

390 M

GEN

Erläuterungen

# Werkstandard

Oktober 1970

VEB  
Projektierung  
Wasserwirtschaft

Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen gegenüber der Einwirkung der Sickerwasserströmung  
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.  
Blatt 3

252

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Begriffsbestimmungen und Erläuterungen	1
2. Kontakterosion Typ 1/1, 1/3 und 3/1	3
2.1. Wirkungen und Einflußfaktoren	3
2.2. Sicherheitskriterium	4
2.3. Kritik an den bisher verwendeten Regeln	5
2.4. Neue Erosionsregeln	9
3. Entwässerungsfunktion der Wasserbaufilter	10
3.1. Forderungen an die Wasserdurchlässigkeit	10
3.2. Kritik an den bisher verwendeten Regeln	11
3.3. Neue Durchlässigkeitsregeln	12
4. Beispiele für die Filterbemessung	14
5. Hinweise für die Konstruktion von Wasserbaufiltern	18
6. Verwendete Bezeichnungen	20
7. Literaturverzeichnis	21
8. Bilderverzeichnis	23

### 1. Begriffsbestimmungen und Erläuterungen

Nach [1] wird die Erosion im Gegensatz zur Suffosion (siehe WAPRO 4.04. Blatt 2) wie folgt definiert:

"Umlagerung und Transport der Teilchen fast aller Fraktionen eines Erdstoffs an der freien Oberfläche oder im Innern desselben, in größeren bereits vorhandenen oder sich im Prozeß der Auswaschung erst bildenden, meist röhrenförmigen Hohlräumen, durch fließendes Wasser. Es kommt dadurch zur fortschreitenden Zerstörung des Erdstoffs."

Hinsichtlich der Lage der Erosion zum Erdkörper unterscheiden wir die

- Hußere Erosion,
- innere Erosion,
- Fugenerosion und
- Kontakterosion.

Dieser Werkstandard beschäftigt sich nur mit der Kontakterosion (Bild 1). Darunter wird die an der Kontaktfläche zweier unterschiedlich zusammengesetzter Erdstoffe stattfindende Erosion verstanden. Dabei finden die Teilchen des feineren Erdstoffs in den Poren des

Fortsetzung Seite 2 bis 30

Bestätigt: 19.10.1970, Direktor, Halle (Saale)

größeren Erdstoffs Platz, und es ergibt sich die Möglichkeit der weiteren inneren Suffosion in diesem "neuen" Erdstoff. Im Gegensatz zur Kontaktsuffosion kommt es aber auch zur Zerstörung des feineren Erdstoffs und damit im allgemeinen auch zur Setzung des Erdkörpers. Das in den größeren Erdstoff eingespülte feine Material kann in Abhängigkeit vom Sickerwassergefälle in diesem "neuen" Erdstoff - Mischboden - aber auch kolmatieren.

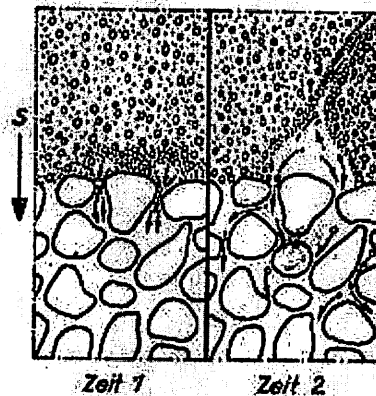


Bild 1

Hinsichtlich der Strömungsrichtung des Sickerwassers zur Erdschwererichtung und der Zuordnung der feineren und der größeren Erdstoffe an einer Kontaktfläche muß man wiederum, wie bei der Kontaktsuffosion, die folgenden Haupttypen unterscheiden (Bild 2):

	fein grob	grob fein	grob grob	grob grob
↓	Typ 1/1		Typ 1/2	
↑		Typ 2/2	Typ 2/3	
→	Typ 3/1	Typ 3/2	Typ 3/3	

Bild 2

Die Kontaktersion ist entscheidend von der Sickerwasserströmungsrichtung abhängig. Während bei der Typenreihe 1/... das Gewicht der Erdstoffteilchen die Kontaktersion fördert, behindert dieses die Kontaktersion bei der Typenreihe 2/... und bei der Typenreihe 3/... befinden sich die Teilchen gewissermaßen im labilen Gleichgewicht und es ist im Mittel nur die Reibungskomponente des Gewichts zu überwinden. Bei nichtbindigen Erdstoffen ist die Kontaktersion nach Typ 2/2, 3/2, 2/3 und 3/3 vom Sickerwassergefälle abhängig, die nach Typ 1/1, 3/1 und 1/3 dagegen unabhängig.

Die Gesetzmäßigkeiten der Kontaktersion der letztgenannten Typen unterscheiden sich nicht wesentlich, so daß sie in diesem Werkstandard gemeinsam behandelt werden können. Die hierfür aufgestellten Beständigkeitsregeln gelten für alle praktisch möglichen Sickerwassergefälle. Daher kann man sie auch für alle anderen Typen verwenden, wenn die Filter unabhängig vom Sickerwassergefälle verformungsbeständig sein sollen. Bei bekannten maximalen Sickerwassergefälle können die Filter, die der Kontaktersion Typ 2/2, 3/2, 2/3 und 3/3 unterliegen, jedoch sparsamer bemessen werden (siehe WAPRO 4.04./4 "Kontaktersion Typ 2/2, 3/2, 2/3 und 3/3 für Filter aus nichtbindigen Erdstoffen").

Im Wasserbau verstehen wir unter Filtern solche Stoffe, die:

- eine ständige ausreichende Entwässerung des zu schützenden Materials ermöglichen,
- je nach den praktischen Erfordernissen die Kontaktsuffosion oder Kontaktersion verhindern und
- selbst praktisch suffosionsicher sind.

Die Filterbemessung erfolgt mit Hilfe von Filterregeln.

Man unterscheidet:

- Filterregeln für ausreichende Wasserdurchlässigkeit - Kurzbezeichnung: Durchlässigkeitsregeln,
- Filterregeln für die Sicherheit gegen Kontaktersion - Kurzbezeichnung: Erosionsregeln und

- Regeln, mit denen die Suffosionsbeständigkeit der Filtermaterialien selbst und die Sicherheit eines Filters gegen Kontaktsuffosion überprüft wird - Kurzbezeichnung: Suffosionsregeln.

Die zur Filterbemessung erforderlichen Suffosionsregeln enthält WAFRO 4.04./2. In diesem Werkstandard werden nur die Erosionsregeln für die Kontakterosion Typ 1/1, 1/3 und 3/1 sowie die Durchlässigkeitsregeln behandelt.

Für die Filterstabilität kann man drei Stufen angeben:

Ein Wasserbaufilter ist stabil, wenn er sowohl gegen Kontakterosion als auch gegen Kontaktsuffosion sicher ist.

Er ist nur bedingt stabil, wenn er zwar die Kontakterosion verhindert, aber eine Kontaktsuffosion noch möglich ist.

Ein Wasserbaufilter ist instabil, wenn er keine Sicherheit gegen Kontakterosion bietet.

In diesem Sinne garantieren die Erosionsregeln diesen Werkstandards stabile Filter, wenn der feinere Erdstoff suffosionsicher ist und bedingt stabile Filter, wenn ein suffosionsgefährdeter feiner Erdstoff vorliegt.

Die erste Aufgabe bei einer Filterbemessung ist daher, die Untersuchung der Suffosionsicherheit des feinen Erdstoffs. Ist sie gegeben, wird nach diesem Werkstandard verfahren. Ist der feine Erdstoff dagegen suffosionsgefährdet, so muß entschieden werden, ob ein stabiler oder bedingt stabiler Filteraufbau notwendig ist. Im ersten Fall ist der grobe Erdstoff nach den Regeln für Kontaktsuffosion zu bemessen (siehe WAFRO 4.04./2). Im zweiten Fall kann wiederum nach den folgenden Regeln gearbeitet werden.

Es ist selbstverständlich, daß für Wasserbaufilter nur suffosionsbeständige Materialien - grobe Erdstoffe - verwendet werden dürfen. Daher ist die zweite Aufgabe bei der Filterbemessung, die Untersuchung der Suffosionsicherheit des groben Erdstoffs. Ist sie nicht gegeben, darf das Material nicht verwendet werden.

## 2. Kontakterosion Typ 1/1, 1/3 und 3/1

### 2.1. Wirkungen und Einflussfaktoren

Die Kontakterosion im definierten Sinne bewirkt die fast völlige Zerstörung des feinen Erdstoffs. Wie auf Bild 1 für die Kontakterosion Typ 1/1 angedeutet ist, erfolgt diese Zerstörung im allgemeinen in Form einer örtlichen rückschreitenden inneren Erosion im feinen Erdstoff, die den Erosionsbruch des Bauwerks verursacht. Dagegen führt eine flächige Kontakterosion zur fortschreitenden Dezimierung des feinen Erdstoffs und damit zur Setzung des Erdkörpers mit allen sich daraus ergebenden Folgen. Während die Kontaktsuffosion unter bestimmten bautechnischen Bedingungen und bis zu einem gewissen Masseprozentsatz der ausspülbaren Teilchen noch als zulässig angesehen werden kann, ist die Kontakterosion unter allen Umständen durch entsprechend projektierte Filter zu verhindern.

Die Kontakterosion Typ 1/1, 3/1 und 1/3 ist von folgenden Parametern der Erdstoffe abhängig:

Basiserdstoff - Korndurchmesser,  
Kornform,  
Kornverteilungslinie,  
Lagerungsdichte,  
Oberflächenrauigkeit der Körner und  
Kohäsion zwischen den Körnern.

Filtererdstoff - Porendurchmesser,  
Porenform,  
Porendurchmesserverteilungslinie,  
Lagerungsdichte,  
Schlupfmaß zwischen Korndurchmesser des Basiserdstoffs und Porendurchmesser des Filtererdstoffs sowie Schichtdicke des Filters.

Durch allgemein bekannte Routineverfahren können Korndurchmesser, Kornverteilungslinie, Lagerungsdichte und die Filterschichtdicke gemessen werden.

Der Einfluß der Kornform und der damit eng zusammenhängenden Porenform wurde nur von [2] näher untersucht. Aus ihren Ergebnissen leitete [4] folgenden Formfaktor ab:

$$\begin{aligned} \text{abgerundete Erdstoffe} & - F_p = 1 \\ \text{scharfkantig-gebrochene Erdstoffe} & - F_p \approx 1,33 \end{aligned} \quad (1)$$

Über den Einfluß der Oberflächenrauigkeit und Kohäsion liegen noch keine gesicherten Ergebnisse vor. Nach empirischen Erkenntnissen kann man jedoch auf die Berücksichtigung dieser Einflußfaktoren bei nichtbindigen Erdstoffen verzichten, da diese Handhabung die Erosionssicherheit im geringen Maße beeinflusst. Trotzdem mußte der Gültigkeitsbereich des Werkstandards auf nichtbindige Erdstoffe beschränkt werden, da seine Anwendung für bindige Erdstoffe zu sehr unökonomischen Lösungen führen würde.

Der Schlupffaktor beträgt nach den Versuchen von [4] für die Kontakterosion natürlicher nichtbindiger Erdstoffe mit abgerundeten Körnern

$$F_s \approx 0,6 \quad (2)$$

Dieses Maß drückt aus, um wieviel kleiner der zu transportierende maßgebende Korndurchmesser  $d^I$  des Basiserdstoffs sein muß als der kleinste maßgebende Porendurchmesser  $d_{p,m}^{II}$  des Filtererdstoffs, damit eine Kontakterosion möglich wird. Er berücksichtigt in gewissem Maße allerdings eine, wenn auch sehr kleine Haftung und Reibung zwischen den Körnern durch Kohäsion und Oberflächenrauigkeit, die etwas von der Kugelform abweichende Kornform natürlicher abgerundeter Flußsedimente und gewisse Haftkräfte aus Oberflächenspannungen des Sickerwassers am Erdstoffkorn - scheinbare Kohäsion -, da diese Einflußfaktoren bei den Versuchen in [4] nicht eliminiert werden konnten.

Nach WAFRO 4.04./2 kann der maßgebende Porendurchmesser  $d_{p,m}^{II}$  des Filtererdstoffs bei stetigen Kornverteilungslinien, die in diesem Werkstandard wegen der geforderten Suffozionsicherheit der Basis- und Filtererdstoffe bei Anwendung der Erosionsregeln vorausgesetzt werden, gleich dem ideellen mittleren Porendurchmesser  $d_p^{II}$  gesetzt werden. Hierfür wird in WAFRO 4.04./2 die Formel von Fawcett empfohlen:

$$d_{p,m}^{II} = d_p^{II} = 0,535 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17} \quad (3)$$

Die Schichtdicke des Filtererdstoffs hat nach [5] insofern einen Einfluß, da die maximale Weglänge eines eingespülten Teilchens des Basiserdstoffs, von der Wahrscheinlichkeit abhängt, mit der dieses Teilchen eine solche Pore antrifft, die sein Weiterwandern verhindert, und diese Wahrscheinlichkeit wird mit wachsender Filterschichtdicke natürlich größer. Die theoretischen Untersuchungen von Silveira sind bisher nicht durch Versuche bestätigt worden, so daß vorläufig mit den empirisch erprobten Schichtdicken gearbeitet werden muß. Entsprechende Forschungen am Institut für Fluß- und Seebau werden voraussichtlich in ein bis zwei Jahren ein praktisch verwertbares Ergebnis erreichen.

## 2.2. Das Sicherheitskriterium

Die Bedingung für die Unmöglichkeit der Kontakterosion nichtbindiger Lockergesteine ist hauptsächlich geometrischer Natur und vom maßgebenden Porendurchmesser des groben Erdstoffs  $d_{p,m}^{II}$ , dem maßgebenden Korndurchmesser des feinen Erdstoffs  $d_m^I$ , dem Schlupfmaß zwischen maßgebendem Korn und maßgebender Pore  $F_s$  und dem Faktor für Korn- und Porenform  $F_p$  abhängig. Faßt man den Schlupf- und Formfaktor zusammen zu

$$F = F_s \cdot F_p \quad (4)$$

so lautet die geometrische Sicherheit gegen Kontakterosion

$$\frac{d_m^I}{F \cdot d_{p,m}^{II}} \geq \eta \quad \left\{ K, G, \text{zul} \right. \quad (5)$$

Mit Bild 5 in [2] wurde nachgewiesen, daß

$$\frac{d_p^{II}}{d_{50}^{II}} = r^{II} (U^{II}, D_e^{II}) \quad (6)$$

Ist. Von [4] und [6] wurde durch Versuche bestätigt, daß auch  $d_m^I$  eine Funktion von  $U^I$  und  $D_e^I$  ist:

$$d_m^I/d_{50}^I = r^I(U^I, D_e^I) \quad (7)$$

Durch Einsetzen von Gl. (6) und (7) in Gl. (5) ergibt sich:

$$\frac{(d_m^I/d_{50}^I) \cdot d_{50}^I}{F \cdot (d_p^{II}/d_{50}^{II}) \cdot d_{50}^{II}} = \frac{r^I(U^I, D_e^I) \cdot d_{50}^I}{F \cdot r^{II}(U^{II}, D_e^{II}) \cdot d_{50}^{II}} = \eta_{K,G,zul} \quad (8)$$

Durch Umformung ergibt sich die heute überwiegend verwendete Form der Erosionsregel:

$$\frac{d_{50}^{II}}{d_{50}^I} \leq \frac{r^I(U^I, D_e^I)}{F \cdot r^{II}(U^{II}, D_e^{II}) \cdot \eta_{K,G,zul}} \quad (9)$$

Wegen der fast unendlichen Vielfalt, der sich gegenseitig teilweise aufhebenden Einflußfaktoren

$$r^I(U^I, D_e^I), \quad r^{II}(U^{II}, D_e^{II}), \quad \text{und} \quad F = F_S \cdot F_P$$

beruhen fast alle Erosionsregeln auf den Ergebnissen von systematischen Laborversuchen, in denen die Hauptparameter  $d_{50}^I$ ,  $d_{50}^{II}$ ,  $U^I$  und  $U^{II}$  variiert wurden. Gelegentlich wurde auch die Lagerungsdichte  $D_e^I$  und  $D_e^{II}$  verändert, im allgemeinen jedoch für Basis- und Filtererdstoff konstant mitteldichte Lagerung

$$D_e^I = D_e^{II} = D_e = \frac{e_0 - e}{e_0 - e_D} = 0,3 \text{ bis } 0,6 \quad (10)$$

vorausgesetzt.

Unter dieser Annahme -  $D_e = 0,3$  bis  $0,6$  - und ferner, daß Erdstoffe mit abgerundeten Körnern vorliegen, was in der Natur und meistens auch in der Baupraxis des Erdbaues überwiegend der Fall ist, vereinfacht sich Gl. (9) mit

$$F = F_S \cdot F_P = 0,6 \cdot 1 = 0,6 \quad (11)$$

nach Gl. (1) und (2) sowie mit

$$\eta_{K,G,zul} = 1,5 \quad (12)$$

was gemeinhin zu fordern ist, zu:

$$\frac{d_{50}^{II}}{d_{50}^I} \leq \frac{r^I(U^I)}{0,6 \cdot r^{II}(U^{II}) \cdot 1,5} \quad (13)$$

Da  $r^{II}(U^{II})$  nach WAPRO 4.04./2 als bekannt vorausgesetzt werden kann, reduziert sich die Forschung für die Sicherheit gegen Kontakterosion nach unserem heutigen Erkenntnisstand im allgemeinen auf die Bestimmung der Funktion  $r^I(U^I)$ .

Da die einzelnen Autoren immer nur den Einfluß einiger Hauptparameter oder gar nur bestimmte typische Erdstoffe untersuchten, unterscheiden sich die Erosionsregeln teilweise beträchtlich und ihr Anwendungsbereich ist begrenzt. Ziel des Werkstandards ist es, aus der großen Zahl der Erosionsregeln, die am besten begründete, am universellsten verwendbare und dennoch leicht handhabbare auszuwählen.

### 2.3. Kritik an den bisher verwendeten Regeln

Theoretisch einwandfrei begründbar ist die Erosionsregel für Schichten aus homodispersen Kugelschüttungen. Hierfür gilt nach [2,7]:

$$d_m^I = d^I$$

$$d_{p,0}^{II} = 0,414 \cdot d^{II}; \quad d_{p,D}^{II} = 0,155 \cdot d^{II} \quad (14)$$

$$F_S = 0,6 \quad F_P = 1 \quad F = 0,6$$

Für mitteldichte Lagerung wird  $d_{p,m}^{II} = 0,284 \cdot d^{II} \quad (15).$

Fordert man einen Sicherheitsgrad  $K_{G,zul} = 1,5$  und setzt Gl. (14) und (15) in Gl. (5) ein, so ergibt sich:

$$d^I = 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,284 \cdot d^{II} \approx 0,25 \cdot d^{II}$$

und man erhält die entsprechende Erosionsregel:

$$\frac{d^{II}}{d^I} \approx 4 \quad (16)$$

Diese wurde bereits von [7] angegeben. Allerdings verwendete er sie auch für ungleichförmige natürliche Erdstoffe, wofür sie viel zu unökonomisch ist.

Am bekanntesten ist die, in der gegenwärtigen Entwurfspraxis der DDR am häufigsten verwendete, Filterregel für Kontaktrosion nach [8,7]

$$\frac{d_{15}^{II}}{d_{55}^I} \leq 4 \text{ (bis 5)}. \quad (17)$$

Für  $U = 1$  entspricht Gl. (17) Gl. (16). Diese Regel wurde bisher als allgemeingültig angesehen. Die Empfehlung Terzaghis, sie nur für den Ungleichförmigkeitsgrad  $U^I = U^{II} \leq 2$  (bis 3) und  $U^I \approx U^{II}$  zu verwenden, wurde dabei übersehen.

Die folgende Tabelle enthält oben die unter Außerachtlassung der letztgenannten Empfehlungen Terzaghis zulässigen Abstandsverhältnisse und unten die nach den neuesten Forschungen von [6,7] und [4,7] zulässigen Abstandsverhältnisse

$$A_{50} = \frac{d_{50}^{II}}{d_{50}^I}$$

Tabelle 1

$U^{II} \backslash U^I$	1	2	3	6	10
1	4 4	6,4 6,7	8,5 7,5	13,5 6,6	19,0 4,6
2	6,4 6,6	10,5 10,1	13,5 12,0	22,0 12,3	31,0 10,8
3	8,5 8,6	13,5 12,0	18,0 14,0	29,0 15,0	41,0 14,2
6	13,5 14,3	22,0 18,1	29,0 20,6	46,0 23,2	65,0 23,2
10	19,0 20,0	31,0 23,4	41,0 25,5	65,0 28,2	92,0 28,6

Danach ist die Terzaghi-Regel tatsächlich nur in einem unbegrenzten Bereich gültig, und zwar:

$$\begin{aligned} &\text{für } U^I = 1 \quad \text{und } U^{II} \geq 1 \\ &\text{für } U^I \leq 2,5 \quad \text{und } U^{II} \leq 2,5 \end{aligned}$$

Dies bestätigt die Empfehlungen von Terzaghi und bringt sogar eine, aber nur theoretische Erweiterung für  $U^I = 1$ .

Neben diesen beiden in der deutschsprachigen Literatur am häufigsten zitierten Regeln, existieren nach [4,7] noch mindestens 24 weitere, wovon die wichtigsten hier nur kurz angeführt werden.

Ursin [9,7]

$$\frac{d^{II}}{d^I} \leq 7 \text{ bis } 20 \quad (18)$$

Sie gilt nur für gleichkörnige Erdstoffe.

Aristowaki - Beger [107]

$$\frac{d_{60}^{II}}{d_{60}^I} \leq 8 \text{ bis } 10 \quad \text{bei } U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \leq 5 \text{ bis } 10 \quad (19)$$

Diese Regel ist unwirtschaftlich.

Moskva - Kanal-Regel (zitiert in [37])

$$\frac{d_{10}^{II}}{d_{60}^I} < 5 \quad \text{bei } U^I < 5 \quad \text{und } U^{II} < 5 \quad (20)$$

Sie liefert für  $U^I \leq 2$  und  $U^{II} = 2$  bis 5 etwas unökonomische und für die anderen U-Bereiche bis  $U = 5$  geringfügige zu unsichere Ergebnisse. In der Form

$$\frac{d_{50}^{II}}{d_{50}^I} \leq 5 \cdot U \quad \text{für } U^I = U^{II} \leq 5 \quad (20')$$

Ist sie nach [47] für Vorentwürfe durchaus verwendbar.

Technische Bedingungen und Projektierungsnormen für Wasserbauten (zitiert in [67])

$$\frac{d_1^{II}}{d_1^I} \leq 7 \text{ bis } 8 \quad (21)$$

mit:  $d_1 = d_{40}$  für Feinsand  
 $d_1 = d_{30}$  für Mittelsand bis Grobsand  
 $d_1 = d_{20}$  für Grobsand  
 $d_1 = d_{15}$  bis  $d_{10}$  für Kies

als Basismaterial. Ihre Berechtigung konnte noch nicht überprüft werden.

Regel des Moskauer Hydroprojekt (zitiert in [117])

$$\frac{d_{50}^{II}}{d_{50}^I} \leq 9 + 0,9 (U^I - 1) \quad \text{mit } U^I \leq 10 \quad (22)$$

Sie bringt gegenüber den Forschungsergebnissen von Gistin/Ziema keine neuen Erkenntnisse.

Regel des Leningrader Forschungsinstituts VNIIG (zitiert in [117])

$$\xi \leq \frac{d_{x,8}^I}{d_{x,8}^I} = f(U; d_{x,8}^2) \quad (23)$$

nach Bild 3. Diese Regel ist theoretisch sehr interessant, weist aber einen für die Praxis viel zu großen zulässigen Schwankungsbereich auf, so daß entweder Fehler möglich sind oder doch Laborversuche zur Stützung der Ergebnisse nötig werden, um diese zu vermeiden.

Pravednyj [127]

$$\frac{d_P^{II}}{d_1^I} \leq 1,8 \quad \text{mit } d_3 \leq d_1 \leq d_{10} \quad (24)$$

Der Faktor 1,8 stellt den reziproken Schlupffaktor  $F_S$  dar, der von [47] zu 1,65 ermittelt wurde. Diese Gleichung ist theoretisch durchaus richtig, allerdings nur für suffosionsgefährdete feine Erdstoffe, da sonst  $d_1 > d_3$  bis  $d_{10}$  sein kann (siehe WAPRO 4.04./2)

Auch die Gleichungen von Patrasov [127]

$$\frac{d_{17}^{II}}{d_{20}^I} \leq \frac{1 - n^{II}}{n^{II}} \cdot \frac{8,96}{1 + 0,008 \cdot U^{II}} \quad \text{mit } U^{II} \leq 10 \text{ bis } 12 \quad (25)$$

und Pavlov (zitiert in [67])

$$\frac{d_{17}^{II}}{d_{10}^I} \leq 3 \cdot \frac{1 - n^{II}}{n^{II}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U^{II}}} \quad (26)$$

gelten nur für suffosionsgefährdete feine Erdstoffe (siehe WAPRO 4.04./2).



Bertram [147]

$$\frac{d_{15}^{II}}{d_{15}^I} \leq 6 \quad \text{Für die Kontaktfläche der 1. Filterschicht mit dem Basismaterial} \quad (27')$$

$$\frac{d_{15}^{II}}{d_{15}^I} \leq 9 \quad \text{für die Kontaktfläche zweier Filterschichten.} \quad (27'')$$

Diese Regel gilt nur für gleichförmige Feinsande bei mitteldichter Lagerung.

United States Bureau of Reclamation (USBR) [157]

$$\frac{d_{50}^{II}}{d_{50}^I} = 5 \text{ bis } 10 \text{ für gleichförmige Erdstoffe} \quad (28)$$

$$\frac{d_{50}^{II}}{d_{50}^I} = 12 \text{ bis } 58 \text{ mit } \frac{d_{15}^{II}}{d_{15}^I} = 12 \text{ bis } 40 \quad (29)$$

für ungleichförmige Erdstoffe. Der Geltungsbereich der Gl. (28) ist stark begrenzt und der zulässige Schwankungsbereich für Gl. (29) viel zu groß für die Anwendung in der Praxis.

United States Corps of Engineers (zitiert in [147])

$$\frac{d_{15}^{II}}{d_{85}^I} < 5 ; \quad \frac{d_{15}^{II}}{d_{15}^I} < 20 ; \quad \frac{d_{50}^{II}}{d_{50}^I} < 25 \quad (30)$$

Diese Regeln bestätigen durchaus die Forschungsergebnisse von Cletin/Ziema, letztere sind aber wesentlich handlicher.

Eigentlich neue Erkenntnisse bringen die Regeln von Istomina und Zweck-Davidenkoff.

Istomina [37]

$$\frac{d_{50}^{II}}{d_{50}^I} = f(U^{II}; \text{Kornform}) \text{ mit } U^{II} < 10 \quad (31)$$

nach Bild 4. Als einziger hat er auch scharfkantige Materialien untersucht. Aus seinen Forschungsergebnissen für scharfkantige gebrochene und für abgerundete natürliche Erdstoffe ergibt sich nach [47] ein Formfaktor

$$F_p \approx 1,25 \text{ bis } 1,43; \text{ im Mittel } 1,33 \quad (32)$$

Damit wird  $F = F_S \cdot F_p = 0,6 \cdot 1,33 = 0,8$

und es ergibt sich für gleichförmige gebrochene Erdstoffe mit  $U = 1$  die Gl. (16), für gleichförmige abgerundete Erdstoffe mit  $U = 1$  analoge Gleichung

$$d^I \geq 1,5 \cdot 0,8 \cdot 0,284 \cdot d^{II} \approx 0,34 \cdot d^{II}$$

und schließlich  $\frac{d_{15}^{II}}{d_{15}^I} \leq 3. \quad (16')$

Sowohl Gl. (16) und (16') stimmen nicht mit dem Diagramm auf Bild 4 überein, so daß seine Anwendbarkeit für gleichkörnige Erdstoffe mit  $U = 1$  angezweifelt werden muß. Für  $U = 6$  stimmt Kurve a jedoch wieder mit der Terzaghiregel überein. Daher bringt die Regel von Istomina außer dem Formfaktor  $F_p$  (siehe Gl. (32)) keine neuen Erkenntnisse.

Zweck-Davidenkoff [117]

Sie haben als erste auf den Einfluß der absoluten Größe des Korns des feinen Erdstoffe hingewiesen. Für gleichförmige Erdstoffe mit  $U \approx 2$  erhielten sie die im Bild 5 gezeigten Ergebnisse. Sie stimmen mit den Versuchsergebnissen von [47] für  $d_{50}^I > 1,0$  mm und  $U^I = U^{II} = 2$  überein. Die zunehmende Tendenz für  $A_{50}$  bei  $d_{50}^I < 1,0$  mm wurde dort ebenfalls festgestellt, allerdings nur für absolut schwingungsfreie Belastung. Sofern diese nicht garantiert werden kann, z.B. Wasserbaufilter in der Nähe von Entlastungsbauwerken



und Verkehrswegen, kann diese Regel jedoch nicht angewendet werden. Ferner fehlen noch Versuche, die die Abhängigkeit des zulässigen Abstandsverhältnisses  $A_{50}$  von  $d_{50}^I$  und  $U^I$  belogen, so daß vorläufig von der praktischen Anwendung abzuraten ist.

Zusammenfassend stellt Ziems in [4] fest, daß keine bekannte Filterregel für Kontakterosion so universell anwendbar ist, wie die im Abschnitt 2.4. dargelegte neue Erosionsregel. Entweder ist die betreffende Regel nur in einem eng begrenzten Ungleichförmigkeitsbereich anwendbar, unwirtschaftlich, in ihrer praktischen Nutzung kompliziert oder mit zu großen Freiheitsgraden in der Wahl des zulässigen Abstandsverhältnisses behaftet. Einige Regeln beziehen sich nur auf suffosionsgefährdete feine Erdstoffe, wofür in WAPRO 4.04./2 bereits universellere Regeln angegeben werden.

Aus der beim Bau des Moskau-Kanals verwendeten Filterregel ergibt sich für  $U^I = U^{II} \leq 5$  die sehr handliche Überschlagsgleichung (20'), die für Vorwürfe und Schnellkontrolle, z.B. für Materialdisponenten, anwendbar ist. Die im Leningrader Institut VNIIG entwickelte Erosionsregel gibt Hinweise für weitere Forschungsarbeiten, diese müssen sich insbesondere mit dem Einfluß der Kornform, der absoluten Korngröße des feinen Erdstoffs bei ungleichförmigen Erdstoffen und der Lagerungsdichte befassen.

Keine bekannte Filterregel steht im Widerspruch zu der in Abschnitt 2.4. wiedergegebenen Regel von Cistin/Ziems, wenn man die Randbedingungen dieser Regel beachtet. Somit kann festgestellt werden, daß die vorgeschlagene neue Regel den international höchsten Erkenntnisstand darstellt. Die leichte Handhabbarkeit empfiehlt sie nachdrücklich für die Anwendung in der Praxis.

#### 2.4. Neue Erosionsregeln

Theoretische Ableitungen für Erosionsregeln bei  $U^I \geq 1$  und  $U^{II} \geq 1$  sind sehr problematisch und bisher nicht gelungen. Vorläufig helfen in diesem Falle nur systematische Versuche, die die Aufstellung empirischer Diagramme ermöglichen.

Dieses hat erstmals [6] unternommen. Die Ergebnisse seiner Versuche zeigt Bild 6. Sie gelten für folgende Randbedingungen:

- Strömung von oben nach unten (Kontakterosion Typ 1/1)

-  $J_{\text{vorh}} \leq 9$

-  $U^I \leq 20$  und  $U^{II} \leq 20$

-  $0,1 \text{ mm} \leq d_1^I \leq 30 \text{ mm}$

-  $4 \text{ mm} \leq d_1^{II} \leq 100 \text{ mm}$

- Bild 6 enthält einen Sicherheitsfaktor  $\eta_{K,G} = 1,5$ , d.h.  $A_{50, \text{zul}} = \frac{A_{50, \text{krit}}}{1,5}$

- Die Erdstoffe müssen suffosionsicher sein.

Die Versuche von [4] zeigten im allgemeinen recht gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Versuche von Cistin, bis auf den Bereich  $U^I = U^{II} \leq 4$ . Ziems konnte seine abweichenden Versuchsergebnisse für diesen Bereich theoretisch beweisen, so daß er eine Korrektur des Bildes 6 vorgenommen hat, die durchaus berechtigt ist.

Das verbesserte Entwurfsdiagramm zeigt Bild 7. Es kann für die Kontakterosion Typ 1/1, 1/3 und 3/1 angewendet werden, da die von [6] geforderte 1. Randbedingung die überhaupt ungünstigste ist. Die 2. Randbedingung muß bestehen bleiben. Das Gefälle  $J = 9$  wird aber nach Forschungen von [6] bei Wasserbaufiltern zwar theoretisch, jedoch nicht in der Praxis überschritten, so daß diese Randbedingung keine praktische Bedeutung hat. Für  $U^I = 20$  sind Laborversuche nötig, da dann die zulässigen Werte für  $A_{50, \text{zul}}$  sehr stark von der Homogenität des Materials abhängig sind.

Nach Möglichkeit sind Filter mit  $U^{II} > 20$  zu vermeiden, da die Homogenitätsforderung zu große technologische Schwierigkeiten bereitet. Die 4. Randbedingung hat nach den Forschungen von Zweck-Davidenkoff [11] nur ökonomische Bedeutung, da bei kleineren  $d_1^I$  größere  $A_{50}$ -Werte erhalten werden. Daher kann unter Außerachtlassung dieser Gesichtspunkte die 4. Randbedingung für nichtbindige Erdstoffe aufgehoben werden. Bei der 5. Randbedingung kann die untere Grenze ebenfalls aufgehoben werden. Die obere Grenze  $d_1^{II} = 100 \text{ mm}$  ist nur durch die

Versuchsbedingungen - kleine Durchlässigkeitsgeräte - begründet. Eine praktische Anwendungsgrenze für das Diagramm auf Bild 7 stellt sie nicht dar, außer, bei Filtern unter der wasserseitigen Schutzschicht von Staudämmen aus Steinschüttungen, die durch Wellenkräfte beansprucht werden. Hierfür gelten andere Gesetzmäßigkeiten [4.7]. Die 6. Randbedingung ermöglicht in Grenzfällen eine großzügigere Handhabung, die jedoch von der Staatlichen Bauaufsicht zu genehmigen ist. Neben der 7. Randbedingung formulierte [4.7] noch die weiteren:

die Erdstoffe müssen mindestens mitteldicht gelagert sein:  $D_0 = 0,3$  bis  $0,6$   
 die Erdstoffe müssen abgerundete Körner haben. Daraus ergibt sich nach Gl. (32):  
 bei scharfkantigen Erdstoffen ist ein weiterer Sicherheitsfaktor für die Kornform von  $\eta_{FP} = 1,33$   
 einzuführen.

Somit ergeben sich folgende neue Erosionsregeln:

Regel 1: Bei nichtbindigen Erdstoffen mit abgerundeten Körnern erfolgt der Nachweis für die Sicherheit gegen Kontakterosion bei den Typen 1/1, 1/3 und 3/1 mit der Gleichung:

$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{d_{50, \text{vorh}}^{\text{II}}}{d_{50, \text{vorh}}^{\text{I}}} \leq A_{50, \text{zul}} = f(U^{\text{I}}, U^{\text{II}})$$

nach Bild 7 unter Einhaltung von Regel 3.

Regel 2: Bei nichtbindigen Erdstoffen mit scharfkantigen Körnern erfolgt der Nachweis für die Sicherheit gegen Kontakterosion bei den Typen 1/1, 1/3 und 3/1 mit der Gleichung:

$$\eta_{FP} \cdot A_{50, \text{vorh}} = 1,33 \cdot \frac{d_{50, \text{vorh}}^{\text{II}}}{d_{50, \text{vorh}}^{\text{I}}} \leq A_{50, \text{zul}} = f(U^{\text{I}}, U^{\text{II}})$$

nach Bild 7 unter Einhaltung von Regel 3.

Regel 3: Die Anwendung der Regeln 1 und 2 erfordert die Einhaltung folgender Randbedingungen:

-  $\frac{d_{50, \text{vorh}}^{\text{II}}}{d_{50, \text{vorh}}^{\text{I}}} \leq 9$

-  $U^{\text{I}} \leq 20$  und  $U^{\text{II}} \leq 20$ .

Bei Basiserdstoffen mit  $U^{\text{I}} > 20$  sind Laborversuche durchzuführen. Filtererdstoffe mit  $U^{\text{II}} > 20$  sind nicht gestattet.

-  $d_{50, \text{vorh}}^{\text{II}} \leq 100$  mm.

Filtererdstoffe mit  $d_{50, \text{vorh}}^{\text{II}} > 100$  mm kommen nur als wasserseitige Schutzschichten von Staudämmen bei Wellenbeanspruchungen vor. Dafür gelten andere Gesetzmäßigkeiten.

- Die Erdstoffe müssen suffosionssicher sein, sonst gilt WAFRO 4.04./2.

- Die Erdstoffe müssen mitteldicht gelagert sein,

$$D_0 = \frac{s_0 - s}{s_0 - s_D} = 0,3 \text{ bis } 0,6$$

- In Sonderfällen kann die Staatliche Bauaufsicht die  $A_{50, \text{zul}}$ -Werte des Bildes 7 bis zu  $1,5 \cdot A_{50, \text{zul}}$  erhöhen. Laborversuche sind dann zu empfehlen.

Regel 4: Bei der Kontakterosion der Typen 2/2, 2/3, 3/2 und 3/3, d.h. bei allen anderen möglichen Typen, kann der Sicherheitsnachweis ebenfalls nach der Gleichung:

$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{d_{50, \text{vorh}}^{\text{II}}}{d_{50, \text{vorh}}^{\text{I}}} \leq A_{50, \text{zul}} = f(U^{\text{I}}, U^{\text{II}}) \text{ bei abgerundeten Körnern oder}$$

$$\text{nach } \eta_{FP} \cdot A_{50, \text{vorh}} = 1,33 \cdot \frac{d_{50, \text{vorh}}^{\text{II}}}{d_{50, \text{vorh}}^{\text{I}}} \leq A_{50, \text{zul}} = f(U^{\text{I}}, U^{\text{II}})$$

bei scharfkantigen Körnern mit  $A_{50, \text{zul}}$  nach Bild 7 und unter Einhaltung von Regel 3 erfolgen, wenn die Filter bei allen praktisch möglichen Sickerwassergefällen erosions sicher sein sollen. Ist das maximale auftretende Sickerwassergefälle bekannt, so erfolgt die Filterbemessung jedoch ökonomischer nach WAFRO 4.04./4.

### 3. Entwässerungsfunktion der Wasserbaufilter

#### 3.1. Forderungen an die Wasserdurchlässigkeit

Damit Entwässerungsanlagen ihre eigentliche Aufgabe erfüllen können, muß der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k$  von der feineren Schicht - Basiserdstoff - zur gröberen Schicht - Filtererdstoff - größer werden:

$$k^{II} > k^I \quad (33)$$

Dies ist bei Filtern nicht selbstverständlich, da der  $k$ -Wert nicht nur vom mittleren Korndurchmesser  $d_m \approx d_{10}$ , sondern sehr wesentlich auch vom Ungleichförmigkeitsgrad  $U$  abhängt. Zunächst muß die Frage beantwortet werden, um wieviel durchlässiger das Entwässerungssystem oder die Filterschicht sein muß als das allgemeine Sickerwasserfeld. In der Analogiepraxis der Sickerwasserströmungsuntersuchungen gilt die Erfahrungsregel, daß ein Entwässerungssystem dann als Nullpotential anzusehen ist, wenn das Verhältnis  $\mathcal{K}$  der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte der gröberen ( $k^{II}$ ) zur feineren ( $k^I$ ) Schicht:

$$\mathcal{K} = \frac{k^{II}}{k^I} \geq 100 \quad (34)$$

ist. Unter diesen Bedingungen wird eine fast vollkommene Entwässerung des Sickerfeldes gewährleistet. Ist das Verhältnis  $\mathcal{K} = k^{II}/k^I < 100$ , muß bei der Ermittlung des Sickerwasserströmungsnetzes der hydraulische Widerstand des Entwässerungssystems berücksichtigt werden.

Die gleichzeitige Erfüllung von Gl. (34) und der Erosionsregeln ist jedoch nach [4.7] bei nichtbindigen Basiserdstoffen nicht möglich. Damit wird klar, daß ein Entwässerungssystem im allgemeinen durch einen mehrschichtigen Filter gebildet werden muß. Nur bei bindigen Basiserdstoffen und bei der Kontakterosion Typ 2/2 könnte unter entsprechenden Randbedingungen ein einschichtiger Filter verwendet werden.

Welcher  $\mathcal{K}$ -Wert bei Filterbemessungen tatsächlich zu fordern ist, wird nachfolgend behandelt.

#### 3.2. Kritik an den bisher verwendeten Regeln

Nach Schweizer Normen [18] wird ein Verhältnis von

$$\mathcal{K} = \frac{k^{II}}{k^I} = 15 \quad (35)$$

verlangt. Bei einem zweisechichtigen Filter ergibt sich dann insgesamt mit:

$$\mathcal{K}_2 = \frac{k^{III}}{k^{II}} = 15 \quad \text{und} \quad \mathcal{K}_1 = \frac{k^{II}}{k^I} = 15,$$

$$\mathcal{K}_{\text{ges}} = \frac{k^{III}}{k^I} = \mathcal{K}_2 \cdot \mathcal{K}_1 = 225.$$

Man erkennt daraus, daß Gl. (34) dann erfüllt werden kann, wenn bei einem zweisechichtigen Filter

$$\mathcal{K}_m = \frac{k^{III}}{k^{II}} = \frac{k^{II}}{k^I} = 10 \quad (36)$$

ist.

Terzaghis [8.7] Durchlässigkeitsregel lautet:

$$\frac{d_{15}^{II}}{d_{15}^I} \geq 4 \quad (37)$$

Setzt man die Gültigkeit der Hazenschen Formel

$$k \sqrt{cm/2} = d_{10}^2 \sqrt{mm} \quad (38)$$

für kleine Ungleichförmigkeitsgrade, für die die Terzaghi-Regel gilt, voraus und ersetzt näherungsweise  $d_{15}$  durch  $d_{10}$ , so ergibt sich

$$\mathcal{K} = \frac{k^{II}}{k^I} \geq 16 \quad (37')$$

wie man sieht, sind Gl. (35) und (37') annähernd äquivalent, wenn  $U^I = U^{II} < 2,5$  ist.

Patrasov [13] verlangt, daß der Filter, der einen suffosionsgefährdeten Erdstoff schützt, nicht kolmatiert und fordert daher:

$$\frac{d_{17}^{II}}{d_{10}^I} \geq \frac{3}{s^{II} \cdot 6 \sqrt{U^{II}}} \quad (39)$$

Diese Gleichung kann daher allenfalls nur für die gleichzeitige Anwendung mit den Regeln für Kontaktsuffosion empfohlen werden.

Bertram [14] fordert:

$$\frac{d_{13}^{II}}{d_{15}^I} \geq 5 \quad (40)$$

Sie entspricht annähernd der Terzaghi-Regel.

Cistin [6] empfiehlt die Terzaghi-Regel, die auch den Entwurfsgrundsätzen des VNIIO entspricht. Alle vorgenannten Regeln können nicht voll befriedigen, da sie entweder die experimentelle Bestimmung der  $k$ -Werte erfordern, oder nur für kleine Ungleichförmigkeitsgrade gelten. Sie berücksichtigen ferner nicht die Anzahl der Schichten eines Entwässerungsfilters, so daß oft unwirtschaftliche Forderungen erfüllt werden müßten. Alle diese Mängel werden von den im Abschnitt 3.3. behandelten Durchlässigkeitsregeln von [4] vermieden, so daß sich diese für die Anwendung in der Praxis empfehlen.

### 3.3. Neue Durchlässigkeitsregeln

Nach einem Vorschlag von [4] sollen grundsätzlich folgende Bedingungen eingehalten werden:

a) bei suffosions sicheren Basisstoffen

$$\mathcal{X}_m = \frac{k_m + 1}{k_m} \geq 1 \quad (41)$$

b) bei suffosionsgefährdeten Basisstoffen

$$\mathcal{X}_m = \frac{k_m + 1}{k_m} \geq 5 \quad (42)$$

c) bei mehrteiligen Filtern, zur Gewährleistung ausreichender Entwässerung

$$\mathcal{X}_{ges} = \mathcal{X}_m \cdot \mathcal{X}_{m-1} \dots \mathcal{X}_1 \geq 100 \quad (43)$$

d) nur bei besonderem Nachweis des Sickerwasserströmungsnetzes kann  $\mathcal{X}_{ges}$  auf

$$\mathcal{X}_{ges} \geq 15 \quad (44)$$

ermäßigt werden.

Zur Erleichterung der Entwurfspraxis hat Ziems in [4] Hilfsmittel angegeben, mit denen der  $\mathcal{X}$ -Wert aus den Kornverteilungslinien der Filtererdstoffe oder die erforderlichen Erdstoffkennwerte bei geforderten  $\mathcal{X}$ -Wert schnell bestimmt werden können. Hierzu boten sich die Forachungsergebnisse von [12] an.

Bild 8 zeigt die Funktionen

$$A_{10} = \frac{d_{10}^{II}}{d_{10}^I} = f(U^I; U^{II}) \quad (45)$$

mit den Randbedingungen:

1.  $\mathcal{X} = k^{II}/k^I = 15$
2.  $d_{10} = 0,06$  bis  $0,6$  mm
3.  $U = 1,0$  bis  $20$

Damit kann das erforderliche Abstandsverhältnis  $A_{10,erf}$  aus den gegebenen Werten für  $U^I$  und  $U^{II}$  bei  $\mathcal{X} = 15$  sofort bestimmt werden. [4] enthält auch entsprechende Diagramme für  $\mathcal{X} = 5, 10, 20, 25, 50$  und  $100$ .

Universeller anwendbar ist jedoch Bild 9. Es enthält die Funktionen

$$\omega = \frac{A_{10}}{1/\mathcal{X}} = f(U^I; U^{II}) \quad (46)$$

Damit kann für gegebene Kornverteilungslinien der Filtererdstoffe der Wert  $\alpha$  abgelesen und aus

$$\alpha = \left( \frac{A_{10}}{25} \right)^2 \quad (47)$$

der vorhandene Wert für  $\alpha$  errechnet werden.

Für Vorentwürfe empfiehlt sich die Auswahl von min  $A_{10}$  nach

$$A_{10, \min} = \frac{d_{10}^{II}}{d_{10}^I} = f(\alpha) \quad (48)$$

mit den Werten der folgenden Tabelle:

$\alpha$	5	10	15	20	25	50	100
$A_{10, \min}$	3	4	5	6	6,5	9	13

Somit ergeben sich folgende neue Durchlässigkeitsregeln:

**Regel 5:** Wasserbaufilter von Entwässerungseinrichtungen für nichtbindige Basiserdstoffe bestehen im Regelfall aus 2 oder mehr Filterschichten. Einschließlich des Basiserdstoffes besteht das System dann aus  $m$  Erdstoffen mit den Durchlässigkeitsbeiwerten  $k_m, k_{m-1}, \dots, k_1, m \geq 3$ .

**Regel 6:** Zur Gewährleistung einer ausreichenden Entwässerungswirkung muß das Verhältnis der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte von gröbster Filterschicht und Basiserdstoff

$$\alpha_{\text{ges}} = \alpha_m \cdot \alpha_{m-1} \dots \alpha_1 = \frac{k_m}{k_1} \geq 100$$

sein. Bei besonderem Nachweis des Sickerwasserströmungsnetzes kann dieses Verhältnis bis auf

$$\alpha_{\text{ges}} = \alpha_m \cdot \alpha_{m-1} \dots \alpha_1 = \frac{k_m}{k_1} \geq 15$$

ermäßigt werden.

**Regel 7:** Als Verhältnis der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte zweier Filterschichten mit  $k^{II}$  - grober Erdstoff - und  $k^I$  - feiner Erdstoff - soll nach Möglichkeit

$$\alpha = \frac{k^{II}}{k^I} = 15$$

angestrebt werden. Dieses Verhältnis wird bei nichtbindigen Erdstoffen erreicht, wenn man das Abstandsverhältnis

$$A_{10} = \frac{d_{10}^{II}}{d_{10}^I} = f(U^I; U^{II})$$

nach Bild 8 wählt. Bei zwei Filterschichten ergibt sich dann

$$\alpha_{\text{ges}} = \alpha_2 \cdot \alpha_1 = 15 \cdot 15 = 225.$$

**Regel 8:** Das Verhältnis der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte zwischen Basiserdstoff und erster Filterschicht muß jedoch mindestens folgende Größe haben:

a) bei suffosionssicheren Basiserdstoffen  $\alpha_m = \frac{k_m + 1}{k_m} \geq 1$

b) bei suffosionsgefährdeten Basiserdstoffen  $\alpha_m = \frac{k_m + 1}{k_m} \geq 5$

Regel 9: Für Vorentwürfe kann das erforderliche minimale Abstandsverhältnis  $A_{10, \min}$  bei nichtbindigen Erdstoffen in Abhängigkeit vom gewünschten  $\mathcal{K}$ -Wert nach folgender Tabelle gewählt werden:

$\mathcal{K}$	5	10	15	20	25	50	100
$A_{10, \min}$	3	4	5	6	6,5	9	13

Regel 10: Die Berechnung des vorhandenen  $\mathcal{K}$ -Wertes bei nichtbindigen Erdstoffen kann nach Bild 9 erfolgen. Mit Hilfe des Rechenwertes

$$\omega = \frac{A_{10}}{1/\mathcal{K}} = f(U^I; U^{II})$$

ergibt sich das Durchlässigkeitsverhältnis zu  $\mathcal{K} = \left(\frac{A_{10}}{\omega}\right)^2$

#### 4. Beispiel für die Filterbemessung

Die Filterbemessung erfolgt in folgenden Schritten:

- 4.1. Auftragung des Schwankungsbereichs der Kornverteilungslinien des Basiserdstoffes.
- 4.2. Überprüfung der Suffosionssicherheit des Basiserdstoffes nach WAFRO 4.04./2.
- 4.3. Entsprechend dem Ergebnis der Suffosionsuntersuchung für den Basiserdstoff erfolgt jetzt gegebenenfalls der Nachweis der Sicherheit gegen Kontaktsuffosion ebenfalls nach WAFRO 4.04./2.  
Andernfalls, d.h. bei suffosionssicheren Basiserdstoffen, erfolgt
- 4.4. Auftragung des Schwankungsbereichs der Kornverteilungslinien des angebotenen oder vorhandenen Filtererdstoffes.
- 4.5. Überprüfung der Suffosionssicherheit des Filtererdstoffes.
- 4.6. Nachweis der Sicherheit gegen Kontaktrosion des vorhandenen Typs für die jeweils ungünstigsten Kornverteilungslinien des feinen und des groben Erdstoffes im Schwankungsbereich mit den jeweils ungünstigsten  $U^I$ - und  $U^{II}$ -Werten.
- 4.7. Berechnung des vorhandenen kleinsten und größten Verhältnisses  $\mathcal{K}$  für die am nächsten und am entferntesten liegenden Kornverteilungslinien der beiden Erdstoffe.
- 4.8. Ermittlung des Sickerwasserströmungssnetzes für das auf diese Weise gefundene kleinste  $\mathcal{K}_{\text{ges}}$  des Entwässerungssystems, wenn  $\mathcal{K}_{\text{ges}} < 100$  ist.

Bevor diese Projektionskette an einem Beispiel demonstriert wird, soll noch die "akademische" Lösung des Filterentwurfs gezeigt werden. Bild 10 enthält das Ergebnis der gleichzeitigen Anwendung von Bild 7 und 8 ( $\mathcal{K} = 15$ ):

Gegeben ist ein Basiserdstoff fa bis ms mit  $U^I = 2,5$  und gesucht wird der Grenzbereich des Filtererdstoffes mit  $U^{II} = 6$ , der Sicherheit gegen die Kontaktrosion aller Typen bei praktisch beliebigen Gefälle und  $\mathcal{K} = 15$  garantiert. Aus Bild 7 ergibt sich

$$\max d_{50}^{II} = d_{50}^I \cdot A_{50, \text{zul}} ; \quad (U^I = 2,5; U^{II} = 6)$$

und aus Bild 8 folgt

$$\min d_{10}^{II} = d_{10}^I \cdot A_{10, \text{erf}} ; \quad (U^I = 2,5; U^{II} = 6).$$

Man erkennt, daß schon bei diesen  $U$ -Werten ein sehr kleiner Schwankungsbereich für den Filtererdstoff vorliegt, so daß überlegt werden muß, ob man  $\mathcal{K} < 15$  wählen kann.

Um von vornherein erkennen zu können, welches maximale  $\mathcal{K}$  bei strenger Anwendung des Bildes 7, d.h. zwischen dem Basiserdstoff und der grüßtmöglichen Kornverteilungslinie des Filtererdstoffes, zu erwarten ist, wurde von [4] das Bild 11 berechnet.

Es enthält die Funktionen

$$\mathcal{K}_{\max} = f(A_{50, \text{zul}}; U^I; U^{II}) \quad (49)$$

Aus Bild 11 kann man folgende "akademische" Schlussfolgerungen für nichtbindige Basiserdstoffe ziehen:

- a)  $\alpha = k^{II}/k^I \geq 15$  kann man für  $U^I \leq 1,5$  nicht erreichen, außer für  $U^{II} = 2$ .
- b) Auch  $\alpha \geq 100$  ist nicht für alle  $U^I - U^{II}$ -Kombinationen erreichbar.
- c) Genügende Durchlässigkeit des Filters läßt sich schwer bei  $U^I < U^{II}$  und leicht bei  $U^I > U^{II}$  erreichen.
- d) Es ist daher unter dem Gesichtspunkt genügender Durchlässigkeit erstrebenswert, wenn  $U^{II} < U^I$  ist. Dieses steht natürlich im Widerspruch zur Erosionsregel, da dann A<sub>50</sub> zu kleiner wird und somit aus diesem Grunde mehr Schichten notwendig werden. Es muß also ein Kompromiß gefunden werden.
- e) Da für den Filtererdstoff immer ein möglichst großer Schwankungsbereich angegeben werden muß, kann der auf Bild 11 angegebene maximale  $\alpha$ -Wert dem Entwurf nicht zugrunde gelegt werden.
- f) In folgender Tabelle sind für den Ungleichförmigkeitsgrad  $U^I$  des Basiserdstoffs die höchsten Ungleichförmigkeitsgrade  $U^{II}$  des Filtererdstoffs und die dabei möglichen  $\alpha$ -Werte angegeben, für die noch ein Mindestschwankungsbereich für den Filtererdstoff erzielt wird.

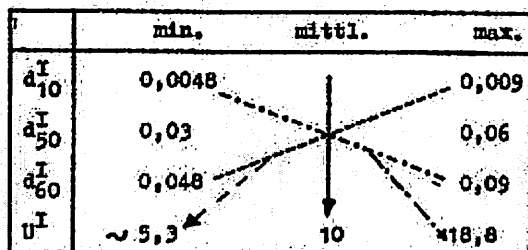
$U^I$	1	2,5	5
max $U^{II}$	< 2	< 10	< 18
mögl. $\alpha$	5	10	15

- g) Der nach Regel 7 anzustrebende und der bisher verwendeten Durchlässigkeitsregel von Terzaghi geforderte Wert von  $\alpha = 15$  wird somit erst bei  $U^I > 5$  und  $U^{II} < 18$  erreicht, wenn man gleichzeitig einen Mindestschwankungsbereich für den Filtererdstoff garantieren muß.
- h) Bei einem Basiserdstoff bis  $U^I \sim 5$  kann daher der mindestens erforderliche Gesamtwert  $\alpha_{ges}$  für das Entwässerungselement nicht mit einer Filterschicht erreicht werden. Es sind dann mindestens 2 Schichten erforderlich.

Alle diese Betrachtungen sind wohl interessant, sind jedoch recht "akademisch", da der Projektant nicht, wie vorher beschrieben, vorgehen kann. Er muß im allgemeinen von den lieferbaren oder vorhandenen Filtermaterialien ausgehen und danach ihre Eignung überprüfen.

Im folgenden Beispiel wird daher die praktische Filterbemessung demonstriert (Bild 12): Die dargestellte Erdstoffkombination wird durch Kontakterosion Typ 1/1 gefährdet.

- Der Schwankungsbereich des Basiserdstoffs wird durch die grafische Darstellung mit den entsprechenden Extremwerten charakterisiert:

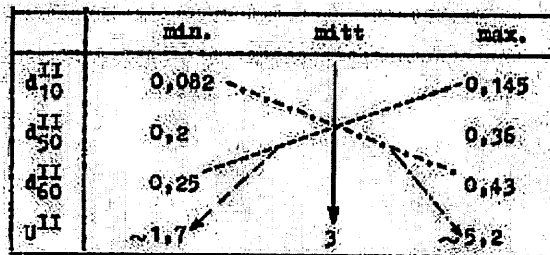


- Nach WAFRO 4.04./2 wird der Nachweis der Suffusionsbeständigkeit, sowohl für stetige Kornverteilungslinien - volle Linie - mit mittl.  $U^I = 10$  als auch für unstetige Kornverteilungslinien - gestrichelte und strich-punktierte Linien - mit min  $U^I = 5,3$  und max  $U^I = 18,8$ , geführt. Auf nähere Beschreibung wird hier verzichtet.

- Ein Nachweis der Kontaktsuffusion für den Basiserdstoff entfällt daher.



- Der Schwankungsbereich des Filtererdstoffs der 1. Schicht wird durch die grafische Darstellung mit den entsprechenden Extremwerten charakterisiert:



- Der Nachweis der Suffosionsbeständigkeit für die 1. Filterschicht wird geführt, auf seine Widrigkeit wird hier verzichtet.

- Nun erfolgt der Nachweis für die Sicherheit gegen Kontakterosion. Da alle U<sup>I</sup>-Werte = 5,3; 10; 18,8 - rechts der Maxima für die U<sup>II</sup>-Kurven = 1,7; 3; 5,2 - auf Bild 7 liegen, sind folgende ungünstige Kombinationen möglich.

a) mitt U<sup>I</sup>/min d<sub>50</sub><sup>I</sup> - mitt U<sup>II</sup>/max d<sub>50</sub><sup>II</sup>.

$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{0,36}{0,03} = 12 < A_{50, \text{zul}} = 14 \quad (U^I = 10; U^{II} = 3).$$

b) mitt U<sup>I</sup>/min d<sub>50</sub><sup>I</sup> - min U<sup>II</sup>/min d<sub>50</sub><sup>II</sup>.

$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{0,2}{0,03} = 6,7 < A_{50, \text{zul}} = 8,5 \quad (U^I = 10; U^{II} = 1,7).$$

c) max U<sup>I</sup>/max d<sub>50</sub><sup>I</sup> - mitt U<sup>II</sup>/max d<sub>50</sub><sup>II</sup>.

$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{0,36}{0,06} = 6 < A_{50, \text{zul}} = 11 \quad (U^I = 18,8; U^{II} = 3).$$

d) max U<sup>I</sup>/max d<sub>50</sub><sup>I</sup> - min U<sup>II</sup>/min d<sub>50</sub><sup>II</sup>.

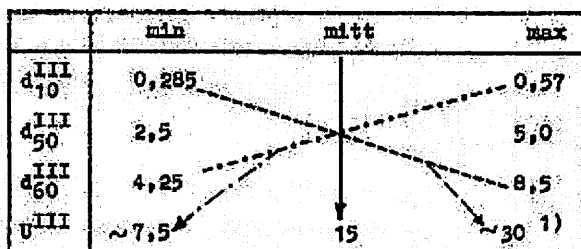
$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{0,2}{0,06} = 3,3 < A_{50, \text{zul}} = 6 \quad (U^I = 18,8; U^{II} = 1,7).$$

Die relativen Sicherheitswerte  $\eta' = \frac{A_{50, \text{zul}}}{A_{50, \text{vorh}}}$  betragen für die einzelnen Kombinationen:

Fall	a	b	c	d
$\eta'$	1,17	1,27	1,83	1,82

Am ungünstigsten ist also der Fall a). Es genügt daher in diesem Fall im allgemeinen, den Sicherheitsnachweis mit mitt U<sup>I</sup>/min d<sub>50</sub><sup>I</sup> gegen mitt U<sup>II</sup>/max d<sub>50</sub><sup>II</sup> zu führen. Dafür spricht auch, daß die extremen U-Werte min U und max U sicherlich wesentlich seltener auftreten als mitt U. Sollte einmal bei den anderen Kombinationsmöglichkeiten  $A_{50, \text{vorh}} > A_{50, \text{zul}}$  sein, so kann man begründen, daß  $A_{50, \text{zul}}$  einen Sicherheitsgrad von  $\eta_{K,0} = 1,5$  enthält, der ausreicht, um solche seltenen ungünstigen Fälle abzudecken.

- Der Schwankungsbereich des Filtererdstoffs der 2. Schicht wird durch die grafische Darstellung mit den entsprechenden Extremwerten charakterisiert:



1) Wegen Regel 3 ist für die Bauausführung max U<sup>III</sup> auf 20 zu beschränken

- Auf den Nachweis der Suffizienzbeständigkeit der 2. Filterschicht wird hier wiederum verzichtet.

- Nun erfolgt der Nachweis für die Sicherheit gegen Kontakterosion von der 1. zur 2. Filterschicht.

Alle  $U^{II}$ -Werte liegen links der Maxima für die  $U^{III}$ -Kurven auf Bild 7. Daher sind folgende ungünstige Kombinationen möglich.

a) mitt  $U^{II}/\min d_{50}^{II}$  - mitt  $U^{III}/\max d_{50}^{III}$ .

$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{5,0}{0,2} = 25 < A_{50, \text{zul}} = 32 \quad (U^{II} = 3; U^{III} = 15)$$

b) mitt  $U^{II}/\min d_{50}^{II}$  - min  $U^{III}/\min d_{50}^{III}$ .

$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{2,5}{0,2} = 12,5 < A_{50, \text{zul}} = 22 \quad (U^{II} = 3; U^{III} = 7,5)$$

c) min  $U^{II}/\min d_{50}^{II}$  - mitt  $U^{III}/\max d_{50}^{III}$ .

$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{5,0}{0,2} = 25 < A_{50, \text{zul}} = 29 \quad (U^{II} = 1,7; U^{III} = 15)$$

d) min  $U^{II}/\min d_{50}^{II}$  - min  $U^{III}/\min d_{50}^{III}$ .

$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{2,5}{0,2} = 12,5 < A_{50, \text{zul}} = 19 \quad (U^{II} = 2,7; U^{III} = 7,5)$$

Die relativen Sicherheitswerte  $\eta' = A_{50, \text{zul}}/A_{50, \text{vorh}}$  betragen für die einzelnen Kombinationen:

Fall	a	b	c	d
$\eta'$	1,28	1,76	1,16	1,52

Am ungünstigsten ist als der Fall c). Es genügt daher in diesem Fall im allgemeinen, den Sicherheitsnachweis mit  $\min U^{II}/\min d_{50}^{II}$  gegen mitt  $U^{III}/\max d_{50}^{III}$  zu führen.

- Der Nachweis genügender Wasserdurchlässigkeit für die einzelnen Schichten und des gesamten Filters erfolgt mit Hilfe von Bild 9 nach Regel 10.

a) Übergang vom Basiserdstoff zur 1. Filterschicht:

Der kleinste  $\mathcal{K}$ -Wert ergibt sich für die Kombination  $\min U^I/\max d_{10}^I$  mit  $\max U^{II}/\min d_{10}^{II}$  zu

$$\min \mathcal{K}_1 = \left( \frac{\min A_{10}}{\omega} \right)^2 = \left( \frac{\min d_{10}^{II}}{\max d_{10}^I} \right)^2 = \left( \frac{0,082}{0,009 \cdot 1,0} \right)^2 = 83$$

und der größte  $\mathcal{K}$ -Wert für die Kombination  $\max U^I/\min d_{10}^I$  mit  $\min U^{II}/\max d_{10}^{II}$  zu

$$\max \mathcal{K}_1 = \left( \frac{\max A_{10}}{\omega} \right)^2 = \left( \frac{\max d_{10}^{II}}{\min d_{10}^I} \right)^2 = \left( \frac{0,145}{0,0048 \cdot 0,76} \right)^2 = 1580.$$

Damit wird Regel 8 erfüllt, wegen  $\min \mathcal{K}_1 = 83 > 1$

b) Übergang von der 1. zur 2. Filterschicht. Es ergibt sich:

$$\min \mathcal{K}_2 = \left( \frac{0,285}{0,145 \cdot 1,4} \right)^2 = 1,4 > 1 \quad (\text{Regel 8 erfüllt}). \quad \max \mathcal{K}_2 = \left( \frac{0,27}{0,082 \cdot 1,05} \right)^2 = 43.$$

c) Gesamtfilter: Der kleinste  $\mathcal{K}$ -Wert ergibt sich für die Kombination

$\min U^I/\max d_{10}^I$  -  $\max U^{III}/\min d_{10}^{III}$  zu

$$\min \mathcal{K}_{\text{ges}} = \left( \frac{\min d_{10}^{III}}{\max d_{10}^I} \right)^2 = \left( \frac{0,285}{0,009 \cdot 1,25} \right)^2 = 640$$

und der größte  $\lambda$ -Wert für die Kombination  
 $\max U^I / \min d_{10}^I$  mit  $\min U^{III} / \max d_{10}^{III}$  zu

$$\max \lambda_{\text{ges}} = \left( \frac{\max d_{10}^{III}}{\min d_{10}^I} \right)^2 = \left( \frac{0,57}{0,0048 \cdot 0,9} \right)^2 = 17\,400.$$

Damit wird auch Regel 6 erfüllt, weil  $\min \lambda_{\text{ges}} = 640 > 100$  ist.

Durch dieses Beispiel wird deutlich, daß die Empfehlung der Regel 7,  $\lambda = 15$  anzustreben, für den Übergang von der 1. zur 2. Filterschicht Schwierigkeiten bereitet. Damit wird nochmals klar, daß alle Durchlässigkeitsregeln, die dieses fordern, zu unökonomischen Lösungen führen müssen.

Da  $\min \lambda_{\text{ges}} = 640 > 100$  ist, entfällt die Notwendigkeit zur Aufstellung eines besonderen Sickerwasserströmungsnetzes. Dies wäre jedoch unbedingt erforderlich, wenn der Basiserdstoff dem Material der 1. Filterschicht entspräche und das Entwässerungssystem nur aus einer Filterschicht bestehen soll.

#### 5. Hinweise für die Konstruktion von Wasserhaufiltern

Da die im Abschnitt 2.1. erwähnten Forschungen von [57] noch nicht soweit gediehen sind, daß sie in die Praxis eingeführt werden können, muß die Dicke der Filterschicht vorläufig noch nach folgenden empirischen Gesichtspunkten entworfen werden:

Regel 11: Das Abführungsvermögen des Entwässerungssystems  $Q_E$  muß größer sein als der maximale Sickerwasseranfall  $Q_S$

$$Q_E \geq Q_S.$$

Daraus ergibt sich die erforderliche Dicke  $t$  der Filterschichten - wasserwirtschaftliche Bedingung -.

Ferner darf die Leistung und Sicherheit der Filterkombinationen durch unterschiedliche Setzungen nicht gefährdet werden. Das erfordert eine Mindestdicke der Filterschichten in Abhängigkeit von der Einbautechnologie und den möglichen unterschiedlichen Setzungen.

Regel 12: Als Faustregel für die Filterschichtdicke gilt:

$$t \geq 8 \cdot d_{50} \text{ für abgerundetes Material}$$

$$t \geq 6 \cdot d_{50} \text{ für gebrochenes Material}$$

nach [37] oder nach [107]

$$t \geq 50 \cdot d_{15}$$

als technologische Mindestwerte sind aber

$$t \geq (0,1) \text{ bis } 0,2 \text{ m bei Handeinbau}$$

$$t \geq (0,2) \text{ bis } 0,3 \text{ m bei maschinellem Einbau}$$

vorzusehen. Die Klammerwerte können nur bei untergeordneten Anlagen verwendet werden.

Nach [21] ergeben sich noch folgende allgemeine Hinweise:

Regel 13: Begrenzungslinien von Entwässerungseinrichtungen sollen im Grundriß und Querschnitt möglichst ohne scharfe Knicke konstruiert werden, um Unstetigkeitsstellen im Sickerwasserströmungsnetz mit ihren theoretisch gegen Unendlich gehenden Sickerwassergefällen - praktisch  $J_{\text{vorh}} \leq 9$  - zu vermeiden. Daher sind im Querschnitt kreisförmige den prismatischen Elementen gegenüber vorzuziehen. Im Grundriß sind fließende Übergänge anzustreben.

Regel 14: Entwässerungseinrichtungen sollen so projektiert werden, daß der spezifische Sickerwasseranfall  $q$  [l/s·m<sup>2</sup>] im Längsschnitt möglichst gleichmäßig erfolgt.

Regel 15: Das Entwässerungssystem einer Stauanlage soll nur soweit wie unbedingt nötig zur Wasserseite vorgeschoben werden, um den Sickerweg möglichst lang und damit das Sickerwassergefälle möglichst klein werden zu lassen.

Weitere Hinweise für die Berechnung und konstruktive Gestaltung von Filtern und Entwässerungsanlagen enthalten [22], bis [43].

Bearbeiter: Dipl.-Ing. J. Ziemis †, Technische Universität Dresden,  
Institut für Fluß- und Seebau,  
Direktor: Professor Dipl.-Ing. R. Hoffmann

Dresden, den 31. 12. 1967

6. Verwendete Bezeichnungen

$A = d^{II}/d^I$	- Abstandsverhältnis der Korndurchmesser zweier unterschiedlicher Erdstoffe an einer gemeinsamen Kontaktfläche
$A_{50} = d_{50}^{II}/d_{50}^I$	- wie vor, für die Korndurchmesser bei 50% der Kornverteilungslinien
$A_{10} = d_{10}^{II}/d_{10}^I$	- wie vor, für die Korndurchmesser bei 10% der Kornverteilungslinien
$A_{50, \text{krit}}$	- Abstandsverhältnis, bei dem eine Kontakterosion möglich wird
$A_{50, \text{zul}} = \frac{A_{50, \text{krit}}}{1,5}$	- zulässiges Abstandsverhältnis für Kontakterosion
$A_{50, \text{vorh}}$	- vorhandenes Abstandsverhältnis
$d$	- Korndurchmesser
$d^I$	- wie vor, des feineren Erdstoffs
$d^{II}$	- wie vor, des gröberen Erdstoffs
$d_i$ (z.B.: $d_{10}, d_{17}$ u.a.)	- wie vor, bei $p_i$ % der Kornverteilungslinie
$d_m$	- maßgebender Korndurchmesser für Kontakterosion
$d_{\text{min}}$	- minimaler Korndurchmesser
$d_p$	- Porendurchmesser
$d_{p,m}$	- maßgebender Porendurchmesser für Kontakterosion
$d_{p,c}$	- wie vor, bei lockerster Lagerung
$d_{p,D}$	- wie vor, bei dichtester Lagerung
$d_p^i$	- ideeller mittlerer Porendurchmesser
$d_{x,f}$	- maßgebender Korndurchmesser für die Skelettfüllung des Filtererdstoffs, der den maßgebenden Porendurchmesser des Filtererdstoffs bestimmt
$d_{x,s}$	- maßgebender Korndurchmesser für das Skelett des Basiserdstoffs, der die Poren des Filtererdstoffs bei der Kontakterosion nicht passieren darf
$D_s = \frac{e_{0-0}}{e_{0-0}^D}$	- Lagerungsdichte
$F = F_s \cdot F_p$	- Verkleinerungsfaktor für den maßgebenden Porendurchmesser bei der Kontakterosion
$F_s$	- Schlupffaktor, charakterisiert das Schlupfmaß zwischen Korndurchmesser $d^I$ und Porendurchmesser $d_p^{II}$ bei der Kontakterosion unter der Annahme abgerundeter Körner ( $F_p = 1$ )
$F_p$	- Formfaktor, charakterisiert die Form der Körner und Poren
$J$	- Sickerwassergefälle
$J_{\text{vorh}}$	- vorhandenes Sickerwassergefälle
$k$	- Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
$k^I$	- wie vor, vom feineren Erdstoff
$k^{II}$	- wie vor, vom gröberen Erdstoff
$n$	- Porenanteil
$P_i$	- Masseprozente der Fraktionen mit dem Korndurchmesser $d \leq d_i$
$Q_s$	- Sickerwasserabführvermögen eines Entwässerungssystems
$Q_s$	- Sickerwasseranfall
$t$	- Dicke der Filterschichten

- $U = d_{60}/d_{10}$  - Ungleichförmigkeitsgrad  
 $U^I$  - wie vor, des feineren Erdstoffs  
 $U^{II}$  - wie vor, des gröberen Erdstoffs  
 $e$  - Porenziffer  
 $e_0$  - wie vor, bei lockerster Lagerung  
 $e_D$  - wie vor, bei dichtester Lagerung  
 $\gamma_{K,G}$  - geometrische Sicherheit gegen Kontakterosion  
 $\alpha = k^{II}/k^I$  - Verhältnis der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte zweier Filterschichten  
 $\alpha_{ges}$  - wie vor, für alle Filterschichten eines Entwässerungssystems  
 $\omega = A_{10}/\sqrt{\alpha}$  - Berechnungswert für die Durchlässigkeitsregeln.

### 7. Literaturverzeichnis

- [1] Ziems, J. Zur Klassifizierung der mechanischen Erdstoffverformungen durch Wirkungen des Sickerwassers. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Berlin 17(1967)2, p. 50-55
- [2] Erläuterungen zu WAFRO 4.04./2 Suffosion nichtbindiger Erdstoffe
- [3] Istomina, V.S. Filtracionnaja ustojcivost' gruntov (Die Sickerbeständigkeit der Böden) Gos.izdat.lit. po stroit. i. arch., Moskva, 1957
- [4] Ziems, J. Erosionsbeständigkeit nichtbindiger Lockergesteine. Abschlußbericht der F/R-Arbeit Nr.: 4507 026/6-2/5 am Institut für Fluß- und Seebau der TU Dresden, 1967
- [5] Silveira, A. An analysis of the problem of washing trough in protective filters (Eine Untersuchung des Problems des Einspißens von Erdstoffteilchen in Schutzfilter). Proc. of the 6th Intern. conf. on soil mech. and Found. engng., Montreal, 1965, Vol. II, Div. 6/27, p. 551-555
- [6] Cistin, J. Konstrukce a stavba filtru sypnych hrází (Konstruktion und Bau von Filtern bei Erddämmen). VVUH Brno, 1964, Abschlußbericht der Forschungsarbeit Nr. IX-5-5/3 (Übersetzung am Institut für Fluß- und Seebau der TU Dresden)
- [7] Schardt, Kies- und Sandfilter im Grund- und Wasserbau. Bautechnik, Berlin (1952)3/4
- [8] Terzaghi-Peck Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Springer-Verlag, Berlin, 1954
- [9] Grisin, M.M. Gidrotechničeskije sooruzenija (Der Wasserbau) Gos.izdat.lit. po stroit. i. arch. i stroitel'nym mat., Moskva, 1955 bzw. 1962
- [10] Aristovki-Beger Entwurfsgrundlagen zum Wehrbau, Verlag Technik, Berlin, 1955
- [11] Lubcockov, E.A. Issledovannije fil'tracii i analiz raboty drenazej plotin Kachovskoj GES (Die Untersuchung der Sickerung und die Betriebsanalyse der Dränagen des Staudammes Kachowka) Gidr.stroi., Moskva, 24(1963)7, p. 16
- [12] Pravednij, G.Ch. Ob instrukcii po proektirovanii obratnyh fil'trov gidrotechničeskich sooruzenij. Gidr.stroi., Moskva (1959) 9
- [13] Patrasev, A.N.; Bakalov, S.A. Razbótká metodov rasčeta mehaniceskoj i chemiceskoj suffozii (Methoden zur Berechnung der mech. u. chem. Suffosion). Izv. VNIIG, Len. (1951)
- [14] Bertram An experimental investigation of protective filters (Experimentelle Untersuchungen über Schutzfilter) Harvard University, Soil Mechanics Series (1940) 7
- [15] Karpoff, K.F. The Use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters (Der Gebrauch von Laborversuchen zur Entwicklung der Entwurfskriterien für Schutzfilter) 58th Annual Meeting of the ASTM USA, ASCE, Proc. (1955) 55
- [16] Post, G.; Londe, P. Der Erdstaudambau - Amerikanische Praxis. Verlag Sager und Wozner, München, 1955

- [17] Zwack-Davidenkoff Versuche an Filtern mit gleichmäßiger Granulometrie. Proc. 4. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 4. Conference, London, 1957, Band II, p. 410
- [18] Rambert, O. Die Anlagen der Kraftwerke Mattmark AG. Wasser- und Energiewirtschaft, Zürich (1962) 3, p. 83
- [19] Beyer, W. Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve WWT, Berlin (1964) 6, p. 169
- [20] Kratochvíl, S. Vodní nádrže a přehrády (Wasserreservoirs und Talsperren) Verlag NOSAV, Prag, 1961
- [21] Ziemsa, J. Die Aufmessung des räumlichen Sickerwasserfeldes im Übergangsbereich des Staudammes der Talsperre Spremberg zum Talhang. Freiburger Forschungshefte, C 214, 1967
- [22] Gedergren, M.R. Seepage requirements of filters and pervious bases (Sickerberechnungen für Filter und durchlässige Gründungen) ASCE, Soil Mech. Found. Div. (1960) 5
- [23] Olejnik, A. Ja. Sposoby rasčeta preryvistykh drenazej v zemljanykh plotinach na nepronicajemom osnovanii (Methoden zur Berechnung nicht durchgehender Entwässerungsanlagen von Erddämmen auf durchlässigen Untergrund) Gidr. stroj. 36 (1966) 9, p. 27
- [24] Olejnik, A. Ja. Metodika rasčeta preryvistykh drenazej v zemljanykh plotinach na nepronicajemom osnovanii (Berechnungsmethoden für diskontinuierliche Dränagen in Erddämmen auf undurchlässigen Untergrund) Gidr. stroj. 35 (1965) 7, p. 38
- [25] Olejnik, A. Ja.; Tkachenko, V. A. Rasčet preryvistogo trubčatogo drenaza v zemljanoj plotine na nepronicajemom osnovanii (Die Berechnung einer diskontinuierlichen Röhrenentwässerung in einem Erddamm auf undurchlässigen Untergrund) Gidr. stroj., 34 (1964) 8, p. 36
- [26] Bieske, S. Erfahrungen mit Brunnenfiltern. Bohrt. Brunn. Rohrl., 15 (1964) 2, p. 69
- [27] Oistin, J. Vyskum nejvýhodnějšich typu drenisa v zemních hrázích (Die Erforschung der vorteilhaftesten Dränagetypen in Erddämmen) Sborník, VSS, 1956
- [28] ... Die Dränage von Spüldämmen in der Sowjetunion, BBT 13 (1959) 3
- [29] Dyok, S. Der Entlastungsbrunnen, ein wirksames Mittel zur Beherrschung der Unterströmung von Dämmen. WWT (1956) 11, p. 351
- [30] Gadzjev, A. B. Opyt kreplenijs napornogo otkosa zemljanoj plotiny s primeneniem kamnytych matov (Experiment zur Stabilisierung des Druckgefälles im Erddamm durch die Anwendung von Schilfmatten) Gidr. stroj., 21 (1961) 2, p. 26
- [31] Janbu, N. Modellversuche und theoretische Berechnungen der Wirkung von Filterbrunnen auf die Sicherung eines Damms. Tehnika Ukeblad, Oslo, 104 (1957) 47 u. 48
- [32] Krašnov, V. Ja. O drenazach ruslovykh zemljanykh namyvných plotin (Die Dränage von im Flußbett errichteten Erdsüldämmen) Gidr. stroj., Moskva, 27 (1958) 10, p. 33
- [33] Mach, V. Uprava styku tesnenta zemnej hrádze s betónovým objektom (Verbindung der Dichtungsschicht des Erddammes mit dem Beton) Zpráva, Praha, (1957) 5
- [34] Makarov, V. Russisch (Die Verkleidung der Böschung von Erdschüttkörpern im Wasserbau mit Filteranlagen aus porösem Beton) Gidr. mel., Moskva (1960) 10, p. 24
- [35] Markević, E. N. Drenaz iz poristogo betona (Dränagen aus porösem Beton) Gidr. stroj., Moskva, 25 (1957), p. 23
- [36] Nikolodsev, O. S. Issledovanie fil'tr iz prostogo betona (Die Untersuchung der Filter aus Porenbeton) Gidr. mel., Moskva, (1958) 10



- [37] Flehm, H. Vorgefertigte Filterbetonplatten und ihre Anwendung  
Wiss.Z.H.B. Cottbus, (1962) 5, p.465
- [38] Schaef; Tiemer Sicherung des luftseitigen Dammfußes durch Entlastungsbrunnen  
Gutachten des Instituts für Wasserwirtschaft Berlin für das  
Speicherbecken Spremberg, 1965
- [39] Sepelov, M.K. Gibkie soprjazenijsa ponurov i protivofil' tracionnyh diafragm s  
betonnymi massivami gidrotehničeskich sooruzenij  
(Elastische Verbindung von Teppichen und Dichtungselementen mit  
den Betonteilen von Wasserbauten)  
Gidr.stroi., Moskva, 24 (1964) 3, p.43
- [40] Semizorov, V.F. Fil'tracionnyj režim v osnovanii v soprjazenijsch vedoslivnoj  
plotiny (Das Filtrationsregime im Untergrund und an der Verbin-  
dung der Entlastungsanlagen mit dem Damm)  
Gidr.stroi., Moskva, 21 (1962) 12, p.40
- [41] Ukazanijsa ... (vorläufige Richtlinien für Sammeldrängungen aus porösen Betonblöcken)  
Hydroprojekt, Moskva, 1960
- [42] Varunov, K.P. Ustrojstvo vertikal'nogo drenaza iz poristogo betona  
(Der Bau von vertikalen Drängungen aus Porenbeton)  
Gidr.stroi., Moskva, 28 (1959) 2, p.22
- [43] Verigin, N.N. O drenaze pod telom plotiny (Die Entwässerung des Untergrundes  
von Dammkörpern)  
Gidr.stroi., Moskva, 26 (1957) 8, p.30

#### 8. Bilderverzeichnis

1. Schematische Darstellung der Kontakterosion Typ 1/1
2. Schematische Darstellung der Haupttypen der Kontakterosion
3. Diagramme für Filterentwürfe nach VNIIG, Leningrad
4.  $A_{50} = f(U^{II})$  für Kontakterosion Typ 1/1 nach Istomina
5.  $A_{50} = f(d_{50}^I)$  für Kontakterosion Typ 1/1 nach Zwack-Davidenkoff
6.  $A_{50} = f(U^I, U^{II})$  für Kontakterosion Typ 1/1 nach Gistin
7.  $A_{50,zul} = f(U^I, U^{II})$  für Kontakterosion Typ 1/1, 1/3 und 3/1 nach Gistin/Ziems
8. Diagramm für die Projektierung von Filtern auf Durchlässigkeit nach Ziems
9. Diagramm zur Bestimmung von  $\mathcal{K} = k^{II}/k^I$  für Filterentwürfe nach Ziems
10. Beispiel für die akademische Anwendung der Erosionsregel nach Bild 7 und der Durchlässigkeitsregel nach Bild 8
11. Größe des Verhältnisses der Durchlässigkeitsabsiwerte  $\mathcal{K} = k^{II}/k^I$  zweier Filter-  
schichten bei voller Ausnutzung des zulässigen Abstandsverhältnisses  $A_{50} = d_{50}^{II}/d_{50}^I$   
nach Bild 7
12. Beispiel für den Sicherheitsnachweis eines Filters

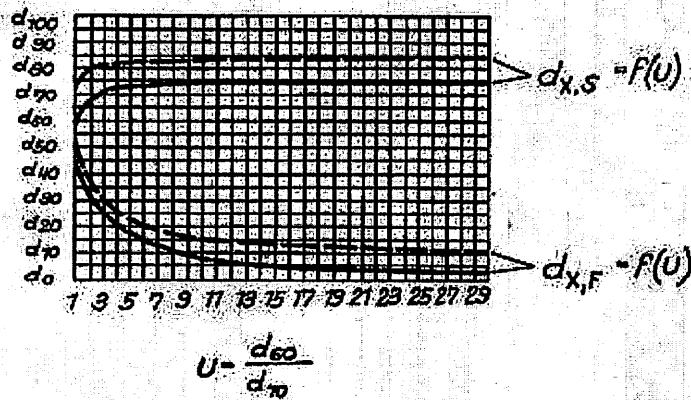
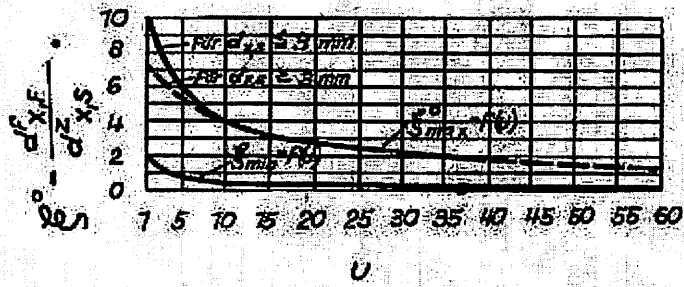
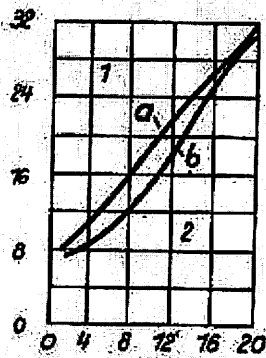


Diagramme für Filterentwürfe nach VNIIG

Bild 3

$$A_{50} = \frac{d_{50}^2}{d_{50}^2}$$



$$U^II = \frac{d_{60}^2}{d_{10}^2}$$

Diagramm für Filterentwürfe n. Jstomina

- a - Filter aus natürlichen Erdstoffen
- b - Filter aus scharfkantigen, gebrochenen Erdstoffen
- 1 Bereich der unzul. Charakteristiken
- 2 Bereich der zulässigen Charakteristiken

Bild 4

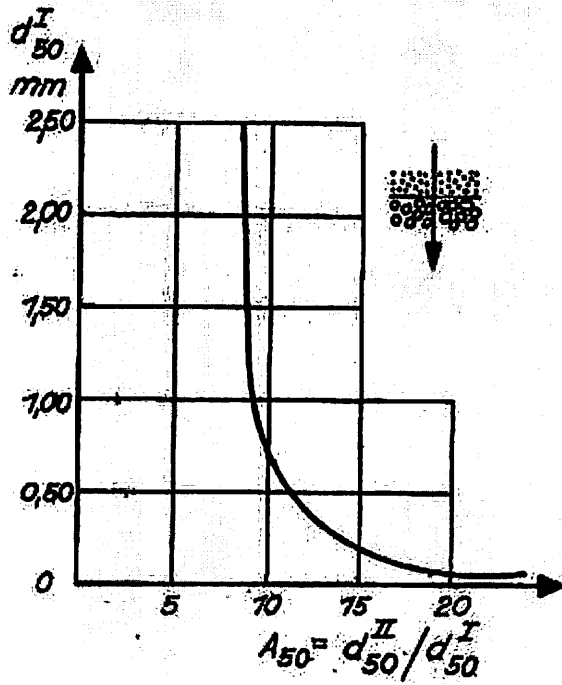


Bild 5

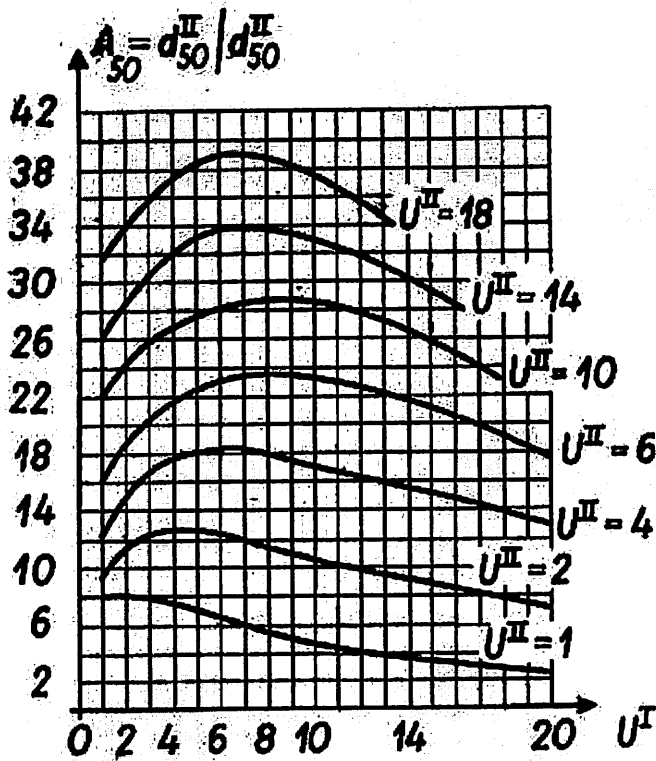


Bild 6

# Entwurfsdiagramm für Kontakterosion

Typ 1/1, 1/3, 3/1

(nach Versuchen von Čiřtín, im Bereich  $U^I \leq 4$  nach Versuchen des Institutes für Fluß und Seebau, TU Dresden, korrigiert)

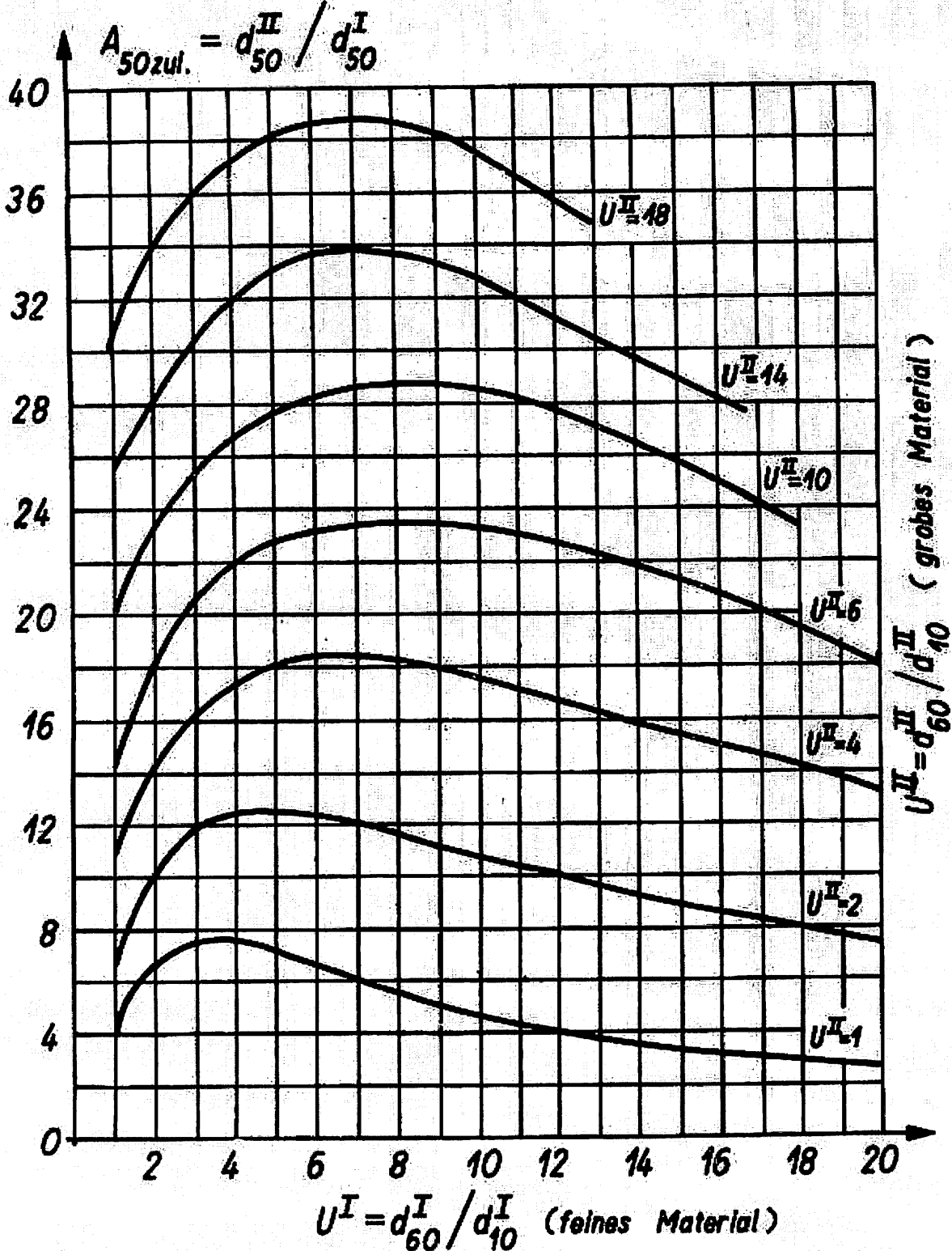


Bild 7

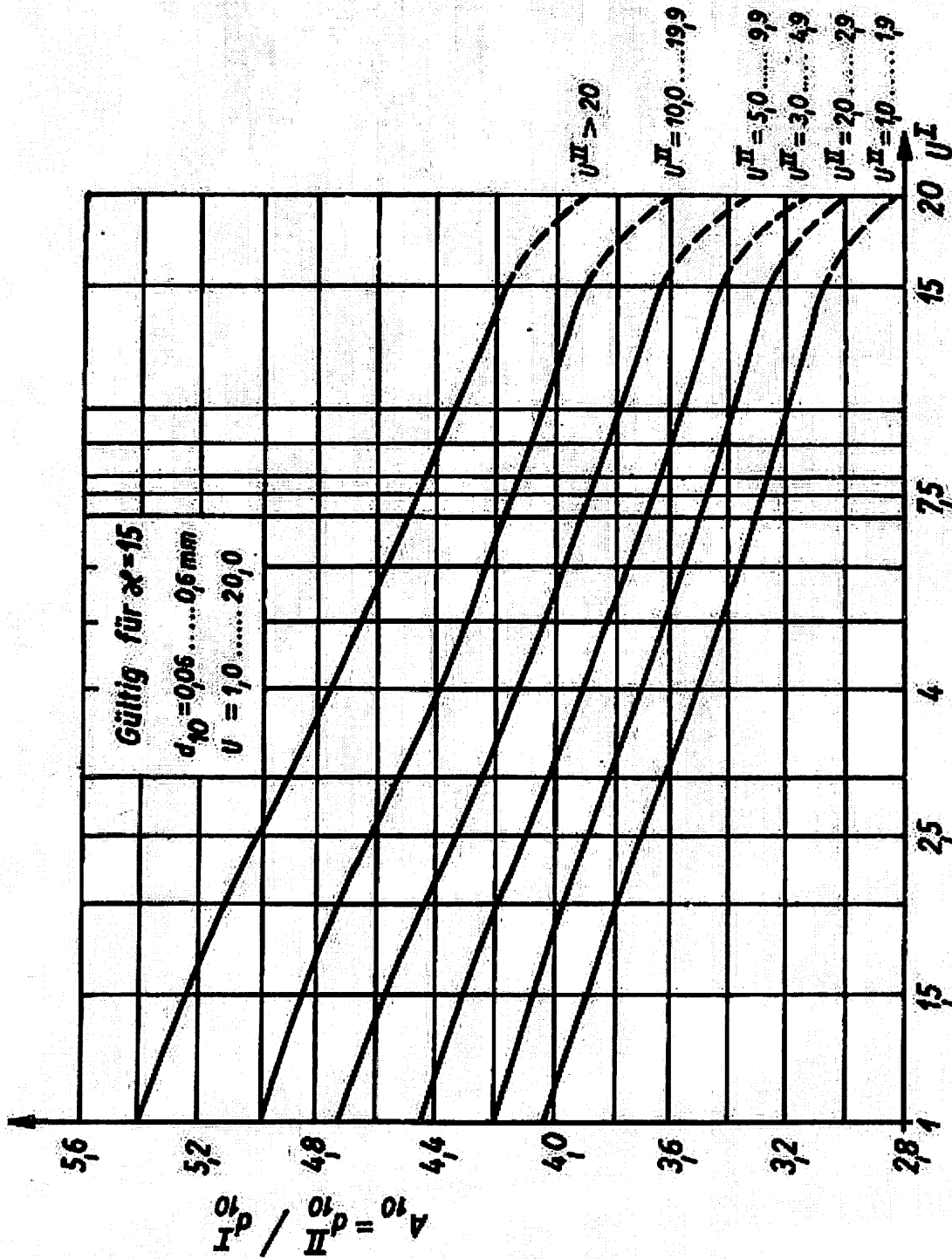
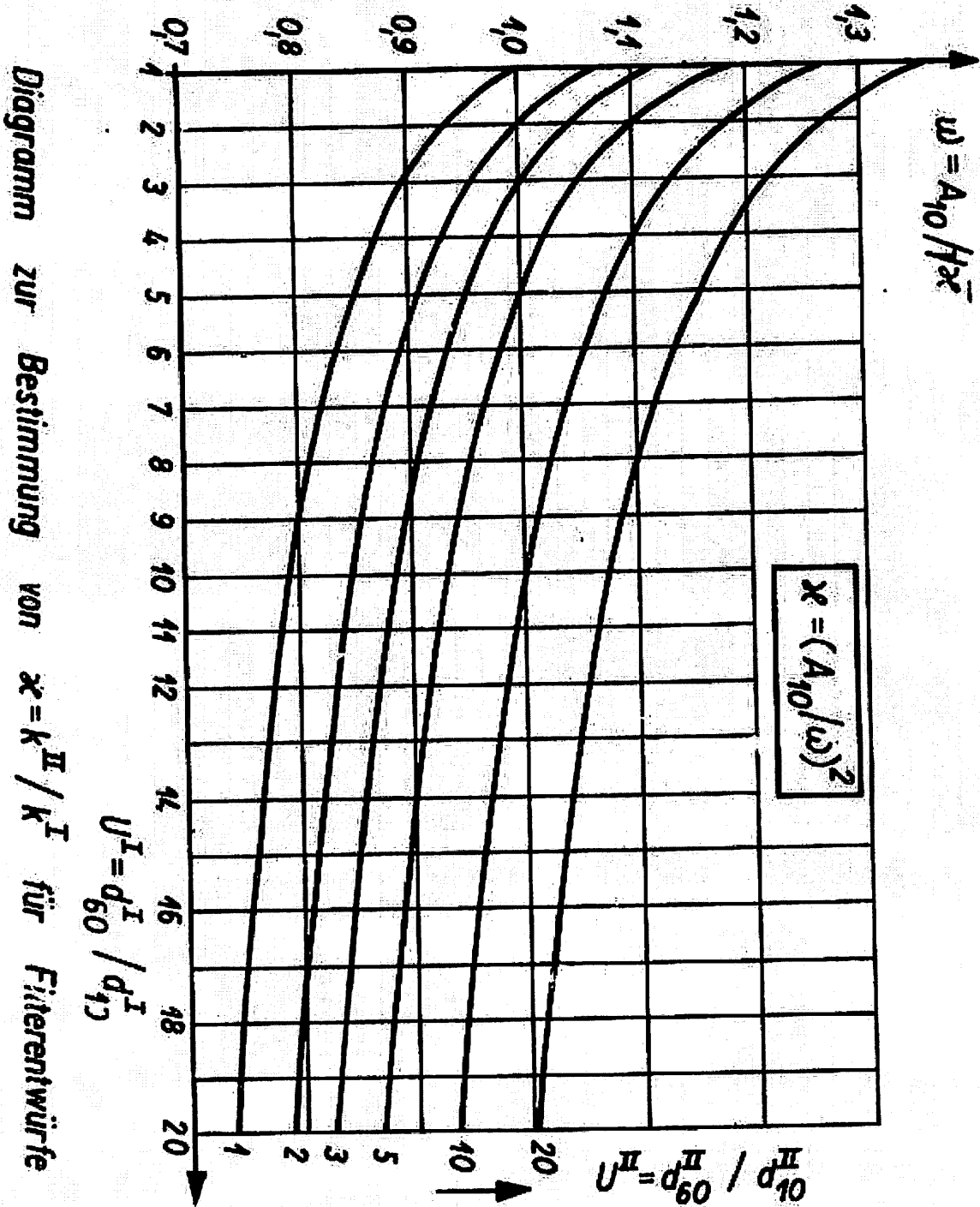


Diagramm für die Projektierung von Filtern nach Ziems

Bild 9



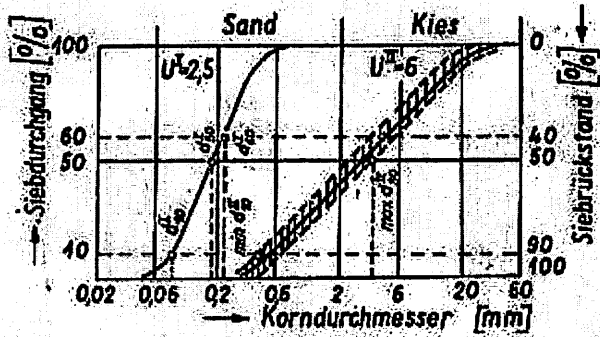
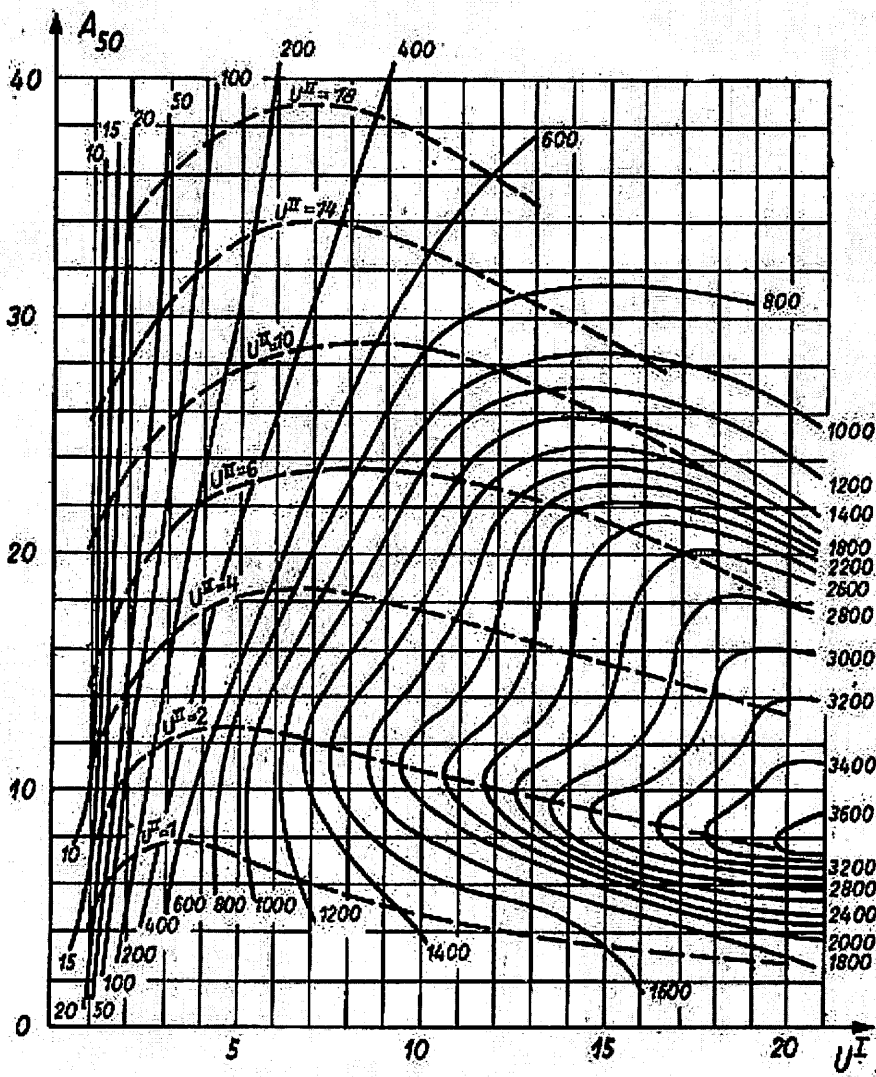


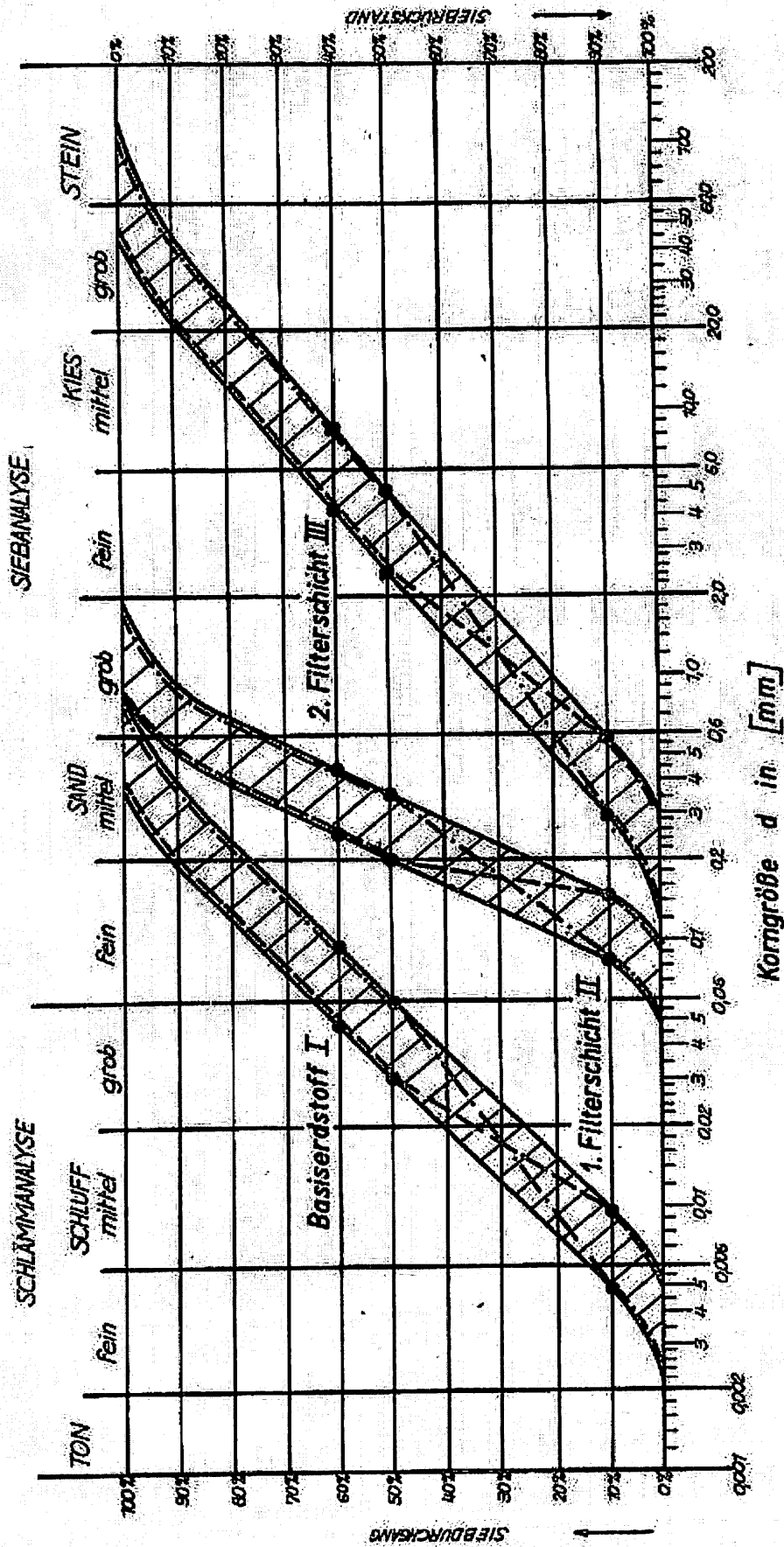
Bild 10



Größe des Verhältnisses der Durchlässigkeitsbeiwerte  $\alpha e = \frac{k^{\text{II}}}{k^{\text{I}}}$   
 zweier Filterschichten bei voller Ausnutzung des zulässigen  
 Abstandsverhältnisses  $A_{50} = d_{50}^{\text{II}} / d_{50}^{\text{I}}$

Bild 11





Beispiel für den Sicherheitsnachweis eines Filters

Bild 12