

VEB
Projektierung
Wasserwirtschaft

Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen gegenüber der
Einwirkung der Sickerwasserströmung
- Kontakterosion Typ 2/2, 3/2, 2/3 und 3/3 bei nichtbindi-
gen Erdstoffen -

WAPRO

4.04.

Blatt 4

Inhaltsverzeichnis		Seite
1.	Begriffsbestimmungen und Erläuterungen	2
2.	Bedingungen der Kontakterosion	3
2.1.	Wirkungen und Einflussfaktoren	3
2.2.	Sicherheitskriterien	4
3.	Theoretische und empirische Grundlagen	5
3.1.	Kontakterosion Typ 2/2 und 3/2	5
3.1.1.	Unbelastete Filterkombinationen	6
3.1.2.	Belastete Filterkombinationen	7
3.1.2.1.	Abhängigkeit des kritischen Sickerwassergefälles $J_{I,krit}$ vom Abstandsverhältnis $A_{50,vorh}$	7
3.1.2.2.	Abhängigkeit des kritischen Sickerwassergefälles $J_{I,krit}$ vom Abstandsverhältnis $A_{50,vorh}$ und der absoluten Korngröße des Basiserdstoffes d_I	8
3.1.2.3.	Abhängigkeit des zulässigen Abstandsverhältnisses $A_{50,zul}$ vom Ungleichförmigkeitsgrad des Filtererdstoffes U_{II} und der abso- luten Korngröße des Basiserdstoffes d_I bei konstantem Sicker- wassergefälle $J_{I,vorh} \leq 1,5$	10
3.1.2.4.	Abhängigkeit des kritischen Sickerwassergefälles $J_{I,krit}$ von der Normalspannung in der Kontaktfläche	12
3.1.2.5.	Abhängigkeit des zulässigen Abstandsverhältnisses $A_{50,zul}$ bei der Kontakterosion Typ 3/2 vom Verhältnis der Ungleichförmig- keitsgrade U_{II}/U_I	13
3.2.	Kontakterosion bei geneigter Kontaktfläche und Wechselbean- spruchung	13
3.3.	Kontakterosion Typ 2/3 und 3/3	16
3.3.1.	Abhängigkeit des kritischen Sickerwassergefälles $J_{I,krit}$ vom vorhandenen Abstandsverhältnis $A_{50,vorh}$ und der absoluten Korngröße des Basiserdstoffes d_I	16
3.3.2.	Abhängigkeit des zulässigen Abstandsverhältnisses $A_{50,zul}$ von der absoluten Korngröße des Basiserdstoffes d_I bei der Bemessung von vertikalen Brunnenfiltern	17
3.3.3.	Kritische Einschätzung der Forschungsergebnisse	17
4.	Neue Erosionsregeln	18
4.1.	Kontakterosion Typ 2/2 und 3/2	18
4.2.	Kontakterosion bei geneigter Kontaktfläche und Wechselbeanspruchung	19
4.3.	Kontakterosion Typ 2/3 und 3/3	20
5.	Verwendete Bezeichnungen	20
6.	Literaturverzeichnis	22
7.	Bilderverzeichnis	23

Fortsetzung Seite 2 bis 31

Bestätigt: 14. 1. 1969, Direktor, Halle (Saale)

(741)0344-73-1117 W

1. Begriffsbestimmungen und Erläuterungen

Unter Kontakterosion wird die an einer Kontaktfläche zweier unterschiedlich zusammengesetzter Erdstoffe stattfindende Erosion des feineren Erdstoffes verstanden [17]. Im Gegensatz zur Kontaktsuffosion (siehe WAPRO 4.04./2) werden bei der Kontakterosion fast alle Fraktionen des feineren Erdstoffes durch das Sickerwasser ungelagert und transportiert. Dabei finden die Teilchen des feineren Erdstoffes in den größeren Poren des größeren Erdstoffes Platz, und es ergibt sich die Möglichkeit der weiteren inneren Suffosion in diesem "neuen Erdstoff". Im Gegensatz zur Kontaktsuffosion kommt es zur Zerstörung des feineren Erdstoffes und damit im allgemeinen auch zur Setzung des Erdkörpers. Das in den größeren Erdstoff eingewaschene feine Material kann in Abhängigkeit vom Sickerwassergefälle in diesem "neuen Erdstoff" - Mischboden - aber auch kolmatieren.

Hinsichtlich der Strömungsrichtung des Sickerwassers zur Erdschwererichtung und der Zuordnung der feineren und größeren Erdstoffe an einer Kontaktfläche muß man die im Bild 1 gezeigten Typen unterscheiden. Natürlich sind unendlich viele Zwischentypen hinsichtlich Neigung der Kontaktfläche und Sickerwasserströmungsrichtung möglich. Die Kontakterosion der Typen 1/1, 2/2, 3/1 und 3/2 hat große praktische Bedeutung bei Wasserbaufiltern von Stauanlagen und die der Typen 1/3, 2/3 und 3/3 bei Brunnenfiltern. Die Typen 2/1 und 1/2 treten in der Natur nicht auf.

Die Kontakterosion ist entscheidend von der Sickerwasserströmungsrichtung abhängig. Während bei der Typenreihe 1/... das Gewicht der Erdstoffteilchen die Kontakterosion fördert, behindert dieses die Kontakterosion bei der Typenreihe 2/... und bei der Typenreihe 3/... befinden sich die Teilchen gewissermaßen in labilen Gleichgewicht. Bei nichtbindigen Erdstoffen ist die Kontakterosion der Typen 2/2, 3/2, 2/3 und 3/3 vom Sickerwassergefälle im feineren Erdstoff abhängig, die der Typen 1/1, 1/3 und 3/1 dagegen unabhängig.

Die Gesetzmäßigkeiten der Kontakterosion der letztgenannten Typen unterscheiden sich nicht wesentlich, so daß sie in WAPRO 4.04./3 gemeinsam behandelt werden konnten. Die hierfür aufgestellten Beständigkeitsregeln gelten für alle praktisch möglichen Sickerwassergefälle und bringen vor allem die Bedingung der geometrischen Unpassierbarkeit des maßgebenden Porendurchmessers des größeren Erdstoffes durch den maßgebenden Korndurchmesser des feineren Erdstoffes zum Ausdruck. Daher kann man die Erosionsregeln nach WAPRO 4.04./3 auch für alle anderen Typen verwenden, wenn die Filter unabhängig vom Sickerwassergefälle verformungsbeständig sein sollen. Bei bekanntem maximalen Sickerwassergefälle im Basiserdstoff - feinerer Erdstoff - Index $I - J_{I,max}$ können Filter, die einer Kontakterosion nach Typ 2/2, 3/2, 2/3 und 3/3 unterliegen würden, jedoch bedeutend sparsamer bemessen werden.

Die Kontakterosion der Typen 2/2 (Bild 2) und 3/2 sowie der Typen 2/3 und 3/3 (Bild 3) unterscheiden sich nicht wesentlich. Sie können daher jeweils gemeinsam behandelt werden.

Im Wasserbau verstehen wir unter Filtern solche Stoffe, die:

- eine ständige ausreichende Entwässerung des zu schützenden Materials ermöglichen, d.h. sie dürfen nicht unzulässig kolmatieren,
- je nach den praktischen Erfordernissen die Kontaktsuffosion oder Kontakterosion verhindern und
- selbst praktisch suffosionssicher sind.

Die Filterbemessung wird nach folgenden Filterregeln vorgenommen:

- Filterregeln für ausreichende Wasserdurchlässigkeit -
Kurzbezeichnung: Durchlässigkeitsregeln, die auch die Möglichkeit der Kolmation der Filter bei suffosionsgefährdeten Basiserdstoffen berücksichtigen müssen (siehe WAPRO 4.04./3).
- Filterregeln für die Sicherheit gegen Kontakterosion -
Kurzbezeichnung: Erosionsregeln, wobei die verschiedenen Typen der Kontakterosion und die Art des Basiserdstoffes zu unterscheiden sind (siehe WAPRO 4.04./3 + 5).
- Regeln, mit denen die Suffosionsbeständigkeit des Filters selbst und die Sicherheit gegen Kontaktsuffosion überprüft wird -
Kurzbezeichnung: Suffosionsregeln (siehe WAPRO 4.04./2).

Für die Filterstabilität werden 3 Stufen angegeben:

- stabil, wenn der Filter sowohl gegen Kontaktterrosion als auch gegen Kontaktsuffosion sicher ist.
- bedingt stabil, wenn der Filter zwar die Kontaktterrosion verhindert, aber eine Kontaktsuffosion noch möglich ist.
- instabil, wenn der Filter keine Sicherheit gegen Kontaktsuffosion bietet.

In diesem Sinne garantieren die Erosionsregeln dieses Werkstandards stabile Filter, wenn der Basiserdstoff suffosionssicher ist, oder bedingt stabile Filter, wenn ein suffosionsgefährdeter Basiserdstoff vorliegt.

Die erste Aufgabe jeder Filterbemessung ist daher die Untersuchung der Suffosionssicherheit des Basiserdstoffes. Ist sie gegeben, wird nach diesem Werkstandard verfahren. Ist der Basiserdstoff dagegen suffosionsgefährdet und übersteigt das vorhandene Sickerwassergefälle dasjenige für den jeweils vorhandenen Filtertyp kritische Gefälle für die Suffosion, so muß nach praktischen Gesichtspunkten entschieden werden, ob ein stabiler oder bedingt stabiler Filteraufbau notwendig ist. Im ersten Fall ist der Filter nach den Regeln für Kontaktsuffosion zu bemessen (siehe WAPRO 4.04./2). Im zweiten Fall kann wiederum nach den folgenden Regeln für Kontaktterrosion gearbeitet werden. Es ist selbstverständlich, daß als Filtererdstoff nur suffosionsbeständige Materialien verwendet werden dürfen. Daher ist die zweite Aufgabe jeder Filterbemessung die Untersuchung der Suffosionssicherheit des vorgesehenen Filtererdstoffes. Ist sie nicht gegeben, darf das Material nicht verwendet werden.

2. Bedingungen der Kontaktterrosion

Um Gesetzmäßigkeiten der Kontaktterrosion erkennen und wenn möglich mathematisch formulieren zu können, ist es zunächst erforderlich, die Wirkungen der Kontaktterrosion zu studieren und die Einflußfaktoren zu kennzeichnen, die eine Kontaktterrosion fördern oder behindern. Erst dann können Sicherheitskriterien gegen das Auftreten der Kontaktterrosion formuliert werden.

2.1. Wirkungen und Einflußfaktoren

Im Abschnitt 1. wurde bereits festgestellt, daß bei der Kontaktterrosion die Körner fast aller Fraktionen des feineren Erdstoffes an der Kontaktfläche mit dem gröberen Erdstoff in Bewegung geraten und in den Porenkanälen des gröberen Erdstoffes weitertransportiert werden - Suffosion in diesem "neuen" Erdstoff -. Die Kontaktterrosion bewirkt daher die fast völlige Zerstörung des feineren Erdstoffes. Wie in Bild 2 und 3 angedeutet ist, erfolgt diese Zerstörung im allgemeinen in Form einer örtlichen, rückschreitenden, inneren Erosion im feinen Erdstoff, die letztendlich einen Erosionsbruch des gesamten Erdkörpers verursacht. Dagegen führt eine flächenhafte Kontaktterrosion zur fortschreitenden Dezimierung des feineren Erdstoffes und damit bei der Kontaktterrosion Typ 2/2 und 3/2 zur flächenhaften und bei der Kontaktterrosion Typ 2/3 und 3/3 zur örtlichen Setzung des Erdkörpers mit allen sich daraus ergebenden Folgen. Während die Kontaktsuffosion unter bestimmten bautechnischen Bedingungen und bis zu einem gewissen Masseprozentatz der ausspülbaren Teilchen (siehe WAPRO 4.04./2) noch als zulässig angesehen werden kann, ist die Kontaktterrosion unter allen Umständen durch entsprechend projektierte Filter zu verhindern.

Die Kontaktterrosion bewirkt aber auch eine Kolmation des gröberen Erdstoffes. Dies führt in einem sich erweiternden Bereich desselben zur:

- Veränderung seiner Kornzusammensetzung sowie unter Umständen der Scherhaftfestigkeitsparameter Kohäsion und innerer Reibungswinkel,
- Erniedrigung des Porenvolumens, des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes und des Sickerwasserdurchflusses,
- Erhöhung der Dichte, des Ungleichförmigkeitsgrades und des Sickerwassergefälles sowie schließlich zur
- Aufhebung der Entwässerungsfunktion des Filters und des ursprünglich vorhandenen Gleichgewichtszustandes im Sickerwasserströmungskraftfeld.

Die durch Kontaktterrosion bewirkte Zerstörung des Erdkörpers wird also nicht nur durch die innere Erosion oder flächenhafte Dezimierung des feineren Erdstoffes, sondern auch durch die Veränderung der bodenmechanischen und hydraulischen Eigenschaften des gröberen Erdstoffes verursacht.

Die Kontakterosion der vom Sickerwassergefälle unabhängigen Typen wird bei nichtbindigen Erdstoffen von folgenden Erdstoffparametern beeinflusst:

Basiserdstoff = feinerer Erdstoff - Index I - :

- Kornverteilungslinie mit den Kennwerten $d_{1,50}$ und U_I
- Kornform mit dem Formfaktor $F_{F,I}$
- Oberflächenrauigkeit der Körner mit dem Faktor $F_{R,I}$ und
- Lagerungsdichte mit dem Kennwert $D_{e,I}$.

Filtererdstoff = gröberer Erdstoff - Index II - :

- maßgebender Porendurchmesser $d_{p, \text{maßg.}, II}$ in Abhängigkeit von den Kennwerten $d_{II,50}$ und U_{II}
- Porenform in Abhängigkeit vom Kornformfaktor $F_{F,II}$
- Porenkanalrauigkeit in Abhängigkeit von Rauigkeitsfaktor der Körner $F_{R,II}$ und
- Lagerungsdichte mit dem Kennwert $D_{e,II}$.

Weitere Einflußfaktoren sind:

- Schlupfmaß zwischen maßgebendem Korndurchmesser des Basiserdstoffes und maßgebendem Porendurchmesser des Filtererdstoffes, gekennzeichnet durch den Faktor F_S , sowie
- bei Unbedenklichkeit einer gewissen Kolmation, die zulässige Kolmationstiefe t_k in Abhängigkeit von der Schichtdicke des Filters t .

Bei den vom Sickerwassergefälle abhängigen Typen der Kontakterosion kommen noch folgende Einflußfaktoren hinzu:

- Spannungszustand des Basiserdstoffes an der Kontaktfläche σ ,
- Winkel der inneren Reibung des Basiserdstoffes $\varphi_{S,I}$ und beim Übergang zu bindigen Erdstoffen auch die Kohäsion $c_{S,I}$
- Sickerwassergefälle im Basiserdstoff J_I
- Sickerwassergefälle im Filtererdstoff J_{II} - Suffosion oder Kolmation im Filtererdstoff -
- Möglichkeit des Auftretens konvektiver und lokaler Sickerwasserbeschleunigungen an Feldsingularitäten $\partial v / \partial s$ oder bei instationären Strömungsbedingungen $\partial v / \partial t$ sowie
- Auftreten von Erschütterungen des Erdkörpers, gekennzeichnet durch einen Faktor F_E .

2.2. Sicherheitskriterien

Die Kontakterosion der vom Sickerwassergefälle unabhängigen Typen wird bei nichtbindigen Erdstoffen überwiegend von geometrischen Einflußfaktoren bestimmt. In WAFRO 4.04./3 wurde daher ein geometrischer Sicherheitsgrad der Kontakterosion $\eta_{K,G}$ definiert, der auch im entsprechenden Entwurfsdiagramm enthalten ist. Die nach WAFRO 4.04./3 entworfenen Filter sind somit auch für die in diesem Werkstandard besprochenen Typen der Kontakterosion sicher, aber unökonomisch.

Die Kontakterosion der vom Sickerwassergefälle abhängigen Typen wird überwiegend von hydraulischen Einflußfaktoren bestimmt [2.7]. Bei diesen Typen muß für

$$\eta_{K,G, \text{vorh}} < \eta_{K,G, \text{erf}} \quad (1)$$

nicht notwendigerweise Kontakterosion auftreten. Man kann also einen zusätzlichen hydraulischen Sicherheitsgrad der Kontakterosion $\eta_{K,H}$ in folgender Form charakterisieren:

$$\eta_{K,H} = f \left[(\eta_{K,G})^d ; (\sigma)^b ; (\varphi_{S,I})^f ; (c_{S,I})^g ; (J_I)^h ; (J_{II})^i ; \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)^l ; \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)^k ; (F_E)^m \right] \quad (2)$$

Die Kontakterosion der vom Sickerwassergefälle abhängigen Typen ist nach dieser Darstellung auch bei $\eta_{K,G, \text{vorh}} < \eta_{K,G, \text{erf}}$ nicht möglich, wenn

$$\eta_{K,H, \text{vorh}} \geq \eta_{K,H, \text{erf}} \quad (3)$$

ist.

Geometrische Sicherheit gegen Kontakterosion ist nach WAFRO 4.04./3 gegeben, wenn

$$A_{50, \text{vorh}} = \frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq \frac{f_1 (U_I)}{F \cdot f_2 (U_{II}) \cdot \eta_{K,G, \text{erf}}} = A_{50, \text{zul}} \quad (4)$$

wird.

Gl. (4) findet seinen Ausdruck im entsprechenden Entwurfsdiagramm (siehe WAPRO 4.04./3, Bild 2), wonach das zulässige Abstandsverhältnis $A_{50, \text{zul}}$ in Abhängigkeit von den Ungleichförmigkeitsgraden des Basiserdstoffes U_I und des Filtererdstoffes U_{II} bestimmt werden kann.

Bei der Bestimmung der hydraulischen Sicherheit gegen Kontakterosion gelingt es noch nicht, alle Einflußfaktoren der Gl. (2) zahlenmäßig zu bestimmen und in einer Bedingungsgleichung analog Gl. (4) zusammenzufassen. Bei den bisherigen Forschungen wurden die Einflußfaktoren σ und J_{II} nicht berücksichtigt, die Einflußfaktoren $\gamma_{S,I}$ und $c_{S,I}$ fanden meistens nur indirekt über $d_{I,50}$ Eingang in die Untersuchungen und die Einflußfaktoren $\partial v / \partial S$, $\partial v / \partial t$ und F_S wurden höchstens qualitativ eingeschätzt. Aber auch die in $\eta_{K,G}$ enthaltenen Faktoren A_{50} , U_I und U_{II} sowie die in $\eta_{K,H}$ enthaltenen Faktoren J_I und $d_{I,50}$ können nicht gleichzeitig berücksichtigt werden. Die Bedingung für die hydraulische Sicherheit gegen Kontakterosion nach Gl. (3) erscheint in der Literatur meist in folgender Form:

$$\eta_{K,H, \text{vorh}} = \frac{J_{I, \text{krit}}}{J_{I, \text{vorh}}} \geq \eta_{K,H, \text{erf}} \quad (5)$$

Das kritische Sickerwassergefälle $J_{I, \text{krit}}$ wird dabei in folgenden Abhängigkeiten dargestellt:

Nach [3_7]: $J_{I, \text{krit}} = f(A_{50}) \quad (6)$

Dabei werden gleichförmige Erdstoffe I und II vorausgesetzt und der Einfluß von $d_{I,50}$ unberücksichtigt gelassen.

Nach [4_7] und [2_7]: $J_{I, \text{krit}} = f(A_{50}; d_{I,50}) \quad (7)$

Während [4_7] gleichförmige Erdstoffe voraussetzen, erweitert [2_7] die Beziehung auch auf ungleichförmige Erdstoffe.

[2_7] berücksichtigte auch erstmals die Normalspannung σ , zunächst allerdings bei konstantem $d_{I,50}$ und gleichförmigen Erdstoffen. Dann gilt:

$$J_{I, \text{krit}} = f(A_{50}; \sigma) \quad (8)$$

Ziel weiterer Forschungen ist es, zunächst die funktionelle Abhängigkeit für

$$J_{I, \text{krit}} = f(A_{50}; d_{I,50}; \sigma; U_I; U_{II}) \quad (9)$$

zu finden.

Das Sickerwassergefälle im Filtererdstoff $U_{II, \text{vorh}}$ hat vor allem Einfluß auf den zeitlichen Ablauf und die Intensität der Kontakterosion. Sein Einfluß ist daher nur bei der Bilanzierung einer einmal eingetretenen Kontakterosion zu berücksichtigen.

Wegen der noch unvollständigen Erforschung des kritischen Sickerwassergefälles $J_{I, \text{krit}}$ nach den Gl. (6) bis (8) vor allem aber wegen der Schwierigkeiten bei der Bestimmung des vorhandenen Sickerwassergefälles $J_{I, \text{vorh}}$ schlägt [2_7] vor, den erforderlichen hydraulischen Sicherheitsgrad zunächst wie folgt festzusetzen:

$$\eta_{K,H, \text{erf}} = 1,5. \quad (10)$$

3. Theoretische und empirische Grundlagen

Bevor die Erosionsregeln für die Kontakterosion der vom Sickerwassergefälle abhängigen Typen angegeben werden, sollen zunächst die theoretischen und empirischen Grundlagen kritisch betrachtet werden.

3.1. Kontakterosion Typ 2/2 und 3/2

In der Literatur wird von den genannten zwei Typen überwiegend die Kontakterosion Typ 2/2 behandelt. Die hydraulischen Randbedingungen sind hier strenger als bei der Kontakterosion Typ 3/2. Man kann daher beide gemeinsam behandeln und spezielle Erleichterungen für den Typ 3/2 besonders vermerken.

3.1.1. Unbelastete Filterkombinationen

Allgemein kann festgestellt werden, daß die Bereiche des Basiserdstoffes an der Kontaktfläche (siehe Bild 2), die der Pore eines unbelasteten Filtererdstoffes gegenüberliegen, einen örtlichen hydraulischen Grundbruch erleiden können, genauso als ob sie sich an der freien Oberfläche des Erdkörpers befinden würden. Hierfür gilt die von [5] angegebene Beziehung:

$$J_{I,krit}^i = \frac{(1-n)(\gamma_B - 1)}{\gamma_w} = \frac{\gamma_B}{\gamma_w} \quad (11)$$

die aus der Bedingung für das Gleichgewicht zwischen dem unter Auftrieb stehenden Erdkörper und der Sickerwasserströmungskraft in dem gleichen Erdkörper leicht abgeleitet werden kann. $J_{I,krit}^i$ repräsentiert dabei das Sickerwassergefälle unmittelbar an der Kontaktfläche. Zunächst soll angenommen werden, daß das Gefälle an der Kontaktfläche $J_{I,krit}^i$ dem mittleren Gefälle im Basiserdstoff J_I entspricht. Setzt man in Gl. (11) noch $\gamma_B = 2,65 \text{ p/cm}^3$ und $n \approx 0,4$, was für locker gelagerte, gleichförmige, nichtbindige Erdstoffe annähernd zutrifft, so ergibt sich

$$J_{I,krit}^i \approx 1. \quad (11')$$

Nach [6,7] beträgt die Reinwichte rolliger nichtbindiger Erdstoffe $2,58 \leq \gamma_B \leq 2,70 \text{ p/cm}^3$ und nach [7,7] der Porenanteil nichtbindiger Erdstoffe $0,48 \geq n \geq 0,25$. Das kritische Sickerwassergefälle nach Gl. (11) liegt demnach in den Grenzen:

$$0,82 \leq J_{I,krit}^i \leq 1,27. \quad (11'')$$

Nun kann aber das Austrittsgefälle J_I^i im Basiserdstoff unmittelbar an der Kontaktfläche zum Filtererdstoff durchaus größer sein, als das mittlere Gefälle J_I (siehe Bild 4). Insbesondere dann, wenn der Porenanteil n_I des Basiserdstoffes sehr groß und der Porenanteil des Filtererdstoffes n_{II} sehr klein ist, ergibt sich an der Kontaktfläche eine Stromröhrenkonzentration der Sickerwasserströmung etwa nach Bild 4.

Die von Ovodov (zitiert bei [8,7]) stammende Beziehung:

$$J_{I,krit}^i = \kappa \cdot \frac{\gamma_B}{\gamma_w} = \kappa \cdot J_{I,krit}^i \quad (12)$$

mit $0,7 \leq \kappa \leq 0,8$ scheint unter Berücksichtigung dieses Effekts entstanden zu sein. Jedenfalls entsprechen die mit Gl. (12) erhaltenen kritischen Sickerwassergefälle am besten den Erfahrungswerten. Mit den der Gl. (11'') zu Grunde gelegten Werten für γ_B und n ergibt sich nunmehr folgender Schwankungsbereich für das mittlere kritische Sickerwassergefälle für örtlichen hydraulischen Grundbruch des Basiserdstoffes bei unbelasteten Filterkombinationen:

$$0,57 (0,65) \leq J_{I,krit}^i \leq 0,89 (1,02) \quad (12')$$

Etwas ausführlicher hat sich [9,7] mit dem Effekt der Stromröhrenkonzentration an der Kontaktfläche zweier unterschiedlicher Erdstoffe beschäftigt. Er untersuchte das Anwachsen des örtlichen Austrittsgefälles J_I^i beim Übergang von einem bindigen Erdstoff zu einem Kiesfilter. Das Ergebnis seiner Laborversuche und der Versuche an Elektroanalogiemodellen formulierte er wie folgt:

$$J_I^i = \frac{J_I}{n_{II}} \quad (13)$$

Da nun $J_{I,krit}^i$ nach Gl. (11) dem J_I^i nach Gl. (13) entsprechen muß, könnte man bei bindigen Basiserdstoffen anstelle der wenig begründeten Gl. (12) die folgende durch Versuche belegte Beziehung formulieren:

$$J_{I,krit}^i = n_{II} \cdot \frac{\gamma_B}{\gamma_w} \quad (14)$$

Bei nichtbindigen Basiserdstoffen ist Gl. (14) aber zweifellos unrichtig. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, in welcher Weise der die Stromröhrenkonzentration berücksichtigende Faktor κ bei nichtbindigen Basiserdstoffen von n_{II} und auch von n_I abhängt. Dabei scheint festzustehen, daß $\kappa \sim n_{II}/n_I$ ist. Da n_{II} fast immer kleiner als n_I ist, meistens aber nur geringfügig kleiner, erhält man nämlich aus obiger Proportion annähernd die von Ovodov angegebenen Zahlenwerte für κ .

Man muß aber auch bemerken, daß die Gl. (11) und (12) nur richtige Ergebnisse liefern können, wenn im Basiserdstoff keine bevorzugten Sickerwege vorhanden sind und der Filtererdstoff die Kontaktfläche homogen berührt.

3.1.2. Belastete Filterkombinationen

Wird eine Filterkombination so stark belastet, daß ein Anheben des Filtererdstoffes durch den insgesamt im Basiserdstoff wirkenden, vertikal nach oben gerichteten Sickerwasserströmungsdruck unmöglich ist, so kann das vorhandene Sickerwassergefälle $J_{I,vorh}$ größer als $J_{I,krit}$ nach Gl. (12) werden, ohne daß ein hydraulischer Kontaktbruch erfolgt. Die erforderliche Belastung kann einmal durch genügende Schichtdicke t des Filtererdstoffes oder durch äußere Kräfte x erzeugt werden. Sie muß jedenfalls eine Normalspannung an der Kontaktfläche in folgender Größe erzeugen:

$$\sigma \geq \gamma_w \cdot t \cdot J_{I,vorh} \quad (15)$$

Diese Belastung bewirkt, daß die gegenseitige Verspannung der Körner des Basiserdstoffes an der Kontaktfläche zunächst erhalten bleibt. Bedingung ist wiederum, daß der Filtererdstoff homogen auf der Oberfläche des Basiserdstoffes verteilt ist, da es sonst in weniger belasteten Bereichen zur Auflockerung des Basiserdstoffes und zur Bildung bevorzugter Sickerwege kommen kann.

Das kritische Sickerwassergefälle $J_{I,krit}$ für den hydraulischen Kontaktbruch im Basiserdstoff, den Beginn der Kontaktzerosion Typ 2/2 und 3/2, ist unter diesen Bedingungen in erster Linie vom Verhältnis des maßgebenden Porendurchmessers des Filtererdstoffes zum maßgebenden Korndurchmesser des Basiserdstoffes, also dem Abstandsverhältnis A_{50} , abhängig. Nicht geringen Einfluß haben aber auch die absolute Größe der Spannungen im Basiserdstoff in der Nähe der Kontaktfläche, die absolute Korngröße des Basiserdstoffes sowie andere bodenphysikalische Kennwerte der beiden sich berührenden Erdstoffe.

3.1.2.1. Abhängigkeit des kritischen Sickerwassergefälles $J_{I,krit}$ vom Abstandsverhältnis $A_{50,vorh}$

Nach [3_7] ist die kritische Porengeschwindigkeit $v_{p,krit}$ von der Porengeschwindigkeit $v_{p,0}$ bei der die unter Auftrieb stehenden Teilchen durch die Sickerwasserströmungskraft angehoben werden, und vom Verhältnis $(d_I/d_{II})^2$ abhängig:

$$v_{p,krit} = v_{p,0} + f \cdot \left(\frac{d_I}{d_{II}} \right)^2, \quad (16)$$

wobei allgemein gelten soll:

$$f \cdot \left(\frac{d_I}{d_{II}} \right)^2 = f_1 \cdot \left(\frac{d_I}{d_{II}} \right) + f_2 \left(\frac{d_I}{d_{II}} \right)^2 + f_3 \left(\frac{d_I}{d_{II}} \right)^3 + \dots \quad (16a)$$

In erster Näherung setzte Isbaß:

$$v_{krit} = v_0 + f_1 \left(\frac{d_I}{d_{II}} \right)^2 \quad (17)$$

Er benutzte beim Übergang von Gl. (16) auf Gl. (17) nur das 1. Glied der Reihe Gl. (16a) und führte gleichzeitig statt der Porengeschwindigkeit v_p die Sickergeschwindigkeit v ein.

Kozlova bestimmte die Konstanten v_0 und f_1 , indem eine Reihe von Laborversuchen ausgewertet wurden. Auf Grund der Versuchsergebnisse ergab sich:

$$v_{krit} = 0,26 d_I^2 \left(1 + 1000 \frac{d_I}{d_{II}^2} \right) \text{ [cm/s]} \quad (18)$$

mit d_I und d_{II} in [mm]. Bei ungleichförmigen Erdstoffen sollen d_I und d_{II} durch die sogenannten "kontrollierenden" Korndurchmesser $d_{I,60}$ und $d_{II,60}$ ersetzt werden. Für diesen Fall schreibt Kozlova:

x) -die äußere Kräfteintragung darf dabei aber die Entwässerungswirkung des Filters nicht beeinträchtigen -

$$v_{\text{krit}} = 0,26 \cdot d_{I,60}^2 \left(1 + 1000 \frac{d_{I,60}^2}{d_{II,60}^2} \right) \quad (18')$$

Isbaß erhielt auf Grund eigener Versuche eine Beziehung für $J_{I,\text{krit}}$ in der Form:

$$J_{I,\text{krit}} = 1 + 1000 \cdot \frac{d_{I,60}^2}{d_{II,60}^2} \quad (19)$$

und forderte einen Sicherheitsgrad $\eta_{K,H,\text{erf}} = 1,5$.

Es ist leicht einzusehen, daß das Verhältnis $d_{II,60}/d_{I,60}$ bei relativ gleichförmigen Basis- und Filtererdstoffen durch das Abstandsverhältnis $A_{50} = d_{II,50}/d_{I,50}$ ersetzt werden kann. Dann kann man schreiben:

$$J_{I,\text{krit}} = 1 + \frac{1000}{A_{50}^2}, \quad (20)$$

und mit dem von Isbaß für erforderlich gehaltenen Sicherheitsgrad ergibt sich:

$$J_{I,\text{sul}} = 0,66 + \frac{667}{A_{50}^2} \quad (20')$$

Die Beziehungen für $J_{I,\text{krit}}$ und $J_{I,\text{sul}}$ nach den Gl. (20) und (20') wurden im Bild 5 grafisch aufgetragen. Zur Erläuterung der Grafik wird noch vermerkt, daß das geometrisch sichere Abstandsverhältnis für $U_I = U_{II} \approx 2$ $A_{50,\text{sul}} = 10$ beträgt. Die Kurven auf Bild 5 weisen demzufolge bei $A_{50} = 10$ eine Unstetigkeitsstelle auf. Sie besagt, daß für $A_{50} \leq 10$ der Einfluß der hydraulischen Parameter faktisch bedeutungslos ist.

3.1.2.2. Abhängigkeit des kritischen Sickerwassergefälles $J_{I,\text{krit}}$ vom Abstandsverhältnis $A_{50,\text{vorh}}$ und der absoluten Korngröße des Basiserdstoffes d_I

Im Bild 5 sind auch einige Versuchswerte von [2_7] enthalten. Der Vergleich zeigt, daß zwar die Masse der Versuchswerte oberhalb der Kurven für J_I liegt, jedoch auch eine ganze Anzahl unterhalb derselben. Analysiert man die einzelnen Versuchsergebnisse hinsichtlich der absoluten Korngröße des Basiserdstoffes, wie im Bild 5 geschehen, so erkennt man den bedeutenden Einfluß der absoluten Korngröße. Zunächst muß also festgestellt werden, daß Gl. (20) den physikalischen Sachverhalt nicht richtig beschreibt.

[2_7] beschritt daher folgenden Weg. Abweichend vom Vorschlag von Isbaß wird, ausgehend von Gl. (16), die kritische Sickerwassergeschwindigkeit wie folgt erhalten:

$$v_{p,\text{krit}} \cdot n = v_{p,0} \cdot n + f_1 \cdot n \cdot \left(\frac{d_I^2}{d_{II}^2} \right)$$

$$v_{\text{krit}} = v_0 + f_1 \cdot n \left(\frac{d_I^2}{d_{II}^2} \right) \quad (21)$$

und das kritische Sickerwassergefälle zu:

$$\frac{v_{\text{krit}}}{k} = \frac{v_0}{k} + \frac{f_1 \cdot n}{k} \left(\frac{d_I^2}{d_{II}^2} \right)$$

$$J_{I,\text{krit}} = J_{I,0} + \frac{f_1 \cdot n}{k \cdot A_{50}^2} \quad (22)$$

bestimmt.

Unter Voraussetzung der Gültigkeit des Darcy-Gesetzes, auch noch für die kritische Geschwindigkeit,

$$v_{\text{krit}} = k \cdot J_{\text{krit}} \quad (23)$$

läßt sich der Durchlässigkeitsbeiwert k nach der empirischen Beziehung von [11_7] in Abhängigkeit von d_{10} darstellen:

$$k = 100 \cdot C \cdot d_{10}^2, \quad (24)$$

mit k [cm/s] und d_{10} [mm].+ Dabei ist der Beiwert C eine Funktion des Ungleichförmigkeits-

grades U nach Bild 6. Für $U_I = U_{II} \approx 1$ ergibt sich $C = 120 \cdot 10^{-4}$ und $k = 1,2 \cdot d_{10}^2$ [cm/s²] mit d_{10} [mm]. Somit erhält Gl. (22) folgende Form:

$$J_{I,krit} = J_{I,0} + \frac{f_1 \cdot n}{1,2 \cdot d_{I,10}^2 \cdot A_{50}^2} \quad (22')$$

Für das Sickergefälle $J_{I,0}$ kann offenbar nach Gl. (12) näherungsweise: $J_{I,0} = \lambda \cdot \frac{\gamma_A}{\gamma_w}$ gesetzt werden, und es wird

$$J_{I,krit} = \lambda \cdot \frac{\gamma_A}{\gamma_w} + \frac{f_1 \cdot n}{1,2 \cdot d_{I,10}^2 \cdot A_{50}^2} \quad (22'')$$

[2] hat den Faktor $(f_1 \cdot n)/1,2$ in Gl. (22'') durch Laborversuche bestimmt und erhielt:

$$\frac{f_1 \cdot n}{1,2} \approx 6. \quad (25)$$

Führt man in Auswertung von Gl. (12') noch

$$J_{I,0} \approx 0,66 \quad (12'')$$

ein, so erhält man schließlich:

$$J_{I,krit} \approx 0,66 + \frac{6}{d_{I,10}^2 \cdot A_{50}^2}; \quad (d_{I,10} \text{ in mm}). \quad (22''')$$

Gl. (22''') wurde in der folgenden Tabelle für verschiedene $d_{I,10}$ und A_{50} ausgewertet und in Bild 7 grafisch dargestellt. Es sei wiederum vermerkt, daß die Kurven auf Bild 7 bei $A_{50} = 4$ eine Unstetigkeitsstelle aufweisen. $A_{50} = 4$ ist das für $U_I = U_{II} \approx 1$ sichere geometrische Abstandsverhältnis. Bei kleineren Abstandsverhältnissen ist der Einfluß der hydraulischen Parameter faktisch bedeutungslos.

Tabelle 1: Auswertung von Gl. (22''') für $J_{I,krit}$

$A_{50} \backslash d_{I,10}$	4	6	8	10	14	20	30	40	50	60	80	100
2 mm	0,75	0,70	0,68	0,675	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
0,6 mm	1,70	1,12	0,92	0,83	0,75	0,70	0,69	0,68	0,67	0,66	0,66	0,66
0,2 mm	10	4,8	3,0	2,15	1,42	1,03	0,83	0,77	0,72	0,71	0,69	0,68
0,06 mm	104	47	26	17	9	4,8	2,52	1,75	1,33	1,12	0,90	0,83
0,02 mm	935	417	234	150	77	38	17	9,9	6,6	4,8	3,0	2,1

Die Versuchsergebnisse von Ziem ordnen sich vollständig in die entsprechenden Felder des Diagramms auf Bild 7 ein, auch diejenigen, für die U_I und $U_{II} \neq 1$ ist. Dies ist hinsichtlich U_I sicherlich richtig bis $U_I = 5$, da nach WAPRO 4.04./3 ja bereits die geometrisch zulässigen Abstandsverhältnisse für $U_I \leq 5$ mit wachsendem U_I ansteigen.

Für U_{II} ist das selbstverständlich auch richtig, da mit wachsendem U_{II} die Porengröße $d_{p,II}$ schnell abnimmt. Ohne weiteres kann daher die Gültigkeit der Kurven des Bildes 7 wie folgt angegeben werden:

- $U_I \leq 5$,
- U_{II} beliebig,
- Lagerungsdichte beliebig,
- Kornform des Filtererdstoffes kugelförmig, abgerundet,
- Belastung $\sigma = \gamma_w \cdot t \cdot J_{I,vorn}$

Wegen der Instabilität von Filterkombination des Typs 2/2 und 3/2 bei dynamischen Belastungen muß weiter gefordert werden:

Die Erdstoffkombination darf nicht durch dynamische Kräfte, z.B. Vibrationen, Stoßbelastung, belastet werden. Treten sie auf, so können ohne zusätzliche Laborversuche, die die tatsächliche Belastung simulieren müssen, nur die geometrisch sicheren Abstandsverhältnisse nach WAPRO 4.04./3 zugelassen werden.

12_7 hat versucht, eine Beziehung für $J_{I,krit}$ aus Gl. (18') von Kozlova abzuleiten. Er führte aber $k = d_{10}^2$ nach Hazen und $U \approx 1$ ein. Damit erhielt er:

$$J_{I,krit} = 0,26 \left(1 + 1000 \frac{d_{I,60}^2}{d_{II,60}} \right) \quad (26)$$

Wegen $U_I = U_{II} \approx 1$ ist natürlich $d_{II,60}/d_{I,60} = d_{II}/d_I = A$ und es wird:

$$J_{I,krit} = 0,26 + \frac{260}{A^2} \quad (26')$$

Gl. (26') wurde ebenfalls im Bild 5 grafisch dargestellt. Wie nicht anders zu erwarten war, gilt sie ebensowenig wie Gl. (20). Bei Basiserdstoffen aus Mittel- und Grobsand werden die danach erhaltenen kritischen Gefälle $J_{I,krit}$ im Laborversuch nicht erreicht.

4_7 untersuchten den Einfluß der absoluten Korngröße des Basiserdstoffes und erhielten folgende empirische Beziehung, die auf Bild 8 grafisch dargestellt ist:

$$J_I = f(A_{50}; d_I) \quad (27)$$

Die verwendeten Erdstoffe hatten einen Ungleichförmigkeitsgrad von $U_I = U_{II} \approx 1,5$. Da die Kurven auf Bild 8 von der Gl. (26') repräsentierenden Kurve auf Bild 5 eingeschlossen werden, folgerten die Autoren, daß Gl. (26') mit der Sicherheit $\eta = 1$ für den hydraulischen Kontaktbruch gleichförmiger Erdstoffe angewendet werden könnte. Dieser Schlußfolgerung widerspricht 2_7. Seine Versuche zeigten, daß die Kurven des Bildes 8 durchweg zu große Gefälle ergeben, wie auch ein Vergleich mit dem Diagramm auf Bild 7 zeigt. Zweck-Davidenkoff haben offenbar das Bruchgefälle angegeben, welches bei den Versuchen von Ziems im Mittel 1,5 bis 2mal so hoch war als das kritische Gefälle, bei dem die ersten Kornbewegungen in der Kontaktfläche beobachtet wurden. Bei Verwendung des Bildes 8 für die Entwurfspraxis im Filterbau mußte daher ein Sicherheitsgrad von etwa $\eta = 3$ gefordert werden.

Sehr interessant ist aber die Feststellung von Zweck-Davidenkoff, daß dynamische Beanspruchungen das kritische Gefälle im Basiserdstoff ganz erheblich reduzieren. Dies stimmt mit den Beobachtungen von Ziems vollkommen überein und führte zur Formulierung der 6. Randbedingung für die Gültigkeit des Diagramms auf Bild 7.

3.1.2.3. Abhängigkeit des zulässigen Abstandsverhältnisses $A_{50,zul}$ vom Ungleichförmigkeitsgrad des Filtererdstoffes U_{II} und der absoluten Korngröße des Basiserdstoffes d_I bei konstantem Sicherwassergefälle $J_{I,vorh} = 1,5$

Bei der Besprechung des Gültigkeitsbereiches des Diagramms auf Bild 7 wurde bereits darauf hingewiesen, daß mit wachsendem Ungleichförmigkeitsgrad des Filtererdstoffes entweder die zulässigen Gefälle bei gleichem Abstandsverhältnis oder die zulässigen Abstandsverhältnisse bei gleichem Gefälle im Basiserdstoff steigen können, da die maßgebende Porengröße schnell kleiner wird. Erste Hinweise auf diese Tatsache enthalten die Forschungsergebnisse von 7_7 (siehe Bild 9). Sie gibt auf Grund zahlreicher Versuche eine empirische Beziehung an, in welcher der Ungleichförmigkeitsgrad der Filtererdstoffe U_{II} mit eingeht:

$$A_{50} = f(U_{II}) \quad (28)$$

Das Diagramm auf Bild 9 soll für folgende Randbedingungen gelten:

- Die Belastung der Filterkombination muß so groß sein, daß ein hydraulischer Grundbruch im Ganzen unmöglich ist, d.h. $\bar{\sigma} \approx \gamma_w \cdot t \cdot J_{I,vorh}$ nach Gl. (15).
- $U_I < 10$ und $U_{II} < 10$
- $J_{I,vorh} \approx 1,5$ bis $2,0$

2_7 hat seine Versuche ebenfalls in der von Istomina gewiesenen Richtung ausgewertet (siehe Bild 10) und kommt zu etwas anderem, vor allem aber detaillierten Ergebnissen. In diesem Diagramm ist zunächst einmal das geometrisch sichere Abstandsverhältnis $A_{50,zul} = f(U_{II})$ für $U_I = 1$, $U_I = 2$ und $U_I = 5$ eingetragen worden. Es ist nun leicht einzusehen, daß diese Abstandsver-

hältnisse erheblich vergrößert werden können, wenn eine Filterkombination des Typs 2/2 oder 3/2 vorliegt, sofern die Sickerwasserströmung $J_{I, \text{vorh}}$ im Basiserdstoff einen bestimmten kritischen Wert nicht überschreitet.

Ist $J_{I, \text{vorh}} \leq 0,66$, so kann praktisch jedes Abstandsverhältnis A_{50} zur Anwendung gelangen, wie im Abschnitt 3.1.1. nachgewiesen wurde. Voraussetzung ist dabei allerdings, daß der Filterstoff die Kontaktfläche homogen berührt, im Basiserdstoff keine bevorzugten Sickerwege vorhanden sind und die Kombination nicht durch dynamische Kräfte beansprucht wird. Die Versuchspunkte wurden entsprechend dem verwendeten Basiserdstoff gekennzeichnet,

x - Grobsand	0,6 bis 2,0 mm
□ - Mittelsand	0,2 bis 0,6 mm
+ - Feinsand	0,06 bis 0,2 mm
o - Grobschluff	0,02 bis 0,06 mm,

und dazu das kritische Gefälle $J_{I, \text{krit}}$ angegeben.

Diese Darstellung läßt erkennen, daß bei Grobsanden als Basiserdstoff mit Sicherheit nur das geometrische Abstandsverhältnis zulässig ist, wenn man als Grenzwert $J_{I, \text{vorh}} \leq 1,5$ wählt. Vorteilhaft können für kleinere Grenzwerte des Sickerwassergefälles $J_{I, \text{vorh}}$, z.B.: $J_{I, \text{vorh}} \leq 1$, etwas größere Abstandsverhältnisse erhalten werden.

Die vorliegenden Versuchsergebnisse reichen jedoch nicht aus, um hierfür eine empirisch gesicherte Beziehung angeben zu können.

Mit den vorliegenden Versuchsergebnissen läßt sich dagegen eine zuverlässige Aussage treffen, wenn Grobsand als Basiserdstoff ausgeschlossen wird. Die Kurve $d_I \approx 0,6$ mm wurde so entworfen, daß alle untersuchten Abstandsverhältnisse für Mittel-, Feinsande und Grobschluff mit $J_{I, \text{krit}} \leq 1,5$ oberhalb derselben zu liegen kommen. Damit wird zum Ausdruck gebracht, daß alle A_{50} -Werte unterhalb dieser Kurve mit der Sicherheit $\eta \approx 1$ zulässig sind, wenn $J_{I, \text{vorh}} \leq 1,5$ ist, und daß alle darüber liegenden A_{50} -Werte unsicher sind.

Aus Bild 7 ergibt sich, daß für Basiserdstoffe mit $U_I = U_{II} \approx 1$ und $d_I = 0,2$ mm bei $J_{I, \text{vorh}} \leq 1,5$ ein Abstandsverhältnis von $A_{50} \approx 13$ zulässig ist. Da das geometrisch sichere Abstandsverhältnis für $1 \leq U_I \leq 5$ nach WAFRO 4.04./3 mit wachsendem U_I ansteigt, konnte daher auch die Kurve $d_I \approx 0,2$ mm auf Bild 10 eingetragen werden, indem sie bei $U_{II} = 1$ mit $A_{50, \text{zul}} \approx 13$ beginnt und sich etwas ansteigend an die Kurve $d_I \approx 0,6$ mm anschmiegt. Es wäre wünschenswert, wenn durch weitere systematische Laborversuche der Bereich der Feinsande als Basiserdstoff noch weiter erforscht wird, da noch recht wenig Versuchsergebnisse für diese Erdstoffart vorliegen.

Schließlich ergibt sich aus Bild 7 auch das zulässige Abstandsverhältnis für Basiserdstoffe mit $U_I = U_{II} \approx 1$ und $d_I \approx 0,06$ mm. Man erhält für $J_{I, \text{krit}} = 1,5$ $A_{50, \text{zul}} \approx 45$. In Bild 10 ließ sich daher ebenso eine Kurve $d_I \approx 0,06$ mm eintragen, indem sie bei $U_{II} = 1$ mit $A_{50, \text{zul}} \approx 45$ beginnend an die Kurve für $d_I \approx 0,6$ mm anschmiegt wird. Im Gegensatz zur Kurve $d_I \approx 0,2$ mm ist die Kurve $d_I \approx 0,06$ mm wiederum besser durch Versuchswerte von Ziems belegt.

In Bild 10 ist also die funktionelle Abhängigkeit

$$A_{50, \text{zul}} = f(U_{II}; d_{I, 50}) \tag{29}$$

dargestellt.

Es gilt entsprechend dem Vorhergesagten für folgende Randbedingungen:

- Suffosionssicherer Basiserdstoff mit $U_I \leq 5$
- Suffosionssicherer Filtererdstoff mit $U_{II} \leq 20$
- $J_{I, \text{vorh}} \leq 1,5$
- Lagerungsdichte beliebig - die Versuche wurden überwiegend mit lockerster Lagerung durchgeführt
- Kornform des Filtererdstoffes kugelförmlich, abgerundet
- Kornform des Basiserdstoffes beliebig
- Belastung der Filterkombination $\sigma = \gamma_w \cdot t \cdot J_{I, \text{vorh}}$, wobei die Entwässerungswirkung durch die Lasteintragung nicht beeinträchtigt werden darf
- Keine dynamischen Belastungen der Filterkombination.

3.1.2.4. Abhängigkeit des kritischen Sickerwassergefälles $J_{I,krit}$ von der Normalspannung σ in der Kontaktfläche

[2,7 hat ferner den Einfluß der Normalspannung in der Kontaktfläche auf das kritische Sickerwassergefälle $J_{I,krit}$ untersucht. Bisher wurde als Basiserdstoff nur ein feinsandiger Grobschluff mit den Kennwerten: $d_{10} = 0,013$ mm, $d_{50} = 0,039$ mm, $d_{60} = 0,046$ mm und $U = 3,54$ verwendet. Dieser Erdstoff enthält ca. 70 % Schluffanteile, jedoch keine Korngrößen $< 2 \mu\text{m}$, ist also im Prinzip als nichtbindiger Erdstoff anzusprechen. Weitere Forschungen müssen daher als erstes den Einfluß des abnehmenden Schluffanteiles zu erfassen suchen.

Das Ergebnis der Versuche mit $A_{50} = 30,8$ ($U_{II} = 1,66$) ist auf Bild 11 und mit $A_{50} = 61,5$ ($U_{II} = 1,19$) auf Bild 12 grafisch dargestellt. In beiden Fällen nimmt das kritische Gefälle $J_{I,krit}$ mit größer werdender Normalspannung zunächst zu und strebt schließlich einem Grenzwert entgegen. Dieser Grenzwert wird mit wachsendem Abstandsverhältnis bei einem kleineren σ erreicht. Für $A_{50} = 30,8$ ist der Grenzwert bei $\sigma = 250$ p/cm² noch nicht erreicht, für $A_{50} = 61,5$ liegt er etwa bei $\sigma = 200$ p/cm² und bei $A_{50} = 238,4$ (siehe Tabelle 2) ist überhaupt keine Abhängigkeit des kritischen Gefälles $J_{I,krit}$ von der Normalspannung σ mehr vorhanden.

Tabelle 2:

Nr.	$d_{1,50}$	$d_{II,50}$	U_I	U_{II}	A_{50}	σ	$J_{I,krit}$	$J_{I,Bruch}$
Dim	mm	mm	-	-	-	p/cm ²	-	-
72						64	~1,1	~1,2
70	0,039	9,3	3,54	1,91	238,4	128	~0,9	~1,2
69						192	~1,1	~1,5
71						256	~1,0	~1,2

Eine Abhängigkeit des Bruchgefälles $J_{I,Bruch} = f(\sigma)$ von der Normalspannung konnte nur bei $A_{50} = 61,5$ registriert werden. Interessant ist ferner, daß das kritische und das Bruchgefälle für sehr große Abstandsverhältnisse - $A_{50} = 238,4$ - praktisch identisch sind, auch für mittlere Abstandsverhältnisse - $A_{50} = 61,5$ - sehr nahe beieinander liegen, aber bei kleinen Abstandsverhältnissen - $A_{50} = 30,8$ - im Laborversuch kaum erreicht werden können, obgleich die kritischen Gefälle bereits um ein Mehrfaches überschritten wurden.

Auf Bild 13 wurden die vorliegenden Versuchsergebnisse komplex ausgewertet. Damit konnte der Zusammenhang

$$J_{I,krit} = f(A_{50}; \sigma) \quad (30)$$

für den untersuchten feinsandigen Grobschluff als Basismaterial dargestellt werden. In der Grafik wurden die Versuchswerte für $A_{50} = 30,8$ und $A_{50} = 61,5$ zunächst geradlinig verbunden und bis zum geometrisch sicheren Abstandsverhältnis $A_{50} = 10$ bei $U_I = 3,5$ und $U_{II} \approx 1,5$ verlängert. Diesen Linien entspricht ein Sicherheitsgrad von $\eta \approx 1$ für den Bereich $30 \leq A_{50} \leq 60$ und $\eta > 1$ für $A_{50} < 30$.

Die gestrichelten Fortsetzungen der verschiedenen σ -Kurven geben den prinzipiellen Verlauf für $\eta \approx 1$ bei $A_{50} < 30$ wieder.

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Bei sehr feinkörnigen Erdstoffen ist eine Abhängigkeit des kritischen Sickerwassergefälles $J_{I,krit}$ im Basiserdstoff vom Spannungszustand in der Nähe der Kontaktfläche festgestellt worden. Bei stark schluffigen Feinsanden ist dieser Einfluß von nicht zu unterschätzender Bedeutung.
- Der Einfluß der Normalspannung auf das kritische Gefälle im Basiserdstoff $J_{I,krit}$ wächst mit abnehmendem Abstandsverhältnis.
- Das kritische Gefälle $J_{I,krit}$ im Basiserdstoff erreicht einen Grenzwert, der für wachsendes Abstandsverhältnis bei immer kleinerer Normalspannung σ erhalten wird.
- Das Bruchgefälle im Basiserdstoff $J_{I,Bruch}$ stimmt für große Abstandsverhältnisse mit dem kritischen Gefälle $J_{I,krit}$ praktisch überein. Für abnehmende Abstandsverhältnisse steigt das

Bruchgefälle sehr viel schneller als das kritische Gefälle bei gleicher Normalspannung.

- Offenbar ist bei sehr kleinen Abstandsverhältnissen das Bruchgefälle im Basiserdstoff $J_{I, \text{Bruch}}$ auch vom Gefälle im Filtererdstoff J_{II} abhängig. Dies folgt aus der Tatsache, daß die Suffosion der aus dem Basiserdstoff abtransportierten Teilchen d_I in den Porenkanälen des Filtererdstoffes $d_{p, II}$ mit kleiner werdendem Abstandsverhältnis immer schwieriger wird.
- Für eine mathematische Formulierung dieser prinzipiell erkannten Gesetzmäßigkeiten reichen die vorliegenden Versuchsergebnisse noch nicht aus.

Abschließend muß noch erwähnt werden, daß Bild 11, 12 und 13 wie alle für die Kontakt-erosion Typ 2/2 und 3/2 nur richtig sind, wenn die angegebenen Sickerwassergefälle auch bei instationärer Sickerwasserströmung nicht überschritten werden, keine dynamischen Kräfteintragungen in die Filterkombination erfolgen, im Basiserdstoff keine bevorzugten Sickerwege vorhanden sind und der Filtererdstoff die Kontaktfläche homogen berührt.

3.1.2.5. Abhängigkeit des zulässigen Abstandsverhältnisses $A_{50, \text{zul}}$ bei der Kontakt-erosion Typ 3/2 vom Verhältnis der Ungleichförmigkeitsgrade U_{II}/U_I

Speziell mit der Kontakt-erosion Typ 3/2 hat sich bisher nur [7] beschäftigt. Auf Grund systematischer Versuche wurde ein Diagramm (siehe Bild 14) für die funktionelle Abhängigkeit entwickelt.

$$A_{50} = f(U_{II}/U_I). \tag{31}$$

Es gilt für folgende Randbedingungen:

$$\begin{aligned} J_{I, \text{vorh}} &\leq 1,3 \\ \sigma &\geq 100 \text{ p/cm}^2 \\ U_I &\leq 10 \\ U_{II} &\leq 10. \end{aligned}$$

In erster Näherung kann anstelle des Bildes 14 auch folgende Gleichung angegeben werden:

$$A_{50} \leq 2 + 6,8 \frac{U_{II}}{U_I}. \tag{32}$$

Danach ergeben sich aber nur günstigere Abstandsverhältnisse als nach Bild 10, wenn U_{II} wesentlich größer als U_I ist. Da die Sicherheit gegen Kontakt-erosion Typ 3/2 bei gleichen Randbedingungen aber größer sein muß als bei der Kontakt-erosion Typ 2/2, spiegelt dieses Diagramm nach unserer Meinung die physikalischen Verhältnisse nicht vollständig richtig wider. Eine weitere Erforschung dieses Typs verspricht somit noch einen wesentlichen ökonomischen Effekt.

3.2. Kontakt-erosion bei geneigter Kontaktfläche und Wechselbeanspruchung

Die folgenden Untersuchungen beziehen sich insbesondere auf Filter unter der wasserseitigen Böschungssicherung von Staudämmen oder Kanalböschungen. Diese werden durch Wellendruck und Wellensog im steten Wechsel belastet, der härtesten Beanspruchung, der eine Erdstoffkombination ausgesetzt werden kann. Darüber hinaus ist dieser Pulsationsfilter noch durch die Besonderheit gekennzeichnet, daß die Decklage oft einen Ungleichförmigkeitsgrad von annähernd "1" besitzt, der schrittweise dem Ungleichförmigkeitsgrad des Dammmaterials angepaßt werden muß.

In erster Linie ist an die erste Filterschicht unter einer Steinpackung, Steinschüttung oder Plattenfuge gedacht. Die sonst üblichen Erosionsregeln können in diesem Falle offenbar nicht ohne weiteres angewendet werden. Alle nachfolgenden Spezialregeln sind strenger.

Für Küstenschutzbauwerke, wo also die größten Wellenbeanspruchungen zu erwarten sind, verlangt Magens (zitiert in [13_7])

$$\frac{d_{II}}{d_I} = 3 \quad \text{mit } U \approx 1 \tag{33}$$

Diese Regel ist natürlich äußerst aufwendig, aber nicht unbegründet, wenn man bedenkt, daß bei gleichförmigen Kugelschüttungen in lockerster Lagerung $d/d_p = 2,41$ ist. Im Regelfall besteht die Steinschüttung aus scharfkantigem Material mit relativ zu Kugeln größeren Porenkanälen und die erste Filterlage aus abgerundetem Material, dessen Körner relativ

leicht die Porenkanäle der Steinschüttung passieren können. Ferner könnte man als erschwerend anführen, daß sich die Steinpackung unter der Pulsationsbelastung ggf. hebt und senkt. Diese Regel kann daher für Küstenschutzbauwerke nicht ohne genauere Forschungen und exakte baupraktische Bedingungen ermäßigt werden. Zwei dieser praktischen Bedingungen müßten z.B. sein, daß die Unterkante der Steinschüttung mit kleineren Steinen ausgezwickt wird, so daß hier etwa ein Ungleichförmigkeitsgrad $U \approx 2$ erreicht wird und das Steingewicht der oberen Steinlage so bemessen wird, daß keine nennenswerte Hebung derselben möglich ist. Ausführlich haben sich [14] und [15] mit der Filterbemessung bei Böschungssicherungen von Staudämmen beschäftigt.

Nach [15] gilt:

$$\frac{d_{II,60}}{d_{I,40}} \leq 10 \quad \text{für Staudämme und} \quad (34)$$

$$\frac{d_{II,60}}{d_{I,40}} \leq 15 \quad \text{für Kanäle.} \quad (35)$$

Dabei soll sein:

$$U \leq 5 \quad (34 \text{ a}) \quad \text{nach einer Empfehlung des "Moskvavolgstroi"}$$

$$U \leq 8 \quad (35 \text{ a}) \quad \text{nach einer Direktive für den Wolga-Don-Kanal.}$$

Die Anweisung des Betriebes "Hydroprojekt für Wasserstraßen" fordert dagegen:

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq 10 \quad \text{mit } U \leq 8 \quad \text{und } t = 10 \text{ bis } 15 \text{ cm.} \quad (36)$$

In den technischen Bedingungen des Ministeriums für Flußschifffahrt der RSFSR wird für die obere Lage eines zweischichtigen Filters $U = 2$ bis 3 und für die untere Lage $U = 6$ bis 8 gefordert. Die Schichtdicke soll beim Bau im Trockenen $t = 10$ cm und beim Bau im Wasser $t = 25$ cm betragen. Das Abstandsverhältnis zwischen der Steinschüttung und der 1. Filterlage soll

$$\frac{d_{II}}{d_{I,50}} \leq 4 \text{ bis } 5 \quad (37)$$

betragen, wobei für d_{II} der rechnerische Durchmesser der Steine der Böschungssicherung eingesetzt werden soll.

Bei Betonplatten ohne Fugendichtung gilt nach [15] folgende Beziehung:

$$d_{50} \geq 1,5 \cdot b_m \quad \text{mit } U \leq 3 \quad (38)$$

b_m - offene Fugenbreite zwischen den Platten.

[16] empfiehlt:

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq 4,5 \cdot e^{0,26 \cdot \frac{t_{II}}{d_{II,50}}} \quad (39)$$

Nach [13] ergeben sich mit dieser Gleichung jedoch teilweise unsinnige Resultate, so daß hierauf nicht näher eingegangen wird.

[17] verlangt, daß suffosionssicheres Filtermaterial verwendet wird, und daß der größte Korndurchmesser des im Filtererdstoff enthaltenen Kieskorns $d_{\max,k}$ nach folgenden Gleichungen bestimmt wird:

$$d_{\max,k} = (0,2 \text{ bis } 0,25) \cdot 1,36 \sqrt[3]{\frac{G}{\gamma_B}} \quad (40)$$

G - Steingewicht,

γ_B - Reinwichte der Steine.

Gl. (40) ist gültig für Filter unter Steinpackungen und Steinschüttungen, während für Filter unter Plattenfugen folgende Gleichung gelten soll:

$$d_{\max,k} \geq (2,5 \text{ bis } 3) \cdot b_m \quad (41)$$

b_m - offene Fugenbreite zwischen den Platten.

Analysiert man Gl. (40) unter Berücksichtigung dessen, daß der Steindurchmesser bei Würfelform $d = 1,0 \sqrt[3]{G/\gamma_s}$ und bei Kugelform $d = 1,24 \sqrt[3]{G/\gamma_s}$ ist, so ergibt sich, daß Lupinskij von folgenden Gedanken ausgeht:

- Der Porenkanaldurchmesser $d_{p,II}$ in der Steinschüttung beträgt etwa $d_{p,II} = (0,2 \text{ bis } 0,25) \cdot d_{II}$ bei kugeliger Gestalt der Steine.
- Offenbar sind die Steine aber unregelmäßig und scharfkantig, so daß der Porenkanaldurchmesser von Lupinskij noch etwa 10 % größer angenommen und somit zu $d_{p,II} = (0,2 \text{ bis } 0,25) \cdot 1,1 \cdot d_{II}$ beziffert wird.
- Da das Filtermaterial suffosions sicher sein soll, genügt es, wenn das Skelettkorn des Filters die Porenkanäle der Steinschüttung nicht passieren kann.
- Als Skelettkorn betrachtet [17_7] das größte Kieskorn.

Wir können Gl. (40) daher auch wie folgt aufschreiben:

$$\frac{d_{II}}{d_{I,max,K}} \geq 3,6 \text{ bis } 4,5. \quad (40 a)$$

d_{II} - rechnerischer Steindurchmesser unter Ansatz von Kugelgestalt

$$d_{II} = 1,24 \sqrt[3]{\frac{G}{\gamma_s}} \text{ und}$$

$d_{I,max,K}$ - maximales Kieskorn des suffosions sicheren Filtermaterials.

Die Dicke des Filters soll nach [17_7] $t \geq 3 \cdot d_{I,max,K}$ sein. (42)

Alle genannten Filterregeln gehen letztlich immer auf die gleiche geometrische Überlegung zurück, daß nämlich ein maßgebender Korndurchmesser des Filtermaterials die Porenkanäle der Steinschüttung nicht passieren darf.

[2_7] empfiehlt daher für die 1. Filterlage unter der Steinschüttung einer wasserseitigen Staudamböschung das geometrisch sichere Abstandsverhältnis:

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq 5. \quad (43)$$

Dabei gelten folgende Randbedingungen:

- Das Steingewicht ist so bemessen, daß eine Bewegung durch Wellenkräfte nicht möglich ist.
- Der Ungleichförmigkeitsgrad der Steinschüttung ist $U_{II} = 1$.
- Die Kornform des Filtermaterials ist abgerundet.
- Der Ungleichförmigkeitsgrad des suffosions sicheren Filtermaterials ist $2 = U_I = 5$.

Kann vom Baubetrieb gewährleistet werden, daß die unterste Lage der Steinschüttung mit kleineren Steinen ausgezwickelt wird, so daß dort der Ungleichförmigkeitsgrad $U_{II} = 2$ beträgt, kann man den Filter unter sonst gleichen Randbedingungen nach

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq 7,5 \text{ bemessen.} \quad (43 a)$$

Wird als Filtermaterial Splitt verwendet, so gilt bei $U_{II} \approx 1$ und sonst gleichen Randbedingungen:

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq 6 \quad (44)$$

und bei $U_{II} \approx 2$

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq 9. \quad (44 a)$$

Alle weiteren Schichten bis zum Übergang auf das Dammaterial können nach WAFRO 4.04./3 bemessen werden. Die Anwendung der Erosionsregeln des Abschnittes 3.1. ist vorläufig nicht möglich, da ihr Geltungsbereich auf pulsationsfreie Filter beschränkt ist und/oder stationäre Sickerwasserströmung voraussetzt.

Die Einwände aus der Praxis, daß die Bemessung der 2. und aller eventuell folgenden Filterschichten großzügiger erfolgen könne, sind im Prinzip richtig. Der aussaugende Einfluß der Wellenkräfte nimmt natürlich mit der Tiefe schnell ab.

Auch bei schneller Stauspiegelsenkung sind die Sickerwassergefälle verhältnismäßig klein und die Sickerwasserströmungsrichtung zur Kontaktfläche ist nicht sehr ungünstig. Weitere Verbesserungen der Filterbemessung erfordern aber neue Forschungen. Bisher liegen noch keine entsprechenden Ergebnisse vor, so daß nach vorstehenden Regeln verfahren werden muß.

3.3. Kontakterosion Typ 2/3 und 3/3

Bei der Bemessung von Brunnenfiltern wurden in der Vergangenheit vor allem die Erosionsregeln

$$\text{von } \text{[19_7]}: \frac{d_{II}}{d_I} \leq 4 \quad (45)$$

$$\text{und } \text{[5_7]}: \frac{d_{II,15}}{d_{I,85}} \leq 4 \quad (\text{bis } 5) \quad (46)$$

angewendet. Wie in WAPRO 4.04./3 nachgewiesen wurde, repräsentieren diese Regeln unter den für sie geltenden Randbedingungen die geometrische Sicherheit gegen Kontakterosion aller Typen, für die aber eine modernere und vor allem wegen der erweiterten Randbedingungen ökonomischere Regel angegeben wurde (siehe WAPRO 4.04./3, Bild 2). Zunächst kann also festgestellt werden, daß selbstverständlich auch für diese Typen die vorstehend genannte Unterlage gültig ist.

Desweiteren muß man aber auch bemerken, daß die im Abschnitt 3.1. für die Kontakterosion Typ 2/2 und 3/2 genannten Erosionsregeln für diesen Fall nicht angewendet werden können, da die hydraulischen Randbedingungen strenger sind (siehe Bild 2 und 3).

Dennoch kann man erwarten, daß Erleichterungen gegenüber den Regeln für die Kontakterosion Typ 1/1 möglich sind, da neben dem Ungleichförmigkeitsgrad der Erdstoffe auch die absolute Korngröße des Basiserdstoffes und das Sickerwassergefälle Einfluß haben.

In der neueren Literatur wurde bisher nur die Kontakterosion Typ 3/3 ausführlicher behandelt. Da die hydraulischen Randbedingungen bei diesem Typ strenger sind als beim Typ 2/3, können die beiden Typen gemeinsam behandelt werden.

3.3.1. Abhängigkeit des kritischen Sickerwassergefälles $J_{I,krit}$ vom vorhandenen Abstandsverhältnis $A_{50,vorh}$ und der absoluten Korngröße des Basiserdstoffes d_I

Erste Versuchsergebnisse von [4_7] stammen aus dem Jahre 1957. Die nur durch wenige Versuchsergebnisse begründete Abhängigkeit

$$J_I = f(A_{50}; d_I) \quad (47)$$

zeigt Bild 15. Die Versuche von [20_7] für Horizontalfilterstränge zeigten, daß Gl. (47) nur für erschütterungsfreie Filter gilt. Er arbeitete mit Druckpulsationen und empfahl bei einer Lagerungsdichte von $D > 0,6$:

$$d_p = (0,166 \text{ bis } 0,2) \cdot d \quad (48)$$

und bei Einkornfiltern

$$\frac{d_{II}}{d_{I,85}} = 4, \quad (49)$$

den ein Abstandsverhältnis

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} = 10 \text{ bis } 16 \quad (50)$$

entsprechen soll. Nach WAPRO 4.04./3 gilt dieses Abstandsverhältnis für U_I und U_{II} größer als 2 und kleiner als 10, was für Brunnenfilter bisher fast immer eingehalten wurde.

Ziems empfahl daher in [18_7] für die Kontakterosion Typ 3/3 und 2/3 die geometrisch sicheren Abstandsverhältnisse (siehe WAPRO 4.04./3, Bild 2) anzuwenden.

Im Jahre 1968 hat [21_7] neue Versuchsergebnisse bekanntgegeben. Er untersuchte wie im Jahre 1957 nur gleichförmige Sande als Basiserdstoff mit $U_I = U_{II} \approx 1 \text{ bis } 2$. Im Laborversuch wurde

mit einem Gefälle von $J_I \approx 0,5$ begonnen und dann das Gefälle gesteigert, bis der Filtererdstoff vollkommen mit dem Basiserdstoff durchsetzt wurde - Zusammenbruch des Filters - . Druckpulsationen wurden nicht untersucht. Die Trockenrohdichte der Basiserdstoffe betrug im Mittel $\rho_s \approx 1,52 \text{ g/cm}^3$ und die der Filtererdstoffe $\rho_f \approx 1,68 \text{ g/cm}^3$. Bei der Auswertung wurde vorausgesetzt, daß der Basiserdstoff homogen ist, keine Bildung von bevorzugten Sickerwegen zu erwarten ist und die Bewegung der Körner des Basiserdstoffes an der Kontaktfläche nur durch stationäre Sickerwasserströmungskräfte verursacht wird. In zwei Diagrammen fixierte er

a) den Moment der ersten beobachteten Bewegung einzelner Körner an der Kontaktfläche (siehe Bild 16) mit

$$J_{I,krit} = f(A_{50}; d_I) \quad (51)$$

und

b) dem Moment der ersten beobachteten Setzung des Erdkörpers, bei dem schon eine gewisse Eindringung des Basiserdstoffes in den Filtererdstoff stattfand (siehe Bild 17) mit

$$J_{I,Setzung} = f(A_{50}; d_I). \quad (52)$$

Davidenkoff empfiehlt, für die Bemessung von vertikalen Brunnenfiltern, das im folgenden Abschnitt erläuterte Diagramm zu verwenden, da im allgemeinen das Gefälle beim Zustrum zum Brunnen schwer abzuschätzen ist.

3.3.2. Abhängigkeit des zulässigen Abstandsverhältnisses $A_{50,zul}$ von der absoluten Korngröße des Basiserdstoffes d_I bei der Bemessung von vertikalen Brunnenfiltern

Das folgende Bemessungsdiagramm für vertikale Brunnenfilter (siehe Bild 18) entwickelte Davidenkoff aus den Versuchsdiagrammen Bild 16 und 17, indem er annahm, daß das maximale Gefälle bei der Brunnenzuströmung

$$J_{I,max} = 7 \quad (53)$$

beträgt. Die für dieses Gefälle bei dem jeweiligen absoluten Korndurchmesser des Basiserdstoffes vorhandene Abstandsverhältnis übertrug er in ein Diagramm, welches eine funktionelle Abhängigkeit

$$A_{50} = f(d_I, 50) \quad (54)$$

für die Randbedingung nach Gl. (53) ergibt.

Davidenkoff empfiehlt, die ausgezogene Kurve im Bild 18 zu verwenden, die als Mittel zwischen den zulässigen Abstandsverhältnissen für den Moment der ersten Kornbewegung (siehe strich-punktierte Kurve) und für den Moment der ersten Setzung des Erdkörpers (siehe gestrichelte Kurve) gezeichnet wurde.

Der Bearbeiter kann auf Grund seiner Versuchserfahrungen diesem Vorschlag nicht zustimmen. Brunnen werden fast immer mit veränderlicher Förderleistung betrieben, so daß ein Gefälle $J_I > J_{I,krit}$ immer wieder neu auftritt und daher wie auch bei $J_I < J_{I,Setzung}$ nach Bild 17 und entsprechend langer Betriebsdauer ebenfalls eine Setzung eintreten muß. Es könnte daher allenfalls die strich-punktierte Kurve von Bild 18 verwendet werden.

3.3.3. Kritische Einschätzung der Forschungsergebnisse

Bei kritischer Analyse fällt aber außerdem auf, daß nach Bild 16 für die Kontaktterrosion Typ 3/3 teilweise höhere kritische Gefälle erhalten werden als nach Bild 7 für die Kontaktterrosion Typ 2/2, was theoretisch unmöglich ist. Die Anzahl der Versuchspunkte auf Bild 16 ist auch relativ gering, die Verbindungslinien sind teilweise recht willkürlich gezogen und insbesondere die Kurve für $d_I = 1,0$ bis $2,0$ mm ist ungläubwürdig extrapoliert. Das geometrisch sichere Abstandsverhältnis ist mindestens $A_{50} = 4$. Dem Verfasser scheinen daher die Versuchsergebnisse von Davidenkoff keinesfalls auszureichen, um daraus praktische Schlußfolgerungen für die Brunnenfilterbemessung ziehen zu können. Wegen der einzuhaltenden Randbedingungen, insbesondere $U_I = 1$ bis 2 , $d_I = 0,06$ bis 2 mm und $J_{I,max} \leq 7$, ist das Bemessungsdiagramm von Davidenkoff auch von sehr geringem praktischen Interesse. Schließlich kann die entscheidende Voraussetzung für die Gültigkeit der Versuche von Davidenkoff, daß die Kornbewegung nur durch stationäre Sickerwasserströmungskräfte verursacht wird, in der Praxis nicht eingehalten werden. Aus allen diesen Gründen können Bild 16, 17 und 18 in der Praxis nicht verwendet werden.

Die Empfehlung von Ziem in [18] bleibt daher nach wie vor richtig:

- für die Kontakterosion Typ 2/3 und 3/3 sind die geometrisch sicheren Abstandsverhältnisse anzuwenden, die für den ungünstigsten Typ 1/1 entwickelt wurden.

Für die genannten Typen gilt daher bis auf weiteres ebenfalls WAPRO 4.04./3. Weitere Forschungen werden zeigen, ob theoretisch durchaus mögliche Erleichterungen auch praktisch verwirklicht werden können.

4. Neue Erosionsregeln

Aus den im Abschnitt 3. durchgeführten kritischen Analysen der theoretischen und empirischen Grundlagen der Kontakterosion und der Auswertung der dort erläuterten Versuchs- und Filterbemessungsdiagramme ergeben sich folgende neue Erosionsregeln.

4.1. Kontakterosion Typ 2/2 und 3/2

Regel 1: Bei der Kontakterosion Typ 2/2 und 3/2 ist die Anwendung weiterer Erosionsregeln unnötig, wenn das vorhandene mittlere Sickerwassergefälle im Basiserdstoff

$$J_{I,vorh} \leq (0,7 \text{ bis } 0,8) \cdot \frac{(1-n) \cdot (\gamma_s - 1)}{\gamma_w}$$

ist und die Randbedingungen nach Regel 2 erfüllt sind.

Setzt man in obiger Beziehung die faktisch ungünstigsten Erdstoffkennwerte ein, so ergibt sich als grober Näherungswert:

$$J_{I,vorh} \leq 0,66.$$

Regel 2: Die Anwendung aller Regeln für die Kontakterosion Typ 2/2 und 3/2 setzt voraus, daß:

- das in die Berechnung eingeführte Sickerwassergefälle im Basiserdstoff $J_{I,vorh}$ auch bei instationärer Sickerströmung nicht überschritten wird
- die Filterkombination nicht durch dynamische Kräfte, z.B. Erdbeben, Erschütterungen in der unmittelbaren Nähe von Tosbecken, Straßen, bei Pulsationsbetrieb von Brunnen, durch Wellenschlag und Sog, belastet wird
- im Basiserdstoff keine bevorzugten Sickerwege vorhanden sind
- der Filtererdstoff die Kontaktfläche homogen berührt.

Regel 3: Werden die Regeln 1 und 2 erfüllt, so kann das Abstandsverhältnis $A_{50} = d_{II,50}/d_{I,50}$ zwischen Basis- und Filtererdstoff beliebig gewählt werden.

Regel 4: Werden die Regeln 1 oder 2 nicht erfüllt, so kann die Filterbemessung in jedem Fall nach WAPRO 4.04./3, Bild 2, erfolgen. Dieses spiegelt die geometrischen Beziehungen zwischen maßgebendem Porenkanaldurchmesser des Filtererdstoffes und maßgebendem Korndurchmesser des Basiserdstoffes wider, bei welchen eine Kontakterosion jeglichen Typs überhaupt unmöglich ist. Ein danach bemessener Filter ist also auch für die Kontakterosion Typ 2/2 und 3/2 bei praktisch beliebigem Sickerwassergefälle $J_{I,vorh}$ im Basiserdstoff sicher genug.

Regel 5: Wird die Regel 1 nicht erfüllt, können jedoch die Randbedingungen der Regel 2 eingehalten werden, so kann der Filterentwurf wesentlich ökonomischer als nach WAPRO 4.04./3 nach den folgenden Regeln 6 oder 7 erfolgen. In diesem Falle wird die hydraulische Sicherheit gegen Kontakterosion nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\eta_{K,H,vorh} = \frac{J_{I,krit}}{J_{I,vorh}} \leq \eta_{K,H,erf}$$

Der erforderliche Sicherheitsgrad beträgt:

$$\eta_{K,H,erf} = 1,5,$$

wenn das vorhandene Sickerwassergefälle im Basiserdstoff $J_{I,vorh}$ nur näherungsweise bestimmt werden kann, oder:

$$\eta_{K,H,erf} = 1,1,$$

wenn das vorhandene Sickerwassergefälle im Basiserdstoff $J_{I,vorh}$ aus einem exakten hydrodynamischen Sickerwasserströmungsnetz entnommen werden kann.

Regel 6: Das kritische Sickerwassergefälle im Basiserdstoff $J_{I,krit}$ wird bei der Kontakt-erosion Typ 2/2 und 3/2 unter Beachtung der in Regel 8 genannten Randbedingungen, mit Hilfe des Bemessungsdiagramms Bild 7 bestimmt, das die funktionelle Abhängigkeit

$$J_{I,krit} = f(A_{50}; d_I)$$

enthält.

Regel 7: Ist $\eta_{K,H,erf} \cdot J_{I,vorh} \leq 1,5$, so wird das zulässige Abstandsverhältnis $A_{50,zul}$ unter Beachtung der in Regel 8 genannten Randbedingungen, mit Hilfe des Bemessungsdiagramms Bild 10 noch ökonomischer als nach Regel 6. Es enthält die funktionelle Abhängigkeit

$$A_{50,zul} = f(U_{II}; d_I).$$

Regel 8: Die Anwendung der Bemessungsdiagramme Bild 7 und 10 erfordert die Einhaltung folgender Randbedingungen zusätzlich zu Regel 2:

- Normalspannung in der Kontaktfläche $\sigma \geq \gamma_w \cdot t \cdot J_{I,vorh}$
- suffosions sicherer Basiserdstoff mit $U_I \leq 5$; bei $U_I > 5$ sind Laborversuche nötig oder es ist WAPRO 4.04./3 anzuwenden
- suffosions sicherer Filtererdstoff mit $U_{II} \leq 20$
- beliebige Lagerungsdichte beider Erdstoffe
- Kornform des Filtererdstoffes kugelförmlich, abgerundet. Bei Filtererdstoffen mit scharfkantigeckiger Kornform ist das Abstandsverhältnis $A_{50,zul}$ mit einem zusätzlichen Sicherheitsgrad von $\eta = 1,3$ zu belegen
- Kornform des Basiserdstoffes beliebig
- keine Beeinträchtigung der Entwässerungswirkung des Filters durch die Belastung.

Regel 9: Bei der Kontakt-erosion Typ 3/2 kann die Filterbemessung auch nach folgender Gleichung durchgeführt werden:

$$A_{50,vorh} \leq 2 + 6,8 \frac{U_{II}}{U_I}.$$

Sie gilt für folgende Randbedingungen:

- $\eta_{K,H,erf} \cdot J_{I,vorh} \leq 1,3$
- $\sigma \geq 100 \text{ p/cm}^2$
- $U_I \leq 10$ und
- $U_{II} \leq 10$.

Danach ergeben sich jedoch nur dann günstigere Abstandsverhältnisse als nach Bild 10, wenn U_{II} wesentlich größer als U_I ist. Die Anwendung dieser Regel für die Kontakt-erosion Typ 3/2 ist daher nicht zwingend.

4.2. Kontakt-erosion bei gegenseitiger Kontaktfläche und Wechselbeanspruchung

Regel 10: Filter unter der Böschungssicherung von Küstenschutzbauwerken sind nach folgender Gleichung zu bemessen:

$$\frac{d_{II}}{d_I} \leq 3 \quad \text{mit } U \approx 1.$$

Bedingung ist, daß der Durchmesser der Steine der Böschungssicherung d_{II} so bemessen wird, daß sich die Steine unter der pulsierenden Wellenbelastung nicht bewegen. Eine Ermäßigung dieser sehr aufwendigen Regel erfordert die Durchführung von Modellversuchen und nach Möglichkeit die Auswicklung der unteren Lage der Steinschüttung mit kleineren Steinen als d_{II} .

Regel 11: Für die 1. Filterschicht unter der Steinschüttung einer wasserseitigen Staudamm- oder Kanalböschung gilt:

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq 5,$$

wobei folgende Randbedingungen einzuhalten sind:

- a) das Steingewicht macht eine Bewegung der Steine durch die Wellenbelastung unmöglich
- b) $U_{II} \approx 1$
- c) $2 \leq U_I \leq 5$ und
- d) Kornform des Erdstoffes der 1. Filterschicht kugelähnlich abgerundet.

Wird die unterste Lage der Steinschüttung mit kleineren Steinen ausgezwickt, so daß $U_{II} \approx 2$ wird, kann unter sonst gleichen Randbedingungen die Gleichung

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq 7,5$$

angewendet werden.

Wird als Erdstoff der 1. Filterschicht Splitt verwendet, so gilt bei $U_{II} \approx 1$ und sonst gleichen Randbedingungen:

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq 6,$$

oder bei $U_{II} \approx 2$ in der untersten Lage der Steinschüttung:

$$\frac{d_{II,50}}{d_{I,50}} \leq 9.$$

Regel 12: Alle weiteren Filterschichten unter der Steinschüttung einer wasserseitigen Staudamm- oder Kanalbüschung können nach WAFRO 4.04./3 bemessen werden. Spezielle Laborversuche werden in diesem Fall ökonomische Vorteile erbringen.

4.3. Kontakterosion Typ 2/3 und 3/3

Regel 13: Die Bemessung von Brunnenfiltern muß vorläufig noch nach WAFRO 4.04./3 erfolgen.

Regel 14: Die Anwendung von Bild 16 oder 18 nach [21]7 erfordert auf jeden Fall besondere Laborversuche, die voraussichtlich aber nur für absolut pulsationsfrei betriebene Brunnen erfolgversprechend sind.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. J. Ziemst, Technische Universität Dresden, Sektion Wasserwesen, Bereich Wasserbau.

Dresden, den 31. 12. 1968

5. Verwendete Bezeichnungen

- | | |
|--|--|
| $A = d_{II}/d_I$ | - Abstandsverhältnis der Korndurchmesser zweier unterschiedlicher Erdstoffe an einer gemeinsamen Kontaktfläche |
| $A_{50} = d_{II,50}/d_{I,50}$ | - wie vor, für die Korndurchmesser bei 50 % der Kornverteilungslinien |
| d | - Korndurchmesser |
| d_I | - wie vor, des feineren Erdstoffes - Basiserdstoff |
| d_{II} | - wie vor, des gröberen Erdstoffes - Filtererdstoff |
| d_p , z.B.: d_{10} , d_{50} , d_{60} | - wie vor, bei p_1 % der Kornverteilungslinie, z.B.: p_{10} , p_{50} , p_{60} |
| $d_{I,maßg}$ | - für die Kontakterosion maßgebender Korndurchmesser des Basiserdstoffes |
| d_p | - Porendurchmesser |
| $d_{p,II}$ | - wie vor, des Filtererdstoffes |
| $d_{p,II,maßg}$ | - für die Kontakterosion maßgebender Porendurchmesser des Filtererdstoffes |

D_e	- Lagerungsdichte eines Erdstoffes
f	- Funktion einer Kenngröße in Abhängigkeit von einer oder mehreren Variablen
F	- Kennzeichen eines Einflußfaktors auf die Kontakterosion - Verkleinerungsfaktor für den maßgebenden Porendurchmesser bei der Kontakterosion -
F_E	- Einflußfaktor für dynamische Kräfte, z.B. Erschütterungen
F_P	- Einflußfaktor für die Kornform der Erdstoffe
F_R	- Einflußfaktor für die Oberflächenrauigkeit der Erdstoffkörner
F_S	- Schlupffaktor, charakterisiert das Schlupfmaß zwischen Korndurchmesser d_I und Porendurchmesser $d_{p,II}$ bei der Kontakterosion
J	- Sickerwassergefälle
J_{vorh}	- vorhandenes Sickerwassergefälle
J_{krit}	- für die Kontakterosion kritisches Sickerwassergefälle
J_{Bruch}	- Bruchgefälle für die Kontakterosion Typ 2/2
k	- Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
n	- Porenanteil
P_i	- prozentualer Anteil der Fraktionen mit dem Korndurchmesser $d \leq d_i$
t	- Dicke einer Erdstoffschicht
t_K	- Kolmationstiefe
$U = d_{60}/d_{10}$	- Ungleichförmigkeitsgrad eines Erdstoffes
v	- Filtergeschwindigkeit nach Darcy
v_p	- Fließgeschwindigkeit in den Porenkanälen
v_{krit}	- kritische Sickerwassergeschwindigkeit für die Kontakterosion
γ_a	- Wichte eines Erdstoffes unter Auftrieb
γ_B	- spezifische Wichte eines Erdstoffes
γ_w	- Wichte des Wassers
e	- Porenzahl
η	- Sicherheitsgrad
$\eta_{K,G}$	- geometrischer Sicherheitsgrad der Kontakterosion
$\eta_{K,H}$	- hydraulischer Sicherheitsgrad der Kontakterosion
σ	- Normalspannung in der Kontaktfläche zwischen Basis- und Filtererdstoff

Indices:

I	- Kenngröße bezieht sich auf den feineren Erdstoff (Basiserdstoff)
II	- Kenngröße bezieht sich auf den gröberen Erdstoff (Filtererdstoff)
erf	- erforderlicher Wert der Kenngröße
krit	- kritischer Wert der Kenngröße
maßg	- maßgebender Wert der Kenngröße
max	- Maximalwert der Kenngröße
min	- Minimalwert der Kenngröße
vorh	- vorhandener Wert der Kenngröße
zul	- zulässiger Wert der Kenngröße

6. Literaturverzeichnis

- [1_7] Ziems, J.: Zur Klassifizierung der mechanischen Erdstoffverformungen durch Wirkungen des Sickerwassers. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Berlin 17 (1967) 2, p. 50-55
- [2_7] Ziems, J.: Beitrag zur Kontaktrosion nichtbindiger Erdstoffe. Dissertation an der Technischen Universität Dresden, eingereicht am 25. 11. 1968
- [3_7] Izbaš, S.V.: Fil'tracionnye deformacii gruntov (Deformationen der Böden bei Durchsickerung). Izv. VNIIG, Leningrad, 1933, Heft 10
- [4_7] Zweck-Davidenkoff: Versuche an Filtern mit gleichmäßiger Granulometrie. Proceedings of the 4. Conf. on Soil mechanics and Foundation engineering, London, 1957, Bd. II, p. 410
- [5_7] Tarsaghi, K.: Die Bodenmechanik in der Baupraxis
Peck, R.B.: Springer-Verlag, Berlin, 1961, p. 241
- [6_7] Schubert, K.: Bodenmechanik
1. Lehrbrief, VEB Verlag Technik, Berlin, 1966, p. 77
- [7_7] Istomina, V.S.: Fil'tracionnaja ustojčivost' gruntov (Die Filtrationsbeständigkeit der Böden)
Izd.-vo po stroit. i arch., Moskau, 1957
- [8_7] Sechtman, Ju., M.: Fil'tracija malokoncentrirovannyh suspenzij (Die Sickerung schwach konzentrierter Suspensionen).
Izd.-vo Akad. Nauk SSSR, Moskau, 1961
- [9_7] Mioduszewski, W.: Gradienty hydrauliczne wyjsciowe w miejscu koncentracji strug na skarpie odpowretrzanej razenia (Der hydraulische Gradient im Bereich der Stromröhrenkonzentration an der unteren Böschung).
Gospodarka wodna, Warszawa, 22 (1967) 12, p. 441
- [10_7] Kozlova, L.I.: Eksperimental'nye issledovanija fil'tracionnyh deformacij dvuch smežnyh raznorodnyh sloev grunta (Experimentelle Untersuchung über die Verformungen zweier benachbarter und verschiedenartiger Bodenschichten bei Durchsickerung).
Izv. VNIIG, Leningrad, 1934, Heft 14
- [11_7] Beyer, W.: Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve.
Wasserwirtsch.-Wassertechn., Berlin 14 (1964) 6, p. 165
- [12_7] Davidenkoff, R.: Deiche und Erddämme, Sickerströmung-Standsicherheit
Werner-Verlag, Düsseldorf, 1964
- [13_7] Wagner, H.: Einfluß der Wellenbrandung auf Uferanlagen.
Forschungsstudie Nr. 2157/26/3-16/3/ Wo, 1963, TU Dresden, Institut für Fluß- und Seebau
- [14_7] Pyškin, B.A.: Voprosy dinamiki beregov vodochranilišč (Fragen der Dynamik der Ufer von Stauseen).
Izd.-vo Akad. Nauk SSSR, Kiev, 1963
- [15_7] Sajtan, V.S.: Proektirovanie kreplenij zemljanyh otkosov na vodochraniliščach (Projektierung der Erdböschungsbefestigungen von Stauseen).
Gostroiizdat, Moskau, 1962

- [16_7] Sankin, P.A.:
Vozdejstvie voln na gidrotehničeskie sooruženija (Die Wellenwirkungen auf Wasserbauten).
Izd-vo Rednoi transport, Moskva, 1955
- [17_7] Lupinskij, M.J.:
Issledovanie raboty kamennyh kreplenij zemljanyh otkozov (Umgekehrte Filter für die Wellensicherung von Erdböschungen).
Gosenergoizdat, Moskva, 1964
- [18_7] Ziems, J.:
Erosionsbeständigkeit nichtbindiger Lockergesteine.
Forschungsarbeit Nr. 4507-026/6-22/5, 1966, Technische Universität Dresden, Institut für Fluß- und Seebau
- [19_7] Scharhardt:
Kies- und Sandfilter im Grund- und Wasserbau.
Die Bautechnik, Berlin, 1952, Heft 3/4
- [20_7] Fuchs, G.:
Die wirksamste Abstufung von künstlichen Kiesschüttungen in den Filterstrecken bei Bohrbrunnen.
Mitt. der TU Berlin, 1963, Heft 60, p. 65
- [21_7] Davidenkoff, R.:
Dimensionierung von Kiesschüttungsfiltern im Brunnenbau.
Bohrtechnik-Brunnenbau, Rohrleitungsbau, Berlin-W, 1968, Heft 1, p. 15

7. Bilderverzeichnis

1. Schematische Darstellung der Haupttypen der Kontaktterrosion.
2. Schematische Darstellung der Kontaktterrosion Typ 2/2.
3. Schematische Darstellung der Kontaktterrosion Typ 3/3.
4. Schematische Darstellung der Stromröhrenkonzentration an der Kontaktfläche einer Filterkombination.
5. Kritisches und zulässiges Sickerwassergefälle $J_I = f(A_{50})$ für die Kontaktterrosion Typ 2/2, nach Izbaš sowie kritisches Sickerwassergefälle nach Davidenkoff.
6. Funktionelle Abhängigkeit $C = f(U)$ in der Gleichung $k = 100 \cdot C \cdot d_{10}^2$ nach Beyer.
7. Kritisches Sickerwassergefälle $J_{I,krit} = f(A_{50}; d_I)$ für die Kontaktterrosion Typ 2/2 nach Ziems.
8. Sickerwassergefälle $J_I = f(A_{50}; d_I)$ für die Kontaktterrosion Typ 2/2 nach Zweck-Davidenkoff.
9. Abstandsverhältnis $A_{50} = f(U_{II})$ für die Kontaktterrosion Typ 2/2 bei $J_{I,vorh} < 1,5$ bis 2 und $U_I < 10$ nach Istomina.
10. Zulässiges Abstandsverhältnis $A_{50,zul} = f(U_{II}; d_I)$ für die Kontaktterrosion Typ 2/2 bei $U_I \leq 5$ und $J_{I,vorh} \leq 1,5$ nach Ziems.
11. $J_I = f(\phi)$ für die Kontaktterrosion Typ 2/2 bei feinsandigem Grobschluff bei $A_{50} = 30,8$.
12. $J_I = f(\phi)$ für die Kontaktterrosion Typ 2/2 bei feinsandigem Grobschluff bei $A_{50} = 61,5$.
13. $J_{I,krit} = f(A_{50}; \phi)$ für die Kontaktterrosion Typ 2/2 bei feinsandigem Grobschluff nach Ziems.
14. Filterbemessungsdiagramm für die Kontaktterrosion Typ 3/2 nach Istomina.
15. $\bar{J} = f(A_{50}; d_I)$ für die Kontaktterrosion Typ 3/3 nach [4_7]
16. $J_{I,krit} = f(A_{50}; d_I)$ für die Kontaktterrosion Typ 3/3 nach [21_7].
17. $J_{I,Setzung} = f(A_{50}; d_I)$ für die Kontaktterrosion Typ 3/3 nach [21_7].
18. $A_{50} = f(d_I, 50)$ für die Kontaktterrosion Typ 3/3 bei $J_{I,max} \leq 7$, $d_I = 0,06$ bis 2 mm und $U_I = U_{II} = 1$ bis 2 nach [21_7]

Hinweise:

TGL 11462/1	12.69	Baugrundmechanik; Prüfungen an Lockergesteinsproben im Laboratorium;
		-; Allgemeine Grundsätze
TGL 11462/2	12.69	-; Bestimmung des Wassergehaltes
TGL 11462/5	12.69	-; Bestimmung der Reindichte
TGL 11462/6	12.69	-; Bestimmung der Rohdichte
TGL 11462/7	12.69	-; Bestimmung der Korngrößenverteilung

TGL 11462/8	(5.70)	-; Bestimmung der lockersten und dichtesten Lagerung von Sanden
TGL 11462/11	3.67	-; Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit
TGL 11482/1	3.67	Erarbeiten; Allgemeine Forderungen
TGL 11482/3	8. 69	-; Zusätzliche Forderungen im Wasserbau
TGL 21239	12.65	Stauanlagen: Talsperren, Allgemeine Grundsätze für Vorbereitung, Bau und Betrieb
TGL 21239/3	1.69	-; Technische Forderungen für Projektierung und Bau von Staudämmen über 5,0 m Höhe
TGL 92-013	4.66	Erdstaudämme und Flußdeiche bis 5,0 m Höhe, Grundsätzliche Forderungen

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

Bild 1

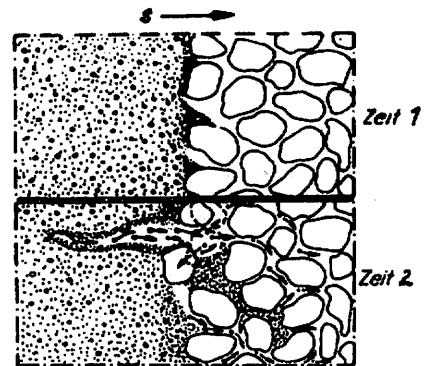
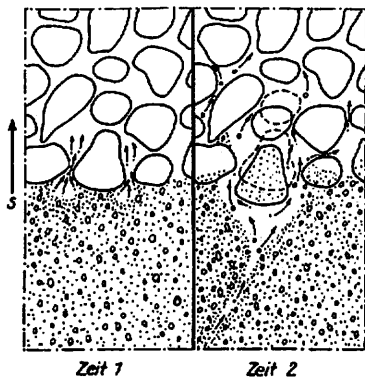


Bild 2

Bild 3

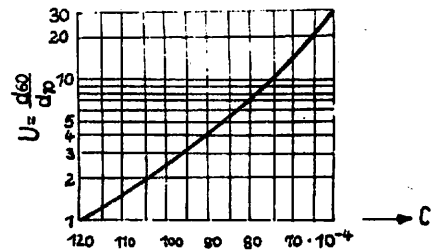
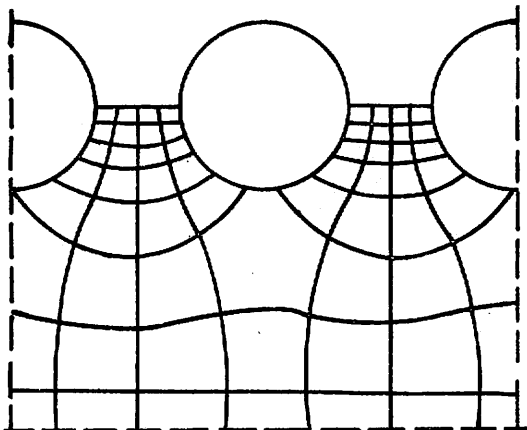


Bild 4

Bild 6

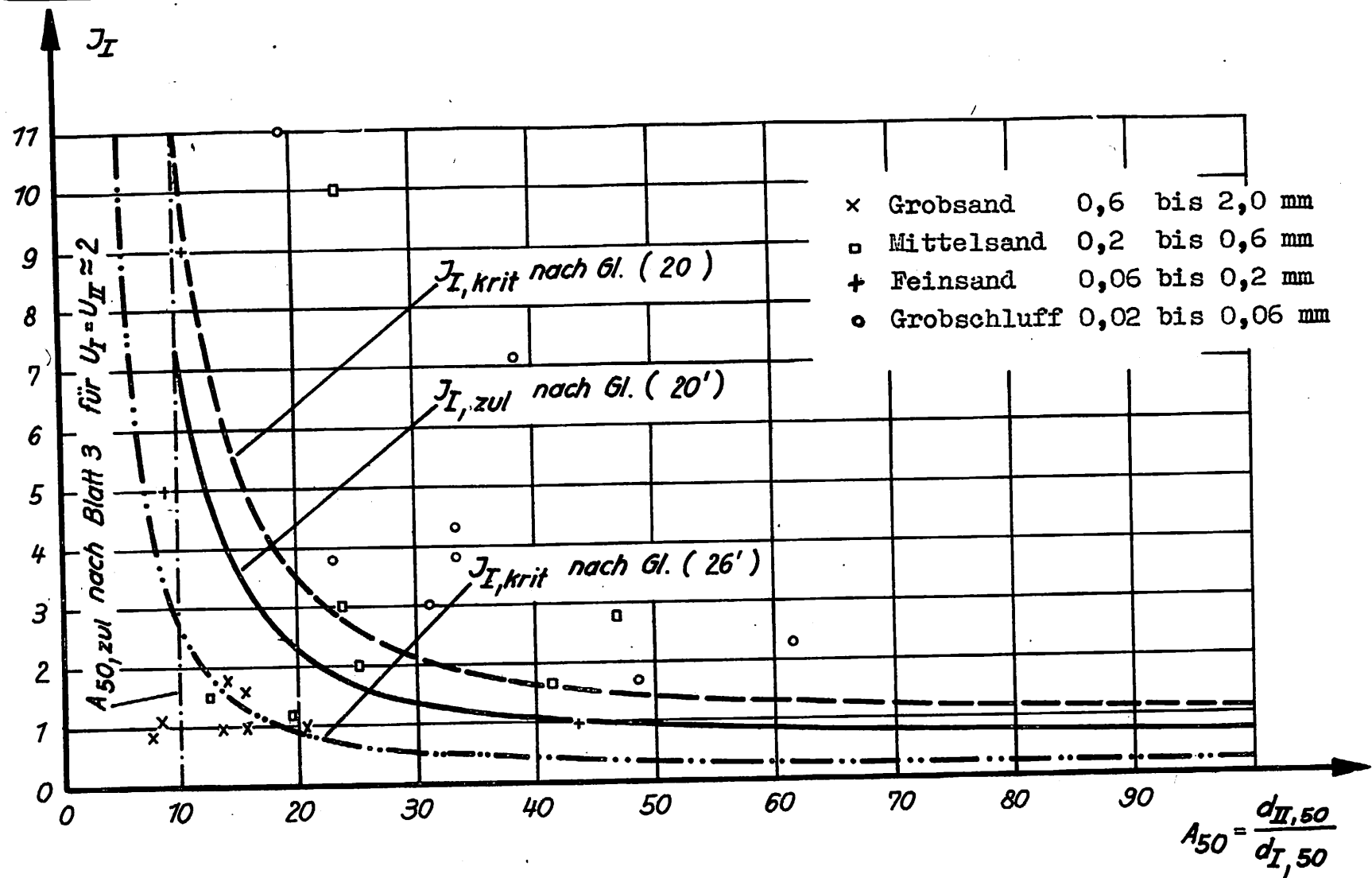


Bild 5 Kritisches und zulässiges Sickerwassergefälle $J_I = f(A_{50})$ für die Kontakterosion Typ 2/2 nach Jzbaš und kritisches Sickerwassergefälle nach Davidenkoff

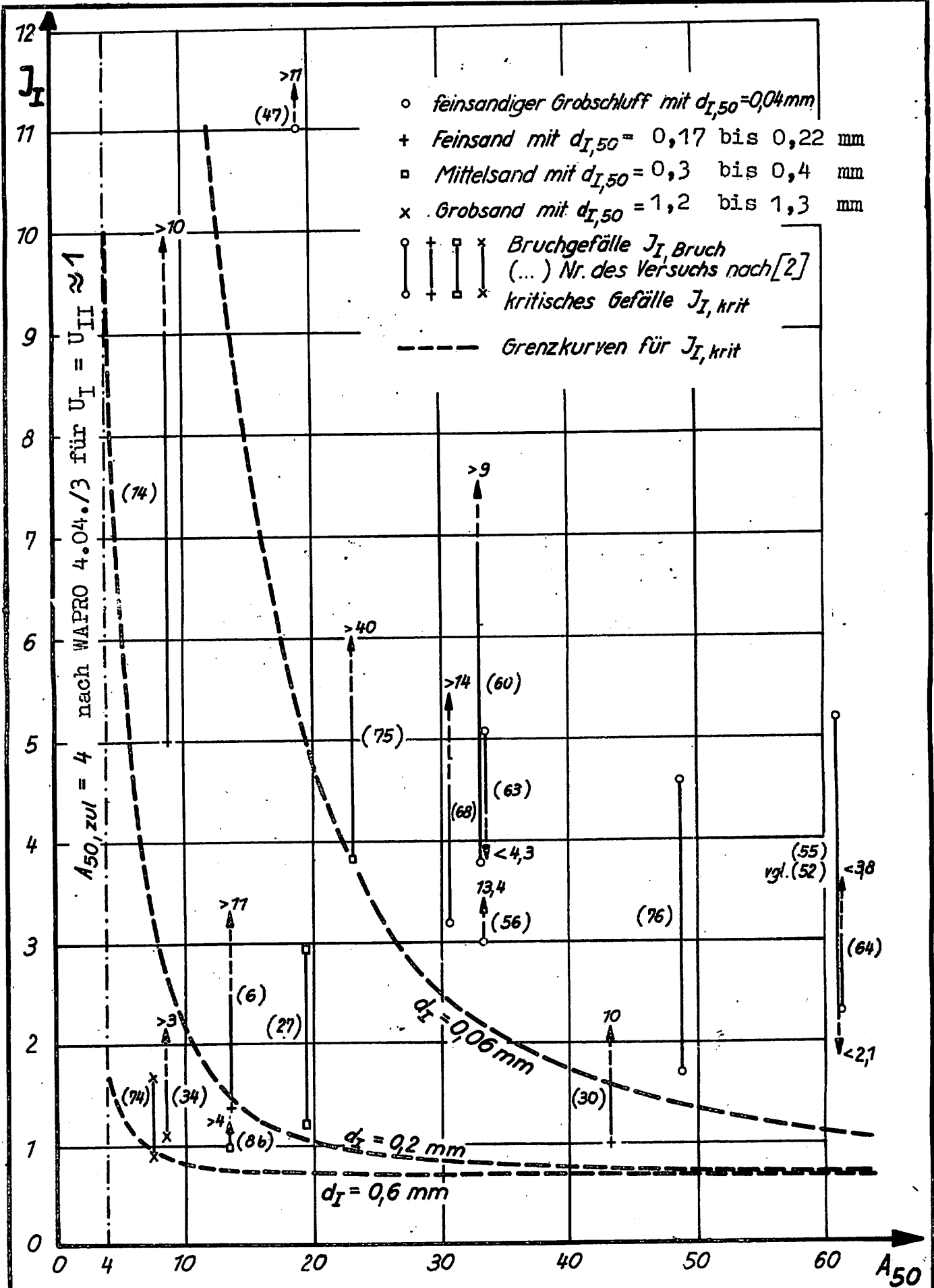


Bild 7 Kritisches Sickerwassergefälle $J_{I, krit} = f(A_{50}, d_I)$ für die Kontakterosion Typ 2/2 nach Ziems

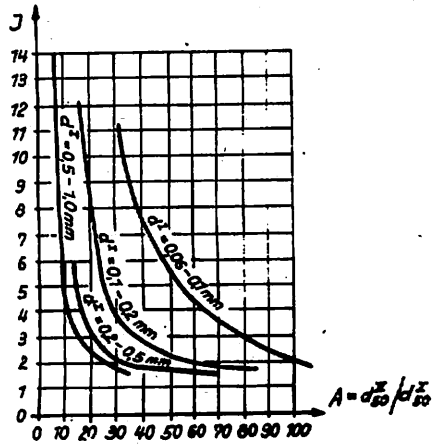


Bild 8

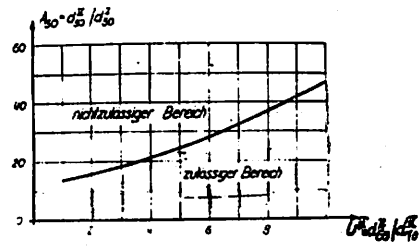


Bild 9

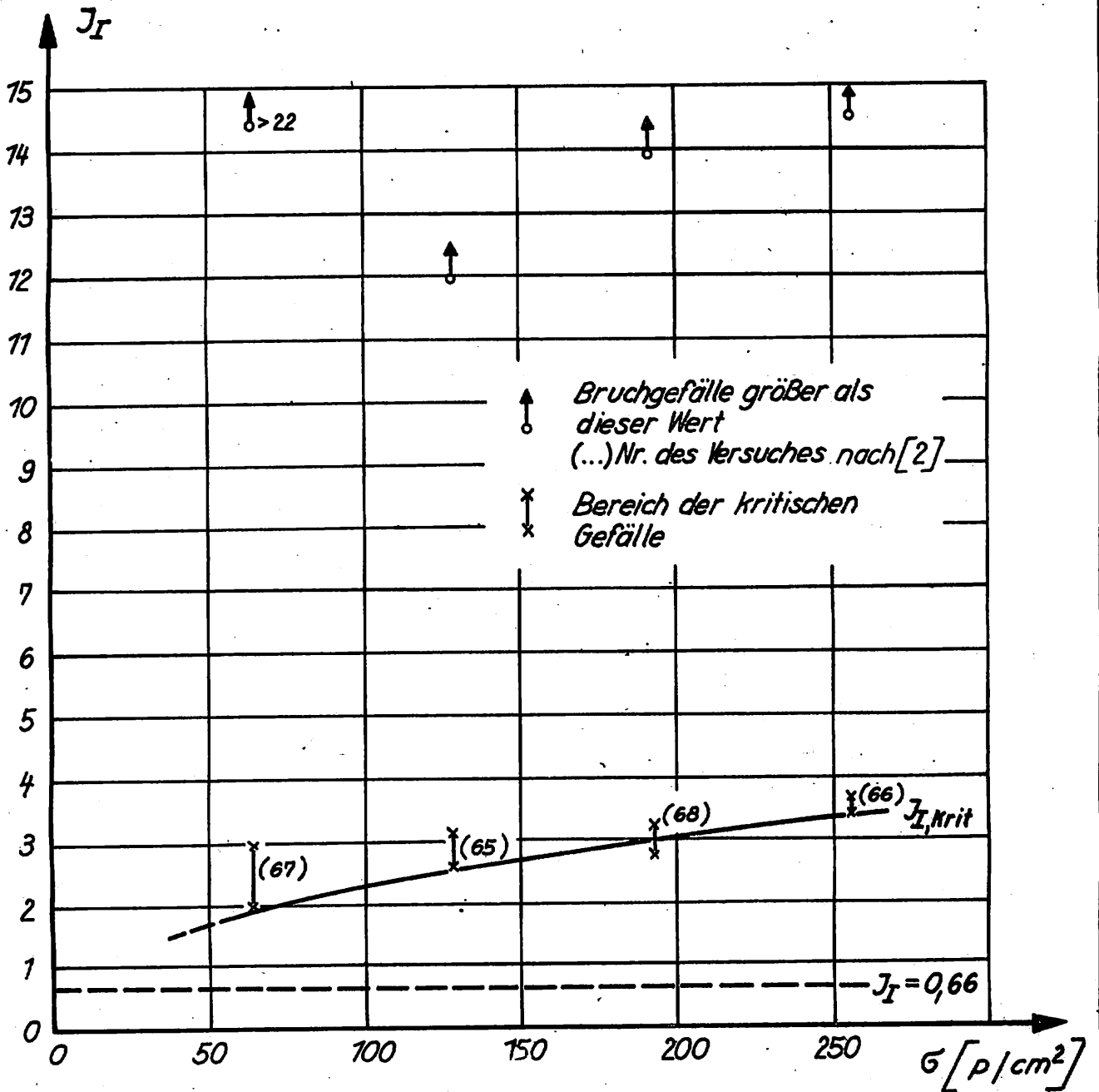


Bild 11 $J_I = f(\sigma)$ für feinsandigen Grobschluff bei $A_{50} = 30,8$

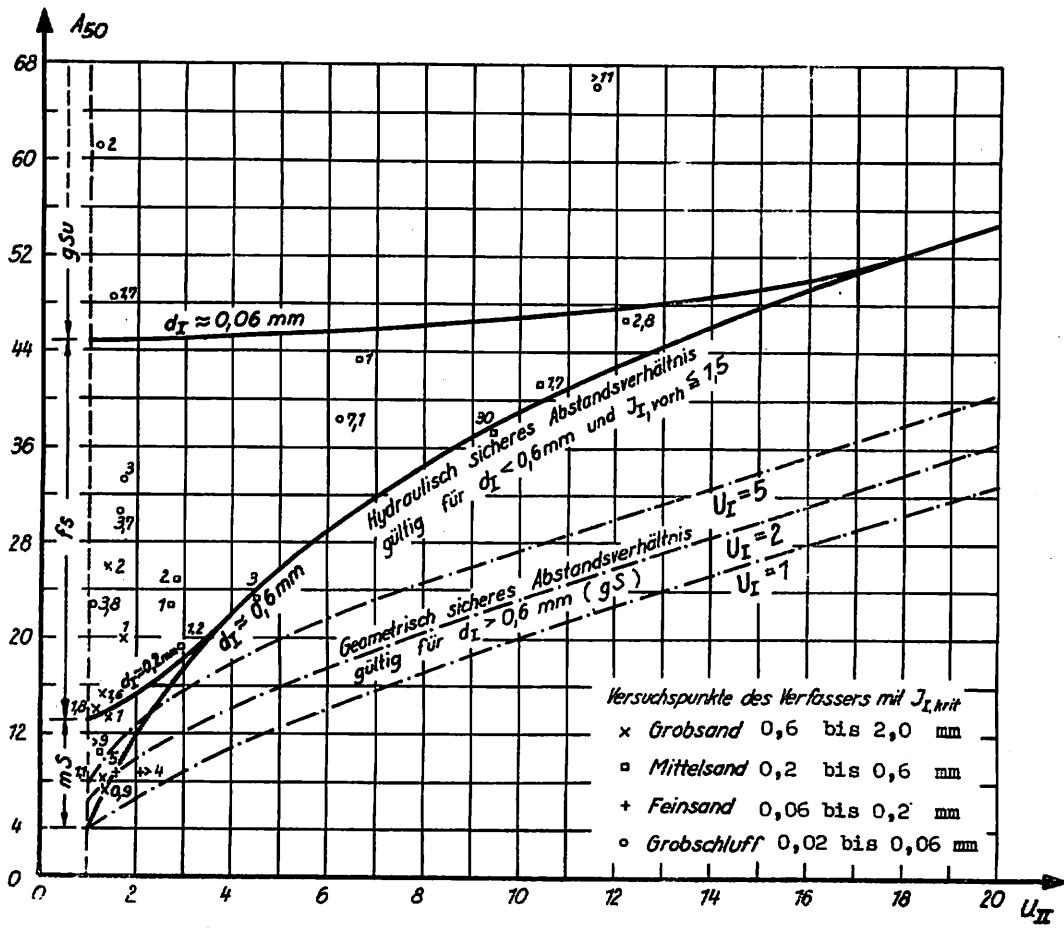


Bild 10 Zulässiges Abstandsverhältnis $A_{50, \text{zul}} = f(U_{II}, d_I)$ für die Kontakterosion Typ 2/2 bei $U_I \leq 5$ und $J_{I, \text{vorh}} \leq 1,5$ nach Ziem

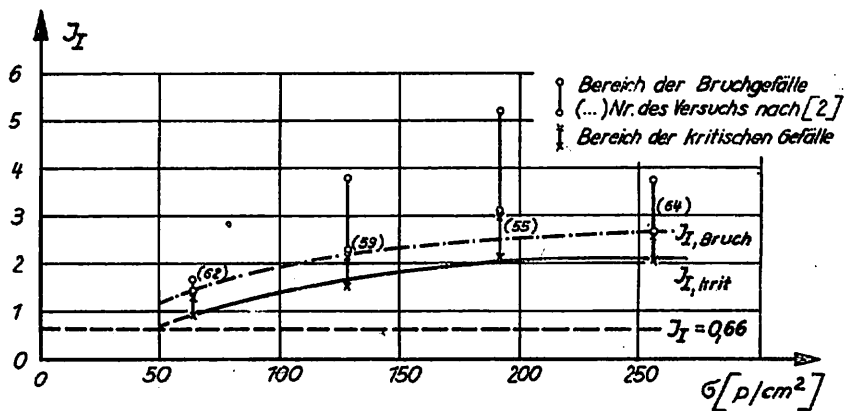


Bild 12 $J_I = f(\sigma)$ für feinsandigen Grobschluff bei $A_{50} = 61,5$

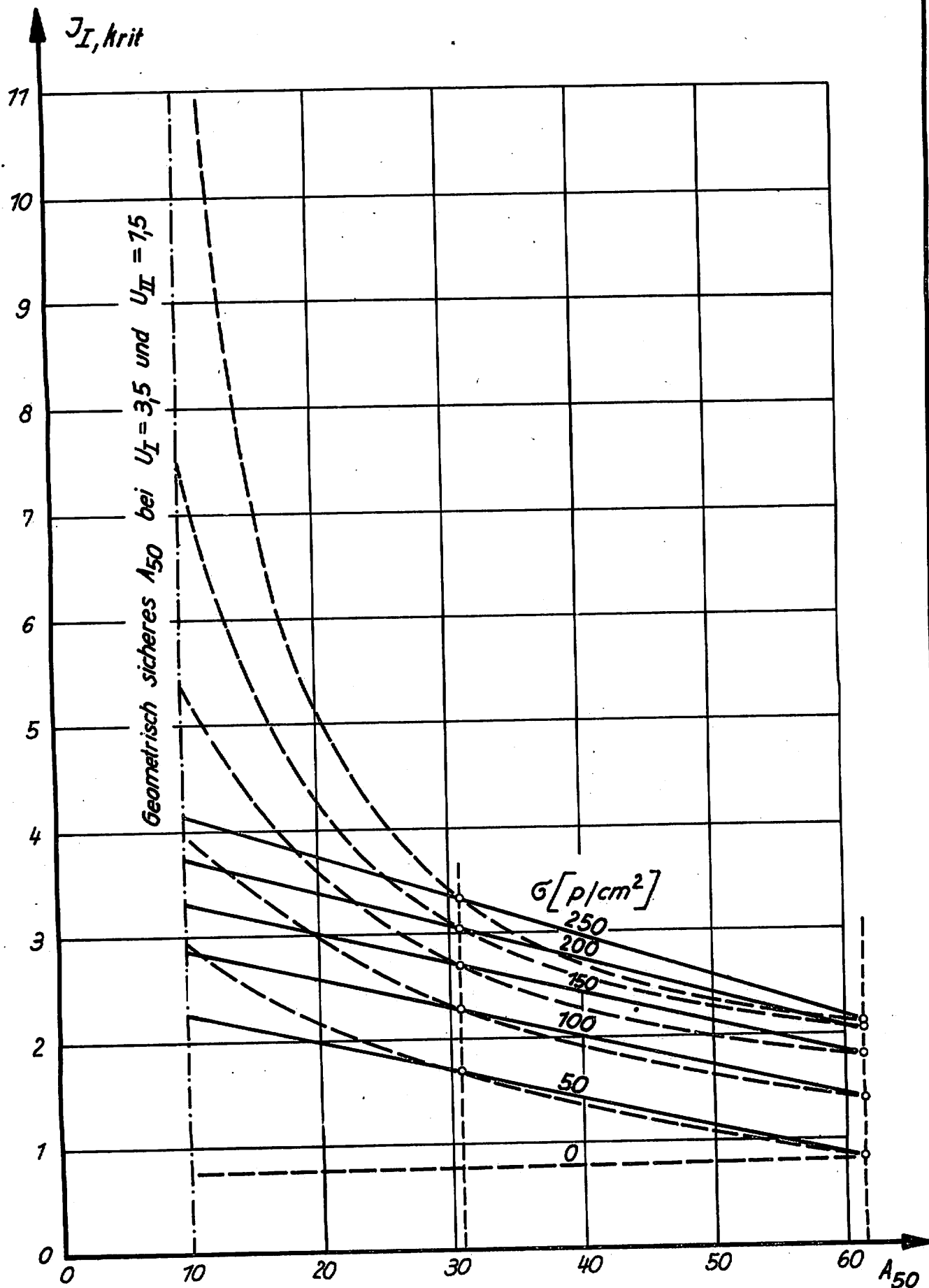


Bild 13 $J_{I,krit} = f(A_{50}; G)$ für feinsandigen Grobschluff nach Ziems

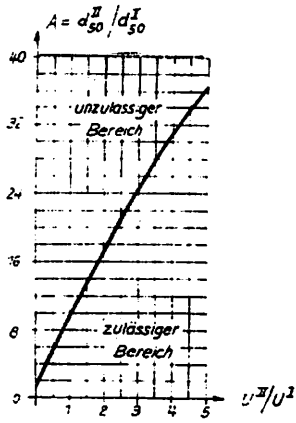


Bild 14

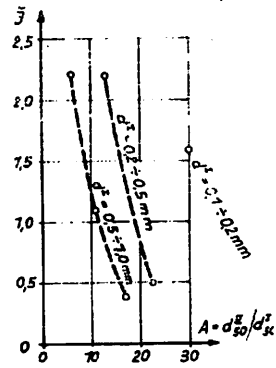


Bild 15

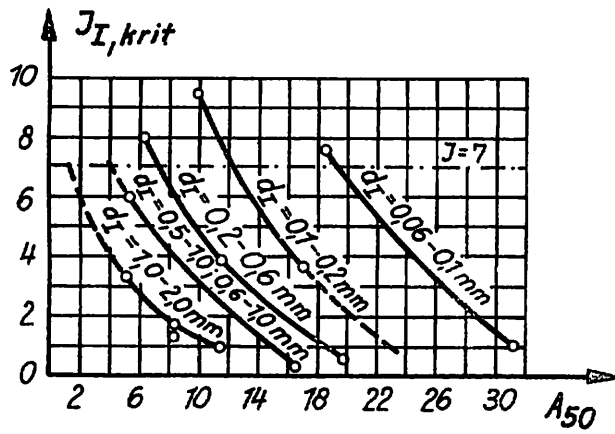


Bild 16

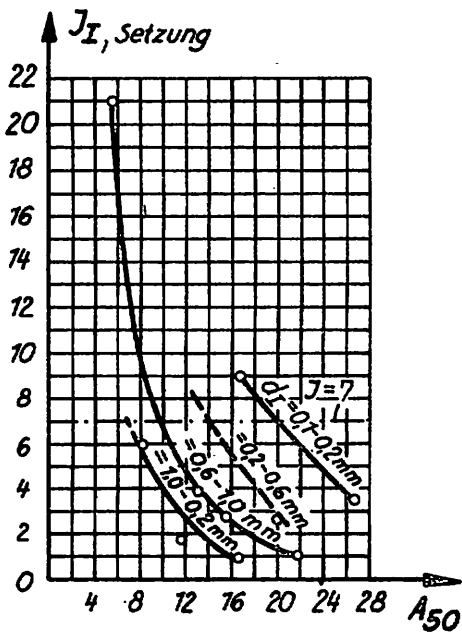


Bild 17

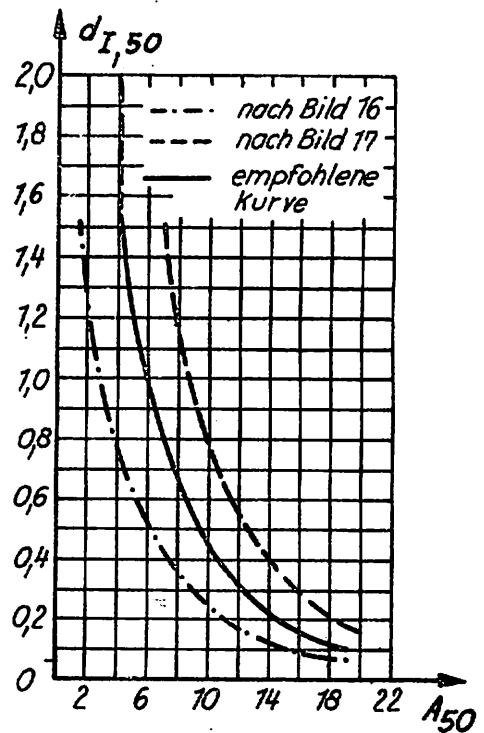


Bild 18