

VEB
Projektierung
Wasserwirtschaft

Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen
gegenüber der Einwirkung der Sickerwasserströmung
Suffosion nichtbindiger Erdstoffe

WAPRO

4.04.

Blatt 2

Inhaltsverzeichnis		Seite
1.	Begriffsbestimmungen	2
2.	Wirkungen und Einflußfaktoren	2
3.	Suffosionsnachweise	3
4.	Grundlagen der Porengeometrie	
4.1.	Der Porendurchmesser im homodispersen Kugelhauwerk	4
4.2.	Der ideale mittlere Porendurchmesser für ungleichförmige Erdstoffe mit stetiger Kornverteilungslinie	5
4.3.	Die Porendurchmesserverteilungslinie	5
4.4.	Der Porendurchmesser bei Kornverteilungslinien, die nach dem Prinzip des geringsten Porenvolumens aufgebaut sind	6
5.	Innere Suffosion	
5.1.	Geometrisch suffosions sichere Erdstoffe	6
5.1.1.	Homodisperse Erdstoffe	7
5.1.2.	Ungleichförmige Erdstoffe mit geraden Kornverteilungslinien im semilogarithmischen Maßstab	7
5.1.3.	Ungleichförmige Erdstoffe mit stetiger Kornverteilungslinie	8
5.1.4.	Ungleichförmige Erdstoffe mit einer Kornverteilungslinie nach der Talbot-Kurve	9
5.1.5.	Ungleichförmige Erdstoffe mit Kornverteilungslinien, die annähernd nach dem Prinzip des geringsten Porenvolumens aufgebaut sind	9
5.2.	Geometrisch suffosionsgefährdete Erdstoffe	9
5.2.1.	Grafische Methode	10
5.2.1.1.	Berechnung des Korndurchmessers d_r	10
5.2.1.2.	Berechnung des Korndurchmessers d_g	11
5.2.1.3.	Zusammenfassung und Regeln	12
5.2.1.4.	Beispiele 1 bis 4	13
5.2.2.	Analytische Methode	16
5.2.2.1.	Festlegung der Abschnittsgrenzen, für welche die Krümmungsparameter K berechnet werden	17
5.2.2.2.	Berechnung des Krümmungsparameter K_t	17
5.2.2.3.	Das analytische Suffosionskriterium S_s	18
5.2.2.4.	Zusammenfassung und Regeln	19
5.2.2.5.	Beispiele 5 bis 11	19
5.3.	Hydraulische Grenzbedingungen der Suffosion, Beispiel 12	22
5.4.	Praktische Erwägungen bei Suffosionsuntersuchungen	23
5.5.	Suffosionsbilanz	24
6.	Äußere Suffosion	24
7.	Kontaktsuffosion, Beispiel 13	24
8.	Verwendete Bezeichnungen	26
9.	Literaturverzeichnis	28
10.	Bilderverzeichnis	30
11.	Schlußbemerkungen	30

Fortsetzung Seite 2 bis 43

Bestätigt: 26.10.70, Direktor, Halle (Saale)

(741)0344-73-1117 V

1. Begriffsbestimmungen

Nach Ziemls [1,7] wird die mechanische Suffosion definiert als

"Umlagerung und Transport der Teilchen der feineren Fraktionen eines Erdstoffs, d.h. der Skelettfüllung, im vorhandenen Porenraum des Erdstoffs, d.h. dem Skelett, durch das Sickerwasser. Das tragende Skelett wird dabei nicht verändert."

Eine ständige Suffosion ist nur möglich, wenn die transportierten Teilchen an einer Grenz- oder Kontaktfläche des Erdkörpers ausgetragen werden. Die Suffosion kann schließlich auch zur Schädigung des Erdstoffskeletts führen, wenn feine, zwischen den tragenden Skelettkörnern eingeklemmte Teilchen, ebenfalls ausgewaschen werden (eingespannte Suffosion).

Hinsichtlich der Lage der Suffosion zum Erdkörper unterscheidet man die
innere Suffosion,
äußere Suffosion und
Kontaktsuffosion.

Die innere Suffosion (siehe Bild 1) ist die Suffosion im Innern eines Erdkörpers. Sie dauert nur verhältnismäßig kurze Zeit und der Transportweg der bewegten Teilchen ist begrenzt, wenn sie nicht durch die äußere oder Kontaktsuffosion fortgesetzt oder eingeleitet wird.

Die äußere Suffosion (siehe Bild 2) ist die Suffosion an der freien Oberfläche eines Erdkörpers. Sie wird bei suffosionsgefährdeten Erdstoffen im allgemeinen durch die innere Suffosion ihre Fortsetzung finden, d.h. diese hervorrufen oder beschleunigen.

Die Kontaktsuffosion (siehe Bild 3) ist die Suffosion an der Kontaktfläche zweier unterschiedlich zusammengesetzter Erdstoffe. Dabei finden die bewegten Teilchen des feineren Erdstoffs in den Poren des größeren Erdstoffs Platz und es ergibt sich die Möglichkeit der weiteren inneren Suffosion in diesem "neuen" Erdstoff. Die Teilchen können sich aber auch im größeren Erdstoff festsetzen, d.h. es kommt zur Kolmation.

Hinsichtlich der Strömungsrichtung des Sickerwassers in bezug auf die Erdschwererichtung und der Zuordnung von feineren und größeren Erdstoffen an einer Kontaktfläche kann man die im Bild 4 gezeigten Typen der Kontaktsuffosion unterscheiden.

2. Wirkungen und Einflußfaktoren

Die Suffosion im definierten Sinne bewirkt die

Veränderung	- der Kornzusammensetzung sowie unter Umständen der Scherhaftfestigkeitsparameter, wie Kohäsion und innerer Reibungswinkel
Erniedrigung	- der Dichte, - des Ungleichförmigkeitsgrades - des Sickerwassergefälles im Bereich der Suffosionserscheinung,
Erhöhung	- des Porenvolumens - Porenzahl - - des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, - des Sickerwasserdurchflusses - des Sickerwassergefälles in den nicht von der Suffosion betroffenen Bereichen eines Erdkörpers
Vorbereitung	- der inneren, der Fugen- und Kontakterosion und bei lange andauernder Suffosion auch des Erosionsbruches von Erdkörpern, z.B. Stauanlagen.

Die Suffosion ist von folgenden Parametern des Erdstoffs und des Sickerwassers abhängig:

Geometrie der Körner	- Korndurchmesser - Kornform
Geometrie der Poren	- Porendurchmesser - Porenform

Mechanische Eigenschaften des Erdstoffs

- Kornverteilungslinie
- Porendurchmesserverteilungslinie
- Lagerungsdichte
- Schlupfmaß zwischen Korn- und Porendurchmesser, Reibungsfaktor zwischen Körnern - Oberflächenrauigkeit - und Kohäsion zwischen den Körnern,

Eigenschaften des Sickerwasserstromes

- Richtung bezüglich der Erdschwere,
 - Geschwindigkeit - Gefälle -
 - Art und Zähigkeit der Flüssigkeit.
- Die Regeln des Werkstandards beziehen sich auf Wasser bei 10 °C.

Durch allgemein bekannte Routineverfahren können Korndurchmesser, Kornverteilungslinie, Lagerungsdichte und die Eigenschaften des Sickerwasserstromes genügend genau bestimmt werden.

Die Kornform und die damit eng zusammenhängende Porenform kann für praktische Zwecke der Suffosionsberechnung noch nicht berücksichtigt werden, da alle ausgereiften Verfahren von der Kugelmodellvorstellung ausgehen. Daher mußte der Gültigkeitsbereich des Werkstandards auf Erdstoffe mit abgerundeten Körnern beschränkt werden.

Auch über den Einfluß des Reibungsfaktors und der Kohäsion liegen noch keine gesicherten Ergebnisse vor. Nach empirischen Erkenntnissen kann man jedoch auf die Berücksichtigung von Reibungsfaktor und Kohäsion verzichten, da diese Handhabung die Suffosionssicherheit günstig beeinflusst. Trotzdem mußte der Gültigkeitsbereich des Werkstandards auf nichtbindige Erdstoffe beschränkt werden, da seine Anwendung für bindige Erdstoffe zu unökonomischen Lösungen führen würde.

Der Schlupffaktor beträgt nach [2,7] für die Kontaktersion natürlicher nichtbindiger Erdstoffe (empirischer Faktor)

$$F \approx 0,6. \quad (1)$$

Dieses Maß drückt aus, um wieviel kleiner der zu transportierende Korndurchmesser d sein muß als der kleinste Durchmesser des Sickerweges - Porendurchmesser d_p -, damit eine Kontaktersion möglich wird. Es berücksichtigt in gewissem Maße allerdings auch eine, wenn auch sehr kleine, Haftung und Reibung der Körner durch Kohäsion und Oberflächenrauigkeit, die etwas von der Kugel abweichende Kornform natürlicher abgerundeter Flußsedimente und gewisse Haftkräfte aus Oberflächenspannung des Sickerwassers am Erdstoffkorn, da diese Einflußfaktoren bei den Versuchen in [2,7] nicht eliminiert werden konnten. Es ist offensichtlich, daß eine Kontaktersion des Kornes d^I durch die Pore d_{pI}^{II} leichter möglich ist als die Suffosion desselben Kornes d^I durch eine gleichgroße Pore d_p^I , da bei der Suffosion eine stärkere Behinderung der Kornbewegung stattfindet als bei der Kontaktersion. Deshalb kann der für die Kontaktersion gefundene Schlupffaktor F (siehe Gl. (1)) auch für Suffosionsberechnungen zur Anwendung empfohlen werden.

Die Bestimmung von Porendurchmesser und Porendurchmesserverteilungslinie wird in Abschnitt 4. erläutert, da es sich hierbei nicht um allgemein bekannte Routineverfahren handelt.

3. Suffosionsnachweise

Bei Suffosionsberechnungen müssen im allgemeinen Fall zwei Sicherheitsnachweise geführt werden.

3.1. Geometrische Suffosionssicherheit $\eta_{S,G}$

Ist der zu transportierende Korndurchmesser d größer als der Porendurchmesser des Sickerkanals d_p , so ist die Suffosion aus geometrischen Gründen absolut unmöglich. Man kann daher entsprechend den Feststellungen in Abschnitt 2. die geometrische Suffosionssicherheit, d.h. die Sicherheit dafür, daß eine Suffosion aus überwiegend geometrischen Gründen nicht auftritt, wie folgt definieren:

$$\eta_{S,G} = \frac{d_m}{F \cdot d_{p,m}} = \frac{d_m}{0,6 \cdot d_{p,m}} \quad (2)$$

Welche Korn- und Porendurchmesser d_m und $d_{p,m}$ für die Suffosion maßgebend sind, wird in den folgenden Abschnitten festgelegt.

3.2. Hydraulische Suffosionssicherheit $\eta_{S,H}$

Ist die geometrische Suffosionssicherheit $\eta_{S,G} < 1$, so liegt ein suffosionsgefährdeter Erdstoff vor. Die Suffosion muß dennoch nicht in jedem Falle eintreten, da erst ein kritisches Sickerwassergefälle die Suffosion bewirkt. Ist das vorhandene Sickerwassergefälle kleiner als das für die Suffosion kritische Sickerwassergefälle, so liegt hydraulische Suffosionssicherheit vor. Es gilt:

$$\eta_{S,G} = \frac{J_{S,krit}}{J_{vorh}} \quad (3)$$

Eine Suffosion tritt daher erst dann ein, wenn

$$\eta_{S,G} < 1 \quad \text{und} \quad \eta_{S,H} < 1$$

sind. Um insbesondere die Inhomogenität der Erdkörper hinsichtlich Kornverteilung und Lagerungsdichte pauschal zu erfassen, wird ein geometrischer Sicherheitsgrad gegen Suffosion von $\eta_{S,G} = 1,5$ und, um die Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des vorhandenen und kritischen Sickerwassergefälles zu berücksichtigen, ein hydraulischer Sicherheitsgrad gegen Suffosion von $\eta_{S,H} = 2$ gefordert.

Bei Suffosionsberechnungen ist daher in jedem Falle zunächst die geometrische Suffosionssicherheit

$$\eta_{S,G} = \frac{d_m}{0,6 \cdot d_{p,m}} \geq 1,5 \quad (4)$$

und wenn $\eta_{S,G} < 1,5$ ist, auch die hydraulische Suffosionssicherheit

$$\eta_{S,H} = \frac{J_{S,krit}}{J_{vorh}} \geq 2 \quad (5)$$

nachzuweisen.

4. Grundlagen der Porengeometrie

4.1. Porendurchmesser im homodispersen Kugelhauwerk

Die Kugelmodellvorstellung ist nach [3] für glimmerarme nichtbindige Erdstoffe durchaus berechtigt. Es gibt sehr viele homodisperse Kugelpackungen in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte mit Berührungspunkten zwischen 3 und 12. Die Packung mit 3 Berührungspunkten ist die wahrscheinlich poröseste mit $n = 0,944$. Sie hat für den praktischen Erdbau keine Bedeutung, da sie nicht stabil ist und daher in der Natur und in Bauwerken nicht auftritt. [4] gibt für homodisperse Kugelpackungen mit 6 - praktisch lockerste Lagerung - und 12 Berührungspunkten - dichteste Lagerung - folgende theoretisch einwandfreie und leicht nachprüfbare Beziehungen an:

praktisch lockerste Lagerung

$$\begin{aligned} n_o &= 0,476 & e_{max} &= 0,908 \\ d_{p,o} &= 0,414 \cdot d & \frac{d}{d_{p,o}} &= 2,41 \end{aligned} \quad (6)$$

dichteste Lagerung

$$\begin{aligned} n_D &= 0,26 & e_{min} &= 0,362 \\ d_{p,D} &= 0,155 \cdot d & \frac{d}{d_{p,D}} &= 6,44 \end{aligned} \quad (7)$$

Nach [5] beträgt der Porenanteil n gleichförmiger nichtbindiger Erdstoffe in natürlicher Lagerung etwa $0,4 \approx n \approx 0,45$. Er liegt nahe dem Porenanteil n_o bei lockerster Lagerung.

Homogene homodisperse Kugelhauwerke besitzen keine wesentlich unterschiedlichen Porendurchmesser, so daß die Bestimmung einer Porendurchmesserverteilungslinie entfällt. Daher können wir feststellen, daß der maßgebende Porendurchmesser $d_{p,m}$ für homodisperses Kugelhauwerk und in guter Näherung auch für abgerundete Erdstoffe mit einem Ungleichförmigkeitsgrad $U = 1$ gleich dem Porendurchmesser bei lockerster Lagerung gesetzt werden kann:

$$d_{p,m} = d_{p,o} = 0,414 \cdot d. \quad (8)$$

4.2. Ideeller mittlerer Porendurchmesser für ungleichförmige Erdstoffe mit stetiger Kornverteilungslinie

In [2_7] werden folgende Beziehungen für den ideellen mittleren Porendurchmesser nach Literaturangaben aufgeführt:

Patrašev [6_7]: $\bar{d}_p = 0,026 (1 + 0,15 \cdot U) \sqrt{\frac{k}{n}} \quad [\text{cm}] \quad (9)$

Pavčić in [7_7]: $\bar{d}_p = 0,535 \cdot \sqrt{U} \cdot e \cdot d_{17} \quad [\text{cm}] \quad (10)$

Gl. (9) und (10) beruhen auf Versuchsergebnissen.

[5_7] entwickelte theoretisch aus der Kapillarsteighöhe h_k :

$$\bar{d}_p = \frac{4 \cdot T}{h_k \cdot \gamma_w} \quad [\text{cm}] \quad (11)$$

und aus dem Reibungsverlust der Sickerwasserströmung:

$$\bar{d}_p = 0,0358 \sqrt{\frac{k_{10}}{n (1 - 0,114 \frac{1-n}{n})}} \quad [\text{cm}] \quad (12)$$

Am Institut für Fluß- und Seebau der Technischen Universität Dresden wurden 50 verschiedene Erdstoffe, u.a. Schluffe, Sande und Kiese, nach den Gl. (9), (10) und (12) ausgewertet (siehe [2_7]). Die Ergebnisse zeigt Bild 5. Man erkennt aus dieser Darstellung, daß das Verhältnis \bar{d}_p/d_{50} mit steigendem Ungleichförmigkeitsgrad eine immer bessere Korrelation zum Ungleichförmigkeitsgrad aufweist. Da die ausgewerteten Gl. (9), (10) und (12) sehr ähnliche Ergebnisse liefern und nur die Gl. (10) die Ermittlung des Porendurchmessers aus der Kornverteilungslinie - d_{17} - und dem Kennwert für die Lagerungsdichte - e - gestattet, wird letztere zur Anwendung empfohlen. Ungünstig bei den Gleichungen von Patrašev und Istomina ist auch noch, daß entweder der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert oder die kapillare Steighöhe bestimmt werden muß und daher die Porendurchmesser mit allen den Fehlern behaftet sind, die diesen Versuchen eigen sind. Die praktische Handhabung der Gl. (10) wird durch Bild 6a und 6b erleichtert.

Eine Entscheidung über den maßgebenden Porendurchmesser bei ungleichförmigen Erdstoffen mit stetiger Kornverteilungslinie kann erst nach Diskussion der Porendurchmesserverteilungslinie erfolgen.

4.3. Porendurchmesserverteilungslinie

Mit diesem Problem hat sich 1965 erstmals [8_7] beschäftigt. Seine theoretischen Untersuchungen sind noch nicht durch entsprechende Versuchsergebnisse belegt. Seine Annahmen für die analytische Berechnung

- die Körner sind Kugeln
- das Haufwerk hat seine dichteste Lagerung
- die relative Lage der Körner zueinander ist zufällig
- die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens eines Korndurchmessers in einer Gruppe ist dem Masseprozentsatz dieser Korngröße gleichzusetzen

sind auch teilweise sehr anfechtbar. Das betrifft insbesondere die seinen Annahmen innewohnende Festlegung, daß der von drei Kugeln in einer Ebene eingeschlossene Porendurchmesser nicht selbst von kleineren Kugel ausgefüllt sein kann, was bei Erdstoffen mit $U > 3$ bei dichtester Lagerung und bei $U > 1,5$ bei lockerster Lagerung unbedingt der Fall sein kann. Auch die vierte Voraussetzung ist sehr fraglich, da die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens eines Korndurchmessers nicht aus der Massensummenlinie - Kornverteilungslinie -, sondern aus der Kornhäufigkeitslinie abgeleitet werden muß.

Trotzdem wird auf Bild 7 ein Vergleich der theoretischen Porendurchmesserverteilungslinien bei dichtester Lagerung, abgeleitet aus der Kornverteilungslinie - Kurve B - nach Silveira und aus der Häufigkeitsverteilung - Kurve C - nach einem Vorschlag von Ziema, sowie der Porendurchmesserverteilungslinien bei lockerster Lagerung, abgeleitet aus der Kornvertei-

lungslinie - Kurve B' - und aus der Häufigkeitsverteilung - Kurve C' - nach einer groben Näherungsbetrachtung von Ziem's; mit den ideellen mittleren Porendurchmessern bei dichtester ($\bar{d}_{p,D}$) und lockerster Lagerung ($\bar{d}_{p,O}$) nach Pavšić durchgeführt. Man erkennt aus diesem Vergleich, daß die Porendurchmesserverteilungslinien B und B', die aus der Kornverteilungslinie abgeleitet wurden, gemessen an den empirischen Werten $\bar{d}_{p,D}$ und $\bar{d}_{p,O}$ für Suffosionsbetrachtungen auf der sicheren Seite liegen, da sie etwas größere $d_{p,50}$ -Werte liefern. Dagegen liegen die Porendurchmesserverteilungslinien C und C', die aus der Häufigkeitsverteilung abgeleitet wurden, auf der unsicheren Seite, gemessen an $\bar{d}_{p,D}$ und $\bar{d}_{p,O}$. Unter Berücksichtigung dessen, daß bei Erdstoffen mit stetiger Kornverteilungslinie die größeren Poren nur mit geringer Wahrscheinlichkeit hintereinander längs des Suffosionsweges liegen, oder auch anders ausgedrückt, daß die großen Körner im allgemeinen als Einlagerung im Material der feineren Körner betrachtet werden können, wird vorgeschlagen, die ideellen mittleren Porendurchmesser (siehe Gl. (10)) als für Suffosionsbetrachtungen maßgebenden Porendurchmesser festzulegen.

Somit kann für ungleichförmige Erdstoffe mit stetiger Kornverteilungslinie geschrieben werden:

$$d_{p,m} = \bar{d}_p = 0,535 \sqrt[4]{U} \cdot e \cdot d_{17} \quad (13)$$

4.4. Porendurchmesser bei Kornverteilungslinien, die nach dem Prinzip des geringsten Porenvolumens aufgebaut sind

Es handelt sich hierbei um Kornmischungen, die so zusammengesetzt sind, daß die jeweils feinere Kornfraktion den von der jeweils größeren Kornfraktion gebildeten Porenraum gerade satt ausfüllt. Diese Erdstoffe besitzen den denkbar kleinsten Porenanteil und somit auch einen fast durchgängig gleichen kleinstmöglichen Porendurchmesser. Aus der Betontechnologie ist die Fuller-Kurve bekannt. Sie gibt diejenige Kornverteilung an, bei der unter sparsamster Verwendung von Bindemitteln die größte Festigkeit erreicht wird. Dabei ist offenbar ein Minimum an Hohlräumen und damit auch eine maximale Rohdichte vorhanden.

Talbot in [9] hat die Kornverteilungslinien mit größter Rohdichte theoretisch abgeleitet und fand:

$$p_i = \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^x \quad (14)$$

Während Talbot $x = 0,5$ einführt, gibt Lee in [9] $x = 0,25$ bis $0,4$ an. Bild 8 zeigt den typischen Verlauf dieser Kornverteilungslinien für verschiedene d_{\max} und x . In der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau durchgeführte Versuche [9] beweisen, daß Erdstoffe, die nach der Talbot-Kurve zusammengesetzt sind, auch bei extrem hohen Sickerwasserfällen, $J = 50$, keine Suffosionserscheinungen zeigen.

Daher kann der maßgebende Porendurchmesser für Kornverteilungslinien, die der Talbot-Kurve entsprechen oder nahe kommen, gleich

$$d_{p,m} = 0,414 d_{\min} \quad (15)$$

gesetzt werden.

5. Innere Suffosion

5.1. Geometrisch suffosions sichere Erdstoffe

Erdstoffe, deren mechanische Kornzusammensetzung (Kornverteilungslinie) eine innere Suffosion ermöglicht, kommen in der Natur relativ selten vor. Es ist daher zweckmäßig, alle Kornverteilungslinien herauszustellen, bei denen eine innere Suffosion aus überwiegend geometrischen Gründen unmöglich ist, bei denen also Gl. (4) erfüllt wird. In Auswertung des Abschnitts 4. über die Festlegungen, welche Porendurchmesser als maßgebend anzusehen sind ($d_{p,m}$) und durch weitere Überlegungen, welche Korndurchmesser als maßgebend gelten (d_m), kann die geometrische Suffosionsicherheit nach Gl. (4) wie folgt präzisiert werden.

5.1.1. Homodisperse Erdstoffe

Es gilt nach Gl. (8): $d_{p,m} = d_{p,o} = 0,414 \cdot d$ und wegen $U = 1$: $d_m = d$.
Somit ergibt sich:

$$\eta_{S,G} = \frac{d}{0,6 \cdot 0,414 \cdot d} = 4 > 1,5 \quad (4a)$$

Daraus folgt:

Regel 1: Homodisperse Erdstoffe mit $U \approx 1$ sind unabhängig von ihrer Lagerungsdichte sicher gegen innere Suffosion.

5.1.2. Ungleichförmige Erdstoffe mit geraden Kornverteilungslinien im semilogarithmischen Maßstab

Es gilt nach Gl. (13): $d_{p,m} = \bar{d}_p = 0,535 \cdot \sqrt[U]{e} \cdot d_{17}$

und ferner ist, wenn man fordert, daß auch nicht das kleinste Erdstoffkorn einer Suffosion unterliegen soll, die absolute geometrische Suffosionssicherheit, $d_m = d_{min}$.

Somit ergibt sich:

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{min}}{0,6 \cdot \bar{d}_p} \geq 1,5 \quad (4b)$$

Sowohl d_{min} als auch \bar{d}_p sind Funktionen von U und d_{50} .

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{min}/d_{50}}{0,6 \cdot \bar{d}_p/d_{50}} \geq 1,5 \quad (4b')$$

Der kleinste Korndurchmesser kann direkt aus der Geradengleichung gewonnen werden:

$$p_i = \frac{P_{60} - P_{10}}{\log d_{60} - \log d_{10}} (\log d_i - \log d_{min}) \quad (16)$$

Durch Umformungen ergibt sich:

$$p_i = \frac{0,5}{\log U} \log \frac{d_i}{d_{min}} \quad \frac{p_i}{0,5} \log U = \log \frac{d_i}{d_{min}}$$

$$U^{p_i/0,5} = \frac{d_i}{d_{min}} \quad d_{min} = \frac{d_i}{U^{p_i/0,5}}$$

Wird als Bezugsgröße $d_i = d_{50}$ gewählt, dann ist:

$$d_{min} = \frac{d_{50}}{U} \quad \text{oder} \quad \frac{d_{min}}{d_{50}} = \frac{1}{U} \quad (17)$$

Danach wird für variable Ungleichförmigkeitsgrade:

Tabelle 1:

U	2	4	6	8	10	20	50	100
d_{min}/d_{50}	0,5	0,25	0,167	0,125	0,1	0,05	0,02	0,01

Der ideale mittlere Porendurchmesser wird nach Bild 5 für lockerste und dichteste Lagerung in Abhängigkeit von U :

Tabelle 2:

U	2	4	6	8	10	20	50	100
$\bar{d}_{p,o}/d_{50}$	0,42	0,22	0,17	0,13	0,10	0,06	<0,03	<0,03
$\bar{d}_{p,D}/d_{50}$	0,13	0,09	0,07	0,06	0,05	0,03	<0,02	<0,01

Nun braucht nur noch der Nenner der Gl. (4b') durch Multiplikation von $0,6 (\bar{d}_p/d_{50})$ gebildet werden und man kann den Wert der geometrischen Suffosionssicherheit $\eta_{S,G}$ mit Hilfe der Tabellen 1 und 2 für verschiedene Ungleichförmigkeitsgrade und Lagerungsdichten berechnen. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3

U	2	4	6	8	10	20	50	100
$\eta_{S,G,0}$	1,98	1,89	1,63	1,60	1,67	1,39	>1,11	>0,55
$\eta_{S,G,D}$	6,41	4,62	3,98	3,47	3,33	2,78	>1,67	>1,67

Auf Bild 9 sind Erdstoffe mit geraden Kornverteilungslinien und mit verschiedenen Ungleichförmigkeitsgraden sowie die dazugehörigen $\bar{d}_{p,0}$ -Werte nach Bild 5 aufgetragen. Daraus ist wiederum ersichtlich, daß für solche Erdstoffe selbst bei lockerster Lagerung bis zu einem Ungleichförmigkeitsgrad $U = 10$ Suffosionssicherheit vorliegt. Es wird $\eta_{S,G} \cdot F = 1,5 \cdot 0,6 \approx 1$ gesetzt.

Aus Tabelle 3 und Bild 9 folgt

Regel 2: Ungleichförmige Erdstoffe mit geraden Kornverteilungslinien im semilogarithmischen Maßstab sind bei $U \leq 10$ unabhängig von ihrer Lagerungsdichte sicher gegen innere Suffosion.

[10] (siehe auch Abschnitt 5.2.1.4., Beispiel 4) hat nachgewiesen, daß gerade Kornverteilungslinien bis $U \leq 100$ unter Voraussetzung mitteldichter Lagerung suffosionssicher sind.

[7] hat Suffosionsversuche für Sande und Kiese mit $2 \leq U \leq 30$ und stetiger Kornverteilungslinie durchgeführt. Seine Versuchsergebnisse mit sicheren Kornverteilungslinien zeigt Bild 10. Sie bestätigen also die theoretischen Feststellungen nach Tabelle 3, Bild 9 und nach [10].

Daraus folgt:

Regel 3: Ungleichförmige Erdstoffe mit geraden Kornverteilungslinien im semilogarithmischen Maßstab und $U > 10$ sind bei mindestens mitteldichter Lagerung

$$D_e = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = 0,3 \text{ bis } 0,6$$

sicher gegen innere Suffosion, wenn ihre Homogenität durch technologische Vorschriften gesichert wird.

5.1.3. Ungleichförmige Erdstoffe mit stetiger Kornverteilungslinie

Es gilt nach Gl. (13): $\bar{d}_{p,m} = \bar{d}_p = 0,535 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17}$ und, wenn man absolute geometrische Suffosionssicherheit fordert: $d_m = d_{\min}$.

Somit ergibt sich:

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{\min}}{0,6 \cdot 0,535 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17}} \geq 1,5 \quad (4c)$$

[11] schlußfolgert aus seinen Versuchsergebnissen für Erdstoffe mit $2 \leq U \leq 30$ und stetiger Kornverteilungslinie weiter (siehe auch Abschnitt 5.1.2.):

- Bei Sanden und Kiesen mit stetiger Kornverteilungslinie ohne Ausfallkörnung und $U < 8$ wurde keine innere Suffosion festgestellt, es kam höchstens zu einem vereinzelt lokalen Wirbel der feinen Körner in den freien Poren zwischen den größeren Körnern.
- Bei $U > 8$ kann es bei $J \geq 6$ zur Suffosion kommen.
- Bei $U > 25$ kann es schon bei sehr geringen Sickerwassergefällen zur Suffosion kommen.

Daraus folgt:

Regel 4: Ungleichförmige Erdstoffe mit stetigen Kornverteilungslinien ohne Ausfallkörnung sind bei $U < 8$ praktisch sicher gegen innere Suffosion, wenn mindestens mitteldichte Lagerung $D_e = 0,3$ bis $0,6$ garantiert ist.

und aus Gl. (4c) ergibt sich

Regel 5: Ungleichförmige Erdstoffe mit stetiger Kornverteilungslinie ohne Ausfallkörnung sind sicher gegen innere Suffosion, wenn $d_{\min} \geq 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,535 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17}$ ist.

Unter Benutzung von Bild 5 lautet die Bedingung unabhängig von der Lagerungsdichte:

$$d_{\min} \geq 1,5 \cdot 0,6 \cdot \bar{d}_{p,0}$$

Der Wert $\bar{d}_p = 0,535 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17}$ kann mit Hilfe der Bilder 6a oder 6b relativ leicht bestimmt werden, so daß Regel 5 ebenfalls leicht auswertbar ist.

5.1.4. Ungleichförmige Erdstoffe mit einer Kornverteilungslinie nach der Talbot-Kurve

Es gilt nach Gl. (15): $d_{p,m} = 0,414 \cdot d_{\min}$ und für absolute geometrische Suffosionssicherheit: $d_m = d_{\min}$. Somit ergibt sich:

$$\gamma_{S,G} = \frac{d_{\min}}{0,6 \cdot 0,414 \cdot d_{\min}} = 4 > 1,5 \quad (4d)$$

Daraus folgt, ebenso wie bei den homodispersen Erdstoffen:

Regel 6: Ungleichförmige Erdstoffe mit Kornverteilungslinien, die der Talbot-Kurve (siehe Bild 8) entsprechen oder dieser nahe kommen, sind unabhängig von ihrer Lagerungsdichte sicher gegen innere Suffosion. Jedoch muß ihre Homogenität durch technologische Vorschriften gesichert werden.

Die letztgenannte Forderung der Regel 6 ergibt sich daraus, daß solche Erdstoffe fast nicht natürlich vorkommen, es sich also um künstlich zusammengesetzte Erdstoffe handelt, die beim unsachgemäßen Einbau zur Entmischung neigen. Daher muß die Homogenität der Mischung durch Misch- und Einbauvorschriften, gesichert werden.

5.1.5. Ungleichförmige Erdstoffe mit Kornverteilungslinien, die annähernd nach dem Prinzip des geringsten Porenvolumens aufgebaut sind

Eine Vielzahl von Autoren hat sich damit beschäftigt, inwieweit Abweichungen der Kornverteilungslinien von den absolut suffosionssicheren Talbot-Kurven zulässig sind. Bild 11 zeigt die Untersuchungsergebnisse von [47, [67, [107, [127 und [137.

Am gründlichsten hat sich mit dieser Frage Lubočkov beschäftigt. Die von ihm angegebenen Grenzkornverteilungslinien, die auf halbempirischer Grundlage beruhen, entsprechen folgender Gleichung:

$$\frac{d_i}{d_{\max}} \Big| U \leq A = \frac{p_i^x + \frac{A-U}{B \cdot (U-1)}}{1 + \frac{A-U}{B \cdot (U-1)}} \quad (18)$$

Die veränderlichen Konstanten A und B sowie der Exponent x sind nach folgender Tabelle zu wählen.

Tabelle 4:

Kornzusammensetzung suffosionssicherer Erdstoffe	Veränderliche		
	x	A	B
an der unteren Grenze	2,0 bis p_i	26,7	47,0
im mittleren Bereich	2,5 bis p_i	62,0	150,0
an der oberen Grenze	2,8 bis 0,5 p_i	156,0	555,0

Bild 12 zeigt die graphische Darstellung von Gl. (18). Da die Voraussetzungen und Schlußfolgerungen von Lubočkov den wirklichen Verhältnissen bei natürlichen nichtbindigen Erdstoffen am nächsten kommen, wird empfohlen, den zulässigen Streubereich für die Kornverteilungslinien nach Bild 12 festzusetzen.

Daraus folgt

Regel 7: Ungleichförmige Erdstoffe in nichtbindiger Lagerung $D_e = 0,3$ bis $0,6$ und mit stetig gekrümmten Kornverteilungslinien, die vollständig im Grenzbereich des Bildes 12 verlaufen, sind sicher gegen innere Suffosion. Ihre Homogenität muß durch technologische Vorschriften gesichert werden.

5.2. Geometrisch suffosionsgefährdete Erdstoffe

Alle Erdstoffe, deren Kornverteilungslinien keine der Regeln 1 bis 7 erfüllen, müssen zunächst als geometrisch suffosionsgefährdet angesehen werden. Dies tritt insbesondere auf Erdstoffe mit unstetigen Kornverteilungslinien zu, die entweder starke Krümmungen und Knicke

oder Ausfallkörnungen besitzen. Ob diese Feststellung bei genauerer theoretischer Untersuchung oder praktischer Überprüfung bestätigt wird, sei vorerst noch dahingestellt. Im folgenden werden ein grafisches und ein analytisches Verfahren erläutert, mit denen die geometrische Suffosionssicherheit bei solchen zunächst als suffosionsgefährdet angesehenen Erdstoffen überprüft werden kann.

5.2.1. Grafisches Verfahren

Neben dem Verfahren von [147], das jedoch nach [27] und [77] nicht für die Praxis empfohlen werden kann, existiert nur das Verfahren von [107].

[107] vertritt die Auffassung, daß jeder nichtbindige Erdstoff einen mittleren wahrscheinlichen Porenanteil n besitzt, der bereits bei minimaler Verdichtung erreicht wird. Die Abweichungen von diesem Wert betragen nur 20 bis 30 %. Sein Verfahren berücksichtigt diesen Porenanteil - etwa mitteldichte Lagerung - und beruht in weiteren nur auf theoretischen Überlegungen bezüglich der Kornverteilungslinie, läßt also keine Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses eines vom mittleren wahrscheinlichen Porenanteil abweichenden Porenanteiles n zu. Dies betrachtet Lubočekov als zulässig, da alle Suffosionsbetrachtungen ohnehin Näherungscharakter tragen. Das Wesen seines Verfahrens besteht darin, daß die Kornverteilungslinie des zu untersuchenden wirklichen Erdstoffes mit einer theoretischen suffosionssicheren Kornverteilungslinie verglichen wird, die nach bestimmten Regeln im Grenzbereich des Bildes 12 auszuwählen ist. Lubočekov hat bewiesen, daß man bei der Auswahl einer theoretischen suffosionssicheren Kornverteilungslinie, durch welche die gegebene wirkliche Kornverteilungslinie ersetzt werden soll, relativ große Freiheit hat [107]. Die maximalen Abweichungen m zwischen diesen Kornverteilungslinien dienen als Maßstab für die geometrische Suffosionsgefährdung des gegebenen Erdstoffes. Indem man die zulässige Abweichung m_{zul} grafisch realisiert, wird für den gerade noch suffosionssicheren größeren Teil der Kornverteilungslinie des wirklichen Erdstoffes die Korngröße d_r bestimmt. Sie ist maßgebend für den Porendurchmesser dieses Teiles des Erdstoffes, der wiederum als Kennwert für die Größe der ausspülbaren Teilchen d_s anzusehen ist. Diese Korngröße d_s stellt im Sinne der Gl. (4) den um den Schlupffaktor verkleinerten maßgebenden Porendurchmesser $F \cdot d_{p,m}$ dar. Für absolute geometrische Suffosionssicherheit gilt ferner $d_m = d_{min}$. Somit kann auch das Verfahren von Lubočekov auf Gl. (4) zurückgeführt werden. Sie lautet dann:

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{min}}{d_s} \geq 1,5. \quad (4e)$$

Natürlich ist auch bei diesem Verfahren eine Diskussion über die Auswirkungen einer geometrisch möglichen Suffosion durchführbar, indem man den Prozentsatz p_s , der im gegebenen Erdstoff enthaltenen Korngrößen $d_{min} \leq d_i \leq d_s$, feststellt und einschätzt, welche Wirkungen die vollständige Auswaschung dieser Teilchen für das Bauwerk oder den Erdkörper hätte.

5.2.1.1. Berechnung des Korndurchmessers d_r , der die Porenabmessungen des suffosionssicheren groben Teils der Kornverteilungslinie eines insgesamt suffosionsgefährdeten Erdstoffes bestimmt

Auf Bild 13 stellt die Kurve a b c den gegebenen Erdstoff dar und die Kurve f d c den äquivalenten theoretischen suffosionssicheren Erdstoff. Die geneigte Gerade a b charakterisiert die feinste Fraktion des wirklichen und die vertikale Gerade f d die äquivalente feinste Fraktion des theoretischen Erdstoffes. Bei den im suffosionssicheren Grenzbereich liegenden theoretischen Kornverteilungslinien bestimmt die feinste Fraktion d_r (siehe Gerade f d) die maßgebenden Porenabmessungen $d_{p,m}$ dieses Erdstoffes, da die Poren jeder größeren Fraktion voraussetzungsgemäß von den Körnern der jeweils feineren Fraktion suffosionssicher ausgefüllt sind. Ebenso bestimmt die feinste Fraktion (siehe Gerade a b) des wirklichen Erdstoffes dessen maßgebenden Porenabmessungen, wenn der größere Teil seiner Kornverteilungslinie die zulässige Abweichung m_{zul} von der äquivalenten suffosionssicheren theoretischen Kornverteilungslinie nicht überschreitet, da dann ebenfalls die Poren jeder größeren Fraktion gerade noch suffosionssicher von der jeweils feineren Fraktion ausgefüllt sind. Die Korngröße d_r ist also so auszuwählen, daß das zulässige Abweichungsmaß

$$m_{zul} = \frac{\Delta p}{\Delta p + p} = \frac{1}{2} \quad (19)$$

gerade eingehalten wird. Bei dem auf Bild 13 gezeigten wirklichen Erdstoff trifft dies für den Punkt e der beiden Kornverteilungslinien zu. Es gilt nämlich:

$$m_e = \frac{\Delta p_e}{\Delta p_e + p_e} = \frac{0,13}{0,13 + 0,13} = \frac{1}{2} = m_{zul}$$

Damit können wir feststellen, daß der grobe Teil e b c der Kornverteilungslinie des realen Erdstoffs gerade noch suffosionssicher ist und die Korngröße d_r , d.h. die kleinste noch suffosionssichere Korngröße, den maßgebenden Porendurchmesser $d_{p,m}$ des realen Erdstoffs bestimmt. Diese Korngröße d_r ergibt sich im Beispiel auf Bild 13 zu:

$$d_r = 0,0711 \cdot d_{max}$$

Gl. (19), mit welcher d_r bestimmt wird, ist nach Lubočkov genau genug und ergibt den Korndurchmesser d_r mit der Sicherheit $\eta_{d_r} = 1$.

Im Beispiel auf Bild 13 stimmen die groben Teile der Kornverteilungslinien b c für den wirklichen und theoretischen suffosionssicheren Erdstoff überein. Wenn dies nicht der Fall ist, so muß man die theoretische suffosionssichere Kornverteilungslinie so wählen, daß sie entweder die Kornverteilungslinie des realen Erdstoffs am extremsten Punkt einer Ausbuchtung - von oben gesehen konvex - berührt (siehe Beispiel 1 und 2) oder dieselbe im Punkt für d_{60} schneidet (siehe Beispiel 3 und 4). Physikalisch bedeutet das im ersten Fall, daß für den feinkörnigen Teil des wirklichen Erdstoffs ein passend zusammengesetzter suffosionssicherer grobkörniger Teil gefunden wurde, und man kann untersuchen, ob dieser suffosionssichere grobkörnige Teil der theoretischen Kornverteilungslinie dem grobkörnigen Teil der Kornverteilungslinie des wirklichen Erdstoffs äquivalent ist oder nicht. Äquivalenz kann konstatiert werden, wenn $m \leq m_{zul}$ ist. Legt man aber die Kornverteilungslinie des theoretischen suffosionssicheren Erdstoffs durch den Punkt d_{60} der Kornverteilungslinie des wirklichen Erdstoffs, so bedeutet dies physikalisch, daß die grobkörnigen Teile des wirklichen und theoretischen Erdstoffs praktisch äquivalent sind, und es wird festgestellt, ob der feinkörnige Teil des wirklichen Erdstoffs dem feinkörnigen Teil des theoretischen suffosionssicheren Erdstoffs entspricht oder nicht. Dies geschieht wiederum durch Vergleich von m mit m_{zul} . Ist $m \leq m_{zul}$, kann festgestellt werden, daß Suffosionssicherheit vorliegt.

Bei Untersuchungen über die Auswirkungen einer geometrischen Suffosion kann es zweckmäßig sein, den Korndurchmesser d_r mit einer bestimmten Sicherheit zu berechnen. Verlangt man den Sicherheitsgrad $\eta_{d_r} = 1,5$, so erhält Gl. (19) folgende Form:

$$m'_{zul} = \frac{\Delta p}{\Delta p + p} = \frac{1}{3} \quad (19')$$

Daraus ergibt sich der Korndurchmesser d_r . Je suffosionsgefährdeter ein Erdstoff ist, umso kleiner muß man den Wert m_{zul} wählen. Zur Bestimmung der geometrischen Suffosionssicherheit nach Gl. (4e) wird jedoch Gl. (19) und d_r benutzt.

5.2.1.2. Berechnung des größten suffosionsgefährdeten Korndurchmessers d_s

Mit Hilfe des nun bekannten rechnerischen Korndurchmessers d_r wird jetzt der maßgebende Porendurchmesser $d_{p,m}$ des gerade noch suffosionssicheren groben Teils des wirklichen Erdstoffs, und/oder der größte suffosionsgefährdete Korndurchmesser $d_s = F \cdot d_{p,m}$ bestimmt. Lubočkov benutzt dazu die Bedingung für die Sicherheit gegen Kontakterosion zweier sehr gleichförmiger Erdstoffe mit $U \approx 2$ bei mitteldichter Lagerung (siehe WAPRO 4.04./3 Bild 7) in der Form:

$$A = \frac{d^{II}}{d^I} = \frac{d_r}{d_s} \leq 10 \quad (20)$$

Sie berücksichtigt bereits den Schlupffaktor F. Da Gl. (20) durch eigene Forschungen für die Kontakterosion bestätigt wurde und die Suffosion von d_s durch die Poren von d_r zweifellos schwieriger ist, als die Kontakterosion von d^I durch die Poren von d^{II} , kann man dem aus Gl. (20) errechneten Wert von d_s den Sicherheitsgrad $\eta_{d_s} = 1$ zumessen, wie es auch Lubočkov tut. Der größte suffosionsgefährdete Korndurchmesser ist also

$$d_s = 0,1 \cdot d_r \quad (21)$$

Somit lautet die Beziehung für die geometrische Suffosionssicherheit

$$S_{,G} = \frac{d_{\min}}{d_s} = \frac{d_{\min}}{0,1 \cdot d_r} = 1,5 \quad (4e')$$

Ist Gl. (4e') nicht erfüllt, so ist die Suffosion möglich. Die Auswirkungen der Suffosion kann man überprüfen, indem man feststellt mit welchem Prozentsatz d_s im Erdstoff enthalten ist. Um bei diesen Betrachtungen sicher zu gehen, kann es zweckmäßig sein, sowohl d_r als auch d_s mit partiellen Sicherheiten zu belegen. Man erhält die partielle Sicherheit $\eta_{d_r} = 1,5$, wenn man Gl. (19') anwendet. Sie ergibt d_r' . Andererseits erhält man z.B. die partielle Sicherheit $\eta_{d_s} = 2$, wenn man d_s' nach

$$d_s' = 0,2 \cdot d_r \quad (21')$$

berechnet. Eine generelle Entscheidung, welche partiellen Sicherheiten bei diesen Untersuchungen zu benutzen sind, kann nicht gefällt werden. Sie sind abhängig vom Grad der Suffosionsgefährdung des Erdstoffs - $\eta_{S,G} < 1$ nach Gl. (4e') - und der Bedeutung des Bauwerks oder Bauteils, das von diesen suffosionsgefährdeten Erdstoffen gebildet oder beeinflusst wird.

5.2.1.3. Zusammenfassung und Regeln

Zusammenfassend kann man folgende Regeln formulieren:

Regel 8: Ein Erdstoff, dessen Suffosionssicherheit nicht nach den Regeln 1 bis 7 nachgewiesen werden kann, kann nach den grafischen Verfahren von Lubockov auf Suffosionssicherheit und den Grad der Suffosionsgefährdung des Erdkörpers überprüft werden.

Alle nichtbindigen Erdstoffe kann man hinsichtlich der Form der Kornverteilungslinie in 3 Typen einstufen:

Typ I: Die Kornverteilungslinie hat im Bereich der feinen Fraktionen einen abnehmenden Anstieg - von oben gesehen konvexen Teil - (siehe Beispiele 1 und 2).

Typ II: Die Kornverteilungslinie hat im Bereich der feinen Fraktionen einen zunehmenden Anstieg - von oben gesehen konkaven Teil - (siehe Beispiel 3).

Typ III: Die Kornverteilungslinie ist eine Gerade im semilogarithmischen Maßstab (siehe Beispiel 4).

Regel 9: Die Berechnung des Korndurchmessers d_r , der die Porenabmessungen des suffosionssicheren groben Teils der Kornverteilungslinie eines insgesamt suffosionsgefährdeten Erdstoffs bestimmt, erfolgt nach Gl. (19)

$$m_{\text{zul}} = \frac{\Delta p}{\Delta p + p} = \frac{1}{2}.$$

Die dazu nötige Auswahl einer äquivalenten theoretischen suffosionssicheren Kornverteilungslinie erfolgt in der Weise, daß letztere die Kornverteilungslinie des wirklichen Erdstoffs in ihrem extremsten konvexen Punkt - Kornverteilungslinie Typ I - berührt oder im Punkt für d_{60} - Kornverteilungslinie Typ II und III - schneidet. Dabei können bei ungünstiger Form der Kornverteilungslinie des wirklichen Erdstoffs bis 40 % und maximal 60 % der groben Fraktionen entfernt werden, ohne daß sich seine Suffosionseigenschaften verändern.

Regel 10: Die Bestimmung des größten suffosionsgefährdeten Korndurchmessers d_s erfolgt nach Gl. (21)

$$d_s = 0,1 \cdot d_r$$

Regel 11: Die geometrische Suffosionssicherheit des untersuchten Erdstoffs wird bestimmt nach Gl. (4e')

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{\min}}{0,1 \cdot d_r} \geq 1,5$$

Regel 12: Ist die geometrische Suffosionssicherheit nach Regel 11 nicht vorhanden, so kann der Grad der Suffosionsgefährdung des Erdkörpers unter Berücksichtigung partieller Sicherheiten für d_r (Gl. (19')) und d_s (Gl. (21')) bestimmt werden, indem man den Prozentsatz p_s der Teilchen $d_{\min} \leq d_1 \leq d_s$ feststellt.

5.2.1.4. Beispiele 1 bis 4

An den folgenden Beispielen wird die Anwendung der grafischen Methode zur Bestimmung der Suffosionseigenschaften nichtbindiger Erdstoffe erläutert und dabei auf einige Besonderheiten eingegangen.

Beispiel 1 (siehe Bild 14)

Die bezogene Kornverteilungslinie 1 stellt einen wirklichen Erdstoff des Typs I mit der Körnung $d = 0,005$ bis 10 mm dar.

Im Bereich a b entspricht die Menge der Fraktionen d_{n+1} der eines suffosionssicheren Erdstoffs an der unteren Grenze des suffosionssicheren Bereiches. Durch die große Menge der Fraktionen d_n im Bereich b c wird die bezogene Kornverteilungslinie an die obere Grenze des suffosionssicheren Bereiches übergeleitet. Im Bereich c d entspricht die Menge der Fraktionen d_{n-1} der eines suffosionssicheren Erdstoffs an der oberen Grenze des suffosionssicheren Bereiches. Es hat den Anschein als ob diese Übereinstimmung darauf hinweist, daß der wirkliche Erdstoff im betrachteten Bereich a b c d suffosionssicher ist. Das ist jedoch aus folgendem Grund nicht der Fall. Die Menge der Fraktion d_n des wirklichen Erdstoffs - Bereich b c - ist um ein nicht geringes Maß größer als die Menge der gleichen Fraktion des theoretischen suffosionssicheren Erdstoffs - Bereich l c -. Es können jedoch nur die Poren der letzteren befriedigend, d.h. suffosionssicher, mit der relativ kleinen Menge der Fraktion d_{n+1} ausgefüllt werden. Somit bleibt ein Teil der Poren der Fraktion d_n des wirklichen Erdstoffs frei, und es besteht die Möglichkeit, daß Teilchen mit Korngrößen $d_i < d_{n+1}$ durch die freigebliebenen Poren der Fraktion d_n ausgewaschen werden.

Die relativ geringe Menge grober Teilchen - Bereich e 0 - verursacht das Heraustreten der bezogenen Kornverteilungslinie aus dem suffosionssicheren Grenzbereich vom Punkt d zu. In diesem Zusammenhang muß man sich Klarheit über den Einfluß der grobkörnigen Teilchen der Erdstoffe auf dessen Suffosionseigenschaften verschaffen. Wenn die Menge der größten Fraktionen relativ gering ist, kann man diese Teilchen praktisch als Einschlüsse im Hauptteil des Erdstoffs betrachten. Diese Teilchen berühren sich gegenseitig nicht, d.h. sie bilden keine Poren, und haben daher auch keinen Einfluß auf die Suffosionseigenschaften des Erdstoffs. Nach den Forschungen von Lubockov kann man praktisch mit Sicherheit bis zu 40 % und bei besonders ungünstiger Form der Kornverteilungslinie auch bis zu 60 % des groben Teils des Erdstoffs entfernen, d.h. unberücksichtigt lassen, ohne daß sich die Suffosionseigenschaften entscheidend verändern. Die Suffosionsberechnung wird in diesen Fällen mit dem verbleibenden feinen Teil des Erdstoffs durchgeführt, der dazu auf 100 % ergänzt werden muß.

In diesem Beispiel werden 15 % des groben Teils des Erdstoffs vernachlässigt - Bereich e 0 -. Der auf 100 % ergänzte feinkörnige Rest bildet die bezogene Kornverteilungslinie 1' des neuen rechnerischen wirklichen Erdstoffs mit der rechnerischen Körnung $d = 0,005$ bis 3 mm. Nach Regel 9 wird für Kornverteilungslinien des Typs I die theoretische suffosionssichere Kornverteilungslinie 2 so gewählt, daß sich beide im extremsten konvexen Punkt der Kornverteilungslinie des wirklichen Erdstoffs 1' berühren. Im vorliegenden Beispiel ist dies der Punkt c'.

Zunächst ist nun zu prüfen, ob die grobkörnigen Bereiche beider Kornverteilungslinien tatsächlich äquivalent sind. Dazu wird die größte Abweichung, in diesem Fall m_d , mit m_{zul} nach Gl. (19) verglichen. Es ist:

$$m_d = \frac{\Delta P_d}{\Delta P_d + P_d} = \frac{0,12}{0,12 + 0,47} = 0,204 < m_{zul} = 0,5$$

Damit ist nachgewiesen, daß der grobkörnige Teil des wirklichen Erdstoffs suffosionssicher ist und die ausgewählte theoretische suffosionssichere Kornverteilungslinie zur Berechnung von d_x und d_p benutzt werden kann.

Als nächstes ist die geometrische Suffosionssicherheit nach Gl. (4c') zu bestimmen. Dazu wird d_x nach Regel 9 bestimmt.

Gl. (19) wird für den Punkt j beider Kornverteilungslinien eingehalten, da

$$m_j = \frac{\Delta P_j}{\Delta P_j + P_j} = \frac{0,075}{0,075 + 0,075} = 0,5$$

ist. Demzufolge ist

$$d_r \approx 0,02 \cdot d_{\max}' = 0,02 \cdot 3 = 0,06 \text{ mm}$$

und weiter ist $d_{\min}' = 0,0016 \cdot d_{\max}' = 0,0016 \cdot 3 = 0,005 \text{ mm}.$

Daraus ergibt sich: $\eta_{S,G} = \frac{d_{\min}'}{0,1 \cdot d_r} = \frac{0,005}{0,006} = 0,83 < 1,5.$

Der Erdstoff ist also nicht geometrisch suffosionssicher.

Als letztes wird der Grad der Suffosionsgefährdung festgestellt. Da $\eta_{S,G} < 1$ ist und ein sehr ungleichförmiger Erdstoff vorliegt, bei dem leicht mögliche Entmischungen zur Inhomogenisierung führen, wird sowohl d_r mit der partiellen Sicherheit $\eta_{d_r} = 1,5$ und d_s mit der partiellen Sicherheit $\eta_{d_s} = 2$ belegt.

Mit Hilfe von Gl. (19) ergibt sich: .

$$d_r' = 0,024 \cdot d_{\max}' = 0,024 \cdot 3 = 0,072 \text{ mm}$$

und nach Gl. (21') ist dann:

$$d_s' = 0,2 \cdot d_r' = 0,2 \cdot 0,072 = 0,0144 \text{ mm}.$$

Der Anteil der Fraktionen $d_{\min}' = d_1 = d_s'$ beträgt im wirklichen Erdstoff $p_s \approx 2\%$. Obgleich also der Erdstoff geometrisch nicht suffosionssicher ist, ist die Suffosionsgefährdung sehr gering, da nur kleinste Schluffpartikelchen ausgewaschen werden können. Im allgemeinen wird man diesen Erdstoff daher für Bauzwecke verwenden können und auch sein Vorhandensein im Baugrund von Stauanlagen gibt keinen Anlaß zu schweren Bedenken.

Beispiel 2 (siehe Bild 15)

Die bezogene Kornverteilungslinie 1 stellt wie im Beispiel 1 einen Erdstoff des Typs I mit der Körnung $d = 0,02$ bis 10 mm - $d_1/d_{\max} = 0,002$ bis 1 - dar. Im Gegensatz zum Beispiel 1 weist dieser Erdstoff jedoch eine deutliche Ausfallkörnung zwischen $0,25 \text{ mm} < d_1 < 2,0 \text{ mm}$ auf, was von vornherein zu der Vermutung berechtigt, daß dieser Erdstoff extrem suffosionsgefährdet sein wird.

Nach Regel 9 muß die theoretisch suffosionssichere Kornverteilungslinie 2 so gewählt werden, daß sie den Punkt b der Kornverteilungslinie 1 berührt. Die größte Abweichung zwischen beiden Kurven befindet sich am Punkt e' und beträgt

$$m_e = \frac{\Delta p_e}{\Delta p_e + p_e} = \frac{0,33}{0,33 + 0,28} = 0,54 > m_{\text{zul}} = 0,5$$

Damit ist nachgewiesen, daß der Erdstoff im groben Teil geometrisch nicht suffosionssicher ist, weil die Kurve 2 zwar für den feinen Teil der Kurve 1 (a b) suffosionssicher zusammengesetzt ist, aber die zulässige Abweichung m_{zul} im groben Teil der Kurve 1 nicht eingehalten wird.

Zur Bestimmung der geometrischen Suffosionssicherheit nach Gl. (4e') wird d_r nach Regel 9 so bestimmt, daß Gl. (19) eingehalten wird. Dies trifft für den Punkt g zu, da

$$m_g = \frac{\Delta p_g}{\Delta p_g + p_g} = \frac{0,32}{0,32 + 0,32} = 0,5$$

ist. Demzufolge ist: $d_r = 0,32 \cdot d_{\max} = 0,32 \cdot 10 = 3,2 \text{ mm}$

und es wird

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{\min}'}{0,1 \cdot d_r} = \frac{0,02}{0,1 \cdot 3,2} = \frac{0,02}{0,32} = 0,062 \ll 1,5.$$

Der Erdstoff ist also, wie zu erwarten war, nicht geometrisch suffosionssicher.

Zur Bestimmung des Grades der Suffosionsgefährdung wird in diesem Falle d_r mit der partiellen Sicherheit $\eta_{d_r} = 1$ und d_s mit den partiellen Sicherheiten $\eta_{d_s} = 2$ vergleichsweise berechnet.

Nach Gl. (21) und (21') ergibt sich:

$$d_s = 0,1 \cdot d_r = 0,1 \cdot 3,2 = 0,32 \text{ mm}$$

$$d_s' = 0,2 \cdot d_r = 0,2 \cdot 3,2 = 0,64 \text{ mm}$$

Für beide Werte von d_g beträgt der Anteil der Fraktionen $d_i \leq d_g$ etwa gleichviel und zwar $p_2 \approx 23\%$. Wie schon aus dem Wert von $\eta_{S,G}$ hervorgeht ist dieser Erdstoff also im höchsten Grade suffosionsgefährdet. Die Auswaschung aller Teilchen der Fraktion $d_i \leq d_g$ würde z.B. zu einer wesentlichen Erhöhung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes mit allen technischen und wasserwirtschaftlichen Folgen führen.

Beispiel 3 (siehe Bild 16)

Die bezogene Kornverteilungslinie 1 stellt einen wirklichen Erdstoff des Typs II mit der Körnung $d = 0,01$ bis 100 mm - $d_i/d_{\max} = 0,0001$ bis 1 - dar. Er enthält relativ wenig grobkörnige Teilchen - Bereich $d > 1$ -, wodurch die Kurve 1 sehr weit außerhalb des Grenzbereiches für theoretische suffosionssichere Kornverteilungslinien zu liegen kommt. Entsprechend den Erläuterungen zum Beispiel 1 über den Einfluß der groben Kornfraktionen auf die Suffosionseigenschaften eines Erdstoffs werden in diesem Fall 40 % der groben Teilchen vernachlässigt. Der verbleibende Rest von 60 % wird auf 100 % ergänzt, wodurch die neue rechnerische Kornverteilungslinie 1' entsteht - $d'_{\max} = 3$ mm -.

Nach Regel 9 muß die theoretische suffosionssichere Kornverteilungslinie 2 beim Typ II so gewählt werden, daß sich beide im Punkt d_{60} der Kornverteilungslinie des realen Erdstoffs schneiden. Nun wird d_r so bestimmt, daß Gl. (19) eingehalten wird. Dies trifft für den Punkt f zu, da

$$m_f = \frac{\Delta P_f}{\Delta P_f + P_f} = \frac{0,2}{0,2 + 0,2} = 0,5$$

ist. Demzufolge ist: $d_r = 0,18 \cdot d'_{\max} = 0,18 \cdot 3 = 0,54$ mm

und es wird: $\eta_{S,G} = \frac{d_{\min}}{0,1 \cdot d_r} = \frac{0,01}{0,054} = 0,185 \ll 1,5$

Dieser Erdstoff ist also nicht geometrisch suffosionssicher.

Zur Bestimmung des Grades der Suffosionsgefährdung wird d_r mit der partiellen Sicherheit $\eta_{d_r} = 1$ und d_g mit der partiellen Sicherheit $\eta_{d_g} = 2$ benutzt. Nach Gl. (21') ergibt sich

$$d'_g = 0,2 \cdot d_r = 0,2 \cdot 0,54 = 0,108 \text{ mm}$$

Der Anteil der Fraktionen $d_i \leq d'_g$ beträgt $p_g \approx 1\%$. Wie im Beispiel 1 ist dieser Erdstoff zwar geometrisch nicht suffosionssicher, dennoch aber nicht sonderlich suffosionsgefährdet. Interessant ist ein Vergleich dieses Erdstoffs mit Regel 4. Der Ungleichförmigkeitsgrad beträgt $V = \frac{3}{0,5} = 6$, ist also kleiner als 8. Nach Člístin ist dieser Erdstoff praktisch suffosionssicher und auch nach dem grafischen Verfahren von Lubockov kann man die gleiche Schlußfolgerung ziehen.

Beispiel 4 (siehe Bild 17)

Die bezogene Kornverteilungslinie 1 stellt einen wirklichen Erdstoff des Typs III mit der Körnung $d = 0,01$ bis 100 mm - $d_i/d_{\max} = 0,0001$ bis 1 - dar. Sie liegt außerhalb des Grenzbereiches für theoretische suffosionssichere Kornverteilungslinien. Nach den Überlegungen über den Einfluß der gröberen Fraktionen auf die Suffosionseigenschaften eines Erdstoffs (siehe Beispiel 1), kann man im Extremfall bis zu 60 % des groben Teiles der Kornverteilungslinie vernachlässigen. Die verbleibende Menge von 40 % wird auf 100 % ergänzt, wodurch die neue rechnerische Kornverteilungslinie 1' entsteht - $d'_{\max} = 0,41$ mm -.

Bei Erdstoffen des Typs III wird entsprechend Regel 9 die theoretische suffosionssichere Kornverteilungslinie 2 so gewählt, daß sich beide im Punkt d_{60} des wirklichen Erdstoffs schneiden. Die Kurve 2 liegt außerhalb der oberen Grenze suffosionssicherer Kornverteilungslinien, dies ist nach Lubockov jedoch zulässig, da die obere Grenze noch genügend Sicherheit einschließt (siehe auch Bild 11). Somit kann die Kurve 1' als im suffosionssicherem Bereich liegend betrachtet werden. Nun wird d_r so bestimmt, daß Gl. (19) eingehalten wird. Dies trifft für den Punkt f₁ zu, da

$$m_{f,1} = \frac{\Delta P_{f,1}}{\Delta P_{f,1} + P_{f,1}} = \frac{0,19}{0,19 + 0,19} = 0,5$$

ist. Demzufolge ist: $d_r = 0,046 \cdot d'_{\max} = 0,046 \cdot 0,41 = 0,0189$ mm

und es wird:
$$\eta_{S,G} = \frac{d_{\min}}{0,1 \cdot d_x} = \frac{0,01}{0,00189} = 5,3 > 1,5$$

Der Erdstoff ist also geometrisch suffosionssicher.

Da diese Untersuchung prinzipielle Bedeutung hat und einschneidende Annahmen getroffen wurden - $d'_{\max} = 0,4 \cdot d_{\max}$, Kurve 2 außerhalb der oberen Grenze des normalerweise suffosionssicheren Bereiches -, wird d_x auch nach Gl. (19') bestimmt.

Diese Gleichung wird vom Punkt f_2 erfüllt, da

$$m_{f_2} = \frac{\Delta P_{f_2}}{\Delta P_{f_2} + P_{f_2}} = \frac{1}{3}$$

ist. Danach ist
$$d'_x = 0,077 \cdot d'_{\max} = 0,077 \cdot 0,41 = 0,0316 \text{ mm}$$

und es wird
$$\eta'_{S,G} = \frac{d_{\min}}{0,1 \cdot d'_x} = \frac{0,01}{0,00316} = 3,16 > 1,5$$

Und selbst wenn man noch eine partielle Sicherheit für d_g von $\eta_{d_g} = 2$ einführt, kann der Erdstoff als suffosionssicher bezeichnet werden, da

$$\eta''_{S,G} = \frac{d_{\min}}{0,2 \cdot d'_x} = \frac{0,01}{0,00632} = 1,58 > 1,5$$

wird.

Die durchgeführte Berechnung ermöglicht folgende Schlussfolgerungen. Dieser Erdstoff des Typs III erfaßt mit seiner Körnung alle Bereiche nichtbindiger Erdstoffe vom Grobschluff bis zum Grobkies und zu den Steinen - $d = 0,01$ bis 100 mm -. Feinkörnigere Erdstoffe sind bereits als bindig anzusprechen, für die diese Methode nicht angewendet werden kann. Größere Erdstoffe mit gerader Kornverteilungslinie und $U > 100$ kommen in der Natur nicht vor. Da der untersuchte Erdstoff suffosionssicher ist, sind auch alle anderen nichtbindigen Erdstoffe mit geraden Kornverteilungslinien und solche Erdstoffe, deren Kornverteilungslinien einer Geraden nahe kommen, suffosionssicher, da ihr Ungleichförmigkeitsgrad $U < 100$ sein wird. Da die grafische Methode eine etwa mitteldichte Lagerung voraussetzt, muß jedoch eingeschränkt werden, daß die obige Feststellung zutrifft, wenn die Erdstoffe mitteldicht gelagert sind und in sich homogen sind (siehe Regel 3).

5.2.2. Analytische Methode

Es existiert zur Zeit nur das Verfahren von [10]. Ebenso wie das grafische Verfahren setzt es etwa mitteldichte Lagerung voraus. Das Wesen des analytischen Verfahrens besteht in Folgendem. Jede Anstiegsänderung der Kornverteilungslinie bedeutet physikalisch eine Veränderung der Korngröße und der Menge der Erdstoffteilchen im betreffenden Bereich. Kennt man die Gesetzmäßigkeiten der Anstiegsänderung bei theoretischen gerade noch suffosionssicheren Kornverteilungslinien und bei den Kornverteilungslinien wirklicher Erdstoffe, so kann man durch Vergleich dieser Gesetzmäßigkeiten auf die Suffosionseigenschaften der wirklichen Erdstoffe schließen. Als Kennwert der Anstiegsänderung wird der Krümmungsfaktor K der theoretischen gerade noch suffosionssicheren Kornverteilungslinie

$$K_t = \frac{P_{n-1,t} - P_{n,t}}{P_{n,t} - P_{n+1,t}} \quad (22)$$

und der Kornverteilungslinie des wirklichen Erdstoffs

$$K_w = \frac{P_{n-1,w} - P_{n,w}}{P_{n,w} - P_{n+1,w}} \quad (23)$$

gewählt. Das Verhältnis
$$S = \frac{K_w}{K_t} \quad (24)$$

wird als Suffosionskriterium bezeichnet. Ist $S = 1$, stimmen also die Krümmungsfaktoren K_w und K_t überein, besteht keine Suffosionsgefahr, da ja die theoretische suffosionssichere mit der wirklichen Kornverteilungslinie hinsichtlich ihrer Anstiegsänderungen übereinstimmt. Ebenso besteht keine Suffosionsgefahr, wenn der Krümmungsfaktor K_w kleiner als der Krümmungsfaktor K_t ist, d.h. bei $S < 1$. Suffosionsgefahr besteht nur, wenn $S \geq 1$ ist. Man darf das

Suffosionskriterium S nicht mit dem Sicherheitsgrad $\eta_{S,G}$ verwechseln. Das Suffosionskriterium gibt nur darüber Auskunft, ob für einen bestimmten Bereich der wirklichen Kornverteilungslinie die zulässige Krümmung eingehalten wurde oder nicht, d.h. ob in diesem Kornbereich Suffosionsgefahr besteht oder nicht. Die Größe des Sicherheitsgrades $\eta_{S,G}$ nach Gl. (4) kann zunächst nicht angegeben werden.

Lubočkov erläutert in [10] auch eine Möglichkeit, die Korngröße d_g analytisch zu berechnen. Das Verfahren ist nicht anschaulich und zu arbeitsaufwendig, so daß auf seine Wiedergabe hier verzichtet wird. Es wird daher vorgeschlagen, bei Suffosionsberechnungen nach folgender Reihenfolge vorzugehen:

- Berechnung des Suffosionskriteriums S nach dem analytischen Verfahren. Ist $S > 1$ wird
 - die geometrische Suffosionssicherheit $\eta_{S,G}$ mit Hilfe des grafischen Verfahrens berechnet und
 - der Grad der Suffosionsgefährdung, d.h. der Prozentsatz p_g der Körne $d_i \leq d_g$, festgestellt.
- Nunmehr werden die einzelnen Schritte des Verfahrens angegeben und durch Beispiele erläutert.

5.2.2.1. Festlegung der Abschnittsgrenzen, für welche die Krümmungsparameter K berechnet werden

Am naheliegendsten ist es, die Abschnittsgrenzen nach Gl. (20) festzulegen:

$$\frac{d'_n}{d'_{n+1}} = \frac{d'_{n-1}}{d'_n} = 10 \quad (25')$$

Dabei legt man d'_n an die Stelle der Kornverteilungslinie des wirklichen Erdstoffs, die von der Kornverteilungslinie des theoretischen suffosionssicheren Erdstoff in Bezug auf die Anstiegsänderung am meisten abweicht, d.h. an einem Knick oder an einem Punkt der Kornverteilungslinie mit größter Krümmung (siehe Beispiel 2 - Bild 15 - am Punkt e). Im allger nämlich wenn $S = 1$ ist, entspricht dann die Korngröße d'_n etwa d_r und die Korngröße $d'_{n+1} = \frac{1}{10} \cdot d'_n$ etwa dem Wert d_g beim grafischen Verfahren. Es wird also gerade der Bereich erfaßt, der mit der partiellen Sicherheit $\eta_{d_g} = 1$ belegt ist. Wenn für diesen Bereich das Suffosionskriterium nach Gl. (24) erfüllt ist, kann daher offensichtlich keine Suffosion auftreten.

Aber diese verhältnismäßig große Länge des Abschnittes gibt für die Berechnung des Suffosionskriteriums S nicht genügend Sicherheit, da es ja nur eine Aussage erlaubt, ob die Suffosion möglich ist oder nicht, aber keine Aussage darüber, welcher Sicherheitsgrad $\eta_{S,G}$ vorliegt. Daher schlägt Lubočkov vor, die Abschnittsgrenzen entsprechend Gl. (21') festzulegen:

$$\frac{d_n}{d_{n+1}} = \frac{d_{n-1}}{d_n} = 5 \quad (25)$$

In diesem Falle beträgt die partielle Sicherheit $\eta_{d_g} = 2$. Vermindert man die Abschnittslänge nochmals auf

$$\frac{d''_n}{d''_{n+1}} = \frac{d''_{n-1}}{d''_n} = 2,5 \quad (25'')$$

ergibt sich schließlich eine partielle Sicherheit $\eta_{d_g} = 4$. Aus den nachfolgenden Abschnitten wird ersichtlich, welche Abschnittsgrenzen Anwendung finden sollen.

5.2.2.2. Berechnung des Krümmungsparameters K_t für theoretische suffosionssichere Kornverteilungslinien

Die bisherigen Suffosionsforschungen zeigten eindeutig, daß Erdstoffe dann am ehesten zur Suffosion neigen, wenn ihre Kornverteilungslinie stärker gekrümmt ist als die untere Grenze nach Bild 12, während die obere Grenze noch zusätzliche Sicherheit in sich birgt. Daher verwendet Lubočkov die untere Grenze als Analogon für Suffosionsuntersuchungen. Die Gleichung dafür lautet für unendlich viele rechnerische Fraktionen (siehe auch Gl. (18) und Tabelle 4):

$$\frac{d_i}{d_{\max}} = p_i^{2-} \cdot p_i^{+} \quad (26)$$

und als sichere Näherungslösung gilt:

$$\frac{d_i}{d_{\max}} = p_i^{5/3} \quad \text{oder} \quad p_i = \left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{0,6} \quad (26')$$

Mit Gl. (26') kann der Wert von K_t in Abhängigkeit von den benutzten Abschnittsgrenzen nach Gl. (25'), (25) oder (25'') berechnet werden. So ergibt sich z.B. unter Verwendung von Gl. (25):

$$p_{n-1,t} = \left(\frac{d_{n-1,t}}{d_{\max}}\right)^{0,6} = 5^{0,6} \cdot \left(\frac{d_{n,t}}{d_{\max}}\right)^{0,6}$$

$$p_{n,t} = \left(\frac{d_{n,t}}{d_{\max}}\right)^{0,6}$$

$$p_{n+1,t} = \left(\frac{d_{n+1,t}}{d_{\max}}\right)^{0,6} = \frac{1}{5^{0,6}} \left(\frac{d_{n,t}}{d_{\max}}\right)^{0,6}$$

und es wird nach Gl. (22):

$$K_t = \frac{\left(\frac{d_{n,t}}{d_{\max}}\right)^{0,6} (5^{0,6} - 1)}{\left(\frac{d_{n,t}}{d_{\max}}\right)^{0,6} \left(1 - \frac{1}{5^{0,6}}\right)} = \frac{5^{0,6} - 1}{1 - \frac{1}{5^{0,6}}}$$

$$K_t = \sqrt[5]{5^3} \approx 2,6 \quad (27)$$

Entsprechend errechnet sich mit Hilfe von Gl. (25')

$$K_{t,\max} = \sqrt[5]{10^3} \approx 4,0 \quad (27')$$

und mit Hilfe von Gl. (25'') $K_{t,\min} = \sqrt[5]{2,5^3} \approx 1,7 \quad (27'')$

Das Verhältnis $\eta_{K_t} = \frac{K_{t,\max}}{K_t} = \frac{4,0}{2,6} \approx 1,5 \quad (28)$

und $\eta_{K_t} = \frac{K_{t,\max}}{K_{t,\min}} = \frac{4,0}{1,7} \approx 2,3 \quad (28')$

zeigt, mit welchem Sicherheitsgrad das Suffosionskriterium $S = K_w/K_t$ belegt ist, wenn man an Stelle von $K_{t,\max}$ ($\eta_{d_s} = 1$) K_t ($\eta_{d_s} = 2$) oder $K_{t,\min}$ ($\eta_{d_s} = 4$) verwendet.

Da K_t bei einer gewählten Abschnittlänge konstant ist, vereinfacht sich die Berechnung von S bedeutend.

5.2.2.3. Analytisches Suffosionskriterium S

Nochmals feststellend, daß das Suffosionskriterium nach Gl. (24) für $S \leq 1$ Suffosionssicherheit und für $S > 1$ Suffosionsgefahr anzeigt, aber nicht den Grad der geometrischen Suffosionssicherheit $\eta_{S,G}$, kann man entsprechend den Ergebnissen von Abschnitt 5.2.2.2. schreiben:

a) Der wirkliche Erdstoff ist im Bereich $d_{n+1}' = \frac{1}{10} d_n'$ bis $d_{n-1}' = 10 \cdot d_n'$ mit dem Sicherheitsgrad $\eta_{K_t} = 1$ suffosionssicher, wenn

$$S_{\min} = \frac{K_w'}{4,0} = 0,25 \cdot K_w' \leq 1 \quad (29)$$

erfüllt ist.

b) Der wirkliche Erdstoff ist im Bereich $d_{n+1}' = \frac{1}{5} \cdot d_n'$ bis $d_{n-1}' = 5 \cdot d_n'$ und dem Sicherheitsgrad $\eta_{K_t} = 1,5$ suffosionssicher, wenn

$$S = \frac{K_w}{2,6} \approx 0,4 \cdot K_w \leq 1 \quad (30)$$

erfüllt ist. Gl. (30) wird für die Anwendung empfohlen.

c) Der wirkliche Erdstoff ist im Bereich $d_{n+1}'' = \frac{1}{2,5} \cdot d_n''$ bis $d_{n-1}'' = 2,5 \cdot d_n''$ mit dem Sicherheitsgrad $\eta_{K_t} = 2,3$ suffosionssicher, wenn

$$S_{\max} = \frac{K_w''}{1,7} = 0,59 \cdot K_w'' \leq 1 \quad (31)$$

erfüllt ist.

Der Krümmungsparameter des wirklichen Erdstoffs K_w , K_w' oder K_w'' wird nach Gl. (23) für dieselben Abschnittslängen berechnet, für die K_t bestimmt wurde.

Es ist notwendig, darauf hinzuweisen, daß das Suffosionskriterium S sich nicht verändert, wenn man, wie beim grafischen Verfahren, Teile des grobkörnigen Bereiches der Kornverteilungslinie vernachlässigt.

5.2.2.4. Zusammenfassung und Regeln

Die Berechnung der Suffosionseigenschaften eines wirklichen Erdstoffs erfolgt beim analytischen Verfahren in folgenden Schritten:

- auftragen der Kornverteilungslinie im semilogarithmischen Maßstab
- aufsuchen des Abschnittes mit der größten Anstiegsänderung im feinkörnigen Bereich der Kornverteilungslinie
- aufschreiben der Koordinaten d_n und p_n für den Mittelpunkt dieses Bereiches

d) berechnen der Koordinaten d_{n+1}/p_{n+1} und d_{n-1}/p_{n-1} nach Gl. (25) oder ablesen aus der Kornverteilungslinie zur Berechnung des Suffosionskriteriums nach Gl. (30). Dafür gilt:

Regel 13: Die Abschnittsgrenzen zur Berechnung des Krümmungsparameter K_w der Kornverteilungslinie des wirklichen Erdstoffs werden wie folgt bestimmt:

$$d_{n+1} = \frac{1}{5} \cdot d_n \text{ und } d_{n-1} = 5 \cdot d_n.$$

e) Nunmehr erfolgt die Berechnung des Krümmungsparameters K_w nach Gl. (23) mit

Regel 14: Der Krümmungsparameter K_w wird aus

$$K_w = \frac{p_{n-1} - p_n}{p_n - p_{n+1}} \quad \text{berechnet.}$$

f) Damit ergibt sich als Suffosionskriterium nach Gl. (30):

Regel 15: Das Suffosionskriterium wird aus $S = 0,4 \cdot K_w$ berechnet.

Ist $S \leq 1$ besteht im untersuchten Abschnitt - $d_{n+1} = d_n = d_{n-1}$ - keine Suffosionsgefahr. Bei $S \geq 1$ ist der untersuchte Abschnitt nicht genügend suffosionssicher.

g) Ist $S > 1$, erfolgt die weitere Suffosionsberechnung nach dem grafischen Verfahren entsprechend den Regeln 9 bis 12.

5.2.2.5. Beispiele 5 bis 11

An den folgenden Beispielen wird die grafische Methode zur Berechnung des Suffosionskriteriums S erläutert und dabei auf einige Besonderheiten eingegangen.

Beispiel 5 (siehe Bild 18)

Die Kornverteilungslinie 1 stellt einen schwachsandigen Kies mit der Körnung $d = 0,1$ bis 100 mm dar. Mit $d_{10} = 0,98$ mm und $d_{60} = 21,1$ mm beträgt sein Ungleichförmigkeitsgrad $U = 21,5$. Die Kornverteilungslinie verläuft ziemlich stetig, daher ist die Auswahl des Punktes d_n schwierig. Gewählt wird $d_n = 2$ mm. Nach Regel 13 wird: $d_{n+1} = 0,4$ mm und $d_{n-1} = 10$ mm. Aus der Kornverteilungslinie ergibt sich: $p_n = 15,5$ %, $p_{n+1} = 4,4$ % und $p_{n-1} = 42,5$ %. Nach Regel 14 errechnet sich: $K_w = \frac{42,5 - 15,5}{15,5 - 4,4} = 2,43$ und damit wird nach Regel 15: $S = 0,4 \cdot 2,43 = 0,97 < 1$. Somit ist dieser Erdstoff genügend suffosionssicher.

Vergleichsweise soll bei diesem Beispiel auch S_{\min} und S_{\max} nach Gl. (29) und (31) berechnet werden.

Nach Gl. (25') ergibt sich: $d'_{n+1} = 0,2$ mm und $d'_{n-1} = 20$ mm und damit wird: $p'_{n+1} = 2$ % und $p'_{n-1} = 58,5$ %. Der Krümmungsparameter $K_w' = \frac{58,5 - 2}{15,5 - 2} = 3,18$ und nach Gl. (29) wird: $S_{\min} = 0,25 \cdot 3,18 = 0,799 < 1$. Selbstverständlich ergibt sich auch jetzt Suffosionssicherheit.

Nach Gl. (25'') ergibt sich: $d''_{n+1} = 0,8$ mm und $d''_{n-1} = 5$ mm und damit wird: $p''_{n+1} = 9$ % und $p''_{n-1} = 28,5$ %. Der Krümmungsparameter K_w'' beträgt dann: $K_w'' = \frac{28,5 - 9}{15,5 - 9} = 2$ und nach Gl. (31) wird $S_{\max} = 0,59 \cdot 2 = 1,18 > 1$. Der Erdstoff wäre demzufolge als suffosionsgefährdet anzusehen.

Zusammenhängend kann man feststellen, daß der untersuchte Erdstoff bei einem Sicherheitsgrad $\eta_{K_t} = 1$ wegen $S_{\min} = 0,795 < 1$ und bei $\eta_{K_t} = 1,5$ wegen $S = 0,97 < 1$ als suffosionssicher anzusprechen ist und erst bei $\eta_{K_t} = 2,3$ wegen $S_{\max} = 1,18 > 1$ eine Suffosionsgefährdung bestehen würde.

Der Sicherheitsgrad $\eta_{K_t} = 1,5$ reicht im allgemeinen für Suffosionsberechnungen aus. Nur in Sonderfällen, z.B. in Erdbebengebieten oder wenn Schwingungen in den Erdstoff eingetragen werden, sollte man mit $\eta_{K_t} = 2,3$ rechnen. Dies ausschließend kann der untersuchte Erdstoff abschließend als genügend suffosionssicher bezeichnet werden.

Beispiel 6 (siehe Bild 18)

Die Kornverteilungslinie 2 stellt einen schwach schluffigen Kiessand mit einem Ungleichförmigkeitsgrad $U = 102,5 - d_{10} = 0,08 \text{ mm}$, $d_{60} = 8,2 \text{ mm}$ dar. Die Kornverteilungslinie verläuft im grobkörnigen Bereich ziemlich stetig, weist im feinkörnigen Bereich am Punkt a jedoch einen Knick auf. Die Berechnung erfolgt daher für die zwei Bereiche der Punkte b und a.

Bereich b:

$d_n = 1 \text{ mm}$, $d_{n+1} = 0,2 \text{ mm}$ und $d_{n-1} = 5 \text{ mm}$ mit $p_n = 26 \%$, $p_{n+1} = 15,0 \%$ und $p_{n-1} = 50,5 \%$.

Damit wird: $K_w = \frac{50,5 - 26,0}{26,0 - 15,0} = 2,2$ und $S = 0,4 \cdot 2,2 = 0,88 < 1$. Der Bereich b dieses Erdstoffes ist demnach genügend suffosionssicher.

Bereich a

$d_n = 0,05 \text{ mm}$, $d_{n+1} = 0,01 \text{ mm}$ und $d_{n-1} = 0,25 \text{ mm}$ mit $p_n = 6,3 \%$, $p_{n+1} = 3,0 \%$ und $p_{n-1} = 16,5 \%$.

Damit wird: $K_w = \frac{16,5 - 6,3}{6,3 - 3,0} = 3,1$ und $S = 0,4 \cdot 3,1 = 1,24 > 1$. Folglich ist der Bereich a nicht genügend suffosionssicher. Durch Anwendung des grafischen Verfahrens ergibt sich

$d_r = 0,06 \text{ mm}$ und $d_s = 0,006 \text{ mm}$. Mit $d_{\min} < 0,002 \text{ mm}$ ergibt sich: $\eta_{S,G} < \frac{0,002}{0,006} < 0,33$.

Der Anteil der ausspülbaren Teilchen beträgt bei der partiellen Sicherheit $\eta_{d_s} = 1$ mit $d_s = 0,006 \text{ mm}$ $p_s = 2,5 \%$ und bei $\eta_{d_s} = 2$ mit $d'_s = 0,012 \text{ mm}$ $p'_s = 3,8 \%$. Der Grad der Suffosionsgefährdung ist also relativ gering.

Beispiel 7 (siehe Bild 18)

Die Kornverteilungslinie 3 stellt eine Gerade mit der Körnung $d = 0,1$ bis 100 mm und $U = 100$ dar. Aus der Geradengleichung (16) ergibt sich:

$$p_i = \frac{0,5}{\log U} \log \frac{d_i}{d_{\min}} = \frac{0,5}{2} \log \frac{d_i}{d_{\min}} = 0,25 \log \frac{d_i}{d_{\min}} \quad (32)$$

und es wird mit Gl.(25):

$$p_n = 0,25 \log \frac{d_n}{d_{\min}} ; \quad p_{n+1} = 0,25 \log \frac{1/5 \cdot d_n}{d_{\min}} ; \quad p_{n-1} = 0,25 \log \frac{5 \cdot d_n}{d_{\min}}$$

Schließlich ergibt sich der Krümmungsparameter zu:

$$K_w = \frac{0,25 \left[(\log 5 + \log d_n/d_{\min}) - \log d_n/d_{\min} \right]}{0,25 \left[\log d_n/d_{\min} - (\log 1/5 + \log d_n/d_{\min}) \right]} = \frac{\log 5}{\log 5} = 1.$$

Somit wird nach Gl. (29), (30) und (31):

$$S_{\min} = 0,25 ; \quad S = 0,4 \quad \text{und} \quad S_{\max} = 0,59$$

somit nochmals festgestellt werden kann, daß alle Erdstoffe mit geraden Kornverteilungslinien suffosionssicher sind (siehe Regel 2 und 3 sowie Beispiel 4).

Beispiel 8 (siehe Bild 18)

Die Kornverteilungslinie 4 stellt einen Erdstoff dar, der von [12] für Filter unter wasserseitigen Steinschüttungen von Staudämmen empfohlen wird (siehe auch Bild 11). Die Kornverteilungslinie entspricht der Beziehung $p_i = d_i/d_{\max}$. Demzufolge kann der Krümmungsparameter als Konstante angegeben werden.

Es ergibt sich:

$$K_w = \frac{d_n/d_{\max}(5-1)}{d_n/d_{\max}(1-\frac{1}{5})} = 5 \quad \text{und} \quad S = 2 > 1 \quad (33)$$

Daher schlußfolgert Luboček in [107], daß dieser Erdstoff nicht suffosionssicher ist, was er auch durch experimentelle Untersuchungen nachgewiesen hat.

Beispiel 9 (siehe Bild 19)

Untersucht wird der Erdstoff mit der Kornverteilungslinie a b f 0 - Kurve 1 - mit $U = 10$ - $d_{10} = 1 \text{ mm}$, $d_{60} = 10 \text{ mm}$ -. Die Berechnung wird für den Punkt b durchgeführt. Es ist: $d_n = 1 \text{ mm}$, $d_{n+1} = 0,2 \text{ mm}$ und $d_{n-1} = 5,0 \text{ mm}$ mit: $p_n = 10 \%$, $p_{n+1} = 7,5 \%$ und $p_{n-1} = 45 \%$. Damit wird: $K_w = \frac{45-10}{10-7,5} = 14$ und $S = 0,4 \cdot 14 = 5,6 > 1$. Folglich ist dieser Erdstoff nicht suffosionssicher. Nach der grafischen Methode ergibt sich $d_r = 0,35 \text{ mm}$ und mit der partiellen Sicherheit $\eta_{d_s} = 2$ wird $d'_s = 0,07 \text{ mm}$ mit $p'_s = 3 \%$. Die geometrische Suffosionssicherheit ist $\eta_{S,G} = \frac{0,07}{0,35} = 1,43 < 1,5$.

Der Erdstoff ist nicht genügend suffosionssicher, aber der Grad der Suffosionsgefährdung wegen $p'_s = 3 \%$ relativ klein.

Beispiel 10 (siehe Bild 19)

Untersucht wird der Erdstoff mit der Kornverteilungslinie a c e 0 - Kurve 2 - mit $U = 34$ - $d_{10} = 1 \text{ mm}$, $d_{60} = 34 \text{ mm}$ -. Die Berechnung wird für den Punkt c durchgeführt. Es ist: $d_n = 2 \text{ mm}$, $d_{n+1} = 0,4 \text{ mm}$ und $d_{n-1} = 10 \text{ mm}$ mit $p_n = 11 \%$, $p_{n+1} = 8,5 \%$ und $p_{n-1} = 27,5 \%$. Damit wird: $K_w = \frac{27,5-11}{11-8,5} = 6,6$ und $S = 0,4 \cdot 6,6 = 2,6 > 1$. Folglich ist auch dieser Erdstoff nicht suffosionssicher. Nach der grafischen Methode ergibt sich $d_r = 2 \text{ mm}$ und mit der partiellen Sicherheit $\eta_{d_s} = 2$ wird $d'_s = 0,4 \text{ mm}$ mit $p'_s = 8,5 \%$. Die geometrische Suffosionssicherheit beträgt $\eta_{S,G} = \frac{0,4}{2} = 0,25 < 1,5$. Der Erdstoff ist nicht suffosionssicher und der Grad der Suffosionsgefährdung wegen $p'_s = 8,5 \%$ relativ groß.

Beispiel 11 (siehe Bild 19)

Untersucht wird der Erdstoff mit der Kornverteilungslinie a d 0 - Kurve 3 - mit $U = 58$ - $d_{10} = 1 \text{ mm}$, $d_{60} = 58 \text{ mm}$ -. Die Berechnung wird für den Punkt d durchgeführt. Es ist: $d_n = 10 \text{ mm}$, $d_{n+1} = 2 \text{ mm}$ und $d_{n-1} = 50 \text{ mm}$ mit: $p_n = 13,5 \%$, $p_{n+1} = 11 \%$ und $p_{n-1} = 50 \%$. Damit wird: $K_w = \frac{50-13,5}{13,5-11} = 14,6$ und $S = 0,4 \cdot 14,6 = 5,8 > 1$, wie im Beispiel 9 - Kurve 1 -. Somit ist dieser Erdstoff nicht suffosionssicher. Nach der grafischen Methode ergibt sich $d_r = 17 \text{ mm}$ und mit der partiellen Sicherheit $\eta_{d_s} = 2$ wird $d'_s = 3,4 \text{ mm}$ mit $p'_s = 12 \%$. Die geometrische Suffosionssicherheit beträgt $\eta_{S,G} = \frac{3,4}{17} = 0,2 < 1,5$. Der Erdstoff ist nicht suffosionssicher und der Grad der Suffosionsgefährdung wegen $p'_s = 12 \%$ sehr groß.

Vergleicht man die Beispiele 9 mit $S = 5,6$; $\eta_{S,G} = 1,43$; $p'_s = 3 \%$, 10 mit $S = 2,6$; $\eta_{S,G} = 0,25$; $p'_s = 8,5 \%$ und 11 mit $S = 5,8$; $\eta_{S,G} = 0,2$; $p'_s = 12 \%$ miteinander, so kann man folgende Feststellungen treffen:

- Je größer das Suffosionskriterium S ist, umso leichter, d.h. bei kleinerem kritischem Gefälle $J_{S,krit}$, kann die Suffosion vonstatten gehen (siehe Beispiel 9 und 10), da die Teilchen d_s die Poren von d_r umso leichter passieren können, je unetlicher die Kornverteilungslinie ist.
- Das Suffosionskriterium steht in keiner Beziehung zur geometrischen Suffosionssicherheit $\eta_{S,G}$ und zum Prozentsatz der ausspülbaren Teilchen p'_s (siehe Beispiel 9 und 10). Im Beispiel 11 ist die Suffosion offensichtlich bei einem kleineren Gefälle $J_{S,krit}$ möglich als im Beispiel 9. Es müßte gelten: $J_{S,krit} = f(\eta_{S,G})$.
- Eine endgültige Aussage über die Suffosionssicherheit eines Erdstoffs kann daher erst mit $\eta_{S,H} = J_{S,krit}/J_{vorh}$ erfolgen. Dabei müßte gelten: $J_{S,krit} = f(S; \eta_{S,G})$.
- Mit dem Kennwert p'_s kann nur die mögliche Auswirkung einer erfolgten Suffosion beurteilt werden.

Die vermutete Abhängigkeit $J_{S,krit} = f(S; \eta_{S,G})$ wurde noch nicht experimentell nachgewiesen. Vorläufig kann $J_{S,krit}$ nur überschlägig nach der Methode im Abschnitt 5.3. berechnet werden.

5.3. Hydraulische Grenzbedingungen der Suffosion; Beispiel 12

Wird nachgewiesen, daß ein Erdstoff suffosionsgefährdet ist, d.h., daß die geometrische Suffosionssicherheit $\eta_{S,G} < 1,5$ nach Gl. (4) ist, so heißt dies noch nicht zwingend, daß die Suffosion auch tatsächlich erfolgt. Dies erfordert nach Abschnitt 3. auch noch die Nichterfüllung der Gl. (5).

$$\text{Die Gleichung} \quad \eta_{S,H} = \frac{J_{S,krit}}{J_{vorh}} \geq 2 \quad (5)$$

ist bei einer Sickerwasserströmung in Erdschwererichtung niemals und bei einer Sickerwasserströmung senkrecht zur Erdschwererichtung mit Abstrichen ebenfalls nicht erfüllt, da dann die Kornbewegung schon bei Gefällen $J_{S,krit} \approx 0 (\downarrow \rightarrow)$ (34)

beginnt. Daraus ergibt sich:

Regel 16: Bei Sickerwasserströmungsrichtungen, die zwischen der Erdschwererichtung (\downarrow) und ihrer Normalen (\rightarrow) liegen, ist $J_{S,krit} \approx 0$. Suffosionsgefährdete Erdstoffe - $\eta_{S,G} < 1,5$ - werden daher mit hoher Wahrscheinlichkeit auch tatsächlich einer Suffosion unterliegen - $\eta_{S,H} < 2$ -.

Mit der Bestimmung des kritischen Sickerwassergefälles für die Suffosion $J_{S,krit}$ bei annähernd aufsteigender Sickerwasserströmung entgegen der Erdschwere haben sich viele Autoren beschäftigt z.B.: Pavlovskij, Ovodov und Dzastin [zitiert in 157], Izbaš [167], Kozlova [177], Bočkov [187], Kondrat'ev [197] und Patrašev [67].

Die neuesten Ergebnisse stammen von Istomina [57]. [57] geht vom Gleichgewicht zwischen dem hydrodynamischen Druck des Sickerwassers und dem Gewicht dieser Teilchen aus. Die theoretischen Untersuchungen sind durch Suffosionsversuche bei Sanden und Kiesen bestätigt. Als kritisches Sickerwassergefälle hat [57] das Gefälle definiert, bei dem die Suffosion an der Oberfläche des Erdkörpers begann - äußere Suffosion -. Die Ergebnisse zeigt Bild 20, in dem $J_{S,krit}$ als Funktion des Ungleichförmigkeitsgrades aufgetragen wurde.

$$J_{S,krit} \uparrow = f(U) \quad (35)$$

Der Streubereich für $J_{S,krit} \uparrow$ bei $U > 10$ ist sehr groß. Entsprechende weitere Versuche über den Einfluß der Korndurchmesser des Erdstoffskeletts und der Skelettfüllung, deren Grenze willkürlich bei $d = 1$ mm festgesetzt wurde, sowie der Werte des inneren Reibungswinkels der Skelettfüllung führen zu folgenden verfeinerten Ergebnissen:

$$J_{S,krit} \uparrow = J_1 + J_2 \quad (36)$$

$$\text{mit} \quad J_1 = \frac{n_E \cdot k_F}{n_F \cdot k_E} \quad (36')$$

$$J_2 = f \left(\frac{d_{10,Sk}}{d_{10,F} \cdot \tan \varphi_F} \right) \quad (36'')$$

nach Bild 21

Nach Istomina ist für $\tan \varphi_F$ folgendes anzunehmen:

Tabelle 5:

Benennung der Skelettfüllung	$\tan \varphi_F$
Mehlsand	0,57
Feinsand	0,6
Mittelsand	0,7

Die recht willkürliche Festlegung, welche Korndurchmesser zum Skelett und welche zur Skelettfüllung zu rechnen sind, bedarf nach den Ausführungen im Abschnitt 5.2. dringend einer Korrektur. Eine Kombination der Verfahren von Lubokov und Istomina müßte angestrebt werden. Da hierzu noch viele Versuchsreihen durchgeführt werden müssen, kann in der Praxis nur nach Gl. (35) oder Gl. (36) verfahren werden, wobei klar sein muß, daß dies in vielen Fällen eine grobe Näherung sein wird.

Es ergibt sich

Regel 17: Bei Sickerwasserströmungsrichtungen annähernd entgegen der Erdschwererichtung (\uparrow) beträgt das kritische Sickerwassergefälle für Suffosion bei $U \leq 10$

$$J_{S,krit} \uparrow = f(U)$$

nach Bild 20 und für genauere Berechnungen sowie bei $U > 10$

$$J_{S,krit} \uparrow = J_1 + J_2 = \frac{n_E \cdot k_F}{n_F \cdot k_E} + f\left(\frac{d_{10,Sk}}{d_{10,F} \cdot \tan \varphi_F}\right)$$

nach Bild 21 und Tabelle 5.

Der im Beispiel 2 (siehe Bild 15) untersuchte Erdstoff mit einer Körnung $d = 0,02$ bis 10 mm hat nach Bild 22 folgende Erdstoffkennwerte:

$$d_{10,E} = 0,065 \text{ mm}, \quad d_{60,E} = 6 \text{ mm}, \quad U_E = 92.$$

Aus Laborversuchen ist bekannt: $n_E = 0,25$ und $k_E = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Die geometrische Suffosionssicherheit betrug $\eta_{S,G} = 0,062 \ll 1,5$

mit: $d_x = 3,2$ mm, $d_g = 0,32$ mm und $d_g' = 0,64$ mm.

Die Grenzziehung zwischen Skelett und Skelettfüllung nach Istomina ist in diesem Falle nicht sehr abwegig, da $d_g' < d_{Sk} < d_x$ ist. Mit $d_{Sk} = 1$ mm ergeben sich die auf Bild 22 dargestellten Kornverteilungslinien des Erdstoffskeletts und der Skelettfüllung.

Die Skelettfüllung hat folgende Kennwerte: $d_{10,F} = 0,03$ mm, $d_{60,F} = 0,08$ mm, $U_F = 2,67$.

Aus Laborversuchen wird gewonnen: $n_F = 0,3$ und $k_F = 9 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Das Erdstoffskelett hat folgende Kennwerte: $d_{10,Sk} = 3,2$ mm, $d_{60,Sk} = 7$ mm, $U_{Sk} = 2,2$.

Damit ergibt sich nach Regel 17: $J_1 = \frac{0,25 \cdot 9 \cdot 10^{-6}}{0,3 \cdot 3 \cdot 10^{-5}} = 0,25$,

$$J_2 = f\left(\frac{3,2}{0,03 \cdot 0,57}\right) = f(187) = 0,07 \quad \text{und} \quad J_{S,krit} \uparrow = 0,25 + 0,07 = 0,32$$

Gl. (5) kann man wie folgt umformen:

$$J_{vorch} \uparrow \leq \frac{J_{S,krit} \uparrow}{2} = 0,16$$

Dieser Nachweis muß durch Analyse eines hydrodynamischen Sickerwasserströmungsnetzes erfolgen, aus dem $J_{vorch} \uparrow$ für den Bereich dieses Erdstoffes entnommen wird. Wäre z.B. J_{vorch} im aufsteigenden Sickerwasserstrom $J_{vorch} \uparrow = 0,1$, so wäre:

$$\eta_{S,H} = \frac{0,32}{0,1} = 3,2 > 2$$

und der Erdstoff könnte trotz $\eta_{S,G} = 0,062 < 1,5$ als praktisch suffosionssicher bezeichnet werden. Dabei darf aber nicht übersehen werden, daß als $J_{vorch} \uparrow$ auch instationäre Sickerwassergefälle auftreten können, die oft das mehrfache des Wertes bei stationärem Fließzustand betragen können. Als Dammschüttmaterial ist dieser Erdstoff ungeeignet, da unterhalb der Sickerlinie und bei Starkregen Sickerwasserströmungen in Erdschwererichtung auftreten mit $J_{S,krit} \downarrow \approx 0$.

5.4. Praktische Erwägungen bei Suffosionsuntersuchungen

Eine geringfügige Suffosion braucht sowohl die Funktion eines Wasserbauwerkes bezüglich der Wasserspeicherung - Sickerwasserabfluß $Q < \text{Mindestwasserabgabe } Q_{\text{mind}}$ - als auch dessen Standsicherheit noch nicht wesentlich zu beeinträchtigen. Bei untergeordneten Bauwerken kann ein Erdstoff auch dann als praktisch suffosionssicher bezeichnet werden, wenn nicht mehr als 3 % der feinsten Kornfraktion zur Suffosion kommen (siehe Beispiele 1, 3, 6 und 9). Daraus ergibt sich

Regel 18: Bei untergeordneten Bauwerken kann man die geometrische Suffosionssicherheit nach folgender Gleichung berechnen

$$\eta_{S,G} = \frac{d_3}{0,6 \cdot d_{p,m}} \geq 1,5 \quad (4f)$$

Für stetige Kornverteilungslinien ohne Ausfallkörnung gilt dann:

$$d_3 \geq 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,535 \sqrt{U} \cdot e \cdot d_{17} \quad (37)$$

oder bei Benutzung von Bild 5 ohne Berücksichtigung der Lagerungsdichte

$$d_3 \geq 1,5 \cdot 0,6 \cdot \bar{d}_{p,0} \quad (37')$$

und für Erdstoffe mit Ausfallkörnung

$$d_3 \geq 1,5 \cdot d_g = 1,5 \cdot 0,1 \cdot d_r \quad (37'')$$

5.5. Suffosionsbilanz

Sehr interessant wäre noch eine Aussage darüber, welcher Massentransport pro Zeiteinheit bei einer geometrisch und hydraulisch möglichen Suffosion erfolgt, also die Aufstellung einer Suffosionsbilanz für Beispiel 2 und 12. Hiermit hat sich unter anderen Sechtman [15] beschäftigt. Dieser Fragenkomplex ist aber z.Zt. noch nicht so weit gelöst, daß für die Praxis verwendbare allgemeingültige Ergebnisse angegeben werden könnten. Daher muß man darauf im Allgemeinen noch verzichten. Im Sonderfall sind spezielle Versuche durchzuführen.

6. Äußere Suffosion

Die äußere Suffosion ist im Gegensatz zur inneren Suffosion bei allen nichtbindigen Erdstoffen unabhängig von ihren bodenmechanischen Kennwerten möglich, die geometrische Suffosionssicherheit nach Gl. (4) ist $\eta_{S,G} = 0$, da die feineren Fraktionen an der Oberfläche eines Erdkörpers bei entsprechenden hydraulischen Randbedingungen natürlich ausgewaschen werden können. Daher kann man bei der äußeren Suffosion nur eine hydraulische Suffosionssicherheit

$$\eta_{S,H} = \frac{J_{S,krit} \uparrow}{J_{vorh} \uparrow} \geq 2$$

entsprechend Gl. (5) nachweisen. Nach Istomina [5] besteht die Abhängigkeit in Gl. (35):

$$J_{S,krit} \uparrow = f(U) \quad \text{oder} \quad J_{S,zul} \uparrow = f(U)$$

Nach Bild 20 ergibt sich:

Regel 19: Das zulässige Sickerwassergefälle für äußere Suffosion beträgt

$$\begin{aligned} J_{S,zul} \uparrow &= 0,3 \text{ bis } 0,4 \quad \text{bei } U < 10 \\ J_{S,zul} \uparrow &= 0,2 \quad \text{bei } 10 \leq U \leq 20 \\ J_{S,zul} \uparrow &= 0,1 \quad \text{bei } U > 20 \end{aligned} \quad (38)$$

Die äußere Suffosion wird verhindert, indem die gefährdeten Bereiche - $J_{vorh} \uparrow > J_{S,zul} \uparrow$ - der Oberfläche des Erdkörpers durch Filter gesichert werden. Diese Filter müssen nach den Regeln für Sicherheit gegen Kontaktsuffosion aufgebaut sein.

7. Kontaktsuffosion; Beispiel 13

Auch die Kontaktsuffosion ist bei entsprechend großem maßgebenden Porendurchmesser $d_{p,m}^{II}$ des groben Materials zunächst unabhängig von den bodenmechanischen Parametern des feineren Materials möglich. Dies gilt natürlich nur für die feinsten Fraktionen des feinen Erdstoffs unmittelbar an der Kontaktfläche. In diesem Sinne ist die Kontaktsuffosion ein Sonderfall der äußeren Suffosion und unterliegt den gleichen Gesetzen (siehe Regel 19).

Die Kontaktsuffosion wird sehr schnell aufhören, d.h. die Auswaschung wird nur wenige Zentimeter weit reichen, wenn der feine Erdstoff gegen innere Suffosion sicher ist. Für diese Erdstoffkombinationen gelten die Regeln für Kontaktersosion (siehe WAFRO 4.04./3).

Liegt jedoch ein feiner Erdstoff vor, der gegen innere Suffosion nicht sicher ist, wo wird die Kontaktsuffosion eben in der inneren Suffosion ihre Fortsetzung finden. Man kann die innere Suffosion des feinen Erdstoffs also abstoppen bzw. die Kontaktsuffosion und damit die

innere Suffosion verhindern, wenn man einen Filter herstellt, der gegen Kontaktsuffosion sicher ist.

Die Kontaktsuffosion ist absolut unmöglich, wenn der gröbere Erdstoff II einen solchen maßgebenden Porendurchmesser $d_{p,m}^{II}$ hat, der die kleinsten suffosionsgefährdeten Teilchen d_{min}^I des feineren Erdstoffs I nicht passieren läßt. Die geometrische Sicherheit gegen Kontaktsuffosion lautet dann also (siehe auch Gl. (4)):

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{min}^I}{F \cdot d_{p,m}^{II}} \geq 1,5 \quad (4g)$$

Im feinen Erdstoff kommen jedoch nicht nur die Körner d_{min}^I zur Suffosion, sondern die ganze Fraktion $d_{min}^I \leq d_1^I \leq d_s^I$. Wählt man den Filter so aus, daß die Körner mit dem Durchmesser $(d_{min}^I + d_s^I)/2$ zurückgehalten werden, so bildet sich in kurzer Zeit ein Zwischenfilter aus, der auch die Korndurchmesser d_{min}^I an der Suffosion hindert. Daher kann man Gl. (4g) für praktische Zwecke ausreichend wie folgt formulieren:

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{min}^I + d_s^I}{2} \cdot \frac{1}{F \cdot d_{p,m}^{II}} \geq 1,5 \quad (4g')$$

Dabei sind folgende Rechenwerte zu verwenden:

d_{min}^I nach der Kornverteilungslinie des Erdstoffs I, $d_s^I = 0,1 \cdot d_r^I$ nach Gl. (21),

$F = 0,6$

$d_{p,m}^{II} = d_p^{II} = 0,535 \cdot \sqrt[6]{U^{II}} \cdot e^{II} \cdot d_{17}^{II}$ nach Gl. (13) unter Benutzung von Bild 6 oder für

Überschlagsrechnungen $d_{p,m}^{II} = d_p^{II} = r(U^{II})$ nach Bild 5 für den Erdstoff II.

Verwendet man als Filter einen Erdstoff II mit mindestens mitteldichter Lagerung und einem Ungleichförmigkeitsgrad $U^{II} \geq 2,5$, was fast immer der Fall ist, so ergibt sich nach Bild 5:

$$d_{p,m}^{II} = d_p^{II} \approx 0,25 d_{50}^{II} \quad (39)$$

Daraus kann die überschlägige Filterbemessungsformel

$$d_{50}^{II} \leq 2 \cdot (d_{min}^I + d_s^I) \quad (40)$$

und bei $d_{min}^I \approx 0$ und $d_s^I = 0,1 \cdot d_r^I$: $d_{50}^{II} \leq 0,2 \cdot d_r^I$ (40')

abgeleitet werden.

Für die Kontaktsuffosion ergibt sich nunmehr

Regel 20: Der Nachweis der geometrischen Suffosionssicherheit bei Kontaktsuffosion erfolgt nach:

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{min}^I + 0,1 d_r^I}{2} \cdot \frac{1}{0,6 \cdot d_p^{II}} \geq 1,5.$$

Für Filtervorbemessungen genügt: $d_{50}^{II} \leq 2 (d_{min}^I + 0,1 d_r^I)$.

Das Filtermaterial muß natürlich selbst gegen innere Suffosion sicher sein. Am zweckmäßigsten ist ein Material mit $2,5 \leq U^{II} < 8$ und stetiger Kornverteilungslinie.

Beispiel 13

Der im Beispiel 2 und 12 (siehe Bild 15 und 22) auf geometrische und hydraulische Sicherheit gegen innere Suffosion untersuchte Erdstoff soll durch einen Filter vor Kontaktsuffosion geschützt werden. Auf Bild 23 ist Erdstoff I mit $d_{min}^I = 0,02$ mm, $d_r^I = 3,2$ mm und $d_s^I = 0,1 \cdot d_r^I = 0,32$ mm dargestellt. Nach der Vorbemessungsgleichung (40') ergibt sich:

$d_{50}^{II} = 0,2 \cdot d_r^I = 0,2 \cdot 3,2 = 0,64$ mm. Als Filtermaterial wird der Erdstoff II - Handelstyp Sand 0 bis 3mm - geliefert, mit: $d_{10}^{II} = 0,24$ mm, $d_{60}^{II} = 0,8$ mm, $U^{II} = 3,3$ und $d_{17}^{II} = 0,36$ mm.

Beim Einbau wurde eine Porenziffer $e^{II} = 0,5$ erreicht. Nach Bild 6a wird mit $d_{17}^{II} \cdot e^{II} = 0,18$ $d_p^{II} = 0,12$ mm und damit:

$$\eta_{S,G} = \frac{0,02 + 0,32}{2} \cdot \frac{1}{0,6 \cdot 0,12} = \frac{0,340}{0,144} = 2,36 \quad 1,5$$

Damit ist nachgewiesen, daß der Erdstoff II als Filtermaterial geeignet ist. Zwar werden zu Beginn der Filterbeanspruchung einige Körner des feinen Erdstoffs I mit dem Korndurch-

messer $0,02 \leq d_1^I \leq 0,072$ mm ausgewaschen werden, doch kommt die Kontaktsuffosion in kürzester Zeit zur Ruhe, da die Körner des Erdstoffs I mit dem Korndurchmesser $0,072 \leq d_1^I \leq 0,32$ mm zusammen mit dem Erdstoff II einen Zwischenfilter bilden, der jede dauernde Kontaktsuffosion ausschließt.

Sollte im Sonderfall gefordert werden, daß auch diese anfängliche Kontaktsuffosion unterbleiben muß, so ergibt sich nach Gl. (4g):

$$d_{p,m}^{II} = \frac{d_p^{II}}{F \cdot 1,5} = \frac{d_{\min}^I}{0,5 \cdot 1,5} = \frac{0,02}{0,75} = 0,022 \text{ mm.}$$

Nach Bild 6a wird dann bei $U^{II} = 3$, $e^{II} \cdot d_{17}^{II} = 0,032$ mm und mit $e^{II} = 0,5$ ist $d_{17}^{II} = 0,064$ mm. Der erforderliche Erdstoff II' ist ebenfalls auf Bild 23 dargestellt.

Vergleichsweise erfolgt auch noch die Filterbemessung für einen Erdstoff I', der sich vom Erdstoff I dadurch unterscheidet, daß ihm die Ausfallkörnung fehlt. Der Erdstoff I' ist sicher gegen innere Suffosion, daher erfolgt die Filterbemessung nach den Regeln für Kontakt-erosion (siehe WAFRO 4.04./3).

Es ist dann $d_{10}^I = 1,8$ mm, $d_{50}^I = 5,0$ mm, $d_{60}^I = 6,0$ mm und $U^I = 3,33$. Als Filter ist z.B. ein Erdstoff II'' mit $U^{II} = 3$ und $d_{50}^{II} = 14 \cdot d_{50}^I = 14 \cdot 5 = 70$ mm geeignet.

Man erkennt durch diese Vergleichsberechnungen, die überaus große Bedeutung der Suffosionsnachweise für Filterbemessungen im Wasserbau.

8. Verwendete Bezeichnungen

Stetigkeit der Kornverteilungslinie	Im Sinne dieses Standards ist eine Kornverteilungslinie stetig, wenn sie keine scharfen Krümmungen oder Knicke, d.h. keine plötzlichen Anstiegsänderungen, aufweist.
$A = d^{II}/d^I$	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
d	Korndurchmesser
d^I	Korndurchmesser des feineren Erdstoffes
d^{II}	Korndurchmesser des größeren Erdstoffes
d_{10}, d_{17}, \dots	Korndurchmesser, der bei 10, 17, ... Masseprozent der Kornverteilungslinie, festgestellt wird
d_m	maßgebender Korndurchmesser für Suffosion
d_{\min}	minimaler Korndurchmesser
d_{\max}	maximaler Korndurchmesser
d_n	Korndurchmesser für den Mittelpunkt des bei analytischen Suffosionsuntersuchungen betrachteten Abschnittes der Kornverteilungslinie
$d_{n+1} < d_n$	Korndurchmesser für die Abschnittsgrenze im feinen Kornbereich
$d_{n-1} > d_n$	Korndurchmesser für die Abschnittsgrenze im groben Kornbereich
d_r	rechnerischer Korndurchmesser eines suffosionssicheren Erdstoffes oder des suffosionssicheren größeren Teils eines Erdstoffes, der dessen Porenabmessungen bestimmt ($\eta_{d_r} = 1$)
d_r'	wie vor, mit der partiellen Sicherheit $\eta_{d_r} = 1,5$
d_s	maximaler Korndurchmesser der suffosionsgefährdeten Bereiche der Kornverteilungslinie eines Erdstoffes ($\eta_{d_s} = 1$)
d_s'	wie vor, mit der partiellen Sicherheit $d_s = 2$
$d_{10,Sk}$	Korndurchmesser bei 10 % der Kornverteilungslinie des Erdstoffskeletts
$d_{10,F}$	Korndurchmesser bei 10 % der Kornverteilungslinie der Skelettfüllung
d_p	Porendurchmesser

$d_{p,m}$	maßgebender Porendurchmesser
$d_{p,0}$	Porendurchmesser bei lockerster Lagerung
$d_{p,D}$	Porendurchmesser bei dichtester Lagerung
\bar{d}_p	ideeller mittlerer Porendurchmesser
$d_{p,50}$	Porendurchmesser bei 50 % der Porendurchmesser-Verteilungslinie
$D_e = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$	Lagerungsdichte
F	Schlupffaktor
h_k	kapillare Steighöhe
J	Sickerwassergefälle
$J_{S,krit}$	kritisches Sickerwassergefälle für Suffosion
$J_{S,krit} \downarrow$	wie vor, in Erdschwererichtung
$J_{S,krit} \uparrow$	wie vor, entgegen der Erdschwererichtung
$J_{S,zul}$	zulässiges Sickerwassergefälle für Suffosion
J_1, J_2	Rechenwerte nach dem Verfahren von ISTOMINA
J_{vorh}	vorhandenes Sickerwassergefälle
k	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
k_{10}	wie vor, bei 10 °C Wassertemperatur
k_E	wie vor, des gesamten Erdstoffs
k_F	wie vor, der Skelettfüllung eines Erdstoffs mit $d < 1$ mm
K	Krümmungsfaktor eines bestimmten Bereiches einer Kornverteilungslinie
K_t	wie vor, bei einem theoretischen gerade noch suffosionssicheren Erdstoff
K_w	wie vor, bei einem wirklichen Erdstoff
m	Abweichungsmaß zwischen den Kornverteilungslinien des wirklichen und theoretischen suffosionssicheren Erdstoffs
m_{zul}	zulässiges Abweichungsmaß für Suffosionsuntersuchungen nach der grafischen Methode von Lubockov
n	Porenanteil
n_0	wie vor, bei lockerster Lagerung
n_D	wie vor, bei dichtester Lagerung
n_E	wie vor, des gesamten Erdstoffs
n_F	wie vor, der Skelettfüllung eines Erdstoffs mit $d < 1$ mm
P_i	Masseprozent der Fraktionen mit dem Korndurchmesser $d \leq d_i$
P_s	Masseprozent der ausspülbaren Fraktion $d_1 \leq d_s$
P_n	Masseprozentsatz für den Korndurchmesser d_n
$P_{n+1} < P_n$	wie vor, für d_{n+1}
$P_{n-1} > P_n$	wie vor, für d_{n-1}
$S = K_w/K_t$	Suffosionskriterium beim analytischen Verfahren von Lubockov
T	Oberflächenspannung des Wassers
$U = d_{60}/d_{10}$	Ungleichförmigkeitsgrad eines Erdstoffs
x	Exponent der Talbot-Kurven
e	Porenzahl
e_{\max}	wie vor, bei lockerster Lagerung
e_{\min}	wie vor, bei dichtester Lagerung

γ_w	Wichte des Wassers
$\tan \varphi_F$	innerer Reibungswinkel der Skelettfüllung eines Erdstoff mit $d < 1 \text{ mm}$
$\eta_{S,G}$	geometrische Suffosionssicherheit
$\eta_{S,H}$	hydraulische Suffosionssicherheit
η_{d_r}	partielle Sicherheit bei der Bestimmung von d_r
η_{d_s}	partielle Sicherheit bei der Bestimmung von d_s
K_t	Sicherheitsgrad des Suffosionskriteriums S

9. Literaturverzeichnis

- [17] Ziems, J. Zur Klassifizierung der mechanischen Erdstoffverformungen durch Wirkungen des Sickerwassers. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Berlin, 17 (1967)2, p.50-55.
- [27] Ziems, J. Erosionsbeständigkeit nichtbindiger Kockergesteine. Abschlußbericht der F/E-Arbeit Nr. 4507 025/6-22/5 am Institut für Fluß- und Seebau der Technischen Universität Dresden, 1967.
- [27] Engelhardt Der Porenraum der Sedimente. Springer-Verlag, Berlin, 1960.
- [47] Scharadt Kies- und Sandfilter im Grund- und Wasserbau. Die Bautechnik, Berlin, (1952), 3/4.
- [57] Istomina, V.S. Fil'tracionnaja ustojivost' gruntov (Die Erosionsbeständigkeit der Böden) Gos. izdat. lit. po stroit. i arch. (Staatl. Verlag für Bauwesen und Architektur), Moskva, 1957
- [67] Patrašev, A.N. Bakalov, S.A. Razbotka metodov rasceta mehaniceskoj i chemiceskoj suffozii (Methoden zur Berechnung der mechanischen und chemischen Suffosion). Izv. VNIIG, Leningrad, 1951.
- [17] Čištín, J. Konstrukce a stavba filtru sypných hrází (Konstruktion und Bau von Filtern bei Erddämmen). Abschlußbericht der Forschungsarbeit Nr. IX-5-5/3, VVUH Brno, 1964 (Übersetzung am Institut für Fluß- und Seebau der TU Dresden).
- [97] Silveira, A. An analysis of the problem of washing through in protective filters (Eine Untersuchung des Problems des Einspülens von Erdstoffteilchen in Schutzfilter). Proc. of the 6th Intern. conf. on soil mech. and found. enging., Montreal, 1965, Vol. II, Div. 6/27, p. 551-555.
- [97] Flehm, H. Erdstoffe als Dichtungsmaterial im Wasserbau. Veröff.d.Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin, (1959)7, p.23.
- [107] Lubočkov, E.A. Graficeskie i analiticeskij sposoby opredelenija suffozionnych svojstv nesvjaznych gruntov (Eine grafische und analytische Methode zur Bestimmung der Suffosionseigenschaften nichtbindiger Böden) Izv. VNIIG, Leningrad, (1965)78, p.255.
- [117] Čištín, J. Zum Problem mechanischer Deformationen nichtbindiger Lockergesteine durch die Sickerwasserströmung in Erddämmen. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Berlin 17 (1967)2, p.45-49
- [127] Lupinskij, M.J. Issledovanie raboty kamennych kreplenij verchovyh otkozov zemljanyh plotin (Untersuchungen über die Bewährung der Steinbefestigung der wasserseitigen Böschung von Erddämmen). Stroizdat (Bauverlag), Moskva, 1953.
- [137] Oohotin, V.V. Laboratornye opyty po sostavleniju doroznyh gruntovyh smesj po principu naimensej poristosti (Laborversuche für die Zusammensetzung der Erdstoffmischungen für Straßen nach dem Prinzip der kleinsten Porosität), Dor.NII, UdSSR, 1929
- [147] Papaspyrou, S. Veränderung der Bodenbeschaffenheit infolge Materialverschleppung durch strömendes Grundwasser. Dissertation vom 9.7.1963, TH München.
- [157] Šechtman, J.M. Fil'tracija malokoncentrirovannyh suspezij (Die Sickerung schwach-konzentrierter Suspensionen). Izdvo. akad.nauk. SSSR, Moskva, 1961.

- [167] Izbaš, S.V. Fil'tracionnye deformacii grunta (Sickerwasserverformungen des Bodens). Izv. VNIIG Leningrad, (1933) 10.
- [177] Kozlova, L.I. Eksperimental'nye issledovanija fil'tracionnyh deformacij dvuch smežnyh raznorodnyh sloev grunta (Experimentalforschung über die Sickerwasserverformungen zweier benachbarter und verschiedenartiger Erdschichten). Izv. VNIIG, Leningrad, (1934) 14.
- [187] Bočkov, N.M. Mehaniceskaja suffozija grunta (Die mechanische Suffosion der Böden) ONTI, IZDVO. NKTP. UdSSR, 1936.
- [197] Kondrat'ev, V.N. Filtracija i mehaniceskaja suffozija v nesvjasnyh gruntach (Sickerung und mechanische Suffosion in nichtbindigen Böden). Krimizdat, Simferopol, 1958.

Weitere im Text nicht erwähnte Literatur:

- [207] Bakalov, S.A. Eksperimental'nye issledovanija zasceplenoj mehaniceskoj suffozii gruntov (Experimentelle Untersuchung der "eingespannten" mechanischen Suffosion der Böden). Kand.-Arb., B-Ka im V.I. Lenina, (1951), Moskva
- [217] Džunin, A.K.; u.a. Osnovy mehaniki mnogokomponentnyh potokov (Grundlagen der Mechanik der Vielkomponentenströmung). Novosibirsk, Izdat.-vo AN SSSR, 1965.
- [227] Izbaš, Slišskij, Smoljak. Gidravlicskie osnovy zamyva kamennoj nabroski peskom (Hydraulische Grundlagen des Ausschwemmens von Sand aus Steinschüttungen). Gidr.Stroi. Moskva, 31(1961)4, p.33
- [237] Izbaš, S.V. Verschiebungen von Bodenteilchen durch Sickerwasser. Z.Int.Stand.Verb.Schiffahrts-Kongr. 10(1935)20, p.86
- [247] Krasnov, V.Ja. K voprosu vozvedenija zamyvnyh kamennonabrosnyh plotin (Zur Frage der Errichtung von hinteraspülten Steinschüttdämmen) Gidr.Stroi. Moskva, 33(1963)4, p.20
- [257] Leussink, H. u.a. Beitrag zur Kenntnis der bodenphysikalischen Eigenschaften von Mischböden. Veröff. TH Karlsruhe, (1964) 15
- [267] Lubočkov, E.A. Izpol'zovanie graficeskogo metoda dlja ocenki suffuzionnyh svojstv nesvjasnyh gruntov (Die Anwendung einer grafischen Methode zur Bewertung der Suffosionseigenschaften nichtbindiger Erdstoffe). Gidrotehniceskoe stroitel'stvo (Hydrotechnisches Bauwesen), Moskva 36 (1966) 5, p. 22.
- [277] Lubockov, E.A. Nesuffuzionnye nesvjaznye grunty (Gegen Suffosion sichere nichtbindige Böden). Isv. VNIIG, Leningrad, (1962) 71
- [287] Šechtman, J.M. Issledovanie javlenij mehaniceskoj suffozii (Die Erforschung der Erscheinung der mechanischen Suffosion) Izv. ak.n., SSSR, OTN, (1957) 6
- [297] Sleskin, N.A.; Systov, S.K. Russisch (Über die Stabilität der Bewegung eines in einem laminaren Strom schwebenden Teilchens). Doklady akad.nauk. SSSR, Moskva, 96 (1954) 5, p.933
- [307] ETUDE DE LA FILTRATION ET DE LA SUFFOSION DANS LA FONDATION DES OUVRAGES DE L'USINE MARFOTRICE DE KISLAJA GOUBA (Versuche über Filtration und Suffosion unter der Gründung des Gezeitenkraftwerkes K.G.) VNIIG, Leningrad, Forschungsarbeit Nr. 7, Bulletin Hydraulic Research, 1964/65, p.334
- [317] ETUDE DU REGIME DE FILTRATION ET DE SUFFOSION SOUS LES REVETEMENTS (Versuche über das Filtrationsregime und die Suffosion unter Abdeckungen) Forschungsarbeit Nr. 87 des VNIIG, Leningrad, Bulletin Hydraulic Research, 1964/65, p.345
- [327] Voščinin, A.P. u.a. Issledovanie po zamyvu peskom kamenykh nabrosok (Untersuchungen über die Auswaschung von Sand aus Steinschüttungen) Gidr.stroi. Moskva, 31 (1961) 2, p.27
- [337] Žilenkov, V.N. O fil'tracionnoj ustojčivosti kamennopescancj sredy (Die Sickerbeständigkeit von steinig-sandigen Stoffen) Gidr.stroi., Moskva, 36 (1965) 10, p.37
- [347] Ziems, J. Über die Verformungsbeständigkeit nichtbindiger Lockergesteine gegenüber der Wirkung des Sickerwassers. Bes. Mitt.z.II.Int. Talsperrenkongreß, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1967, p.67-78
- [357] Ziems, J. 2 Artikel über die Sickerwasserberechnungen an der Talsperre Spremberg. Freiburger Forschungshefte, Reihe C 214, 1967.

10. Bilderverzeichnis

- Bild 1 Schematische Darstellung der inneren Suffosion
- Bild 2 Schematische Darstellung der äußeren Suffosion
- Bild 3 Schematische Darstellung der Kontaktsuffosion Typ 1/1
- Bild 4 Schematische Darstellung der Haupttypen der Kontaktsuffosion
- Bild 5 Vergleich der Ergebnisse der Porenberechnungen für Versuche des Instituts für Fluß- und Seebau nach den Gleichungen von Pavčić, Patrašev und Istomina
- Bild 6a/6b Diagramme zur schnellen Auswertung der Gleichung von Pavčić
- Bild 7 Vergleich der Porendurchmesserverteilungslinie nach Silveira mit dem ideellen mittleren Porendurchmesser nach Pavčić.
- Bild 8 Kornverteilungslinien nach Talbot
- Bild 9 Suffosionsnachweis bei geraden Kornverteilungslinien
- Bild 10 Suffosionssichere Kornverteilungslinien nach Čiştin
- Bild 11 Suffosionssichere Kornverteilungslinien nach verschiedenen Autoren
- Bild 12 Grenzkornverteilungslinien für suffosionssichere nichtbindige Erdstoffe nach Lubočkuv
- Bild 13 Zur Bestimmung des rechnerischen Korndurchmessers d_r
- Bild 14 Beispiel 1: Erläuterung der grafischen Methode des Suffosionsnachweises
- Bild 15 Beispiel 2: Suffosionsnachweis für einen Erdstoff des Typs I (konvexer Kurvenbereich)
- Bild 16 Beispiel 3: Suffosionsnachweis für einen Erdstoff des Typs II (konkaver Kurvenbereich)
- Bild 17 Beispiel 4: Suffosionsnachweis für einen Erdstoff des Typs III (Gerade im semilogarithmischen Maßstab)
- Bild 18 Beispiel 5 bis 8: Suffosionsberechnungen nach der analytischen Methode
- Bild 19 Beispiel 9 bis 11: Suffosionsberechnungen nach der analytischen Methode
- Bild 20 Kritisches Sickerwassergefälle für äußere Suffosion nach Istomina
- Bild 21 $J_2 = f \left(\frac{d_{10,Sk}}{d_{10,F} \cdot \tan \varphi_F} \right)$ nach Istomina
- Bild 22 Beispiel 12: Zur Bestimmung von $J_{S,krit}$ bei einem suffosionsgefährdetem Erdstoff
- Bild 23 Beispiel 13: Zur Filterbemessung bei Kontaktsuffosion

11. Schlußbemerkungen

Die eigentlichen Suffosionsforschungen wurden erst in den Jahren nach 1945 begonnen. Die Hauptergebnisse wurden in den fünfziger Jahren publiziert und in Deutschland in den sechziger Jahren bekannt. Sie konnten daher noch nicht genügend durch praktische Erfahrungen überprüft werden. Dieses gilt insbesondere für die im Abschnitt 5.2. aufgeführten Gesetzmäßigkeiten. Daher sind bei Anwendung des Werkstandards auf Erdstoffe mit scharfkantigen oder plattig-eckigen Körnern und auf Erdstoffe mit abgerundeten Körnern bei $U = d_{60}/d_{10} > 20$ bis auf Widerruf Labor- oder Feldversuche durchzuführen, um die theoretischen Untersuchungen zu stützen. Hiervon ausgenommen sind Erdstoffe, deren Kornverteilungslinie der Regel 6 oder 7 entspricht. Die Versuchsergebnisse sind dem Chefsingenieur für Speicherbau zuzuleiten.

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

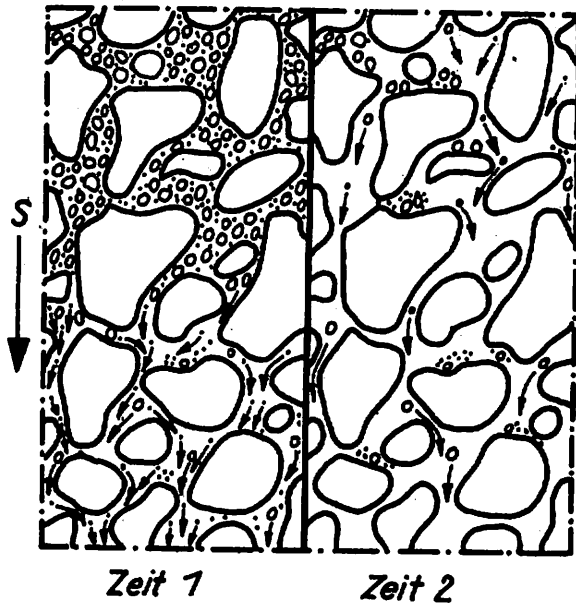


Bild 1

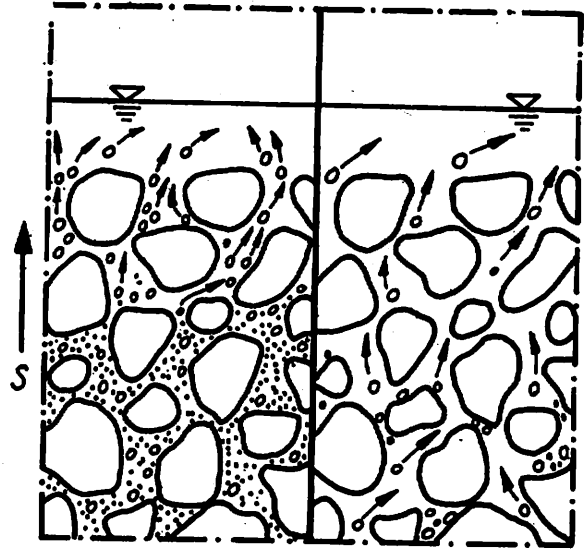


Bild 2

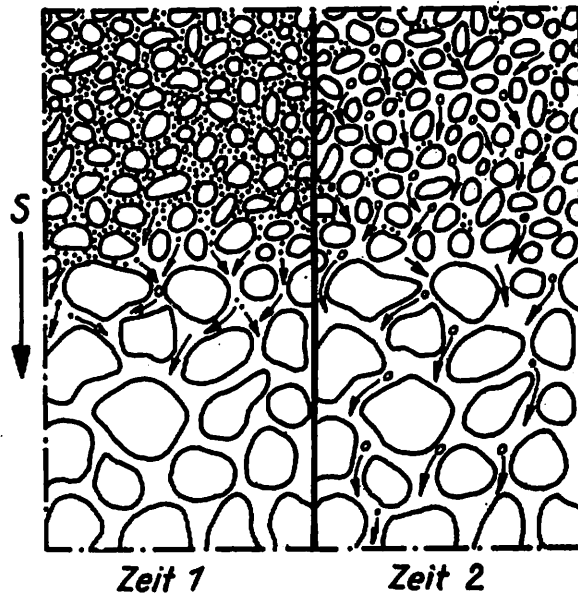
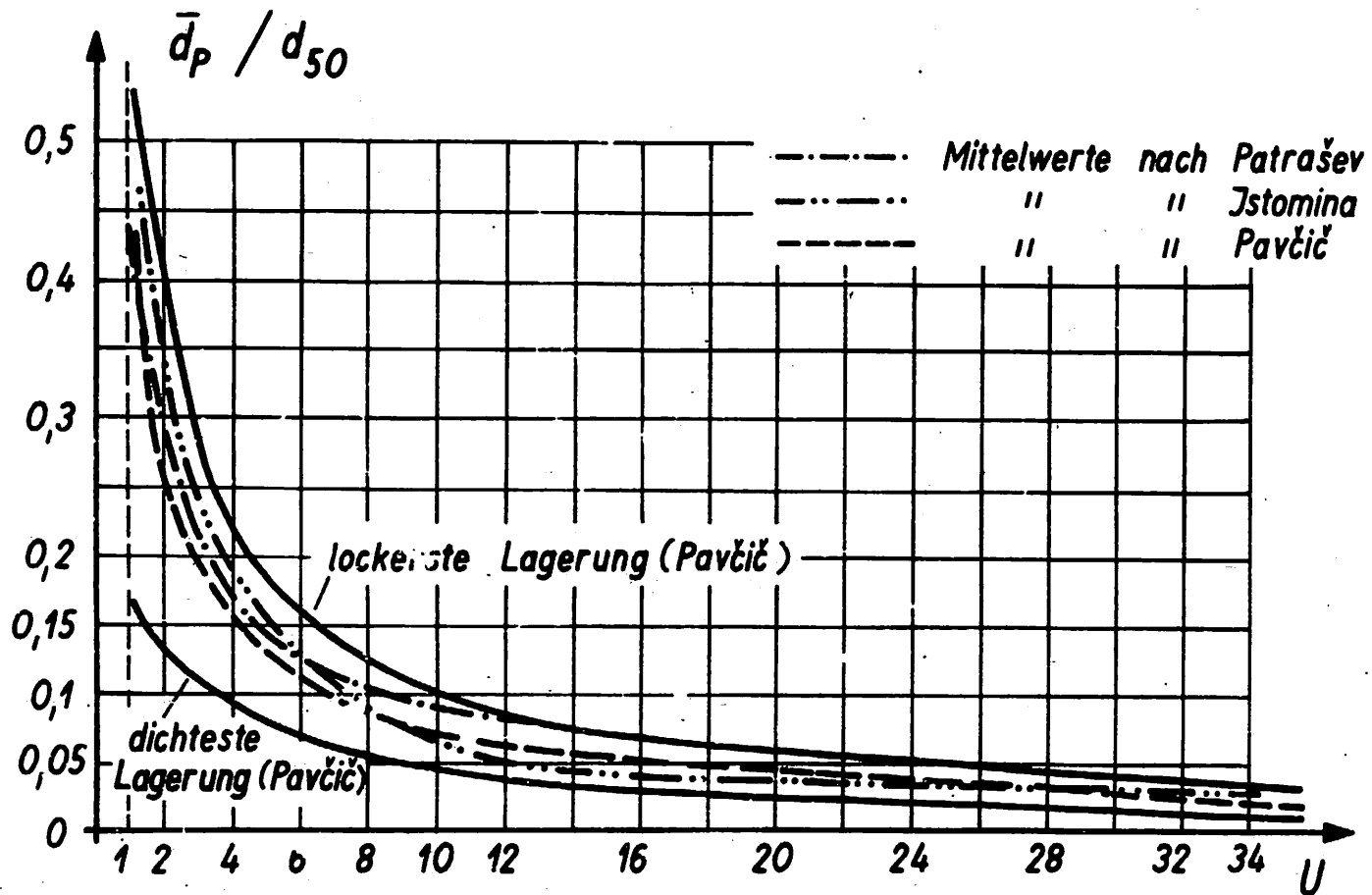


Bild 3

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

Bild 4



Vergleich der Ergebnisse von Porenrechnungen für Versuche des Institutes für Fluß- und Seebau nach den Gleichungen von Pavčić, Patrašev u. Jstomina

Bild 5

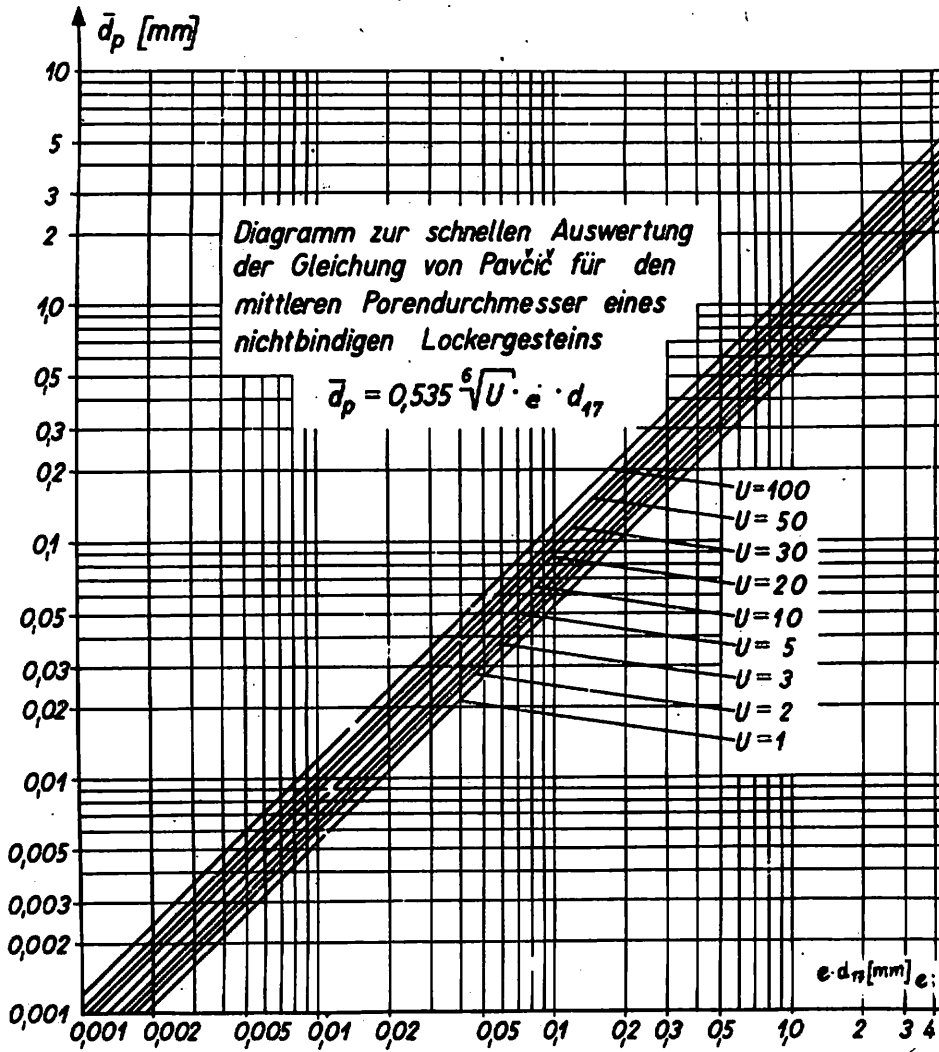


Bild 6a

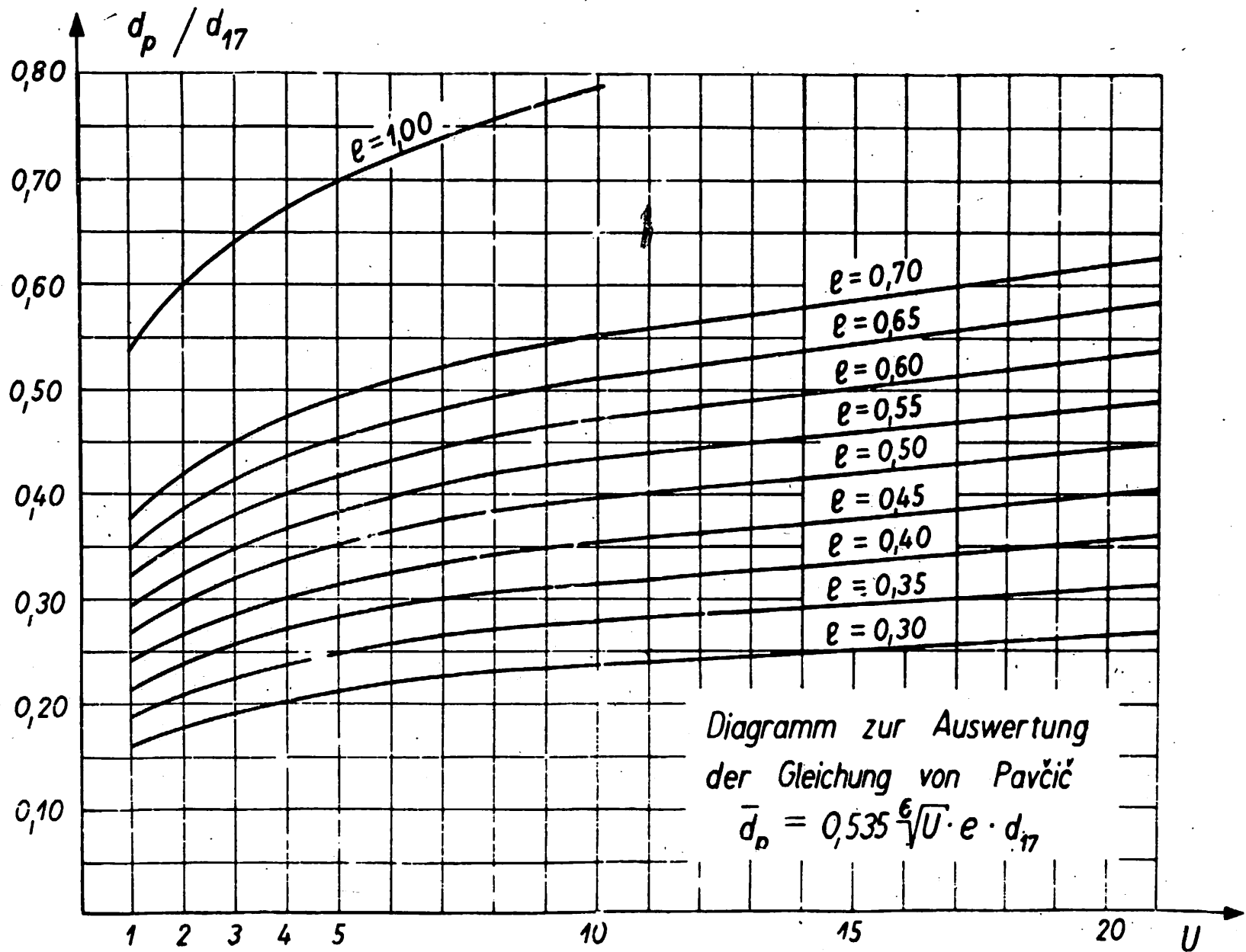
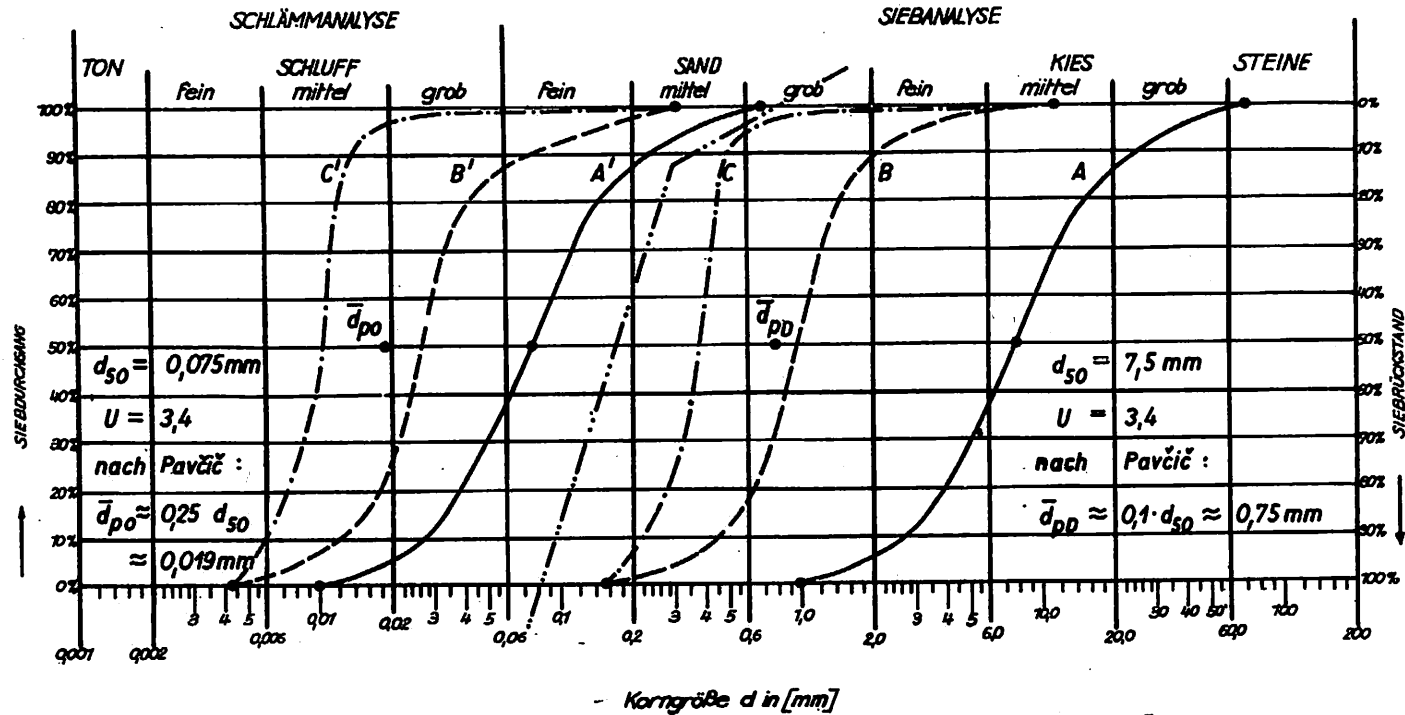


Diagramm zur Auswertung
der Gleichung von Pavčić
$$\bar{d}_p = 0,535 \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17}$$

Bild 6b

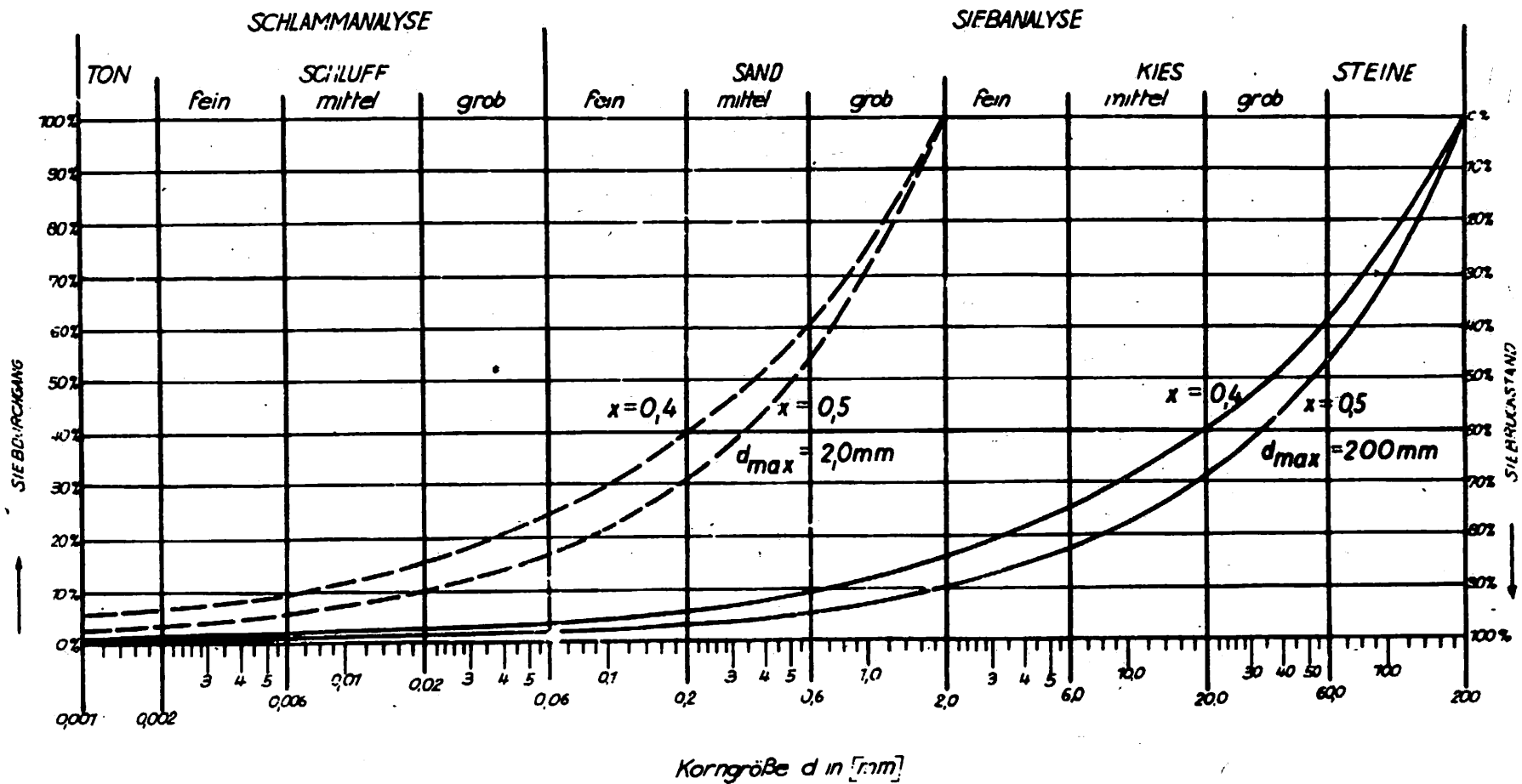


- Fall 2 - lockerste Lagerung
- A' - Kornverteilungslinie
 - B' - Porendurchmesserverteilungslinie, abgeleitet aus der Kornverteilungslinie
 - C' - " , abgeleitet aus der Häufigkeitsverteilung

- Fall 1 - dichteste Lagerung
- A - Kornverteilungslinie
 - B - Porendurchmesserverteilungslinie, abgeleitet aus der Kornverteilungslinie
 - C - " , abgeleitet aus der Häufigkeitsverteilung

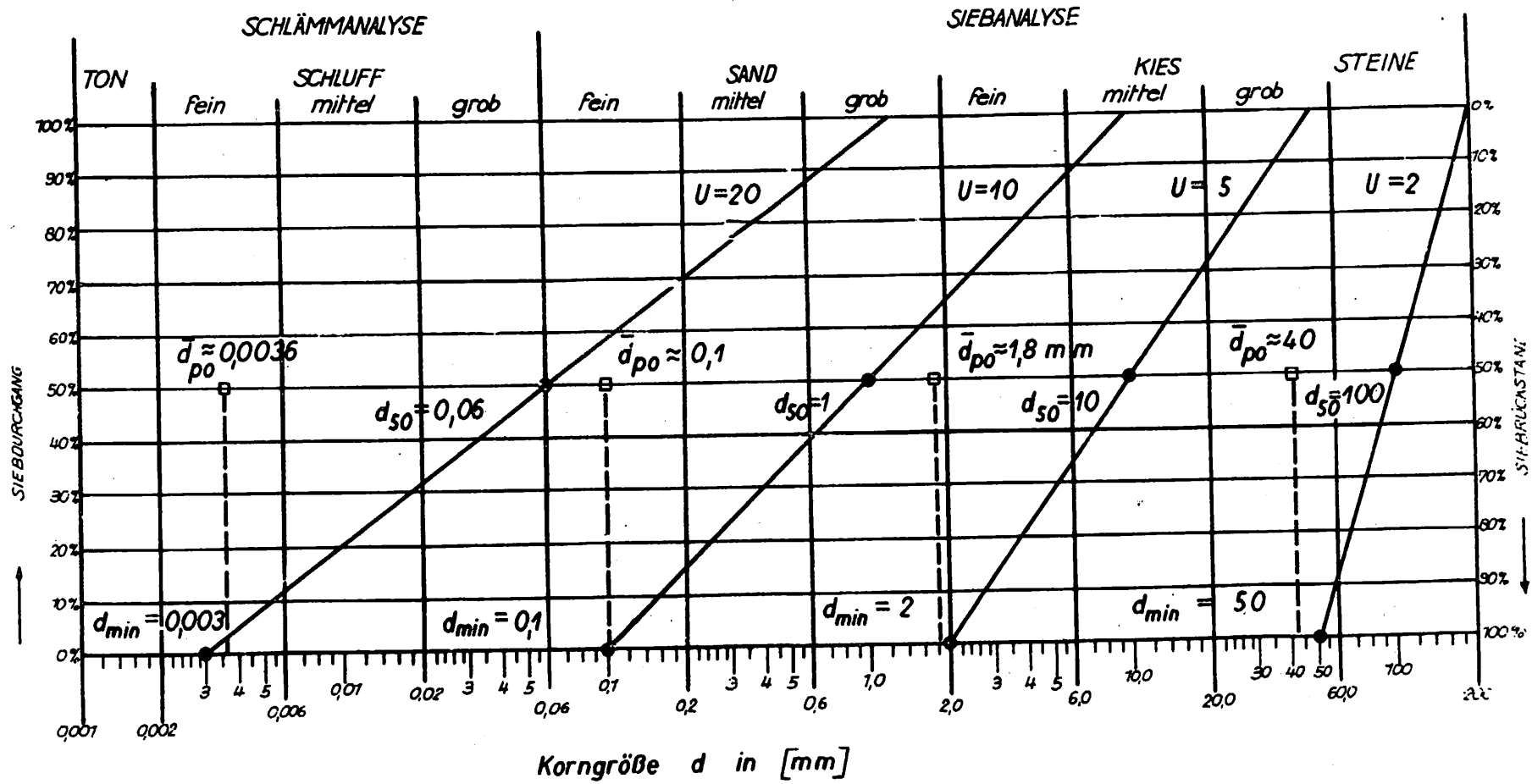
Vergleich der Porendurchmesserverteilungslinie nach Silveira mit dem mittleren Porendurchmesser nach Pavčić

Bild 7



Kornverteilungslinien nach Talbot

Bild 8



Suffosionsnachweis bei geraden Kornverteilungslinien

Bild 9

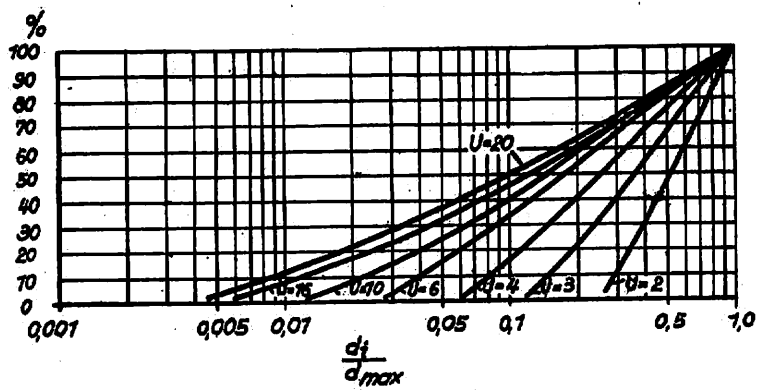
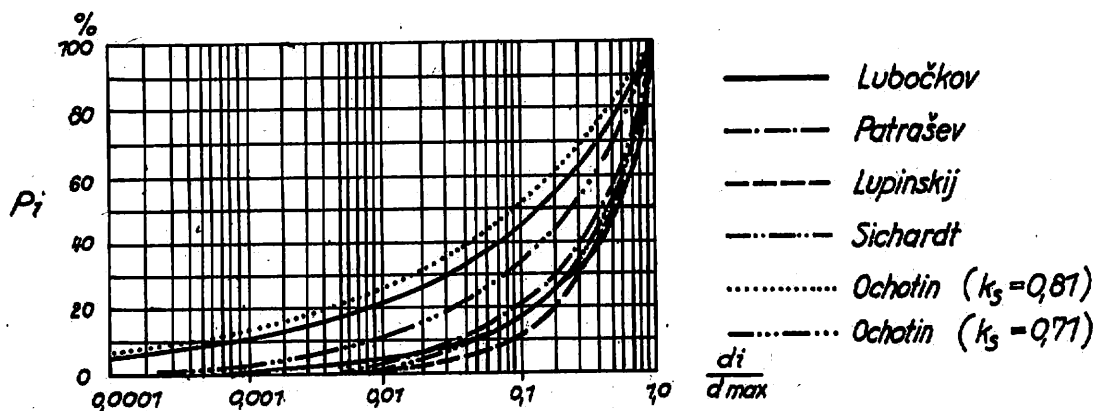
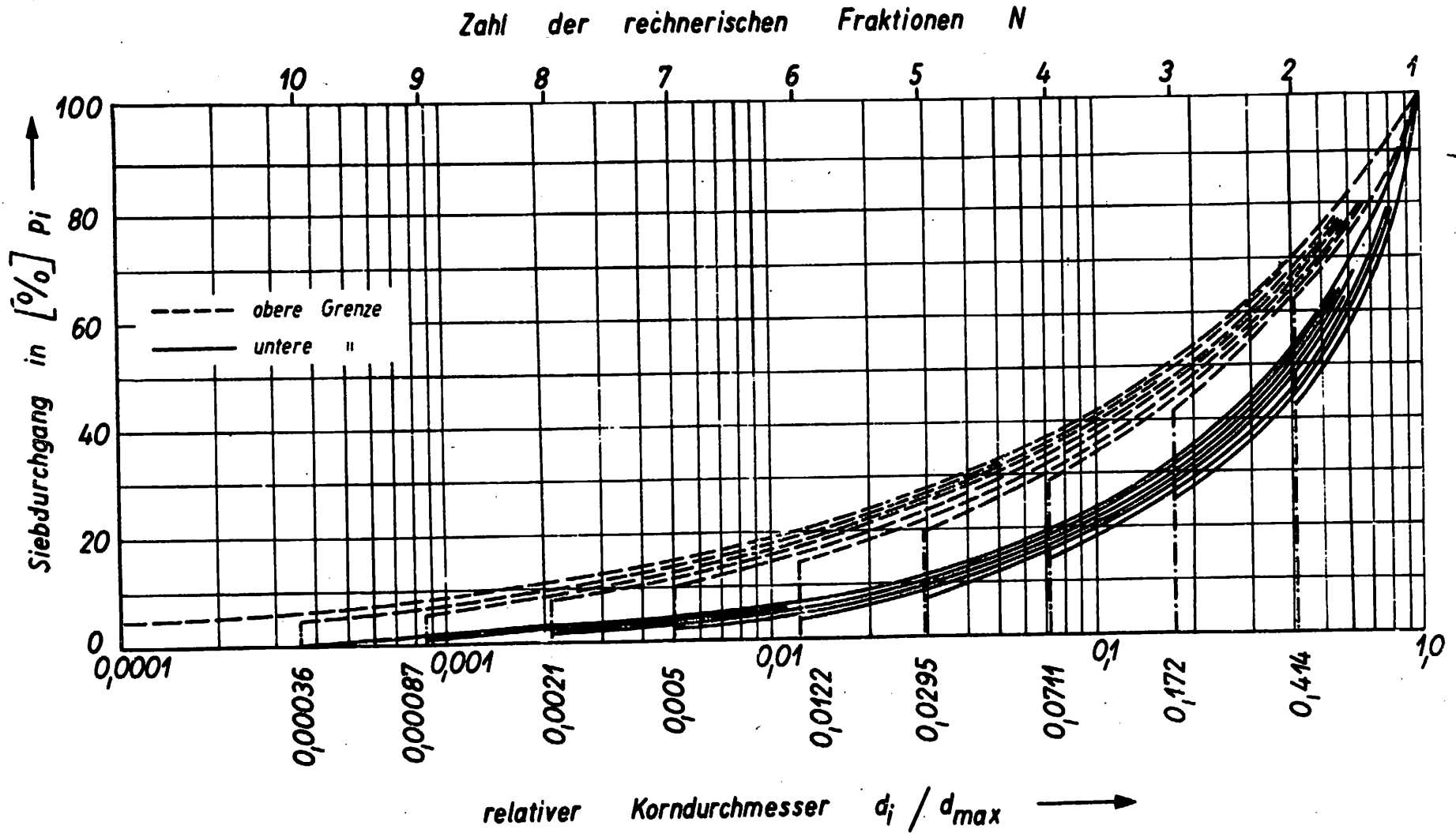


Bild 10



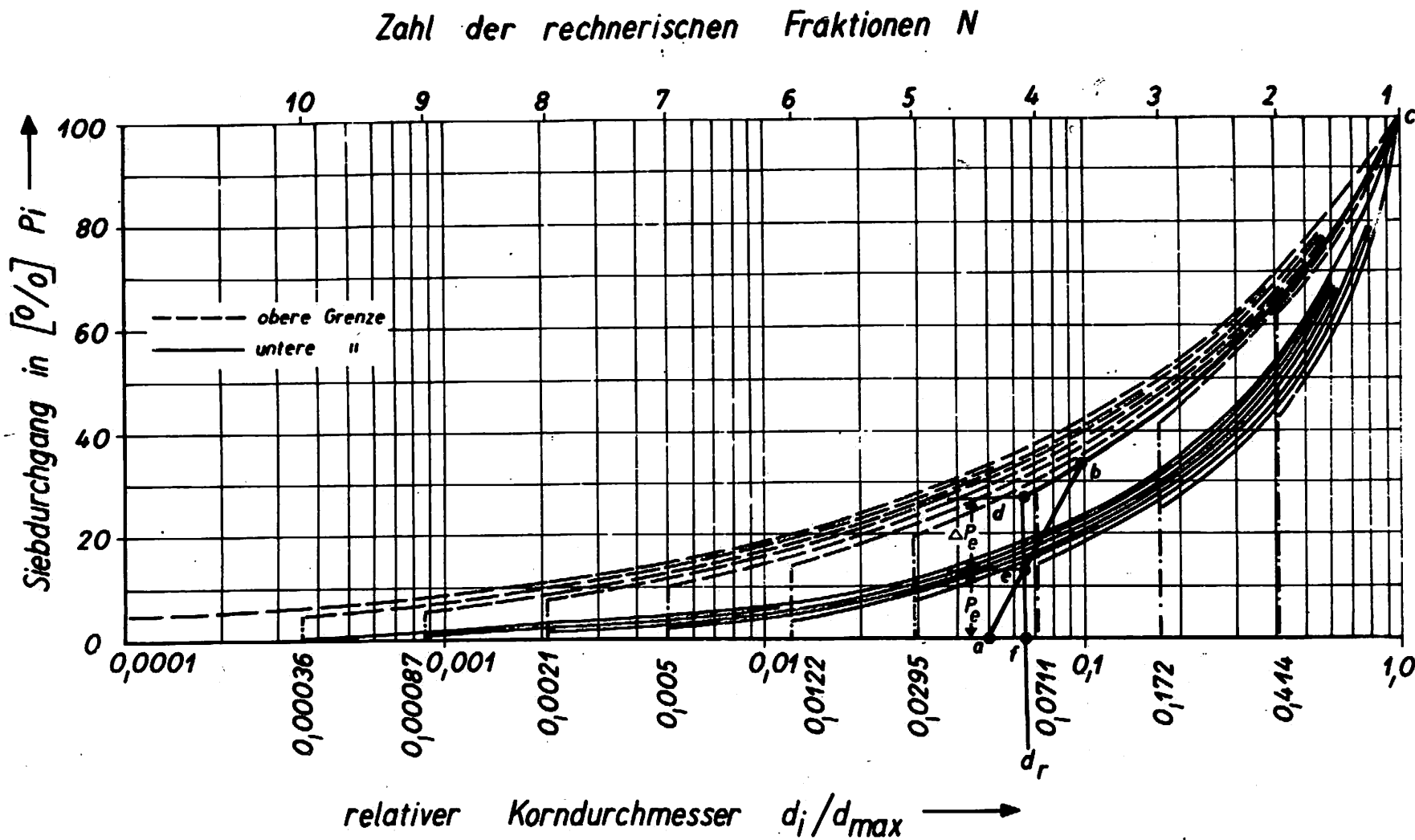
Suffosionssichere Kornverteilungslinien nach verschiedenen Autoren

Bild 11

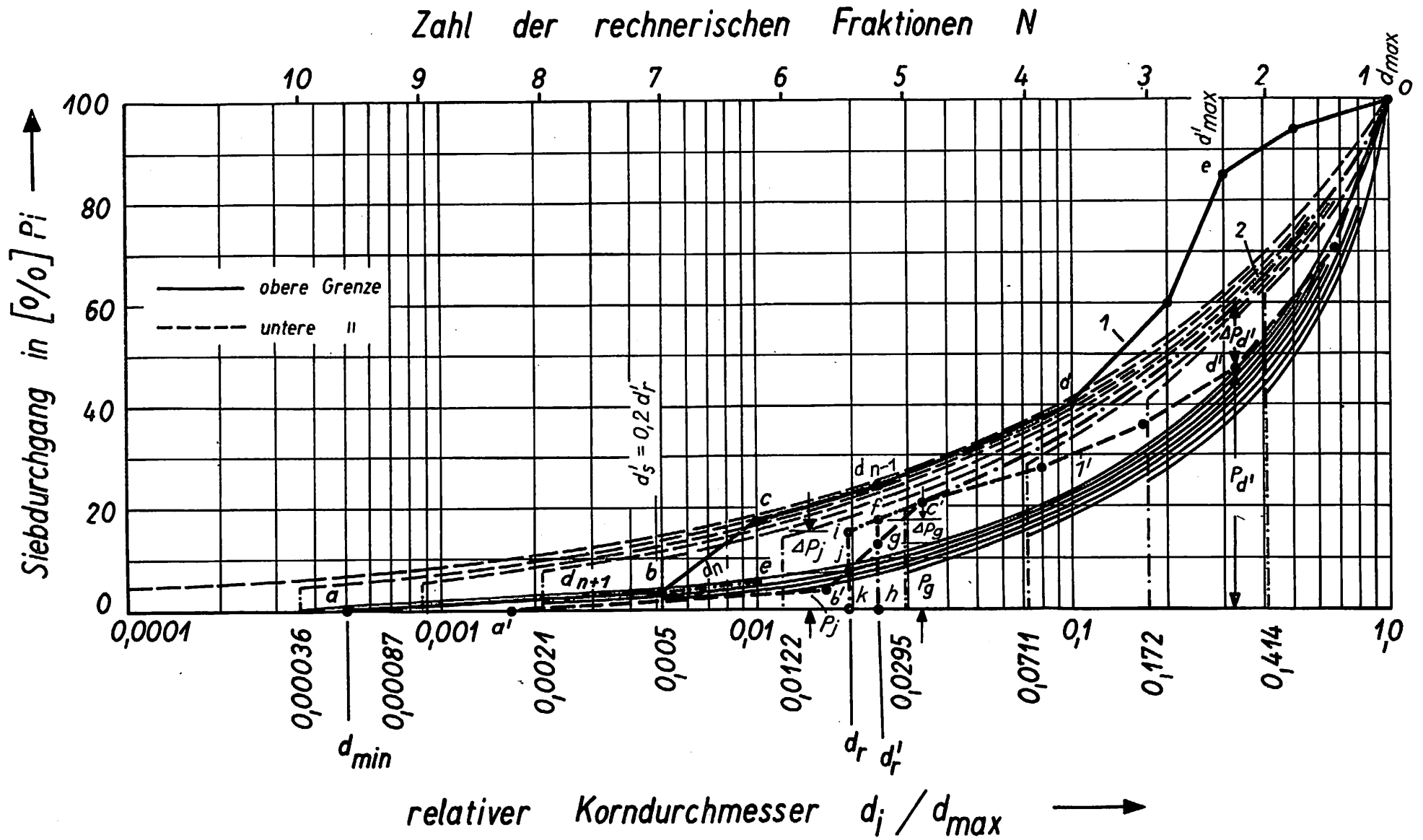


Grenzkornverteilungskurven für suffosionssichere nichtbindige Erdstoffe nach Luboček.

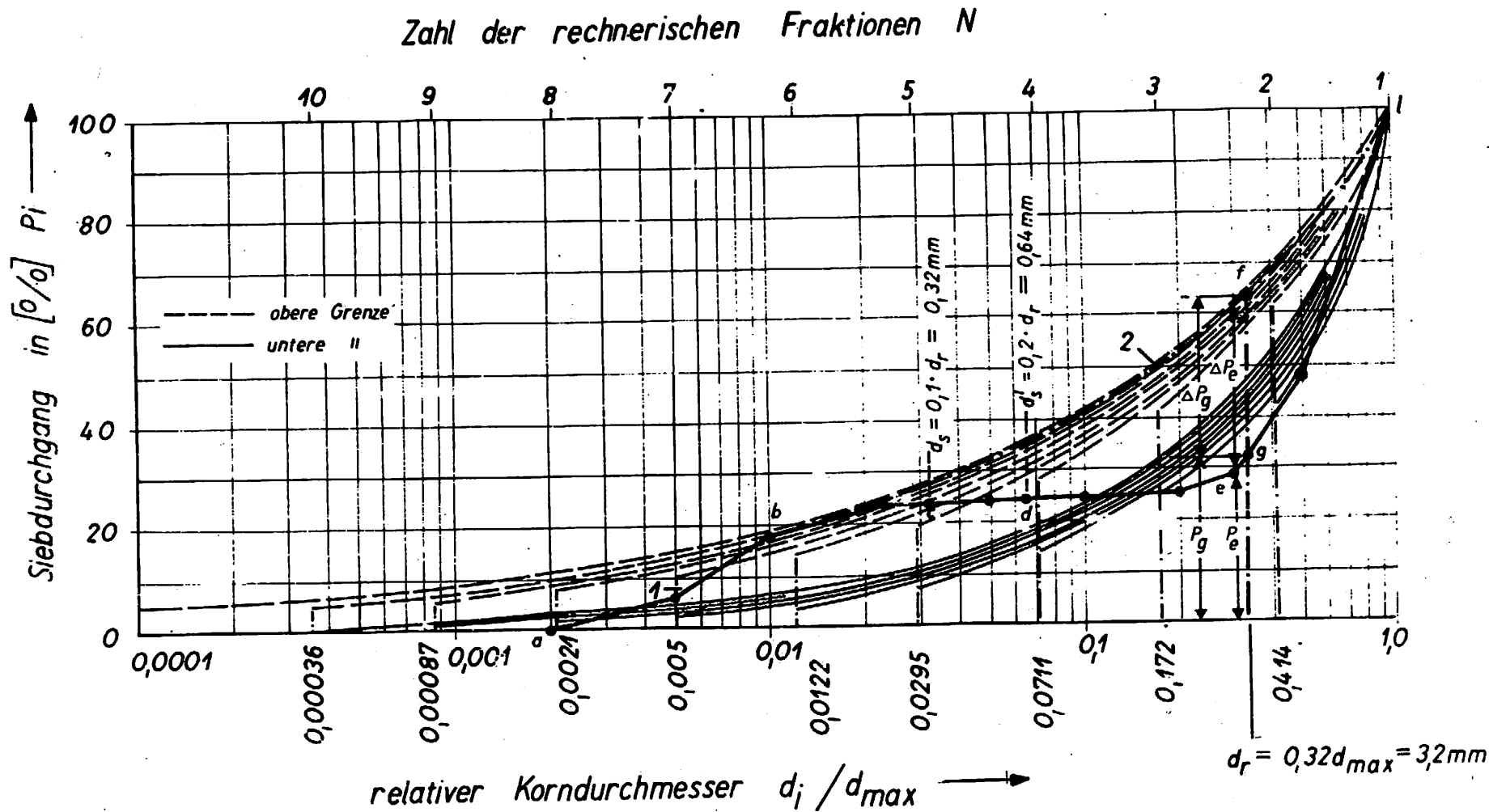
Bild 12



Bestimmung des rechnerischen Durchmessers d_r



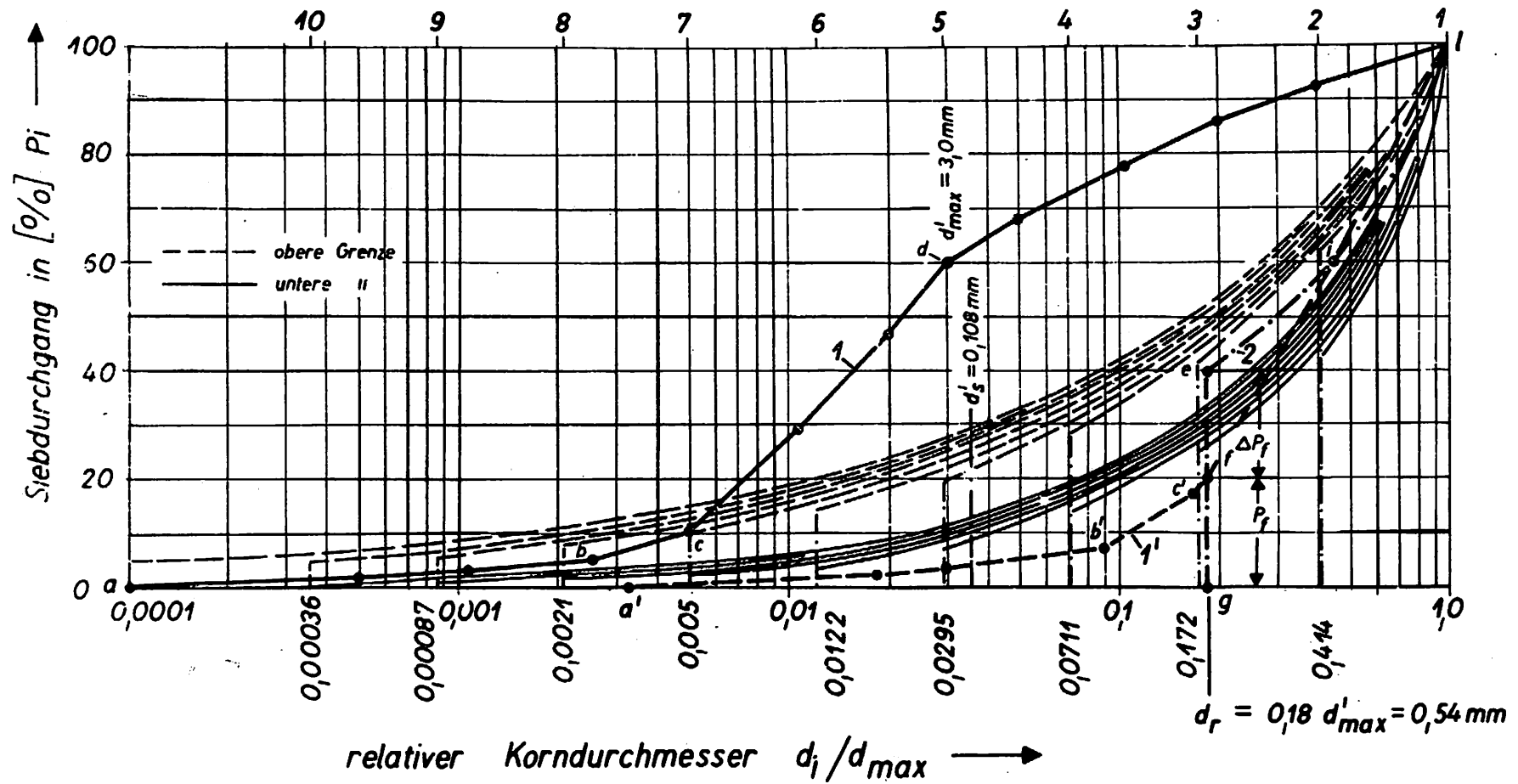
1. Beispiel : Erläuterung der grafischen Methode des Suffosionsnachweises



2. Beispiel : Suffosionsnachweis für einen Erdstoff des Typs I
(konvexer Kurvenbereich)

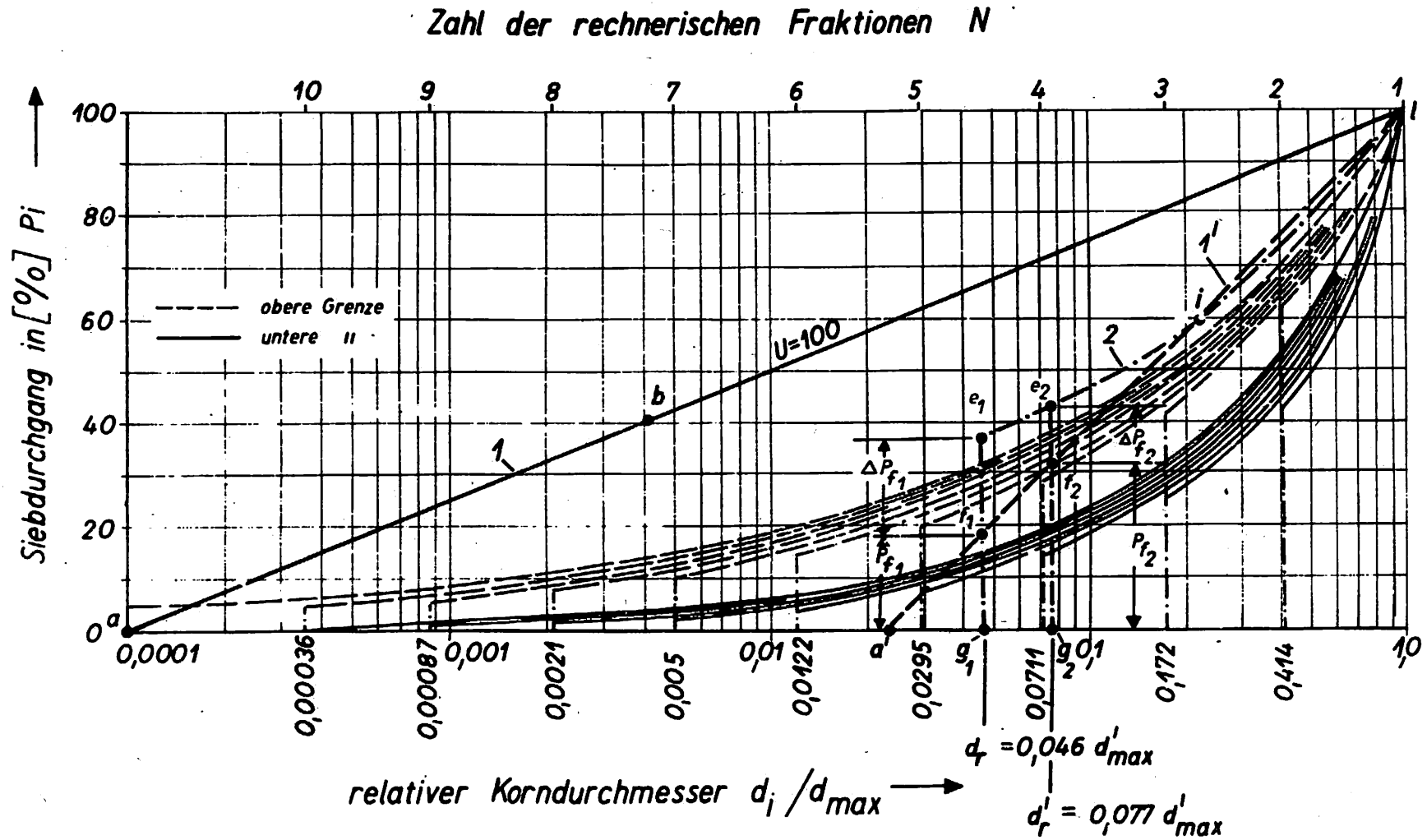
Bild 15

Zahl der rechnerischen Fraktionen N



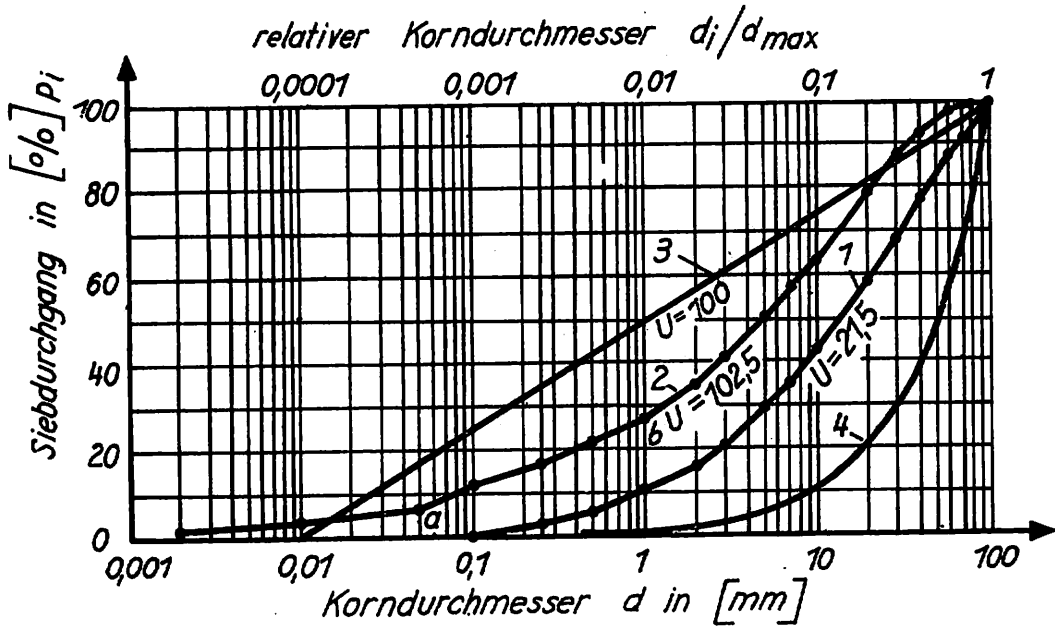
3 Beispiel: Suffosionsnachweis für einen Erdstoff des Typs II
 (konkaver Kurvenbereich)

Bild 16



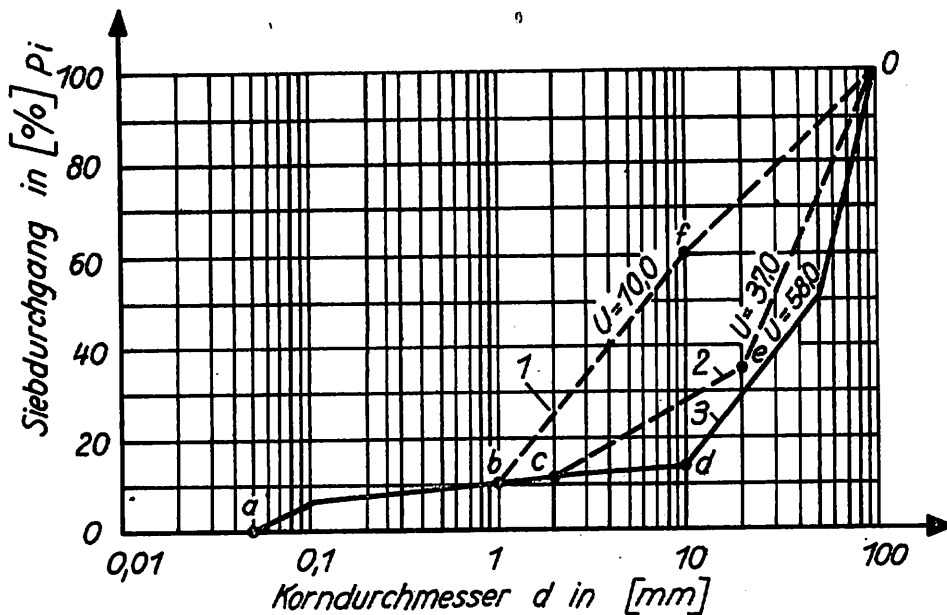
4. Beispiel: Suffosionsnachweis für einen Erdstoff des Typs III
(Gerade im semilogarithmischen Maßstab)

Bild 17



5.- 8. Beispiel : Suffosionsberechnungen nach der analytischen Methode

Bild 18



9.- 11. Beispiel : Suffosionsberechnungen nach der analytischen Methode

Bild 19

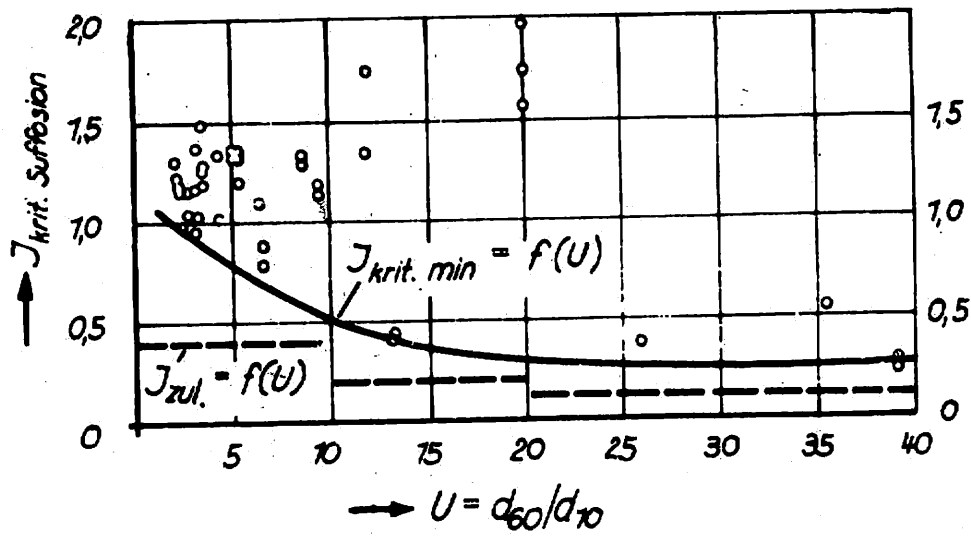


Bild 20

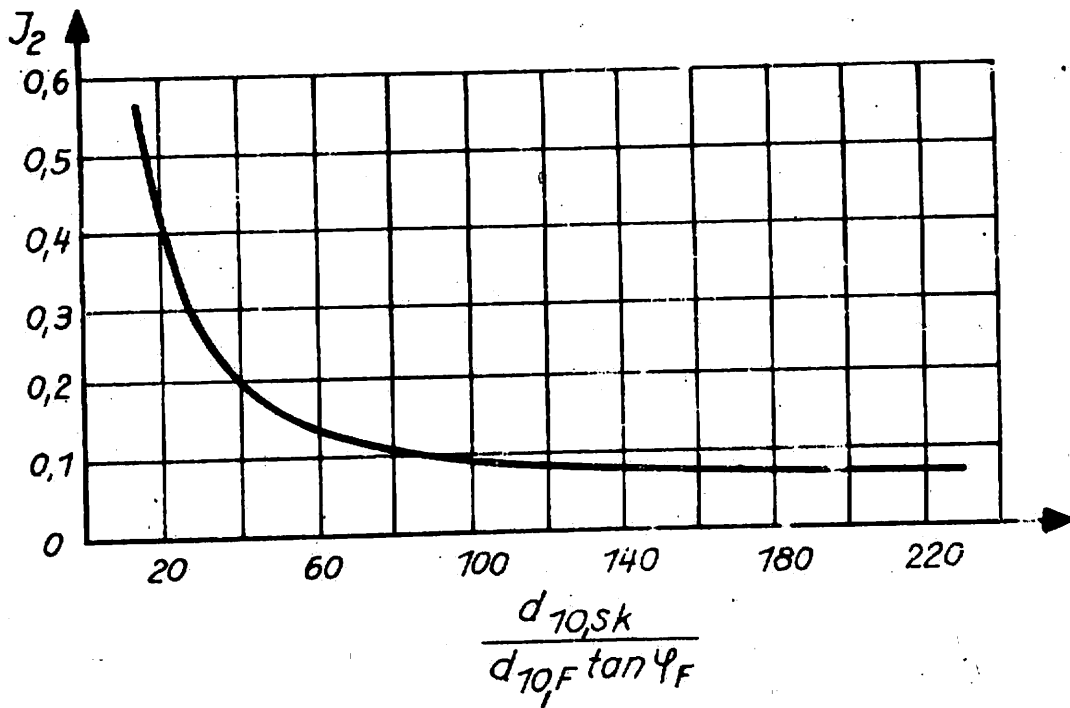
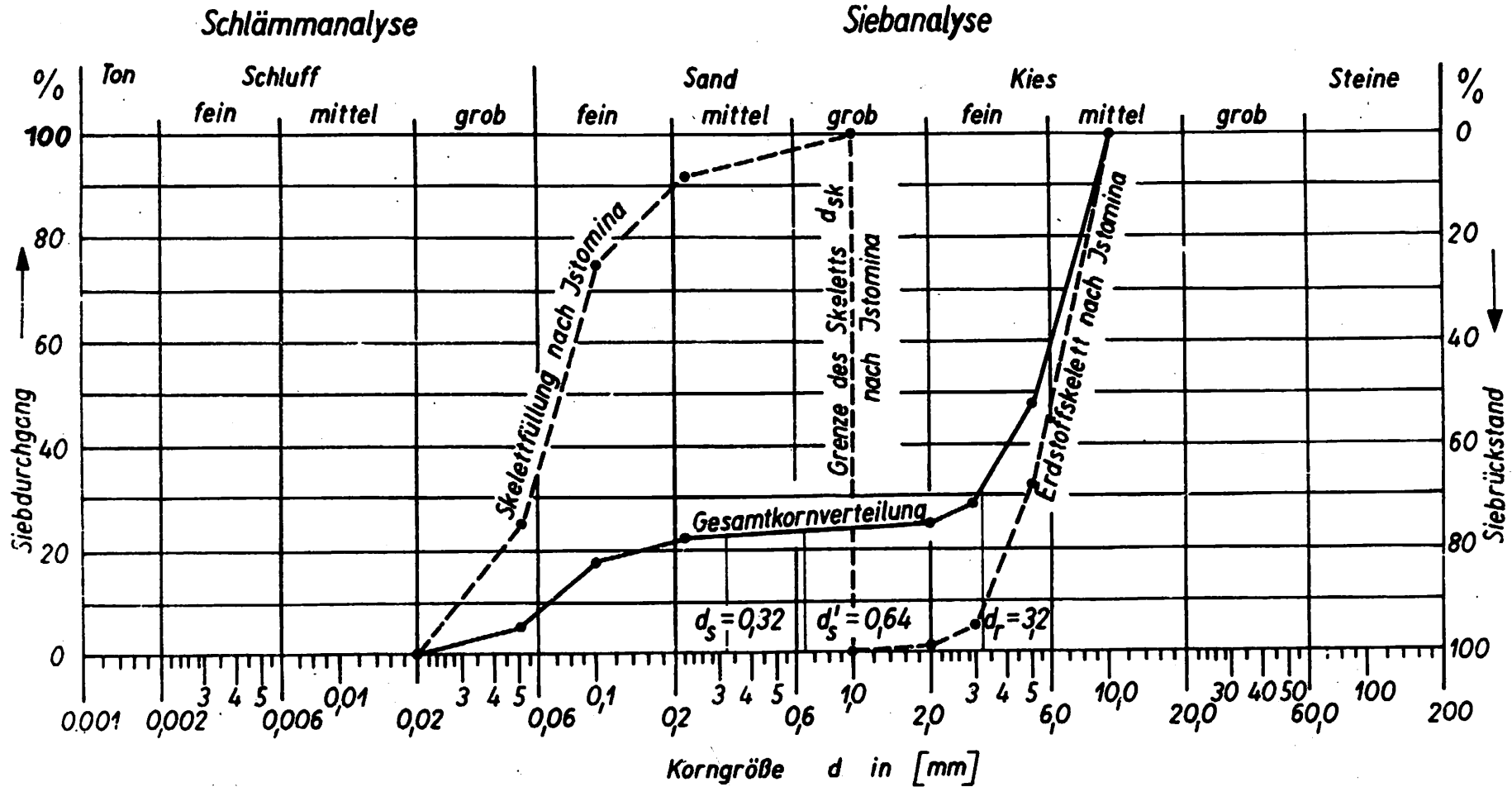
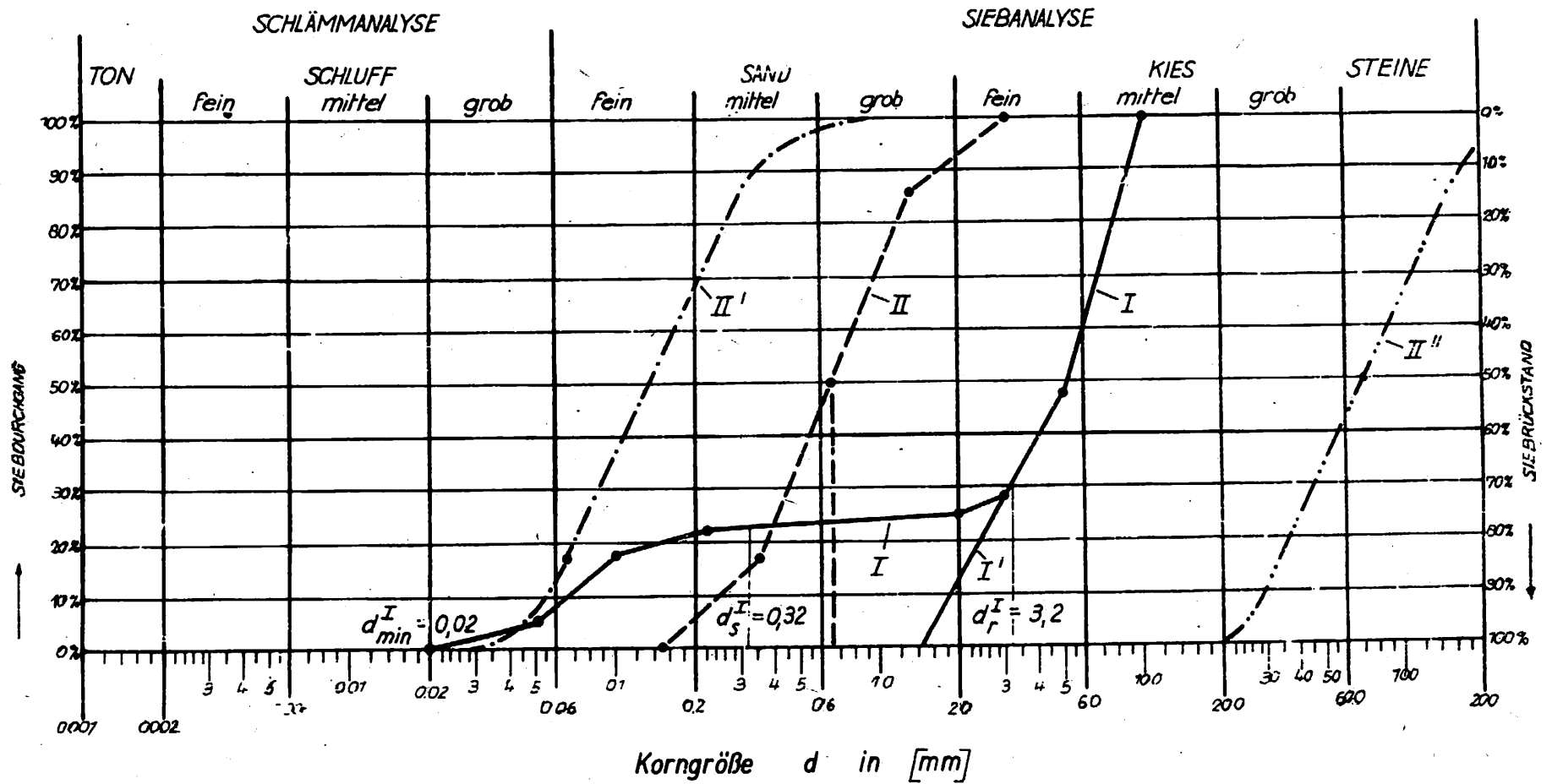


Bild 21



12. Beispiel: Zur Bestimmung von $J_{s,krit}$ bei einem suffusionsgefährdeten Erdstoff



13. Beispiel: Zur Filterbemessung bei Kontaktsuffosion