

WITTMANN L.

Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, BRD

Zur Problematik der Filterbemessung bei künstlichen und natürlichen Filtern

Some aspects of the design of natural and fabric filters

SUMMARY

In designing a filter one has to fulfill two opposing requirements: the mechanical filter stability and the hydraulic activity. These requirements are formulated in what we call "filter criteria". These filter criteria are mainly a geometrical approach to the problem most often neglecting the hydraulic boundary conditions. A short and critical analysis of these criteria is given in this paper. The thickness of a filter must be of great interest but is not always taken into consideration. Some of the existing approaches especially the last aspect are discussed by comparing natural and (textile) fabric filters.

1. FILTER IM BAUWESEN

Die Erfordernis und der Einsatz von Filtern im Bauwesen sind vielfältiger Natur; sei es im Grundbau als Brunnenfilter oder Drain; im Deich- und Dammbau als Flächenfilter, im Straßen- und Eisenbahnbau als Flächendränage oder im Fluß- und Kanalbau als Übergangszone unter Deckwerken.

Die zum Aufbau derartiger Filter zur Verfügung stehenden Materialien waren bis in die sechziger Jahre fast ausschließlich natürliche Filterbaustoffe (Sand, Kies, Steine). Erst in neuerer Zeit, verursacht durch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, neue technische Verfahren und nicht selten durch den Mangel an geeigneten natürlichen Filterbaustoffen, erlangten künstliche Filterbaustoffe (Gewebe, Vliese) mehr Bedeutung.

2. ANFORDERUNGEN AN EINEN FILTER

Bei der Bemessung eines Filters gilt es im allgemeinen zwei gegenläufige Anforderungen zu erfüllen:

- die mechanische Filterfestigkeit
- die hydraulische Wirksamkeit

Die Forderung nach mechanischer Filterfestigkeit verlangt: die Porenöffnungen des Filterbaustoffes müssen so klein sein, daß der abzufilternde Erdstoff sie nicht passieren kann. Bezüglich der hydraulischen Wirksamkeit sollen die Porenöffnungen jedoch noch so groß sein, daß in ihnen das anfallende Sickerwasser drucklos abgeführt werden kann. Diese allgemeinen Forderungen wurden bereits von TERZAGHI [1] erkannt und sind Inhalt der von ihm aufgestellten Filterregel (siehe 3.).

Die Forderung nach mechanischer Filterfestigkeit ist immer einzuhalten, während die Ne-

benbedingung der hydraulischen Wirksamkeit von untergeordneter Bedeutung sein kann. Als Beispiel sei die Übergangszone zwischen Dichtungskern und Stützkörper eines Erddammes mit Innendichtung genannt. Zum Schutz des Kernes vor Suffosion und Erosion ist die mechanische Filterfestigkeit der Übergangszone gegen das Kernmaterial unbedingt erforderlich. Die Frage nach hydraulischer Wirksamkeit ist hierbei nur im Hinblick auf die Dammstatik zu stellen. Die Gruppe der Filter läßt sich somit in zwei Untergruppen aufteilen:

- Filter mit Schutzfunktion: es ist nur die Gewährleistung der mechanischen Filterfestigkeit zu erfüllen
- Filter mit Schutz- und Dränagefunktion: zusätzlich zur mechanischen Filterfestigkeit ist auch die hydraulische Wirksamkeit zu gewährleisten (ergänzende Bemessung auf Wasserabführungsvermögen).

3. FILTERKRITERIEN NATÜRLICHER FILTERBAUSTOFFE

Die im folgenden kurz dargebotenen Filterkriterien sind in erster Linie für nichtbindige Böden gültig. Bei zunehmendem Feinheitsgrad der Böden gewinnt die Kohäsion an Einfluß, was bewirkt, daß bei Anwendung von Filterkriterien nichtbindiger Böden auf kohäsive Erdstoffe die Bemessung auf der sicheren Seite liegt (vgl. DAVIDENKOFF [2]).

3.1 DIE MECHANISCHE FILTERFESTIGKEIT

3.1.1 GEOMETRISCHE KRITERIEN

Die Forderung der mechanischen Filterfestigkeit nach Sicherheit gegen Suffosion und Erosion wurde bislang als geometrisches Problem gewertet, so daß eine Vielzahl existierender Filterkriterien sich in erster Linie an den Korngrößen von Erdstoff und Filter orientieren. Die Kennzeichnung eines Erdstoffes erfolgt meist anhand der Kornverteilungskurve, deren Beschreibung aber nur

durch ausgewählte Punkte (z.B. d_{50} = Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang) erfolgen kann. Die einfachsten Filterregeln beinhalten somit die folgenden Zusammenhänge (D = Korndurchmesser grober Erdstoff (Filter); d = Korndurchmesser feiner Erdstoff):

$$D_{15} \leq 4 d_{85} \quad (\text{TERZAGHI [1]})$$

$$D_{15} \leq 5 d_{85} \quad (\text{CORPS OF ENGINEERS [3]})$$

$$D_{50} \leq 3 \text{ bis } 4 d_{50} \quad (\text{SICHARDT [4]}) \text{ u.a.}$$

Da die Charakterisierung eines Erdstoffes durch eine einzige Korngröße nur für gleichförmige Erdstoffe zutreffend sein kann, sind obige Kriterien streng genommen auch nur für diese gültig (TERZAGHI: Ungleichförmigkeitsgrad $U = d_{60}/d_{10} \leq 2$). Bei der Verwendung gleichförmiger Filter sind oft mehrere Filterlagen erforderlich (Stufenfilter).

Für ungleichförmige Erdstoffe (Filter und abzufilternder Erdstoff mit $U > 2$) wurden ebenfalls Filterkriterien entwickelt, die unter Einbeziehung des Parameters Ungleichförmigkeit Aussagen über zulässige Abstandsverhältnisse (D/d) machen. Das für ungleichförmige Filterbaustoffe (Mischfilter) praktikabelste Kriterium dürfte das von CISTIN/ZIEMS [7] entwickelte und durch Versuche belegte Entwurfsdiagramm sein (s. Abbildung 1).

Zulässiges Abstandsverhältnis
 $A_{50, \text{zul.}} = d_{50, \text{II}} / d_{50, \text{I}}$ bei einer
 Sicherheit $\eta_{K.E.G.} = 1.5$ bei
 Kontakterosion

Nach Versuchen von ČIŠTIN,
 im Bereich $U_1 \leq 4$
 nach Versuchen von ZIEMS
 korrigiert mit folgenden
 Nebenbedingungen:

$i_1, \text{verh.} \leq 9$
 $0,1 \text{ mm} \leq d_1 \leq 30 \text{ mm}$
 $4 \text{ mm} \leq d_{11} \leq 100 \text{ mm}$
 suffosionssichere Erdstoffe I und II
 $I_{0, \text{II}} = 0$ für $1 \leq U_1 < 2$ und $U_1 > 10$
 $I_{0, \text{II}} = 0,5$ für $2 \leq U_1 \leq 10$
 C_{11} entsprechend Tabelle
 Kornform des Erdstoffes I beliebig

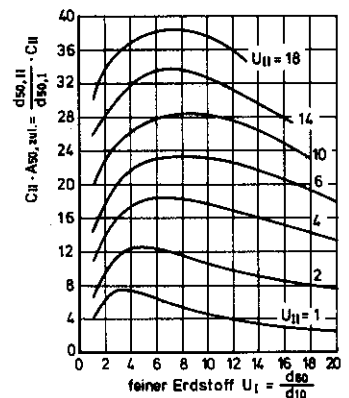


Abb. 1 FILTERKRITERIUM NACH CISTIN/ZIEMS [7]

Bei annähernd kugelförmigen Erdstoffen und unter der Voraussetzung der dichten Lagerung des Erdstoffes kann auch folgender Weg beschritten werden (SILVEIRA [6], ZIEMS [7]): Aus der Kornverteilung des Filters wird dessen Porenweitenverteilung ermittelt und diese mit der Kornverteilung des zu schützenden Erdstoffes verglichen. Dieses aufwendige Verfahren hat sich bislang als wenig praktikabel erwiesen.

3.1.2 HYDRAULISCHE KRITERIEN

Alle zuvor zitierten Filterregeln lassen jedoch die hydraulischen Randbedingungen außer Acht, die in energetischer Hinsicht letztlich dafür verantwortlich sind, ob ein Erdstoffpartikel auch die Poren eines geometrisch nicht filterfesten Erdstoffes passieren kann. Das Kriterium nach CISTIN/ZIEMS (s. Abb. 1) gibt zumindest den Bereich der hydraulischen Randbedingungen an und präzisiert somit den Anwendungsbereich. Angaben über zulässige und kritische Sickerwassergefälle oder Sickerwassergeschwindigkeiten sind Inhalt nur weniger Kriterien (DAVIDENKOFF [2], ZIEMS [7] u.a.).

Bei der Filterbemessung bewegt man sich in der Praxis meist auf der sicheren Seite, d.h. man fordert die Einhaltung des geometrischen Kriteriums. Dabei dürfen aber die hydraulischen Gültigkeitsgrenzen derartiger Kriterien nicht unberücksichtigt bleiben, insbesondere dann nicht, wenn es sich bei der hydraulischen Belastung um dynamische Kraftwirkungen handelt (Schwingungen, Erschütterungen, Pulsation, Strömungsumkehr).

3.2 HYDRAULISCHE WIRKSAMKEIT

Die hydraulische Wirksamkeit, nicht zu verwechseln mit dem hydraulischen Kriterium (3.1.2) beinhaltet eine Aussage über die Durchlässigkeit des Filters im Vergleich zur

Durchlässigkeit des angrenzenden Erdstoffes. Nach TERZAGHI [1] soll $D_{15} \geq 4 d_{15}$ sein, was im Sand- und Kiesbereich unter Anwendung der Durchlässigkeitsbestimmung nach BEYER [8]

einer um mindestens eine Zehnerpotenz größeren Durchlässigkeit des Filtermaterials entspricht; dies wiederum befriedigt bei ausreichendem Abflußquerschnitt (Filterdicke) die Anforderung nach druckloser Abführung des Sickerwassers (Dränagefunktion).

4. FILTERKRITERIEN KÜNSTLICHER FILTER

Bei den gebräuchlichen künstlichen Filtern handelt es sich fast ausschließlich um dünnwandige Materialien (Kunststoffe) mit zwei typischen Vertretern:

- Gewebe
- Vliese.

Die Gewebe mit aus dem Herstellungsprozeß bedingten regelmäßigen Maschenweiten (= Porenöffnungen) und meist enger Porenweitenverteilung und die Vliese (Spinn- und Nadelvliese) mit einem etwas breiteren Porenweitenpektrum und einer irregulären Porengeometrie machen unterschiedliche Identifizierungsverfahren erforderlich. Die Gewebe erlauben meist eine optische Ausmessung der Maschenweiten, während bei Vliesen das Verfahren der Trocken- oder Naßsiebung zum Einsatz gelangt (ZITSCHER [9], LIST [10]).

4.1 DIE MECHANISCHE FILTERFESTIGKEIT

Bei rein geometrischer Betrachtung läßt sich unter vereinfachenden Annahmen (Kugelform und dichte Lagerung) aus der Kornverteilung eines relativ gleichförmigen natürlichen Filters dessen Porenweitenverteilung kalkulieren. Der so ermittelte Bereich der Porenweiten deckt sich mit dem von RAGUTZKI [11] für zulässige Maschenweiten D_w künstlicher Filter in Abhängigkeit vom Medianwert d_{50} des abzufilternden Erdstoffes ermittelten Bereich (gültig für $d_{50} = 0.1$ bis 0.3 mm).

$$D_w/d_{50} \leq 1.7 \text{ bis } 2.7 \text{ (Randbedingung: Sta-}$$

tionarität)

$$D_w/d_{50} < 0.5 \text{ bis } 1.0 \text{ (Randbedingung: Turbulenz, wechselndes Gefälle).}$$

Für Vliese mit ihrer geometrisch unregelmäßigen Struktur ist eine derartige Quantifizierung nicht möglich. Aus dem Verfahren der Trocken- oder Naßsiebung läßt sich aber relativ einfach der "Siebdurchgang" durch das Vlies ermitteln. Unter Berücksichtigung und Simulation dynamischer Effekte hat LIST [10] ein Prüfverfahren entwickelt, das zur Quantifizierung des Erosionsverhaltens oder Bodenrückhaltevermögens dient.

Da in der Natur der zu schützende Boden eine meist größere Ungleichförmigkeit aufweist, ist bei der Bemessung eines gleichförmigen natürlichen Filters im allgemeinen, bei Geweben und Vliesen im besonderen die Filterbedingung sehr exakt einzuhalten (vgl. MEYER [12]). Maßgebend hierfür ist die Porenweitenverteilung in Strömungsrichtung (Filtrationslänge) deren Einfluß in Kapitel 5. ausführlich diskutiert wird. In wieweit die geforderte Bemessung überhaupt möglich ist, ist eine Frage nach der Breite des Kornverteilungsbandes des zu schützenden Erdstoffes, da dieser meist nicht durch eine einzige Kornverteilungskurve repräsentiert wird.

Unabhängig davon macht der Einsatz gleichförmiger natürlicher Filter und damit der künstlicher Filterbaustoffe eine engere Filterabstufung erforderlich, was man sehr leicht mit dem Diagramm aus Abbildung 1 zeigen kann. Bei künstlichen Filtern ist eine Kompensation der engeren Filterabstufung durch Wahl eines nachfolgenden gröbereren Erdstoffes (z.B. Steinschüttung) möglich. Der Auflagerbedingung der Gewebe und Vliese ist dabei besondere Beachtung zu schenken, da es sonst zu unzulässigen Verformungen oder Zerstörung des künstlichen Filters kommen kann.

Spezielle hydraulische Kriterien (vgl. 3.1.2) sind für künstliche Filter nicht bekannt. Wegen der geringen dritten Dimension dieser Filterbaustoffe ist das Auftreten von Turbulenz nie ganz auszuschließen, so daß geometrische Kriterien unter Berücksichtigung ungünstigster hydraulischer Randbedingungen

die größte Sicherheit bieten.

4.2 HYDRAULISCHE WIRKSAMKEIT

Die künstlichen Filterbaustoffe zeichnen sich durch eine große Flächenporosität aus; diese wiederum garantiert bei nicht zu kleinen Poren- bzw. Maschenöffnungen eine im Vergleich zum anstehenden Material ausreichende Durchlässigkeit zumindest in zur Filterebene senkrechter Richtung. Beobachtete I_0 -Gefälle (RAGUTZKI [11]) sind vermutlich auf die starke Benetzbarkeit verschiedener Materialien zurückzuführen. All diese Beobachtungen beziehen sich jedoch allein auf den Filterbaustoff.

Aufgrund seiner Flächenhaftigkeit sollte der künstliche Filterbaustoff nie allein betrachtet werden, sondern nur im Verbund mit dem angrenzenden Erdstoff. Bei Gewährleistung der mechanischen Filterfestigkeit ist die zulässige Maschenweite bzw. Porenöffnung kleiner als ein Großteil der abzufilternden Bodenpartikel, so daß in der Grenzschicht Boden-Filter "negative Siebeffekte" auftreten können. Die Bodenpartikel blockieren dabei die Öffnungen des künstlichen Filters und vermindern seine ursprüngliche Durchlässigkeit. Bei in sich nicht filterfesten (suffosiven) Erdstoffen hohen Feinteilgehaltes oder bei Sickerwässern mit Schwebstoffbeladung ist an zu fein bemessenen Filtern der Effekt der "Filterkuchenbildung" mit einhergehender Durchlässigkeitsverminderung zu beobachten. Eine Durchlässigkeitsverminderung kann auch die Folge von Luftzutritt und dadurch ausgelöster chemischer oder biologischer Prozesse sein. Auf zusätzliche Effekte aus der Kompressibilität künstlicher Filterbaustoffe wie auch auf die Dränagewirkung in Filterebene soll hier nicht eingegangen werden.

5. FILTERDICKE UND FILTRATIONS-LÄNGE

Alle in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Filterkriterien betreffen eine zur

Strömungsrichtung senkrechte, mehr oder minder repräsentative Filterebene, im folgenden als "Filterquerschnitt" bezeichnet. Mit Ausnahme der meist einlagigen Gewebe und Spinnvliese besitzen Nadelvliese einen mehrlagigen Aufbau, natürliche Filter im allgemeinen eine ausgeprägte räumliche Struktur, d.h. sie bestehen aus mehreren Filterquerschnitten (Filterdicke).

Bei den natürlichen Filterbaustoffen ist diese Filterdicke in erster Linie konstruktiv bedingt:

- die Herstellung eines homogenen Filters erfordert ein Vielfaches des Filterkorn-durchmessers; so ermittelte Filterdicken liegen jedoch noch unter den baubetrieblich erforderlichen Mindestmaßen.
- in Bauwerken mit größeren Setzungen und Verformungen (z.B. Dämme) muß der Filter auch nach diesen Ereignissen noch seine Funktion erfüllen (ausreichende Filterdicke)
- die Filterdicke als Ergebnis der Bemessung des Filters als Drän (Beispiel Sohl-drän).

Die Filterdicke und damit die räumliche Ausbildung eines Filters bewirken, daß neben einer Porenweitenverteilung über den Filterquerschnitt auch eine solche über die Filterdicke existiert. Wie man mit Wahrscheinlichkeitstheoretisch-geometrischen Betrachtungen zeigen kann (SILVEIRA [6], SAKTHIVADIVEL [13]), bewirkt dies eine zusätzliche Sicherheit.

Unter der Voraussetzung der Ausbildung von Porenkanälen bedeutet diese Sicherheit, daß eine im "ersten Querschnitt" zu große Porenöffnung über die Filterdicke einmal so klein wird, daß sie die mechanische Filterfestigkeit gewährleistet (Filtrationslänge). Bei geringfügig zu groben Filtermaterialien können auch diese mit zunehmender Filterdicke ihre Funktion erfüllen, da es infolge von

Brückenbildungs- und Sperreffekten zu einer Blockierung des Filters kommen kann. Die Beständigkeit dieser Effekte ist bei dynamischen Belastungen nicht gegeben (DAVIDENKOFF [2], WITTMANN [14] [15], ZIEMS[7]).

Das allmähliche Ausfiltern in Strömungsrichtung führt zur Ausbildung einer Übergangszone mit im allgemeinen ausreichender Durchlässigkeit. Diese Übergangszone ist für den hydraulischen Kraftangriff günstig zu beurteilen, da sie das Auftreten unzulässig hoher Gradienten verhindert.

Bei den künstlichen Filterbaustoffen ist die Filtrationslänge nicht oder nur in begrenztem Umfang vorhanden. Die Anforderungen an einen künstlichen Filter sind somit strenger zu stellen, d.h. die mechanische Filterfestigkeit muß in einem Filterquerschnitt erfüllt werden. Daß dies bei einlagigen künstlichen Filtern kaum möglich ist, wurde in 4. diskutiert. Die Nadelvliese versuchen mit ihrer Labyrinthstruktur der Forderung nach Filtrationslänge gerecht zu werden. Die Filtrationslänge sollte jedoch immer in Abhängigkeit vom Korndurchmesser des zu schützenden Bodens beurteilt werden und ein Vielfaches dieses Korndurchmessers betragen. Dabei ist die Kompressibilität insbesondere dickerer Matten zu berücksichtigen.

Bei der Wirksamkeit eines Filters wird oft der "umgekehrte Filter" zitiert (s. Abb. 2). Nur bei gut gestuften Erdstoffen und bei zulässigem begrenztem Bodenzug (Material-eintrag in Filter) kann es zur Ausbildung eines umgekehrten Filters vor dem eingebauten Filter kommen. Gelegentlich ist dessen Aufbau nur bei kurzzeitigen dynamischen Kraftwirkungen und bei Bodenumlagerung am Ort möglich. In dieser Form wird das Verfahren des "Schockentsandens" zur Leistungserhöhung von Brunnen angewandt.

Die Schutzfunktion des umgekehrten Filters ist auf künstliche Filterbaustoffe nur mit Vorsicht übertragbar. Das Durchlassen gewis-

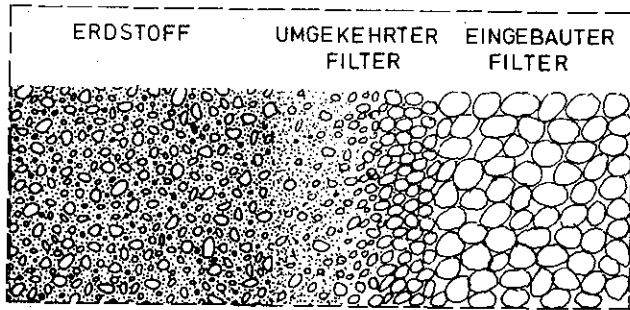


Abb. 2: Umgekehrter Filter

ser Fraktionen durch den dünnwandigen Filter zur Förderung des Aufbaues des umgekehrten Filters erfolgt hierbei unkontrolliert und eine Einlagerung (Kolmatation) im nachfolgenden meist größeren Erdstoff verbessert nicht die hydraulischen Randbedingungen. Auch nur geringfügig lokale Inhomogenitäten und Anisotropien abzufilternder Erdstoffe (z.B. Alluvionen an Rhein, Donau, Rhône usw.) begünstigen dann den Vorgang der rückschreitenden Suffosion und Erosion.

Daß es bei nur geringem Materialaustrag gar nicht zur Ausbildung eines umgekehrten Filters kommen kann, ließe sich anhand einer Massenbilanz zeigen.

Das Hauptproblem künstlicher Filterbaustoffe, die Anpassung des flächenhaften Filters an die räumliche Struktur des Erdstoffes unter Vermeidung hydraulischer Unwirksamkeit und unter Gewährleistung ausreichender Sicherheit (Kompensation der Filtrationslänge) bedarf der weiteren Klärung in grundlegenden Versuchen. Hat ein Filter nur die Schutzfunktion zu erfüllen (z.B. Selbstdichtung in Dämmen), so sind künstliche Filterbaustoffe bereits eine echte Alternative. Der Einfluß der Parameter Beständigkeit des Materials, Spannungs-Verformungsverhalten und Kompressibilität wurde hier nicht näher berücksichtigt, sollte aber bei der Filterbemessung immer berücksichtigt werden.

6. LITERATUR

[1] TERZAGHI K., PECK R.B.: Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Berlin, Göttingen, Heidelberg, Springer-Verlag 1961

- [2] DAVIDENKOFF R.: Anwendung von Bodenfiltern im Wasserbau. Bundesanstalt für Wasserbau Nr.35, Karlsruhe Oktober 1973
- [3] CORPS OF ENGINEERS: Soil Mech. Design Seepage control. Eng. Man. f. Civ. Works Constr. Washington, USA, Dep. of the Army, Corps of Engineers, Februar 1952
- [4] SICHARDT W.: Kies- u. Sandfilter im Grund- u. Wasserbau. Die Bautechnik 29, 1952, H.3
- [6] SILVEIRA A.: An Analysis of the Problem of Washing Through in Protective Filters Proc. of the 6th Int. Conf. o. Soil Mech. a. Found. Eng., Montreal 1965
- [7] ZIEMS J.: Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe. Diss. Techn. Universität Dresden 1968
- [8] BEYER W.: Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen u. Sand aus der Kornverteilungskurve. WWT 14. Jahrg. (1964) Heft 6
- [9] ZITSCHER F.F.: Empfehlungen für die Anwendung von Kunststoffen im Erd- u. Wasserbau. Die Bautechnik 52, 1975, 12
- [10] LIST: Instationär belastete Kunststoff-Filter. Bundesanst. f. Wasserbau Nr. 35, Karlsruhe 1973
- [11] RAGUTZKI G.: Einige Versuchsergebnisse über Filtereigenschaften von Kunststoffgeweben u. deren Verwendung im Lahnungs- bau. Forschungsst. f. Insel- u. Küstenschutz, Norderney Jahresb., Bd. 21 1969
- [12] MEYER H.: Der Einbau durchlässiger Böschungsbefestigungen in Schiffahrtskanälen unter Wasser bei laufendem Verkehr. Zeitschr. f. Binnenschiffahrt u. Wasserstraßen Nr. 4/72
- [13] SAKTHIVADIVEL R., THANIKACHALAM V.: Design of Filter Thickness Based on the Application of Queuing Theory. J. of Hydr. Research 13 (1975) No. 2
- [14] WITTMANN L.: Die Stabilität hydrodyn. beanspruchter Böden. DFG-Forschungsb., Inst. f. Boden- u. Felsm., Univers. Karlsruhe 1975
- [15] WITTMANN L.: Die Suffosionsstabilität von Sand-Kies-Gemischen. Beitr. z. 5. Donau-Europ. Konf. Bratislava/CSSR Sept. 1977