VASO dammkommittés rapport nr 14

Utrednings- och utvecklingsprojekt med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

GEOMEKANISKA FILTER OCH EROSION I TÄTKÄRNANS KRÖN





Vattenregleringsföretagens Samarbetsorgan

VASO dammkommittés rapport nr 14

Utrednings- och utvecklingsprojekt med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

GEOMEKANISKA FILTER OCH EROSION I TÄTKÄRNANS KRÖN

Anders Wörman, Uppsala Universitet Olivier Blanc, Chalmers Tekniska Högskola

Omslagsfoto: Bengt Johansson, Vattenfall Grafisk form: Fras&Form Tryck: Spånga Tryckeri AB 1995 ISSN 1400-7827 INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖROF	RD	i
SAMM	ANFATTNING	iì
SUMM	ARY	iii
1.	INTRODUKTION	1
2. 2.1. 2.1.1.	ÖVERSIKT AV FILTERKRITERIER Olika typer av filterproblem Geometriska kriterier för ensgraderat friktionsmaterial	3 3
2.1.1.1. 2.1.1.2. 2.1.1.3.	och kohesiva jordar Geometriska filterförsök Strömning vinkelrät mot en horisontell filteryta Strömning parallellt med en horisontell filteryta	3 3 4 6
2.1.2.	Hydrauliska kriterier för ensgraderat friktionsmaterial Hydrauliska filterförsök Strömping vinkelröt met en herioentell filten te	7
2.1.2.2. 2.1.2.3. 2.2.	Strömning vinkellat mot en norisontell filteryta Strömning parallellt med en horisontell filteryta Inverkan av gradering på inträngningsdjupet av basmaterial	9 10
2.3.	i filtret och total förlust av basmaterial Inre stabilitet av graderade basmaterial	10 13
3		
0.	SAKENNEISFAKIUNEK	15
 4. 4.1. 4.2. 4.2.3. 4.2.3.1. 4.2.3.2. 4.3. 4.4. 	EN STUDIE AV FILTRERING I VÄL GRADERADE BAS- MATERIAL MED STRÖMNING PARALLELLT MED FILTERYTAN Syfte med undersökningen Experiment Experimentell utrustning Försöksmaterial Försökets uppläggning Experimentförberedelser Försöksförfarande Teoretisk metodik och utvärdering Diskussion	15 17 17 17 17 19 20 20 20 20 20 28
4. 4.2.1. 4.2.2. 4.2.3. 4.2.3.1. 4.2.3.2. 4.2.3.2. 4.3. 4.4. 5.	EN STUDIE AV FILTRERING I VÄL GRADERADE BAS- MATERIAL MED STRÖMNING PARALLELLT MED FILTERYTAN Syfte med undersökningen Experiment Experimentell utrustning Försöksmaterial Försökets uppläggning Experimentförberedelser Försöksförfarande Teoretisk metodik och utvärdering Diskussion	15 17 17 17 19 20 20 20 20 20 28 31
4. 4.2.1. 4.2.2. 4.2.3. 4.2.3. 4.2.3.1. 4.2.3.2. 4.3. 4.4. 5. 6. 6.1. 6.2.	EN STUDIE AV FILTRERING I VÄL GRADERADE BAS- MATERIAL MED STRÖMNING PARALLELLT MED FILTERYTAN Syfte med undersökningen Experiment Experimentell utrustning Försöksmaterial Försökets uppläggning Experimentförberedelser Försöksförfarande Teoretisk metodik och utvärdering Diskussion FRAMTIDA UNDERSÖKNINGAR SLUTSATSER Litteraturöversikt Studie av filtrering i välgraderade basmaterial med	15 17 17 17 17 19 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 31 33 33
4. 4.2.1. 4.2.2. 4.2.3. 4.2.3. 4.2.3.1. 4.2.3.2. 4.3. 4.4. 5. 6. 6.1. 6.2.	EN STUDIE AV FILTRERING I VÄL GRADERADE BAS- MATERIAL MED STRÖMNING PARALLELLT MED FILTERYTAN Syfte med undersökningen Experiment Experimentell utrustning Försöksmaterial Försökets uppläggning Experimentförberedelser Försöksförfarande Teoretisk metodik och utvärdering Diskussion FRAMTIDA UNDERSÖKNINGAR SLUTSATSER Litteraturöversikt Studie av filtrering i välgraderade basmaterial med strömning parallellt med filterytan	15 17 17 17 17 19 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20

FÖRORD

Vattenkraftutbyggnaden och därmed byggande av stora dammar startade i stor skala i Sverige efter andra världskriget och var mest omfattande under 50- och 60-talen.

Principerna för utformning och konstruktion av dammanläggningarna under denna intensiva utbyggnadsperiod äger i huvudsak sin giltighet fortfarande.

Vad avser krav på utskovens avbördningsförmåga har dessa föreslagits av dammägarna och (efter eventuella justeringar) fastställts av vattendomstol med SMHI som sakkunnig. Kriterierna i detta avseende kan därför sägas ha etablerats gemensamt av dammägarna och SMHI.

Under 1980-talet ifrågasattes i Sverige, såsom tidigare skett i många andra länder, de etablerade principerna för utskovsdimensionering. Flödeskommittén, som tillsattes av kraftindustrin och SMHI för att utreda flödesriskerna, föreslog i sin slutrapport ett nytt sätt att beräkna dimensionerande tillrinning. Kriterierna innebär att dammar med allvarliga brottkonsekvenser skall kunna klara ett påtagligt högre tillflöde än vad man tidigare räknat med.

För att på ett säkert och kostnadseffektivt sätt kunna anpassa dammbeståndet till de nya kraven har ett stort antal utredningar och utvecklingsprojekt genomförts. Dessa projekt har genomförts på uppdrag av VASO dammkommitté, som är kraftindustrins gemensamma organ i dammsäkerhetsfrågor och bland annat har till uppgift att samordna dammarnas anpassning till de nya riktlinjerna. Den styrgrupp som lett arbetet har bestått av Harald Eriksson – Sydkraft, som varit ordförande, Sten Lasu – Svenska Kraftverksföreningen, Lennart Markland – Vattenregleringsföretagen samt Malte Cederström och Urban Norstedt – Vattenfall.

För varje projekt finns en rapport och därtill finns en sammanfattande rapport över hela arbetet, huvudrapporten (nr 1), vilken även innehåller en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Föreliggande projekt har genomförts av Anders Wörman, Vattenfall Utveckling AB och Uppsala Universitet i samråd med Urban Norstedt, som varit ombud för beställaren. Projektet hade som sin inledande inriktning att beskriva riskerna för erosion av krönet på tätkärnan om vattnet skulle komma att stiga så högt mot en fyllningsdamm att filtret över tätkärnan genomströmmas.

Projektet vidgades därutöver till en mer generell översikt, analys och granskning av etablerade kriterier för säker filterfunktion när det gäller bredgraderade basmaterial, såsom t ex morän, för strömning parallellt med och även vinkelrätt mot kontaktytan mellan basmaterial och filter.

En slutsats som kan dras är att filter kan fungera även om filterkriterierna inte är helt uppfyllda, men att det inte går att bortse ifrån att på längre sikt sker materialtransport.

VASO dammkommitté

SAMMANFATTNING

Rapporten sammanfattar vissa valda teoretiska och experimentella undersökningar inom vetenskapsområdet granulära filter och geomekaniska filterprocesser. Syftet har varit att särskilja och föreslå lämpliga dimensioneringsformler för olika typer av filterproblem med hänsyn till graden av stabilitet, typ av hydraulisk belastning, gradering, filtertjocklek och inverkan av kohesion. Härvidlag särskiljs på strömning parallellt och vinkelrät mot kontaktytan mellan filter samt basmaterial (det eroderbara materialet), kohesiva jordar och friktionsmaterial, horisontella och vertikala filterytor, samt geometriska och hydrauliska filterkriterier.

Ett geometriskt filterkriterium säkerställer att basmaterialet efter en initial, liten volymförlust är stabilt oavsett storleken av den hydrauliska belastningen som ansätts över den utvecklade filterkakan. Sherard (1984a) fann att likheten $D_{15}/d_{85} = 9$ motsvarar det geometriska filterkriteriet om flödet är vinkelrät mot filterytan. För kohesiva basmaterial kan det kritiska kornstorlekesförhållandet vara så högt som 60. Om flödet är parallellt med filterytan, så hindras inte erosion i samma utsträckning av mekaniskt tilltäppning, vilket leder till kornstorlekesförhållandet för friktionsmaterial är någonstans i intervallet 6 till 8 när både ytan och strömningen är horisontella.

Av ekonomiska eller praktiska skäl kan hydraulisk filterdimensionering tillämpas genom att inte helt uppfylla de geometriska filterkraven och som en kompensation för denna förenkling anpassa materialvalen till den dimensionerande hydrauliska belastningen. Eftersom basmaterialet utsätts för en liten men fortskridande erosion vid ett sådant konstruktionsutförande bör effekten av denna ses i relation till konstruktionens förväntade livslängd. Successiv filterbildning av månggraderade basmaterial leder dock, i olika hög grad, till en avtagande erosion med tiden vilket är en väsentlig faktor för det hydrauliska filtrets funktionsduglighet. Den föreliggande studien omfattar därför laboratorieexperiment av filterbildning av månggraderade basmaterial med strömning parallellt med en horisontell filteryta. Detta filterproblem är aktuellt till exempel vid strömning över tätkärnan eller ovanpåliggande sandfilter i en fyllningsdamm samt för erosionsskydd av kanalbottnar.

Med utgångspunkt från en känd kornfördelningskurva för basmaterialet kan ytan av basmaterialet som exponeras för strömmande vatten och är tillgänglig för erosion beskrivas som en funktion av filterbildningen och indirekt till erosionsdjupet i basmaterialet. Den tillgängliga ytan avtar med fortskridande erosion och därigenom fortskridande filterbildning. I utvärderingen söktes sambandet statistiskt (multipel linjär regression) mellan en dimensionslös parameter som beskriver transportintensiteten av basmaterialet, den tillgängliga ytan och ytterligare en dimensionslös parameter som beskriver den hydrauliska belastningen. De båda dimensionslösa parametrarna har härletts ur fysikaliska betraktelser. Transportsambandet har verifierats av de experimentella resultaten inom intervallen $1,11 < d_{100}/d_{85} < 4,43$; $0 < \xi /d_{85} < 30;$ 0 < J < 40och $d_{85}/D_{15}=0,084.$ Transportsambandet kan användas för att kvantifiera erosionsprocessen på en tätkärnas överyta som överströmmas av vatten som demonstrerades av Wörman & Skoglund (1992).

SUMMARY

The present report contains a selected review of theoretical and experimental investigations in the field of granular or geo-mechanical filters and filtration phenomena. Part of the purpose has been to distinguish between and provide appropriate design criteria for different types of filter situations with regard to degree of stability, type of hydraulic load, gradation and effects of cohesion. Consequently, a distinction is made between flow parallel and normal to the contact surface between the base (the erodible soil) and filter material, cohesive and friction material, horizontal and vertical filter surfaces and geometrical and hydraulic filter criteria.

A geometrical filter criterion assures that the base material is stable after an initial, small amount of volume loss irrespective of the hydraulic load applied on the filter cake. Sherard (1984a) found that the equality $D_{15}/d_{85} = 9$ corresponds to the geometrical filter criterion if the flow is perpendicular to the base/filter interface. For cohesive base soils, the critical grain size ratio can be as high as 60. On the other hand, if the flow is parallel to the base/filter interface, erosion is not prevented to the same extent by mechanical clogging. Hence, for friction materials the grain size ratio appears to be somewhere in the range of 6 to 8.

For economical or practical reasons, hydraulic filter design may be utilized. This method implies that the geometrical filter criterion is not satisfied and, as compensation for this simplification, the choice of base and filter material is related to the design hydraulic load. Since the base material in such a case is subjected to a small but finite erosion rate, the destabilising effect should be considered in the whole life span of the structure. However, successive clogging of transported base grains, in variable degree, leads to a decay in erosion with time which is a significant factor to the capability of the hydraulic filter. In accordance, the current investigation includes laboratory experiments on filter development of widely graded base soils with flow parallel to a horizontal interface. This problem is concurrent with the erosion process induced by flow over the moraine core in a rockfill dam and erosion in canal bottoms provided with hydraulic filter material.

On the basis of a known grain size distribution curve for the base soil, the surface area of the base soil that is exposed to flow and available to erosion can be described as a function of the filter development and indirectly to the erosion depth in the base soil. The available area declines with continuing erosion and thereby with continuing filter development. In the evaluation of the experimental results, the statistical relationship between a dimensionless parameter representing the transport rate, the available area and another dimensionless parameter representing the hydraulic load was determined from multiple linear regression. Both dimensionless parameters were derived from physical principles. The transport relationship is verified by the experimental results within the ranges $1.11 < d_{100}/d_{85} < 4.43$, $0 < \xi/d_{85} < 30$, 0 < J < 40 and $d_{85}/D_{15} = 0.084$. The proposed relationship can be used to describe the erosion process induced by water over-topping the core in an earth fill dam as was done by Wörman & Skoglund (1992).

1. INTRODUKTION

Många vattenbyggnadstekniska konstruktioner, såsom jordfyllningsdammar, erosionsskydd och vågbrytare är byggda av krossmaterial från bergarbeten eller moränavlagringar. Eftersom konstruktionen är permeabel finns förutsättningar att grundvatten strömmar genom jorden, vilket måste tas i beaktande både under bygg- och driftskedet. Kunskap om inre erosion i samband med läckage eller andra defekter i funktionen är grundläggande för att säkerställa dammens stabilitet. Särskilt med tanke på att dimensionerande flöden för jordfyllningsdammar har höjts dramatiskt på senare tid (af Klintberg et al, 1990) är det aktuellt att förbättra förståelsen för inre erosion och geomekaniska filterprocesser. En möjlighet har diskuterats att temporärt tillåta överströmning av dammens centrala moräntätkärna vid extrema flöden. Eftersom överströmning av tätkärna kan leda till erosion på tätkärnans överyta eller på det överliggande sandfiltret, bör erosionsprocessen och filtrets beskaffenhet beaktas vid utfärdandet av driftförfarandet för vattenmagasinet/kraftstationen.

Den här rapporten sammanfattar vissa valda teoretiska och experimentella undersökningar inom vetenskapsområdet granulära filter och geomekaniska filterprocesser. Syftet har varit att särskilja och föreslå lämpliga dimensioneringsformler för olika typer av filterproblem med hänsyn till graden av stabilitet, typ av hydraulisk belastning, gradering och inverkan av kohesion. För att få en mer fullständig teoretisk bakgrund om filtrering hänvisas läsaren till orginalreferenserna.

Eftersom jordfyllningsdammar i allmänhet byggs av välsorterade material med avseende på kornstorlek så är förekommande erosion selektiv på så sätt att de större kornen har högre tendens att stanna kvar än de mindre kornen. Selektiviteten beror delvis på att de större kornen är tyngre, men kanske framför allt på att dessa korn har en högre benägenhet att fastna i porkanalerna i filtret. Ett eroderat och transporterat korn fastnar i kornskelettet om dess effektiva storlek är större än porkanalernas minsta storlek (Kenney et al, 1985, Witt, 1986, Lafleur. 1989). Om ett av de större kornen fastnar så ökar sannolikhet för att också mindre korn fastnar i den förträngning som det större kornet orsakat. En tillräcklig stor massaförlust av det eroderade materialet, basmaterialet, medför då att en filterkaka utbildas med tiden. För att basmaterialet slutligen skall vara stabilt så krävs, bland andra enligt Åberg (1993), att endast de största kornstorleksfraktionerna av basmaterialet kvarhålls i filterkakan initialt. Den totala förlusten av basmaterial beror på dess gradering och storleken på den hydrauliska belastningen.

Eftersom geometriska filterkriterier ofta är svåra att uppfylla/åstadkomma i praktiken, både den mellan tätkärna och sandfilter och mellan sandfiltret och bergfyllningen, så kan det vara nödvändigt att ta hänsyn till dynamiken i filtreringsprocessen vid dimensionering. Detta öppnar även vägen för en mindre konservativ dimensionering jämfört med konventionella geometriska filterkriterier som t ex det av Sherard (1984a). Eftersom filtersamband som gäller för väl sorterade basmaterial med strömning parallellt med filterytan inte finns att tillgå i litteraturen, var ett syfte med den föreliggande undersökningen att genomföra laboratorieförsök för detta fall. Resultaten kan utvärderas med de teoretiska ansatser som föreslogs av Wörman & Skoglund (1992).

2. ÖVERSIKT AV FILTERKRITERIER

2.1. Olika typer av filterproblem

2.1.1. Geometriska kriterier för ensgraderat friktionsmaterial och kohesiva jordar

2.1.1.1. Geometriska filterförsök

Granulära filter krävs ofta i stratifierade sten- och jordfyllningskonstruktioner och har uppgiften att hindra material från att vandra in i porkanalerna på en angränsande zon med markant större kornstorlek. Filter används i stenfyllningsdammar, erosionsskydd längs kuster och kanaler, i erosionskydd mot lokal erosion etc. Den hydrauliska transportkapaciteten och sättet med vilket den hydrauliska belastningen är ansatt varierar signifikant för olika fall; från vågpåverkan på kuster, stationär strömning vinkelrät mot filterytor i stenfyllningsdammar och stationär eller icke stationär strömning parallell mot filterytan i kanaler. Dessa variationer i den hydrauliska belastningen medför, med hänsyn till involverade krafter eller moment, att olika dimensioneringskriterier bör användas för olika belastningsfall (de Graauwe, et al, 1983, Brauns, 1991). Trots detta har, ända sedan Therzagis utredningar från 30-talet, en allmän uppfattning varit att dimensionera filter för de mest extrema situationer: även när den hydrauliska belastningen är stor (mycket större än förväntade verkliga förhållanden) accepteras endast en mindre materialförlust för att filtret skall betraktas vara funktionsdugligt. I laboratorieexperiment undersöks denna



Figur. 1. Vanlig utrustning för filterförsök (figur efter Sherard et al, 1984).

situation genom att placera ett finare jordmaterial (basmaterial) ovanpå ett grövre sand- eller gruslager (filtret) i ett cylindriskt rum med en horisontell kontaktyta mellan de två materialskikten. Ett vertikalt vattenflöde ordnas genom att ansätta höga hydrauliska gradienter och ibland är det experimentella rummet också utsatt för kraftig vibrering som orsakar extrema accelerationer av kornen (dvs indirekta krafter). Sherard et al (1984a) använde ett tryck motsvarande 40 meters vattenpelare vilket gav en hydraulisk gradient genom filtersektionen på i storleksordningen 1 000. Denna försöksprocedur innebär en tämligen konservativ dimensionering i de flesta praktiska fall. Den experimentella uppställningen enligt Sherard et al visas i figur 1. Resultaten från liknande undersökningar redovisas dock i termer av det kornstorleksförhållande mellan filter- och basmaterial som precis definierar stabila förhållanden, dvs ett kritiskt tal och ett geometriskt filterkriterium.

2.1.1.2. Strömning vinkelrät mot en horisontell filteryta

I undersökningarna av Sherard et al (1984a) med ensgraderat basmaterial av friktionstyp (t ex sand), betraktades filtret som funktionsdugligt så länge endast obetydliga mängder av basmaterialet kom att transporteras helt genom filtret och klart vatten därefter läckte ut genom filtret. Resultaten indikerade att det fanns ett smalt område mellan misslyckade och lyckosamma filter, väl definierat av:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} = 9$$
 (ekv. 1)

 D_{15} är där den kvadratiska siktstorlek som släpper igenom 15% av filtermaterialet och d85 är den siktstorlek som släpper igenom 85% av basmaterialet (figur 2). Anledningen till att använda 15% fraktilen är att mindre kornstorleksfraktioner övervägande styr storleken på



Figur 2. Samband mellan D_{15} och d_{85} i filterförsöken av Sherard et al. (1984). (Figur efter Sherard et al. (1984))

porkanalerna. Anledningen till att använda 85%-fraktilen är att detta garanterar (i allmänhet) stabilitet av basmaterialet genom att även de finare fraktionerna hindras från att migrera (C.F. Wittman, 1981). Det finns även en del andra förslag på val av kornstorleksfraktil (Ziems, 1968, de Graauwe 1983), men baserat på argument från Sherard et al (1984) så förefaller kvoten D_{15}/d_{85} vara mest allmängiltigt (se även kapitel 2.3).

Man kan observera att kornstorleksförhållandet givet av (ekv. 1) är mycket större än det värde som ursprungligen föreslogs av Therzaghi (1929): $D_{15}/d_{85} = 4$. Brauns (1991) sammanställer 11 olika studier där kornstorleksförhållandet varierar mellan 4 och 12, beroende på definitionen av tillståndet för "obetydande transport", den exakta graderingen av materialet och speciellt det faktum att en säkerhetsfaktor är inkluderad i de lägre värdena i intervallet. Ekv. (1) inkluderar ingen säkerhetsfaktor.

För kohesiva material, är filterstabiliteten inte bara bestämd av de geometriska faktorerna, utan beror också på sedimentets elektrokemiska egenskaper, såsom dispersivitet, kohesion och speciellt de reologiska egenskaperna. Genom att behålla kornstorleksförhållandet som en av de primära parametrarna i representationen av filterprocessen så berättigas användandet av termen "geometriskt filterkriterium" också för kohesiva basmaterial.

I en andra och tredje experimentserie av Sherard et al (1984b) undersöktes de geometriska filterkriterierna för naturliga silt- och lerjordar i s k "slot and slurry tests". I slurry-försöken tillsattes vatten till basmaterialet tills att det fick en viskositet liknande den som motorolja har, varpå slurryn placerades ovanför filtret i en experimentell apparat liknande den i figur 1. Genom detta förfarande säkerställdes att silten och leran blev sammanhängande (kohesiva) faser vars rörelseegenskaper dominerades av kohesion (ej kornstorlek). Ett filter bedömdes som lyckat när flödeshastigheten snabbt minskade och stabiliserades med ett litet



Figur 3. Det kritiska kornstorleksförhållandet som funktion av kornstorleken (mm) av ett kohesivt basmaterial (bearbetning av resultat av Sherard et al, 1984).

konstant flöde av klart vatten. För en lång rad av filtergraderingar fann man att det kritiska kornstorleksförhållandet varierade inom intervallet:

$$19 < \frac{D_{15}}{d_{85}} < 56$$
 (ekv. 2)

Enligt Sherard, finns inget tydligt samband mellan jordmaterialets plasticitet mätt som Atterbergs gräns och filterkriteriet enligt (ekv. 2). Figur 3 visar hur det kritiska värdet på D_{15}/d_{85} beror av basmaterialet kornstorlek. Ett sådant beroende har rapporterats av Vaughan och Soares (1982) och Witt (1986). I motsats till detta geometriska sätt att se på filtrering av kohesiva basmaterial, föreslog Wolski et al (1970) en teoretisk modell som baserades på de reologiska egenskaperna hos basmaterialet, vilket inkluderar plasticiteten som en variabel.

l slot-försöken som utfördes av Sherard et al, (1984b) och Sherard och Dunnigan (1988), preparerades basmaterialet med en spricka längs vilken erosionen initierades. Sammanhängande aggregat av basmaterial eroderade från sprickväggarna men föll troligen sönder under transporten i sprickan innan materialet nådde fram till den nedströms belägna filterytan. Under dessa villkor reduceras de kohesiva effekterna på basmaterialet och de geometriska kriterierna stämmer bättre med (ekv. 1) än (ekv. 2).



Figur 4. Försöksutrustning för undersökning av filterstabilitet med strömning parallellt med kontaktytan mellan bas- och filtermaterialen. (figur efter de Graauwe et al, 1983.)

2.1.1.3. Strömning parallellt med en horisontell filteryta.

Ett annat filterfall uppkommer om vatten flödar parallellt mot kontaktytan mellan bas- och filtermaterialen. Figur 4 visar en försöksutrustning som används för att fastställa filterregler med syfte att förebygga eller begränsa erosion genererad av strömning som är parallell med

en horisontal gränsyta. Generellt i studier av detta filtreringsfenomenen så ansätts väsentligt lägre hydrauliska belastningar än vad som tillämpats tidigare.

Efter bästa kännedom så har den maximala hydrauliska gradienten varit ungefär 0,6 i den här typen av försök (de Graauwe, 1983, Brauns, 1985). Eftersom tyngdkraften verkar stabiliserande på basmaterialet i det här fallet så har undersökningarna fokuserats på sambandet mellan den hydrauliska lasten och det geometriska filterkriteriet (se kapitel 2.2). Undersökningarna av Bezuijen et al (1987), de Graauwe et al (1983) och Wörman och Olofsdottir (1982), som dessutom har begränsats till ensgraderade och icke-kohesiva basmaterial, indikerar att om den hydrauliska gradienten längs kontaktytan blir tillräckligt stor så är det geometriska filterkriteriet nära den i (ekv.1).

Det geometriska filterkriteriet påverkas således endast i lite grad av om flödet är parallellt eller vinkelrät mot kontaktytan. Baserad på dessa studier och den något annorlunda studien av Wörman (1989), kan man dra slutsatsen att ett geometriskt filterkriterium för erosion mellan två ytor i ensgraderade ickekohesiva material uppnås någonstans inom intervallet:

$$6 < \frac{D_{15}}{d_{85}} < 8$$
 (ekv. 3)

Om (ekv. 3) jämförs med (ekv. 1) kan slutsatsen dras att erosion orsakad av flöde parallellt med filterytan inte motverkas i samma grad av en mekanisk filtrering som då flödet är vinkelrät mot kontaktytan. Dock är skillnaderna små.

Efter bästa kännedom så finns inga undersökningar gjorda på filtrering av kohesiva basmaterial med ett vattenflöde parallellt mot gränsytan. Emellertid så är ett rimligt antagande att förhållandet mellan (ekv. 1) och (ekv. 3) kan utnyttjas i generalisering av (ekv. 2) för det specifika fallet. Härigenom kan man dra slutsatsen att det geometriska filterkriteriet för kohesiva material utsatta för vattenflöde parallellt med gränsytan definieras av ett något lägre värde på kornstorleksförhållandet D_{15}/d_{85} än vad som anges av (ekv. 2).

2.1.2. Hydrauliska kriterier för ensgraderat friktionsmaterial.

2.1.2.1. Hydrauliska filterförsök

Som påpekats är det geometriska filterkriteriet relativt konservativt för de flesta tillämpningar. I normala ingenjörstillämpningar är den hydrauliska gradienten i en stenfyllningskonstruktion inte ens i närheten av 1 000 och på många platser på jorden, så är vibrationer relaterade till jordskorpans rörelser försumbara. För en icke trycksatt (öppen strömning) grundvattenakvifer, kan den hydrauliska gradienten maximalt vara 1,0 (fritt fall). Dessa förhållanden har lett till en förståelse under de sista två årtiondena att lasten skall inkluderas som en variabel i analysen och dimensioneringsförfarandet. Därför har man utfört undersökningar på förhållandet mellan (D_{15}/d_{85})_c och den hydrauliska gradienten, J, riktad antingen vinkelrät eller parallellt mot filterytan. Den försöksuppställning som brukar användas är densamma som i figurerna 1 och 4.

Eftersom de hydrauliska filterkriterierna endast är giltiga för basmaterial som är geometriskt instabila och framför allt hålls på plats på grund av tyngdkraften, är ett speciellt problem att definiera begynnande erosion, kritiska villkor. Det mest använda tillvägagångssättet att definiera begynnande erosion är att erkänna att det finns ett så kallad tröskeltillstånd mellan en fullständig stabil yta och en instabil yta. (Ziems, 1968, de Graauwe et al, 1983, Brauns, 1985). Undersökningar av sedimenttransporter i floder visar emellertid att de statistiska fördelningarna av sedimentets och turbulensens egenskaper medför att en fullständig stabil yta inte kan existera så länge som vatten strömmar (Lavelle och Mofjeld, 1987, Wilcock, 1988). Åtminstone har ett stabilt tillstånd inte kunnat registreras för finkorniga material i laboratorieförsök som utförts under lång tid. Följaktligen, i det andra sättet att definiera kritiska villkor, som ofta används ingenjörstillämpningar (Taylor och Vanoi, 1972, Parker, 1990), så introduceras en mobilitetsparameter för att definiera graden av stabilitet/mobilitet (Wörman och Olafsdottir, 1992). Mobilitetsparametern G*, är en dimensionslös parameter som representerar volymflödet av basmaterialet längs filterytans plan; G*=G/(V · d₈₅), där G är transportintensiteten av basmaterialet per breddenhet filteryta och V är medelvärdet på porvattenhastigheten. Betydelsen av denna parameter demonstreras av Neill och Yalin (1969). Härav kan filterkriteriet ges som en funktion, F:

$$\left(\frac{D_{15}}{d_{85}}\right)_{C} = F(J;G^*)$$
 (ekv. 4)

Tyvärr är mobilitetsgraden eller den exakta metod som exakt anger hur begynnande rörelse är definierad sällan beskriven eller tillämpad i hydrauliska filterundersökningar. Som ett exempel genomförde Wörman och Olofsdottir (1992) experiment liknande de av de Graauwe et al (1983) och Bezuijen et al (1987) (se figur 4) och fann att det tröskeltillstånd



Figur 5. Kritisk kornstorlekskvot som funktion av den hydrauliska gradienten och basmaterialets kornstorlek. Strömningen är vertikal mot en horisontell kontaktyta mellan bas- och filtermaterial. (Figur efter Ziems, 1968).

som användes av de sistnämnda författarna motsvarar en transportintensitet i storleksordningen av $1 \cdot 10^{-3}$ [g / s m]. Under en veckoperiod ger detta att cirka 500 gram material passerar genom en 1 meter bred sektion orienterad med sin långsida vinkelrät mot transportriktningen (baserad på ett fåtal antaganden). Även en sådan liten transport kan vara väsentlig att beakta under hela stenfyllningskonstruktionens livslängd. Under 50 år passerar över 1 ton av sediment (under antagande om oändligt lång gränsyta). Enligt Wörman och Olofsdottir innebär en sänkning av den kritiska hydrauliska gradienten med 50% att mindre än ett kilogram av sedimentet passerar sektionen under 50 år. Känsligheten i transportförhållandet för variationer i den hydrauliska gradienten är stor, vilket gör att transportförhållandet endast bör uppfattas kvalitativt.

Med hänvisning till det ovanstående resonemanget bör ett hydrauliskt filterkriterium (gällande ett geometriskt instabilt filter) formuleras med hänsyn till (ekv. 4) och inkludera en formell definition av begynnande erosion. Därför uppmanas den yrkesverksamme ingenjören att vara kritisk vid val bland de olika kriterierna för hydraulisk filterdimensionering som finns tillgängliga. En väsentlig fråga är om den totala volymen av basmaterial (som sammanhänger med definitionen av kritiska förhållanden) innebär en acceptabel risk.

2.1.2.2. Strömning vinkelrät mot en horisontell filteryta

Man kan skilja mellan två fall, antingen är basmaterialet lokaliserat ovanför filtermaterialet, som i figur 1, eller lokaliserat nedanför. Hydrauliska filterkriterier har enbart blivit



Figur 6. Kritisk hydraulisk gradient som funktion av kornstorlekskvot för strömning parallellt med en horisontell filteryta. (Figur efter Wörman och Olofsdottir, 1992).

experimentellt verifierad för det senare fallet, i vilket tyngdkraften inverkar stabiliserande och erosion är orsakad av fluidisering av basmaterialet. Figur 5 visar resultaten av Ziems (1968), hur $(D_{50}/d_{50})_c$ varierar med den hydrauliska gradienten samt basmaterialets kornstorlek.

Kritiska villkor baserades på en subjektiv uppskattning av ett tröskeltillstånd av begynnelse rörelse. Ur diagrammet ser man att det kritiska kornstorleksförhållandet varierar från stora tal till tal som förknippas med de geometriska filterkriterierna (ungefär 5) när den hydrauliska gradienten blir stor. Den undersökta basmaterialen var i huvudsak av friktionstyp. Liknande resultat har också rapporterats av de Graauwe et al (1983).

2.1.2.3. Strömning parallellt med en horisontell filteryta

Flera undersökningar har gjorts kring erosion längs gränsytan mellan ett underliggande basmaterial som är täckt av ett gruslager och där vatten flödar parallellt med kontaktytan (de Graauwe et al, 1983, Brauns 1985, Bezuijen, et al, 1987, Wörman och Olofsdottir, 1992). I samtliga studier består basmaterialet av en ensgraderad och icke-kohesiv sand, emedan olika kriterier har tillämpats för att definiera begynnande erosion. Ett stationärt flöde leds genom filtermaterialet/gruslagret under en tidsperiod från ett par timmar upp till flera dygn. Som ett resultat av flödet så eroderade basmaterialet och transporteras till en avsättningsbassäng på nedströmssidan av försöksmodellen där sanden kunde samlas upp och vägas. I figur 6 visas försöksresultaten av de Graauwe et al och Bezuijen et al tillsammans med resultaten av Wörman och Olofsdottir utvärderade för ett värde på mobilitetsparametern motsvarande G*=10⁻⁵. Det var detta värde som användes i beräkningsexemplet ovan beträffande långtidseffekten av en kumulativ förlust av basmaterial.

Man kan se från diagrammet hur påverkan från den mekaniska tilltäppningen ökar gradvis i "filterintervallet" med ökande värde på d_{85}/D_{15} . Allteftersom kornstorleksförhållandet blir tillräckligt stort så satisfieras det geometriska filterkriteriet. Olikheter i resultat med ändrad baskornsstorlek beror på hydrodynamiska effekter.

2.2 Inverkan av gradering på inträngningsdjupet av basmaterialfiltret och total basmaterialförlust

På ett sätt är teorin som kommer att diskuteras i detta kapitel fundamental för tolkningen av filtreringsfenomen i stratifierad jord och kunde ha lyfts fram tidigare i denna rapport. Genom att avstå från detta är dock de inledande kapitlen något mer lättillgängliga än vad som eljest skulle vara fallet. Trots teorins nya idékoncept kommer det slutligen att visas att kornstorleksförhållandet är en av de väsentligaste parametrarna i kombination med några andra parametrar (vi har redan berört G*).

Längs en transportväg i ett granulärt filter så är porkanalernas storlekar och speciellt deras förträngningar spridda statistiskt. Detta innebär att transporterade basmaterialkorn konfronteras med ett spektrum (en fördelning) av porkanalstorlekar och passerar fler och fler förträngningarna ju längre in i filtret de vandrar. Antalet passerade förträngningar ökar med penetrationsdjupet. Följaktligen ökar sannolikheten med penetrationsdjup att ett basmaterialkorn möter en förträngning i porkanalerna i vilken kornet mekaniskt kan fastna. Transporten leder till en kumulativ förlust av basmaterial och en avsänkning av bas/filter-gränsytan. Dessa två effekter, penetrationsdjupet och gränsytans avsänkning kan vara viktiga vid tolkningar av filterstabiliteten.

Bivillkoret för det geometriska filterkriteriet, att obetydliga mängder av basmaterialet tillåts att transporteras helt genom filtret, kräver inte bara kunskap om den statistiska fördelningen av porkanalernas geometri och kornstorleksfördelningen av basmaterialet, utan man skall även besluta om 1) acceptabelt inträngningsdjup och 2) acceptabel avsänkning av gränsytan. Studier som behandlar dessa faktorer för friktionsmaterial har gjorts av Witt (1986), Brauns och Witt (1987), Kenney et al (1985) och Wörman och Skoglund (1992). Witt (1986) gjorde experiment och teoretiska undersökningar av filterbildning för icke-kohesiva basmaterial med flöden vinkelrät mot gränsytan. Han fann att hela fördelningen av minsta



Figur 7. Kumulativ förlust av basmaterial samt penetrationsdjupet i filtret som funktion av Q_B (figur efter Witt, 1968).

porkanalvidd (den minsta vidd i en begränsad sektion längs en porkanal) tenderade mot mindre storlekar med ökat antal av förträngningar längs en transportväg. Beroendet avtar med ökat antal hopträngningar och, för en tillräckligt stort antal av hopträngningar, blir fördelningen konstant. Sålunda med ökad filtertjocklek eller inträngningsdjup av basmaterial i filtret, så närmar sig den minsta vidden, P_e , av porkanalerna:

$$P_e = 0,27 \text{ D}$$
 (ekv. 5)

där är den aritmetiska genomsnittet av filtermaterialets kornstorlek (Witt, 1986). Den minsta porkanalvidden kan även tolkas som diametern av det största basmaterialkorn som kan transporteras genom filtret vid filtreringsprocessens initialskede (allteftersom filtreringsprocessen pågår så minskar gradvis den effektiva porstorleken i filterkakan). Kenney et al (1984) inkluderade en viss grad av säkerhet i uttrycket för den effektiva förträngningen av porkanalerna och föreslog uttrycken $P_e = 0,20 D_{15}$ eller $P_e = 0,25 D_5$. Åberg (1993) lade också fram en teori för hur den effektiva porstorleken skulle beräknas.

Andelen per massenhet av basmaterial som kvarhålls genom filterbildning, Q_B , fås ur kornstorleksfördelningen (definierad per massenhet) för basmaterialet med hjälp av likheten $P_e = d_{Q_B}$, där $0 < Q_B < 1,0$. Massandelen, Q_B , beror av inträngningsdjupet och den kumulativa massförlusten av basmaterialet vid jämvikt enligt figur 7. Resultaten i figur 7 har en teoretisk förankring i partikelstatistik och i utvärderingar av fristående laboratorie-experiment av Witt (1986). Den kumulativa förlusten av basmaterial per areaandel av gränsyta är betecknad m_B [kg/m²] och penetrationsdjupet betecknas l. Klart är att penetrationsdjupet och kumulativa förlusten av basmaterial ökar markant med ökat Q_B då Q_B är nära 0,95. Ur denna teoretiska aspekt är därför 95%-fraktilen en bättre filterparameter än den som normalt används, dvs 85%-fraktilen.

Den beskrivna metodiken gör det möjlighet att laborera med variablerna, D, d, m_B och l, vid dimensioneringen av filtret (förutom J och G*). Eftersom penetrationsfronten har en statistisk definition, är variabeln, inte identisk med den filtertjocklek som krävs för att erhålla en stabil filterkaka. En viss andel av basmaterialets korn transporteras längre än penetrationsdjupet och därför behöver filtertjockleken vara något större för att uppfylla antagandena bakom (ekv. 5).

Efter bästa kännedom så har inga experimentella undersökningar utförts angående filterregler för kohesiva material med hänsyn till penetrationsdjup. Koenders och Williams (1992) föreslog i en teoretisk beskrivning hur penetrationsdjupet kunde beräknas genom att betrakta rörelseekvationen för en viskös jordblandning, utan att bestämma den empiriska koefficienten.

Wörman och Skoglund (1992) föreslog i en teoretisk beskrivning hur den kumulativa basmaterialförlusten kan inkluderas som en variabel i en matematisk modell för filtrerprocesser där flödet är parallellt mot gränsytan genom att använda J och G* i analysen. Om transporten är parallell med gränsytan, så är troligen penetrationsdjupet inte så väsentligt att beakta.

2.3. Inre stabilitet av graderade basmaterial

Vid bedömningen av hur stor förlust av basmaterial som kan tolereras ur säkerhetssynpunkt är det viktigt att beakta den totala avsänkningen av filterytan. En annan central fråga berör basmaterialets inre stabilitet. Om enbart de största kornen av basmaterialet, säg d₈₅ eller ibland upp till d₁₀₀, kvarhålls initialt i en filterprocess innebär inte detta nödvändigtvis att även alla finare fraktioner slutligen kvarhålls och att erosionen avtar med tiden. I ett språnggraderad (två kornfraktioner med markant olika storlek) eller väl graderat basmaterial som är känslig för separation kan inre instabilitet och urtvättning av material uppkomma på grund av två orsaker som diskuteras av Åberg (1993). En anledning för urtvättning är om det finns tillräcklig små korn som sitter löst i kornmatrisen och kan passera genom porkanalerna. Den andra anledningen hänger samman med basmaterialets avsänkning som beror av att materialvolymer går förlorade vid transporten in i filtret. Sättningen ger upphov till en omstrukturering av de ursprungligen fixerade kornen vilket därigenom lösgör en del korn. För språnggraderade material, som är känsliga för separation, är det möjligt att denna process inte upphör. Emellertid om alla kornen som passerar filtret representerar en kontinuerlig frekvensfunktion (avseende storlek) kommer en filterkaka slutligen att utvecklas med tiden. Det finns två problem att beakta: 1) kornstorleksfördelningen för det basmaterial som passerar filtret är inte nödvändigtvis identisk med den kornstorleksfördelningen som gäller det ursprungliga basmaterialet och 2) härav följer att kornstorleksfördelningen för filterkakan inte är entydigt relaterad till den totala mängden förlorat basmaterial. Eftersom den totala volymen av basmaterial som går förlorad är en viktig variabel för att bedöma graden av inre stabilitet, så har sambandet mellan denna variabel och basmaterialets gradering behandlats bland andra av Kenney och Lau (1985), Lafleur et al (1989) och Åberg (1993).

Åberg (1993) undersökte den inre stabiliteten med hänsyn till omstrukturering av kornmatrisen baserad på hans egna experiment och de av Kenney och Lau (1985) och Lafleur et al (1989). Fallet med lösa korn behandlades inte. Ett jordlager placerades ovanpå siktnätet i en filtercylinder av standardutförande (figur 1) och uppställningen utsattes för en hydraulisk gradient i storleksordningen av 20 (flödet var vinkelrät mot gränsytan) och lätta vibrationer. Den urspolade materialmängden fångades upp, torkades och vägdes.

Med hjälp av Åbergs teori kan man särskilja jordmaterial som innehåller lösa korn från jordmaterial utan fria korn med utgångspunkt från kornstorleksfördelning. För den andra materialtypen är den inre stabiliteten beroende på jordens förmåga att separera i en finare och en grövre fraktion; härefter betecknade I och II. Som ett stabilitetskriterium jämförs den bestämmande porstorleken för den grövre fraktionen, II, med den undre gränsen för samma fraktion. Beroende på hur gränsen väljs mellan de två fraktionerna så kan kornstorlekskoten variera från noll till oändligheten. Om förhållandet $P_{e,II}/D_{0,II}$ överskrider värdet 1,0 för någon enda godtyckligt vald fraktilgräns mellan 0 och 1,0, kan materialet betraktas vara instabilt, vilket bekräftas av en rad experimentella resultat. Observera att $D_{0,II} \ge D_0$. För information om beräkningen av den minsta vidden av porkanalsystemet hänvisas läsaren till Åberg (1993). Det är även möjligt att utnyttja (ekv. 5) eller uttrycken som ges av Kenney et al (1984). Som en tumregel kan vi utnyttja resultaten av Kenney et al:

$$\frac{\mathbf{D}_{15,\mathrm{II}}}{\mathbf{D}_{0,\mathrm{II}}} < 5 \tag{ekv. 6}$$

som ett kriterium för inre stabilitet av basmaterial. Detta uttryck är identiskt med $D_{15,II}/D_{100,I} < 5$; båda uttrycken är ett mått på gradienten i kornstorleksfördelningen.

3. SÄKERHETSFAKTORER

I "verkliga" dimensioneringsfall förekommer naturliga variationer i jordens karakteristika och belastningsvillkor som motiverar att en viss grad av säkerhet inkluderas i beräkningsförfarandet för geomekaniska filter. Väsentliga frågor är vilka variabler som medför den största osäkerheten och följaktligen hur säkerheten skall inkluderas i beräkningen. Man kan förmoda att de specifika villkor under vilka filterkonstruktionen är byggd kan vara viktiga att beakta i det avseende. Erosionsskydd för kuster kan komma att byggas under delvis torra förhållanden eller på grunt vatten, medan erosionsskydd kring brostöd i strömmande vatten ofta byggs under vatten och i strida förhållanden. Utseendet av den färdiga produkten avviker ofta från ritbordsprodukten, men olika mycket i olika tillämpningar.

Terzaghis geometriska filterkriterium:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} = 5$$
 (ekv. 7)

som gäller för vinkelräta flöden mot filterytan inkluderar en viss grad av säkerhet. Jämförelse mellan (ekv. 1) och (ekv. 7) antyder att säkerhetsfaktorn som verkar i vänsterledet av (ekv. 7) är 9/5.

Witts teori (1986), delvis återgivet i figur 7, speglar att den representativa fraktilgränsen för basmaterialets kornstorlek kan väljas olika beroende på det inträngningsdjup som accepteras. Ienlighet med Witts resultat kommer en säkerhetsfaktor som antas verka på inträngningsdjupet, att kunna ekvivaleras med en mycket större säkerhetsfaktor som verkar på kornstorleken (icke-linjärt förhållande). Ett liknande icke-linjärt samband skulle erhållas om säkerhetsfaktorn verkar inuti funktionsoperationen i högra ledet av (ekv. 4). Genom att exempelvis föreskriva en säkerhetsfaktor av 2 verkande på transportintensiteten, G, innebär detta en ekvivalent säkerhet verkande på kornstorleken i storleksordning 4 000 (om $F(x) \infty x^{12}$ som iakttogs av Wörman och Olofsdottir, 1992). Detta uppfattas säkert som en oacceptabelt hög säkerhet och är givetvis praktiskt omöjlig i de flesta ingenjörstillämpningar.

En annan viktig säkerhetsaspekt rör variationerna i jordens egenskaper vilka kräver ett mer statistiskt betraktelsesätt för att låta sig beskrivas (Brauns, 1992). Ett filter kan ju t ex mycket väl vara funktionsdugligt inom större delen av sin gränsyta mot basmaterialet, men funktionsodugligt på en begränsad yta. För strömning vinkelrät mot filterytan påverkas graden av säkerhet av det förväntade areaförhållandet mellan dessa båda ytor. Med en viss grad av sannolikhet, t ex 90%, kan man göra uttalanden om att areaförhållandet är större än 95%. Få empiriska undersökningar finns gjorda inom detta område (Brauns, 1992, utgör dock ett undantag). Om transporten sker parallellt med gränsytan bör man tänka i termer av funktionsodugliga transportvägar och den area som dessa upptar av filterytan.

Dessa enkla exempel visar på några få möjligheter i valet av säkerhetskoncept och de stora skillnader som dessa kan ha på dimensionerande variabler. Den enda rekommendation som framförs här är att säkerheten bör introduceras i dimensioneringen på ett medvetet sätt.

4. EN STUDIE AV FILTRERING I VÄL GRADERADE BASMATERIAL MED STRÖMNING PARALLELLT MED FILTERYTAN

4.1. Syfte med undersökningen

Byggandet av jord- och stenfyllningsdammar, erosionsskydd av kuster eller kanaler kräver ofta att filterdimensioneringen görs med hänsyn till att basmaterialet är månggraderat och att vattenflödet också kan vara riktat parallellt med filterytan. Ett speciellt exempel är den möjlighet som varit diskuterad i Skandinavien att tillåta temporär överströmning av tätkärnan i fyllningsdammar och därigenom acceptera en risk för erosion längs den horisontella överytan av morän- eller lertätkärnan (Wörman och Skoglund, 1992). Eftersom det geometriska filterkriteriet (ekv. 1) sällan är helt uppfyllt mellan tätkärnan och ovanpåliggande sandfilter eller mellan sandfiltret och ovanpåliggande stenfyllning, är det naturligt att basera slutsatser om erosionens förlopp och dammens övergripande stabilitet på en dynamisk analys av förloppet. Denna analys kräver dock empiriska samband för att relatera erosionsintensiteten med hydrauliska villkor och filterbildningens tillstånd.

Undersökningar av Witt (1986) och Brauns och Witt (1987) angående basmaterialförlust och inträngningsdjupet i filter (kapitel 2.2) är grundade uteslutande på analys av storleksfördelningarna av basmaterialets korn samt porkanalernas förträngningar i filtret (geometriska/statistiska analyser). Eftersom inte det dynamiska förloppet beaktades (statiskt tillstånd antas) kan deras resultat utnyttjas i ett konservativt dimensioneringsförfarande med hänsyn basmaterialförlust och inträngningsdjup i filter. Samma omdöme kan anses gälla undersökningarna kring inre stabilitet av basmaterial av Kenney och Lau (1985), Lafleur (1989) och Åberg (1993). Av praktiska eller ekonomiska skäl kan det emellertid finnas anledning att beakta den verkliga belastningen och det dynamiska responsen av jordkonstruktionen i vissa fall.

Enligt författarnas kännedom har varken stabilitetssamband utvecklats eller experiment genomförts kring erosion och filtrering av välgraderade basmaterial med flöde parallellt med filtergränsytan. Syftet med den föreliggande undersökningen är därför att ta fram preliminär information om dynamiken i filterprocessen av välgraderade basmaterial som utsätts för flöde parallellt med filterytan.

Wörman och Skoglund (1992) föreslog en teoretisk metod med vilken de kunde förklara resultaten från fullskaleexperiment i laboratoriemiljö av inre erosion i fyllningsdammar som utsätts överströmning av tätkärnan. Denna undersökning är därför inriktad mot att genomföra experiment som gör det möjligt att verifiera eller vederlägga förutsättningar för de teoretiska resonemangen i deras studie.

4.2. Experiment

4.2.1. Experimentell utrustning

Experiment utfördes i en utrustning tillverkad av aluminium och plast i Älvkarlebylaboratoriet (Vattenfall Utveckling ABs forskningslaboratorium). Totalt var den experimentella utrustningen tre meter lång och två och en halv meter hög och en meter bred. Utrustningen bestod av tre olika delar (figur 8a):

- 1. Del ett är en uppströmskammare där vattenflödet fördelas över tvärsnittsytan i inloppet till den experimentella sektionen. Uppströmskammaren är förbunden med den mellersta kammaren genom en kvadratisk grind, 0,3 x 0,3 m. För att möjliggöra ett trycksatt system med stor hydraulisk gradient, fanns möjlighet att stänga till överdelen på denna kammare och den mellersta sektionen av utrustningen.
- 2. Del två, den mellersta kammaren, är själva experimentsektionen där undersökta material placerades. Dess invändiga mått var 1,056 m i längd, 0,284 m i bredd och ungefär 1,0 m i höjd. Ovanför sand och grus lagren placerades fyra vertikala plattor med sina plana ytor vinkelrät mot flödesriktningen. Syftet med detta arrangemang var att åstadkomma en konstant hydraulisk gradient längs filterytan genom att begränsa flödesvägen till 0,298 m mellan filterytan till den nedre kanten på plattorna. För att reducera inverkan av väggen på strömningen (lokalt högre permeabilitet), så limmades 1 cm tjockt, mjukt textilmaterial (moquette) fast på de vertikala sidväggarna i den mellersta sektionen. För att hålla sand/grusmaterialet på plats vid inflödes- och utflödessektionerna, kompletterades de kvadratiska gallren med metallnät i lämplig maskstorlek.
- 3. Del tre, nedströmsdelen, består av en trattformig plastlåda där vattenytan hölls ovanför den experimentella vattenvägen. Eroderat material som spolades ut från den experimentella delen deponerades i denna bassäng och kunde regelbundet tömmas genom en ventil i botten på tratten.



Figur 8a och b. a) experimentell utrustning (övre figur) och b) kumulativ kornstorleksfördelning för undersökta basjordar (nedre figur).

I försöksanläggningen gjordes sex tryckmätningar (piezometrisk stighöjd) genom väggen (en på övre reservoaren, fyra på den experimentella sektionen och en i depositionsbassängen).

4.2.2. Försöksmaterial

En filtersyta formades mellan ett filtermaterial, vilket var samma i alla experimenten och ett basmaterial vars gradering varierades mellan experimenten.

Filtermaterialet var ensgraderat, naturligt rundat granitgrus med kornstorlekar mellan 4,0 och 8,0 mm, alltså förhållandet $d_{100}/d_0 = 2$. Materialen siktades och tvättades två gånger för att avskilja finare kornstorlekar så väl som möjligt. På detta sätt hade mindre än 2% av gruskornen en korndiameter mindre 4 mm och mindre än 1% var större än 8 mm. Kornstorleksfördelningen karakteriseras bland annat av $D_{15} = 4,44$ mm och $D_{50} = 5,66$ mm. Porositeten, n, mättes genom att tillsätta vatten till grusmaterialet och mäta totalvolymen respektive vattenvolymen. Porositeten varierade mellan 0,40 och 0,45 med ett medelvärde på = 0,425.

Basmaterialet var av kvartssand graderat mellan 0,25 och 0,5 mm i det första försöket, mellan 0,25 och 1,0 mm i det andra försöket och mellan 0,25 och 2,0 mm i det tredje försöket (figur 8b, tabell 1). Syftet var att 85%-fraktilen skulle vara konstant i alla försöket, emedan d_{100} varierades, för att härigenom göra det möjligt att undersöka relevansen av att använda d_{85} som ett unikt mått på filtreringsegenskaperna för väl graderade basmaterial. Från kapitel 2.1 framgår att d_{85} är en allmänt använd parameter i filtersammanhang.

Bassanden blandades av lämpliga proportioner från de preparerade ursprungsfraktionerna 0,25–0,5, 0,5–1,0 och 1,0–2,0 mm. Ansträngningar gjordes för att åstadkomma ett väl blandat och homogent material. Kontrollsiktning med en noggrannare fraktionsindelning än som användes för produktionssiktningen visade att endast små avvikelser förelåg mellan den verkliga kornfördelningskurvorna och de förväntade. Mindre än 1% var över förväntat värde av d₁₀₀ och mindre än 4% var finare än d₀.

Material	Storleks- intervall	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Andel av kornen som är utanför storleksintervall	
	(mm)				under %	over %
Grus	4,000 - 8,000	4,44	5,66	7,21	1,88	0,83
Sand 1	0,250 - 0,500	0,28	0,37	0,46	3,52	0,96
Sand 2	0,250 – 1,000	0,28	0,40	0,50	1,98	0,13
Sand 3	0,250 – 2,000	0,29	0,41	0,50	2,42	0,07

4.2.3. Försökets uppläggning

4.2.3.1. Experimentförberedelser

Försöket inleds med att sand placeras i den experimentella sektionen, del 2. För att få en vattenmättad sandbädd preparerades denna med 8,0 cm lugnvatten på botten av försöksanläggningen. Därefter fick sanden sjunka genom vattnet och sätta sig på bottnen av försöksutrustningen tills sandnivån nådde upp till den önskade höjden (0,102 m). Sandytan horisonterades med en mekaniskt styrd skrapa. Därefter lades gruset väldigt försiktigt ovanpå sanden upp till en bestämd nivå mellan de vertikala plattorna; den totala tjockleken av gruslagret var ungefär 60 cm. Flödesvägen var emellertid begränsad till avståndet mellan filterytan och den lägre kanten av de vertikala plattorna (0,298 m). Vattennivån höjdes sakta (med ett konstant flöde om cirka 0,25 l/s) för att slutligen nå överfallets nivå på nedströmssidan. Sedan kunde experimentet starta.

4.2.3.2. Försöksförfarande

Under experimentet ökades flödet stegvis. Ett steg varade vanligtvis mellan en och fem timmar (i speciella fall, under natten till exempel, kunde det hålla på i tolv timmar). Flödet hölls konstant under ett steg och i allmänhet varierade den hydrauliska gradienten endast lite. Mätproceduren omfattade flödesbestämning, sex mätningar av stighöjd (för att kunna utvärdera hydraulisk gradient), mängden material som fångades upp i depositionsbassängen och tidpunkten då mätningarna gjordes. Mätningarna upprepades ett flertal gånger under varje steg. Vattentemperaturen var konstant omkring 18°C. Från mätningarna av deponerad materialmängd och tid beräknades tidsmedelvärdet av transportintensiteten för varje steg. När mängden eroderat basmaterial fortgått under ett tag, så bedömdes att avsänkningen av filterytan var tillräckligt stor för att påverka de lokala flödesgradienterna. Experimentet avbröts då.

4.3. Teoretisk metod och utvärdering

Från figurerna 9–11 kan man dra slutsatsen att det föreligger en markant korrelation mellan en ökande hydraulisk gradient och en ökad transportintensitet av basmaterial. Visuel observation av urspolningsprocessen i depositionsbassängen indikerade att transporten är begränsad till de lägre partier av gruslagret. Transporten är koncentrerad till porkanalsystemetet i filtret precis i närheten av filterytan. För denna typ av ytbegränsad erosion är tillgängligheten av basmaterialet konstant (till skillnad från t ex suspenderad transport) vilket medför att masskoncentrationen inte är en variabel för problemet. Vidare så innebär rörelsemängdsförlusten som basmaterialets eroderade korn erfar vid kollisioner och friktion mot filterväggarna samt mot den immobila överytan av basmaterialet att transporthastigheten är lägre än advektionshastigheten av vattenflödet. För ensgraderat, ickekohesivt basmaterial och horisontell filteryta med parallellt flöde, kan den effektiva transportintensiteten tecknas som (Wörman & Olafsdottir, 1992):

 $G^*=n (4,48\tau^*)^{12}$

(ekv. 8)

Parametern

۹

$$\tau^* = \frac{\frac{c_1}{8} D_H J}{(S_S - 1)d_{85}}$$
(ekv. 9)

återspeglar förhållandet mellan destabiliserande moment från vattenflödet och stabiliserande moment från vikten av basmaterialet under vatten, $G^*=G/(Vd_{85})$, G är den volymtransportintensitet per enhetsbredd, $V=q/n_1$, q är vattenflöde per enhetsarea, n1 är filtermaterialets porositet, e₁ är portalet för filtermaterialet, D_H är det harmoniska medelvärdet viktat med volym av filtermaterialets kornstorlekar, J är den hydrauliska gradienten och S_S är densitetförhållandet fast material och vatten. Ekv. (8) och (9) gäller inom de undersökta intervallen; 65 < Re = q D₁₅/ < 500; 5 < Re = V d₈₅/ < 60; 0,03 < J < 0,3; 0,015 < d₈₅/D_H<0,10 och 9·10⁻⁷ < G* < 1 10-3. För en mer ingående förklaring av ekv. (8) och (9) hänvisas läsaren till Wörman & Olafsdottirs rapport.

Resultaten från experiment nr 1 ($d_{100}/d_0 = 2$) befanns följa det befintliga sambandet mellan hydraulisk gradient och transportintensitet ganska bra med undantag för korttidsfluktuationer i transportintensitet. Baserat på Wörman & Olafsdottirs undersökningar så fortsätter dessa fluktuationer kontinuerligt utan några tendenser att klinga av. Anledningen att resultaten från steg 6 uppvisar dessa fluktuationer bara under en initial tidsperiod är att tidstegen över vilka transporten mäts förlängdes under försöket. Senare resultat från steg 6 är därför medelvärdesbildade över längre tidssteg än de tidiga resultaten från steget. Karakteriserande för alla tre experimenten är att frekvensen av fluktuationerna är omkring 1/7 000, dvs en transportvåg passerar varannan timma.

Under varje steg i experiment tre så tenderade den genomsnittliga transportintensiteten att minska markant med fortskridande erosionsutveckling. I steg 10, minskade transportintensiteten med två tiopotenser under loppet av 15 timmar trots att den hydrauliska gradienten och flödet hölls konstanta (figur 11). Figur 12 visar en typisk tillståndsparameter enligt Wörman & Olofsdottir (1992) på ordinatan som en funktion av det relativa erosionsdjupet i basmaterialet, $V_{er}/(d_{85}A_b)$, där Ver är den eroderade volymen mätt i depositionsbassängen och A_b är den totala area av bas/filter gränsytan. För erosionsdjup, $\xi = V_{er}/A_b$, som är mindre än korndiametern så är tillståndsparametern på ordinatan ungefär konstant lika med 0,03, vilket är det samma värde som gäller för ett ensgraderat material för $d_{85}/D_H = 0,1$, (figur 14). Figur 13 visar hur inverkan av filtrering ökar från det första till det tredje experimentet och när det relativa erosionsdjupet ökar över värdet 1,0. Troligen beror den ökande kvoten mellan hydraulisk gradient och transportintensitet på att filterytan tilltäpps kontinuerligt av basmaterialkorn. Gränsytans tillgänglighet för transport minskar därmed kontinuerligt med ökande ξ/d_{85} . Om filtreringsprocessen tillåts fortskrida kommer gränsytan att bli helt tilltäppt och parametern på ordinatan att närma sig oändligheten.

Inledningsvis under erosionsprocessen är ytan som är tillgänglig för transport given av porositeten i filtermaterialet. Betrakta två godtyckliga plana snittytor genom filtret som åskådliggörs i figur 15, härigenom avgränsar ytorna en lamell i filtret. Om A anger areaandelen som är tillgänglig för transport och Δs är tjockleken av filterlamellen, så kan porositeten tecknas som:

$$n_{1} = \lim \frac{\Delta s A(t=0)}{\Delta s} = A(t=0)$$
 (ekv. 10)



Figur 9. Tillståndsvariabler för experiment nr. 1. Hydraulisk gradient och transportintensitet som funktion av förfluten tid. Transportintensitet som funktion av den hydrauliska gradienten.



Figur 10. Tillståndsvariabler från experiment nr. 2. Hydraulisk gradient och transportintensitet som funktion av förfluten tid. Transportintensitet som funktion av den hydrauliska gradienten.



Figur 11. Tillståndsvariabler från experiment nr. 3. Hydraulisk gradient och transportintensitet som funktion av förfluten tid. Transportintensitet som funktion av den hydrauliska gradienten.



Figur 12. Typisk tillståndsparameter för filterprocessen som funktion av relativt erosionsdjup för experiment nr. 3.



Figur 13. Typisk tillståndsparameter för filterprocessen som funktion av relativt erosionsdjup.

Genom att anta att rörelsemängdsöverföringen från vattenflödet till bas/filterytan per enhetsarea gränsyta är invariant med A så kan man ta hänsyn till reduktionen i transportintensitet genom en linjär formulering såsom:

$$G^* = AG_M^*$$
 (ekv. 11)

där G_M^* är transportintensiteten på en enhetsarea av basmaterialet och G* är den effektiva transporthastighet på en enhetsarea av bas/filter gränsytan. Ekv. (8) är baserad på (ekv. 10) och (ekv. 11), vilket också är anledningen till att porositeten förekommer som en variabel i (ekv. 8).



Figur 14. Typisk tillståndsparameter för filterprocessen som funktion av kornstorleksförhållande och utvecklingstillstånd.



Figur 15. Schematisk framställning av ett plant snitt genom filtermaterial.

Allteftersom basmaterialets korn täpper till filtret, minskar successivt arean som är tillgänglig för transport. Genom kontinuitetsvillkor kan den tilltäppta arean, A_{cl} , sättas i samband med den genomsnittliga kornstorleken av kvarhållna korn, d_{cl} , volymandelen av dessa korn i det ursprungliga basmaterialet och den kumulativa erosionsvolymen. En metod liknande den som föreslås för en skyddslagerbildning av flodbäddar av Karim och Holly (1986) och Wörman (1991) kan användas. Tilltäppt area per enhetsarea av total filteryta kan härigenom skrivas som:

$$A_{cl} = \int_{t'=0}^{t} \frac{\varepsilon - \eta - \partial G}{d_{c1} - 1 - \eta - \partial x} dt' = \varepsilon \frac{\eta - d_{85} - \xi}{1 - \eta - d_{c1} - d_{85}}$$
(ekv. 12)

där ε är en empirisk koefficient varierande inom intervallet $0 < \varepsilon < 2$ beroende på 1) andelen kornvolym i ursprungsmaterialet som har potential att täppa till porkanalerna i filtret som faktisk göra detta och 2) deras orientering i fastlåst läge både med hänsyn till partikelformen och med hänsyn till möjligheten att flera korn fastnar i samma porkanal och delvis täcker samma filterarea.

Kombineras (ekv. 8) och (ekv. 9) med (ekv. 11) och (ekv. 12) så fås ett transportsamband:

$$G^* = (n_1 - \varepsilon \frac{\eta - d_{85} - \xi}{1 - n d_{c1} - d_{85}}) (0.56 - \frac{e_1}{S_s - 1} J - \frac{D_H}{d_{85}})^{1/2}$$
(ekv. 13)

som tar hänsyn till filtrering och kan användas för att utvärdera de experimentella resultaten.



Figur 16. Typisk filtrerparameter som funktion av det relativa erosionsdjupet.

4.4. Diskussion

Genom det experimentella förfarande som beskrivits ovan kan alla tillståndsvariabler i (ekv.13) utvärderas oberoende med undantag för ε , η och d_{cl}. Figur 16 visar resultaten utvärderade med hjälp av (ekv. 13). Tydligen varierar filterparametern definierad av (ekv. 12) relativ entydigt med ξ/d_{85} som:

$$\varepsilon \frac{\eta}{1-\eta} \frac{d_{85}}{d_{cl}} = 0.37 \left(\frac{\xi}{d_{85}}\right)^{-0.9749}$$
 (ekv. 14)

Kombineras (ekv. 13) och (ekv. 14) fås

$$G^* = \left(n_1 - 0.37 \left(\frac{\xi}{d_{85}}\right)^{0.025}\right) \left(0.56 \frac{e_1}{S_{s-1}} J \frac{D_H}{d_{85}}\right)^{1/2}$$
(ekv. 15)

dvs, det är en ganska svag inverkan av ξ/d_{85} på transportintensiteten för de undersökta materialtyperna. Denna slutsats kan i någon mån verifieras genom analys av figur 13. Emellertid finns ingen anledning att tro att (ekv. 15) skulle vara generellt giltig. Tvärt om finns skäl att tro att en vidare gradering av basmaterialet leder till en mer uttalad effekt av filtrering (speciellt de högre fraktionerna). I enlighet med detta ger resultaten från experimenten nr 1 en något lägre filterfaktor i figur 16 än de andra resultaten. I figur 13 kan man också se att resultaten från det 3:e experimentet uppvisar de mest framträdande filteregenskaperna för ξ/d_{85} >1 och att praktiskt taget ingen filtrering alls förekommer i det första experimentet.

För de tre undersökta basmaterialen är filtreringen relativt liten (än för mer graderade material) vilket är anledningen till de relativt små skillnaderna i resultaten. Ett rimligt antagande är att filterfaktorn är en funktion av graderingen av basmaterialet, d_{100}/d_{85} och på den relativa storleken d_{85}/D_{15} . Den sista parametern var konstant $d_{85}/D_{15} = 0.084$ och basmaterialets gradering varierade i intervallet $1,11 < d_{100}/d_{85} < 4,43$.

Inga ansträngningar gjordes för att särskilja korttidsfluktuationer från den övergripande trenden i transportintensiteten. Eftersom fluktuationerna är signifikanta i jämförelse med förändringar i trendvärdena så är denna förenkling relativt grov och bör åtgärdas i framtiden. En naturlig metodik att separera de olika frekvenserna är tex spektralanalys. En teoretisk beskrivning av transportfluktuationer kräver att även våglängden eller vågutbredningshastigheten för störningarna i gränsytan registreras.

Ett sätt att förstå de experimentella resultaten som summeras av (ekv. 14) är att tolka parametrarna som konstituerar vänsterledet i (ekv. 14). Medelstorleken av tilltäppande basmaterialkorn, d_{el} , minskar troligtvis något med fortskridande erosionsutveckling. Allt eftersom filterkakan växer till så minskar samtidigt porkanalernas hopträngningar i filtret i anslutning till filterkakan. Mindre och mindre korn besitter därmed potentialen att fastna i filterkakan, dvs η ökar med fortskridande erosion. Eftersom både dessa faktorer verkar för en ökande filterfaktor (vänstra ledet i (ekv. 14)) med fortskridande erosion så måste den bakomliggande anledningen till att filtrerfaktorn minskar med fortskridande erosion sökas i fysiken bakom parametern ξ , den enda återstående variabeln i vänsterledet av (ekv. 14).

Antag att de kvarhållna kornen fastnar huvudsakligen i ett fåtal tillräckligt små förträngningar i filtrets porkanaler. På återstoden av filterytan passerar basmaterialets korn igenom. Ett sådant filteruppförande skulle resultera i en flerdubbel igentäppning av de små porförträngningar, medan arean som är tillgänglig för transport inte nämnvärt påverkas. I en plan avbildning av filterkakan liknande den i figur 15 så skulle de kvarhållna kornen täcka delvis samma area. I extremfallet täcker de exakt samma area och följaktligen skulle filterfaktorn närma sig noll.

Utvärderingen indikerar att exponenten i (ekv. 8), föreslagen av Wörman & Olafsdottir för basmaterial med en gradering definierad av $d_{85}/d_0 = 1.8 \text{ och } d_{100}/d_{85} = 1.11$, också gäller för basmaterial med gradering i intervallet $1.11 < d_{100}/d_{85} < 4.43$. Enligt undersökningsresultaten varierar dock proportionaliteten för månggraderade material enligt (ekv. 14) och (ekv. 15). Dessutom, har (ekv. 8) testats och befunnits vara approximativt giltigt för hydraulisk gradienter upp till 0.414 (jämfört med 0.3 vilket är den högsta gradient som tidigare har undersökts). För de undersökta materialen var inte inverkan av filtrering på transportintensiteten så framträdande.

5. FRAMTIDA UNDERSÖKNINGAR

- Filterfunktionen, (ekv. 14), har troligtvis allvarliga begränsningar med avseende på variation av basmaterialets gradering, d₈₅/D₁₅ och relativt erosionsdjup, ξ/d₈₅. I framtida experimentella undersökningar bör man variera dessa parametrar i ett vidare intervall än vad som varit fallet i den föreliggande studien. Särskilt moränmaterial som används i stenfyllningsdammar kan karakteriseras av betydligt högre förhållanden av d₁₀₀/d₈₅ än 4,43. Av försökstekniska skäl är dessutom de undersökta erosionsdjupen små (2 cm) jämfört med de erosionsdjup som skulle kunna accepteras i många praktiska fall.
- 2. Om tätkärnan i en stenfyllningsdamm överströmmas så är den hydrauliska gradienten på nedströmskanten av tätkärnans överyta 1,0 (Wörman & Olofdottir, 1992). I experimenten har den hydrauliska gradienten varit som störst något större än 0,4. I framtida undersökningar skulle högre hydrauliska gradienter ansättas.
- 3. För att möjliggöra en mer pålitlig utvärdering av experimentella resultat av filtrering i välgraderade basmaterial så bör utvärderingen inkludera fluktuationerna i transportintensitet som observerades av Wörman & Olofsdottir (1992) och i den föreliggande undersökningen. Fluktuationerna i transportintensitet kan vara i storleksordningen 50% av medelvärdet. Experimenten som omfattar dessa fluktuationer i kombination med en avtagande trend i transport är svåra att utvärdera utan en formell separation av de två sorters tidsberoende i transportintensiteten. I denna aktuella studien försummades helt enkelt fluktuationerna i utvärderingen.

6. SLUTSATSER

6.1. Litteraturöversikt

Ett geometriskt filterkriterium säkerställer att basmaterialet (det eroderade materialet) efter en initial, liten volymförlust är stabilt oavsett storleken av den hydrauliska belastningen som ansätts över den utvecklade filterkakan. Sherard (1984a) fann att likheten $D_{15}/d_{85} = 9$ motsvarar det geometriska filterkriteriet om flödet är vinkelrät mot filterytan. För kohesiva basmaterial är erosionsbenägenheten lägre jämfört med friktionsmaterial och i enlighet med detta visar några undersökningar att det kritiska kornstorlekesförhållandet kan vara så högt som 60. Om flödet är parallellt med filterytan, så hindras inte erosion i samma utsträckning av mekaniskt tilltäppning, vilket leder till kornstorleksförhållandet för friktionsmaterial är någonstans i intervallet 6 till 8 när ytan och strömningen är horisontella.

Om ett geometriskt filterkriterium inte är helt uppfyllt så påverkas erosionen av basmaterialet i hög grad av storlek och riktning av den hydrauliska belastningen. Figurerna 5 och 6 visar förhållandet mellan kritisk hydraulisk gradient och D_{15}/d_{85} för flöden vinkelrät mot respektive parallellt med filterytan. När kornstorleksförhållandet närmar sig det geometriska filterkriteriet så går den hydrauliska gradienten mot oändligheten.

En väsentlig fråga för hydraulisk filterdimensionering är den kumulativa effekten av basmaterialets erosion efter en lång tid (i storleksordningen år eller decennier). Den kritiska hydrauliska gradienten som representeras i figurerna 5 och 6 motsvarar en liten men begränsad transportintensitet av basmaterial vilket kan vara väsentligt att ta i beaktande under hela konstruktionens livstid.

Då filterkakan utvecklas i gränsytan mellan bas och filtermaterial så transporteras en del korn, vilka som slutligen fastnar i filtrets porkanaler, på betydande avstånd in i filtermaterialet. Filterkakans inträngningsdjup och den kumulativa massaförlusten av basmaterialet är viktiga variabler att ta hänsyn till under dimensioneringen. Inträngningsdjupet är ett mått på vilken tjocklek som krävs på filterlagret (dock inte identisk med erforderlig tjocklek) och den kumulativa massaförlusten ger den effektiva avsänkningen av konstruktionen.

Inre stabilitet av basmaterial beror av möjligheten att materialet separerar i en finare och en grövre fraktion. Som ett stabilitetskriterium för detta föreslog Åberg (1993) att den begränsande porstorleken för den grövre fraktionen jämförs med den övre kornstorleksgränsen för den finare fraktionen. Om kvoten mellan dessa två variabler överskrider 1,0 för någon enda godtyckligt vald fraktilgräns mellan noll och 1 så är materialet instabilt. Eftersom den begränsande porstorleken enligt Kenney et al(1984) är omkring 0,2 D₁₅, så föreligger en tydlig analogi mellan detta kriterium för inre stabilitet och det som gäller för stabilitet i gränsytan mellan två granulära material enligt t ex (ekv. 1).

6.2 Studie av filtrering i välgraderade basmaterial med strömning parallellt med filterytan

Resultaten från den experimentella undersökningen av filtrering i välgraderade basmaterial indikerar att även en liten inverkan av filtrering (att vissa korn fastnar i filtret) medför att

erosionsprocessen sakta avtar med tiden. Om bara ett fåtal procent av basmaterialets korn är större än storleken av porförträngningarna som styr baskornens tilltäppning av filtret, så kommer en filterkaka troligen att utvecklas med tiden. I många praktiska fall kan detta innebär att konventionella geometriska filterkriterier inte nödvändigtvis måste uppfyllas helt strikt. Både storleken på den hydrauliska belastningen och filtreringsprocessens egenskaper kan vara relevanta faktorer att ta i beaktande. En väsentlig dimensioneringsvariabel är den kumulativa förlusten av basmaterial som är nödvändig för att uppnå tillräcklig stabilitet med hänsyn till den ansatta hydrauliska belastningen. Med hänsyn till detta kan slutsatsen dras att karakteriserande kornstorlek för basmaterialet kan väljas större än den vanligen använda d₈₅. Med hänsyn till undersökningen av Witt (1986) angående kumulativ massaförlust och inträngningsdjup i filtret skulle d₉₅ kunna anses vara en lämplig variabel.

En teori har föreslagits och verifierats med hjälp av de experimentella resultaten som gör det möjligt att prediktera kumulativ förlust av basmaterial (eller den fördjupning i gränsytan mellan bas och filter) som en funktion av tid och andra styrande variabler för problemet.

Ett transportsamband som är giltigt under filterprocesser, (ekv. 15), har verifierats av experimentella resultat inom intervallen $1,11 < d_{100}/d_{85} < 4,43$; $0 < \xi/d_{85} < 30$; 0 < J < 40 och $d_{85}/D_{15} = 0,084$. Resultaten av denna studie berättigar att det föreslagna sambandet används för att kvantifiera erosionsprocessen på en tätkärnas överyta som överströmmas av vatten som gjordes av Wörman & Skoglund (1992).

7. **REFERENSER**

Bezuijen, A., Klein Breteler, M., Bakker, k.J., 1987, *Design Criteria for Placed Block Revetments and Granular filters*, Second Int.Conf. on Costal and Port Engrg. in Developing Countries, Bejing, China.

Brauns, J., 1985, *Erosionsverhalten geschichteter Bodens bei horizontaler Durchströmung*, Wasserwirtschaft, 75, 10, 448-453.

Brauns, J., 1991, *Filters and Drains in Advances in Rockfill Structures*, edited by E. Maranha das Neves, NATO ASI Series, Serie E Vol. 200.

Brauns, J., Witt, K.J., 1987, *Proposal for an advanced concept of filter design*, 9th European Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering, Dublin, Ireland.

de Graauwe, A., van der Meulen, T., van der Does de Bye, M., 1983, *Design criteria for granular filters*, publication No. 287, Delft Hydraulics.

Kenney, T.C., Lau, D., 1985, Internal stability of granular filters, Can.Geotech.J., Vol. 22, pp 215-225.

Kenney, T.C., Chahal, R, Chiu, E, Ofoegbu,G.I., Omange, G.N., Ume, C.A., 1985, *Controlling constriction sizes of granular filters*, Can.Geotech.J.,32-43.

Koenders, M.A., Williams, A.F., 1992, Flow equations of particle fluid mixtures, Acta Mechanica 92, pp 91-116.

Lafleur, J., Mlynarek, J., Rollin, A.L., 1989, *Filtration in broadly graded cohesionless soil*, J.Geotech.Engrg., Vol.115(12), pp1747-1768.

Lavelle, J.W., Mofjeld, H.O., 1987, *Do Critical Stresses for Incipient Motion Really Exist ?*, J.Hydr.Engrg., Vol. 113(3), pp 370-385.

Neill, C.R., Yalin, M.S., (1969), *Quantitative definitions of Beginning of Bed Movement*, J.Hydr.Div., Vol. 95, No. Hy1, pp 585-588.

Parker, G., 1990, *Surface-based bedload transport relation for gravel rivers*, J.Hydr.Res, Vol. 28, No. 4, April, pp 417-436.

Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Talbot, J.R., 1984a, *Basic properties of sand and gravel filters*, J.Geotech.Engrg, ASCE, 110(6), June.

Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Talbot, J.R., 1984b, *Critical filters for silts and clays*, J.Geotech.Engrg, ASCE, 110(6), June.

Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., 1988, *Critical filters for impervious soils*, J.Geotech.Engrg, ASCE, Vol.115(7).

Taylor, B.D., Vanoni, V.A., 1972, *Temperature effects in Low-transport, Flat-bed Flows*, J.Hydr.Div., Vol. 98, No. Hy8, pp 1427-1445.

Terzaghi, C., 1929, *Effect of Minor Geological Details on the Safety of Dams*, American Inst. Mining and Metallurgical Eng., Techn.Publ.No.215, pp 31-44.

Vaughan, P.R., Soares, H.F., 1982, *Design of filters for clay cores of dams*, J.Geotechn.Engrg., Vol. 108(1), 17-31.

Witt, K.J., 1986, *Filtrationsverhalten und Bemessung von Erdstoff-Filtern*, Veröff. Institut für Boden- und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Germany.

Wilcock, P.R., 1988, Methods for Estimating the Critical Shear Stress of Individual Fractions in Mixed-Size Sediments, Water Resour. Res., Vol. 24(7), pp 1127-1135.

Wittman, 1981, Die analytische ermittlung der durchläßigkeit rolliger erdstoffe unter besonderer berücksichtigung des nichtlinearen widerstandsgesetzes der porenströmung, Veröff. Institut für Boden und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, 87.

Wolski, W., Fürstenberg, A., Mioduszewski, J., Reczek, J., 1970, *Protection against piping of Dam cores made of Flysh origin Cohesive Soils*, ICOLD, Montreal, Q36, R34, pp 575-585.

Wörman, A., 1989, *Riprap Protection without Filter Layers*, J.Hydr.Engrg, ASCE, 115(12), Dec.

Wörman, A., 1991, *Interfacial Sediment Transport*, Bulletin No. Trita-VBI-152, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Wörman, A., Olafsdottir, H., 1992, *Erosion in a Granular Medium Interface*, Journal of Hydraulic Reserch, Vol., No. 5, pp 1-17.

Wörman, A., Skoglund, M., 1992, *Overtopping of the Core in Rockfill Dams - Internal Erosion*, HydroPower 92, Lillehammer, Norway, June, A.A. Balkema, the Netherlands.

Ziems, J., 1968, Beitrag zur Kontakterosion nictbindiger Erdstoffe, Dissertetion TU Dresden.

Åberg, B., 1993, *Washout of Grains from Filtered Sand and Gravel Materials*, J. Geotech. Engrg, Vol 119(1), pp 36-53.

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR

Liksom i många andra länder har vi i Sverige omvärderattidigare metoder att bestämma dimensionerande flöden till dammanläggningar. Kraftindustrin och SMHI har genom arbetet i Flödeskommittén enats om nya riktlinjer för denna dimensionering. Riktlinjerna innebär i vissa delar ett nytt synsätt.

De nya riktlinjerna medför att högre tilltlöden än vad som tidigare antagits skall kunna hanteras. Tillämpningen av dessa riktlinjer kommer i flera fall att innebära att olika typer av åtgärder behöver vidtagas. Om dessa åtgärder och kombinationer av åtgärder inte planeras och genomförs omsorgsfullt och kompetent kan stora ekonomiska resurser förspillas utan att eftersträvad säkerhetshöjning uppnås.

För att klara denna komplicerade anpassningsprocess krävs kompetens och kunskap inom bland annat följande områden: hydrologi, teknik (bl a verklig avbördningsförmåga, teknisk förmåga att klara överdämning, luckors funktionssäkerhet och tillståndskontroll av dammar), säker driftsamverkan, brottkonsekvenser och beredskap samt riskanalys.

För att genomföra utredningar och utveckling inom dessa områden har VASO dammkommitté initierat ett antal projekt och föreliggande rapport redovisar ett av dem. Seriens huvudrapport (nr 1) ger en sammanfattande beskrivning av arbetet och innehåller även en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Rapporter kan beställas från: ELFORSK 101 53 STOCKHOLM Telefon: 08 - 677 25 30 Telefax: 08 - 677 25 35