

ELFORSK



BYGGFORSKNINGSRÅDET



DAMMSÄKERHET

Säkerhetsanalys av defekta filter

Flöde parallellt med filterytan

Rapport 99:12

DAMMSÄKERHET

Säkerhetsanalys av defekta filter

Flöde parallellt med filterytan

Rapport 99:12

DAMMSÄKERHET

Säkerhetsanalys av defekta filter

Flöde parallellt med filterytan



Andreas Nyberg och Anders Wörman

juni 1999

Sammanfattning

För att uppnå önskade krav på stabilitet och täthet är fyllningssdammar uppbyggda i flera sektioner med olika jord- och stenmaterial. Tät kärnan, filtren och stödfyllnaden samverkar för att ge önskade egenskaper. Risken för inre erosion i kontaktytorna mellan materialzonerna motverkas genom att åtskilja tät kärnan från stödfyllningen med ett eller flera filterskikt som dimensioneras enligt givna filterkriterier. På grund av differentialsättningar eller brister i byggförfarandet uppkommer dock vissa anomalier i filterkonstruktionen. Speciellt i filtren ovanpå tät kärnan brukar avvikelser från det geometriska filterkriterierna förekomma genom den valda designen. Intresset för erosion på tät kärnans ovansida tilltog i samband med att flödeskommitténs riktlinjer för dimensionerande höglöden presenterades [1]. En möjlighet ansågs vara att temporärt tillåta överströmning av tät kärnan och ovanpåliggande filter. Genom den utökade magasineringskapaciteten finns möjlighet att klara av en extrem flödestopp.

I de flesta filterkonstruktioner föreligger en risk för avvikelser från det geometriska filterkriteriet, och det är därför av stort praktiskt intresse att undersöka vilka konsekvenser detta kan få på konstruktionens totala stabilitet. Geometriska filterkriterier är framtagna med mycket stränga funktionskrav, vilket innebär en hög hydraulisk belastning, en kraftig mekanisk påverkan (vibrationer) och en liten erosionsförlust. Även när avvikelser från det geometriska filterkriteriet förekommer kan således konstruktionen ha en god funktion beroende på belastning och betydelsen av en mindre erosionskada. I den föreliggande rapporten beskrivs metoder att bestämma säkerheten hos filterkonstruktioner (endast filter- och basmaterial) som inte helt uppfyller det geometriska filterkriteriet, d.v.s. filtren är defekta. Tidigare undersökningar har huvudsakligen berört ensgraderade bas- och filtermaterial. Vid dammbyggen används däremot nästan alltid naturligt förekommande månggraderade material. För sådana material finns speciellt goda förutsättningar att de största kornstorleksfraktionerna fastnar i filterlagret och bidrar till en successiv filterbildning. Studien omfattar således inre erosion vid flöde parallellt med gränsytan mellan ett filter och ett månggraderat basmaterial.

Experiment har genomförts med mer varierande kvoter D_{15}/d_{85} och d_{100}/d_{85} än vad som tidigare gjorts. Diametrarna D_x och d_x är den kvadratiske siktstorlek som x procent av filter- respektive basmaterialets vikt passerar vid siktning. En säkerhetsanalys av defekta filter har utvecklats, i vilken hänsyn tas till olika specifika funktionskrav som hastighet i erosionsprocessen, graden av anomalier, acceptabel erosionsförlust och basmaterialets gradering. Filtrets funktionsduglighet betygssätts på en femgradig skala med ett särskilt säkerhetsindex.

Sex experiment har utförts där flödet har varit parallellt med gränsytan. Samtliga basmaterial har samma kornstorlek d_{85} , medan gradering av större kornstorleksfraktioner varierades. Kvoten d_{100}/d_{85} varierade i intervallet 1,2 – 8,0. Filtermaterialet har varit ensgraderat med en konstant kvot $D_{100}/D_0 = 2$ medan den för filtermaterialet karakteristiska kornstorleken D_{15} har varierat i intervallet 2,77 – 6,67. Ett experiment varade mellan 2 till 14 dagar. Under försöket gjordes stegvis

förändringar i den hydrauliska gradienten, vattenflödet och sedimentflödet vilka mäts vid olika tidpunkter.

Experimentresultaten visar att om vissa basmaterialkorn i storleksintervallet, $d_{85} - d_{100}$, är större än den kontrollerande porförträngningen så sker en successiv filterbildning och erosionen upphöra med tiden. Detta betyder att det konventionella geometriska filterkriteriet inte nödvändigtvis behöver uppfyllas i de fall då basmaterialets gradering i intervallet $d_{85} - d_{100}$ är sådan att åtminstone en liten andel av kornen fastnar i filtret.

Resultat från tidigare undersökningar antyder att transportintensiteten av basmaterialet varierar med den för erosion tillgängliga arean och hydraulisk belastning enligt (2.5) [19][23]. Den tillgängliga arean uppskattas med ekvationerna (2.6) och (2.15). Resultaten i figurerna 4.2.1 och 4.2.2 visar dock att sambandet mellan den för erosion tillgängliga arean i filterytan och erosionsdjup kan variera markant med basmaterialets gradering. Approximationen (2.15) bör ersättas med ett uttryck som även inkluderar kvoten d_{100}/d_{85} .

Ett speciellt säkerhetsindex för filterkonstruktioner (bas- och filtermaterial) har definierats på basis av olika fysikaliskt relevanta storheter. Säkerhetsindexet kan ligga till grund för en mer utvecklad riskanalys. Fyra faktorer har identifierats som viktiga för filtrets säkerhet. Dessa representerar hastigheten med vilken en erosionsstörning forplantar sig, det geometriska filterkriteriet och den kritiska hydrauliska gradienten med hänsyn till filterbildning. En fjärde faktor, som inte undersökts närmare i detta projekt, representerar graden av anomali i filterkonstruktionen.

Summary

Earth- and rockfill dams are constructed in several sections or zones of granular material, each zone with a specific purpose to achieve acceptable levels of stability and permeability of the structure. The central moraine core, the filters and the supporting rockfill interact in order to give the dam the desired capabilities. Separation of the core from the rockfill by one or several filters of sand and/or gravel counterbalances the risk of internal erosion along the contact surface between the material zones. Due to differential settlements or deficiencies in the construction procedure, however, certain defects or anomalies arise in the filter construction. Particularly, along the filter on top of the core, deviations from the geometrical filter criteria often exist because of the selected design. The interest for erosion in this section, above the core, increased rapidly in connection with the Swedish recommendations for design floods for dams that were proposed in 1990 [1]. One possibility to cope with the increased floods was considered to be temporary overtopping of the core or the sand filter above it [24]. By expanding the reservoir capacity in this way, flood peaks can be stored temporarily.

In most filter constructions there is a risk for deviations from the geometrical filter criterion and, therefore, the technical consequences of such expected defects on the overall stability of the dam have a significant practical interest. Geometrical filter criteria are developed on the basis of a high requirements of safety, which implies a large hydraulic load, heavy mechanical vibrations and a small loss of material by erosion. Hence, even if deviations from the filter criterion exist, the filter construction may possess an acceptable degree of safety depending on the actual load situation and the significance of a minor erosion damage. The current report describes suggested methods to determine the safety of filter constructions (interaction between filter layer and base material) that not entirely fulfil the geometrical filter criterion; i.e. the filter is defect. Previous investigations on defect filters have primarily been focused on uniformly graded base and filter materials. Dams, however, are predominately constructed by well-graded and naturally existing materials. For such materials, there is a high likelihood for some of the largest grain size fractions to clog the pore constrictions of the filter and for a progressive filter development. Thus, the study comprises internal erosion and filter development for a flow parallel with a horizontal surface between a filter layer and a well graded base material.

Experiments have been conducted with ratios of D_{15}/d_{85} and d_{100}/d_{85} varying in larger intervals than in previous investigations. The diameters D_x and d_x are the square sieve mesh sizes through which x percent by mass can pass through. Based on the experimental results, a safety assessment methods is proposed, which takes into account different aspects like time rate of change in erosion process, degree of inhomogeneities of materials, acceptable volume loss of material and grading of base material. The filter ability is graded on a scale from one to five in terms of a safety index that can be easily incorporated in a more general risk analysis.

Six experiments have been performed in which the flow was parallel with the interface between filter and base material. All base materials had the same grain size d_{85} , while the gradation of the larger size fractions was altered. The ratio d_{100}/d_{85} varied in the

range 1.2 – 8. The filter material was uniformly graded with a constant ratio $D_{100}/D_0 = 2$ and the grain size D_{15} was altered in the range 2.77 – 6.67. Each experiment had a duration of between 2 to 14 days. During the experiments, the hydraulic gradient was increased stepwise which led to corresponding increments in the discharge of both water and sediment from the base material. These mentioned properties of the process were frequently measured and their relationship was evaluated.

The experimental results indicate that if the base material grains in the size interval $d_{85} - d_{100}$ is larger than the pore constriction size a successive filter development occurs and erosion eventually ceases. This implies that the conventional geometrical filter criterion not necessarily needs to be fulfilled in cases when the gradation of the base material in the interval $d_{85} - d_{100}$ is such that a minor fraction of the grains clogs the filter.

Results from previous investigations indicate that the transport rate of the base material varies with the area available for erosion in the filter interface and the hydraulic gradient according to (2.5) [19][23]. The available area is determined by means of Eqns. (2.6) and (2.15). The results in Figs. 4.2.1 and 4.2.2 show, however, that the relationship between the available area and erosion depth can vary significantly with the gradation of the base material. The approximation (2.15) should be substituted by a relationship that includes also the ratio d_{100}/d_{85} .

A safety index for the filter structure (base and filter material) has been defined on the basis of different physically relevant factors. The safety index can be included in a more general risk analysis. Four factors have been identified as important to the safety of the filter. These factors represent the velocity by which a perturbation of the erosion propagates, the geometrical filter criterion and the critical hydraulic gradient with account taken to a successive filter development. A fourth factor, which is not closely examined in this study, represents anomalies (heterogeneities) of the filter material (e.g. in porosity).

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	1
2	TEORI.....	3
2.1	FILTERKRITERIER - ALLMÄNT	3
2.1.1	Geometrisk filterkriterier.....	3
2.1.2	Hydraulisk filterkriterier	3
2.2	KONSTITUTIVT TRANSPORTSAMBAND.....	4
2.2.1	Uniforma material	4
2.2.2	Månggraderade material.....	5
2.2.3	Typisk filterparameter J^*	6
2.3	SÄKERHETSANALYS.....	6
2.3.1	Säkerhetsindexet SI	8
3	MATERIAL OCH METODER	13
3.1	MATERIALET.....	13
3.1.1	Filtermaterialet.....	13
3.1.2	Basmaterialet.....	16
3.1.3	Experimenten.....	18
3.2	EXPERIMENTANLÄGGNINGEN	18
3.3	EXPERIMENTUTFÖRANDE	19
3.4	UTVÄRDERING AV MÄTDATA	20
3.4.1	Relativ area A / Igensatt area A_{klogg}	20
3.4.2	Typisk filterparameter J^*	21
3.4.3	Erosionsförloppet	21
3.5	SÄKERHETSINDEXET SI	23
3.5.1	Säkerhetsfaktorn SF_{K1}	23
3.5.2	Säkerhetsfaktorn SF_c	23
3.5.3	Säkerhetsfaktorn $SF_{J(kritisk)}$	24
4	RESULTAT.....	26
4.1	EROSIONSFÖRLOPPET	26
4.1.1	Sedimentflöde Q_M och hydraulisk gradient J	26
4.1.2	Transportintensitet som funktion av hydraulisk gradient.....	28
4.2	RELATIV AREA A / IGENSATT AREA A_{KLOGG}	29
4.3	TYPISK FILTERPARAMETER J^*	31
4.4	TRANSPORTFÖRLOPPET	32
4.4.1	K_f -värden.....	32
4.4.2	Degradering av basmaterialet.....	33
4.5	SÄKERHETSANALYS AV UNDERSÖKTA FILTERKONSTRUKTIONER.....	34
4.5.1	Säkerhetsfaktorn SF_{K1}	34
4.5.2	Säkerhetsfaktorn SF_c	34
4.5.3	Säkerhetsfaktorn $SF_{J(kritisk)}$	35
4.5.4	Säkerhetsindexet SI	35
5	PRAKTISKA IMPLIKATIONER	37
6	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	38
6.1	FILTRERINGSEFFEKTER	38
6.1.1	Transportintensitetens G versus hydraulisk gradient J	38
6.1.2	Relativ area A / Igensatt area A_{klogg}	38
6.1.3	Filterparametern J^*	39
6.2	DEGRADERINGEN AV BASMATERIALET	40

6.3	SÄKERHETSANALYSEN	40
6.3.1	Säkerhetsfaktorn SF_{K1}	40
6.3.2	Säkerhetsfaktorn SF_c	40
6.3.3	Säkerhetsfaktorn $SF_{J(kritisk)}$	40
6.3.4	Jämförelse mellan säkerhetsfaktorerna	41
6.4	SÄKERHETSINDEXET	41
6.5	FRAMTIDA UNDERSÖKNINGAR	41
6.6	DE VIKTIGASTE RESULTATEN	43
7	TACKORD	44
8	REFERENSER	45

Bilagor

A	EXPERIMENTRESULTAT	1
A.1	HYDRAULISK GRADIENT J OCH SEDIMENTFLÖDE Q_M	1
A.2	IGENSATT AREA A_{KLOGG}	7
A.3	RELATIV AREA A	7
B	SIMULERINGAR	8
B.1	SUCCESSIV DEGRADERING AV BASMATERIALET	8
C	ENDIMENSIONELLA TRANSPORTEKVATIONEN FÖR EROSION	9
C.1	HÄRLEDNING	9
D	BETECKNINGAR	12

1 Inledning

I Sverige används mängd sten- och jordfyllnadsdammar inom vattenkraften, totalt finns omkring 10.000 dammar i Sverige. Fyllningsdammar består av flera zoner av jordmaterial eller sten mellan vilka särskilda filterkriterier bör vara uppfyllda enligt givna dimensioneringsrekommendationer [16]. På grund av att fyllnadsmassorna kan separera i olika kornstorleksfraktioner under byggnadsskedet eller till följd av att anomalier uppkommer genom differentialsättningar av dammkroppen finns risk att filterkriteriet inte är uppfyllt enligt rekommendationerna på all ställen. Inre erosion kan då uppkomma. En särskild risk föreligger om tätkärnan eller dess ovanpåliggande filtermaterial överströmmas och erosion uppkommer i något av dessa material. Denna risk har aktualiserats genom senare tids hydrologiska undersökningar som indikerar att de dimensionerande högflödena har varit underskattade [1].

Det finns olika sätt att klara den ökade dimensionerande flödena. Dammkroppen kan byggas högre, utskovens kapacitet kan ökas och dämningssgränsen kan sänkas (i kombination med ändrat driftförfarande). Det alternativ som för närvarande genomförs på svenska vattenkraftanläggningar är att öka utskovens kapacitet så att de dimensionerande flöden kan avbördas. Ett annat mera ekonomiskt fördelaktigt sätt skulle kunna vara att utnyttja vattenmagasinets kapacitet för kortvariga flödesökningar och därigenom tillåta tillfällig överströmningar av tätkärnans krön. Överströmning av tätkärnan skulle även kunna inträffa oavsiktligt genom missbedömningar i lokala avrinnings- och väderförhållanden, fel i dimensioneringsmetodiker och fel i avbördningsanordningar.

Överströmningen medför ett flöde parallellt med den horisontella kontaktytan mellan två materialzoner, mellan tätkärnan och finfiltret eller mellan finfiltret och stödfyllningen. Huruvida det underliggande erosionsutsatta materialet, basmaterialet, kommer att erodera beror på filtrets förmåga att kvarhålla basmaterialet. Om det geometriska filterkriteriet inte är helt uppfyllt så kan en betydande mängd av basmaterialet erodera bort med ett eventuellt dammbrott som följd. Emellertid, är det geometriska filterkriteriet i hög grad konservativt, vilket beror på att en filterbildning ofta förekommer även för relativt stora avvikelser från filterkriteriet [18]. Även en obetydlig filterbildning leder ofta till att erosionen slutligen upphör efter att en tillräckligt stor mängd material har eroderats bort [23] [24].

En mängd undersökningar har tidigare utförts för att undersöka erosionen vid strömning parallellt med en horisontell filterytan [2][4][6][22][18]. I stort sett alla sådana experiment har dock bara behandlat ensgraderade filter- och basmaterial, trots att det nästan uteslutande är månggraderat material som används vid dammbyggen. Syftet med denna studie har således varit att undersöka månggraderade material i större omfattning än vad som omfattats i tidigare undersökningar. I detta arbete har sex stycken experiment och ett flertal belastningssituationer utförts inom intervallen $5,3 < D_{15}/d_{85} < 16,3$ och $1,2 < d_{100}/d_{85} < 8,0$.

Tidigare undersökningar av inre erosion i en gränsyta mellan ett bas- och ett filtermaterial vid strömning parallellt med den horisontella gränsytan har bara utförts för hydrauliska gradienter upp till 0,6 [4][6][18][22]. Vid nedströmskanten av tät kärnan, där överströmmande vatten faller fritt (vertikalt), erhålls dock en hydraulisk gradient på 1,0. Därför har det bedömts som viktigt att genomföra experiment i vilka den hydrauliska gradienten överskrider 1,0.

Ytterligare att mål med detta forskningsprojekt är att utveckla en metod med vilken det är möjligt att göra konsekvensanalys av defekta filter. I förteliggande rapport redovisas ett förslag till en sådan konsekvensanalys.

Erosion och filterbildning vid strömning parallellt med kontaktytan mellan två granulära material är ett vanligt förekommande problem i vattenresurstekniska anläggningar. Problemen har många praktiska implikationer, dels i fyllnadsdammar, men även i erosionsskydd av kanalbottnar, vågbrytare och erosionsskydd av bropelare. Av geometriska skäl upphör alltid erosionen runt t.ex. en bropelare [20] oavsett filterbildningen eftersom det finns ett maximalt möjligt erosionsdjup. I övriga fall så är det av yttersta vikt att filterbildningen fungerar på ett tillfredsställande sätt.

Det geometriska filterkriteriet innebär att en obetydlig erosion tillåts även under hydrauliska belastningar som vida överstiger de förhållanden som råder i alla praktiska tillämpningar [13] [14]. En viktig effekt som påverkar erosionen av månggraderade basmaterial är den succesiva igensättningen av basmaterialspartiklar i filtret. Denna effekt som på engelska kallas 'clogging' kan i vissa fall medföra att ett filter är funktionsdugligt i en viss definierad mening trots att det inte uppfyller det geometriska filterkriteriet. Det är denna typ av semi-funktionella filter som behandlas i detta arbete.

2 Teori

2.1 Filterkriterier - allmänt

2.1.1 Geometriska filterkriterier

Det första förslaget till ett geometrisk filterkriterium presenterades 1923 av Prinz [5]. Kriteriet definierade en kritisk kvot mellan de representativa kornstorlekarna för bas- och filtermaterialen för vilken basmaterialet precis var stabilt mot inre erosion. Prinz antog att såväl bas- som filtermaterialet bestod av sfäriska partiklar. Flera andra forskare har flöjt i hans spår. Både teoretiska och experimentella undersökningar har genomförts [12], [16] och [22].

Det geometriskt baserade filterkriteriet som allmänt ses som det gällande för dimensionering av vattenresurstekniska konstruktioner är det som presenterades av Terzaghi/Peck 1948 [5]. Det har under många år använts flitigt vid dimensionering av t ex stenfyllningsdammar och lokala erosionsskydd. Enligt kriteriet kräver stabiliteten att

$$D_{15} / d_{85} < 4 \quad (2.1)$$

där D_x och d_x är de kvadratiske siktstorlekarna som vid torrsiktning släpper igenom x viktprocent av kornen hos filter- respektive basmaterial. Då det geometriska filterkriteriet är helt uppfyllt kan den hydrauliska belastningen vara mycket hög utan att filterfunktionen brister. Ett flertal undersökningar har visat att filterkriteriet (2.1) har en säkerhetsfaktor på ~ 2 och att ett filter för uniforma basmaterial av friktionstyp fungerar tillfredsställande i de flesta praktiska fallen även för villkoret $D_{15}/d_{85} < 9$ [12][13][14]. Huvuddelen av de geometriska filterkriterierna är framtagna för ensgraderade material med ett flöde vinkelrätt mot filterytan. Trots detta så används kriterierna ofta även vid dimensioneringen av ett filter då strömningen är parallell med filterytan. Undersökningar har dock visat att kriteriet för ett fungerande filter vid strömning parallellt med filterytan är aningen restriktivare och ligger i intervallet $6 < D_{15}/d_{85} < 8$ [19]. Även detta kriterium gäller för ensgraderade och icke-kohesiva basmaterial.

2.1.2 Hydrauliska filterkriterier

I allmänhet är det dyrt och/eller svårt att uppfylla de geometriska filterkriterierna. Detta gör det intressant att kunna acceptera vissa avvikelser från det geometriska filterkriteriet och, som alternativ, införa den hydrauliska belastningen som en variabel i dimensioneringen. Då det geometriska filterkriteriet är uppfyllt kan gränsytan mellan bas- och filtermaterialet utsättas för hydrauliska gradienter ända upp till 1000 utan att några betydande mängder av basmaterialet eroderas bort. I en öppen akvifer (t ex en jord- eller stenfyllningsdamm) uppgår dock gradienten som högst till 1,0 och det kan således vara motiverat att ta med den hydrauliska belastningen som en variabel i ett dimensioneringsförfarande. Eftersom de hydrauliska filterkriterierna endast är giltiga för basmaterial som är geometriskt instabila och framför allt hålls på plats av tyngdkraften, är det speciellt viktigt att kunna definiera ett kritiskt villkor för begynnande erosion. En mängd olika definitioner för begynnande erosion går att finna inom litteraturen

[4][6][21][22], och dessa har olika användbarhet inom olika tillämpningar. Undersökningar har inriktats både mot filterbildning flöde vertikalt mot och parallellt med filterytan.

Ett kriterium, likt det geometriska filterkriteriet, men som tar med den hydrauliska belastningen som en variabel kan skrivas på formen [19]:

$$\left(\frac{D_{15}}{d_{85}} \right)_{cr} = F(J^*) \quad (2.2)$$

där J^* är en dimensionslös belastningsparameter (definieras senare). Belastningsparametern är bland annat en funktion av den dimensionslösa transportintensiteten G^* (definieras senare). Genom ekvation (2.2) ovan definieras ett kriterium för vilket filtret dimensioneras med hänsyn till rådande belastning men även under övervägande vilket sedimentflöde som kan accepteras. Introduktionen av G^* kan motiveras genom att även en mycket låg transportintensitet kan i vissa fall medföra avsevärda konsekvenser efter en lång belastning.

Wörman & Olafsdottir [18] och Wörman [23] har tagit fram uttryck för den dimensionslösa transportintensiteten G^* som en funktion av bland annat den hydrauliska belastningen J . Det är från dessa studier som den teoretiska delen av detta arbete bygger vidare på.

2.2 Konstitutivt transportsamband

I avsnitten ovan framgår att dimensioneringen av erosionsskydd för ensgraderade material är välundersökt. Det finns en mängd experimentella såväl som teoretiska undersökningar av ensgraderade friktionsmaterial medan filterbildningsprocessen för månggraderade material inte är så välundersökt, varken experimentellt eller teoretiskt.

Den teoretiska delen av detta arbete bygger vidare på teorin av Wörman & Olafsdottir [18] och Wörman [23], där materialtransporten beskrivs av ett semiempiriska samband som baseras på grundläggande fysikaliska mekanismer. Osäkerheter i härledningen representeras med empiriska koefficienter som bestäms ur experiment.

2.2.1 Uniforma material

De konstitutiva transportsamband som presenteras i denna rapport bygger på teorin för sedimenttransport i kanaler. Inom detta område brukar man vanligen teckna transportintensiteten som en funktion av skärspänningen som det strömmande vattnet orsakar längs botten och ett för basmaterialet karakteristiskt Reynolds tal [7][11][15].

För ensgraderade, icke-kohesiva bas- och filtermaterial med en horisontell kontaktyta, där flödet är parallellt med ytan kan transportintensiteten, enligt [18], tecknas på en dimensionslös form som

$$G^* = n_1 (4.48 \tau^*)^{12} \quad (2.3)$$

i vilken $G^* = G / (V d_{85})$, G är transportintensiteten uttryckt som volymflödet av partiklar per enhetsbredd [$m^3/(m \cdot s)$], porvattenhastigheten $V = q/n$ [m/s], q är flödet per areaenhet, ρ är vattnets densitet, τ är skärspänningen mot botten, n_1 är filtermaterialet porositet och 85%-fraktilen för basmaterialet betecknas d_{85} . Vidare definieras parametern

$$\tau^* = \frac{\frac{e_1}{8} D_H J}{(S_s - 1) d_{85}} \quad (2.4)$$

i vilken portalet hos filtermaterialet ges av e_1 , den hydrauliska gradienten har beteckningen J , S_s är kvoten mellan partiklarnas och vattnets densitet ($S_s \sim 2.65$), och den harmoniska projicerade diamatern hos filtermaterialet betecknas D_H . Definitionen (2.4) återspeglar kvoten mellan destabiliserande krafter på ett korn i basmaterialet, orsakade av vattenflödet, och stabiliserande krafter på partikeln, orsakade av dess nettotyngd. Ekvationerna (2.3) gäller bara inom vissa undersökta parameterintervall. Den största begränsningen av ekvationernas användbarhet är att sambandet bara är verifierade för hydrauliska gradienter upp till 0,3. Som en jämförelse kan nämnas att den hydrauliska gradienten J vid nedströmskanten av tätkärnan är lika med 1,0 eftersom vattnet här faller fritt.

2.2.2 Månggraderade material

Enligt de geometriska filterkriterierna ovan, och även för transportekvationen (2.3), definieras basmaterialets egenskaper av endast en korndiameter, d_{85} . Detta fungerar bra för relativt ensgraderade material, medan filteregenskaperna för ett mera månggraderat basmaterial kan variera markant med kvoten d_{100}/d_{85} . Om vissa av de allra största kornen fastnar i porkanalernas förträngningar finns förutsättningar att en fungerande filterkaka slutligen bildas. Materialförlusten kan dock bli betydande. För mera månggraderade basmaterial och ensgraderade filtermaterial kan ekvationen (2.3) skrivas om så att en sådan successiv igensättning av basmaterialet i filtret tas i beaktande. Ekvationen (2.3) kan skrivas om på följande form

$$G^* = A (4.48 \tau^*)^{12} \quad (2.5)$$

där A betecknar den relativa arean (andel av total area) som vid gränsytan är tillgänglig för erosion. Observera att skillnaden mellan ekvationerna (2.3) och (2.5) är att n_1 i ekvation (2.3) har bytts ut mot A i ekvation (2.5). Den relativa arean är följaktligen lika med porositeten n_1 av det grövre materialet då ingen filtreringseffekt förekommer. Den relativa beror på hur mycket basmaterial som eroderats bort enligt [23]

$$A = \left(n_1 - \epsilon \frac{\eta}{1 - \eta} \frac{d_{85}}{d_{cl}} \frac{\xi}{d_{85}} \right) \quad (2.6)$$

där ε är en empirisk koefficient i intervallet 0-2 som dels beror av andelen eroderade korn som fastnar i filtret och dels av deras orienteringen när de fastnat i filtret. Erosionsdjupet hos basmaterialet betecknas ξ och ges av eroderad volym av basmaterialet per enhetsbottenarea. Medelkornstorleken hos de igensatta kornen betecknas d_{cl} och koefficienten η betecknar volymandelen eroderade korn.

2.2.3 Typisk filterparameter J^*

Stabilitetsanalyser av basmaterialet visar att en typisk belastningsparameter i sambandet (2.2) kan tecknas [18][23]

$$J^* = J \left(\frac{\frac{e_1}{8} \frac{1}{S_s - 1}}{\text{Re}(d)^{-0.14} \left(\frac{G}{n_1} \right)^{0.085}} \right) \quad (2.7)$$

där exponenterna -0,14 och 0,085 är empiriskt bestämda koefficienter i de tidigare undersökningar och $\text{Re}(d)$ är ett för basmaterialet karakteristiskt Reynolds tal. Sambandet (2.2) är oberoende av det relativa erosionsdjupet (ξ/d_{85}) i de fall då ingen "filtereffekt" förekommer, medan den kritiska belastningen går mot oändligheten då "filtereffekten" är stor.

2.3 Säkerhetsanalys

I det fall det överhuvudtaget förekommer ett filter ovanpå tätkärnan i en fyllningsdam så är sällan det geometriska filterkriteriet (2.1) uppfyllt mot den ovanpåliggande stödfyllningen. Ofta förekommer inget filter alls. Ett huvudsyfte med övertäckningen av tätkärnan är att under vinterhalvåret minimera risken för tjälning i tätkärnan. Härigenom finns en risk för erosion vid överströmning av tätkärnan eller ovanpåliggande filter. Risken accentueras genom att fyllningsdammar, av byggnadstekniska skäl, alltid är något inhomogena [30]. Heterogeniteten innebär att vissa delar av en damm är särskilt känsliga för en eventuell överströmning, och det är här som en erosionskada uppkommer. Ett filter som i det stora hela är funktionsdugligt kan således p g a heterogenitet lokalt ses som ett defekt filter. Den föreliggande rapporten innehåller därför ett provande förslag till en säkerhetsanalys av defekta filter som bland annat bygger på de teoretiska och experimentella resultat som tagits fram i projektet.

En riskanalys innehåller i regel ett hänsynstagande till både sannolikheten för en inträffad händelse och konsekvensen av händelsen. Följande enkla samband brukar ibland användas vid en riskanalys:

$$\text{Risk} = \text{Sannolikhet} \times \text{Konsekvens} \quad (2.8)$$

där sannolikheten ofta anges i procenttal och konsekvensen värderas i monetära termer. I andra sammanhang eller genom vissa relationer med (2.8) används en riskskala, exempelvis 1-5, där 1 kan innebära mycket hög risk medan 5 innebär mycket låg risk.

I denna rapport presenteras inte en fullständig riskanalys utan endast en säkerhetsanalys av bas-filtermaterialen. Säkerheten definieras i form av ett index, graderad mellan 1 och 5, som anger hur väl filterkonstruktionen kommer att fungera under förutsättning av en referensbelastning (se avsnitt 2.3.1). Fig. 2.3.1 visar schematiskt hur en fullständig riskanalys av en filterkonstruktion kan vara upplagd. Om belastningen förändras, förändras även sannolikheten att en betydande inre erosion uppkommer. Den föreliggande säkerhetsanalysen har begränsats till faktorn bedöma säkerheten av enbart filterkonstruktionen.

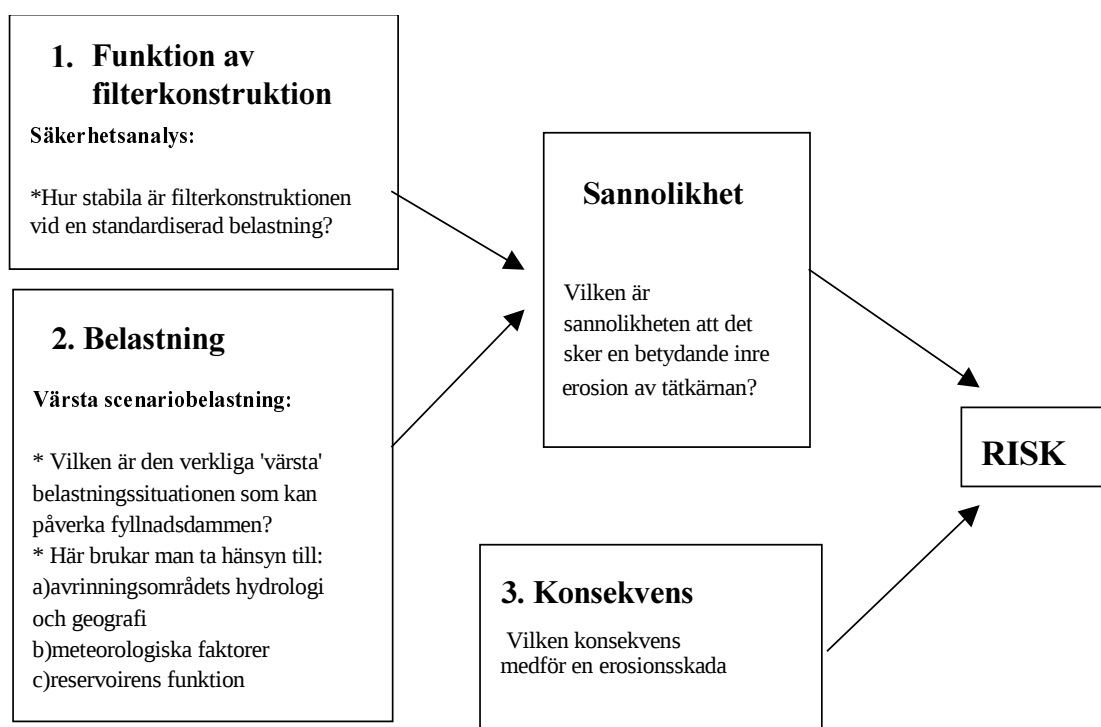


Fig 2.3.1 Ett hypotetiskt riskanalyschema som avgränsats att gälla defekter i enbart filterkonstruktionen i en fyllnadsdamm.

En förutsättning för säkerhetsanalysen som görs i detta är således att sannolikhetstermen i sambandet (2.8) kan delas upp i två separata delar (se figuren ovan). Genom att analysera enbart filterfunktionen på ett anpassat sätt skapas förutsättningar att fortsätta riskanalysen i framtida undersökningar. Sannolikhetsbegreppet kan analyseras i följande två steg

- 1) Materialens säkerhet (görs i detta arbete)
- 2) Verklig belastningssituation i en fyllnadsdamm (ej i detta arbete)

Man tänka sig en situation där filtret ovan tätkärnan i en fyllnadsdamm är mycket defekt, se del 1) i Fig. 2.3.1. Detta innebär att säkerheten av filtret i den föreliggande

rapporten bedöms som låg. Om samtidigt belastningssituationen, se del 2) i Fig. 2.3.1, av olika skäl (t ex hydrologiska, geografiska eller meteorologiska) är sådan att temporär överströmning i det närmaste är omöjlig så blir den sammanlagda sannolikheten liten, p.g.a. 1) och 2), för att en betydande inre erosion skall inträffa.

2.3.1 Säkerhetsindexet SI

Målet med säkerhetsanalysen är att i form av ett säkerhetsindex, SI, och med hjälp av formaliserade metoder kunna uttrycka filtermaterials funktionsduglighet på en relativ skala mellan mycket låg säkerhet till mycket hög säkerhet. Indexvärdet kan inkluderas i en mer fullständig riskanalys. Säkerhetsindexet baseras på flera olika analysmetoder som har formaliserats i fyra punkter:

1. Endimensionella transportekvationens K_1 - värde (förklaras i avsnitt 2.3.1.1). Detta värde beskriver hur snabbt en erosionsstörning på tät kärnan ena kant fortplantar sig tvärs över tät kärnan.
2. Förhållanden mellan basmaterialens d_{85} och d_{100} och filtermaterialets D_c (avsnitt (2.3.1.2)). Dessa värden avgör hur väl det geometriska filterkriteriet är uppfyllt.
3. Den kritiska hydrauliska gradienten $J_{kritisk}$ (avsnitt (2.3.1.3)). Detta värde avgör effekten av en successiv filterbildning vid en betydande materialförlust.
4. Heterogenitet i dammens byggnadsmaterial (avsnitt (2.3.1.4)). Detta avgör sannolikheten för att en lokal erosionskada kan uppkomma i någon sektion längs tät kärnans krön.

De tre första säkerhetsfaktorerna kan betraktas som varandes delvis alternativa, d.v.s. de uttrycker olika aspekter av hur väl en homogen filterkonstruktion fungerar, medan den fjärde säkerhetsfaktorn är speciellt värdefull som en kompletterande information. Redan här kan nämnas att den fjärde säkerhetsfaktorn, d v s heterogenitetseffekter, inte studeras i detta arbete. I framtida undersökningar är det dock av största vikt att även ta anomalier i beaktande. Intervallgränser för de tre första säkerhetsindexena presenteras i avsnitt 3.5. Det sammanvägda säkerhetsindexet tas som det lägst erhållna värdet. Säkerhetsindexet SI, varierar mellan 1-5 enligt följande skala:

1. Mycket låg säkerhet
2. Låg säkerhet
3. Måttlig säkerhet
4. Hög säkerhet
5. Mycket hög säkerhet

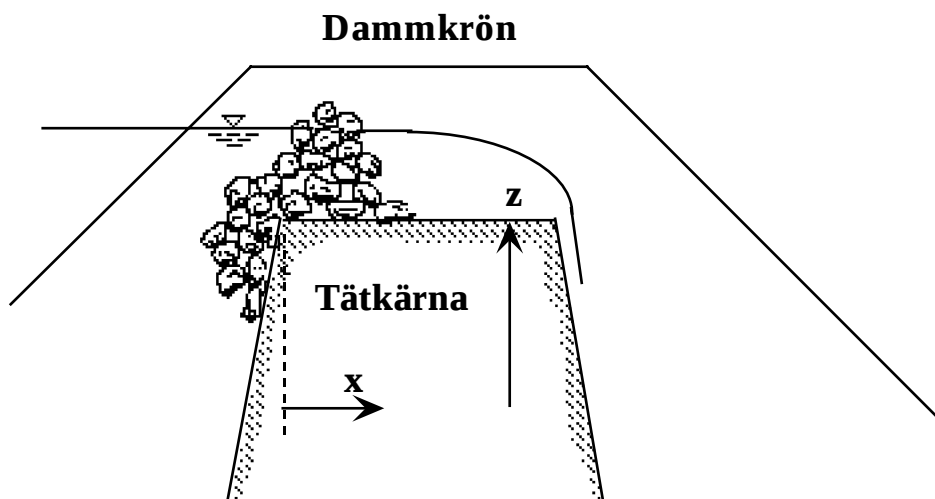


Fig. 2.3.1.1.1 Schematisk bild av överströmning av den centrala tätkärnan i en fyllnadsdamm.

2.3.1.1 Endimensionell transportekvation – koefficienten K_1

Erosionen som uppkommer på tätkärnans krön vid en eventuell överströmning kan beskrivas i en endimensionell form tvärs över tätkärnan. Målet är att beskriva variationen i tid, t , och rum, x , av transportintensiteten och filterytans nivå, z (Fig. 2.3.1.1.1). Följande samband för vattenströmningen och sedimenttransporten kan användas för att beskriva erosionsprocessen [18]

1. Rörelseekvationen för vattenflödet i det porösa materialet ovanpå tätkärnan (man antar att tätkärnan är en tät yta)
2. Kontinuitetsekvationen för vattnet
3. Empiriskt transportsamband för tätkärnans material
4. Kontinuitetsekvationen för tätkärnans material

Ett liknande system kan ställas upp om erosionen uppkommer i ett filterlager ovanpå tät kärnan [24]. För de experimentella förhållandena kan man anta att likformig strömning råder vilket avsevärt förbättrar möjligheten att hitta analytiska lösningar för det uppställda problemet. Om man antar att likformig strömning råder kan transportintensitetens variation skrivas på formen av värmeledningsekvationen [34]

$$\frac{\partial G}{\partial t} + K_1 \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} = 0 \quad (2.9)$$

där K_1 beskriver ett samband mellan transportintensitet och hydraulisk gradient enligt

$$K_1 = - \frac{1}{1 - n_2} \frac{\partial G}{\partial J} \quad (2.10)$$

En härledning av (2.9) redovisas i Appendix C. Ekvationen (2.9) kan lösas analytiskt i de fall då K_1 varierar på ett enkelt sätt med x och t , speciellt om K_1 är konstant. Koefficienten K_1 motsvarar värmeledningskoefficienten och uttrycker därför hur snabbt en störning i erosionsintensiteten fortplantas över tätkärnans krön. En likande ekvation (på formen av värmeledningsekvationen) kan även tecknas för nivån z . Hur snabbt en störning fortplantas beror således på basmaterialets porositet och uttrycket $\partial G/\partial J$. Det senare sambandet kan bestämmas experimentellt. I regel har det en markant olinjär natur.

2.3.1.2 Maximala porförträngningar

Ett flertal undersökningar har behandlat hur fördelningskurvan för ett kornmaterials hålrum kan relateras till materialets kornstorleksfördelning [26][27][17][29][25]. I flertalet av de refererade artiklarna presenteras även uttryck för hur maximala porförträngningar kan beräknas från kända kornstorleksfördelningar. Den maximala porförträngningen hos ett filtermaterial definieras som den största partikeldiameter hos basmaterialet som kan transporteras genom filtret utan att fastna. Den maximala porförträngningen varierar i alla riktningar (x - y - z), men den antar ett konstant värde då en partikel färdats en tillräckligt lång sträcka genom filtret (det s k penetrationsdjupet) [17]. Den maximala porförträngningen kallas också för den kontrollerande hålrumsstorleken.

Witt [17] uttrycker den maximala porförträngningen genom statistiska analyser som verifierades med empiriska undersökningar. Den maximala porförträngningen hos ett filtermaterial ges som

$$D_c = 0.27 D_{50(\text{by number})} \quad (2.11)$$

där $D_{50(\text{by number})}$ är diametern då 50 % av filtermaterialets partiklar har passerat en kvadratisk sikt med samma öppningsdiameter. Det oklart av Witt's rapportering för vilka graderingar ekvation (2.11) är giltig.

Undersökningarna av Kenney och Lau [26] samt Kenney et al. [27] visar att den maximala porförträngningen framförallt beror på de finare kornstorleksfraktionerna. De uttryck som de föreslår baseras på volymviktade diametrar och kan användas för att beräkna maximala porförträngningar även för månggraderade filter. Följande uttryck presenteras för maximala porförträngningar [10]:

$$D_c = 0.20 D_{15(\text{by volume})} \quad (2.12)$$

$$D_c = 0.25 D_{5(\text{by volume})} \quad (2.13)$$

där D_{15} och D_5 är den kvadratiske siktdiametern då 15 respektive 5 % av materialvolymen har passerat genom sikten.

2.3.1.3 Kritisk hydraulisk gradient $J_{kritisk}$

Den kritiska hydrauliska gradient som här presenteras tar hänsyn både till relativt erosionsdjup ξ/d_{85} och transportintensitet G^* . Den är framtagen ur ekvationerna (2.5) och (2.6) och beräknas på följande sätt [23]

$$J = \left(\frac{G^*}{n_1 - 0.37 \left(\frac{\xi}{d_{85}} \right)^{0.025}} \right)^{1/12} \left(\frac{(S_s - 1) d_{85}}{4.48 \frac{e_1}{8} D_H} \right) \quad (2.14)$$

Uttrycket för den relativa arean A i uttrycket ovan har erhållits genom följande empiriskt funna samband [19][23]:

$$\varepsilon \frac{\eta}{1 - \eta} \frac{d_{85}}{d_{cl}} = 0.37 \left(\frac{\xi}{d_{85}} \right)^{-0.9749} \quad (2.15)$$

För att bestämma den kritiska gradienten $J_{kritisk}$ sätts värden på materialparametrarna (S_s , D_H , d_{85} , e_1 och n_1), tillåtna värden på G^* och ξ/d_{85} in i ekvation (2.14).

2.3.1.4 Heterogenitetseffekter

Av olika orsaker så är sällan det byggnadsmaterial som används i en fyllnadsdamm homogent. Undersökningen av Carlsten et al. [30] visar att heterogeniteten ofta är betydande. Sådana anomalier kan medföra lokala avvikelser från t ex geometriska filterkriterier trots att kriteriet kan anses vara uppfyllt baserat på medelvärden för materialegenskaperna. Det är således väl motiverat att göra geostatistiska analyser av kovariansen för parametrar såsom porositet och de karakteristiska diametrarna d och D . I denna rapport studeras inte kovariansen explicit i säkerhetsanalysen, men en kort beskrivning av hur heterogeniteten kan kvantifieras ges i det nedanstående.

Auto-kovariansen är ett mått på hur en viss storhet samvarierar beroende på separationsavstånd mellan observationerna. Om auto-kovariansen är noll för ett visst separationsavstånd föreligger ingen samvariation, vilket innebär att två observationer är helt slumpmässiga i förhållande till varandra. När separationsavståndet minskar, ökar sannolikheten att observationerna antar liknande värden. Högst kovarians uppnås när separationsavståndet går mot noll. Kovariansen är då lika med variansen. Auto-kovariansen för porositeten $n(x)$, definieras enligt [8][9]:

$$\text{Cov}[n(x), n(x+s)] = E[(n(x) - \mu_n(x)) (n(x+s) - \mu_n(x+s))] \quad (2.16)$$

där $\mu_n = E[n]$ är väntevärdet av n , s är separationsavståndet för de studerade punkterna och $E[\dots]$ betecknar en väntevärdesoperation. Som påpekats, vid separationsavståndet $s=0$ övergår kovariansen i variansen. Kovariansen minskar med ökande s enligt Fig. 2.3.1.4.1 och då avståndet s är lika med korrelationslängden l så är porositeten i de två punkterna oberoende av varandra.

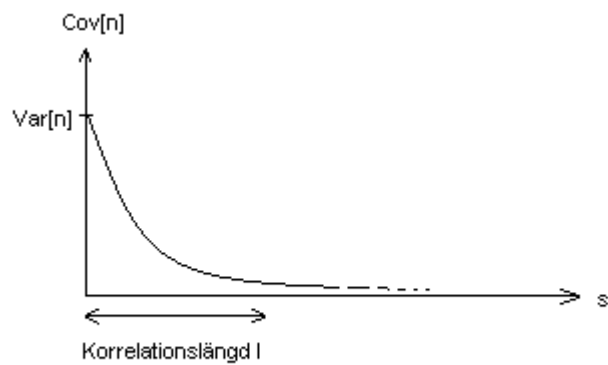


Fig 2.3.1.4.1 Ett typiskt utseende på ett kovariansdiagram

I en framtida fortsättning av detta projekt skulle det vara intressant att undersöka kovariansen av olika parametrar. Det är t.ex tänkbart att koefficienten K_1 i (2.10) kan uppfattas som en rumsligt slumpmässig variabel som beskrivs med geostatistik av den typ som visas i Fig. 2.3.1.4.1. Slumpmässigheten påverkar både det väntevärdesbildade förloppet och osäkerheten i medelvärde. Metoder för att analysera liknande slumpmässiga förlopp ges av [31][32][35].

3 Material och metoder

3.1 Materialet

Vid filterexperiment av den typ som genomförs i denna undersökning är det relativt enkelt att handsikta filtermaterialet. Ju finkornigare materialet är desto längre sikttid krävs per volymsenhet material. Basmaterialet har därför siktats med hjälp av en maskinell anordning, en Gillsonskakare, i ett samarbete med Sveriges Geologiska Undersökning (SGU). Filtermaterialet har dessutom tvättats 2 gånger för att bli av med finpartiklar.

3.1.1 Filtermaterialet

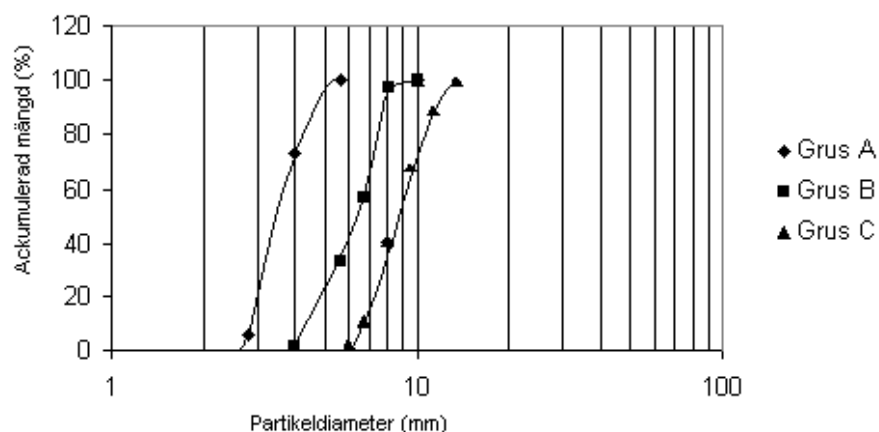
Tre olika ensgraderade filtermaterial bestående av granitsingel har använts i intervallet 2,5 – 12,0 mm. Filtermaterialen har haft en konstant kvot $D_{100}/D_0 = 2$. I tabellen (3.1.1.1) ges olika typiska storheter för de tre undersökta filtermaterialen. Materialens porositet n_1 och den inom filterteorin så karakteristiska korndiametern D_{15} anges i tabellen. Porositeten n_1 bestämdes genom att vattenmätta ett ursprungligen torrt prov av granitsingel med en känd volym, V_T , genom att tillsätta en viss volym vatten, V_w . Med kännedom om båda dessa kan porositeten enkelt bestämmas ur

$$n = \frac{V_w}{V_T} \quad (3.1)$$

Porositeten är ganska lika för de tre materialen och ligger i samtliga fall inom intervallet 0,40 – 0,42. Siktkurvorna för filtermaterialen har liknande utseende (Fig. 3.1.1.1). Genom dessa noggranna kontrollsiktningar kunde andelen material som låg utanför de intervallgränser som ges i tabellen bestämmas till mindre än tre procent för samtliga material.

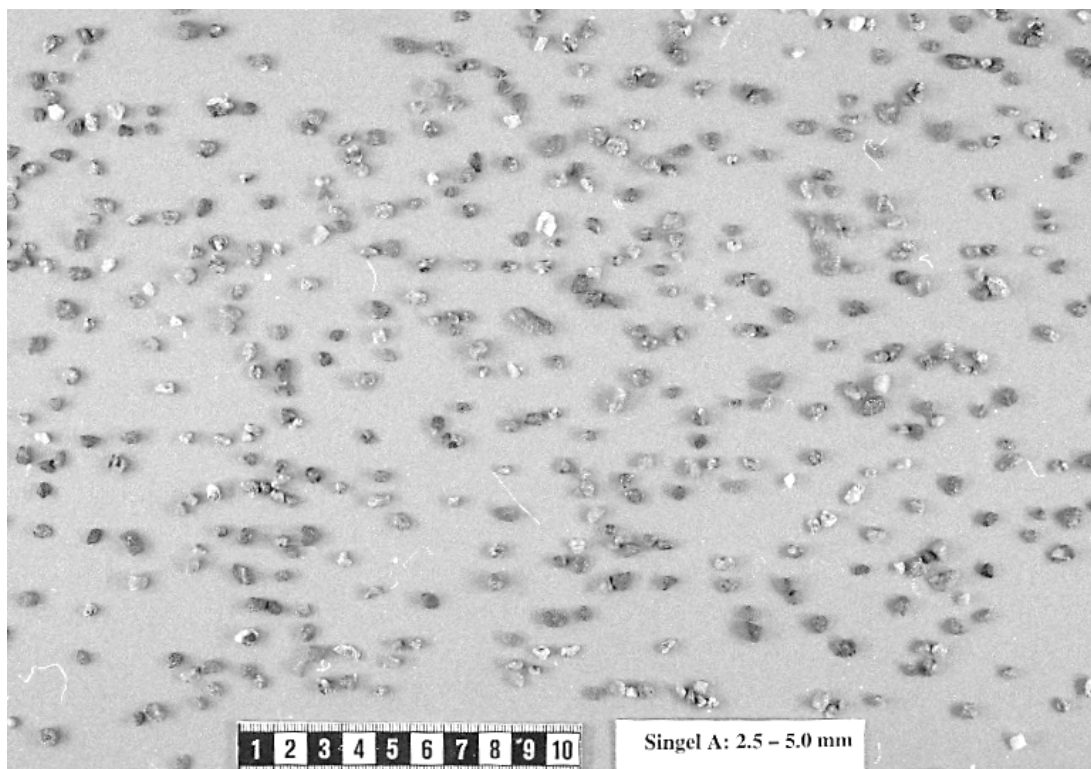
<i>Material</i>	<i>Kornstorleksintervall (mm)</i>	<i>D_{15} (mm)</i>	<i>Porositet n_1</i>
Singel A	2,5 – 5,0	2,67	0,42
Singel B	4,0 – 8,0	4,44	0,41
Singel C	6,0 – 12,0	6,67	0,40

Tabell 3.1.1.1 Sammansättningen av de olika filtermaterialen. Gemensamt för de tre materialen är att de har samma kvot $D_{100}/D_0 = 2$.

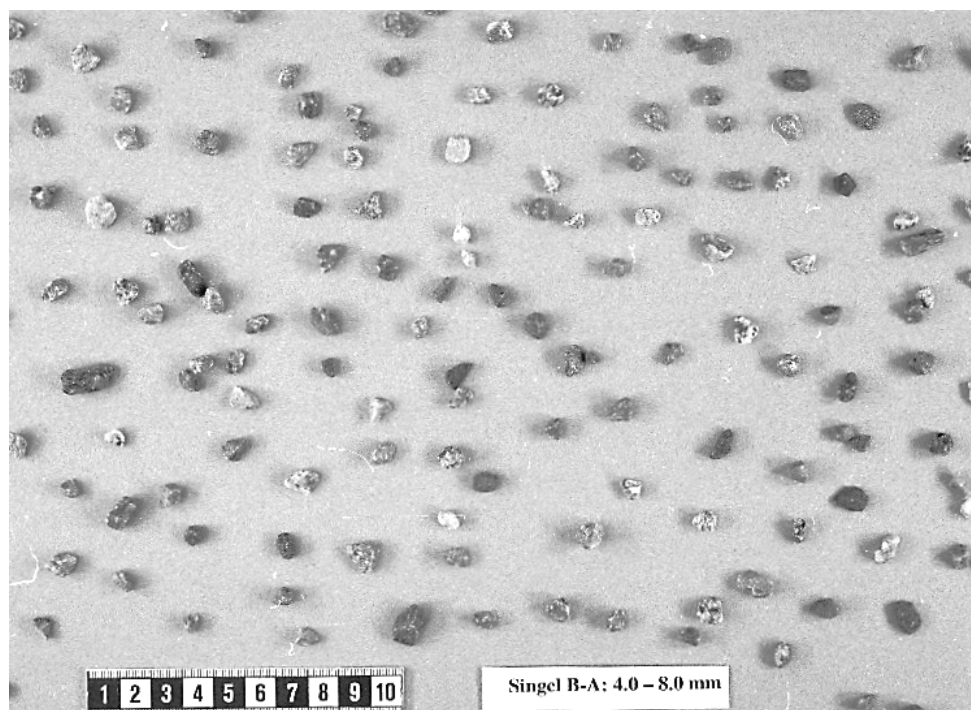


Figur 3.1.1.1. Siktcurvor för filtermaterialiet.

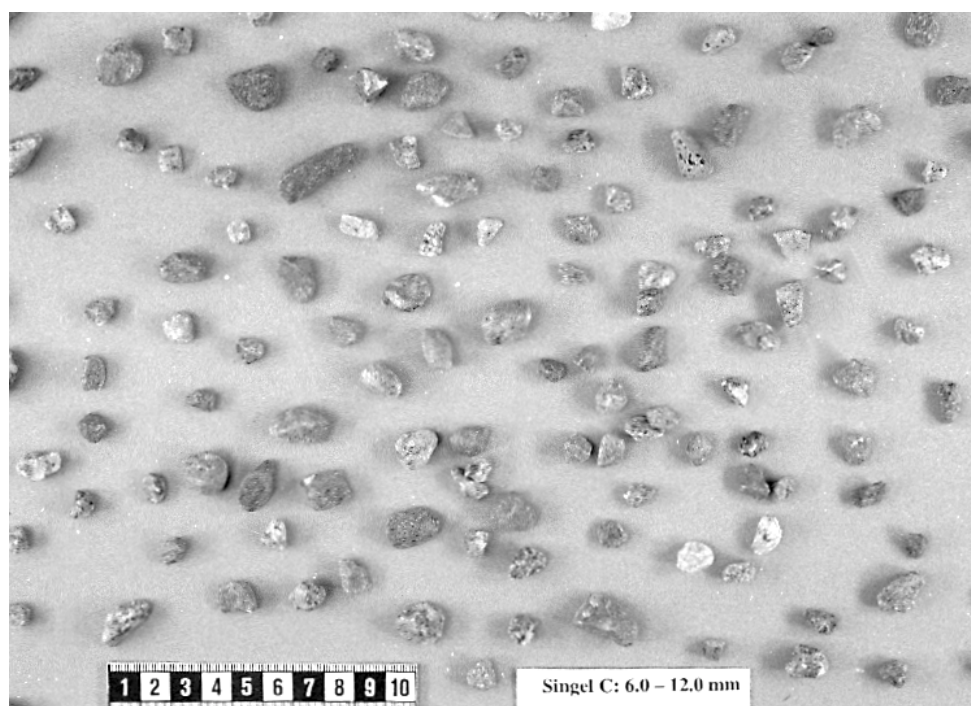
Eftersom filtermaterialiet är av natursingeltyp, d v s rullstensgrus, så har de alla en ganska liknande, rundad kornform. De olika filtermaterialens (A-C) kornform kan ses i Figurerna 3.1.1.2 – 3.1.1.4.



Figur 3.1.1.2. Fotografi av filtermaterialiet Singel A (2,5 – 5,0 mm)



Figur 3.1.1.3. Fotografi av Singel B (4,0 – 8,0 mm)



Figur 3.1.1.4. Fotografi av Singel C (6,0 – 12,0 mm)

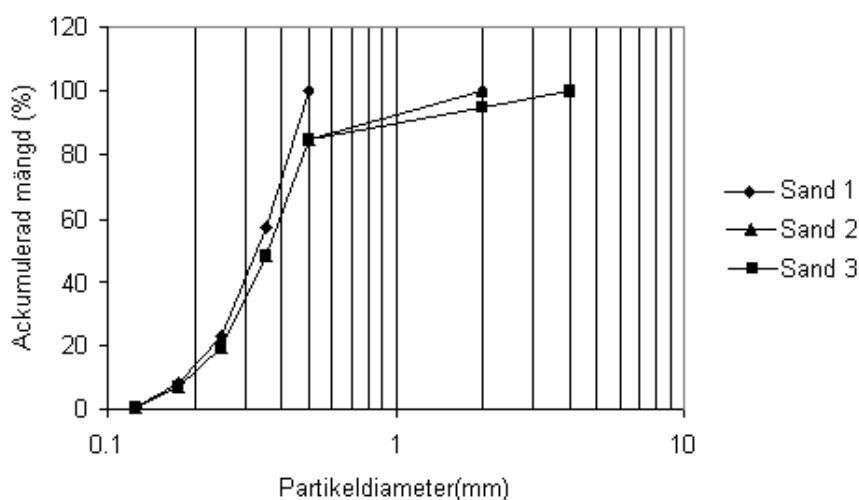
3.1.2 Basmaterial

Till basmaterial valdes ett sandmaterial med så hög kvartshalt som möjligt. Tanken med detta var att minimera betydelsen av sekundära faktorer som kan påverka försöksresultatet. Ett sandmaterial (benämns Silversand av leverantören) användes med en kvartshalt på över 97 procent. Tre olika typer av basmaterial användes: sand 1, sand 2 och sand 3 med olika fördelning bland de största kornstorlekarna (Se Tabell 3.1.2.1). Kornstorleksfördelningarna har utformats så att korndiameter d_{85} var densamma för alla tre material. Fördelningarna skiljer endast i intervallet $d_{85} - d_{100}$, där kvoten d_{100}/d_{85} varierades inom intervallet 1,2 – 8,0.

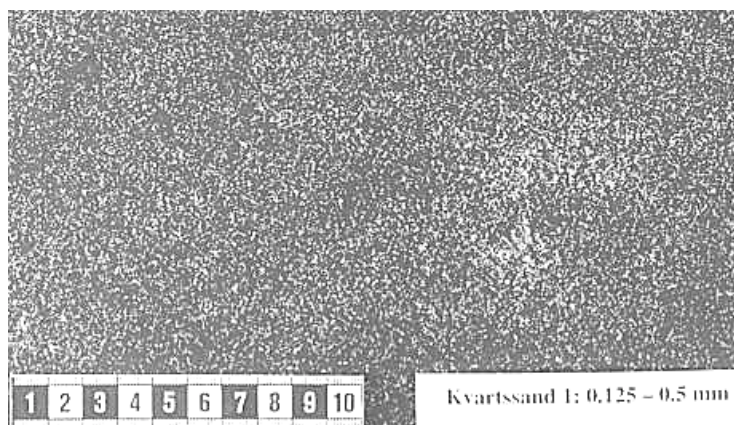
Material	Intervall (mm)	d_{85} (mm)	d_{100}/d_{85}
Sand 1	0,125 – 0,5	0,41	1,2
Sand 2	0,125 – 2,0	0,50	4,0
Sand 3	0,125 – 4,0	0,50	8,0

Tabell 3.1.2.1 Sammansättningen av de olika basmaterialen. Materialen har liknande d_{85} , medan kvoten d_{100}/d_{85} varierar mellan 1,2 – 8,0.

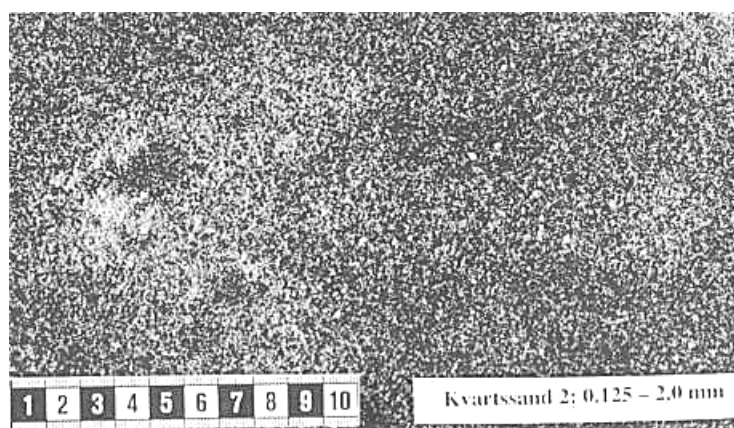
Basmaterialen tillverkades genom att blanda lämpliga andelar från intervallen 0,125 – 0,5, 0,5 – 1,0, 1,0 – 2,0 samt 2,0 – 4,0 mm. Materialet i samtliga dessa intervall var kvartssand (Silversand) utom i intervallet 2,0 – 4,0 mm, där det inte gick att hitta kvartssand. I detta intervall användes granitsingel, vilket innebär en viss variation av kornform (dock ej densiteten i nämnvärd utsträckning). Troligen är dock denna felfaktor försumbar. En kontrollsiktning visade att andelen material som låg utanför givna intervallgränser var mycket liten. Siktningskurvor för basmaterialen visar dock att svansen hos de tre materialen varierar något, se Fig. 3.1.2.1 nedan. De olika basmaterialens sammansättning och även lite grann av deras kornform kan ses i figurerna 3.1.2.2 – 3.1.2.4. En ännu bättre uppförstoring än den som har använts hade gett tydligare indikation på kornform.



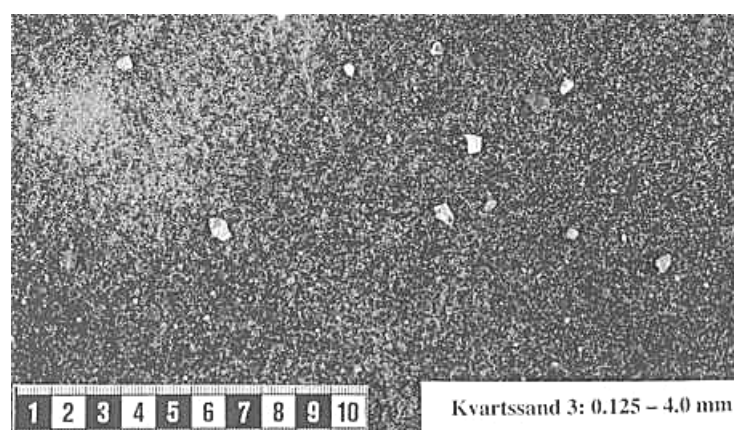
Figur 3.1.2.1. Siktkurvor för basmaterial.



Figur 3.1.2.2. Fotografi av Sand 1 (0,125 – 0,5 mm)



Figur 3.1.2.3. Fotografi av Sand 2 (0,125 – 2,0 mm)



Figur 3.1.2.4. Fotografi av Sand 3 (0,125 – 4,0 mm)

3.1.3 Experimenten

I de sex experiment som har utförts i detta arbete har följande bas- och filtermaterial använts:

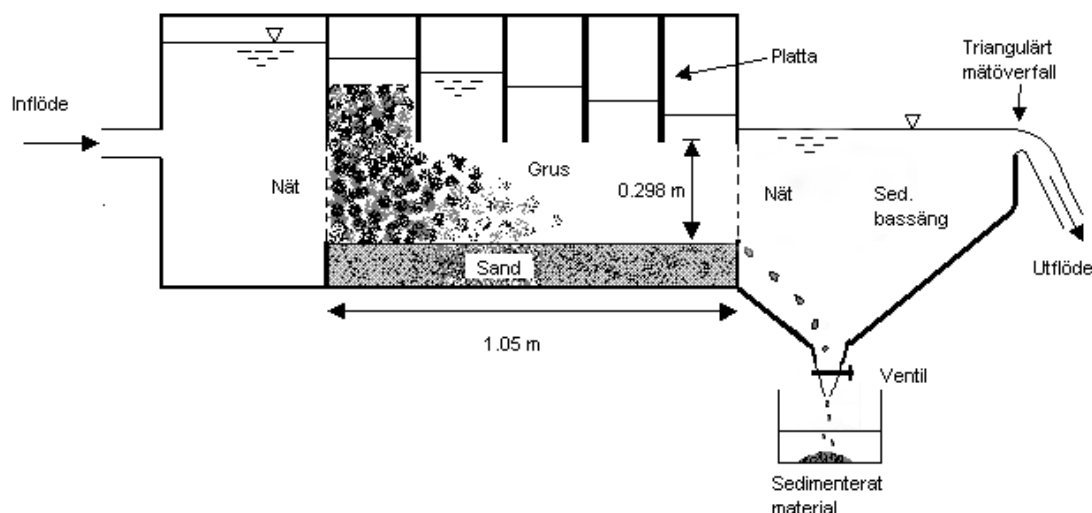
<i>Filter \ Bas</i>	Sand 1 (0,125 – 0,5)	Sand 2 (0,125 - 2,0)	Sand 3 (0,125 – 4,0)
Singel A (2,5- 5)	Exp. 1: $D_{15}/d_{85} = 6.51$	Exp.5: $D_{15}/d_{85} = 5.34$	
Singel B (4-8)	Exp. 2: $D_{15}/d_{85} = 10.82$		
Singel C (6-12)	Exp. 3: $D_{15}/d_{85} = 16.27$	Exp. 4: $D_{15}/d_{85} = 13.34$	Exp. 6: $D_{15}/d_{85} = 13.34$

Tabell 3.1.3.1. Filter- och basmaterial i de sex experimenten.

3.2 Experimentanläggningen

Den experimentanläggning som har använts i denna studie är den samma som använts tidigare av Wörman och Blanc (1995). För att återställa anläggningen i användbart skick utfördes en mängd åtgärder. Den största delen av fogarna tätades m.h.a. silikon, ett triangulärt mätöverfall på nedströmssidan tillverkades och kalibrerades så att flödet kunde mätas m.h.a. ett stigrör.

Som framgår av Fig. 3.2.1. är anläggningen 3 meter lång, 2 meter hög och 1 meter bred. Den är byggd av aluminium och plexiglas. Den består av tre separata delar vilka är förbundna genom svetsfogar, skruvar och silikon. Vattnet strömmar in i anläggningen till uppströmsreservoaren, varifrån det strömmar genom mittendelen och ut i nedströmsbassängen (se Fig. 3.2.1). Uppströmsreservoaren och mellandelen är byggda av aluminium, medan nedströmsdelen är byggd av plexiglas.



Figur 3.2.1 Experimentanläggningen i sidoprofil, det eroderade basmaterialet sedimenterar i bassängen till höger i bilden.

Mellandelen av anläggningen är den del i vilken de undersökta materialen placeras och experimentet genomförs. Mellandelen är 1,05 meter lång, 0,28 meter bred och 1,0 meter hög. En heltäckningsmatta limmades på väggarna inne i anläggningen som en åtgärd för att minimera risken för preferentiella flödesvägar. Fyra vertikala skivor är placerade i mellandelen på ett avstånd av 20 centimeter från varandra för att erhålla en jämn hydraulisk tryckgradient eftersom det då blir samma flödesarea i alla sektioner. Avståndet från gränsytan mellan filter- och basmaterial till den undre kanten av dessa vertikala plattor blev därigenom 0,298 meter. Det hydrostatiska trycket mättes i sex punkter med hjälp av tryckkuttag, stigrör och spetsmätare. Ett tryckkuttag satt på uppströmsreservoiren, fyra tryckkuttag placerades på mellandelen och ett tryckkuttag satt på nedströmsbassängen. Den hydrauliska gradienten kunde sedan beräknas från den erhållna tryckprofilen. Ett lock kan försluta uppströmsreservoiren och mellandelen för att erhålla ett övertryck. Vid inflödes- och utflödessektionen av mellandelen placerades nät med lämplig maskvidd för att hålla materialet på plats. Nätens maskvidd anpassades för att släppa igenom basmaterialet och för att hålla kvar filtermaterialet.

Nedströmsbassängen är byggd som en sedimentationstratt, i vilken det eroderade materialet sedimenterar. I botten av sedimentationstratten finns en ventil som kan öppnas för att tömma bassängen på sedimenterat material. Vattnet lämnar slutligen anläggningen genom att brädda över ett triangulärt överfall. Mätöverfallet användes vid flödesbestämningar genom att mäta vattennivån i ett stigrör.

3.3 Experimentutförande

Ett experiment började med att basmaterialet sattes på plats i mellandelen. Separation av sanden undveks under isättningen. Sanden våtpackades genom att initialt ha omkring 8 cm vattendjup i experimentanläggningen. Kapillärspänningen hos sanden medför att denna vattenmängd räcker för att väta sanden upp till ungefär 10,2 cm. Sanden packades lätt och gränsytan gjordes horisontell med en specialgjord kratta.

Efter att bädden har nått en tjocklek av 10,2 cm och slätats ut med krattan placerades filtermaterialet ovanpå bädden. Detta gjordes i början försiktigt för att inte deformera bädden alltför mycket. Filtermaterialets mäktighet uppgick slutligen till ungefär 60 cm.

Anläggningen vattenfylldes sedan med ett flöde på ca 0,2 l/s. Detta sker dels från uppströmssidan genom att öppna inflödesventilen och dels från nedströmssidan med hjälp av en vattenslang. Förklaringen till att vi valde att vattenfylla anläggningen även från nedströmssidan är att det vid enkelriktat flöde föreligger en ganska stor erosionsrisk då vattenytan ligger strax ovanför gränsytan.

Efter att anläggningen helt hade vattenfyllts och vattnet hade börjat att brädda över det triangulära mätöverfallet så kunde experimentet börja. Den hydrauliska gradienten ökades stegvis och det eroderade material tappades ut ur sedimentationstratten genom att tillfälligt öppna bottenventilen. Ett experimentsteg varierade mellan 45 minuter och flera dygn. Under ett och samma steg hölls flödet och därmed även den hydrauliska gradienten konstant. För varje steg gjordes ett antal provtagningar, vid korta steg togs ett prov var 10-15:e minut, medan tiden mellan två provtagningar vid långa steg var betydligt längre. I vissa fall avstannade nästan helt erosionen och då togs prover bara 1-2

gångar per dygn. Avsikten med att ha så långa steg som flera dygn var att studera huruvida erosionen verkligen upphörde med tiden. Samtidigt som varje provtagning av eroderat material gjordes så bestämdes den hydrauliska gradienten genom att mäta nivån i stigrören. Flödet Q mättes också vid varje provtagningstillfälle.

Gränsytan mellan filter- och basmaterial snedställs alltmer desto längre experimentet pågår. Det är således nödvändigt att avbryta experimentet då gränsytan snedställts såpass mycket att den uppmätta hydrauliska gradienten inte är representativ för de förhållanden som råder vid gränsytan.

Det eroderade basmaterialet samlades upp i sedimentationsbassängen på nedströmssidan om mellandelen (Fig. 3.2.1) och tömdes ut vid provtagningstillfällena genom en bottenventil. Proverna torkades därefter i en ugn (105 °C) under 24 timmar och vägdes. Erosionsintensiteten kan således relateras till den hydrauliska gradienten och/eller vattenflödet Q .

3.4 Utvärdering av mätdata

Mätdata har utvärderats på två olika sätt, dels genom att undersöka hur den relativa arean A tillgänglig för erosion hos filtret minskar med det relativa erosionsdjupet och dels genom att undersöka hur snabbt erosionen fortskrider genom att studera de olika experimentens K_1 -värden. Avsikten med detta kapitel är till stor del att det ska ligga till grund för det som presenteras i resultatdelen.

3.4.1 Relativ area A / Igensatt area A_{klogg}

Den relativa arean A , som är tillgänglig för erosion minskar då basmaterialet fastnar i filtermaterialet. Ett samband mellan den relativa arean A och det relativa erosionsdjupet (ξ/d_{85}) ges av ekvation (2.6). Ytterligare ett samband för den relativa arean, som lämpar sig för tolkning av de experimentella resultaten, ges av (2.5):

$$A = \frac{G^*}{(4.48 \tau^*)^{12}} \quad (3.2)$$

Av denna framgår att den för erosion tillgängliga relativa arean kan bestämmas genom att mäta transportintensiteten, G^* , och skärspänningsparametern τ^* . Den sistnämnda parametern (se (2.4)) beskriver förhållandet mellan stabiliserande (partiklarnas egentynghet) och destabiliserande krafter (vattnets lyftkraft (Archimedes princip), formmotståndskrafter och lyftkrafter orsakade av vattenflödet). Parametern τ^* är proportionell bl a mot den hydrauliska gradienten J , vilken genom linjär regression beräknats från den uppmätta tryckprofilen.

I de resultat som presenteras i denna rapport har inte bara den relativa arean A plottats utan även den relativa igensatta arean A_{klogg} har plottats mot det relativa erosionsdjupet (ξ/d_{85}). Den relativa igensatta arean kan ges som skillnaden mellan den relativa arean

som initialt är tillgänglig för erosion, n_1 , och den aktuella relativa arean som är tillgänglig för erosion:

$$A_{\text{clogg}} = n_1 - A = \varepsilon \frac{\eta}{1 - \eta} \frac{d_{85}}{d_{cl}} \frac{\xi}{d_{85}} \quad (3.3)$$

där den igenkloggade arean A_{klogg} har erhållits från de beräknade värdena på A (se ekvation (3.2) ovan) och porositeten n_1 för det grövre materialet. Högerledet av (3.3) har uttryckts ur geometriska och statistiska betraktelser (jmf (2.6)).

3.4.2 Typisk filterparameter J^*

För att grafiskt kunna illustrera filtereffekten på ett tydligt sätt har filterparametern J^* plottats mot det relativa erosionsdjupet ξ/d_{85} . Filterparametern J^* har beräknats enligt ekvation (2.7), där Reynolds tal definieras som

$$\text{Re}(d) = \frac{V d_{85}}{\nu} \quad (3.4)$$

där V är den specifika flödes hastigheten (m/s) och ν är den kinematiska viskositeten (m^2/s) hos vattnet.

3.4.3 Erosionsförloppet

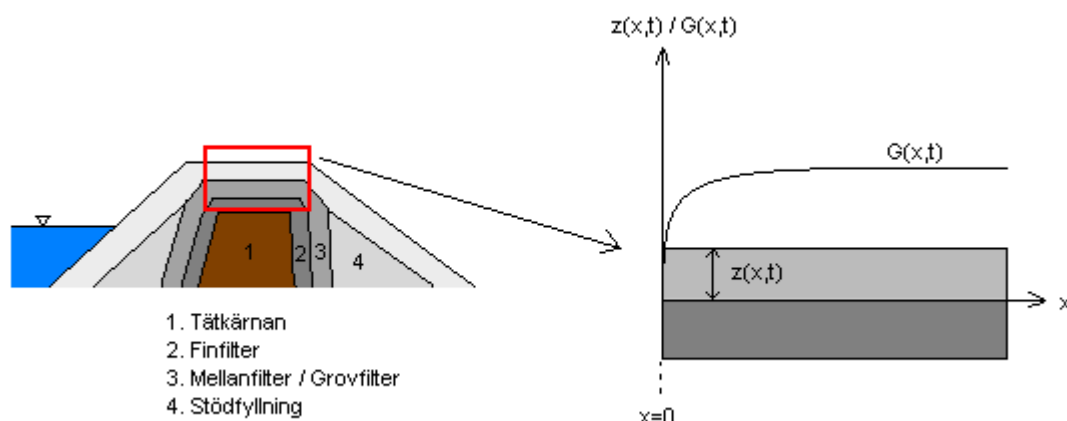
Den endimensionella transportekvationen (2.9), vilken gäller för villkoren i experimentanläggningen, kan lösas analytiskt i de fall då parametern K_1 är känd. K_1 -värdet beräknas med en ekvation (2.10), där $\partial G/\partial J$ har uppskattats genom en enkel linjär regression av uppmätta data. I en gränsyta (mellan en finfiltret och mellanfiltret) ovanpå tärkärnan i en fyllnadsdamm (se Fig. 3.4.3.1) förekommer inget sedimentinflöde precis på uppströmskanten. Samma villkor gäller även på uppströmsranden i experimentanläggningen. Randvillkor kan uttryckas som $G(x=0, t>0) = 0$. Om man samtidigt antar att transportintensiteten initialt är den samma överallt så har vi följande problemställning:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial t} + K_1 \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} &= 0 \\ G(x=0, t > 0) &= 0 \\ G(x, t=0) = G(x=\infty, t=0) &= G_0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Denna problemformulering gäller alltså för likformiga strömningsförhållanden och är främst tillämplig på förhållandena i experimentanläggningen. Kvalitativt kan formuleringen även användas till att bedöma hur snabbt en störning fortplantas över tärkärnan i en fyllnadsdamm. Lösningen av systemet (3.5) ges av en sk errorfunktion enligt:

$$\frac{G}{G_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{K_1 t}}\right) \quad (3.6)$$

där G_0 är transportintensiteten initialt. Detta uttryck för $G(x,t)$ kan användas för att lösa ut den successiva degraderingen av basmaterialet.



Figur 3.4.3.1 Den övre delen av en fyllnadsdamm i skissen till vänster. I den högra skissen ses en uppförstoring av gränsytan mellan två lager. I samma skiss är även den initiala medelnivån av badden $z_B(x,t=0)$ och transportintensiteten $G(x,t=t_1 > 0)$ inritade.

Medelnivån av basmaterialet betecknas z_B och ges av följande partiella differentialekvation:

$$(1 - n_2) \frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} = 0 \quad (3.7)$$

där n_2 är basmaterialets porositet. Ekvation (3.7) kan lösas analytiskt genom att först derivera uttrycket för $G(x,t)$ m a p x och sedan sätta in $\partial G / \partial x$ i (3.7). Nu är ekvationen omskriven på en sådan form att den kan lösas genom variabelseparation varigenom följande uttryck erhålls

$$z_B(x,t) = z_B(x,0) + \frac{G_0}{K_1 \sqrt{\pi}} \left(2\sqrt{K_1 t} \exp\left[-\frac{x^2}{4K_1 t}\right] + x \sqrt{\pi} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{K_1 t}}\right) \right) - G_0 \frac{x}{K_1} \quad (3.8)$$

där $z_B(x,0)$ är gränsykans ursprungliga medelnivå, se Fig. 3.4.3.1.

Detta uttryck för z_B skiljer sig avsevärt från den profil som erhålls vid erosion av t ex tätkärnans överyta. Förklaringen till detta ligger i förenklingen om likformig strömning vilket givetvis inte gäller i en fyllnadsdamm där vattnet accelererar vid tätkärnans överyta från nästan stillastående vatten i reservoiren till fritt fallande vid tätkärnans

nedströmskant. Denna modell som här tagits fram beskriver alltså (bl a p g a antagandet om likformig strömning) inte en verklig situation i en fyllnadsdamm. Däremot så beskriver modellen den situation som vi har i experimentanläggningen ganska bra, där vi har likformig strömning eftersom flödesarean genom experimentdelen är konstant. Den modell som här tagits fram får således ses som ett sätt att kvantifiera hastigheten i erosionsförloppet i gränsytan mellan filter- och basmaterial.

3.5 Säkerhetsindexet SI

Säkerhetsindexet SI beror av fyra faktorer, se avsnitt (2.3.1). I den analys som presenteras i detta arbete har de tre första faktorerna studerats medan heterogenitetseffekter har utelämnats. Intervallgränserna för de tre säkerhetsfaktorer som här följer har kalibrerats från erhållna resultat.

3.5.1 Säkerhetsfaktorn SF_{K_1}

Genom experimentella data kan värden på K_1 erhållas (se avsnitt (3.4.3)). Säkerhetsfaktorn SF_{K_1} erhåller olika värden beroende på värdet på absolutbeloppet av koefficienten K_1 . Ekvation (3.6) ger en möjlighet att översätta de experimentella resultaten till ett störningsmått i den speciella geometri som gäller enligt systemet (3.6). Som referensmått används en längd av filterytan av 1 m och en belastningstid av 7 dygn. Belastningstiden 7 dygn har bedömts vara representativ (i samma storleksordning) för varaktigheterna i extrema variationer i nederbörd och avrinningsprocesser. Längden 1 m är i samma storleksordning som bredden av en tätkärna i en fyllningsdamm. Rent operationellt har säkerhetsfaktorerna definierats enligt de intervall av G/G_0 som ges i tabell 3.5.1.1. En hög säkerhet av filterfunktionen har t.ex. bedömts råda när störningen i transportintensiteten är mindre än 20% ($1 - 0,8 = 20\%$) efter en veckas belastning (och referenslängden 1 m). En mycket låg säkerhet har ansetts råda när störningen är mer än 91% ($1 - 0,09 = 91\%$).

Intervall för K_1 -värde	G/G_0 för $x = 1$ m och $t = 7$ dygn	Säkerhetsfaktor SF_{K_1}	Innebörd
$>5 \cdot 10^{-5}$	$< 0,09$	1	Mycket låg säkerhet
$5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}$	0,09 - 0,31	2	Låg säkerhet
$5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-7}$	0,31 - 0,80	3	Måttlig säkerhet
$5 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	0,80 - ~ 1	4	Hög säkerhet
$< 10^{-9}$	~ 1	5	Mycket hög säkerhet

Tabell 3.5.1.1 Intervallgränser för absolutbeloppet av K_1 vid säkerhetsanalysen.

3.5.2 Säkerhetsfaktorn SF_c

Bedömningen av vilken inverkan den successiva igensättningen har på filtrets funktion baseras på jämförelser mellan största korn, i storleksintervallet $d_{85} - d_{100}$ och filtrets maximala porförträngningsdiametern D_c . I de fall då basmaterialets maximala partikeldiameter d_{100} är betydligt mindre än den maximala porförträngningsdiametern D_c kan ingen betydande igensättning förväntas. Om däremot en ganska stor mängd av basmaterialets svans är större än D_c bedöms sannolikheten som stor att filtret ska sättas

igen av basmaterialet med en relativt snabbt avtagande erosion som följd. Ett filtermaterial kan således bedömas som funktionsdugligt fastän det inte uppfyller det geometriska filterkriteriet.

Ett sätt att kvantifiera svansens betydelse för säkerheten är att definiera en dimensionslös parameter enligt:

$$C = \frac{d_{100}}{D_c} \frac{d_{85}}{D_c} \quad (3.9)$$

där D_c är den maximala porförträngningen beräknad enligt ekvation (2.11), $D_c \approx d_{cl}$. Kvoten d_{85}/D_c utgör en väsentlig faktor för filterprocessen enligt ekvation (3.3). Om man antar att faktorn $\varepsilon \eta/(1-\eta)$ är linjärt proportionellt mot d_{100}/D_c så erhålls ett uttryck där A_{klogg} enligt (3.3) är linjärt proportionellt mot högerledet i (3.9). Det är rimligt att anta att förekomsten av riktigt stora korn (d_{100}/D_c) påverkar filterbildningen. Enligt en kvalitativ bedömning där erfarenheterna från experimenten vägdes in, har säkerhetsfaktorn SF_c definierats operationellt enligt Tabell 3.5.2.1.

Intervall för C-värde	Säkerhetsfaktor SF_c	Innebörd
<0.15	1	Mycket låg säkerhet
0.15-0.3	2	Låg säkerhet
0.3-0.6	3	Måttlig säkerhet
0.6-1.2	4	Hög säkerhet
>1.2	5	Mycket hög säkerhet

Tabell 3.5.2.1 Intervallgränser för värdet på C vid säkerhetsanalysen.

3.5.3 Säkerhetsfaktorn $SF_{J(kritisk)}$

Den tredje faktorn i denna säkerhetsanalys är den kritiska hydrauliska gradienten, vilken har beräknats enligt ekvation (2.14). Det kritiska värdet på den dimensionslösa transportintensiteten G^* har satts till 10^{-4} , vilket ungefär motsvarar det värde som brukar anses gälla för initiering av erosion (det motsvarar ungefär det gränstillstånd som i början av 30-talet undersöktes av Shields [36]). Det kritiska värdet på det relativa erosionsdjupet ξ/d_{85} har satts till 50. Både transportintensiteten och erosionsdjupet kan dock väljas annorlunda med hänsyn till de speciella förutsättningar som råder i den aktuella tillämpningen. Följaktligen, ger definitionen av $SF_{J(kritisk)}$ en möjlighet till anpassning av säkerhetsvärderingen baserad på sakliga överväganden. Säkerhetsfaktorn $SF_{J(kritisk)}$ har definierats operationellt inom de intervall av den kritiska hydrauliska gradienten som anges i tabell 3.5.3.1. En anledning att anse att säkerheten är mycket hög om den kritiska hydrauliska gradienten är större än 1 är att detta innebär att erosion inte uppkommer överhuvudtaget. Den maximala hydrauliska gradienten i en fyllnadsdam uppkommer vid fritt fall och antar då värdet 1.

Intervall för J_{kritisk}	Säkerhetsfaktor $SF_{J(\text{kritisk})}$	Innebörd
<0.2	1	Mycket låg säkerhet
0.2-0.45	2	Låg säkerhet
0.45-0.7	3	Måttlig säkerhet
0.7-1.0	4	Hög säkerhet
>1.0	5	Mycket hög säkerhet

Tabell 3.5.3.1 Intervallgränser för kritisk hydraulisk gradient vid säkerhetsanalysen.

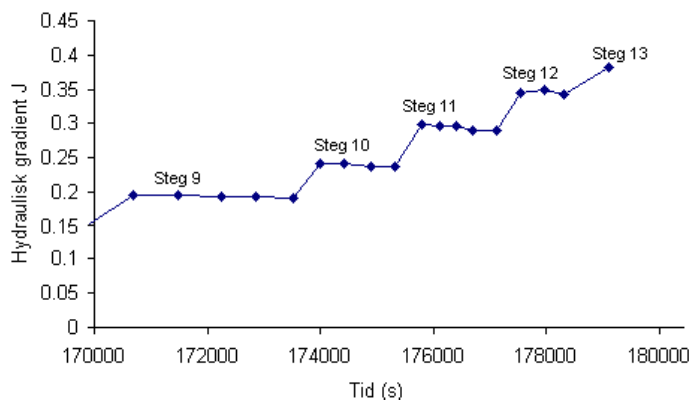
4 Resultat

4.1 Erosionsförloppet

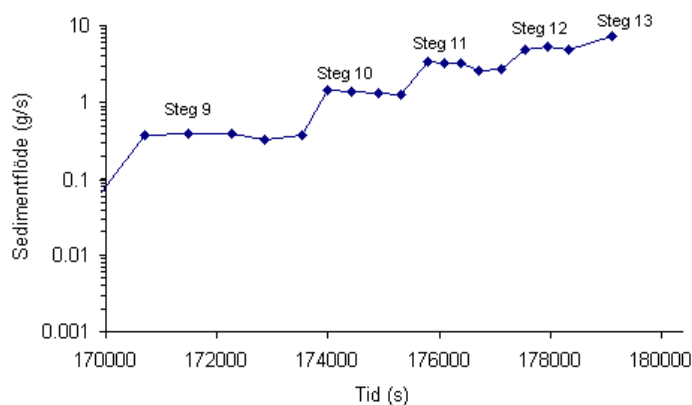
Ett genomfört experiment resulterade i ett samband mellan sedimentflödet Q_M , den hydrauliska gradienten J .

4.1.1 Sedimentflöde Q_M och hydraulisk gradient J

Den hydrauliska gradienten ökades stegvis från $J = 0$ till $J = 0,5 - 1,0$. Sedimentflödet svarade i de flesta fall direkt på en sådan ökning. Figurerna nedan visar belastningen och sedimentflödets tidsvariationer för experiment 3 under steg 9-13. Basmaterialet är sand 1 (0,125-0,5 mm) och filtermaterialet är singel C (6-12 mm).



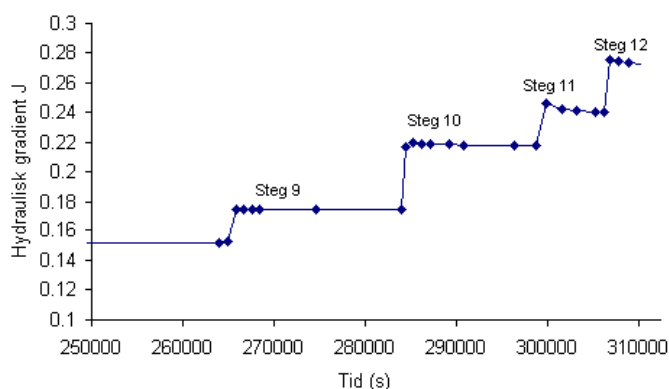
Figur 4.1.1.1. Den hydrauliska gradienten i experiment 3, steg 9-13.



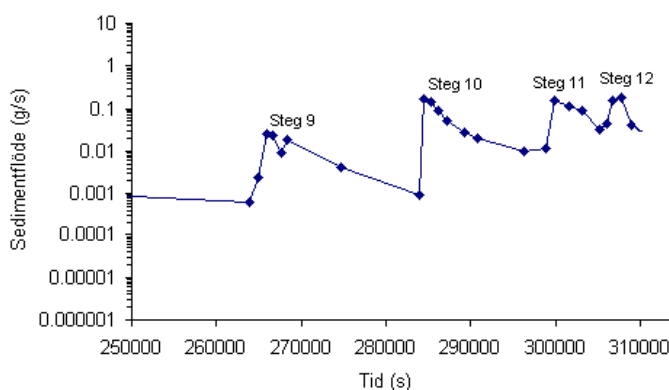
Figur 4.1.1.2. Sedimentflöde för experiment 3, steg 9-13.

I figurerna 4.1.1.1 och 4.1.1.2 ses att en ganska liten ökning av gradienten medför en avsevärd ökning (ordinatan är logaritmen) av transportintensiteten, vilket teoretiskt kan ses i ekvationerna (2.3) och (2.5) där transportintensiteten G^* är proportionell mot J^{12} . Under ett steg är den hydrauliska gradienten konstant och eftersom filtereffekten i experiment 3 är liten så är transportintensiteten också relativt konstant under samma steg. Det figurerna 4.1.1.1 och 4.1.1.2 visar är således precis vad man kan förvänta sig eftersom filter- och basmaterialen i experiment 3 är ensgraderade med sådan sammansättning att de inte uppfyller det traditionella geometriska filterkriteriet.

Som redan nämnts är filtereffekten i experiment 3 liten och sedimentflödet under ett enskilt steg är relativt oförändrat. Figurerna 4.1.1.3 och 4.1.1.4, vilka visar den hydrauliska belastningen respektive sedimentflödet under några steg för experiment 4, uppvisar dock en helt annan bild. Här avtar sedimentflödet kraftigt med tiden under ett enskilt steg eftersom igensättningen av filtret är avsevärd. Sedimentflödet går vid konstant hydraulisk belastning mot noll för att sedan drastiskt öka igen då gradienten höjs. Därefter avtar återigen sedimentflödet och närmar sig även under detta steg noll. Tänk på att skalan på ordinatan är logaritmen även i Fig. 4.1.1.4.



Figur 4.1.1.3. Den hydrauliska gradienten i experiment 4, steg 9-12.

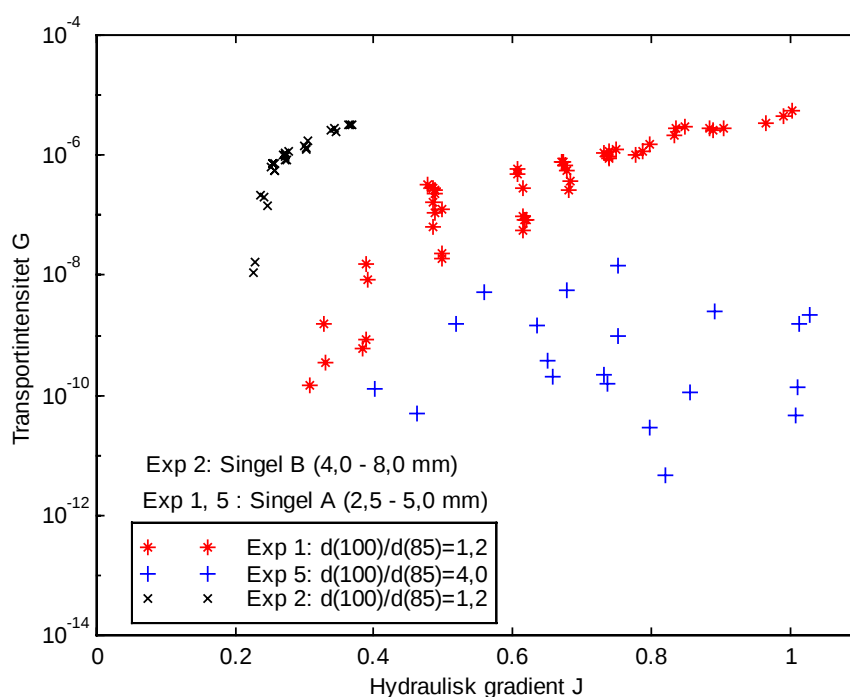


Figur 4.1.1.4. Sedimentflöde för experiment 4, steg 9-12.

I bilaga (A.1) återfinns figurer för den hydrauliska gradientens och sedimentflödets tidsvariation för samtliga experiment 1-6.

4.1.2 Transportintensitet som funktion av hydraulisk gradient

Sedimentflödet Q_M (g/s) kan skrivas om till ett volymsflöde G ($m^3/s/m$) per enhetsbredd om man tar hänsyn till att partiklarnas densitet är omkring 2650 kg/m^3 (se avsnitt (3.4.1)). I figurerna 4.1.2.1 och 4.1.2.2 har G plottats mot den hydrauliska gradienten J , avsikten med att dela upp resultatet i två figurer har varit att de tre resultaten i Fig. 4.1.2.2 har erhållits för olika basmaterial, men med samma filtermaterial, singel C (6-12 mm). Detta gäller även i Fig. 4.1.2.1, som visar resultaten i experiment 1 och 5 i vilka samma filtermaterial användes, singel A (2,5 – 5,0 mm). Basmaterialen är dock olika, sand 1 ($d_{100}/d_{85} = 1,2$) respektive sand 2 ($d_{100}/d_{85} = 4,0$).

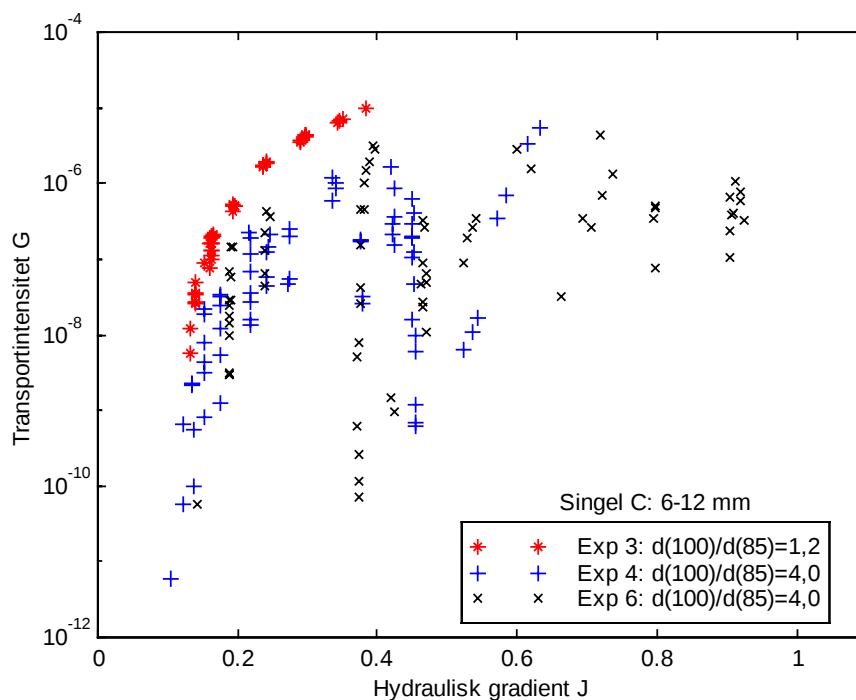


Figur 4.1.2.1. Transportintensiteten G plottad mot belastningen J för experiment 1,2 och 5.

I Fig. 4.1.2.1 ses stora skillnader i resultaten mellan experiment 1 och 5. Vid en konstant hydraulisk belastning uppvisar transportintensiteten relativt små variationer i experiment 1, medan variationen är mycket större i experiment 5. Transportintensiteten i experiment 5 är dessutom väldigt liten (maximalt 0,03 g/s) och oberoende av den hydrauliska belastningen medan den ökar med belastningen i experiment 1.

Experiment 3, 4 och 6 uppvisar tydliga skillnader orsakade av olika kvoter d_{100}/d_{85} . Experiment 3, vilket har utförts för ensgraderat basmaterial och ligger långt ifrån det geometriska filterkriteriet, uppvisar vid konstant belastning en mycket liten variation av transportintensiteten. Experiment 4 och 6 ger upphov till en helt annat resultat, variationen i G är här mycket större än i experiment 3. Steg 8 i experiment 6 pågick i

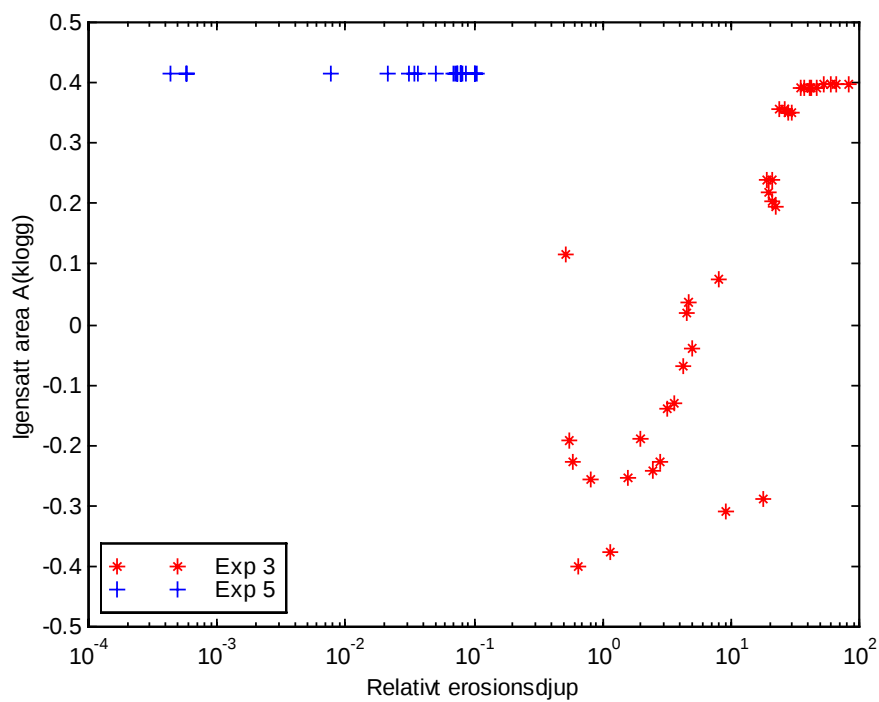
ungefär en vecka där syftet var att studera den långsiktiga igensättningen av filtret. Under detta steg, vilket gjordes vid en hydraulisk belastning $J \approx 0,37$, avtog sedimentflödet från ~ 5 g/s till $\sim 0,0002$ g/s. Liknande studier av långtidseffekter gjordes inte för experiment 3 och 4 även om det förekommer en markant filterbildning i experiment 4. Generellt så avtog transportintensiteten snabbast i början av ett steg i de experiment då filterbildning förekom.



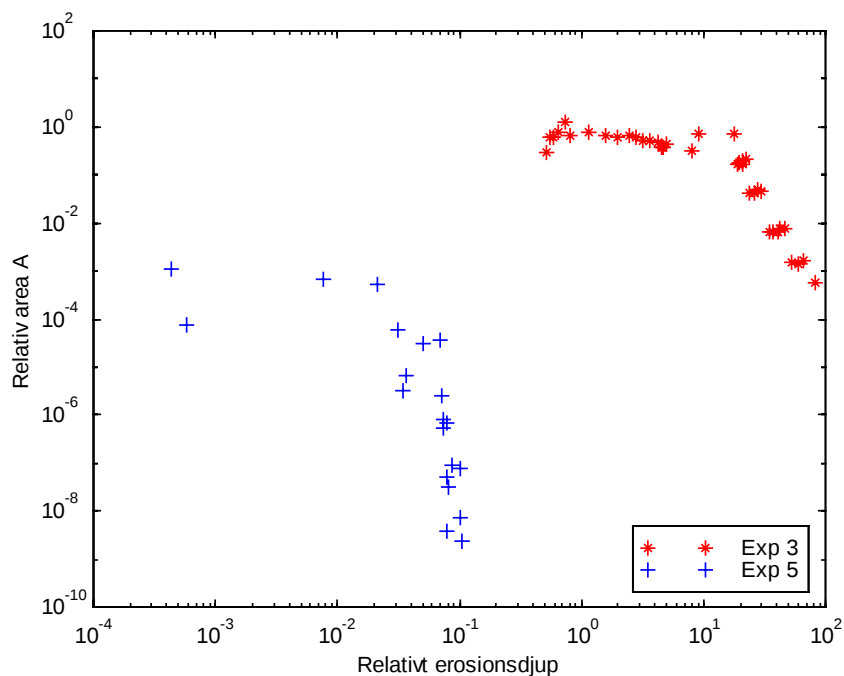
Figur 4.1.2.2. Transportintensiteten G plottad mot belastningen J för experiment 3,4 och 6.

4.2 Relativ area A / igensatt area A_{klogg}

Den igensatta arean har beräknats enligt ekvation (3.2) och sambandet $A_{klogg} = n_1 - A$. Igensättningen ökar statistiskt sett med det relativa erosionsdjupet ξ/d_{85} . I detta avsnitt jämförs de två extremfallen, experiment 3 (ingen 'klogging') och experiment 5 (kraftig 'klogging'). Resultatet för de övriga experimenten redovisas i bilaga (A.2). Resultatet i Fig. 4.2.1 har erhållits för experiment 3 och 5. Experiment 5 uppvisar i Fig. 4.2.1 en mycket snabb igensättning av filtret medan i experiment 3 förekommer endast en obetydlig filterbildning. Den relativa arean A som är tillgänglig för transport har plottats mot det relativa erosionsdjupet ξ/d_{85} i Fig. 4.2.2. Den relativa arean A är enligt definition lika med skillnaden mellan filtermaterialets porositet n_1 och den igensatta arean A_{klogg} . Sambandet mellan den relativa arean och erosionsdjup ger en tydlig bild av hur filterbild-



Figur 4.2.1. Den igensatta arean plottad mot det relativa erosionsdjupet för experimenten 3 och 5.



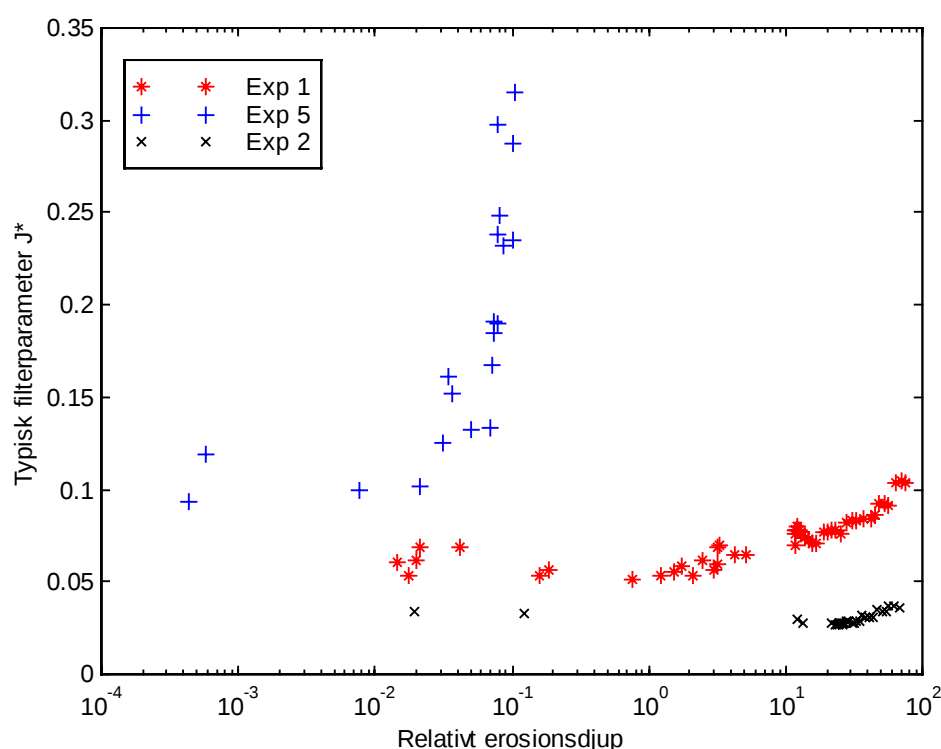
Figur 4.2.2. Den relativa arean A som är tillgänglig för erosion i filterytan som funktion av det relativa erosionsdjupet för experimenten 3 och 5.

ningen fortgår. När derivatan $dA/d\xi$ går mot (negativa) oändligheten utvecklas filtret mycket fort. Liknande figurer för de övriga experimenten återfinns i bilaga (A.3).

I Fig. 4.2.2 ses stora skillnader mellan experiment 3 och 5. Endast mycket låga värden på det relativa erosionsdjupet ξ/d_{85} behövs för att filtret ska sätta igen i experiment 5. Båda experiment uppvisar en markant förändrad derivata $dA/d\xi$ vid ett visst gränsvärde av det relativa erosionsdjupet. Gränsvärdet i experiment 3 är omkring $\xi/d_{85} \sim 10^1$ medan i experiment 5 är det omkring $\xi/d_{85} \sim 5 \cdot 10^{-2}$.

4.3 Typisk filterparameter J^*

Den typiska filterparametern J^* , vilken beräknats enligt den metod som beskrevs i avsnitt (3.4.2), har i figurerna 4.3.1 och 4.3.2 plottats mot det relativa erosionsdjupet.

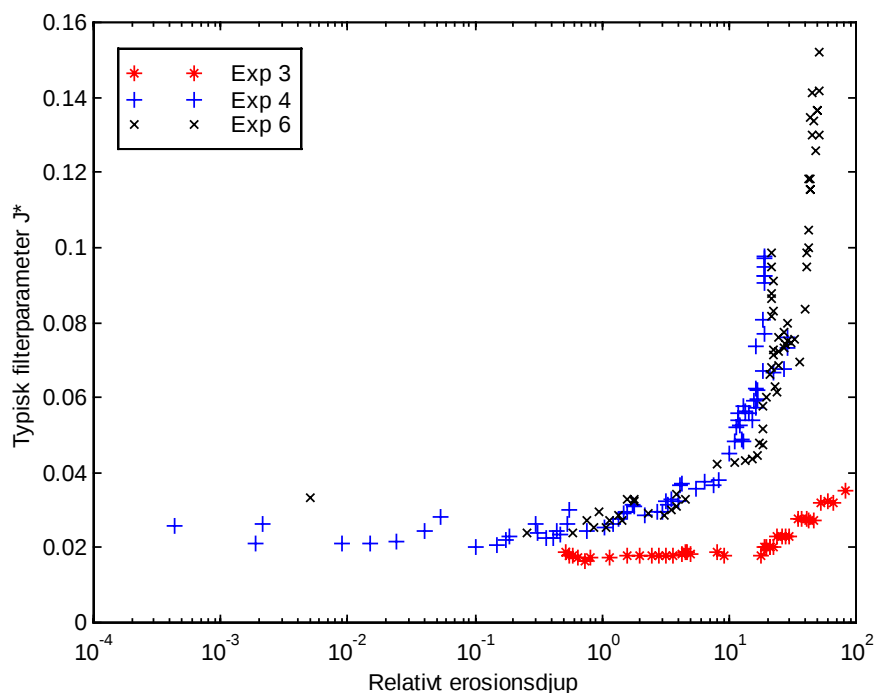


Figur 4.3.1. En typisk filterparameter J^* som funktion av det relativa erosionsdjupet ξ/d_{85} för experiment 1, 2 och 5.

Experiment 1, 2 och 5 uppvisar tydligt olika förlopp. Parametern J^* på ordinatan för experiment 5 går redan vid låga ξ/d_{85} mot oändligheten medan igensättningen av filtret i experiment 2 var liten och därmed är filterparametern relativt oförändrad med erosionsdjupet. Resultaten från experiment 1 ligger mittemellan de båda extremfallen, en viss igensättning kan observeras men först vid höga värden på det relativa erosionsdjupet.

I Fig. 4.3.2 jämförs igensättningsförmågan hos samma filtermaterial (singel C) för tre olika basmaterial (sand 1, sand 2 och sand 3). Experiment 4 och 6 kräver relativa

erosionsdjup större än 10 för att J^* ska gå mot oändligheten, d v s stora mängder basmaterial eroderar bort innan ett fungerande filter byggs upp. Jämför detta med experiment 5 i Fig. 4.3.1 där filtret sattes igen och J^* går mot oändligheten redan vid mycket låga värden på det relativa erosionsdjupet ($< 10^{-1}$).



Figur 4.3.2. En typisk filterparameter J^* plottad mot det relativa erosionsdjupet ξ/d_{85} för experiment 3, 4 och 6. Parametern J^* på ordinatan närmar sig för experiment 4 och 6 oändligheten, filtereffekten var här relativt stor.

4.4 Transportförloppet

4.4.1 K_1 -värden

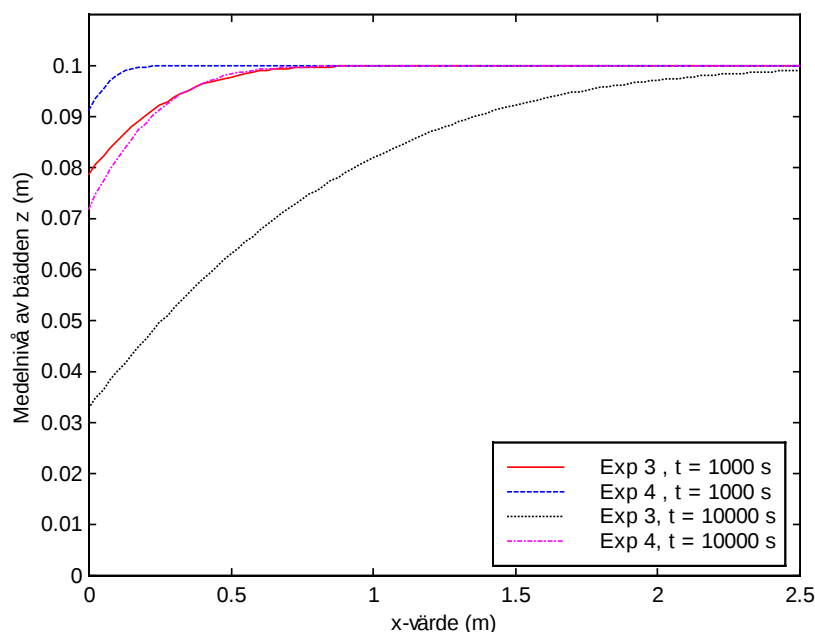
Genom en enkel linjär regression på uppmätta data av transportintensiteten G och den hydrauliska gradienten J erhöles m.h.a. ekvation (2.10) kunde K_1 -värden bestämmas för de experimentellt undersökta basmaterialen (Tabell 4.4.1.1). K_1 -värdet för experiment 5 är det värde som till beloppet är minst medan experiment 3 har det till beloppet största K_1 -värdet. Detta är en följd av att experiment 5 hade den mest markanta filterbildningen, medan filtermaterialet i experiment 3 var försumbar. Rent intuitivt kan man förvänta sig ett snabbare erosionsförlopp i experiment 1-3 än i experiment 4-6. Detta är en följd av att basmaterialet i experiment 4-6 har en större maximal diameter d_{100} än vad som gällde i experimenten 1-3. Om hänsyn toges till kvoterna D_{15}/d_{85} och d_{100}/d_{85} så kan erosionsförloppets hastighet anges för experimenten i följande ordning (med fallande hastighet): exp 3, exp 2, exp 1, exp 4, exp 6 och exp 5. En jämförelse med tabell 4.4.1.1 visar exakt denna ordningsföljd och utvärderingen av K_1 förefaller således vara pålitlig.

Experiment nr.	Basmaterial	Filtermaterial	K_f -värden
1	Sand 1 (0,125 –0,5)	Singel A (2,5 – 5,0)	$-8,4 \cdot 10^{-6}$
2	Sand 1 (0,125 –0,5)	Singel A (4,0 – 8,0)	$-3,4 \cdot 10^{-5}$
3	Sand 1 (0,125 –0,5)	Singel C (6,0-12,0)	$-6,7 \cdot 10^{-5}$
4	Sand 2 (0,125 –2,0)	Singel C (6,0-12,0)	$-5,0 \cdot 10^{-6}$
5	Sand 2 (0,125 –2,0)	Singel A (2,5 – 5,0)	$-1,7 \cdot 10^{-9}$
6	Sand 3 (0,125 –4,0)	Singel C (6,0–12,0)	$-1,7 \cdot 10^{-6}$

Tabell 4.4.1.1. De olika experimentens K_f -värden.

4.4.2 Degradering av basmaterialet

Genom den analytiska lösningen (3.8) till ekvation (3.7) kan profiler erhållas för basmaterialbäddens degradering i experimentanläggningen. I den analytiska lösningen (3.8) ingår parametern G_0 , vilken beskriver den initiala transportintensiteten. I de plottade simuleringarna som här redovisas har denna parameter tagits som medeltransportintensiteten under experimenten. Profilerna i Fig. 4.4.2.1 har erhållits efter tiden 1000 sekunder (~17 minuter) och 10000 sekunder (~3 timmar) för experiment 3 (sand 1, singel C) och experiment 4 (sand 2, singel C). Experiment 3 uppvisar ~ 10



Figur 4.4.2.1. Degraderingen av bädden efter 1000 samt 10000 sekunder simulerad för experiment 3 och 4.

gånger snabbare degradering av basmaterialbädden än experiment 4. Liknande profiler för de övriga experimenten återfinns i bilaga (B.1).

4.5 Säkerhetsanalys av undersökta filterkonstruktioner

I detta avsnitt har de olika säkerhetsfaktorerna bestämts för de undersökta filterkonstruktionerna. Härigenom finns möjlighet att verifiera att intervallgränserna för de olika säkerhetsfaktorerna ger ungefär samma resultat vad gäller säkerhetsnivå samt att jämföra de klassificerade säkerhetsnivåerna med en erfarenhetsbaserad bedömning av filterkonstruktionens säkerhet.

4.5.1 Säkerhetsfaktorn SF_{K1}

Intervallgränserna för säkerhetsfaktorn SF_{K1} har definierats i tabell (3.5.1.1). De uppmätta K_1 -värdena i de olika experimenten ligger till grund för de erhållna värdena på säkerhetsfaktorn SF_{K1} i tabell 4.5.1.1. Generellt visar resultaten i tabellen att säkerheten av de undersökta filtren varierar mellan mycket låg till hög säkerhet. Inget av filtren har mycket hög säkerhet, vilket är konsistent med målsättningen för projektet; att undersöka filterbildningen i defekta filterkonstruktioner.

Experiment nr.	Basmaterial	Filtermaterial	K_1 -värden	SF_{K1}
1	Sand 1 (0,125 – 0,5)	Singel A (2,5 – 5,0)	$-8,4 \cdot 10^{-6}$	2
2	Sand 1 (0,125 – 0,5)	Singel A (4,0 – 8,0)	$-3,4 \cdot 10^{-5}$	2
3	Sand 1 (0,125 – 0,5)	Singel C (6,0–12,0)	$-6,7 \cdot 10^{-5}$	1
4	Sand 2 (0,125 – 2,0)	Singel C (6,0–12,0)	$-5,0 \cdot 10^{-6}$	2 / 3
5	Sand 2 (0,125 – 2,0)	Singel A (2,5 – 5,0)	$-1,7 \cdot 10^{-9}$	4
6	Sand 3 (0,125 – 4,0)	Singel C (6,0–12,0)	$-1,7 \cdot 10^{-6}$	3

Tabell 4.5.1.1. Säkerhetsfaktorn SF_{K1} för de olika experimenten. Betyget 1 innebär mycket låg säkerhet medan betyget 5 innebär mycket hög säkerhet.

Experiment nr.	Basmateriallets d_{85} (mm)	Basmateriallets d_{100} (mm)	D_c (mm)	Dimensionslös parameter C	SF_c
1	0,41	0,50	0,82	0,30	2 / 3
2	0,41	0,50	1,31	0,12	1
3	0,41	0,50	1,96	0,05	1
4	0,50	2,0	1,96	0,26	2
5	0,50	2,0	0,82	1,49	5
6	0,50	4,0	1,96	0,52	3

Tabell 4.5.2.1. Säkerhetsfaktorn SF_c för de olika experimenten. Säkerhetsfaktor 1 innebär mycket låg säkerhet medan en 5:a innebär mycket hög säkerhet.

4.5.2 Säkerhetsfaktorn SF_c

Vid beräkningen av den maximala porförträngningen för de tre olika filtermaterialen gav ekvation (2.11) det största värdet och för att vara på den säkra sidan har detta värde använts för den maximala porförträngningen. Den dimensionslösa parametern C har

beräknats m.h.a. ekvation (3.9) och översatts i termer av säkerhetsfaktorn SF_c enligt tabell (3.5.2.1). Resultaten i tabell 4.5.2.1. visar ungefär samma tendens som erhöles i avsnitt 4.5.1. Dock är spridningen i säkerhetsfaktorerna något större.

4.5.3 Säkerhetsfaktorn $SF_{J(kritisk)}$

Den kritiska hydrauliska gradienten har bestämts m.h.a. ekvation (2.14), där den kritiska transportintensitet G^* har satts till 10^{-4} och det relativa erosionsdjupet ξ/d_{85} har satts till 50, vilket kan tänkas motsvara en uppkommen skada på en damm, t ex ett begynnande sjunkhål. Den acceptabla transportintensiteten har valts på en så låg nivå att en erosionskada kan upptäckas i ett tidigt skede. Som nämnts i avsnitt 3.5.3. kan de valda värdena på både transportintensitet och erosionsdjup anpassas efter tillämpning. Värdena på säkerhetsfaktorn $SF_{J(kritisk)}$ som visas i tabell 4.5.3.1 är generellt något lägre än vad som erhöles i avsnitten 4.5.1. och 4.5.2. Skillnaden är dock relativt liten och bedöms inte vara tillräckligt starkt skäl att modifiera de föreslagna intervallgränserna för säkerhetsfaktorerna.

Experiment nr.	$J_{kritisk}$ (dim. lös)	$SF_{J(kritisk)}$
1	0,42	2
2	0,26	2
3	0,17	1
4	0,21	2
5	0,51	3
6	0,21	2

Tabell 4.5.3.1. Säkerhetsfaktorn $SF_{J(kritisk)}$ för de olika experimenten. Betyget 1 innebär mycket låg säkerhet medan en 5:a innebär mycket hög säkerhet.

4.5.4 Säkerhetsindexet SI

Resultatet av tre partiella säkerhetsfaktorer som presenterats i avsnitten används som grund för ett sammanvägt säkerhetsindexet SI . med hänvisning till försiktighetsprincipen, väljs det sammanvägda säkerhetsindexet som det sämsta värdet av de partiella säkerhetsfaktorerna. Av tabell 4.5.4.1 framgår dock att variationen av de partiella säkerhetsfaktorerna är måttlig, vilket stärker trovärdigheten av de valda intervallgränserna som använts för säkerhetsfaktorerna i tabellerna 4.5.1.1, 4.5.2.1 och 4.5.3.1.

Experiment nummer	1	2	3	4	5	6
Basmaterial	Sand 1	Sand 1	Sand 1	Sand 2	Sand 2	Sand 3
Filtermaterial	Singel A	Singel B	Singel C	Singel C	Singel A	Singel C
Säkerhetsfaktor 1- SF_{K1}	2	2	1	2 / 3	4	3
Säkerhetsfaktor 2- SF_c	2 / 3	1	1	2	5	3
Säkerhetsfaktor 3- $SF_{J(kritisk)}$	2	2	1	2	3	2
Säkerhetsindex SI	2	1	1	2	3	2

Tabell 4.5.4.1. Säkerhetsindexet SI för de olika materialsammansättningarna som använts i de utförda experimenten 1-6.

5 Praktiska implikationer

De viktigaste praktiska implikationerna kan sammanfattas i tre punkter:

1. Det konventionella geometriska filterkriteriet behöver inte uppfyllas i de fall då basmaterialets gradering i intervallet $d_{85} - d_{100}$ bidrar till en successiv filterbildning under en signifikant materialförlust. Den relativa arean som är tillgänglig för erosion i filterytan är en viktig faktor för erosionsbenägenheten. Sambanden (2.5) och (2.6) beskriver erosionsintensiteten som funktion av relativt erosionsdjup i basmaterialet. I ett av experimenten sjönk erosionsintensiteten med en faktor 10^5 gånger lägre genom en successiv filterbildning. Betydelsen av detta är att det traditionella geometriska filterkriteriet inte nödvändigtvis behöver uppfyllas i många praktiska tillämpningar. Både den hydrauliska belastningen och basmaterialets svans $d_{85} - d_{100}$ är relevanta faktorer att ta i beaktande. I avsnitt 6.1 diskuteras hur den tillgängliga arean beror på olika tillståndsvariabler.
2. Säkerhetsindexet SI som har tagits fram kan tillämpas både vid nybyggnation och rehabilitering av filterkonstruktioner (i fyllnadsdammar). Indexeringen har införts för att underlätta för den föreslagna metodiken att inkluderas i en mer fullständig riskanalys. Säkerhetsanalysen har i detta arbete inriktats på fyllnadsdammar, men kan även appliceras på erosionskydd av kanalbottnar, vågbrytare och erosionsskydd runt bropelare. De intervallgränser som presenterats i detta arbete vid framtagandet av säkerhetsfaktorerna får då modifieras, bl a med tanke på att den hydrauliska belastningen ändras.
3. De tre olika säkerhetsfaktorerna, vilka ligger till grund för säkerhetsindexet SI, är alternativa, d v s de kan i hög utsträckning ersätta varandra. Säkerhetsfaktorerna SF_c och $SF_{J(kritisk)}$, vilka bygger på geometriska och grundläggande fysikaliska principer, är de faktorer som kan användas praktiskt på ett relativt enkelt sätt. Om $SF_{J(kritisk)}$ tillämpas för att bedöma säkerheten av en skada på ett filter i en fyllnadsdamm, måste först rimliga värden ansättas på aktuellt erosionsdjup och acceptabel transportintensitet. Antag att om skadan kan lagas under en period av en vecka, så görs bedömningen att en acceptabel transportintensitet är 10^{-4} och att säkerhetsfaktorn, härav får ett visst värde. Om, å andra sidan, skadan lagas under en period av en månad så bör nivån för den acceptabla transportintensiteten sänkas, vilket kan innebära att indexvärdet, enligt tabell 3.5.3.1, sjunker.

6 Diskussion och slutsatser

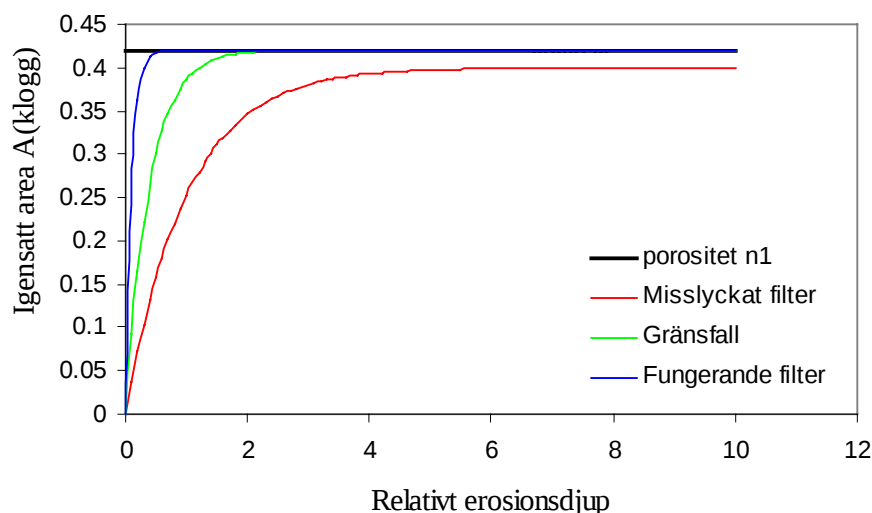
6.1 Filtringseffekter

6.1.1 Transportintensitetens G versus hydraulisk gradient J

I de sex experiment som har utförts har filtermaterialet alltid varit ensgraderat medan basmaterialet har haft varierande gradering. I experiment 4, 5 och 6, där basmaterialet var månggraderat, förekom en betydande filtring, medan ingen nämnvärd igensättning av basmaterialet i filtret förekom i de ensgraderade experimenten 1, 2 och 3. I experimenten med ensgraderat basmaterial var transportintensiteten konstant under ett enskilt steg medan den avtog avsevärt i de mera bredgraderade experimenten. Skillnaderna var markanta och illustreras i figurerna 4.1.1.1 – 4.1.1.4.

6.1.2 Relativ area A / Igensatt area A_{klogg}

Ur (3.3) erhålls den obekanta parametern $\varepsilon (1-\eta)/\eta d_{85}/d_{cl} = A_{klogg}/(\xi/d_{85})$. I tidigare arbeten har därför $A_{klogg}/(\xi/d_{85})$ relaterats till det relativa erosionsdjupet ξ/d_{85} [19][23]. Det linjära beroendet mellan den beroende och den oberoende parametern gör emellertid att det är svårt att utvärdera skillnader i filtringseffekt. Enligt figur 4.2.1 och 4.2.2 framgår att sambandet mellan $A_{klogg}/(\xi/d_{85})$ och ξ/d_{85} inte är helt entydigt för de undersökta materialen, vilket har föreslagits som en approximation i tidigare undersökningar. Representationerna som används här avslöjar huruvida ett fungerande filter byggs upp eller inte. Schematiskt sker filterbildningen enligt figur 6.1.2.1.



Figur 6.1.2.1. Schematisk representation av skillnaden mellan ett fungerande och icke-fungerande filter. Porositeten $n_1 \approx 0.42$ är densamma som den initialt tillgängliga arean i filtermaterialet.

Resultaten avviker något från denna schematiska representation vilket framgår genom jämförelser med Fig. 4.2.1. En slutsats är att den empiriska parametern $\varepsilon (1-\eta)/\eta d_{85}/d_{cl}$ som bestämdes av Wörman och Olafsdottir [18] borde modifieras. Målet för denna

undersökning har dock inte varit att utveckla ett sådant teoriunderlag som gör det möjligt att kvantifiera filtereffektens samband med erosionsdjup, utan endast att ge empiriska indikationer på de avsevärda variationer som kan förekomma i filtereffekten.

Allmänt gäller att A_{klogg} ökar för samtliga experiment och närmar sig ett konstant värde, vilket ges av filtermaterialets porositet. A_{klogg} ökar snabbare i de experiment där filtereffekten är stor än i experiment utan någon betydande filtereffekt. Denna skillnad framgår tydligast i jämförelsen mellan resultaten från experiment 3 och 5 (Fig. 4.2.1).

I resultatdelen av denna rapport har det visats att sambandet mellan den relativa arean A (utvärderad enligt ekvation (3.2)) och relativt erosionsdjup ξ/d_{85} är en tydlig indikator på skillnader i filtereffekt mellan experimenten. Den relativa arean minskar för samtliga experiment med erosionsdjupet, men går betydligt snabbare mot noll för experiment med en hög filtreringsgrad. Detta belyses i Fig. 4.2.2 där de två extremfallen, experiment 3 och 5, jämförs. Ett förvånande resultat är att den relativa arean i experiment 3 (utvärderad enligt ekvation (3.2)) är konstant ända fram till $\xi/d_{85}=10$ för att sedan markant avta vid högre erosionsdjup. Denna förändring är oväntad eftersom de material som användes i experiment 3 är ensgraderade och inte är i närheten av att uppfylla det geometriska filterkriteriet. En tänkbar förklaring är att sambandet (3.2) inte gäller under hela det intervall av hydraulisk gradient som användes i försöken (den hydrauliska gradienten ökar med ökande erosionsdjup). Man vet sedan länge att sambandet mellan transportintensitet och skärspänning i en öppen kanal blir mer linjärt med ökande transportintensitet [33], vilket till viss del kan förklara resultaten i Fig. 4.2.2.

6.1.3 Filterparametern J^*

Ytterligare ett sätt att åskådliggöra skillnader i filtreringseffekter mellan de olika experimenten är att studera variationen i den typiska filterparametern J^* med det relativa erosionsdjupet. I figurerna 4.3.1 och 4.3.2 ses tydliga skillnader mellan ensgraderade och månggraderade material. Filtreringsgraden har varit stor i experiment 4, 5 och 6 (månggraderade) medan den har varit relativt liten för experiment 1, 2 och 3 (ensgraderade). I samtliga experiment med månggraderade basmaterial går J^* mot oändligheten, i experiment 4 och 6 eroderas dock stora mängder basmaterial bort innan ett fungerande filter börjar att byggas upp. I experimenten med ensgraderade material är dock J^* relativt konstant, men en viss tendens till filterbildning finns även i dessa. Det är dock osäkert huruvida filterbildningen fortskrider vid en kontinuerlig eller ökad hydraulisk belastning. Försöken genomfördes i regel under 2 – 5 dagar. Det mest troliga är dock att ett fungerande filter aldrig skulle byggas upp för ensgraderade basmaterial som inte uppfyller det geometriska filterkriteriet.

Resultatet från experiment 4 och 6 är liknande trots att basmaterialet har olika kvot d_{100}/d_{85} , 4,0 respektive 8,0. En orsak till den obetydliga skillnaden kan vara att endast fem procent av kornmaterialet i sand 3 har diamterar i intervallet 2,0 – 4,0 mm och att det krävs större borteroderade mängder material än vad som var fallet för att dessa korn skall ha ett avgörande inflytande. En annan orsak kan vara att det nedströms belagda nätet som användes i experiment 4 hade samma maskvidd som basmaterialets d_{100} ,

nämligen 2,0 mm, och att detta skulle ha påverkat resultatet. Någon synlig effekt kunde dock inte tydligt observeras under experimentets gång. Nämnas bör att nätet i experiment 6 hade en maskvidd på 5,2 mm medan basmaterialet hade ett $d_{100} = 4,0$ mm.

Resultaten av J^* påminner i hög grad om tidigare resultat [19][23]. Den mest markanta skillnaden är att mätningar har gjorts för högre erosionsdjup och högre hydraulisk gradient i detta arbete än tidigare.

6.2 Degraderingen av basmaterialet

Den uppmätta degraderingen i experimentanläggningen påminner ganska mycket om de profiler som beräknas analytiskt enligt teorin som presenteras i avsnitt 2.3.1.1. och 3.4.3. Ett syfte med teoribildningen är att man i framtida undersökningar ska kunna ta hänsyn till de ändrade hydrauliska förhållanden som uppstår i experimentet på grund av den successiva degradering. I denna undersökning har det antagits att den igensatta arean ges av ekvation (3.3) som funktion av en medelvärdesbildat erosionsdjup. Om man tar hänsyn till en variabel avsänkning av botten, innebär detta att filtereffekten och transportintensiteten varierar över ytan. Mätningarna av transportintensiteten baseras på förhållandena i utströmningssektionen.

6.3 Säkerhetsanalysen

6.3.1 Säkerhetsfaktorn SF_{K1}

Intervallgränserna för säkerhetsfaktorn SF_{K1} som presenteras i kapitel 3 är definierade med hänsyn till erfarenheterna från genomförda experiment. Experiment 5 ges betyget hög säkerhet och experiment 3 ges betyget mycket låg säkerhet. Genom att använda dessa referensexperiment är det möjligt att få en konsistent säkerhetsvärdering baserat antingen på parametern K_1 , graderingsparametern C eller den typiska filterparametern J^* .

6.3.2 Säkerhetsfaktorn SF_c

Säkerhetsfaktor SF_c innebär ett enkelt sätt att kvantifiera betydelsen av basmaterialets svans, $d_{85} - d_{100}$, för filtreringsförmågan. Resultatet påminner i hög grad om det resultat som erhöles för SF_{K1} , vilket beror på att intervallgränserna delvis kalibrerats från samma experimentella underlag. Skillnaden mellan de båda säkerhetsfaktorerna är att SF_c är mycket enklare att utvärdera (mindre mängd data behövs), vilket bidrar till en enkel användning. All information erhålls från kornfördelningskurvorna för bas- och filtermaterialet.

6.3.3 Säkerhetsfaktorn $SF_{J(kritisk)}$

Ett skäl att definiera ett säkerhetsindex som beror på vald transportintensitet är att indexvärdet kan anpassas till den aktuella tillämpningen eller situationen, ett exempel gavs i avsnitt 5 för hur denna anpassning kan användas för en säkerhetsanalys av en tänkt skada i en fyllnadsdamm. En brist är att ekvation (2.14) inte tar hänsyn till skillnader i filtrering med variationer i d_{100} . Observationer som styrker att d_{100} påverkar filtreringen gjordes i detta projekt (se avsnitt 4.2). Denna svaghet kan dock avhjälpas i

framtida undersökningar och implementeras i modellen. Genom att ta hänsyn till svansens betydelse för filtreringsgraden kan troligtvis en mycket bra och pålitlig modell erhållas.

6.3.4 Jämförelse mellan säkerhetsfaktorerna

Ett syfte har varit att de olika säkerhetsfaktorerna skall ge liknande indexvärde. Eftersom hänsyn även har tagits till troliga maximala intervallgränser och en jämn intervallindelning av underliggande fysiska parameterar har eftersträvat (jmf avsnitt 3.5) förekommer dock vissa avvikelser. De två första säkerhetsfaktorerna, SF_{K1} och SF_C , bygger på enkla fysikaliska och geometriska förhållanden vilket försvårar generaliseringar med teoretiskt stöd. Generaliseringar bör därför baseras på empiriska undersökningar likande de som genomförts i detta projekt. Den konstitutiva modell som säkerhetsfaktorn $SF_{J(kritisk)}$ bygger på kan däremot vidareutvecklas i framtida undersökningar genom att ta hänsyn till filtereffekten av korn med en storlek i intervallet $d_{85} - d_{100}$. Eftersom $SF_{J(kritisk)}$ baseras på en utvecklad teoribildning finns relativt goda förutsättningar för generaliseringar för andra material än de undersökta.

Ingen av de föreslagna säkerhetsfaktorerna inkluderar effekter av anomalier (heterogenitet) i filtrets egenskaper. I avsnitt 2.3.1.4. exemplifieras hur graden av anomali i porositet kan kvantifieras. I framtida undersökningar bör säkerhetsanalysen kompletteras med en teoribildning och empiriska undersökningar med syfte att klargöra betydelsen av anomalier på en filterkonstruktions säkerhet. Heterogenitetseffekter bör tas i beaktande för att representera risker förknippade med anomalier i konstruktionen orsakade av differentialsättningar eller byggfel.

6.4 Säkerhetsindexet

Endast ett experiment (exp 5) uppvisar enligt den föreslagna säkerhetsanalysen en måttlig säkerhet (grad 3) medan de övriga uppvisar låg säkerhet. Två experiment (exp 2 och 3) uppvisar en mycket låg säkerhet beroende på att materialen i dessa experiment är ensgraderade och inte uppfyller det geometriska filterkriteriet. När erosionen väl initeras för ensgraderade basmaterial så fortskrider den så länge den hydrauliska belastningen inte sänks. Orsaken till att filterkonstruktionerna i experiment 4 och 6 har så låg säkerhet är att det för dessa material krävs så stora relativa erosionsdjup innan ett filter byggs upp. I experiment 5 byggdes däremot ett filter upp relativt snabbt.

6.5 Framtida undersökningar

1. I tidigare undersökningar har observationen gjorts att det bildas dyner (vågformade störningar) i basmaterialets överyta med en frekvens på ungefär en våg per två timmar [18][23]. Liknande observationer gjordes även i denna undersökning, men även mycket kortare fluktuationer (10-15 min) observerades visuellt under experimentet. Inga ansträngningar gjordes i detta arbete för att särskilja korttidsfluktuationer från den medelvärdesbildade trenden i transportintensitet. Eftersom fluktuationerna är signifikanta i jämförelse med förändringar i trendvärdena så bör deras effekt studeras närmare i framtida undersökningar. En tydlig praktisk implikation är att feltolkningar av experimentella resultat (p.g.a. fel

transportintensiteter) kan ge svåröverskådliga konsekvenser vid generaliseringar i olika tillämpningar. Spektralanalys är en naturlig metodik som skulle kunna användas för att särskilja olika frekvenser i transportintensitet. Registrering av våglängden och vågutbredningshastigheten hos gränsyttestörningarna bör ligga till grund för en sådan teoretisk utvärdering.

2. I en framtida teoriutveckling är det av största betydelse att en den för erosion tillgängliga arean (i filterytan) uttrycks som funktion av kornstorlekar i intervallet $d_{85} - d_{100}$. Enligt ekvation (2.14) finns ett entydigt samband mellan relativt erosionsdjup och filtereffekt, vilket är en acceptabel approximation i många fall. Resultaten i figurerna 4.2.1 och 4.2.2 visar dock att signifikanta avvikelser kan förekomma.

I samband med en fortsatt undersökning bör man även beakta andra teoretiska modeller som alternativ till den här tillämpade. Ekvation (2.5) bygger på antagandet att det finns ett linjärt samband mellan den för erosion tillgängliga arean och transportintensitet. Avvikelser från det linjära sambandet skulle kunna uppkomma p.g.a. hydrodynamiska effekter. Vidare, bygger konceptet med tillgänglig area (både i (2.5) och (2.6)) på att filterbildningen sker i ett plan, filterprocessen är tvådimensionell. I praktiken utbildas en filterkaka till ett visst djup och det uppkommer antagligen kraftiga krökningar i de preferentiella, öppna transportvägarna genom filterkakan. I princip kan man tänka sig att, i en spegling av den igensatta tvådimensionella filterkakan (konceptet bakom (2.6)), är den tillgängliga arean noll, men att det ändå finns vissa transportvägar genom filterkakan. En förbättrad geometrisk filterbildningsmodell än den som uttrycks av (2.6) borde ta hänsyn till flerdimensionell geometri.

3. Den föreliggande undersökningen har huvudsakligen begränsats att gälla en säkerhetsanalys av defekta 'homogena' filterkonstruktioner. I många praktiska tillämpningar uppkommer defekter till följd av brister i konstruktionsförfarande och differentialsättningar. Mätningar av Carlsten et al. [30] indikerar att det kan förekomma markanta variationer i fyllnadsdammars porositet. Denna typ av defekter kan ses som en form av heterogenitet (anomali) i filterkonstruktionen, i materialens egenskaper (t.ex. porositet). Detta innebär att filtret skulle kunna betraktas som funktionsdugligt baserat på aritmetiska medelvärden för ingående relevanta variabler, men lokalt kan avvikelser förekomma. Sådana lokala avvikelser i filteregenskaperna kan vara avgörande för hela konstruktionens stabilitet.

I framtida undersökningar bör säkerhetsanalysen för filterkonstruktionen inkludera ett hänsynstagande till heterogenitet i materialparametrar. Ett exempel på en problemformulering i denna riktning är att uppfatta koefficienten K_1 i system (3.5) som en rumsligt slumpmässig (stokastisk) variabel. Slumpmässigheten kan beskrivas av ett medelvärde och en auto-kovarians på det sätt som beskrivits i avsnitt 2.3.1.4. Härigenom kan man ta hänsyn till effekten av variabla egenskaper i filtret längs en utsedd strömlinje, analysen är endimensionell. Man kan tänka sig att även ta hänsyn till att transporten inte nödvändigtvis följer strömlinjerna genom

mekanisk interaktion mellan eroderade korn och filtermatrisen. Detta ger upphov till ett flerdimensionellt stokastiskt problem. Även temporala variationer i egenskaper kan vara aktuella att beakta. Det enklare, endimensionella, problemet kan lösas med t.ex. perturbations- och spektralanalytiska metoder av typen som presenteras av Dagan [31] och Espinoza och Valocchi [32].

4. Säkerhetsindexet för geomekaniska filter som föreslås i den föreliggande undersökningen har utformats så att det enkelt kan föras in i en mer övergripande riskanalys för en fyllnadsdamm. Det är viktigt att riskanalyser för fyllnadsdammar baseras på adekvata fysikaliska analyser liknande de som ligger till grund för säkerhetsindexet. Ett viktigt framtida forskningsproblem är därför att införliva kunskaper om geomekaniska filter i riskanalyser för fyllnadsdammar. I denna undersökning har ett försök genomförts att överföra dessa kunskaper på en form som enkelt (utan omfattande detaljkunskaper om geomekaniska filter) kan införlivas i riskanalyser.

6.6 De viktigaste resultaten

1. I detta arbete föreslås tre olika (partiella) säkerhetsfaktorer för geomekaniska filter som vardera baseras på en definierad fysisk storhet som karakteriserar filtrets egenskaper. En faktor reflekterar hur snabbt en erosionsstörning fortplantar sig tvärs över tät kärnan i en fyllnadsdamm. En annan faktor avgör hur väl det geometriska filterkriteriet är uppfyllt. Den tredje faktorn representerar den kritiska hydrauliska gradienten J_{kritisk} vilken anger den hydrauliska gradienten som ger upphov till ett givet erosionstillstånd med hänsyn till filterbildning. Faktorerna används för att bilda ett säkerhetsindex som kan ligga till grund för en mer utvecklad riskanalys. Intervallindelningen av indexerna har gjorts så att indexvärdena ger liknande resultat för sex undersökta filterkonstruktioner, men en strävan har även varit att uppnå en jämn intervallindelning (av underliggande fysiska storheter) och en viss anpassning till tänkbara maximala gränser i praktiska situationer.
2. Ifall en liten andel av de största kornstorleksfraktionerna, $d_{85} - d_{100}$, är större än den kontrollerande porförträngningen så uppkommer en filterbildning och erosionen upphöra successivt med tiden. Detta verifierades bland annat under ett veckolångt försökssteg, i experiment 6, där erosionsintensiteten sjönk med en faktor $\sim 10^5$. Detta betyder att det konventionella geometriska filterkriteriet inte behöver uppfyllas i de fall då basmaterialets gradering i intervallet $d_{85} - d_{100}$ är sådan att åtminstone en liten andel av svansen fastnar i filtret.
3. Resultaten i figurerna 4.2.1 och 4.2.2 visar att sambandet mellan den för erosion tillgängliga arean i filterytan och erosionsdjup kan variera markant med basmaterialets gradering. En adekvat teoribildning som beskriver denna variation skulle ha ett stort praktiskt värde. I framtida teoriutveckling bör det konstitutiva transportsambandet (ekvation (2.5)) vidareutvecklas på ett sätt som beskrivits i avsnitt 6.5.
4. I säkerhetsanalysen bör heterogenitetseffekter tas i beaktande för att komplettera de tre andra säkerhetsfaktorerna.

7 Tackord

Det föreliggande projektet har samfinansierats av ELFORSK AB och Byggforskningsrådet (BFR). Ett varmt tack riktas till Lars Hammar (ELFORSK AB) och Björn Sellberg (BFR) som har bidragit till projektets definiering och färdigställandet av denna rapport. Vi vill även framföra ett stort tack till Sören Karlsson vid institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet för att all hjälp med ordningsställandet av experimentanläggningen och till Mattias Göransson vid Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) för all hjälp med siktningen av basmaterialet.

8 Referenser

- [1] af Klintberg L., Bergström S., Ehlin U., Ohlsson P-E., Sjöborg K-Å.; "slutrapport från flödeskommitte'n", Vattenfall, Svenska Kraftverksföreningen, SMHI, 1990
- [2] Bakker K.J., Verheij H.J., de Groot M.B.; "Design Relationship for Filters in Bed Protection", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 120, No. 9, sid 1082-1088, september 1994
- [3] Bertram, G. E.; "An experimental investigation of protective filters' , Graduate School of Eng. at Harvard University, Cambridge/ Mass. Pub. 267, Series 7., 1940
- [4] Bezuijen A., Klein Breteler M., Bakker K. J.; "Design Criteria for Placed Block Revetments and Granular filters", Second Int. Conf. On Coastal and Port Engrg. In Developing Countries, Beijing Kina 1987
- [5] Brauns J.; "Filters and Drains in Advances in Rockfill Structures", edited by E. Maranha das Neve, Kluwer Academic Press, NATO ASI Series, Serie E Vol. 200, Nederländerna 1991
- [6] de Graauw A., van der Meulen T., van der Does de Bye M.; "Design criteria for granular filters", publication no. 287, Delft Hydraulics Laboratory, Nederländerna januari 1983
- [7] Einstein H.A.; " The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows", U.S. Dept. Agric., Soil Conserv. Serv., T.B., No. 1026, september 1950
- [8] Haan C.T. "Statistical Methods in Hydrology", Iowa State University Press, Ames, Iowa, ISBN: 0-8138-1510-X, 378 sidor, 1977
- [9] Isaaks E.H., Srivastava R.M., "Applied Geostatistics", Oxford University Press, ISBN: 0-19-505013-4, 561 sidor, New York 1989
- [10] Kenney T.C., Chahal R., Chiu E. Ofoegbu G.I., Omenge G.N., Ume C.A.; "Controlling constriction sizes of granular filters", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, sid 32-43, 1985
- [11] Neill C.R., Yalin M.S.; "Quantitative Definition of Beginning of Bed Movement", Journal of Hydr. Div., Vol. 95, No. Hy1, sid 585-588, januari 1969
- [12] Sherard J.L., Dunnigan L.P., Talbot J.R.; "Basic properties of sand and gravel filters" , Journal of Geotechn. Eng., Vol. 110, nr 6, sidor 684-700, juni 1984
- [13] Sherard J.L., Dunnigan L.P., Talbot J.R.; "Filters for silts and clays" , Journal of Geotechn. Eng., Vol. 110, nr 6, sidor 701-718, juni 1984
- [14] Sherard J.L., Dunnigan L.P.; "Critical Filters for Impervious Soils", Journal of Geotechn. Eng., Vol. 115, nr 7, sidor 927-947, juli 1989
- [15] Taylor B.D., Vanoni V.A.; "Temperature Effects in Low-Transport, Flat-Bed Flows", Journal of Hydr. Div., Vol. 98, No. Hy8, sid 1427-1445, augusti 1972
- [16] Vattenfall, 1988, "Jord- och Stenfyllningsdammar", Happy Printing AB, Stockholm, ISBN 91-7186-271-4.
- [17] Witt K.J.; "Filtrationsverhalten und Bemessung von Erdstoff-Filtern", Thesis, Institute of Soil and Rock Mechanics, University Karlsruhe, H. 104, 1986

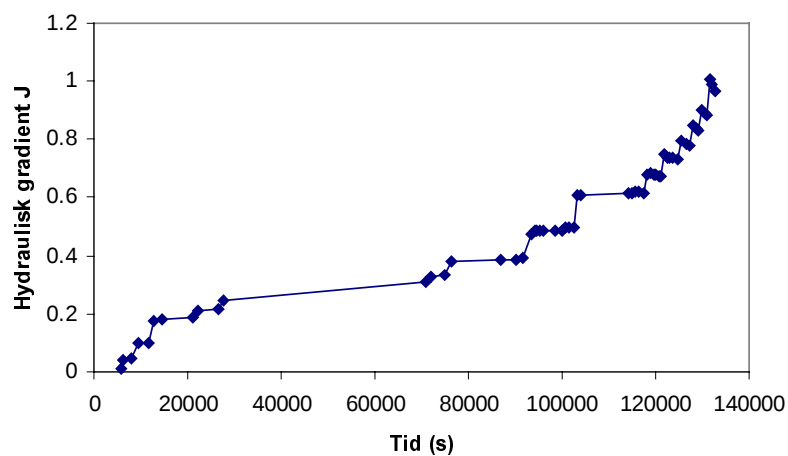
-
- [18] Wörman A., Olafsdottir R.; "Erosion in a granular medium interface", Journal of Hydraulic Research, Vol 30 , nr 5, sid 639-655, 1992
- [19] Wörman A., Blanc O.; "Geomekaniska filter och erosion i tätkärnans krön", VASO dammkomite's rapport nr. 14, 1995
- [20] Wörman A.; Diskussion kring artikel 10: "Design Relationship for Filters in Bed Protection", Journal of Hydraulic Engineering, sid 177-178, mars 1996
- [21] Ziems J. "Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe", Dissertation TU, Dresden 1968
- [22] Brauns J.; "Stability of layered granular soil under horizontal groundwater flow", 'Proceedings' inför en konferens, Lausanne Frankrike 1985
- [23] Wörman A.; "Constitutive equation for filtration of well graded base soil with flow parallell to base/filter interface", konferenspapper inför konferens, Montreal 1996
- [24] Wörman, A., Skoglund, M.; Overtopping of the Core in Rockfill Dams - Internal Erosion, HydroPower92, June 1992 Lillehammer, Norway, Eds. E. Broch and D.K. Lysne, A.A. Balkema, the Netherlands, 433-440.
- [25] Åberg, B., 1993, "Washout of Grains from Filtered Sand and Gravel Materials", J. Geotech. Engrg, 119(1), 36-53.
- [26] Kenney, T.C., Lau, D., 1985, "Internal stability of granular filters", Can.Geotech.J., Vol. 22, 215-225.
- [27] Kenney, T.C., Chahal, R, Chiu, E, Ofoegbu, G.I., Omenge, G.N., Ume, C.A., 1985, "Controlling constriction sizes of granular filters", Can.Geotech.J., 32-43.
- [28] Koenders, M.A., Williams, A.F., 1992, "Flow equations of particle fluid mixtures", Acta Mechanica 92, pp 91-116.
- [29] Lafleur, J., Mlynarek, J., Rollin, A.L., 1989, "Filtration in broadly graded cohesionless soil", J.Geotech.Engrg., Vol.115(12), 1747-1768.
- [30] Carlsten, S., Johansson, S., Wörman, A., 1995. Radar Techniques for Indication of Internal Erosion in Embankment Dams", Journal of Applied Geophysics, 33, 143-156.
- [31] Dagan, G, 1989. Flow and Transport in Porous Formations, Springer-Verlag, Berlin.
- [32] Espinoza, C., Valocchi, A.J., 1997, Stochastic Analysis of One-dimensional Transport of Kinetically Adsorbing Solutes in Chemically Heterogeneous Aquifers, Water Resources Res., 33(11), 2429-2445.
- [33] Vanoni, V.A., 1975. Sedimentation Engineering, Manual by Am. Soc. of Civil Engrg., ISBN 0-87262-001-8.
- [34] Wörman, A., 1991. Interfacial Sediment Transport, Thesis for the degree of doctor of philosophy in science, Bulletin TRITA-VBI-152, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [35] Wörman, A., Xu, S., Dverstorp, B., 1999. Kinematic Analysis of Solute Mass Flows in Rock Fractures with Spatially Random Parameters, **Under review:** Journal of Fluid Mechanics

- [36] Shields, A., (1936), "Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung", Mitteilung der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, No. 26, Berlin, Germany

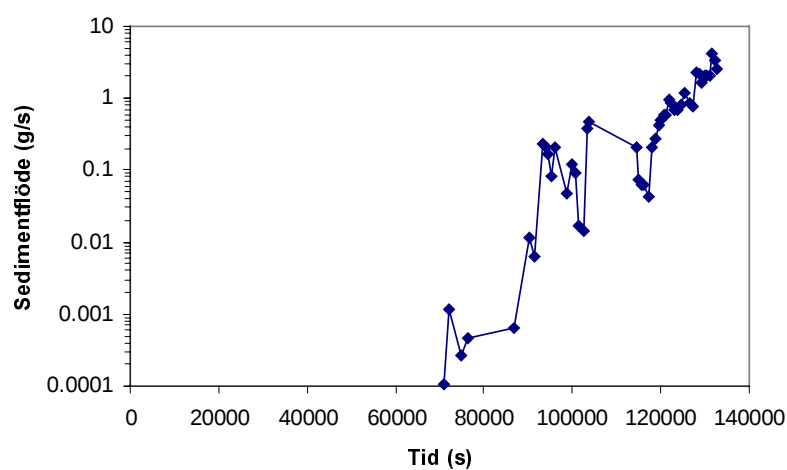
Bilagor

A Experimentresultat

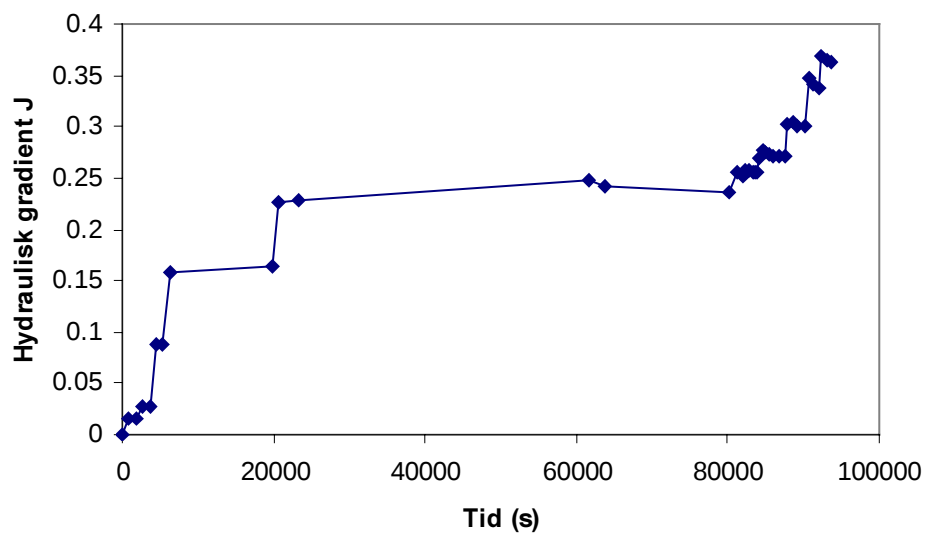
A.1 Hydraulisk gradient J och sedimentflöde Q_M



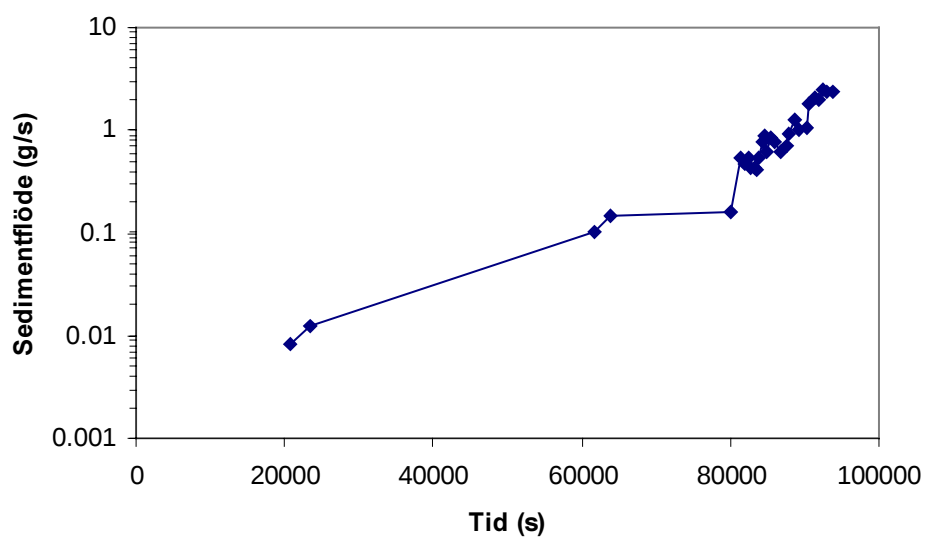
Figur A.1.1. Den hydrauliska gradientens tidsvariation för experiment 1.



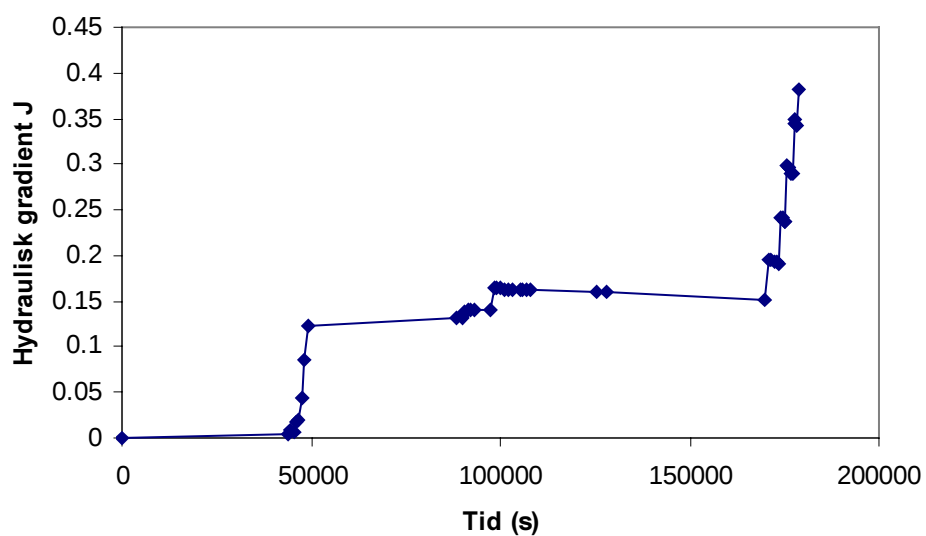
Figur A.1.2. Sedimentflödets tidsvariation för experiment 1. Det förekom ingen mätbar erosion innan $t \approx 70000$ s. Sedimentflöden = 0 g/s kan inte plottas i grafen eftersom y-skalan är logaritmerad.



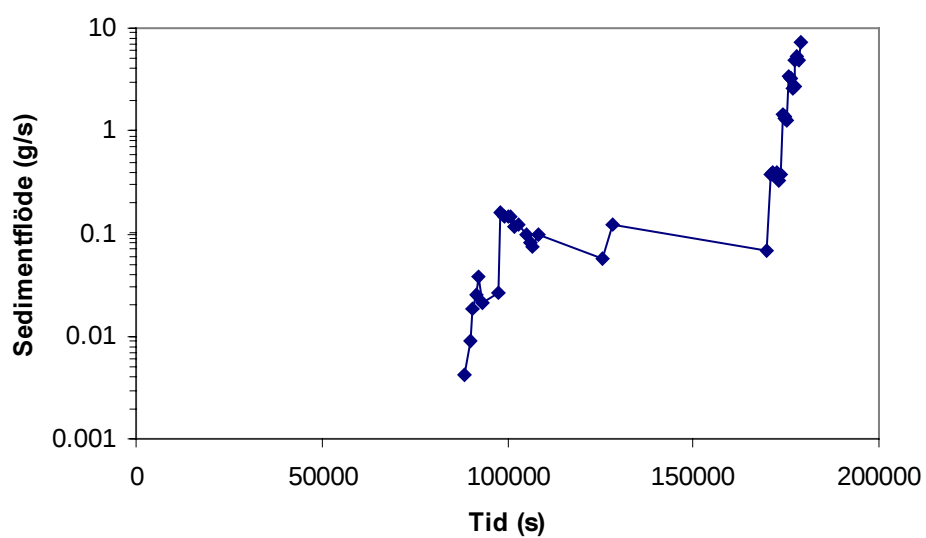
Figur A.1.3 Den hydrauliska gradientens tidsvariation för experiment 2



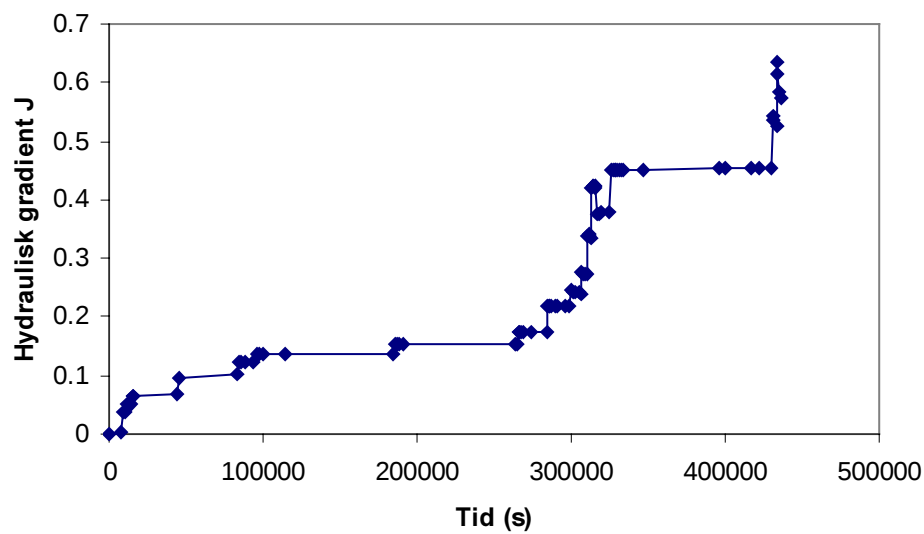
Figur A.1.4. Sedimentflödets tidsvariation för experiment 2. Det förekom ingen mätbar erosion innan $t \approx 20000$ s. Sedimentflöden = 0 g/s kan inte plottas i grafen eftersom y-skalan är logaritmerad.



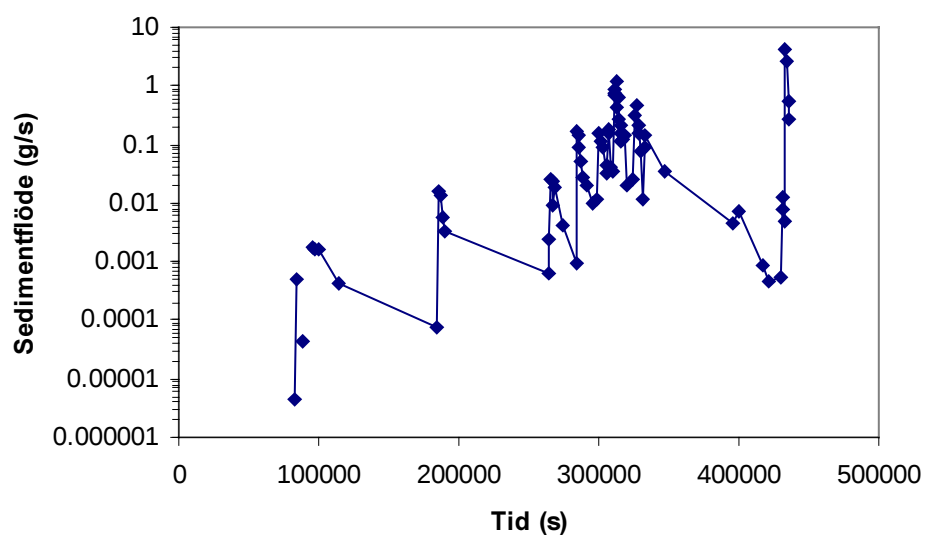
Figur A.1.5. Den hydrauliska gradientens tidsvariation för experiment 3.



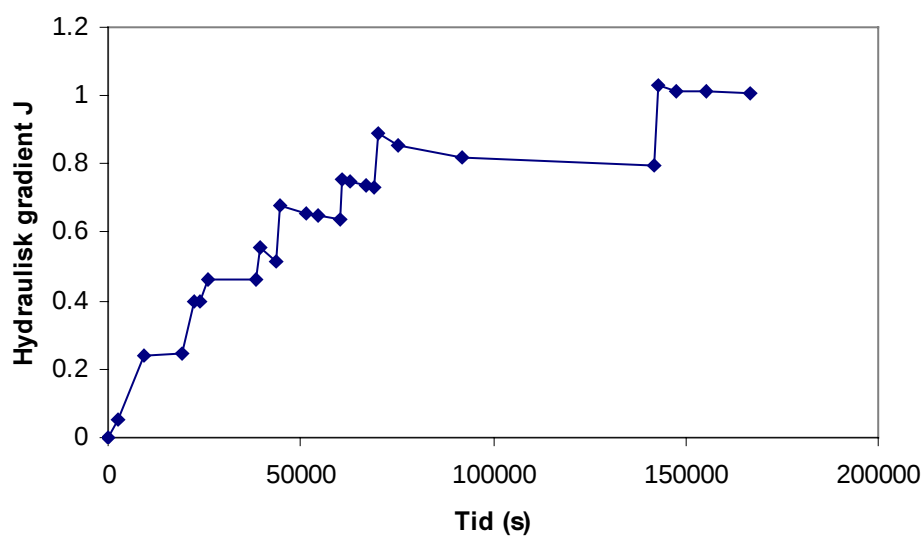
Figur A.1.6. Sedimentflödets tidsvariation för experiment 3. Det förekom ingen mätbar erosion innan $t \approx 85000$ s. Sedimentflöden = 0 g/s kan inte plottas i grafen eftersom y-skalan är logaritmerad.



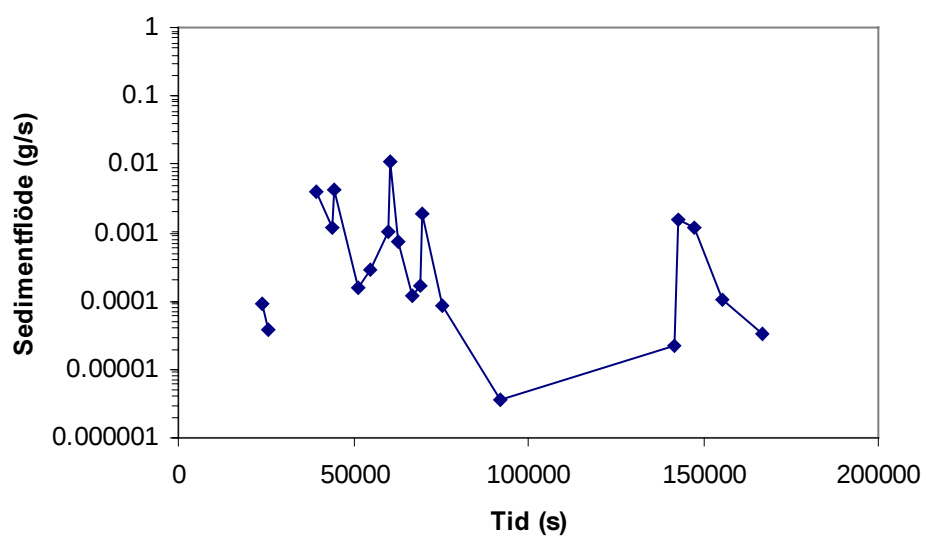
Figur A.1.7. Den hydrauliska gradientens tidsvariation för experiment 4.



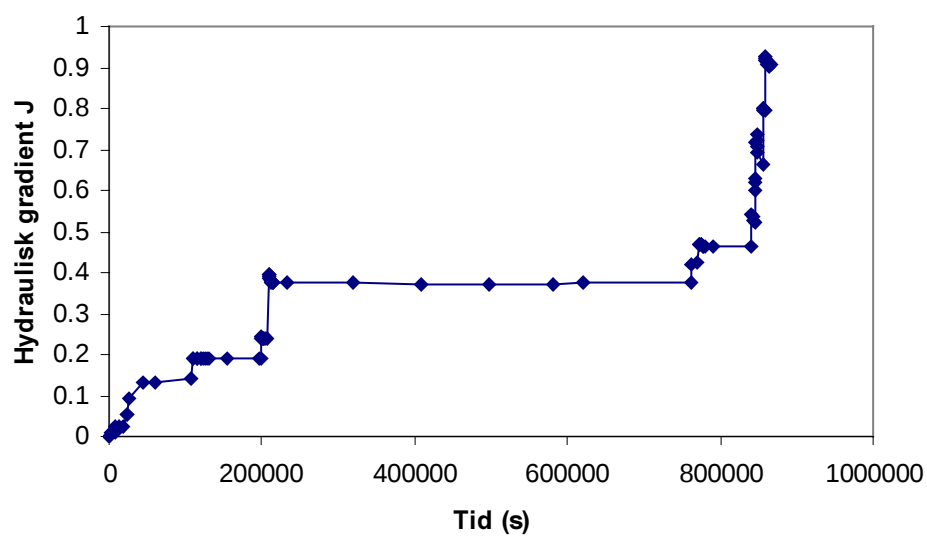
Figu ar erosion
innan $t \approx 75000$ s. Sedimentflöden = 0 g/s kan inte plottas i grafen eftersom y-skalan är
logaritmerad.



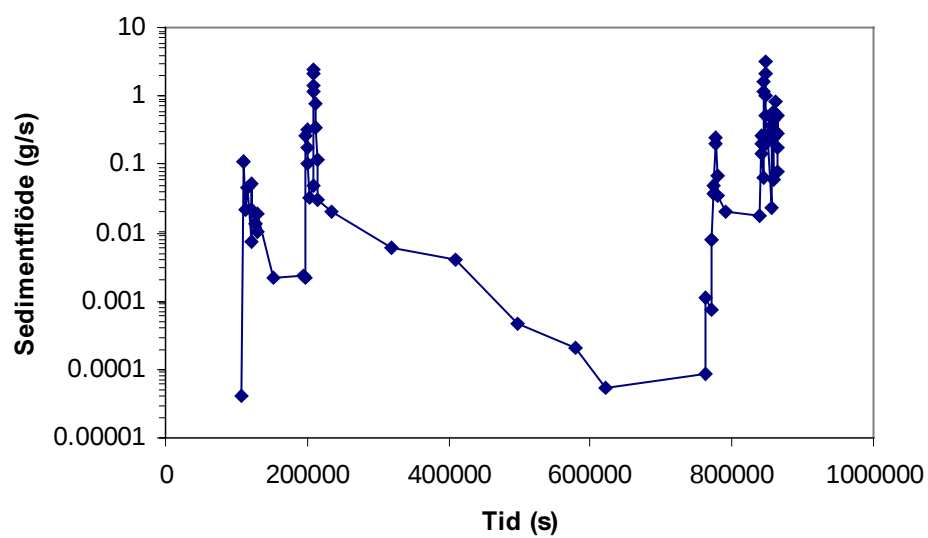
Figur A.1.9. Den hydrauliska gradientens tidsvariation för experiment 5.



Figur A.1.10. Sedimentflödets tidsvariation för experiment 5. Det förekom ingen mätbar erosion innan $t \approx 25000$ s. Sedimentflöden = 0 g/s kan inte plottas i grafen eftersom y-skalan är logaritmerad.



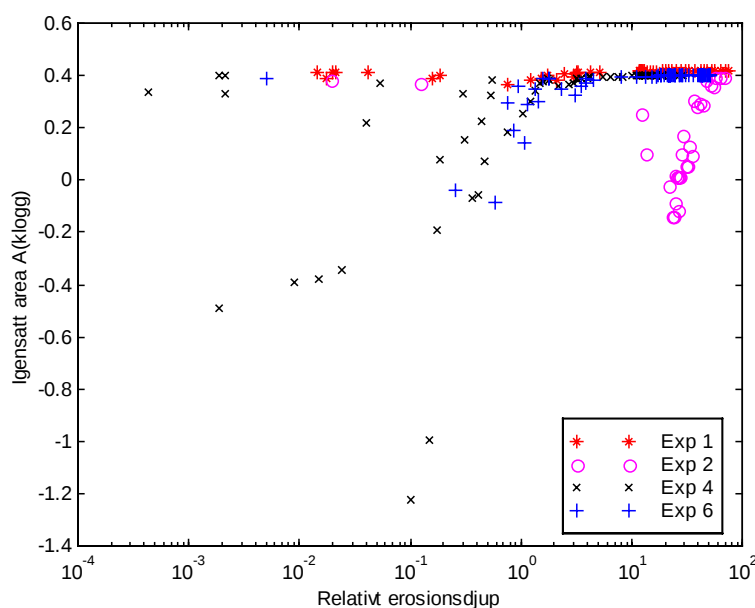
Figur A.1.11. Den hydrauliska gradientens tidsvariation för experiment 6.



Figur A.1.12. Sedimentflödets tidsvariation för experiment 6. Det förekom ingen mätbar erosion innan $t \approx 100000$ s. Sedimentflöden = 0 g/s kan inte plottas i grafen eftersom y-skalan är logaritmerad.

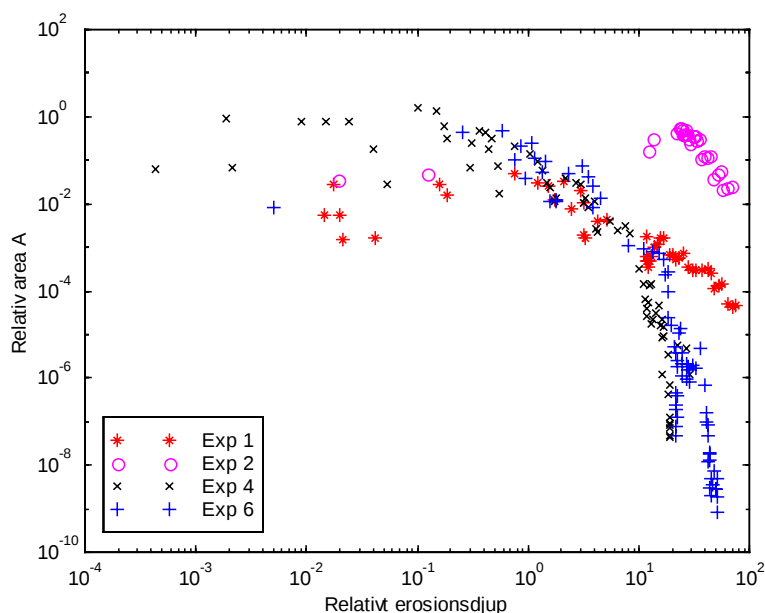
A.2 Igensatt area A_{klogg}

Den igenkloggade arean redovisas i figuren nedan för experiment 1, 2, 4 och 6.



Figur A.2.1 Den igensatta arean plottad mot det relativa erosionsdjupet för exp 1, 2, 4 och 6.

A.3 Relativ area A

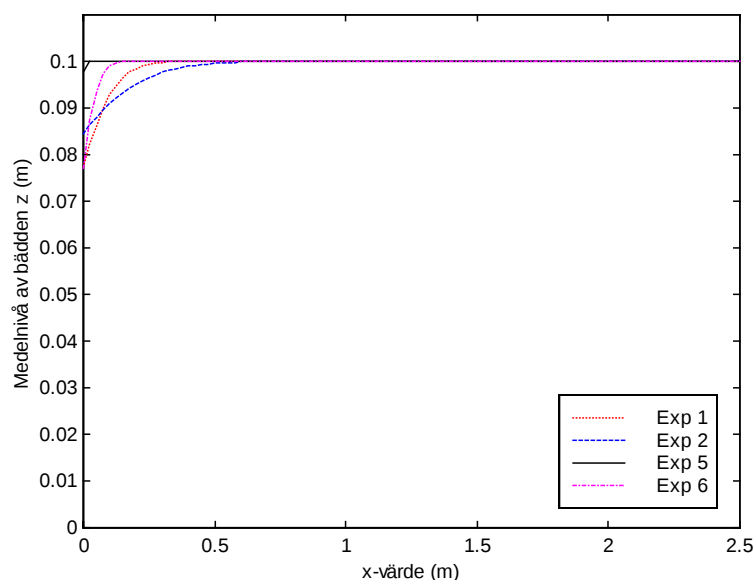


Figur A.3.1 Den relativa arean tillgänglig för erosion plottad mot det relativa erosionsdjupet för experiment 1, 2, 4 och 6.

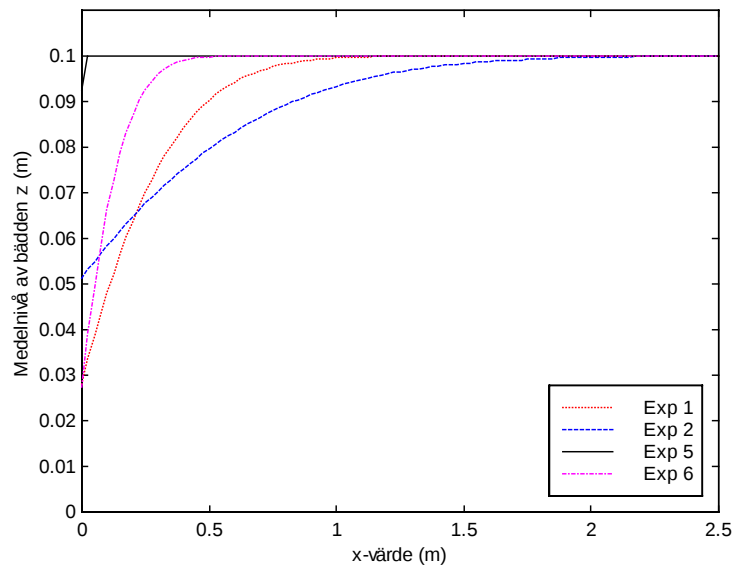
B Simuleringar

B.1 Successiv degradering av basmaterialet

Efter 1000 och 10000 sekunder har följande profiler erhållits enligt den matematiska modell som använts:



Figur B.1.1 Degraderingen av bädden efter 1000 sekunder för exp 1, 2, 5 och 6 enligt den matematiska modell som redovisats i avsnitt 2 och 3. Den ursprungliga nivån är 0.1 m längs hela gränsytan.



Figur B.1.2 Degraderingen av bädden efter 10000 sekunder för exp 1, 2, 5 och 6 enligt den matematiska modell som redovisats i avsnitt 2 och 3. Den ursprungliga nivån är 0.1 m längs hela gränssytan.

C Endimensionella transportekvationen för erosion

C.1 Härledning

Härledningen av den endimensionella transportekvationen för erosion bygger på två ekvationer, nämligen rörelseekvationen för vattenfasen och kontinuitetsekvationen för bäddmaterialet. De återstående två ekvationerna, som ges av problemets hela definition i avsnitt 2.3.1.1, används för att uttrycka då två empiriska koefficienterna som ges av den nedanstående härledningen. Under vissa förutsättningar som definieras här kan transportekvationen uttryckas på formen av (2.9). Innebörden av alla beteckningar i ekvationerna nedan ges i bilaga D.

Rörelseekvationen i på en differentiell, endimensionell form för vattenfasen och masskonserveringen av bäddmaterialet ges av:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial(\rho U^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho(h + z_B))}{\partial x} + \frac{f\rho}{8R_h} \frac{U|U|}{g} = 0 \quad (\text{C.1})$$

$$(1 - n_2) \frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} = 0 \quad (\text{C.2})$$

Ekvation (C.1) brukar ofta tecknas på en form utan tröghetstermer, d.v.s. utan de två första termerna i (C.1). Dessutom gäller i fall med tillräckligt låg strömningshastighet, i vilka friktionskoefficienten $f \propto (U^{-1} R_h^{-1} v)$, att (C.1) kan förenklas på en form som

känns igen som Darcy's lag. Den första tröghetstermen kan försummas även med motiveringen att kvasistationäritet råder, d.v.s. att $\partial h/\partial t = \partial U/\partial t = 0$. Kvasistationäritet kan antas när störningar i erosionsytan fortplantas betydligt långsammare än störningar i vattnet. Övriga nämnda förenklingar påverkar inte den följande härledningen.

Om första termen i (C.1) försummas och (C.1) differentieras med avseende på t erhålls

$$\frac{\partial^2 \left(\frac{U^2}{2g} + h \right)}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 z_B}{\partial x \partial t} + \frac{\partial J}{\partial t} = 0 \quad (C.3)$$

där, för enkelhets skull, den specifika energiförlusten per längdenhet (fjärde termen i (C.1) dividerad med ρ) har betecknats

$$J = \frac{f \rho}{8 R_h} \frac{U |U|}{g} = - \frac{\partial \left(\frac{U^2}{2g} + h + z_B \right)}{\partial x} \quad (C.4)$$

Om (C.2) differentieras med avseende på x erhålls

$$\frac{\partial^2 z_B}{\partial x \partial t} + \frac{1}{(1 - n_2)} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} = 0 \quad (C.5)$$

Genom att kombinera (C.3) och (C.5) kan nu den beroende variabeln z_B elimineras. För att erhålla en differentialekvation i G är det lämpligt att använda kedjeregeln på första termen i (C.3) enligt

$$\frac{\partial^2 \left(\frac{U^2}{2g} + h \right)}{\partial x \partial t} = \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial t} \frac{\partial \left(\frac{U^2}{2g} + h \right)}{\partial G} = \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial t} \frac{\partial \left(\frac{U^2}{2g} + h \right)}{\partial J} \frac{\partial J}{\partial G} \quad (C.6)$$

Kombinationen av (C.3) – (C.6) ger nu en hyperbolisk fältekvation:

$$\frac{\partial G}{\partial t} + K_1 \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + K_2 \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial t} = 0 \quad (C.7)$$

i vilken koefficienterna

$$K_1 = - \frac{1}{(1 - n_2)} \frac{\partial G}{\partial J} \quad (C.8)$$

$$K_2 = \frac{\partial}{\partial J} \left(\frac{U^2}{2g} + h \right) \quad (C.9)$$

Vid likformig strömning ($K_2 = 0$) övergår transportekvationen i en parabolisk fältekvation, d.v.s. den eftersökta ekvationen (2.9). Denna går under benämningen värmeledningsekvationen.

D Beteckningar

I denna bilaga ges en närmare förklaring till olika beteckningar som använts i rapporten.

d_x = kvadratisk siktstorlek som släpper igenom x-viktprocent av basmaterialet [m]

D_x = kvadratisk siktstorlek som släpper igenom x-viktprocent av filtermaterialet [m]

D_H = den har harmoniska projicerade medeldiametern [m]

D_c = maximal porförträngning [m]

C = dimensionslös parameter vid säkerhetsanalysen [-]

n_1 = porositeten hos filtermaterialet [-]

n_2 = porositeten hos basmaterialet [-]

$e_1 = n_1/(1 - n_1)$ portalet hos filtermaterialet [-]

ρ = vattnets densitet ≈ 1000 [kg/m³]

ρ_{part} = partikeldensitet ≈ 2650 [kg/m³]

S_s = specifik densitet $= \rho_{\text{part}}/\rho \approx 2,65$ [-]

d_{cl} = medelkornstorlek hos igensatta korn [m]

η = volymandelen eroderade basmaterials-korn [-]

ε = empirisk koefficient i intervallet 0-2 [-]

$\xi = \frac{V_{er}}{A_b} = \frac{\text{eroderad volym}}{\text{bottenarea}} = \text{erosionsdjupet} \quad [-]$

$Re(d)$ = Reynolds tal karakteristiskt för en viss partikeldiameter d [-]

A = relativ area tillgänglig för erosion i gränsytan [-]

A_{klogg} = relativ igensatt area i gränsytan $= n_1 - A$ [-]

$\alpha = A_{\text{klogg}} \cdot (\xi/d_{85})$ [-]

Q = volymsflödet [m³/s]

q = volymsflödet per enhetsarea [m/s]

V = specifik flödeshastighet = q / n_1 [m/s]

Q_M = sedimentmassflödet [kg/s]

G = sedimentvolymsflödet per enhetsbredd [m³/s/m]

G^* = dimensionslös transportintensitet = $G / (V d_{85})$ [-]

J = hydraulisk gradient [-]

J_{kritisk} = kritisk hydraulisk gradient som används vid säkerhetsanalysen [-]

J^* = typisk filterparameter [-]

K_1 = samband mellan transportintensitet och energigradient [m²/s]

K_2 = likformighetsparameter [m]

ν = kinematisk viskositet [m²/s]

z_B = medelnivå hos bäddmaterialet [m]

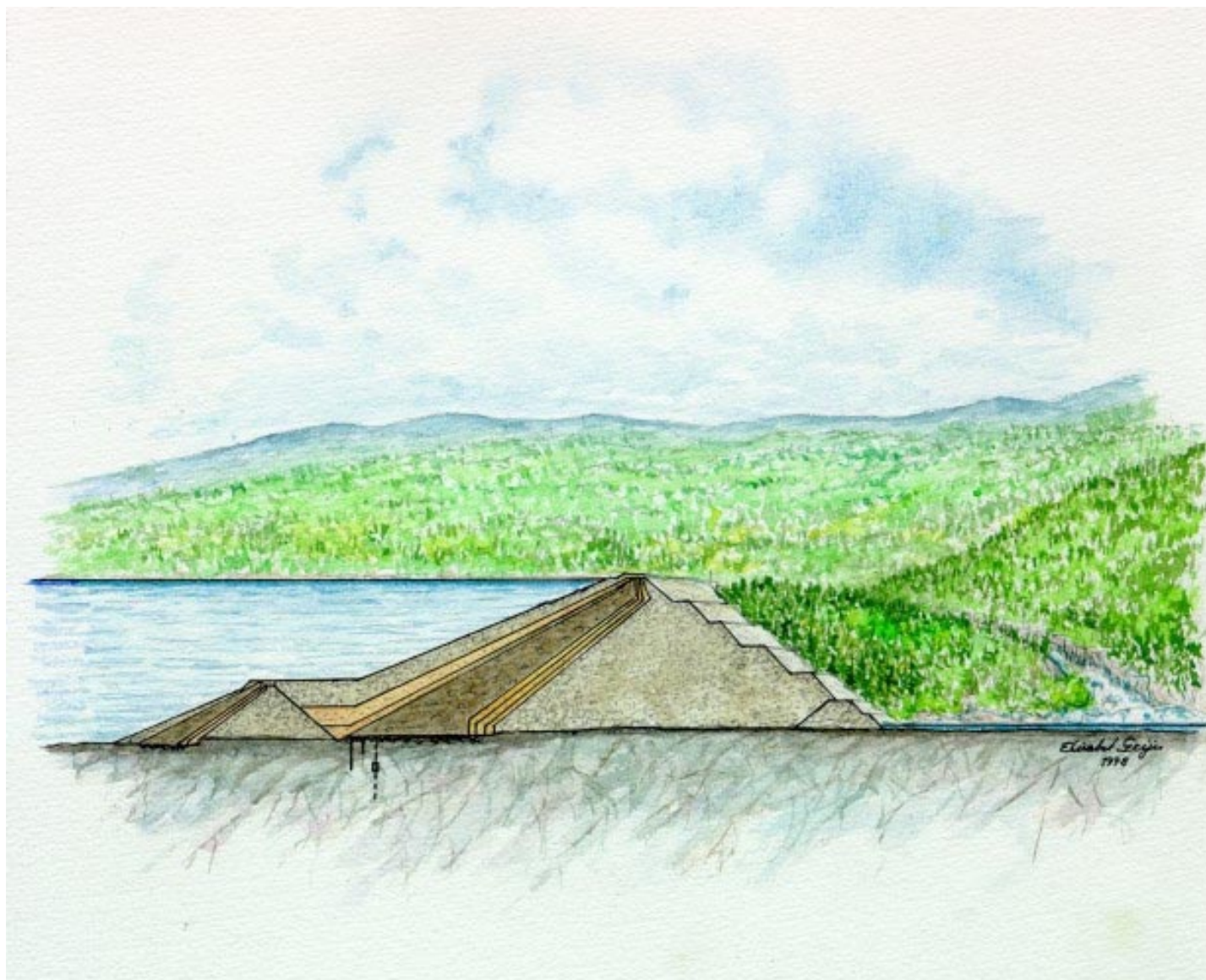
U = medelflödeshastighet [m/s]

g = tyngdaccelerationen ≈ 9.82 [m/s²]

h = vattendjupet [m]

f = friktionskoefficient [-]

R_h = hydraulisk radie [m]



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se