

**ELFORSK**



## **DAMMSAKERHET**

**Svenska fyllningsdammars känslighet för  
inre erosion**

**Rapport 99:33**

# **DAMMSÄKERHET**

**Svenska fyllningsdammars känslighet för  
inre erosion**

**Rapport 99:33**

# **Svenska fyllningsdammars känslighet för inre erosion**

**Elforsk rapport 99:33**

## Förord

BC Hydros W.A.C. Bennett damm i British Columbia, Kanada, är en 183 m hög och ca 2000 m lång jorrdamm som dämmer upp en ca 30 mil lång sjö med en regleringsvolym av 70 miljarder m<sup>3</sup> vatten.

Två sjunkgropar uppstod under juni respektive september 1996 i Bennett-dammen. Man beslöt tillsammans med delstatens dammsäkerhetsmyndighet att magasinsnivån omedelbart skulle sänkas. Därefter startade omfattande undersökningar av dammen både med mer beprövade metoder samt med nyare metoder som legat i forskningens framkant.

Hösten 1996, i anslutning till det inträffade, beslöts det att ett utvecklingssamarbete skulle starta mellan BC Hydro och svensk kraftindustri med inriktning på dammsäkerhetsfrågor kopplade till inre erosion, sjunkgropar och reparationsmetoder.

Utvecklingssamarbetet har varit mycket givande för båda parter. Det var ett unikt tillfälle att direkt kunna få tillgodogöra sig resultatet av de mycket omfattande utrednings-, undersöknings- och FoU-insatser på högsta internationella nivå. Genom detta utbyte har ett antal rapporter från svensk sida tagits fram, bl.a. den föreliggande. I detta samarbete har Urban Norstedt, Vattenfall Vattenkraft, och Gunnar Sjödin, Vattenregleringsföretagen, utgjort styrgrupp för VASO Dammkommitté och kraftindustrin och finansierande företag har varit alla medlemmar i Svenska Kraftverksföreningen.

Stockholm i december 1999

Elforsk AB



## Sammanfattning

Svenska fyllningsdammars känslighet för inre erosion har i föreliggande rapport studerats genom att tillämpa resultat från filterförsök utförda internationellt. I svenska fyllningsdammar har under årens lopp ett flertal sjunkgropar rapporterats. Groparnas storlek har varierat inom vida gränser, från smågropar med några decimeters diameter och djup till mycket stora gropar med en volym upp till i storleksordningen 30 m<sup>3</sup>. Förstärkningsåtgärder har i flera fall vidtagits och riskerna för framtida sjunkgropar och riskerna för fortlöpande erosion har diskuterats.

En metod beskrivs där man genom att studera korngraderingen hos filter och tätjord för den aktuella dammen ges möjlighet att bedöma riskerna för fortlöpande erosion. Informationen kommer främst från University of New South Wales i Australien där forskning bedrivs genom filtertester och allmänna studier av inre erosion i fyllningsdammar.

Det vanliga kravet på korngraderingen för nedströmsfiltret i en fyllningsdamm med moränkärna är numera att minst 15 % av materialet skall vara mindre än 0,7 mm. Vidare bör, för att undvika stenseparation, maximala stenstorleken i filtret begränsas till 25 mm. Svenska dammar har oftast grövre filter och speciellt de som byggdes 1970 till 1975 har grövre filter i jämförelse med dammar som färdigställts under övriga perioder. Vidare har noterats att i flera av dessa dammar med grövre filtermaterial har inre erosion uppstått, vilket visat sig i form av sjunkgropar.

Resultaten från filterförsöken gjorda i Australien har grupperats enligt följande:

- **Ingen erosion:** filtret tätar med praktiskt taget ingen erosion av basmaterialet
- **Viss erosion:** filtret tätar efter ”viss” erosion av basmaterialet
- **Kontinuerlig erosion:** filtret är alltför grovt för att det eroderade materialet skall täta igen filterövergången, vilket medför obegränsad erosion.

De nya laboratorieförsöken i gruppen ”ingen erosion” bekräftar i huvudsak ovanstående regler som fortfarande rekommenderas bli använda för nya dammar. Resultaten som grupperas i de två övriga grupperna visar att en markant säkerhet finns i filterreglerna om en viss erosion tillåts, men kontinuerlig erosion är osannolik.

Resultaten från laboratorieförsöken har tillämpats på två svenska dammar; Stenkullaforsdammen och Suorvadammen.

Dammen i *Stenkullafors* har ett maximalt D<sub>15</sub> på filtret av 1,4 mm, vilket är för högt för ”ingen erosion” men är lägre än gränsen för ”kontinuerlig erosion”. Medelvärde på D<sub>15</sub> uppfyller dock troligen kriteriet mindre än 0,7 mm, dvs mindre än gränsen för ”ingen erosion”. Enligt bedömningsgrunderna för filterfunktionen för befintliga dammar kan förväntas att förloppet avstannar antingen utan eller med viss erosion. Denna bedömning verkar stämma bra med verkligheten, eftersom Stenkullaforsdammen har haft viss inre erosion i tät kärnan. Förloppet avstannade dock innan någon markant erosion inträffade.

Dammen i **Suorva** har ett maximalt  $D_{15}$  på filtret av 2,4 mm, vilket är för högt för ”ingen erosion”. Vidare är troligen också medelvärdet på  $D_{15}$  högre än 0,7 mm, dvs högre än gränsen för ”ingen erosion”. Enligt bedömningsgrunderna för filterfunktionen för befintliga dammar kommer det härigenom att vid en koncentrerad läcka vara lika sannolikt att förloppet självläker med viss erosion som ett förlopp med ingen självläkning med stor erosion. Denna bedömning för Suorva verkar också stämma bra med verkligheten, eftersom dammen har haft inre erosion i tätkärnan och att det krävdes markanta volymer (ca 30 m<sup>3</sup>) innan förloppet självläcktes.

Inre erosion i moräner har under de senaste årtiondena diskuterats i ett flertal referenser. Inre erosion har konstaterats i dammar både med icke kohesiva som kohesiva material i tätkärnan. Erfarenheterna visar att då dessa dammar varit utsatta för koncentrerade läckage har finmaterialet i moränen inom partier eroderat och transporterats bort från tätkärnan, medan grov sand och grus lämnats kvar.

I rapporten redovisas metoder för att från moränens korngradering bestämma om moränen är inre stabil eller instabil. Utvärdering enligt en av metoderna har gjorts av korngraderingen för tätjorden i Stenkullaforsdammen och i Suorvadammen. Den grövre moränen i båda dammarna indikeras vara instabil inom hela sin gradering. Delar av tätkärnorna i de båda dammarna bedöms härigenom innehålla material som har förutsättningar för inre erosion. Nedströmsfiltrets gradering kan härigenom förväntas bestämma om förloppet avstannar eller kommer att fortgå.

## Summary

The venerability of Sweden's embankment dams for internal erosion has been examined in this report by applying results from internationally conducted filtration experiments. Over the years, there have been a number of sinkholes reported in Swedish embankment dams. The size of the sinkholes have varied within a fairly wide range, from small holes measuring only a few decimetres in diameter and depth to much larger holes with volumes of nearly 30 m<sup>3</sup>. In some cases, reinforcement measures have been instituted and there has been a discussion of the risks for future sinkholes and ongoing erosion.

One method described involves analyzing the particle size distribution in the filter and impervious fill in the dam being examined, providing an opportunity to assess the risks for ongoing erosion. The information comes primarily from the University of New South Wales in Australia where research is being done with filter testing and general studies of internal erosion of embankment dams.

Nowadays, the most common requirement for the particle size distribution at an embankment dam's downstream filter is that at least 15% of the material shall be less than 0.7 mm when the core material consists of fine grained moraine. Also, in order to avoid stone separation, the maximum stone size in the filter should be limited to 25 mm. Swedish dams often have coarser filters, and especially those built between 1970 and 1975 have coarser filters in comparison with dams built at other times. It has also been noted that several dams with coarser filter material have experienced internal erosion, which manifested itself in the form of sinkholes.

The results from the filter experiments done in Australia have been grouped as follows:

- **No erosion:** the filter sealed with practically no erosion of the base material
- **Some erosion:** the filter sealed after "some" erosion of the base material
- **Continuous erosion:** the filter is too coarse to seal the eroded material within the filter, which resulted in unlimited erosion.

For the most part, the new laboratory experiments within the group "no erosion" confirms that the above stated rule should continue to be recommended for use with the construction of new dams. The results from the other two groups show that there is a clear degree of safety in filter rules where some erosion is allowed, but continuous erosion is improbable.

The results from the laboratory experiments have been applied to two Swedish dams, the Stenkullafors Dam and the Suorva Dam.

The dam at **Stenkullafors** has a maximum D<sub>15</sub> in the filter of 1.4 mm, which is too high for "no erosion" but is under the limit for "continuous erosion". However, the average value for D<sub>15</sub> probably meets the criterion of less than 0.7 mm, i.e., less than the limit for "no erosion". Based on the evaluation criteria for filter functions in existing dams, it can be expected that the process self heal with no or with some erosion. This assessment seems to be in agreement with reality, since the Stenkullafors Dam has had some

internal erosion in the impervious core. However, the process stopped before any noticeable erosion occurred.

The dam at **Suorva** has a maximum  $D_{15}$  for the filter of 2.4 mm, which is too high for “no erosion”. Also, it is likely that the average value for  $D_{15}$  is higher than 0.7 mm, i.e., higher than the limit for “no erosion”. Therefore, based on the evaluation criteria for filter functions in existing dams, it is just as likely for dams with a concentrated leakage that the process self heals on its own when there is a certain amount of erosion, as it is for there to be no spontaneous self heal and a greater amount of erosion. This opinion for the Suorva Dam seems to agree quite well with reality, since the dam has had internal erosion in the impervious core and that it required a considerable volume (about 30 m<sup>3</sup>) before the process self healed on its own.

During the most recent decades, internal erosion in moraines has been discussed in several contexts. Internal erosion has been verified in dams with both non-cohesive and cohesive material in the impervious cores. Experience has indicated that when these dams have been subjected to concentrated leakage the fines within the moraines were eroded and transported away from the impervious core, while the coarser sand and gravel were left.

The report describes methods for determining whether the moraine is internally stable based on the moraine’s particle size distribution. Evaluation according to one of methods was made of the particle size distribution for the impervious fill at the Stenkullafors Dam and at the Suorva Dam. The coarser moraines in both of the dams appeared to be unstable throughout the entire range of grain size distribution. For this reason, portions of the impervious cores in both the dams were judged to contain material with the prerequisites for internal erosion. Therefore, the grain size distribution at the downstream filters can be expected to shed light on whether the process will self heal or if it will continue.



## Innehållsförteckning

|          |                                                                        |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INLEDNING.....</b>                                                  | <b>2</b>  |
| 1.1      | BAKGRUND.....                                                          | 2         |
| 1.2      | MÅL .....                                                              | 3         |
| <b>2</b> | <b>FILTERREGLER SOM TILLÄMPAS FÖR SVENSKA FYLLNINGSDAMMAR.....</b>     | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>EROSIONENS UTVECKLING VID FILTERTESTER .....</b>                    | <b>6</b>  |
| 3.1      | ORIENTERING.....                                                       | 6         |
| 3.2      | FILTRETS INNEHÅLL AV FINMATERIAL, (D15 -MÅTTET) I SVENSKA DAMMAR ..... | 7         |
| 3.3      | BESTÄMNING AV FILTERKRITERIER FÖR "INGEN EROSION" .....                | 8         |
| 3.4      | BESTÄMNING AV FILTERKRITERIER FÖR "FORTGÅENDE EROSION ".....           | 9         |
| <b>4</b> | <b>MORÄNENS KÄNSLIGHET FÖR "INRE EROSION" .....</b>                    | <b>15</b> |
| 4.1      | ORIENTERING.....                                                       | 15        |
| 4.2      | KRITERIER FÖR BEDÖMNING AV KÄNSLIGHET FÖR INRE EROSION .....           | 15        |
| 4.3      | TILLÄMPNING PÅ SVENSKA MORÄNER .....                                   | 18        |
| <b>5</b> | <b>SLUTSATSER .....</b>                                                | <b>21</b> |
| <b>6</b> | <b>REFERENSER.....</b>                                                 | <b>23</b> |

## 1 Inledning

Svenska fyllningsdammars känslighet för inre erosion har i föreliggande rapport studerats genom att tillämpa resultat från filterförsök utförda internationellt. Innehållet av sand i moränen, som oftast används som material i tät kärnan, påverkar eventuella marginaler för filterregler, som t ex finns angivna i Vattenfalls handbok ”Jord- och Stenfyllningsdammars” (1988).

Projektet har genomförts av Åke Nilsson, SwedPower. Gunnar Sjödin från Vattenregleringsföretagen har följt projektet och lämnat värdefulla synpunkter.

Vidare har Ingvar Ekström, SwedPower, genom Vattenfalls VMI-stipendium med studier vid University of New South Wales i Australien, bidragit med information om pågående forskning med filtertester vid universitetet. Ingvar har också granskat rapporten.

### 1.1 Bakgrund

Bennett Dam, som föranlett det forskningssamarbete där denna utredning ingår, är uppbyggd med en tät kärna av liknande material som tät kärnor av morän i svenska dammar. Moränens egenskaper avseende risk för inre erosion, förmågan till självläkning och inverkan av nedströmsfiltrets kornfördelning har även på senare år varit under diskussion för svenska dammar.

I det följande redovisas hur utländska resultat från filterförsök med moräner som basmaterial kan tillämpas på svenska moräner. Resultat har studerats från analyser om filter redovisade av M. Foster och R. Fell vid University of New South Wales, Australia, [1] och [2]. Vidare har resultat från tester av inre stabilitet hos filter redovisade av T.C. Kenney och D. Lau [3] tillämpats på olika svenska material.

Sjungkropar är i de flesta fall ett tecken på att inre erosion i dammen har inträffat. Från internationell statistik över dammbrott framgår att inre erosion i dammkroppen, eller i dammens grundläggning, är den vanligaste orsaken till dammbrott för fyllningsdammars. Grovt räknat beror 1/3 av dammbrotten på inre erosion och ungefär lika stor del, dvs 1/3, på höga flöden som t ex medför överströmning av dammkrönet. Resterande tredjedel av inträffade dammbrott har mycket varierande orsaker.

Under det senaste årtiondet har ett flertal rapporter som beskriver fall av inre erosion i svenska dammar publicerats, jämför t ex referenser i VASO-rapport nr 16 [4] där en inventering av förändringar i svenska fyllningsdammars presenteras.

I Sverige har inga dammbrott inträffat på grund av inre erosion (räknat på samma sätt som för ICOLDs statistik, dvs på dammar högre än 15 m). Under årens lopp har dock sjungkropar rapporterats i ett flertal svenska fyllningsdammars. Groparnas storlek har varierat inom vida gränser, från smågropar med några decimeters diameter och djup till

mycket stora gropar med en volym upp till i storleksordningen  $30 \text{ m}^3$ . I några av fallen har förstärkningsåtgärder vidtagits i form av injekteringar eller genom att ny tätning införts, t ex i form av en stålspons. Vidare har i några fall dränageanordningar längs dammens nedströmstå utökats. Slutligen har i ett par fall gjorts ombyggnad av skadade dammen. Beskrivning och utvärdering av rapporterade sjunkgropar i svenska dammar har tidigare studerats i samarbetet mellan B.C. Hydro och VASO, se [5].

När inre erosion konstaterats i svenska dammar har i nästan alla fall noterats att nedströmsfiltret haft ett alltför grov gradering i förhållande till vad man idag skulle acceptera vid nybyggnad. Inre erosionen har dock i nästan alla fall avstannat av sig själv innan några åtgärder hunnit vidtas. Riskerna för framtida händelser och riskerna för att fortlöpande erosion uppstår har varit svåra att bedöma. Faktorer som påverkar riskerna är t ex stödfyllningens erosionsmotstånd, möjlighet till snabb avsänkning av magasinet och omfattningen av instrumentering som ger möjlighet till tidig varning.

## **1.2 Mål**

Målet med föreliggande utredning är att öka förståelsen för förutsättningarna för inre erosion. Vidare presenteras nya utländska erfarenheter om inre erosion i fyllningsdammar, vilka bedöms kunna tillämpas på svenska förhållanden. En metod beskrivs där man genom att studera korngraderingen hos filter och tätjord för den aktuella dammen ges möjlighet att bedöma om det finns förutsättningar för fortlöpande erosion. Behovet av eventuella åtgärder bör härigenom bättre kunna optimeras.

## 2 Filterregler som tillämpas för svenska fyllningsdammar

Filterreglerna som anges i Vattenfalls handbok [6] baseras i huvudsak på regler från Bureau of Reclamation. Reglerna har i viss mån anpassats till svensk laboratoriestandard till följande definitioner:

$d$  = kornstorlek hos basmaterial för tätjord (oftast bredgraderad morän) räknas på material  $< 20$  mm. Då basmaterialet utgörs av finfiltret används dock totalsiktningsskurvan.

$D$  = kornstorleken för filtermaterialet räknas på allt material (totalsikturvor).

Vidare räknas finjordshalten, dvs halt av material  $< 0,06$  mm, på material  $< 20$  mm.

Nedanstående filterkrav innebär hårdare krav än vad som enligt praxis använts under perioden då flertalet av de svenska fyllningsdammarna byggdes.

Filterreglerna, som allmänt avser den grövsta tillåtna filtermaterialet (inte medelkurvor), för såväl månggraderade som ensgraderade basmaterial framgår av **Tabell 2.1**.

**Tabell 2.1 Filterregler för olika basmaterial**

| Basmaterial med<br>finjordshalt $< 30$ % | Basmaterial med<br>finjordshalt $30 - 80$ % |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| $4 < D_{15}/d_{15} < 40$ *               | $D_{15}/d_{15} > 5$                         |
| $D_{15}/d_{85} < 4$ **                   | $D_{15} < 0,7$ mm                           |
| $D_{50}/d_{50} < 25$                     | $D_{50}/d_{50} < 25$                        |

\* detta krav avgörande för månggraderat basmaterial

\*\* detta krav avgörande för ensgraderat basmaterial

Nedströmsfiltret närmast tätkärnan anses som det viktigaste filtret i en fyllningsdamm. Moränen som används till tätjord i svenska fyllningsdammar innehåller oftast, åtminstone till någon del, en högre finjordshalt än  $30$  %. Detta medför att kravet på  $D_{15} < 0,7$  mm i de flesta fall blir dimensionerande för nedströmsfilter.

För att filtret skall få tillräcklig **inre stabilitet** bör kornkurvan vara linjär och ej språnggraderad. Filter av sand med  $D_{90}$  mindre än  $25$  mm behöver normalt ingen ytterligare begränsning av ojämnhetsgraden. För grövre filter kan dock ytterligare begränsningar av kornfördelningen vara lämpliga, vilka bestäms från fall till fall.

Risken för **stenseparation** begränsas genom att maximala stenstorleken begränsas enligt kraven i **Tabell 2.2**.

**Tabell 2.2**      **Maximal stenstorlek hos filter för att undvika stenseparation**

| Minimum $D_{10}$<br>för filtermaterialet, mm | Maximum $D_{90}$<br>för filtermaterialet, mm |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| < 0,5                                        | 20                                           |
| 0,5 - 1,0                                    | 25                                           |
| 1,0 - 2,0                                    | 30                                           |
| 2,0 - 5,0                                    | 40                                           |
| 5,0 - 10,0                                   | 50                                           |
| 10,0 - 50,0                                  | 60                                           |

Det vanliga kravet på  $D_{15} < 0,7$  mm medför att  $D_{10}$  faller inom intervallet 0,5 – 1,0 mm. Risken för stenseparation medför härigenom oftast att  $D_{90}$  behöver begränsas till 25 mm.



### 3 Erosionens utveckling vid filtertester

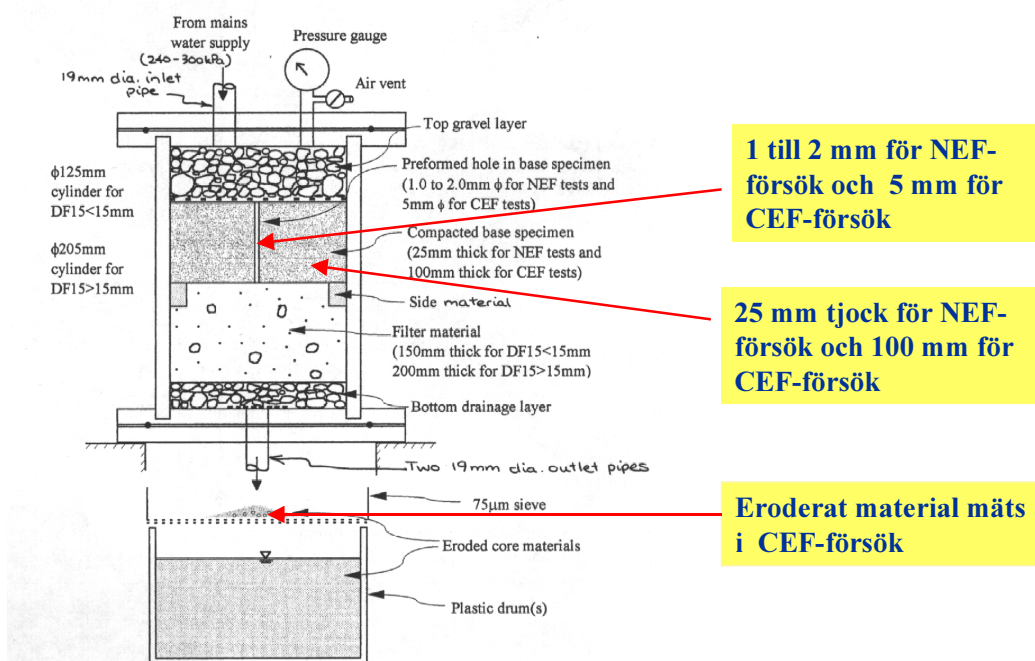
#### 3.1 Orientering

Moderna filterregler, som t ex tillämpas i Sverige enligt avsnitt 2 ovan, baseras på filtertester som avses efterlikna en spricka i tätkärnan fram till filtret. Filtertesterna och reglerna som framkommit av resultaten har rekommenderats av Sherard och Dunnigan (1989), se [7]. Filtertesterna utvärderade gränsen då ingen synbar erosion inträffade då vatten strömmade genom ett hål (1 mm diameter) som "förtillverkades" genom basmaterialet.

Filterförsök har under senare år genomförts för att studera hur erosionen utvecklas då något grövre filter används i jämförelse med ovan nämnda försök där ingen synbar erosion tilläts, jämför analyser gjorda av M. Foster och R. Fell vid University of New South Wales, Australia, [1] och [2].

Två olika typer av försök genomfördes; NEF och CEF-tester vilket menas:

- NEF** None Erosion Filter test, dvs försök för att bestämma filteregenskaper då ingen erosion uppstår
- CEF** Continuing Erosion Filter test, dvs försök för att bestämma filteregenskaper då fortgående erosion uppstår.

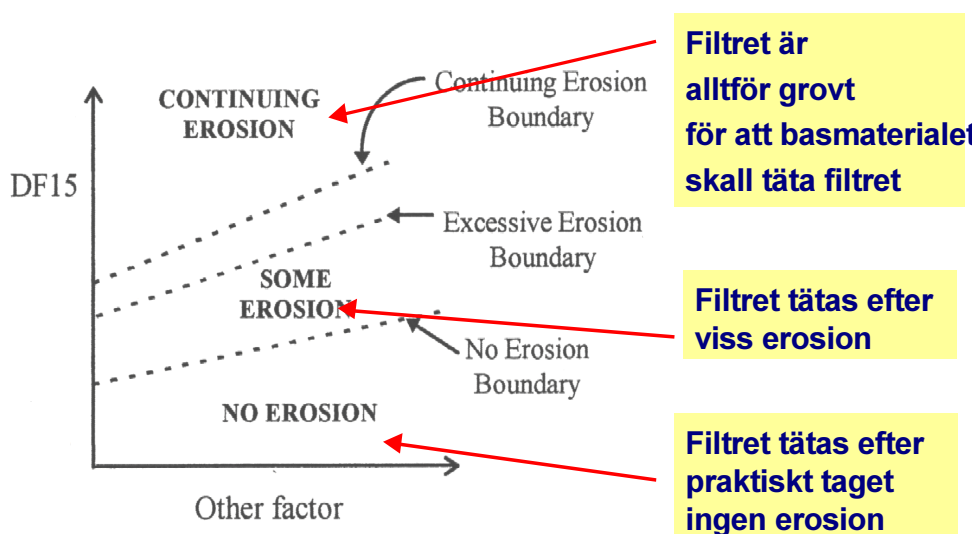


Figur 3.1 Apparat för filtertest för bestämning gränsen för fortgående erosion, referens [2]

Resultaten från filterförsöken har grupperats enligt följande:

- **Ingen erosion:** filtret tätar med praktiskt taget ingen erosion av basmaterialet
- **Viss erosion:** filtret tätar efter ”viss” erosion av basmaterialet
- **Kontinuerlig erosion:** filtret är alltför grovt för att det eroderade materialet skall täta igen filterövergången, vilket medför obegränsad erosion

Filtrets funktion bestäms för moräner i huvudsak av kravet på kornstorlek för de minsta 15 % hos filtermaterialet. De olika grupperna av resultat kan härigenom schematiskt illustreras av **Figur 3.2**.



Figur 3.2 Erosionsgränser enligt M. Foster and R. Fell [2]

### 3.2 Filtrets innehåll av finmaterial, (D15 -måttet) i svenska dammar

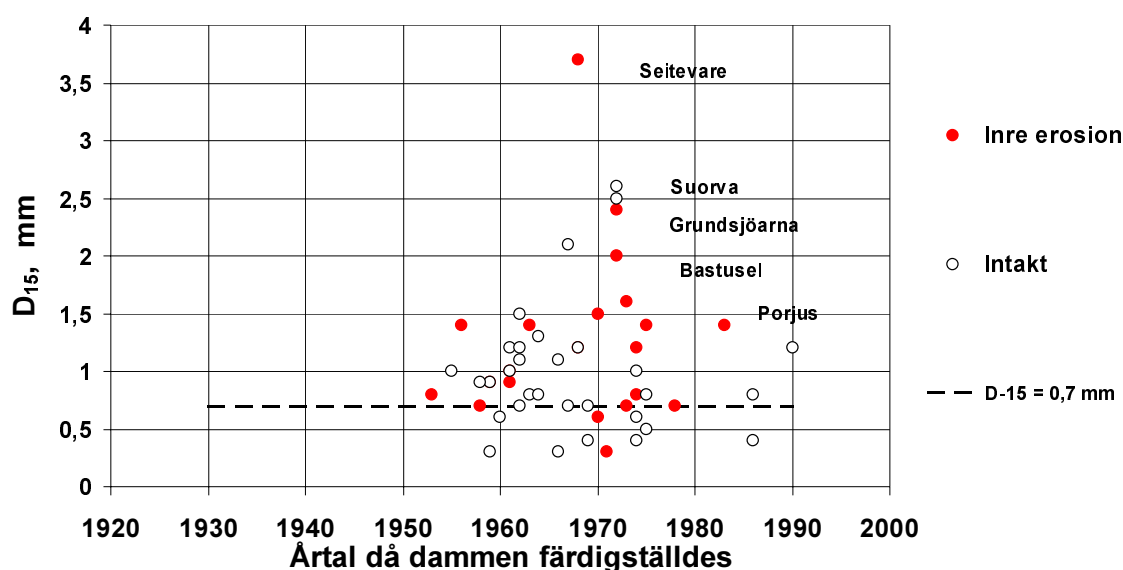
En ofta angiven förklaring till att dammar utsätts för inre erosion är att nedströmsfiltren är felaktigt dimensionerade eller utförda. Från en siktkurva kan bl.a.  $D_{15}$  definieras, vilken enligt nuvarande filterregler som ovan nämnts vanligen inte får överstiga 0,7 mm.

Får att undersöka vilken inverkan  $D_{15}$ -måttet har haft på de svenska dammarnas status har en sammanställning gjorts i referens [8]. I rapporten redovisas  $D_{15}$  både för dammar där sjunkgropar rapporterats och för dammar som inte uppvisat några sådana skador. Angivna mått på  $D_{15}$  avser den grövsta rapporterade siktkurvan i en kurvskara. Vid utvärderingen har man dock bortsett från enstaka ”udda” kurvor.

Siktkurvorna som påträffats för filtren avser normalt inte totalsiktning utan har ett  $D_{\max}$  på t ex 16 mm eller 64 mm. Filtren innehåller dock många gånger också grövre material

av okänd mängd. I praktiken innebär detta att angivna värden för t ex  $D_{15}$  och  $D_{50}$  skall ökas med något okänt värde för att vara representativa för hela materialet.

Resultatet av filterinventeringen av svenska dammar visas i **Figur 3.3** där även nuvarande filterpraxis ( $< 0,7$  mm) är inlagt med en streckad linje. Kornfördelningen  $D_{15}$  för anläggningen i Juktan, som rapporteras till 27 mm räknat på totalsiktningsskurvan, har uteslutits i diagrammet eftersom den är så stor att den faller utanför skalan i diagrammet.



**Figur 3.3** Storleken på  $D_{15}$  för dammens nedströmsfilter i förhållande till året då dammen färdigställdes, referens [5]

Resultatet i figuren visar att dammar som byggdes 1970 till 1975 i allmänhet har grövre filter i jämförelse med dammar som färdigställts under tidigare år. Från figuren framgår vidare att i flera av dessa dammar med grövre filtermaterial har det uppstått inre erosion som visat sig i form av sjunkgropar.

### 3.3 Bestämning av filterkriterier för "ingen erosion"

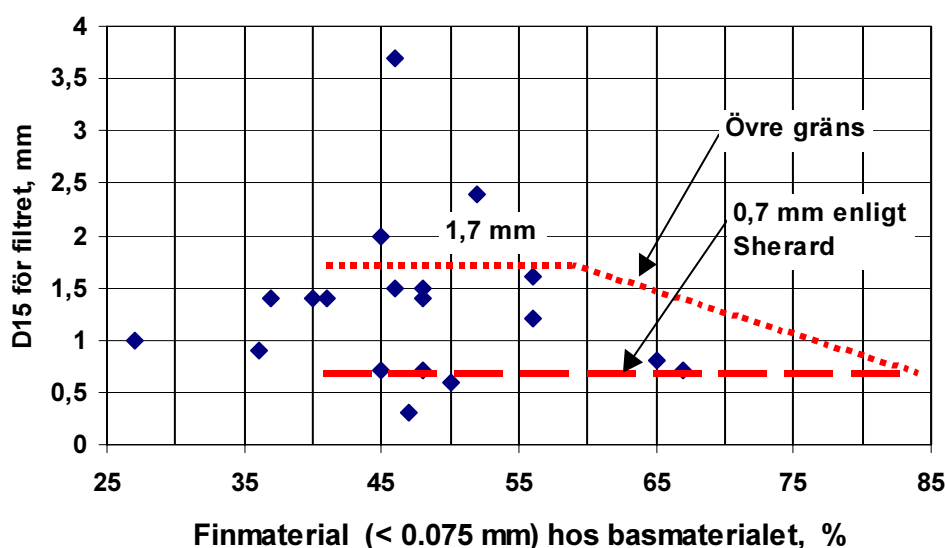
De nya filtertesterna av Foster & Fell [2] gjordes först med målet att verifiera resultaten av Sherards försök, se [7]. I det följande redovisas endast försöksresultat för filter som skall skydda Grupp 2 material, dvs tätjord som enligt Sherard innehåller 40 – 80 % finmaterial. De nya laboratorieförsöken är omfattande och bekräftar i huvudsak Sherards resultat. Mindre variationer erhöles dock enligt följande:

- En viss marginal (säkerhet) verkar finnas på  $D_{15}$ -mättet 0,7 mm för filtret då tätjorden som skall skyddas av filtret innehåller det lägre finjordshalten inom intervallet (40 – 80 %). Filterförsöken indikerar att  $D_{15}$ -mättet möjligen skulle kunna ökas till 1,7 mm i den lägre delen av intervallet, se **figur 3.4**.

- Gränserna för Grupp 2 material bör vidgas till att omfatta material som innehåller 35 – 85 % finmaterial.

Det bör här noteras att i internationella filterregler har finmaterialhalten räknats på material < 5,6 mm, medan i de svenska reglerna har definitionen på finmaterialhalten anpassats till Svenska Geotekniska Föreningens (SGFs) standard där halten räknas på materialmängden < 20 mm. De ovan angivna gränserna (35 och 85 %) motsvarar ungefär 25 – 80 % vid en omräkning till material < 20 mm. Detta innebär att intervallet genom sänkning av den undre gränsen utökats något i jämförelse med nuvarande svenska reglerna redovisade under avsnitt 2 ovan.

Gränserna har markerats streckade i Figur 3.4 där också resultaten från den svenska filterinventeringen lagts in.



**Figur 3.4** Gräns för "ingen erosion" dels enligt Sherard, dels enligt Foster och Fell referens [2]. Punkterna avser exempel på resultat från svenska dammar. Finmaterialhalten för basmaterialet är räknat på material < 4,75 mm, medan  $D_{15}$  för filtret räknat är på allt material.

Det skall här betonas att Foster & Fell rekommenderar att för nya dammar skall fortfarande Sherards filterkriterier användas med  $D_{15}$ -gränsen 0,7 mm. Gränserna för Grupp 2 föreslås dock bli utvidgade till intervallet 35 – 85 % finmaterial hos basmaterialet.

### 3.4 Bestämning av filterkriterier för "fortgående erosion "

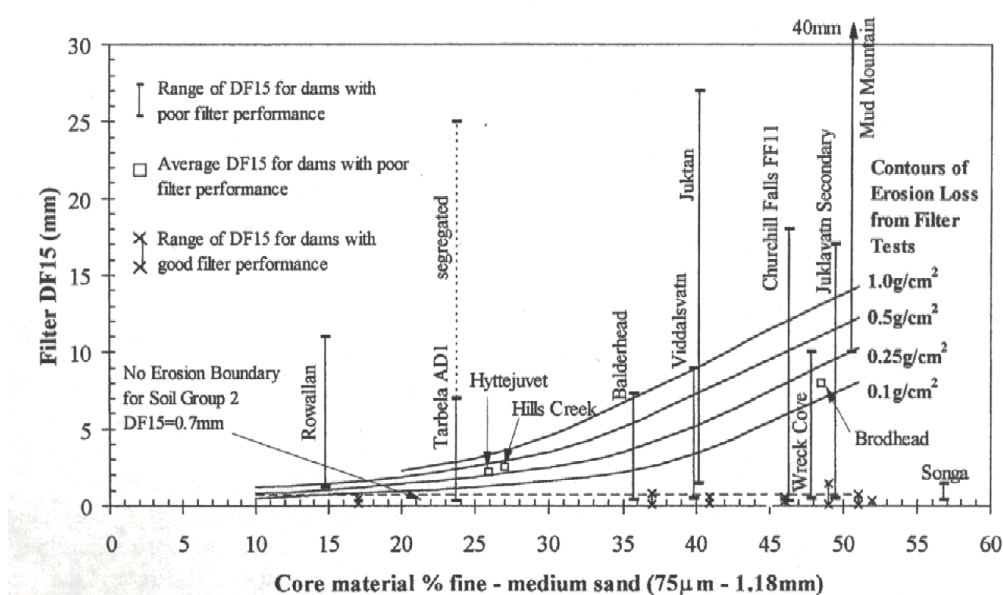
#### 3.4.1 Filtertester av Foster & Fell

Resultaten från nya filtertester med apparaten, som ovan beskrivits i avsnitt 3.1, där fortgående erosion kan mätas, visar att mängden eroderat material är starkt beroende av basmaterialets sandinnehåll. **Figur 3.5** visar uppmätta erosionsmängden uppritat i förhållande till  $D_{15}$  för filtret och mängden fin- och mellansand i basmaterialet.

Mängden fin och mellansand avser partiklar i intervallet 0,075 – 1,18 mm räknat i procent av material mindre än 4,75 mm.

För en konstant storlek på  $D_{15}$  för filtret erhålls avtagande erosionsmängd med ökat sandinnehåll hos basmaterialet. Kurvor för lika erosionsmängd har inritats med hjälp av interpolering mellan försöksresultaten. Vidare har markerats gränsen för "ingen erosion", dvs  $D_{15} = 0,7$  mm som erhållits från NEF-försök (None Erosion Filter test).

I figuren har Foster & Fell [1] och [2] också jämfört laboratorieresultaten med praktikfall med dammar med dåliga och bra erfarenheter av inre erosion. Resultat från dammarna i Juktan ( $D_{15} = 27$  mm) finns bl.a. inlagt i figuren. Filterna i Juktan ligger dock markant utanför kurvorna där avstannande erosion kan förväntas, vilket stämmer väl överens med erfarenheterna från fält, jämför referens [9].

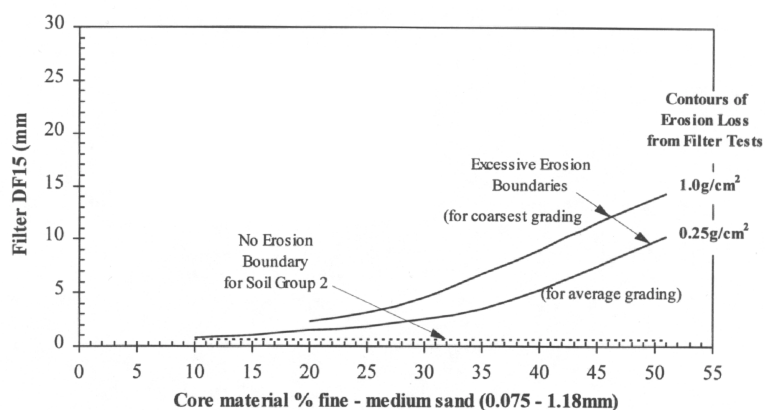


**Figur 3.5 Jämförelse mellan erosionsmängder vid filtertester och dammar med dåliga och bra erfarenheter av inre erosion**

Foster & Fell [2] har med ledning av försöksresultaten och jämförelser med praktikfallen föreslagit följande gräns där fortlöpande erosion kan förväntas:

- Då genomsnittliga  $D_{15}$  för filtermaterialet är större än kurvan som ger  $0,25 \text{ g/cm}^2$  vid provning i apparaten för fortlöpande erosion, jämför **Figur 3.1**.
- Då övre gränsen för  $D_{15}$  för filtermaterialet är större än kurvan som ger  $1,0 \text{ g/cm}^2$  vid provning i apparaten för fortlöpande erosion

Ovanstående gränser avser grupp 2 material, dvs basmaterial som innehåller 35 till 85 % finmaterial (räknat på material mindre än 4,75 mm). De utvalda gränskurvorna visas i **Figur 3.6**.



Figur 3.6 Gränser för fortlöpande erosion, referens [2]

För att bedöma riskerna för filterfunktionen vid eventuell koncentrerad läcka i befintliga dammar föreslår Foster & Fell [2] att filtrets och stödfyllningens kornstorlek undersöks och resultaten jämförs med gränskurvorna för fortlöpande erosion enligt figur 3.6. Beroende på filtrets största och medelstorlek av  $D_{15}$  i förhållande gränserna i figuren föreslås i referensen att riskerna för filterfunktionen bedöms enligt följande **Tabell 3.1**.

Tabell 3.1 Bedömning av filterfunktionen för befintliga dammar

| Grupp | Aktuellt $D_{15}$ i jämförelse med erosionsgränser från filtertester |                           | Sannolik filterfunktion vid eventuell koncentrerad läcka |                             |                                     |
|-------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
|       | Medel $D_{15}$ i dammen                                              | Största $D_{15}$ i dammen | Avstannar utan erosion                                   | Självläker med viss erosion | Ingen självläkning med stor erosion |
| 1     | = I E                                                                | = I E                     | Sannolikt                                                | Osannolikt                  | Högst osannolikt                    |
| 2     | = I E                                                                | > I E och = K E           | Lika sannolikt                                           |                             | Osannolikt                          |
| 3     | > I E                                                                | = K E                     | Osannolikt                                               | Lika sannolikt              |                                     |
| 4     | = I E och = K E                                                      | > K E                     | Osannolikt                                               | Osannolikt                  | Sannolikt                           |
| 5     | > K E                                                                | > K E                     | Högst osannolikt                                         | Osannolikt                  | Högst sannolikt                     |

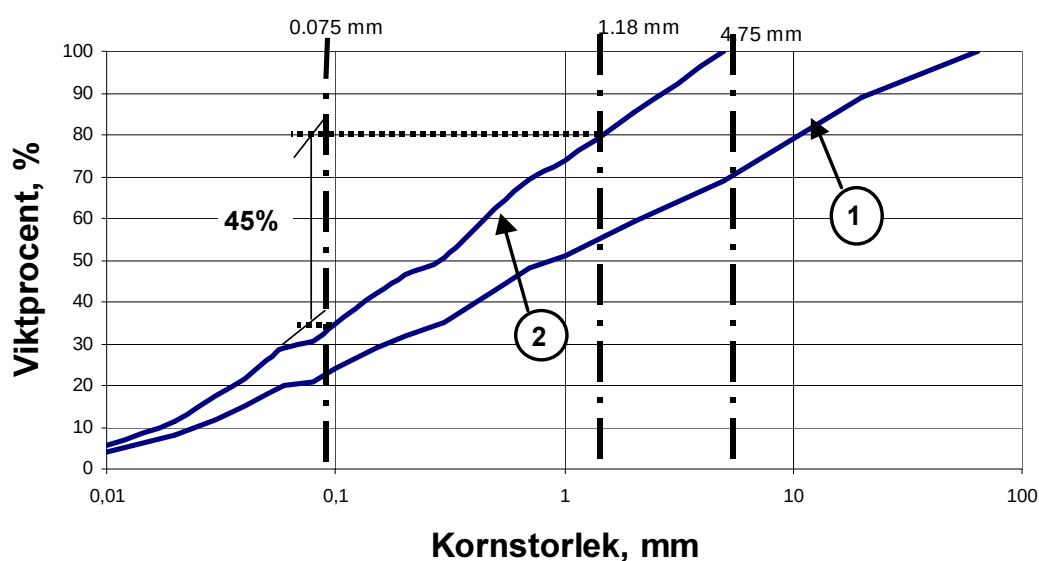
I E = Gräns för Ingen Erosion K E = Gräns för Kontinuerlig Erosion

### 3.4.2 Tillämpning på svenska fyllningsdammar

Korngraderingen för nedströmsfiltret i svenska dammar finns inventerat i referens [8]. Resultaten i inventeringen kan dock inte direkt jämföras med resultaten från laboratorieförsöken, eftersom redovisade laborativvärden från byggnadstiden ofta avser siktningar bara av delen mindre än 16 eller 64 mm. Det är därför sannolikt att de siktade proverna inte varit representativa för allt material i filtren, utan att man sorterat bort de grövsta fraktionerna innan siktningen. Vidare har i inventeringen noterats den grövsta korngraderingen för filtret, vilket gör att information om medelvärde för graderingen inte är lätt tillgängligt. Uppgifter från tätjorden finns delvis i referens [5], men även här saknas uppgifter om moränens innehåll av fin- och mellansand.

I det följande har därför endast översiktligt studerats två fall; dammarna i Stenkullafors och Suorva.

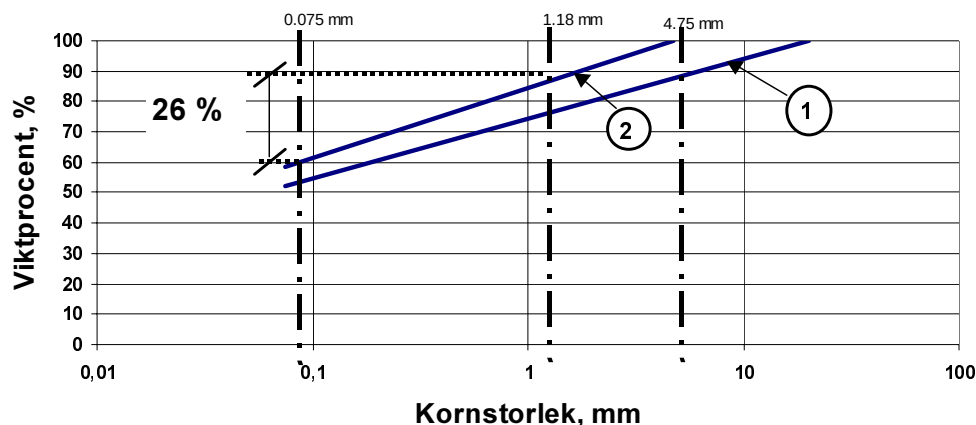
Korngraderingen av tätjorden i **Stenkullafors** framgår av **Figur 3.7**. Från siktkurva (1) av material mindre än 64 mm har graderingen för material mindre än 4,75 mm ritats upp, jämför kurva (2). Innehållet av fin- och mellansand, dvs partiklar i intervallet 0,075 – 1,18 mm räknat i procent av material mindre än 4,75 mm, kan härigenom bestämmas till ca 45 %. Enligt filterinventeringen är maximala  $D_{15}$  ca 1,4 mm. I ett digram för bedömning av fortlöpande erosion enligt [2] kommer härigenom värdena för sandinnehållet i basmaterialet och  $D_{15}$  för filtret att hamna under gränsen för erosionsmängden  $0,25 \text{ g/cm}^2$ , jämför **Figur 3.9**.



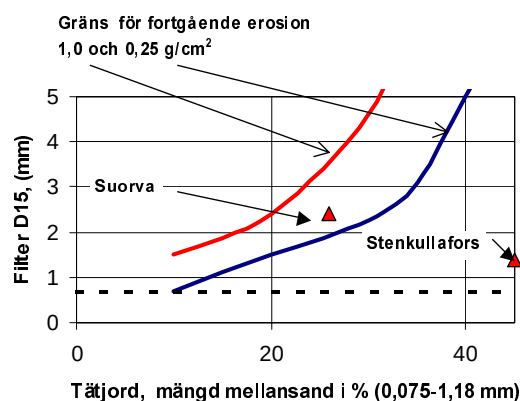
**Figur 3.7** Exempel på bestämning av “sandinnehållet” hos basmaterialet (räknat på material < 4,75 mm), exempel från Stenkullafors

Korngraderingen av tätjorden i **Suorva** innehåller som mest ca 52 % finmaterial och är åtminstone bitvis markant finkornigare än tätjoden i Stenkullafors. Innehållet av fin- och mellansand blir med motsvarande utvärdering som ovan ca 26 %, jämför schematisering i **Figur 3.8**. Enligt filterinventeringen är maximala  $D_{15}$  ca 2,4 mm. I digrammet för bedömning av fortlöpande erosion kommer härigenom Suorva att hamna över gränsen för erosionsmängden  $0,25 \text{ g/cm}^2$ , men under erosionsgränsen  $1,0 \text{ g/cm}^2$ , (där erosionsvärdena på samma sätt som i figur 3.6 avser fortlöpande erosionsgränsen då man använder medelvärdet respektive övre gränsen för  $D_{15}$  för filtermaterialet), jämför **Figur 3.9**.





**Figur 3.8** Exempel på bestämning av "sandinnehållet" hos basmaterialet (räknat på material < 4,75 mm), exempel från Suorva



**Figur 3.9** Innehållet av fin- och mellansand för Stenkullafors och Suorva jämfört med erosionsmängden 1,0 och 0,25 g/cm<sup>2</sup> vid filtertester enligt [2]

Dammen i *Stenkullafors* har som ovan nämnts ett maximalt  $D_{15}$  på filtret av 1,4 mm, vilket är för högt för "ingen erosion" men är lägre än gränsen för kontinuerlig erosion enligt figur 3.9. Medelvärdet på  $D_{15}$  är uppfyller dock troligen kriteriet mindre än 0,7 mm, dvs mindre än gränsen för "ingen erosion".

Enligt bedömningsgrunderna för filterfunktionen för befintliga dammar (tabell 3.1) kommer dammen att hamna i grupp 2. Vid en koncentrerad läcka kan härigenom förväntas att förloppet avstannar antingen utan eller med viss erosion.

Denna bedömning verkar stämma bra med verkligheten, eftersom Stenkullaforsdammen enligt referens [11] och [12] har haft viss inre erosion i tatkärnan. Förloppet avstannade dock innan någon markant erosion inträffade.

Dammen i *Suorva* har som ovan nämnts ett maximalt  $D_{15}$  på filtret av 2,4 mm, vilket är för högt för "ingen erosion". Vidare är troligen medelvärdet på  $D_{15}$  högre än 0,7 mm,

dvs högre än gränsen för ”ingen erosion”. Vid jämförelse med gränserna för kontinuerlig erosion ligger värdena över gränsen  $0,25 \text{ g/cm}^2$  (vilken avser medelvärdet för graderingen) enligt **Figur 3.9**. Den kontinuerliga erosionsgränsen  $1,0 \text{ g/cm}^2$ , som avser den största graderingen, överskrids dock inte.

Enligt bedömningsgrunderna för filterfunktionen för befintliga dammar (tabell 3.1) kommer härigenom dammen att hamna i grupp 3. Vid en koncentrerad läcka bedöms det härigenom vara lika sannolikt att förloppet självläker med viss erosion och ett förlopp med ingen självläkning med stor erosion.

Denna bedömning för Suorva verkar också stämma bra med verkligheten, eftersom dammen enligt referens [9] har haft inre erosion i tät kärnan och att det krävt markanta volymer (ca  $30 \text{ m}^3$ ) innan förloppet självläktes.

## 4 Moränens känslighet för "inre erosion"

### 4.1 Orientering

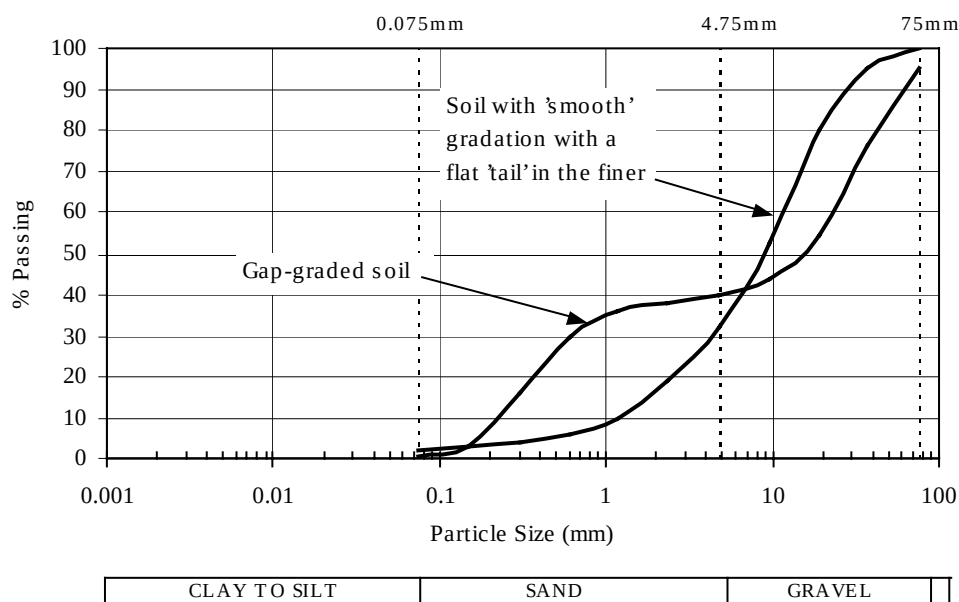
Inre erosion (suffusion) i moräner har under de senaste årtiondena diskuterats i ett flertal referenser. Inre erosion kan inträffa i icke kohesiva material, vilket framgår av t ex laboratorieförsök av Kenney and Lau [3]. Vidare har inre erosion konstaterats i dammar både med icke kohesiva som kohesiva material i tätkärnan, Sherard 1989 [7]. I den senare referensen redovisas praktikfall där incidenter med inre erosion förekommit på dammar med tätkärnor av bredgraderat material. Inre erosion i tätkärnan anges särskilt aktuell då materialet är av glacialt ursprung (morän).

Erfarenheterna visar att då dessa dammar varit utsatta för koncentrerade läckage har finmaterialet i moränen inom partier eroderat och transporterats bort från tätkärnan, medan grov sand och grus lämnats kvar.

### 4.2 Kriterier för bedömning av känslighet för inre erosion

Ett flertal kriterier finns för att bedöma känsligheten för inre erosion. De mest använda är de som föreslagits i de ovan nämnda referenserna [3] och [7].

För språnggraderade material, dvs material där vissa fraktioner saknas anges Sherards metod vara tillämplig. För jämt graderade material med en "svans" av finare material anses metoden som beskrivits av Kenney & Lau [3] vara tillämplig, jämför **Figur 4.1**.



**Figur 4.1** Exempel på jord med jämn- och språnggrading, referens [3]

För språnggraderad jord anger Sherard att jorden är självläkande om siktkurvan delas upp i två material och de båda materialen uppfyller följande villkor:

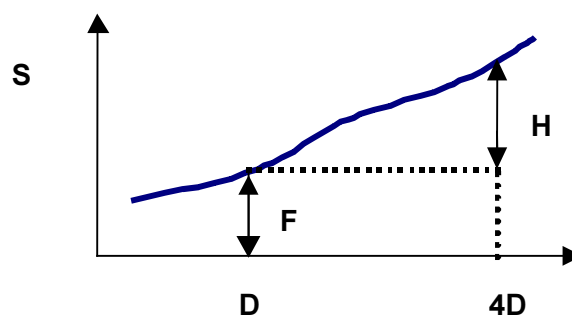
$$\frac{D_{15grova}}{D_{85fina}} < 5$$

där  $D_{15grova}$  = D15 för det grova materialet

$D_{85fina}$  = D85 för det fina materialet

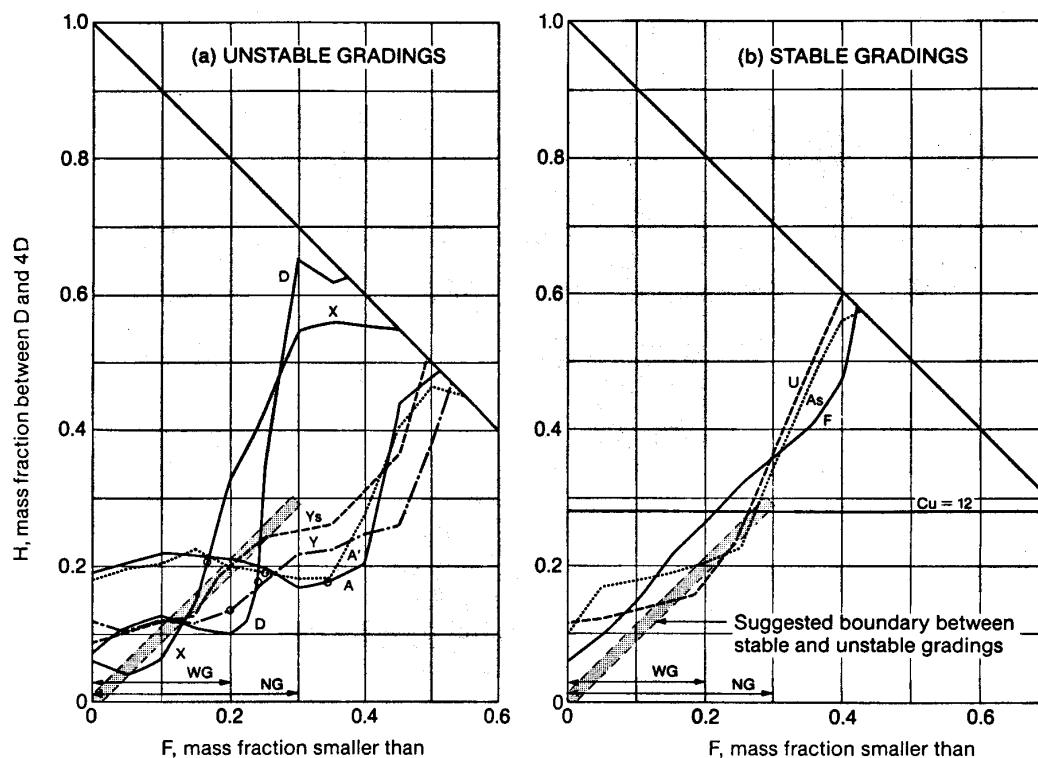
För jämt graderade material med en "svans" av finare material kan enligt [3] utvärderingen göras enligt följande:

Kornkurvans form beskrivs av kornstorleken D och kornstorleken 4AD enligt **Figur 4.2**.



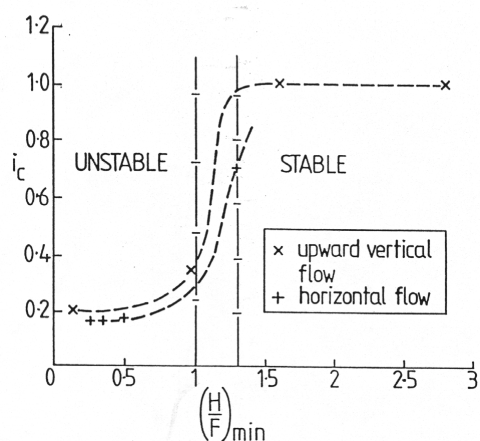
**Figur 4.2** Definition av enheterna D, F och H enligt Kenney & Lau 1985 [3]

Kornkurvan kan genom denna metod beskrivas med en lista av samhörande värden på F och H som ritas upp i diagramform som exemplen i **Figur 4.3**.



Figur 4.3 Utvärdering av inre stabilitet enligt Kenney & Lau 1985 [3]

Stabilitetsindex ( $H/F$ ) mindre än 1 indikerar material som ej är inre stabilt. För material som har index mindre än 1 fordras vidare en minsta gradient för att initiera inre erosion. Gradienten är enligt Skempton and Brogan [10] beroende av minsta värdet på  $H/F$  **Figur 4.4**.



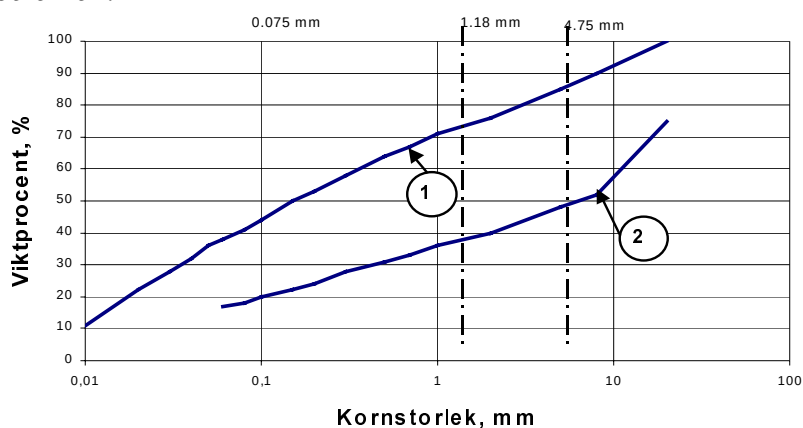
Figur 4.4 Förslag till erforderlig kritisk gradering vid olika stabilitetsindex ( $H/F$ ), Skempton och Brogan [10]

Laboratorieförsöken som utfördes av Kenney & Lau [3] är gjorda på grövre material som innehåller mindre finmaterial än de svenska moränerna som används till tät kärnor.

Det är därför möjligt att försöksresultaten inte är helt tillämpbara. Det förefaller finnas olika uppfattning mellan olika forskare om tillämpbarheten av försöken. Forskning pågår internationellt på flera ställen med filtertester. Förhoppningsvis kommer försök genomföras i framtiden på graderingar av morän av glacialt ursprung liknande de som används i Sverige till fyllningsdammars tätkärnor.

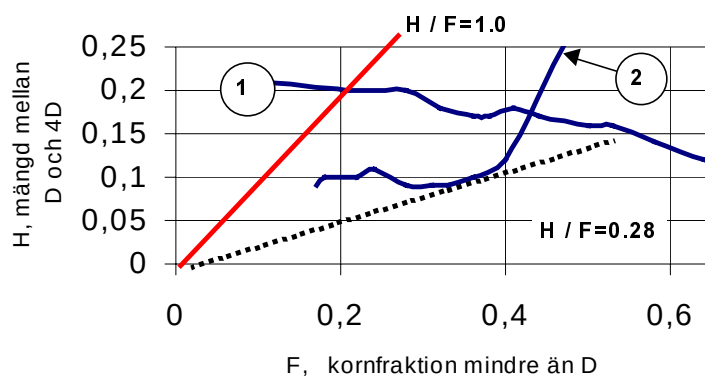
### 4.3 Tillämpning på svenska moräner

Moränen i tätkärnan i *Stenkullafors* har korngradering som ligger mellan de två kurvorna i **Figur 4.5**. Kurva 1 representerar det mest finkorniga och kurva 2 det grövsta materialet i tätkärnan.



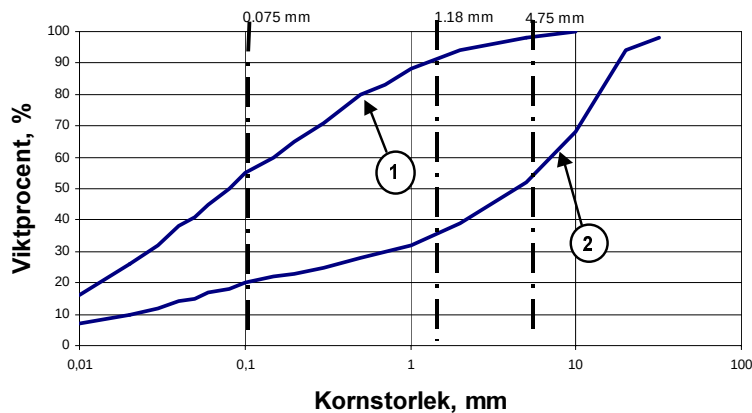
**Figur 4.5** Korngradering för tätjord i Stenkullafors, kurva 1 finaste och 2 grövsta materialet

Tillämpning av kriteriet för inre instabilitet enligt [3] på de båda kurvorna illustreras i **Figur 4.6**. Finmaterialet i det finaste materialet (kurva 1) indikeras här ha stabilt finmaterial, då kurvan ligger i det stabila området för korngraderingen mindre än ca 0,2 mm. Det grövsta materialet (kurva 2) indikeras på motsvarande sätt vara instabilt inom hela sin gradering. För detta inte stabila material kan man vidare se att minimum  $H/F = 0,28$ . Enligt figur 4.4 medför detta stabilitetsindex att det behövs en minsta gradient av så lågt som ca 0,2 för att transportera materialet. Den verkliga gradienten i fält kan i större delen av dammkroppen antas variera mellan 1 och 2, varför gradienten är mer än tillräcklig för att transportera finmaterialet i moränen som har den grövre korngraderingen.



**Figur 4.6** Metod för bedömning av inre stabilitet. Tättjord från Stenkullafors. Kurva 1 och 2 gradering enligt (1) respektive (2) i figur 4.5. Stabilitetsindex ( $H/F$ ) utvärderad för kurva (2).

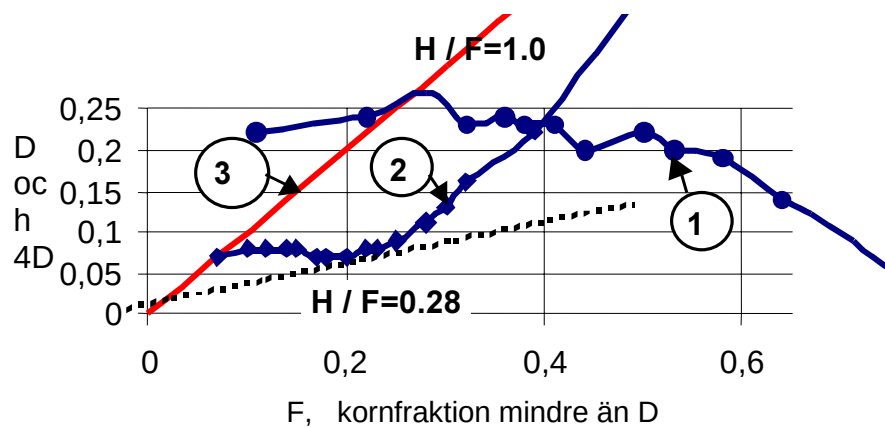
Korngraderingen för tätjorden i **Suorvadammen** framgår av **Figur 4.7**. Motsvarande tillämpning av kriteriet för inre instabilitet på de båda kurvorna erhålls illustreras i **Figur 4.8**. Finmaterialet i det finaste materialet (kurva 1) indikeras här på samma sätt som för Stenkullafors ha stabilt finmaterial, då kurvan ligger i det stabila området då korngraderingen är mindre än 0,2 mm. Det grövsta materialet (kurva 2) indikeras på motsvarande sätt vara instabilt inom hela sin gradering. Det grövsta materialet i Suorva har mycket lika korngradering som motsvarande material i Stenkullaforsdammen.



**Figur 4.7** Korngraderingen för tätjord i Suorva. Kurva (1) är "övre" finare gränsen av materialet, medan kurva (2) är "undre" grövsta gränsen av materialet

På motsvarande sätt som för Stenkullaforsdammen indikerar resultaten från laboratorieförsöken att gradienten i fält är så stor att finmaterialet i den grövre moränen kan transporteras av det genomsipprande vattnet inom tätkärnan i riktning mot nedströmsfiltret.





**Figur 4.8** Metod för bedömning av inre stabilitet. Tättjord från Suorva. Kurva 1 och 2 gradering enligt (1) respektive (2) i figur 4.7. Linje 3 avser gräns mellan stabilt och ej stabilt material. Stabilitetsindex ( $H/F$ ) utvärderad för kurva (2).

## 5 Slutsatser

Inre erosion (suffusion) i en fyllningsdamms tätkärna innebär att finmaterialet i tätjord som inte är stabil tvättas ur. Detta kan leda till dammbrott med följande händelsekedjor:

- Ökad läckning som leder till bakåtgripande erosion (piping)
- Håligheter kan formas i tätkärnan, eller undergrunden, som leder till sättningar i dammkrönet och överströmning
- Ökning av portrycket och minskning av hållfastheten i dammen eller undergrunden som leder till skred och överströmning

Inre erosion i fyllningsdammars tätkärnor kan dels bero på alltför grova filter, dels bero på separering vid utläggning av filtret. Begränsning av stenstorleken är till för att undvika separering, som medför att filtret lokalt blir alltför grovt och urspolning av tätmaterial kan ske.

Om dammbrott inträffar vid läckage beror till stor del av stödfyllningens dränagekapacitet och erosionsstabilitet. Vid fyllningsdammar med relativt tät stödfyllning kan även mindre läckage ge höga portryck i stödfyllningen och stabilitetsproblem eller orsaka erosion.

I de flesta fall med inre erosion visar erfarenheter både i Sverige och utomlands, jämför referens [4], [5], [9] och [11] till [14], att sjunkgropar utvecklats utan att detta orsakat dammbrott. Det avstannande förloppet beror bl.a. på att det sker en självläkning i filterzonen.

Enligt [2] rekommenderas att för nya dammar bör filterkriteriet  $D_{15} < 0,7$  mm tillämpas för nedströmsfiltret då basmaterialet, dvs materialet i tätkärnan, innehåller finjordshalt av 35 – 85 % räknat på material mindre än 4,75 mm.

Det bör noteras att flera svenska dammar med sjunkgropar har markant större maximal stenstorlek i filtret än vad som tillåts enligt nuvarande riktlinjer. Redovisade laboratorievärden från byggnadstiden återspeglar dessutom inte filtrets verkliga maximala kornstorlek; vid små värden på  $D_{max}$ , som t ex 16 och 32 samt 64 mm, är det sannolikt att de siktade proverna inte varit representativa för allt material i filtren, utan att man sorterat bort de grövsta fraktionerna innan siktningen.

I flertalet fall där sjunkgropar noterats bedöms orsaken vara inre erosion i dammkroppen eller undergrunden. I några fall har groparna andra förklaringar, t ex nedspolning av finmaterial i samband med regn i underliggande grov sprängsten. I de fall sjunkgropar uppstått på grund av inre erosion bedöms att de orsakats av otillfredsställande projektering eller byggande.

Tidigare har vid konstaterad inre erosion noterats att i många fall har nedströmsfiltret haft ett alltför grov gradering i förhållande till vad man idag skulle acceptera vid

nybyggnad. För befintliga dammar visar erfarenheterna i fält och på senare år genomförda laboratorieförsök att det finns en betydande möjlighet till självläkning. Resultaten redovisade av Foster & Fell [2] visar att möjligheterna för självläkning till stor del är beroende av tätjordens innehåll av fin- och mellansand. För befintliga dammar finns härigenom nu möjlighet att på ett mer nyanserat sätt bedöma riskerna för fortlöpande erosion.

Forskning pågår internationellt på flera håll för att bedöma riskerna för inre erosion, se t ex [14]. Då erfarenheterna i Sverige visar att inre erosion förekommit i ett stort antal dammar är det av stort intresse att följa internationella utvecklingen.

## 6 Referenser

- [1] Foster, M. A. and Fell, F.; "Analysis of Filter Test Behaviour" , A Draft Report, University of New South Wales, Australia, September 1998.
- [2] Foster, M. A. and Fell, F.; " Filter Testing for Dams - No Erosion and continuing Erosion Boundaries", University of New South Wales, Australia, 1998.
- [3] Kenney, T. C. and Lau, D. "Internal stability of granular filters". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, No. 2, 215-225, 1985.
- [4] "Åldersförändringar i fyllningsdammar", VASO dammkommittés rapport nr 16, 1996. Jord- och stenfyllningsdammar, Vattenfall, 1988.
- [5] Nilsson, Å., Ekström, I. och Söder, C-O.; "Inre erosion i svenska dammar, beskrivning och utvärdering av rapporterade sjunkgropar", ELFORSK, Stockholm, december 1999.
- [6] Jord- och stenfyllningsdammar, Vattenfall, 1988.
- [7] Sherard, J. and Dunnigan, L.; "Critical Filters for Impervious Soils", Geotech. Eng., ASCE, v. 115, no. 7, 927-460, 1989.
- [8] "Filter - Inventering och funktionsanalys", VASO dammkommittés rapport nr 13, 1996.
- [9] Kjellberg R., Norstedt, U. and Fagerström, H; "Leakage in and reconstruction of the Juktan earth and rockfill dams" ICOLD, Lausanne, Francisco, June, 1985, vol 4, pp 553-572, 1985.
- [10] Skempton, A. and Brogan, J.; "Experiments on Piping in Sandy Gravels, Geotechnique, v.44, no. 3, 53-69, 1994.
- [11] Nilsson Å. and Norstedt U.; "Evaluation of ageing processes in two Swedish dams", ICOLD, Vienna 1991.
- [12] Norstedt U. and Nilsson Å.; "Internal erosion and ageing in some of the Swedish earth- and rock-fill dams", Q.73, R.20, ICOLD, Florence, 1997.
- [13] Foster, M. and Fell, R. and Spannagle, M.; "Analysis of Embankment Dam Incidents", A Draft Report, University of New South Wales, Australia, September 1998.
- [14] Foster, M. A. and Fell, R.; "A Framework for estimation the probability of piping failure of embankment dams using the event tree methods", A Draft Report "The University of New South Wales, April 1999.





# 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](http://www.elforsk.se)