

**ELFORSK**



# **DAMMSÄKERHET**

**Reparationsmetoder för dammkropp i relation till inre erosion**

**Rapport 07:53**



# **Reparationsmetoder för dammkropp i relation till inre erosion**

**Kriterier för val av injekteringsmetod och  
injekteringsmaterial**

**Elforsk rapport 07:53**



## Förord

Stockholm november 2007

Denna rapport är ett delresultat inom Elforsks program Svenskt VattenkraftCentrum - SVC och Dammsäkerhet.

Kraftindustrin har traditionellt satsat avsevärda resurser på forsknings och utvecklingsfrågor inom dammsäkerhetsområdet, vilket har varit en förutsättning för den framgångsrika utvecklingen av vattenkraften som energikälla i Sverige.

Målen för programmet är att långsiktigt stödja branschens policy, dvs att:

- Sannolikheten för dammbrott där människoliv kan vara hotade skall hållas på en så låg nivå att detta hot såvitt möjligt elimineras.
- Konsekvenserna i händelse av dammbrott skall genom god planering såvitt möjligt reduceras.
- Dammsäkerheten skall hållas på en god internationell nivå.

Prioriterade områden är Teknisk säkerhet, Operativ säkerhet och beredskap samt Riskanalys.

SVC har en styrgrupp bestående av: Sten Bergström – SMHI, Svante Söderholm – STEM, Olle Mill – SvK, Martin Johansson – Skellefteå Kraft, Urban Norstedt – Vattenfall Vattenkraft, Karl-Erik Löwén – FORTUM, Sven Knutsson – LTU, Anders Gustafsson – SWECO, Anders Wörman – KTH, Patrik Andreasson – Vattenfall Research and Development, Lars-Åke Lindahl – SveMin, Carl-Oscar Nilsson – E.ON

Ramprogrammet Dammsäkerhet har en styrgrupp bestående av: Jonas Birkedahl – FORTUM, Malte Cederström - Vattenfall Vattenkraft, Anders Isander – E.ON, Martin Johansson – Skellefteå Kraft, Olle Mill - Svenska Kraftnät, Urban Norstedt - Vattenfall Vattenkraft, Gunnar Sjödin – Vattenregleringsföretagen, Rolf Steiner - FORTUM, samt Lars Hammar - Elforsk

Lars Hammar  
Elforsk AB



## Sammanfattning

Genomströmmande vatten är ett naturligt tillstånd i alla jordfyllningsdammar och i de flesta fall orsakar detta inga problem. Men i vissa fall är genomströmningen så pass hög att en erosionsprocess av dammen kan initieras. Det genomströmmande vattnets hastighet ökar och vid en tillräckligt hög sådan påbörjas en materialtransport från tätkärnan ut genom nedströmsfiltret. Det bortförda jordmaterialet från tätkärnan ersätts inte förens erosionsförloppet är långt gånget och tätkärnan har blivit uppluckrad ända bak till uppströmsfiltret. Vid denna tidpunkt ”offras” filtermaterialet till förmån för de hålrum som har bildats i tätkärnan. Filtermaterialet följer med läckvattnet och sedimenteras inne i tätkärnan. Tyvärr är inte filtermaterialet och det borttransporterade tätkärnematerialet av samma sort varför läckan inte lagas utan bara fylls upp med ett material med avvikande egenskaper från tätkärnans ursprungliga. Ett ökat läckvattenflöde är därför att förväntas trots en viss självläkning. Vid extrema fall uppenbaras sjunkgropar på dammkrönet då erosionsförloppet är långt gånget.

De flesta dammar ansatta av erosion byggdes under slutet av 60 talet och början av 70 talet. Vid denna tid var filterkraven inte lika hårda som idag varför filtrets kapacitet att hålla tätkärnans minsta jordpartiklar på plats minskar. Detta anses vara en av de största orsakerna till att dammar utsätts för inre erosion.

Separation vid utläggning av tätkärnan anses också som en bidragande orsak till inre erosion då moränjorden tenderar att sorteras efter fraktionsstorlekar varför vissa lager med mer permeabel jord bildas där läckvattnet kan passera med en högre hastighet. Samma princip anses ligga bakom de ökade flöden som i vissa dammar har registrerats vid gränsen för fyllning och packning av tätkärnejord före/efter vinteruppehållet vid bygnadsfasen

För att upptäcka dessa skador använder man sig av läckvattenmätningar, visuella inspektioner, läckvattenmätningar, vattenståndsmätningar, rörelsemätningar, grumlighetsmätningar, porttrycksmätningar, georadar, temperaturmätningar, resistivitetsmätningar och självpotentialmätningar.

Olika metoder för att reparera skador har använts som orsakats av inre erosion som slitsmurar, kompaktinjektering och permeationsinjektering. Andra metoder som jetinjektering och uppspräckningsinjektering har undersökt men inte förefallit vara lämpliga för detta ändamål.

Enligt mig och min referensgrupp finns det en uttrycklig önskan att finna ett reparationsmaterial vars egenskaper inte skiljer sig från tätkärnans ursprungliga och för detta krävs att jag tänker i nya banor dvs. bort från de cementbundna materialen. Det är av stor vikt att i första hand garantera en hög geoteknisk säkerhet mot dammbrott vid reparation och att även undersöka möjlighet till filterförbättring i samband med åtgärd mot en eroderad tätkärna.

Kraven på ett godkänt injekteringsförfarande är framförallt att stabilitet av dammkroppen ska försäkras samt att det inte medför en förhöjd styvhet av tätkärnan





## Summary

Dams subjected to seepage is a natural state for all embankment dams and in most cases this cause no problem, but in some cases the seepage is so high that a state of erosion occurs. The velocity of the seepage enhances greatly and at a certain velocity transport of the material from the core is initiated through the down stream filter. The material, which has been eroded from the core isn't replaced until the process has went on for an excessive amount of time and the horizon of erosion has found its way back to the up stream filter. At this moment the up stream filter "sacrifices" itself to mend the eroded part of the core. The material from the filter is transported by the seepage and is sedimented inside the core. Unfortunately, the eroded material from the core doesn't have the same characteristics as the material from the filter hence the leak isn't mended; it is only filled with a material with far different characteristics than the original till hence an enhanced amount of seepage must be expected through the core. In extreme cases when the erosion has been going on for a long time sinkholes might occur on the crest of the dam

Most dams subjected to internal erosion were built in the late sixties or early seventies and by this time the demands upon the filter criteria wasn't as tough as they are today hence the capacity of the filter for holding the smallest soil particles of the core in place was greatly reduced. This is considered to be one of the main reasons for internal erosion to occur in embankment dams.

Separation of the soil at the time of construction is also considered to be of great importance for internal erosion. The till is somehow sorted by fraction sizes why certain layers of more permeable soil are forming where the seepage may pass with a greater velocity. The same basic principle is though to cause the higher flows of seepage recorded at the border of construction before/after the winter when the site is laid to rest.

In order to detect these damages several methods are used such as visual inspections, seepage measurements, water height measurements, measurements of movement, turbidity measurements, pore pressure measurements, georadar, temperature measurements, resistivity measurements and self-potential measurements.

Various methods have been used in order to repair damages caused by internal erosion such as diaphragm wall, compact grouting and permeation grouting. Other methods such as jet grouting and claquage grouting has been examined but they have both been rejected because they are not suitable for this kind of work

According to my reference group and me there is a strong wish to find a material that possesses mutual characteristics as the original till in the core. To do so I have to think outside the world of cement bound grouting materials. In case of remedial work it is of great importance to guarantee a high level of geotechnical sustainability and also to evaluate the possibility of a filter enhancement in liaison with possible reparation of a damaged core.

The demands on an approved grout procedure are mainly that the stability of the dam is assured and that the material used doesn't enhance the stiffness of the core.



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inledning .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Fyllningsdammen .....</b>                                   | <b>5</b>  |
| 2.1      | Jordarter.....   | 5         |
| 2.1.1    | Organiska jordar.....  | 5         |
| 2.1.2    | Mineraljordar - Moräner .....                                  | 5         |
| 2.1.2.1  | Fraktionsstorlekar .....                                       | 6         |
| 2.2      | Olika typer av fyllningsdammar.....                            | 7         |
| 2.3      | Tät kärnan.....  | 10        |
| 2.3.1    | Önskvärda egenskaper .....                                     | 10        |
| 2.4      | Filtret .....  | 11        |
| 2.4.1    | Filterkriterier .....  | 13        |
| 2.4.2    | Filterregler .....   | 13        |
| 2.4.3    | Språnggradering.....   | 15        |
| 2.5      | Stödfyllning.....  | 15        |
| 2.6      | Släntskydd .....   | 17        |
| <b>3</b> | <b>Den inre erosionsprocessen av tät kärnan .....</b>          | <b>19</b> |
| 3.1      | Inre erosion.....  | 21        |
| 3.1.1    | Piping.....  | 22        |
| 3.1.1.1  | Processen bakom piping .....                                   | 22        |
| 3.1.2    | Sjunkgropar.....   | 23        |
| 3.2      | Sprickor.....  | 24        |
| 3.3      | Hydraulisk uppspräckning.....                                  | 26        |
| 3.4      | Skadornas orientering för specifika fall .....                 | 27        |
| 3.4.1    | Skador invid anslutande betongkonstruktioner .....             | 27        |
| 3.4.2    | Skador i anslutning till övervakningsutrustning.....           | 28        |
| 3.4.3    | Skador i anslutning till tung trafik .....                     | 28        |
| 3.5      | Skadornas utseende .....                                       | 29        |
| 3.6      | Sammanfattning av den inre erosionsprocessen i tät kärnan..... | 30        |
| <b>4</b> | <b>Skadedetektion .....</b>                                    | <b>31</b> |
| 4.1      | Visuella inspektioner.....                                     | 32        |
| 4.2      | Läckvattenmätningar .....                                      | 32        |
| 4.3      | Vattenståndsmätningar .....                                    | 32        |
| 4.4      | Rörelsemätningar .....   | 33        |
| 4.5      | Grumlighetsmätningar.....                                      | 33        |
| 4.6      | Portrycksmätningar .....                                       | 33        |
| 4.7      | Radar .....  | 34        |
| 4.7.1    | Borrhålsradar.....   | 34        |
| 4.7.2    | Georadar.....  | 34        |
| 4.8      | Temperaturmätningar .....                                      | 35        |
| 4.9      | Resistivitetsmätningar .....                                   | 36        |
| 4.10     | Potentialmätningar .....                                       | 36        |
| 4.11     | Sammanfattning av metoder för skadedetektion .....             | 37        |
| <b>5</b> | <b>Reparationsmetoder.....</b>                                 | <b>39</b> |
| 5.1      | Metoderna.....   | 40        |
| 5.1.1    | Uppspräckningsinjektering .....                                | 41        |
| 5.1.2    | Kompaktinjektering .....                                       | 43        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 5.1.2.1  | Brukets sammansättning.....   | 44        |
| 5.1.2.2  | Injekteringstryck.....  | 44        |
| 5.1.3    | Injektering med jord.....   | 45        |
| 5.1.3.1  | Funktion.....   | 45        |
| 5.1.3.2  | Brukets sammansättning.....   | 45        |
| 5.1.3.3  | Bentonit.....   | 46        |
| 5.1.3.4  | Bentonits erosionskänslighet.....                                       | 46        |
| 5.1.3.5  | Svällningstryck.....  | 47        |
| 5.1.4    | Permeationsinjektering.....   | 48        |
| 5.1.4.1  | Cementbruk.....   | 48        |
| 5.1.4.2  | Silikatinjektering.....   | 48        |
| 5.1.5    | Jetinjektering.....   | 50        |
| 5.1.5.1  | Tillvägagångssätt.....  | 50        |
| 5.1.6    | Slitsmur.....   | 51        |
| 5.1.6.1  | Enstegsmetoden.....   | 51        |
| 5.1.6.2  | Tvåstegsmetoden.....  | 52        |
| 5.1.7    | Injektering med inerta material.....                                    | 53        |
| 5.1.7.1  | Principiell funktion av inert material.....                             | 53        |
| 5.2      | Sammanfattning av reparationsmetoder. För- och nackdelar.....           | 54        |
| 5.3      | Problem i samband med injekteringsmaterial alt injekteringsmetodik..... | 56        |
| 5.4      | Monitorering av injekteringsutförande.....                              | 56        |
| 5.5      | Utvärdering av injektering.....   | 56        |
| 5.6      | Framtida prioriteringar av injekteringsförfarande och bruk.....         | 57        |
| <b>6</b> | <b>Exempel på reparationer.....</b>                                     | <b>59</b> |
| 6.1      | Bennet dam, Kanada.....   | 59        |
| 6.1.1    | Trolig orsak till sjunkgrop.....  | 59        |
| 6.1.2    | Reparationsmetod.....   | 59        |
| 6.1.2.1  | Försiktighetsåtgärder.....  | 60        |
| 6.1.2.2  | Brukets sammansättning.....   | 60        |
| 6.1.2.3  | Arbetsövervakning.....  | 61        |
| 6.2      | Hällby, Sverige.....  | 61        |
| 6.2.1    | Trolig orsak till sjunkgrop.....  | 61        |
| 6.2.2    | Reparationsmetod.....   | 61        |
| 6.3      | Porjus, Sverige.....  | 62        |
| 6.3.1    | Reparationsmetod.....   | 62        |
| 6.4      | Suorva östra, Sverige.....  | 62        |
| 6.4.1    | Reparationsmetod.....   | 62        |
| 6.5      | Lilla Edet, Sverige.....  | 63        |
| 6.5.1    | Reparationsmetod.....   | 63        |
| 6.5.2    | Kontroll av arbetets funktion.....                                      | 64        |
| <b>7</b> | <b>Slutsatser.....</b>  | <b>65</b> |
| 7.1      | Problemformulering.....   | 65        |
| 7.1.1    | Varför inre erosion är intressant.....                                  | 65        |
| 7.1.2    | Val av reparationsmetodik.....  | 65        |
| 7.1.3    | Slutsatser gällande material-/teknikfrågor.....                         | 66        |
| 7.1.4    | Faror vid injektering.....  | 67        |
| 7.1.5    | Tidigare utförda reparationsarbeten.....                                | 67        |
| 7.1.6    | Dagens kunskapshål.....   | 67        |
| 7.1.7    | Framtida prioriteringar.....  | 67        |
| 7.1.8    | Projektets framtida riktning.....                                       | 67        |
| 7.2      | Reparation av fyllningsdammar med injektering - kravformulering.....    | 69        |
| 7.3      | Laborativ försöksverksamhet.....  | 70        |
| 7.3.1    | Rörförsök.....  | 70        |
| <b>8</b> | <b>Referenser.....</b>  | <b>73</b> |

# 1 Inledning

Denna rapport syftar att utgöra ett underlag för min framtida forskning angående reparationsmaterial till fyllningsdammar. Forskningen är ett finansierat projekt av SVC och bedrivs på Vattenfall Research & Development, Älvkarleby samt på institutionen för Jord och Bergmekanik på KTH, Stockholm.

Rapporten ska ge en ökad uppfattning om vilka problem som avses behandlas i framtiden och vilka metoder som vanligtvis används idag inom ramarna för reparation av skadade tåtkärnor i fyllningsdammar.

Utformningen av projektet bedrivs genom ett samarbete med professor Håkan Stille, KTH, Tekn. Dr. Daniel Eklund på Vattenfall Research and Development, Älvkarleby samt en referensgrupp där förutom Håkan Stille och Daniel Eklund även Peter Viklander från Vattenfall AB, Håkan Bond från WSP och Martin Johansson från Skellefteå Kraft ingår

Dispositionen för rapporten är:

1. Att först beskriva vilka problem denna rapport vill accentuera, fyllningsdammen och dess ingående beståndsdelar samt interaktionen mellan dessa delar och vilka jordarter som används till byggnadsmaterial.
2. Att beskriva erosionsprocessen och vilka skador den ger upphov till.
3. Att redogöra för de metoder som används idag för att upptäcka och lokalisera skador.
4. Att gå igenom metoder hur man kan reparera dessa former av skador och sedan utvärdera dessa med avseende på deras eventuella lämplighet för dammreparation.
5. Att beskriva utvalda verkliga fall där reparationsåtgärder utförts.
6. Att utvärdera och sälla ut de viktigaste parametrarna som bör styra val av tillvägagångssätt vid framtida reparationsarbeten.

De vanligaste orsakande skadefaktorerna som en fyllningsdamm utsätts för är följande (Källa <http://www.risknet.foi.se>):

- Läckning genom damm (30 %)
- Läckning genom grund (14 %)
- Överströmning (23 %)
- Yttre erosion (18 %)
- Instabilitet (6 %)
- Övriga (9 %)

Detta projekt avser att behandla de skador som beror på läckning genom damm och läckning genom undergrund i de fall det orsakar erosion av tåtkärnan, det vill säga knappt hälften av alla skadefaktorer. Specifika skador i samband med genomläckning av dammen är inre erosion, skador invid anslutande betongkonstruktioner som innehåller dammens vitala delar (utskov etc.) samt i anslutning till installerad övervakningsutrustning. Skador på grund av läckning genom undergrund kan orsaka urspolning av dammens finmaterial varför tåtkärnan mister sin tätande kontakt med berggrunden.

Enligt Olle Dahlin et al (1987) finns det ett antal bakomliggande orsaker till varför skador sker:

- Dålig packning.
- Bristfälliga filter.
- Stenseparation i tätjord eller filter.
- Flyt- och erosionsbenägen tätjord.
- Tjälskjutning.
- Utglidningar.
- Vibrationer av tung trafik.
- Urspolning av tätkärnan underifrån på grund av erosion i bergsprickor.

Fyllningsdammar utsätts kontinuerligt för genomströmmande vatten och på grund av detta utsätts de även för en inre erosionsprocess som transporterar bort de finaste fraktionsstorlekarna från tätkärnans jord. Eftersom denna erosionsprocess kan hota dammens livslängd är det av stor vikt att den repareras innan den riskerar att gå till brott. Det kommer att bli viktigt att förstå processen bakom erosionen inuti en dammkropp för att finna lämpliga metoder och material till att reparera den skadade delen av dammen.

Enligt utförd litteraturstudie är anledningarna till inre erosionsproblem många. Ingen damm är perfekt varför man alltid kan förvänta sig skador på dammar. Då majoriteten av de svenska fyllningsdammar byggdes kring 1960-talet med en beräknad livslängd på 50 år innebär detta att runt 2010 kan det uppstå problem av olika slag med våra dammar. Detta innebär inte att samtliga dammar ligger i farozonen för kollaps år 2010, men det är en tydlig signal att mer resurser bör läggas ner inom ramarna för forskning på reparationsmetoder. De flesta ”problemdammar” uppvisar skador redan vid den första fyllningen av magasinet.

För att ersätta material som spolats ur tätkärnan förefaller injekteringsteknik vara den mest intressanta metoden och både metodik samt materialfrågor bör utredas.

Det som skiljer damminjektering från vanlig jordinjektering är kraven som åläggs den. Slutmålet är inte att bara förstärka dammen så att den håller för högre belastningar utan ett bredare spektrum av önskemål och krav måste tillgodoses, dock är det viktigt att poängtera att hållfastheten är viktigare än tätheten efter utförd reparationsinsats. Dessa önskemål på egenskaper av injekteringsbruket finns redovisade sist i rapporten och kan sägas vara en slutsats av detta arbete.

Genom tiderna har det gjorts mycket injektering i jord dock fokuserat i allra högsta grad på jord- och markstabilisering. Att injektera i jord ger många valmöjligheter eftersom parametrarna är talrika. Stor hänsyn måste tas till att jord lätt spricker upp vid oaktsam injektering då man helt mister interaktionen mellan injekteringsmedlet och det avsedda området för reparation och för att undvika problem associerade med det ändrar man till exempel på injekteringsbrukets styvhetsegenskaper. Det är svårt att förutse jordmaterialets fysiska struktur/homogenitet varför försiktigheten vid injektering måste vara stor. För jordar har man även behov av att förstärka vid nybyggnation alternativt förstärka upp under gamla redan existerande byggnader/vägar/övriga konstruktioner, vilket har lett till att en mängd metoder utvecklats just av detta skäl.

Beroende på jordens egenskaper måste man från fall till fall använda sig av olika metoder och oftast är en kombination av flera den bästa lösningen. För implementering av injekteringsmetod i en fyllningsdamm är det därför viktigt att inte generalisera och binda upp sig mot en gängse metod då olika problem kräver olika lösningar. Injektering i dammar bör leda till att återskapa och efterlikna den ursprungliga strukturen som den såg ut innan den inre erosionen påverkat dammen i en sådan grad att en skada inträffat.





## 2 Fyllningsdammen

### 2.1 Jordarter

Eftersom en jordfyllningsdamm är uppbyggd av jordmaterial är det av största vikt att förstå sig på dessa eftersom de ingår i ett komplext system där varje detalj för respektive jordtyp fyller en specifik funktion för dammen.

Det finns två huvudtyper av jord, organisk- och mineraljord.

- Organisk jord – utgörs av nerbrutna och komposterade organiska material som växtdelar. Det finns tre typer: torv, gyttja och dy
- Mineraljord – utgörs av vittrade och eroderade stenmaterial från olika stensorter. Denna jordart är den huvudsakliga som står att finna i Sverige och hittas i stort sett överallt (morän)

#### 2.1.1 Organiska jordar

Organiska jordar är uppbyggda av förmultnade växtdelar och djur. De organiska jordarna delas upp i tre typer:

- Gyttja
- Torv
- Dy

Jordarna dräneras under lång tid och samtidigt under detta förlopp genomgår de en kraftig konsolidation. En organisk jord kan komprimeras ända ner till 1/10 del av sin ursprungliga storlek. Dessa jordar är direkt olämpliga ur all byggnadsteknisk synvinkel och vid byggnation väljer man oftast att schakta bort den. Organisk jord kommer inte att behandlas vidare på grund av dess geotekniska olämplighet.

#### 2.1.2 Mineraljordar - Moräner

Den vanligaste jordarten i Sverige är utan jämförelse morän. Moränen avsattes mellan den Pleistocena (1,8 miljoner år sen) och den Holocena epoken, där vi befinner oss än idag. Inom dessa epoker infann sig ett flertal istider och under dessa genererades mängder med mineraljordar samt äldre jordar som blandades med nyare. Resultatet blev vad vi idag kallar för morän, en mineraljord med kraftigt blandade partikelstorlekar, allt från block till leror. Morän har blandade egenskaper med de huvudsakliga är:

- Hög kapillaritet.
- Låg permeabilitet.
- Mycket fast med en odränerad skjuvhållfasthet på ca 100 kPa. Moräner med odränerad skjuvhållfasthet 200 – 300 kPa existerar också men då framförallt i moräner rika på leror.

- Måttligt tjälfarliga till mycket tjälfarliga när procentandelen silt ökar.
- Hög friktionsvinkel.
- Stora mängder att tillgå. I medeltal finns det sju meter morän över hela Sveriges yta ner till urberget.

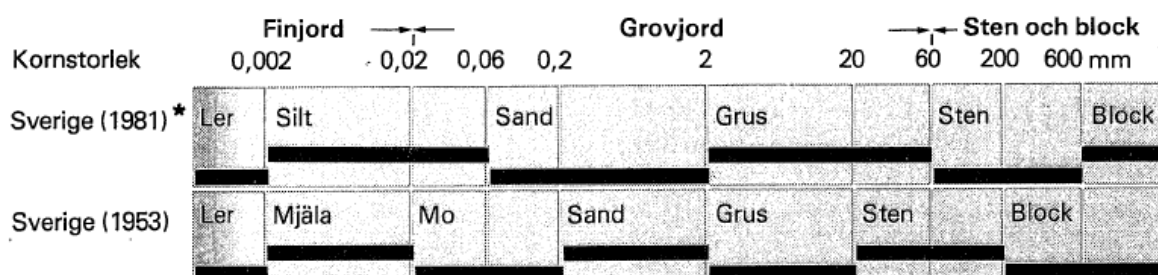
Den höga kapillariteten är ett problem då den gör moränen tjälfarlig. Att lägga ut en tätkärna på vintern är inte rekommendabelt då vinterns kyla kan frysa vattnet i moränen vilket expanderar och spräcker upp jorden. Moränens permeabilitet är låg vilket gör den utmärkt lämpad för att utgöra en barriär mot en vattenreservoar. Om moränen har en alltför hög skjuvhållfasthet kan den bli mycket svårarbetad men väl på plats är den styv och väl lämpad för sitt ändamål. En hög friktionsvinkel ökar säkerheten mot glidytor samt dammens förmåga att stå emot tryck ökar. Att stora mängder finns att tillgå är en stor ekonomisk vinst.

Karakteristiken på jorden är ytterst beroende på dess ursprung. Om jorden ursprungligen kommer från granit kommer moränen att i huvudsak att bestå av block, sand och silt medan en lerjord har sitt ursprung från lösa stensorter som olika typer av skiffrar. En enkel tumregel för att förutspå vilken typ av jord man har på byggnadsplatsen är att desto högre altitud moränen utvinns från desto blockfattigare är den eftersom gravitationen påverkar blocken i högre grad än de mindre jordpartiklarna. På högre altituder är därför moränen mindre blockig medan den i dalar är mer blockrik (Helena Alexanderson 2004).

I fyllningsdammar används endast mineraljordar och de vanligaste är morän samt isälvsavlagringar. Isälvsavlagringar är en form av grovsediment (friktionsjord) De har en hög permeabilitet, lätta att dränera och är inte tjälfarliga. Skjuvhållfastheten ligger i storleken 50 – 100 kPa (Conny Svensson 1996), men detta är beroende av sidotrycken eftersom det är en friktionsjord.

### 2.1.2.1 Fraktionsstorlekar

Mineraljordar delas vanligtvis upp i två huvudgrupper, finkorniga jordarter (finjordshalt > 50 %) och grovkorniga jordarter (finjordshalt < 50 %) Sten och block ingår inte i dessa jordarter. Med fraktionsstorlekar menas den storlek vittrings- och erosionsprodukter från olika typer av bergmassa får. Skiffrar ger leror och finkorniga jordar medan klastiska stensorter av typ konglomerat ger grövre jordarter, på gränsen till sten. Fraktionsstorlekarna står att finna i *figur 2-1*.



Figur 2-1. Fraktionsstorlekar med mått och namn. Vattenfall (1988).

Inom dammbyggnadskonsten är fraktionsstorlekar viktiga då de står för den inre stabiliteten i dammkroppens jordskelett. Tätkärnans position och beständighet är beroende av skillnaden i fraktionsstorlekar mellan sig och filtrena (finfilter, mellanfilter och grovfilter). Det önskvärda

teoretiska scenariot är att de finaste kornen i tätkärnan ska fastna i finfiltrets porer som i sin tur ska fastna i mellanfiltrets porer som i sin tur ska tas upp i grovfiltrets. På så sätt inträffar en viss materialtransport initialt då dammen tas i bruk men efter ett tag har ett jämviktsläge inställt sig varför dammen fungerar på ett tillfredsställande sätt. Detta önskvärda scenario är dock i verkligheten mycket svårt att uppfylla då en viss separation alltid inträffar vid utläggningen. Separation vid utläggning är farligt då material med lika fraktionsstorlekar varvas om vartannat varför interaktionen små-/mellan-/grova korn försvåras. Läckvattnet får då en enklare resa genom dammkonstruktionen vilket måste undvikas då ökade läckvattenflöden per automatik ger en kraftigare erosion i dammen. Vid ursköljning av tätkärnan är det alltid de minsta fraktionsstorlekarna som först blir borttransporterade. Anledningen till detta beror ofta på en för stor skillnad mellan filtrets och tätkärnans fraktionsstorlekar och problemen blir då liknande dem vid separation.

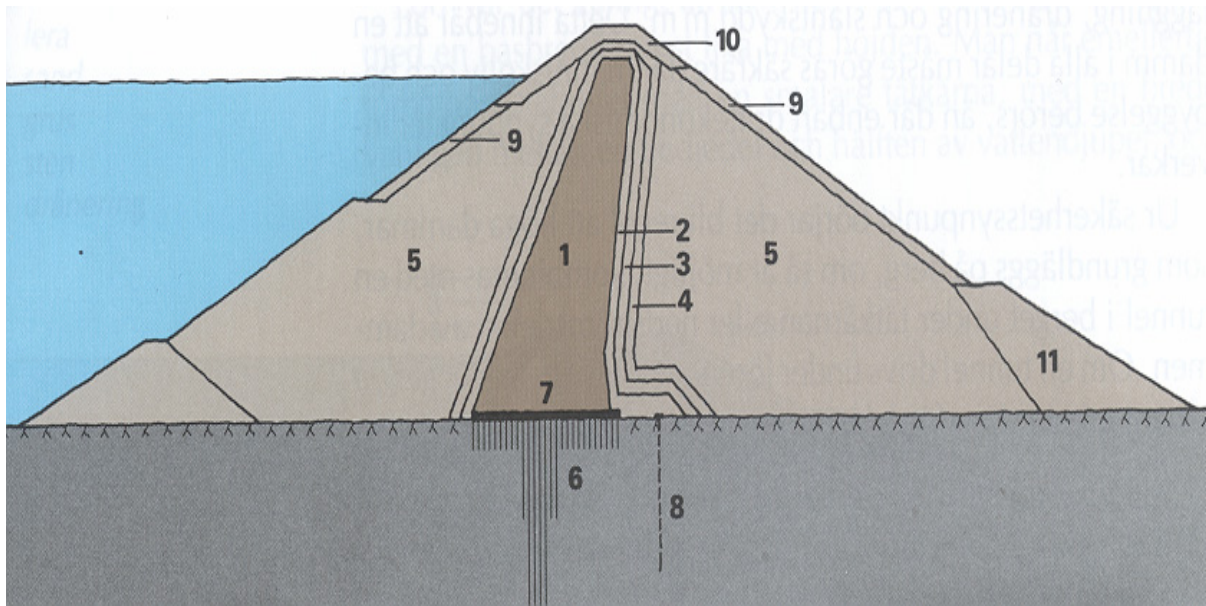
## 2.2 Olika typer av fyllningsdammar

En fyllningsdamm är i huvudsak uppbyggd av jordmaterial, vanligtvis från morän och stenar/block som i regel har sitt ursprung som sprängsten. Det finns två huvudtyper av fyllningsdammar:

- Jordfyllningsdamm som till största del består av jordmaterial.
- Stenfyllningsdamm som till största del består av stenmaterial.

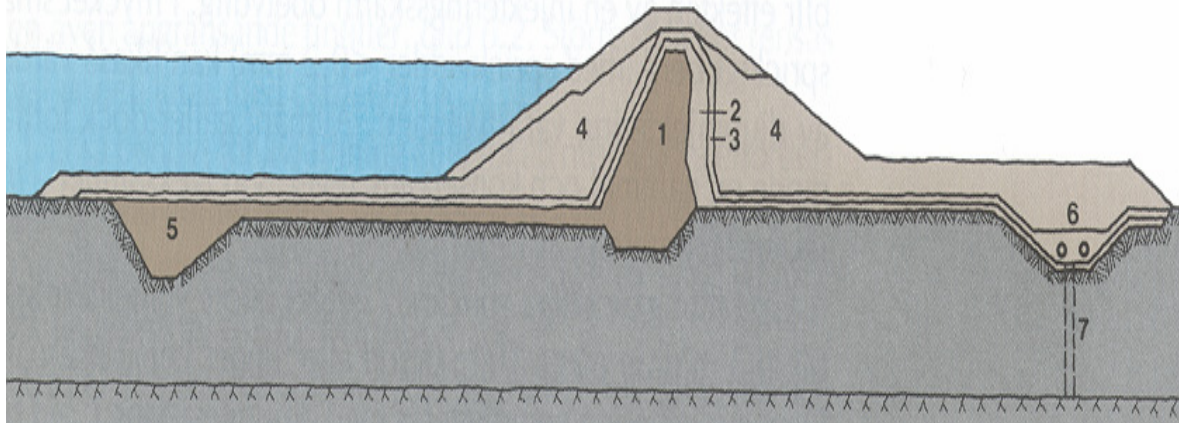
Dammarna är indelade i zoner med olika egenskaper. Varje zon är designad för att uppfylla specifika krav och önskemål.

- Tätkärnan – Utgörs av morän och är i stort sett impermeabel med en hydraulisk konduktivitet av  $1 \times 10^{-6}$  till  $1 \times 10^{-9}$  m/s. Tätkärnan sänker portrycket i dammkonstruktionen och begränsar vattengenomströmningen.
- Filterzoner – Filterzoner är uppbyggda av finkorniga friktionsmaterial som ska hålla kärnan på plats samt verka dränerande.
- Stabiliserande zoner – Sprängstensfyllning som stabiliserar och håller upp dammen.
- Erosionsskydd – Materialet är av blockstorlek (>600mm) och skyddar dammen mot erosion i form av vågor, kraftigt regn, is, översvämning etc.



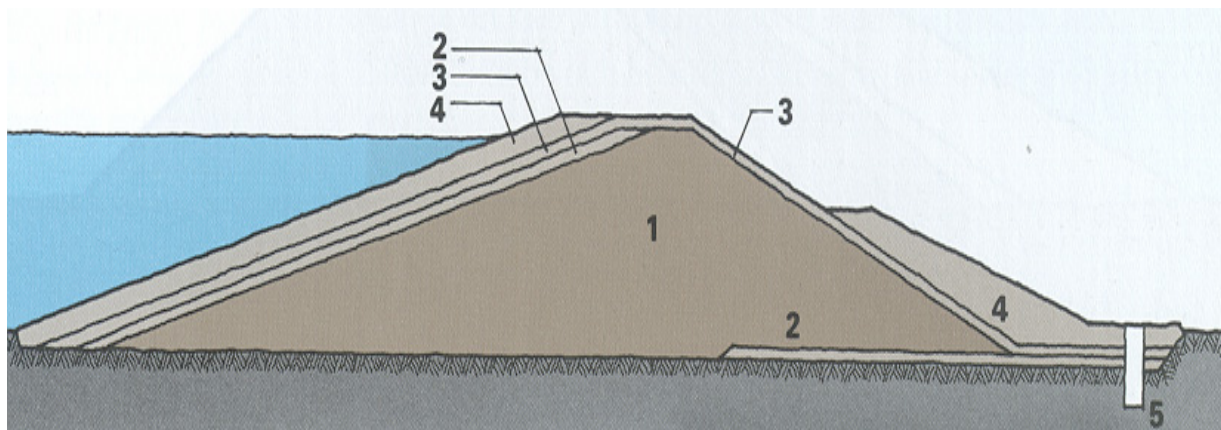
Figur 2-2. Schematisk bild av en hög fyllningsdamm (> 15m) med central tät kärna. Vattenfall (1988).

1. Tät kärna
2. Finfilter
3. Mellanfilter
4. Grovfilter
5. Stödfyllning
6. Injekttering i undergrund
7. Betongplatta
8. Filterbrunn
9. Släntskydd
10. Krönskydd
11. Dammtåstöd



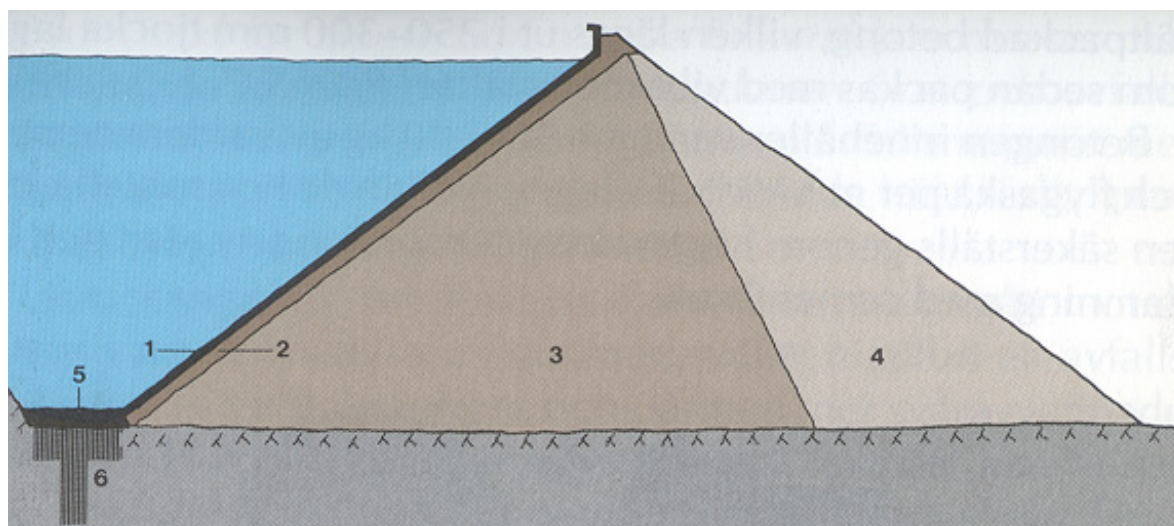
Figur 2-3. Schematisk bild av låg damm (< 15m) grundlagd på otät undergrund av jord. Vattenfall (1988).

1. Tät kärna
2. Finfilter
3. Grovfilter
4. Stenfyllning
5. Tätjordsdike
6. Dräneringsdike
7. Filterbrunn



Figur 2-4. Schematisk bild av en homogen jorddamm. Vattenfall (1988).

1. Lera
2. Sand
3. Grus
4. Sten
5. Dränering



Figur 2-5. Schematisk bild av en fyllningsdamm med fronttätning. Vattenfall (1988).

1. Betongdäck
2. Övergångslager
3. Stenfyllning, 1,0m lager
4. Stenfyllning, 1,5m lager
5. Tätklack
6. Injektering

Figur 2-2 till 2-5 visar olika zoner i olika typer av fyllningsdammar. Material såsom betong, asfalt, stål eller trä kan även de användas som tätande lager.

## 2.3 Tätkärnan

Det material som i huvudsak används i tät kärnor i Sverige är väl sorterad morän. Morän finns i princip hela landet och har goda geotekniska egenskaper (se kapitel 2.1.2). Moränen är lätt att packa, har hög täthet och utmärkta konsolideringsegenskaper. Utformningen av tät kärnan beror till största delen av närheten till lokala täkter av morän och dess karakteristik. En bred tät kärna anses vara säkrare än en smal särskilt med avseende på eventuella sprickor i tät kärnan och/eller under densamma och detta eftersom att det är mindre sannolikt för en spricka att gå tvärs igenom tät kärnan, från filter till filter i en bredare damm. En bred central tät kärna är också önskvärd om dammen är placerad i en trång och smal dal då ett högre vattenstånd ger upphov till större påfrestningar för tät kärnan i form av högre portryck då det är höjden på reservoaren som avgör detta och inte vattenmängden. Om tät kärnejorden har låg permeabilitet samt hög vattenkvot uppstår det problem med att hantera jorden då dess karakteristik nästan kan liknas vid betong och den spricker lättare. Jorden blir svårpackad och högre portryck är att väntas varför en smalare tät kärna byggs då den är lättare att utföra korrekt (Vattenfall 1988).

En lutande tät kärna (4:1, 2:1) ger en jämnare portrycksfördelning på nedströmssidan jämfört med en vertikal samt minskar risken för utglidningar och upphängning av tät kärnejord mot filtret (Vattenfall 1988). Upphängning av tät kärnan är mycket farligt för dammen då detta bidrar till att sänka effektivspänningen  $\sigma'_v$  och i de fall denna går mot och över noll inträffar jordförvätskning, dvs. jorden mister helt sin bärighet på grund av att porvattentrycket,  $u$ , spräcker upp tät kärnan.

### 2.3.1 Önskvärda egenskaper

Tätjord av morän är som bäst, om den uppfyller följande idealvillkor (Vattenfall 1988):

- Siltig, sandig morän med 15-40 % av material med fraktionsstorlek  $<20$  mm (grovgrus).
- Permeabilitet mellan  $3 \cdot 10^{-7}$  -  $3 \cdot 10^{-9}$  m/s.
- Vattenkvot i fält omkring den optimala vid tung laboratoriestampning.
- God packbarhet enligt provpackning.
- Måttlig stenhalt.
- Blockfattig.

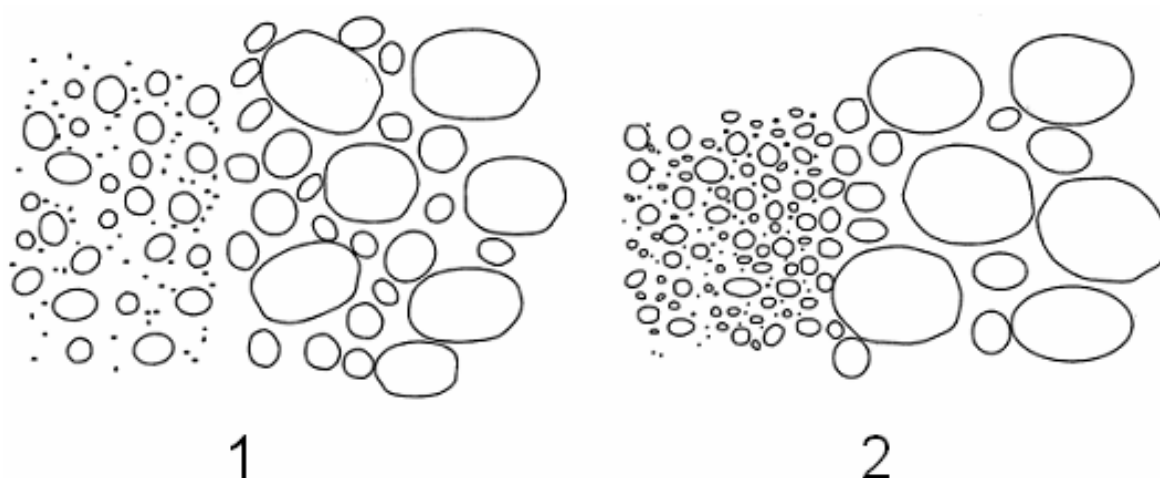
Att moränen är belägen i närheten av dammbygget är önskvärt då det är positiv ekonomisk aspekt.

Vid de fall då lokala täkter inte finns bör man söka andra ingenjörsmässiga lösningar såsom fyllningsdammar med fronttätning av armerad betong eller asfaltbetong. På Island vid Karahnjúkar pågår för närvarande ett mycket stort dammprojekt med just denna lösning. Dammar med tätning av betong/asfaltsdäck lämpar sig även väl under förhållanden där dammen kommer att byggas även under vintertid.



## 2.4 Filtret

Filtret bär den huvudsakliga uppgiften att hålla tätkärnan på plats. Filtret skall även förhindra erosion av partiklar från den jord de skyddar (tätkärna/finfilter/mellanfilter) samt tillåta dränering av läckvatten (Robin Fell et al 2005). Vid stora dammbyggen används upp till tre filter men det vanligaste är två, grovfilter och finfilter. Finfiltret utgörs av sandigt material och grovfiltret utgörs av material av makadams fraktionsstorlek. I de fall ett mellanfilter används, vilket behövs då tätjorden är fingraderad, utgörs detta av grus – grovgrus (2 – 60 mm). En övergångszon av sten utgör sedan den slutliga zonen mellan stödfyllningen och grovfiltret. Det är viktigt att filtermaterialet har låg kohesion, detta för att förhindra att sprickor bildas. I stora dammar är varje filter som tumregel minst 5m brett därför att breda filter utgör ett bättre skydd mot sprickor i tätkärnan.



Figur 2-6. Bilden visar den principiella funktionen av filtermaterial. På bild 1 ses ett dåligt fungerande filter med dåligt graderad basjord medan bild 2 visar ett väl fungerande filter som effektivt blockerar och förhindrar materialtransport. Vattenfall (1988).

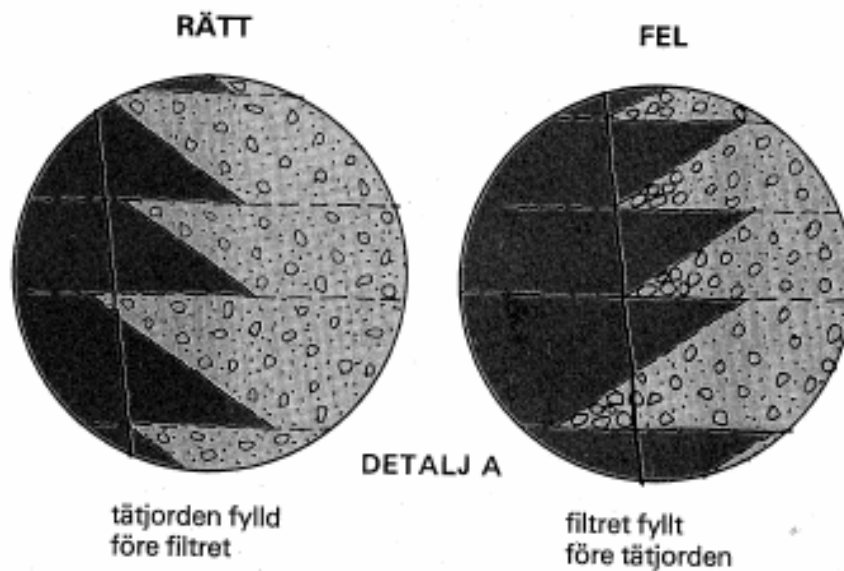
Ett filter har i huvudsak tre krav för att fungera tillfredsställande:

- Högre permeabilitet än tätkärnejorden för att möjliggöra dränering.
- Låg porositet för att förhindra att filtermaterialet i kärnan sköljs ur.
- Begränsade skillnader mellan fraktionsstorlekarna i en och samma zon för att förhindra separation vid utläggning då kanaler av högpermeabla lager bildas.

Under normala förhållanden i dammen fungerar nedströmsfiltret både dränerande och skyddande mot inre erosion. Uppströmsfiltret å sin sida har inte alls samma erosionskyddande uppgift som nedströmsfiltret men måste ändå vara utformat så att det klarar av en eventuell hastig avsänkning av vattnet inne i reservoaren då vattenströmningen genom dammen riskerar att bli inverterad och dammen utsätts för negativa portryck. Om kärnan trots allt utsätts för inre erosion har uppströmsfiltret som uppgift att med hjälp av sitt eget material täta de strömningskanaler som uppstår i tätkärnejorden.

Fortsättningsvis måste även uppströmsfiltret kunna:

- Ge skydd mot vågerosion.
- Ge skydd mot frosthävningar och hydraulisk uppsprickning av tätkärnan.
- Utgöra en övergångszon mot en sågtandade ytan av kärnan som är ytterst känslig mot erosion (se figur 2-7).
- Fungera likvärdigt som nedströmsfiltret vid en eventuell hastig avsänkning av magasinet då vattenflödet ändrar riktning.



Figur 2-7. Bilden visar den sågtandade kontaktyta som bildas mellan filter och tätkärna vid byggnadsfasen. De ljusa partierna föreställer filtret och de mörka föreställer tätkärnan. Vid felaktigt utförande (till höger) bildas separation vid utläggning varför materialets erosionskänslighet ökar mångfalt. Risken för separation just här ökar även om varje lager är för tjockt. Vattenfall (1988).



### 2.4.1 Filterkriterier

Filterkriterierna är ett viktigt rättesnöre under byggnationen av dammen. Det finns klara samband mellan dåligt utförda filter och dammar hårt ansatta av inre erosion (Hans Rönnkvist 2006).

Filter är vanligtvis specificerade efter deras kornfördelning. De måste vara tillräckligt fingraderade för att hålla tätjärnejorden på plats samt tillräckligt grova för att tillåta en effektiv dränering av läckvatten. Detta är grunden till varför man har en damm med zoner för att gradvis gå från en zon med finare jord till en zon med grövre jord. För att uppnå dessa krav på det ideala filtret måste det enligt (Åke Nilsson et al 1999) och (ICOLD 1994):

- Inte separera vid utläggningen
- Inte ändra sin kornfördelningskurva under byggnadsskedet, packning eller ändras med tiden på grund av frosthävningar och läckvattenflöden
- Inte ha någon/betydande del kohesion eller förmåga att cementera med tiden. Detta för att förhindra sprickbildning
- Vara inre stabilt.
- Ha en tillräckligt hög permeabilitet för att tillåta dränering
- Kunna täta eventuell läcka i tätjärnan

Till hjälp för att utföra filter på korrekt sätt har det utformats filterkriterier som utgår från fraktionsstorlekarna på filtermaterialet. Definitionerna visas i följande avsnitt.

### 2.4.2 Filterregler

Filterreglernas fader är Karl Terzaghi som redan under 1940-talet utformade de första. Dessa första filterregler saknade dock klara regler för bland annat maximal stenstorlek för filtret varför de har reviderats med tiden och på grund av dessa oklarheter kom därför filtrens utformning vid olika dammar att variera. I (RIDAS 1998) har gränserna specificerats till att vara mer finkorniga än sina föregångares och en begränsning för maximal stenstorlek har införts för att förhindra separation vid utläggning (Se *tabell 2-1*)

Det har visat sig att det material som vanligast används i tätjärnor (morän) oftast i huvudsak består av silt- och sandfraktioner, i vilka stenar (> 60 mm) är löst inblandade. Kornstorleken  $d_{85}$  representerar i sådant fall inte ett fast kornskellett, som genom inre filterbildning kan förhindra det finkorniga materialet att transporteras bort. På grund av detta införde man därför på 60-talet en ytterligare begränsning av  $D_{15}$ , (Åke Nilsson 1995). Fram till och med en bit in på 1970-talet rådde i branschen en övertro på tätjärnans förmåga att självläka vid eventuella läckage. Filtret ansågs bara fylla en andra funktion i skyddet gentemot detta varför lättnader i specifikationer för filtrens konstruktiva utformning antogs i de fall filtermaterial var svårt att få tag på i närheten av dammen.

Det måste dock påpekas att inre erosion inte endast kan förklaras med bristfälliga filter utan många gånger orsakas inre erosion av en kombination av orsaker (Åke Nilsson 1995).

Definitioner

**d** = kornstorlek hos basmaterial (tätjord enligt laboratoriesiktning < 20 mm, finfilter enligt totalsiktning)

**D** = Kornstorlek hos filtermaterial (enligt totalsiktning vanligen finfilter < 60 mm, grovfilter < 100 mm)

Finjordshalt = halt av material < 0.06 mm, räknad på material < 20 mm

Filterregler

**Basmaterial med finjordshalt < 30 %**

$4 < D_{15}/d_{15} < 40^*$

$D_{15}/d_{85} < 4^{**}$

$D_{50}/d_{50} < 25$

$D_{max} < 60 \text{ mm}$

\* avgörande för månggraderat basmaterial

\*\* avgörande för ensgraderat basmaterial

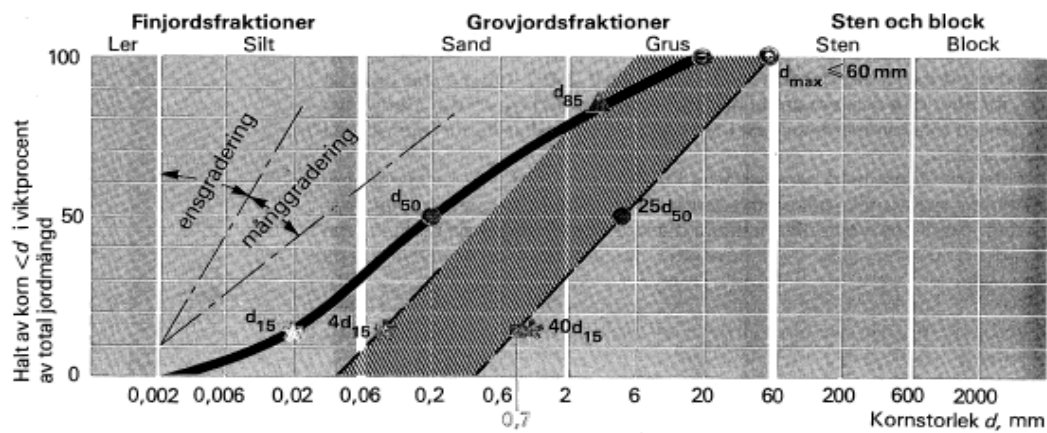
**med finjordshalt 30 – 80 %**

$4 < D_{15}/d_{15}$

$D_{15} < 0.7 \text{ mm}$

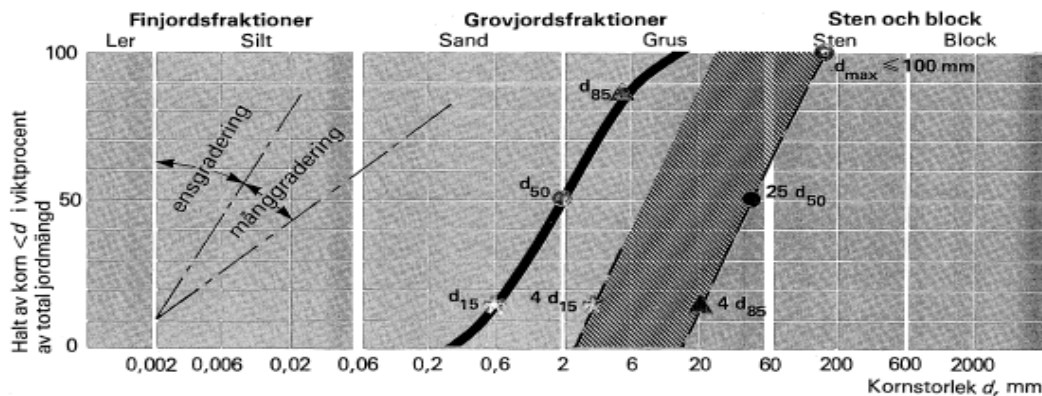
$D_{50}/d_{50} < 25$

$D_{max} < 60 \text{ mm}$



Figur 2-8

Korngradering som uppfyller krav för finfilter mot månggraderat basmaterial. Bild från Vattenfall (1988)



Figur 2-9

Korngradering som uppfyller krav på grovfilter mot ensgraderat basmaterial. Bild från Vattenfall (1988)

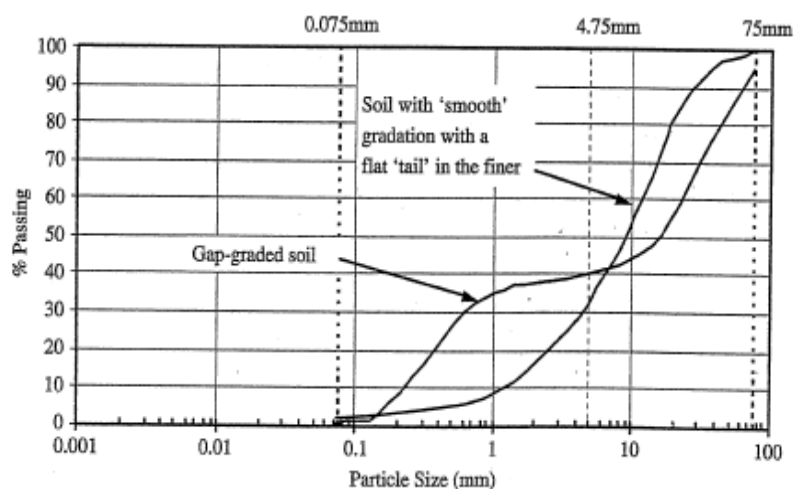
För att förstå begreppet  $D_{15}$  så är det ett mått på vilken kornstorlek minst 15 % av finmaterialet i filtret har. Samma princip gäller för basmaterial (tätkärnejord) men beteckningen är ersatt med  $d_{15}$ . Enligt *figur 2-8*, som anger korngradering som uppfyller krav på grovfilter mot månggraderat basmaterial är  $d_{15}$  måttet 0.02 mm.

| Min $D_{10}$ (mm) | Max $D_{90}$ (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                |

Tabell 2-1. Maximal stenstorlek i finfilter för att undvika stenseparation (RIDAS 1998). Uppkom för att täppa till luckorna i definitionerna enligt Vattenfall 1988.

### 2.4.3 Språnggradering

Ibland förekommer det att kornfördelningskurvorna är språnggraderade. Med detta menas att vissa fraktionsstorlekar i jordmaterialet saknas. Faran blir då att materialet blir inre instabilt (suffusion) med ökad erosionskänslighet som följd då de mindre kornen tillåts att erodera ur samt att separationsrisken ökar.



Figur 2-10. Språnggraderad kornfördelningskurva där fraktionsstorlekar mellan 1 – 10mm saknas och jämförs med en "normal" fördelningskurva. Bild från Robin Fell et al (2005).

## 2.5 Stödfyllning

Då vattengenomströmningen i kärnan ökar föreligger det risk att tätkärnan börjar erodera eftersom vattenhastigheten ökar och därmed minskar tätkärnans geotekniska hållbarhet. I de fall stor vattengenomströmning tillåts fortgå utan förebyggande åtgärder ligger det på filtret och framförallt på stödfyllningen att hålla uppe dammkroppen och att förhindra en omedelbar kollaps tills reparationsåtgärder satts in (Vattenfall 1988).

Stödfyllningen består oftast av grovkornig friktionsjord eller sprängstensfyllning. Det optimala materialet för stödfyllning är dock sprängsten. Sprängsten är i sig självt inte känsligt för erosion och dess skarpa kanter gör att sten för sten låser fast sig i varandra och därmed skapar ett stabilt skelett som håller både tätkärna och filter på plats, dvs. materialets friktionsvinkel är hög. Nackdelen med skarpa kanter är att de vid utläggningen lätt krossas. Vid oförsiktighet vid utläggning av stödfyllningen kan de vassa stenkanterna krossas och bilda stenmjöl som ligger mellan stenarna. Detta stenmjöl kan efter viss nederbörd sköljas bort med sättningar, ibland på flera decimeter som följd (Vattenfall 1988).

Stödfyllningar överdimensioneras oftast för att uppnå extra hög säkerhet mot dammbrott

## 2.6 Släntskydd

Släntskydden är främst till för att skydda dammen mot erosionspåverkan utifrån som vågerosion och islaster. Skiffrika bergarter bör undvikas som byggnadsmaterial eftersom skiffrikt berg lätt krossas till små fraktionsstorlekar av leras storlek. Vanligaste materialet för släntskydd är sprängsten eller natursten och vid de tillfällen sten inte finns att tillgå är ett bra alternativ att använda sig av betongblock.

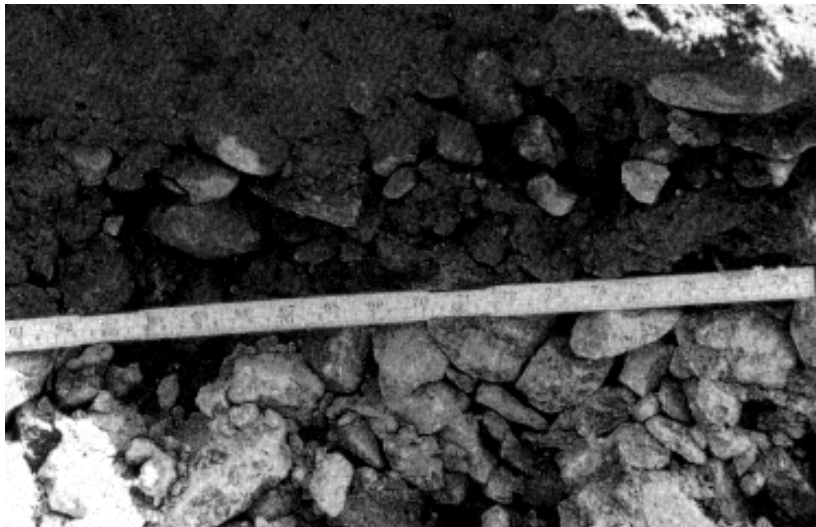
**Uppströmssidan** ska i synnerhet tåla islaster, hindra vågornas möjlighet att erodera ur stödfyllning och tåla tjäle. Blocken ska vara så pass stora att vågor inte kan lyfta bort dem och detta dimensioneras enligt tabeller baserade på vattendjup och stryklängd (längden av den area varpå vinden kan påverka vågorna i vattnet som sedan slår mot dammen). Filterkraven skall uppfyllas gentemot innanförliggande material. Reparationer på uppströmssidan är de vanligaste förekommande på dammar (Vattenfall 1988).

**Nedströmssidan** ska vara säkert mot regn, snösmältning, frost och is. Dammtån förstärks som regel ofta extra mycket då läckvattenflöden ofta emitterar här ifrån. En förstärkning av dammtån ökar dammens förmåga att motstå kollaps då den bidrar till ett ökat momentmotstånd vid uppkomst av cirkulära glidytor samt att dammtåmaterialet i praktiken inte kan spolas bort vid kraftig genomläckning. Dammtåmaterialet kan vara stenblock eller betongblock med en diameter, i vissa fall, på upp till en meter.



### 3 Den inre erosionsprocessen av tät kärnan

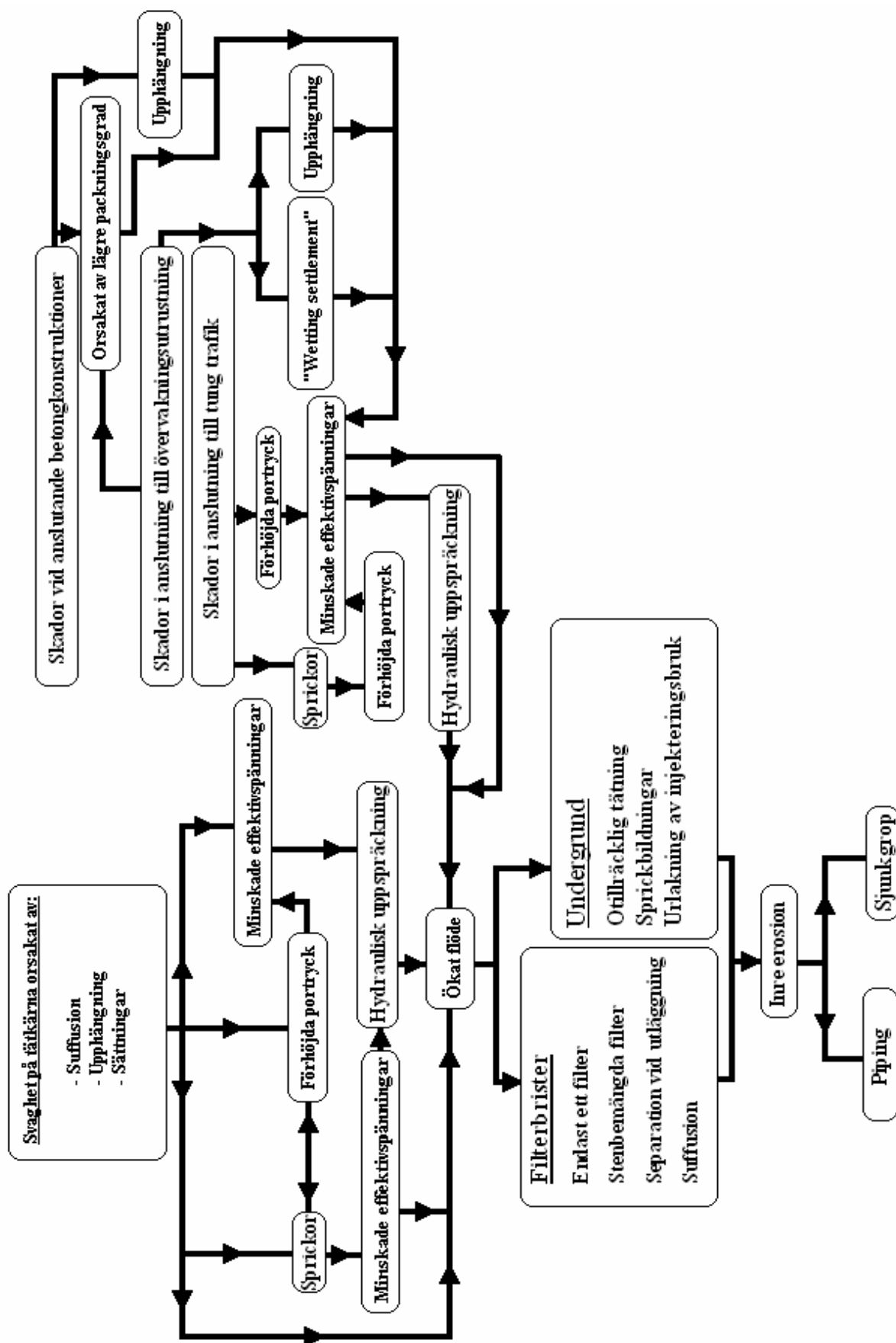
Den erosionsprocess som detta projekt inriktar sig mot att förmildra är den inre erosionen i dammkroppen. Inre erosion är ett välkänt begrepp men få vet med säkerhet vad det är som utlöser den. I detta kapitel förklaras de ingående mekanismerna i processen, sprickbildningar, skador vid anslutande betongkonstruktioner, skador i anslutning till övervakningsutrustning och skador orsakade av tung trafik.



**Figur 3-1** visar hur finmaterial eroderats ut ur dammkonstruktionen. I området över måttstocken finns fortfarande det fina materialet kvar medan under densamma har finmaterialet eroderats bort. Bild från Vattenfall (1988).

I *figur 3-2* visas vad som kan orsaka inre erosion av tät kärnan samt dess verkan och effekt genom ett flödesschema. Med hjälp av detta kan man enklare förstå vad som händer vid ett inre erosionsförlopp och vilken typ av åtgärder som bör sättas in vid ett läckage för att bromsa detta genom att gå bakåt från verkan till orsak. Att känna till orsaken till en skada gör det enklare att reparera den och att i framtiden förhindra att den återkommer i dammkonstruktionen. För att förhindra den inre erosionen alternativt minska dess effekter bör man upphäva den del av processen som skapar den. Tänk på brandtriangeln. Den består av syre, värme och bränsle. Tas en del av den bort brinner det inte och samma princip bör användas även inom detta område då flera faktorer samtidigt spelar sin roll för erosionsförloppet.

Genom en snabb titt på *figur 3-2* uppkommer en given fråga: Hur kan man förhindra att skador uppstår i dammar med dåligt utformade filter? Detta område förefaller intressant för vidare forskning, det vill säga att reparera defekta filter.

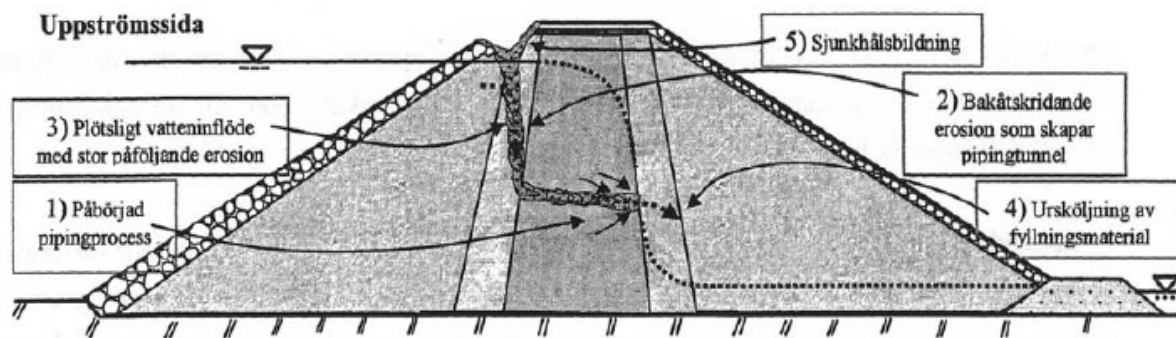


Figur 3-2. Flödesschema över möjliga erosionsförlopp i en fyllningsdamm med tåtkärna av morän. Egen bild



### 3.1 Inre erosion

Den vanligaste typen av skada i tåtkärnan på en fyllningsdamm är bakåtskridande erosion, eller mer känt som piping. Vid långt gångna fall av piping kan slutligen sjunkgropar uppstå på dammkrönet. Piping är en skadetyper med tunnelutseende medan termen inre erosion är ett samlingsnamn för samtliga skadetyper inuti tåtkärnejorden.



Figur 3-3. Bild som i 5 steg visar en skadas utveckling i dammkroppen från inre erosion (piping i denna bild) till sjunkgrop. Bild från Kursmaterial för vattenbyggnad KTH (2003).

Inre erosion är ett begrepp då tåtkärnans jord utsätts för en större extern påfrestning än vad den klarar av. Med extern påfrestning menas läckvattnet som passerar kärnan som då utsätts för allt högre skjuvkrafter i och med att det passerande vattnets hastighet ökar. När dessa skjuvkrafter blir större än jordens förmåga att stå emot dem startas processen, men just exakt vad det är som initierar är det ingen som vet men mycket forskning angående detta pågår idag.

Inre erosion kan vara uppluckrad/urspolad jord, piping och sjunkgropar. Inre erosion är direkt farlig då dammens hållfasthet sjunker och läckvattnets förmåga att passera genom dammkroppen ökar. Vid ökad vattenhastighet ökar erosionsgraden ytterligare och processen blir en negativ spiral med ömsom ökad vattenhastighet som ger ökad erosion osv.

Att upptäcka inre erosion är svårt men grumligt läckvatten, ökat läckvattenflöde samt sjunkgropar i anslutning till dammkrönet är några exempel på varningssignaler. Då sjunkgropar bildas har erosionen pågått mycket länge alternativt att den är kraftig och händelseförloppet sker snabbt. Orsaken till groparna bedöms vara otillfredsställande projektering eller byggande (Åke Nilsson et al 1999). För vidare läsning om skadedetektion se avsnitt 4

Inre erosion innebär **inte** per automatik att en dammkropp utsatt för detta kommer att gå till brott, endast att sannolikheten för det ökar.

### 3.1.1 Piping

Piping är en process där finmaterialet i tätjärnejorden sköljs ur av det genomströmmande vattnet i dammkroppen men tätjärnejorden är så pass stabil att den inte rasar ihop utan en tunnel inne i jorden tillåts att bildas.



Figur 3-4. Klassisk bild på hur en pipingskada kan se ut. Skadan kan bäst liknas vid grottbildning där taket hålls upp av de starka kohesiva krafterna som råder i tätjärnans jord. Vattenfall (1988).

För att piping ska inträffa måste fyra villkor uppfyllas (Robin Fell et al 2005):

- Kontinuerligt genomströmmande vatten.
- Tillgång till ett erodabelt material i flödesvägarna som kan borttransporteras.
- En oskyddad öppning mellan tätjärna/filter eller finfilter/grovfilter där erosionsmaterialet flödar fritt igenom.
- Tätjärnejorden ska kunna forma tunnlar utan att rasa ihop (detta skiljer piping från inre erosion).

#### 3.1.1.1 Processen bakom piping

Piping i dammkroppen kan initieras av någon av följande tre processer (Robin Fell et al 2005):

- Bakåtskridande erosion.
- Koncentrerad läcka.
- Suffusion.

*Bakåtskridande erosion* startar i läckvattnets utgångspunkt vid gränsen mellan tätjärna/filter eller finfilter/grovfilter för att sedan successivt arbeta sig bakåt in i dammkroppen. Finmaterial längst bak i den tunnel som bildas i tätjärnan följer med läckvattnet varför tunneln kontinuerligt propagerar bakåt in i kärnan mot uppströmssidan. Då tätjärnan inte rasar ihop är detta mer allmänt känt under namnet piping för skadans rörliknande form.

*Koncentrerad läcka* inträffar då en spricka mellan upp- och nedströmssidan genom tät kärnan formas eller då ett lager av högerpermeabelt material skär tät kärnan. Flödes hastigheten ökar lokalt och finmaterialet i tät kärnan riskerar att sköljas ur. Sprickor i tät kärnan kan bildas då dess jord har en hög skjuvhållfasthet och risken för detta ökar i takt med ökad kohesion därför att den då tenderar att uppträda mer sprött och högerpermeabla lager kan bildas på grund av separation i byggnadsfasen. Vidare föreligger det även en viss risk med sprickor i gamla filter som tagit upp en stor mängd finmaterial från tät kärnan. Filtrets korngradering ändras och det fina materialet ökar kohesionen.

*Suffusion* innebär att tät kärnejorden är instabil i sig själv varför finmaterialet lätt eroderas. Detta inträffar i språnggraderade jordar (se avsnitt 2.4.3) där vissa fraktionsstorlekar saknas helt.

### 3.1.2 Sjunkgropar

Sjunkgropar är en följdskada av inre erosion och piping. Vid långt fortskriden piping kan pipen skära tät kärnan ända till uppströmsfiltret och vid detta kan uppströmsfiltrets material rasa ner i pipen. Allt eftersom jordmaterial kontinuerligt försvinner under uppströmsfiltret bildas ett underskott av jord varför dess material rasar neråt. Efterhand kan detta urskiljas på uppströmsfiltrets yta, det vill säga uppe vid dammkrönet mot uppströmssidan till, i form av en sjunkgrop. Att filtret, till skillnad från tät kärnan, rasar ner beror på de skilda geotekniska egenskaperna materialen emellan.



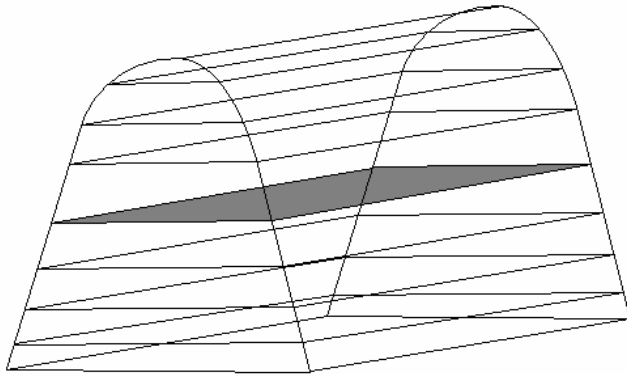
**Figur 3-5.** En typisk sjunkgrop. När material förs bort underifrån på grund av erosionen ersätts det förlorade materialet uppifrån varför områden sjunker ner i dammkroppen. Bild från The National Center for Atmospheric Research & the UCAR Office of Programs.

Om en sjunkgrop bildas mitt uppe på dammkrönet bör man misstänka att inre erosion pågår i tät kärnan och att tät kärnejorden inte är benägen att bilda tunnlar. Då kommer ovanliggande jord att rasa neråt varför sjunkgropen inte inkorporerar filtret i processen som annars vid piping.

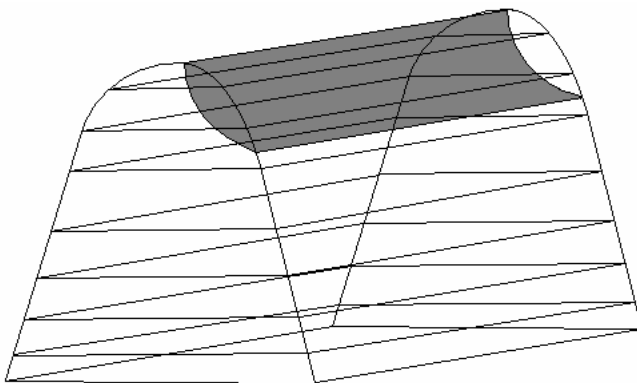
Vid bilning av sjunkgrop vid dammkrönet kan det även uppstå en ökad risk för överströmning då fribordet sänks.

### 3.2 Sprickor

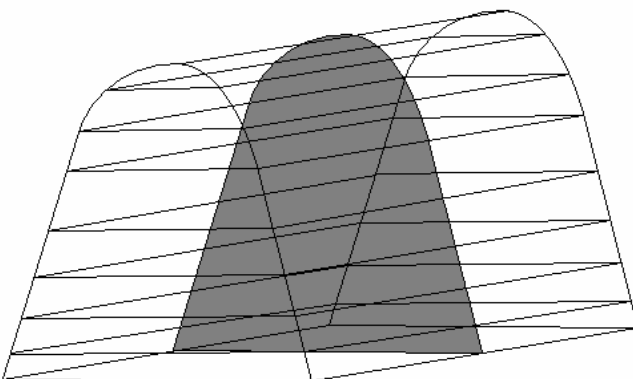
Det finns flera bakomliggande faktorer då sprickor uppstår i tättkärnan men de vanligaste härrör från spänningsomlagringar på grund av sättningar samt tjälfaktorer.



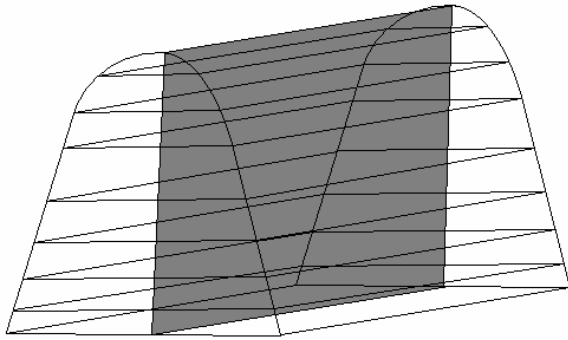
Figur 3-6. SPRICKFALL ETT. Ett tänkbart transversalt sprickplans orientering inuti tättkärnan på en fyllningsdamm. Egen bild.



Figur 3-7. SPRICKFALL TVÅ. Ett tänkbart sprickplans orientering då det uppkommer i form av en cirkulär glidyta. Egen bild.



Figur 3-8. SPRICKFALL TRE. Ett tänkbart sprickplans orientering då sprickan skär tättkärnan vertikalt. Egen bild.



Figur 3-9. SPRICKFALL FYRA. Ett tänkbart sprickplans orientering då sprickan skär tåtkärnans längdriktning. Egen bild.

I fyllningsdammar utsätts dammen för årliga variationer i och med att vattennivån i magasinet på uppströmssidan ändras. Då resultanten av vattentrycket på uppströmssidan trycker mot dammen bildas ett moment som vill tippa över dammen. Resultatet för tåtkärnan blir då att nedströmssidan utsätts för tryckkrafter medan uppströmssidan utsätts för dragkrafter i dammens vertikalriktning. Det är sedan dessa dragkrafter som spräcker upp jorden med horisontella sprickplan som följd. Enligt denna teori borde det vara vanligare med sprickor på tåtkärnans uppströmssida än på dess nedströmssida. Sprickornas orientering går då rakt igenom dammen (filter-till-filter) **SPRICKFALL ETT** visar ett sådant tänkbart scenario. **SPRICKFALL TVÅ** visar en spricka som kan tänkas uppkomma vid de fall då det råder en låg släntstabilitet och det finns risk för utglidningar.

**SPRICKFALL TRE** visar en tänkbar spricka i dammens vertikalriktning. För att sprickor ska formas i dammens vertikalriktning krävs i vissa fall en kraftig jordbävning med en magnitud på åtminstone 6,5 på richterskalan (Robin Fell et al 2005) men även sättningar under dammen ger upphov till dessa sprickor.

Sprickfall ett och sprickfall tre utgör särskild fara för dammen då den tillåter en snabb passage av läckvatten från uppströmssidan till nedströmssidan via sprickbildningen varför ett erosionsförlopp troligen lär utvecklas häri.

Enligt (Tomas Ekström et al 2001) kan sprickbildning även bero på:

- Sättningar i torrpackad tåtkärna vid första uppfyllning av magasinet då kärnan hänger upp sig på omgivande filter eller stödfyllning.
- Sättningar i våtpackad mycket tät tåtkärna som först efter lång tid dräneras och därmed sätter sig och hänger upp sig på omgivande material.
- Upphängning på anslutande konstruktioner (se avsnitt 3.4.1)
- Valvbildning mellan ojämnheter i bergytan.

Ytterligare förklaringar till horisontella sprickors uppkomst står att finna i det faktum att vid byggnadsfasen då jorden läggs ut i lager bildas naturliga horisontalplan genom konstruktionen. Jorden blir då svagare i dessa gränsskikt och således mer sprickbenägen.

Kunskapen om sprickor är mycket eftersatt då man inte tar sig tid att utreda orsakerna till dess uppkomst därför att vid sprickbildningar vill man kvickt reparera dem (James L. Sherard et al 1965). Sprickor som orienterar sig i dammens längdriktning (sidostöd-till-sidostöd) utgör inte

alls samma fara för dammens fortlevnad som transversala sprickor då sprickor i dammens längdriktning inte ger läckvattnet en snabbare väg igenom konstruktionen. **SPRICKFALL FYRA** påminner mycket om **SPRICKFALL TRE** och bör bildas på ungefär samma sätt.



Figur 3-10. längsgående spricka på dammkrön liknande **SPRICKFALL TVÅ** eller **SPRICKFALL FYRA**. Bild Åke Nilsson.

### 3.3 Hydraulisk uppspräckning

Hydraulisk uppspräckning sker då antingen en spricka i tätkärnan eller en zon med högpermeabelt material tillåter porvattentrycket att stiga så pass mycket att jordstrukturen tvingas isär. Detta beskrivs av formeln:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u$$

Där  $\sigma_v$  = jordens vertikalspänning och  $u$  = porvattentryck. När  $u > \sigma_v$  uppstår det en stor risk för hydraulisk uppspräckning därför att jordens effektivtryck försvinner. En ytterligare orsak till uppspräckning är upphängning av jorden då  $\sigma_v$  minskar med liknande resultat som I föregående fall.

### 3.4 Skadornas orientering för specifika fall

Flertalet orsaker har redan nämnts som orsak till att erosion sker men det finns vissa delar av en damm som oftare än andra utsätts för skador.

#### 3.4.1 Skador invid anslutande betongkonstruktioner

Skador vid anslutande betongkonstruktioner i en damm är vanligt förekommande och detta primärt på grund av att det vid anslutningar är svårare att kompaktera jorden. Vid betongkonstruktioner utgör även betongmaterialet en impermeabel spärr för läckvattnet varvid en viss koncentration av flöde samt ökning av detta sker och då både ett ökat flöde inträffar plus att jorden i regel är sämre packad är det just vid dessa punkter man kan förvänta sig att få en ökad erosion. Enligt Åke Nilsson et al (1999) beror det på följande:

- Svårigheter med packning på grund av utrymmesskäl att packa jorden på dessa platser då det är svårt med t.ex. en vält komma ända in till kanten mellan betongkonstruktionen och jorden. Tätjärnejordens permeabilitet sänks inte tillräckligt och mer vatten passerar.
- Upphängning av tätjärnejorden mot betongväggen och eventuella anslutande sponter sker. Jordtrycket blir lågt varför det redan vid låga portryck kan uppstå hydraulisk uppspräckning i anslutning till uppfyllning av vattenmagasinet.
- Tätjorden har torrpackats för att underlätta arbetsutförande med vibroplatta. När dammen fylls med vatten kommer detta område att vara mer sättningsbenäget än övriga delar av dammen

### **3.4.2 Skador i anslutning till övervakningsutrustning**

Skador som uppstår i anslutning till övervakningsutrustning är även det välkänt. Den gängse förklaringen till detta är att packningsgraden runt utrustningen är markant sämre än i övriga delar av dammen varför den blir mer erosionskänslig. Även vid placering av utrustning efter dammens färdigställande kan skador ske då vibrationer från eventuella borrhningsarbeten lokalt kan packa jorden så att höga portryck uppstår.

Skadedetektion av idag innebär ofta att kablar med olika mått grävs ner i och i anslutning till tåtkärnan. Insikt över att kablage i tåtkärnan kan orsaka erosion har på senare tid erhållits varför man idag som regel installerar övervakningsutrustning i filtret där de jordmekaniska egenskaperna (låg kohesion) tillåter detta på annat sätt än om instrumenteringen skulle ha installerats i tåtkärnan (hög kohesion) Dock är det omöjligt att kringgå detta vid de fall då man önskar att mäta portrycket i tåtkärnan. Ett bra exempel på detta står att finna i avsnitt 6.1.

Det paradoxala med övervakningsutrustning är att konventionella metoder för att upptäcka inre erosion även bidrar till att den de facto sker.

### **3.4.3 Skador i anslutning till tung trafik**

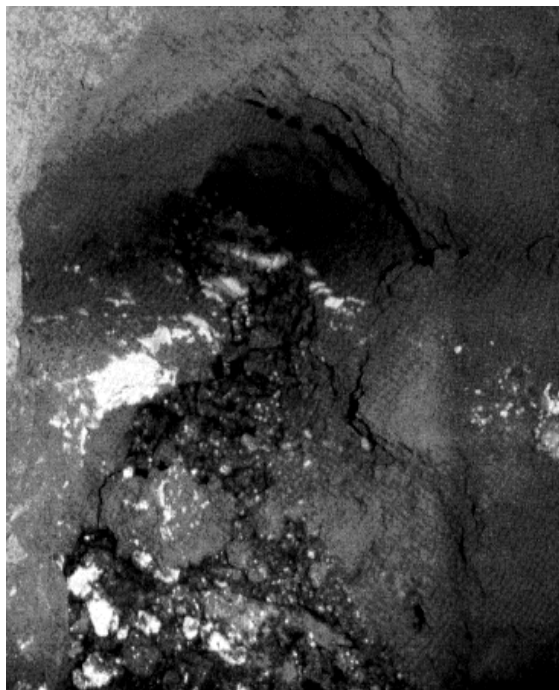
Det är vanligt att dammar utnyttjas som broar över den älv/flod/å där den är byggd. Då tung trafik passerar, vilket är vanligt i till exempel Norrland tack vare sin stora skogsindustri, orsakar denna trafik markvibrationer som kan fortplantas i dammkroppen. Enligt portrycksmätningar är det möjligt att dessa skakningar kan utlösa omlagringar och därmed sättningar när inre erosion vållat kaviteter och/eller andra svagheter i dammens övre zon. Att tung trafik kan orsaka sättningsskador i dammens djupare delar bör anses som uteslutet (Olle Dahlin et al 1987).

Som ett stickspår till detta bör nämnas seismisk aktivitet som kan orsaka skador på en dammkonstruktion men detta scenario är relativt osannolikt i svenska miljöer.



### 3.5 Skadornas utseende

Skadornas utseende skiljer sig åt men bland de vanligaste är tunnelbildning, så kallad piping. Tåtkärnejordens höga kohesion gör detta möjligt. Om man tittar på *figur 3-11* och *figur 3-12* är det lätt att bilda sig en uppfattning av skadornas inverkan på dammstrukturen. Finns där ingen tåtkärnejord kommer läckvattenflödet att ökas mångfalt (*figur 3-11*).



**Figur 3-11.** Bild över en typisk dammskada, sk piping. En tunnel har bildats in mot nerströmsfiltret. De vita områdena är rester från gammal injektering och erosionsförloppet har i efterhand fortsatt ovanför den injekterade sprickan. Bild från Vattenfall (1988)

Då piping inte kan ske på grund av tåtkärnejordens beskaffenhet är löst lagrad jord ett typiskt utseende av en skada. Detta var fallet vid Bennet Dam i Kanada (se avsnitt 6.1)

Sjungkropar har också nämnts och de kan liknas vid gropar på dammkrönet med varierande diametrar beroende på skadans omfattning och materialets förmåga att rasa ner.



Figur 3-12. Sjungrop på dammkrönet av Bennet Dam, Kanada. Bild från Steve Garner (2006).

### 3.6 Sammanfattning av den inre erosionsprocessen i tätkärnan

Att helt förhindra inre erosion från att ske i en tätkärna är mycket svårt. Detta är tyvärr ett fenomen vi får lära oss att leva med och därför anpassa oss till det. En fyllningsdamm kan i princip läcka hur mycket som helst så länge dess geotekniska hållfasthet kan garanteras men det blir i slutändan en avvägning då högt läckage på dammar och låg geoteknisk hållfasthet går hand i hand – Målet för projektet bör därför bli att i första hand att inte förhindra inre erosion utan att i stället i första hand garantera att de geotekniska villkoren för dammens hållfasthet uppfylls.

Enligt *figur 3-2* kan man utläsa att den minsta gemensamma nämnaren då skador uppstår är bristande filter och undergrund då dessa delar av konstruktionen ska säkerställa att tätkärnans material stannar i tätkärnan.

I vissa fall då sjungropar uppkommit har det inte registrerats några fall av grumlat läckvatten vilket leder in på en ny frågeställning: Vart tar då tätkärnans urspolade finmaterial vägen? Man bör i dessa fall misstänka att filtret fångar upp dessa partiklar alternativt att de sedimenteras i stödfyllningen och lämnar sålunda ej dammen. Hur stor filtrets förmåga att fånga upp finmaterial är samt hur mycket det kan ta upp är en fråga som bör utredas från damm till damm då man vid en eventuell mätnad bör kunna förvänta ett stopp av materialtransport mellan tätkärna och filter.

Hur beter sig ett filter som har fångat upp en stor mängd finmaterial från dammen? Desto mer filtret fångar upp desto större bör dess styvhet bli varför dess sprickbenägenhet bör öka, det vill säga filtret transformeras långsamt till en tätkärna.

## 4 Skadedetektion

Det finns många sätt att kontrollera om en dammkärna är skadad alternativt att misstänka att en allvarlig skada är nära förestående. Med skada menas en, för dammen, oreparabel påverkan som hotar dess beständighet och funktion. Metoderna för upptäckt är många men för att nämna några så är följande använda inom detektion av skador i damm:

- Visuella inspektioner
- Läckvattenmätningar
- Vattenståndsmätningar
- Rörelsemätningar
- Grumlighetsmätningar
- Portrycksmätningar
- Georadar
- Temperaturmätningar
- Resistivitetmätningar
- Självpotentialmätningar

Vid val av mätmetod finns en mängd parametrar att beakta som naturliga variationer i dammen och vilken noggrannhet som behövs. I och med att de naturliga variationerna är viktiga är det bra att kontinuerligt övervaka dammkonstruktionen.

### **Basinstrumentering för fyllningsdamm med tåtkärna grundlagd på jord eller berg och stödfyllning på jord eller berg.**

| Variabel för mätning                                     | Konsekvensklass 1A | Konsekvensklass 1B | Konsekvensklass 2          |
|--|--------------------|--------------------|----------------------------|
| Läckage, (mätöverfall)                                   | x, kont.           | x, kont.           | x, månadsvis <sup>2)</sup> |
| Sättning och sidorörelse av krön (mätbrunnar i dammkrön) | x, år              | x, år              | (x, årlig)                 |
| Portryck i tåtkärna (portrycksgivare)                    | (x, årlig)         | (x, årlig)         | -                          |
| Vattenstånd i nedströms filter eller i stödfyllning      | x, halvår          | (x, halvår)        | -                          |
| Vattenstånd/portryck i undergrund <sup>1)</sup>          | -                  | -                  | -                          |
|  | x, halvår          | x, halvår          | x, halvår                  |

<sup>1)</sup> vid stödfyllning på jord

<sup>2)</sup> då läckageförändringar kan utvecklas snabbt bör tätare mätningar övervägas ur beredskapssynpunkt

Figur 4-1. Utdrag från presentation av RIDAS angående basinsinstrumentering för övervakning av dammar av olika konsekvensklasser. Bild från RIDAS, Tillämpningsvägledning – fyllningsdammar (2004)

## 4.1 Visuella inspektioner

Visuella inspektioner går ut på att utan instrumentering i dammkroppen följa dammens tillstånd. Sjunkgropar, sprickor, ökat flöde, kraftiga sättningar och grumligt läckvatten är typer av skador som kan upptäckas med visuella inspektioner.

Specifika delar av dammen såsom utskov är av större vikt att övervaka.

## 4.2 Läckvattenmätningar

Läckvattenmätningar är ett klassiskt sätt att kontrollera mängden vatten som en dammkonstruktion släpper igenom sig. Allt vatten som rinner igenom dammen samlas upp och leds ut i en eller flera mätpunkter. Vid dessa punkter kan mätning ske på det totala flödet genom dammsektionen. Metoden är enkel men ger tyvärr ingen egentlig bra bild av vad som sker inne i dammkroppen. Eftersom installationen ligger vid dammtån och framförallt inte inne i konstruktionen är det risk för att ytavrinning orsakat av nederbörd kan ge förhöjda värden. Vid ett ökat läckvattenflöde kan slutsatsen dras att en läcka finns vid en viss sektion av konstruktionen

## 4.3 Vattenståndsmätningar

Vid vattenståndsmätningar borrar hål ner i tät kärnan och i dessa placeras inspektionsrör. Den vattenpelare som ställer in sig i inspektionsröret ger sedan en bild av tryckgradienten av läckvattnet i dammkonstruktionen. Nivån i rören genomgår årliga variationer som är beroende av vattennivån i reservoaren, dock med en viss fördröjning beroende av tät kärnejordens permeabilitet. Om nivån i ett rör förändras i snabbare takt än omgivande tyder detta på att en förändring av jordens sammansättning kring inspektionsröret har skett. Vanligtvis stiger vattennivåerna vilket tyder på en permeabilitetssänkning av jorden. Vattenståndsrör kan även placeras i filterjorden.



Figur 4-2. Vattenståndsmätning vid Lilla Edet. Bild: Johan Lagerlund.

## 4.4 Rörelsemätningar

Med hjälp av konventionella teodoliter kan man följa dammens rörelser med god precision. Teodoliten riktas in på fasta punkter på dammen (mät dubb placeras på dammkonstruktionen) vilket även är en nackdel med metoden, att bara ett fåtal punkter kan utvärderas. Även inklinometrar som mäter skillnader i släntlutning och laserscanning av dammens överyta för att mäta rörelser vertikalt, som horisontellt används

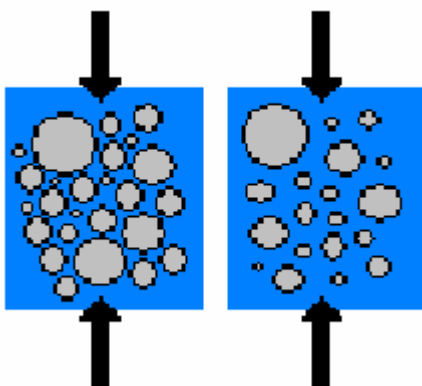
1999 testades för första gången en ny metod för rörelsemätningar; att upptäcka rörelser med hjälp av fiberoptiska kablar längs hela dammens längd och 2004 gjordes den första installationen av systemet vid Ajauredammen. Denna metod detekterar förändringar ner till 5mm vinkelrätt mot kabeln (Sam Johansson et al 2003).

## 4.5 Grumlighetsmätningar

Då vatten som passerar genom dammen gör detta med normal, låg, hastighet eroderas enbart en liten del alternativt ingen del alls av finmaterialet från tätkärnan ur. Vid ökad läckvattenhastighet ökas dock inblandningen av finmaterial och med hjälp av en portabel eller fix turbiditetsmätare kan denna inblandning mätas. Inblandningen av finmaterial är i regel direkt jämförbar med vattnets strömningshastighet och resultatet är beroende på var i dammen mätning sker varför denna metod ger störst utslag och resultat då skadan är punktformig (Sam Johansson et al 1995).

## 4.6 Portrycksmätningar

Att mäta portryck i tätkärnan är ett sätt att skapa en bild av tillståndet i en dammkropp. Viktigt med kunskapen angående portrycksfördelningen är att den ger en bild över effektivspänningarna i konstruktionen som är viktiga för dammens hållfasthet och därmed dess buffert för att stå emot inre erosion. Vid mätningar av portryck tar man reda på vattentrycket i porerna på jordstrukturen då det är av stor vikt att portrycket alltid överskrider av det omgivande jordtrycket.



Figur 4-3. Figuren till vänster visar när  $\sigma_v > u$ . Jorden är väl ihopsamlad. Figuren till höger visar när  $\sigma_v < u$  då jorden spricker upp. Ökat läckvattenflöde är att vänta. Egen bild.

Det kan dock uppkomma svårigheter i att mäta portryck eftersom det kan ta uppemot 20 – 30 år för portrycken i lerrika kärnor att uppnå stationärt tillstånd (Robin Fell et al (2005). Koncentrerade läckor kan upptäckas genom att man på ömse sidor av tät kärnan placerar piezometrar som mäter porvattentrycket varför en bild av dess förändring genom tät kärnan kan utläsas. Metoden har stora likheter med läckvattenmätningar.

Portrycksmätningar har med framgång använts på bl.a. Bennet dam i Kanada, Vatnedalsvatn och Svartevann i Norge samt Manicouagan 3 i Kanada.

## **4.7 Radar**

En metod som delas upp i två olika utföranden:

- Borrhålsradar.
- Georadar.

### **4.7.1 Borrhålsradar**

Denna metod innebär att borrhål måste utföras i dammkroppen och det finns två typer av mätningar: **Enkelhålsmätningar** och **mellanhålsmätningar**. Vid enkelhålsmätningar sänks både sändare och mottagare ner i samma hål. Då radarpulser sänds ut reflekteras de mot gränssytor med skiftande relativ dielektricitetskonstanter som går tillbaka mot mottagaren där de registreras. Tidsförskjutningen mellan radarpuls och mottagning registreras varför avståndet från sändaren till det reflekterande lagret kan beräknas. Detta görs under förutsättning att radarpulsens utbredningshastighet i tät kärnejorden är känd.

För mellanhålsmätningar krävs minst två borrhål där en sändare placeras i det ena och en mottagare i det andra. I den mottagande enheten registreras hastighet och amplitud på de inkommande radarimpulserna och denna information ger en bild av egenskaperna på materialet som ligger mellan sändaren och mottagaren.

Vid mätning med borrhålsradar mäts i princip områden med avvikande vattenkvoter. För fyllningsdammar kan potentiella läckage med förhöjd porositet och vattenkvot detekteras med mycket god noggrannhet och upplösning (Sam Johansson et al 1995).

### **4.7.2 Georadar**

Principen för georadar är snarlik med enkelhålsmätningar med skillnaden att borrhål inte görs. En elektromagnetisk puls sänds ner i marken som reflekteras mot elektriska diskontinuiteter och erhållna jordartsparemetrar utifrån metoden är kornstorlek och vattenkvot.

Vid mätning med georadar på fyllningsdammar dras vanligtvis utrustningen på en släde efter ett fordon utmed dammkrönet, se *figur 4-4*. Frekvensen som radarimpulserna sänds ut med spelar roll i den mån att korta våglängder tränger inte ner djupt som längre men ger istället en mer detaljerad bild av dammens tillstånd. I dammar med tät kärna som har en hög andel finmaterial får man ibland ingen utläsning av dammens djupare delar (Sam Johansson et al 1995).





Figur 4-4. Mätning med georadar uppe på dammkrön. Bild från Sam Johansson et al (1995).

I de fall där erosion inträffat och bildat kaviteter i kärnan erhålls i regel en mycket svag bild vilket är en nackdel. Precisionen för mätningar med georadar är hög och felmarginalen ligger på ungefär 5 % vid mätningar (Sam Johansson 1997).

## 4.8 Temperaturmätningar

Förslag till att använda temperaturmätning som detektionsmetod för grundvattenflöden framlades redan i slutet på 1950 talet men metoden kom inte till praktisk tillämpning i Sverige förens 1987.

Med temperaturmätningar får man en direkt bild av kärnans tillstånd genom att mäta förändringarna i temperaturen. Temperaturen i en damm styrs huvudsakligen av lufttemperaturen och vattentemperaturen i reservoaren med tyngdpunkt på vattnets temperatur (Sam Johansson 1997). Lufttemperaturen bidrar bara till värmeförändringar i den översta delen av dammen. Under sommarhalvåret värms dammen successivt upp medan vattnets uppvärmning går i snabbare takt och således fungerar denna princip tvärtom under vinterhalvåret. Under tiden som läckvatten passerar tät kärnan kommer den att få likvärdig temperatur som det genomströmmande vattnet. Om man med hjälp av temperaturgivare upptäcker att vattentemperaturen är densamma på tät kärnans nedströmssida som på uppströmssida kan man dra slutsatsen att vattnets passage genom kärnan skett fortare än normalt, vilket kan tyda på en bristfällig funktion av tät kärnan.

Vid försök gjorda vid Lövöns vattenkraftverk utprovades denna metod som genom fiberoptikkablar mäter temperaturvariationer på vatten som genomströmmar tät kärnan. Dessa kablar installerades 1998, i samband med en ombyggnad av dammens skadade delar vid intagen där det utvecklats sjunkgropar. Kablarna gick runt tät kärnan och inte igenom den. Instrumentering som leds igenom tät kärnan kan i vissa fall leda till ökad erosion (Pär Hansson 1999). Innan installationen av dessa kablar mättes temperaturvariationerna genom vattenståndsrör.

Denna mätmetod är billig och ger en god bild över temperaturvariationerna i dammen och fungerar som ett instrument för att få en bild över strömningsförloppet i konstruktionen (Sam

Johansson et al 1999). En vidare fördel är att man även kan lokalisera den ökade genomströmningen.

## **4.9 Resistivitetmätningar**

Med resistivitetmätningar mäter man i praktiken jordens vatteninnehåll och med detta menas mängden vatten, joninnehållet i vattnet och hur vattnet är fördelat i materialet. Resistiviteten beror på faktorer som lerinnehåll, porositet och temperatur men andra faktorer som porvattentryck, temperatur och koncentrationen av upplöst material, s.k. TDS (Total Dissolved Solids).

I dammar som fungerar varierar resistivitetsskillnaderna lite och följer en årlig rytm men vid ökat läckage då fina lerpartiklar eroderas ur ändras den i större skala. Olyckligtvis kommer en ökad porositet att sänka resistiviteten medan erosion av lerpartiklar ökar den vilket gör denna metod i stor grad svår att utnyttja för övervakning av läckvatten då dessa två händelser inträffar samtidigt (Sam Johansson 1997).

## **4.10 Potentialmätningar**

Potentialmätningar är även känt under namnet SP-mätningar där SP står för "Självpotential" och man mäter variationer av elektriska potentialer i jorden. Detta är av stort intresse då skillnader i den elektriska potentialen ger ett samband mellan vattenhastigheten som genomströmmar dammkonstruktionen. Jorden i dammen är full av mineraler och när vatten passerar dessa så avgår en viss elektrisk laddning till vattnet och det är denna laddning man fångar upp i mätinstrument. Ju mer vatten som passerar desto fler laddningar fångas upp i vattnet och genom detta får man i praktiken en indikation på eventuell förhöjd vattenströmning i dammkonstruktionen. Metoden ger inga indikationer på en förändrad porositet i tät kärnan.

Metoden är känslig för störningar. Material som kablar eller metall detaljer i dammkonstruktionen kan störa mätningen och detta beskrivs som ett "brus". Det är av stor vikt att kalibrera mätinstrumenten mot detta bakgrundsbrus innan mätningar påbörjas

Enligt (Sam Johansson et al 2005) kan variationer av strömningspotentialen beskrivas i tre steg:

- Ett strömningsnät etableras. Hydrauliska gränsvärden och hydraulisk konduktivitet i jorden bestämmer hur detta nät ser ut.
- Vattnet passerar ett mineral och skalar av en del av den elektriska dubbelladdningen och skapar på så vis en konvektionsströmsdensitet som i sin tur ger upphov till en laddningsseparation.
- Laddningsseparationen skapar ett elektriskt fält som ger elektrisk ström genom jorden. Fördelningen av strömmen beror på positionen av platsen för vattnets passage av det strömavgivande mineralet samt jordens resistivitetsfördelning. De uppmätta självpotentialanomalierna är egentligen orsakade av potentialfallet mellan observationspunkterna.

I verkligheten sker dessa steg gradvis och samtidigt till dess att ett jämviktsläge uppstår.



#### **4.11 Sammanfattning av metoder för skadedetektion**

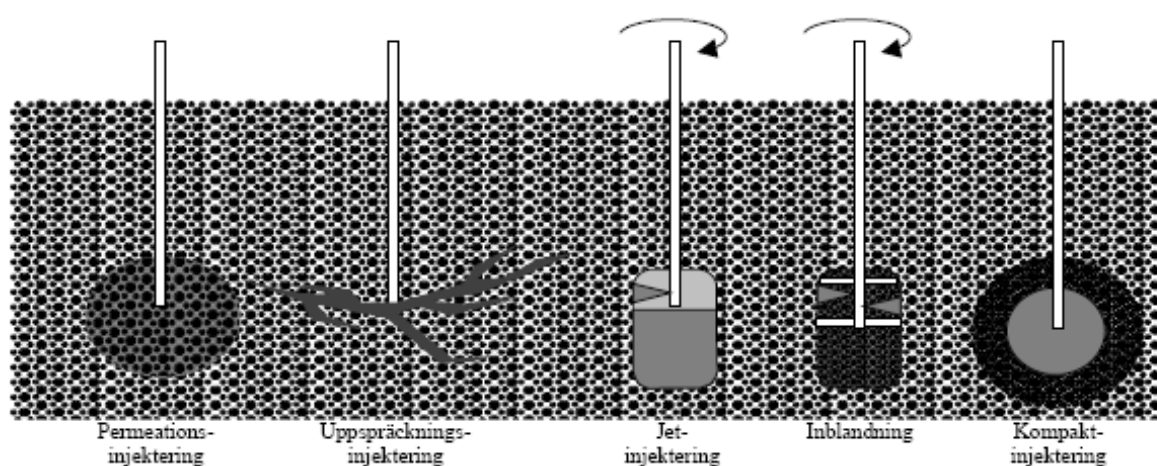
Att övervaka dammar är en nödvändighet för att inte överraskas av skador. Det är viktigt att dessa mätningar utförs kontinuerligt och under en längre tidsperiod för bästa resultat. Med förut beskrivna metoder kan man redan på ett tidigt stadium få en överblick av ett eventuellt förvärrat tillstånd i en damm och därmed sätta in åtgärder för att förhindra omfattande skador orsakat av inre erosion. I och med att små reparationsåtgärder är billigare att utföra än stora är det en klok investering att installera övervakningssystem som övervakar dammen under hela dess dimensionerade livslängd.



## 5 Reparationsmetoder

I detta avsnitt följer beskrivningar för de injekteringsmetoder som kan vara av intresse att implementera i läckande fyllningsdammar. Anledning till att injektering utsetts som reparationsmetod är därför att det är den enda metod som kan återföra bortspolat material in i en dammkropp. En mängd injekteringsmetoder finns och rapporten går in på de principiella skillnaderna i utförande som särskiljer metoderna från varandra samt i vilka delar av dammen de lämpligast kan användas.

Projektet syftar i att finna ett lämpligt material för att reparera eventuella dammskador. Även metoder vid utförandet kommer att behandlas. Denna rapport utgör dock endast ett underlag för framtida beslutsfattning för reparationsmetodik.



Figur 5-1. Olika metoder för injektering av jord. Bild från Pär Hansson (1999)

Flertalet försök har gjorts på olika former av injektering där Pär Hansson har stått för ett flertal välbeskrivna experiment och då framförallt i *Injektering av fyllningsdammar – storskaliga försök (2005)*. Häri beskrivs försök utförda med basering på injekteringsbruk bestående av ultrafin cement (UF). Dessa försök är intressanta då de är gjorda i stor skala på en dammodell som givits en skada som uppstår vid inre erosion. Olika blandningar av ultrafin cement testades (bentonit, vattenglas, flytmedel, silika, och våtmald UF). Slutsatserna var att cementbaserade injekteringsmedel kunde användas vid denna typ av reparationsarbeten. Arbetet efterlyser även beständighetstester av det injekterade materialet.

Vid all form av injektering bör beräkningar angående mängd injekteringsbruk utföras baserade på de förundersökningar som gjorts av dammens skada. Vidare bör all injektering ske i sekvenser för att förhindra att ny injektering inte stör tidigare utförd injektering (Örjan A. Sjöström 1999).

Valet av injekteringsteknik bestäms efter vad man avser att åstadkomma med injekteringen. Vid de fall där skadans orientering och omfattning är väl utvärderad kan man injektera med självtryck utan att tvinga ner injekteringsbruket. De gängse principerna som efterföljs idag är att först täta de stora skadorna med grova material som snabbt härdar eftersom då tätningens arbetet fortskrider i denna första del kommer vattenhastigheten att öka då läckan blir alltmer koncentrerad. Det grova materialet utsätts då inte i lika hög grad av erosion som mindre reparationsmaterial bör göra. Efter denna första del följer steg två då man reparerar

själva skadan det vill säga injektering av de mindre spricksystemen/pipen/diffusa miljön med finare bruk. Detta kan sammanfattas till att vid all reparation skall först läckan stoppas, därefter ska orsaken till den lagas.

## **5.1 Metoderna**

I följande del av denna rapport beskrivs olika former av reparationsmetoder som kan tänkas möjliga för dammreparationsarbeten. Metoderna är antingen väl beprövade inom jordstabilisering/markförbättring eller endast på ett försöksplan. Efter beskrivningen följer en utvärdering av metoderna baserade på dess eventuella tillämpbarhet för användning i fyllningsdammar ansatta av inre erosion.

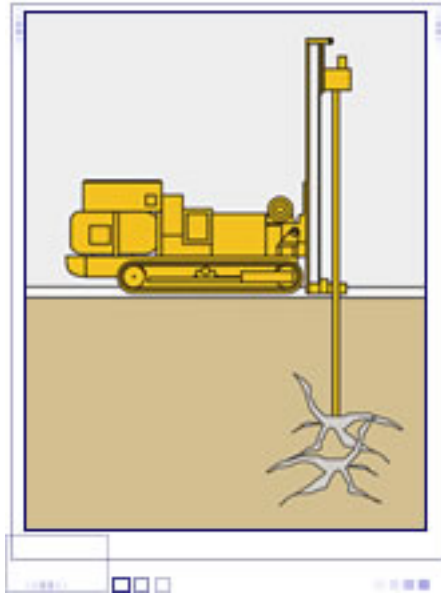
Undersökta metoder är:

- Uppspräckningsinjektering
- Kompaktinjektering
- Injektering med jord
- Permeationsinjektering
- Jetinjektering
- Slitsmur
- Inert injektering

Vid val av reparationsmetod bör alltid skadans typ och orsak beaktas och således bör man inte sträva efter att utforma en gängse reparationsmetod för alla skador. Efter utfört arbete är det viktigare att konstruktionen är stabil än att dammen är tät (lågt läckage).

### 5.1.1 Uppspräckningsinjektering

Uppspräckningsinjekteringen (*Fracture-, Claquage- grouting*) har sitt ursprung i Frankrike, (James Warner 2004). Metoden går ut på att avsiktligt spräcka upp jorden genom att injekteringsmedlet appliceras med högt tryck samt att dess styvhet är så hög (Pär Hansson 1999), att jorden spricker upp. Injekteringsbruket flödar samtidigt ut i spricksystemen och fyller ut dessa för att sedan härda. Den främsta förhöjda egenskapen i jorden blir en ökad hållfasthet genom ett nätverk av sammankopplade relativt starka tätskärmar i olika riktningar.

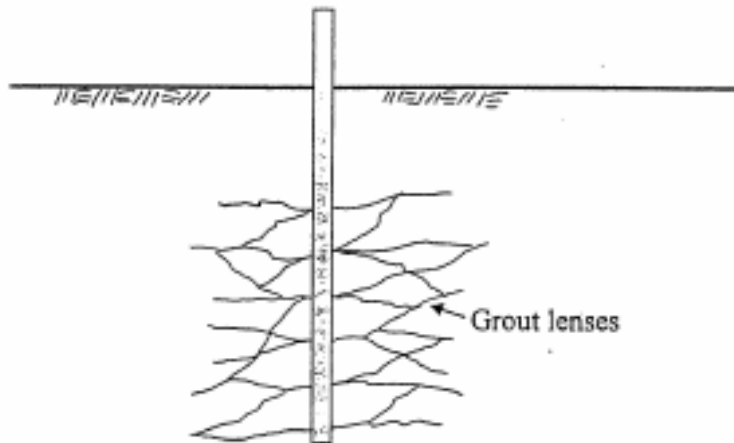


Figur 5-2. Sprickplan bildas vid injekteringsfronten. Planen öppnas upp där jorden har svagheter i sin skjuvhållfasthet. Bild från <http://mooreandtaber.com>

De vanligaste använda tätningsmedlen är cementbaserade med relativt höga vct och dessa ger en god hållbarhet samt en hög tryckhållfasthet. Nackdelen är att bruket som används är dåligt, liksom all cement, på att ta upp dragkrafter. Inblandning av polymerfibrer i injekteringsmedlet kan fungera som armering och ger därför en ökad draghållfasthet (James Warner 2004).

Nackdelen med uppspräckningsinjektering är att det i praktiken är omöjligt att styra sprickbildningen i jorden. Sprickornas orientering och storlek blir aldrig densamma från fall till fall då lokala svagheter i jorden avgör sprickornas orientering. Fördelen med bildandet av tätskärmar är att man förlänger läckvattenvägarna och därigenom, i praktiken, minskar jordens permeabilitet. Dock har utgrävningar efter provinjektering visat att tätskärmar i regel ej är tillräckligt nära varandra och bara i ett fåtal fall korsar de varandra vilket är nödvändigt för att permeabiliteten ska kunna sänkas effektivt.

Metoden kan med fördel användas på de flesta typer av lågpermeabla jordar med fraktionsstorlekar på grus - lera vilket gör metoden lämplig för att lyfta upp jord som satt sig men framförallt i stabiliserande syfte. Vid eventuell användning i tät kärnan måste hänsyn tas till utbredningen av tätskärmar då det kan bildas "bryggor" av injekteringsmedel mellan tät kärnan och filtret varigenom ett ökat läckvattenflöde kan ske vilket är en stor nackdel då man i detta fall skadar dammen mer än man reparerar den.

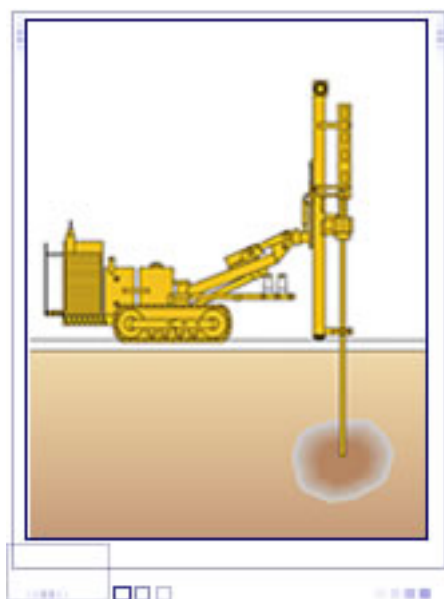


Figur 5-3. Injektering börjar nerifrån. Allt eftersom munstycket höjs följer sprickbildningen i jorden med och i slutändan har ett gitter av tätskärmar bildats runt borrhålet. Bild från James Warner (2004)

### 5.1.2 Kompaktinjektering

Kompaktinjektering är den vanligaste metoden vid jordinjektering (James Warner 2004). Metoden går ut på att göra vad namnet beskriver dvs. att med hjälp av ett injekteringsbruk kompaktera löst lagrade jordmassor i anslutning till injekteringen. Kompaktinjektering är mångsidigt då det går att använda på de flesta jordar från sand - silt och i viss mån lera men det blir dock svårare ju finare jordmaterialet är då detta material har en annan respons än friktionsmaterial och spricker lättare upp på grund av sin högre kohesion. Då injekteringsbruket växer radiellt uppstår skjuvkrafter vid dess yta som verkar mot den omgivande jorden. Då denna jord är av fel karaktär (högkohesiv) finns det risk för att den spricker upp. Höga krav ställs därför på utförandet och en noggrann monitorering är av högsta vikt. Enda kravet vad fraktionsstorlekar anbelangar är att permeabiliteten tillåter porvattnet att dräneras så att höga portryck undviks (James Warner 2004). Om inte, finns en risk för att den kompakterade jorden stänger av läckvägarna som svarar med att spräcka upp jorden då vatten inte kan kompakteras som jordmaterial utan istället ökar porvattentrycket vilket resulterar i minskade effektivspänningar.

Tillvägagångssättet är ett injekteringsförfarande ”uppifrån och ner” eller ”nerifrån och upp”. Nerifrån och upp är enklare men risk finns att man vid detta förfarande pressar jorden uppåt och därigenom skadar markytans struktur. Uppifrån och ner metodiken gör inte detta men förfarandet är mer omständligt då man hela tiden tvingas ner i redan injekterad jord.



**Figur 5-4. Till skillnad från fraction grouting så gör brukets sammansättning att injekteringen växer radiellt. Jorden runt injekteringen densifieras (kompakteras). Bild från <http://haywardbarker.com>**

Med kompaktinjektering ändras inte jordens mekaniska egenskaper utan metoden ökar endast jordens packningsgrad. Samtliga övriga beskrivna metoder i detta avsnitt gör detta (Pär Hansson 1999). Kompaktinjekteringen, då den fungerar på rätt sätt, blandar sig aldrig in med jordmaterialet som det injekteras i, vilket kan vara en avgörande faktor i vissa fall då man vill hålla isär bruk och jord.

### **5.1.2.1 Brukets sammansättning**

Injekteringsbrukets reologi måste vara sådant att det inte uppför sig som en lågviskös vätska, det vill säga: det måste vara styvt. Är den inre friktionen i bruket för låg kommer injekteringen inte att växa radiellt som en massa utan istället hydrauliskt spräcka upp marken och därmed omöjliggöra jordens kompaktering och om detta sker kan dammens inre struktur skadas. Bruket kan utgöras av cementbundet material såväl som av jordmaterial. Sammansättningen av bruket är viktig då man inte vill spräcka upp den omgivande lösa jorden och detta uppnås vanligtvis av att bruket är sammansatt med mycket sand för att hålla en hög inre friktionsvinkel så att bruket växer radiellt. Silt tillsätts också för att ge en god pumpbarhet. Om material med finare fraktionsstorlek än silt adderas finns det risk att materialet blir för lättflytande och då istället spräcker upp jorden (James Warner 2004), som är fallet vid uppspräckningsinjektering.

### **5.1.2.2 Injekteringstryck**

Injekteringstrycket bestäms efter den omgivande jordens passiva jordtryck (jordens respons vid kompression) eftersom denna måste övervinnas för att uppnå kompaktering av omgivande jord. Trycket bestäms även av jordens förmåga att dräneras. För höga tryck spräcker upp jorden då porvatten inte hinner avgå från jordstrukturen.



### 5.1.3 Injektering med jord

Injektering med jord har stora likheter med kompaktinjektering men man använder sig uteslutande av jordmaterial med varierande fraktionsstorlekar (huvudsakligen leror) och vatten. Fördelen med denna metod är att man undviker att introducera material i tät kärnan med skilda geotekniska egenskaper från ursprungsegenskaperna. I Kina utmed gula floden användes denna metod med mycket stor framgång och metoden slog mycket väl ut på i stort sett samtliga dammar där reparationsinsatser sattes in (Y. J. Chen 1982). Historiskt sett har jordinjektering med lera använts ofta och då i synnerhet för att minska problem orsakade av vatten då leran är mycket tät. Injektering med jord är billig och vissa leror, framförallt bentonit, har en förmåga att svälla flera gånger sin ursprungliga storlek. Det finns dock klara frågeställningar på jordinjekteringars kvalitet och hållbarhet då det visat sig att de fungerar dåligt ur dessa två aspekter (James Warner 2004) och det är därför sällan vanligt att injektering sker med bara lera. I de flesta fall används portlandcement i kombination med leror.

#### 5.1.3.1 Funktion

Metoden lämpar sig väl då skadorna utgörs av löst lagrad tät kärnejord då jorden redan vid låga injekteringstryck spricker upp och dessa sprickor fylls sedan upp efterhand av injekteringsbruket som formar lågpermeabla sköldar. Jorden runt om skadan kommer även att densifieras vid genomförandet. Då injekteringstrycket släpps kommer omgivande jord att pressa tillbaka in mot den reparerade delen tack vare en adhesionsprocess då det reparerade områdets material är mycket nära besläktat med den ursprungliga tät kärnejorden samt lerans förmåga i injekteringsbruket att svälla. Vid en korrekt utförd reparation kan den horisontella permeabiliteten gå ner mot ca  $10^{-8}$  m/s (Y. J. Chen 1982).

Då injekteringsbruket kommer i kontakt med läckvattenkanaler kan bruket transporteras i dessa och täta dem. Om injektering utförs i tät kärnejord med en vattenhalt mindre till mycket mindre än det optimala bör en blandning med lågt innehåll av lera användas så att det överflödiga vattnet höjer vattenhalten i kärnan för att sedan fortsätta injekteringen med ett bruk med högre lerhalt. Detta för att höja injekteringens inträngande förmåga (Y. J. Chen 1982).

#### 5.1.3.2 Bruket sammansättning

Som redan nämnt består bruket av olika fraktioner av jord. Dessa fraktioner tar man fram genom att anpassa sin blandning efter kornfördelningskurvan av tät kärnejorden. Det vanligaste är dock att bruket till största del består av lera (det är även lera som är hårdast ansatt för urspolning ur tät kärnan vid inre erosion) då detta lättare tränger längre in i den skadade delen eftersom det lättare hålls suspenderat i vatten. Blandningen anges i lera till cement baserat på vikt och dess densitet ligger vanligtvis runt  $1,2 - 1,4$  t/m<sup>3</sup>. Erfarenheter visar att högre densitet på bruket, förutsatt att det är tunt nog att pumpas via injekteringsrör, ger ett bättre resultat av den slutliga reparationen (Y. J. Chen).

### 5.1.3.3 Bentonit

Bentonit utgör en viktig beståndsdel i många injekteringsbruk som verkar underlättande på spridningsförloppet av bruk och då i synnerhet under härdningsprocessen då den förhindrar separation, samma fenomen som ligger bakom och kan förklara vissa erosionsförlopp. Bentoniten bör t.ex. undersökas för att ta reda på hur pass lämplig den är att användas tillsammans med inert injektering istället för flytmedel för att eventuellt kunna motivera en vidareutveckling av den metoden (se avsnitt 5.1.7). Vidare är bentoniten intressant därför att det är ett "naturligt material" då det finns en önskan, om möjligt, att undvika att kemiska preparat introduceras i tät kärnan. Bentoniten används redan idag i många injekteringsbruk.

Bentonit är namngett efter platsen där den först upptäcktes, Fort Benton i USA. Bentonit är en form av lera som sväller i kontakt med vatten. Leran utgörs framförallt av kristallin lera och då i synnerhet mineralet montmorillonit med inslag av andra mineraler från smektitgruppen vilka i sin tur innehåller aluminiumsilikater med järn, magnesium och natrium eller kalcium. Montmorillonit bildas när basiskt stenmaterial som till exempel vulkanisk aska sedimenteras i en marin miljö. Som lera ska montmorilloniten anses som svag med dålig bärighetskapacitet. Det finns två typer av bentonitleror:

- Natriumbentonit
- Kalciumbentonit

Natriumbentonit är välkänd för att svälla extremt mycket och det finns rapporter på att den kan svälla upp till 15 - 18 gånger sin egen storlek i kontakt med vatten. Bentonitens svällning beror på att vattenmolekyler absorberas i lerans molekylstruktur. Vid inblandning av bentonit i cementbruk fördröjs sedimentering eftersom bentoniten höjer viskositeten. Kalciumbentoniten är inte lika effektiv ur svällningssynpunkt men vid förbehandling med soda fås liknande egenskaper.

### 5.1.3.4 Bentonits erosionskänslighet

Generellt sett är den hydrauliska konduktiviteten mycket låg för bentonit. För natriumbentonit varierar den mellan  $2 \times 10^{-5}$  till  $4 \times 10^{-14}$  [m/s] och för kalciumbentonit varierar den mellan  $1 \times 10^{-5}$  till  $2 \times 10^{-13}$  [m/s]. Det som påverkar bentonitens konduktivitet är bland annat pH halten och inblandning av organiska ämnen i vattnet. Lerstrukturen i bentonit är mycket homogen vid låg salthalt men den störs av förhöjda saltvärden då leran koagulerar varför porer bildas med höjd konduktivitet som följd. En förhöjning av vissa organiska ämnen i vattnet ger samma resultat som vid höjd salthalt.

Eftersom vattengenomströmningshastigheten är en direkt avgörande faktor vid erosion av bentoniten så är en permeabilitetssänkning av materialet direkt farligt sett ur erosionssynpunkt. Då permeabiliteten överstiger  $1 \times 10^{-6}$  [m/s] uppskattar man att vattenhastigheten blir så pass hög att lerpartiklar börjar spolats bort (Tomas Ekström et al 2001).

### 5.1.3.5 Svällningstryck

Svällningstrycket är liktydigt med effektivtrycket hos bentonitmaterial och det måste alltid, med erforderlig säkerhetsmarginal, underskrida det av överlast, sidostöd mm utövade effektivtrycket (Tomas Ekström et al 2001). Svälltrycket bestäms i huvudsak av två faktorer:

1. Bentonitens densitet
2. Vattnets salinitet

| Typ av bentonit | Densitet<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Svälltryck, $p_s$ [kPa] |             |
|-----------------|----------------------------------|-------------------------|-------------|
|                 |                                  | Sött vatten             | Salt vatten |
| Natriumbentonit | 1400                             | 100                     | 0           |
| Natriumbentonit | 1600                             | 300                     | 40          |
| Natriumbentonit | 1800                             | 800                     | 300         |
| Natriumbentonit | 2000                             | 4000                    | 4000        |
| Kalciumbentonit | 1400                             | 0                       | 0           |
| Kalciumbentonit | 1600                             | 20                      | 0           |
| Kalciumbentonit | 1800                             | 500                     | 200         |
| Kalciumbentonit | 2000                             | 4000                    | 4000        |

Tabell 5-1. Svällningstrycket hos smektitisk lera med 70-80 % montmorillonit. Salthalten i det salta vattnet motsvarar den som går att finna i oceanerna emedan det söta vattnet avser älv/sjö/bräckvatten. Tabell från Tomas Ekström et al (2001)

Enligt *tabell 5-1* kan svälltrycket vid vissa betingelser bli mycket stort. En natriumbentonit med densiteten 2000kg/m<sup>3</sup> som genomströmmas av älvvatten utövar då 4 MPa mot sin omgivning förutsatt att omgivningen klarar av att stå emot trycket vilket motsvarar det tryck som i teorin utövas av en ca 12m hög dammkropp (Passivt jordtryck, med ett antaget  $c = 10\text{kPa}$  och  $\phi = 35^\circ$ ) varför man bör förvänta sig deformationer i dammkroppens inre struktur om injektering sker med enbart detta material på ett djup mindre än 12m.

Vanligast för bentonit är att den ingår i blandningar som slurrys. Bentonitens viskositetshöjande effekt skall då förhindra att separation sker i härdningsprocessen.

### 5.1.4 Permeationsinjektering

Permeationsinjektering går ut på att injektera ett poröst medium utan att förstöra dess ursprungliga struktur och därigenom ändra de geotekniska egenskaperna i den injekterade jorden. Metoden lämpar sig bäst i friktionsjordar där porositet och permeabilitet är hög och i stort sett vilket bruk som helst kan användas. Permeationsinjektering penetrerar jordens porer och fyller upp dessa samt eventuella hålrum med bruk som sedan härdar. En god tumregel är dock att injekteringsbrukets partiklar inte bör ha större diameter än en femtedel av den ursprungliga jordens porstorlek (<http://mooreandtaber.com>). Permeationsinjektering kan användas på jordar med en permeabilitet ner mot  $10^{-6}$  m/s (silt) och således berörs ej leror av denna metod. Vid injektering i mycket tät jord finns risk för en viss hydraulisk uppspräckning (Svante Widing, 1987) eftersom injekteringsbruket inte tillåts penetrera den alltför täta porstrukturen i tät kärnans jord.

Viktiga geotekniska parametrar för permeationsinjektering är:

- Permeabilitet
- Porositet
- Mikrostratigrafi (lagerföljder)
- Läckvattenflöde

Där mikrostratigrafi kan bäst beskrivas med jordens förmåga att bilda lager och då framförallt horisontellt. Permeabiliteten i jorden är, i nästan samtliga fall olika horisontellt jämfört med vertikalt med en i regel högre horisontell permeabilitet,  $k_h > k_v$ . Läckvattenflöde får extra stor inverkan vid just permeationsinjektering då brukets utspridning (riktning och längd) påverkas av detta.

#### 5.1.4.1 Cementbruk

Typiska injekteringsbruk är slurrys av olika slag med företrädesvis små fraktionsstorlekar som härdar med tiden till exempel flygaskor och kalkstensmaterial (ultrafin cement) Klassisk cementbruk kan användas på jordar med en minsta fraktionsstorlek av 0.4 mm (<http://haywardbarker.com>) vilket motsvarar mellansand men detta kan modereras till viss del av vct och inblandning av olika extramaterial till det konventionella bruket.

#### 5.1.4.2 Silikatinjektering

Silikatinjektering kallas ibland för vattenglas men dess riktiga namn är egentligen alkalisilikat (Pär Hansson, 1995). Meningen med silikatinjekteringen är att den ska tränga in i porerna i det injekterade mediet och därigenom sänka jordens permeabilitet. Skälet till att utföra silikatinjektering är två

- Förstärkning av jorden
- Minskning av vattenflödet

Vid förstärkning utnyttjas principen av adhesion då injekteringen klistrar fast jordmaterialet om vartannat varför detta ger en ökning av jordens kohesion. Då minskning av vattenflöde

---

avses försöker man att fylla upp porerna i det injekterade materialet så långt det går varför vattnet får en svårare och längre väg att färdas. En nackdel med silikatinjektering är deras begränsade livslängd. De vattenglasbaserade injekteringsmedel som finns idag har osäkerheter i sin beständighet mot frost och urlakning (Pär Hansson 2005). Indikationer finns på att de inte är stabila ens upp till en månad och att de är benägna att lösa upp sig själva för att lämna endast en liten del fast material kvar (Pär Hansson, Reserapport).

Silikatinjekteringen bildar ett gel vid kontakt med syra. Vid injekteringsarbete är det opraktiskt att blanda i syran direkt och därmed få en reaktion vid injekteringsutrustningen innan vattenglaset trängt in i porerna för att där sedan gela varför man använder sig av en härdare i stället som bildar syra efter ett tag (Pär Hansson 1995). En slutsats är att ju snabbare gelbildningen sker desto sämre blir silikatinjekterings inträngningsförmåga.

Beroende på vilken acceleratortyp som används vid härdningsprocessen kan det uppstå osäkra miljökonsekvenser och vidare kan härdningen i det närmaste upphävas om bruket störs under tiden (Pär Hansson 2005).

Vattenglas har en vidare stor nackdel i dess förmåga att genomgå en negativ volymändring under och efter härdningsprocessen. Då vatten avgår minskar brukets totalvolym och detta kan även ske utan vattenavgång.

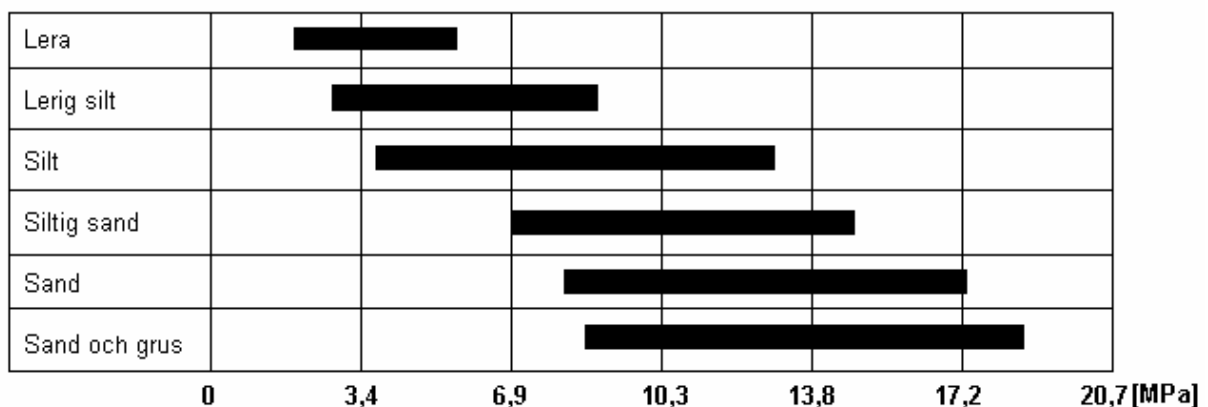
### 5.1.5 Jetinjektering

Jetinjektering är en ganska ”våldsam” metod där man med hjälp av munstycken under högt tryck ersätter urspolat finmaterial i en tät kärna med cement eller cement/bentonit. Den ursprungliga jordens grövre korn bildar då en ny struktur tillsammans med injekteringsbruket (Kjell Windelhed 2001). Den geometriska formen på pelarna som bildas av injekteringen kan både vara cirkulära och lamellformade. Metoden ger stort utrymme till att anpassa de slutgiltiga geotekniska egenskaperna efter krav och behov. Metoden lämpar sig bättre i relativt grovkorniga kohesionslösa material än i t.ex. silt och leror. Det mest lämpliga är grov sand och grus (James Warner 2004). Vid jetinjektering i leror och silt krävs mer energi än i processen och slutresultatet blir smalare pelare eftersom porositeten i dessa jordar är låg. Fördelen med metoden uppnås främst i och med den höga hållfastheten som bildas. Jetinjektering har med framgång använts i undergrunden på dammar grundlagda på jordmaterial för att öka jordmaterialets skjuvhållfasthet samt bilda en tätskärm med avsikt att kontrollera vattenflödet under dammen.

Vid jetinjektering är det mycket viktigt att det urspolade finmaterialet får chans att avgå. Om inte detta sker kommer höga tryck att bildas i jorden på grund av det ökade trycket injekteringsutrustningen bidrar med, varför risk för hydraulisk uppsprickning ökar.

#### 5.1.5.1 Tillvägagångssätt

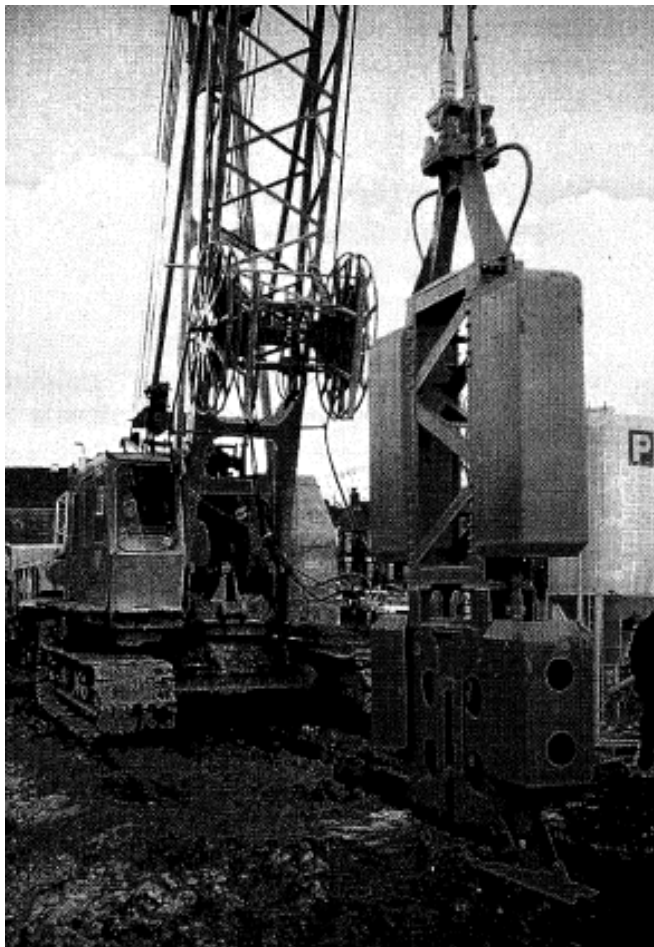
Ett hål borrar ner vid dammkrönet varefter finmaterialet i jorden spolas bort av roterande munstycken med antingen luft eller vatten. Därefter ersätts det bortspolade finmaterialet med cementbruk eller cement/bentonitbruk varefter en homogen pelare bildas. Om man låter munstyckena fixeras i stället för att rotera blir slutprodukten istället en spalt. Bentonit blandas i för att uppnå en tätare konstruktion och normal dosering ligger på 1 – 2 % av cementvikten. Den färdiga jetpelaren får en slutlig permeabilitet på mellan  $10^{-7}$  –  $10^{-9}$  m/s (Kjell Windelhed 2001) vilket är ungefär samma värden som för en normal tät kärna.



Figur 5-5. Slutgiltig hållfasthet i olika jordar vid jetinjektering. Leror får en svagare hållfasthet eftersom den injekterade cementen, cement/bentonit ej ersätter urspolat finmaterial lika bra som i sand/grus. Bild från James Warner (2004)

### 5.1.6 Slitsmur

Denna metod är mycket omfattande och kan tillämpas över stora områden i en damm för att reparera dess tätkärna. Utförandet kan liknas vid slitsgjutning och används med fördel i kohesiva kärnor med högt lerinnehåll (J. A. Charles et al 1996) Ett dike grävs vertikalt i tätkärnan (se *figur 5-6*) samtidigt som det fylls med en bentonitslurry för att stödja upp väggarna med anledning av att förhindra ras. Vid relativt små dammar används enstegsmetoden där en stödjande cement-bentonitslurry används både som stödmassa vid utgrävningen av diket och som slutlig tätmassa. En vidareutveckling av metoden, tvåstegsmetoden, låter ersätta den stödjande bentonitslurryn med en plastisk betongmassa. (J. A. Charles et al 1996). För dammar med stora skador i hela konstruktionen är detta en bra metod. En slitsmur lagar inte skadan utan förhindrar endast skadans effekt.



Figur 5-6. Grävning av slits med specialutrustad grävmaskin. Bild från J. A. Charles et al (1996)

#### 5.1.6.1 Enstegsmetoden

Enstegsmetoden lämpar sig bättre för små dammar därför att påfrestningarna mot den slutliga produkten är mindre. Cement-bentonitslurryn som används som uppehållande medium under utgrävningen av diket lämnas kvar och får sedan härda. Vattenhalten i slurryn ligger vanligtvis mellan 250 – 400 % varför krympningar kan uppstå vid uttorkning med sprickbildning som följd om slurryn inte täcks över. Den slutliga hårdnade produkten är spröd vid låga sidotryck och plastiskt beteende uppnås endast under dränerade förhållanden med

höga effektivspänningar på minst 100 kPa (J. A. Charles et al 1996). Vikten på den hårdnade slurryn är låg, endast mellan 11 – 12 kN/m<sup>3</sup> vilket tyder på ett högt vatteninnehåll.

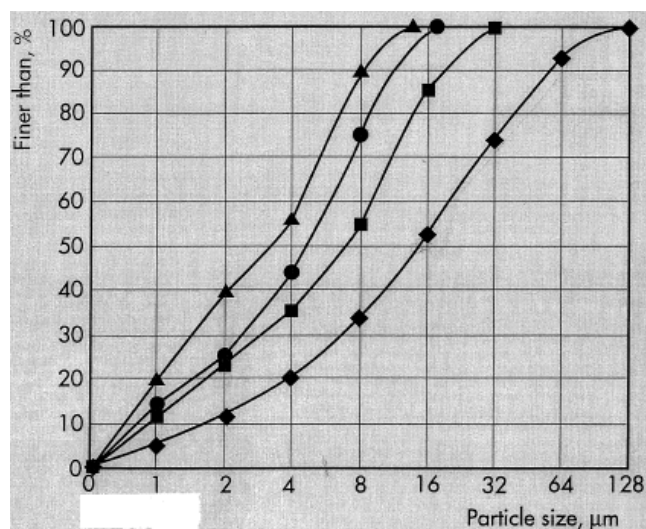
#### **5.1.6.2 Tvåstegsmetoden**

Liknar mångt och mycket föregående med den skillnaden att den stödjande slurryn ersätts med en betongblandning (cement, bentonit, ballast, vatten och ibland även PFA) PFA står för pulverized fuel ash, mer känt som flygaska. Betongblandningen gjuts på plats allt eftersom grävarbetet fortskrider. Gjutningen på plats sker med en så kallad ”tremie pipe” som sänks ner till botten av den urgrävda tät kärnan. Betongen pumpas ner genom röret och tränger undan stödvätskan och allt eftersom arbetet fortskrider höjs röret med nivån på den utlagda betongen och den stödjande bentonit-slurryn följer med upp enligt Arkimedes princip. Gjutningen sker sektionvis som paneler. Fördelen med den här metoden jämfört med enstegsmetoden är att den slutgiltiga betongen är starkare och mindre erosionskänslig. Dessa metoder har visat sig väl lämpade för stora arbeten och i USA har det gjorts arbeten på djup ända ner mot 100 m. En reparation av denna sort inte reparerar själva skadan utan minskar endast skadans konsekvenser som annars riskerar att hota dammens livslängd.



### 5.1.7 Injektering med inerta material

Ett inert material ger inte upphov till några kemiska reaktioner i bruket såväl i torrt som i kontakt med vatten. Det material som fram till idag har provats några fåtal gånger (endast i laboratoriemiljö) är finmald kalksten och finsilt. Kornstorleksfördelningen är likvärdig med mikrocement vilket betyder att den största kornstorleken ligger på 16  $\mu\text{m}$  (att jämföra med silt vars största kornfördelning som är 60  $\mu\text{m}$ ) Försök har visat att det sedimenterade materialets packningsgrad kan kontrolleras med hjälp av flytmedel som använts till betong och injekteringsbruk (Pär Hansson reserapport)



Figur 5-7. Kornfördelningskurvor över injekteringscement där de två vänstra kurvorna visar fördelningen för UF 12 (Ultrafin Cement, 12 $\mu\text{m}$  som största kornfraktion) samt UF 16. Liknande storleksfördelning som dessa två har även det inerta material som provats. Bild från <http://heidelbergcement.com>

#### 5.1.7.1 Principiell funktion av inert material

Som redan nämnt reagerar inte det inerta materialet på något vis vid injektering utan i stället låter man materialet sedimentera och självpackas vid arbetsutförandet. Den packningsgrad som uppstår då materialet konsolideras kan kontrolleras med hjälp av flytmedel. Det är viktigt att överskottsvattnet i blandningen dräneras ur därför att det är först då som sedimentationen blir effektiv med en tät jordstruktur som slutresultat. Överskottsvatten bör dräneras ur med speciella dräneringshål (Pär Hansson reserapport). När materialet har packats uppvisar det tixotropa egenskaper det vill säga ett material/vätska som blir mer lättflytande om man snabbt rör om i det för att sedan tjockna igen då det får vila.

## **5.2 Sammanfattning av reparationsmetoder. För- och nackdelar**

### **Uppspräckningsinjektering**

- + Minskar till viss del permeabiliteten genom att öka längden på läckvattenvägarna.
- + Passar bra för lågpermeabla jordar.
  
- Svårigheter att styra sprickbildningen i jorden.
- Sprickor ej önskvärda i tåtkärnan.

Uppspräckningsinjektering är inget som bör användas inom dammreparation. Eftersom uppspräckning av tåtkärnan i största möjliga mån måste undvikas.

### **Kompaktinjektering**

- + Packar jorden och minskar därigenom dess permeabilitet.
- + Passar i regel samtliga jordar.
  
- Stor kunskap av operatör krävs för att ej spräcka upp jorden.
- Risk finns för att dammens inre struktur kan rubbas.

Metoden är gammal och väl beprövad så mycket kunskap och djup förståelse för den finns. Den kräver mycket av operatören för att förhindra uppspräckning. Metoden innebär att man måste borra i tåtkärnan för att komma åt den utsatta platsen och för detta måste även kunskap om exakt var i dammen skadan befinner sig finnas.

### **Injektering med jord**

- + "Naturliga" material används vid utförande.
- + Billig metod som har använts i stor skala.
  
- Spräcker upp jorden.
- Låg beständighet mot ursköljning.

Injektering med jord har använts sedan länge med tillfredsställande resultat i de flesta fall men det finns dock frågor kring dess beständighet. Så länge en låg läckvattenhastighet uppnås är metoden ett bra alternativ då den lämpar sig väl för vattenmothållande åtgärder. Dess förmåga att svälla gör den också intressant då den kan hjälpa till att packa löst lagrad jord med hjälp av sitt eget svälltryck. En vidare fördel med metoden är brukets förmåga att följa med läckvattenflöden och täta kanalerna dessa flöden ger upphov till. Materialet är dock känsligt mot höga vattenhastigheter.

## Permeationsinjektering

- + Skadar ej dammens inre struktur.
- + Lämpar sig väl i jordar med hög permeabilitet (filter)
- Beständigheten i denna miljö är osäker.
- Svårt för bruket att verkligen tränga in till avsedd plats innan härdning.
- Volymminskning under och efter härdning.

En intressant metod som förefaller intressant men stor osäkerhet råder för dess beständighet då bruket är mycket tunt i sin struktur. Försök gjorda med silikatbruk är svåra att utvärdera (Pär Hansson 2005). God kunskap om skadans omfattning och den omgivande jordens porositet måste utvärderas.

## Jetinjektering

- + Hög slutlig hållfasthet.
- + Passar bra i sand – grus.
- Svårigheter att dränera det bortspolade finmaterialet.

Denna metod kommer inte att behandlas vidare däremot kan den vara intressant att utföra i undergrunden av dammar anlagda på jordmaterial. Läckning genom undergrund avses inte att behandlas vidare i detta projekt.

## Slitsmur

- + Kan utföras på stora djup och i stor skala.
- + Används i tåtkärna med hög andel lera.
- Reparationsmaterialet är krympningsbenäget.
- Stora insatser krävs.

Slitsmurar blockerar effektivt strömmande vatten men reparerar inte skadan. Den förhindrar endast resultatet av skadan och måste därför kompletteras med ytterligare reparationsmetoder i efterhand. Metoden är vanligt förekommande världen över.

## Inert injektering

- + Injekterat material reagerar inte kemiskt med den omgivande jorden.
- + Självsedimenterar.
- Överskottsvatten kan vara svårt att dränera på ett kontrollerat sätt.
- Dåliga kunskaper om metoden då den är ny.

Den inerta injekteringen förefaller mycket intressant då den innebär en mycket liten åverkan på tåtkärnan genom att bruket får självsedimentera. Tyvärr verkar kunskaperna på detta område i allmänhet små. Det slutliga materialet får en plastisk konsistens vilket, sett ur en dammreparation, är bra då den blir flexibel och bör således inte bidra till uppsprickning eller upphängning av tåtkärnan.

### 5.3 Problem i samband med injekteringsmaterial alt injekteringsmetodik

All form av injektering kan bidra till att skada dammkonstruktionen. Styva kroppar i tät kärnan kan orsaka uppsprickning och upphängning av jordmaterialet samt bidra till en viss lokal flödeskoncentration i gränsen mellan injektering/ursprunglig tät kärnejord. Införande av stela kroppar kan även förhindra framtida skadedetektion. Om en styv injekteringskropp införs i en damm kan skador som sker efter injekteringen bli svåra/omöjliga att upptäcka i ett tidigt stadium då konsekvenserna (sjunkgrop) kan ta mycket längre tid att synliggöras.

För att injekteringsbruk ska kunna nå dammens skadade zon krävs det ett borrhningsarbete i dammkroppen. Vid borrhningsarbeten genom tät kärnan kan detta orsaka att jorden lokalt får en sämre packningsgrad varför permeabiliteten sjunker. Om borrhningsarbeten i stället genomförs i filtrena borde denna bieffekt kunna undvikas.

Då pumpning vid injekteringsförfarande i dammkropp sker långsamt ställer detta extra höga krav på utrustningen. Det är svårt att på ett kontrollerat sätt utföra injektering vid låga pumpflöden (~10 liter/min) varför tryckutjämnare bör installeras för att minska pumpstötter som kan skada tät kärnejorden (Örjan A. Sjöström 1999). Anledning till att man vill pumpa vid så låga hastigheter är att man vill undvika uppbyggnad av höga portryck i det injekterade området varför injekteringshastigheten anpassas efter tät kärnejordens förmåga att dräneras (James Warner et al *Compaction grouting for sinkhole repair at Bennet dam*).

Vidare krävs det lägre injekteringstryck i de övre delarna av en damm där jordtrycken är lägre och jorden därför mer benägen att spricka upp.

### 5.4 Monitorering av injekteringsutförande

Vid all injektering i jord ställs höga krav på utförandet och kontrollen av detta eftersom det rent visuellt är i det närmaste omöjligt att kontrollera resultatet av injektering. Att följa injekteringsförfarandet noggrant är av stor vikt då man med hjälp av detta kan utvärdera reparationsmetodens effektivitet på ett bättre sätt. Vid till exempel kompaktinjektering strävar man efter att ”bygga” upp ett tryck i bruket rakt igenom hela utförandet och eventuella avvikelser från detta, vid till exempel tryckfall, kan betyda att man tvingat jorden till brott varför nya håligheter i dammen kan bildas vilket är icke önskvärt vid användning av denna metod. Genom tryck-flödeskurvor kan man tydligt följa tryckuppbyggnaden och om det sker uppspräckning i stället för kompaktering (Örjan A. Sjöström 1999).

### 5.5 Utvärdering av injektering

För att kunna dra en väl underbyggd slutsats huruvida en injektering har fungerat krävs en utvärdering. Att göra detta är svårt eftersom när injekteringen väl är på plats kan man omöjligt kontrollera materialet eftersom det befinner sig inuti dammkroppen men givetvis finns det alternativ. Alternativen för övervakning som används för kontinuerlig monitorering av dammen, men som även kan användas till att kontrollera effektiviteten av utförd reparation, står beskrivna i avsnitt 4. Det borde dock läggas ner resurser på att utveckla dessa

alternativt finna bättre, förslagsvis standardiserade metoder. Läckvattenmätningar bör anses vara den vanligaste metoden där injekteringsarbetet fortgår till dess att en viss förutbestämd gräns har nåtts med hänsyn till vattenläckage [l/s]. Med andra ord kontrolleras bara effekten av reparation men inte reparationen i sig själv.

## 5.6 Framtida prioriteringar av injekteringsförfarande och bruk

Materialmässigt bör man hålla sig med ”naturliga” material, det vill säga material som inte härdar likt cement, då man undviker införandet av stela kroppar i tätkärnan. Även kemiska medel såsom till exempel vattenglas bör undersökas noggrant innan de används och då framförallt ur två synvinklar: miljöaspekter och hållbarhet (både mekanisk hållbarhet och tidsberoende)

Teknikmässigt bör man försöka undvika att genomföra borrningsarbete genom tätkärnan utan istället hålla till i filtrena. Om borrning i tätkärna måste ske bör detta göras i till exempel en tätkärna som har en sjunkgrop. I denna form av skada är jorden löst lagrad varför det inte finns risk för uppsprickningar i anslutning till borrningsarbeten.

Vid all reparation bör man fråga sig varför reparationsbehovet har uppstått. I nästa samtliga fall är den minsta gemensamma nämnaren bristfälliga filter samt undergrund varför det borde vara viktigt att även analysera dessa för en presumtiv reparation i samband med tätkärnan därför att en tätkärna inte kan spolas ur om filtret, respektive undergrunden inte är eftergivligt (se *figur 3-2*). Om den urspolade skadan repareras med injektering men inte filtret är skadans orsak förbisedd.



## 6 Exempel på reparationer

Att systematiskt gå igenom och utvärdera gamla reparationsarbeten kan vara till stor hjälp för att lära sig hur man vid framtida reparationsarbeten ska gå till väga, eller än viktigare: vad man INTE bör göra

### 6.1 Bennet dam, Kanada

Bennet dam är en 182 m hög och 2000m lång jordfyllningsdamm som dämmer upp ca  $70 \times 10^9$  m<sup>3</sup> vatten i British Columbia, Kanada och uppfördes mellan åren 1962 - 1965. Dammen har en central tät kärna av morän, fattig på sand, som enligt undersökningar visade sig vara inre instabil. Även filtrena saknade en del sand varför även dessa var språnggraderade (Steve Garner 2006). Två sjunkgropar uppstod sommaren 1996 i dammkrönet och dessa var vid krönet ca 2,5 m i diameter och 7 m djupa. Provboringar visade att kärnan rakt under var mycket löst lagrad ner till ca 80 m djup och därefter mer blandad kvalitet ner till 125 m djup. På en nivå mellan 44 – 46 m under dammkrönet fanns tre zoner, vardera 0,3 till 0,6 m tjocka, bestående av sand med en viss inblandning av silt. En liknade zon upptäcktes även vid 83 meters djup (B. D. Watts et al 2000). Bennet dam är den utan tvekan mest väl beskrivna ”problemdammen” enligt utförd litteraturstudie och visar på en väl genomtänkt metodik där tid för undersökningar avsatts. Vid Bennet Dam reparerades sjunkgropar.

#### 6.1.1 Trolig orsak till sjunkgrop

Under byggnadsskedet sattes förlängningsrör på plats samt rör för flödeskontroll av dammen och det var kring just två av dessa som sjunkgroparna uppstod. Anledningen tros härigenom vara att jorden runt dessa rör blev sämre packat under byggnadstiden varför de blev i högre grad mer lättpåverkade av det genomflödande vattnet. Teorin för detta var att fuktkvoten efter hand höjts vartefter jordmaterialet satt sig - ”wetting settlement” (Pär Hansson 1999). Ett annat samband visade sig vara att i gränsskikten mellan byggnadsstoppet på hösten och byggnadsstarten på våren utgjorde en zon med ett mer erosionskänsligt material då porvolymen ökats på grund av frosthävningar (Steve Garner 2006).

#### 6.1.2 Reparationsmetod

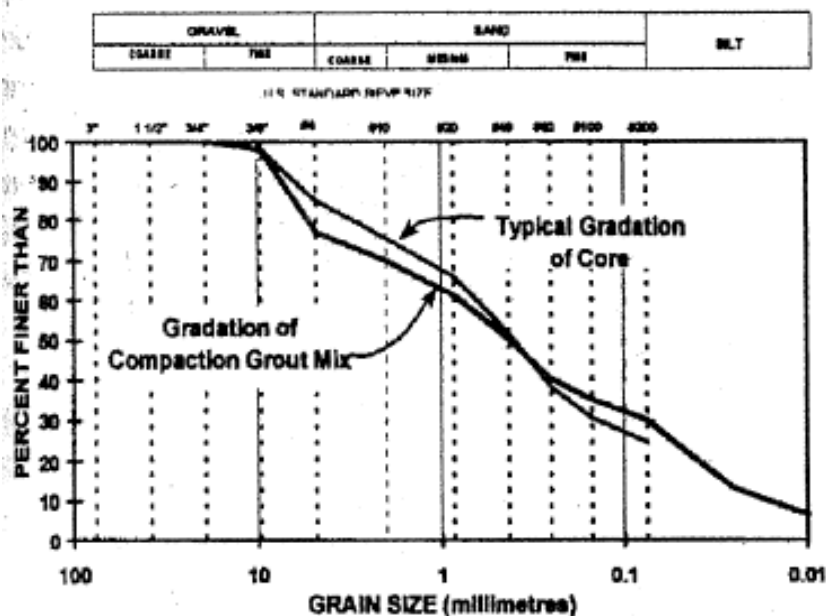
Det är viktigt att påpeka att denna reparation var inriktad mot att reparera sjunkgropar. Valet för reparationsmetod föll på kompaktinjektering samt permeationsinjektering. Kompaktinjekteringen utfördes på stora djup (boringar utfördes ända ner till drygt 100 meters djup i tät kärnan) medan permeationsinjekteringen utfördes på tät kärnans övre del från 10 – 15 m djup och upp till dammkrönet.

### 6.1.2.1 Försiktighetsåtgärder

- Eftersom arbetet utfördes på vintern då vattenmagasinet var fullt ställdes extrema krav på att undvika hydraulisk uppspräckning av jorden. För att undvika detta valdes relativt små injekteringsrör för att försäkra sig om en tryckförlust då allt för stora injekteringsrör kan orsaka att injekteringsbruket flödar ner på ett okontrollerbart sätt. Man valde även att injektera små mängder i flertalet hål istället för som brukligt vid kompaktinjektering, att injektera stora mängder i få hål (ca 200 liter/hål).
- För att undvika uppbyggnaden av höga porttryck krävdes att injekteringen inte utfördes snabbare än vad tätkärnejorden kunde dräneras. Detta gjorde att injekteringshastigheten valdes till endast 0,25 kubikfot/minut (~7 l/min) Att pumpa vid dessa låga tryck ställde stora krav på utrustningen och det visade sig i det närmaste omöjligt att styra injekteringshastigheten och på grund av detta blev det en nödvändighet att byta ut originalutrustningen mot bättre

### 6.1.2.2 Brukets sammansättning

Mycket energi lades på att finna en lämplig blandning på bruket och det märkliga i just detta fall var att man inte tillsatte någon form av cement alls i bruket. Bruket utformades så att det i största möjliga mån skulle få en kornfördelningskurva likvärdig med tätkärnejordens. Det enda som ingick i bruket var vatten, ärtsingel (20 %), sand (50 %) och silt (30 %) (Pär Hansson, reserapport Bennet Dam).



Figur 6-1. Jämförelse av kornfördelningskurvor mellan faktisk tätkärnejord och injekteringsbruk i Bennet Dam, Kanada. Bild från James Warner et al, *Compaction grouting for sinkhole repair at WAC Bennet Dam*.



### 6.1.2.3 Arbetsövervakning

Med hjälp av piezometrar runt sjunkgroparna registrerades portrycken med tvåminutersintervall, i vattenståndsrör registrerades vattennivåerna var tionde minut. Observationsprismor på upp- respektive nedströmssidan om sjunkgroparna för optisk övervakning installerades. Mätstationerna till dessa placerades på fasta marken vid dammens ömse sidor. Dessa stationer mätte rörelser i dammkroppen två gånger per 12 timmars arbetspass. Även pumprycken följdes noga under hela utförandefasen.

## 6.2 Hällby, Sverige

Hällby kraftverk ligger i Ångermanälven som mynnar ut norr om Härnösand ca 430 km norr om Stockholm. Dammen började byggas 1967 och togs i bruk 1970. 1985-86 (15 år efter driftstart) reparerades dammen efter en omfattande sättningsskada i vänster jorddamms anslutning till kröndammen vid uppströmsslätten. Sjunkgropen hade en uppskattad volym av 7 m<sup>3</sup> och ett djup av 0,7 m. Borrningar visade att tät kärnan blivit urspolad och att den var tvungen att repareras. Skadorna uppstod i dammens bottenparti och tät kärnan högre upp var skadad varför beslutet att reparera dammen med hjälp av injektering fattades.

Under byggnadsfasen ersattes stora delar av nedströmsfiltret av ett material benämnt ”stödjord”. Inga dokument finns dock om stödfyllningen hade likvärdig kornstorleksfördelning som filtermaterialet (Åke Nilsson et al 1999).

### 6.2.1 Trolig orsak till sjunkgrop

Eftersom kärnan var urspolad i bottenpartiet antogs att sprickor i undergrunden tillät att läckvatten under högt tryck tagit sig in i tät kärnan underifrån. Orsaken till detta är troligen ett resultat av bristfällig täthet efter injektering av berg och detta i kombination med att man under byggnadsfasen sorterade ur sten från tätjorden de första 0,5 metrarna för att undvika stenseparation orsakade troligen erosionen. Uppströmsfiltret har därefter sjunkit ner för att laga det läckande bottenskiktet i tät kärnan. Vid tiden för sjunkgropens uppkomst konstaterades en flödesökning från 0,35 l/s till 3,3 l/s. Tyvärr kunde det inte bekräftas om vattnet under flödesökningen grumlats men vattnet bedömdes vara klart efter flödesökningen. Skadan bedömdes inte ha orsakats av bristfälliga filter och att stenseparation inträffat. Ingen skillnad i kornfördelningskurvorna, före/efter inre erosion kunde utläsas.

### 6.2.2 Reparationsmetod

Sammanlagt injekterades 42m<sup>3</sup> cement/bentonitbruk, 164m<sup>3</sup> silikatbruk och 46m<sup>3</sup> bruk för bergsinjektering (totalt 252m<sup>3</sup>) Allt detta i vänster jorddam. I höger jorddam injekterades 14m<sup>3</sup> cement/bentonitbruk, 124m<sup>3</sup> silikatbruk och 17m<sup>3</sup> bruk för bergsinjektering (totalt 155m<sup>3</sup>). Totalt injekterades sammanlagt, för hela konstruktionen, 407m<sup>3</sup>. Från 2003 – 2005 utfördes ytterligare reparationer som en höjning på 50 cm av tät kärnan, en fyllnad av 35 000m<sup>3</sup> block på nedströmssidan för att utöka säkerheten mot utglidningar samt installationer av diverse mätutrustning för monitorering av rörelser och genomströmning av dammkonstruktionen. I de yttre raderna valdes tätningssmedlet cement/bentonitbruk för att täta

större hålrum och urspolningsstråk. I de inre valdes silikatbruk. Injektering av berget utfördes samtidigt.

Efter utförda reparationsarbeten sjönk läckvattenflödet gradvis till 0,17 l/min. I nuläget är även vattenståndsrör installerade i dammen och temperaturmätning i dessa utförs kontinuerligt.

### **6.3 Porjus, Sverige**

Porjus kraftverk ligger i Lule älv ca 1 000km norr om Stockholm. Dammen stod färdig 1975 men redan året efter, 1976, samt 1979 och 1985 uppstod sjunkgropar. Undersökning vid sektion 0/390 gav vid handen att tät kärnan var oskadd. 1993 uppstod åter igen en sjunkgrop vid denna sektion intill dammkrönets uppströmskant. Lagning av tät kärna utfördes på sektion 0/380 – 0/400 och 0/595 – 0/605 där man uppmätt en förhöjd vattenkvot i tät kärnan.

Enligt uppgifter har det varit svårt att i efterhand kunnat ange var i dammkroppen läckage och erosion startat. Man tror dock att de härrör från kontakten tät kärna/berggrund (Örjan A. Sjöström 1999).

#### **6.3.1 Reparationsmetod**

Reparation utfördes med ultrafin cement och även en sand/bentonit/cement. Som ett tillägg till detta injekterades även sand och bentonit i nedströmsfiltret. Efter utförda reparationer minskades läckaget med 90 % i de skadade delarna och med 75 % i de anslutande delarna.

### **6.4 Suorva östra, Sverige**

Suorva östra ligger i Lule älv uppströms Porjus kraftstation ca 1000km norr om Stockholm. Dammen stod färdigställdes 1972 och 1983 noterades grumligt vatten nedströms samt en sjunkgrop om 30m<sup>3</sup> i dammens krön sektion 0/740 (dammen är 0/750 lång) Sjunkgropen lagades med cement/bentonitbruk varvid läckaget minskade till 25 %. Tät kärnan var skadad ända ner till berggrunden. Man anser att erosionen har att göra med moränens sammansättning och att erosionen startade nära bergkontakten. Man behövde inte anta otillräcklig tätning av berget (Örjan A. Sjöström 1999).

#### **6.4.1 Reparationsmetod**

Dammen tätades med injektering under självtryck (cement-/bentonitbruk), ca 40 ton. Sommaren 1984 gjordes kompletterande injekteringar av damm/tät kärna. I 40 st hål injekterades 9 ton cement och 39m<sup>3</sup> silikatbruk i tät kärnan samt 9 ton cement och 2m<sup>3</sup> silikatbruk i berget. 1987 injekterades jord och berg med ca 60 ton Degerhamns injekteringscement.

## 6.5 Lilla Edet, Sverige

Lilla Edet är en tätort som ligger drygt 35 km söder om Vänersborg där Vänern har sitt utlopp. Vid Lilla Edet byggdes redan 1608 Sveriges första sluss. 1832 invigdes nästa sluss och 1916 stod den slutliga slussen, som används än idag klar. Dess två föregångare är i dagsläget igenfyllda och är således en del av dammen. Dammen är av typ fyllningsdamm med moränkärna. Problemen med läckage genom dammen och framförallt under den har alltid varit betydande och diverse försök att tätat läckorna har utförts. Rörspontar har monterats och vissa försök till injektering har gjorts men utan godkända resultat. I anslutning till dammen på nedströmssidan ligger ett pappersbruk och under detta uppstod så småningom sjungropar som skadade byggnaden

### 6.5.1 Reparationsmetod

Arbetsförfarandet har varit att sponta ner till berggrunden, gräva ur tät kärnan och ersätta materialet med ny morän. Innan ifyllning av tät kärnan har berggrunden injekteras med snabbcement. Problem uppstod vintertid med injekteringen eftersom snabbcementen krävde minst +7° för att härda. Det genomströmmande kalla vattnet gjorde det olyckligtvis omöjligt att utföra detta arbete vintertid.



Figur 6-2. Utgrävning av tät kärnan vid Lilla Edet. Vid bakre delen av bilden syns betongkonstruktion som utgör en del av sluss i Göta Älv som går genom dammen. Bild Johan Lagerlund

Snabbcementen hade vid injekteringens början höga vct för att tränga in i de minsta sprickorna och vct sänktes sedan successivt för optimal tätning. Sammanlagt injekterades ca 50 m<sup>3</sup> cementbruk. Vid spontfoten gjöts en betongbalk på plats för att täta mellan berg/spont. Även rörspontar installerades och mellan dessa ett armeringsnät som sedan täkts med sprutbetong. Då väl sponten var på plats och lyckad injektering var utförd fylldes dammen med morän som sedan packades väl. Spontarna satt sedan kvar när arbetet var klart. Största djupet som man var tvungen att gräva ner till var 9 m och vintern 2006 var man vid den allra sista etappen invid den nuvarande slussen på Bohussidan. Projektet stötte på en del svårigheter som var svåra att förutse i förväg. Gamla reparationsarbeten med hålfyllningar av betong gjorde det svårt att schakta ur tatkärnan. Dammen ligger i en gammal bruksmiljö och olika strömkablar som förser/försåg pappers bruket med elektricitet låg nergrävda i den och tyvärr var det ingen som visste hur dessa användes idag. Ingen kartering gjordes förr utan de personer som då visste vad strömkablarna användes till hade gått i pension eller ur tiden. Noterbart var även att det gick en förkastningszon rakt under dammen

### **6.5.2 Kontroll av arbetets funktion**

Vattenståndsrör installerades uppströms dammen och resultaten visade att vattenståndet höjdes i dammkonstruktionen, vilket tydde på ett lyckat arbete. Även det gamla slushuset som låg mitt på dammen vid den del där 1832 års sluss stod fick helt plötsligt problem med vatteninläckning, en olycka som visade så gott som något att injekteringsarbetet och ersättandet av dammkärnan fallit väl ut. Efter urschaktning av första etappen var inläckaget 3435 l/min och efter slutförd injektering var läckaget endast 6 l/min innan återfyllnaden av tätjord påbörjades vilket ger en förbättring av hela 99,9 %.

Noterbart är att detta arbete utfördes på en liten damm. På stora dammar finns det inte samma möjlighet att schakta ur tatkärnan och ersätta denna.

## 7 Slutsatser

Syftet med denna rapport är att sammanfatta kunskapsläget vad gäller dammreparationskonsten och utgör grunden för framtida fortsatt forskning inom området

### 7.1 Problemformulering

Nedan följer slutsatser på de huvudsakliga frågeställningarna i rapporten.

#### 7.1.1 Varför inre erosion är intressant

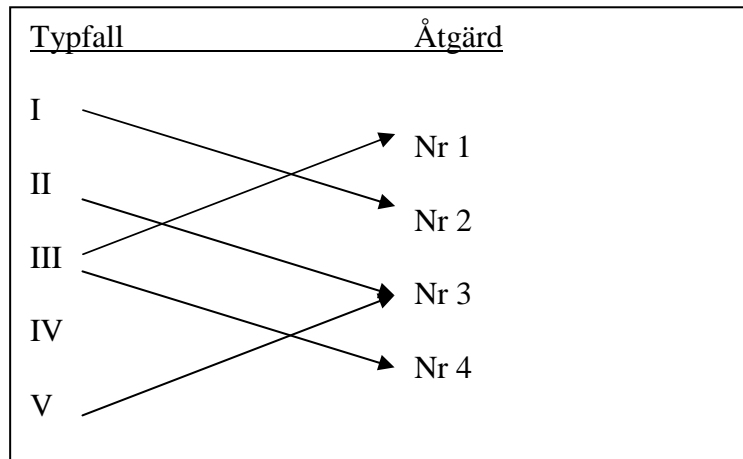
Eftersom inre erosion av en tät kärna ligger bakom många fall av ökat läckage är det viktigt att förstå processen. Ett ökat läckage innebär en försämring av dammens uppgift, det vill säga att mothålla en vattenmängd samt vara mekaniskt stabil. Detta leder till att sannolikheten för ett dammbrott ökar. En vidare intressant frågeställning är varför skadan uppkommer. För i stort sett samtliga fall anses det vara orsakat av filtrets oförmåga att kvarhålla tätjorden i kärnan eller en bristande tätning av dammens undergrund som kan lakas ur med tidens gång, vilket ger en ökad vattengenomströmning med större risk för erosion.

#### 7.1.2 Val av reparationsmetodik

För att försäkra en god reparation krävs kunskap om skadans orientering och utseende. Det gäller att fylla upp de hålrum som bildats vid den inre erosionen. I vid bemärkelse sker det med någon form av inpressning/ersättning av nytt material det vill säga injektering. Alternativt kan dammen byggas om eller tatkärnans typ bytas.

- Är skadan lokal eller längs större delen av tatkärnan (val av reparationsmetod)
- Är skadan diffus eller i form av en kavitet (val av reparationsmetod)
- Vilket material har spolats bort från tatkärnan (val av reparationsmaterial)
- Skadans lokalisering i dammen (val av bormetod)
- Med vilken hastighet skadan ökar i omfattning (prioritering)

Det bör även i slutändan vara av intresse att ta fram en jämförelse av skadetyper och ställa dessa i relation till en reparationsmetod anpassad för respektive skadetyper. Varje typfall representerar en form av skada på dammkonstruktion till exempel en sjunkgrop eller piping. Varje åtgärd symboliserar i sin tur en reparationsmetod. Varje typfall är olikt det andra och samma princip gäller för åtgärderna. Typfallen ska sättas i relation till orsaken bakom skadan och varför den sker. Tonvikten å min sida kommer att ligga på åtgärderna och att dessa mer eller mindre bevisligen fungerar som reparationssätt med avseende på experimentella försök, givet en viss typ av skada.



Figur 7-1. Typfall mot åtgärder. Detta visar en principiell skiss, inga konkreta metoder.

Enligt figur 7-2 kan en typ av skada repareras med kanske flera olika typer av reparationsmetoder och detta kan i slutändan innebära en tidsvinst då man eventuellt ställs inför tvånget att fatta snabba beslut på reparationsmetod. Det är viktigt att förstå att ingen universalmetod kommer att stå till buds för att reparera alla typer av skador.

### 7.1.3 Slutsatser gällande material-/teknikfrågor

Att avgöra vilka metoder som fungerat tillfredställande i ett längre tidsperspektiv är svårt att uttala sig om. Detta på grund av att majoriteten av reparationer är gjorda relativt nyligen. Det är därför av intresse att utvärdera reparerade fyllningsdammar. I väntan på utredningar kan vissa mer allmänna slutsatser dras utifrån min genomförda litteraturstudie.

- Ett styvt cementbaserat bruk tätar läckor och är inte erosionskänsligt men skapar nya läckvattenvägar och kan dölja underliggande skador samt bidra till upphängningar av tätjorden.
- Att injektera med jord är billigt och sänker permeabiliteten på tät kärnan men materialet är erosionskänsligt.
- För all injektering gäller att säkerställa injekteringsbrukets beständighet.
- En slitsmur är att överväga då skadorna på tät kärnan är omfattande och har en orientering längs hela dammen.
- Vad gäller material bör injekterat material vara av tätjordskaraktär för att störa tät kärnan i minsta möjliga mån. Styva material bör undvikas. Vid reparation av en "pipe" kan läckvattnet utnyttjas för att transportera bruket till rätt plats (skadans position). Där avsätts materialet och med en viss inblandning av lera sväller det för bättre fixering.
- Vad gäller teknik så bör borrhingsarbeten i tät kärnan undvikas såvida denna inte är skadad upp till krönet. Borrhningen bör i stället utföras genom filtermaterialet.

### **7.1.4 Faror vid injektering**

Oförsiktig injektering kan ge upphov till att en skadas omfattning förvärras. För höga injekteringsstryck och för stor injekteringsmängd kan spräcka upp jorden. Oförsiktig borring i tät kärna kan bidra till urspolning, upphängningar och vibrationsinducerade sprickor i tätjorden.

### **7.1.5 Tidigare utförda reparationsarbeten**

Bennet Dam i Kanada utgör ett bra exempel på ett lyckat reparationsarbete varvid man reparerade en skadad tät kärna med sättningar på dammkrönet. Att det blev lyckat beror till stor del på den stora insatsen som lades ner på undersökningar av skadans art. Vid Lilla Edet i Sverige får dess damm med gamla injekteringsarbeten stå som exempel för mindre lyckad injektering. Gamla injekteringar av cementbruk i tät kärnan omöjliggjorde dagens reparationsarbete, sålunda fick dammens tät kärna bytas ut helt. Det bör poängteras att dagens reparationsarbeten är utförda på ett utmärkt sätt (Johan Lagerlund 2006).

### **7.1.6 Dagens kunskapshål**

Kunskapshålen idag utgörs av att få rapporter finns att tillgå för utförda reparationsarbeten med längre tidsperspektiv än entreprenörens arbetsrapport. Vidare pågår forskning angående fenomenet inre erosion vilket är en viktig process att förstå för att kunna utföra hållbara reparationer

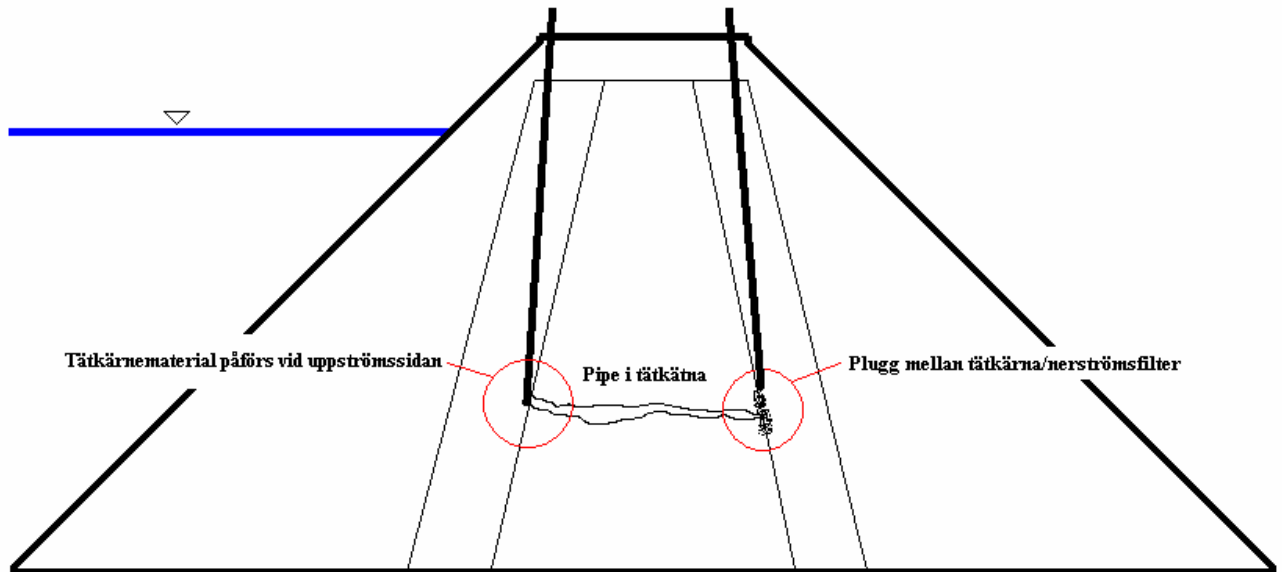
### **7.1.7 Framtida prioriteringar**

Tyngdpunkten av fortsatt forskning inom området bör läggas på att med injekteringsmetodik reparera tät kärnor med så lite störning av densamma som möjligt. Tät kärnor är känsliga och en liten störning av jordstrukturen kan ge upphov till allvarliga skador.

### **7.1.8 Projektets framtida riktning**

I framtiden kommer laborativ verksamhet att prioriteras. Syftet är att undersöka huruvida det är möjligt att hjälpa dammen att självläka. Självläkning är en process som sker kontinuerligt i jordfyllningsdammar men tyvärr under förutsättning att materialtransport sker i och genom tät kärnan på tät kärnans bekostnad. Idén är att ge dammen ett överskottsmaterial för denna process samtidigt som filtrets förmåga att fånga upp det suspenderade materialet ökas med hjälp av en plugg mellan nerströmsfilter och tät kärna. För att detta ska bli möjligt krävs en noggrann kunskap över skadans orientering.

För ökad förståelse av resonemang enligt ovan se figur 7-2



Figur 7-2. Tänkt utförande vid reparation av pipe genom tätjärna. En materialuppfångande plugg skapas nerströms mellan skadad tätjärna och filter. På uppströmssidan vid skadans front injekteras tätjärnematerial som följer läckvattnet ner mot pluggen där det fångas upp och sedimenteras. Bentonitinblandning orsakar svällning så att bruket expanderar och hålls på plats. Borrningsarbeten sker i filtermaterialet och tätjärnan störs i minsta möjliga mån. Metoden kräver en noggrann lokalisering av skadans position och orientering.



## 7.2 Reparation av fyllningsdammar med injektering - kravformulering

Efter utförd litteraturinventering inom området för dammreparationer kan man dra vissa slutsatser angående önskemål på ett injekteringsmaterials egenskaper och hur injekteringen skall utföras

Önskemålen på **injekteringsmedel** är följande:

- Injekteringsmedlet ska primärt stabilisera dammen och förhindra uppkomsten av nya sjunkgropar.
- Injekteringsmedlets styvhet måste anpassas så att upphängningar av tät kärnan ej uppkommer (härdat tillstånd).
- Injekteringsmedlet bör ha en god beständighet det vill säga vara motståndskraftigt mot urlakning och andra nerbrytningsmekanismer.
- Injekteringsmedlet bör ha en för skadans utseende relevant inträngningsförmåga.
- Injekteringsmedlet får inte separera vid appliceringen vilket är viktigt för att hindra att zoner med högpermeabelt material bildas och därmed risk för framtida skadebildningar (koncentrerad läcka).

Vad gäller själva **injekteringsprocessen** kan följande krav ställas:

- Injekteringen skall minska läckvattenflödet och förhindra uppkomst av framtida erosionsprocesser
- Injektering får inte bidra till att sättningar och uppsprickning av tät kärnan sker. Om kärnan spricker upp vid injektering flyttas bara problemet till ett annat ställe i dammen. Ökad sprickbildning orsakar kanaler där vatten kan passera med högre hastigheter. För att undvika detta krävs en noggrann kontroll av arbetsutförandet
- Injekteringen får inte bidra till att dammens zoner förstörs. Om injektering sker i gränsen mellan tät kärna och filtret kan en ”brygga” av injekteringsbruk bildas mellan de två zonerna varför vatten kan passera med en högre hastighet (gäller mycket styva bruk)

## 7.3 Laborativ försöksverksamhet

Vidare bör nästa steg bli att handgripligen ge sig i kast med laborativ verksamhet för att ge empiriska underlag för metod- och materialutformning för reparationsarbeten i dammkroppar. Möjligheten till filterförbättring i samband med reparation av tät kärnan bör också undersökas.

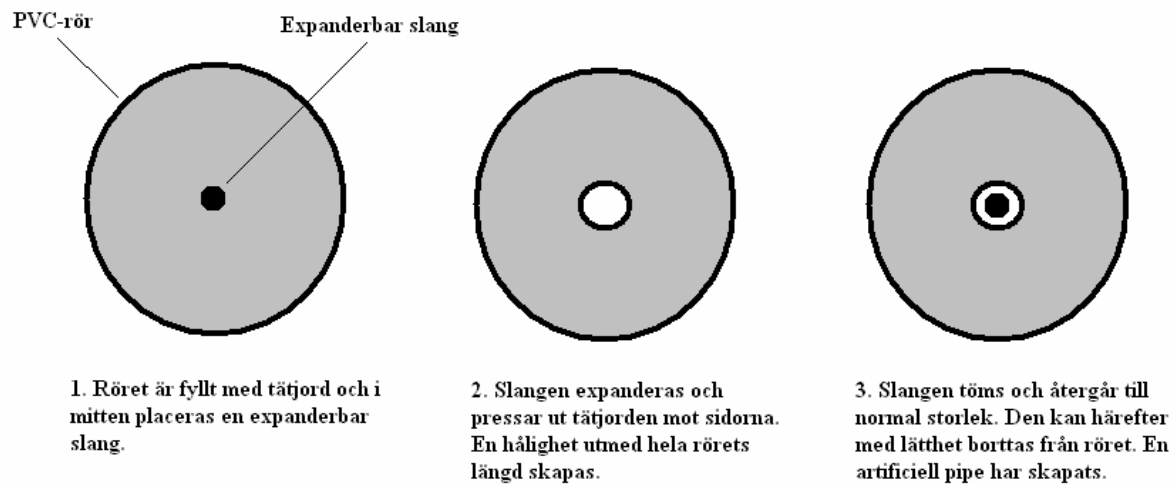
Den experimentella verksamheten kommer att utföras i tre steg: *metodik, material samt verifiering*. **Metodik** innebär att själva laborationsmetoder samt kronologisk ordning på dessa bestäms. Vilket **material** och hur detta är uppbyggt utgör steg två. Sista delen handlar om att införa detta material i en dammliknande miljö i ett labb för **verifiering**; att det fungerar mot verkliga fall.

Det är viktigt att det primärt utformas mindre kostsamma och lätt repetitiva försök. Allt eftersom kunskapen för de ingående processerna växer i och med dessa försök, kommer efterhand mer precisa experiment att utföras. Dessa vidare utvecklingar av försök ska alltmer efterlikna verkliga dammbyggnationer, om än i mindre skala. I denna etapp kommer det att utföras rörförsök.

### 7.3.1 Rörförsök

En miljö, likt den verkliga i en skadad tät kärna måste byggas upp. Rör (PVC-rör) kommer att prepareras med moränmaterial (relativt rik på lera för bättre vidhäftning mot PVC-rörets yta) så att de efterliknar en skadad sektion av en fyllningsdamm. Rörens innanmäte kommer att packas med tätjord och i mitten placeras en expanderbar slang som under tryck expanderar och skapar en rörformad skada, dvs. en pipe. Efter att slangen satts under tryck är det lätt att tömma på trycket för att sedan dra ut den och kvar efterlämnas en pipe omgiven av väl packad tätjord (se figur 7-3). Den just beskrivna prepareringen avser att modellera en skada som är resultatet av pipping (rörformad läcka)

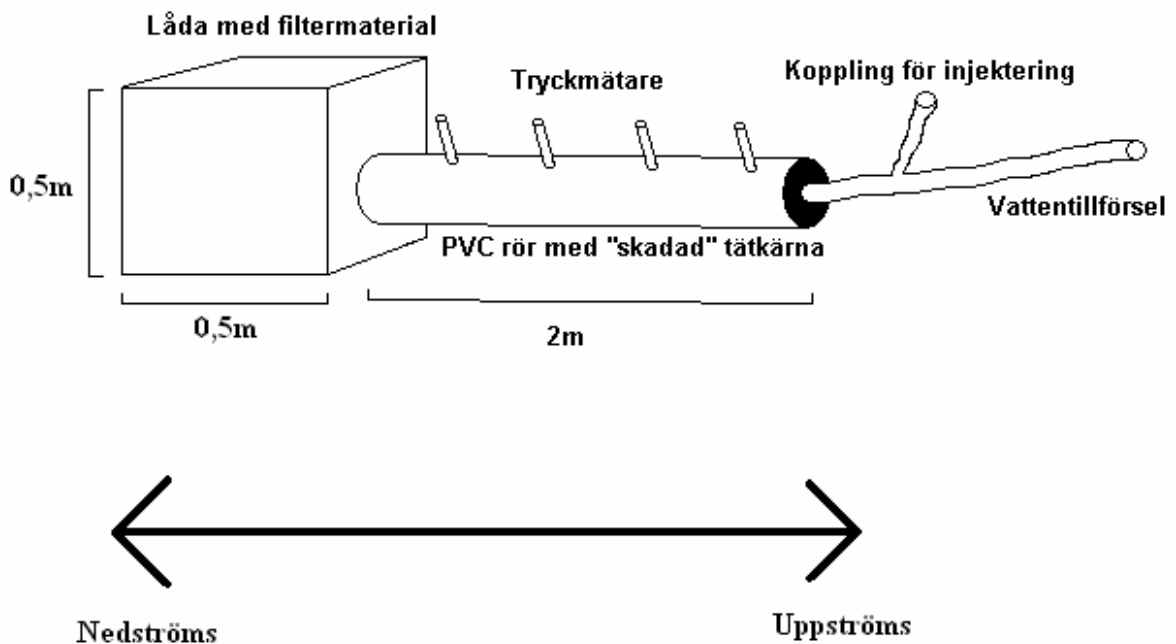
Vid ena rörändan kommer en box att placeras för att modellera ett poröst material som i verkligheten utgörs av filtret. Röret kommer att fogas samman med filterlådan och ställas under vattentryck (se figur 7-4). Ett material som är benäget att fånga upp finpartiklar kommer att injekteras på nedströmssidan i tät kärnan så att det bildar en plugg i gränsen mellan rör och filtertrappen. Denna plugg bör bestå av material med hög stabilitet dvs. ett material med hög rasvinkel och med en fraktionsstorlek av finsand. Därefter kommer material, liknande det som eroderats bort i verkliga fall, att injekteras tillsammans med det strömmande vattnet och därigenom hitta sin plats i läckan och täta denna. *Hypotesen vi arbetar efter är alltså att det läckande vattnet skall föra reparationsmaterialet på plats* och dessa försök kommer att ge svar på brukets sammansättning, vilken blandning fungerar bäst i avseende att stabilisera och täta skada. Utvärdering av metoden sker genom tryckmätningar över röret samt uppdelning i mindre sektioner för att kontrollera permeabilitet och uppnådd hållfasthet i olika skikt. Det injekterade bruket ska vara färgat och rören företrädesvis transparenta för bättre visuell övervakning.



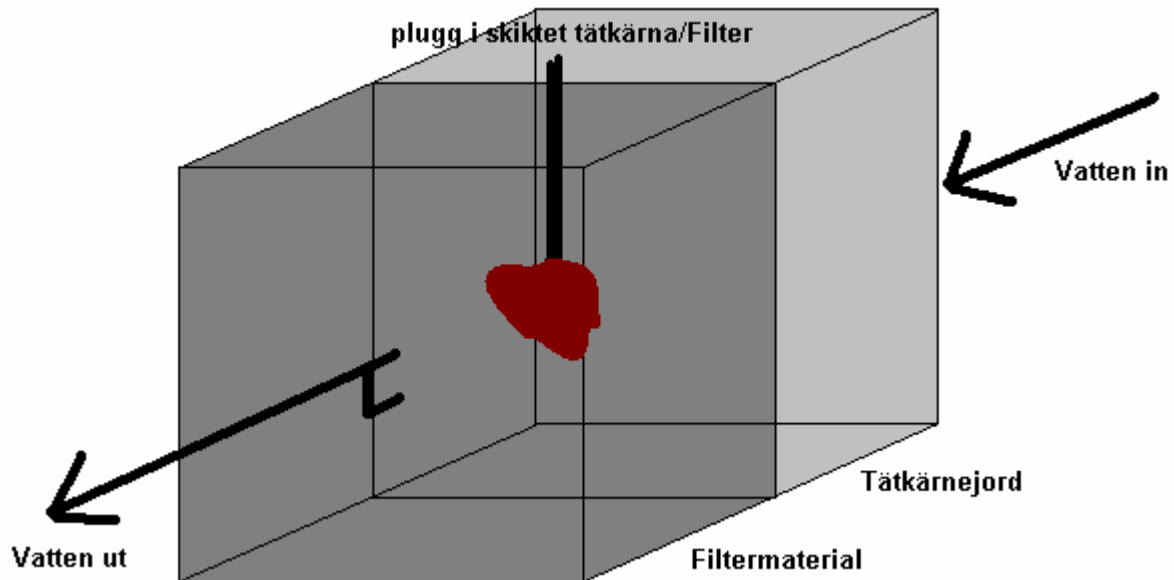
Figur 7-3. Preparation av simulerad tätkärna med hjälp av expanderbar slang samt PVC-rör.

Vad som söks med dessa rörförsök är följande:

- Bruketets sammansättning för reparation av pipe
- Inträngningsförmåga för injekteringsbruk avsett för jordinjektering
- Verifiering/falsifiering av beskriven metodik för injektering av tätkärna
- Resultat av utförd injektering (mekanisk hållfasthet/hydraulisk täthet)



Figur 7-4. Skiss över en tänkbar laborativ uppsättning. Jämför med figur 7-1



Figur 7-5. Liknande föregående modell men frihetsgraderna är fler. I stället för en rörmiljö är denna ersatt med ett större rum. Modellen efterliknar mer verkliga dammar än uppställningen för rörförsöken.

Dessa tänkta försök kommer i korta drag gå ut på en tvåstegsinjektering. Som ett första steg ska en ”plugg” (förslagsvis material med hög friktionsvinkel och med liknande fraktionsstorlek som filtret) byggas upp mellan tätkärna och nerströmsfiltret. I ett andra steg ska injekteringsbruk med liknande kornfördelning som det borteroderade materialet samt en viss tillsats av svällande lera injekteras uppströms. Hypotesen är därmed att det läckande vattnet ska transportera bruket ner mot pluggen där detta sedan kommer att successivt bygga upp skadan bakåt. Inblandning av lera utförs då dess svällande effekt bör ge en högre geoteknisk hållbarhet i och med sin svällande förmåga.

Figur 7-4 har få modellerbara parametrar med en avgränsad miljö. Effektiviteten av injekteringen kan på ett enkelt sätt läsas av via tryckgivare längs hela den tänkta skadan. Initialt kommer skada av typ piping att ske. Metoden kommer att vara enkel att repetera. Då godtagbara resultat uppnåtts (brukets blandning, pluggens egenskaper) kan man fortsätta experimenten enligt figur 7-5. Uppsättningen på figur 7-5 visar en betydligt större miljö där PVC-röret ersatts med en tätkärna. Liknande skador som föregående experiments ska tillfogas och effektiviteten av utförd injektering ska utvärderas med hjälp av bland annat utgrävning. Samtliga sidor av provkroppen ska vara vattentäta utom gavlarna, enligt figur 7-5, där vatten passerar in respektive ut.

Den experimentella idén utgår från att förbättra filtret och att hjälpa tätkärnan till självläkning.

## 8 Referenser

- B. D. Watts, P. C. Gaffran, R. A. Stewart, J. C. Sobkowicz och A. G. Küpper** (2000) *WAC Bennet Dam – Characterization of sinkhole NO. 1*. Montreal 2000: 53d annual conference of the Canadian geotechnical society. Special session.
- B.D. Watts, P.C. Gaffran, R.A Stewart, J.C Sobkowicz och A.G. Küpper**. Montreal 2000. 53:e Annual conference of the Canadian geotechnical society
- Caroline Göthlin** (2005) *Alternative reparation material based on limestone filler for grouting in embankment dams – Evaluation of mechanical- and early leaching problems*. Examensarbete 2005
- Conny Svensson**. (1996) *Conny Svenssons ingenjörsgelogiska exkursion*.
- Dawn Shuttle, Michael Jefferies och Members ASCE**. *Prediction and validation of compaction grout effectiveness*
- Daniel Eklund** (2005) *Introduktion till injektering av fyllningsdammar*
- Daniel Eklund** (2005) *Penetrability due to filtration tendency of cement based grouts*. Doktorsavhandling för jord- och bergmekanik, Stockholm 2005
- Darius Bonazzi** (1965) *Alluvium grouting proved effective on alpine dam*. Journal of the soil mechanics and foundations division. Proceedings of an American Society of Civil Engineers
- Guy St-Arnaud**. (1995) *The high pore pressures within embankment dams: an unsaturated soil approach*. Canadian Geotechnical journal Vol. 32, No. 5
- Hans Rönnkvist**. Presentation 12/9 – 2006 ICOLD workshop i Stockholm
- Helena Alexanderson** (2004). fil.dr. Institutionen för naturgeografi och kvartärgeologi Stockholms universitet. Skriftlig korrespondens
- <http://connywww.tg.lth.se/exkursionstartmenus.html#anchor380315> - Om jordarter
- <http://webmineral.com/> - Mineralogi
- <http://www.glossary.oilfield.slb.com/> - Om bentonit
- <http://www.haywardbarker.com> - Om injektering
- <http://www.heidelbergcement.com/se/sv/cementa/> - Cementa AB. Rapport på Ultrafin 16 (UF 16) augusti 2003
- [http://www.mooreandtaber.com/permeation\\_grouting.htm](http://www.mooreandtaber.com/permeation_grouting.htm) - Permeationsinjektering
- <http://www.portlandonline.com/CSO/index.cfm?a=dfdca&c=dajfg> - Tremie pipe
- <http://www.webelements.com/> - Periodiska systemet
- ICOLD 1994

**J A Charles, P Tedd, A K Hughes och H T Lovenbury.** *Investigating embankment dams, A guide to the identification and repair of defects*

**James L. Sherard, Richard J. Woodward och Stanley A. Clevenger** (1965) *Earth and earth-rock dams. Engineering problems of design and construction*

**James Warner, P.E.** (2004) *Practical handbook of grouting. Soil, rock and structures*

**James Warner, Michael Jefferies och Steve Garner.** *Compaction grouting for sinkhole repair at Bennet dam.* Geotechnical special publication No. 120. Grouting and ground treatment – Proceedings of the third international conference

**James Warner, Michael Jefferies och Steve Garner.** *Compaction grouting for sinkhole repair at WAC Bennet Dam.* Okänd publicering. Erhållen via personlig kontakt med Steve Garner.

**Joe G. Tam** (1996) *Grout expectations. Description of and applications for grouts used in the civil engineering field*

**Johan Lagerlund.** *Omfattande dammreparation vid Lilla Edet.* ELFORSK nyhetsblad februari 2007

**John N. Cernica.** (1995) *Soil Mechanics*

**John Sobkowicz och Steve Garner.** *Anomalous pore pressures in earth dams*

**Karl Terzaghi, Ralph B. Peck och Gholamreza Mesri** (1996) *Soil mechanics in engineering practice – Third edition.*

**Kjell Windelhed** (2001) *Jetinjektering. En intressant reparationsmetod för jorddammar*

**Kursmaterial vattenbyggnad.** KTH (2003)

**Olle Dahlin och Hans Fagerström** (1987) *Injektering av sättningsskada i Hällbydammen.* Seminarium om dammar 20-21 november 1986, KTH.

**Pär Hansson** (1995) *Injektering av jorddammar – Problemformulering och litteraturinventering*

**Pär Hansson.** (1999) Reserapport, Bennet dam, BC Hydro, Canada. Teknikbevakning av injekteringsarbeten.

**Pär Hansson** (2005) *Injektering av fyllningsdammar – Storskaliga modellförsök*

**RIDAS** (1994)

**RIDAS** (2004) Presentation av RIDAS av Åke Nilsson 2004-08-25 på NNCOLD:s Fagseminar 2004

**Robin Fell, Patrick Macgregor, David Stapleton och Graeme Bell** (2005) *Geotechnical engineering of dams*

**Sai Kakuturu och Lakshmi N. Reddi.** Journal of Geotechnical and environmental engineering ASCE juli 2006 sid 890-901. *Mechanistic models for self-healing of core cracks in earth dams*

**Sam Johansson, Maria Bartsch, Ola Landin, Gerhard Barmen, Torleif Dahlin och Peter Ulriksen** (1995) VASO dammkommittés rapport nr 21. *Utrednings- och utvecklingsprojekt med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer. Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar.*

**Sam Johansson** (1997) *Seepage monitoring in embankment dams.* Doktorsavhandling för jord- och bergmekanik, Stockholm 1997

**Sam Johansson och Mahmoud Farhadiroushan.** (1999) *Fiber-optic measurements at the Lövön dam.* ELFORSK rapport 99:36

**Sam Johansson, Mahmoud Farhadiroushan, T. Parker, och D. Watley** (2003) *Distributed strain measurements for embankment dams – Laboratory Tests, Installation, and Initial Monitoring Experiences,* ELFORSK rapport 03:19

**Sam Johansson, Johan Friberg och Torleif Dahlin.** (2005) *Seepage monitoring by resistivity and streaming potential measurements at Hällby embankment dam 1996 – 1999.* ELFORSK rapport 00:15

**Sam Johansson och Åke Nilsson** (2005) *Internal Erosion Detection at the Rösvatn Test Site – Experiences from blind tests using Resistivity, Self Potential, Temperature and Visual inspection.* ELFORSK rapport 05:42.

**Steve Garner** 2006-09-11. ICOLD Workshop i Stockholm

**Steve J. Garner, J. Warner, M.G Jefferies och N.A. Morrison.** *A Controlled approach to deep compaction grouting at WAC Bennet dam*

**Svante Widing** (1987) *Några allmänna synpunkter på damminjektering.* Seminarium om dammar 20-21 november 1986, KTH.

**Tomas Ekström och Roland Pusch** (2001) *Bentonit i fyllningsdammar*

**Vattenfall** (1988)

**W. Wolski, M. J. Lipinski, A. Fürstenberg och T. Baranski.** *Influence of internal erosion on safety of old dams.* International conference on geofilters, 3, Warsaw, 5-7 June 2000. Proceedings

**Y.J. Chen** (1982) *Grouting for sealing the cohesive fills of embankment dams.* 14:e ICOLD mote Rio de Janeiro 1982.

**Åke Nilsson** (1995) *Filter – Inventering och funktionsanalys.* VASO dammkommittés rapport nummer 13. Utrednings- och utvecklingsprojekt med anledning av flödeskommitténs riktlinjer

**Åke Nilsson, Ingvar Ekström och Carl-Olof Söder** (1999) *Inre erosion I svenska dammar.*

*Beskrivning och utvärdering av sjunkgropar*

**Örjan A Sjöström** (1999) *Reparation av jorrdammar genom injektering*







# 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)