



SVENSKT VATTENKRAFTCENTRUM

Reparationsinjektering av dammar och underground

Strategi för forskning och utveckling

Elforsk rapport 12:65



Fredrik Johansson, Tommy Edeskär

Oktober 2012

ELFORSK

Reparationsinjektering av dammar och undergrund

Strategi för forskning och utveckling

Elforsk rapport 12:65

Förord

Syftet med föreliggande förstudie har varit att ta fram en övergripande forskningsplan för reparationsinjektering av dammar inom det geotekniska och bergmekaniska området. Studien omfattar injektering av jordfyllningsdammarna och undergrund.

Rapporten är skriven av Dr. Tommy Edeskär, Luleå tekniska universitet (LTU) och Dr. Fredrik Johansson, Kungl. tekniska högskolan (KTH).

En referensgrupp har knutits till projektet med medverkan från Prof. Sven Knutsson, LTU, Adj. Prof. Peter Viklander, LTU/WSP, Adj. Prof. Roland Pusch, LTU, Prof. Håkan Stille, KTH, Dr. Almir Draganovic, KTH samt Tommy Elisson, Besab.

Arbetet har bedrivits inom "Svenskt VattenkraftCentrum – SVC". SVC har etablerats av Energimyndigheten, Elforsk och Svenska Kraftnät tillsammans med Luleå tekniska universitet, Kungliga tekniska högskolan, Chalmers tekniska högskola och Uppsala universitet.

Medverkande vattenkraftföretag är Alstom, Andritz Hydro, E.ON Vattenkraft Sverige, Fortum Generation, Holmen Energi, Jämtkraft, Karlstads Energi, Linde Energi, Mälarenergi, Skellefteå Kraft, Sollefteåforsens, Statkraft Sverige, Statoil Lubricants, Sweco Infrastructure, Sweco Energuide, SveMin, Umeå Energi, Vattenfall Research and Development, Vattenfall Vattenkraft, VG Power och WSP.

Svenskt Vattenkraftcentrum, SVC, är ett kompetenscentrum för utbildning och forskning inom vattenkraft och gruvdammarna. Nuvarande etapp pågår 2009-2012.

Ytterligare information finns på programmets hemsida www.svc.nu.

Stockholm, Oktober, 2012



Cristian Andersson
Program area Hydropower
Elforsk

Sammanfattning

Svenska dammar blir allt äldre och i huvudsak fokuserar industrin på att bibehålla dammarnas funktion och anpassa dem till förändrade förutsättningar och ökade säkerhetskrav. Det är i allmänhet mer komplicerat att reparera eller uppgradera befintliga anläggningar jämfört med att bygga nya. Bygga nytt är i allmänhet orealistiskt vilket innebär att det är angeläget att det finns tillförlitliga metoder tillgängliga för att reparera och uppgradera befintliga anläggningar.

Det finns en rad injekteringsmetoder som kan användas för reparation av dammar och undergrund och som prövats internationellt och i viss utsträckning även tidigare i Sverige. Följande metoder har identifierats: kompakthinjektering, permeationsinjektering, inträngningsinjektering och slitsmur. Av dessa metoder har permeationsinjektering identifierats som mest intressant för rehabilitering av medelstora svenska dammar. Inom detta område finns ett antal intressanta forsknings- och utvecklingsspår som är viktiga för branschen.

Permeationsinjektering innebär vanligen en användning av en kombination av injekteringsbruk, oftast två olika, för att åtgärda sprickor av olika storlek. Det finns en rad injekteringsbruk tillgängliga men för flera kan beständigheten ifrågasättas eller bör undvikas av miljöskäl. Det finns dock alternativ som bör undersökas närmare och som inte tidigare använts i Sverige, t.ex. silica sol i lösning som aktiveras med kalcium.

Vidare behöver en mer ingenjörsbaserad injekteringsmetodik utvecklas och skräddarsys för användning på dammar. Det gäller framförallt vid vilket tryck injekteringen ska utföras för att uppnå ett tillfredsställande injekteringsresultat utan att äventyra dammkonstruktionens säkerhet. Det krävs även bättre kontrollmetoder för brukets spridning under injektering, där forskning rekommenderas inom konceptet "real time grouting method". Injektering i strömmande förhållanden och under vattentryck bör också studeras närmare. Särskilt fokus bör läggas på att säkerställa under vilka förhållanden bruket är erosionsstabil samt att injekteringsskärmarna uppnår de egenskaper som förväntas.

Det finns idag bristande erfarenhetsåterföring i Sverige från genomförda reparationsinjekteringsprojekt. Historiska och kommande projekt bör därför dokumenteras inom SVC.

Summary

The Swedish hydropower dams are aging and the main focus within the hydropower industry is to preserve the functionality of the dams and to adapt to changing conditions and increased safety demands. In general it is more complicated to repair or upgrade a present dam compared to construct a new dam. To completely replace an old dam with a new is in general unrealistic and thus it is important to have access to available and reliable methods for repair and upgrade of existing dams.

Today, there is a range of grouting methods that are possible to use for repair purposes on existing dams and their foundations that has been tested internationally or in Sweden. The following methods have been identified for remedial work on dams: compaction grouting, permeation grouting, intrusion grouting and slurry trench. Of these methods, permeation grouting is identified as the most promising method for remedial purposes of a typical Swedish dam and there are several interesting research and development issues connected to this method of importance for the Swedish hydropower industry.

Permeation grouting is generally practiced by the use of a combination of grouts, individually adapted to cracks of different sizes. There are several grouts available on the market, but for several of these can the long term performance be doubtful from environmental concerns. There are some thoughts about alternative grout that are promising and that has not yet been tested in Sweden such as e.g. Silica Sol in solution activated by calcium ions.

There is a need to develop the grouting techniques and a more engineering based grouting process for dam projects. Especially the injection pressure needs to be further investigated in order to secure the performance of grouting action without endanger the safety or overall performance of the dam. Furthermore, a better control method of the grout spread is needed, where the "real time grouting control method" is recommended for further research. Grouting in flowing regimes and under water pressure are of special interest for the dam industry. Especially with respect to research regarding erosion stable grout mixes.

There is today a lack of exchange of experience from previous remedial grouting projects. Historical and future remedial grouting projects are recommended to be documented within the Swedish Hydropower Center (SVC) program.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Tillståndsbedömning	2
2.1	Allmänt	2
2.1.1	Lokalisering	2
2.1.2	Tillståndsbedömning kopplat till reparationsinjektering	3
3	Reparationsmetoder	4
3.1	Inledning	4
3.2	Jordinjektering.....	4
3.2.1	Uppspräckningsinjektering	4
3.2.2	Kompaktinjektering.....	4
3.2.3	Permeationsinjektering i jord	5
3.3	Inträngningsinjektering i sprickigt berg	6
3.4	Jetinjektering	7
3.5	Slitsmur.....	7
4	Problembeskrivning	9
5	Behov av forskning och utveckling	10
5.1	Inledning	10
5.2	Tillståndsbedömning	10
5.3	Krav på färdig konstruktion	10
5.3.1	Beständighet.....	10
5.3.2	Styvhet	11
5.3.3	Täthet	11
5.3.4	Miljö	11
5.4	Injekteringsmetodik och bruksegenskaper.....	11
6	Sammanfattning och rekommendationer	15
7	Referenser	17

1 Inledning

Majoriteten av svenska dammar inom vattenkraften byggdes under 1950-, 60-, och 70-talen. Under denna tidsperiod var kunskapen inom vissa områden mindre jämfört med dagens kunskap. Som ett resultat var bland annat filterkraven på de jorrdammar som byggdes under dammbyggnadsepoken inte lika hårda. Skador som inre erosion är därför förekommande på ett flertal svenska fyllningsdammar. En del av dammarna där skador förekommit tätades senare genom injektering med natriumsilikater (vattenglas), vilket på senare tid visat sig ha en tveksam beständighet. Utöver en pågående inre erosion i ett antal dammar finns därför sannolikt även ett antal tätade dammar där risk för nya läckage är uppenbar.

Den stigande åldern för dammarna innebär även att andra skador från olika typer av nedbrytningsmekanismer i en ökande utsträckning sannolikt kommer uppträda. Bland annat genomfördes en stor mängd ridåinjekteringar och andra typer av injekteringsarbeten i berggrunden under dammarna i samband med deras byggande. Med tiden sker en succesiv urlakning av dessa injekteringsridåer och därmed en ökad risk för läckage. Baserat på ovanstående faktorer är det därför rimligt att anta att behovet av reparationsinjektering kommer öka i framtiden.

Ett flertal metoder för reparationsinjektering existerar i dagsläget. Vilken metod som ska väljas beror i huvudsak på vad som ska injekteras samt vilken typ av skada som existerar. Reparationsinjektering är emellertid ett svårt problem och det finns ett antal begränsningar i dagens befintliga metoder. Det är exempelvis oklart hur injekteringstrycket ska beräknas för att förhindra uppspräckning och samtidigt maximera den tätande effekten från injekteringen. Det är även oklart hur erosion av bruket ska förhindras vid injektering i strömmande vatten samtidigt som en acceptabel beständighet och minimal miljöpåverkan uppnås. Ovanstående frågeställningar är exempel som visar på behovet av ökad kunskap och utveckling inom området.

Syftet med föreliggande förstudie är att ta fram en övergripande forskningsplan för reparationsinjektering av dammar inom det geotekniska och bergmekaniska området. Detta innebär att studien omfattar injektering av jordfyllningsdammar och undergrund. Injektering av betongkonstruktioner har inte beaktats. Studien börjar med en genomgång av befintliga metoder för tillståndsbedömning av fyllningsdammar och undergrund. Därefter följer en beskrivning av befintliga metoder för reparationsinjektering. Baserat på dessa kapitel följer en problembeskrivning, vilken följs av ett kapitel där behov av forskning och utveckling presenteras. Slutligen genomförs en sammanfattning av studien och en plan för fortsatt forskning presenteras.

2 Tillståndsbedömning

2.1 Allmänt

Dagens övervakningssystem är inriktade mot att övervaka den samlade funktionen för dammen. I allmänhet omfattar tillståndsövervakningen följande delar (Kjaernsli et al. 1992, Fell et al. 2005 mfl.):

Visuell inspektion för detektering av bl.a. sjunkhål och läckage. Processer som detekteras med visuell inspektion är i allmänhet långt gångna och kräver ofta åtgärd.

Läckagemätning sker i dammens dräneringssystem. I allmänhet samlas dräneringsvatten upp i samlingspunkter vilket försvårar lokalisering av en lokal ökning av ett flöde. Läckagevattnet kan analyseras m.p. på turbiditet som indikator på inre erosion eller kemiskt för att klassificera om det är grundvatten eller ytvatten som läcker.

Portryck/vattennivå/temperatur mäts i diskreta mätpunkter. Portrycksmätningar ger information om läckage och kombineras ofta med temperaturmätning. Portrycksmätning ingår som en del av övervakningen för dammarnas stabilitet.

Deformationsmätningar ger information om stabilitet och deformationsprocesser. Deformationsmätningar genomförs vanligen med plintar, peglar eller inklinometrar.

Idag kan man med god säkerhet fastställa totalt läckage. Ur ett åtgärds perspektiv är det emellertid viktigare att identifiera orsaken och avgränsa problemet.

2.1.1 Lokalisering

För lokalisering av en skada är upplösning i undersökningsmetoden viktig. I allmänhet räcker inte en metod för lokalisering utan en kombination av flera metoder är nödvändiga.

Flera geofysiska metoder kan användas för lokalisering av anomalier som kan tolkas som skador. Geofysiska metoder är i allmänhet bäst på att identifiera skillnader mellan mätserier. Tolkningen av geofysiska metoder är beroende av längre mätserier för att fånga upp naturliga variationer, tex betingade av årstid, och behöver i allmänhet kompletteras med flera geofysiska metoder och med sondering eller provtagning (Johansson 1997, Lum och Sheffer 2005). I **Tabell 1** redovisas en översikt över geofysiska metoder.

Tabell 1. Geofysiska metoder, dess primära utvärderingsresultat, tekniska mognad och lämplighet för lokalisering av läckage.

Metod	Primär utvärdering	Teknisk mognad	Lokaliseringspotential
Temperaturmätning	Flödesförändringar	Hög	Hög
Resistivitet	Flödesförändringar	Medel	Medel
Georadar	Porositet	Hög	Medel
Potentialmätning (SP)	Flödesförändring	Låg	Låg
Seismik	Styvhet/densitet	Hög	Låg

Temperaturmätningar är tillförlitliga ur mätjänseende men har kort rumslig upplösning. Det finns både passiva och aktiva givare och mätningen kan ske med optisk fiber, mätning med givare (vanligen i inspektions/mätbrunnar) och genom infraröd mätning på fri vattenyta. Användningen av optiska fibrer är begränsad i äldre dammar eftersom de kan vara svåra att efterinstallera (Fell et al. 2005).

Resistivitet kan genomföras i både fasta installationer och icke-stationära. För fyllningsdammarna med stödfyllningar är det problematiskt att praktiskt mäta på dammen med icke-stationära enheter. Lokaliseringspotentialen av skador bedöms som medelbra eftersom metoden mäter i snitt.

Potentialmätning har begränsat användningsområde eftersom metoden är känslig för störning av andra installationer och har kort räckvidd.

Seismik bedöms ha en låg potential för lokalisering av en skada. Dammkonstruktioner är allmänt svårtolkade och S-vågor som har hög upplösning dämpas fort. Borrhålsseismik är en metod för att rikta seismiska undersökningar mot särskilda problemområden. Nackdelen med borrhålsseismik är att metoden innebär ett ingrepp genom borrhning.

Geofysiska metoder behöver i allmänhet korreleras mot fysisk undersökning som tex borrhål och eller sondering. I kombination med installation av fast mätutrustning kan borrhålsdata erhållas för analys. Möjligheten för ostörd provtagning genom borrhning är dock begränsad men det går att tex mäta kompressionsmoduler med pressometer och mäta hydraulisk konduktivitet genom falling head tester.

2.1.2 Tillståndsbedömning kopplat till reparationsinjektering

De metoder som idag används för övervakning av dammar ger en grov problembild som underlag för projektering av en reparationsinjekteringsåtgärd. Den är inte detaljerad med avseende på rumslig eller tidsmässig upplösning för att styra en åtgärd under utförande.

3 Reparationsmetoder

3.1 Inledning

Ett antal metoder för reparationsinjektering av jordfyllningsdammar och undergrund finns framtagna. I följande kapitel beskrivs dessa kortfattat och metodernas begränsningar presenteras. De olika metoderna har indelats i fyra grupper; jordinjektering, inträngningsinjektering i sprickigt hårt berg, jetinjektering och slitsmur. Kapitlet är i huvudsak hämtat från Sjöström (1999), Ekström et al. (2001) samt Lagerlund (2007).

3.2 Jordinjektering

Injektering i fyllningsdammar utförs vanligtvis med jordinjekteringsteknik genom ventilrör eller tube-å-manschette. Beroende på vilket typ av skada som injekteringen avses laga ställs olika krav på bruket och utförandet. Ett flertal olika typer av jordinjektering existerar. I detta kapitel har följande metoder översiktligt beskrivits; uppspräckningsinjektering, kompakthinjektering samt permeationsinjektering. Nedan följer en beskrivning av de olika metoderna.

3.2.1 Uppspräckningsinjektering

Uppspräckningsinjektering går ut på att avsiktligt spräcka upp jorden. Injekteringsmedlet appliceras med högt tryck samtidigt som brukets sammansättning är sådan att permeation förhindras vilket resulterar i att jorden spricker upp (Hansson 1999). Den utförda injekteringen skapar ett nätverk av sammankopplade relativt starka tätskärmar vilken även skapar en förhöjd hållfasthet och viss kompaktering i jorden. Syftet med metoden kan vara att lyfta jord som satt sig, stabilisera jorden eller förlänga läckagevägarna och därigenom minska jordens permeabilitet. Utgrävningar efter provinjekteringar har emellertid visat att tätskärmar i regel inte är tillräckligt nära varandra för att kunna sänka permeabiliteten på ett effektivt sätt. Enligt författarnas vetenskap har metoden inte använts för reparation av fyllningsdammar i Sverige. Orsaken till detta är sannolikt oförmågan att styra sprickbildningen och därmed det önskade slutresultatet.

3.2.2 Kompakthinjektering

Kompakthinjektering innebär att man injekterar en trögflytande massa som radiellt expanderar och därmed kompakterar den omgivande jorden. Vid kompakthinjektering väljs en sammansättning på injekteringsmassan så att en väl definierad gränsyta skapas mellan massan och jordmaterialet. Metodens främsta fördel är att man inte ändrar jordens mekaniska egenskaper utan istället försöker återskapa ursprunglig funktion och förhållanden. Metodens främsta begränsningar är att den är svårare att användas på kohesionsjordar då jorden lättare spricker upp. Dessutom måste dränerade förhållanden

säkerställas under injekteringen för att inte minska effektivspänningen och därmed öka risken för uppsprickning av jorden.

Metoden användes exempelvis av BC Hydro för injektering av Bennet Dam i Kanada där två sjungropar upptäcktes 1996. Huvudskälet till att metoden valdes i detta fall var möjligheten att injektera på ett sådant sätt att tät kärnan i stort sett återställdes till sin ursprungliga funktion (Hansson 1999). Den löst lagrade jorden från sjungropen sträckte sig från dammkrönet ända ner till bergytan, en sträcka som för en av sjungroparna uppgick till 120 m. Vid kompaktinjekteringen användes ett injekteringsstryck på 7 MPa och injekteringsmassan utgjordes av en blandning av vatten, ärtsingel, sand och silt. Denna blandning skiljer sig något från de vanligaste blandningarna vid kompaktinjektering på så sätt att även cirka 12% cement brukar tillsättas.

3.2.3 Permeationsinjektering i jord

Permeationsinjektering innebär att befintliga kanaler och porer fylls med injekteringsmassa som sedan härdar. Metoden lämpar sig bäst i friktionsjordar med hög porositet. Som en tumregel bör injekteringsbrukets partiklar inte ha en större diameter än en femtedel av jordens porstorlek. Permeationsinjektering kan användas på jordar med permeabilitet ner mot 10^{-6} m/s (silt) och lämpar sig därför inte för leror. Vid mycket tät jord finns istället en risk för hydraulisk uppspräckning om injekteringsmassan inte lyckas penetrera porstrukturen i den täta jorden.

Om jorden injekteras med cement- eller sandcementbruk med låga vct finns en risk att inträngningen i jorden blir begränsad (Sjöström 1999). Istället finns en risk att det skapas en hålfyllnad som på sikt kan medföra en koncentrerad vattenströmning i gränsskiktet mellan jorden och den fastare kroppen. Exempel på injektering med cement eller sandcementbruk är reparationen av Rätans kraftverk 1968 där 79 m^3 sandcementbruk injekterades under självtryck med vct 0,8 samt reparation av fyllningsdammen i Porjus där en skada reparerades med ett cementbruk bestående av Ultrafin cement med vct 0,8 (Sjöström 1999). Vidare skriver Sjöström att för vanlig Degerhamns injekteringscement krävs en kornstorlek på d_{95} cirka 0,3 mm för att penetrationsinjektering ska kunna ske, vilket innebär kornstorleken mellansand och grövre material.

För att uppnå ett bruk med hög viskositet som samtidigt inte separerar har bentonit ibland blandats i bruket. Med tillsättning av bentonit förbättras sammanhållningen mellan kornen och förhindrar därmed separering under tillverkning och injektering. Samtidigt blir bruket mer tixotropt vilket är positivt för att förhindra erosion av bruket medan det härdar. Bentoniten gör emellertid bruket mer trögflytande och försämrar inträngningsförmågan hos bruket. Enligt Jansson (1986) penetrerar inte cement-bentonitbruk jordlager med permeabilitet som är lägre än $5 \cdot 10^{-4}$ m/s. För att förbättra inträngningen i cement-bentonitbruk brukar därför flytmedel tillsättas. När bentonit tillsätts reduceras inverkan från cementen vilket ger ett slutresultat med lägre tryckhållfasthet och ett mer plastiskt beteende. Detta är särskilt positivt i fyllningsdammar då ett material som bättre efterliknar jordmaterialet uppnås.

Försök med en suspension bestående av finmald kalksten har också utförts, se exempelvis (Hansson 1999) och Götlin (2005). Försöken visade att med tillsats av flytmedel sedimenterade den injekterade suspensionen till ett material med hög packningsgrad och tixotropa egenskaper. Samtidigt erhöles ett medel som man kan räkna med har bättre inträngningsförmåga än bentonit (Hansson 1999). Ett antal frågetecken avseende bland annat beständigheten kvarstår emellertid för denna typ av bruk.

Då en bättre inträngningsförmåga krävs eller där erosion av bruket kan vara ett problem användes tidigare injekteringsbruk baserat på silikater även benämnt vattenglas i form av kolloidal lösning. Genom tillsatts av accelerator fås ett bruk där härdtiden kan styras. Med kortare härdtider begränsas inträngningslängden. Bruket har en hög densitet och påstås kunna tränga in i jordar med permeabiliteter högre än $3 \cdot 10^{-6}$ m/s (Jansson 1986).

Den största begränsningen för silikatbruken är dess beständighet då de inte är stabila i tidsperspektiv länge än en månad (Hansson 1999). Beroende på vilken acceleratortillsats som används kan det även uppstå osäkra miljökonsekvenser (Hansson 2005). Dessutom genomgår vattenglas en negativ volymändring under härdningsprocessen då vatten avgår vilket minskar brukets totalvolym. Vid mycket höga vattenflöden där erosion av bruket är ett stort problem kan olika typer av polyuretaner användas. Genom tillsats av accelerators kan mycket snabb härdning uppnås. Deras främsta nackdelar är osäkra miljökonsekvenser samt att viss osäkerhet avseende beständigheten föreligger.

Injekteringsbruk i löst form härdar eller bildar en tätande gel vid tillsats av aktivator (Bruce et al. 1997). Exempel på kemiska baser av bruk i löst form är akryler, fenoler, aminoplaster, polyuretan och silica sol. Av dessa kemiska baser är det främst silica sol som är av intresse för rehabilitering av dammar. Silica sol består av kisel i lösning som vid aktivering av kalciumjoner bildar en kristallstruktur av kalcium hydrosilikater. Denna typ av tätningsmedel anses ha en högre beständighet än kolloidala silikatbaserade injekteringsbruk som aktiveras av natrium (Bruce et al 1997).

Exempel på dammar som har injekterats med cement-bentonit blandning och/eller silikater är Bastusels kraftverk 1973-1975, Hällby kraftverk 1986, Näs 1989, Porjus 1993, Rengårds kraftverk, Ringdalsdammen 1999, Rätans kraftverk 1994 samt Sourva östra damm 1983-1984 och 1987 (Ekström & Pusch 2001). Exempel på dammar som injekterats med silica sol är Teesta i Indien.

3.3 Inträngningsinjektering i sprickigt berg

Principen och problemställningarna vid injektering i hårt sprickigt berg är samma som vid jordinjektering, d.v.s. att uppnå en bra inträngning samtidigt som risken för upplyft kan kontrolleras. Även en bra täthet och beständighet eftersträvas och konsekvenserna på miljön ska vara försumbara.

Vid injekteringen pumpas bruket under tryck in i sprickorna i syfte att täta bergmassan. I samband med byggandet av nya dammar är det vanligt att injekteringsridåer injekteras under dammen i syfte att förlänga läckagevägen och minska portrycket i berggrunden. Under jordfyllningsdammarna är det även

viktigt att förhindra att materialtransport (inre erosion) från exempelvis tätkärnan inträffar vilket leder till inre erosion om det inte åtgärdas.

En stor skillnad mot injektering vid byggandet av nya dammar och reparationsinjektering eller efterinjektering i befintliga dammar är närvaron av strömmande vatten och vattentryck. Närvaron av det strömmande vattnet innebär stora problem med bland annat erosion av bruket. Vid stora vattenflöden är det vanligt att injektering med polyuretaner med kort härdtid används för att stoppa vattenflödet. Det befintliga vattentrycket i dammen måste övervinnas vid injekteringen vilket ökar risken för tex. uppräckning.

3.4 Jetinjektering

Vid jetinjektering spolas jordens finmaterial bort med luft eller vatten under högt tryck samtidigt som en blandning av cement eller cement-bentonit tillsätts. Injekteringsbruket bildar tillsammans med jordens grövre korn en ny struktur. Luften eller vattnet spolas ut från roterande munstycken och skapar på så vis en cirkulär struktur. Pelarens bredd kan styras genom justering av trycket och rotations- samt lyfthastigheten. Metoden lämpar sig bäst i relativt grovkorniga kohesionslösa material. Slutresultatet blir en pelare med hög hållfasthet och låg permeabilitet (10^{-7} till 10^{-9} m/s). Metoden har beskrivits utförligt av Windelhed (2001). Vid injekteringen är det viktigt att säkerställa att det urspolade finmaterialet kan avgå för att förhindra hydraulisk uppsprickning.

Jetinjektering har med framgång använts i undergrunden på ett flertal dammar grundlagda på jordmaterial i syfte att skapa en tätskärm under dammen samt öka jordens skjuvhållfasthet, se exempelvis i Charles et al. (1996). Metoden har enligt författarens vetskap inte använts på någon svensk damm.

3.5 Slitsmur

En slitsmur kan göras både vattentät och bärande och kan ersätta temporära eller permanenta sponter eller murar. Enligt Ekström & Pusch (2001) ska stödvätskan (slurryn) uppfylla följande funktionskrav "(i) ge erforderligt sidotryck mot schaktväggarna, (ii) förbli i slitsen utan att läcka ut i omgivande jord, (iii) kunna hålla finkorniga material (t.ex. sand eller cement) i suspension, (iv) vara lättpumpad och (v) vara rensningsbar. Om dessutom betong gjuts i slurryn, måste stödvätskan kunna undanträngas av betongen."

Slitsmuren kan utföras med enstegsmetoden eller tvåstegsmetoden. Vid enstegsmetoden grävs en slits eller dike som fylls med en stödjande cement-bentonitslurry som även används som slutlig tätmassa. Vid tvåstegsmetoden fylls först det utgrävda diket eller slitsen med en stödjande bentonitslurry, därefter fylls slitsen nerifrån och upp med en cement-bentonit blandning genom en s.k. "tremie pipe". Inbladningen av bentonit genomförs i syfte att erhålla en tätvägg med plastiska egenskaper, d.v.s. med möjlighet att uppta deformationer.

Metoden lämpar sig väl för reparation av tätkärnan i en fyllnadsdamm och kan tillämpas över stora områden i dammen. Slitsmuren lagar emellertid inte skadan utan förhindrar endast skadans effekt. Då slurryn har ett högt

vatteninnehåll kan även krympsprickor uppstå vid uttorkning om slurryn inte täcks över.

Metoden med slitsmur är vanligt förekommande internationellt vid reparation av fyllningsdammar och har genomförts på djup ända ner mot 100 m. I Sverige har den bland annat använts vid Juktans och Lövöns kraftverk (Ekström & Pusch 2001). Slitsmuren vid Lövöns kraftverk var cirka 60 m lång och ett 1 m brett och cirka 7 till 10 m djupt dike schaktats ner till bergytan. Samtidigt med schaktningen fylldes diket med en cement-bentonitslurry. Främsta anledningen till att metoden valdes var enligt Ekström och Pusch (2001) att "(i) slurryn stelnar till en plastisk och tät kropp som påminner om den omgivande materialet (ii) det tränger inte undan eller spränger upp befintlig tätkärna så att den skadas.

4 Problembeskrivning

Flera av de fyllningsdammar som byggdes under 60- och 70-talen har problem med inre erosion med efterföljande läckage som följd. Orsaken till detta är bland annat att kraven på filterkriterierna var lägre då dessa dammar byggdes. För att reducera läckaget har reparationsinjektering utförts på ett antal dammar i Sverige. Flera av dessa reparationsarbeten utfördes med silikater (vattenglas) med dålig beständighet. Det finns därför en risk att läckaget i framtiden kan öka vid dessa dammar. I samband med att dammarna byggdes utfördes även stora mängder injekteringsarbeten i berggrunden under dammarna. Med tiden sker emellertid en succesiv urlakning av injekteringsbruket vilket innebär att risken för läckage ökar. Sammanfattningsvis innebär detta att det kommer finnas ett behov av att kunna utföra reparationsinjektering av våra dammar i framtiden.

För en lyckad reparationsinjektering är tre saker nödvändiga; (i) skadan måste kunna karaktäriseras och dammens tillstånd beskrivas, (ii) en kravställning för reparationsinjekteringen ska finnas och (iii) lämplig metodik ska väljas och utformas.

Att karaktärisera en skada i dammen eller i injekteringsridån i undergrunden är i de flesta fall svårt då skadan generellt är dold och dess exakta läge och utformning är diffus. En mängd olika undersökningsmetoder finns att tillgå och genom en kombination av olika metoder är det möjligt att skapa en bild av skadan. Denna bild är emellertid osäker och kan i flera fall tydas på olika sätt.

För att lyckas med en reparationsinjektering är det nödvändigt att uppfylla ställda krav på täthet, styvhet, beständighet och miljö. Det ideala injekteringsbruket för en fyllnadsdamm ska exempelvis ha goda inträngningsegenskaper, låg styvhet, god åldersbeständighet och en god tätande effekt (Götlin 2005). Såsom beskrivits av Götlin innebär emellertid en god inträngningsförmåga generellt att åldersbeständigheten reduceras då ett mer visköst material snabbare urlakas på joner. Det ena kravet uppnås på bekostnad av det andra. Sammansättningen på bruket för varje injekteringssituation blir därför ofta en kompromiss.

Val av utformning för lämplig injekteringsmetodik beror på faktorer som läge på skadan i dammen eller undergrunden, vattenflödet, vattentrycket och överlagringstrycket. Vidare är det även viktigt att utforma en metodik vid injekteringen som tätar skadan samtidigt som inga nya skador uppstår. Att exempelvis kunna beräkna hur inträngningslängden varierar med injekteringstiden är en förutsättning för att kunna bestämma maximalt tillåtet injekteringstryck vid olika tidpunkter.

Sammanfattningsvis finns ett antal generella problemställningar som fortfarande är helt eller delvis olösta inom området för reparationsinjektering, vilket visar på ett behov av forskning och utveckling inom området.

5 Behov av forskning och utveckling

5.1 Inledning

I föregående kapitel konstaterades att tre saker är nödvändiga för en lyckad reparationsinjektering; karaktärisering av skadan, kravställning samt utformning av lämplig metodik. Inom samtliga av dessa områden finns olika frågeställningar med ett mer eller mindre uttalat behov av forskning och utveckling, vilka presenteras i följande kapitel.

5.2 Tillståndsbedömning

Ur ett reparationsperspektiv är identifiering av problemet och rumslig avgränsning nödvändig. Geofysiska metoder ger en möjlighet att detektera och avgränsa problem men för tillförlitliga resultat krävs längre mätserier för att ta hänsyn till naturliga variationer och för att nå en högre detaljeringsgrad. Geofysiska metoder måste kalibreras mot fysisk provtagning eller sondering. Det kan delvis åstadkommas vid installation av optiska fibrer eller mätbrunnar. Det forskningsbehov som finns inom området kopplat till åtgärder är att kunna fastställa vilken process som orsakar det oönskade läckaget (fracturing, inre erosion etc) och vilka egenskaper den skadade zonen har som tex hydraulisk konduktivitet och gradering för val och kontroll av åtgärdsmetod. En modellering av förhållanden innan och efter åtgärd baserat på mätningar bör också studeras som en del av kontroll och uppföljning av åtgärder.

5.3 Krav på färdig konstruktion

5.3.1 Beständighet

Med beständighet avses här primärt effekten av själva åtgärden. För att åtgärden ska vara beständig krävs att sprickor och oönskad hög porvolym reduceras i tillräcklig grad vid injekteringen. För att få önskad inträngning får injekteringsmedlet inte ha för låg viskositet och inte för stor kornstorlek. Dessa egenskaper ska vägas mot risken för att injekteringsmedlet inte är erosionsstabil eller är för lättflytande för att fylla hålrummen. Bentonit, som i många sammanhang används som hydraulisk barriär är eroderbar om $K > 10^{-6}$ m/s (Ekström och Pusch 2001). För tillsatsmedel måste den långsiktiga kemiska stabiliteten beaktas. För injekteringsbuk i allmänhet förefaller beständigheten i ett par hundra år vara realistiskt (Weaver 2000). Härdande injekteringsbruk krymper i allmänhet vid injektering. Risken för krympning ökar i områden som inte står i permanent kontakt med vatten. En krympning ökar risken för initiering av en ny erosionsprocess (Lagerlund 2009). Weaver (2007) pekar på problematik med frusna zoner i kallt klimat vid injektering.

5.3.2 Styvhet

Styvheten i injekteringen i packade material bör inte avvika för mycket från omgivande material. Stora skillnader i styvhet ökar risken för sprickor i dammkärnan vid deformationer (Weaver 2007). Hur stora skillnader i styvhet som är acceptabla vet vi inte idag. Troligen är det platsspecifikt. Vilken styvhet som uppnås vid injektering av icke-härdande bruk är heller inte känt idag. Kompaktionsinjektering och injektering med kiselbaserade injekteringsmedel har liknande mekaniska egenskaper som typiska moränbaserade tätkärnor.

5.3.3 Täthet

Den uppnådda tätheten vid reparationsinjektering bör efterlikna det omgivande materialet om det kan anses som tätt. Om injekterat material blir tätare än omgivande material ökar risken för initiering av nya erosionsprocesser i åtgärdens gränsskikt eller naturliga svaghetszoner. Denna fråga bör belysas vid val av injekteringsbruk.

En kombination av injekteringsmetoder/bruk kan kombineras för att täta konstruktioner. Det finns emellertid injekteringsbruk som kan vara olämpliga att kombinera. Det är t.ex. visat att NaCl som aktivator för kisellösningar kan påverka bentonittätning negativt (Holmboe et al. 2011 m.fl.).

5.3.4 Miljö

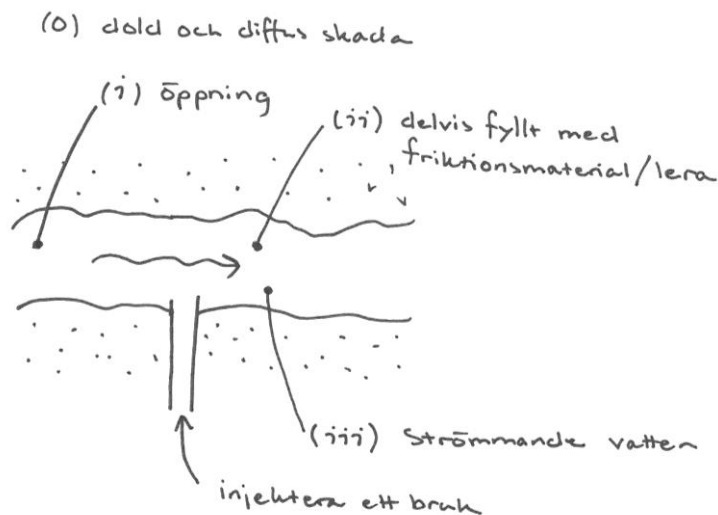
Injekteringsbruk kan bestå av en rad kemiska komponenter, t.ex. härdningsmedel som cement, konditionerare för att justera viskositet mm. (Weaver 2007). Det finns även injekteringsbruk av flerkomponent typ, dvs att det är de injekterade kemikalierna som reagerar och bildar en tät kemisk förening i injekteringshålet. Ur miljöhänseende måste alla ingående kemikalier i injekteringsarbetet, den slurry som injekteras och slutprodukten miljöbedömmas var för sig innan en åtgärd kan anses vara miljömässigt acceptabel. Traditionella injekteringsmedel, ofta cementbaserade, resulterar i starkt alkaliska miljöer. Kolloida silikater och silikater i lösning innebär tillsats av natrium respektive kalciumbaserade salter i en alkalisk miljö. Organiskt baserade injekteringsmedel bedöms vara historiskt belastade i Sverige efter tunnelarbetena i Hallandsås och utgör därmed inte ett förstahandsval för vidare studier.

I en miljöbedömning bör även risken för utsläpp av ev. oljor och fetter från maskinutrustningen värderas. Hydraulisk konduktivitet i bentonit påverkas starkt av oljor och ett ofrivilligt utsläpp i injekteringshålet kan försämra åtgärdens prestanda.

5.4 Injekteringsmetodik och bruksegenskaper

Även om materialet i en jordfyllnadsdamm är väsentligt annorlunda mot bergmassan som dammen i de flesta fall är grundlagd på är problemen vid reparationsinjektering i båda dessa material till sin natur likartade. Vi har en dold och diffus skada. Denna skada har en öppning som är delvis fylld med friktionsmaterial och/eller lera. I öppningen strömmar vatten med en viss

hastighet och tryck. I denna öppning ska ett bruk injekteras som ska täta skadan samtidigt som ett antal krav ska uppnås. Principen illustreras i **Figur 6.1**.



Figur 6.1 Principfigur för problemställning vid reparationsinjektering.

Problemställningen illustrerad i Figur 6.1 kan indelas i två huvudområden (i) utformning av injekteringsmetodik och (ii) optimering av brukets egenskaper.

Injekteringsmetodik

Som tidigare beskrivits i kapitel 4 finns ett antal metoder för reparationsinjektering. Några av dessa bygger på relativt väl utvecklade koncept där behovet av forskning och utveckling i viss mån är begränsad. Till dessa räknas enligt författarna reparation med jetinjektering och slitsmur. Inom dessa områden finns ett behov av att sammanställa befintlig kunskap för att underlätta val av metod, medan behov av forskning i viss mån är begränsad. En metod som uppspräckningsinjektering kommer sannolikt inte bli aktuell att använda sig av vid reparationsinjektering i svenska dammar. Detta innebär att behovet av forskning och utveckling främst berör permeations- och inträngningsinjektering i jord och berg samt även kompakthinjektering. Frågeställningarna vid kompakthinjektering är emellertid i flera avseenden likartad de som existerar vid permeations- och inträngningsinjektering.

Vid en injektering är det inträngningsförmågan och spridningen i jorden eller bergsprickorna som kommer vara de bestämmande faktorerna för injekterings slutliga resultat. Dagens stoppkriterier och injekteringsmetodik vid reparationsinjektering av dammar är i huvudsak erfarenhetsbaserade. Under det sista årtiondet har en väsentlig ökning av kunskapen på detta område utvecklats. Speciellt inom injektering i sprickigt hårt berg, vilket har möjliggjort en mer ingenjörsbaserad injekteringsprocess, främst baserat på den ökade förståelse som möjliggjorts genom Hässler et al (1988), Gustafson och Stille (1996) samt Eriksson et al. (2000).

Analytiska betraktelser kan genomföras i syfte att uppskatta inträngningslängden vid injekteringen. Dessa betraktelser bygger emellertid på att geometrin där bruket flödar är känd, vilket sällan är fallet. För att lösa detta har en aktiv kontrollmetod utvecklats. Metoden kallas för "real time grouting control method" och innebär att tryck och flöde vid injekteringen avläses online när injektering pågår. Genom att tolka dessa data kan dimensionaliteten för varje enskild injektering beräknas, d.v.s. om flödet exempelvis är en- eller tvådimensionellt. Därmed kan även inträngningen beräknas successivt och tillåtna injekteringsstryck kan beräknas. Metoden finns beskriven i Stille et al. (2012). Merparten av det teoretiska ramverket för metoden finns utarbetad för injektering i berg. Ett behov av applicering av metoden i ett antal praktiska fall är dock nödvändig för att verifiera metoden. Metoden har tagits fram för injektering i berg, genom vissa modifieringar borde det emellertid vara möjligt att även utarbeta en metodik för injektering i jordmaterial där detta används.

I det internationella Stripaprojektet 1980-1992 utvecklades för SKBs räkning en metod benämnd "dynamic injection" som innebär användning av oscillerande pumpning med kortvariga tryckpulser på upp till 4 MPa (Pusch, et al, 1985), överlagrande ett konstant tryck motsvarande upp till 50 % över rådande bergvattentryck. Både cement- och lerbaserade (bentonit) grouter användes med gott resultat.

Sedan 2011 pågår på Geoteknikdivisionen, LTU, utveckling av cementbaserade grouter med oorganiska flytmedel och duktil karaktär. Härdningen är långsam men hållfastheten blir god och därmed motståndet mot piping och erosion.

Brukets egenskaper

Det optimala bruket för permeationsinjektering eller inträngningsinjektering existerar inte i dagsläget. Som tidigare beskrivits ska exempelvis ett optimalt bruk för en fyllnadsdamm ha goda inträngningsegenskaper, låg styvhet, god åldersbeständighet och en god tätande effekt.

Ett relativt väl fungerande koncept föreföll det som exempelvis användes vid Hällby att vara. Injektering av grövre öppna strukturer skedde där med ett cement-bentonitbruk medan anslutande delar med lägre permeabilitet injekterades med vattenglas. Problemet med detta förfarande var dock beständigheten hos vattenglas. I princip saknas i dagsläget ett bruk med goda inträngningsegenskaper i relativt täta jordar som samtidigt bibehåller vissa egenskaper från cement-bentonit blandningen. Vid avdelningen för jord och bergmekanik vid KTH pågår för närvarande ett projekt för att utarbeta ett cementbruk med optimal kornfördelning för inträngning vid injektering. Provning av detta bruk med avseende på permeation i jordar bör utföras efter att utvecklingen är klar. Med hänsyn till de små porer som existerar i exempelvis moränen i en tätkärna är det emellertid tveksamt om injektering med suspensioner är en framkomlig väg. Kanske bör olika former av polyuretaner provas i laboriemiljö för att se om dessa kan uppfylla ställda krav. Injektering med injekteringsbruk i lösning (tex silica sol) bör studeras närmare. En central fråga för denna typ av injekteringsbruk är aktiveringen för bildande av kristallstruktur under strömmande förhållanden.

Ett annat område i behov av utveckling och forskning är erosion av injekteringsbruket. Vid en reparationsinjektering förekommer oftast strömmande vatten med olika hastigheter under olika tryck. Erosion av bruket innan det härdar är därför ett stort problem. Problemet har bland annat studerats av Axelsson (2009) vid injektering i berg. I dagsläget är metoderna för hur erosion av bruket ska förhindras främst erfarenhetsbaserade, d.v.s. man prövar sig fram vid varje injekteringssituation tills man hittar en lösning som fungerar. Även här är en mer ingenjörsbaserad metodik önskvärd. Försök på konstgjorda sprickor för exempelvis cementbruk bör utföras och jämföras mot analytiska lösningar för att utarbeta fungerande konceptuella modeller som möjliggör detta.

6 Sammanfattning och rekommendationer

Det finns idag ett antal injekteringsmetoder för att åtgärda läckage i dammar. Kompaktinjektering är en metod som är lämplig för åtgärder på stora fyllningsdammarna. I Sverige finns ett fåtal dammar av nödvändig storlek för denna metod. Slitsmur och jetinjektering kan anses som etablerade metoder där forskningsbehovet bedöms som lågt ur ett branschperspektiv.

För svenska medelstora dammar bedöms den lämpligaste injekteringsstrategin vara en kombination av cement/bentonit slurry i kombination med efterinjektering för tätning av små sprickor. Denna metod användes under 1980-talet i Sverige men beständigheten i efterinjekteringen med vattenglas som injekteringsbruk har ifrågasatts. Här finns ett antal intressanta forskningsfrågor som identifierats som viktiga för svensk vattenkraftindustri.

Användning av icke-härdande bruk, främst silica sol, har ökat inom framförallt tätning av tunnlar. Erfarenheter från projekt så som Hallandsås bör kunna användas även inom dammområdet. Det finns två typer av silica sol baserade injekteringsmedel, kollodiant som aktiveras med natrium och löst som aktiveras med kalcium. I Sverige har vi inom SKB och Hallandsås-projektet studerat den kollodiala silica sol-typen. Beständigheten för denna typ av silica sol kan utifrån referenserna ifrågasättas ur ett dammperspektiv. Det finns referenser som pekar på att den kalciumaktiverade silica sol-typen har en bättre beständighet och mer lämplig för användning för tätning av dammar. Ingen erfarenhet av detta medel inom Sverige har hittats.

Vid injektering används trycket på injekteringsbruket för att styra arbetet. Trycket ska vara högt nog för att sprida bruket i håligheter och samtidigt lågt nog för att förhindra uppspräckning av dammkroppen eller berget. Närvaron av höga vattentryck ökar risken för uppspräckning. En mer ingenjörsbaserad injekteringsmetodik behöver utvecklas och skräddarsys för användning på dammar. Vidare krävs bättre kontrollmetoder för brukets spridning under injektering, där tillämpad forskning rekommenderas inom konceptet "real time grouting method" som en aktiv kontrollmetod inom detta område.

Om vattnet strömmar i området för reparationsinjekteringen kan det påverka resultatet negativt genom utspädning av injekteringsbruket, erosion av injekteringsbruket eller genom att bruket inte aktiveras. Ingenjörsbaserade kriterier för strömningshastigheter och kontroll behöver därför utarbetas.

Sammanfattningsvis rekommenderas att följande områden prioriteras vid framtida forskning inom området i form av senior- eller doktorandprojekt.

- Sammanställning av tidigare erfarenheter från utförda reparationsinjekteringar i fyllnadsdammar och undergrund.
- Utveckling och provning av injekteringsmedel för permeationsinjektering för fyllnadsdammar. Medlet bör eftersträva goda inträngningsegenskaper, låg styvhet, god åldersbeständighet och en god tätande effekt. Möjligt framtida injekteringsmedel som bör undersökas närmare är exempelvis kalciumaktiverad silica-sol.
- Utveckling av injekteringsmetodik, stoppkriterier och kontrollmetoder för reparationsinjektering av fyllnadsdammar och undergrund. Lämpligen genom anpassning av RTGC-metoden till vattenkraftsbranschen.
- Utveckling av ingenjörsbaserade kriterier och kontrollmetoder för erosion av injekteringsmedel.

Dessa projekt bör försöka medfinansieras utanför SVC. Dessutom bör det finnas en beredskap att initiera mindre projekt, t.ex. i form av exjobb för att dokumentera eller utreda mindre frågor om reparationsinjektering blir aktuellt på en svensk damm. Syftet med denna typ av projekt är främst erfarenhetsåterföring.

7 Referenser

- Axelsson M. (2009) Prevention of erosion of fresh grout in hard rock. Doctoral Thesis, Division of GEO Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Bruce, D.A., Smoak, W.G., Gause, C.C (1997) Seepage control: A review of grouts for existing dams. Proc. Of the Association of State Dam Safety Officials, 14th annual conference, Pittsburg, PA September 7-10.
- Börjesson, L., Pusch, R., Fredriksson, A. Hökmark, H., Karnland, O., Sandén, T., (1992). Final Report of the Rock Sealing Project - Sealing of zones disturbed by blasting and stress release. Stripa Project Technical Report TR 92-21, Swedish Nuclear Fuel and Waste Handling Company (SKB).
- Charles J.A., Tedd P., Hughes A.K., Lovenbury H.T. (1996) Investigating embankment dams – A guide to the identification and repair of defects. Building Research Establishment Report. ISBN 1 86081 069 1
- Ekström T., Pusch R. (2001) Bentonit i fyllningsdammar – Allmän beskrivning av bentonit, tidigare användning av bentonit i Sverige samt några synpunkter på blandningar av bentonit och jordar. Elforsk rapport 01:15, Stockholm.
- Eriksson M., Stille H., Andersson J. (2000) Numerical calculation for predication of grout spread with account for filtration and varying aperture. Tunneling and Underground Space Technology 15(4):353-364.
- Fell, R., Stapledon, D., MacGregor, P., Bell, G. (2005) Geotechnical Engineering of Dams, Taylor & Francis, ISBN 98-0-415-88932-2
- Gustafson G., Stille H. (1996) Prediction of groutability from grout properties and hydrogeological data. Tunneling and Underground Space Technology 11(3):325-332.
- Götlin C. (2005) Fillerbruk för reparationsinjektering av fyllningsdammar. Utvärdering av mekaniska egenskaper samt den tidiga urlakningsbeständigheten. Elforsk rapport 05:34. Stockholm.
- Hansson P. (1999) Reserapport, Bennett Dam, BC Hydro, Canada – Teknikbevakning av injekteringsarbeten. Elforsk rapport 99:37. Stockholm.
- Hansson P. (2005) Injektering av fyllningsdammar – Storskaliga modellförsök.
- Holmboe, M., Wold., Pettersson, T. (2011) Effects of the injection grout Silica sol on bentonite. Physics and Chemistry of the Earth, Vol 3, pp. 1580-1589.
- Hässler L., Stille H., Håkansson U. (1988) Simulation of grouting in jointed rock. In: Proceedings of the 6th international congress on rock mechanics, Montreal, vol 2, pp 943-946.
- Jansson B. (1986) Tätning av höger och vänster jorddamm vid Hällby kraftverk i Ångermanälven sept. 1985 – juni 1986, Stabilatorrapport.

- Johansson, S. (1997) Seepage monitoring in embankment dam. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Kjaernsli, B. Valstad, T. och Höeg, k. (1992). Rockfill dams. Hydropower Development 10, NGI, Trondheim.
- Lagerlund, J. (2007) Reparationsmetoder för damkropp i relation till inre erosion – Kriterier för val av injekteringsmetod och injekteringsmaterial. Elforsk rapport 07:53.
- Lum, K. Y., and Sheffer, M. R. (2005) Dam Safety: Review of Geophysical Methods to detect Seepage and Internal Erosion in Embankment Dams, Hydro review, Vol. 29(2).
- Pusch, R., Erlström, M., Börgesson, L.(1985). Sealing of rock fractures. A survey of potentially useful methods and substances. SKB Technical Report TR 85-17. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management AB (SKB), Stockholm.
- Sjöström Ö. (1999) Förstudie Reparation av jorrdammar genom injektering, Elforskrapport 99:48, Elforsk AB, Stockholm.
- Stille H., Gustafson G., Hässler, L. (2012) Application of new theories and technology for grouting of dams nd foundations on rock Geotech Geol Eng. Published online 17 april 2012.
- Weaver, K. (2007). Dam foundation grouting. ASCE Press, Reston.
- Windelhed K. (2001) Jetinjektering – En intressant reparationsmetod för jordartsmetaller, förstuide. Elforsk rapport 01:10, Stockholm.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se