

ELFORSK



DAMMSÄKERHET

**FÖRSTUDIE
REPARATION AV JORDDAMMAR GENOM
INJEKTERING**

Rapport 99:48

DAMMSÄKERHET

**FÖRSTUDIE
REPARATION AV JORDDAMMAR GENOM
INJEKTERING**

Rapport 99:48

FÖRSTUDIE

REPARATION AV JORDDAMMAR GENOM INJEKTERING

Elforsk rapport 99:48



Örjan A Sjöström

ROCK TEAM

Box 23030

104 35 Stockholm

tel 08-329250

fax 08-329251

Förord

BC Hydros W.A.C. Bennett damm i British Columbia, Kanada, är en 183 m hög och ca 2000 m lång jorrdamm som dämmer upp en ca 30 mil lång sjö med en regleringsvolym av 70 miljarder m³ vatten.

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

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

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

Förstudien har inriktats på att belysa följande frågeställningar:

- verifiering av beständighet hos tidigare utförd injektering.*
- metoder för bestämning av kvalitet och utsträckning på tidigare u(förd reparation.*
- metoder för framtida reparationer.*

Stockholm i december 1999

Elforsk AB

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	2
2	FÖRSTUDIENS INRIKTNING.....	3
3	GENOMGÅNG AV TIDIGARE UTFÖRDA REPARATIONER.....	4
4	DAGENS FUNKTION OCH STATUS - ANSATS TILL PROBLEMBESKRIVNING	7
4.1	INJEKTERING/HÅLFYLLNING MED CEMENTBRUK	7
4.2	JORDINJEKTERING	10
5	UNDERSÖKNING OCH DOKUMENTATION AV TIDIGARE UTFÖRDA REPARATIONER.....	11
6	IDÉER FÖR UTFÖRANDE AV NÄSTA REPARATION.....	12
6.1	REPARATION AV NYA SJUNKHÅL.	12
6.2	REPARATION I ANSLUTNING TILL GAMLA SJUNKHÅL	13
6.3	KOMPLETTERING AV TIDIGARE UTFÖRD INJEKTERING	13
6.4	BERGINJEKTERING	13
6.5	ALLMÄNNA TEKNIKFRÅGOR	13
6.6	UTRUSTNING	14
6.7	UPPHANDLING	15
6.8	KONKURRENSSITUATIONEN	16
7	BEHOV AV FORSKNING OCH KOMPLETTERANDE UTREDNINGAR.....	18
8	SAMMANFATTNING	19
9	REFERENSER.....	20
A	BILAGA GEOBOR S	

1 Inledning

Vid ett antal tillfällen har ökade och oacceptabla läckage genom och under jordfyllningsdammar förekommit i svenska dammar.

I några fall har ökat läckage uppstått ett antal år efter första uppfyllning. Vid några fall har onormala läckage uppstått redan vid första uppfyllning av magasinet.

I de flesta fall har man reparerat de skador som förorsakat dessa onormala läckage genom någon form av injektering, varvid cementinjektering enbart eller i kombination med bentonit och/eller vattenglas varit den vanligaste metoden.

På senare tid har ett visst ökat läckage kunnat förmärkas i anslutning till tidigare utförda reparationer.

2 Förstudiens inriktning

Förstudien har inriktats på att belysa frågeställningarna:

Vad har tidigare utförd injektering för beständighet?

Vilken utsträckning har tidigare utförd reparation, vilken kvalitet, och hur varierar det inom området?

Vilken teknik och vilka metoder bör användas för framtida reparationer?

Som en del i arbetet har diskussioner förts med bl a Pär Hansson, Vattenfall Utveckling, Mikaela Dan, KTH, Sam Johansson, HydroResearch, Seje Carsten och Stefan Wänstedt, Geosigma, Martin Brantberger och Bertil Sparrman, Stabilator, Bengt Eriksson TGB, Sten-Åke Pettersson och Jan-Erik Daniels, Craelius, vilka lämnat värdefulla synpunkter till studien. Urban Norstedt, Vattenfall Vattenkraft, och Harald Eriksson, Båkab, har initierat studien och dess frågeställningar samt under arbetet lämnat värdefulla och konstruktiva synpunkter till det fortsatta arbetet.

3 Genomgång av tidigare utförda reparationer

Dokument från följande fyra reparationsarbeten har studerats:

Rätans kraftverk, reparation 1968 i anslutning till monolit 3, med 79 m³ sand-cementbruk under självtryck, vct 0,8, i samband med första uppfyllning av magasinet (1).

Hällby kraftverk, byggt 1967-70, omfattande reparation 1985-86 efter sättningsskada i vänster jorddamms anslutning till kröndammen, med jordinjekteringsteknik. Sammanlagt injekterades 42 m³ cement/bentonitbruk, 164 m³ silikatbruk och 46 m³ bruk för berginjektering i vänster jorddamm, summa 252 m³, samt 14 m³ cement/bentonitbruk, 124 m³ silikatbruk och 17 m³ bruk för berginjektering i höger jorddamm, summa 155 m³, totalt 407 m³ (2, 3).

Porjus kraftverk, ny fyllningsdamm färdigställdes 1975. Skada reparerades 1993 med Ultrafin cement, vct 0,8 (4, 5).

Suorva Östra färdigställdes 1972. 1983 uppstod ett stort läckage och ett 30 m³ sjunkhål. Reparation utfördes 1983, 84 och 87 med cementbruk under självtryck, ca 120 ton cement i tåtkäman, plus 39 m³ silikatbruk, samt ca 20 ton cement i berget plus 2 m³ silikatbruk (6, 7, 8).

Nedan följer en något utförligare beskrivning av arbetena.

Rätans kraftverk

I samband med fyllning av magasinet uppstod 680414 ett läckage med materialtransport vid nedströmstån av monolit 4. Läckaget var max 5840 l/min och minskade inom en vecka till 190 l/min, som skulle motsvara det vattenflöde som tidigare observerats komma fram ur berget. Vattnet var helt klart, erosionen hade upphört.

En sättning på ca 0,5 m uppstod 680421 i stenkonan uppströms om och intill vingen på monolit 3.

Samtidigt med läckaget Lindö-borrades ett hål i tåtkärnan omedelbart uppströms sponten vid anslutningen till monolit 3. Protokollet anger lös morän från 6 m djup med spolvattenförlust och ett hålrum i den naturliga moränen under sponten.

Borröret fylldes med sand-cementbruk ca 1:1 och vct i genomsnitt 0,8. Under uppdragning injekterades 24 m³ bruk. På samma sätt injekterades i en första omgång 6 st hål med 43 m³ och i en andra omgång ytterligare 10 st hål med 12 m³ bruk. Dessa 10 hål fördjupades ned i berget, som enl protokollen angavs vara trasigt i ytan men injekteringen visade att berget var praktiskt taget tätt.

Rapporten från arbetet sammanfattar att "den mest troliga förklaringen till läckagets uppträdande anses vara den, att trycket från dämningen via bergsprickor och trasigt ytberg fortplantats från uppströmssidan av monolit 3, runt sponten till dammens nedströmssida och där initierat erosion och materialtransport. Möjligen kan ett genomsläppligt skikt i den naturliga moränen under dammen nedströms om sponten ha bidragit till läckvägens utbildande. Sedan erosionen kommit igång har den vandrat uppströmsåt, under sponten, längs uppströmssidan av denna och fram till uppströmssidan av monolit 3. När så tillräckligt stora hålrum utbildats har sättningar i massan inträffat vilka tätat vattengången på dammens uppströmssida." (1)

Hällby kraftverk

Hällby kraftverk byggdes 1967-70. I samband med höga vattenflöden hösten 1985 uppstod en sättningsskada vid vänster jorddamms anslutning till kröndammen. Samtidigt ökade läckvattenföringen från det normala 20-22 l/min till ca 200 l/min.

Den inträffade skadan föranledde steg för steg mer omfattande undersökningar. Sonderingar i vänstra dammen gav vid handen att skador måste ha inträffat i dammens bottenparti och att tät kärnan även högre upp var allvarligt skadad. Borrningar i den högra dammen avslöjade likartade men totalt oväntade svagheter även i den dammens tät kärna. Undersökningarna gav otvetydigt till resultat att dammarnas tät kärna blivit urspolad och måste repareras.

För reparationen valdes jordinjektering, i den vänstra dammen i sju rader och den högra i fyra rader. I de yttre raderna användes cement/bentonitbruk för att täta större hålrum och urspolningsstråk, i de inre silikatbruk. Injektering av berget utfördes samtidigt. Mest bruk gick åt i bottenregionen närmast berg och betongplatta. Sammanlagt injekterades 56 m³ cement-bentonitbruk, 288 m³ silikatbruk, berginjektering 63 m³, totalt 407 m³. Läckvattenmängderna minskade markant vid injektering av bottendelen i hål E4 resp F10, ned till 40 l/min. Efter avslutad injektering fortsatte läckningen att minska ned till 10 l/min, vilket är mindre än ursprunglig läckning.

Undersökningar utfördes bl a med viktsondering före och efter injektering. Effekten av injekteringen syns tydligt, och "sonderingsdiagrammen har nu samma utseende som i övriga delar av dammarna, dvs motsvarar bilden av hårt packad morän." (2, 3).

Porjus kraftstation

Vid Porjus kraftstation färdigställdes 1975 en ny fyllningsdamm på höger sida om kraftstationen. Sjunkhål uppstod 1976, 1979 och 1985. Undersökning av skadan 1985 i sektion 0/390 gav vid handen att tät kärnan var oskadad. 1993 uppstod återigen ett sjunkhål i sektion 0/390 intill dammkrönets uppströmskant.

Undersökningar omfattande georadar, borrhningar, mellanhålsradar, temperaturmätningar, spårämnesförsök samt uppföljning av pågående läckage- och grundvattenmätningar utfördes.

Tätning av tätkärna och berggrund bedömdes erforderlig inom områdena 0/380 - 0/400 samt 0/595 - 0/605, där förhöjd vattenkvot i tätkärnan konstaterats. Reparation utfördes med Ultrafin cement, vct 0,8.

Cederwall och Läskelä skriver i sin rapport att "Det är svårt att i efterhand närmare ange var i dammkroppen läckage och erosion startat men det är sannolikt att båda förloppen initierats i direkt eller nära kontakt mellan berg och tätkärna." De pekar också på risken med ev tvärgående sprickor i berget under dammen. De understryker också det stora informationsvärdet som temperaturmätningar kan ge för tillståndsbedömningen hos en läckande fyllningsdamm. De diskuterar lämpligt injekteringsmedel för injektering av tätkärnan. Cementbruk skulle kunna ge betongkroppar i form av plattor eller annan konfiguration som är väsentligt styvare än omgivande tätkärna, men skriver också att den föreslagna metoden med injektering i tätkärnan med självtryck antagligen inte förorsakar större cement/betongplattor (4, 5).

Suorva Östra

Dammen Suorva Östra färdigställdes 1972. 1983 noterades grumligt vatten som trängde fram nedströms dammen, ca 100 l/s, och en sjunkgrop ca 30 m³ i dammens krön, sektion 0/740. Under tiden sjunkgropen fylldes med cement-bentonitbruk minskade läckaget till 25%, läckan självtätade delvis. Tätkärnan visade sig vara skadad ända ned till berggrunden. Dammen tätades med injektering med självtryck med cement-bentonitbruk, ca 40 ton cement. Läckaget sjönk till ca 10%.

Under sommaren 1984 företogs ytterligare injekteringar av dammen och tätkärnan därunder. I 40 hål injekterades 9 ton cement och 39 m³ silikatbruk i tätkärnan, 9 ton cement och 2 m³ silikatbruk i berget.

Åren 1984-86 utfördes ytterligare undersökningar och under 1987 utfördes omfattande borrhningar och injektering, då undertecknad bl a vikarierade som platschef. Då injekterades i jord och berg ca 60 ton (enligt mina egna noteringar) Degerhamns injekteringscement med 4% flyttillsats, V33, och 2% bentonittillsats, vct 1,0.

Det som jag fortfarande minns tydligt är att i ett hål "försvann" 5 m³ bruk i bergkontakten, utan något som helst motstånd trots injektering med självtryck. Vart tog det vägen?

Sherard (8) anser att erosionen har att göra med moränens sammansättning, och att erosionen startade nära bergkontakten. Han menar också att man inte behöver anta otillräcklig tätning av berget som orsak (6, 7, 8).

4 Dagens funktion och status - ansats till problembeskrivning

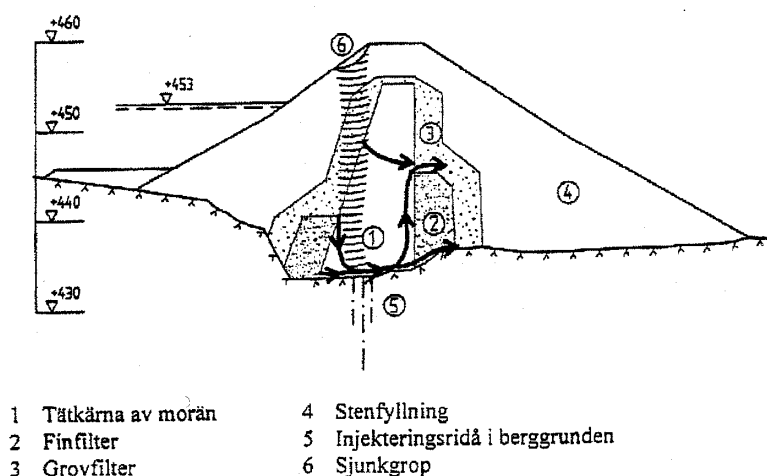
Med anledning av att man på senare tid märkt ett ökat läckage i de tidigare reparerade områdena finns det en mängd frågor som helst bör besvaras innan en andra omgång reparation påbörjas. Man vet numera att cementpasta vid vct över 0,75 har porositet på ca 40%, och att den urlakas av kallt vatten.

Några aktuella frågeställningar:

- hur ser läckvägarna ut, när de förekommer i jord, i kontakt jord/berg, i berg
- var och hur har injekteringsmedlet fyllt upp i håligheter, i tätjord, i filter, i stödjord, mm
- cementpastans och injekteringsmedlens kvarvarande beständighet
- är filterfunktionen havererad

4.1 Injektering/hålfyllning med cementbruk

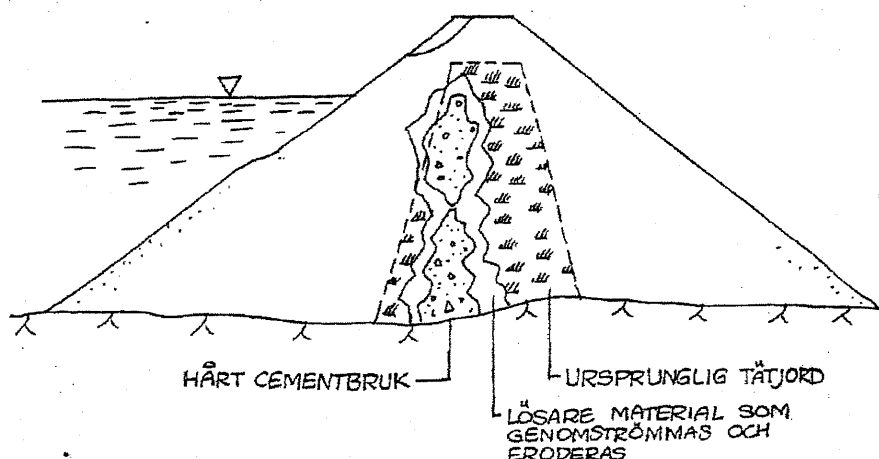
När det gäller dammar som har injekterats/hålfyllts med cementbruk eller sandcementbruk med låga vct, föreställer jag mig att man får en fastare kropp, vilket utseende den nu har, som gett en bra mekanisk reparation, medan hydrauliskt sett den fastare lagningen på sikt medför en mer koncentrerad vattenströmning i gränsområdet mellan lagningen och ursprunglig tätjord. Man kan också tro att den ursprungliga jorden packats något vid injekteringen/hålfyllningen, men att den inte är av samma kvalitet som den ostörda tätkärnan, se figur 1 och 2 (9).



Figur 1. Sjunkgrop med antagna läckvägar. Bilden hämtad från (9)

Jag bedömer att jorden inte injekterats i någon större omfattning, dvs att porerna fyllts med injekteringsbruk, det borde kanske i stället kallas för hålfyllnad, fyllnadsinjektering, eller "cavity grouting". För penetration krävs också en relation mellan kornstorleken på jorden, D10, och brukets korstorlek på 8 å 10 gånger (10). Det betyder att för Degerhamns injekteringscement t ex krävs kornstorlek på ca 0,3 mm, dvs ungefär mellansand och grövre, för att penetrationsinjektering skall kunna ske. Se också (18). Permeabiliteten och porvolymen har också betydelse, se bl a referens 11 och 14. Brukets viskositet och tryck har stor betydelse för inträngningsförmågan, och jag tror också att brukets vattenhalt har betydelse, dvs att det finns risk för uppspräckning vid injektering med bruk vct 0,8, även om viskositeten är låg. Jag bedömer att inträngningsförmågan hos de bruk som använts i de aktuella fallen varit låg.

Om bilden av injektering/hålfyllnad som målats upp ovan är någorlunda relevant torde man med tiden få en förändring av det hårda cementbruket i gränsen mot det ursprungliga "hålet" till en mer eller mindre urlakad zon med successivt mindre hårdhet/mindre cement, skiftande till lösa jordmaterial där kanske också finmaterial transporterats bort och som slutligen övergår till tätkäma av god kvalitet. Denna bildning kan ha vilken form som helst.



Figur 2. Illustration till hur hålfyllnad skulle kunna se ut

Å andra sidan redovisar Pär Hansson i (12) en undersökning av injekterad sand, där man kommit fram till att vidhäftningen mellan bruk och jord bryts vid låga laster, varvid partiklarna omlagras till tätare struktur innan brott sker. Pär skriver att "Detta skulle kunna betyda att de fasta partier i dammkroppen som injekteringen förorsakar tämligen lätt bryts ned varefter injekteringen kan betraktas som löst liggande partiklar i jordens porsystem, dvs endast ett tillskott av finmaterial."

Men vid hålfyllning har man kanske inte en god kontakt mellan den fastare cementkroppen och omgivande tätkärna utan den omges av ett lösare, kanske också mer

vattenrikt jordmaterial. Detta skulle medföra att ev deformation skulle tas upp av det lösare mellanskiktet och att cementkroppen därmed inte skulle brytas ned.

Kanske kan endera teorin bekräftas vid de provtagningar som föreslås utföras vid nästa reparation.

Något som jag observerat vid framschaktning av jord som injekterats är att om det finns en tydlig horisontell lagring kan man se horisontella skikt av bruk. Om skiktningar saknas söker sig bruket utåt/uppåt, se figur 3. Större stenar i jorden har fått ett skal av injekteringsbruk, vilket tyder på läckanvisningar i gränsskiktet till hårda kroppar.

Vid anslutning till betongkonstruktioner och sponter, där läckagen ofta uppstått, bedömer jag, bl a med hänvisning till föregående stycke, att man kan komma att finna en koncentration av bruk i kontaktzonen.



Figur 3. Bild visande uns av cement-bentonitbruk i finsand. Gdynia Dry Dock, Polen, 1976

Av ovanstående dammar hänför sig Rätan och Porjus till kategorin "hålfyllning", Suorva delvis, då i viss omfattning silikatbruk använts på den senare.

Jag bedömer att cementbruket inte penetrerat filtret i någon omfattning i dessa fall, brukssammansättningen och det låga trycket talar mot detta.

Att i stället för cementbruk pumpa in tätjordsmassor, såsom man gjorde på Bennet Dam. Canada (13) tycker jag verkar teoretiskt intressant. Om man skulle välja den metoden för någon av våra högre dammar, tror jag ändå att man måste komplettera i närområdet med injektering enligt 6.1 nedan. Och även om man skulle lyckas packa omgivande

tätjord, så hjälper inte det om den är urspolad, det som är urspolat måste ersättas med injektering, t ex enligt 6.1. Pär Hanssons idé att i stället injektera ett inert material. t ex inert kalk, är intressant. Han hade gjort ett litet pilotförsök som såg intressant ut.

4.2 Jordinjektering

När det gäller reparationer utförda med jordinjekteringsteknik, dvs med jordinjekteringsbruk. cement-bentonit, deflockulerad bentonit och/eller silikatbruk så utförs denna i allmänhet genom ventilrör eller tube-á-manchette-rör (14).

Man går normalt tillväga så att injektering utförs i flera rader, i nivåer varierande från 0,3 m till 1 m, med successivt finare bruk enligt ett anpassat mönster. Cement-bentonit-bruk används för att försegla ev grövre jordstrukturer. Injektering utförs om den aktuella nivån tar emot bruk efter vissa kriterier. Man kan behandla samma nivå flera gånger, och med olika bruk. Finns en svaghetszon någonstans, så behandlas även den, utan att man vet om den. Metoden ger en generell behandling.

Denna teknik torde ge en mer anpassad och mjukare behandling, och en mer uniform behandling som kanske ger egenskaper hos den injekterade jorden som inte avviker alltför mycket från den omgivande orörda tätkärnan. En fördel är också att den inte kräver detaljkunskap om de aktuella förhållandena. Metoden är dock antagligen dyrare vid jämförelse, men torde inte kräva samma omfattning av undersökningar och kontroller jämfört med den andra metoden. Behovet av tilläggsarbeten och kompletteringar torde dock vara mindre om arbetet utförs som systematisk jordinjektering.

I (15) redovisar Pär Hansson storskaliga laboratorieförsök med injektering med Ultrafin cement och silikatbruk i en simulerad skada i en tätkärna.

Ett problem är silikatbrukens beständighet, dvs att ingen vet riktigt vilken livslängd en sådan injektering har. Dock är ett mycket stort antal dammar byggda på undergrund som jordinjekterats eller reparerats med denna metod. Cambefort (16) hänvisar till försök som visar att syneres inte uppträder vid finkorniga jordar, och det är ju där silikatbruken skall användas, och att den urlakning som sker inte nämnvärt påverkar permeabiliteten. Kutzner redovisar i (17) undersökningar på silikatgelers styrka.

I (18) finns en allmän översikt av jordinjekteringsprinciper, dess möjligheter och begränsningar.

Det vore värdefullt om en utvärdering av tidigare utförda jordinjekteringar kunde utföras, t ex Hällby, som reparerades 1985-86, men kanske också Gardikforsen, Kvistforsen, Åsens kraftverk bl a, där jordinjektering utfördes i samband med bygget för ett 40-tal år sedan. Jordinjekteringsarbetet i Kidatu (14), Tanzania, utfördes 1974-75 och omfattade ca 10.000 m³ bruk, således ett mycket stort jordinjekteringsarbete. Kanske skulle SIDA kunna medfinansiera en utvärdering?

5 Undersökning och dokumentation av tidigare utförda reparationer

Ju bättre bild man kan få av tidigare utförd reparation och dess status, desto mer precisa åtgärder kan man vidta. Om man får en osäker bild av förhållandena är man hänvisad till mer generella åtgärder.

För att få en allmän bild av området för tidigare injektering bör förutom läckmängder och deras variationer, vattenstånds- och porttrycksmätningar, ev rörelser i dammen, etc, georadar- och mellanhålsradarundersökningar samt temperaturmätningar utföras. Rapporter från arbetets utförande studeras givetvis också.

För att få veta något om den tidigare injekterings kvaliteten och - om man bild av hur det kan se ut är någorlunda relevant - hur det omgivande, lösare jordmaterialet är beskaffat, bör borrhining utföras med t ex Geobor S. Geobor S är en ny borrhiningsmetod, som ger minimal störning av omgivande jord genom att spolmediet går inuti borrhöret, och som tillåter byte av provtagningsverktyg för provtagning i hårda material som måste kärnböras till verktyg med slutare och liner för provtagning i lösa material. Metoden används både på Hallandsåsen och Öresundsbron för att få minimal störning av det material som tas ut och bästa resultat av provtagningen, se bilaga 1.

Att helt korrekt värdera vattenhalt och packningsgrad i riktigt lösa material är kanske inte att förvänta sig, men där kan man troligtvis få hjälp av bl a mellanhålsradar och temperaturmätningar. Eventuellt skulle man kunna använda flytande kväve, frysa ett parti strax under borrhöret, borra ur och ta upp.

Upptagna kärnor av cementbundet material bör laboratorietestas, t ex med avseende på cementshalt, hållfasthet, ev spektrografisk undersökning som visar urlakning, mm.

Material från de lösare delarna bör analyseras vad beträffar kornfördelning, ev spår av cement, och i görligaste mån volymvikt, porvolym, vattenhalt, etc.

Permeabiliteten bör bestämmas, t ex med Lefranc-test (18), både i fastare material och i lösa formationer.

Förutom jordens gradering och packning har permeabiliteten stor betydelse för bedömning av hur penetrationsinjektering skall utföras (11, 18).

6 Idéer för utförande av nästa reparation

Diskussionen delas upp på följande kategorier:

- Reparation av nya sjunkhål
- Reparation i anslutning till gamla sjunkhål
- Komplettering av tidigare utförd jordinjektering
- Teknikfrågor
- Berginjektering
- Allmänna teknikfrågor
- Utrustning
- Upphandling
- Konkurrenssituationen

6.1 Reparation av nya sjunkhål.

Om nya sjunkhål uppstår bör dessa fyllas på ungefär samma sätt som man gjort tidigare. Jag föreslår att man använder sand:cementbruk, såsom man gjorde vid Rätans kraftverk. Vct bör vara ca 0,6. Flytmedel måste då till. Lämpligt tillsatsmedel och dosering för pumpbarhet bör provas ut. Standardcement är enligt min mening tillfyllest.

Man bör dock i tillägg till denna hålfyllning komplettera med traditionell jordinjekteringsteknik i ett antal rader, förslagsvis minst tre, omkring sjunkhålet, och det arbetet skall inriktas på penetrationsinjektering.

Kan man på goda grunder anta att det finns linser eller kanaler med grövre material än ca 1 mm, ungefär grovsand, bör injektering påbörjas med cementbruk baserat på standardcement. Jag anser dock att man inte ska använda bentonit såsom man gjorde tidigare, utan i stället ska använda flytmedel för lägsta viskositet. Tidigare använde man vct ca 3,0, men jag tror att man bör sikta på vct 1,5. Lämpligt recept bör utprovas.

Därefter injekteras med Ultrafin cement med optimal flyttillsats för lägsta viskositet. Vct kanske 1,5, lämpligt recept utprovas. Om inget talar för att det finns riktigt grova stråk, med risk för spridning till filtret t ex, börjar man direkt med Ultrafin cement.

Som avslutning kan silikatbruk med hårdare av typ Dynagrout användas. I Hällby användes t ex en blandning av silikat:vatten 1:4. Detta är kanske en lämplig blandning, ev kan man minska vattnet till 3 delar, vilket ger en något fastare gel, men är också något dyrare. Vald hårdare bör kontrolleras ur miljösynpunkt.

6.2 Reparation i anslutning till gamla sjunkhål

Under förutsättning av att det inte utbildats nya sjunkhål, markanta sättningar eller läckvatten med materialtransport, eller annat som talar för hålrum i dammkärnan, är mitt förslag att injektering utförs genom ventilrör eller tube-å-manchette-rör i minst tre rader, möjligtvis fler, på likartat sätt som beskrivs ovan.

6.3 Komplettering av tidigare utförd injektering

Man bör undersöka huruvida det går att lokalisera, spola ur och använda tidigare använda ventilrör eller tube-å-manchette-rör. I Hällby t ex, har man fyllt rören med bentonit, kapat under vägbanan och försett rören med en stålhatt. Lägena finns angivna på ritningar. Det finns förstås risk för att ventilerna rostas sönder eller fastnat på ventilrören, men kanske mantelbruk och injekteringsbruk konserverat dessa. Ur denna synpunkt, risken för korrosion, vore det kanske bättre att i fortsättningen använda plaströr.

Om gamla rör inte kan användas, måste nya sättas. Hur behandlingen skall utföras beror på karaktär och omfattning av skadat område, men även här bör kompletterande injektering utföras i minst tre rader.

Jag föreställer mig att man även i detta fall kan använda samma procedur som beskrivits ovan, men att man behåller det gamla receptet för silikatbruket.

6.4 Berginjektering

I de fall där det befinns nödvändigt att komplettera berginjekteringen bör denna utföras med cementbruk vct 0,6 á 0,8, baserad på Ultrafin cement eller motsvarande, med flyttillsats för att erhålla en viskositet på 32 á 34 sekunder Marsh (18, 19). Berginjekteringen bör utföras till stopp vid maxtrycket. Risken för spridning till ovanliggande jord bör beaktas när maxtryck och maxmängder bestäms.

6.5 Allmänna teknikfrågor

6.5.1 Injekteringstryck i jord

Det är en intrikat uppgift att för de olika ovan beskrivna fallen bestämma kriterier för maxtryck och maxmängd av olika bruk på olika nivåer, och i vilken ordning injektering skall utföras.

Trycken beror på vilken typ av rör som används och på vilken nivå aktuell ventil ligger. Pumphastighet, och därmed trycknivån, bör bestämmas vid inledning av varje injekteringsarbete genom s k ”pumping test” som utförs på någon minut. Med denna pumping test känner man av motståndet i marken och vid vilken nivå man kan arbeta utan uppspräckning. Den inledande testen bestämmer sedan vilken pumphastighet man kan använda. Eftersom motståndet i marken normalt stiger under arbetets gång bör ytterligare pumping tests utföras under arbetets gång.

6.5.2 Injekteringsmängder

De maxmängder som bör användas kan bestämmas genom bedömning av skadat område och vilken porvolym som skall fyllas. Normalt ansätter man den beräknade volymen gånger 1,5 å 2. Är arbetet lyckat kan man då så småningom registrera en viss mätnad, genom markhöjning, tryckökning, ”refusal”, minskat läckage genom dammen, etc.

6.5.3 Arbetsordning

Vid jordinjektering är det av vikt att injektering sker i sekvenser, så att tidigare injekterat bruk inte störs av nästa injektering. Gelstyrkan bestämmer det tryck, dvs injekteringstryck i marken invid tidigare injektering, som kan användas och tidpunkten. Trycket och tryckökningen i jorden från injekteringen bör därför mätas.

6.6 Utrustning

6.6.1 Registrering av tryck och flöde

All injektering bör utföras med registrering av tryck och flöde, se figur 5. Det är ett utomordentligt värdefullt hjälpmedel för injekteringsingenjören och för uppföljningen. Genom tryck-flödes-kurvan kan man tydligt se tryckuppbbyggnaden och om det sker uppspräckning, ”mini-bursts”, i stället för penetration. Härigenom kanske man så småningom kan få fram ett allmänt kriterium för mätnad enligt GIN-principen (21) även för reparation av dammar med injektering.



Figur 4. Utrustning för registrering av tryck och flöde, använd vid fältförsöken vid Hallandsås. Med på bilden är författaren i fältmundering

6.6.2 Blandare

Blandare skall vara höghastighetsblandare som ger god dispergering av cementkornen. Dispergeringseffekten skall verifieras.

6.6.3 Restriktion för användning av tidigare blandat bruk

De föreslagna bruken har en viss öppentid, dvs tid innan de bör placeras (22). Därför bör minst två omrörar-kärl användas, så att gammalt bruk inte pumpas in.

6.6.4 Pumpar

Pumpar som ger tryckstötter bör undvikas. Kolvumpar skall därför förses med tryckutjämnare så att tryckvariationerna inte är större än säg 10 á 15 %.

6.7 Upphandling

Injekteringsarbetet skulle i många fall kunna utföras effektivare än vad som är fallet i dag. Det finns t ex mycket effektiva “packers”, men de är dyra i inköp. Har man betalt per timme eller per dag finns inget incitament för effektiv hantering. Samma gäller injekteringsutrustningen. Automatiska blandare för hantering av storsäck eller bulk-cement och effektiva pumpar finns, se figur 5. och de är inte så dyra i inköp. Men kan man använda gammal, redan avskriven utrustning, så är det givetvis mest lönsamt för entreprenören. Och varför inte använda flera pumpar?



Figur 5. Del av modern injektionsstation med automatisk blandning. Levererad av Rodio till Hallandsås 1993.

Injekteringsarbetet bör därför handlas upp per nivå, per uppkoppling ("hook-up") och per liter eller m³ injekterat bruk enl teknisk beskrivning, vare sig det gäller injektering via borrhör eller ventiltrör. När det gäller installering av ventiltrör eller tube-å-manchetterör bör dessa betalas per m inkl mantelbruk. Huruvida borrhörning med grova foderrör och provtagningen i dessa kan handlas upp per m och per styck, beror på omständigheterna. Jag tror också att detta vore välgörande för utvecklingen, även om det ibland kan vara svårt att för entreprenören att sätta pris. Det kräver också en å-prislista med rimliga mängder för de olika momenten, och det kan kanske vara svårt att förutse omfattningen av nödvändig provtagning i förväg. Idag finns det dock på marknaden mycket effektiva maskiner som klarar de flesta formationer utan problem, och som gör arbetet mer förutsägbart och prissättningen enklare.

6.8 Konkurrenssituationen

Det finns inte så många svenska aktörer på marknaden för dessa specialarbeten. De som kan nämnas är Stabilator, Herkules, ev TGB och Nibe Borr i samarbete med annan entreprenör. PG Geoteknik är bra på borrhörning.

Kanske ska man i vart fall vid större arbeten gå ut på internationell förfrågan, eller i vart fall skriva handlingarna på engelska, så att svenska entreprenörer lätt kan finna en samarbetspartner?

Men aktörerna i Europa är heller inte många, och flera har kopplingar till varandra, t ex Soletanche-Bachy, Bauer, Rodio. Den italienska entreprenören Trevi har samarbete med Herkules, Cementation och Keller, är några andra aktörer. Entreprenörservice i Norge ägdes tidigare delvis av Skanska/Stabilator, men jag har hört att det inte längre är så.

Alternativet är att man kan förutskicka en viss mängd av reparationsarbeten, så att några svenska aktörer finner det lönt att satsa på modern utrustning och utbildning av personal.

7 Behov av forskning och kompletterande utredningar

Nedan listas ett antal utvecklingsmöjligheter som borde utprovas:

Att injektera/hålfylla med tätjord borde testas på något sätt, troligen på en större damm.

Att injektera med inert material borde också utprovas

Det finns en viss osäkerhet när det gäller lämpligt vct för jordinjekteringsbruk. Är vct 1,5 det optimala, eller kan man gå ned till 1,0 eller t o m 0,8? Detta borde närmare utredas. Kanske kan det ske vid nästa jordinjektering? Det som vi fann vid fältförsöken vid Hallandsås var att man i vart fall inte kan börja med låga vct:n, men att det verkade fungera med vct 0,8 efter ett antal satser (22). Vid Hallandsås företogs dock fältförsöken med injektering i insitu-vittrat berg som är en fastare formation än tät kärnan i en damm

Att ta prov i lös och vattenrik jord genom att frysa med flytande kväve under borrhöret provas lämpligen vid nästa reparation.

Lämpligt flytmedel och dosering för de olika bruken bör utprovas på genom enkla laboratorieförsök.

Hur väl jordinjektering och silikatbruken stått sig borde utvärderas, så att osäkerheten om silikatbrukens livslängd kunde elimineras. Finns något publicerat internationellt i frågan?

Jag kan förstå att vattenflöde genom bergsprickor kan orsaka erosion i jordmaterialet ovan berget. Däremot är jag tveksam till att det skulle bli någon materialtransport att tala om i mindre bergsprickor. Dessa skall ju också vara tätade med injektering. Eller öppnas de av bergdeformationen i samband med uppfyllning av dammen? Mot erosion i finare bergsprickor talar bl a min erfarenhet att jordmaterial i sprickor snabbt blockerar vidare injektering. Detta borde utredas.

8 Sammanfattning

I denna förstudie av reparation av jorddammar med injektering har problemställningen belysts. Reparation av sjunkhål och läckande jorddammar bör utföras i stort sett som man gjort tidigare med tillägg av en behandling av kontaktzonen med jordinjekteringsteknik. Förstudien utmynnar i några relativt konkreta rekommendationer vad beträffar injekteringsteknik, metodik och utrustningskrav. Modifierade brukssammansättningar föreslås, för att tillvarata nya rön beträffande tillsatsmaterial. Detta kräver vissa laboratorieundersökningar samt utprovning av lämpligt vct för cementbruk för penetrationsinjektering i samband med något lämpligt reparationsarbete. Några förslag till utveckling och forskning vad beträffar injektering med tätjord och inerta material redovisas. Utvärdering av tidigare utförda jordinjekteringar och injektering med silikatbruk föreslås.

Det är min förhoppning att den i förstudien föreslagna metodiken skulle kunna utgöra bas för fortsatt arbete. Viss justering och komplettering med undersöknings- och kontrollåtgärder i samråd med dammexperter erfordras. Efter anpassning till aktuellt objekt skulle konceptet kunna tillämpas praktiskt på någon damm som är i behov av reparationsåtgärder.

9 Referenser

1. VBB:s PM den 25.9.1968 angående Läckage genom jorddamm II, Rätans kraftverk.
2. VBB:s rapport 49155 daterad 1987-03-16, Reparation av jorddammarna 1985-65, Hällby Kraftverk
3. Stabilators rapport "Tätning av höger och vänster jorddamm vid Hällby kraftverk i Ångermanälven sept 1985-juni 1986. Författad av Bengt Jansson, maj 1986.
4. Intern rapport från Vattenfall. Porjus kraftstation. Höger damm. Dammskada 1993. Utförda undersökningar samt åtgärdsförslag. Slutrapport 1994-02-02
5. Cederwall, K och Leskelä A. Porjusdammen. Iakttaga skador och anomalier höger damm. Rapport april 1994.
6. Norstedt U, Nilsson Å, Internal erosion and ageing of some of the Swedish earth and rockfill dams. Dix-neuvième Congrès des Grand Barrages, Florence 1997.
7. Suorvadamman. Beskrivning av arbetena och teknisk beskrivning upprättad av VBB 1987-03-31
8. Sherard J L, Suorva Dam Studies, daterad April 4, 1987.
9. Nilsson Å, Ekström I och Söder C-O. Inre erosion i svenska dammar. Beskrivning och utvärdering av rapporterade sjunkgröpar. Elforsk rapport 1998-03-23
10. Kutzner, Baugrundverfestigung durch Injektionen. Strassen und Tiefbau 7/1969.
11. Lax, Jordinjektering. Förutsättningar och materialval. Rakenustekniika 1967:1.
12. Hansson, P. Injektering av jorddammar - Problemformulering och litteraturinventering, 1998-01-15
13. Hansson P. Reserapport, Bennet Dam, BC Hydro, Canada - Teknikbevakning av injekteringsarbetena. 1997-08-22
14. Sjöström Ö. Jordinjektering Kidatu, Tanzania. Stabilatorrapport 1973-06-13
15. Lindström L, Westerberg B. Finmalet cement. Malning, injektering, betong. Sept 1997.
16. Cambefort H. Injection des Sols. Editions Eyrolles 1967.

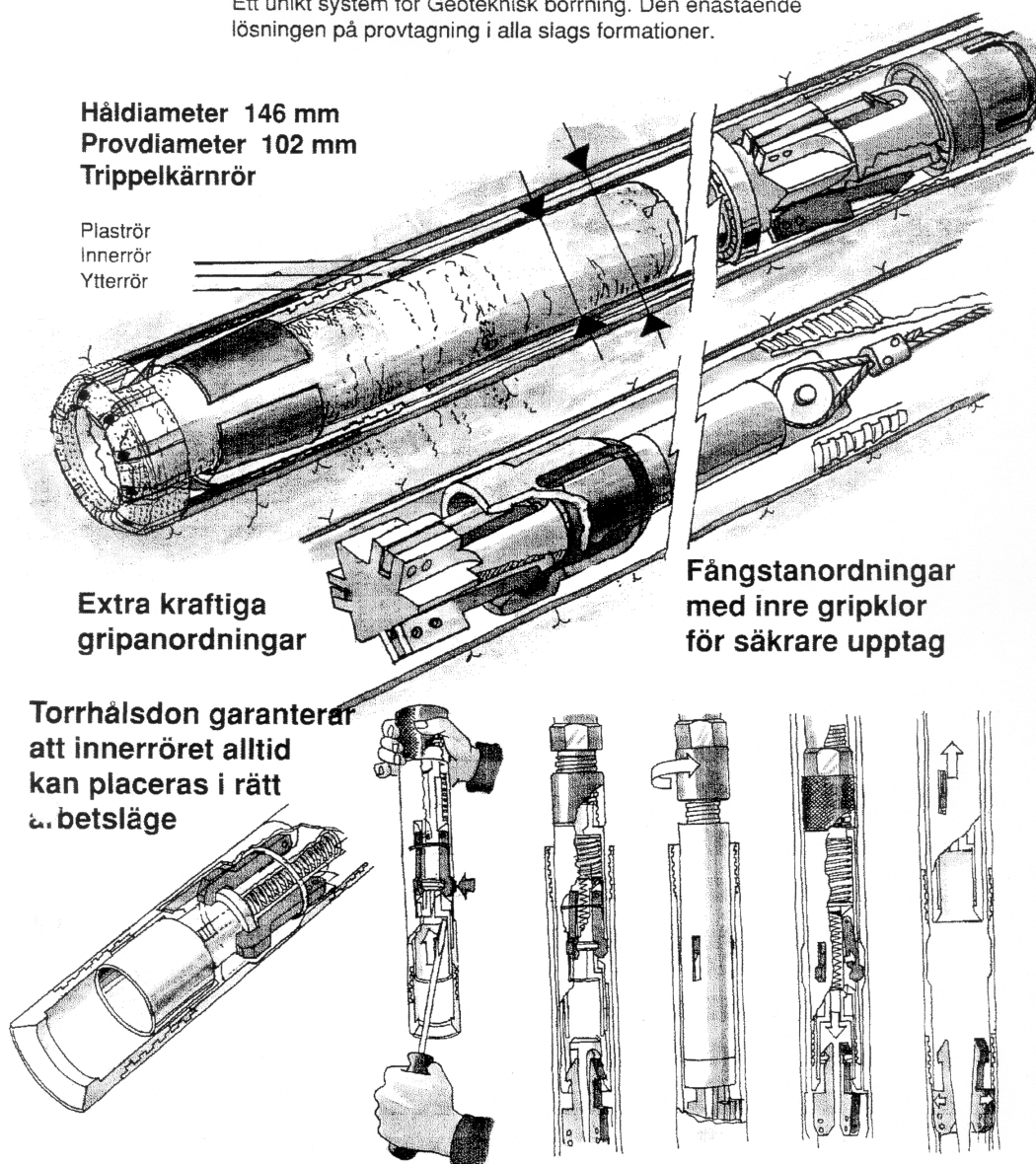
17. Kutzner. Über die mechanischen Eigenschaften der mit Silikatgelen injizierten Erdstoffe. Die Bautechnik, März 1968.
18. Sjöström Ö. Jordförstärkning medelst injektering. STF ingenjörsutbildning 1974.
19. Sjöström Ö. Injektering av jord och berg. Betonghandboken. Arbetsutförande, kap 29 Utgåva 2, 1992.
20. Sjöström Ö. Grouting Handbook. Sealing, Strengthening and Stabilizing of Rock and Soil. Skriven för Craelius 1989.
21. Lombardi G. Grouting design and control using the GIN principle. Water Power 1993/9.
22. Lind T. Resultat Prekvalificering avseende injekteringsmedel till fältprovning för tätningsarbeten i Hallandsåstunneln. Cementa AB, 1993.
23. International Society for Rock Mechanics. Commission on Rock Grouting. Final Report, May 1995.

A Bilaga

GEOBOR S - WIRELINEPROVTAGARE

Atlas Copco

Ett unikt system för Geoteknisk borrhning. Den enastående lösningen på provtagning i alla slags formationer.



Utbytbara varianter i samma konstruktion för:

- Kärnbörkning i medelhårt berg, **Metod I.**
- Kärnbörkning i mjuka formationer, **Metod II.**
- Provtagning i jordlager, **Metod III.**
- Provtagning i lager med varierande hårdhet, **Metod IV.**
- Provtagning enligt "Shelby", **Metod V.**
- Borrhning med "3-cone bits" utan provtagning, **Metod VI.**
- Vattenförlustmätning med packer, **Metod VII.**



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