

UPPGRADERING AV FORSHUVUDDAMMEN

**En demonstrationsstudie av oförstörande
undersökningsmetoder och
cementinjektering**

Elforsk rapport 01:24

UPPGRADERING AV FORSHUVUDDAMMEN

**En demonstrationsstudie av oförstörande
undersökningsmetoder och
cementinjektering**

Elforsk rapport 01:24

UPPGRADERING AV FORSHUVUDDAMMEN

**En demonstrationsstudie av oförstörande
undersökningsmetoder och
cementinjektering**

Elforsk rapport 01:24



Christian Bernstone och Per-Erik Thorsell

Sammanfattning

I det FoU-projekt som redovisas i denna rapport har test och validering gjorts av förundersökningsmetoder och en uppföljning av ett injekteringsarbete som genomförts på en svensk betongdamm under sommaren 1999. Den anläggning som studerats är den äldre delen av Forshuvuddammen från 1921. Anläggningen ägdes under 1999 av Stora Enso Energy AB, men tillhör idag av Fortum AB. Förundersökningen har samordnats av Vattenfall Utveckling AB och injekteringsarbetet har utförts av Stabilator AB (ingår idag i Skanska AB).

Projektet har haft två infallsvinklar. Den första delen har haft som syfte att prova och demonstrera nyare borrhålsbaserade metoder för att ta fram underlag till beställare och utförare av reparationsarbeten. Målsättningen har här varit att beskriva hur det inre av betongen ser ut i en konstruktion som under lång tid har varit utsatt för cementurlakning. Syftet med injekteringsdelen har varit att följa upp ett större reparationsarbete på en svensk betongdamm. Motsvarande målsättningen har varit att följa upp det praktiska arbetet med att genomföra en injektering. Den övergripande målsättningen med projektet har primärt varit kunskapsåterföring från utförare såväl som från senare års FoU inom undersöknings- och reparationsområdet. En sekundär målsättning har varit att identifiera eventuella svagheter i dagens kunskapsläge.

Genom studien så kom Stabilators egen förundersökning att utökas i omfattning. Sex undersökningsborrhål togs upp i fyra av dammens pelare. Borrhålen klassificerades enligt gängse metodik som har varit i bruk inom vattenkraften sedan lång tid tillbaka. Vidare filmades borrhålen med hjälp av ny kamerateknik som medger att betongväggen i ett borrhål kan filmas med hög upplösning. Vidare har borrhålen undersökts med oförstörande provningsmetoder: dels genom enkelhålsmätningar med radarsond och dito tomografiska mätningar, och dels genom calipersmätningar. I det senare fallet registrerades borrhålets form, inklusive förekomst av hålrum och sprickor.

Sammanfattningsvis så har den utökade förundersökningen utgjort ett bra stöd för att beskriva betongens kondition. En brist har varit problem med att borra så pass djupa hål att de passerar kontaktzonen till underliggande berggrund. Mest slående är resultat från filmningen, men även caliperloggningen har gett bra information om betongens kondition. Radarmätningarna har fungerat sämre än väntat och endast tillfört indikationer på kvalitetsbrister. Försöket med radartomografi misslyckades till följd av radarns energi dämpades ut i betongen betydligt snabbare än väntat.

Eftersom den gamla dammen även fortsättningsvis kommer att användas för att reglera Forshuvuds vattenmagasin så har ägarens målsättning med arbetet varit att säkerställa funktionen över en tidsperiod om ca 30 år, vilket har gjorts genom att täta konstruktionen med cementinjektering. Uppgraderingen omfattar hela dammen, d.v.s. samtliga pelare, samtliga skibord, anslutning till nya kraftstationen och anslutningen mellan gamla maskinstationen och den västra älvrinken. Den uppföljning av arbetet som har gjorts inom FoU-projektet har dock koncentrerats till pelarna i den utökade förundersökningen.

Injekteringsarbetet har utom i ett par avseenden kunnat genomföras enligt entreprenörens ursprungliga planering. Svåra problem uppstod vid bormningsarbetet med att betong tenderade att rasa in och påföljande risk för fastlåsning av borrhålen. Problemen ledde till beslut att sluta injekteringsborrhålen en bit innan berget, vilket gjorde att kontaktzonen berg/betong i regel inte kom att förstärkas. Det kvarstår därför osäkerhet om huruvida kontaktzon mellan betong och berg är tät eller inte.

Inledningsvis gjorde Stabilator två prognoser för bruksåtgången. En låg prognos var 2,5% fyllnadsgrad och en hög var 5%. Facit visar att åtgången varierade mellan 0,5 och 0,9% med ett medeltal på 0,7%, d.v.s. betydligt mindre mängder har gått åt än vad som förutsågs inför arbetets start.

Både standard- och injekteringscement har använts vid injekteringen. Den ordinarie förundersökning som låg bakom planeringen av arbetet hade indikerat att det fanns stora hålrum i konstruktion, vilket motiverade användning av standardcement. Den utökade förundersökningen har dock visat att betongen hade relativt få hålrum, vilket snarare motiverar allmänt användande av injekteringscement.

Beställaren har följt upp entreprenaden med en garantibesiktning. Entreprenörens kontroll av genomfört arbete består av en dokumentation som överlämnats till beställaren.

En mindre uppföljning har även kunnat genomföras inom FoU-projektets ram genom att göra ett par nya kärnborrhål som filmats. Filmningen visade att de farhågor som fanns under arbetets gång att kontaktzonen mellan berg och betong skulle bli bristfällig verkar vara ett faktum för pelare 4. Förhållandena under genomförandet har dock varit sådana att detta är en övervägd risk som man har varit beredd att ta. Filmningen visar att det överlag har skett en förbättring av betongkvaliteten. Förbättringen är dock inte jämn. Vissa tidigare dåliga partier ser nu bra ut, till och med mycket bra. Andra sådana partier ser ut att helt sakna nytt bruk.

Summary

The R&D project presented in this report involves testing and validation of pre-investigation methods plus a follow-up study of grouting work carried out on a Swedish concrete dam. The particular structure studied is the 1921 part of the Forshuvud dams. The work was done during the summer 1999. The plant was then owned by Stora Enso Energy AB, but is now a part of Fortum Kraft AB.

The extended pre-investigation carried out was co-ordinated by Vattenfall Utveckling AB. The contractor of the grouting work was Stabilator AB, which today is totally integrated to Skanska AB.

The project has had two specific objectives. The first objective was to test and demonstrate new borehole-based logging techniques enabling technical information to be used by both orderer and contractors of repair works. Here, the goal was to describe the integrity of concrete structures long-time exposed to leaching. The second objective was to follow up repair works on a Swedish concrete dam, with the goal to study grouting state-of-practice. Transfer of knowledge, both from contractors and from R&D late years, is an additional overall goal. We have also had an ambition to identify areas that suffer from lack of knowledge to which future R&D should be directed.

The pre-investigation made by the contractor was increased in extent by six complementary boreholes in four of the concrete pillars. Cores were taken and classified in accordance to common practice used within the hydropower industry. The boreholes were then filmed by a camera technique that allows high-resolution digital image visualisation of the walls. Next, the boreholes were logged using both single-probed and tomographic radar probes. Calliper measurements of the wall's surface finalised the survey.

In summary, the extended pre-investigation has supported a thorough description of the structural integrity. The most successful result was achieved by borehole imaging. However, ordinary calliper logging also gave quite useful information. The radar survey was less successful, and has only given indications on concrete quality deficiencies. The tomography trial was unsuccessful due to a much faster damping of the transmitted radar energy than expected.

The owner wanted the repair works to secure a continued service life of the concrete dam of at least 30 years. This requirement was chosen achieved by sealing the structure using cement grouting. The work encompassed the whole dam, i.e., pillars, skiboards, and the connection to the power station and the riverbank. The follow-up of the grouting work has, however, been concentrated to the pillars contained in the extended pre-investigation.

The grouting work has, with a few exceptions, been conducted according to the contractors original plan. However, severe difficulties occurred during drilling whereby concrete tended to come loose and repeatedly stuck the drill bit. To overcome such costly stops a decision was made to make the grouting holes shallower. This conse-

quently resulted in that the contact zone between bedrock and structure was not properly strengthened. It is therefore uncertain whether this zone has appropriate strength or not.

The contractor's initial grout volume prognosis varied between cement filling of 2,5% (low) and 5% (high). However, the grout result shows that the filling reached between 0,5% and 0,9% only. This is clearly a considerably less cement volume than expected.

The contractor's pre-investigation led the grout work planning. This investigation indicated that the structure contained numerous voids, which motivated usage of standard cement. However, the extended pre-investigation showed that voids were less frequent, which rather pointed out usage of a fine-grained cement type. Both cement types have been used.

The owner has followed-up the contractor's work by a guaranty inspection. The contractor has made a self-contained control of the grouting work, mainly by a thorough documentation delivered to the owner.

A minor follow-up study was made as a part of the R&D project. Two additional boreholes were drilled, cored and video filmed. Imaging showed that the transition zone between rock and concrete was defective at pillar no. 4. However, the circumstances were such that this was considered acceptable. Overall, the images showed that improvement of the concrete quality was obtained.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	SYFTE OCH MÅL	1
1.3	AVGRÄNSNINGAR.....	2
1.4	GENOMFÖRANDE	2
1.5	REFERENSSKRIFTER OCH REFERENSARBETEN.....	2
2	REKAPITULATION OM CEMENTURLAKNING	5
2.1	INLEDNING	5
2.2	VARFÖR ÄR DET VIKTIGT MED TÄT BETONG I DAMMAR?	5
2.3	ÖTÄT BETONG TILL FÖLJD AV URLAKNING AV CEMENTPASTA.....	6
3	FORSHUVUDDAMMEN	9
3.1	INLEDNING	9
3.2	FORSHUVUD KRAFTSTATION	10
3.3	ARKIVMATERIAL	12
3.4	DISKUSSION OM TIDIGARE REPARATIONER	15
4	UTÖKAD FÖRUNDERSÖKNING.....	16
4.1	INLEDNING	16
4.2	NYA UNDERSÖKNINGSBORRHÅL.....	16
4.3	FÖRUNDERSÖKNINGENS MÄTPROGRAM.....	17
4.4	PELARNAS BETONGKVALITET UTFRÅN RESULTAT FRÅN FÖRUNDERSÖKNINGEN	31
5	INJEKTERINGSARBETET.....	36
5.1	INLEDNING	36
5.2	KRAV SOM STÄLLS PÅ DET FÄRDIGA INJEKTERINGSRESULTATET	36
5.3	UTRUSTNING OCH MATERIAL.....	36
5.4	UTFÖRANDE	43
5.5	ÖVRIGA ARBETEN I ENTREPRENADEN.....	51
5.6	MILJÖASPEKTER.....	51
6	UPPFÖLJNING AV INJEKTERINGSARBETET.....	52
6.1	INLEDNING	52
6.2	ÄGARENS UPPFÖLJNING.....	52
6.3	ENTREPRENÖRENS UPPFÖLJNING.....	53
6.4	UPPFÖLJNING INOM RAMEN FÖR DEMONSTRATIONSPROJEKTET	53
7	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	58
7.1	FÖRUNDERSÖKNING	58
7.2	INJEKTERING	59
7.3	UPPFÖLJNING	62
7.4	SLUTORD.....	62
8	REFERENSER.....	64

Bilagor

- A** **BESIKTNINGSPROTOKOLL**
- B** **METODBESKRIVNINGAR**

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Livslängden för vattenkraftbranschens anläggningar har av bedömare uppskattats till mellan 50-160 år. Många konstruktioner börjar därför komma upp i sådan ålder att ett ökat reparationsbehov framöver är troligt. Samtidigt visar nyligen genomförda scenariostudier i det s.k. SAME-projektet [20] att det för svensk energiförsörjning är angeläget att bibehålla vattenkraften på nuvarande nivå om 64,5 TWh. De två alternativ som står tillbuds är att bygga nytt (och lägga ner gammalt) eller att vårda de anläggningar som finns. Att bygga nytt blir kostsamt, varför det är av största vikt att dagens anläggningar underhålls på ett sådant sätt att de kan fungera i ytterligare 50 år.

Återkoppling av genomförda reparationer är viktigt för att kunna dra lärdom av sådant som har fungerat bra och sådant som behöver förbättras. I det projekt som redovisas här demonstreras nyare undersökningstekniker i fält samtidigt med att Forshuvuddammen i Borlänge har uppgraderats genom cementinjektering. Projektet har möjliggjorts genom ett samarbete mellan Vattenfall Utveckling AB (med finansiering från Elforsk), Stora Enso Energy AB och Stabilator. Studien omfattar det arbete som har gjorts för att injektera den stenkädda betongdammen.

Demonstrationsprojektet är ett led i ett pågående arbete vid Vattenfall Utveckling vilket har som mål att koppla ihop utvecklingsområdena tillståndskontroll, konditionsbedömning och livslängdsbedömning med reparationsområdet. Genom dokumentationen från projektet hoppas vi att erfarenhetsåterföring från både utförare och FoU skall komma en större skara till del.

1.2 Syfte och mål

Projektet har två infallsvinklar, varför syfte och mål har delats upp i två delar. Syftet med den första delen är att prova och demonstrera nyare borrhålsbaserade metoder för att ta fram underlag till beställare och utförare av reparationsarbeten. Syftet med injekteringsdelen är att följa upp ett större reparationsarbete på en svensk betongdamm.

Målsättningen med förundersökningsdelen är att beskriva hur det inre av betongen ser ut i en konstruktion som under lång tid har varit utsatt för cementurlakning. Arbetet omfattar att sammanställa sprickfrekvens, förekomst av större hålrum, samt att jämföra kvaliteten mellan enskilda betongpelare. Målsättningen med injekteringsdelen är att följa upp det praktiska arbetet med att genomföra en injektering. Diskussioner förs om varför oförutsedda problem uppkommit samt vilka åtgärder som har vidtagits. Vidare görs en uppföljning av de material och recept som har använts. Efter injekteringsarbetets avslut har en mindre uppföljningsundersökning gjorts där resultatet av injekteringen kontrolleras.

Den övergripande målsättningen är primärt att etablera kunskapsåterföring från utförare såväl som från senare års FoU inom undersöknings- och reparationsområdet. En sekundär målsättning är att identifiera eventuella svagheter i dagens kunskapsläge.

1.3 Avgränsningar

Arbetet har gjorts i samarbete med den entreprenör som har utfört reparationsarbetet. Störningar i normal arbetsgång har minimerats, vilket har gjort att snabba beslut många gånger behöver fattas. State-of-the-art arbeten har inte varit något mål att uppnå.

1.4 Genomförande

Projektet föregicks av en förundersökning av dammen som Stabilator gjorde under 1998. Under januari-februari 1999 fördes diskussioner mellan Stora Enso Energy och Vattenfall Utveckling om att följa upp det förestående uppgraderingsarbetet i ett demonstrationsprojekt. Stora Enso Energy genomförde entreprenadupphandling under februari – maj 1999, vilken sedermera tillföll Stabilator.

Stabilators förundersökning kom genom demonstrationsstudien att utökas i omfattning. Stora Enso Energy lät göra nya undersökningsborrhål i dammen under maj månad, vilka har följts av borrhålsundersökningar av Vattenfall Utveckling under början av juni månad.

Etablering och reparationsstart skedde i början av juni och arbetena kunde avslutas i slutet av oktober. Parallellt med dessa arbeten har Vattenfall Utveckling på plats gjort regelbundna uppföljningsmätningar av använda injekteringsbruk etc..

Efter det att injekteringarna avslutats har två nya borrhål tagits upp i en av de reparerade pelarna. Resultatet av injekteringen följdes därefter upp med nya borrhålsmätningar.

1.5 Referensskrifter och referensarbeten

Ett flertal rapporter som avhandlar genomförda injekteringsarbeten i betongdammar har använts som bakgrundsmaterial. Rapporterna sammanfattas kortfattat nedan:

- Uppföljning för kvalitetssäkring av injekteringsarbeten vid uppgradering av cementinjektering har gjorts förut. Ett tidigt exempel står att finna i arbeten på Bullerforsen 1932, då ägd av Stora Kopparbergs Bergslags AB (anläggningen var då 22 år gammal). I samband med en injektering av Svenska Diamantbergborrningsbolaget så gjordes två intilliggande borrhål före och efter injekteringen. Kärnorna undersöktes med mikroskop vid Sveriges Geologiska Undersökning [23]. Syftet var att följa upp hur det injekterade bruket trängde ut i betongen. Undersökningen visade att den gamla betongen i starkt urlakade delar innehöll kaviteter av växlande diameter (upp till 1 dm i längsta diameter). Kaviteterna hade i stor utsträckning hydraulisk kontakt med varandra. Mellan de grövre porösa partierna var betongen bättre bibehållen men även där fanns mindre hålrum med liten diameter och isolerade från varandra. SGU kunde konstatera att det injekterade cementet tydligt skilde sig från den gamla betongen genom sin vita färg. Kvaliteten hade väsentligt förbättrats: det nya

cementet hade lyckats utfylla de större kommunicerande kaviteterna och effektivt tätat dem. De fåtal öppna större hålrum som fortfarande fanns kvar antogs sakna kommunikation med de utfyllda hålrummen eller ha haft alltför trånga förbindelsekanaler. Det framgår inte av dokumentationen vilket eller vilka recept som har använts vid injekteringen.

- Anvisningar för utförande av cementinjektering i berg, upprättade av Statens Vattenfallsverk 1968 [26]. Rapporten sammanfattar en mängd praktiska erfarenheter som samlats inom Statens Vattenfallsverk under ett stort antal år fram till och med 1968. En sammanställning görs av injekteringsapparat, injekteringens utformning och injekteringsmetoder. Vidare behandlas förundersökningar, tidplanering av injekteringsarbeten, samt borrhning och förbehandling av injekteringsborrhål. Tillverkning av injekteringsbruk diskuteras, liksom injekteringens utförande samt efterkontroll och redovisning. Som titeln anvisar så behandlas inte injektering av urlakade betongkonstruktioner.
- Cementinjektering – handbok i materialteknik för injekterare, framtagen av Vattenfall Utveckling AB [12]. Handboken är sammansatt för att kunna användas av utförandepersonal och projektörer m.fl. som en handledning i materialteknik för cementinjektering. De delmaterial som används vid sammansättning av injekteringsbruk diskuteras, liksom viktiga parametrar att beakta samt något om mätteknik. Utförandetekniken behandlas inte.
- Urlakning av cementinjektering [1]. Modellförsök genomfördes av Vattenfall Vattenkraft under en åttamånadersperiod 1988 för att skaffa bättre kunskap om injekteringsbruks beständighet. Försöksresultaten visade att prover med injekteringsburk urlakades snabbt och kraftigt av rent älvvatten redan vid mycket ringa läckvattemängd. Urlakningshastigheten visade sig vara kraftigt beroende av vattencementtalet och mindre beroende av använda cementtyper. Rapporten slår fast att man vid ominjektering bör använda sig av ett bruk med lågt vattencementtal.
- Dokumentation från föryngring av betong i Älvkarleby kraftstation under 1990-91 [14]. Kraftstationen har injekterats vid ett flertal tillfällen, senast under 1987-91 då avsikten var att förlänga konstruktionens livslängd med 30 år. Vid tillfället uppgraderades konstruktionsdelar uppströms turbinerna: intagströsklar, pelarnosar, sidoväggar och frontbalkar. Kraven på arbetet översattes i att hållfastheten hos den injekterade betongen skulle uppgå till minst K200 och vattenförlusten mätt i borrhålen fick inte överstiga 1,0 l/m·min·MPa. Det injekteringsbruk som användes var uteslutande baserat på Cementa injekteringscement. Grundreceptet var vct 0.6 och 3 % flytmedel V33 beräknat på cementvikten. I något fall med stora bruksförluster förtjockades bruket genom att reducera flytmedelsmängden och sänka vct. Bruket rödfärgades för att underlätta utvärderingen av uppnått injekteringsresultat. Injekteringarna utfördes huvudsakligen genom hammarborrade hål Ø 48 mm och mekaniska enkelmanschetter, med ett max tillåtet injekteringstryck om 0,3 MPa (ca 3 bar) mätt vid manschettens nivå. I det fall ett hål skulle stöta på armering fanns det krav från ägaren om att omedelbart stoppa borrhningsarbetet, och borrhning av ett nytt hål i dess

omedelbara närhet (det senare gällde ej om armeringen påträffades på större djup). Vid sammanställning av arbetet konstaterades att fyllnadsgraden för injekterade konstruktionsdelar i stationens respektive aggregat varierade mellan 1.4 och 3.0%.

- Cementinjektering i äldre sten- och betongdammar, framtagen av Harald Eriksson (Sydkraft) [6]. Denna VAST-rapport beskriver kortfattat vanliga skador på betongdammar, och det konstateras att cementinjektering är en kostnadseffektiv metod för att höja en skadad konstruktions kondition. Enligt författarens erfarenhet så är omfattningen av borringar av avgörande betydelse för slutresultatets kvalitet. Därför bör borrar kapaciteten vara dimensionerad så att borrar kapaciteten blir hög, t.ex. hammarborr med 4-skärig krona Ø65 mm och försedd med både luft- och vattenspolning. För klen borrarutrustning ökar bl.a. risken för fastborring, speciellt i dålig betong. Risken kan minskas genom att säkerställa väl tilltagen luftkapacitet. Författaren anger att vid ”normaldålig” betong erfordras vanligen tre borraromgångar varvid den sista omgångens hål blir mera lokalt anpassade till ställen där läckage och håligheter tidigare har uppstått.

2 REKAPITULATION OM CEMENTURLAKNING

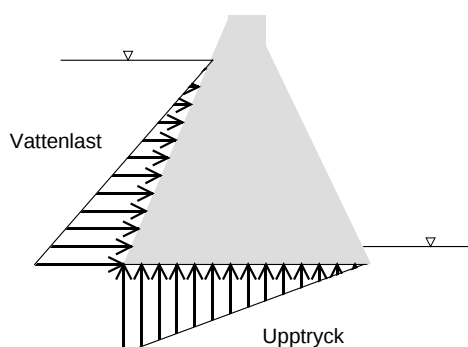
2.1 Inledning

Ett injekteringsbruks inträngningsförmåga är en nog så viktig egenskap för att uppnå ett gott resultat, men det hjälper trots allt föga om slutprodukten läcker vatten eller förstörs med tiden. Det finns därför en mängd krav som måste ställas på den hårdnade produkten, och som i mångt och mycket samverkar [12]. Täthet är det första grundkravet och beständighet det andra.

För en betongdamm så kan urlakning ske för dels cementpastan i själva dammkroppen och dels för den tätskärm av injekteringscement som finns under själva dammen.

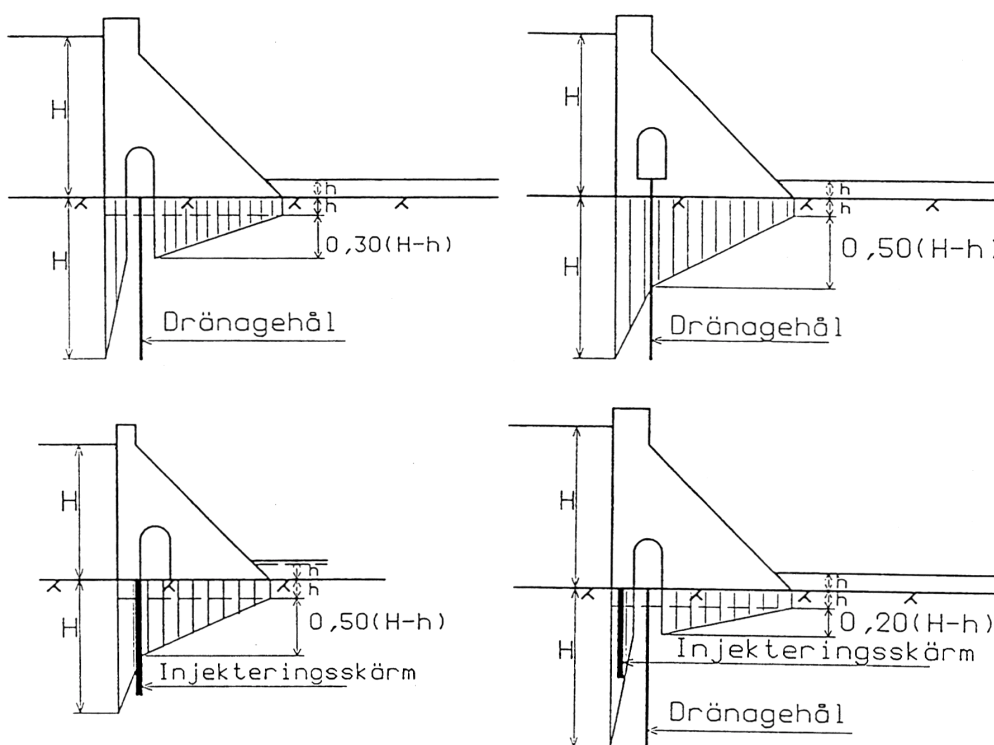
2.2 Varför är det viktigt med tät betong i dammar?

Vikten av att säkerställa en tät damm förstås lätt genom att betrakta vattentryckets inverkan på dammens stabilitet. För gravitationsdammar är vattentrycket i eller under en damm av lika stor vikt som det utvändiga vattentrycket för dammens stabilitet mot vältnings och glidning. Figur 2.1 visar en skiss över hur vattentrycket verkar på en gravitationsdamm.



Figur 2.1 Vattentryckets verkan på en gravitationsdamm. Den horisontella lasten benämns vattenlast och den uppåtriktade lasten benämns upptyck. Efter [10].

Upptycket kommer att bidra negativt till dammens stabilitet genom att öka det stjälpande momentet. Genom att installera en tätskärm under dammen och genom att dränera läckage så kan upptycket minskas. I RIDAS anges fyra alternativa designkriterier för att med hjälp av en injekteringsskärm och dränering minska upptycket under betongdamm, se Figur 2.2.



Figur 2.2 Fyra olika tillvägagångssätt för att med hjälp av en injekteringsskärm och dränering minska upptrycket under betongdammar [24]. I det fall som tätskärmens funktion försämrats så kommer man att närma sig en situation med fullt verkande upptryck.

Många av de första gravitationsdammarna konstruerades med invändig dränering. Detta tjänade två syften: dräneringen skulle avskära läckage så att dessa inte kom ut på luftsidan, och den skulle reducera det invändiga vattentrycket. Till följd av kalkurlakning och/eller injekteringar kommer dräneringssystemet att efterhand bli allt mindre effektivt och i sådana dammar kan därför en ökning av upptrycket ske med åren. Denna åldringsprocess leder till en reduktion av dammens säkerhet genom att ge en ökad belastning [7]. I och med att vatten kan passera genom betongen så förändras tryckgradient från dammen uppströmssida till nedströmssida vilket ökar det stjälpande momentet, d.v.s. säkerheten mot vältnings- och glidning minskar. I det fall som en genomgående spricka uppkommit så skall fullt upptryck räknas längs sprickans längd.

2.3 Otät betong till följd av urlakning av cementpasta

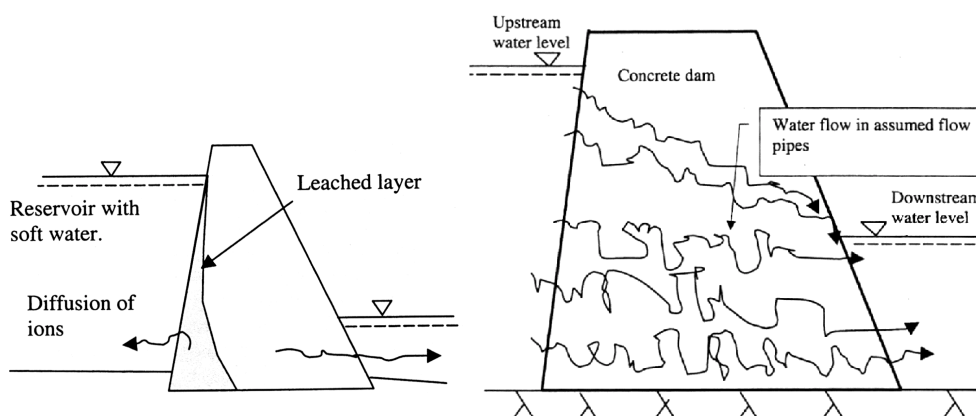
Cementpasta kan brytas ned på en rad olika sätt [13]. De mekanismer som kan vara att räkna med i damminjekteringssammanhang är främst urlakning och sulfatreaktioner. Urlakning har sin orsak i att den relativt lösliga kalciumhydroxid som ingår i den hårdnade cementpastan löses upp av vatten som strömmar förbi eller genom en otät pasta varvid ett underskott av kalciumhydroxid uppstår. Detta underskott medför att CSH-

gelen¹, d.v.s. den hårdnande produkt som till största delen bidrar till cementpastans hållfasthet, spjälkar av ny kalciumhydroxid och så småningom förstörs [9]. En principiell skiss över hur urlagning kan ske i en betongdamm visas i Figur 2.3 och i Figur 2.4 visas ett par exempel med synbara kännetecken av pågående urlakning.

Cementpastans vct, permeabilitet och vattnets beskaffenhet inverkar på cementpastors beständighet mot urlakning. För vct är beroendet starkt, exempelvis visar laboratorieförsök att en ökning av vct från 0.3 till 0.5 ökar urlakningen med 90% [1]. Permeabiliteten för den hårdnade cementpastan beror huvudsakligen på vct. En kritisk gräns ligger runt vct 0.7. Över denna gräns blir kapillärporerna i pastan sammanhängande och medger genomströmning av vatten och därigenom en ökad urlakningsrisk [21]. Urlakningens omfattning ökar med ett vattnes mjukhet, vilket har betydelse eftersom svenska älvvatten i allmänhet är mjukt (kalkfattigt).

Sulfatangrepp förorsakas av att sulfater i läckvatten reagerar med aluminatföreningar i pastan. Reaktionsprodukterna är starkt svällande vilket leder till att cementpastan bryts ned [9]. Kriterierna för sulfatangrepp följer i stort sett samma mönster som för urlakning. Dock är detta en kemisk reaktion som kan förhindras genom att använda ett sulfatresistent cement. Detta angrepp är i allmänhet inte aktuellt för älvvatten.

För att skaffa sig kontroll över läckage och läckagevägar under en dammkonstruktion så tätas i regel berggrunden med hjälp av en tätskärm av injekteringscement. Urlakning av en skärm kan uppstå genom utförandemissar, bristfällig planering, eller uppkomst av sprickor som öppnar upp läckvägar.



Figur 2.3 Den vänstra figuren visar cementurlakning från en betongdamm genom dels diffusion och dels konvektion. Den högra figuren visar hur urlakning i en otät damm kan ske i anslutning till läckagevägar där vatten transporteras relativt "snabbt". Båda figurerna har hämtats från [5].

¹ Kalciumsilikahydrat.

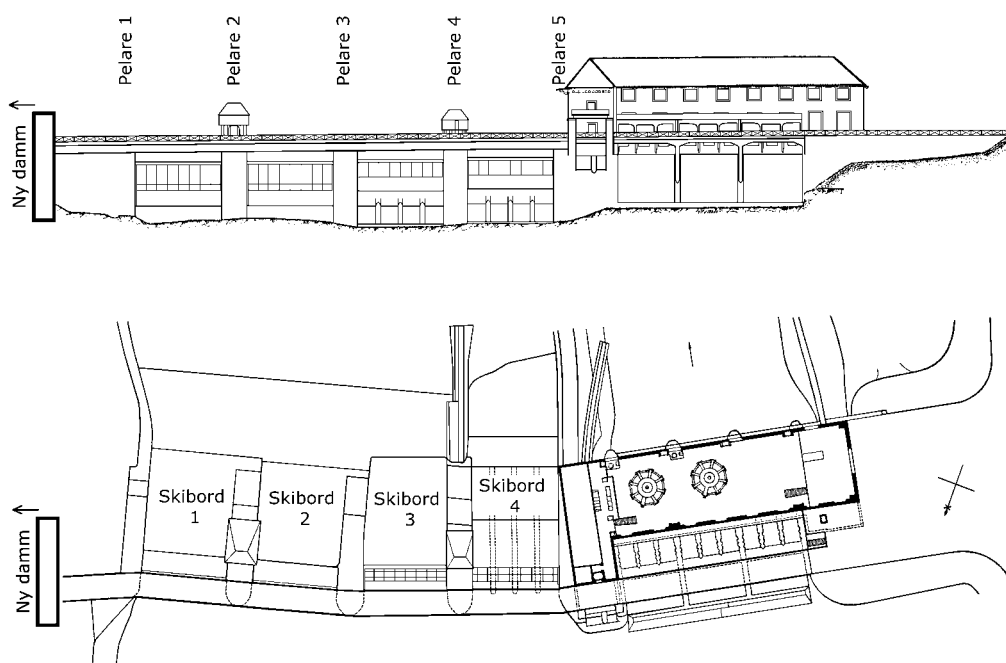


Figur 2.4 Två exempel på cementurlakning. I den vänstra bilden har kalk, som i lösning transporterats ut genom en spricka i betongen (en sluttande vägg), lösts ut vid kontakt med luftens syre och bildat en stalaktit. I den högra bilden har läckage skett genom otäta fogar i en betongpelares steninklädnad.

3.2 Forshuvud kraftstation

Forshuvud I uppfördes under åren 1917-21 (Figur 3.2). Kraftstationen byggdes då med två turbiner och förbereddes för ytterligare en turbin. Den tredje turbinen installerades under 1928-29. Byggentreprenör under 1917-18 var Skånska Cementgjuteriet, därefter skedde resterande arbeten i egen regi [3]. Kraftverkets turbiner utnyttjar en fallhöjd om 10,7 meter och drivvattenföringen är 220 m³/s.

Ett nytt verk, Forshuvud II, togs i drift under 1990 på motsatta älvstranden. Forshuvud I har därför stängts under 1998 efter att ha varit i drift sedan 1921. Den gamla dammen med sina luckor kommer att ingå som en del i den nya kraftstationen. Inför avställandet har det funnits behov av att göra vissa uppgraderingar för att säkerställa anläggningens stabilitet och säkerhet under luckornas resterande livslängd. Dessa arbeten har genomförts under 1998-1999.



Figur 3.2 Skiss över Forshuvuds kraftverk, gamla delen (del av ritning från Stora Enso Energy). Pelarna har numrerats 1-5. Skala 1:1400.

3.2.1 Forshuvud ur ett kulturhistoriskt perspektiv

Riksantikvarieämbetet har, tillsammans med Vattenfall och Svenska Kraftverksföreningen, upprättat en riksomfattande förteckning över alla landets vattenkraftverk. Efter bedömning utifrån ett antal kriterier har ett förslag lämnats över de kraftverk som är kulturhistoriskt mest intressanta att bevara för framtiden [3]. Forshuvuds kraftstation representerar ett av kraftverken i den kategori som omfattar "Moderna låg- och mellantrycksverk med en effekt > 3MW". Ett utdrag från författarnas kommentarer om kraftverket återges nedan:

Kraftverket är primärt tillkommet för att förse Bergslagens järnverk vid Domnarfvet med kraft. Forshuvudforsen I var det första svenska storkraftverket med låg fallhöjd, konstruerad efter generella hydrodynamiska och maskintekniska principer som fortfarande gäller. Verket utrustades efter amerikansk och schweizisk förebild med stora, vertikalaxlade maskinaggregat. De enhjuliga turbinerna med den då oerhörda slukförmågan 70 m³/s per hjul, fick sin vattentillförsel strömningsriktigt ordnad i spiralformade trycksumpar. Med moderna vattenvägar, stora enhjuliga turbiner med högt specifikt varvtal samt direktkoplade, kapslade generatorer blev Forshuvudforsen I det fjärde svenska pionjärverket i Bergslagens regi efter Domnarvet 1878, Kvarnsveden 1900 och Mockfjärd 1911.

Ett avtal har nu tecknats mellan Länsantikvarien i Dalarna och Stora Enso Energy, vilket innebär att det gamla kraftverket kommer att bevaras för framtiden. Som ett led i detta göts intagen igen under vårvintern 1999.

3.2.2 Teknisk beskrivning

Forshuvud I har en 125 meter lång och 15 meter hög massivdamm av stenkäddad betong. Utskoven består av två stora och två mindre sköldvalsar som manövreras från spelhus på betongbockar. Maskinhuset har en underbyggnad av betong, medan överbyggnaden är byggd av tegel.

Regleringsdammens uppbyggnad finns beskriven i en av Svenska Vattenkraftföreningens publikationer [25]. Av beskrivningen framgår att i huvudsak användes en betongblandning om 1:4:6² (stampbetong), men under skibordens stenkäddning finns även ett 0.7 m tjockt lager (inklusive stenkäddningen) med en fetare blandning om 1:2,5:3 (gjutbetong). Varje sten har förankrats i betongen med 55 cm järn. Det fetare betonglagret är i sin tur förankrat med järn som sträcker sig in i normalbetongen. Betongen i dammen utgör ett exempel på vad Harald Eriksson i [28] kallar blötbetongepoken. Betongkvaliteten är typisk för svenska 20-talsdammar, varvid man började med att armera konstruktionerna. Generellt så separerade denna betong kraftigt i formen och den blev kvalitetsmässigt mycket ojämn och dessutom otät.

Bergbotten under dammen har försetts med keramiska dräneringsrör. I dammpelarnas främre delar (pelarnos) har vertikala dräneringsrör lagts in. Dräneringsrörens funktion är att avskära läckage och att reducera det invändiga vattentrycket.

Dammens samtliga pelare och skibord är åtskilda med rörelsefogar. Tätningen har åstadkommit med bockade blyplåtar. Fogarna har därefter fyllts med inlagda lager av asfaltindräkt juteväv. Fogar på uppströmssidan har dessutom gjutits igen med asfalt och diktats med bly.

² Skrivsättet var vanligt förekommande förr och användes för att ange den relativa fördelningen av cement, fin ballast (sand) respektive grov ballast (sten).

3.3 Arkivmaterial

Dammens betongkonstruktion har reparerats med injektering vid två tillfällen, dels 1935 fjorton år efter byggnationen, dels 1985-86 i samband med att en skada uppstod på ett av dammens utskov. Arkivmaterial återges även från den förundersökning av betongens kondition som Stora Enso Energy lät göra under 1998.

3.3.1 Reparationsarbeten 1935

Vid ett par tillfällen under de första 10 driftsåren lossade stenar från stenbeklädningen på ett av skiborden [27]. Orsaken ansågs bero på att den bakomliggande betongen var alltför porös och innehöll stora håligheter och för att undvika fortsatta problem beslöt ägaren 1935 att skibordet skulle uppgraderas med cementinjektering. Efterhand utvidgades arbetet till att omfatta partier på hela dammen så att i) samtliga trösklar injekterades i varierande omfattning, ii) samtliga pelare injekterades i anslutning till valsarnas falsar samt inuti pelarnas vertikala ventilationskanaler, och iii) ledmuren injekterades i hela sin längd.

Totalt injekterades 141,5 ton cement i 606 borrhål (892 m). Det är inte känt vilket vct som har använts. Borrhålen borrades i genomsnitt till 1,5 m djup vilket ger ca 234 kg cement per hål (eller 159 kg per meter), se Tabell 3.1. Noteras kan att det har borrats ett stort antal hål i pelare 4. Därefter följer pelarna 3, 5, 2 och 1. Injekterad mängd cement följer denna ordning, vilket ger en antydning om pelarnas betongkvalitet. Av Figur 3.3 framgår hur borr- och injekteringsplanen såg ut för skibord 3 och för pelare 4.

Tabell 3.1 Sammanställning av cementåtgång efter avslutad injektering [27]. Sortering har gjorts efter de konstruktionsdelar som har tagit störst mängd bruk. Se Figur 3.2 för översikt.

Konstruktionsdel	Antal borrhål	Antal borrhål-meter	Cement [Kg]	Cement [Kg/hål c:a]	Cement [Kg/m hål]
Damppelare 1	8	16	3020	377	189
Damppelare 2	16	32	5286	329	165
Damppelare 3	62	81,6	13584	453	166
Damppelare 4	116	140,4	29083	252	207
Damppelare 5	34	44	12181	359	277
Skibord 1	11	16,5	2039	185	124
Skibord 2	13	19,3	2893	222	150
Skibord 3	234	319,2	30483	130	95
Skibord 4	5	7	841	168	120
Ledmuren	107	215,8	42119	395	195
Summa	606	891,8	141529	234	159

Längre fram i rapporten så har bruksåtgången för 1999 års injektering tagits fram i form av en beräknad fyllnadsgrad. Utifrån den angivna åtgången i Tabell 3.1 tillsammans med en antagen densitet på bruket 1662 kg/m^3 och ett antaget vct på 0,7 så kan cementåtgången beräknas.

gången översätts till volym³. Därmed låter sig fyllnadsgraden från 1935 års injektering skattas. Beräkningen grundar sig på samma pelarvolym som senare används i Kapitel 5.

Tabell 3.2 Fyllnadsgrad i pelare 1-5 från 1935 års injektering (jämför Tabell 5.6).

Pelare	Bruksåtgång [m ³]	Pelarvolym [m ³]	Fyllnadsgrad [%]
1	3,1	1080	0,3
2	5,4	1440	0,4
3	13,9	1350	1,0
4	29,7	1350	2,2
5	12,5	675	1,8

3.3.2 Reparationsarbeten 1985-86

1985 inträffade en incident som medförde att stenbeläggningen för en utskovströskel lossnade och spolades bort. Som mest uppgick läckaget till 60-70 m³/s. Genombrottet kunde snabbt stoppas med åtgärder från stationspersonalen, men för att säkerställa den framtida stabiliteten beslöt man från ägarens sida att genomföra en uppgradering genom cementinjektering. Borrkärnor från en förundersökning visade nämligen att betongen var urlakad och hade större håligheter.

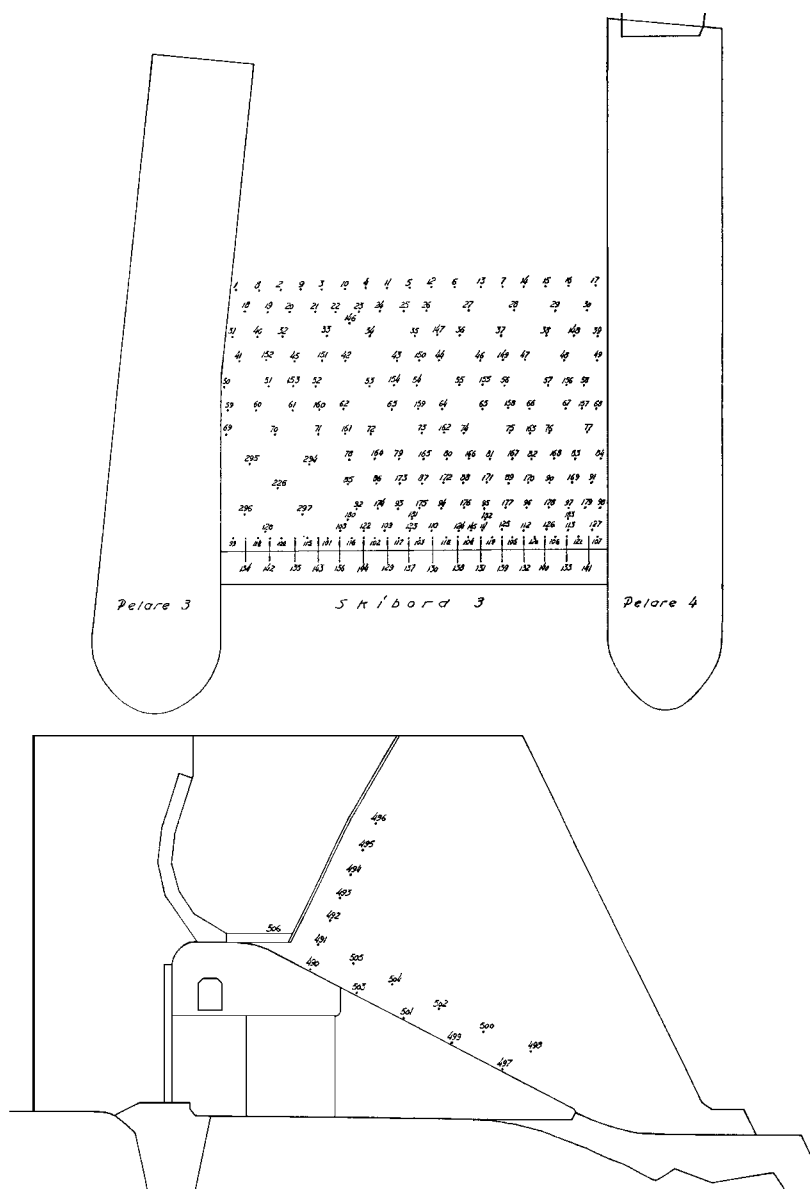
Injekteringsarbetet genomfördes av Skanska under sommaren 1986. Samtliga pelare ingick. Efter arbetets avslut hade man injekterat totalt ca 170 ton cement vilket motsvarar 25 % större mängd än vad som injekterades 1935.

Som redan nämnts så har bruksåtgången för 1999 års injektering tagits fram i form av en beräknad fyllnadsgrad. Liksom i tidigare så har, åtgången i Tabell 3.3 tillsammans med en antagen densitet och vct översatts till volym³. Därmed kan fyllnadsgraden från injekteringen skattas (samma pelarvolym som senare används i Kapitel 5).

Tabell 3.3 Sammanställning av bruksåtgång för pelare 1-5 efter avslutad injektering 1986 samt beräkning av fyllnadsgrad.

Konstruktionsdel	Cementåtgång [kg]	Bruksåtgång [m ³]	Pelarvolym [m ³]	Fyllnadsgrad [%]
Pelare 1	23125	23,6	1080	2,2
Pelare 2	42525	43,5	1440	3,0
Pelare 3	21287	21,8	1350	1,6
Pelare 4	26712	27,3	1350	2,0
Pelare 5	11700	12,0	675	1,8
Summa	138249	-	-	-

³ Detta vattencementtal skall endast ses som ett tankeexperiment, d.v.s. genom att använda samma vct för de tre injekteringarna -35, -86 och -99 så kan fyllnadsgraden beräknas på samma sätt. I realiteten så användes 1935 förmodligen ett vct på ca 2,0.



Figur 3.3 Exempel på borr- och injekteringsplan från 1935-års reparation: skibord 3 och pelare 4 (skala 1:330 respektive 1:275). Arbetsgången framgår av numreringen av borrhål. Uppenbarligen har kvaliteten varierat i olika delar av skibordet. Skibordets bredd är 16 meter. För uppströms-sidan och nedströmssidan av skibordet har 33 hål respektive 17 injekteringshål borrats, vilket ger mellan 1 och 2 borrhål per meter. Injektering gjordes även av pelarnos (framgår ej av ritningar). Efter del av ritning från Stora Enso Energy.

3.3.3 Förundersökning 1998

Inför upphandlingen av Forshuvuddammens uppgradering lät Stora Enso Energy göra sex borrhningar med kärnprovtagning. Resultatet visade genomgående att betongen var i dåligt skick. Det är idag oklart var på konstruktionen som dessa kärnor borrades.

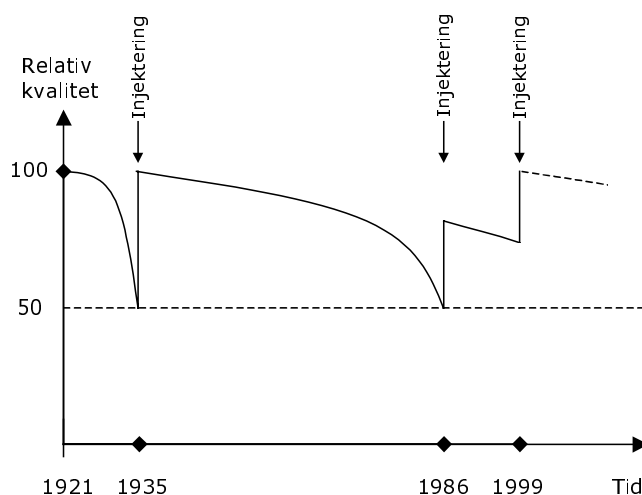
3.4 Diskussion om tidigare reparationer

Tidsperspektivet från det att dammen byggdes fram till idag sammanfattas i Figur 3.4. Observera att figuren endast skall ses som en principiell illustration över betongens nedbrytningsförlopp. Figuren visar att nedbrytningen (urlakning) gick fort efter det att dammen stod färdig 1921. 14 år efter uppförandet initierades den första injekteringen till följd av skador på ett skibord. Därefter dröjde det ytterligare 51 år innan det återigen uppstod en skada vars orsak berodde på urlakning. Den injektering som nu har genomförts under 1999 skiljer sig från de två tidigare genom att den inte har initierats av en skada utan för att ägaren långsiktigt önskar upprätthålla dammsäkerheten.

Förundersökningarna från både 1935 och 1985 visade att det fanns stora håligheter i betongen. Någon kvantifiering av vad som anses vara "stort" har emellertid inte gjorts och det är därför svårt att uttala sig om hur stora hålrummen har varit. Harald Eriksson anger emellertid i [28] att 20-talsbetong kan ha upp till knytnävsstora hålrum.

Förekomst av rörelsefogar bör föranleda en särskild utredning för att säkerställa dess funktion även efter injektering. Om tillräcklig mängd distansmaterial finns kvar bör injekteringen kunna utföras utan särskilda åtgärder. Om däremot distansmaterialet av någon anledning saknas helt eller delvis bör cementinjekteringen föregås av injektering av fogen med ett flexibelt material [14]. Det har inte framkommit några uppgifter om att problematiken har uppmärksamats vid 1985 års injektering.

Det finns vissa likheter med det uppgraderingsarbete som har genomförts på Älvkarleby Kraftstation (se avsnitt 1.5). Båda kraftverken har byggts ungefär samtidigt.



Figur 3.4 Utförda injekteringar som funktion av tid efter dammens uppförande. Diagrammets utgör en principiell illustration av förloppet. Det mått som används för att beskriva betongens kvalitet har därför ingen egentlig betydelse.

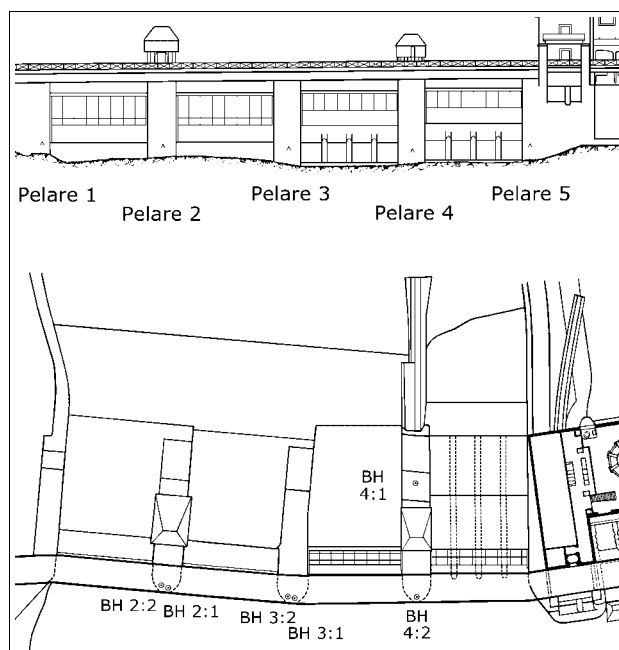
4 UTÖKAD FÖRUNDERSÖKNING

4.1 Inledning

Stabilators förundersökning har genom demonstrationsstudien ökat i omfattning. Sex nya undersökningsborrhål togs upp under maj månad, vilka följdes av borrhålsundersökningar under juni månad. Den utökade förundersökningen har begränsats till pelare 2, 3 och 4. Borrningsarbetet beskrivs under avsnitt 4.2 och mätprogrammet under avsnitt 4.3. Det senare omfattar borrkärnekartering och ett mätprogram baserat på insamling av information i tre steg. I steg 1 filmades borrhållsväggarna för att studera sprickor och hålrum utmed borrhålets längd. I steg två gjordes en s.k. caliperloggning av borrhålen för att uppskatta hur djupt in i konstruktionen som hålrum och öppna sprickor sträcker sig. Det sista steget omfattade loggning med radarsond där betongen i anslutning till borrhålen studeras. En sammanställning av resultaten i görs i avsnitt 4.4. Mätkostnaderna anges i avsnitt 4.5.

4.2 Nya undersökningsborrhål

De sex nya borrhålen har borrats i pelare 2, 3 och 4 av Kärnborrning AB (Drillcon) i Nora. Borrhålsdiametern är Ø 56 mm. Hålens placeringen framgår av Figur 4.1.



Figur 4.1 Placering av undersökningsborrhål. (del av ritning från Stora Enso Energy). Pelarna har numrerats 1-5. Skala 1:1400.

Fyra kärnor har borrats ut i pelare 2 och 3. Två borrhål i respektive pelare har lagts intill varandra i pelarnas med 1 meters mellanrum. Därmed kan de eventuella variationer som

finns i betongen mellan näraliggande hål studeras. I pelare 4 har två kärnor tagits ut ur borrhål placerade i pelarnas respektive pelarbakdel, vilket möjliggör att betongkvaliteten mellan uppströms- och nedströmssida kan jämföras. I det senare fallet görs dessutom ett test med mellanhålsmätningar med borrhålsradar. Information om borrhålen har sammanställts i Tabell 4.1.

Tabell 4.1 Samlad information om undersökningsborrhålen i Figur 4.1. Vattenytans läge har hämtats från borrhålsfilmningen (efter en stabiliseringsperiod om flera dagar). För två av borrhålen fick borrhäringsarbetet avbrytas p.g.a. ras, vilket gör att dessa inte når ned till berg.

BORRHÅL	LÄNGD [m]	KOMMENTAR
BH 2:1	15,8	Endast kärnprovtagning, bergkontakt 15,85 m.
BH 2:2	14,7	Vattenyta 11,65 m, borrhärningen fick avbrytas innan bergkontakt nåddes till följd av ett ras.
BH 3:1	18,6	Vattenyta 13,85 m, bergkontakt 17,75 m.
BH 3:2	18,5	Vattenyta 14,05 m, bergkontakt 17,65 m.
BH 4:1	11,5	Borrhärningen fick avbrytas innan bergkontakt nåddes till följd av ett ras. Hålet når inte ner till vattenytan.
BH 4:2	16,6	Vattenyta 5,2 m, bergkontakt 16,3 m.

4.3 Förundersökningens mätprogram

Metoder för oförstörande provning av betong är i flera avseenden lämpliga att använda vid tillståndsbedömning av vattenbyggnadsbetong och det finns idag ett flertal olika metoder som går att handla upp av mätkonsulter på den svenska/nordiska marknaden. Metoderna baseras på olika fysikaliska principer, och mäter t.ex. elektriska, elektromagnetiska, seismiska, akustiska eller radiologiska egenskaper hos betongen.

I en nyligen genomförd studie har en bedömning gjorts över vilka metoder som kan vara lämpliga att välja med utgångspunkt i en förväntad skada [4]. Fem olika typer av skadefall diskuteras (i samtliga fall med mer än en problemställning för varje skadefall). Dessa är mätning av sprickor, mätning av spjälkning och delaminering, mätning av hålrum och inneslutningar, uppföljning av utförda reparationer, och mätning av betongtjocklek. Då en metod skall väljas så är det emellertid förutom typ av skada också viktigt att känna till omständigheter som kan komma att påverka möjligheten till att genomföra en undersökning med bra resultat, t.ex. den skadade konstruktionsdelens åtkomlighet. En svåråtkomlig konstruktionsdel kan medföra att indirekta mätningar behöver göras. Andra yttre faktorer är konstruktionens tjocklek, över eller under vatten, armering, råheten hos betongens ytor, betongens sammansättning, fuktinnehåll, inklädning och möjlighet till lägesbestämning.

I Forshuvud är det framförallt svårigheten att komma intill pelarsidor och betongens steninklädnad som har varit begränsande faktorer vid valet av undersökningsmetoder. Eftersom målsättningen har varit att beskriva hur betongen ser ut vad gäller sprickfre-

kvens, förekomst av större hålrum, och kvalitetsvariationer mellan enskilda betongpelare så har valet fallit på borrhålsbaserade metoder.

Borrhålsfilmning med teknik motsvarande det japanska BIP-systemet har inte tidigare använts i Sverige för betongundersökningar, men den höga upplösningen på bilderna tillsammans med en korta mättider gör tekniken intressant att använda i både små och stora projekt. Metoden har valts för att kunna studera de områden som vid kärnborrning ger kärnförluster. Bilderna ger dessutom en möjlighet till att studera den inre betongens allmäntillstånd samt kvarvarande rester från tidigare utförda injekteringar.

Loggning med en calipersond är en traditionell metod för att ta fram information om ett borrhåls verkliga diameter. I Forshuvud har metoden använts för att kvantifiera hålrum.

Borrhålsradar kan användas som hjälpmedel för att lokalisera och orientera sprickzoner och lagerföljder mellan olika bergarter. I dammsammanhang används borrhålsradar även för att kartera inre erosion i fyllningsdammar. I forshuvud har syftet med radarmätningar varit att studera hur betongen ter sig i konstruktionen i anslutning till borrhålen.

Det mätprogram som har valts baseras således på insamling av information i tre steg. I steg ett filmas borrhålsväggarna för att studera sprickor och hålrum utmed borrhålets längd. I steg två görs en caliperloggning för att uppskatta hur djupt in i konstruktionen som hålrum och öppna sprickor sträcker sig. Det sista steget omfattar loggning med radarsond där betongen i anslutning till borrhålen studeras.

Parallellt med borrhålsmätningarna har en borrhålskartering gjorts enligt Vattenfalls riktlinjer. Av kostnadsskäl valdes att göra mätningar i fem av de sex borrhålen. Det sjätte borrhålet avsattes som reserv.

4.3.1 Borrhålskartering

Inledning

Inför injekteringsarbeten i berg har man traditionellt gjort relativt omfattande förundersökningar av bergets kvalitet genom kärnborrning. Den ökade kännedom om berget som en genomgång av kärnorna ger gör att det går att bättre anpassa injekteringsarbetet med hänsyn till verkliga förhållanden, d.v.s. typ av bruk, injekteringstryck och indelning i etapper. Motsvarande information om en betongkonstruktions kondition ger god hjälp för att avgöra om en injektering är nödvändig överhuvudtaget, eller för att vid injektering planera hur arbetet skall utföras.

Genomförande

Borrningsarbetet av de sex undersökningshålen har inte varit helt problemfritt. Som framgick av Tabell 4.1 så har det inte gått att borra ned till berg i alla hålen.

Borrkärnekarteringen har gjorts enligt Vattenfalls riktlinjer⁴. Informationen från karteringen har sammanställts i diagramform med hjälp av ett framtaget Excel-makro⁵. Vid kartering indelas betongen efter en okulär bedömning i sex olika kvalitetsklasser, där klass 1 är mycket bra betong och klass 6 mycket dålig betong (se Tabell 4.2). Dessutom noteras mängd av gammalt injekteringsbruk, mängd sparsten, och mängd armering.

Det har tyvärr visat sig att kärnorna efter borring inte har lagrats i lådor på bästa sätt, vilket har fått till följd att lägesbestämningen i besiktningsprotokollen inte stämmer fullt ut (för att säkerställa att kärnorna lagras så bra som möjligt bör de riktlinjer som aviseras under not 7 användas). En mycket god lägesbestämning finns dock i resultatet från borrhålsfilmningen. Utskrifter har kunnat användas parallellt med karteringen av kärnorna, vilket har gjort att osäkerheter har följts upp.

Tabell 4.2 Förklaring till de sex olika kvalitetsklasser som används vid Vattenfalls klassificering av kvaliteten hos betongkärnor. Förekomst av sparsten och kärnförlust kommer att hamna i klass 1 respektive klass 6.

KLASS	BESKRIVNING
1	Bra betong, homogen och helt fri från håligheter och större porer
2	Bra betong, relativt homogen och fri från håligheter, dock en del större porer
3	Medelgod betong, dock en del håligheter och större porer
4	Mindre god betong, ej vattentät, större håligheter förekommer
5	Dålig och mycket otät betong, mycket håligheter och porös
6	Usel betong, håller knappast ihop

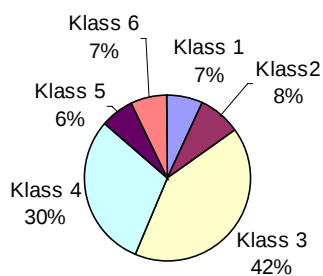
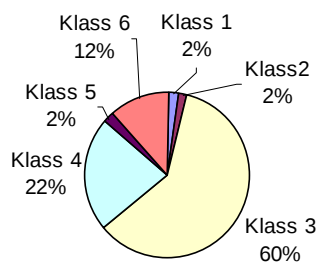
Resultat

Besiktningsprotokollen från karteringen finns i Bilaga A. En sammanställning i diagramform redovisas i Figur 4.2 - Figur 4.4. En grov jämförelse mellan borrhålen kan göras genom att jämföra andelen betong i klasserna 1-3 med andelen i klasserna 4-6. Precis som förväntat så uppvisar betongen i de intilliggande borrhålen 2:1 och 2:2 respektive 3:1 och 3:2 jämförbar kvalitet. Kvaliteten i pelarnas för pelare 3 är bättre än den i pelare 2 och 4. Betongkvaliteten är likvärdig för de två senare.

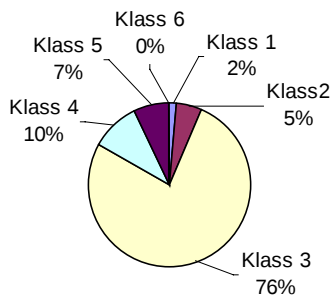
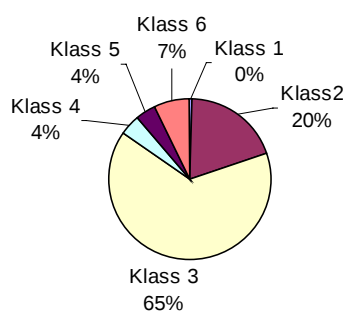
Vid jämförelse mellan pelarnas respektive pelarbakdel för pelare 4 så visar det sig att det finns tämligen stora kvalitetsskillnader. Det tre första klasserna står för 68 % av kärnan från uppströmssidan och för 93 % av kärnan från nedströmssidan. Detta är en konsekvens av att vattennivån i betongen sjunker kraftigt från uppströmssidan till nedströmssidan (se Figur 4.18), och därmed minskar exponeringen för urlakning med avståndet från uppströmssidan.

⁴ Råd och riktlinjer för hantering av borrkärnor och metodik för klassificering kommer att publiceras i en handbok i Elforsks rapportserie under 2001 [8].

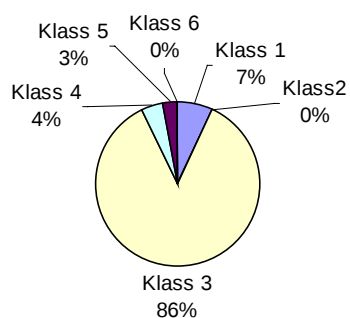
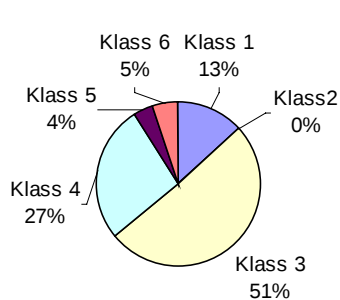
⁵ Makrot finns tillgängligt via Betongteknik vid Vattenfall Utveckling AB. Information om makrot kommer även att finnas i den handbok som omnämns i not 4.

Kärnklassificering BH 2:1**Kärnklassificering BH 2:2**

Figur 4.2 Besiktningsprotokoll för kartering av borrhäns från borrhål 2:1 och 2.2 (för lokalisering se Figur 4.1). Besiktningsprotokollen återfinns i Bilaga A.

Kärnklassificering BH 3:1**Kärnklassificering BH 3:2**

Figur 4.3 Besiktningsprotokoll för kartering av borrhäns från borrhål 3:1 och 3.2 (för lokalisering se Figur 4.1). Besiktningsprotokollen återfinns i Bilaga A.

Kärnklassificering BH 4:1**Kärnklassificering BH 4:2**

Figur 4.4 Sammanställning av besiktningsprotokoll från karteringen av borrhäns från borrhål 4.1 och 4:2 (för lokalisering se Figur 4.1). Besiktningsprotokollen återfinns i Bilaga A.

4.3.2 Borrhålsfilmning

Inledning

Tekniken för borrhålsfilmning beskrivs i Bilaga B1. För mätningarna har en utrustning från japanska Raax Ltd använts: BIPS (Borehole Image Processing System). Systemet producerar digitala färgbilder av borrhålsväggen med en hög bildupplösning.

Genomförande

Filmningen genomfördes utan problem för samtliga fem borrhål (Figur 4.5 visar ett fotografi från mätarbetet). Totalt samlades 76 filmmeter in. Vald upplösning var 1 millimeter steghastighet och 360 pixel per varv, vilket gav en kontinuerlig loggningshastighet av 1,5 meter per minut.

Vid utvärdering av resultaten så kan bilderna presenteras på två sätt: antingen projicerade på en cylinder där borrhålets ideala form kan återskapas, eller projicerade på en yta i planet där bilden viks ut i planet. I det förra fallet kan bilderna roteras runt cylinderns axel, vilket gör att det går att framhäva vissa strukturer, t.ex. ett hålrum.



Figur 4.5 Fotografi från mätningar vid Forshuvud i juni 1999. Stativet styr sondens väg så att den ligger väl centrerad i borrhålet.

Resultat

Bildmaterialet från filmningen visar överlag god kvalitet och ger en bra överblick av betongens status innan 1999 års förnyelseinjektering påbörjades. Det finns möjlighet till ytterligare högre bildkvalitet, med samtidigt ökade mättider (720 pixel per varv och 0,5 mm steghastighet). En miss i kommunikationen med den konsultfirma som utförde mätningarna gjorde att upplösningsfrågan aldrig kom att diskuteras.

Med utgångspunkt från Harald Erikssons klassificering av betongkvaliteter utifrån byggnadsår så tillhör Forshuvud, som redan nämnts, den s.k. blötbetongepoken. Användan-

det av armering var således helt nytt. Betongen separerade ofta kraftigt i formen och kvaliteten blev ojämn, och det förekommer knytävsstora hålrum. Innan undersökningen genomfördes befarades därför att det fanns gott om hålrum och sprickor i betongen, men bilderna visar att så inte är fallet. En klassificering av hålrummen har gjorts utifrån bildmaterialet:

Klass A	1-3 cm
Klass B	3-5 cm
Klass C	5-10 cm
Klass D	10-15 cm
Klass E	15-20 cm

När det gäller små håligheter motsvarande klass A så är skillnaderna mellan betongen i pelarnas uppströmssida små. I genomsnitt finns det en sådan hålighet per längdmeter, men i praktiken så förekommer de koncentrerade till vissa partier i pelarna. Håligheter motsvarande klasserna B - D förekommer endast sporadiskt, i genomsnitt 3-4 stycken per borrhål. Borrhål 4:2 har dock 9 hål i dessa klasser, och är därmed sämre än de övriga. Exempel på hålrum visas i Figur 4.6. Utöver tydliga hålrum så förekommer även sammanhängande urlakade partier i samtliga tre pelare. Mindre hålrum förekommer ofta i anslutning till underdelen av betongens ballast.

Filmningen visar att sprickförekomst endast förekommer i mindre utsträckning. I borrhål 2:2 och 3:1 finns 1 spricka, i borrhål 3:2 och 4:2 finns 3 sprickor och i borrhål 4:1 saknas sprickor helt och hållet. Exempel på sprickor visas i Figur 4.7.

Injekteringsbruk från de två tidigare reparationstillfällena 1935 och 1986 finns i samtliga pelare. En viss färgskillnad för bruken kan iakttagas, vilket antagligen beror på skillnader i det material som användes vid de två olika tillfällena (Figur 4.8). Det verkar inte som om man har försökt att färga injekteringsbruket.

Borrhålen når ner i bergrunden för tre av de fem filmade borrhålen. Bilderna från filmningen visar att kvaliteten på kontaktzonen ser bra ut i pelare 3, men att den är dålig i pelarnas för pelare 4 (Figur 4.9). I det senare fallet visade filmningen dessutom att det förekom strömmande vatten⁶. För pelare 3 så verkar betongkvaliteten sjunka i ett område cirka en decimeter ovanför kontaktzonen. En anmärkningsvärd iakttagelse i borrhål 3:1 är att det efter cirka en meter berg återkommer en tunn skiva av cementbruk (Figur 4.9 b-c). Eftersom borrhålet slutar strax nedanför denna förändring så täcks det dåligt av filmningen. Området är således för tunt för att kunna utvärderas (av ritningar för pelaren så framgår det att bergytan för pelaren slutar från högersidan till vänstersidan av pelaren).

⁶ Om sonden fixeras på ett visst djup så kommer tidsberoende förlopp att kunna registreras. Innan själva bildinsamlingen påbörjades så vilade sonden mot borrhålets botten medan referensdata matades in till den mätfil som skulle skapas. Pågående vattenströmning under fundamentet - till följd av turbulens runt mätsonden - framgick av bilder som då kontinuerligt uppdaterades på instrumentets bildskärm.

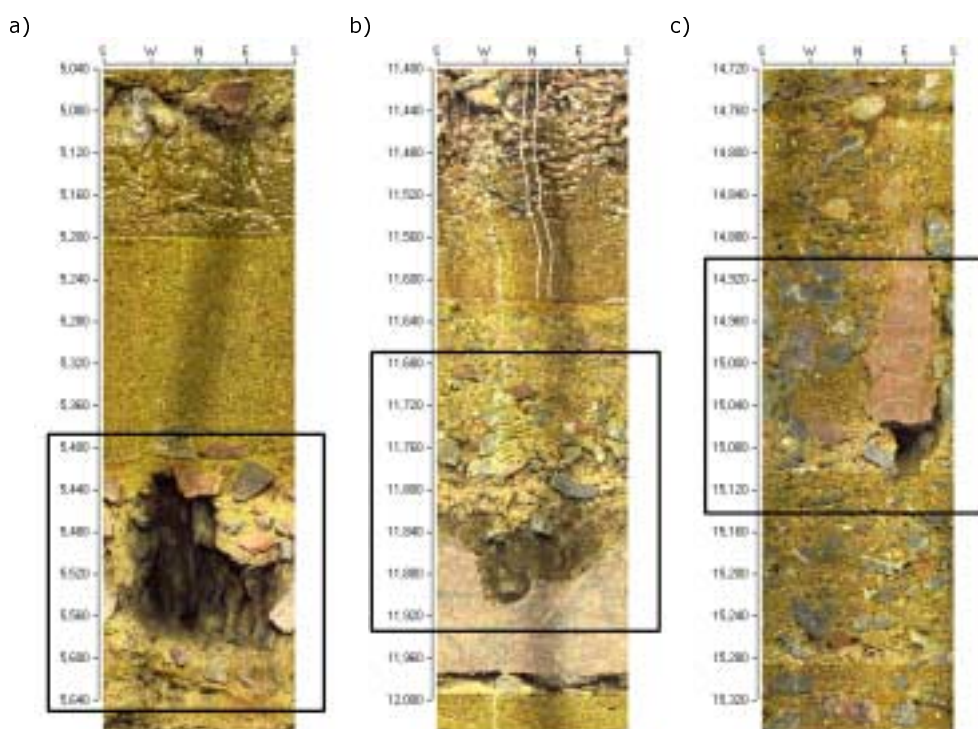
De problem med separation som Harald Erikssons hänför till blötbetongepoken stämmer väl in på betongen i de undersökta pelarna. Det förekommer i flera fall långa partier med frånvaro av synlig ballast, medan ballast dominerar bildmaterialet i andra partier. Exempel på separation visas i Figur 4.10.

Vid borrhning av undersökningsborrhålen så har armering borrats av eller skadats i samtliga borrhål i pelarnas (Figur 4.11). För borrhål 3:2 och 4:1 har endast ett järn skadats, medan för borrhål 2:2 och 3:1 så har nio respektive sex järn skadats. I samtliga fall utom ett så ser kvaliteten på armeringsjärnen bra ut, d.v.s. utan påverkan av korrosion. Järnen har hittats på nivåerna 2, 9, 10, 12, 14 och 16 meters djup.

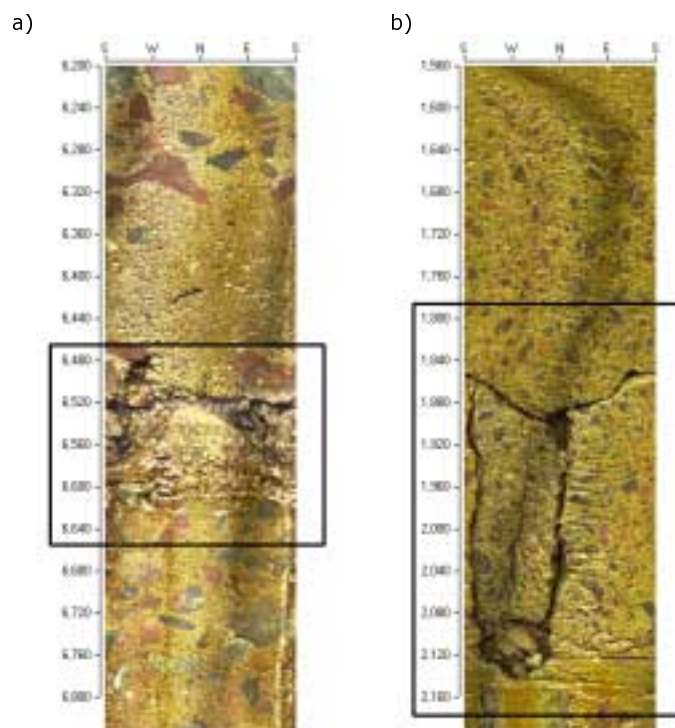
Sparsten förekommer, utom i borrhål 4:1, endast i liten omfattning.

Begränsningar

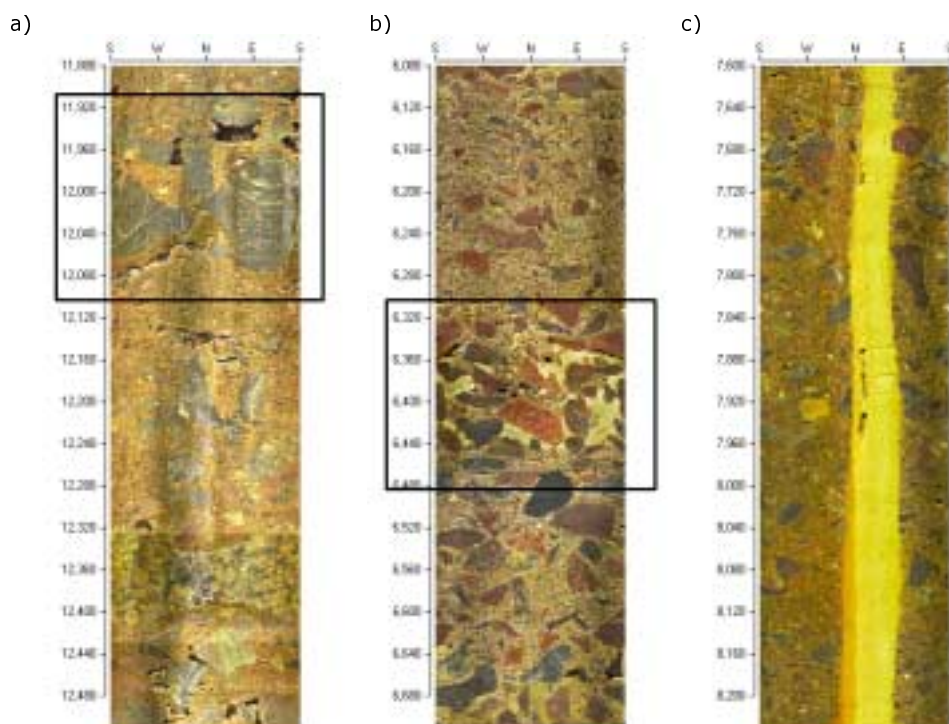
Det kan vara svårt att upptäcka hålrum i sådana fall som de har mjuka övergångar, d.v.s. då vinkeln för hålets väggar är mycket flack. BIP-sondens ljuskälla ger då inte upphov till skuggor, vilket gör att hålet ser ut som "normal" borrhålsvägg (möjligen med undantaget att bildens skärpa försämras något).



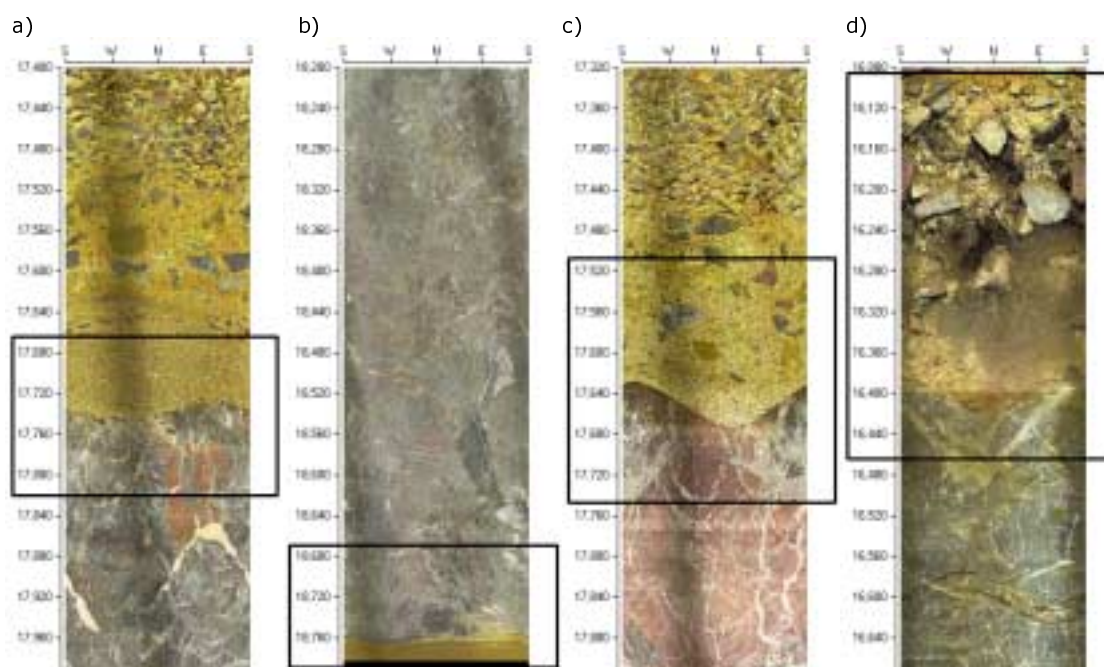
Figur 4.6 Bilder av hålrum: a) 5,5 meter i BH 4:2, b) 11,8 m i BH 2:2, och c) 15,0 m i BH 4:2. Varje bild motsvaras av snitt från borrhålsväggens cirkulär cylindriska yta som har vikts ut i planet.



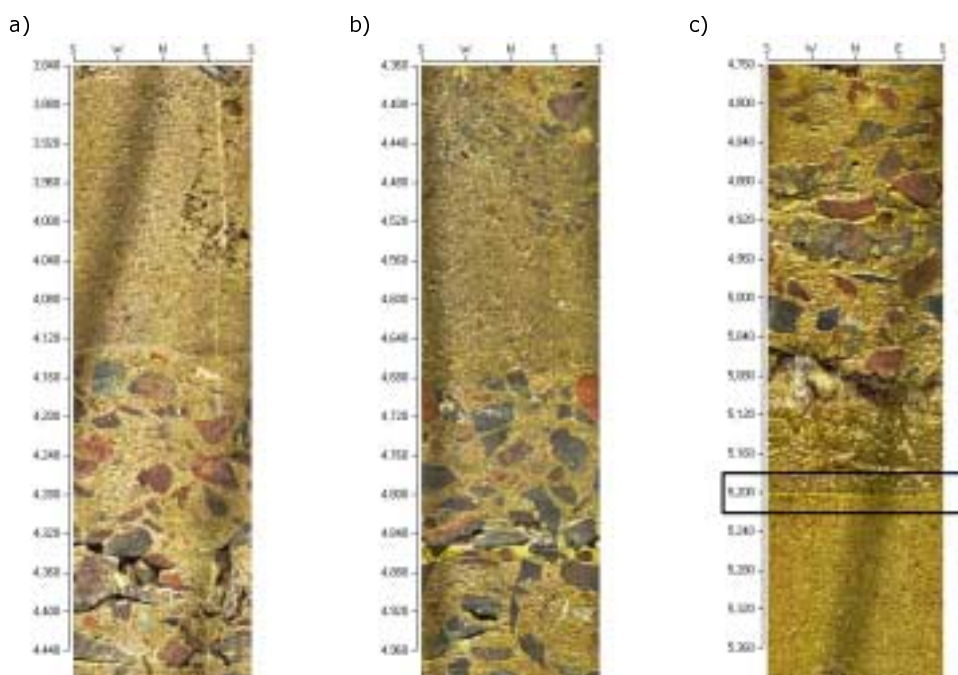
Figur 4.7 Exempel på avsnitt med sprickor (borrhål 2:2 respektive 4:2).



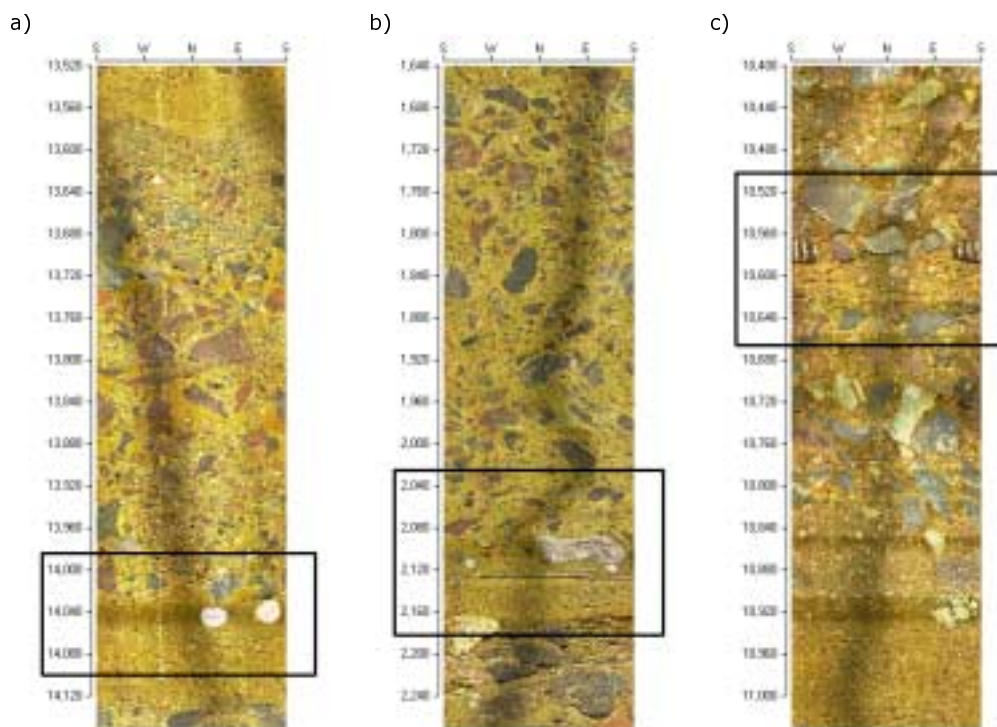
Figur 4.8 Bilderna visar partier med injektionsciment från 1935 eller 1986. En viss färgskillnad för bruket finns. I a) är bruket mörkfärgat och i b-c) är bruket ljusfärgat. Den högra bilden visar ett igengjutet injektionsborrhål.



Figur 4.9 Kontaktzonen mellan berg och betong. För borrhål 3:1 i bild a-b) så följs bergkontakten av nytt bruk efter ca 1 meter berg. För borrhål 3:1 och 3:2 i bild c-d) så ser kontaktzonen bra ut. Betongen i borrhål 4:2 har en dålig bergkontakt.



Figur 4.10 Exempel på partier där betongen har separerat (BH 2:2, BH 3:1, och BH 4:2). I det sista fallet märks även passage genom stående vattenyta.



Figur 4.11 Exempel på avborrad armering (BH 2:2, BH 3:2, och BH 4:2). I b) ligger ett armeringsnät strax ovanför en gjutfog. Armeringsjärnet i c) är påverkat av korrosion.

4.3.3 Caliperloggning

Inledning

En Caliperlogg har använts för att kvantifiera de hålrum som identifierats vid filmningen. Tekniken för caliperloggning beskrivs i Bilaga B2. Den utrustning som har använts, Wellmac, tillverkas av Malå Geoscience. Maximal slaglängd med den bestyckning som användes var 70 mm.

Genomförande

Mätningarna genomfördes utan problem för samtliga fem borrhål.

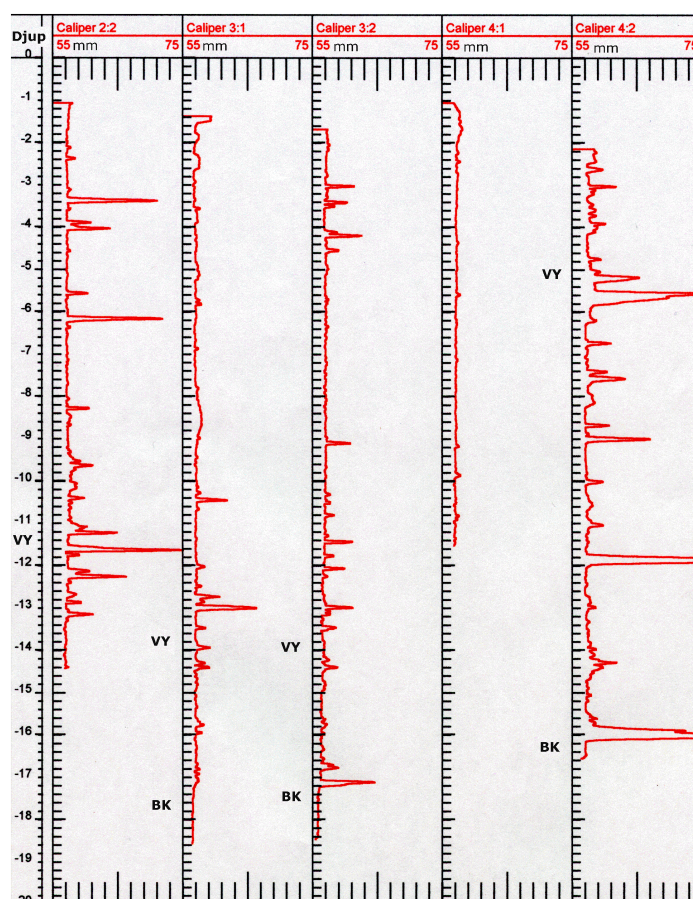
Resultat

Resultatet från loggningen redovisas i Figur 4.12. Eftersom borrhålsdiametern är 56 mm så startar utdata från loggen på ca 56 mm (horisontell axel). Alla avvikelser i borrhålets diameter längs med hålets djup registreras i form av ökningar eller minskningar i antal millimeter jämfört med normalvärdet. Loggarna visar att det finns diameteravvikelser, vilket i sin tur är ett tecken på betongkvalitetsvariationer. Avvikelseerna är till övervägande del små och förekomsten skiljer sig åt mellan respektive hål. Figur 4.12 visar att:

- De första 10 metrarna av borrhålsväggen för hålen 3:1, 3:2 och 4:1 är förhållandevis jämna. Betongkvaliteten framstår därför som förhållandevis god. På större djup ökar

ojämnheterna för BH 3:1 och BH 3:2, vilket bör motsvaras av en sämre betong. Detta stämmer också väl överens med intrycket från filmningen.

- BH 2:1 och BH 4:2 har ett flertal avvikelser i storleksordningen millimeter och upp till några centimeters storlek. Betongkvaliteten verkar vara relativt dålig.
- I alla de borrhål som är djupa nog att träffa på en stående vattenyta så ligger denna i anslutning till en avvikelse i borrhålens diameter (spricka eller hålrum).
- Vattenytan i BH 3:1 och 3:2 ligger djupt jämfört med BH 2:2 och 4:2, vilket tyder på en jämförelsevis tät betong i anslutning till vattenmagasinet. Likheterna i loggdata är god, vilket precis som filmningen visat, tyder på att kvaliteten på betongen mellan dessa två närliggande hål är likvärdig. Betongen har inte varit speciellt exponerad för urlakning.
- Caliperdata visar att för fyra av de hålrum som identifierats från filmningen så är djupet ≥ 75 mm.



Figur 4.12 Resultat från Caliperloggning. Markeringen VY motsvaras av stående vattenyta i borrhålet och markeringen BK motsvaras av övergång mellan betong och berg.

Begränsningar

Begränsningar med metoden ligger i en ändlig slaglängd (d.v.s. hur långt loggens mekaniska givararm förmår att tränga in i en spricka), och i förmågan att registrera mycket tunna sprickor. Vidare ger den utrustning som har använts endast information om avvikelser i en riktning. Sannolikt har därför mätningen missat att registrera en del av de avvikelser som finns.

Eventuellt så kan Calipermätningar ge ett ännu bättre resultat för hammarborrade hål genom att omfattningen av ras och sönderslagen dålig betong kan studeras.

4.3.4 Radar**Inledning**

Syftet med radarmätningarna har varit att studera hur betongen ter sig i konstruktionen i anslutning till borrhålen. Hålrum i betongmassan ger sig till känna i radardata i form av punktreflexer, medan utsträckta sprickor återges som en serie intilliggande reflexer (plana strukturer). Det kan dock finnas andra avvikelser i betongen som kan ge upphov till reflexer, t.ex. infästningsjärn för stenbeläggningen och rester av numera igensatta dräneringskanaler). Tekniken för radarmätning beskrivs i Bilaga B3.

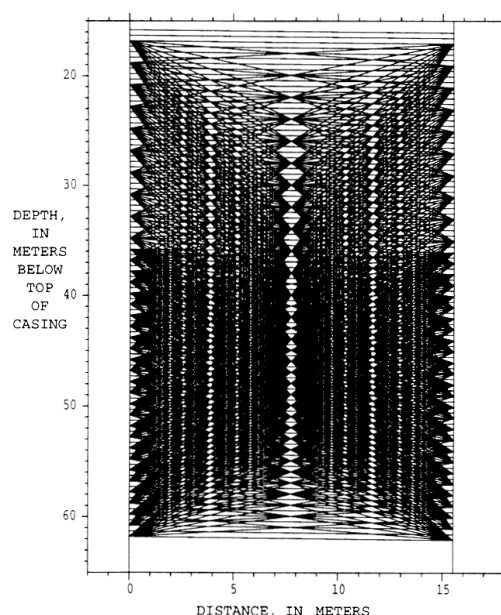
Vid mätningarna har använts ett portabelt radarsystem från Malå Geoscience: Ramac GPR med 250 MHz antenner (diameter 48 mm).

Genomförande

Två typer av mätningar har gjorts: reflektionsmätningar respektive tomografimätningar.

Reflektionsmätningar är enkelhålsmätningar där radarreflexer samlas in från den volym som omsluter borrhålet, d.v.s. 360° runt hålet. På samma sätt som tidigare så samlas mätdata in under det att radarsonden kontinuerligt transporteras från ett borrhåls botten och vidare upp mot markytan.

Vid tomografiförsöket separerades sändar- och mottagarantennerna åt i borrhål 4:1 och 4:2 (15 meter). Principen är att den ena antennen fixeras på en viss nivå i ett av borrhålen samtidigt som den andra antennen kontinuerligt transporteras upp genom borrhålet. Förfarandet upprepas systematiskt för ett flertal olika nivåer på den första antennen. Slutresultatet blir en omfattande genomlysning av den volym av konstruktionen som befinner sig mellan de två borrhålen, se Figur 4.13). Försöket gjordes för att detektera hålrum och för att testa om metoden går att använda på gamla betongkonstruktioner.



Figur 4.13 Schematisk bild över strålgången mellan två borrhål för radarmätningar vid ett tomografiförsök [17]. Varje enskild linje i figuren motsvaras av en mätning.

Resultat reflexionsmätningar

Tolkning av radardiagrammen från mätningarna har gjorts av Geosigma AB. Kvaliteten på data är bra och radardiagrammen innehåller information om betongens egenskaper ca 3-4 meter ut från borrhålen. Ett exempel på mätresultat (borrhål 2:2) redovisas i Figur 4.14a. Vertikal axel motsvaras av borrhålets längd och den övre horisontella axeln motsvaras av gångtid för den utsända elektromagnetiska vågen att träffa en reflektor och registreras igen av mottagarsändaren. För den nedre horisontella axeln så har gångtiden översatts till avstånd från själva borrhålet och ut i omgivande konstruktion. I Figur 4.14b och Figur 4.15a-c redovisas de tolkningar som Geosigma har gjort för radardiagrammen. Strukturerna utgörs av punktreflexer (båge) eller planreflexer (linjer). En sammanställning av samtliga identifierade strukturer redovisas i Tabell 4.3.

Eftersom borrhålen BH 3:1 och 3:2 ligger intill varandra så borde radarmätningarna ge ungefär samma strukturer i båda fallen. Detta stämmer också för de plana strukturerna, men de punktreflexer som finns i BH 3:1 saknas dock i BH 3:2.

Om samtliga reflexer från mätresultaten antagas bero på hålrum och sprickor så ger detta att det finns få större hålrum, och att det finns utbildade spricksystem i framförallt pelare 3.

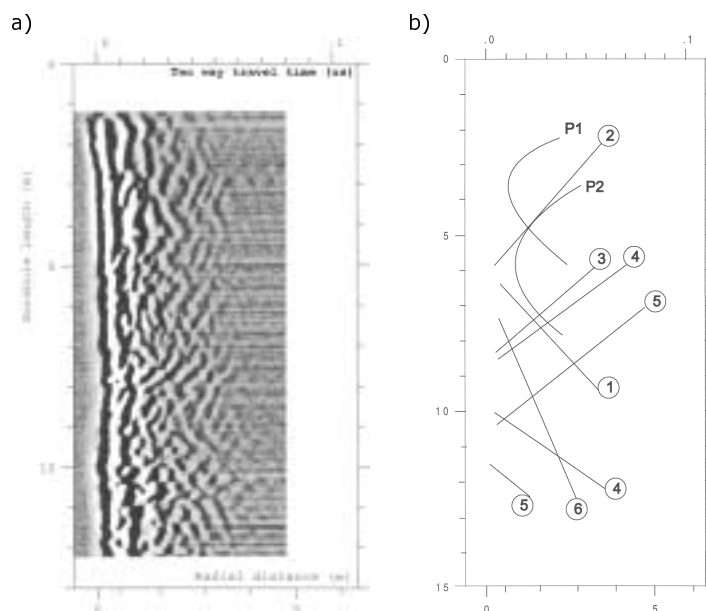
Begränsningar

De avvikelser som reflektionsmätningarna har identifierat går inte att riktningsbestämma. Vidare så går det inte att utesluta att en del av reflexerna härrör från t.ex. ingjutna dräneringsrör och järnbeslag (stenbeläggningens infästning).

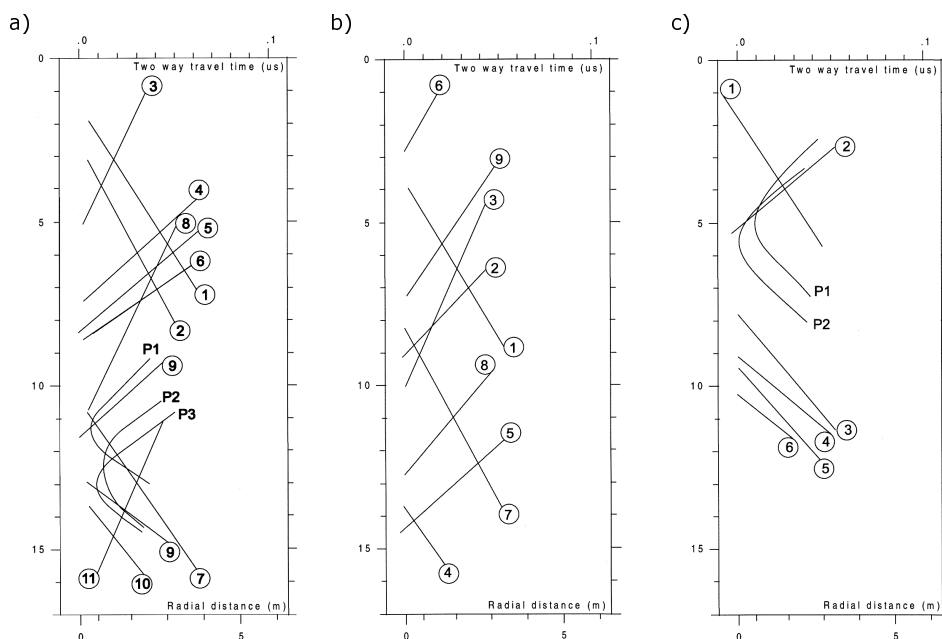
Resultat tomografimätningar

Tomografimätningen fungerade dåligt till följd av att det inte gick att få radarpulsen att färdas mellan sändar- och mottagarantenn. Reflektionsmätningen i borrhål 4:1 visar att penetrationen av radarvågor ut i omgivande betong var mycket dålig. Detta är anmärkningsvärt, men kan möjligtvis förklaras med att det omgivande materialets egenskaper skiljer sig från övriga delar vilket givit elektriska egenskaper som försvårar penetratio-
nen. En trolig förklaring är att bentonit har ingått som del i något av de injekteringsbruk som har använts vid tidigare reparationer (2% vid vct 0,5 och upp till 5 - 7% vid blöta blandningar). Bentonitens funktion är då att minska brukets vattenseparation. Bentonit, som ju är en lera, dämpar kraftigt radarvågornas energi vilket gör att inträngningen blir mycket begränsad. Ytterligare förklaring till varför radarvågens dämpas kraftigt kan vara närvaro av salt (kraftig tölsättning är en möjlig källa, men får betraktas som osannolik eftersom saltet svårligen skulle kunna spridas jämnt ut i hela pelarvolymen).

Tolkning av tomografimätningar kräver att borrhålens krökning är känd. Informationen fås genom att göra avvikelsemätningar i samband med borrhålsarbetet.



Figur 4.14 Radardiagram från borrhål 2:2 (a), och tolkade stukturer (b). Punktrelexer (P) från t.ex. ett hålrum ger upphov till parabolstrukturer i radardata. Linjära reflexer (ringförsedd nummering) från t.ex. en spricka ger upphov till en plana strukturer. OBS! Vinklar för strukturerna kan ej plockas ut från detta diagram!



Figur 4.15 Identifierade strukturer från tolkningen av reflektionsradarmätningar för borrhålen BH 3:1, BH 3:2, och BH 4:2. OBS! Vinklar för strukturerna kan ej plockas ut från detta diagram!

Tabell 4.3 Sammanställning av strukturer i betongen (trolig förekomst av hålrum respektive sprickplan) baserad på resultat från loggning med radarsond.

BORRHÅL	BH 2:2	BH 3:1	BH 3:2	BH 4:1	BH 4:2
Punktreflexer	2	3	0	0	2
Plana strukturer	5	11	9	3	6

4.4 Pelarnas betongkvalitet utifrån resultat från förundersökningen

En kort sammanfattning av resultaten görs nedan för respektive pelare, tillsammans med en bedömning ur injekteringssynpunkt.

Tabell 4.4 Rangordning av parametrar med koppling till betongkvaliteten för enskilda pelare (1 är bäst, 5 är sämst).

PARAMETER	PELARE 1	PELARE 2	PELARE 3	PELARE 4	PELARE 5
Fyllnadsgrad 1935	1	2	3	5	4
Fyllnadsgrad 1986	4	5	1	3	2
Kärnborrkartering –99	-	5	4	5	-
Calliperlogg	-	4	3	5	-

4.4.1 Resultat för pelare 2

Historiken visar betongkvaliteten i pelare 2 var bra 1935 (Tabell 4.4). Vid den injektering som gjordes 1986 var situationen den omvända - störst mängd bruk gick åt i pelare 2. Jämfört med 1935 så hade kvaliteten således försämrats förhållandevis mycket. Vad visar då den nya förundersökningen?

Sammanfattningsvis så visar resultat från borrhålen i pelare 2 att det finns gott om mindre hålrum (klass A) och få större hålrum (klass B och C). Likaså finns endast ett fåtal sprickor. Kontaktzonen ser ut att vara urlakad. Bruk från de tidigare injekteringarna förekommer i stor mängd. Vid borrhänsarbetet så har flera armeringsjärn skadats eller borrats av. Inga tecken finns på pågående korrosion. Den fria vattenytan stabiliserade sig relativt djupt, d.v.s. betongen är tät mot vattenmagasinet, se Figur 4.16.

Eftersom kontaktzonen verkar vara urlakad så bör denna kontaktinjekteras. Den nedre delen av betongen (8,0-14,5 m) bedöms kunna ta förhållandevis stora mängder bruk. Även den övre delen är att betrakta som dålig, och det finns enstaka hålrum som kan sträcka sig ut i omgivande betong, d.v.s. hydraulisk kontakt med annat borrhål är möjlig. Sammantaget så gör små hålrum och få sprickor att det kan vara svårt att få ut stora mängder bruk i enskilda injekteringsborrhål. Ett lättflytande bruk är att föredra, men trots detta så kan åtgången mellan enskilda hål variera en hel del. Det bedöms bli svårt att få ut bruk i en stor volym i anslutning till enskilda hål. Konsekvensen är att det kan behöva borrar ett relativt stort antal hål. En ekonomisk avvägning kan vara att koncentrera hålen i första hand till nära pelarens väggar.

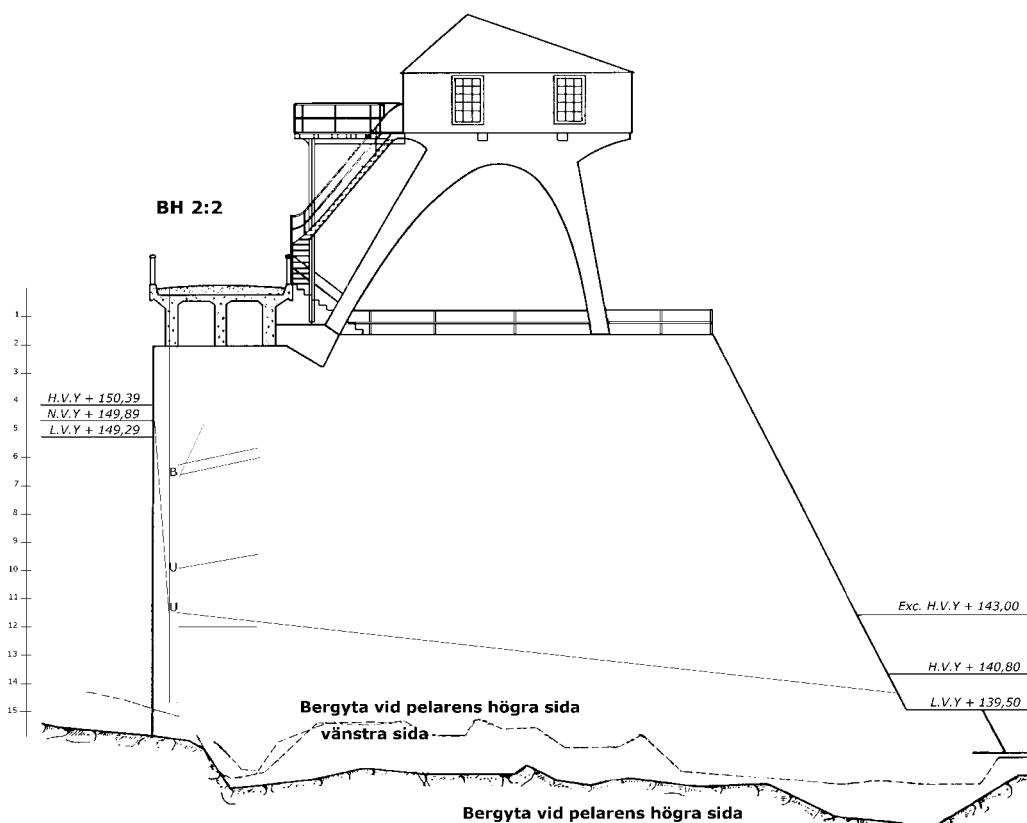
Sammanfattningsvis så bör arbetet koncentreras mot att dels förbättra kontaktzonen och dels öka tätheten för betong som exponeras för vatten.

4.4.2 Resultat för pelare 3

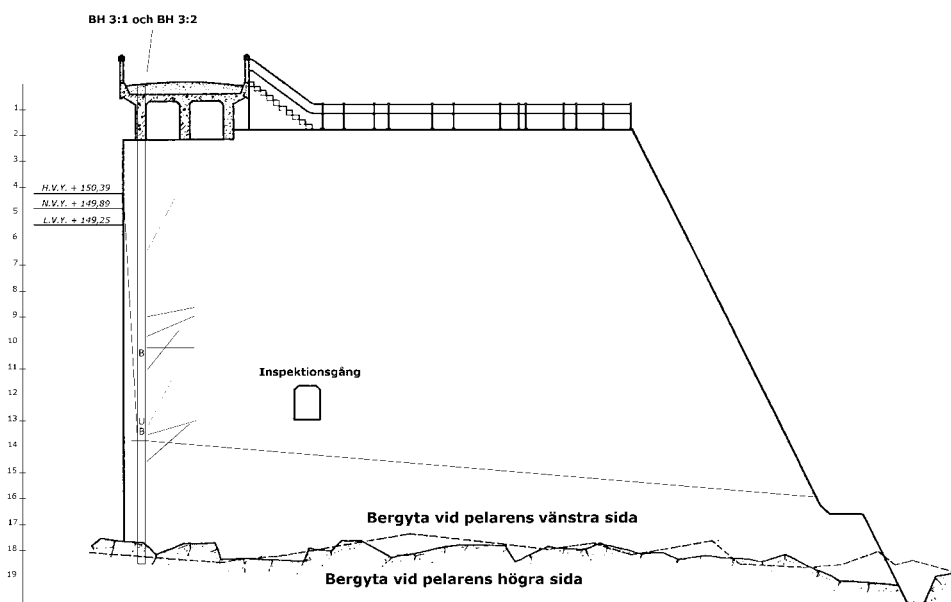
Historiken visar betongkvaliteten i pelare 3 var relativt dålig 1935 (Tabell 4.4). Vid injekteringen 1986 gick det endast åt små mängder bruk i 3 (den pelare som hade den minsta åtgången). Jämfört med 1935 så hade kvaliteten inte försämrats nämnvärt.

Den nya förundersökningen visar att kvaliteten i pelare 3 är förhållandevis bra. Filmningen visar att det finns gott om små hålrum (klass A), och på lite större djup ett fåtal något större hålrum (klass B, C och D). Egentliga sprickor saknas, men kan finnas i anslutning till en del av hålrummen. Det finns gott om bruk från tidigare injekteringar. Armeringsjärn har framförallt träffats på i BH 3.1. Järnen visar inga tecken på pågående korrosion. Den fria vattenytan stabiliserade sig relativt djupt, d.v.s. betongen är tät mot vattenmagasinet, se Figur 4.17.

Ur injekteringssynpunkt så bedöms kvaliteten på betongen som relativt bra, men det förekommer en del lokala skador som kan stå i hydraulisk kontakt med andra skadade partier. Bedömningen är att det kommer att gå åt mindre bruk vid injektering jämfört med pelare 2. I övrigt gäller samma kommentarer som angavs för pelare 2.



Figur 4.16 Sammanställning av information för pelare 2 (BH 2:2). Strukturer har ritats in utifrån resultatet från radarmätningarna och från borrhålsfilmningen (B = spricka klass B, U = urlakad zon). Strukturerna från radarmätningarna går inte att orientera i planet, men alla vinklar är korrekt återgivna.



Figur 4.17 Sammanställning av information för pelare 3 (BH 3:1 och BH 3:2). Strukturer har ritats in utifrån resultatet från radarmätningarna och från borrhålsfilmningen i BH 3:1 (B = spricka klass B, U = urlakad zon). Strukturerna från radarmätningarna går inte att orientera i planet, men alla vinklar är korrekt återgivna.

4.4.3 Resultat för pelare 4

Historiken visar betongkvaliteten i pelare 4 var mycket dålig 1935, d.v.s. stora mängder bruk gick åt vid föryngringen (Tabell 4.4). Vid injekteringen 1986 så gick det även den gången åt relativt stora mängder bruk. Jämfört med 1935 så har en förnyad påtaglig nedbrytning genom urlakning ägt rum.

Den nya förundersökningen visar att betongkvaliteten fortfarande är dålig. Det är emellertid stor kvalitetsskillnad mellan pelarens uppströms- och nedströmsdel. I uppströmsdelen finns det ett stort antal hålrum utmed hela borrhålets längd, och större hålrum även på ringa djup (klass A, B, C, D och E). Kontaktzonen mot underliggande berggrund är dålig med pågående läckage av strömmande vatten under pelaren. Ett tydligt utbildat spricksystem finns i ett parti ett par meter under brobanan. Sprickor i anslutning till hålrummen kan inte uteslutas. Mängden gammalt injekteringsbruk är mindre än vad som var fallet i borrhålen i pelare 2 och 3, men det finns trots detta en hel del bruk kvar i vissa partier av hålet. Armering som uppvisar korrosionsskador har påträffats. Vattenytan ligger nära magasinets vattenyta, varför betongen här måste betraktas som otät, se Figur 4.18.

För det borrhål som ligger på nedströmssidan förkommer knappast några hålrum överhuvudtaget, och inga sprickor. Det finns en hel del injekteringsbruk från tidigare reparationer. Detta hål gick tyvärr inte att borra ner till berggrunden.

Pelare 4 har alltså varit dålig under hela sin historia. Ur injekteringssynpunkt bedöms hela uppströmssidan av pelare 4 att vara i speciellt stort behov av åtgärder. Stora mängder bruk bör, i anslutning till större hålrum, kunna tryckas ut i omgivande betong. Det läckage som finns i anslutning till bergkontakt måste tätas så att verkande upptryck kan reduceras. Nedströmsdelen av pelaren ser inte ut att behöva injekteras.

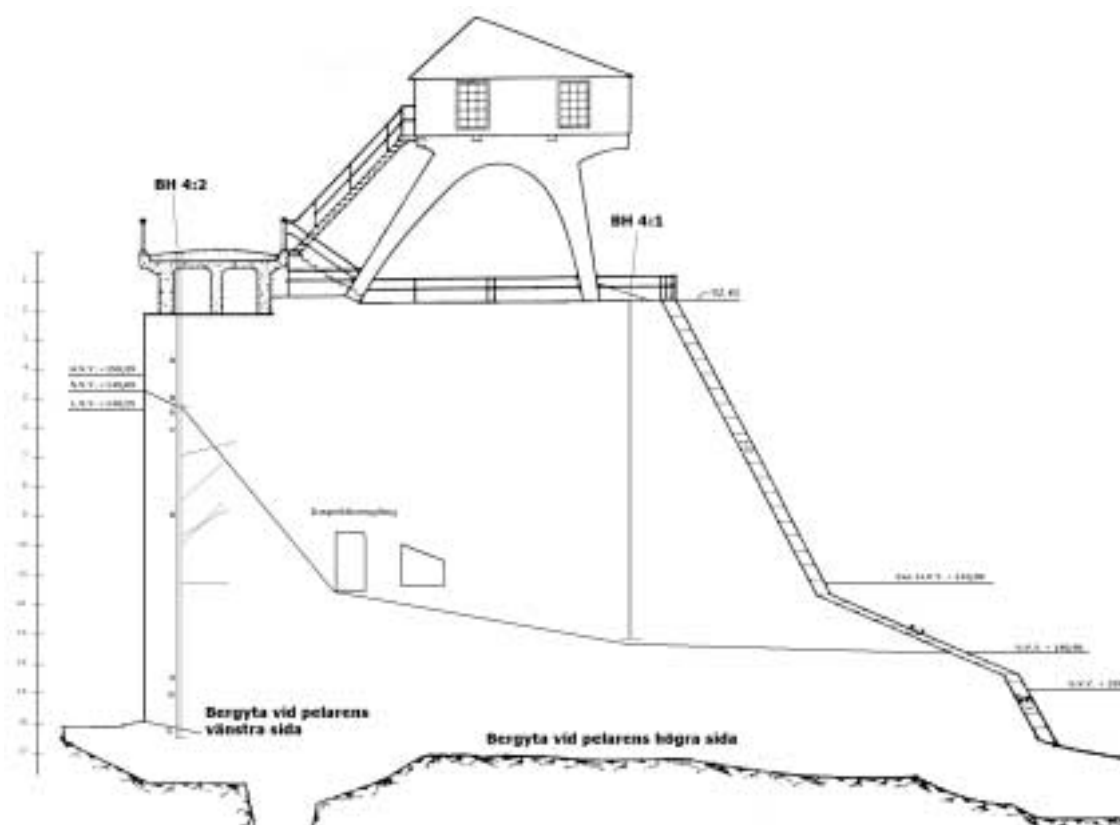
4.4.3.1 Kostnader för mätprogrammet

Borrhålsmätningarna handlades upp till ett löpmeterpris, exklusive mobilisering/demobilisering av personal och utrustning. Kostnaderna fördelade sig om:

- Borrhålsfilmning: 200 kr/m + 250 kr i uppriggning per borrhål.
- Caliperloggning: 100 kr/m + 250 kr i uppriggning per borrhål.
- Radar (reflektion): 140 kr/m + 250 kr i uppriggning per borrhål.
- Radar (mellanhål): 15000 kr + 250 kr i uppriggning

Radarmätningarna kräver dessutom en utvärdering som behöver göras av en konsult. Kostnader för detta tillkommer således, och uppgick i offert till 29500 kr för tomografi-mätningar (den dåliga datakvaliteten från försöket gjorde emellertid att detta aldrig kom att genomföras), och till 30750 kr för samtliga enkelhålsmätningar.

Kostnader för kärnborrning tillkommer.



Figur 4.18 Sammanställning av information för pelare 4 (BH 4:1 och BH 4:2). Strukturerna har ritats in utifrån resultatet från radarmätningarna och från borrhålsfilmningen i BH 3:1 (B, C, D, E = spricka klass B, C, D, E; U = urlakad zon). Strukturerna från radarmätningarna går inte att orientera i planet, men alla vinklar är korrekt återgivna. Eftersom borrhål 4:1 inte har nått ner till någon vattenyta så skall läget för den utritade potentiallinjen endast ses som ungefärlig.

5 INJEKTERINGSARBETET

5.1 Inledning

Den gamla dammen kommer även fortsättningsvis att användas för att reglera Forshuvuds vattenmagasin. Ägarens målsättning är att den skall fungera utan problem över en tidsperiod om ca 30 år. Den injektering som görs syftar till att täta betongkonstruktionerna och att säkerställa dammens stabilitet.

Förundersökningsprogrammet har varit koncentrerat till pelare 2, 3 och 4. Reparationen som helhet omfattar emellertid hela dammen, d.v.s. samtliga pelare, samtliga skibord, anslutning till nya kraftstationen och anslutningen mellan gamla maskinstationen och den västra älvbrinken. Uppföljningen av reparationsarbetet har koncentrerats till pelarna 2, 3 och 4, men även övriga delar har bevakats.

5.2 Krav som ställs på det färdiga injekteringsresultatet

Injekteringsarbetet har haft som huvudmål att säkerställa dammens funktion under ytterligare 30 år framöver. Detta kan falla tillbaka på:

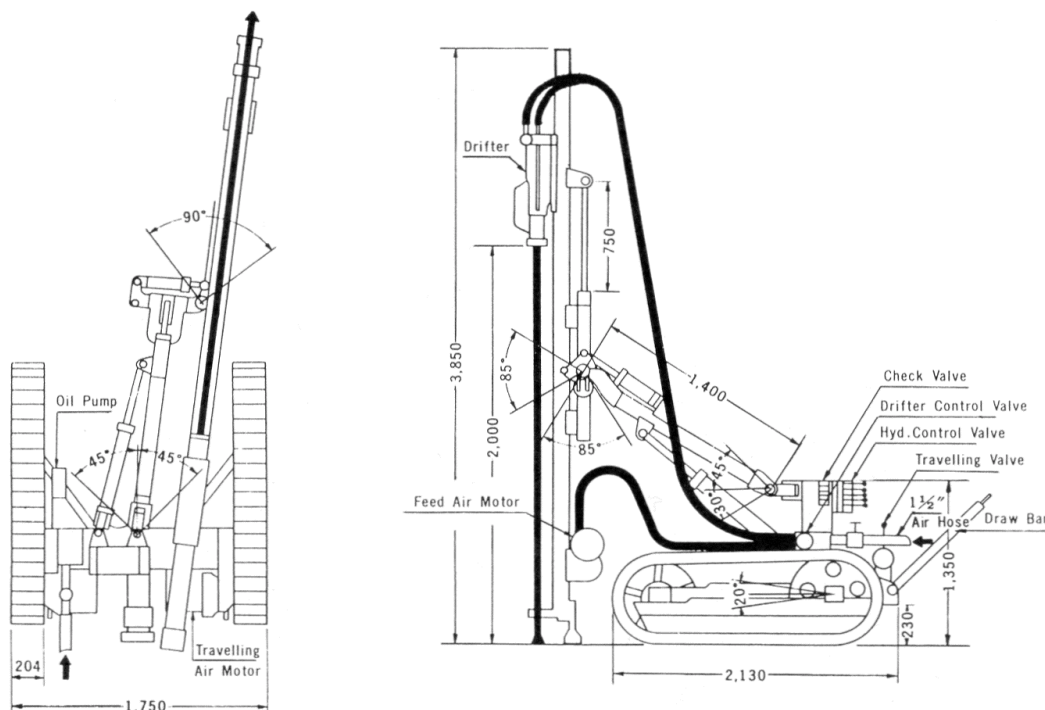
1. Betongens täthet. Detta har främst följts upp genom att se hur mycket bruk som gått att få ut i konstruktionen. Den borrplan som utformades initialt baserades på ett grundmönster med 1 meters hålavstånd. Borrplanen grundade sig på erfarenheter från tidigare injekteringar samt på förundersökningen. En kompletterande injekteringsomgång med ett tätare hålavstånd görs enligt planen efter behov. Något egentligt gränsvärde som avgjort hur tätt injekteringsborrhålen har satts har inte funnits.
2. Beständigt injekteringsbruk. Uppnås genom att ha en tät pasta som inte separerar, d.v.s. lågt vct. Har följts upp genom att inte använda högre vct än 1,0 (som framgår av Kapitel 2 så är detta vct att betrakta som något högt ur beständighetssynpunkt).
3. Intakt armering. Ägaren har emellertid inte ställt några krav på att borrhningsarbetet inte fått skada befintlig armering.
4. Ingen krav har ställt på att följa upp rörelsefogars funktion (funktionen kontrollerades inte heller i förundersökningen).

5.3 Utrustning och material

5.3.1 Borrhningsutrustning

Den borrhigg som Stabilator har haft på plats för borrhning av injekteringsborrhål är en så kallad källarmus med tillhörande hydraulaggregat (KLEMM Bohrtechnik, modell 4001), se Figur 5.1 och Figur 5.2. Borrhiggen har använts för hammarborrhning och arbetar med 1200 mm långa borrhstål med Ø51 mm krysskär⁷ (retracttyp). Borrkronorna byttes i regel efter avklarade 100 bormeter.

⁷ Vid hammarborrhning bör 4-skäriga eller flerskäriga borrkronor användas, eftersom vanliga mejselskär i regel ger mycket ojämna hål [1].



Figur 5.1 Skiss över typisk utformning av ett lättviktsborrapparat [15]. Angivna mått är i mm.



Figur 5.2 Den borrhög som har använts i Forshuvud för att borra injekteringsborrhål (hammarborrning).

Vid hammarborrning överförs energi från borrapparatet via borrstål och hårdmetallskär till betongen, där den används för krossningsarbete. Huvudkomponenterna i apparatet är en cylinder med en fram- och återgående slagkolv som slår mot borrstångens nacke. För att kunna borra till önskat håldjup kan det vara nödvändigt att skarva ihop flera

borrstänger med hylsor, och energin i den stötvåg som når borrkronan överförs till borrarbete i kontaktytan mellan skär och betong [7]. Kärnborrade hål ger förmodligen en bättre inträngning vid injektering eftersom det blir mindre borrhax kvar i betongen. Hammarbörning ger däremot sannolikt något rundare sprickmynningar vilket kan vara gynnsamt för inträngningen av bruket. Kärnbörning är ca tre gånger så dyrt som hammarbörning⁸.

Bortspolning av borrhax görs med hjälp av vattenspolning genom ett hål i borrstången. Eftersom betongen är urlakad så är den förhållandevis spröd. Vid spolning kommer därför stora mängder dålig betong att spolas ut, vilket gör att borrhålen blir volymmässigt större jämfört med ett kärnborrat hål. En typisk kommentar i borrarprotokollen från Forshuvud var att all betong var att betrakta som "lös".

Börningen genomfördes tillsammans med vattenförlustmätningar, dvs. en kartläggning av betongens vattengenomsläpplighet genom systematiska vatteninpressningsförsök på olika nivåer i borrhålet (se även Bilaga B4). Avstängning i sektioner görs med hjälp av enkel- eller dubbelmanschetter. Mätvärdet utgörs av den vattenmängd som utmed en viss längd på viss tid och vid visst tryck kan pressas in i betongen. Mätningen utförs bäst med en känslig flödesmätare inkopplad till ledningen till hålet. Resultatet har använts för att styra receptet på injekteringsbruk. En positiv sideeffekt av mätningen är att den väter och spolar sprickmynningar och väggar vilket är positivt för injekteringsresultatet.

5.3.2 Injekteringsutrustning

Injekteringsutrustningen har placerats på en plattform som flyttas allteftersom arbetet fortskrider, se Figur 5.3. Plattformen, som benämns ZBE injekteringsplattform (Atlas Copco Craelius), består av en kolloidkvarn med tillhörande omrörare, uppblåsbara och mekaniska manschetter, samt tryck- och flödesmätare. De mekaniska manschetterna används vid ytinjektering, och de uppblåsbara manschetterna används vid våningsinjektering.

Kolloidkvarnen blandar beståndsdelarna till bruket under ett högt varvtal (1500 rpm). Alla ingående partiklar finfördelas så att bruket får en jämn kvalitet. Den kvarn som har använts rymmer 150 liter, vilket alltså utgör en övre gräns för storleken på de satser som kan blandas per tillfälle. En riktlinje är att ett färdigblandat bruk inte skall bli stående längre än ca 30 minuter, därefter försämras effekten av flytmedelstillsatsen (se avsnitt 5.3.5). Den omrörare som är ansluten till kolloidkvarnen rymmer ca 100 liter. I denna behållare förvaras blandningen under långsam omrörning fram till själva injekteringen.

En vattenbehållare finns i anslutning till kolloidkvarnen (50 liter). Behållaren har fylls upp till max volym, varefter eventuellt tillfört överskottsvatten har kunnat svämma över behållarens kanter.

⁸ Muntlig information av Bernt Olsson, Stabilator AB (kostnaden är ca 800-900 kr/m respektive 300-350 kr/m för kärnborrade respektive hammarborrade hål).

Vid blandning har mängden bruk styrts av vattenmängden i vattenbehållaren. Efter att vatten släppts ner i kolloidkvarnen så tillsattes cement säckvis genom att manuellt öppna dem och låta materialet blandas med vattnet. Även flytmedel har tillsatts manuellt genom dosering med hjälp av ett mätglas. Risken för feldosering minimerades genom att använda graderade behållare och kärl. Blandningstid har varit ca 2 minuter.

Vid injektering har bruket pumpats från omröraren genom grova slangar fram till ett injekteringsborrhåls manschett, se Figur 5.4. Manschetten utgörs av ett stålrör som i sin fria ände är försedd med en gummipackning. Packningen gör det möjligt att få en tät anslutning mellan borrhålsväggen och manschetten. Tillförseln av injekteringsbruk reglerades manuellt av operatören med hjälp av ventiler på slangens koppling och på manschettens övre del.

Med den utrustning för tryck- och flödesmätning som har använts kan injekteringstrycket mätas antingen vid pumpen, vid borrhålets mynning eller nere i själva borrhålet. I Forshuvud mättes detta vid pumpen och i enstaka fall även vid hålmynningen. Utrustningen, som ger flödet i liter per minut samt total åtgång av injekteringsbruk, ger resultatet via en utskriven remsa. Remsans skala är tyvärr svår att ändra varför resultatet är svårt att tolka (gammal teknik).



Figur 5.3 Injekteringsplattform med kolloidkvarn, pump och utrustning för tryck- och flödesmätning.



Figur 5.4 Fotografi som visar en pågående injektering av en pelarnos.

5.3.3 Provningsutrustning

Personal från Vattenfall Utveckling har funnits på plats under cirka 1 dag per vecka för att följa injekteringsarbetet framskridande. Vid dessa tillfällen har brukskvaliteten kontrollerats avseende vattenseparation och volymändring, viskositet och flytgräns med rheometer, filtreringsstabilitet med filtreringspump, skjuvhållfasthet med fallkon, densitet och vct med mud balance samt marshkon.

En cementsuspensions möjlighet att tränga in i sprickor beror bland annat av cementkornens maximala storlek, kornstorleksfördelning, vattencementtal, flytgräns samt suspensionens tixotropi, viskositet och flytspänning [18].

Injekteringsbrukets *stabilitet* kan bestämmas genom att mäta vattnets separation från brukets fasta partiklar. Stabilitet är en viktig faktor då vattenseparation medför att läckvägar kvarstår efter att injekteringsbruket har hårdnat. Vid provning av ett bruks stabilitet så hälls bruksblandningen i ett mätglas. Efter två timmars vila mäts höjden på den fria vattenyta som bildats ovanpå bruket. För ett idealt bruk eftersträvas 0 % vattenseparation, men i praktiken kan viss separation accepteras. Denna provning utförs i enlighet med SS-EN 445 "Vattenseparation och volymändring".

Ett bruks vätskeegenskaper kan beskrivas med hjälp av två mått: *viskositet* och *flytgräns*. Viskositeten påverkar brukets strömningshastighet i en spricka, d.v.s. den bestämmer hur snabbt en injektering går att genomföra. Brukets viskositet beror av dess vattencementtal, flytmedel, cementets finhet och andra eventuella tillsatser. Viskositeten kan minskas genom att öka vct, tillsätta flytmedel eller genom att använda grovmalet cement (provningsmetod Rheometer enligt DIN 53019). Samtidigt är det viktigt att hålla ett lågt vct för att skapa en tät cementpasta med liten mängd sammanhängande kapillärporer.

Flytgränsen är ett mått på brukets skjuvhållfasthet och därmed den kraft som man måste påverka bruket med för att det skall börja flyta som en vätska vid en given sprickvidd. Om bruket har trängt in tillräckligt långt och skjuvhållfastheten är tillräckligt hög så balanserar skjuvspänningarna mot sprickväggarna ut injekteringstrycket och bruket kommer att stanna. Ett bruk med flytgränsen 10 Pa tränger dubbelt så långt in i en given spricka än ett bruk med flytgränsen 20 Pa gör, förutsatt att man injekterar till stopp och att partikelegenskaperna inte ändras [12]. En grov kontroll av flytgräns (och viskositet) fås genom provning med marshkon (API 13B). Provning har gjorts i Forshuvud.

Filtreringsstabiliteten ger ett mått på brukets inträngningsförmåga vid spricköppningar och sprickförträngningar. Vid dessa kan bildas pluggar av cementkorn. Det är bildandet av sådana pluggar som normalt avgör injekteringsresultatet. Som tidigare nämnts så innebär ett högre vattencementtal och mindre kornstorlek en förbättrad inträngningsförmåga (samtidigt måste hänsyn tas till brukets beständighet). En metodbeskrivning för bestämning av filtreringsstabiliteten återfinns i Bilaga B5.

Satser för provning i labb gjordes med en omrörare av paddeltyp (IKARW16 basic) med Ø 50 mm propeller. Dispergering gjordes med en Ultra-Turrax T25 med verktyg S25KR-25GM. Storleken på satserna var 2 liter. Blandningsförfarandet var cement i vatten med påföljande tillsats av flytmedel och dispergering i 2 minuter. Det bör här noteras att denna blandare normalt ger bättre dispergering än de kolloidkvarnar som används i fält.

5.3.4 Övrig utrustning

För att kunna genomföra en injektering krävs att ett visst mottryck kan byggas upp, vilket betyder att relativt massiva konstruktionsdelar ger bättre förutsättningar. Intags-trösklar och pelarnosar är relativt tacksamma konstruktioner, så länge man inte behöver borra alltför nära väggarna. Problem med läckage kan motverkas genom att möjliga läckagevägar tätas, t.ex. fogar i en stenbeläggning.

För att kunna täta fogarna i pelarnas stenbeläggning så byggdes ställningar utmed pelarsidorna. En flotte användes av samma anledning för att komma åt fogarna utmed pelarnas uppströmssida (dock ej under magasinets vattenyta).

5.3.5 Injekteringsbruk

Ett injekteringsbruk är en blandning av cement, vatten och tillsatsmedel i bestämda proportioner. I det enklast fallet ingår endast cement och vatten. Cementen löser sig inte i vattnet, utan behåller sin fasta form. Cementkornens ringa storlek och att vattnet hålls i rörelse gör att kornen kan hållas i suspension i vattnet. Ju mindre kornen är desto lättare hålls de svävande [12].

Tidigare utfördes de flesta injekteringar med standardcement som i första hand är ämnade för betongtillverkning. Cementtypen, som är förhållandevis grovkornig, är dåligt lämpad för injektering av fina sprickor och porer. Sedan några år tillbaka finns det ett brett utbud av finmalda cementtyper speciellt avsedda för injektering. Trots detta finns det, om det huvudsakligen gäller att fylla och täta grova sprickor, ingen större anledning

till att använda dessa ofta dyra cementtyper [12]. Förundersökningen i Forshuvud visade dock, eftersom det finns få stora håligheter, att det var motiverat att använda ett finmalt bruk för att klara av att få ut bruket i betongen.

Vatten som är lämpligt att använda för blandning med cement brukar skall vara ”drickbart”. Speciellt viktigt är att vattnet inte får innehålla för höga halter av humus (kan retardera eller helt upphäva hårdnandet), eller sulfater (inverkar menligt på brukets beständighet) [12]. Dalälvens vatten är att betrakta som tillräckligt rent och har därför utan behandling kunnat användas vid arbetena i Forshuvud.

Det överlägset mest använda tillsatsmedel är flytmedel. Flytmedlet belägger cementkornen så att de får samma ytladdning, med resultatet att de stöter bort varandra. Flytmedlets verkan blir således att hjälpa till med att skilja cementklumpar åt vid blandningen, att hindra kornen från att klumpa ihop sig och bilda större partiklar, samt att agera som ett smörjmedel mellan partiklarna. Efter inblandning av flytmedel har man en öppethållandetid om ungefär en halvtimme. Därefter går fördelarna förlorade. Vid dosering skall stor noggrannhet iakttas eftersom överdosering kan leda till instabilitet och underdosering till att önskade flytegenskaper inte kan uppnås [12].

Det kan finnas motsatsförhållanden vid sammansättning av ett injekteringsbruk. Exempelvis ger ett högt vct goda inträngningsegenskaper, men dålig stabilitet och täthet. Detta gör att sammansättningen hela tiden blir mer eller mindre en kompromiss där situationen i vilken injekteringsbruket skall verka får ange vilka egenskaper som skall prioriteras. Om fina sprickor skall injekteras ställs stora krav på att bruket är lättflytande och har en låg flytgräns. Om däremot öppna starkt vattenförande sprickor skall tätas måste bruket vara styvare med en hög flytgräns, dessutom måste det tillstyvna snabbt [12]. Förundersökningen visar att det är det förra fallet som är aktuellt i Forshuvud. Det material som har använts listas i Tabell 5.1 (själva receptet diskuteras i nästa avsnitt).

Inför arbetet gjorde entreprenören en massberäkning i syfte att uppskatta hur stor mängd injekteringsbruk som kunde förväntas gå åt. Två alternativ utvärderades med hög respektive låg bruksåtgång. I det förra fallet antogs en fyllnadsgrad på 5 % och i det senare en fyllnadsgrad på 2,5 %. Resultatet blev en kalkylerad åtgång av 295 respektive 148 m³ injekteringsbruk, se Tabell 5.2.

Tabell 5.1 Materialspecifikation för de injekteringsbruk som har använts i Forshuvud.

MATERIAL	PRODUKT
Cement 1	Cementa standardcement (max kornstorlek 120 µm)
Cement 2	Cementa injekteringscement (max kornstorlek 30µm)
Flytmedel	Cementa HPM
Vatten	Dalälvsatten

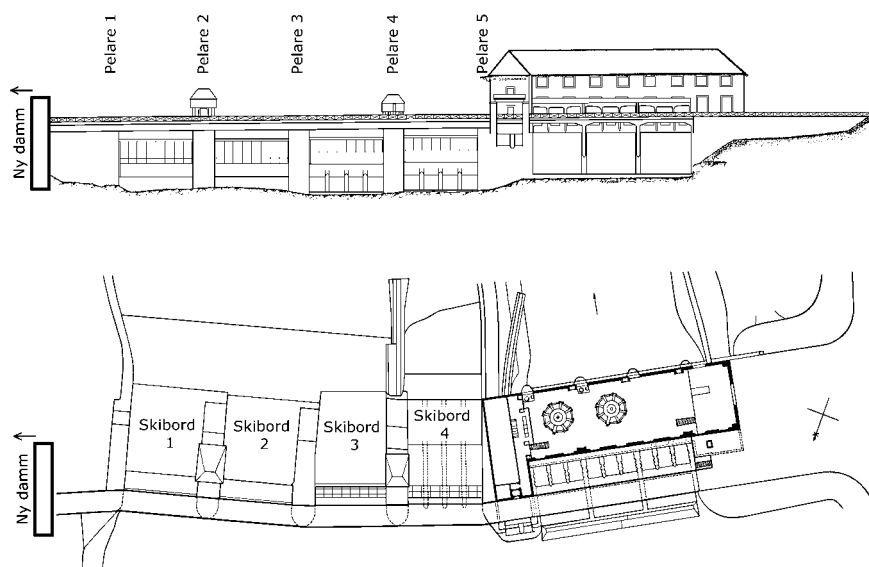
Tabell 5.2 Beräknad bruksåtgång vid en antagen hög respektive låg fyllnadsgrad.

PELARE	L [m]	H [m]	B [m]	V [m ³]	Alt 1 (5 %) [m ³]	Alt 1 (2,5 %) [m ³]
Pelare 1	16	15	4,5	1080	54	27
Pelare 2	20	16	4,5	1440	72	36
Pelare 3	20	15	4,5	1350	67,5	34
Pelare 4	20	15	4,5	1350	67,5	34
Pelare 5	18	15	2,5	675	34	17
Summa	-	-	-	-	295	148

5.4 Utförande

Inledningsvis diskuteras arbetet med att injektera pelare 2, 3 och 4 (avsnitt 5.3.1 – 5.3.3) då det är dessa som ingick i den utökade förundersökningen. Därefter följer en sammanställning av resterande arbeten (5.3.4), d.v.s. pelare 1 och 5, skiborden, anslutningen till den nya dammen samt anslutningen mellan den gamla maskinstationen och älvbrinken, se Figur 5.5.

Arbetsordningen har planerats med hänsyn till damm- och personsäkerhet. Avställning av en eller flera luckor har gjorts när personal befunnit sig i vattenväg, samtidigt som det genom hela projektet alltid har funnits utskovsluckor i funktion. Ingen begränsning i anläggningens kraftproduktion har behövts för arbetets genomförande. Arbetslaget har bestått i en arbetsledare, två injekteringstekniker och två borrheter.



Figur 5.5 Skiss över Forshuvuds kraftverk, gamla delen (del av ritning från Stora Enso Energy).

5.4.1 *Borrning av injekteringsborrhål*

När den ursprungliga stampbetong göts så lades betongmassan ut i horisontella lager, vilket innebär att det fanns förutsättningar för uppkomst av horisontella skikt med sämre betong. Denna skiktning är tydlig i bilderna från borrhålsfilmningen. Förhållandet har beaktas vid placeringen av injekteringsborrhålen. Alla borrhålen löper vertikalt genom pelarna och kommer därmed att övertvåra alla horisontella strukturer.

Vid borrning är det även viktigt att injekteringsborrhålen görs så pass djupa att de når ned till fast berg. Genom kontaktinjektering kan därefter en tät kontaktzon åstadkommas. Vid borrningen av undersökningsborrhålen (avsnitt 4.2) uppstod emellertid problem med att borra ned till fullt djup, d.v.s. ned genom kontaktzonen betong/berg och vidare 1 meter ned i berget. Borrhålen tenderade att rasa in, med påföljande risk för att låsa fast borrhålskronan. Efter inledande borrhåll i pelare 1 och 2 så hade 40 % hålen rasat in, och borrhålskronan fastnade vid upprepade tillfällen. Efter en övervägning av nyttan med att injektera kontaktzonen så beslöts att injekteringen skulle avslutas ca 1 meter ovanför denna. Sålunda blev den allmänna metodiken att borrhållsarbetet delades in i två etapper, s.k. successiv fördjupning. Vid den första etappen borrhållades hålen ned till halva pelarhöjden följt av injektering. Efter att bruket härdats så borrhållades hålen upp på nytt, men nu till fullt djup, d.v.s. till ca 1 m från kontaktzonen mellan pelare och berg.

Borrhållsarbetet har gjorts med samtidig mätning av spolvattenförluster. Mätning av vattenförluster har utförts i två nivåer: i) från 7,5 m till fullt djup på ca 15 m, samt ii) från 0,5 m till 7,5 m. Trycket vid vattenförlustmätningen har för den nedre delen av hålet varit 2,5 bar och för det övre hela hålet 1,5 bar (trycket skall normalt vara lägre och aldrig högre än injekteringstrycket, eftersom vattnets tryckfortplantningsförmåga är obegränsad, medan ett injekteringsbruk fortplantar trycket med viss förlust [18]).

Eftersom pelarnas för samtliga pelare ligger under dammens brobana så gjordes där Ø100 mm kärnborrhål genom vägbeläggningen med tillhörande gruslager till ett djup på ca 500 mm. Foderrör monterades därefter för att förhindra nedfall av löst material.

Den borrhållsplan som utformades initialt baserades på ett grundmönster med hålavståndet 1 meter. Borrhållsplanen grundade sig på erfarenheter från tidigare injekteringar samt på förundersökningen. En kompletterande injekteringsomgång med ett tätare hålavstånd görs enligt planen efter behov.

Efter borrning renspolades hålen med hjälp av en polyetenslang till dess att löst material slutade att flöda upp genom borrhålet mynning. Slangen fördes upp och ner under spolningens gång under ca 5 minuter. Vattentrycket var 3 Bar. Rengöringen kan effektiviseras genom att luft tillsätts vattnet (detta har dock inte gjorts i Forshuvud).

Sammanlagt har 1170 meter hammarborrade injekteringshål etablerats. De fördelar sig på respektive pelare enligt Tabell 5.3. Den totala antalet borrhållsmeter blev i praktiken 35 % mindre än vad entreprenören inledningsvis hade planerat för (1790 m borrhållsmeter). Minskningen beror på att borrhålen har avslutats en bit innan kontaktzonen berg/betong och att det har varit en mindre åtgång bruk än vad som kalkylerats med, d.v.s. betongens

kvalitet har varit relativt god. En volymberäkning med information från Tabell 5.3 och borrhålsdimension 56 mm ger att åtgång av injekteringsbruk för att gjuta igen borrhålen uppgår till ca 0,5 m³ per pelare.

Tabell 5.3 Sammanfattning av borrhningar för pelare 1-5.

KONSTRUKTIONSDDEL	KÄRNBORR [antal]	BORRMETER [m]	HAMMARBORR [antal]	BORRMETER [m]
Pelare 1	0	0	14	210
Pelare 2	2	30	18	270
Pelare 3	2	30	17	255
Pelare 4	2	30	17	255
Pelare 5	0	0	12	180
Summa	6	90	78	1170

5.4.2 Injektering och provning

Injekteringsbruk

Bruksreceptet har valts med utgångspunkt från resultatet av vattenförlustmätningarna. Vid vattenförluster mindre än 10 liter per minut och meter användes injekteringscement och vid förluster större än 10 liter per minut och meter användes standardcement. Vattenförluster både större och mindre än 10 liter per minut uppkom under arbetets gång, men varför just dessa gränser används är oklart. Ett finmalt cement användes således vid små vattenförluster, medan det grövre standardcementet användes vid stora vattenförluster.

Injekteringen startade med pelare 1 och fortsatte därefter i nummerordning. Inledningsvis användes för pelare 1 standardcement med vct 1,0 med 1% flytmedel HPM, Bruket övergavs emellertid till följd av problem med alltför stor vattenseparation, ca 25% (dessutom var detta vct något högt ur beständighetssynpunkt). För ett idealt bruk eftersträvas 0% vattenseparation, men i praktiken kan viss separation accepteras. Skälet är att en del vatten kommer att tryckas i konstruktionen när det hela ligger under tryck, vilket gör att ett bruk med någon procents separation vid sitt hårdnande kommer att ligga närmare 0% i separation, d.v.s. ett visst överskottsvatten kommer att tas omhand. Detta resonemang låg till grund för att prova ut ett bruk med 5% max vattenseparation, vilket innebar att receptet ändrades till vct 0,8 med 2,4% HPM, se Tabell 5.4 och

Tabell 5.5. Som jämförelse kan nämnas att dosering av detta flytmedel ofta ligger runt 0,65%, vilket enligt författarnas uppfattning är något för lågt. Samtidigt kan överdosering kan leda till instabilitet och kraftigt förlängd bindetid, vilket gör att 2,4% får betraktas som i högsta laget.

Av avsnitt 2.3 framgår att en kritisk gräns för cementpastors beständighet mot urlakning ligger runt 0,7. Eftersom valt receptet har vct 0,8 så är detta att betrakta som en maxgräns.

Provning av standardcement med filterpumpen gav max 5 ml med 125 µm siktdukar, vilket motsvaras av en mycket dålig inträngning (se även Bilaga B5). Resultatet är också vad man kan förvänta sig på grund av standardcementets är relativt grovmalet. Motsvarande provning med injekteringscement gav 300 ml för siktdukarna 100 och 125 µm. Resultatet är bra och helt enligt beräknat. Vidare har provning av brukets viskositet och flytgräns givit acceptabla resultat.

Vid all provtagning har prov tagits från kolloidblandaren. Sammanfattningsvis så har inga nämnvärda avvikelser har funnits i brukets egenskaper. Bruk äldre än 30 minuter skall kasseras, vilket också har gjorts.

Tabell 5.4 Resultat från provning av vattenseparation 990702 (2,4% HPM). 2 minuter med Ultra-Turrax. Prover lagrade i 20 °C. Noteras bör att olika typer av blandare leder till olika vattenseparation för det färdiga bruket. Provning av bruk i labb behöver därför inte stämma helt överens med provning i produktion.

MATERIAL	VCT 1,0	VCT 0,9	VCT 0,8	VCT 0,7	VCT 0,6	VCT 0,5
Standardcement (batch 990603)	36%	–	23%	19%	15%	0%
Injekteringscement (batch 990630)	12%	4%	0%	0%	–	–

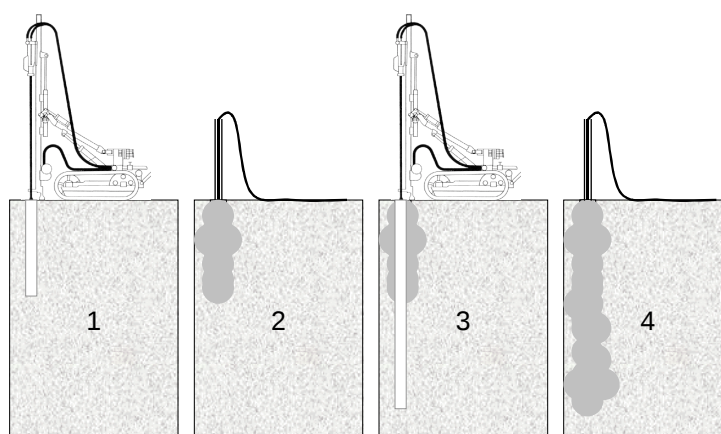
Tabell 5.5 Framtagna recept att använda vid injekteringarna i Forshuvud.

MATERIAL	VCT 0,5	VCT 0,8
Standardcement	25 kg	-
Injekteringscement	-	25 kg
Vatten	12 kg	20 kg
Flytmedel HPM	0,5 l	0,5 l

Injekteringstryck

Inledningsvis användes trycket 1,5 bar vid injektering av en pelares hela höjd, men eftersom cementåtgången blev relativt liten så höjdes trycket i de lägre delarna så småningom till 2,5 bar. Det maximala injekteringstryck som kan tillåtas beror på betongens hållfasthet och risken för att öppna upp nya spricksystem. Behovet av ett högt injekteringstryck ökar i takt med den mängd bruk som pumpas in i konstruktionen.

Ökningen till 2,5 bar gjorde det lättare att tränga bort vatten samtidigt som inträngningen av cementbruk blev bättre. Efter ytterligare övervägande övergick man senare till att injektera pelarna i två nivåer på samma sätt och med samma tryck som vid vattenförlustmätningen, d.v.s. 2,5 bar i nedre halvan av hålet och 1,5 bar i övre halvan, se Figur 5.6.



Figur 5.6 Skiss över det slutliga tillvägagångssätt som valdes för injekteringen: 1) $\frac{1}{2}$ -t hål, 2) injekterat $\frac{1}{2}$ -t hål, 3) helt hål, 4) injekterat helt hål.

Injekterings avslut

Av väsentlig betydelse för resultatet är att injekteringen utförs med ett tryck som hela tiden ligger så nära det max tillåtna som möjligt, och inte avslutas förrän ett stabilt mottryck erhållits och bruksåtgången avtagit till noll eller praktiskt taget noll [26].

I Forshuvud gjordes injekteringsavslut med vct 0,8 vid ett stabilt mottryck om 2,5 bar i den nedre nivån eller 1,5 bar i den övre nivån, samtidigt med att bruksåtgången sjönk till mindre än 0,5 liter per 10 minuter. I det fall ett stabilt mottryck inte kunde uppnås efter en åtgång på 150 kg bruk så upprepades proceduren, men med vct 0,5. Om mottryck trots detta inte uppnåddes så avbröts injekteringen i ca 30 minuter varefter den återupptogs på nytt. I praktiken uppstod emellertid inga problem med att bygga upp mottrycket.

Manschetterna är försedda med kranar som stängs allteftersom hålen blir färdiginjekterade. Dessa får sitta kvar tills bruket börjat binda. Borrning intill ett nyligen injekterat hål och omborrning av injekterad håldel har ej tillåtits förrän det att bruket börjat hårdna.

5.4.3 Bruksåtgång

Fyllnadsgraden redovisas i Tabell 5.6. Åtgången av bruk har varit lägst i pelare 1 och 5, varför det inte heller har varit nödvändigt att borra lika många hål där som i de övriga pelarna. Genom att jämföra injekterad volym med pelarnas ungefärliga totala volym så har en fyllnadsgrad kunnat beräknas. Fyllnadsgraden varierar mellan 0,5 och 1,0 % och är i medeltal är 0,7 %. Tas hänsyn till den volym (ca $0,5 \text{ m}^3$) som gått åt till att fylla borrhålen så minskar fyllnadsgraden något.

En jämförelse med motsvarande fyllnadsgrad från injekteringarna 1935 och 1986 visar att åtgången har varierat en del (

Tabell 5.7). Sett till fyllnadsgrad så har injekteringen från -86 resulterat i bäst uppgraderingsresultat⁹.

Det saknas koppling mellan mängd injekterat bruk och om ett injekteringsborrhål bor-rats med kärnborrning eller med hammarborrning. I pelare 2 har kärnborrhålen tagit ca 400 liter bruk och vissa hammarborrhål upp till ca 1000 liter. Samma sak gäller för pe-lare 3. För pelare 4 däremot så är bruksåtgången i kärnborrhålen i paritet med de bästa hammarborrhålen (Se Figur 5.8, Figur 5.10 och Figur 5.12).

Med kontaktingjektering avses tätning av kontaktzonen mellan berg och betong. Injek-tering utförs då till relativt litet bergdjup med hål som tvärrar över kontaktzonen. Efter-som endast de kärnborrade undersökningshålarna når ned till berg så har kontaktzonen bara kunnat injekteras för dessa hål.

Eftersom det inte har gått att bygga ställning i närheten av utskovsluckorna så har det varit svårigheter att täta läckage i anslutning till dessa. Det samma gäller fogar under uppströms vattenyta. Vid injektering i närhet av den vertikala inspektionsgång som finns i varje pelare så har läckage mot gången kontrollerats och vid behov tätats.

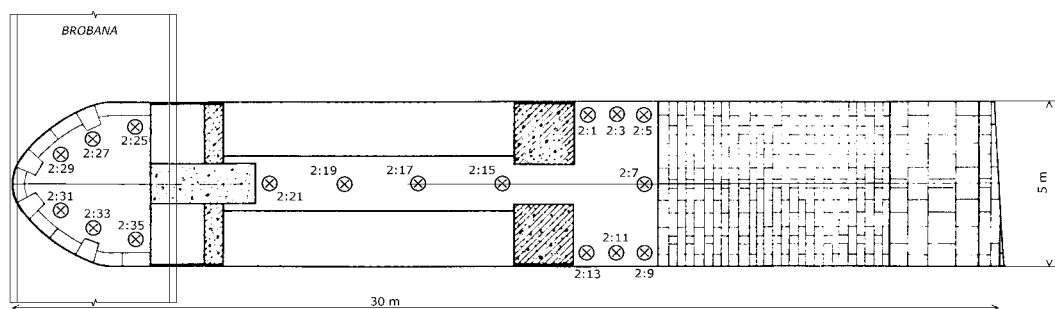
Tabell 5.6 Sammanställning av åtgången av injekteringsbruk för pelarna 1-5. Injekterad volym har jämförts med respektive pelares totala volym vilket har gett en beräknad fyllnadsgrad.

PELARE	BRUKSÅTGÅNG [m ³]	PELARVOLYM [m ³]	FYLLNADSGRAD 1999 [%]
1	5	1080	0,5
2	13	1440	0,9
3	7,8	1350	0,6
4	11,2	1350	0,8
5	3,9	675	0,6

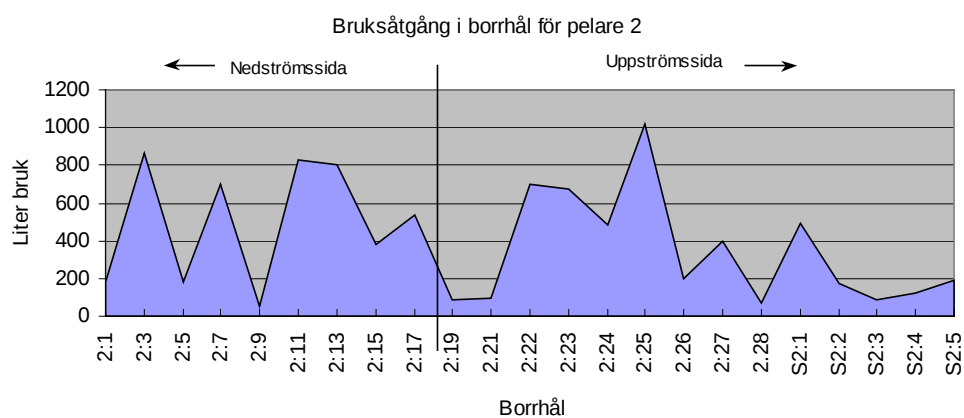
Tabell 5.7 Sammanställning av fyllnadsgrad för samtliga reparationer.

PELARE	FYLLNADSGRAD 1935 [%]	FYLLNADSGRAD 1986 [%]	FYLLNADSGRAD 1999 [%]
1	0,3	2,2	0,5
2	0,4	3,0	0,9
3	1,0	1,6	0,6
4	2,2	2,0	0,8
5	1,8	1,8	0,6

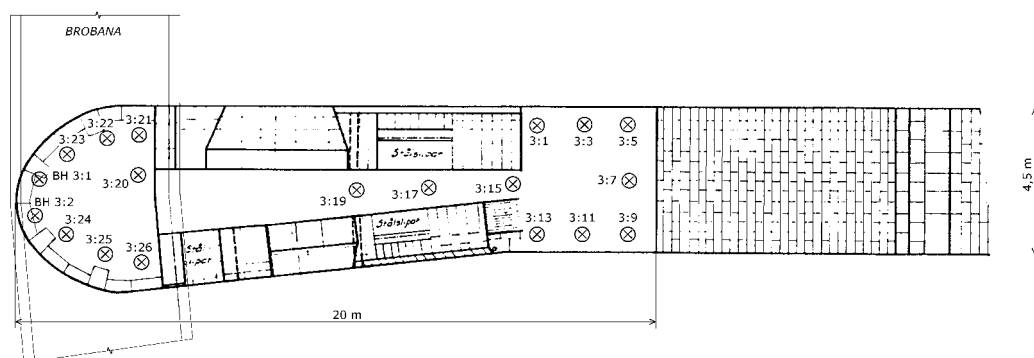
⁹ Kommentar: Detta kan vara en sanning med modifikation. Jämförelsen bygger på ett antagande att om ett vct på 0,7. Har ett högre vct använts 1986 så blir skillnaden i cementmängder mindre.



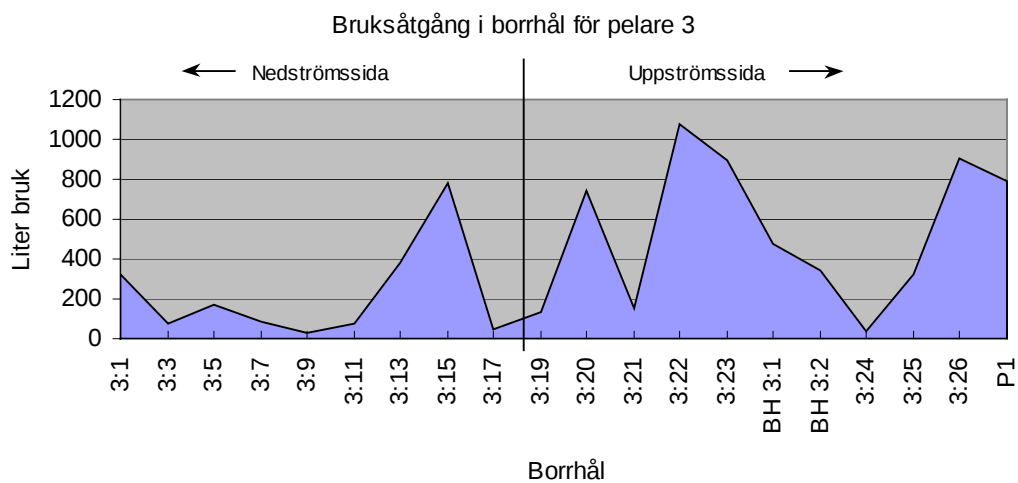
Figur 5.7 Placering av injekteringsborrhål för Pelare 2. Av 29 inplanerade borrhål har endast 17 behövt utföras.



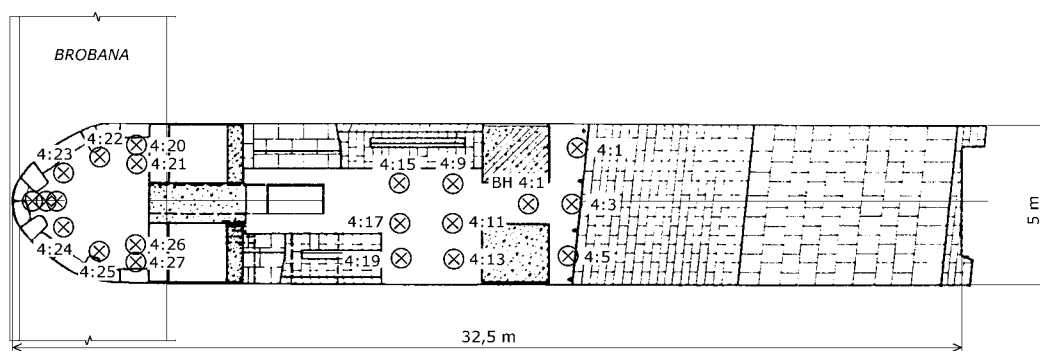
Figur 5.8 Åtgång av bruk i liter för respektive injekteringsborrhål i pelare 2.



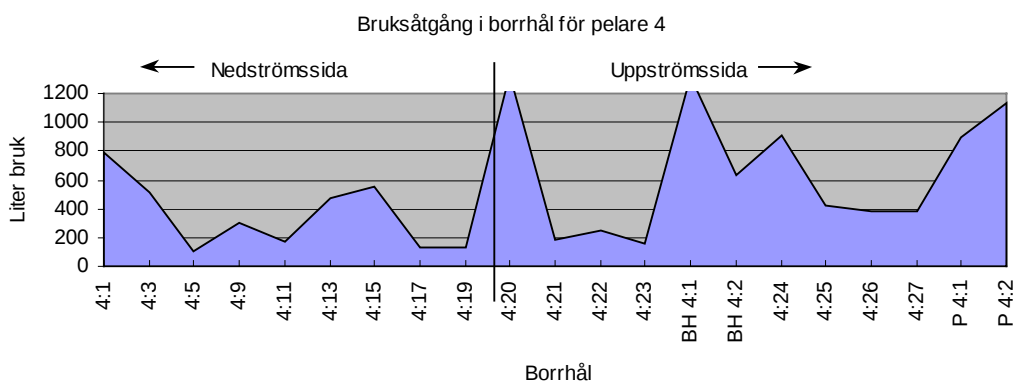
Figur 5.9 Placering av injekteringsborrhål för Pelare 3. Av 26 inplanerade borrhål har endast 19 behövt utföras.



Figur 5.10 Åtgång av bruk i liter för respektive injekteringsborrhål i pelare 3.



Figur 5.11 Placering av injekteringsborrhål för Pelare 4. Av 28 inplanerade borrhål har endast 21 behövt utföras.



Figur 5.12 Åtgång av bruk i liter för respektive injekteringsborrhål i pelare 4.

5.5 Övriga arbeten i entreprenaden

I sin helhet omfattade Stabilators entreprenad på Forshuvud Kraftstation följande arbeten:

- Borring och injektering av pelare.
- Blästring och omfogning av pelare och skibord.
- Blästring och impregnering (Conservado 100) av pelartoppar.
- Blästring och injektering av gamla intagskonstruktionen.
- Borring och injektering av tätskärm höger älvstrand.
- Borring och injektering i anslutning till nya kraftstationen.
- Borring och injektering av is- och flottningsutskov.
- Håltagning för ny värmekulvert för uppvärmning av den gamla kraftstationen med spillvärme från den nya stationen.

5.6 Miljöaspekter

Arbetet har kunnat bedrivas utan allvarliga störningar under arbetets gång. Allt arbete har omfattats av Stora Enso Energy AB:s miljöpolicy.

6 UPPFÖLJNING AV INJEKTERINGSARBETET

6.1 Inledning

Tre överordnade funktioner som en dammkonstruktion skall uppfylla är:

1. Spärra av ett vattendrag i syfte att hålla kvar drivvatten som kan användas för energiproduktion i ett kraftverks turbiner.
2. Dämma upp ett vattendrag för att i turbinerna kunna utnyttja den fallhöjd som finns naturligt över en viss sträcka av en vattenfåra.
3. Upprätthålla ett regleringsmagasin så att drivvattenflödet kan varieras efter behovet av elkraft.

Tillsammans med dammsäkerhetskrav, d.v.s. bärförmåga, stabilitet och beständighet, och de tre funktionerna ovan så kan funktionskrav för betongdammens konstruktionsdelar definieras. De beständighetsproblem som äldre dammar kan ha beror i många fall på missbedömningar i materialval, på felaktig dimensionering med hänsyn till beständighet eller på brister i utförandet. I det senare fallet rör det sig om bristande kunskaper eller slarv vid tiden för byggandet. För ägare av betongkonstruktioner är det därför viktigt att säkerställa rätt beständighetskrav för olika typer av reparationer, t.ex. vad gäller vidhäftning, kompatibilitet, krympning och täthet.

Stora Enso Energy har, liksom andra ägare i samma situation, valt att säkerställa funktionskraven för betongdammen i Forshuvud genom uppgradering med injektering. Hur bra material man än har att jobba med så hjälper det dock inte om injekteringen utförs på ett dåligt sätt. I fallet med en cementinjektering så är det framförallt krav på vattentäthet och urlakningsbeständighet som skall kunna uppfyllas under den period som dammens funktionskrav skall vara uppfyllda.

Ett injekteringsresultat är beroende av fyra huvudfaktorer: injekteringsföremål, injekteringsmaterial, injekteringsmetod och kompetens och erfarenhet hos den personal som utför injekteringen. Förbättringen kan mätas som förändring av täthet, hållfasthet och beständighet. Efter slutförd injektering bör därför resultatet kontrolleras genom borrar och vattenförlustmätning av särskilda kontrollhål. Där vattenförlusten överstiger tillåtet värde bör nya hål borrar och ytterligare injektering utföras, varefter ny kontroll tar vid [26].

6.2 Ägarens uppföljning

Stora Enso Energy har inte gjort någon egen uppföljning av injekteringsarbetet annat än en slutbesiktning. Ägaren har dock valt att delfinansiera en uppföljning inom ramen för demonstrationsprojektet, se avsnitt 6.4.

6.3 Entreprenörens uppföljning

Entreprenören har främst gjort kontroll av injekteringen utifrån den mängd bruk som har kunnat tryckas ut i dammkonstruktionen. Utifrån de krav som denne har ställt på utförandet så har ingen förtätning av den ursprungliga injekteringsplanen varit nödvändig. Tvärtom har antalet injekteringsborrhål kunna minskas. Detta kan förklaras med att betongkvaliteten visat sig vara i bättre kondition än vad förundersökningen från 1998 visade.

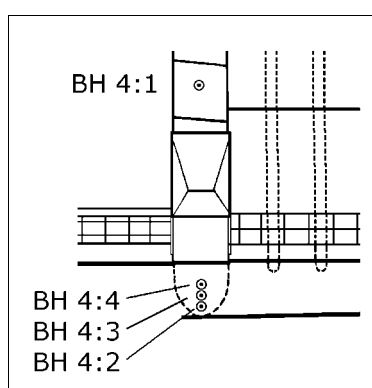
Utöver detta så har entreprenören hjälpt till med genomförandet av den uppföljning som gjorts inom ramen för demonstrationsprojektet, se avsnitt 6.4.

6.4 Uppföljning inom ramen för demonstrationsprojektet

6.4.1 Inledning

I samband med upphandlingen av loggningsarbetet i den utökade förundersökningen ingick en option på ytterligare mätningar för uppföljning efter injekteringsarbetets avslut. Mätningar skulle då endast göras om resultatet från förundersökningen visade sig lovande.

Det kunde snart konstateras att speciellt borrhålsfilmningen gav mycket bra information om betongens kondition, varför nya mätningar beställdes för en uppföljningsundersökning för kontroll av uppnått injekteringsresultat. Två nya kärnborrhål borrades i pelare 4, d.v.s. den pelare som visat sig vara i störst behov av reparation. Borringarna gjordes strax innan Stabilator avetablerade arbetsplatsen i Forshuvud. Borrhålens placering framgår av Figur 6.1. Placeringen av BH 4:3 och 4:4 ligger nära injekteringshålet 4:2. De nya hålen bör således reflektera hur inträngningen av bruk har blivit med ökande avstånd från injekteringsborrhålet.



Figur 6.1 Placering av borrhål 4:3 och 4:4 för uppföljning av uppnått injekteringsresultat i pelare 4.

Tabell 6.1 Samlad information för de två uppföljningsborrhålen i Figur 6.1.

BORRHÅL	LÄNGD [m]	KOMMENTAR
BH 4:3	16,5	Vattenyta 6,8 m, ingen bergkontakt.
BH 4:4	17,2	Vattenyta 7,2 m, bergkontakt 16,6 m.

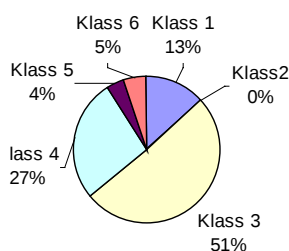
6.4.2 Borrkärnekartering

Borrkärnekarteringen liksom tidigare sammanställts i diagramform med hjälp av Excel-makrot. För förklaring till de olika kvalitetsklasserna hänvisas till Tabell 4.2. Besiktningensprotokollen från karteringen finns i Bilaga A. En sammanställning i diagramform redovisas i Figur 6.2. Avsaknad av infärgning av injekteringsbruket gör det svårt att utvärdera fyllnadsgraden med någon större säkerhet.

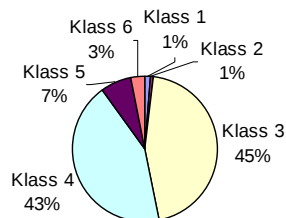
Indelningen av betongkvalitet i klasserna 1-3 respektive klasserna 4-6 görs på samma sätt som tidigare. En kvalitetshöjning bör ha skett efter injekteringen. Innan injekteringen så stod de tre första klasserna för 68 % av kärnan från uppströmssidan (BH 4:2). Med rätta borde de två kärnorna från BH 4:3 och BH 4:4 uppvisa en större andel för dessa klasser. Eftersom det senare hålet ligger längre från injekteringsborrhålet så bör dessutom kvaliteten i BH 4:3 vara högre än i BH 4:4.

Resultatet från karteringen sammanställs i diagrammen i Figur 6.2. En grov kvalitetsuppskattning fås genom att jämföra andelen betong i klasserna 1-3 med andelen i klasserna 4-6 i respektive hål. Det visar sig att klassificeringen inte gör det enkelt att påvisa förbättringar mellan kärnan BH 4:2 och de två nya kärnorna BH 4:3 och BH 4:4. Kärnan 4:3 som ligger närmast injekteringsborrhålet har faktiskt sämre betong än 4:4 som ligger ytterligare 0,5 meter längre bort från injekteringspunkten. Kvaliteten för BH 4:2 och BH 4:4 är likvärdig. *Resultatet är anmärkningsvärt och visar att kärnklassificering som systemet är uppbyggt för närvarande är ett trubbigt verktyg för att utvärdera uppnådd förbättring av en injektering.*

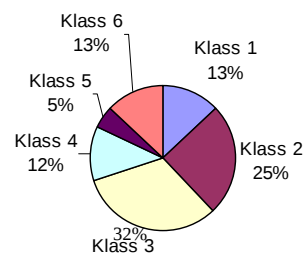
Kärnklassificering BH 4:2



Kärnklassificering BH 4:3



Kärnklassificering BH 4:4



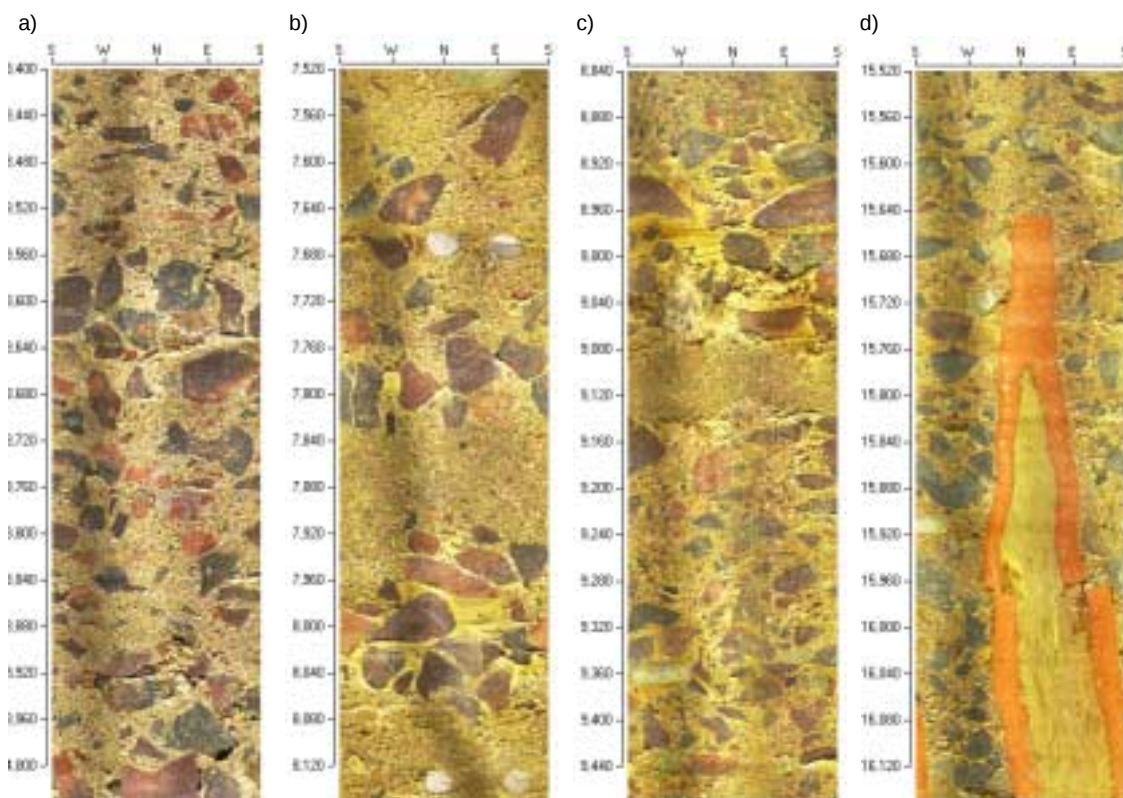
Figur 6.2 Besiktningensprotokoll för kartering av borrkärna från borrhål 4:3 och 4:4.

6.4.3 Borrhålsfilmning

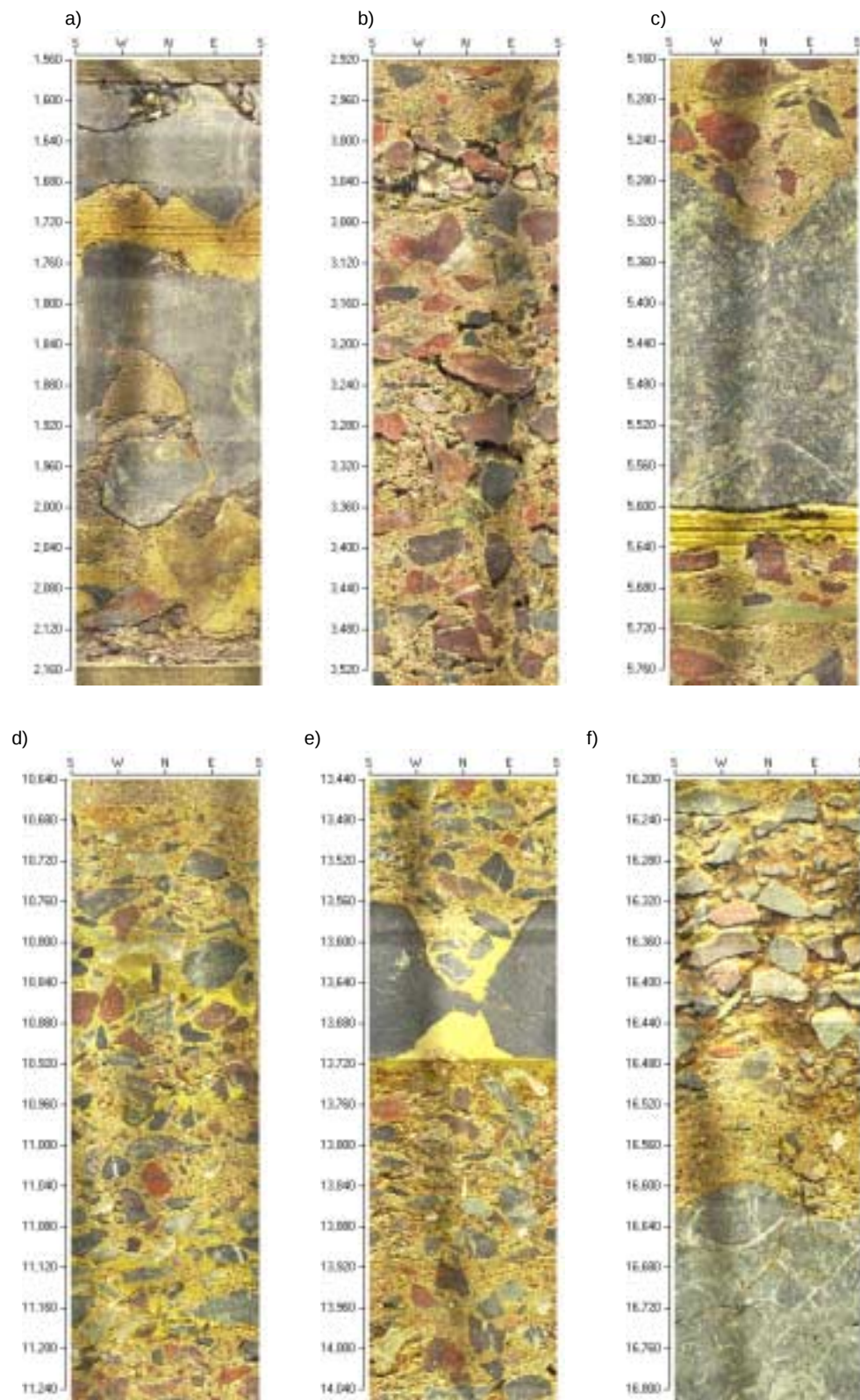
Bildmaterialet från uppföljningsfilmningen visar liksom i den tidigare undersökningen överlag god kvalitet, se Figur 6.3 och Figur 6.4. Det nya injekteringsbruket känns igen på en ljus vitaktig färg.

Betongen i anslutning till BH 3:3 har fortfarande i stor utsträckning öppna porer – förmodligen beroende på att de inte står i hydraulisk kontakt med varandra. Mindre hålrum i anslutning till enskilda ballaststenar har till stor del fyllts ut med nytt bruk.

Betongen i anslutning till BH 4:4 uppvisar relativt stora kvalitetsvariationer. Sammanhängande partier med nytt bruk visar att partier med större hålrum har gått att reparera. Samtidigt finns det också kvar enskilda större partier som inte verkar ha stått i hydraulisk kontakt med något injekteringsborrhål. Dessvärre ser detta ut att gälla för kontaktzonen mellan berg och betong.



Figur 6.3 Bilder från borrhålsfilmningen i BH 4:3. Den första bilden (a) visar att det kvarstår en del håligheter i betongen. Som helhet ser utfyllnaden av hålrum och porer ut att vara god (b-d). I den sista bilden ses ett igeninjekterat dräneringsrör.



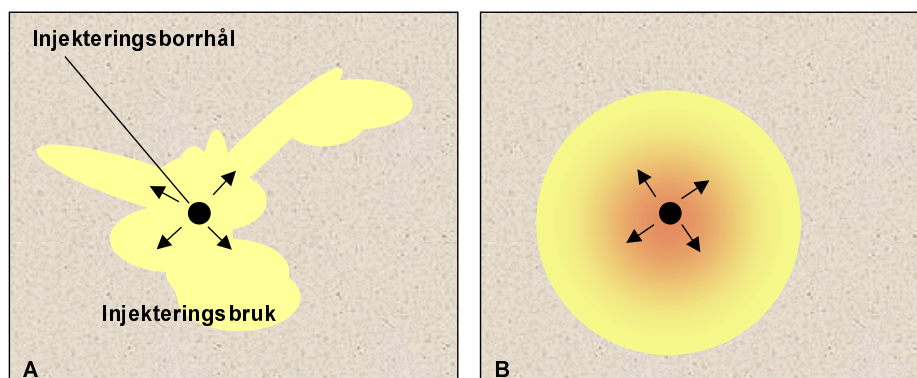
Figur 6.4 Bilder från borrhålsfilmningen i BH 4:4. Det generella intrycket av denna kärna är att variationerna är större än i BH 4:3. Det finns större hålrum som har fyllts ut samtidigt som det finns partier som är relativt dåliga.

6.4.4 Sammanfattning av uppföljningsmätningar

Det går inte att anta en jämn förbättring av betongen i anslutning till ett injekteringsborrhål. Istället kommer bruket att leta sig fram den lättaste vägen och relativt dålig betong nära ett injekteringsborrhål kan förbli dålig medan andra partier en bit bort får ta del av det nya bruket (Figur 6.5). Så har uppenbarligen varit fallet i Forshuvud (framgång av borrhånekarteringen). Att det förhåller sig på det här sättet är inget nytt, men tål att upprepas. Självklart är det därför också svårt att göra en bra uppföljning av resultatet från en injektering. Uppföljning genom vattenförlustmätningar är en möjlig lösning som dock inte har använts i Forshuvud.

Filmningen visar att de farhågor som fanns under arbetets gång att kontaktzonen mellan berg och betong skulle bli bristfällig verkar vara ett faktum för pelare 4. Förhållandena under genomförandet (problem med borrhåll av injekteringsborrhål) har dock varit sådana att detta är en övervägd risk som man har varit beredd att ta.

Filmningen visar att det överlag har skett en förbättring av betongkvaliteten. Förbättringen är dock inte jämn. Vissa tidigare dåliga partier ser nu bra ut, till och med mycket bra. Andra sådana parter ser ut att helt sakna nytt bruk.



Figur 6.5 Illustration av det troliga faktiska spridningsförloppet från ett injekteringsborrhål i Forshuvud (a) och det ideala spridningsförloppet (b). Den injekterade konstruktionen ses här ovanifrån.

7 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

7.1 Förundersökning

Sammanfattningsvis så har den utökade förundersökningen med loggningsbaserade undersökningsmetoder utgjort ett bra stöd för att beskriva betongens kondition i Fors-huvuddammen. En brist har varit att entreprenören haft problem med att borra så pass djupa hål att de passerar kontaktzonen till underliggande berggrund. Mest slående är resultat från filmningen, men även caliperloggningen, som har gett bra information om betongens kondition. Radarmätningarna har fungerat sämre än väntat och endast tillfört indikationer på kvalitetsbrister. Försöket med radartomografi misslyckades till följd av radarpulsens energi dämpades ut i betongen betydligt snabbare än väntat. Detta kan bero på endera av tre anledningar: mycket hög fukthalt i betongen, tidigare injektering genomförd med inblandning av bentonit eller närvaro av salt från tösaltning. Ingen utredning har gjorts för att klarlägga vilken av dessa faktorer som ligger bakom det misslyckade resultatet. Tösaltning är dock osannolikt. Ingen dokumenterad tösaltning av pelarna är känd. Dessutom borde rester från tösaltning leda till mer allvarliga problem med armeringskorrosion.

Konstruktionen är från den s.k. blötbetongepoken. Det befarades därför finnas gott om hålrum och sprickor i betongen, men den utökade förundersökningen har visat att så inte är fallet. En förklaring är att tidigare injekteringsarbeten har lyckats väl med att fylla ut gamla hålrum. De få sprickor och hålrum som trots allt finns förmodas vara vattenförande. Till exempel så ligger, för alla de borrhål som är djupa nog att träffa på en stående vattenyta, denna i anslutning till sprickor eller hålrum.

Filmbilderna visar att de problem med separation som har hänförts till blötbetongepoken stämmer väl in på betongen i de undersökta pelarna. Det förekommer i flera fall långa partier med mycket lite synlig ballast, medan ballast dominerar i andra partier. Vidare visar bildmaterialet att konstruktionens dräneringsrör idag är helt igensatta av cementbruk, d.v.s. dess funktion är obefintlig. Konstruktionen är därmed utsatt för en ökad belastning jämfört med då den konstruerades. I och med att vatten kan passera genom betongen så förändras tryckgradient från dammen uppströmssida till nedströmssidan vilket resulterar i ett ökat stjälpande moment, d.v.s. säkerheten mot vältnings och glidning minskar.

Filmbilderna har visat sig vara ett bra komplement till konventionell borrhärnekartering. Klassificering kan inte göras enligt gängse praxis (för detta krävs en kärna), men bildmaterialet ger god uppfattning om betongens kvalitet in-situ. Till fördelarna kan räknas att orsaker till förluster vid kärnprovtagning blir uppenbar och att lägesbestämning av defekter kan göras med stor säkerhet. Dokumentation av förundersökningen blir dessutom enkel (jämfört med långtidsförvaring av kärnor). En begränsning är att det kan vara svårt att upptäcka hålrum i sådana fall som de har mjuka övergångar, d.v.s. då vinkeln för hålets väggar är mycket flack. BIP-sondens ljuskälla ger då inte upphov till skuggor, vilket gör att hålet ser ut som "normal" borrhålsvägg.

Undersökningar med Caliperlogg är enkel att genomföra samtidigt som metoden ger direkt information om betongens kondition. I Forshuvud har endast kärnborrhål undersökts. Av allt att döma är metoden värdefull även för hammarborrade hål eftersom resultatet från en loggning kommer att ge en direkt återkoppling av omfattningen av ras och sönderslagen dålig betong. En begränsning är att sonden har en viss slaglängd som sätter en gräns för hur långt loggens mekaniska givararm förmår att tränga in i en spricka och i förmågan att registrera mycket tunna sprickor. Eftersom den utrustning som har använts endast har en givararm så mäts endast avvikelser i en riktning. Sannolikt har därför mätningen missat att registrera en del av de avvikelser som finns.

Förundersökningen visar att det finns en klar kvalitetsskillnad mellan enskilda pelare och mellan pelarnas uppströms- och nedströmssida. Uppströmsväggarnas täthet är troligen en tungt vägande orsak till dessa skillnader. Läget för stående vattenyta i undersökningsborrhålen visar att pelare 3 är betydligt tätare än pelare 2 och 4, d.v.s. pelare 3 har i mindre utsträckning varit exponerad för urlakning. Undersökningen visar även att betongkvaliteten mellan intilliggande hål är likvärdig.

Armeringens funktion kan försämras genom korrosion genom dels minskad effektiv tvärsnittsarea och dels försämrad vidhäftning mot intilliggande betong. Armeringskorrosion anses generellt vara en vanlig orsak till nedbrytning av armerade betongkonstruktioner. Men eftersom det ofta finns relativt lite armering i vattenbyggnadsbetong, älvvattnet är jonfattigt och betongen i allmänhet inte är exponerad för tösaltning så anses problemet vara ovanligt på betongdammar. Den fuktiga miljön gör dessutom att karbonatisering inte heller sker i någon större utsträckning. Förundersökningen visar att armeringskorrosion inte är något utbrett problem i Forshuvud, dock misstänks korrosion finnas på uppströmsarmeringen i pelare 4.

Ingen kontroll av funktionen för befintliga rörelsefogar har gjorts. Det kan dock argumenteras för att en sådan kontroll bör göras eftersom tidigare injekteringar kan ha påverkat funktionen. Av samma anledning bör en kontroll av funktionen även göras efter avslutad injektering. Hur en sådan kontroll bör göras är dock oklart.

En slutsats av förundersökningen är att man framledes alltid bör försöka färga ett injekteringsbruk. Därmed underlättas, speciellt efter återkommande reparationer, utvärderingen av ett bruks ursprung, liksom utvärderingen av hur väl en ny injektering har fyllt ut jämfört med befintligt injekteringsbruk. Mot detta kan argumenteras att färgämnet potentiellt kan försämma brukets inträngning. Test som gjorts av färgämnet röd järnoxid vid betonglaboratoriet vid Vattenfall Utveckling visar dock att inträngningen inte påverkas. Mot infärgning talar att färgen på bruket kan visa sig bli alltför svag, d.v.s. det kan fortfarande vara svårt att identifiera bruket när det väl är ute i konstruktionen.

7.2 Injektering

Den utrustning som har använts av entreprenören har möjliggjort att injekteringsarbetet i stort har löpt på enligt plan. Ett viktigt undantag är borrhålsarbetet (se vidare längre fram). Noteras kan att den kolloidkvarn som användes, och som används allmänt i bran-

schen, har erkänt bristfällig dispergeringseffekt. Detta kommer att inverka negativt på brukets inträngningsförmåga, men i dagsläget saknas bra alternativ. Noteras kan också att den borrhög som har använts för att borra injekteringsborrhålen inte längre tillverkas. Vidare så bör den utrustning som användes för att övervaka tryck och flöde under injekteringen relativt enkelt kunna förbättras genom digital registrering av mätvärden, d.v.s. en logg bör kopplas till tryck- och flödesgivarna. Larm för styrande injekteringsparametrar kan då lätt regleras av injekteringspersonalen.

Författarnas uppfattning är att provningsutrustning på plats bör omfatta:

- Kärll för att mäta vattenseparation.
- Filterpump.
- Mud balance för att kontrollera vct.
- Marshkon för att kontrollera att brukets viskositet ligger in om rätt gränsvärden.
- Termometer för att kontrollera av blandarens funktion (i takt med att blandaren blir sliten så kommer brukets temperatur att sjunka).
- Fallkon eller bindetidsmätning.

Både standard- och injekteringscement har använts vid injekteringen. Den förundersökning som låg bakom planeringen av arbetet hade indikerat att det fanns stora hålrum i konstruktion, vilket motiverar användning av standardcement. Den utökade förundersökningen visade dock att betongen hade relativt få hålrum. De mindre skador som dominerade motiverar snarare en allmän användning av injekteringscement.

Principen för vilka vct som bör användas vid injektering har ändrats kraftigt under de senaste årtiondena. Från att ha eftersträvat ett bruk med mycket vatten så säger dagens kunskap om beständighet att vatteninnehållet begränsas. Det bruk som användes i Fors-huvud hade vct 0,8, vilket får anses vara en maxgräns ur beständighetssynpunkt.

De problem som fanns inledningsvis med separation gick snabbt att åtgärda genom en modifiering av receptet som baserades på provning i fält.

Injekteringsarbetet har utom i ett par avseenden kunnat genomföras enligt entreprenörens ursprungliga planering. Som redan nämnts uppstod svåra problem vid borrhögsarbetet med att betong tenderade att rasa in och påföljande risk för fastlåsning av borrhögen. Problemen ledde snart till beslut att sluta injekteringsborrhålen en bit innan berget, vilket gjorde att kontaktzonen berg/betong i regel inte kom att förstärkas. Det kvarstår därför osäkerhet om en tät kontaktzon mellan betong och berg. Det tål att upprepas att läckage med genomströmning av vatten från uppströms- till nedströmssidan inte är detsamma som att dränera undergrunden, d.v.s. att låta vattentryck i berget på ett kontrollerat sätt avledas mot luft. Strömmande vatten under konstruktionen skapar fullt upptryck mot kontaktytan, vilket dammen med största sannolikhet inte är konstruerad för.

För att klara att borra bra injekteringsborrhål så krävs uppenbarligen en förbättrad metodik som är anpassad för borrhög i gammal betong. Hur denna bör se ut är författarna

inte klara över. Vi förmodar det finns starka skäl till att utreda dels varför borrhörningsarbetet inte fungerade tillfredsställande och dels hur förbättrad borrhörningsteknik i dålig betong skall se ut. Detta skulle ge beställare bättre möjlighet att ta fram en kravspecifikation inför en upphandling och entreprenörer förbättrad möjlighet till att uppnå goda resultat till minskade merkostnad för strul.

Upptrycket under dammpelarna har betydelse för dammens stabilitet. Eftersom upptrycket går att kontrollera med hjälp av tryckgivare så bör man vid injekteringsarbeten rutinmässigt göra samtidig installation av tryckgivare. Den utökade förundersökningen visade dessutom att funktionen för den dränering som byggdes in i dammen från början är borta idag. Inga nya dränagehål har borrats.

Entreprenören har endast behövt borra drygt hälften av planerade borrhål, vilket innebär att det inledande borrhålsmönstret i regel inte har behövt förtätas. Betongkvaliteten har således varit bättre än vad 1998 års förundersökning visade. Med facit i hand så kan konstateras att de beslut som baserades på denna förundersökning var dåligt underbyggda. Tillvägagångssättet för injektering justerades genom att injektera i ett tvåstegsförfarande istället för att injektera hela borrhålet i ett steg.

Inledningsvis gjordes två prognoser för bruksåtgången. En låg prognos var 2,5% fyllnadsgrad och en hög var 5%. Facit visar att åtgången varierade mellan 0,5 och 0,9% med ett medeltal på 0,7%, d.v.s. betydligt mindre mängder har gått åt än vad som förutsågs inför arbetets start.

Den utökade förundersökningen visade att pelare 2 och 4 var betydligt sämre skick än pelare 3. Detta har också kunnat konstateras vid injekteringen där dessa två pelare har haft de högst uppnådda fyllnadsgraderna. Vidare så har störst mängder för enskilda borrhål varit för borrhål på pelarnas uppströmssida, d.v.s. det märks ur injekteringsresultatet att betongkvaliteten har varit sämst i de delar som ligger i anslutning till magasinet.

En fortlöpande diskussion som förs i branschen är huruvida ett bättre injekteringsresultat kan uppnås med kärnborrade injekteringsborrhål jämfört med hammarborrade hål. Detta skulle motiveras med att man vid hammarborrning lokalt utsätter konstruktionen för höga slagtryck. Det borrhålskax som bildas vid borrhörningen kan i viss utsträckning förväntas tryckas ut i intilliggande sprickor och håligheter. Vid efterföljande rengöring av borrhålet med vattenspolning och vid injektering lägger man sig på trycknivåer som är lägre än de lokalt höga trycket vid borrhörningen. Resonemanget leder fram till ett förväntat resultat där borrhörningsarbetet oavsiktligt har tätat sprickor och håligheter med borrhålskax. Inträngningen av injekteringsbruk kan – oavsett hur väldispergerat och i övrigt bra bruket är – aldrig bli bättre än de begränsningar som närvaro av borrhålskaxpluggar tillåter. För Forshuvuds del så visar t.ex. Figurerna 34, 36 och 38 att det inte finns något entydigt samband mellan injektering i de kärnborrade undersökningsborrhålen och hammarborrade standardhålen. Exempelvis så har stora mängder bruk gått åt i de kärnborrade hålen i pelare 4, men så är inte fallet i pelare 3. Slutsatsen blir, i det här fallet, att antagandet om bättre injekteringsresultat med kärnborrade hål inte har kunnat bekräftas.

7.3 Uppföljning

Varken beställaren eller entreprenören har gjort någon egentlig uppföljning av genomfört arbete. Beställarens uppföljning består av en garantibesiktning och entreprenörens uppföljning består av en levereras med dokumentation av genomfört arbete. Både beställare och entreprenör har dock bidragit till att det inom FoU-projektets ram har kunna genomföras en "extraordinär" uppföljning. Denna har bestått i att göra ett par nya kärnborrhål och att göra en ny filmning med BIP-systemet.

Filmningen visar att de farhågor som fanns under arbetets gång att kontaktzonen mellan berg och betong skulle bli bristfällig verkar vara ett faktum för pelare 4. Förhållandena under genomförandet har dock varit sådana att detta är en övervägd risk som man har varit beredd att ta.

Filmningen visar att det överlag har skett en förbättring av betongkvaliteten. Förbättringen är dock inte jämn. Vissa tidigare dåliga partier ser nu bra ut, till och med mycket bra. Andra sådana parter ser ut att helt sakna nytt bruk.

De insatser som har gjorts inom demonstrationsprojektet för att följa upp injekteringsresultatet är mycket begränsade. Fokus bör i en ordentlig uppföljning vara att säkerställa dels kontaktzonen berg och betong och dels kontrollera uppströmssidans täthet. Det förra fallet är viktigt ut stabilitetssynpunkt, det andra för att förhindra att konstruktionen fortsätter att exponeras för läckvatten. Just förekomst av läckvatten genom betongen i pelare 4 har resulterat i en sämre betongkvalitet jämfört med de övriga pelarna.

Sammanfattningsvis finns det osäkerheter i hur kontaktzonen fungerar, vilket motiverar framtida övervakning av porttryck.

7.4 Slutord

Hade man gjort annorlunda om information från den utökade förundersökningen funnits innan förnyelsen projekterades? Författarnas svar är Ja. Några punkter är:

- Lägre förväntad fyllnadsgrad.
- Större andel injekteringsbruk.
- Färgning av injekteringsbruk.

När nästa Fördjupade Dammsäkerhetsvärdering genomförs i Forshuvud bör uppmärksammas dels rörelsefogarnas funktion och dels stabilitetsberäkningar som tar hänsyn till att dräneringssystemet inte fungerar och att det kan råda full upptryck.

Vad behövs göras på området?

- Ta fram bättre borrhäls teknik för dålig betong. Gäller för både utförar- och maskinsidan.
- Hjälp för att avgöra när krav bör ställas på att befintlig armering inte skadas. Beskrivning av rekommenderad åtgärd när detta trots allt sker.
- Ta fram bättre verktyg för att följa upp resultatet av genomförda injekteringar.

- Ta fram rekommendationer för samtidig installation av instrumentering, speciellt för upptrycksmätningar.
- Ta fram rekommendationer för hur man skall hantera kvalitetskontroller av bruk under produktionsfasen i ett normalprojekt, t.ex. kontroll av att bruket inte blir äldre än 30 minuter. Sådana rekommendationer används vid de injekteringsarbeten som görs vid Södra Länken.
- Introduktionskurs i praktisk injektering för att introducera ny personal på entreprenörsidan.
- Handbok som underlättar för beställare att handla upp injekteringsarbeten, inklusive ett kapitel om vad som går att uppnå med förundersökningar.

8 REFERENSER

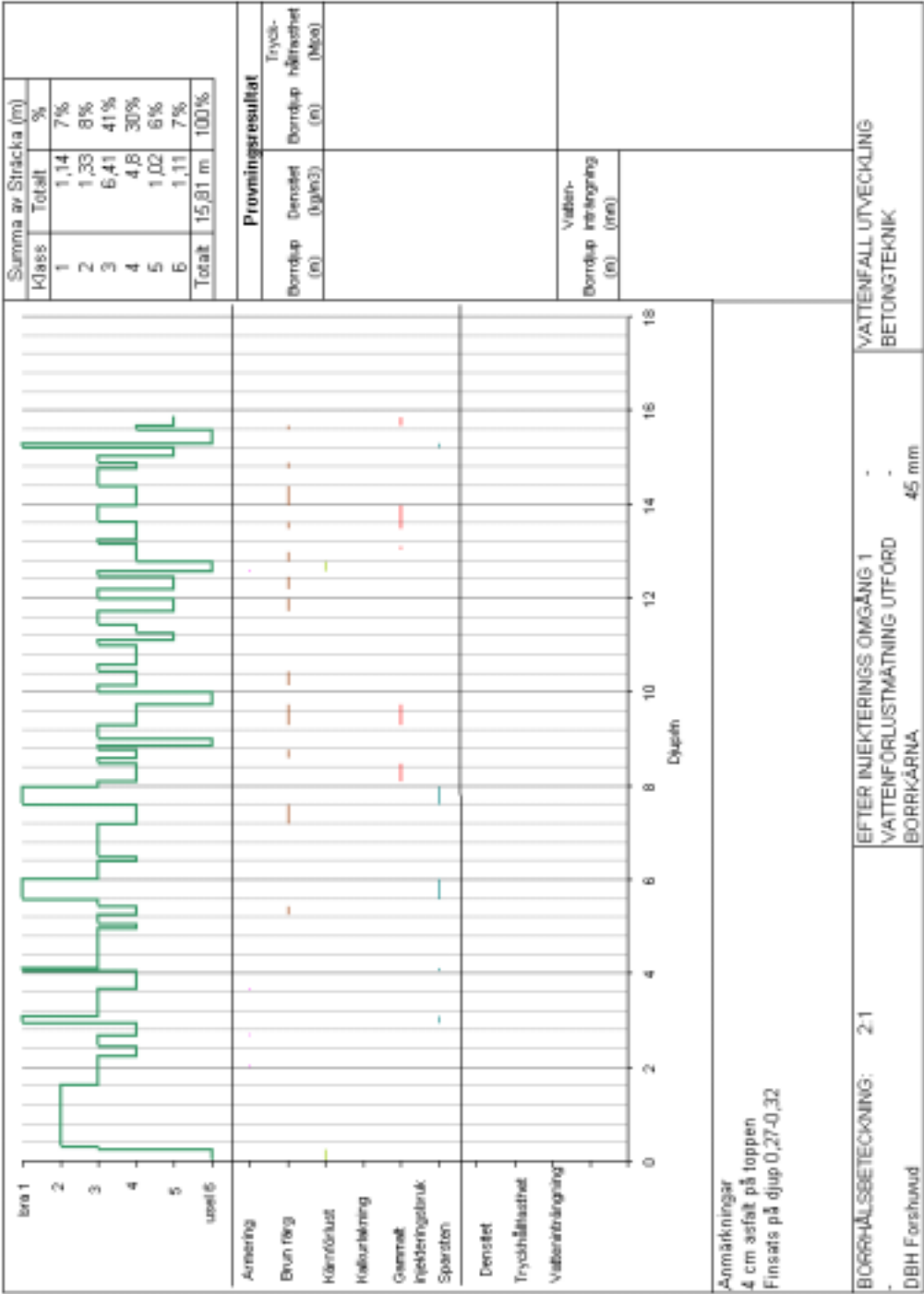
- [1] Alemo, J., Johansson, N. och Bronner, N. (1988). *Urlakning av cementinjektering*, Vattenfall Vattenkraft: Utveckling & Miljö, FUD-rapport U(B) 1988/18, 62 s.
- [2] Alm, P-G. (1990). *Loggningsteknik - en kort introduktion*, Kompendium, Institutionen för Geoteknologi, Lunds Tekniska Högskola, 21 s.
- [3] Brunnström, L. Och Spade, B. (1995). *Elektriska vattenkraftverk - Kulturhistoriskt värdefulla anläggningar 1891-1950*, Riksantikvarieämbetet, ISBN 91-7192-963-0, 205 s.
- [4] Bernstone C. (1998). *Kunskapsåterföring på betongområdet från det amerikanska REMR-programmet*, Elforsk Rapport 98:33, 79 s.
- [5] Ekström, T. (2000). *Leaching of concrete - experiments and modelling*, Licentiatavhandling, Report TVBM-7153, Lunds Universitet, 151 s.
- [6] Eriksson, H. (1991). *Cementinjektering i äldre sten- och betongdammar*, VAST, Stockholm, April 1991. 22 s.
- [7] Grøner, C. F. (1991). *Aldring og sikkerhet av betongdammer*, NVE Tilsyns- og beredskapsavdelingen, Prosjekt damsikkerhet, Rapport nr. 1, 38 s.
- [8] Grønholm, R. (2001). Utvärdering av borrhäror förån betongkonstruktioner, *Elforsk Rapport* 01:01, 29 s.
- [9] Fagerlund, G. (1987). *Beständiga betongkonstruktioner*, Cementa, Uppsala.
- [10] Forsman, B. (1990). *Bergteknik*, Kompendium BG 017, Tekniska Högskolan i Luleå, 127 s.
- [11] Hakami, E. (1993). *Portryck under dammar - litteraturstudie*, Vattenfall Vattenkraft, ISSN 1103-3134, 26 s
- [12] Hansson, P. (1994). *Cementinjektering – handbok i materialteknik för injektorare*, Elforsk Rapport 94:12, 32 s.
- [13] Hansson, P. (1995). *Injektering av jorrdammar - problemformulering och litteraturinventering*, Rapport UC 95:2, Vattenfall Utveckling AB, 17 s.
- [14] Hansson, P. (1997). Föryngring av betong i Älvkarleby kraftstation 90-91, i *Sammanfattning av föredrag Kraftindustrins Betongdag 1997*, Rapport UC 97:10Ö, Vattenfall Utveckling, Betongteknik, s. 17-19.
- [15] Houlsby, A. C. (1990). *Construction and design of cement grouting - a guide to grouting in rock foundations*, John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-471-51629-5, 442 s.
- [16] Johansson, M. (1999). Digital image processing of borehole images for determination of rock fracture orientation and aperture, Licentiatavhandling, Kungliga Tekniska Högskolan, ISBN 91-7170-436-1, 83 s.
- [17] Lane Jr, J. W., Joesten, P. K. och Haeni, F. P. (1998). Use of borehole methods to monitor the movement of a saline tracer in carbonate rock at Belvidere, Illinois, *Procs. SAGEEP '98 (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems)*, Chicago, Illinois, Mars 22-25 1998, s. 323 - 332.
- [18] Ljungkrantz, C., Möller, G. och Petersons, N. (1992). *Betonghandboken: arbetsutförande*, Svensk Byggtjänst och Cementa AB, ISBN 91-7332-586-4, s. 680.
- [19] Melander, R. (1997). *Betongdammars kondition och beständighet*, Licentiatavhandling, Kungliga Tekniska Högskolan, ISSN 1400-1292.
- [20] Naturvårdsverket (1999). *Hållbar energiframtid? Långsiktiga miljömål med systemlösningar för el och värme*, Slutrapport från SAME-projektet, ISBN 91-620-4965-8, 92 s.

-
- [21] Powers, T. C., Copeland, L. E. och Mann, H. M. (1959). Capillary continuity and discontinuity in cement pastes, *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, May 1959.
- [22] Statens Vattenfallsverk och Svenska Kraftverksföreningen och Svenska Kraftverksföreningen (1997). *Fortsatt vattenkraftutbyggnad*, ISBN 91-7186-051-7, 83 s.
- [23] Sundius, N. (1932). *Utlåtande angående borrhärlor av betong ur dammen Bullerforsen i Dalälven*, Sveriges Geologiska Undersökning, Stockholm den 22 mars 1932, 5 s.
- [24] Svenska Energi (2000), RIDAS – Tillämpningsanvisningar, Stockholm 2000, 136 s.
- [25] Svenska Vattenkraftföreningen (1923), Svenska Vattenkraftföreningens publikationer nr. 152 (1923:7).
- [26] Statens Vattenfallsverk (1968). *Anvisningar för utförande av cementinjektering i berg*, Rapport, 60 s.
- [27] Stora Enso Energy AB. *PM beträffande cementinjektering i Forshuvud 1935*, Falun 12 december 1935, 3 s.
- [28] VAST (1991). *Betong i Vattenkraftanläggningar*, Kraftverksföreningens utvecklingsstiftelse, ISBN 91-8733-407-0, 11 s
- [29] Widing, S. (1987). Några allmänna synpunkter på damminjektering, i *Seminarium om dammar*, Kungliga Tekniska Högskolan, 20-21 november 1986, Report No. 36, 20 s.

A BESIKTNINGSPROTOKOLL

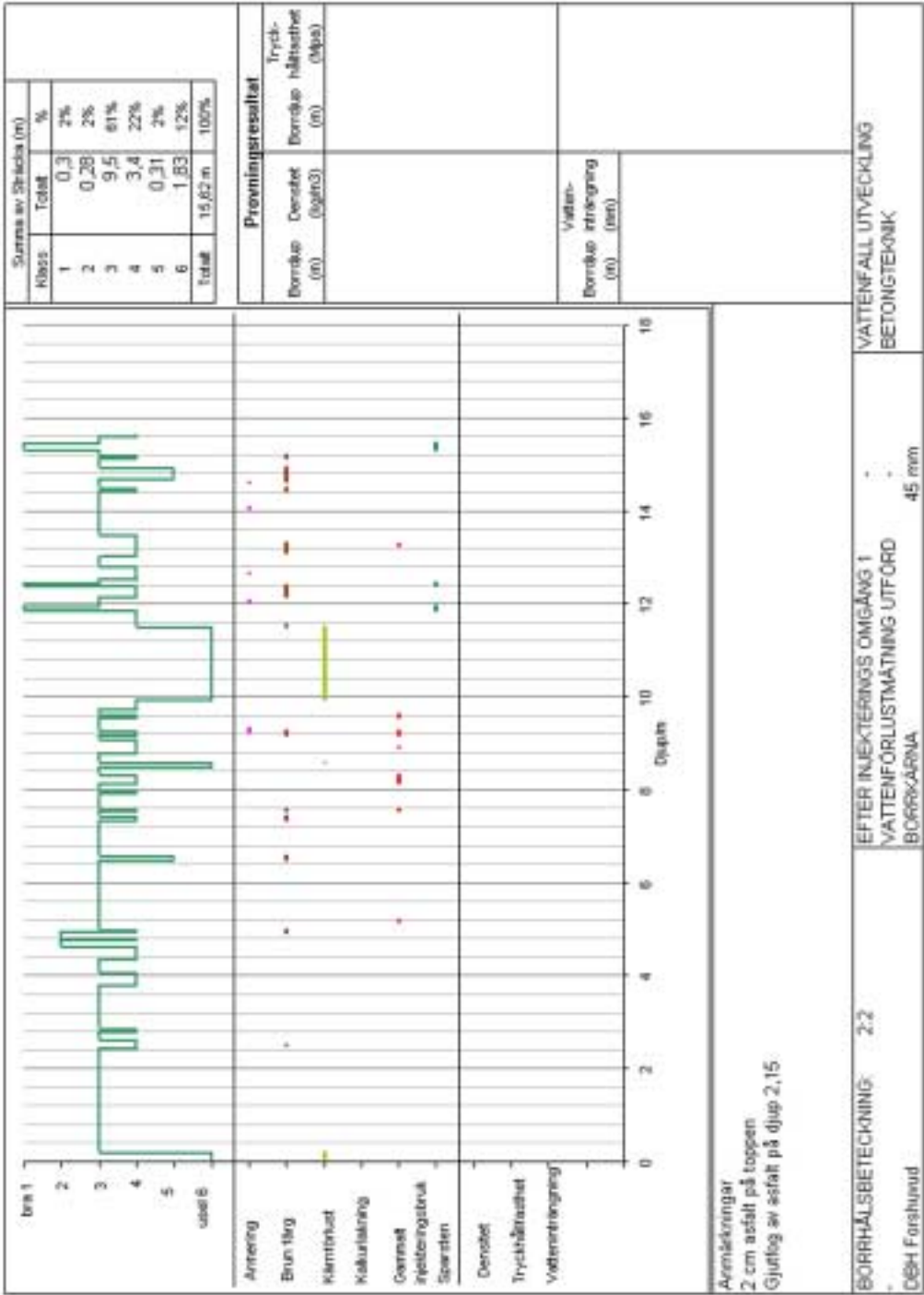
A.1 Protokoll BH 2:1

BESIKTNINGSPROTOKOLL FÖR BETONGKÄRNOR I BETONG

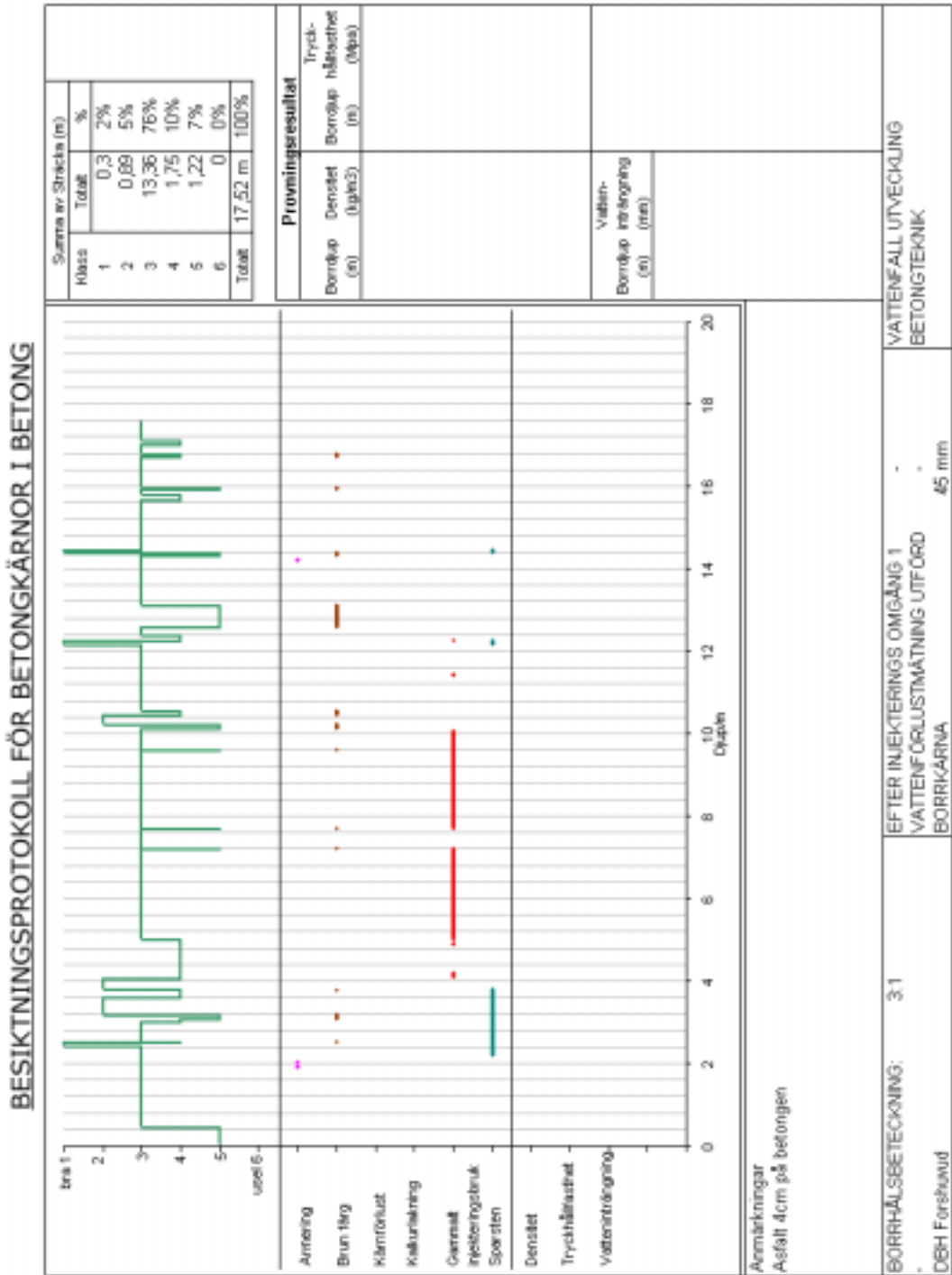


A.2 Protokoll BH 2:2

BESIKTNINGSPROTOKOLL FÖR BETONGKÄRNOR I BETONG

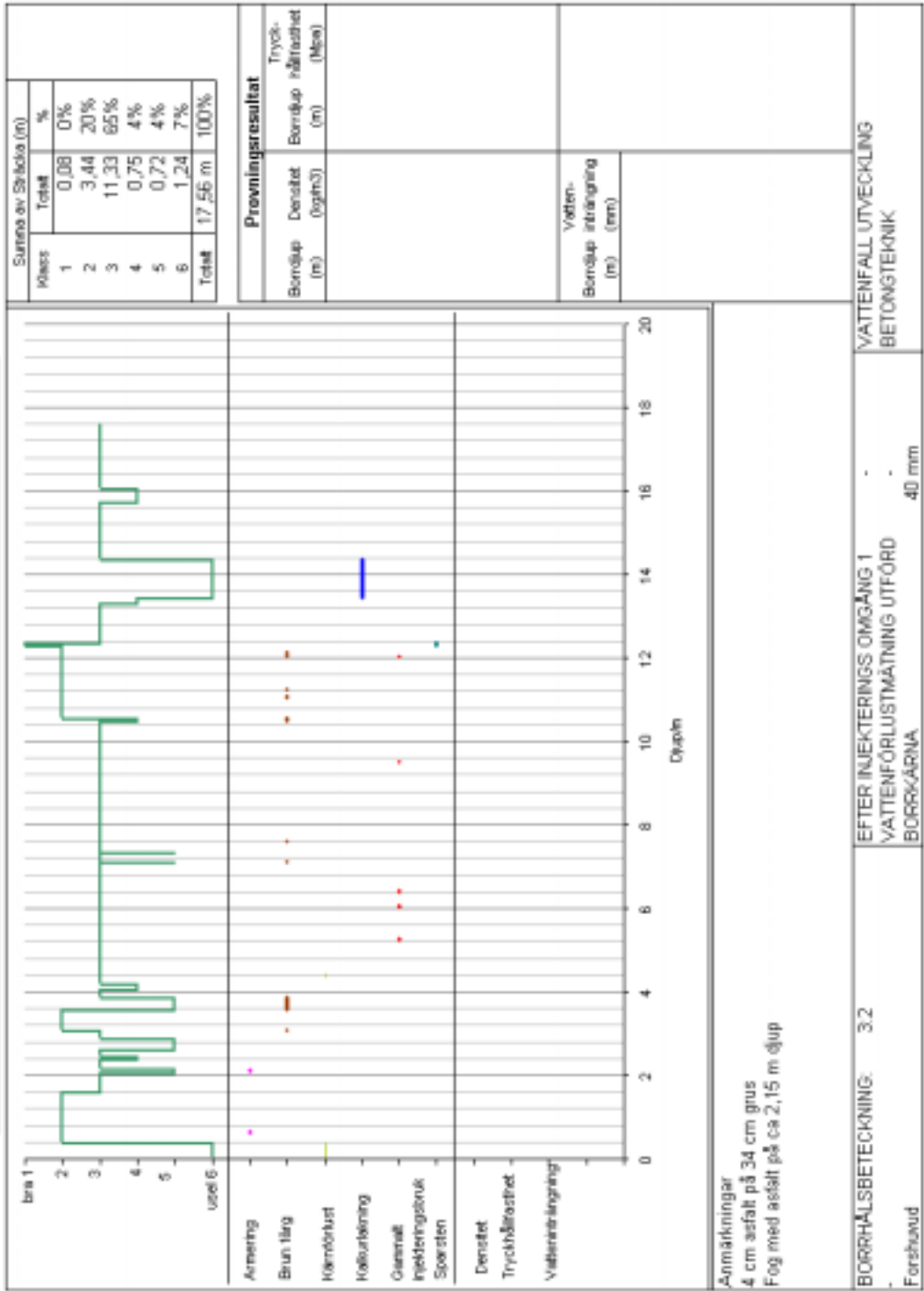


A.3 Protokoll BH 3:1

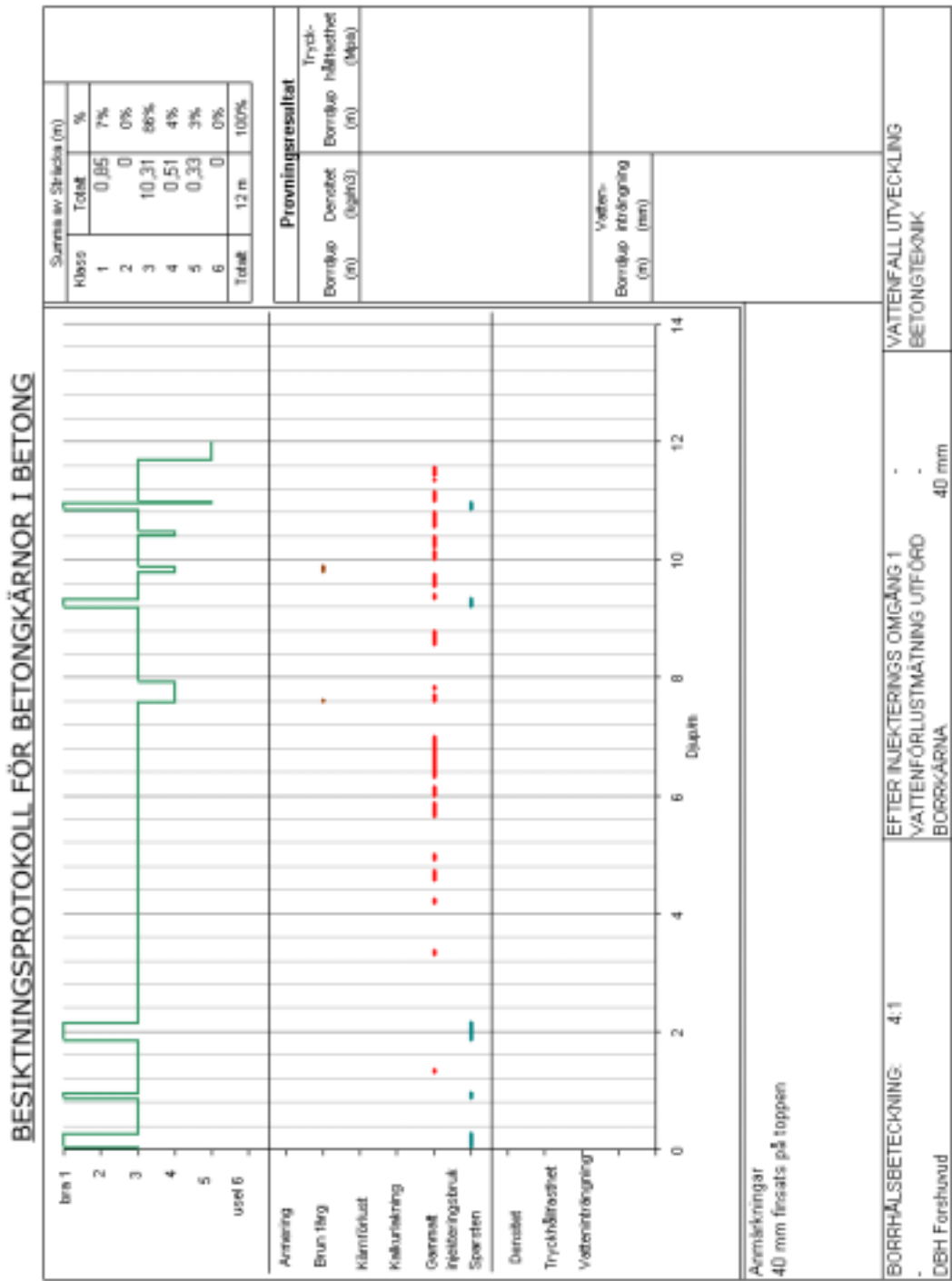


A.4 Protokoll BH 3:2

BESIKTNINGSPROTOKOLL FÖR BETONGKÄRNOR I BETONG

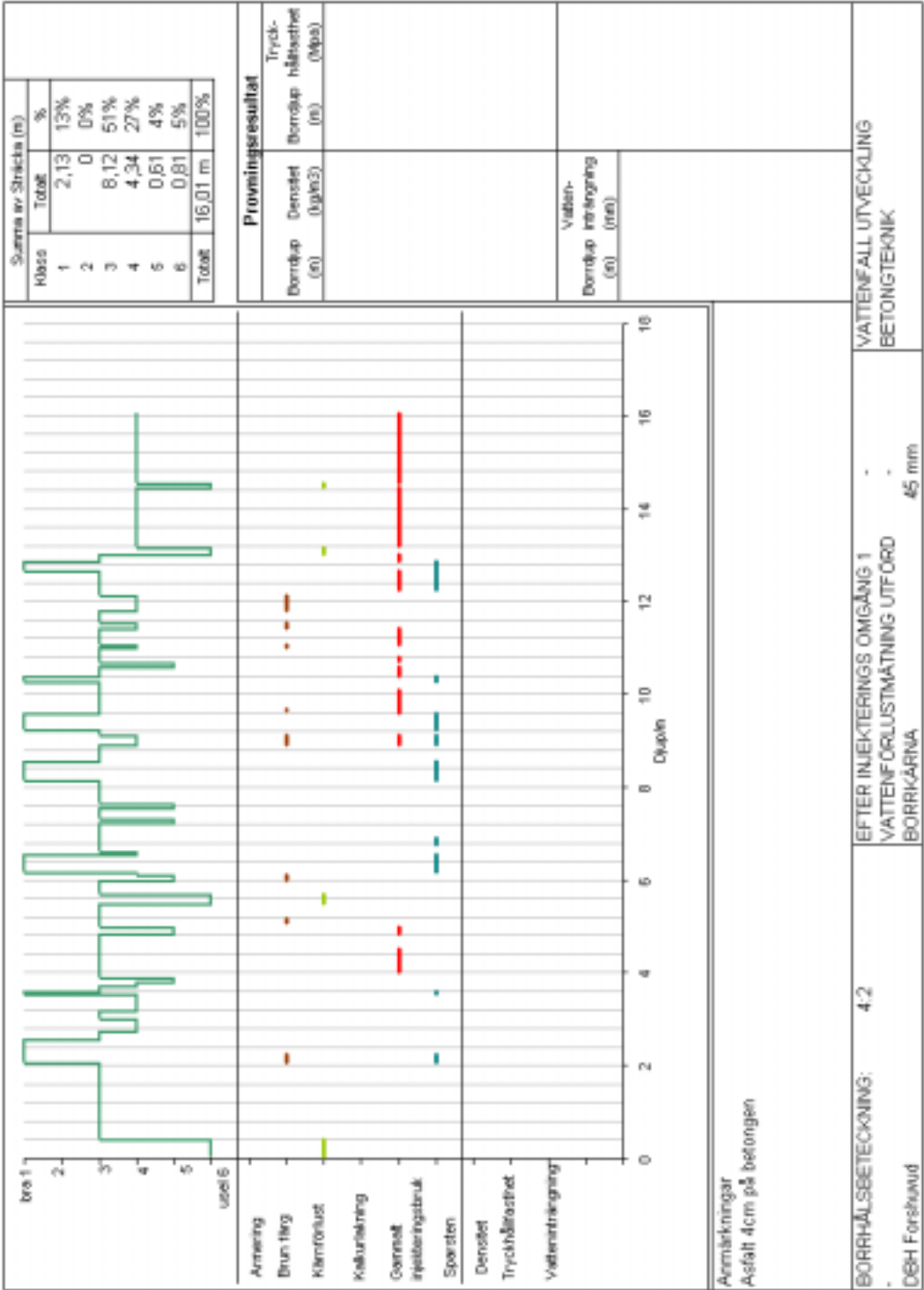


A.5 Protokoll BH 4.1



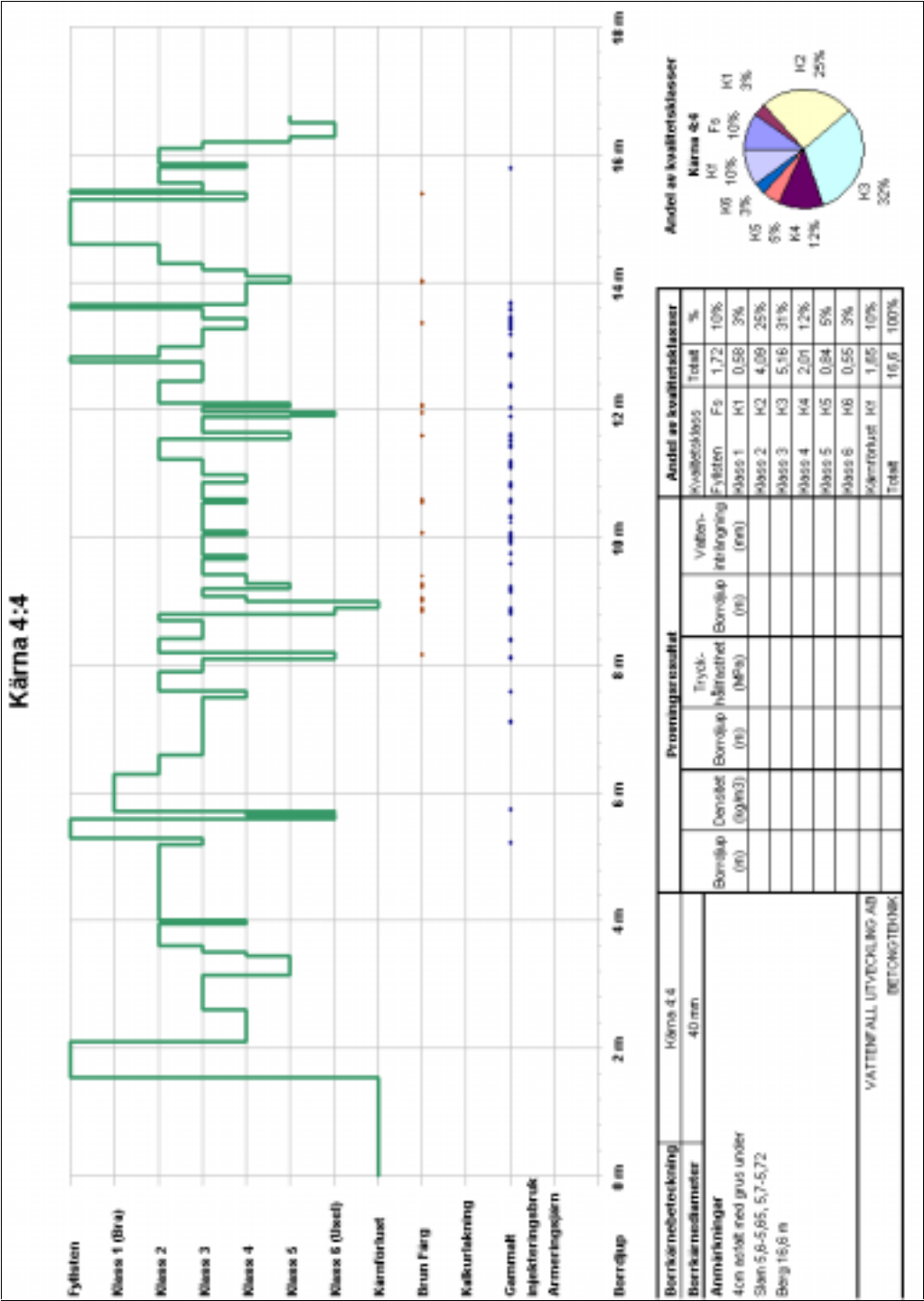
A.6 Protokoll BH 4:2

BESIKTNINGSPROTOKOLL FÖR BETONGKÄRNOR I BETONG





A.8 Protokoll BH 4:4



B METODBESKRIVNINGAR

B.1 Borrhålsfilmning – BIPS (Borehole Image Processing System)

Metod

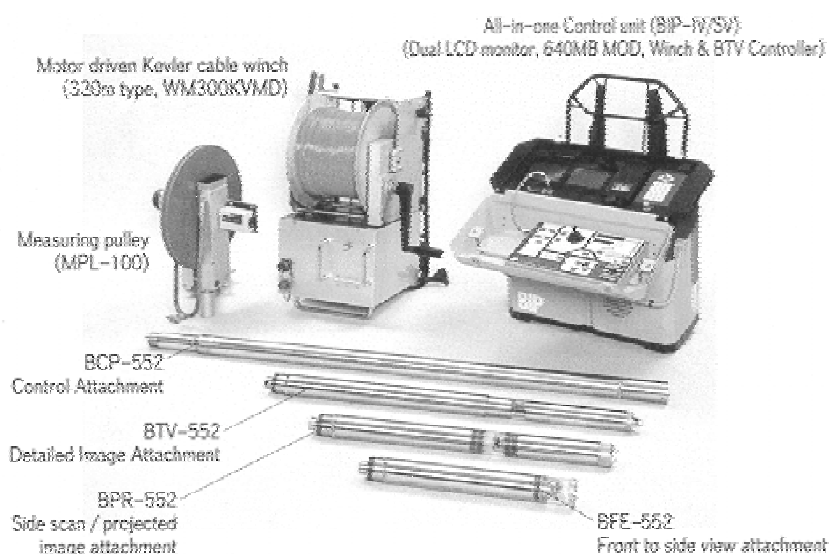
En föregångare till modern filmningsteknik för borrhål är den s.k. borrhålskikaren. Denna bestod av en rörsond som i ena änden var försedd med en belyst spegelanordning med vars hjälp borrhålsvägar kunde detaljgranskas [26]. Modernare borrhålskameror som baseras på s.k. fisheye-objektiv har funnits tillgängliga under ganska många år. Nackdelen med dessa är att den bild som de ger i 360° vinkel är svårtolkad. På marknaden finns nu åtminstone två kommersiella borrhålssystem som ger en kontinuerlig digital bild (videofilmning) av borrhålsväggen i ett borrhål: OPTV från Robertson Geologging i England, och BIPS (Borehole Image Processing System) från Raax Co. Ltd, Japan.

BIP-systemet marknadsförs i Sverige genom Raycon AB i Malå, men har fram tills relativt nyligen endast använts i större bergbyggnadsprojekt (SKB) och har då utgjort ett komplement till konventionell kärnkartering. Den vidareutveckling som har gjorts för att förbättra kvaliteten på bilden från kameran har resulterat i en kompakt utrustning med mycket hög upplösning (fotografisk kvalitet).

Den beskrivning som görs av systemet nedan bygger i huvudsak på information från Raax Ltd.

Utrustning

Systemet består av en kontrollenhet, kabelvinsch med motor och en mätprob som innehåller en CCD-kamera, lampa och en digital kompass (se Figur 8.1). Systemets standardprob har diametern 50 mm, vilket gör att minsta borrhålsdiameter för att kunna göra mätningarna är 56 mm.



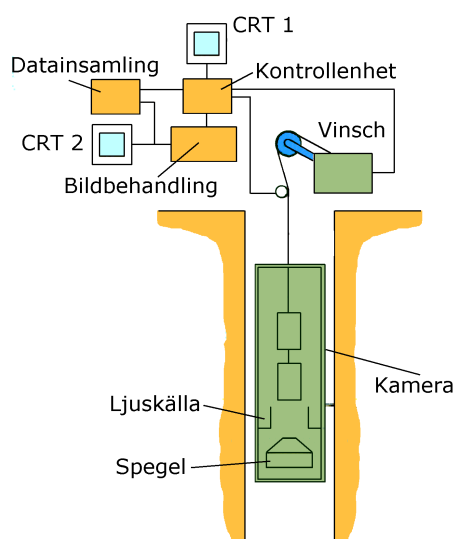
Figur 8.1 Utrustning för borrhålsfilmning med BIP-systemet. Raax modell BIP-IV/SV.

Mätförfarande

Vid mätning behöver utrustningen riggas upp över det borrhål som skall undersökas. Ett treben eller liknande placeras över borrhålet så att sonden kan löpa väl centrerad vid mätning. Vid start sänks sonden ner till bottenläget. Kabelvinschen används sedan för att kontrollera sondens hastighet på sin väg upp genom borrhålet. Sondens hastighet kommer till viss del att bestämma bildens upplösning.

Filmningen sker stegvis så att väggen för en viss nivå i borrhålet skannas av ett helt varv med CCD-kameran, d.v.s. 360 grader. Vid skanningen roterar ljusstrålen runt sondens axel och data registreras i form av pixlar (360 eller 720 pixlar per varv beroende på önskad upplösning). När en nivå är avklarad hissas sonden upp 0,5 alternativt 1 mm beroende på önskad upplösning.

Data från sonden skickas via kabel upp till kontrollenheten på markytan, där bilden i realtid byggs upp kontinuerligt på en skärm. Orientering av bilden sker med hjälp av information från den digitala kompass som finns i sonden.



Figur 8.2 Princip för mätning med BIP-systemet.

Utvärderingsmetodik

Hantering av mätdata görs med hjälp av en medföljande programvara (BIPS Image Viewer 32). Den bild som sammanställs består av en 360 graders utvikning av borrhållsväggen, men bilden kan även avbildas projicerad på en cylinder motsvarande en tredimensionell borrhållskärna. Programvaran medger även att bilder skapas i varierande skalor genom in- och utzoomning. Det finns även möjlighet till att karakterisera det filmade materialets strukturer, d.v.s. strykning, stupning och sprickrosdiagram.

Potential och begränsningar

I Japan har tester gjorts där bildmaterialet har tjänstgjort som stöd för planering av injekteringsarbeten. Framtida system för avancerad bildbehandling kan förmodligen göra

detta attraktivt. Nämnas kan att det för närvarande pågår forskning inom området bildbehandling i ett forskningsprojekt på KTH där BIP-bilder har använts som underlag [16]. Huvudsyftet är där att utföra automatisk bestämning av orientering av sprickplan och sprickors apertur från borrhålsbilder.

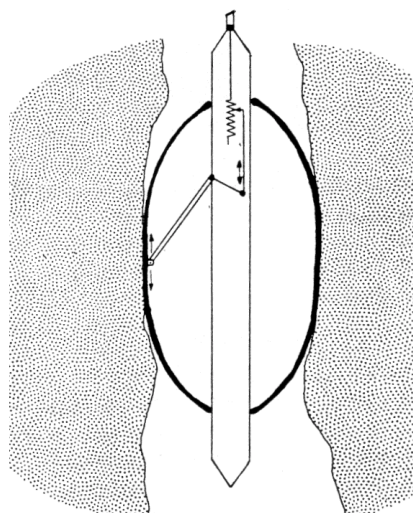
Det finns viss risk för störningar eller deformationer av bilden från sonden i de fall som denna inte är korrekt centrerad i borrhålet.

B.2 Caliperloggning

Metod

De olika mätningar som utförs i borrhål kallas med ett gemensamt namn för loggning. Logg är beteckning för en mätprob och dess tillhörande registreringsenhet, men beteckningen används även för det redovisade resultatet.

Caliperloggen mäter variationer i borrhålsdiameter. Proben har armar som pressas ut mot borrhålsväggen och registrerar borrhålets diametervariation efterhand som den hissas upp genom hålet, se Figur 8.3.



Figur 8.3 Exempel på utformning av en Caliperlogg [2]. Just i detta fallet omsluts givararmen av ett gummimembran. Den logg som användes i Forshuvud hade inte något gummimembran.

Utvärderingsmetodik

Armens rörelser då den hissas upp genom ett borrhål presenteras grafiskt i ett diagram. Olika typer av prober kan ha olika antal armar och även varierande slaglängd för armarna.

Potential och begränsningar

Metoden ger god information om hur borrhålsväggen varierar utmed ett borrhål. Vanligtvis används metoden i kombination med andra typer av loggar. Resultatet från loggarna ritas upp bredvid varandra och geologisk information varvid t.ex. lagerföljder i

sedimentärt berg kan utläsas. Följer en mjuk berg- eller jordart på en hård dito så visar detta sig genom att det lösa materialet tenderar att fall ut och det bildas ett hålrum.

I betongsammanhang är metoden förmodligen i stort sett okänd. Icke desto mindre är det en mycket enkel och robust metod som utgör ett bra komplement till traditionell borrhålskartering (för att ta fram information om sprickor och hålrum).

B.3 Geo- och borrhålsradar

Metod

Georadarmetoden (GPR) baserar sig på utbredning av radiovågor i materialet från ytan på en konstruktion. En antenn används för att sända korta elektromagnetiska pulser som reflekteras i det inre av konstruktionen. Reflekterad energi tas emot och tiden mellan sändning och mottagande av reflexer mäts. Radarsystemet sänder pulser med korta intervall emellan och under mätningen rör sig antennen kontinuerligt. I varje läge på konstruktionen där mätning gjorts representerar tiden i signalen ett djup för det reflekterande skiktet. De uppmätta signalernas intensitet ritas längs mätlinjen som en profil över de elektriska gränsskikten i materialet.

Borrhålsradar är en anpassning av georadar som möjliggör borrhålsmätningar. Borrhålsradar kan användas bl.a. för orientering av sprickzoner och bergartskontakter, lokalisering av bergrum och tunnlar samt sprickzoner från sonderingsborrhål på markytan inför tunneldragning eller bergrumsbyggande. Metoden kan även användas för att kartera inre erosion i fyllningsdammar.

Mätförfarande

För att utföra en GPR-mätning behövs sändande och mottagande radarelement som monterats i en antenn. En enda eller två separata antenner kan användas. Till detta kopplas elektronik för sändande och mottagande. Dessutom behövs en kontrollenhet för styrning av mätningen (mättid, insamlingshastighet, filter och förstärkning), en insamlingsenhet för radarsignaler och en enhet för grafisk presentation.

En GPR-mätning kan utföras utan direktkontakt med konstruktionens yta. Vid mätningen förs antennen längs en mätlinje med så nära konstant fart som möjligt mellan utsatta referenspunkter. Genom att känna till fordonets väg och hastighet kan mätdata relateras till lägen i konstruktionen. Om en yta ska kontrolleras bör man vara noggrann med att rikta in mätlinjerna så att de är parallella och utgår från samma läge.

Utvärderingsmetodik

Den grundläggande informationen som fås ur mätdata är de radargram som innehåller rådata plottade med ett tröskelvärde för vilka signalnivåer som räknas som informationsbärande. Signalens polaritetväxlingar ger upphov till svart-vita band i radargrammen.

Mätdata kan processeras vidare och presenteras på färgskärm eller som videosignaler. Signalbehandling av rådata kan göras för att avlägsna interferensfenomen av t.ex. slumpmässigt brus eller regelbundet upprepade reflexer som inte härrör från materialet.

Genom signalbehandling kan också önskade reflexer framhävas, korrekationer för antennens geometri eller andra kända fenomen göras och beräkningar av signaler göras. För en meningsfull utvärdering krävs dock god kunskap om den aktuella konstruktionen, de ingående materialen och mätuppläggningsen.

Potential och begränsningar

GPR-metoden har god förmåga att identifiera relativt stora defekter i betong (kapaciteten försämras dock för betong med hög fukthalt). Mätningar kan göras på stora konstruktioner med flera meters grovlek. Inverkan av armering kan göra att penetrationen begränsas och reflexer från defekter maskeras. Mätproceduren kräver stor noggrannhet för att ge bra koppling till läget i konstruktionen. Metoden lämpar sig väl för automatisk avsökning längs en linje, men är inte i första hand anpassad för avsökning över ytor. Tolkning av data kräver god kunskap om mätmetoden och mätsituationen. Utrustningar för georadarmätningar i betong finns utvecklade.

Vid borrhålsmätningar så krävs en borrhålsdiameter om minimum 56. En liten diameter är fördelaktigt eftersom detta ger mindre störningsreflexer. Vid enkelhålsmätningar erhålls ingen riktningsinformation och de första 1-2 dm i betongen från borrhålsväggen ger ingen tolkningsbar information. För undersökningar som utförs som mellanhålsmätningar krävs ett någorlunda stort avstånd mellan de borrhål som skall användas.

B.4 Vattenförlustmätning¹⁰

Inledning

Vattenförlustmätning med endast ett konstant tryck som den utförs rutinmässigt i bergborrhål, ger i stort sett endast svar på om berget är tätt eller ej. Någon information därutöver ger den knappast och orsaken till att dessa mätningar utförs är oftast att det är föreskrivet i kontrakt eller arbetsbeskrivning.

En enkel vattenförlustmätning tar ca 15-20 minuter. Om denna utförs i varje hålvåning, som ofta föreskrivs, tar det vid normal arbetskapacitet ca 15 % av arbetstiden.

Det finns inget samband mellan vattenförlust och cementåtgång annat än i mycket stora drag. Där man genomgående har höga vattenförluster blir ofta cementåtgången större än där man genomgående har låga förluster. Men något samband mellan vattenförlust och cementåtgång för ett enskilt hål finns ej, vilket är självklart då ett hål kan vara genomkorsat av ett otal fina sprickor som var och en ej kan ta något cement eller också en grov spricka som ger samma vattenförlust som de fina sprickorna tillsammans.

I Sverige anges vattenförlusten vanligen i liter per meter, minut och bar. Som tryck vid vattenförlustmätning är det vanligt att ta samma som högsta tillåtna injekteringstryck för nivån i fråga. Detta medför att bergets hydrauliska konduktivitet ej går att jämföra mellan de olika testade hålvåningarna.

¹⁰ Mycket av den beskrivning som görs här kommer från Melander [19].

Lugeon, upphovsman till vattentest, föreskrev att en Lugeontest skulle göras med ett tryck av 10 bar och menade då 10 bars aktivt tryck nere i hålet och ej omräknat linjärt från t.ex. ett testtryck på 5,7 eller 15 bar som nu ofta sker. Dessutom skulle man ta hänsyn till grundvattenyta och friktionsförluster i slangen mellan manometern och hålvåningen. Tyvärr är 10 bar i många fall ett för högt tryck som kan åstadkomma uppspräckning i ett ytberg eller ett horisontalskiktat berg.

Ett lämpligare tryck vore kanske 3 bar och detta tryck skall då ej vara ett medelvärde av de max och minitryck som erhålls med de kolvpumpar som nu vanligen används. De pumpar som används skall ge ett lätt reglerbart och konstant tryck utan pulsering. Det tryck som skall användas vid beräkning av vattenförlusten, skall vara det aktiva trycket i den provade hålvåningens mitt, d.v.s. hänsyn måste tas till grundvattenytan, statiskt tryck i slangen mellan manometern eller pumpen och hålvåningen samt friktionsförluster i slangen.

B.5 Bestämning av filtreringsstabilitet

Inledning

Denna metod har tagits fram av Vattenfall Utveckling och är föreslagen som europeisk provningsmetod för provning av injekteringsmedel för reparation av betongkonstruktioner. Beskrivningen kan beställas med referens till metodbeskrivning VU-SC:27. Ett referat av beskrivningen följer nedan.

Omfattning och tillämpning

Vid injektering av fina sprickor och poröst material begränsas ett cementbruks inträngningsförmåga av att cementpartiklarna bildar filterkaka vid förträngningar i strömningsvägen. Detta förhindrar brukets vidare inträngning. Filtreringsstabilitet är en provningsmetod med vilken man kan utvärdera förmågan hos ett bruk att undgå bildande av filterkaka.

Provningsmetoden kan användas både i laboratorium och i fält. Den kan förutom för att bestämma lämpliga bruksrecept exempelvis användas för att utvärdera en blandares effektivitet och för att jämföra olika blandningsutrustningar. Metoden kan även användas för att bestämma ett bruks öppethållandetid.

Utrustning

Suganordning enligt Figur 8.4.

Siktdukar med maskvidderna 125, 75, 45 och 32 μm .

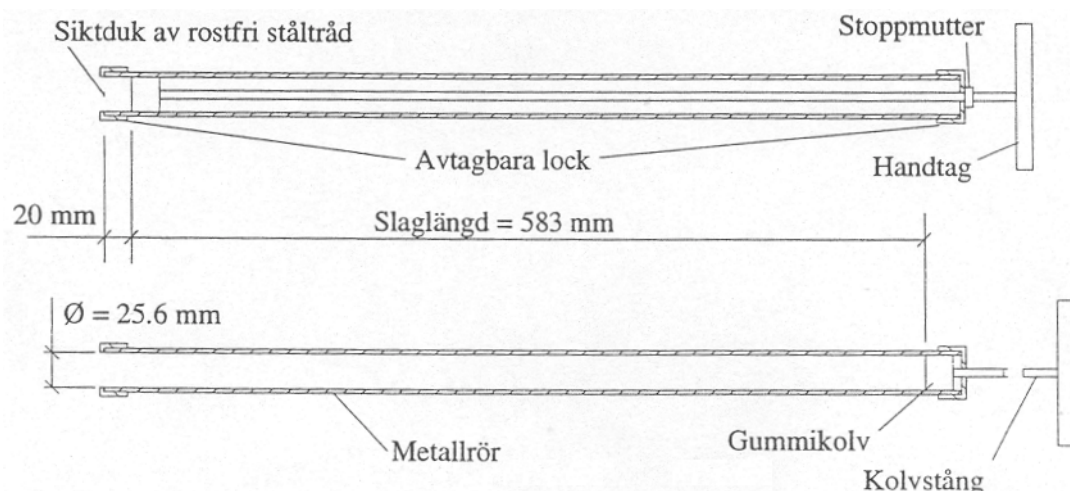
Graderad bägare med inre diameter 105 ± 5 mm och höjd minst 140 mm.

Termometer med noggrannheten $\pm 0,1$ °C.

Tidtagarur med noggrannheten ± 1 s.

Blandarutrustning.

Mätglas, 500 ml med 5 ml gradering.



Figur 8.4 Suganordning för mätning av filtreringsstabilitet..

Provningsprocedur

Omgivande lufttemperatur skall vara 20 ± 2 °C, om inte annat anges. Aktuell siktduk monteras i suganordningen.

Bruket hålls upp i bägaren till 1.0 liters markeringen 5 ± 1 minuter efter att blandningen är avslutad om inte annat anges. Suganordningen sänks ned i bruket så att mynningen är vid brukspelarens halva höjd. Handtaget dras omedelbart ut till sin fulla längd under konstant hastighet. Tidsåtgången för denna procedur ska vara 5 ± 1 sekunder. Därefter flyttas suganordningens mynning till mätglaset där bruket pressas ut. Suganordningen töms fullständigt på bruk genom några korta pumpslag.

Mätproceduren startar med 125 µm siktduk. Om utrustningen fylls helt (300 ml) fortsätter mätningen med närmast finaste siktduk. Detta skall upprepas tills mätresultatet blir mindre än 300 ml. Repetitionerna skall ske inom 3 minuter.

Resultat

Volymen bruk som dragits upp i suganordningen och därefter pressats ut i mätglaset mäts med en noggrannhet om 5 ml.

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