

SUMMERING AV BETONGTEKNISKT PROGRAM VATTENKRAFT 2013-2016

RAPPORT 2016:308



BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Summering av Betongtekniskt program vattenkraft 2013-2016

**HOLGER ECKE
MANOUCHEHR HASSANZADEH
MARIE WESTBERG-WILDE**

ISBN 978-91-7673-308-0 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Syftet med denna summering av genomförd verksamhet i Betongtekniskt program vattenkraft är att sammanfatta de resultat som har uppnåtts under etapp 2013-2016 av programmet.

Vattenkraftens betongkonstruktioner motsvarar stora värden, varför en effektiv förvaltning är av största vikt. I Betongtekniskt program vattenkraft samlas vattenkraftsbranschen för att bedriva forsknings- och utvecklingsarbete. Inom ramen för programmet har bland annat en unik fältstation byggts upp där forskning i autentisk älvmiljö kan bedrivas.

Intressenterna i Energiforsk Betongtekniskt program vattenkraft är Fortum Sverige AB, Jämtkraft AB, Jönköping Energi AB, Karlstads Energi AB, Skellefteå Kraft AB, Sollefteåforsens AB, Statkraft Sverige AB, Sydkraft Hydropower AB, Umeå Energi AB, Vattenfall AB Vattenkraft och Vattenfall Indalsälven AB.

Sammanfattning

Betongtekniskt program vattenkraft har pågått i olika etapper sedan 1995. Syftet med verksamheten är att ta fram verktyg, riktlinjer, utförandebeskrivningar och teknik så att åtgärder kan genomföras vid rätt tid, till lägsta möjliga kostnad och till rätt kvalitet. Kunskapssammanställningar och implementering av resultat från internationella projekt kompletteras med fördjupade teoretiska och experimentella projekt i laboratoriemiljö och fält.

I denna rapport summeras resultaten från de 20-tal projekt som genomförts inom ramen för etappen. Programmet har delats in i tre fokusområden:

- Produktionsrelaterade betongkonstruktioner
- Underhållsstrategier
- Bärförmåga

Fokusområde Produktionsrelaterade betongkonstruktioner omfattar utveckling av förvaltningen av t.ex. inre vattenvägar och maskinfundament så att god produktionssäkerhet säkerställs under mycket lång tid. I denna programetapp har man valt att satsa särskilt på "aggregatnära konstruktioner".

Inom fokusområde Underhållsstrategi har studier om mekanismer som styr nedbrytning samt kännedom om vilken typ av tillståndskontroller som ger rätt beslutsunderlag genomförts. Med utvecklade underhållsstrategier underlättas valet av kostnadseffektiva reparationer.

Fokusområdet Bärförmåga omfattar konstruktioners och materials respons mot mekaniska, fysikaliska och kemiska belastningar. Med respons menas kollaps, brott, lokalt brott, sprickbildning eller deformation.

Summary

Concrete research program hydro power has been in operation in several phases since 1995. The aim of the program is to develop tools, guidelines, descriptions of execution and technology to be able to perform maintenance and investment in time, at a low cost and with adequate quality. The program involves state of the art summaries, implementation of international results, theoretical studies and experiments in field or laboratory.

This report summarizes the results from some 20 projects that have been carried out within the program phase 2013-2016. Activities have been carried out within three focus areas:

- Production related concrete structures
- Maintenance strategies
- Bearing capacity

Focus area Production related concrete structures involves development of asset management of for example internal waterways and foundations in order to ensure a high level of production availability in a longer time scale. In this phase special attention has been put on aggregate supporting structures.

In focus area Maintenance strategies, studies on degradation mechanisms and condition monitoring have been performed to improve the knowledge needed for asset management. Developed maintenance strategies facilitates cost effective asset management.

Focus area Bearing capacity comprises the response from mechanical, physical and chemical loads on designs and materials. The definition of response in this case is failure, local failure, formation of cracks or deformation.

Innehåll

1	Bakgrund	10
1.1	Programstruktur	10
2	Produktionsrelaterade betongkonstruktioner	12
2.1	Åldring av bergförstärkning/metodkartläggning tillståndskontroll inre vattenvägar	12
2.1.1	Kraftverkstunnlar beständighet (Håkansson, 2013)	12
2.1.2	Inspektionsmetoder för inre vattenvägar i vattenkraftverk Sundberg & Amsköld (2015)	13
2.2	Numerical method for Fluid-Structure Interaction (examensarbete, Truc Vu, 2014)	13
2.3	Praktiskt inriktad sprickinventering	14
3	Underhållsstrategi	15
3.1	Fältstation	15
3.1.1	Fukttransport i betong med pågjutning	15
3.1.2	Fältexponering av fogband	16
3.1.3	Exponering av provkroppar med låg samt mellanreaktiv ballast (AKR)	16
3.2	Provning och analys av fogband	16
3.3	Fogband och fogmassor i betongkonstruktioner	17
3.4	Fuktupptagning och frostbeständighet hos betong Doktorandprojektet (Martin Rosenqvist).	17
3.5	Utvärdering av ETMA för bestämning av urlakningsprofiler	18
3.6	Redogörelse för utvecklingen av vattenbyggnadsbetong inom svensk vattenkraft	18
3.7	Utvärdering efter långtidsexponering	19
3.8	RILEM ASR Prognosis of deterioration and loss of serviceability in structures affected by alkali-silica reactions	20
4	Fokusområde Bärförmåga	21
4.1	Delfokusområden	22
4.1.1	Samverkan mellan olika materialskikt och kontaktytor – FO1	22
4.1.2	Betongens hårdnande och initialspänningar – FO2	22
4.1.3	Den injekterade betongens egenskaper och konstruktionens bärförmåga och täthet – FO3	22
4.1.4	Konstitutiva materialmodeller – FO4	23
4.1.5	Beräkningarnas giltighet – FO5	23
4.2	Utförda projekt inom Bärförmåga	23
4.2.1	Allmänt	23
4.2.2	ICOLD Bulletin: Non- Linear Modelling of Concrete Dams (NLMCD) – FO1	24
4.2.3	Spännings- och töjningsutveckling i ny gjuten betong (förstudie) – FO2	24

4.2.4	Injekterad betongs egenskaper – konstruktionens bärförmåga och täthet – FO3	25
4.2.5	Litteraturstudie om inverkan av ASR på betongkonstruktioners bärförmåga – FO4	25
4.2.6	RILEM ASR Prognosis of deterioration and loss of serviceability in structures affected by alkali-silica reactions – FO4	27
4.2.7	Beräkningens giltighet – granskning av beräkningar – FO5	28
4.2.8	Spricktyper i vattenkraftskonstruktioner – relaterat till samtliga FO	29
4.2.9	Bygginnovationen – relaterat till samtliga FO	30

1 Bakgrund

Många vattenkraftkonstruktioner består av betong. Byggnadsvärdena för dessa är stora, uppskattningsvis 30 - 50 miljarder kr. Att byta ut dem skulle kosta mångfalt dessa belopp. Att utveckla och effektivisera förvaltningen av betongkonstruktioner är därför av största betydelse. Energiforsk driver Betongtekniskt program Vattenkraft för att samla vattenkraftbranschens FoU-arbete inom betongområdet. Genom FoU-insatser ökar möjligheten att genomföra åtgärder vid rätt tid, till lägsta möjliga kostnad och till rätt kvalitet.

Syftet med betongtekniskt program vattenkraft är att ta fram verktyg, riktlinjer, utförandebeskrivningar och teknik så att åtgärder kan genomföras vid rätt tid, till lägsta möjliga kostnad och till rätt kvalitet.

Målet är att den kunskap som tas fram ska;

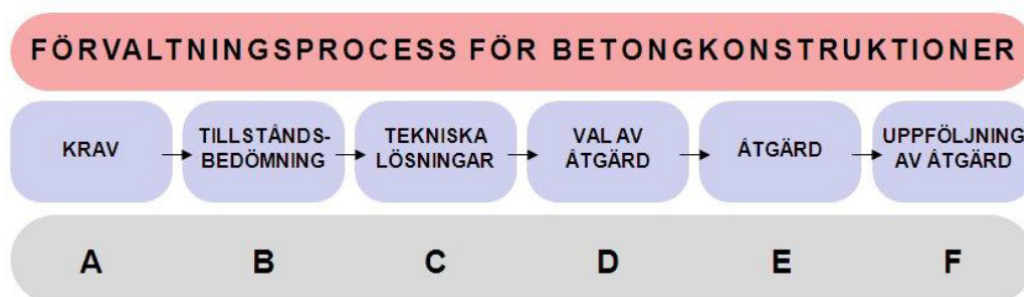
- Minska produktionsbortfall orsakade av problem med betong-konstruktioner,
- Bidra till att uppfylla dammsäkerhetstekniska krav på funktion, stabilitet, bärförmåga och hållfasthet för betongkonstruktionerna.

Relaterad FoU pågår också inom satsningarna "Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogram", BeFo (bergteknisk forskning) och delar av Svenskt VattenkraftCentrum.

Frågeställningarna blir alltmer betydelsefulla då anläggningarna blir äldre och reparationsåtgärder blir mer frekventa. Men utöver fokus på befintliga betongkonstruktioner, är syftet även att tillföra erfarenhet och kunskap för om- och nybyggnation av beständiga och kostnadseffektiva konstruktioner och anläggningar.

1.1 PROGRAMSTRUKTUR

Det sedan tidigare etablerade arbetssättet, att i dialog med programmets styrgrupp formulera och genomföra projekt som stärker förvaltningsprocessen (Figur 1) för betongkonstruktioner, har tillämpas även i denna etapp.



Figur 1 Förvaltningsprocessen för betongkonstruktioner omfattar sex delprocesser.

Till sin hjälp har styrgruppen haft två experter, Lars-Elof Bryne/Holger Ecke från Vattenfall samt Manouchehr Hassanzadeh, Sweco. Dessa har medverkat i

utvecklingen av verksamheten, bistått projektledarna med expertkunskap samt granskat resultat.

Kunskapssammanställningar och implementering av resultat från internationella projekt har kompletteras med fördjupade teoretiska och experimentella projekt i labbmiljö och fält. En unik möjlighet som har utnyttjats är den station för fältextponering som etablerades via programmets föregående etapp. Resultat från programmet publiceras i öppna rapporter eller vid seminarier/workshops. Rapporterna finns att ladda ned på www.energiforsk.se. Varje år ordnas också Kraftindustrins betongdag i Älvkarleby i samverkan med Energiforsk Betongtekniskt program kärnkraft.

Programmets arbete har delats in i tre huvudområden:

- Produktionsrelaterade betongkonstruktioner
- Underhållsstrategi
- Bärförmåga

Verksamheten styrs av en styrgrupp, som tar beslut om enskilda projekt i programmet. Under etapp 2013-2016 har denna bestått av:

Cristian Andersson/Monika Adsten, Energiforsk AB
 Johanna Feldtman, Sydkraft Hydropwer AB
 Marcus Hautakoski, Vattenregleringsföretagen
 Martin Hansson, Statkraft Sverige AB
 Mats Persson, Vattenfall Vattenkraft AB
 Robert Lundström, Skellefteå Kraft
 Stefan Norberg, Fortum Sverige AB

2 Produktionsrelaterade betongkonstruktioner

Området avser att utveckla förvaltningen av t.ex. inre vattenvägar och maskinfundament så att god produktionssäkerhet säkerställs under mycket lång tid. Inte sällan måste anläggningskonstruktionerna överleva mer än två aggregatbyten. Området berör i princip hela förvaltningsprocessen, i figur 1. I det tidigare treårsprogrammet (2010-2013) påbörjades aktiviteter inom fokusområdet, och i denna etapp har arbetet fortsatt.

Projekt inom området produktionsnära betongkonstruktioner kopplar i vissa fall till övriga delområden.

Nedan presenteras de projekt som funnits med i planerna och som helt eller delvis utförts inom området under den pågående etappen (2013-2016). Dessa är

- Åldring av bergförstärkning (två examensarbeten)
- Numerical method for Fluid-Structure Interaction
- Praktiskt inriktad sprickinventering

2.1 ÅLDNING AV BERGFÖRSTÄRKNING/METODKARTLÄGGNING TILLSTÅNDSKONTROLL INRE VATTENVÄGAR

Många av Sveriges vattenkraftanläggningar har bergtunnlar som tillopp eller utlopp från kraftstationen. Tunnlarna är framförallt byggda under perioden 1910-1980 (under utbyggnadsepoken). Området gällande åldring av bergförstärkning var planerat att i första hand resultera i en sammanställning av kunskapsluckor avseende åldring av bergförstärkning i vattenfyllda tunnlar. Kunskapsluckorna kan kopplas till bl.a. förstärkningstyper, exponeringsmiljö samt laster och klimatfaktorer, åldring, nedbrytning och inspektion.

Under tidsperioden 2013-2016 har två examensarbeten med koppling till området presenterats, Håkansson (2013) och Sundberg & Amsköld (2015). Nedan sammanfattas de viktigaste resultaten.

Övrigt planerat arbete har skjutits upp och inför kommande etapp är det tänkt att förtydliga beskrivning och innehåll i arbetet mer i detalj.

2.1.1 Kraftverkstunnlars beständighet (Håkansson, 2013)

Syftet med examensarbetet var att studera åldringsfenomen och nedbrytningsprocesser i kraftverkstunnlar. I arbetet sammanfattas tunneldrivnings- och förstärkningsmetoder. Nedbrytning av förstärkning beskrivs, med fokus på korrosion av bultar, och förändrande egenskaper hos bergmassan.

Resultatet innefattar fallstudier av 26 tunnelras vilka indikerar att tre rasmekanismer är vanligt förekommande: Svällande lera (42 % av fallen), glidning i svaghetszon med omvandlingsprodukt (19 % av fallen) samt variationer i det hydrostatiska trycket inne i tunneln (23 % av fallen). Dessa rasmekanismer utvecklas vanligtvis relativt kort efter driftsättning. Ingjutna bergbultar som är monterade på rätt sätt har god beständighet, men tillfälliga bultar är mer utsatta

för korrosion då de inte är skyddade av sprutbetong eller liknande. Inget av rasen i fallstudien hade berott endast på att bergbultar korroderat. Det förefaller finnas kraftverkstunnlar som endast är förstärkta med tillfälliga bultar. De tillfälliga bultarna utgör således en okänd risk för kraftverkstunnlarnas beständighet och stabilitet.

Slutsatserna var att med systematiskt underhållsarbete, exempelvis inspektioner och besiktningar för att avgöra kraftverkstunnlarnas kondition, kan tunnarnas livslängd förlängas. Ändrade driftsförhållanden kan ge ökat slitage i bergtunnlarna eftersom variationer i det hydrostatiska trycket ökar risken för utspolning och erosion av sprickfyllnader.

Fortsatta studier rekommenderades gällande utformning av kraftverkstunnlarnas förstärkning för att de ska kunna stå emot hydrostatiska tryckförändringar och svällande leror, samt studier kring korrosion av tillfälliga bultar och hur många tunnlar som är förstärkta med dem.

2.1.2 Inspektionsmetoder för inre vattenvägar i vattenkraftverk Sundberg & Amsköld (2015)

Syfte med examensarbetet var att utvärdera till vilken grad inspektioner med undervattensfarkoster, ROV (Remotely operated vehicle), kan användas som alternativ till inspektioner av inre vattenvägar, både aggregatnära och i till- och utloppstunnlarna. Examensarbetet sammanfattar vanliga skador, dagens inspektionsmetoder samt hur en ROV är uppbyggd och fungerar. Det ingår även redovisning av en inspektion av torrlagda aggregatnära inre vattenvägar och en inspektion med ROV i en 2,5 km lång utloppstunnel samt egna försök med inhyrd ROV för att undersöka vilka typer av betongskador som är möjliga att detektera. Resultatet från samtliga delar i arbetet pekar på att besiktningar med ROV kan övervägas för flera olika typer av inspektioner. För till- och utloppstunnlar är denna typ av inspektion många gånger den enda rimliga. För de aggregatnära inre vattenvägarna ger dagens inspektionsmetoder med torrläggning ett fullgott resultat, men ROV skulle kunna vara ett alternativ vid svårtillgängliga delar, t.ex. på grund av utformning eller stora läckage. För de längsta tunnarna i Sverige är räckvidden inte tillräcklig (7 km).

Fortsatta studier rekommenderades gällande inspektion av tunnel som ska tömmas, först med ROV och sedan inspektion av den torrlagda tunneln. Även förslag på AUV (autonomous operated vehicle) för förbättrad inspektion.

2.2 NUMERICAL METHOD FOR FLUID-STRUCTURE INTERACTION (EXAMENSARBETE, TRUC VU, 2014)

I industriapplikationer, såsom kraftverk, är frågan om samspelet mellan fluid och struktur alltid närvarande. Närmare bestämt påverkar fluiden kraftverkets struktur genom att applicera en kraft på det och vice versa. Som ett resultat av fluidens kraftpåverkan, kan kraftverkets struktur vibrera eller deformeras. En god förståelse för detta FSI-problem kan bidra till att utforma system ifråga om säkerhet, stabilitet och effektivitet.

Syftet med examensarbetet var att optimera och testa Unicorn FSI lösaren från FEniCS projektet. Denna FSI-lösare ska därefter användas till att simulera samspelet mellan vätska och struktur i ett experiment, som utförts på Vattenfalls forsknings och utvecklingsavdelning. Målet är att förbättra Unicorn FSI-lösaren för att klara av ett verkligt industriellt problem. Dessutom kan vissa av resultaten av simuleringen användas som ett verktyg för att förutsäga beteendet hos ett system under inverkan av en fluid.

2.3 PRAKTISKT INRIKTAD SPRICKINVENTERING

Arbete inom området var planerat att genomföras inom denna etapp, men har skjutits upp och finns med som förslag för kommande etapp 2017-2020.

3 Underhållsstrategi

Området avser att utveckla och ta fram av strategier för betongkonstruktioner där det t.ex. krävs god kunskap om mekanismer som styr nedbrytning, och kännedom om vilken typ av tillståndskontroller som ger rätt beslutsunderlag. Med utvecklade underhållsstrategier underlättas valet av kostnadseffektiva reparationer. Underhållsstrategi berör i princip hela förvaltningskedjan, men specifikt delprocesserna tillståndsbedömning, tekniska lösningar och val av åtgärd.

Projekt inom området underhållsstrategi kopplar i vissa fall till övriga delområden.

Nedan presenteras de projekt som genomförts inom området under den pågående etappen (2013-2016). Dessa är

- Fältstation (med tre pågående projekt)
- Provning och analys av fogband
- Fogband och fogmassor i betongkonstruktioner
- Fuktupptagning och frostbeständighet hos betong (doktorandprojekt)
- Utvärdering av ETMA för bestämning av betongens kemiska profil.
- Betongteknikens utveckling.
- Utvärdering efter långtidsexponering

3.1 FÄLTSTATION

Fältstationen uppfördes under föregående etapp och den första tiden av etappen 2013-2016 tog den i drift. I nuläget pågår tre försök vid fältstationen. Mer om fältstationen och pågående projekt finns att läsa i *Oxfall, M (2016) Lägesrapport för pågående försök i fältstation för långtidsexponering och mätning*. Nedan ges en kort sammanfattning.

3.1.1 Fukttransport i betong med pågjutning

Syfte med projektet är att studera hur en pågjutning inverkar på fukttillstånd och fukttransport i den bakomliggande betongen vid olika val av metod, betongkvalitet, arbetsutförande eller kombination av samtliga av dessa faktorer. Målet är att få ökad kunskap om hur en betongkonstruktion uppför sig efter en reparation något som på sikt kan leda till bättre motiverade val och utformning av framtida reparationer.

Endast en typ av pågjutning studeras. Sex provkroppar installerades 2013. En av dessa har temperaturgivare för mätning av temperatur. En första provkropp togs upp efter 1 års exponering, men av olika anledningar var provningen krångligare än vad man trott och vissa resultat gick ej att få fram. Nästa provningstillfälle är efter 3 års exponering och ska ske under hösten 2016. På grund av att kvaliteten på pågjutningen inte är enligt det som avsågs från början (lägre vct, högre lufthalt, lägre hållfasthet än det som önskats i förstudien) ska projektets fortlevnad diskuteras efter den kommande mätningen.

3.1.2 Fältexponering av fogband

Syfte med projektet är att studera åldringsscenarier av dilatationsfogar och dess reparationer och målet är att få ökad kunskap gällande åldring samt reparationers lämplighet och beständighet.

Fokus i projektet är hur fogområdet påverkas över tid och hur detta påverkar konstruktionens funktion, samt hur olika fogband påverkas av den alkaliska miljö som råder i betongen. Tre fogband inkluderades (dessa tre har även ingått i studie av Swerea KIMAB, 2.2.2). För varje fogband togs fram tre provkroppar (totalt 9 st). Dessutom togs det fram 15 mindre provkroppar (vardera med tre fogbandsprover av vardera typ, totalt 9*15 st). En av de mindre provkropparna kommer att plockas upp varje år från och med 2016 och de större kommer plockas upp efter tidigast 5 respektive 10 års exponering. Såväl fogband som gjutzon kommer att analyseras i de större provkropparna.

3.1.3 Exponering av provkroppar med låg samt mellanreaktiv ballast (AKR)

Syfte med projektet är att undersöka hur omfattande AKR är för svenska vattenkraftanläggningar samt studera reaktionshastighet och skadegrad under exponering i älvmiljö. Dessutom ska provkroppar med AKR påföras pågjutningar och tätskikt för att studera om dessa påverkar reaktionen. Målet är att få ökad kunskap för att förbättra framtida insatser.

För provkropparna användes ballast från bergart bedömd som medelreaktiv samt en ballast som ej innehöll känt reaktiv bergart. 40 provkroppar tillverkades (20 med reaktiv ballast och 20 med icke-reaktiv ballast). Fem olika klimatförhållanden designades. Det ena motsvarar accelererad provning enligt RILEM AAR-3. De övriga förvarades alla i +20° C under första året, varefter exponeringen ändrades för tre av proverna. Efter ett års provning framgår att den valda ballasten är reaktiv och ger utslag i den accelererade metoden. Fortsatta mätningar kommer göras halvårsvis.

3.2 PROVNING OCH ANALYS AV FOGBAND

Swerea KIMAB utförde provning av fogband i syfte att öka förståelsen för

- Hur bedömning av ett fogbands lämplighet för användning i betongkonstruktioner ska göras.
- Om det finns lämplig metod för tillståndskontroll eller övervakning på fogband i drift.
- Om de metoder som idag används för certifiering är relevanta.
- Om det finns snabbare sätt att utvärdera lämplighet än accelererad provning under 42 dygn.

Uppdraget har presenterats i form av en rapport, Jacobson et al (2016).

Provningar och analyser gjordes av nya, icke exponerade fogband och fogband som varit utsatta för olika typer av accelererade exponeringsmiljöer. En del av resultaten jämfördes med resultat från fogband som varit i drift ute på något verk.

En slutsats är att alla typer av ftalatmjukgörare i PVC kommer att hydrolyseras i alkalisk miljö vilket leder till att materialet hårdnar och blir sprödare med tiden. PVC med mjukgörare som inte är hydrolyskänslig har därmed förutsättningar att bibehålla sina egenskaper även i alkalisk miljö under lång tid.

Fogband av elastomeren SBR (styren-butadien gummi) kommer inte att uppföra sig på samma sätt som mjukgjord PVC. Då det är brist på långtidserfarenhet samt att gummimaterial kan variera mycket i komposition och egenskaper är det svårt att dra slutsatser om vad det är som kommer att begränsa livslängden på dessa material i en betongkonstruktion. Det är även svårt att bedöma hur en accelererad provning skall göras.

Rekommendationer för fortsatta studier handlar bland annat om utvärdering av de fogband som gjutits in i provkropparna på fältstationen (se 2.2.1.2), analys av fogband av elastomer-typ som varit i drift samt analys av huruvida dagens acceptanskriterier är relevanta.

3.3 FOGBAND OCH FOGMASSOR I BETONGKONSTRUKTIONER

Denna rapport tar upp området fog- och tätningsmassor med fokus på vanligt förekommande typer, deras generella egenskaper, hur massorna åldras och en lämplig metodik för inspektion av fogarna. Fokus i rapporten är på fogband och fogmassor i kärnkraftverk.

Än idag finns dock ingen generell koppling mellan graden av nedbrytning (förändring av egenskaper) och när materialet borde bytas ut för att säkerställa funktionen. Detta beror mycket på att det inte finns några standardiserade polymera material inom industrin, där specifika egenskaper uppnås

I rapporten ges några enklare riktlinjer för hur ofta en inspektion av fogar/tätningar borde göras och hur man kan identifiera olika typer av fogmaterial. Vidare beskrivs olika feltyper vad gäller fogmassor, möjliga orsaker till dessa fel och förslag på åtgärder.

3.4 FUKTUPPTAGNING OCH FROSTBESTÄNDIGHET HOS BETONG DOKTORANDPROJEKTET (MARTIN ROSENQVIST).

Kraftindustrins byggnader och dammkonstruktioner har idag en relativt hög medelålder. Betydelsen av att kunna förlänga konstruktionernas kvarvarande livslängd är stor. Kunskap om vattenbyggnadsbetongens beständighet och förekommande nedbrytningsmekanismer är nödvändig för att prioritera och planera åtgärder. För betongkonstruktioner i konstant kontakt med vatten och som utsätts för låga temperaturer under vintern är risken för frostsador alltid närvarande.

Det övergripande syftet med doktorandprojektet är att utreda hur betong i vattenbyggnader kan skadas till följd av frostangrepp. De förlopp som leder till yttre och inre frostsador ska beskrivas. Dessutom ska inverkan av höga fuktnivåer och samverkan med andra vanliga nedbrytningsmekanismer undersökas.

Resultat från genomförda experimentella studier visar att nedbrytning av betongens yta längs vattenlinjen primärt orsakas av samverkan mellan urlakning och frost. Nötning ökar ytterligare nedbrytningsstakten. I tunna betongdammar utan isolerande klimatvägg på nedströmssidan kan nedbrytning till följd av makroskopisk islinsbildning inträffa. Nedbrytningsförloppet kan ske hastigt då inre skador kan vara svåra att upptäcka. Vid båda typerna av frostnedbrytning är fuktnivån hög. Erhållna resultat visar att betong nedstänkt i vatten blir vattenmättad med tiden. De samlade resultaten från doktorandprojektet kan användas till att bättre prioritera och planera förebyggande åtgärder, samt framtida reparationsinsatser.

3.5 UTVÄRDERING AV ETMA FÖR BESTÄMNING AV URLAKNINGSPROFILER

Betong i kontakt med vatten i kraftverksdammar och vattenvägar drabbas av successiv urlakning av dess kalciumföreningar, det vill säga cementets beståndsdelar. Urlakning är normalt en långsam process. Ackumulerat över tid kan dock mängden urlakad kalk bli ansenlig. Betongens porositet ökar och mekaniska egenskaper försämras. Detta leder till att betongens förmåga att motstå andra nedbrytningsmekanismer försvagas. Profiler över cementets kemiska sammansättning för beräkning av urlakningsgrad har utomlands utförts medelst mikronsonanalys (EPMA).

Det övergripande syftet med projektförslaget är att utvärdera ifall EPMA är en lämplig analysmetod för bestämning av urlakningsprofiler i vattenbyggnadsbetong. Utvärderingen ska omfatta både metodens för- och nackdelar, inklusive en kostnadsjämförelse med andra metoder.

Genom analys av betong från en befintlig lamelldamm har det visats att mikrosondanalys är en användbar analysmetod för att med hög noggrannhet bestämma kemisk sammansättning i cement. Vid återkommande mikrosondanalyser skulle det således vara möjligt att med stor noggrannhet följa urlakningsprocessen i cement och betong över tid.

3.6 REDOGÖRELSE FÖR UTVECKLINGEN AV VATTENBYGGNADSBETONG INOM SVENSK VATTENKRAFT

Sedan tidigt 1900-tal har betong varit ett vanligt förekommande byggnadsmaterial i vattenkraftskonstruktioner. Betongens lämplighet i vattenkraftsmiljö ifrågasattes dock under 1920-talet till följd av bristande kvalitet och kontroll på utförda betongarbeten. Omfattande forskning ledde till utveckling av nya cementtyper, tillsatsmaterial, samt rutiner för utförande och kontroll av betongarbeten. Utvecklingen av vattenbyggnadsbetong har resulterat i att vattenkraftverk från olika tidsepoker har uppförts med olika betongsammansättningar och metoder. Variationer i cementtyp, cementhalt, vct, stenmax och använda tillsatsmaterial medför att betongens egenskaper har varierat över tiden. Denna variation har direkt inverkan på vattenbyggnadsbetongens beständighet.

Det övergripande syftet med projektet är att öka kunskap och förståelse för vattenbyggnadsbetong från olika tidsepoker under vattenkraftsutbyggnaden. Vanligt förekommande betongsammansättningar och tillämpade utförandetekniker ska sammanställas.

Det har framkommit att det finns mycket bevarad information om hur betongarbetena utfördes under vattenkraftsutbyggnaden. Denna information är dock fördelad över handböcker, anvisningar, erfarenhetsrapporter, bevarad korrespondens, artiklar, standarder och normer. Genom detta projekt har stora delar av detta material sammanställts inom ramen för en publikation.

3.7 UTVÄRDERING EFTER LÅNGTIDSEXPONERING

Projektet innefattar utvärderingen av de fältexponeringar av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong som pågått sedan 1997 (och delvis fortsatt pågår). Studien har primärt inriktats på om, och under vilka förutsättningar, som stålfiberkorrosion riskerar uppstå i sprickzonen om sprutbetongen spricker. Resultatet finns i rapport Nordström (2016).

Målet med fältexponeringarna är:

- Definiera tid till initiering och korrosionshastighet efter en ev. initiering
- Undersök inverkan av relevanta materialparametrar på korrosionsprocessen
- Studera långtidspåverkan på residualbärförmåga p.g.a. korrosion och ev. andra initierade nedbrytningsmekanismer.
- Skapa underlag för att definiera kritisk sprickvidd vid ev. initierad korrosion

Resultat visar att samtliga provplatserna uppvisar korrosion efter 17 års exponering, men i mycket begränsad omfattning i älvmiljön. Korrosionsangreppet är kraftigast vid Rv40 som utgör en miljö med kombinationen av hög fuktighet och relativt hög kloridbelastning där korrosion initierades efter 1 år. I Eugeniattunneln var korrosion tydlig efter ca 5 år.

Sammanfattningsvis kan konstateras att stålfiberkorrosion i sprucken sprutbetong exponerade för kloridutsatta miljöer måste förväntas uppträda med de vanligast förekommande fibertyperna. Det är inte rimligt att anta 100 års livslängd med bibehållen bärförmåga i de provade kloridutsatta miljöerna. På sikt kan urlakningen i sprutbetongen som befinner sig i vattenlinjen bli ett problem med nedsatt hållfasthet och sämre skydd för fibrer, men det är i dagsläget svårt att uttala sig om.

Framtida utvärderingar rekommenderas för kvarvarande försöksupställning i Dalälven, med inriktning på förnyad kontroll av ev. fiberkorrosion och framförallt förändringen av betongens sammansättning. Rekommendationen är att denna utförs år 2027 då proverna exponerats i 30 år.

3.8 RILEM ASR PROGNOSIS OF DETERIORATION AND LOSS OF SERVICEABILITY IN STRUCTURES AFFECTED BY ALKALI-SILICA REACTIONS

Projektet har initierats inom RILEM (<http://www.rilem.org>) för att ta fram metodik för att beskriva nedbrytningsprocessen hos betongkonstruktioner utsatta för AKR. Projektet syftar till att ta fram lämplig provningsmetod för bestämning av kvarvarande expansion och förändringar i materialegenskaper samt modeller för att beskriva konstruktionernas fysikaliska och mekaniska beteende.

Uppdraget inom betongprogrammet avsåg att delta i en arbetsgrupp inom RILEM och att i projektets första fas sammanställa ca fyra provningsmetoder samt koordinera sammanställning av de provningsmetoder som beskrivs av andra i arbetsgruppen. Under arbetets gång tillkom ytterligare provningsmetoder och arbetet utökades genom samarbete med Universitetet i Colorado. Metodbeskrivningarna för provning är i nuläget på remiss. Metoderna har beskrivits som en standard.

Livslängdsmodellering av ASR-skadade konstruktioner kräver indata i form av materialdata och dess utveckling med tiden. Förhoppningsvis så kan en eller flera av de beskrivna metoderna leverera de materialdata som krävs för att en livslängdsbedömning skall kunna utföras.

4 Fokusområde Bärförmåga

Fokusområdet avser metoder och verktyg för analys av fenomen och effekter som på kort eller lång sikt inverkar på konstruktioners eller konstruktionsdelars bärförmåga.

Fokusområdet är ganska brett och kan innefatta allt från en dammkonstruktions bärförmåga till vattenvägars, utskovens eller energiomvandlarens bärförmåga. Med bärförmåga i en strikt bemärkelse avses den last som konstruktionen kan bära utan att brista eller kollapsa. Även om detta betraktelsesätt är centralt inom vattenkraftens verksamhet behövs någon mer flexibel och vidare definition. Definitionen bör innefatta gränsvärden för deformationer, sprickbildning och nedsatt förmåga att uppfylla en specifik funktion, till exempel täthet.

Vid analys av de effekter som inverkar på bärförmågan beaktas utöver de mekaniska belastningar, exempelvis vatten- och istryck, även fysikaliska och kemiska fenomenens inverkan på konstruktionerna. Detta innebär att Fokusområdet Bärförmåga beaktar även nedbrytningsmekanismernas inverkan på bärförmågan, eller bärförmågans förändring med tiden.

Materialegenskaper som hållfasthet, diffusionskoefficienter, m.m. varierar inom konstruktionen och med tiden. Även laster och randvillkor varierar. Ofta är det svårt och oekonomiskt att utföra beräkningar eller dimensionera konstruktionen för det värsta tänkbara scenariot. Man behöver ange sannolikheten för att en viss händelse inträffar t.ex. brott, deformation eller sprickbildning. I dessa sammanhang behöver man använda probabilistiska metoder, vilka omfattas av Fokusområdet Bärförmåga.

Sammanfattningsvis omfattar Fokusområdet Bärförmåga konstruktioners och materialens respons mot mekaniska, fysikaliska och kemiska belastningar. Med respons menas kollaps, brott, lokalt brott, sprickbildning eller deformation.

Vad det gäller modellering av konstruktion och material inkluderar fokusområdet analytiska och numeriska modeller, linjära som icke-linjära samt deterministiska som probabilistiska. Som nämndes ovan är tid en viktig faktor i detta sammanhang, varför även modeller som beskriver materialens nedbrytning beaktas.

Tillämpning och anpassning av modeller baserade på icke-linjära materialegenskaper samt dynamiska laster från generatorer och turbiner var fokusområde i de program som föregick i detta avsnitt beskrivna programmet. Modellerna har hjälpt till att förstå spricktillväxt i betongdammar som orsakas av temperaturförändringar samt spricktillväxt i generatorfundament orsakad av temperatur- och fuktighetsförändringar samt dynamiska laster alstrade av generatorer och turbiner. Icke-linjära beräkningar baserade på icke-linjära materialmodeller används nu av konsulter. SVC gör stor satsning inom nämnda tillämpningarna. Även internationellt ökar tillämpningen inom dammkonstruktionsområdet. Därför bestämdes att Energiforsks satsningar på de generella frågeställningarna inte skulle bli lika intensiva som förut. Energiforsk skulle istället rikta sina insatser mot specifika problemställningar som

kompletterade andra aktörers forskning och utveckling. Energiforsk såg till att de redan utvecklade modellerna spreds bland konsulter verksamma inom vattenkraftområdet. Nedan beskrivs några områden som berördes.

Fokusområdet Bärförmåga har haft ambitionen att starta ett projekt inom varje delfokusområde, men detta inte var möjligt av resursmässiga skäl. Därför, valde Fokusområdet Bärförmåga att även delta i och stötta projekt, som initierades av andra aktörer. Dock, med villkoret att projektens inriktning sammanföll med delfokusområdenas inriktning. Avsnitt 4.2 beskriver genomförda projekt inom de olika delfokusområdena.

4.1 DELFOKUSOMRÅDEN

4.1.1 Samverkan mellan olika materialskikt och kontaktytor – FO1

De flesta konstruktioner består av detaljer med olika egenskaper som samverkar. Till exempel betongdammar och ledmurar är grundlagda på berg. Det är viktigt att beskriva/modellera kontaktytan mellan konstruktionsdelarna på ett realistiskt sätt. Vidare, bör finnas väldefinierade modeller med väl utredda egenskaper vad det gäller inverkan på de globala beräkningsresultaten för att underlätta jämförelsen mellan olika lösningar, modeller, datorprogram, mm. Andra viktiga exempel är samverkan mellan olika gjutetapper, mellan pågjutning och underlag, mellan dilatationsfog och konstruktionsdelar.

Gränsskiktet mellan berg och betong (även sprutbetong), materialskikt inom betong och berg samt sprickor i betong och berg bör uppmärksammas. Det vattentryck som kan uppkomma i skiktet mellan olika material, gjutetapper och sprickor bör beaktas. Samtliga nämnda faktorer påverkar glidningen mellan materialskikten.

4.1.2 Betongens hårdnande och initialspänningar – FO2

Betongens hårdnande bör modelleras. För närvarande finns datorprogram som kan användas för ändamålet. Men systematisk genomgång av modellerna och anpassning till vattenkraftens förhållanden bör utföras. Vidare, bör modellernas användbarhet vad det gäller reparationsåtgärder, d.v.s. reparationsbetongens hårdnande och dess samverkan med underlaget, utredas och utvärderas. Vid skadeutredningar och fastställandet av skadeorsak behövs ofta kunskap om betongens egenspanningar och initiala spänningar. Kunskaperna kan bara tas fram genom långtidsövervakning och kompletterande beräkningar som inkluderar betongens hårdnande.

4.1.3 Den injekterade betongens egenskaper och konstruktionens bärförmåga och täthet – FO3

Betong injekteras på grund av att den har spruckit eller urlakats. Den injekterade betongen får nya mekaniska och fysikaliska egenskaper. Hur det förändrade materialets egenskaper skall inkluderas i de avancerade beräkningarna är inte riktigt utrett. Det injekterade betongens mekaniska och fysikaliska egenskaper är inte heller kända. Därför är det svårt och osäkert att analysera en injekterad

konstruktions bärförmåga och täthet med avancerade beräkningsmodeller. På grund av att injektering är en viktig reparationsmetod behövs insatser inom detta område.

4.1.4 Konstitutiva materialmodeller – FO4

De flesta kommersiella datorprogram har en uppsjö av konstitutiva materialmodeller. Det finns materialmodeller för beaktandet av olika fenomen, bl.a. skador orsakade av spänningar/töjningar som överstiger det värde som materialet tål. Det finns ingen sammanställning av de materialmodeller som är tillämpbara för dammkonstruktioner. Det saknas även en verifiering av materialmodellerna och rekommendation gällande värden på ingående parametrar.

Det finns inte någon sammanställning av konstitutiva materialmodeller som beskriver nedbrytning av material. T.ex. frostangrepp och alkalisilikareaktioner (ASR) leder till materialexpansion. I vanliga fall, t.ex. expansion orsakad av temperaturökning, skadas inte materialet om expansionen inte förhindras. Däremot skadas materialet i samband med frostangrepp och ASR, även om betongen får expandera fritt. Konstitutiva modeller som tar hänsyn till inverkan av expansion på materialens mekaniska och fysikaliska egenskaper är nödvändiga för analys av konstruktioner utsatta för frost- och ASR-angrepp.

4.1.5 Beräkningarnas giltighet – FO5

Som framgick ovan är de avancerade beräkningsmodellerna kraftfulla verktyg för analys av dammkonstruktioner och tillhörande anläggningar. Verktygen används allt oftare och man drar allt mer långtgående slutsatser från beräkningsresultaten. För närvarande finns inte lämpliga verktyg för att verifiera beräkningsmodellerna och resultaten. Det finns inget verktyg för att jämföra resultat från olika beräkningar. Många program har olika sätt att behandla numeriska hinder och svårigheter. Man märker ofta att beräkningarna inte konvergerar, men man vet inte hur stor betydelse de har för slutresultaten, osv. Ett projekt som på ett systematiskt sätt behandlar dessa frågor efterlyses.

4.2 UTFÖRDA PROJEKT INOM BÄRFÖRMÅGA

4.2.1 Allmänt

Som framgick i Avsitt 4.1 utgjorde resultaten av de program som föregick det avslutande programmet grunden för de fokusområden som beskrevs i Avsnitt 4.1. Nedan anges exempel på projekt som hade utförts före det avslutande programmet:

- Avancerade sprickberäkningar i aggregatnära miljö – FO4
- Avancerad beräkning av spricktillväxt i dammkonstruktioner – FO4
- Korrosion av slakarmerade förankringsstag och bergbultar – FO1

FO*n* (Fokusområde nummer *n*) anger projektens anknytning till fokusområde definierat enligt Avsnitt 4.1.

4.2.2 ICOLD Bulletin: Non- Linear Modelling of Concrete Dams (NLMCD) – FO1

Icke finansierat projekt

Utförare: Manouchehr Hassanzadeh (Vattenfall/Sweco)

Vid ICOLD-mötet 2014 föreslog den svenska delegaten i kommitté A (Computational aspects of analysis and design of dams) att en ny bulletin för avancerade numeriska beräkningar för betongdammar tas fram. Förslaget handlade om "Effects of discontinuities", d.v.s. modellering av gränssnittet mellan olika material, sprickor, konstruktionens ränder, hålrum, områden med spänningskoncentrationer, m.m. Kommitténs medlemmar var positiva till förslaget och ville att arbetet skulle utökas till att även omfatta icke-linjär analys av betongdammar. Svenska delegaten har initierat arbetet. Hittills har flera webbmöten hållits. Bulletinens "Scope" har bestämts tillsammans med i stort sett bulletinens innehållsförteckning. Bulletinens titel är "Non-Linear Modelling of Concrete Dams". Bulletinen författas av olika deltagare. För närvarande finns relativt stort material i de teoretiska och inledande delarna av Bulletinen. Deltagare från Sverige, Australien, Italien, Norge, Kanada, Frankrike och Schweiz deltar i arbetet. Sverige ställer upp med flera deltagare.

4.2.3 Spännings- och töjningsutveckling i ny gjuten betong (förstudie) – FO2

Helfinansierat av Energiforsk

Utförare: Johan Blomdahl (Sweco), Richard Malm (KTH/Sweco) och Erik Nordström (Sweco)

Projektets Steg 1 (Förstudie), se nedan, är slutfört.

Projektet utförs i tre steg enligt nedan:

- Steg 1: Förstudie
- Steg 2: Utvecklande av metodik/Simulering
- Steg 3: Guideline

Syftet med projektet är att utvärdera skillnaden mellan dimensionering enligt Eurokod och BBK för att utreda hur skillnaden i armeringsmängd påverkar risk för uppsprickning i grova betongkonstruktioner. Detta avses att genomföras, dels i specialutvecklade (2D) program så som HACON samt att utveckla en metodik för att genomföra analyser av hårdande betong i konventionella FE-programvaror. Detta genom att studera dessa konstruktioners spännings- och töjningstillstånd samt spricktillväxt (djup, bredd samt frekvens) och inverkan av randen.

Syftet med projektet är vidare att utveckla en metodik för att simulera, i 3D, med hjälp av konventionella FE-analysprogram spännings- och töjningsutvecklingen i ny gjuten betong för att försöka beskriva grova betongkonstruktioners hållfasthetsutveckling och risken för ytsprickor. Syftet med projektet är dock inte att utveckla egna teoretiska materialmodeller för att beskriva utvecklingen av spänning och töjning i ung hårdande betong. Istället avses att utvärdera befintliga materialmodeller och utveckla en metodik för hur dessa kan implementeras i konventionella FE-analysprogram.

Dessutom syftar man till att simulera de uppkomna ytsprickornas bredd och djup för att kunna bestämma dess betydelse för konstruktionen.

4.2.4 Injekterad betongs egenskaper – konstruktionens bärförmåga och täthet – FO3

Helfinansierat av Energiforsk

Utförare: Oskar Larsson (Konstruktionsteknik, LTH) och Magnus Åhs
(Byggnadsmaterial, LTH)

Att injektera vattenkraftkonstruktioner är en vanlig reparationsmetod som syftar till att förlänga konstruktionens livslängd. Det är dock svårt att verifiera om injekteringen uppnått önskat resultat, dvs. om sprickor och håligheter ifyllts och konstruktionen fått tillräcklig kapacitet när det gäller bärförmåga och täthet. Materialegenskaperna hos den injekterade betongkonstruktionen är dock svåra både att bestämma och verifiera. Detta gör det svårt att utföra beräkningar av bärförmåga och täthet på den injekterade konstruktionen.

Projektets slutrapport presenterar en förstudie där de viktigaste egenskaperna som behövs för modellering av injekterade betongkonstruktioner har kartlagts. Litteraturstudier har genomförts för att studera vad som tidigare gjorts inom området och vilken typ av modellering som är möjlig att göra. Studien är uppdelad i två delar, där injekteringens påverkan på bärförmåga respektive täthet har undersökts.

Det finns idag inte tillräckligt med kunskap för att avgöra hur egenskaperna hos en injekterad betongdamm ser ut. Det är möjligt att modellera vattenflöde och bärförmåga med olika detaljeringsgrad, det är dock inte möjligt att avgöra vilken detaljeringsgrad som är lämplig att använda för ett specifikt fall. I dagens kunskapsläge är det inte möjligt att fatta beslut om lämplig detaljeringsgrad för modelleringen på ett objektivt sätt av den som utför beräkningarna.

Det är inte heller möjligt att fatta beslut angående om en betongkonstruktion bör injekteras eller om andra åtgärder är mer lämpliga. De långsiktiga egenskaperna hos injekteringen och dess samverkan med den ursprungliga betongen är inte möjliga att uppskatta i dagens läge, utan mer forskning krävs.

I slutrapporten ges olika förslag på riktad forskning där ovanstående identifierade kunskapsluckor kan täppas till. Det finns metoder för verifiering som inte har testats och utvärderats för denna typ av konstruktioner, vilket gör att det är möjligt att genomföra ytterligare studier för att kartlägga injekterad betongs egenskaper. Framtida studier bör även inkludera provning i laboratorium där olika metoder kan testas och jämföras med modellering med olika detaljeringsgrad.

4.2.5 Litteraturstudie om inverkan av ASR på betongkonstruktioners bärförmåga – FO4

Helfinansierat av Energiforsk

Utförare: Ali Farhang (Ramböll)

Rapporten studerar ASR-skadans inverkan på både betongens material- och hållfasthetsegenskaper, samt betongtvärsnittets bärförmåga vid bärlighetsutredning i brottgränstillstånd med hänsyn till olika typer av brott så som böj-, skjuv-, genomstansnings- samt förankringsbrott. Vidare studeras lamelldammars verkningssätt i bruksgränstillstånd under normal förekommande laster med hjälp av både linjär och icke-linjär finita element modellering. Modelleringen syftar till att visa om det råder risk för sprickbildning och spricktillväxt på grund av normalt förekommande temperaturlaster i lamelldammar. Rapporten utvidgar sedan resonemanget till inverkan av en eventuell ASR på sprickbildning och spricktillväxt i lamelldammar och risker för en försämrade stabilitets- och täthetsegenskaper.

Rapporten är baserad på en utförlig litteraturinventering samt två examensarbeten på Kungliga Tekniska Högskolan KTH och Uppsala universitet.

Arbetet visar att ASR har en varierande inverkan på betongens hållfastheter och elasticitetsmodul. Generellt resulterar ASR i en reduktion av hållfastheter och elasticitetsmodul beroende på grad av ASR expansion. Däremot, påverkas tvärsnittets bärförmåga med hänsyn till böjande moment inte nämnvärt för underarmerade tvärsnitt. Tvärkraftskapaciteten av armerade betongkonstruktioner som har slutna byglar runt ett dubbel armerat tvärsnitt påverkas inte nämnvärt vid måttliga ASR expansion. Förutsatt att armeringsanordningen i de kritiska tvärsnitten har tillräcklig med byglar som skapar förutsättningar för en styv omslutningseffekt. Det har, dock, konstaterats att tvärsnittets tvärkraftskapacitet kan vid hög grad av expansion (större än 6 mm/m) reduceras med 20%.

Det stora problemet med ASR kan relateras till förankringsskapaciteten. Här har man konstaterat att ASR kan minska vidhäftningshållfastheten signifikant om tvärgående armering saknas och om täckande betongskikt är för tunt. Reduktioner upp till 60% av förankringsskapacitet kan uppkomma vid expansioner av storleksordningen 6 mm/m. Denna reduktion kan ha stor inverkan på bergförankringarnas verkningssätt och även betongens förankringsförmåga till böjarmering. Spjälkning av betong parallell med längsgående armering kan generellt minska tvärsnittets moments-, tvärkrafts- och genomstansningskapacitet och inte minst förankringsskapacitet.

Experimentella studier i laboratoriemiljö med armerade provkroppar utsatta för påskyndad ASR visar att reduktionen av bärförmåga beror i regel på hur armeringen anordnas i betongen. Betong med lågt armeringsinnehåll utan byglar resulterar inte i en märkbar omslutningseffekt vid ASR expansion och därmed kan en viss reduktion av bärförmågan förväntas. I sådana fall reduceras bärförmågan i en bärlighetsberäkning genom en reduktion av betongens hållfastheter. Däremot provkroppar med högt armeringsinnehåll och tätt placerade byglar visar en marginell reduktion av bärförmåga på grund av omslutningseffekter av armering.

FE analysen visar att lamelldammar kan utveckla horisontella och vertikala sprickor i både frontplatta och kontrefor på grund av tvångslaster orsakat av temperatur. Risken för uppkomsten av stora sprickor samt eventuell spricktillväxt hos befintligt spricksystem under konstruktionens livslängd kan öka markant om betongen drabbas av ASR skador. Denna risk är betydelsefull om lamelldammen

är lättarmerade och därmed ingen omslutningseffekt kan erhållas vid ASR expansion och följaktligen bör denna risk beaktas vid kontroll av stabilitet, läckage och tvärsnittsbrott.

4.2.6 RILEM ASR Prognosis of deterioration and loss of serviceability in structures affected by alkali-silica reactions – FO4

Delfinansierat av Energiforsk

Utförare: Manouchehr Hassanzadeh (Vattenfall/Sweco) och Jan Trägårdh (CBI)

Detta RILEM projekt har initierats för att ta fram en metodik för bestämning av nedbrytningsprocess hos betongkonstruktioner utsatta för ASR. Projektet syftar till att ta fram lämplig provningsmetod för bestämning av kvarvarande expansion, förändringar i materialegenskaper samt modeller för att beskriva konstruktionernas fysikaliska och mekaniska beteende. Vidare, syftar projektet till att utveckla metoder för uppföljning av förändringar i konstruktioner och följa upp förändringarna för att verifiera modellerna. Projektet satsar även på storskaliga provningar. RILEM-arbetet bedrivs inom fyra Working Groups (WG):

1. WG-1 Material Testing
2. WG-2 Numerical Modeling
3. WG-3 Monitoring
4. WG-4 Large Scale Testing

Arbetet genomförs i två faser, varav fas 1 handlar huvudsakligen om att framställa en lägesrapport och fas 2 handlar om projektets genomförande. En preliminär lägesrapport togs fram under 2015 och slutrapporten levereras inom kort. Fas 2 börjar efter avslutad fas 1.

Detta arbete avser WG1. Jan Trägårdh och Manouchehr Hassanzadeh sammanställde dem för arbetsgruppen kända provningsmetoderna (4 stycken). Provningsmetoderna har beskrivits på samma sätt som en standard. Rapportens utkast presenterades i ett möte i Paris 2015-06-23. Resultatet av arbetet uppskattades vilket ledde till att flera nya laboratorier som har utvecklat egna metoder begärde att även deras metoder skulle inkluderas i rapporten. Efter mötet skickade nya deltagare sina metoder till Trägårdh och Hassanzadeh som skulle bearbetas på samma sätt. Arbetet blev till slut så omfattande så att Energiforsks resurser inte räckte till. Därför togs arbetet över av Colorado Universitet (Viktor Saouma och hans doktorand) så att rapporten kunde kompletteras och revideras. Arbetet är nu slutfört och resultatet diskuteras vid ett möte i juni 2016, i Colorado.

4.2.7 Beräkningens giltighet – granskning av beräkningar – FO5

Helfinansierat av Energiforsk

Utförare: Tomas Ekström (ÅF), Per-Johan Gustafsson (Byggnadsmekanik, LTH), Mikael Hallgren (Tyréns), Manouchehr Hassanzadeh (Vattenfall/Sweco), Richard Malm (KTH/Sweco), Lars-Olof Nilsson (Byggnadsmaterial, LTH), Sven Thelandersson (Konstruktionsteknik, LTH)

Arbetets slutrapport är: *"Vägledning för granskning av avancerade datorberäkning avseende mekanik och transportprocesser i betongkonstruktioner för vattenkraft"*

Vattenkraftens konstruktioner befinner sig i en miljö där belastningar orsakade av så väl mekaniska som fysikaliska och kemiska fenomen gör sig gällande och bör beaktas vid dimensionering och tillstånds- och livslängdsbedömning av vattenkraftskonstruktioner. Därför kan beräkningarna handla om analyser av mekaniska spänningar/töjningar såväl som analyser av olika transportprocesser. Transportprocesserna kan inverka direkt på bärförmågan/stabiliteten genom t.ex. temperatur- och vattenflöden/porvattentryck, eller indirekt genom att bärförmågan/stabiliteten sjunker om materialet degraderas, t.ex. genom urlakning eller frostsador. Slutrapporten beskriver översiktligt vattenkraftens konstruktioner och till dessa hörande avancerade tillämpningsberäkningar.

Vidare beskriver slutrapporten ett antal fysikaliska fenomen, varav några också inkluderar kemiska reaktioner, som kan behöva beaktas vid byggnad och underhåll av dammar och andra anläggningskonstruktioner av betong. Flera av dessa fenomen kan beskrivas teoretiskt och göras beräkningsbara med en differentialekvation, eller ett system av differentialekvationer. För lösning av sådana ekvationer har avancerade datorberäkningar blivit ett viktigt ingenjörswerktyg. Datorberäkningar ger genom metoder som finita elementmetoden och finita differensmetoden möjlighet att bestämma en åtminstone approximativ numerisk lösning, även i de fall ekvationen är mycket komplex och omöjlig att hantera analytiskt eller genom handberäkningsmetoder. Kapitlet redovisar också några modelltyper och beräkningsverktyg för så väl spännings- som masstransportberäkningar.

Det konstateras att granskning av avancerade datorbaserade beräkningar är en komplicerad process och för att uppnå god kvalitet inte bara i beräkningsresultaten utan även i granskningen av beräkningsresultaten krävs det att granskningsprocessen planeras. Det är också viktigt att granskningsprocessen är överenskommen mellan parterna, dvs Beställaren, Beräkningsingenjören och Granskaren. Vidare måste granskningsprocessen planeras tidigt i projektet och innan beräkningsarbetet påbörjas. För att granskningen ska vara så effektiv som möjligt rekommenderas det att Granskaren utses redan innan beräkningsarbetet påbörjas. I ett tidigt skede bör Beräkningsingenjören och Granskaren vara överens om följande två viktiga dokument som upprättas i olika skeden

- Analysförutsättningar som skall upprättas innan själva analyserna genomförs
- Analysrapport som skall upprättas efter att analyserna genomförts och där resultat och slutsatser redovisas

Slutrapporten utvecklar mer i detalj vilka krav som ställs på dessa dokument så att de blir granskningsbara. En mycket viktig del i dokumentationen är Redovisning av analysmodell och indata. Rapporten redogör även för några viktiga synpunkter på vad man bör vara observant på som granskare som också kan användas som någon form av checklista för den som sammanställer rapporterna. Den ger även anvisningar för granskning av Analysförutsättningar respektive Analysrapport samt själva beräkningarna.

Olika typer av verifieringar som bör genomföras av numeriska modeller och av dess resultat beskrivs också. Dessa krav är att anse som minimikrav och är inte på något sätt en garanti för att beräkningen är korrekt. Numeriska analyser med finita elementmetoden eller finita differensmetoden är approximationer av ett verkligt beteende, och bör åtminstone verifieras med avseende på konvergens, d.v.s. att elementindelning är tillräcklig för att numeriska modellen ska ge samma resultat oavsett förfining av elementindelningen eller användning av högre ordningens element. Vidare bör elementindelningar och bearbetning av beräkningsresultat inte göras så att spänningsfördelningar blir överdrivet utjämnade.

4.2.8 Spricktyper i vattenkraftskonstruktioner – relaterat till samtliga FO

Helfinansierat av Energiforsk

Utförare: Manouchehr Hassanzadeh (Vattenfall/Sweco) och Marie Westberg Wilde (ÅF)

Med hjälp av rapporter och bilder som Vattenkraftsföretagen tillhandahöll valdes en population av 38 dammar - längs Lagan, Nissan, Ljusnan, Ljungan, Indalsälven och Umeälven - som inspekterades okulärt. Denna population valdes utifrån storlek, typ och lokalisering i landet. Resultatet har sammanställts i denna rapport, som beskriver sprickornas uppkomst, ger en uppfattning om de olika förekommande spricktyperna samt kortfattat beskrivning av bakomliggande mekanismer som kan ha förorsakat sprickorna och eventuella konsekvenser. De enligt översiktlig bedömning frekventa spricktyperna har sammanställts och presenterats i en hypotetisk dammkonstruktion. Rapporten kan ses som ett underlag vid besiktning och tillståndsbedömning av dammarnas betongkonstruktioner.

Rapporten visar att en stor andel av de sprickor som observeras i dammkonstruktionerna orsakas av förhindrade termiska rörelser. Även skador orsakade av alkalisilikareaktioner och inre frostangrepp förekommer i en del av konstruktionerna. Erosion av betongyta vid vattenlinjen förekommer i många dammkonstruktioner. Korrosionsangrepp är sällsynt i dammkonstruktionerna. Vidare förekommer ytsprickor orsakade av plastisk krympning, plastisk sättning och separation av bruk i kontakt med gjut-form, m.m. I äldre konstruktionerna har ytsprickorna utvidgats med åren och underlättat nedbrytning orsakade av andra mekanismer som urlakning och frost.

Rapporten föreslår att arbetet kompletteras med liknande data från dammar i andra älvar samt betongkonstruktioner i jorddammar, noggrannare beskrivning av de olika mekanismernas verkningssätt, noggrannare beskrivning av kombinationen av olika samtidigt verkande mekanismer t.ex. kombinationen av

mekaniska och fysikaliska belastningar, samt teoretisk modellering som ökar förståelsen av de olika mekanismernas verkningssätt.

4.2.9 Bygginnovationen – relaterat till samtliga FO

Helfinansierat av Energiforsk

Utförare: Manouchehr Hassanzadeh (Vattenfall/Sweco)

Hassanzadeh representerade Energiforsk i Bygginnovationens styrelse och affärsråd, 2013-2015.

Det övergripande syftet med Bygginnovationen är att utveckla en stark och uthållig innovationsmiljö för svensk byggsektor. Det ska bland annat ske genom att brygga över gapet till högskole- och universitetssektorn och därigenom främja kommersialisering av kunskap, lösningar och forskningsresultat samt förbättra samverkan mellan byggsektorn, instituten och samarbetsorganisationen Sveriges bygguniversitet. Den första treårsperioden avslutades 2015-12-31. En ny treårsperiod inleddes 2016-01-01. Energiforsk deltar inte i den nya periodens arbete.

5 Referenser

- Håkansson, W. (2013) *Kraftverkstunnlars beständighet*. Examensarbete, Lunds tekniska högskola.
- Sundberg, & Amsköld, S. (2015) *Inspektionsmetoder för inre vattenvägar i vattenkraftverk*. Examensarbete, Kungliga tekniska högskolan.
- Oxfall, M (2016) *Lägesrapport för pågående försök i fältstation för långtidsexponering och mätning*. Energiforskrapport. Ej publicerad.
- Jacobson, K., Noränger, S., Lukes, D. (2016) *Provning och analys av nya och åldrade fogband – Fogband bestående av PVC och/eller Elastomer*, Energiforskrapport 2016:240
- Nordström, E. (2016). *Utvärdering efter 17 års fältexponering av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong*. BeFo-rapport nr 153.
- Björkenstam, E. (1999) *Inventering av betongreparationer utförda på svenska vattenkraftanläggningar*. Elforskrapport 99:28.
- Björkenstam, E. (2001) *Studie och uppföljning av reparationer utförda på utskov/skibord*. Energiforskrapport 01:29
- Bond, H. et al (2016) *Revidering av RIDAS tillämpningsvägledning för betongdammar*. Energiforsk rapport. Ej färdigställd.
- Hassanzadeh, M. & Westberg Wilde, M. (2016, ej färdigställd) *Inventering av förekommande spricktyper i vattenkraftkonstruktioner*. Energiforskrapport, Ej publicerad.
- Truc Vu, T.T. (2014) *Testing and optimization of Unicorn Fluid-Structure Interaction solver for simulating an industrial problem*. Energiforskrapport 14:15.

SUMMERING AV BETONGTEKNISKT PROGRAM VATTENKRAFT 2013-2016

Många vattenkraftkonstruktioner består av betong. Byggnadsvärdena för dessa är stora, uppskattningsvis mellan 30 och 50 miljarder kronor. Att byta ut konstruktionerna skulle kosta mångfalt detta belopp. Det är därför av största betydelse att utveckla och effektivisera förvaltningen av vattenkraftens betongkonstruktioner.

Energiforsk driver Betongtekniskt program Vattenkraft för att samla vattenkraftbranschens FoU-arbete inom betongområdet. Genom forsknings- och utvecklingsinsatser ökar möjligheten att genomföra åtgärder vid rätt tid, till lägsta möjliga kostnad och till rätt kvalitet. Här summeras resultaten från den programetapp som har pågått mellan 2013 och 2016.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk