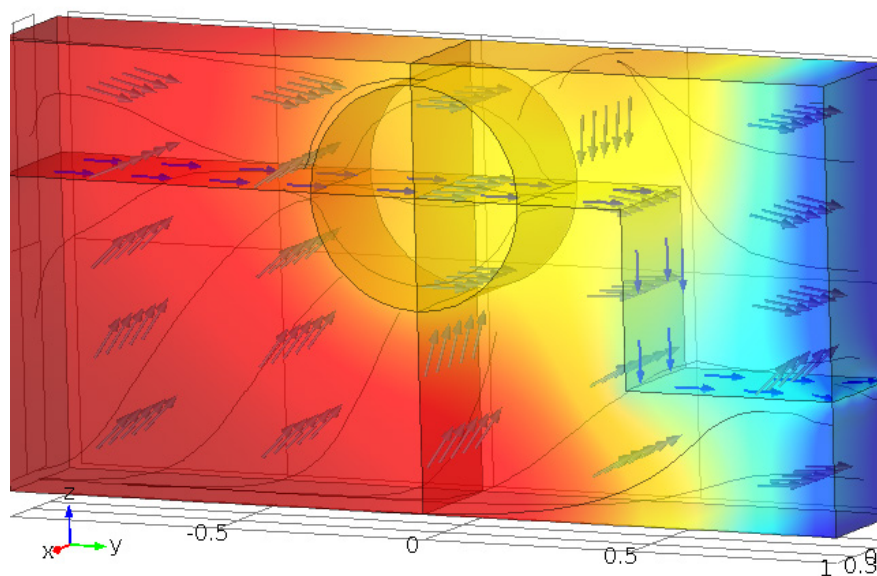


INJEKTERAD BETONGS EGENSKAPER

RAPPORT 2016:258



BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Injekterad betongs egenskaper

Konstruktionens bärförmåga och täthet

MAGNUS ÅHS
OSKAR LARSSON

ISBN 978-91-7673-258-8 | © 2016 ENERGIFORSK

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

Förord

Rapporten "Injekterad betongs egenskaper" är resultatet av en litteraturstudie som genomförts vid Lunds tekniska högskola på avdelningarna Konstruktionsteknik och Byggnadsmaterial. Fokus för litteraturstudien har varit materialegenskaper och matematiska modeller för bärförmåga och täthet för injekterad betong.

Projektet initierades av Manouchehr Hassanzadeh, SWECO ENERGUIDE, i samråd med styrgruppen för Energiforsks Betongprogram Vattenkraft som såg ett behov av att undersöka materialegenskaperna hos injekterad betong. Injektering är en vanlig reparationsmetod för spruckna och urlakade vattenkraftkonstruktioner. Det är viktigt att känna till materialegenskaper för den injekterade betongen för att kunna analysera och beräkna bärförmågan och tätheten efter en reparation. Dessutom innebär kännedom om materialegenskaperna en förutsättning för att genomföra beräkningar av livslängden på en injektering.

Referensgruppen för detta projekt har bestått av:

Manouchehr Hassanzadeh, Vattenfall numera SWECO ENERGUIDE

Peter Johansson, Avd Byggnadsmaterial

Mårten Janz, ÅF

Tomas Ekström, ÅF

Martin Hansson, Statkraft

Dessa nyckelpersoner har varit mycket engagerade och viktiga i projektets genomförande.

Projektet, som har genomförts av Magnus Åhs, avd. Byggnadsmaterial och Oskar Larsson, avd. Konstruktionsteknik, ingår i Energiforsk Betongtekniskt program Vattenkraft. Programmets intressenter är Fortum, Jämtkraft, Jönköping Energi, Karlstad Energi, Skellefteå Kraft, Sollefteåforsens AB, Statkraft, Sydkraft Hydropower och Vattenfall.

Sammanfattning

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 svåra både att bestämma och verifiera. Detta gör det svårt att utföra beräkningar av bärförmåga och täthet på den injekterade konstruktionen.

I denna rapport presenteras 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 rapporten 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.

Summary

Grouting of hydropower structures is a common repair method that aims to extend the life of the structure. However, it is difficult to verify if the desired result is achieved after grouting is applied to a hydro power structure, i.e. if cracks and cavities are filled and if the structure have sufficient capacity in terms of load capacity and density. The achieved material properties of the grouted concrete structure are difficult both to determine and to verify. This makes it difficult to perform calculations of the achieved load capacity and density of the grouted structure.

This report presents a preliminary study in which the main properties needed for modeling grouted concrete structures have been identified. Literature studies have been conducted to cover previous research and what kind of modeling that is possible to do. The study is divided in two parts, where the impact of grouting on structural resistance and water flow has been studied.

Today there is not enough knowledge to determine the properties of a grouted concrete dam. It is possible to model water flow and structural resistance with varying degrees of detail, it is however not possible to determine the level of detail that is suitable for use in a specific case. The current state-of-art shows that it is not possible to decide on the appropriate level of detail for modeling in an objective way for performing the calculations.

Furthermore, it is not possible to reach a decision on whether a concrete structure should be injected or if other measures are more appropriate. The long-term characteristics of grouting and its interaction with the original concrete are not possible to estimate at present, since more research is needed.

The report makes various suggestions for targeted research where the above identified knowledge gaps can be filled. There are methods of verification that has not been tested and evaluated for this type of structures, making it possible to conduct additional studies to identify properties of grouted concrete. Future studies should also include testing in a laboratory where various methods can be tested and compared with modeling with varying degrees of detail.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Syfte och mål	10
1.3	Projektets genomförande	10
1.4	Avgränsning	11
2	Typiska skador i dammar och konsekvenser	12
2.1	Allmänt	12
2.2	Exempel på spruckna dammar	13
3	Effekt av injektering på bärförmåga	19
3.1	Litteraturstudie	19
3.1.1	Injektering av betongkonstruktioner	19
3.1.2	Injektering av berg	23
3.1.3	Gränsyta betong-betong	23
3.2	Identifiering av egenskaper	24
3.3	Modellering	26
3.3.1	Nivå 1 – full interaktion	26
3.3.2	Nivå 2 – full interaktion, olika egenskaper	27
3.3.3	Nivå 3 – partiell interaktion	27
3.3.4	Nivå 4 – ingen interaktion	28
4	Effekt av injektering på täthet	29
4.1	Allmänt	29
4.2	Litteraturstudie	29
4.3	Flödesmodeller	30
4.3.1	Modell med hög detaljeringsgrad	30
4.3.2	Modell med en lägre detaljeringsgrad	32
4.3.3	Modell med låg detaljeringsgrad	34
5	Diskussion	36
6	Slutsatser	38
7	Förslag till fortsatt arbete	39
8	Referenser	41

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Det finns många dammar i Sverige som är gamla, de äldsta över hundra år. Många av dessa dammar har reparerats flera gånger, där reparationerna har föranletts av skador av olika slag. Skadorna kan ibland bestå av synliga sprickor eller att en provborrning har visat på urlakade områden. Vid upptäckten av sådana skador görs en utredning för att bedöma om skadorna är av sådan omfattning att de måste repareras. Injektering med ett cementbaserat material är ett vanligt sätt att reparera de skadade delarna.

När en dammkonstruktion injekteras får materialet nya mekaniska och fysikaliska egenskaper. Dessa nya egenskaper kan leda till att materialets förmåga att klara spänningar och andra påkänningar förändras. Materialets permeabilitet, flödestäthet, kan också förändras efter en utförd injektering. Det är dock svårt att kontrollera eller beräkna om den injekterade betongen uppfyller de krav som åtgärden/injekteringen skulle uppfylla. Beräkningsanalyser är därför viktiga för att i förväg kunna uppskatta effekten av olika åtgärder. Ökade modellerings- och beräkningsmöjligheter kan även förbättra designen av själva injekteringsprocessen, eftersom det ger möjligheter till att bestämma tillåtet injekteringstryck, en faktor som kan ge stor inverkan på den färdiga konstruktionens egenskaper. Vid ett för lågt injekteringstryck finns det risk för att inte alla sprickor och hålrum fylls ut, medan ett för högt tryck kan leda till ytterligare skador genom ökat tryck i varje spricka.

Vanligtvis kontrolleras resultatet av injekteringen genom att mäta vattenförlusten före och efter en injektering. Ett annat sätt är att ta borrkärnor från det injekterade området för att kontrollera utförandet, och ett tredje sätt är borrhålsfilmning [1]. Dessa kontroller säger inte något om konstruktionens förändrade egenskaper, utan är en indikation på om injekteringsmaterialet har trängt in i sprickor och urlakade områden så att en god utfyllnad har uppnåtts. Resultatet från sådana kontroller ger inget underlag för att utföra en beräkning av hur bärförmågan och tätheten har förändrats. De säger heller inget om själva utfyllnadens karaktär, där det kan finnas risk för filtreringseffekter dvs. att det längst in i sprickorna finns mest vatten medan allt större material har stoppats upp. Dagens verifieringsmetoder ger heller inte någon möjlighet till att göra en prognos om hur bärförmågan och tätheten kommer att förändras i framtiden. Därmed går det inte att förutsäga om hur mycket injekteringen kan tänkas förlänga livslängden.

Om en sprucken urlakad konstruktions livslängd ska kunna bedömas efter en injektering bör välfungerande modeller tas fram, modeller som kräver god kännedom om det injekterade materialets egenskaper. Injekteringens påverkan på materialets egenskaper måste inkluderas i beräkningar av bärförmåga såväl som täthet för att kunna bedöma livslängden. Om både de mekaniska och de fysikaliska egenskaperna inte är kända, är det svårt och osäkert att analysera en injekterad konstruktions bärförmåga och täthet med en beräkningsmodell. Eftersom injektering är en viktig reparationsmetod behövs insatser inom detta område.

Ur ett modelleringsperspektiv kan problemet hanteras på olika sätt med olika nivåer av komplexitet. Det enklaste sättet är att anta att materialet efter injekteringen har samma egenskaper som den ursprungliga betongen. Situationen är dock normalt sett mer komplex och mer detaljerad modellering av injekteringen kan behöva göras. Att betrakta det injekterade materialet som homogent är det enklaste betraktelsesättet. Det

ger också den minst tidskrävande analysen av konstruktionens stabilitet, bärförmåga, täthet och beständighet. Det finns säkert förhållanden som tillåter ett sådant antagande, avgörande är injekteringens kvalitet samt dess riktning i förhållande till spännings- och flödesriktningar.

1.2 SYFTE OCH MÅL

Syftet med projektet är att ta fram modeller och riktlinjer för analys av injekterade betongkonstruktioner. Projektet skall leda till materialmodeller som möjliggör noggrann och ekonomisk analys av injekterade konstruktioner. Denna rapport utgör ett första steg i projektet, där befintliga modeller, metoder och kunskapsluckor ska kartläggas

1.3 PROJEKTETS GENOMFÖRANDE

Projektet är uppdelat i tre etapper:

1. Förstudie som inkluderar främst en litteraturstudie av tillgängliga modeller men även en undersökning av möjliga modelleringssätt.
2. Verifiering av modellering och nödvändiga materialegenskaper med hjälp av experiment och avancerad modellering
3. Tillämpning på injekterade betongkonstruktioner

Denna rapport behandlar etapp 1 där fokus främst har varit en litteraturstudie för att kartlägga tillgängliga modeller för analys av bärförmåga och täthet hos injekterade betongkonstruktioner. Det som prioriterats är injekterade vattenkraftkonstruktioner och material som används för vattenkraftkonstruktioner, men kunskap och erfarenhet från andra områden har även de beaktats. I litteraturstudien har mekaniska och fysikaliska data som krävs för de kartlagda modellerna undersökts och redovisats. Fokus har varit på två olika delar, dels konstruktionens bärförmåga och dels konstruktionens täthet separerade i två olika avsnitt

Etappen har genomförts enligt följande

- Litteraturstudie. Vad har gjorts tidigare angående injekteringar, både när det gäller betong och när det gäller berg. Kartläggning av vilka typer av injekteringar som används idag
- Vilken typ av modellering går att göra? Det finns olika typer av modelleringsnivåer som kan användas, t.ex.
 - × Se allt som ett isotropt material. Enklaste lösningen som dock kan medföra vissa problem och fel.
 - × Beakta interaktionen mellan injektering och ursprungsmaterialet genom att modellera dem som separata delar med olika egenskaper. Här kommer bl.a. studier av injekteringar i bergmaterial att användas.
 - × Inte beakta någon interaktion alls, dvs. att inte tillgodoräkna sig injekteringen vid beräkning av bärförmåga.
 - × Det kan även finnas andra sätt att genomföra modelleringen, vilket kommer att studeras
- Vilken typ av beräkningsmetod förekommer i litteraturen idag. Är det rimligt att använda analytiska metoder eller krävs det en numerisk modellering?
- Beroende på resultat av studien kan det vara väsentligt att studera hur den långsiktiga interaktionen mellan injekteringen och betongen håller. Visar det sig att

det t.ex. går att modellera med ett isotropt material är det viktigt för dammens säkerhet att kopplingen mellan materialen inte försämras. Är främst aktuellt i etapp 2 och 3.

- Identifiera materialegenskaper som måste mätas för att få relevant indata
- Lämpliga/önskvärda/möjliga verifieringsmetoder för en modell

1.4 AVGRÄNSNING

Denna rapport behandlar endast materialegenskaper och modellering av bärförmåga och flöde hos injekterade betongdammar. Inga analyser eller studier har gjorts av själva injekteringsprocessen eller av egenskaper hos betongdammar som inte är injekterade. Ingen analys av åtgärder för att minska den belastning som ger upphov till sprickbildning eller urlakning har heller gjorts.

2 Typiska skador i dammar och konsekvenser

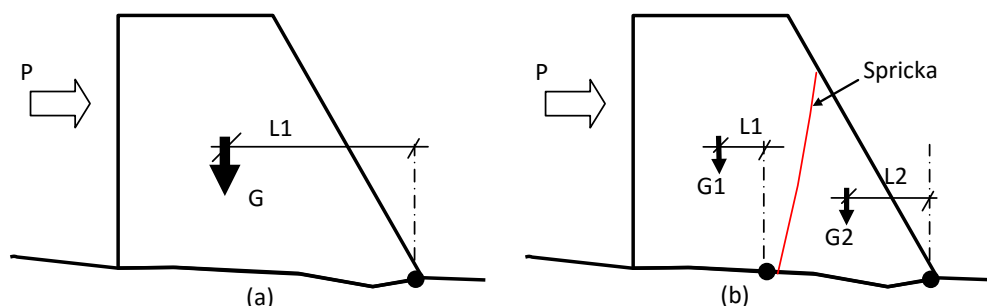
2.1 ALLMÄNT

Sprickor i betongdammar medför flera oönskade problem som får konsekvenser för både dammens stabilitet och täthet.

Problemställningar avseende stabilitet hos spruckna betongdammar/monoliter är exempelvis:

- En spricka kan medverka till att monoliten inte längre har monolitiska egenskaper. Beroende på hur sprickan "klyver" betongmonoliten och hur vid den är uppför monoliten sig inte längre som en monolit utan som två eller flera mindre monoliter. Det innebär att stabilitet mot stjälpning och glidning kan påverkas negativt, framförallt stjälpning påverkas eftersom hävarmen runt respektive stjälpaxel minskar, se Figur 2-1.
- Spänningen i sprickspetsar medför att sprickan växer, om lasten ligger kvar eller återkommer, t.ex. på grund av temperaturvariationer.
- När sprickor växer i längd och vidd överförs krafter till intilliggande områden varvid nya sprickor kan uppstå.

Det är svårt att avgöra hur mycket i ovanstående punkter som förändras eller förbättras genom injektering och vilka antaganden som kan göras då injekteringen är genomförd.



Figur 2-1 Principfigurer för stabilitet för (a) en osprucken monolit och (b) en sprucken monolit.

Problemställningar som rör täthet innefattar både uppsprucken och urlakad betong. Dessa skador påverkar tätheten hos konstruktionen och de fysikaliska egenskaperna förändras i skadeområdet:

- Vattenflöde i ett genom injektering tätat sprickområdet kan medföra att området närmast den injekterade sprickan urlakas. Detta kan bero på att fuktegenskaperna hos injekteringsbruket är sämre eller bättre än omgivande material, varvid cementpastan försvinner i större eller mindre mängd och permeabiliteten ökar. De mekaniska egenskaperna försämras också när området blir mer poröst. Urlakningen kan vara mer eller mindre omfattande, så att cementpasta helt saknas och ballasten ligger lös i konstruktionen eller att en del av pastan är kvar men väldigt porös.

- Sprickor kan medföra ökad fukthalt i betongen och är sprickorna genomgående kan vatten flöda genom dessa, varvid risken för frostsador och andra skademekanismer ökar.

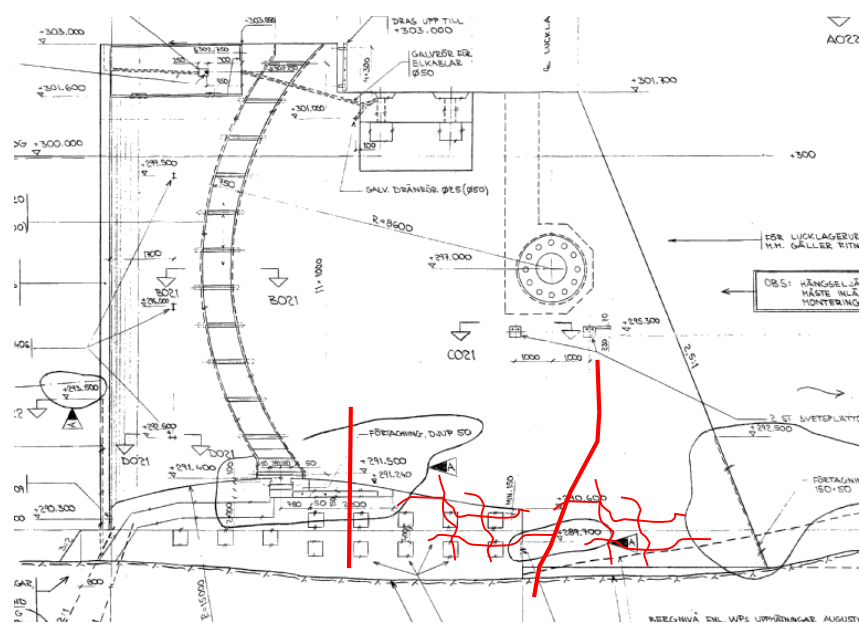
För att förbättra egenskaperna hos en sprucken betongdamm används därför injektering, vilket medför att dammen får nya/förändrade egenskaper när det gäller både stabilitet och täthet. Injektering kan göras med olika typer av material och metoder, där de vanligaste är cementbaserade material eller plastmaterial typ epoxi. Det finns god tillgång till olika typer av vägledning när det gäller hur en injektering bör genomföras, se t.ex. [1-5], medan det finns betydligt mindre forskning och studier på hur kapaciteten hos konstruktionen ser ut efter injekteringen, både när det gäller mekaniska egenskaper och täthet.

Eftersom problemställningen för spruckna betongdammar ser olika ut när det gäller typ av analys och påverkan har studien delats upp i två delar. Den första delen beaktar främst problematiken med påverkad bärförmåga på grund av sprickbildning, där tätheten är av sekundär betydelse. Denna typ av sprickbildning är främst enligt Figur 2-1. Den andra delen behandlar modeller för flödestäthet i betong, där även mycket urlakade dammkonstruktioner ingår. Här är syftet med injekteringen främst att hindra ett vattenflöde, men även bärförmågan kan förbättras. Urlakningen kan i vissa fall vara så omfattande att en förhöjd bärförmåga garanterat erhålls vid en injektering.

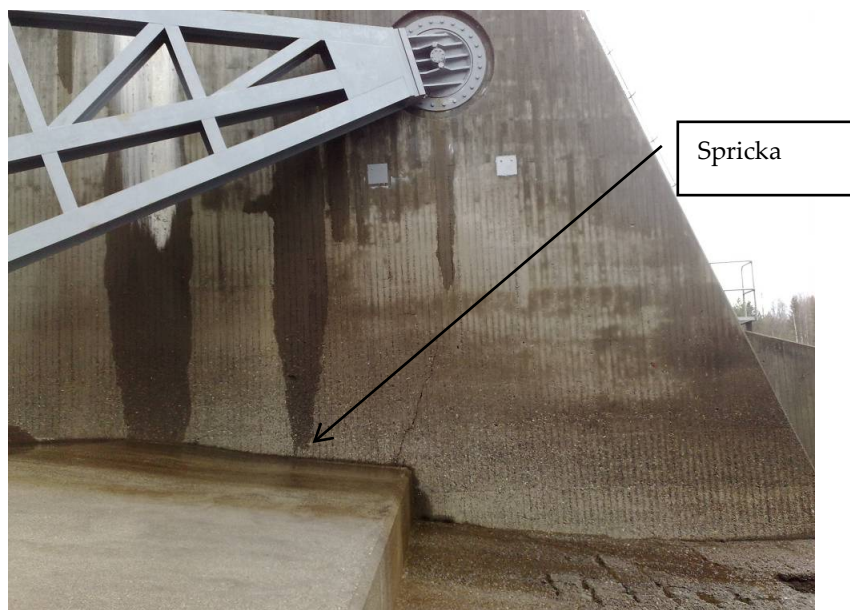
Det är av väsentlig betydelse att vid problem med sprickbildning inte enbart injektera själva sprickorna utan även att förhindra uppkomsten av nya sprickor [6]. Att genomföra en injektering utan att ta hänsyn till de bakomliggande orsakerna till skadorna är ofta verkningslös eftersom skadorna med största sannolikhet kommer att återkomma. I denna rapport görs inga förslag på åtgärder för att minska fortsatt påverkan och nedbrytning, det är enbart betongens egenskaper efter injektering som har studerats.

2.2 EXEMPEL PÅ SPRUCKNA DAMMAR

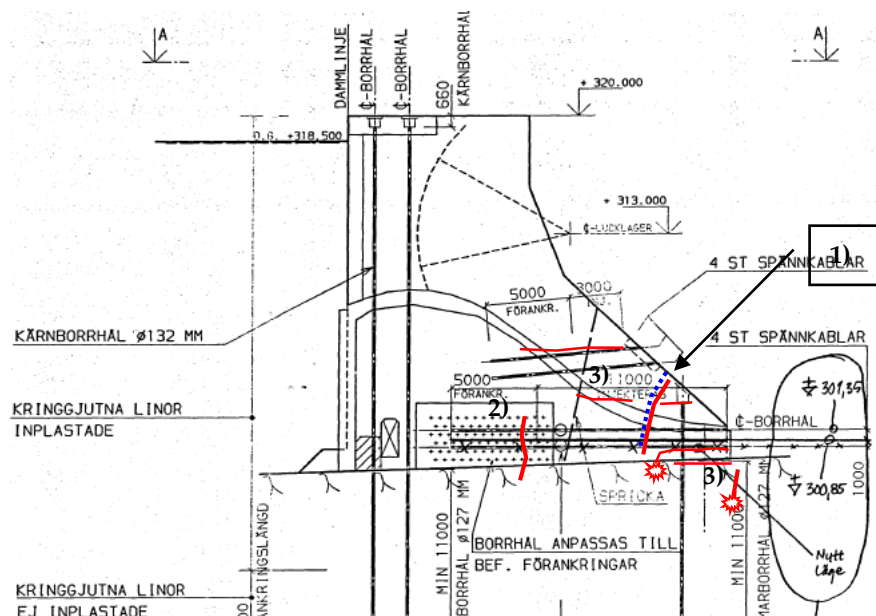
I följande avsnitt visas en rad exempel på sprickor i dammkonstruktioner. Bilderna visar var sprickor kan uppkomma och hur dessa kan vara orienterade i förhållande till geometri, belastning och läge. För vissa av sprickorna har också en möjlig skademekanism kortfattat presenterats. Figur 2-10 visar en borrhäla som har borrats ur en vattenkraftkonstruktion som varit kraftigt urlakad i vissa delar. Bilderna är hämtade ur ett flertal projekt som Tomas Ekström, ÅF, har utfört åt vattenkraftsindustrin.



Figur 2-2 Utskovspelare i en damm i Norrland, höger sida: Observerade sprickor 2011-10-21 inritade på ritning.



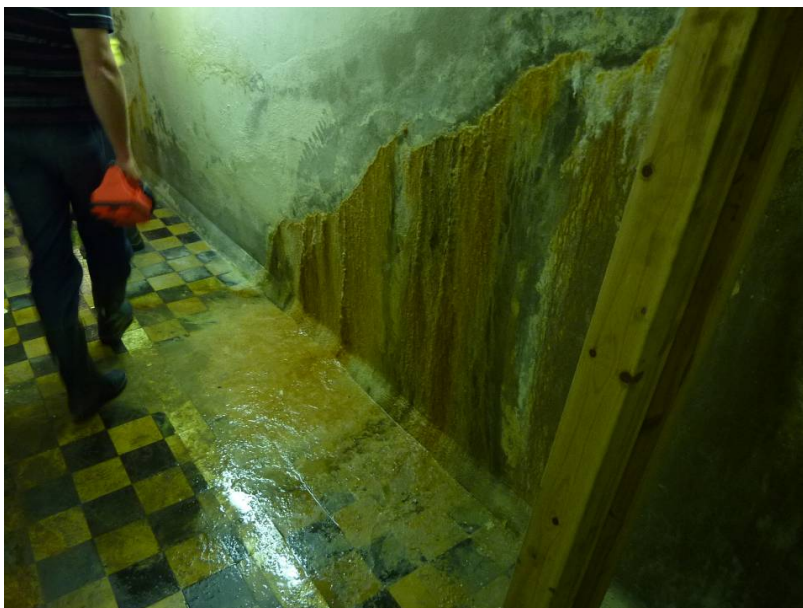
Figur 2-3 Foto från samma pelare som visas i Figur 2-2.



Figur 2-4 Mittpelare i utskov. Monterade spännstag 1996 samt observerade sprickor på vänster (blåa, streckade linjer) och höger (röda, heldragna linjer) sida av pelaren vid den aktuella inspektionen 2012.



Figur 2-5 Samma damm som i Figur 2-4.



Figur 2-6 Urlakad spricka i en inspektionsgång i en kraftstation.



Figur 2-7 Sprickor i ett anfang till en valvdamm.



Figur 2-8 Sprickor i utskovspelare.



Figur 2-9 Utskovspelare skadad av AKR, frost, och urlakning.



Figur 2-10 Borrkärnor från en urlakad betongdamm

3 Effekt av injektering på bärförmåga

Det största problemet för en betongdamm med en injekterad spricka är att bedöma den globala hållfastheten, vilket till största delen beror på osäkerheter för vidhäftningen mellan den ursprungliga betongen och injekteringen [7]. I litteraturstudien har därför fokus legat dels på hur en damm med injekterade sprickor kan modelleras och dels på hur stark vidhäftning det är mellan injekteringen och betongen och hur detta kan uppskattas.

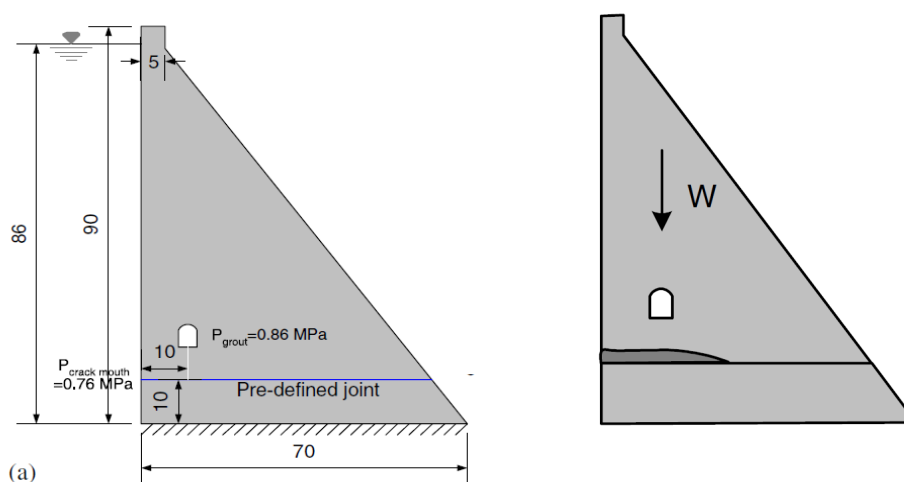
Även trycket från själva injekteringen och av ett vattenflöde i sprickorna påverkar bärförmågan. Inget fokus i litteraturstudien har lagts på denna typ av effekter, utan endast egenskaper efter själva injekteringen har kartlagts. Detta tryck bör dock läggas till som initialt vid beräkning av bärförmåga efter själva injekteringen är genomförd, det är därför väsentligt att ta hänsyn till de effekter av vätskeflöde som presenteras i kapitel 4 i denna rapport.

3.1 LITTERATURSTUDIE

3.1.1 Injektering av betongkonstruktioner

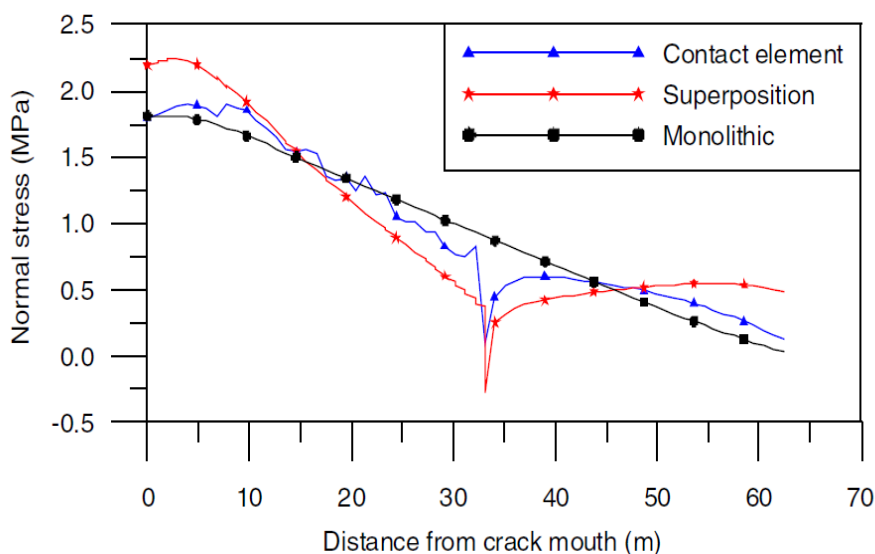
Endast ett fåtal studier har hittats där bärförmågan hos en betongkonstruktion efter injektering har studerats. Det finns betydligt fler studier på själva injekteringsprocessen och hur den bör genomföras för att önskat produktionsresultat ska uppnås, dvs. att sprickor och håligheter fylls med injekteringsmaterial. De flesta undersökningar och studier undersöker dock inte om håligheterna faktiskt är fyllda och om vidhäftningen mellan nytt och gammalt material är god. I detta avsnitt fokuseras på hur bärförmågan kan påverkas av injektering och hur det är möjligt att modellera effekten av injekterade sprickor.

I en studie av Javanmardi and Léger [7] jämfördes olika sätt att modellera en injektering av en betongdamm. Analysen innehöll dels modellering av själva injekteringsprocessen och dels modellering av den slutgiltiga spänningsnivån efter injektering med olika metoder. En finita element-modell skapades över dammen som finns i Figur 3-1. I modellen definierades en skarv där själva injekteringen virtuellt genomfördes och där spänningen analyserades. Tre olika metoder användes med olika antaganden. I den första metoden antogs dammen ha återfått sin ursprungliga funktion, monolitiskt beteende. I den andra metoden beräknades spänningen i det avsedda snittet då injekteringen avslutats vilken adderades till den monolitiska modellen genom superponering och i den tredje modellerades själva injekteringen med kontaktelement. Utgångspunkten för modellering av hårdnad injektering med kontaktelement var det tryck som uppstår vid själva injekteringen. Injekteringsstrycket adderades som en fördefinierad tryckkraft i kontaktelementen vilket antogs vara likt de förhållanden som uppkommer då injekteringen hårdnat.



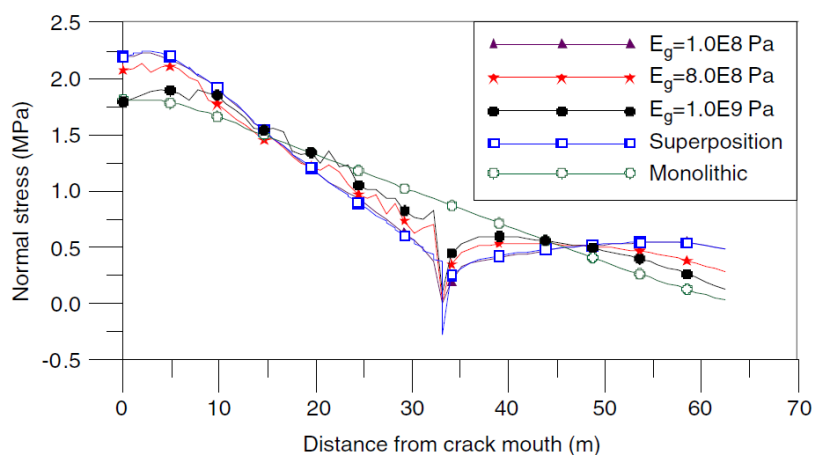
Figur 3-1 Geometri för den damm som använts vid modellering, till höger en bild av den injekterade sprickan [7]

I figur 3-2 visas spänningen längs den fördefinierade skarven från de tre olika modelleringssätten. Då en helt monolitisk konstruktion antas blir spänningsförändringen linjär längs skarven. I de båda andra metoderna uppstår en extra nedgång i spänning i mitten av skarven, de ger även en något högre maxspänning än vad modellen som antar en hel monolit ger. Förändringen i mitten beror på att sprickan slutar i det området, det blir därmed en viss spänningskoncentration i modellerna i övergången. Skillnaden i spänningsnivå mellan monoliten och modellen med kontaktelement är liten, vilket antyder att det för detta fall inte är någon större skillnad mellan att använda kontaktelement och en monolit. Superposition av spänningen vid injekteringen med spänningen från monolitmodellen ger en högre spänningsnivå, vilket var väntat. I det fallet antas inte injekteringen ge någon dämpande effekt på spänningen som uppkommer vid själva injekteringen. En sådan situation kan antas uppkomma då injekteringen inte fått tillräcklig vidhäftning mot den ursprungliga betongen eller innan materialet har härdat.



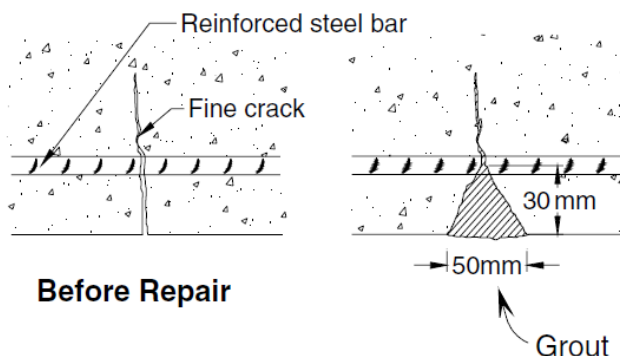
Figur 3-2 Spänningsnivå längs den fördefinierade skarven i figur 3-1 [7]

Även effekter av olika styvhet hos injekteringsmaterialet har undersökts av Javanmardi and Léger [7]. De visade att ett styvare material (10 GPa eller högre) vid användning av kontaktelement gör att spänningen närmar sig modellen då dammen antas vara en oskadad monolit, se Figur 3-3. Om ett vekare material (under 10 GPa) används kommer spänningen att gå mot situationen då superposition används och injekteringen inte ger något bidrag till dammens bärighet. Detta visar tydligt att egenskaperna hos injekteringsmaterialet kan vara avgörande för hur en injekterad betongdamm kan modelleras.



Figur 3-3 Effekt av styvhet hos injekteringsbruket på spänningen längs skarven

Thanoon, Jaafar [8] testade laborativt olika metoder för att laga sprickor i spruckna betongkonstruktioner. De fokuserade på en kontrollerad spricka i fritt upplagda betongplattor, som lagades med fem olika tekniker. Totalt tillverkades sex plattor, en referens och en platta för varje reparationsteknik. En av dessa var cementinjektering, där den spruckna betongplattan först rengjordes och sedan injekterades, Figur 3-4 visar hur lagningen ser ut. Endast en spricka uppstod och injekterades, eftersom syftet med studien var att undersöka effekter under kontrollerade former. Resultaten visade att både spricklasten och brottlasten var högre för plattan med injekterad spricka än för ett referensprov utan injektering, ungefär 15-20 procent högre. Detta indikerar att om god vidhäftning uppnås kommer en lagad betongkonstruktion att uppnå minst lika stor kapacitet som den ursprungliga. I detta fall rengjordes de spruckna ytorna och armeringen med stålborste, vattenblåstring och tryckluft innan injekteringen applicerades. En liknande procedur är inte möjlig vid injektering av betongdammar, vilket gör att det kan vara svårt att uppnå samma goda resultat. Vidhäftningen är en viktig parameter för hur stor kapacitet som en lagad betongkonstruktion får. Finns det ett vattenflöde genom sprickan är det möjligt att ytorna rengörs, vidare studier i ämnet krävs dock innan det är möjligt att göra några bedömningar om hur vidhäftningen påverkas.



Figur 3-4 Sprickan före och efter injektering, [8]

I samma studie av Thanoon, Jaafar [8] testades även hur en injektering med epoxi påverkar lastkapaciteten. Ett försök med epoxi genomfördes på liknande sätt som för cementinjekteringen och gav ett liknande resultat för spricklasten. Kapaciteten vid brott blev dock något lägre för epoxi-injekteringen än för referensprovet.

Effekter av injektering med cementbaserade material och epoxi har även undersökts av Irhouma [9]. I studien undersöktes hur hållfastheten hos gränssytan mellan injektering och den ursprungliga betongen påverkas av olika temperaturförhållanden. Två olika typer av epoxi och ett injekteringsmaterial med finkornig cement användes vid försöken, där provkroppar delades med hjälp av en kil och sedan lagades med något av materialen. Hälften av provkropparna injekterades då ytorna var våta för att efterlikna förhållanden vid damminjektering. Testerna genomfördes vid antingen 20 °C eller -50 °C, där de provkroppar som testades i kalla förhållanden förvarades i en frys för att sedan tas ut och testas omedelbart. För de provkroppar som injekterats med cement minskade spricklasten något vid -50 °C, dock upptäcktes ingen större skillnad mellan vått och torrt vid själva injekteringen. Inga referensprover testades vilket gör att det är svårt att veta om injekteringen i sig påverkar hållfastheten. Genomgående går det att se i resultaten från Irhouma [9] att injekteringen med epoxi gav högre spricklast än injektering med cementinjektering. Detta motsäger till viss del de resultat som presenterades av Thanoon, Jaafar [8], där cementinjekteringen gav en starkare konstruktion. De har dock använt olika typer av epoxi, vilket gör att jämförelser är svåra.

Bruce and De Porcellinie [10] undersökte effekter av epoxi-injektering på stabiliteten hos några olika betongdammar i USA och Spanien. De presenterade resultat från 10 olika dammar där en speciell typ av epoxi har använts för att injektera sprickor. Denna epoxi har en låg styvhet vilket gör att den kan ses som en dilatationsfog då den ursprungliga funktionen inte uppnås, men enligt Bruce and De Porcellinie [10] klarar den av att föra över laster mellan de olika betongdelarna på ett effektivt sätt. De dammar som undersökts visar inga tecken på att fler sprickor ska ha uppkommit efter injekteringen, vilket indikerar att metoden med epoxi med låg styvhet fungerar. Det kan vara en lämplig injektering i situationer där konstruktionen inte riskerar att kollapsa, men där själva sprickan medför andra typer av problem t.ex. läckage eller där det inte är nödvändigt att den ursprungliga funktionen återfås.

3.1.2 Injektering av berg

En injekteringssituation som till viss del liknar injekterade betongdammar är injektering av berg. I olika studier som har gjorts har störst fokus varit dels på själva injekteringsprocessen [9] och dels på hur injekteringen i sig klarar belastning, t.ex. vid ingjutning av ankare [10, 11]. Moosavi and Bawden [10] visade att ett tjockare injekteringsmaterial som är mer trögflytande ger en högre skjuvhållfasthet och därmed bättre vidhäftning än ett lösare material. Det är dock viktigt att inte injekteringsmaterialet bromsas upp, det gäller därför att hitta en balans mellan konsistens och hållfasthet.

Park, Qiu [11] testade utdragshållfastheten hos ett injekteringsmaterial och dess förankring till berg och stålankare. Dels undersöktes injektering som utfördes med tryck och dels injektering där endast gravitationen utnyttjades. Resultaten visade att det mest sannolika brottet sker i gränsytan mellan berg och injektering. Injektering med tryck gav betydligt bättre vidhäftning mellan berg och injekteringsmaterialet, vilket antyder att det går att påverka vidhäftningen genom utförandet. Studien visar också betydelsen av vidhäftningen och att denna egenskap är viktig för hur ett injekterat område klarar olika typer av belastning.

3.1.3 Gränsyta betong-betong

Det har genomförts ett stort antal studier angående egenskaper hos betong med pågjutningar och undersökningar av egenskaper hos gränsytan mellan gammal och ny betong [12-16]. Den mesta forskningen inom detta område behandlar pågjutningar gjorda i labbmiljö under kontrollerade förhållanden vilket i sig medverkar till en förbättring av egenskaperna. Den viktigaste egenskapen är vidhäftningen mellan den ursprungliga betongen och pågjutningen, där försöken ofta innehåller åtgärder för att förbättra vidhäftningen, t.ex. genom användning av primer.

Vid försök testas ofta dragkapaciteten i gränsytan, men även skjuvkapaciteten är viktig för att vidhäftningen ska kunna anses vara god [14]. Försök har visat att skjuvkapaciteten är högre än dragkapaciteten då ytan är väl rengjord [14]. Andra försök av exempelvis Bass, Carrasquillo [13] visar att rengöring dock inte alltid ger någon större effekt på vidhäftningen, det som istället har störst påverkan är mängden armering som håller ihop de två olika betongdelarna. Eftersom det i en sprucken betongdamm är svårt att verifiera hur rengjord en spricka eller hållighet är, är det svårt att dra några slutsatser för denna tillämpning baserat på de tester som gjorts i kontrollerad labbmiljö. Det är även svårt att detektera mängden armering som spänner över en spricka.

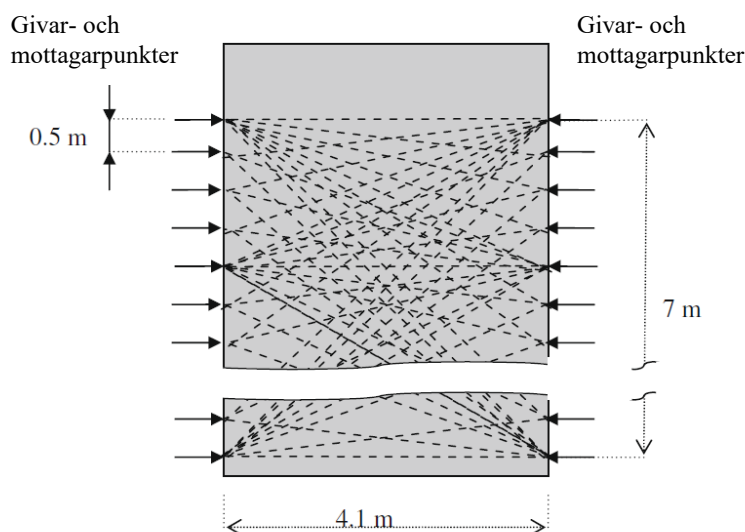
Tassios and Vintzileou [15] genomförde en studie över hur ytans egenskaper påverkar vidhäftningen, specifikt skjuvkapaciteten vid cyklisk belastning. Resultaten visade att friktionen mellan två relativt släta ytor inte påverkades nämnvärt av den cykliska belastningen. En mer ojämn gränsyta får till en början en större skjuvkapacitet och högre friktion än för en slät gränsyta. Efter några cykler minskade kapaciteten kraftigt och den blev lägre än för den släta ytan, vilket beror på att den cykliska belastningen gör att ytan skavs sönder. Detta kan indikera att en injekterad spricka i en damm där det med största sannolikhet finns grova gränsytor mellan injektering och ursprunglig betong kan få en minskad vidhäftning med tiden. En damm utsätts dessutom för stora cykliska belastningar pga. temperaturvariationer och ändrat vattentryck vilket ytterligare bidrar till att minska vidhäftningen.

Mikrosprickor i gränsytan kan påverka vidhäftningen negativt [17]. Eftersom mikrosprickor kan vara svåra att upptäcka gör detta att det finns en stor osäkerhet i hur stor vidhäftning som har erhållits. En ytterligare faktor som kan påverka vidhäftningen i gränsytan mellan gammalt och nytt cementbaserat material är krympningen [18]. I de flesta fall där vidhäftningen försämrats under hårdningen och bom uppstått beror det på krympningen hos det nya materialet. I en fortsatt del av det nuvarande projektet är det därför väsentligt att undersöka effekter av krympning och mikrosprickor eftersom vidhäftningen har stor betydelse för hur mycket kapacitet som går att tillgodoräkna i en injekterad konstruktion.

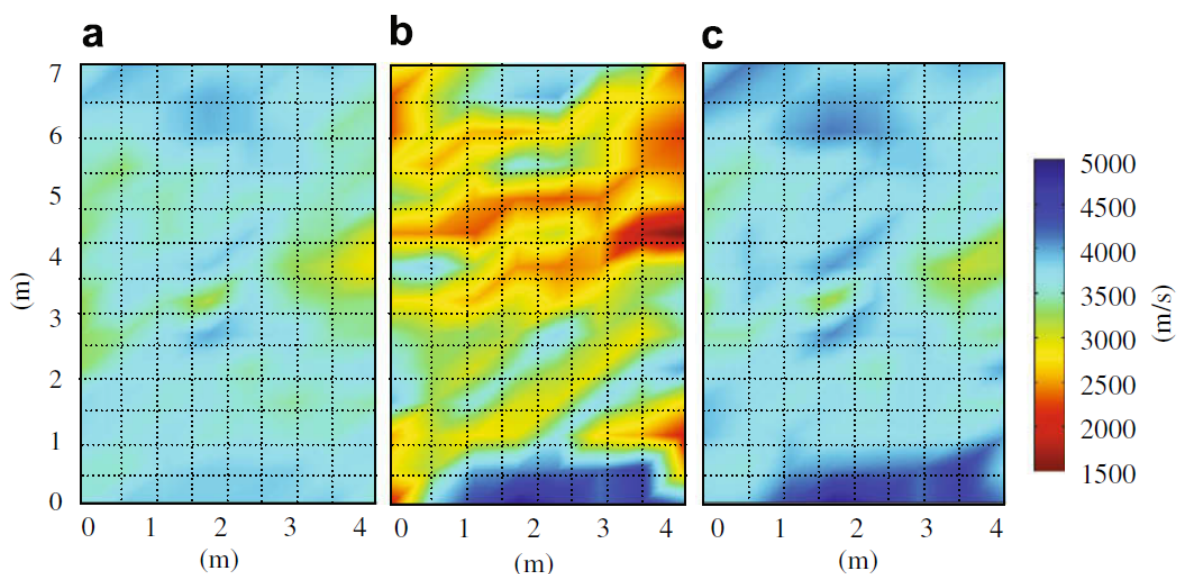
3.2 IDENTIFIERING AV EGENSKAPER

Den mesta tidigare forskning som utförts angående lagningar av betongkonstruktioner behandlar situationer där det är möjligt med en kontrollerad rengöring. Ytan kan tvättas av och en s.k. primer kan appliceras för att vidhäftningen ska förbättras. I en sprucken betongdamm är samma kontroll inte möjlig, eftersom det inte går att komma åt ytorna för inspektion inne i konstruktionen. Det krävs därmed andra typer av inspektionsmetoder för att ta reda på de egenskaper som behövs för själva modelleringen av bärförmågan och för att säkerställa vilken modelleringsnivå som krävs.

De metoder som finns idag är antingen förstörande provning, t.ex. genom att ta ut borrhärdar, eller oförstörande provning. Att plocka ut borrhärdar är effektivt, dock medför det vissa svårigheter. Dels innebär det att ett ingrepp behöver göras i själva konstruktionen som i sin tur behöver lagas. Det är dessutom svårt att få representativa prover för stora konstruktioner såsom dammar, eftersom det inte är lämpligt att göra alltför många tester och att konstruktionen kan vara inhomogen [17]. Icke-förstörande provning har fördelen att den inte påverkar konstruktionen i sig. Det finns dock idag en begränsad mängd tester som kan genomföras, där den främsta nackdelen är att själva proceduren inte är anpassad för betongdammar där den ena sidan av konstruktionen inte går att komma åt. Ett exempel är elastiska vågor (pulsvågor) som använts för att validera hur väl en sprucken betongvägg fyllts med injektering [19]. I denna metod placeras sändare och givare på var sin sida om en betongkonstruktion enligt Figur 3-5. P-vågshastigheten i materialet mäts med givarna och kan relateras till om injekteringen har lyckats eller ej. Vid sprickbildning blir hastigheten lägre eftersom vågorna bryts mer än vad det gör i den ospruckna eller lagade betongen. En ytterligare nackdel med denna metod förutom att det kan vara svårt att placera givarna är att injekteringen måste hårdas innan kvaliteten på injekteringen kan undersökas. Om mätningen görs för tidigt kan det ge resultat som antyder att injekteringen inte blivit fullständig även om den varit lyckad, se Figur 3-6. I figuren kan ses att bilden vid full hydrataion är nästan identisk med bilden före sprickbildning, medan det två veckor efter injektering fortfarande är mycket spridning och tecken på försvagningar.



Figur 3-5 Givare och mottagare för P-vågor över ett betongtvärsnitt [19]



Figur 3-6 Tomogram i ett betongtvärsnitt: a) före sprickbildning, b) 2 veckor efter injektering, c) efter full hydrataion Shiotani, Momoki [21]

Denna studie är ett exempel på att det kan vara värt att undersöka oförstörande provningsmetoder för att verifiera hur injekteringen gått och om betongdammen har fått de önskade materialegenskaperna. Förutom de metoder som presenteras här finns ytterligare metoder som kan vara lämpliga, t.ex. vattenförlustmätning [1] och markpenetrerande radar [20].

De studier som refereras i rapporten pekar på att det främst är E-modulen hos injekteringsmaterialet och vidhäftningen mellan injekteringen och den ursprungliga konstruktionen som är de viktigaste egenskaperna. Vid fortsatta studier bör ett stort fokus läggas på att kartlägga och utveckla metoder för att kunna verifiera dessa egenskaper.

3.3 MODELLERING

Modellering av bärförmåga görs lämpligen med finita element metoden. Speciellt injekteringen kan vara svår att ta hänsyn till vid användning av andra beräkningsmetoder, eftersom själva beräkningen blir mycket komplex om försvagningar ska tas hänsyn till. När det gäller användandet av modellering för att beräkna bärförmågan hos en injekterad betongdamm finns det olika nivåer för hanteringen. Nivåerna är baserade på den information som funnits i litteraturstudien av tidigare forskning inom området samt vad som är möjligt i dagens beräkningsprogram.

- Nivå 1 – full interaktion mellan ursprunglig betong och injektering, där alla hålrum och sprickor är ifyllda. Det injekterade materialet har samma egenskaper när det gäller hållfasthet och styvhet som ursprungsmaterialet.
- Nivå 2 – full interaktion mellan ursprunglig betong och injektering, där alla hålrum och sprickor är ifyllda. Det injekterade materialet har **inte** samma egenskaper när det gäller hållfasthet och styvhet som ursprungsmaterialet.
- Nivå 3 – partiell interaktion mellan ursprunglig betong och injektering, där det kan finnas små hålrum och otillräcklig vidhäftning.
- Nivå 4 – ingen interaktion mellan ursprunglig betong och injektering på grund av dålig vidhäftning och ifyllnadsgrad

Det kan utöver dessa nivåer även finnas fler situationer som inte täcks in här, t.ex. en situation då injekteringen helt misslyckats. Sådana situationer bör modelleras liknande en oinjekterad konstruktion där sprickan bör inkluderas i modellen, se figur 2-1. I efterföljande avsnitt ges exempel och rekommendationer för hur de olika nivåerna kan modelleras och vilka materialegenskaper som är väsentliga att verifiera genom t.ex. provning.

3.3.1 Nivå 1 – full interaktion

I nivå 1 antas injekteringen ha samma styvhet och hållfasthet som den ursprungliga betongen. Injekteringen har här varit lyckad och alla hålrum/sprickor är fullständigt ifyllda. Vid den här typen av åtgärder kan dammen anses ha återfått sin ursprungliga funktion, dvs. den kan åter ses som en monolit. I modelleringen bör därför ingen speciell hänsyn tas till de injekterade områdena, utan det är möjligt att använda ett helt isotropt material för hela dammkonstruktionen. För denna nivå kan det även vara möjligt att utgå från den ursprungliga dimensioneringen.

Denna nivå är i många fall orealistisk, vilket visats och diskuterats tidigare. I de flesta injekteringssituationer är det mycket svårt att avgöra om det kommer att bli full interaktion mellan materialen och om de verkligen har samma egenskaper. Om materialen har samma egenskaper och full vidhäftning och ifyllnad har uppnåtts är detta den enklaste modelleringsmetoden att använda. Den är även lämplig vid situationer där en överslagsberäkning av dammens stabilitet efterfrågas, situationer då den exakta kapaciteten inte är det väsentliga. I denna nivå är det också möjligt att använda superpositionering av effekter av själva injekteringen enligt [7], där sådana effekter läggs till resultatet från den monolitiska modellen.

För att kunna använda denna grundläggande form av modellering krävs det god kännedom om materialegenskaper och vidhäftning. Verifiering genom provning krävs för att kunna motivera användandet, se avsnitt 3.2 för exempel på verifieringsmetoder.

3.3.2 Nivå 2 – full interaktion, olika egenskaper

I nivå 2 antas injekteringen ha något skilda egenskaper från betongen. Styvhet och/eller hållfasthet är inte samma för de båda materialen vilket gör att det kan finnas en svag zon i dammen som bör tas hänsyn till. Vidhäftningen antas dock vara god vilket gör att det inte bildas några sprickor i gränsytan mellan injekteringen och den ursprungliga betongen. Detta fall är inte helt realistiskt eftersom ett försvagat material bör innebära att det spricker upp lättare än om det är samma egenskaper.

Modelleringen kan genomföras med försvagade områden, t.ex. element med andra egenskaper men där endast hållfasthet och e-modul skiljer sig. Denna metod skulle även kunna appliceras då ett annat injekteringsmaterial än cementbaserat har använts. En del alternativa injekteringsmaterial klarar av att överföra laster, men har en väsentligt lägre styvhet än vad den ursprungliga betongen har. Detta gör att sprickan kan ses som helt lastöverförande men med stor deformationspåverkan.

Modelleringen kan även göras utan speciella försvagade områden, utan istället genom att applicera en direktkontakt mellan de olika delar av konstruktionen som hålls separerade genom sprickan, se ex. figur 2-1. Beroende på beräkningsprogram finns det olika typer av villkor som kan appliceras för att säkerställa lastöverföringen men samtidigt ge en försvagad styvhet.

3.3.3 Nivå 3 – partiell interaktion

Den mest realistiska nivån när det kommer till hur materialet och konstruktionen bör bete sig vid injektering av en betongdam är nivå 3. Här antas att materialen har olika egenskaper och är separata från varandra. Vidhäftningen är inte fullständig, utan det kan förekomma hålrum, icke ifyllda sprickor eller dålig vidhäftning pga. rester av vittrad betong. Denna modelleringsnivå kan även användas då alla hålrum är ifyllda, men vidhäftningen är reducerad, eller då extra noggrannhet i beräkningen efterfrågas.

Modelleringen bör lämpligast ske genom att materialen separeras i modellen och länkas ihop genom kontaktelement. Det innebär en betydligt mer komplicerad modellering än vad som är fallet i nivå 1 och 2, men kan ge en större noggrannhet vid denna typ av situationer. Den forskning som hittats angående denna typ av modellering visar dock att skillnaden mellan olika modelleringsnivåer inte är stor. Användning av denna typ av avancerad modellering bör därför göras med försiktighet, eftersom det inte är säkert att skillnaderna i förhållande till enklare modeller är tillräckligt stora för att motivera den extra tid som krävs.

Det finns flera olika typer av kontaktelement som går att använda, speciellt då olika typer av beräkningsprogram används. I Brigade [21], som är en variant av Abaqus, specificeras lättast interaktionen mellan de ursprungliga betongdelarna som en yta-till-yta kontakt där injekteringsens egenskaper läggs in i själva kontaktvillkoret. Liknande metoder bör även finnas i andra finita elementprogram såsom COMSOL Multiphysics, eftersom metodiken är den samma. De egenskaper som kan specificeras för kontaktytorna kan delas in i tangentiella (friktion och elastisk glidning) eller normala (hård, mjuk eller dämpad kontakt och separation) till själva snittytan [21]. Egenskaperna beror på vidhäftningen mellan ytorna, styvheten hos injekteringsmaterialet och trycket från själva injekteringen.

3.3.4 Nivå 4 – ingen interaktion

I den högsta nivån antas injekteringen varit så pass ofullständig eller ha nått en mycket låg vidhäftning mot det ursprungliga materialet att det inte går att tillgodoräkna sig någon kapacitet. Nivån är tämligen orealistisk och innebär att injekteringen är verkningslös ur bärighetssynpunkt, men kan ha uppnått sitt syfte om läckage och eventuellt vattenflöde ändå förhindrats, men där endast de hålrum som stoppar flödet fyllts och inga andra delar.

Denna situation innebär att konstruktionen ur bärighetssynpunkt kan modelleras utan hänsyn till injekteringen, med en sprickbildning enligt konstruktörens tidigare beräkningar, se till exempel [22], [23] för exempel på hur denna typ av beräkning kan genomföras. Dock så är denna nivå mest intressant för urlakade konstruktioner där det inte finns en distinkt sprickbildning. För denna typ av konstruktioner är flödesmodellerna i nästa avsnitt mer intressanta, eftersom injekterings syfte främst kan anses vara att reducera läckage.

4 Effekt av injektering på täthet

4.1 ALLMÄNT

När ett urlakat betongmaterial injekteras så påverkas tätheten, permeabiliteten. Injekteringen genomförs i det urlakade området för att ersätta bortspolad cementpasta med ny cementpasta. Cementpastan som injekteras har inte samma egenskaper som den ursprungliga dels för att vattencementtalet, vct, inte är samma som i det ursprungliga receptet och dels för att cementet inte nödvändigtvis är av samma kvalitet som den ursprungliga. Samverkan mellan den injekterade cementpastan och ballasten skiljer sig också mot samverkan mellan betongens cementpasta och ballast i det oskadade materialet.

Det injekterade materialets permeabilitet är en viktig parameter för att kunna bedöma funktionen hos den injekterade konstruktionen. Permeabiliteten före och efter en injektering är svår att bestämma eftersom det inte går att ta ett prov som är representativt för en stor betongkonstruktion. Dessutom är olika delar olika skadade/urlakade och resultatet av en injekteringen blir inte heller lika bra i olika delar.

Permeabiliteten för ett injekterat material skulle kunna erhållas genom att skapa en modell av det injekterade materialet. Beroende på modellens utformning och upplösning skulle permeabiliteten för ett injekterat material kunna uppskattas.

Modeller av injekterade sprickor och deras inverkan på en större kompakt materialvolym kan vara mer eller mindre nyanserade avseende de mekaniska och fysikaliska förhållandena. Om materialvolymen är porös tillkommer också flöde mellan sprickor och materialet i sprickväggarna.

4.2 LITTERATURSTUDIE

Det här avsnittet fokuserar på vilka metoder som finns för att modellera flöden i geometrier som består av uppspruckna porösa material. Mycket av litteraturen kommer från området underjordiskt flöde genom sprucket berg som också kan vara poröst. Urlakade och spruckna injekterade betongkonstruktioner är i princip analoga med en sådan geometri. Det som skiljer sig är att sprickor i berg kan vara orienterade i plan men det förekommer även spricksystem som inte följer en viss huvudorientering. Urlakning av betong och flöde genom urlakad betong har beskrivits av Ekström, som också har utvecklat en modell för sådana material [24].

Det finns en hel del beskrivningar av hur man injekterar skadade vattenkraftsbyggnader i svensk litteratur [1-5]. Rapporterna inriktar sig på att beskriva metoder för hur en injektering ska gå till men där finns också förslag på hur resultatet ska kontrolleras.

Rosenqvist [1] anger ett antal kontrollmoment som kan utföras för att kontrollera resultatet efter en injektering. De momenten kan bestå av vattenförlustmätning, uttagning av borrhälskärnor för att bedöma kvaliteten på betongen och borrhålsfilmning. Dessa kärnor kan provtryckas för att kontrollera tryckhållfastheten. Det skulle också vara intressant att kontrollera tätheten hos den injekterade betongen i någon typ av flödesmätning. Vattenförlustmätning görs genom att pressa vatten i ett borrhål under ett visst övertryck. Sedan mäts flödet d.v.s. hur mycket vatten som flödar genom borrhålets omslutningsarea och eventuella sprickor som finns. Flödet anges i Lugeon

(Lu) eller liter/(minut*borrhålslängd*tryck). Där 1 Lu anses som ett gott resultat d.v.s. att betongen har blivit tät.

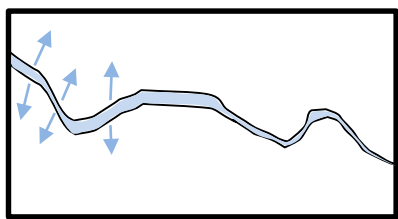
4.3 FLÖDESMODELLER

Flödesmodeller kan definieras olika beroende vilket problem som den ska behandla. Är det ett storskaligt problem så kan en viss modell tillämpas men är det ett mindre och lokalt problem som behandlas så fungerar det inte att använda samma typ av modell. Jämför att detaljerat studera flödet i en specifik spricka med att studera en flödet genom en svårt skadad stor dammkonstruktion med många sprickor och områden som är mycket urlakade. Det teoretiska resonemanget nedan är hämtat från en bok som behandlar flöde och föroreningar i uppsprucket berg, [25]. Liknande teoretiska resonemang finns också i andra publikationer.

Geometrin i ett uppsprucket berg påminner mycket om geometrin i en uppsprucken betongkonstruktion. Berget som är uppsprucket kan också vara poröst vilket ökar möjligheten att använda en sådan här modell. Efter en injektering med ett cementbaserat injekteringsbruk förändras flödesmotståndet för sprickorna och det tidigare urlakade området. Dock är det väldigt svårt att bedöma i vilken grad som sprickorna och det urlakade området har fyllts ut. Delar av det urlakade området kanske fortfarande inte har nåtts av injekteringsbruk medan andra är helt utfyllda. Egenskaperna hos injekteringsbruket kan också variera beroende på till exempel separation som uppstår vid injekteringen.

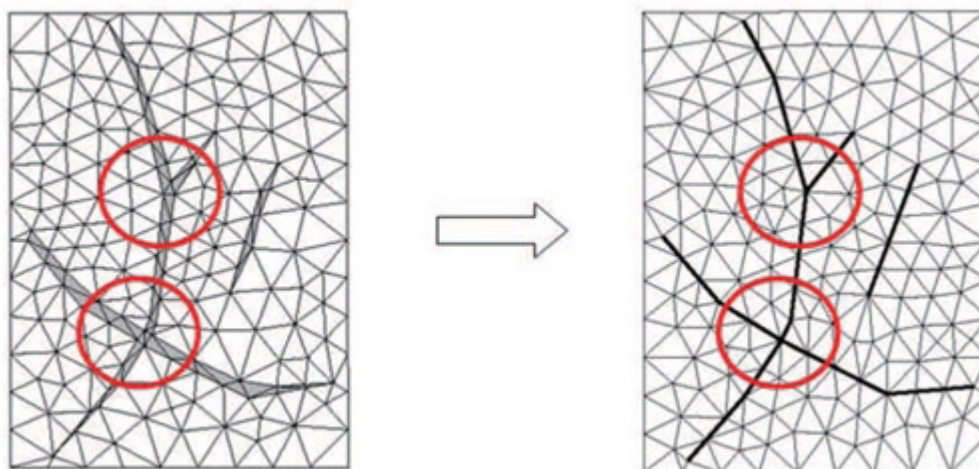
4.3.1 Modell med hög detaljeringsgrad

Modeller av flöde i injekterad betong kan beskrivas utifrån olika detaljeringsgrad/upplösning. En modell som beskriver flödet genom en väldefinierad geometri med väldefinierade materialegenskaper, kan ge en detaljrik bild av flödet på en mycket begränsad volym av en betongkonstruktion. En skiss en sådan väldefinierad spricka utan någon zon med stor urlakning kan ses i Figur 4-1.



Figur 4-1 Väldefinierad spricka i en liten materialvolym, cm³.

En sådan spricka kan i ett finita element program avbildas på flera olika sätt. I Figur 4-2, ses exempel på två olika avbildningar av samma spricka.



Figur 4-2 Detaljerad geometrisk avbildning i 2D (till höger) jämfört med en förenklad avbildning (till vänster)[24]

Den vänstra bilden avbildningen av en spricka i Figur 4-2 är svårare att både elementindela, definiera och beräkna, medan den högra avbildningen reducerar svårigheten. Flödet i sprickan påverkar den "homogena" omslutande materialvolymen oavsett modelleringsteknik.

Det finns metoder för att modellera sprickor med det förenklade sättet inbyggda i mjukvaran COMSOL Multiphysics, och det kallas för "discrete fractures" som ligger under fysiken Darcy's law.

Användningen av en förenklad modell enligt höger bild i figur 4-2, begränsas bland annat av möjligheten att detaljerat beskriva en eller flera sprickor i ett svagt urlakat område, till exempel i stora dammkonstruktioner. En annan begränsning utgörs av möjligheten att verifiera resultatet från en sådan flödesmodell. Dessutom ökar beräkningstiden om en detaljerad modell används för en stor konstruktion, vilket gör att den modellen i praktiken blir oanvändbar. En fördel med en detaljerad modell med hög upplösning är att det går att undersöka till exempel inflöde och utflöde ur ett poröst omslutande material i detalj.

En modell som är ämnad att beskriva en lite större del av en injekterad betongkonstruktion men ändå inte hela kan användas i en begränsad volym där flera sprickor kan ingå i geometrin. Ett exempel på en sådan begränsad materialvolym ses i Figur 4-3.

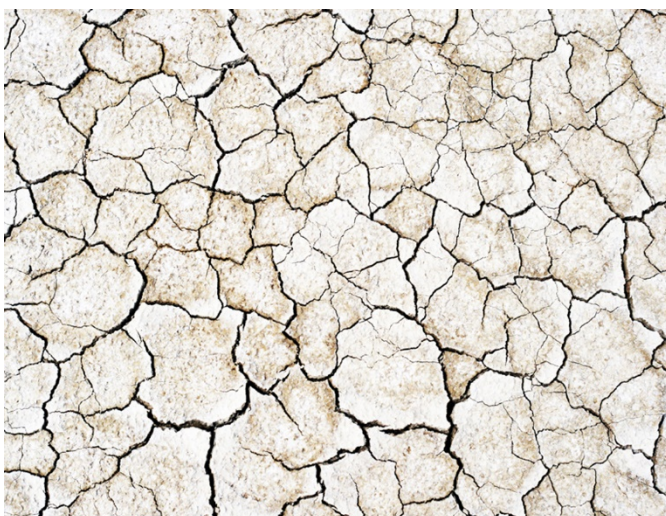


Figur 4-3 Väldefinierade sprickor i en lite större materialvolym, dm³.

I en sådan modell är det nödvändigt att exakt känna till sprickornas geometri och läge. Däremot kan modellen byggas upp genom att definiera sprickor med hjälp av ett statistiskt betraktelsesätt, där de är slumpmässigt utspridda/belägna men i en väldefinierad mängd. En sådan modell kan tillämpas på ett lokalt problem med en begränsad volym. Fortfarande är det inte möjligt att praktiskt tillämpa modellen på en stor dammkonstruktion.

4.3.2 Modell med en lägre detaljeringsgrad

Ytterligare en modell är utvecklad för att hantera flödesproblem där det finns sprickor i ett poröst material, den modellen kallas för dubbelporositetsmodellen. Dubbelporositetsmodellen utvecklades från början av en rysk matematiker 1960 [26]. Modellen utgår från två sammankopplade modeller som beskriver dels spricksystemet och dels det porösa materialet mellan sprickorna. Det är också möjligt att dela in ett material i flera undersystem med hjälp av dubbelporositetsmodellen. Dessa undersystem går sedan att koppla ihop i en större modell.



Figur 4-4 Många sprickor i en större porös materialvolym, m³

En sådan modell är beskriven av Bin and Guan [27], där flera mindre modeller är sammankopplade till en större modell. I den presenterade modellen antas att det uppspruckna porösa mediet (materialet) kan betraktas som ett kontinuum av mindre delar som överlappar varandra med en väldefinierad porositet och permeabilitet. Till detta kopplas ett sprickkontinuum som lokalt är kopplat till varandra. De ekvationer som styr dessa båda kontinuum definieras genom att kombinera massbalansekvationen och Darcy's lag:

$$\phi_m \frac{\partial \rho_m}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k_m \rho_m}{\mu} \nabla p_m \right) = -\tau \quad (1)$$

$$\phi_f \frac{\partial \rho_f}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k_f \rho_f}{\mu} \nabla p_f \right) = \tau + q \quad (2)$$

där index m och f står för det uppspruckna mediet och sprickorna, k är permeabiliteten. p står för vattentrycket, ρ och μ är densiteten respektive viskositeten. Permeabiliteten är ett mått på flödesmotståndet hos ett material och viskositeten beskriver det inre flödesmotståndet hos en vätska till exempel vatten.

I ekvation (1) och (2) står τ för flödesutbytet mellan det uppspruckna porösa mediet och q står för en källterm. Notera att q enbart förekommer i ekvation (2) vilket indikerar att det globala flödet endast antas gå genom sprickorna och inte genom det porösa mediet.

Dessa båda ekvationer är vanliga differentialekvationer som används för att beräkna trycket vid ett visst flöde genom ett material med vissa definierade materialegenskaper. Trycket som orsakas av flödet ger upphov till en inre spänning i materialet. Spänningen i materialet ger därför ett bidrag till spänningar som uppkommer av yttre krafter, vilket innebär att det finns en koppling till mekaniska beräkningsmodeller. Bärförmågan hos en vattenkraftkonstruktion kan därför påverkas av ett flöde genom ett urlakat eller uppsprucket område.

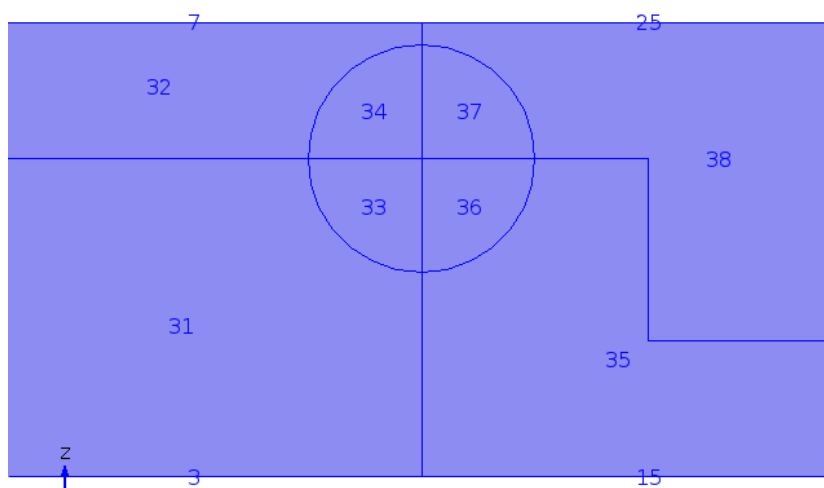
Det finns många programvaror som kan utföra numeriska beräkningar utifrån dessa ekvationer. Många av dem är baserade på finita element metoden och två vanligt förekommande programvaror COMSOL Multiphysics och Abaqus.

Det finns inga flödesmodeller utvecklade specifikt för fallet med injekterad betongkonstruktioner. Kunskap om permeabiliteten för injekterad betong saknas och det finns heller inte någon metod framtagen för att verifiera en flödesmodell.

4.3.3 Modell med låg detaljeringsgrad

Till sist är det naturligtvis möjligt att modellera den injekterade betongkonstruktionen som ett homogent material med samma egenskaper som den ursprungliga icke urlakade betongen. Det innebär att de injekterade sprickorna och områdena har samma egenskaper som de icke injekterade och att flödesmodellen blir enklare. Dock innebär denna grovt förenklade modell att detaljeringsgraden också sjunker. Det är också möjligt att anta att egenskaperna i de skadade partierna i en damm antingen blir bättre, lika eller sämre än de oskadade delarna. Egenskapen i fråga kan då göras bättre, lika eller sämre på ett schabloniserat sätt i ett homogent perspektiv. Eller att man i modellen anger en annan egenskap för ett visst område (domän) med till exempel urlakad betong som omsluts av oskadad betong.

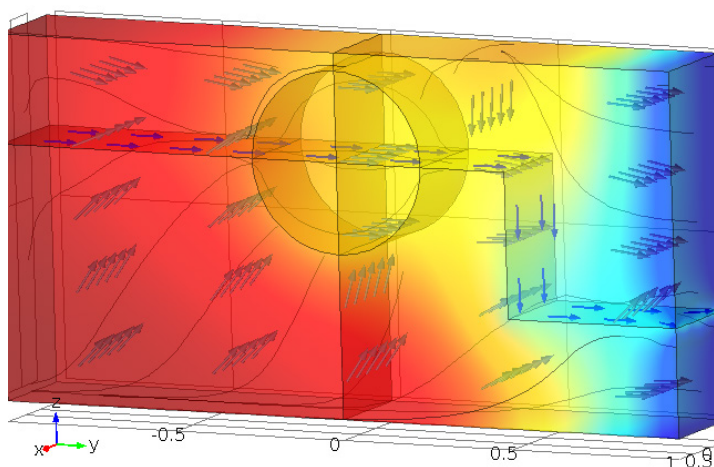
Fallet med två olika domäner som ges olika flödesegenskaper tas upp som ett exempel där geometrin visas i Figur 4-5.



Figur 4-5. Ett rektangulärt utsnitt av en större betongkonstruktion

I Figur 4-5, har det urlakade och injekterade området avbildats som en cirkel i ett godtyckligt plan. Detta område är indelat i fyra delar (markerade med siffrorna 33, 34, 36 och 37) vilka kan ansättas ha en fukttransport som har helt andra egenskaper jämfört med omgivande material. Dock ansätts egenskapen som homogen för hela området.

Den brutna horisontella linjen som ses i Figur 4-5 skulle kunna representera en större spricka som löper genom utsnittet från vänster till höger kant. Denna spricka kan modelleras med speciella egenskaper som en rand med en viss tjocklek (sprickan bör ha en begränsad tjocklek i jämförelse med omgivande material). Ovanstående har behandlats i ett förenklat beräkningsexempel med Comsol Multiphysics och resultatet visas i Figur 4-6.



Figur 4-6. Flödesmönster i spricka (blå pilar) och i övrigt material.

På den vänstra randen finns ett flöde in i domänen och på den högra randen råder atmosfärstryck. Materialet i den "liggande cylindern" i Figur 4-6 har ett lägre fukttransportmotstånd än övrigt material och skulle kunna representera ett injekterat område. Färgskalan i bilden representerar trycket i varje del av geometrin där den blåa färgen motsvarar atmosfärstrycket och den röda färgen motsvarar ett visst övertryck. Pilarna (de blåa) representerar dels flödesriktning i sprickan (följer sprickgeometrin) och de gråa pilarna i volymen motsvarar flödet i det ospruckna materialet. Flödeslinjer finns också representerade som tunna linjer i figuren.

Det är naturligtvis möjligt att ange flera sprickor som ränder som korsar en i övrigt homogen geometri. Detta sätt att ange sprickor är beräkningsmässigt fördelaktigt i jämförelse eftersom elementindelningen inte blir ohanterligt stor. Ju större kännedom om sprickans geometri och flödesegenskaper desto högre sannolikhet att modellen ger ett rimligt resultat.

För att lösa ovanstående problem måste, bland annat, följande materialegenskaper vara kända eller antas

- vattnets dynamiska viskositet och densitet
- materialets densitet
- porositeten och permeabilitet hos omgivande material
- porositet och permeabiliteten i sprickan
- sprickans tjocklek i genomsnitt

5 Diskussion

Det finns ett mycket stort värde i befintliga betongkonstruktioner inom vattenkraften, där många av dessa konstruktioner är gamla och urlakade eller har allvarliga sprickor. Årligen injekteras många betongkonstruktioner för att lösa dessa problem, åtgärder som är kostsamma. Det är dock mycket svårt att kontrollera eller beräkna om konstruktionerna uppfyller de krav som åtgärden/injekteringen skulle uppfylla. Att genomföra beräkningsanalyser med rätt noggrannhet är därför viktigt för att i förväg kunna prediktera effekten av olika åtgärder samt att i efterhand kunna analysera utförd åtgärd. Nedan diskuteras det som konstaterats i denna studie angående egenskaper hos en injekterad betongkonstruktion och vilka möjligheter det finns för modellering och analys.

Som visats i kapitel 3 och 4 i denna rapport har det genomförts relativt få studier på materialegenskaper hos en injekterad betongkonstruktion. De studier som finns har främst fokuserat på hur injekteringen kan genomföras och inte på egenskaperna hos den injekterade konstruktionen. En stor bidragande faktor till denna fokus är svårigheterna med att kunna verifiera materialegenskaperna efter en genomförd injektering. Det är av största vikt att injekteringen genomförs på ett korrekt sätt och de utredningar som finns inom detta område är därför viktiga. Det är en stor nackdel att inte veta hur kvantitativa materialegenskaper förändras av injekteringen, eftersom det är dessa som möjliggör beräkning av bärförmågan och tätheten hos materialet. Dessa behövs även för att bestämma livslängden hos reparationen och konstruktionen. Detta är speciellt viktigt för att uppnå en hållbar lösning. En ytterligare komplikation med just dammkonstruktioner är storleken. De ofta stora konstruktionerna innebär att förstörande provning i de flesta fall endast kan utföras som stickprovskontroller på små avgränsade delar. Detta innebär en risk för att resultatet av en materialprovning inte blir representativt.

En injektering som sker i en skadad vattenkraftkonstruktion kan som tidigare nämnts förbättra både konstruktionens bärförmåga och/eller täthet. Resultatet från en injektering kontrolleras ofta på ett indikativt sätt genom visuell inspektion av borrhälsborr, borrhålsfilmning eller genom vattenförlustmätning. Dessa metoder är av det kvalitativa slaget och säger inget om de kvantitativa materialegenskaper som krävs för modellering av de injekterade delarna. De använda metoderna är snarare en kontroll av hur väl injekteringsmaterialet har fyllt ut sprickor och urlakade områden runt det aktuella borrhålet. En sådan kontroll räcker inte för att kunna göra någon förutsägelse om livslängden på vare sig reparationen eller hur konstruktionen i övrigt påverkats av injekteringen.

Alla skadade betongdammar som injekteras kan inte hanteras på samma sätt eller anses ha liknande problem. I denna rapport har två olika skadetyper studerats; (i) då en distinkt spricka bildas av någon typ av belastning och (ii) då dammen urlakats av vattenflöden och uppvisar läckage. Dessa två typer innebär olika frågeställningar eftersom de påverkar dammen på olika sätt. Vid injektering av en distinkt spricka efterfrågas oftast en återgång till det ursprungliga bärande systemet. Injekteringen syftar till att återskapa dammens monolitiska funktion. För fallet med urlakning är det största problemet oftast läckage, där dammens täthet ska återskapas med injekteringen men även en ökad bärförmåga fås av denna åtgärd. Ett läckage kan också förändra porvattentrycket och därmed det inre spänningstillståndet både i materialet och konstruktionen.

En viktig aspekt som inte täckts in i denna studie är att en ökad kunskap om materialets flödesegenskap innan injektering också kan användas för att förbättra designen av injekteringen och bestämning av tillåtna tryck, mm. Det innebär en möjlighet att minska risken för att injektering genomförs på ett felaktigt sätt. En felaktigt genomförd injektering kan medföra att en spricka vidgas ytterligare, vilket kan innebära en försämring av funktionen för konstruktionen som sådan och för materialet. Dessa båda funktioner är viktiga vid uppskattningen av de egenskaper som behövs vid modellering. Vid injektering där t.ex. bruket är för styvt kan trycket i sprickan öka och den succesivt vidgas istället för att fyllas igen. Målet för injekteringen är att fylla så mycket som möjligt av de sprickor som finns, något som kan göra att dammen i det närmaste återfår sin ursprungsfunktion. En felaktig injektering kan därför medföra att detta inte uppnås. Även detta visar på vikten av att kunna undersöka hur injekteringen gått och vilket egenskaper som uppnåtts.

Det kan också vara så att injekteringen av en damm kan riskera att öka de inre spänningarna och spänningarna vid randen, t. ex. mellan dammen och berggrunden. Detta är ett mycket allvarligt problem som måste tas i beaktande vid en injektering. Hur högt tryck kan tillåtas utan att riskera att påverka det inre spänningstillståndet på ett negativt sätt och hur påverkas materialegenskaperna av injekteringen. Det är också ett område som det finns behov av att undersöka, även om det faller utanför omfattningen för detta projekt.

Vid förekomst av sprickor och urlakade zoner finns en ökad risk för korrosion på armering som fått en ökad exponering mot syre och fukt. Att undersöka om korrosion har skett är svårt, eftersom det är problematiskt att visuellt inspektera armeringen och därmed utvärdera dess tillstånd. Vid korrosion av armering försämras konstruktionens funktion och bärförmåga, att injektera en sådan damm kan därför vara utan långsiktig verkan. Det som dock styr hur stor skyddande effekt injekteringen har är hur långt korrosionen kommit, vid liten korrosionsmängd är det möjligt att till viss del återskapa den skyddande miljön. Om korrosionen pågått en längre period finns det risk för att det inte går att uppnå den bärförmåga som eftersträvas även om injekteringen blir lyckad. Då injekteringen utförs för att tätat ett läckage är detta dock ett mindre problem, eftersom injekteringen i de fallen har ett lite annat syfte än att återställa bärförmågan till ursprunget. En annan fråga som är intressant att ställa är om det går att utgå ifrån att bärförmågan förbättrats efter en injektering, om en kontroll visar att läckaget minskar.

En viktig fråga när det gäller att reparera en skadad betongkonstruktion är om den verkligen går att reparera? De resultat och studier som redovisas i denna rapport räcker inte som bas för att kunna ta denna typ av beslut, utan det krävs ytterligare studier om ett beslutsstöd ska kunna utvecklas. För ägarna kan denna fråga vara den mest avgörande. Om dammen inte uppnår tillräcklig kapacitet efter injektering eller endast är säker en kort tid efter genomfört arbete är det inte försvarbart att göra en omfattande injektering. Vidare studier inom egenskaper hos injekterade betongkonstruktioner bör ha som mål att kunna besvara denna fråga.

6 Slutsatser

Studierna som presenteras i denna rapport har lett till följande slutsatser:

- Existerande beräkningsprogram och metoder/modeller kan anses vara tillräckliga för att kunna göra beräkningar av bärförmåga och täthet hos en injekterad betongkonstruktion. Det finns dock i dagens läge inte tillräckligt med information och testresultat som visar materialegenskaperna för ett injekterat material för att genomföra verifierade beräkningsanalyser.
- För att kunna välja modelleringsnivå vid beräkningar krävs egna antaganden. Dessa antaganden kan idag inte baseras på vedertagna forskningsresultat. Vidhäftning mellan injektering och ursprunglig betong är tillsammans med injekteringsmaterialets styvhet de egenskaper som behövs för att avgöra vilken typ av modellering som kan användas för bärförmågeberäkningar.
- Verifierade modeller för att beräkna bärförmåga och täthet hos en injekterad konstruktion ger ökade möjligheter till att utnyttja befintliga dammar på ett mer effektivt sätt och ger även möjligheter till att förbättra själva injekteringsprocessen.
- Det är inte möjligt att uppskatta om betongkonstruktionen fortfarande är lämplig att injektera eller inte, eftersom ett underlag för den typen av beslut inte finns i tillräckligt stor utsträckning.
- Flödesmodeller har hittas som har använts i snarlika material, uppsprucket berg, men dessa modeller har inte tillämpats på injekterade betongkonstruktioner.
- De programvaror som vi har tittat på är möjliga att använda för att göra modeller för att utföra verifierande beräkningar med.

7 Förslag till fortsatt arbete

Diskussionen och slutsatserna i denna rapport visar på bristfällig kunskap om de mekaniska egenskaperna och flödespåverkande materialegenskaperna hos injekterad betong. För att kunna genomföra beräkningsanalyser av tillståndet hos en konstruktion efter genomförd injektering är det avgörande att känna till dessa egenskaper. Analyser av denna typ är värdefullt för att kunna fatta välgrundade beslut om en damm ska repareras genom injektering, på annat sätt förstärkas eller ersättas med en ny. Vid beslut om injektering av en urlakad eller sprucken damm är det även viktigt att bedöma livslängden och långtida egenskaper. För att kunna bedöma effekter av injektering och skapa bättre underlag för beslut krävs därför mer forskning där en långsiktig satsning på detta område skulle innebära en stor samhällsnytta.

Bestämma materialegenskaper för injekterad betong. Dessa egenskaper är till exempel hållfasthet för en oskadad betong och för en skadad men injekterad betong. Hållfasthetsegenskaper för den injekterade konstruktionen. Egenskaperna hos injekteringsbruket och därmed konstruktionen kan förändras på grund av separation när det hamnar i en spricka eller urlakat område. Detta kan innebära att vct ökar med avståndet från injekteringspunkten. Permeabilitet i en oskadad betong och en skadad men injekterad betong. Flödesegenskaper för härdat injekteringsbruk i en injekterad betong. Dessa materialegenskaper kan bestämmas på ett laboratorium. Det bör även i en kommande etapp fokuseras på utprovning och anpassning av icke-förstörande provningsmetoder, eftersom en betongdamm har en speciell geometri med svårigheter att montera givare på alla delar. Icke-förstörande metoder är fördelaktiga att använda då det kan innebära att förstörande provning endast behöver tillämpas för verifieringstester.

Utveckla beräkningsmodeller för injekterad betong. Beräkningsmodeller som finns för andra tillämpningar kan utvecklas för injekterad betong och valideras mot försök. Förnya och utöka kunskapsbasen rörande injekterad betongs egenskaper och hur dessa kan modelleras. Bestämma detaljeringsgrad som krävs för att modellera en vattenkraftkonstruktion på ett tillfredsställande sätt. Även probabilistiska analyser är av intresse att genomföra i en fortsättning, där variabiliteten i resultaten kan studeras. Egenskaperna kan skilja mycket mellan två liknande konstruktioner vilket bör tas hänsyn till för att kunna uppnå en tillräckligt god bärförmåga och täthet efter injektering.

Effekter av krympning och mikrosprickor på vidhäftningen mellan injektering och ursprunglig konstruktion. Den långsiktiga funktionen är mycket viktigt för betongkonstruktioner där det kan vara svårt att genomföra ytterligare lagningar efter injektering.

Åldringsfenomen. Vattenkraftkonstruktioner används under lång tid och därför är det av intresse att veta hur materialegenskaper påverkas med tiden.

Det finns möjligheter att utnyttja injekterade dammar som är tagna ur bruk vars materialegenskaper kan undersökas. Delar av en sådan dammkonstruktion kan tas in i ett laboratorium, där olika mät- och valideringsmetoder användas i en kontrollerad miljö för att utvärdera dess lämplighet och tillförlitlighet innan de används i fält.

Det föreslagna fortsatta arbetet genomförs lämpligen som forskningsprojekt, doktorand- eller seniorprojekt, där samverkan mellan konstruktions- och

materialforskare är väsentligt för att kunna uppnå önskat resultat. Omfattningen och inriktningen av det föreslagna fortsatta arbetet är så stor och vetenskapligt intressant att det krävs en större insats för att påbörja detta intressanta forskningsområde. Dessa forskare bör ha ett nära samarbete eftersom vissa delar av flödesmodelleringen kan påverka bärighetsmodelleringen och vice versa. Det är lämpligt att det finns både modelleringskompetens och kompetens i laborativa studier för att genomföra detta.

8 Referenser

1. Rosenqvist, M., *Vägledning för cementinjektering av betongkonstruktioner- Projektering, utförande och kontroll*. 2011.
2. Eriksson, H., *Cementinjektering i äldre sten- och betongdammar*. 1991, VAST Kraftindustrins stiftelse för tekniskt utvecklingsarbete.
3. Bernstone, C. and P.-E. Thorsell, *Uppgradering av Forshuvuddammen - En demonstrationsstudie av oförstörande undersökningsmetoder och cementinjektering*. 2001.
4. Thorsell, P.-E., *Uppföljning av injekteringsarbeten, Kanalmur, Älvkarleby*. 2007.
5. Hansson, P., *Cementinjektering - Handbok i materialteknik för injekterare*. 1994.
6. Lombardi, G., in *Advanced Dam Engineering for Design Construction and Rehabilitation*, R.B. Jansen, Editor. 1988, Van Nostrand Reinhold: New York.
7. Javanmardi, F. and P. Léger, *Grouting of cracks in concrete dams: numerical modelling and structural behaviour*. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2005. 7(4): p. 161-173.
8. Thanoon, W.A., et al., *Repair and structural performance of initially cracked reinforced concrete slabs*. *Construction and Building Materials*, 2005. 19(8): p. 595-603.
9. Eriksson, M. and H. Stille, *Cementinjektering i hårt berg*. 2005: Stiftelsen Svensk bergteknisk forskning.
10. Moosavi, M. and W.F. Bawden, *Shear strength of Portland cement grout*. *Cement and Concrete Composites*, 2003. 25(7): p. 729-735.
11. Park, J., T. Qiu, and Y. Kim, *Field and Laboratory Investigation of Pullout Resistance of Steel Anchors in Rock*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013. 139(12): p. 2219-2224.
12. Paliari, V., et al., *Experimental Investigation of the Behaviour of Interfaces in RC Elements Subjected to Cyclic Actions: Effect of Compressive Stress Normal to the Interface*, in WCEE. 20102: Lisbon, Portugal.
13. Bass, R.A., R.L. Carrasquillo, and J.O. Jirsa, *Shear Transfer across New and Existing Concrete Interfaces*. *ACI Structural Journal*, 1989. 86(4): p. 383-393.
14. Silfwerbrand, J., *Shear bond strength in repaired concrete structures*. *Materials and Structures*, 2003. 36: p. 419-424.
15. Tassios, T.P. and E. Vintzileou, *Concrete to Concrete Friction*. *Journal of Structural Engineering*, 1987. 113(4): p. 832-849.
16. Júlio, E.N.B.S., et al., *Accuracy of design code expressions for estimating longitudinal shear strength of strengthening concrete overlays*. *Engineering Structures*, 2010. 32(8): p. 2387-2393.
17. Ljungkrantz, C., G. Möller, and N. Petersons, eds. *Betonghandbok Material*. 1994, AB Svensk Byggtjänst: Solna.
18. Silfwerbrand, J., *Effekter av differenskrimpning, krypning och fogytans egenskaper på bärförmågan hos samverkansplattor av gammal och pågjuten betong*. 1987: Stockholm.
19. Shiotani, T., et al., *Elastic wave validation of large concrete structures repaired by means of cement grouting*. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(7): p. 2647-2652.
20. Owerko, P.O., L; Salamak, M., *Identification of concrete voids in an untypical railway bridge pillar by Ground Penetrating Radar Method*. *Measurement Automation Monitoring*, 2015. 61(3): p. 76-80.
21. *BrigadePlus 6.1*. 2015, Scanscot Technology: Lund.
22. Ansell, A.B., Jonas; Ekström, Tomas; Hassanzadeh, Manouchehr; Unosson, Mattias *Spricktillväxt i lamelldamm, Tillämpning av icke-linjära modeller – Del I*, in *Elforsk rapport 08:21*. 2007.
23. Ansell, A.E., Tomas; Hassanzadeh, Manouchehr; Malm, Richard *Crack propagation in buttress dams, Application of non-linear models – Part II*, in *Elforsk report 10:69*. 2010.

24. Ekström, T., *Leaching of concrete*, in *Div of Building Materials*. 2001, Lund institute of technology. p. 153.
25. Bear, J., C.-F. Tsang, and G. de Marsily, eds. *Flow and contaminant transport in fractured rock*. 1993, Academic press, Inc.: London.
26. Barenblatt, G.I., I.P. Zheltov, and I.N. Kochina, *Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata]*. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1960. **24**(5): p. 1286-1303.
27. Bin, G. and Q.I.N. Guan, *A HYBRID UPSCALING PROCEDURE FOR MODELING OF FLUID FLOW IN FRACTURED SUBSURFACE FORMATIONS*. *International Journal of Numerical Analysis & Modeling*, 2012. **9**(3): p. 667-683.

INJEKTERAD BETONGS EGENSKAPER

Det finns ett stort värde i vattenkraftens betongkonstruktioner, men många konstruktioner är gamla och urlakade eller har allvarliga sprickor.

Injektering är en vanlig reparationsmetod för spruckna och urlakade vattenkraftkonstruktioner. Men för att kunna analysera och beräkna bärförmågan och tätheten efter en reparation är det viktigt att känna till materialegenskaperna för den injekterade betongen. Det är också en förutsättning att känna till materialegenskaperna för att kunna genomföra beräkningar av livslängden för en injektering.

Den här rapporten baseras på en litteraturstudie som har genomförts vid Lunds tekniska högskola på avdelningarna Konstruktionsteknik och Byggnadsmaterial.

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