

ELFORSK



DAMMSÄKERHET

Islaster mot dammkonstruktioner-fördjupad förstudie

Rapport 14:57

Islaster mot betongdammar – fördjupad förstudie

Elforsk rapport 14:57

Förord

Klimatet i Sverige innebär att dammar utsätts för islast. RIDAS rekommenderar att stabiliteten kontrolleras för lastfall där islasten ingår. Enligt RIDAS ansätts islasten till mellan 50 till 200 kN/m, där de högre lasterna rekommenderas i de norra delarna av landet medan de lägre rekommenderas i de sydligaste.

Kunskapen om islastens storlek och variation är behäftad med stora osäkerheter. Föreliggande fördjupade förstudie föreslår att verksamhet initieras för att minska dessa osäkerheter genom att mäta islast direkt mot dammonoliter som samtidigt instrumenteras för att kunna göra numerisk bakåtanalys av islasten.

Projektet har ingått i Elforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete med medverkan från Vattenkraftföretag och Svenska Kraftnät.

Stockholm augusti 2014

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Cristian Andersson', with a long horizontal line extending to the right.

Cristian Andersson

Sammanfattning

Klimatet i Sverige innebär att våra svenska dammar utsätts för islast. För att beakta detta, rekommenderar de svenska riktlinjerna för dammsäkerhet (RIDAS) att stabiliteten kontrolleras för de lastfall där islasten ingår. Kunskapen om islastens storlek och variation är emellertid behäftad med stora osäkerheter. Under våren 2013 genomfördes en förstudie med syftet att analysera framkomliga vägar gällande bestämning av islastens storlek. Denna förstudie utmynnade i ett antal förslag där det bl.a. föreslogs att framtida projekt bör inriktas på att utarbeta och verifiera en tillförlitlig metod att i fält mäta den faktiska islasten mot dammkonstruktionen. Syftet med föreliggande fördjupade förstudie är att analysera möjligheterna att genomföra direkt mätning av islast mot betongdammen samt att bakåträkna islasten genom numeriska analyser.

En inventering av befintliga mätmetoder visar att det finns flera metoder som kan vara möjliga att tillämpa. Den metodik som sannolikt är bäst lämpad är den som användes mot fyren vid Norströmsgrund, med användning av lastceller monterade i en låda. Nackdelen med en sådan metodik är att eventuella dragkrafter inte kommer registreras vilket innebär att den resulterande kraften kan överskattas, men denna begränsning kan troligtvis accepteras. En kombination av lastceller och trådtöjningsgivare skulle kunna vara en framkomlig väg, men det är något som måste studeras närmare i samband med ett framtida projekt.

För att studera möjligheterna att använda numeriska analyser för att bakåträkna islasten användes en befintlig numerisk modell på en 40 m hög lamelldammsmonolit från Malm (2014). Studien visade att mätning av krönförskjutning med direkt pendel sannolikt är den metod som har bäst förutsättningar att kunna användas för bakåtanalysen. En annan möjlig metodik är montering av trådtöjningsgivare på betongkonstruktionen. Analyserna visade emellertid att det krävs relativt stora islaster på cirka 40-50 kN/m för att islastens inverkan på konstruktionen ska kunna särskiljas mot övriga laster som konstruktionen utsätts för. Det är inte säkert att islaster i denna storleksordning uppträder i ett magasin varje år och det är därför önskvärt att mätningarna fortgår under ett flertal år.

Baserat på ovanstående resonemang rekommenderas att ett projektförslag utarbetas där islasten mäts direkt mot en dammonolit. I anslutning till den direkta mätningen av islasten bör även monoliten instrumenteras med direkt pendel och trådtöjningsgivare för numerisk bakåtanalys av islasten. Även om metodiken med bestämning av islastens storlek med numerisk bakåtanalys är svårare jämfört med den direkta mätningen är merkostnaden för en sådan kompletterande instrumentering relativt låg. Det ligger också ett framtida intresse i att undersöka möjligheten att utveckla en kompletterande, och mindre kostsam, metodik till den direkta mätningen.

Summary

The climate in Sweden implies that the concrete dams are subjected to ice loads. In order to account for this, the guidelines for dam safety (RIDAS) recommend that the stability of the dams is evaluated with load cases where the ice load is included. However, the knowledge about the size and variation of the ice load are associated with large uncertainties. In 2013, a study was performed with the aim to analyze possible methods to determine the ice load. The study resulted in several proposed methods. Among others, it was suggested that a future project should include direct measurements of the ice load against or in the concrete dam. The aim with this feasibility study was to analyze the possibility to perform such a project. In addition, the possibility to back analyze the ice load through numerical analyses was studied.

An inventory of existing techniques to directly measure the ice load showed that there exist several techniques that might be suitable to utilize. The technique most suitable is probably the one utilized at the light house Norströmsgrund, which used load cells installed in a steel box. The main shortcoming with this technique is that possible tensile forces will not be registered. However, that limitation might be acceptable. A combination of load cells and strain gauges could be a possible way forward to overcome this limitation, but this has to be further studied in future projects.

In order to study the possibilities of using numerical analyses to back calculate the ice load, an existing numerical model of a 40 m high monolith in a buttress dam was used (Malm 2014). The study showed that measurements of the dam crest using direct pendulums are probably the best measurements to use for the back analyses. Another possible technique was to use measurements from strain gauges mounted on the downstream side of the concrete structure. However, the analyses showed that an ice load of approximately 40-50 kN/m is necessary in order to be able to separate the ice load from the other loads. It is not certain that ice loads with that magnitude occur in the reservoir each year. Therefore, it is desirable that the measurements are performed under several years.

Based on the reasoning above, it is recommended that a project proposal is derived in which the ice load is directly measured against a monolith in a concrete dam. In connection to the direct measurements of the ice load, it is recommended that a direct pendulum is installed in the monolith together with strain gauges for numerical back analyses of the ice load. Even if the methodology with determination of the ice load using numerical back analyses is difficult, the additional cost is relatively low. It is also of interest in the future to derive a complementary, and less costly, methodology to the direct measurement.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
2	Metodiker för mätning av islast på betongdammar	2
2.1	Direkt mätning	2
2.1.1	Mätmetodiker	2
2.1.2	Exempel på utformning av instrument	3
2.2	Indirekt mätning	4
3	Möjlighet till bakåtanalys av islastens storlek med numeriska beräkningar	8
3.1	Numerisk modell	9
3.1.1	Observerade sprickor	11
3.2	Potentiellt lämpliga mätdata för bakåtanalys av islast	12
3.2.1	Krönförskjutning	13
3.2.2	Töjningsmätning på frontplattan	14
3.3	Mindre lämpliga mätdata för bakåtanalys av islast	15
3.3.1	Variation i sprickbredd	15
3.3.2	Spännkablers spännkraft	16
4	Sammanfattning och rekommendationer	17
5	Referenser	19

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Klimatet i Sverige innebär att våra svenska dammar utsätts för islast. För att beakta detta, rekommenderar de svenska riktlinjerna för dammsäkerhet (RIDAS) att stabiliteten kontrolleras för de lastfall där islasten ingår. Kunskapen om islastens storlek och variation är emellertid behäftad med stora osäkerheter. Under våren 2013 genomfördes en förstudie med syftet att analysera framkomliga vägar gällande bestämning av islastens storlek.

Denna förstudie utmynnade i ett antal förslag där det bl.a. föreslogs att framtida projekt bör inriktas på att utarbeta och verifiera en tillförlitlig metod att i fält mäta den faktiska islasten mot dammkonstruktionen. Möjliga tillvägagångssätt skulle exempelvis kunna vara utveckling av fullskalemätning såsom utförd vid Norströmsgrund med mätning direkt mot, eller i, betongkonstruktionen.

Under senare år har samtidigt metoderna för numerisk analys av betongkonstruktioner utvecklats. För betongdammar är det därför teoretiskt möjligt, genom att jämföra resultat från numeriska beräkningar mot uppmätta töjningar och/eller deformationer i dammen, att bakåträkna vilken islast som verkar på betongdammen.

Med ovanstående metodiker kan dels den verkliga islasten som verkar på dammkroppen mätas och dels kan islasten som beräknats med numeriska metoder jämföras mot den islast som uppmäts vid fullskalemätningen. Genom detta skulle även en verifiering av den numeriska beräkningsmetodiken vara möjlig.

1.2 Syfte

Syftet med föreliggande fördjupade förstudie är att genomföra en studie av möjligheterna att utföra mätning av islast direkt mot, eller i, betongdammen samt analysera om det är praktiskt möjligt att bakåträkna islasten genom numeriska analyser baserat på uppmätta töjningar och/eller deformationer i dammen.

2 Metodiker för mätning av islast på betongdammar

2.1 Direkt mätning

2.1.1 Mätmetodiker

För att begränsa kostnaderna för fullskalemätningar av islaster på dammar görs antagandet att endast den resulterande tryckkraften vinkelrätt mot en vertikal yta behöver registreras. I samband med vattenståndsvariationer är det troligt att det installerade instrumentet även utsätts för andra betydande kontaktkrafter från isen som också måste kunna hanteras. Samtidigt är det viktigt att vidhäftningen mellan is och instrument liknar dammens normala kontaktyta så att istäckets krympning och rotation försvåras på samma sätt som för dammen i övrigt. Vertikala kontaktkrafter mellan is och damm kan i praktiken aldrig helt undvikas eftersom såväl istillväxt som nederbörd påverkar isens isostatiska jämviktsläge. När det är önskvärt att registrera krafter mot en stor kontaktyta på en befintlig damm har följande metoder bedömts intressanta:

1. Registrering av volymändring i en låda

Denna typ av lastkännare (ofta benämnd Medof panel) bygger på principen att lasten är proportionell mot deformationen av en stålplatta som stöds av ett stort antal gummikuddar inuti en låda. Lasten kan då beräknas indirekt från mätningar av volymändringen hos en innesluten vätska i lådan. Med antagande om hur lasten är fördelad kan kalibrering göras. Problemet med mätning via en vätska är att den ändrar volym då temperaturen ändras. Temperaturen hos vätskan kommer att variera på ett komplicerat sätt beroende på konvektion eller stratifiering.

2. Registrering av stödkrafter

Kraftmätning med hjälp av elektrisk töjningsmätning i stål utförs oftast med foliegivare som limmas direkt på en polerad stålyta. Töjningsbaserade kraftgivare eller lastceller finns standardiserade inom ett stort kraftintervall, 0-5 MN. Temperaturens inverkan kan kompenseras för genom bryggkoppling och individuell kalibrering med den valda längden på mätkabeln. För lyckade långtidsmätningar över år krävs lastceller av hög kvalitet som kontinuerligt måste matas med en stabil elektrisk spänning. Metoden kan tillämpas i detta fall så att minst tre lastceller mäter reaktionskrafterna mellan två plattor.

3. Mätning av dragkraft i en tråd via resonans

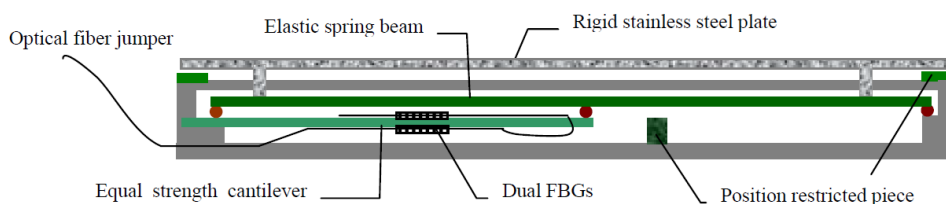
Mätning av förändringar i dragkraften i en tråd kan göras mycket noggrant baserat på tekniken med svängande tråd. Detta görs indirekt via mätning av egenfrekvensen efter att tråden satts i svängning. Om en elastisk tråd spänns mellan två punkter kan mycket små längdändringar mätas. Trådens töjning är temperaturberoende och därför måste dess temperatur registreras med stor noggrannhet. Långtidsstabiliteten hos denna typ av mätinstrument har ofta varit ifrågasatt eftersom trådens spänningsrelaxation vid varierande temperatur och spänningsnivå är okänd. Metoden kan tillämpas för att registrera krafter t ex genom att montera trådarna mellan två plattor som är upplagda på elastiska stöd.

4. Taktila tryckgivare

Taktila tryckgivare finns i utförande där en yta täcks av ett stort antal sensorer placerade i en matris. Givarna som är mycket tunna ($\sim 0,1$ mm) skyddas av t ex polyuretan eller någon annan plastfilm. Genom samtidig mätning i rader och kolumner kan signalernas position och tryckvärde registreras. Härigenom fås tryckets spatiala fördelning. En svaghet i metoden är att tryckregistreringen är olinjär och har dålig upplösning. En möjlig men oprövad tillämpning kan vara att täcka det taktila skiktet med rostfri plåt som klarar drag och skjuvkrafter.

5. Fiberoptisk mätning av töjning

Fördelarna med fiberoptisk mätning är bland annat god långtidsstabilitet och att ingen matningsspänning behövs. Fiberoptisk mätning av töjning med Fibre Bragg Grating Sensors (FBGS) kan användas för att mäta deformationer i en metalllåda exempelvis så som visas i figuren nedan. En nackdel är att de fiberoptiska givarna är starkt temperaturberoende.



Figur 2-1 Skiss på en möjlig istrycksgivare enligt Zhou et al. (2005).

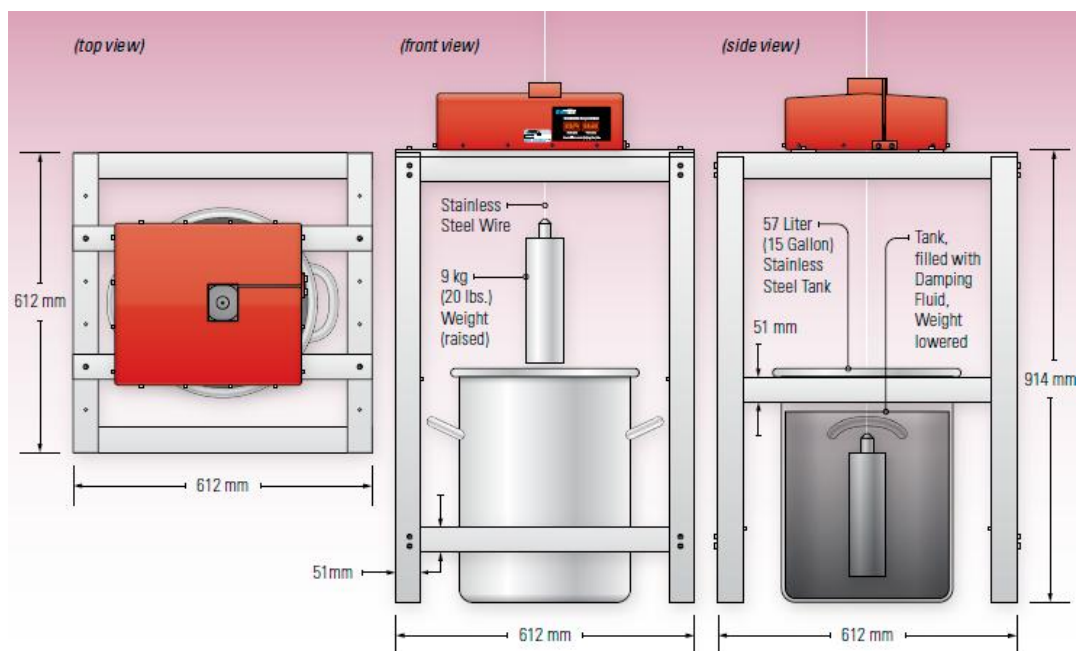
2.1.2 Exempel på utformning av instrument

Islaster från drivande havsis mättes mot utsjöfyren Norströmsgrund i Bottenviken enligt principen (2) direkt kraftmätning. Fyra stycken lastceller på 50 ton placerades som stöd mellan två stela plattor som förspändes mot

I princip kan tre olika typer av indirekta mätningar utföras för att kunna bakåträkna islastens storlek med numeriska analyser. Den första är genom att mäta monolitens krönförskjutning på grund av islasten genom direkta pendlar, den andra genom att montera töjningsgivare på betongen och den tredje är att observera förändringar i sprickvidd på eventuella sprickor som finns i betongkonstruktionen. Nedan följer en kort beskrivning av instrumentens funktion.

1. Direkta pendlar

En direkt pendel utgörs av en tunn stålwire som hänger i en tyngd från dammkrönet. När dammkrönet rör sig, exempelvis på grund av en horisontell islast, rör sig stålwiren relativt dammens grundläggningsnivå. Mätning av denna rörelse kan exempelvis utföras genom optisk mätning av den skugga som bildas när wiren belyses, se exempelvis modell BGK-6950A från Geokon vilken redovisas i Figur 2.3. Den optiska mätningen har en upplösning på 0,01 mm och noggrannheten anges till mindre än 0,1 mm (Geokon 2014a).

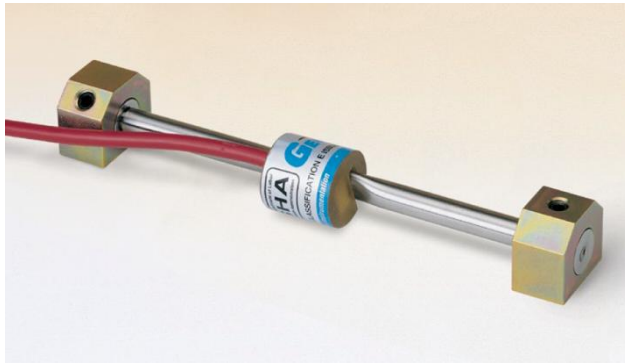


Figur 2-3 Pendelsystem modell BGK-6950A installerad vid ett måtbord för en direkt pendel (Geokon 2014).

2. Töjningsgivare

Töjningsgivare består oftast av en stålsträng mellan två monteringsplattor. Vid deformationer i betongen förändras spänningen i strängen och därmed dess frekvens. Givarna är oftast cirka 100-150 mm långa och kan limmas fast med epoxi eller skruvas fast. Givarnas upplösning är generellt cirka 1 $\mu\epsilon$, se exempelvis Geokon 4000 Vibrating Wire Strain Gauge, vilket innebär en spänningsförändring på 30 kPa (med Ebtg=30 GPa). Noggrannheten är 0,5%

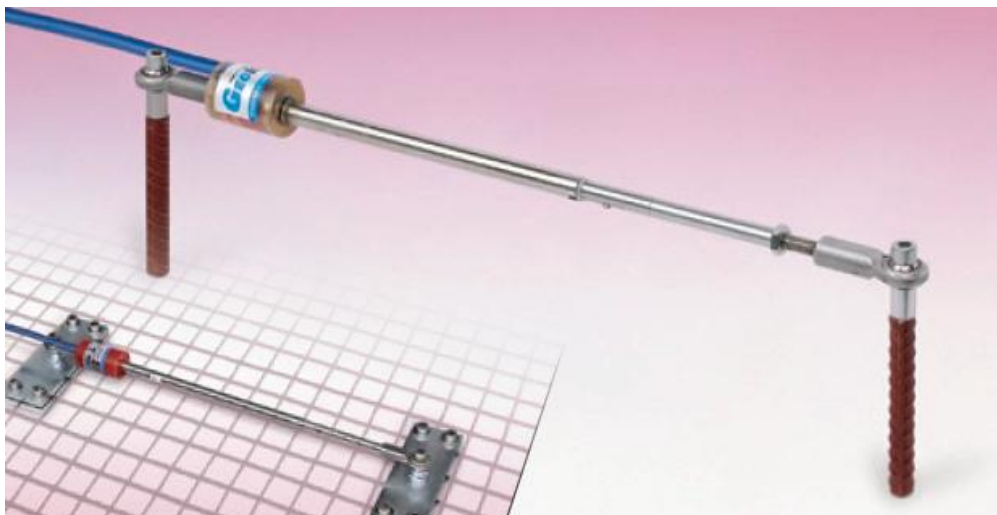
av frekvensområdet ($3000 \mu\epsilon$) vid standardkalibrering, men kan minskas till 0,1% vid enskild kalibrering (Geokon 2014b). Detta motsvarar en noggrannhet på 450 respektive 90 kPa.



Figur 2-4 Töjningsgivare Geokon 4000 av typ vibrerande sträng (Geokon 2014b).

3. Sprickviddsmätare

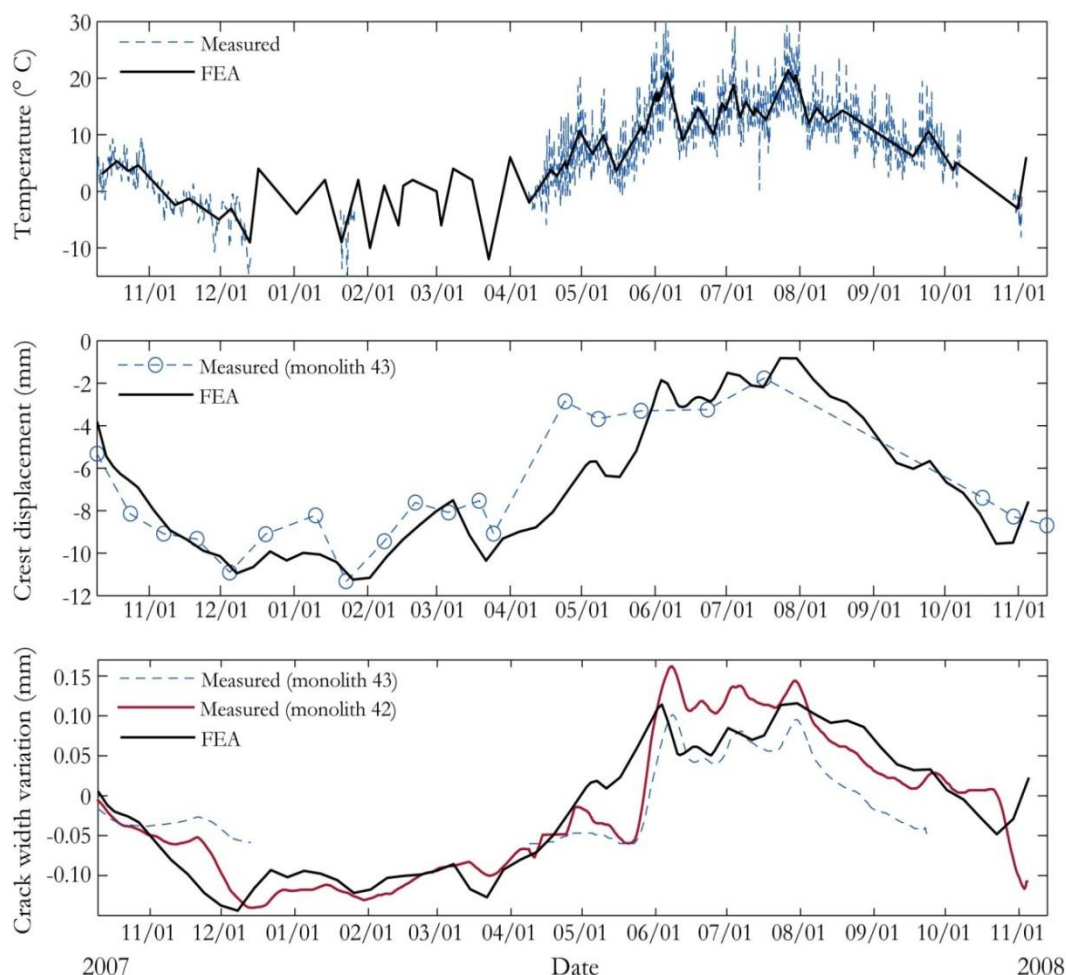
Sprickviddsmätare består generellt av en teleskopstav av stål som monteras över den spricka där deformationer ska observeras. I staven finns en svängande sträng som är seriekopplad till en fjäder. Vid deformationer ökar fjädern spänningen vilket förändrar strängens frekvens. Exempel på sprickviddsmätare är Geokon modell 4420, se Figur 2.5. Denna modell har en upplösning och noggrannhet på 0,025% respektive 0,1% av frekvensområdet (Geokon 2014c). Med ett mätområde på 12,5 mm ger det en upplösning på 0,003 mm och en noggrannhet 0,013 mm.



Figur 2-5 Sprickviddsmätare Geokon 4420 (Geokon 2014c).

3 Möjlighet till bakåtanalys av islastens storlek med numeriska beräkningar

Syftet med föreliggande avsnitt är att studera möjligheten att använda befintlig instrumentering som finns på betongdammar för att beräkna islastens storlek. Tidigare forskningsprojekt, Björnström et al (2006), Ansell et al (2008), Ansell et al (2010) samt Malm (2009), har visat att det går att beräkna t.ex. variationen i krönförskjutning på en 40 m hög betong-lamelldamm orsakad av temperaturvariationer med god noggrannhet. I Figur 3-1 nedan illustreras skillnad mellan beräknad och uppmätt krönförskjutning för en av de största monoliterna på Storfinnforsens lamelldamm.



Figur 3-1 Jämförelse mellan uppmätt och beräknad respons hos dammen. Översta grafen visar utomhustemperaturen, mitten grafen illustrerar variation i krönförskjutning och nedersta variation i sprickbredd. Från Malm (2009)

I resultaten framgår att det generellt är en mycket god överensstämmelse mellan beräknad och uppmätt respons, dock under perioden april – maj så underskattar den numeriska beräkningen den uppmätta krönförskjutningen. I den ovanstående beräkningen var dock islasten ej beaktad. En arbetshypotes är att denna skillnad kan bero på islast. Skillnaden mellan beräknad och uppmätt krönförskjutning är maximalt ca 3 mm, enligt Figur 3-1. En nackdel med dessa mätningar är dock att dessa sker manuellt med ca ett mätvärde per månad. Om istället en automatiserad kontinuerlig registrering hade använts för pendelmätningen, se avsnitt 2.2, skulle en avsevärt bättre utvärdering vara möjlig.

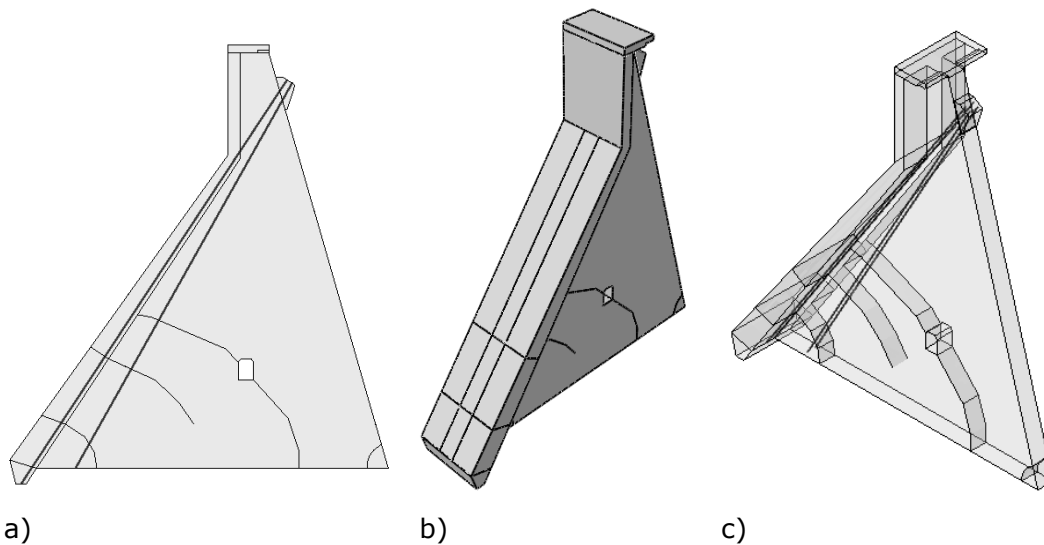
I efterföljande avsnitt beskrivs de numeriska beräkningar som genomförts för motsvarande lamelldamm i syfte att studera möjligheten att använda olika typer av uppmätta mätdata för att kunna bakåtanalysera islastens storlek. För att en viss typ av mätdata ska vara tillämplig för detta så krävs det att en signifikant förändring i respons sker i beräkningsmodellen när islasten beaktas.

I föreliggande rapport presenteras endast resultat för denna stora monolit med en höjd på 40 m. Islastens inverkan förväntas dock vara än mer dominerande på lägre monoliter, och därmed är det möjligt att vissa typer av mätdata går att använda för mindre monoliter trots att dessa ger relativt små utslag vid denna stora monolit. Nedan ges först en kortfattad beskrivning av beräkningsmodellen och därefter presenteras två avsnitt där dels lämpliga mätdata för utvärdering av islast presenteras respektive mätdata som anses vara mindre lämpliga.

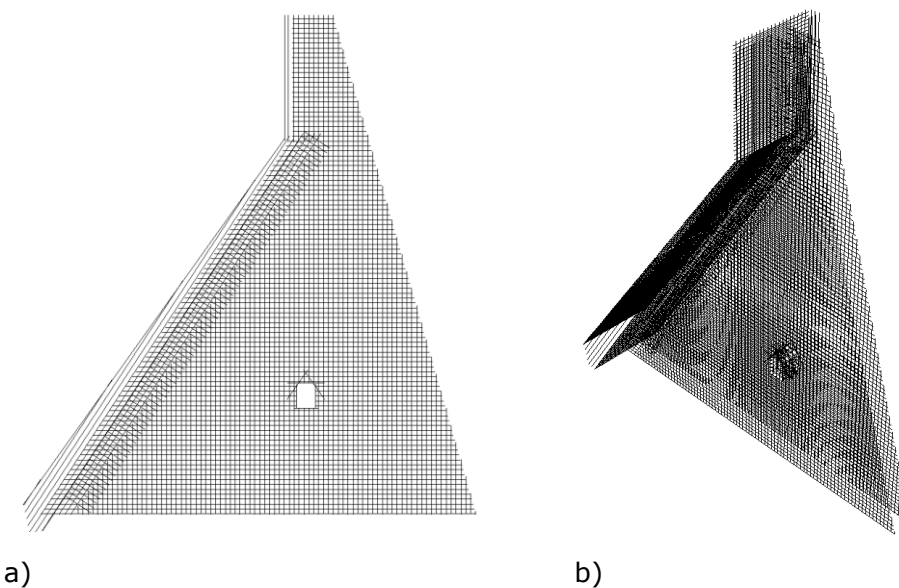
3.1 Numerisk modell

Den numeriska modellen som används i detta projekt baseras på tidigare Elforskprojekt, se t.ex. Malm (2009), men framförallt baserat på den vidareutvecklade modellen som presenterades av Malm (2014). Modellen beskrivs endast i korthet i denna rapport, för utförligare beskrivning se Malm (2014).

Beräkningsmodellen som representerar en betongmonolit består av ca 120 000 linjära första ordningens 3D solidelement. Observerade sprickor är modellerade som fysiska sprickplan i modellen, dvs med diskreta sprickor, för att detaljerad information ska kunna fås om spricköppning etc, se Figur 3-2. Slakarmering är också inkluderad i hela modellen och bär laster i sprickplanen. Slakarmeringen är modellerad där varje armeringsjärn är modellerad som stångelement, se Figur 3-3. Totalt används ca 42 000 linjära första ordningens 3D stångelement för att beskriva slakarmeringen. Storfinnforsen är även förstärkt med bergsförankrade spännkablar som går genom stödskivan ned i berggrunden. Dessa är också inkluderade i modellen, som förspända stångelement, ca 450 linjära första ordningens 3D stångelement. Totalt så motsvarar modellen ca 725 000 frihetsgrader.



Figur 3-2 Numerisk FE modell som illustrerar inkluderade sprickplan samt förspänningskablar.

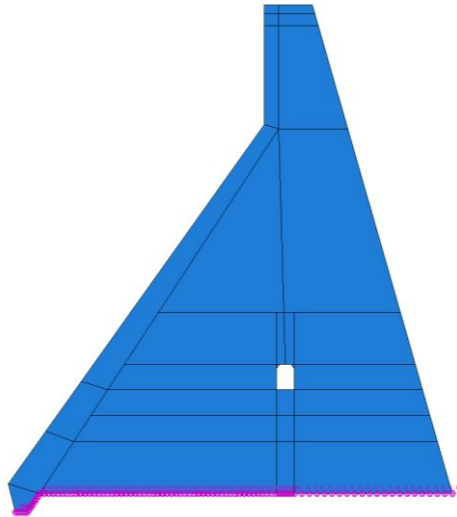


Figur 3-3 Slakarmering modellerad som stångelement.

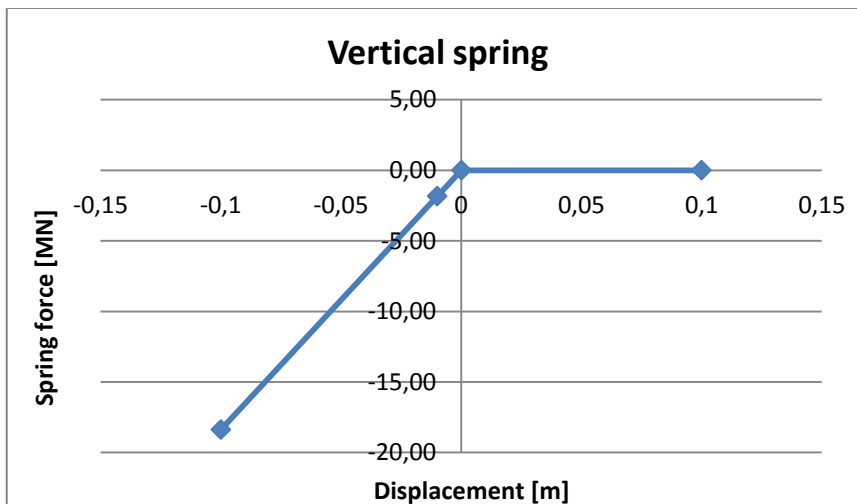
I modellen beaktas som ett första steg laster orsakade av hydrostatiskt vattentryck, upptryck under frontplattan, egentyngd av monoliten samt förspänning av spännkablarna. I nästföljande steg appliceras islasten som ökas linjärt. Orsaken till att islasten appliceras separat är för att dess enskilda inverkan på monoliten ska kunna studeras.

Underliggande berg är beaktat med hjälp av horisontella och vertikala fjädrar, se Figur 3-4, där fjäderstyvhetera beräknats för att motsvara 40 m berg (samma som monolitens höjd). De vertikala fjädrarna är modellerade som

icke-linjära där de endast ger mothåll vid nedåtriktad rörelse (dvs med obefintlig styvhet för uppåtriktad rörelse), se Figur 3-5, för att på så sätt kunna beskriva eventuell stjälpning.



Figur 3-4 Fjädrar under monoliten som representerar underliggande berg.

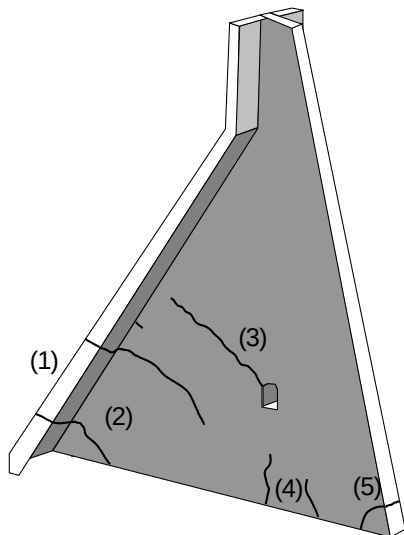


Figur 3-5 Fjäderstyvhet på vertikala fjädrar.

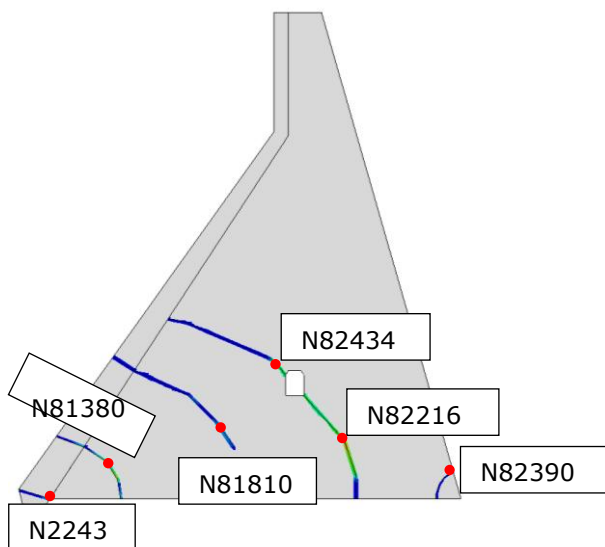
3.1.1 Observerade sprickor

De olika typer av sprickor som har observerats på monoliterna är illustrerade i Figur 3-6, se Malm (2009). Dessa observerade sprickor är inkluderade i beräkningsmodellen och modellerade som diskreta sprickor. Syftet med detta är dels för att monolitens reducerade styvhet pga sprickor ska beaktas, men framförallt för att kunna erhålla information om hur t.ex. sprickbredden hos de olika sprickorna förändras vid beaktad islast, för att på så sätt kunna utröna om sprickbreddsgivare skulle kunna användas för bakåtberäkning av islastens storlek.

I Figur 3-7 illustreras de sprickor som är inkluderade i modellen samt tillhörande noder där sprickbreddsvariationen övervakas.



Figur 3-6 Observerade spricktyper på den verkliga monoliten.



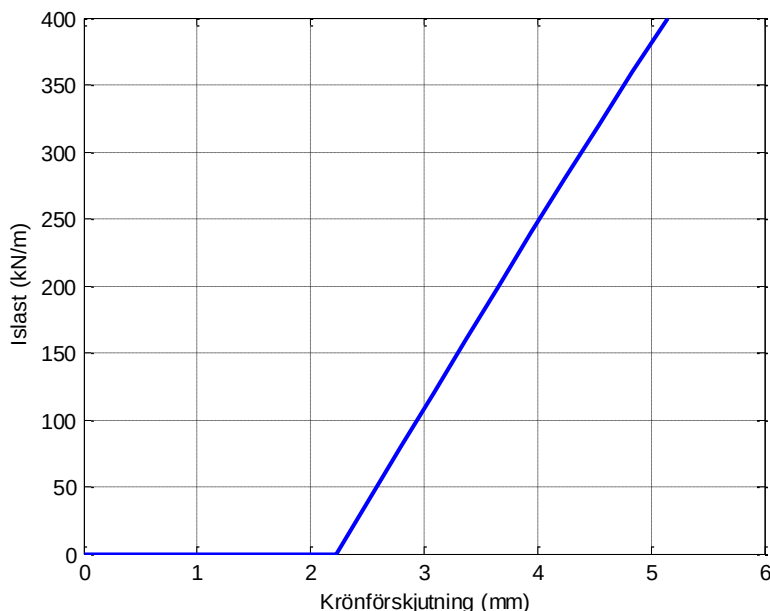
Figur 3-7 Markerade sprickor som studeras.

3.2 Potentiellt lämpliga mätdata för bakåtanalys av islast

Baserat på genomförda analyser med beräkningsmodellen i avsnitt 3.1, så presenteras i detta avsnitt de typer av mätdata som ger goda indikationer för att kunna användas vid bakåtberäkning av islast.

3.2.1 Krönförskjutning

För att studera krönförskjutningens variation vid islastbelastning har ytterligare en analys genomförts där islasten ökas kontinuerligt för att ta fram relationen mellan krönförskjutning och islastens storlek, se Figur 3-8.



Figur 3-8 Krönförskjutning vid analys med ökande islast.

Resultatet från denna beräkning visar att krönförskjutningen ökar med ca 1,5 mm om islasten är 200 kN/m. Under förutsättning att skillnaden mellan uppmätt och beräknad respons i Figur 3-1 enbart beror på islasten så krävs en islast som motsvarar ca 400 kN/m. Denna islast är mycket hög och det är därför rimligt att det finns ytterligare faktorer som i detta fall kan ligga bakom denna diskrepans. Rimliga orsaker kan i detta fall istället vara mätosäkerheter, då det t.ex. endast är krönförskjutningen vid ett tillfälle som ger denna stora diskrepans eller att temperaturerna som används som indata i beräkningsmodellen ej är tillräckligt detaljerade.

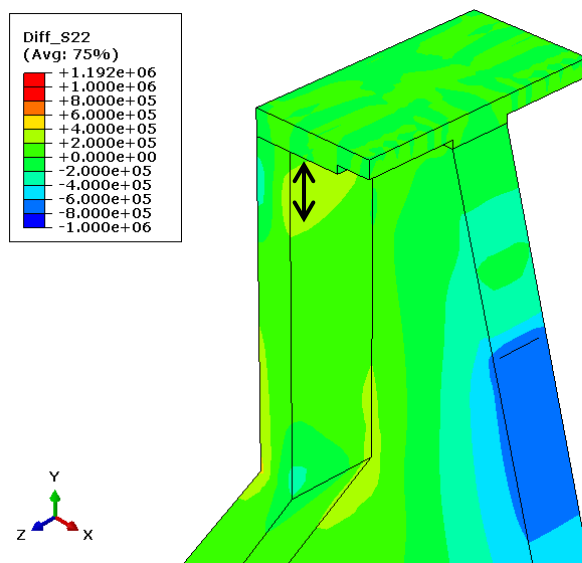
Oavsett detta, så visar dessa analyser på att krönförskjutningen är ett bra mått för att kunna beräkna islastens storlek. Med förfinade analyser för perioden då stora islaster förväntas samt tillräckligt detaljerad mätdata så går det teoretiskt att bedöma islastens storlek. Dessutom, Malm (2014) visade att för lamelldammar där isolerväggen finns installerad på nedströmssidan av stödsdämben så erhålls mycket små förändringar i krönförskjutningen på grund av omgivande temperatur. Som jämförelse visades att skillnaden i krönförskjutning mellan en varm sommar relativt en kall vinter var ca 2 – 4 mm (beroende på uppvärmning av det isolerade området under vintern) om isolerväggen är monterad på nedströmssidan av stödsdämben. Motsvarande skillnad i krönförskjutning för en oisolerad monolit var ca 9 mm. Skillnaden i krönförskjutning pga omgivande temperaturvariationer för de månader då islasten är av intresse är därmed avsevärt mindre än ovanstående värden. Vid

de fall det finns en isolervägg monterad på nedströmssidan borde det därmed vara möjligt att bedöma islastens storlek med relativt låg felmarginal.

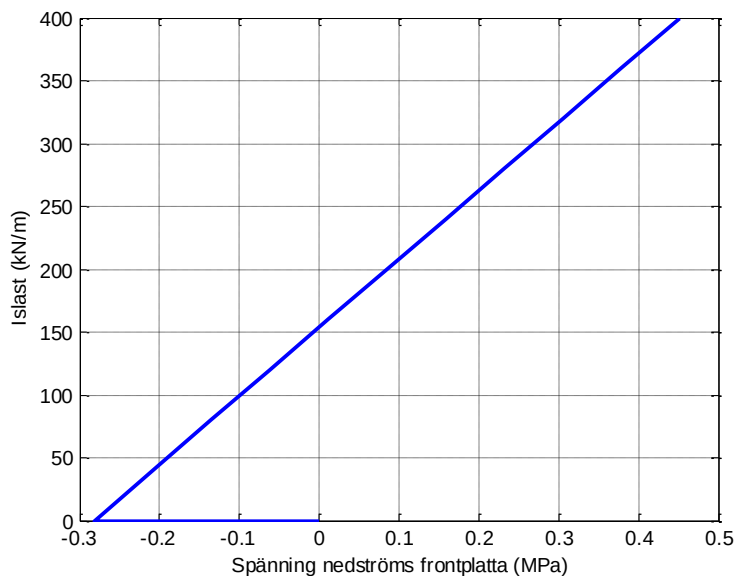
3.2.2 Töjningsmätning på frontplattan

En annan typ av mätdata som kan användas för bestämning av islastens storlek är uppmätta töjningar på nedströmssidan av frontplattan, vilket illustreras i Figur 3-9. I figuren illustreras spänningsskillnaden mellan fallet utan islast och fallet då islasten är 200 kN. För detta fall är differensen i vertikal spänning ca 0,4 MPa. Även på stödsnivåns nedströmssida illustreras ett område som utsätts för stora förändringar i spänning vid en islast, ca 0,8 MPa i tryckspänning enligt Figur 3-9. Dock bedöms det finnas större svårigheter med att mäta vid detta område utav två orsaker;

- Om en isolervägg finns monterad på lamelldammen som innesluter hela stödsnivån, så är detta område otillgängligt pga isolerväggens infästning.
- Om isolerväggen ej finns monterad så att nedströmssidan på stödsnivån är innesluten, så kommer detta område att utsättas för variationer i temperatur från omgivande luft och solstrålning. Detta innebär att det kan bli svårare att utvärdera islastens storlek.



Figur 3-9 Område på frontplattans nedströmssida där stora förändringar i vertikal spänning förväntas vid en islast.



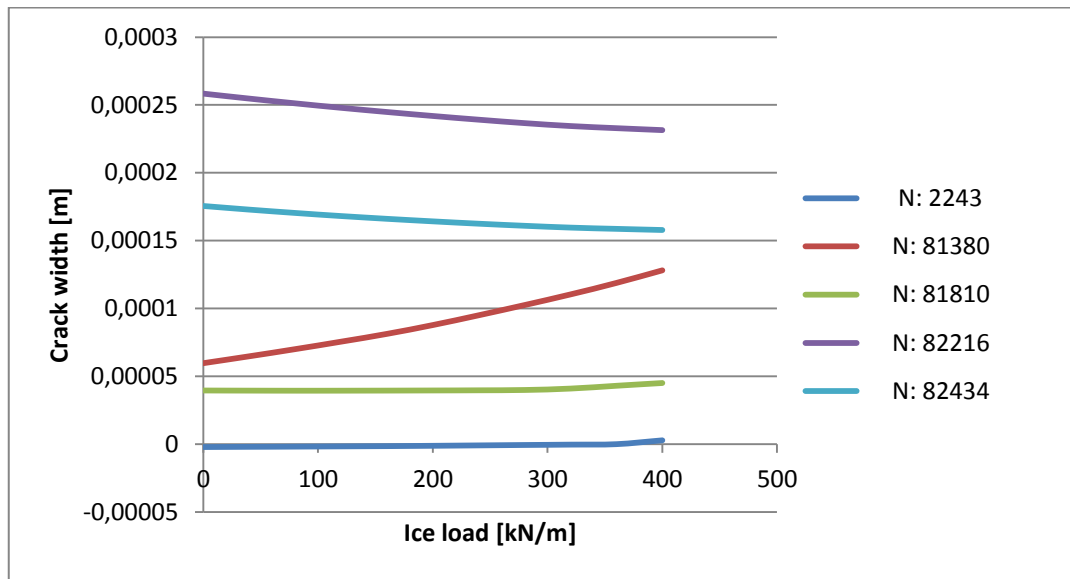
Figur 3-10 Förändring i vertikal spänning på frontplattans nedströmssida vid ökande islast.

3.3 Mindre lämpliga mätdata för bakåtanalys av islast

Baserat på genomförda analyser med beräkningsmodellen i avsnitt 3.1, så presenteras i detta avsnitt de typer av mätdata som verkar vara mindre lämpliga att använda vid bakåtberäkning av islaster. Orsaken till att dessa anses vara mindre lämpliga är att motsvarande typer av givare monterade på motsvarande positioner på en riktig lamelldamm skulle ge mycket små förändringar i mätvärden vid islaster.

3.3.1 Variation i sprickbredd

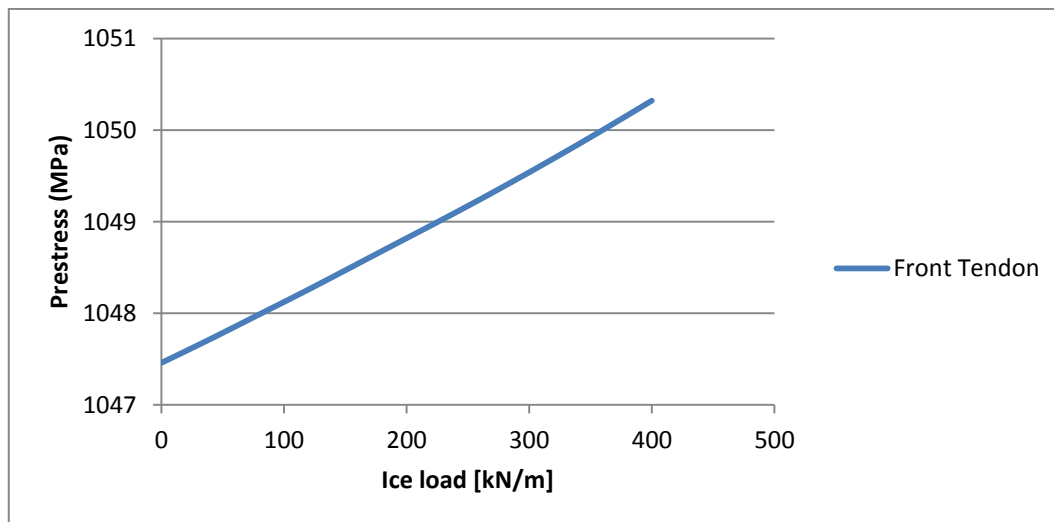
Samtliga av de studerade sprickorna visar på mycket små förändringar i sprickbredd när att islasten succesivt ökas inom intervallet 0 – 400 kN/m. Den största ökning i sprickbredd blir enligt dessa analyser endast 0,07 mm vid en islast på 400 kN/m för den lutande sprickan i stödskivan som går mellan frontplatta och stödskiva (benämns typ 2 i Figur 3-6).



Figur 3-11 Variation i sprickbredd vid successivt ökande islast.

3.3.2 Spännkablers spännkraft

Variationen i spännkraft vid successivt ökande islast hos de bergsförankrade spännkabellarna som finns eftermonterade på monoliterna illustreras i Figur 3-12. Från de genomförda analyserna framgår att endast en liten ökning i spännkraft uppstår vid den successivt ökande islasten. Mätvärden från eventuella lastceller som finns monterade vid spännkabellarnas förankringar är därmed mindre lämpliga att använda för bakåtanalys av islastens storlek.



Figur 3-12 Variation i spännkraft vid successivt ökande islast.

4 Sammanfattning och rekommendationer

Syftet med föreliggande fördjupade förstudie var att analysera möjligheterna att genomföra direkt mätning av islast mot betongdammen samt att bakåträkna islasten genom numeriska analyser.

En inventering av befintliga mätmetoder visar att det finns flera metoder som kan vara möjliga att tillämpa, såsom Medof panel, registrering av stödkrafter via lastceller, töjningsgivare med svängande sträng, taktila givare och fiberoptisk mätning av töjning. Vid ett framtida projekt där mätning av islast genomförs på en befintlig damm är det lämpligt att utforma mätutrustningen på så sätt att mätning kan fortgå under flera års tid med liten underhållsinsats. Detta ställer stora krav på givarnas tillförlitlighet och robusthet.

Den metod som sannolikt bäst uppfyller dessa krav är den metodik som användes mot fyren vid Norströmsgrund, med användning av lastceller monterade i en låda. En annan intressant metodik är användningen av taktila givare där utvecklingen går mycket snabbt. Nackdelen med de båda ovanstående metodikerna är dock att enbart tryckkrafter kan registreras. Eventuella dragkrafter kommer inte registreras vilket innebär att den resulterande kraften kan överskattas. En metodik där eventuella dragkrafter försummas är emellertid konservativ och är kanske något som kan accepteras. Sannolikt utgörs huvuddelen av de krafter som verkar på monoliten av tryckkrafter. En kombination av lastceller och trådtöjningsgivare kanske skulle kunna vara en framkomlig väg, men det är något som måste studeras närmare i samband med ett framtida projekt. Sammanfattningsvis visar genomgången av de direkta metoderna för mätning av islast direkt mot dammen att en sådan metodik är genomförbar.

För att studera möjligheterna att använda numeriska analyser för att bakåträkna islasten användes en befintlig numerisk modell på en 40 m hög lamelldammsmonolit från Malm (2014). Studien visade att mätning av krönförskjutning med direkt pendel sannolikt är den metod som har bäst förutsättningar att kunna användas för bakåtanalysen. Enligt utförda analyser är krönförskjutningen cirka 1,5 mm vid en islast på 200 kN/m. Pendelns mätnoggrannhet är cirka 0,1 mm, vilket skulle motsvara en islast på 13 kN/m. Vid tidigare analyser uppgick skillnaden mellan mätningar och FE-analyser till cirka 1-2 mm. Detta var dock baserat på pendelmätningar en gång i månaden. Med kontinuerlig registrering av mätdata från krön deformationer är det sannolikt att skillnaden kan reduceras kraftigt. Om dammen även är försedd med en isolervägg med optimal placering för att minska krönets rörelser är det troligt att skillnaden kan reduceras ytterligare. Den största osäkerheten ligger dock i den numeriska modellen. Vilken noggrannhet som kan uppnås med den numeriska modellen är i dagsläget oklar men 0,3 till 0,4 mm kan sannolikt vara möjligt att uppnå, vilket skulle innebära att islaster på 40-50 kN/m skulle kunna bakåträknas från krön deformationen.

En annan möjlig mätmetod är trådtöjningsgivare monterad på nedströmssidan av monolitens frontplatta. Numeriska analyser visar att skillnaden i spänning på frontplattans nedströmssida på grund av en islast på 200 kN/m uppgår till cirka 400 kPa. Detta värde ligger i det intervall för mätnoggrannhet som en standardkalibrerad trådtöjningsgivare har. Vid enskild kalibrerad givare är noggrannheten cirka 90 kPa, vilket motsvarar en islast på 45 kN/m. En svårighet med töjningsgivare är dock att dessa mäter på ett litet område och möjligheten att använda resultatet från dessa töjningsgivare kan reduceras vid inverkan från t.ex. lokal uppsprickning i anslutning till givaren.

Sammanfattningsvis visar analyserna med den numeriska modellen att bakåtanalys av islast är svårt men borde vara teoretiskt möjligt. Det är möjligt att det krävs islaster på 40-50 kN/m för att monolitens förändrade beteende på grund av islast ska kunna bakåtanalyseras. Det är inte säkert att islaster i denna storleksordning uppträder i ett magasin varje år och det är därför önskvärt att mätningarna fortgår under ett flertal år.

Baserat på ovanstående resonemang rekommenderas att ett projektförslag utarbetas där islasten mäts direkt mot en dammonolit. I anslutning till den direkta mätningen av islasten bör även monoliten instrumenteras med direkt pendel och trådtöjningsgivare för numerisk bakåtanalys av islasten. Även om metodiken med bestämning av islastens storlek med numerisk bakåtanalys är svårare jämfört med den direkta mätningen är merkostnaden för en sådan kompletterande instrumentering relativt låg. Det ligger också ett framtida intresse i att undersöka möjligheten att utveckla en kompletterande, och mindre kostsam, metodik till den direkta mätningen.

5 Referenser

Ansell, A., Björnström, J., Ekström, T., Hassanzadeh, M., Unosson, M. (2008). *Spricktillväxt i labelldamm – Tillämpning av icke-linjära modeller – Del I*. Elforskrapport 08:21. Elforsk. Tillgänglig från: http://www.elforsk.se/Rapporter/?download=report&rid=08_21

Ansell A, Ekström T, Hassanzadeh M, Malm R. (2010). Crack propagation in buttress dams : Application of non-linear models - Part II. Elforskrapport 10:69. Elforsk. Tillgänglig från: http://www.elforsk.se/Rapporter/?download=report&rid=10_69

Björnström, J., Ekström, T., Hassanzadeh, M. (2006). Spruckna betongdammar – Översikt och beräkningsmetoder. Elforskrapport 06:29. Elforsk. Tillgänglig från: http://www.elforsk.se/Rapporter/?download=report&rid=06_29

Fransson, L. (2001) Development of ice load panels and installation at lighthouse Norströmsgrund. Validation of Low Level Ice Forces on Coastal Structures (LOLEIF) EU MAST III Project – Contract No MAS3-CT 97-0098. LOLEIF Report No. 5-A.

Geokon (2014a) Pendulum System, Model BGK-6850A. <http://www.geokon.com/BGK-6850A>

Geokon (2014b) Strain Gauges, Model 4000. <http://www.geokon.com/4000>

Geokon (2014c) Displacement Transducers, Model 4420. <http://www.geokon.com/crackmeters>

Malm, R. (2009) *Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method*. PhD thesis. Trita-BKN.Bulletin 97.Department of Civil and Architectural Engineering.KTH Royal Institute of Technology. Stockholm: KTH; 2009. Tillgänglig från: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:209582/FULLTEXT01.pdf>

Malm, R. (2014). Storfinnforsen & Ramsele – Ny klimatvägg och instrumenteringsbehov. Presentation vid SVC dagarna 2014. Tillgänglig från: http://www.elforsk.se/Global/SVC/SVC-dagarna%202014/Richard_Malm_SVC_dagarna_SFF_RSE_2014.pdf

Zhi Zhou, Chunguang Lan, Jinping Ou (2005) A novel ice-pressure sensor based on dual FBGs. Smart Structures & Materials/NDE Joint. Conference: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, SPIE, San Diego, USA.



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se