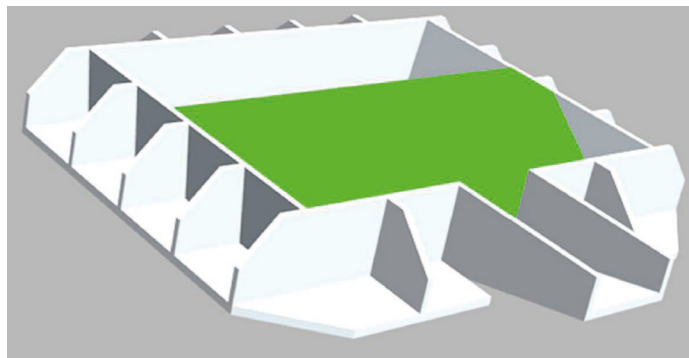


Testdamm i Älvkarleby för skadedetektering

En försöksdamm har under hösten 2019 byggts i Älvkarleby. Anläggningen ger möjligheter att, under realistiska förhållanden, studera defekter i fyllningsdammar. Syftet med projektet är att undersöka möjligheten att detektera inbyggda skador i dammen med ett antal olika metoder. Arbetet kommer leda till rekommendationer för instrumentering av fyllningsdammar. Projektet är ett samarbete mellan Vattenfall Research & Development, Luleå tekniska universitet (LTU), Lunds tekniska högskola (LTH), Uppsala universitet (UU) samt HydroResearch.



Figur 1: Stödkonstruktion i betong.

Anläggningen består av en stödkonstruktion nedsänkt i marken, *figur 1*. Stödkonstruktionen har måtten 20x16x4 m och är tillverkad i betong. De två sidor som är 16 meter, mot vilka dammens anslutningar kommer att ligga an, har en lutning om 1H:8V. Bottenplattan har tillverkats i betong armerad med glasfiber för att bättre efterlikna en berggrund. I denna stödkonstruktion kan fyllningsdammar byggas och utsättas för ensidiga vattenlastar likt verkliga dammar. Över hela stödkonstruktionen har ett tält placerats för att skydda anläggningen mot väder och vind. Anläggningen ger möjligheter att under realistiska förhållanden noggrant studera en fyllningsdamms beteenden vid exempelvis skadeförlopp, snabbare reglering av dammagasinet, borrning i damm, reparationsinjektering, etc.



Johan Lagerlund
Vattenfall R&D, Luleå tekniska universitet



Jasmina Toromanovic
Luleå tekniska universitet



Torleif Dahlin
Lunds tekniska högskola

Observera dammens beteende

Det första projektet som avses att utföras i anläggningen är att utveckla detektionsmetoder för att finna svagheter i fyllningsdammar. För att genomföra detta har man i stödkonstruktionen byggt en fyllningsdamm med ett visst antal väldefinierade defekter, *figur 2*. Defekternas placering och antal är för de som genomför mätningarna okända. Detektionsmetoder av intresse är resistivitmätningar (LTH), seismiska mätningar (UU) och temperaturmätningar (HydroResearch). Syntetisk förhandsmodellering har utförts för att säkerställa att detektionsmetoderna kan hitta defekterna. Geotekniska mätningar (LTU) kommer följa upp hur dammens mekaniska beteende ändras över tid.

Fyllningsdammen för detta första projekt är dimensionerad enligt riktlinjer och krav i i kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, RIDAS [1]. En sektion av dammen visas i *figur 3*. Dammen är 20 meter lång, 4 meter hög och 15

meter i basen. Bredden på krönet är 3 meter. Fyllningsdammen blev färdigbyggd i mitten av november 2019. Fram till december samma år kommer installationer av instrumentering färdigställas och kalibreras innan de "riktiga" mätningarna påbörjas. Vatten kommer då fyllas på och under denna första fyllning studeras fyllningsdammens beteende mycket noggrant. Detta första projekt förväntas pågå under två år. Vattenfall R&D står för investeringen att bygga och förvalta riggen och testdammen.

Geoteknisk mätutrustning

Fyllningsdammen är instrumenterad med olika typer av geoteknisk instrumentering för övervakning av dammens mekaniska beteende. Positioner och typ av utrustning för den geotekniska utrustningen visas i *figur 4*. Rörelser förväntas ske i fyllningsdammen, speciellt i samband med ändrade belastningsfall, som till exempel när magasinet fylls upp med vatten för första gången. En sektion av fyllningsdammen har därför utrustats med inklinometrar. Inklinometrarna är placerade i uppströms stödfyllning, tät kärna och nedströms stödfyllning. Istället för traditionella inklinometrar, som endast mäter horisontella rörelser, har inklinometrar av typen SAA (Shape Accelerometer Array) installerats. Denna typ av inklinometer möjliggör mätning av rörelser i dammen i x-, y- och z-led. Dessa instrument installerades i segment om 25 cm i rör i dammen. Kontinuerliga



Chris Juhlin
Uppsala universitet



Sam Johansson
HydroResearch



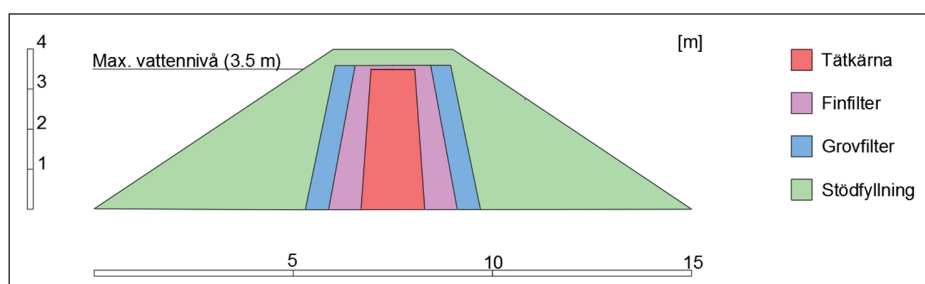
Figur 2: Byggande av dammen. Sett från höger anslutning.

mätningar kommer utföras. Rörelser inuti dammkroppen kommer följas under projektets gång.

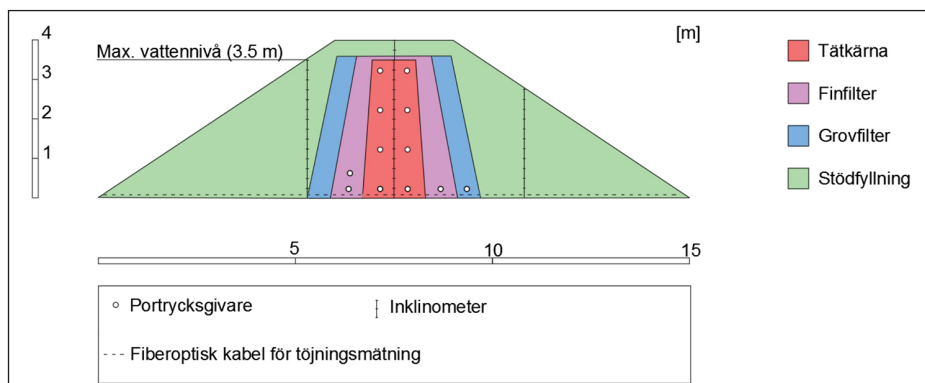
Porttrycksgivare (vibrating wire piezometrar) har byggts in i filter och tåtkärna i dammen, enligt figur 4. Av de 12 installerade porttrycksgivarna, återfinns åtta stycken i tåtkärnan. Denna installation möjliggör kontinuerlig övervakning av porttrycket i dammen. Man kommer till

exempel kunna följa hur porttrycken byggs upp under uppfyllning, samt hur lång tid det tar för moränen i tåtkärnan att bli vattenmättad

Fiberoptiska kablar för mätning av töjning och temperatur har installerats 15–20 cm över fyllningsdammens botten. Kablarna har installerats i totalt fyra sektioner av dammen, rakt igenom - nedströms till uppströms. Töjningarna



Figur 3: Sektion.



Figur 4: Geoteknisk mätutrustning.

mäts varje meter i kabeln med korrektion för temperaturinducerade variationer. Mätningar planeras vid ändrade belastningsfall, i synnerhet då vattenytan i magasinet ändras samt när fyllningsdammen vattenmättas.

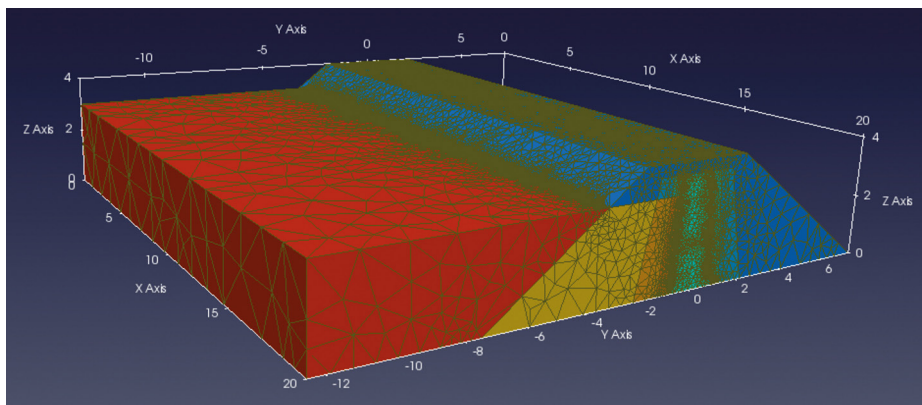
Mätdata från de geotekniska mätningarna kommer att användas i numerisk modellering. Finita elementmodeller kan kalibreras mot mätdata från dammen. På så vis går det att erhålla värden på materialparametrar i dammkroppen.

Resistivitet – system för övervakning med geoelektrisk tomografi

Ett mätsystem för elektrisk resistivitetstomografi (ERT), som även kan mäta inducerad polarisation (IP) i tidsdomän, har installerats i dammkroppen. Metoden bygger på galvanisk mätning av de elektriska egenskaperna, där kontrollerade strömpulser skickas mellan två elektroder samtidigt som den elektriska potentialen mäts mellan ett eller flera par elektroder, se [2] för en lite utförligare metodbeskrivning.

Eftersom de simulerade defekterna är placerade i tåtkärnan, har elektroderna placerats i anslutning till denna för att ge så hög känslighet för mätningarna som möjligt. Sammanlagt 224 elektroder i form av rostfria stålplattor har installerats i två parallella linjer på vardera tre nivåer längs tåtkärnan, ovanpå krönet samt i uppströms- och nedströmsfiltren på halva höjden samt vid botten. Vidare har elektroder installerats i uppströms- och nedströmsfiltren längs dammens anslutningar. För analys och tolkning krävs invers numerisk modelltolkning, vilket kommer göras i 4D (3D samt tid som fjärde dimension). Figur 5 visar en finit elementmodell av dammen från förstudien, och liknande kommer användas för analys och tolkning av data.

De typer av defekter som byggts in i testdammen är generellt sett svåra att upptäcka i undersökningar gjorda vid ett enstaka tillfälle. Analys av mätdata från olika tidpunkter med variation i nivå eller temperatur på magasinetsvatten ger betydligt bättre förutsättningar för att detektera zoner med avvikande hydrauliska egenskaper. Mätning före, under och efter en höjning av nivån i vattenmagasinet ger möjlighet att upptäcka zoner med högre hydraulisk konduktivitet genom att vatteninnehållet i och kring dessa zoner ändras snabbare än i andra delar av dammen. Detta leder till förändringar i resistiviteten. En variation i temperatur i vattenmagasinet kommer på liknande sätt fortplantas in i dammen och tåtkärnan med olika hastighet beroende



Figur 5: FE-modell av dammen, (skapad av Rayhaneh Norooz).



Figur 6: Seismograferna (gula lådor) används för att mäta vibrationerna från de inbyggda sensorerna och borrhålen längs dammkrönet som används för aktivt generera seismiska vågor.

på tät kärnans hydrauliska egenskaper, och därigenom ge upphov till en variation i resistivitet. Mätningar kommer utföras automatiskt minst en gång per dygn i samband med att vattennivå och temperatur ändras.

Seismik

Seismiska vågor är som ljudvågor (kompressionsvågor) men fortplantar sig genom fast material. I likhet med ljudvågors fortplantning i luft, fortplantas seismiska vågor i fasta material. Hur de breder ut

sig och reflekteras beror på vad materialet har för egenskaper. Det är våghastigheten, densiteten och dämpningsfaktorn av materialet som främst bestämmer hur de seismiska vågorna fortplantar sig. Till skillnad från i luft och vatten, kan både kompressionsvågor och skjuvvågor fortplanta sig i fasta material. Kompressionsvågor är mest känsliga för hur komprimerbart materialet är, medan skjuvvågor är mest känsliga till skjuvbarheten. Mätning av gångtiderna och det reflekterade vågfältet av dessa

vågor kan ge information om materialets egenskaper. I löst material kommer vågorna att fortplanta sig långsammare än i mer kompakt material. Om det finns starka kontraster i hastighet eller densitet inom volymen som undersöks kommer vågor att reflekteras. Dessa reflektioner kan ge information om var skador finns i fyllningsdammen.

I testdammen har fem kablar med 24 hydrofoner i varje installerats. Två av dessa kablar ligger längst ner i fyllningsdammen nära tät kärnan, uppströms och nedströms. De tre sista kablarna ligger ovanför tät kärnan. Seismiska vågor kommer genereras i en rad av 25 halvmeter djupa borrhål längs krönet av fyllningsdammen, figur 6. Dessa hål fylls med vatten och i varje hål sänks en källa ner som omvandlar en elektronisk puls till seismisk energi, en ”sparker”. Dessutom finns fyra stycken 4 meter djupa borrhål ner till botten av fyllningsdammen invid anslutningarna. Dessa kommer användas för att bestämma de storskaliga elastiska egenskaperna av fyllningsdammen genom att mäta gångtider för kompressions- och skjuvvågor. För dessa hål används en borrhålshammare som genererar bägge vågtyperna.

Mätningar kommer att utföras i kampanjer genom att aktivera de seismiska källorna med jämna mellanrum. Om samma respons från en tänkbar defekt syns vid flera tillfällen, stärks misstankarna att metodiken har hittat en defekt. Dessutom finns möjlighet att titta på skillnader i responsen från de olika kampanjerna för att se om förändringar i dammens elastiska egenskaper kan kartläggas med tiden. Till exempel, kan förändring i den storskaliga kompressionsmodulen följas allteftersom dammen belastas. Dessa förändringar är viktiga för de geotekniska aspekterna när det gäller bevakning av dammar.

Förutom den aktiva seismiken, kommer passiv seismik att genomföras. Passiv seismik innebär att man ”lyssnar” på dammen utan att på eget initiativ inducera vågor. Område i fyllningsdammen med högre läckage ger signaler som möjligtvis kan detekteras med vibrationssensorer. Dessa mätningar måste ske när det är

relativt lugnt i området, till exempel under helger eller nätter, eftersom det annars riskerar att försvinna bakom brus från annan verksamhet inom laboratoriets område.

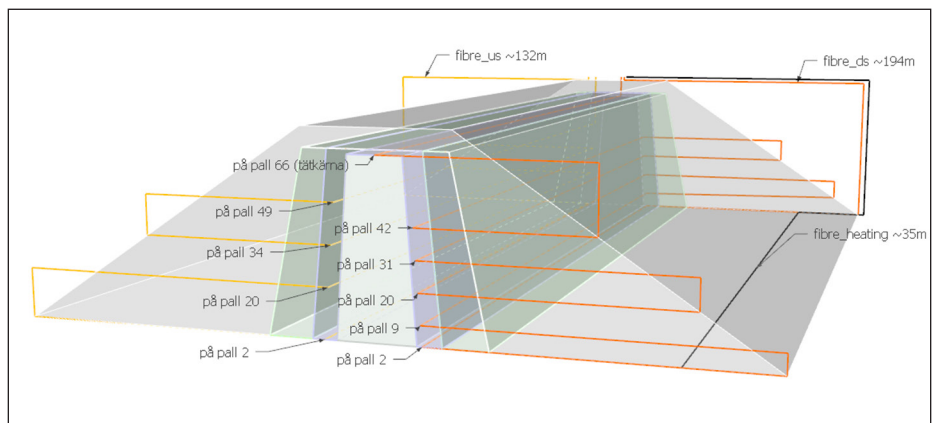
De seismiska mätningarna kommer inte ge ett omedelbart svar om en defekt har hittats. De krävs noggrann analys av insamlad data. Ett av målen med projektet är att hitta rutiner och algoritmer som kan identifiera möjliga defekter i det data som samlas in. Därför läggs betydande resurser på just analys av insamlad data. Ambitionen är att en metodik kan utvecklas som kan tillämpas på större fyllningsdammar.

Optisk fiber – läckageövervakning genom temperaturmätningar

Temperaturmätningar är numera en vanlig metod för att övervaka vattenläckage genom fyllningsdammar. Metoden har god förmåga att upptäcka även små läckage, samt att följa eventuella förändringar av läckage. Grundprincipen är enkel; läckagevattnets temperatur bestäms av vattentemperaturen i magasinets årstidsvariation. Ju högre läckaget är, desto mer varierar temperaturen i dammen under året. Även andra faktorer som vattnets strömlängd, avstånd till markytan, termiska egenskaper måste beaktas.

Distribuerad temperaturmätning i optiska fiber (DTS, Distributed Temperature Sensing) utvecklades successivt i slutet av 1990-talet. Denna mätteknik visade sig vara utmärkt för temperaturmätning i dammar. Detta innebar ett genombrott för tekniken att använda temperatur för läckageövervakning. Mätning i optiska fiber ger information om temperaturen utmed hela kabeln med en upplösning av 0,12 m som lägst. Mätning med noggrannhet $<0,1^{\circ}\text{C}$ kan göras upp till tiotals kilometers längd. Genom att kablarna kan läggas längs hela dammen kan små lokala avvikelser ses utmed hela dammens längd. Eftersom temperaturmätningar kan göras med hög noggrannhet kan små lokala läckageförändringar upptäckas. Idag finns kablar installerade i uppemot 100 dammar i Sverige, såväl inom kraftindustrin som gruvindustrin.

Vid ny- eller ombyggnation av fyllningsdammar är installation av optisk fiber numera nästintill standard. För delaktigast är att kunna installera fiber intill dammens tåtkärna eller i dess nedre delar, vilket endast är möjligt vid nybyggnation av dammar. I testdammen har kablar lagts på olika nivåer i både upp- och nedströmsfiltret, på krönet, samt i dammtån, *figur 7*.



Figur 7: Placering av optiska kablar för temperaturmätning i experimentbyggnadsdammens uppströmsfilter, på tåtkärnans krön, i nedströmsfiltret, samt i dammtån.

Att kunna installera fiber på ett så omfattande sätt som gjorts i testdammen är inte vanligt, men har gjorts i detta fall eftersom syftet är att detektera de inbyggda defekternas läge så noggrant som möjligt både i längsled och höjdd. Vid praktisk tillämpning av metoden i befintliga fyllningsdammar är syftet främst att upptäcka läget för läckageförändringar längs dammen. För detta används vanligen en kabel längs dammtån vilket oftast är tillräckligt. Inom forskningsprojektet är det däremot motiverat att mäta längs många mätlinjer. Den tillkommande informationen kommer att bidra till ökad förståelse som kan komma till användning vid utvärdering av dammar där information från endast ett fåtal mätlinjer finns.

I testdammen har även en värmekabel med optisk fiber installerats. Genom att tillföra el utvecklas värme runt kabeln. Hur snabbt temperaturökningen sker vid uppvärmning beror av vattenströmningen runt kabeln. Även temperaturavklingningen efter att uppvärmningen avslutats bestäms av vattenströmningen. Denna metodik kommer också att testas inom forskningsprojektet. Mätningarna i testdammen kommer att utföras med mätinstrumentet Silixa XT-DTS, vilket har en samplingslängd av 0,25 m. Mätningarna kommer att utföras under hela testperioden.

Sammanfattning

En anläggning för att testa fyllningsdammar under olika förhållanden har byggts i Älvkarleby. Anläggningen kommer att tas i bruk under tidig vinter 2019. Med denna anläggning kommer man i det första projektet utveckla metoder för att upptäcka skador i en fyllningsdamm samt undersöka hur vattenmättningsprocessen av en fyllningsdamm går till.

Testdammen i Älvkarleby kommer noga övervakas under projektets gång. För övervakning av dammens mekaniska

beteende nyttjas den geotekniska mätutrustningen, där deformationer, portryck samt töjningar mäts. För att upptäcka variationer i materialet, som till exempel ändrad konduktivitet eller lösa zoner, kan resistivitetstomografi och seismik användas. Fiberoptiska temperaturmätningar kommer kunna visa på skillnader i vattenflöden i dammen.

Genom att instrumentera dammen med olika typer av övervakningsinstrument, är målsättningen att detektera inbyggda skador. Detta arbete är tänkt att vara till hjälp för instrumentering av befintliga fyllningsdammar, samt i dammsäkerhetsarbete med att kunna detektera pågående processer i dammar.

Utöver huvudfinansieringen från Vattenfalls så bedrivs delar av forskarnas arbete med stöd från Energiforsk, Energimyndigheten och Svenskt Vatten-kraftcentrum (SVC). SVC har etablerats av Energimyndigheten, Energiforsk och Svenska Kraftnät tillsammans med Luleå tekniska universitet, Kungliga Tekniska Högskolan, Chalmers tekniska högskola och Uppsala universitet. Vid vidare intresse om dammen, kontakta Christian Bernstone, Vattenfall. ■

Referenser

- [1] Energiföretagen. (2019). *RIDAS – Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet*. Stockholm: Energiföretagen. www.energiforetagen.se/det-erbjuder-vi/publikationer-och-e-tjanster/e-tjanster-webbshop/ridas---energiforetagens-riktlinjer-for-damm-sakerhet/
- [2] Jonson P., Johansson L., Johansson S., Olsson P.-I. & Dahlin T. (2019) *Geofysiker, drönare och geologer ger tillsammans en bättre bild av berget*, Bygg & teknik, 1/19, 52-55.