# DEFORMATIONER OCH PORTRYCK I EN EXPERIMENTELL FYLLNINGSDAMM

# RAPPORT 2021:772





# Deformationer och portryck i en experimentell fyllningsdamm

Mätningar under dämningsupptag

CHRISTIAN BERNSTONE JOHAN LAGERLUND JASMINA TOROMANOVIC CHRISTOPHER JUHLIN

ISBN 978-91-7673-772-9 | © Energiforsk maj 2021 Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

# Förord

# Den experimentella fyllningsdammen i Älvkarleby har installerats med geoteknisk utrustning som bland annat består av portycksgivare, inklinometrar och optiska fibrer. Detta har gjort det möjligt att följa dammens beteende under uppfyllnad och drift.

Inom ramen för detta projekt har data samlats in och jämförts med modelleringar av portryck och deformationer. Vattenfall R&D har stått för uppdragets samordning, under ledning av Tekn. Dr. Christian Bernstone och Tekn. Lic. Johan Lagerlund. Utformning av instrumenteringsprogram, och bearbetning och analys av data har hanterats av Luleå tekniska universitet (LTU) och Uppsala universitet (UU):

- 1. Professor Jan Laue och Tekn. Lic. Jasmina Toromanovic vid Avdelningen för Geoteknik, LTU.
- 2. Professor Christopher Juhlin och Tekn. Dr. Silvia Salas Romero vid Institutionen för Geovetenskaper, UU.

Referensgruppen utgjordes av Henrik Arver (Vattenregleringsföretagen), Daniel Sjöstedt (Skellefteå kraft), Carl-Oscar Nilsson (Uniper), Sezar Moustafa Näsvall (Fortum), Jonas Hammarsson (Fortum) och Anders Sjödin (Statkraft).

Projektet har genomförts inom Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogram med medverkan från industrin och Svenska kraftnät. Författarna ansvarar för rapportens innehåll.



# Sammanfattning

Vattenfall R&D har vid laboratoriet i Älvkarleby byggt en experimentell fyllningsdamm med en utformning som motsvarar en konventionell svensk fyllningsdamm för vattenkraftändamål. Dammen innehåller inbyggda sensorkablar och konstgjorda defekter. Genom ett pågående blindtest undersöks möjligheterna till att kunna lokalisera dessa defekter. Samtidigt med blindtestet pågår ett arbete med att följa hur en fyllningsdamms egenskaper utvecklas från det att den har färdigställts. Det är denna senare del som omfattas av detta Energiforskuppdrag. Syftet med uppdraget är att undersöka utvecklingen av deformationer och portryck vid dämningsupptagning och under fortsatt drift med magasinet vid dämningsgräns.

Fyllningsdammen har försetts med en relativt omfattande geoteknisk instrumentering. Instrumenteringen möter de behov som finns för att utifrån dammens förutsättningar kunna validera geoteknisk modellering av beteendet i form av portryck, spänningsförhållanden och deformationer för ett tvärsnitt genom konstruktionen. Beräkningsverktyget PLAXIS har använts för att simulera dammkonstruktionens beteende. Modelleringsarbetet och med tillhörande geotekniska undersökningar i labb har till största delen genomförts av LTU i nära samarbete med Vattenfall R&D. Uppsala universitet har använt de i dammen installerade seismikkablarna (vars primära syfte är skadedetektering) för att bestämma tätkärnans elasticitetsmodul.

Denna rapport redovisar resultat uppnådda fram till hösten 2020. Sammanfattningsvis visar resultaten på de fördelar som finns med att genom avancerade beräkningar verifiera designparametrar och prognostisering av en fyllningsdamms funktion, men också på utmaningar. Med hjälp av FE-modellering kan det tidiga skedet efter färdigställd konstruktion beskrivas både vad gäller portryck och deformationer med rimlig tillförlitlighet.

Det finns potential till förbättringar genom ytterligare materialkarakterisering i labb och genom att förbättra modellens simulering av porundertryck. Resultaten visar vidare att instrumenteringen med portrycksgivare i tätkärna och filter ger värdefull information om dammens respons vid dämningsupptagning och kontinuerlig drift.

Nyckelord: Fyllningsdamm, Dammsäkerhet, Damminstrumentering, Deformation, Portryck.



# **Summary**

At the laboratory in Älvkarleby, Vattenfall R&D has built an experimental filling dam with a design that corresponds to a conventional Swedish embankment dam for hydropower purposes. The dam contains built-in sensor cables and artificial defects. An ongoing blind test examines the possibilities of being able to locate these defects. At the same time as the blind test, work is underway to monitor how the properties of the embankment dam develop from the time the dam was completed, during initial reservoir filling and during steady-state operation. It is this latter part that is covered by this research project. The purpose of the assignment is to investigate the development of deformations and pore pressures at reservoir filling and continued operation at the retention level.

The embankment dam has been equipped with a relatively extensive geotechnical instrumentation. The instrumentation meets the needs that exist to be able to validate geotechnical modeling of the behavior in the form of pore pressure, stress conditions and deformations for a cross section of the dam. An advanced finite element modelling tool (PLAXIS) has been used to simulate the behavior of the dam. The modeling work and associated geotechnical investigations in the lab has largely been carried out by LTU in close collaboration with Vattenfall R&D. Uppsala University has used installed seismic cables (which primary use is for the defect detection) to determine the elasticity modulus of the impermeable core.

This report covers results achieved up to the autumn of 2020. In summary, the results show the benefits of verifying design parameters and forecasting of an embankment dam's function through advanced finite element modelling tools, but also challenges. The numerical model is capturing the saturation process in the impermeable core. From both field and numerical modelling of deformations, the loading-unloading behavior is observed with reasonable reliability.

There is potential for improvement through further material characterization in the lab and, especially, by improving the model's simulation of negative pore pressures. The results also show that the instrumentation with pore pressure sensors in the core and filter provides valuable information about the dam's response to reservoir filling and continuous operation.

**Key words:** Embankment dams, Dam Safety, Dam Instrumentation, Deformation, Pore pressure.



# Innehåll

1	Inled	ning		8		
	1.1	Bakgru	und	8		
	1.2	Syfte o	och mål	8		
	1.3	Omfat	ttning och avgränsningar	8		
2	Vatte	Vattenfalls experimentdamm				
	2.1	Inledn	ning	9		
	2.2	Stödko	onstruktionens utformning	9		
	2.3	Fyllnir	11			
		2.3.1	Kravställning utifrån RIDAS	11		
		2.3.2	Materialkrav utifrån design	13		
	2.4	Geote	eknisk instrumentering	14		
	2.5	Byggn	netod	14		
	2.6	Geom	etrisk modell	17		
3	Meto	bd		18		
	3.1	Inledn	ning	18		
	3.2	Mater	rialkarakterisering	18		
		3.2.1	Kornfördelning	18		
		3.2.2	Hydraulisk konduktivitet	18		
		3.2.3	Packning och densitet	20		
		3.2.4	Kapillär stighöjd och vattenbindningskurva	20		
		3.2.5	Hållfasthets- och deformationsegenskaper	21		
	3.3	Geote	eknisk instrumentering	22		
		3.3.1	Geodesi	22		
		3.3.2	Portrycksgivare	22		
		3.3.3	Inklinometer	23		
		3.3.4	Optisk fiber för töjningar	25		
		3.3.5	Seismik	27		
	3.4	Beräki	ningsmodeller	29		
		3.4.1	PLAXIS 29			
		3.4.2	Seismik-modellering	29		
4	Resu	ltat från	mätningar	31		
	4.1	Mater	rialkarakterisering	31		
		4.1.1	Kornfördelning	31		
		4.1.2	Hydraulisk konduktivitet	31		
		4.1.3	Packning och densitet	32		
		4.1.4	Kapillär stighöjd och vattenbindningskurva	33		
		4.1.5	Hållfasthets- och deformationsegenskaper	34		
	4.2	Vatter	nbalans	35		
		4.2.1	Magasinsnivå	35		



7	Referenser			51
6	Diskus	48		
	5.4	Deform	mationer	44
	5.3	Portry	rck	43
	5.2	Vatter	nmättnad och relativ hydraulisk konduktivitet	41
	5.1	5.1 Inledning		41
5 Resultat från modelleringar				41
		4.3.4	Deformationsmoduler (fält)	39
		4.3.3	Töjningar	39
		4.3.2	Rörelser	38
		4.3.1	Portryck	36
	4.3	Damm	nens beteende och egenskaper	36
		4.2.2	Läckage	35



# 1 Inledning

#### 1.1 BAKGRUND

Det arbete som bedrivs inom ramen för detta uppdrag har initierats för tillvarata den unika möjligheten att följa hur en fyllningsdamms egenskaper utvecklas från det att den har färdigställts, vid dämningsupptagning, och under fortsatt drift. Möjligheten utgörs av en testdamm som Vattenfall R&D har byggt i Älvkarleby där syftet är att med olika metoder för skadedetektering genomföra ett blindtest av dessa metoders kapacitet att hitta ett antal inbyggda defekter (se t.ex. Lagerlund et. al. 2020).

# 1.2 SYFTE OCH MÅL

Syftet med uppdraget är att utifrån en för experiment särskilt utformad fyllningsdamm undersöka deformationers och portrycks utveckling vid dämningsupptagning och under fortsatt drift med magasinet vid dämningsgräns.

Målet är att koppla insamlad data från dammens byggnation och instrumentering till resultat från geoteknisk modellering av portryck och deformationer.

### 1.3 OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR

Det bör noteras att huvudsyftet med experimentdammen är att utvärdera oförstörande metoder för att identifiera skador, vilket inte ingår att rapportera i denna rapport. För mer information om resultat från skadedetekteringsarbetet hänvisas istället till Nooroz m.fl. (2021), Johansson och Bernstone (2021) och Lagerlund m.fl. (2021).

De resultat som redovisas i denna rapport baseras på vad som har uppnåtts till och med utgången av november månad 2020. Eftersom experimentdammen kommer att vara i fortsatt drift under större delen av 2021 så återstår fortsatt utvärdering av ytterligare mätdata från dammens geotekniska instrumentering.

Under större delen av året 2020 så har den rådande Corona-pandemin medfört begräsningar i samhället i stort, och följaktligen även lokalt vid Älvkarlebylaboratoriet. Det har inte funnits tillgänglig personal på plats i samma utsträckning som vanligt, och för att minska risken för smittspridning så har anlitandet av externa tjänsteleverantörer begränsats. Sammantaget så har detta medfört att vissa arbetsinsatser som har att göra med experimentdammens drift tagit längre tid att få utförda. Situationen har indirekt påverkat framdriften av de arbeten som ingår i detta Energiforskuppdrag.



# 2 Vattenfalls experimentdamm

### 2.1 INLEDNING

Vattenfall R&D har vid laboratoriet i Älvkarleby byggt en försöksanläggning som möjliggör forskning och utveckling om fyllningsdammar. Det första experimentet som har utförts i anläggningen är ett blindtest av oförstörande övervakning av en konventionell fyllningsdamm med utformning baserad på rekommendationer enligt RIDAS.

Försöksanläggningens stödkonstruktion och fyllningsdammens utformning beskrivs i detta kapitel.

# 2.2 STÖDKONSTRUKTIONENS UTFORMNING

Anläggningen består av en bassängformad stödkonstruktion av vattentät betong grundlagd fyra meter under naturlig markyta (Figur 1), vatten- och elförsörjning samt ett väderskyddande tält. Omgivande mark utgörs av en 10 meter mäktig sandavlagring på berg där grundvattenytan ligger i nivå med berget. Stödkonstruktionen står därför på naturligt dränerad mark. Vidare har en för svenska förhållanden ny konstruktionslösning valts för bottenplattan, som är armerad med glasfiberstänger. I och med att det därmed saknas elektriskt ledande armering motsvaras botten av en grundläggning på berg. Plattans yta är obehandlad (rå).

Stödkonstruktionens geometri, med dess bottenplatta och fyra stödmurar, är 20 m i längd, 16 m i bredd, och 4 m i höjd. Vid den ena långsidan finns en ramp som gör det möjligt att ta in maskiner i samband med entreprenadarbeten. Sidoväggarna är gjutna med lutningen 1:8 för att underlätta god packning av anslutande jordmaterial. Betongytan har spacklats och slipats i lägena för fyllningsdammens anslutning mot väggarna. Den översta metern av samtliga väggars utsida är isolerad med frigolitskivor.

Bottenplattan lutar 1:100 mot en nedströms anslutande uppsamlingsränna (se Figur 2). Sju stycken mot betongen limmade gummiribbor gör det möjligt att sektionsvis leda läckvatten från fyllningsdammens tätkärna till åtta anslutande plåtlådor. Från lådorna leds vattnet vidare via Thomsonöverfall till uppsamlingsrännan med tillhörande pumpgrop (Figur 3). Läckaget för respektive sektion mäts kontinuerligt med Thomsonöverfallen.

En tältöverbyggnad medger väderskydd men behövs även för att undvika att läckageuppsamlingssystemet påverkas av frysning vintertid (temperaturen kommer i denna del av dammen inte att understiga 0 °C).





Figur 1. Färdiggjuten stödkonstruktion 13 september 2019.



Figur 2. Vy ovanifrån med avrinningsytor, med plåtrännan vid snittet E-F. Botten lutar från GH mot EF. Rännan i snittet EF lutar från F mot E.





Figur 3. Gummiribbor för sektionering av läckagevatten under nedströms stödfyllning. Respektive flöde rinner ner i en plåtlåda med Thomsonöverfall, och därefter vidare till en pumpgrop i bildens bortre hörn.

#### 2.3 FYLLNINGSDAMMENS UTFORMNING

Experimentdammen har byggts så att den i princip fyller ut stödkonstruktionens mått, dvs. 20 meter lång, 4 meter i krönhöjd och 15 meter bred i basen vinkelrätt dammlinjen. Tätkärna utgörs av morän, med två anslutande filterzoner (finfilter och grovfilter) samt en stödfyllning (Figur 4).



Figur 4. Fyllningsdammens utformning med tätjord (A), fin- och grovfilter (B och C) och stödfyllning (D).

#### 2.3.1 Kravställning utifrån RIDAS

Ridas tillämpningsvägledning innehåller vägledning och allmänna råd vid nybyggnad av fyllningsdammar. Den förkortade text som återges nedan har hämtats från den version av vägledningen som gällde vid experimentdammens projektering (RIDAS 2011). För mer utförlig beskrivning, se originaltext.

Fyllningsdammar dimensioneras, utförs och kontrolleras i sådan omfattning att kvalitet och nivå motsvarande den geotekniska klassen GK2 aldrig underskrids. Fyllningsdammar kommer normalt att falla inom geotekniska klassen GK3,



varigenom ytterligare krav kan bli aktuella. Utformningen skall göras så att säkerhet finns mot alla tänkbara orsaker till dammbrott, t.ex.:

- Inre erosion i dammkroppen eller undergrunden.
- Yttre erosion i samband med regn, högt vattenstånd och vågor.
- Stabilitetsbrott (utglidning) åt nedströms- eller uppströmshållet.

Kravet för dimensioneringen av kornfördelningen kontrolleras utifrån enveloppkurvor, där i princip alla kornfördelningskurvor skall falla innanför givna gränser.

Tätningen utgörs oftast med en kärna av morän. Utifrån god täthet och bearbetbarhet så används företrädesvis moräner av siltig-sandig typ, blockfattig och med måttlig stenhalt<sup>1</sup>. Intill betongkonstruktioner får stenstorleken inte överstiga 30 mm.

Vattenkvotens övre gräns i tätjorden skall vid packning vara högre än den optimala, men inte överstiga denna med mer än ca 3%. Skulle materialet i den täkt som används överstiga gränsvärdet så kan åtgärder behöva vidtas (t.ex. genom utdikning). Motsvarande lägre gräns väljs till optimal vattenkvot bestämd enligt tung laboratoriestampning. Gränserna illustreras i Figur 5.



Figur 5: Acceptabel zon för moränens tunghet för torrt material, vattenkvot och luftporhalt vid packning (tunghet för kornen 26,5 kN/m<sup>3</sup>) (RIDAS 2011).

Pallhöjden för de först utlagda lagren skall vara högst 100 mm. Innan ny fyllning läggs ut på större sammanhängande ytor skall föregående ytskikt rivas upp. Nytt material tippas på den upprivna ytan och materialet utbreds undan för undan. Lagertjockleken utprovas så att föreskriven packningsgrad uppnås i hela lagret.



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Eventuella större stenar bör sorteras bort i tätjordstäkten.

Sättningar vid första vattendränkning blir betydande för material som packas in vid låg vattenkvot och till låg densitet. Följande acceptanskrav tillämpas:

- Vattenkvotens lägre gräns väljs till optimal vattenkvot bestämd enligt Modifierad Proctor.
- Vattenkvotens övre gräns bestäms så att tillräcklig bärighet erhålls för packningsredskapet.
- Krav på maximal luftporhalt anpassas till dammens känslighet för sättningar (normalt < 10 %).

För att filtermaterialet skall få tillräcklig inre stabilitet bör kornkurvan vara relativt linjär och inte språnggraderad eller månggraderad. Särskilt nedströms finfilter är kritiskt, och har därmed relativt snäva gränser för att uppnå filtrering.

# 2.3.2 Materialkrav utifrån design

Materialet till dammen har hämtats från berg- och moräntäkten Sälgsjön<sup>2</sup> i Gävle kommun (Jehanders AB). Vid förprovning av materialen erhölls materialegenskaper enligt Tabell 1 och siktkurvor enligt Figur 6. Resultaten uppfyller de krav som ställs i RIDAS.

Egenskaper:	Tätkärna	Finfilter	Grovfilter	Stödfyllning
Material	Morän 0-20 mm	Bergkross 0/16	Bergkross 8/64	Bergkross 32/154
Dmax	20 mm	-	-	150 mm
Finjordshalt	20%	-	-	-
Hydraulisk konduktivitet	10 <sup>-7</sup> m/s	10 <sup>-5</sup> m/s	10 <sup>-2</sup> m/s	10 <sup>-1</sup> m/s
Densitet (våt)	2,25 t/m <sup>3</sup>	1,9 t/m <sup>3</sup>	1,7 t/m <sup>3</sup>	1,8 t/m <sup>3</sup>
Friktionsvinkel	42°	36°	40°	41°

Tabell 1. Materialegenskaper enligt förprovning.



Figur 6. Kornkurvor för ingående material, enligt förprovning.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> GPS (WGS 84): N 60' 36.797 E 17' 08.707. Jordlagren i täktområdet utgörs huvudsakligen av morän.



### 2.4 GEOTEKNISK INSTRUMENTERING

Uppföljningen av hur experimentdammens jordmekaniska beteende utvecklas över tid görs för den högra delen av dammkonstruktionen (sett i strömningsriktningen). Installerad instrumentering omfattar:

- Piezometrar för kontinuerlig övervakning av portryck i filter (4 st.) och tätkärna (8 st.) och dess variation över tid.
- Inklinometrar (3 st.) för kontinuerlig övervakning av rörelser, med placering i uppströms stödfyllning, tätkärna och nedströms stödfyllning. Vald typ av inklinometer möjliggör mätning i x-, y- och z-led för respektive mätpunkt som sitter c/c 25 cm. Installationsrören utgörs av flexibla PE-rör.
- Optisk fiber för övervakning i mätkampanjer av töjningar utmed dammens övergång till dess grundläggning (på 15–20 cm ovan bottenplattan). Fiberkabeln löper i en slinga med totalt fyra passager genom dammkroppen.
- Kablar med hydrofoner för seismiska mätningar (5 st.). Varje kabel har 24 hydrofoner med 0,8 m mellanrum. Data från dessa sensorer samlas in i kampanjer för bestämning av geotekniska egenskaper (och detektering av inbyggda skador).
- Mätdubbar (16 st.) i överkant av och utmed stödkonstruktionens väggar. Stödkonstruktionens väggar är dimensionerade för att inte deformeras oaktat lastfall (en tom konstruktion respektive att hålla en damm med dess vattenmagasin), dvs. så att det inte kan uppkomma någon sidobelastning på (i det här fallet) experimentdammen. Dubbarna möjliggör verifieringskontroll av att detta villkor är uppfyllt.

Instrumenteringens planerade placering i dammen (exklusive mätdubbar) framgår av Figur 7 och Figur 8.



Figur 7. Tvärsektion genom dammen visande dammens stödfyllning, grov- och finfilter, tätkärna, samt placeringen av piezometrar (röda prickar), inklinometrar (stående prickade linjer) och optisk fiber (liggande streckad linje).

#### 2.5 BYGGMETOD

Fyllningsdammen har byggts i pallar med utläggning och packning av material inifrån-och-ut, dvs. tätjord följt av finfilter, grovfilter och stödfyllning. Figur 9 visar pågående utläggning av den första pallens material, med en av praktiska skäl annorlunda ordningsföljd än för dammen i övrigt. Effektiv sluthöjd för tätjordens två första pallar är 10 cm, och därefter 20 cm, se Figur 8. Framdriften var två till tre färdigställda pallar per dag. Den totala materialåtgången blev ca. 1500 ton.



För packningsarbetet användes en markvibrator anpassad för arbeten i trånga utrymmen (Swepac FR 85) vilket möjliggjorde god packning intill betonganslutningar och installationer (inbyggda skador och inklinometerrör). Uppnådd packningsgrad kontrollerades för varje packad pall tätjord med en vattenvolymeter (Haas 10-1650). Dessa mätningar användes även för att räkna fram luftporhalter. Resultatet visar att uppnådd packningsgrad ligger i intervallet 90 - 95% och uppnådd luftporhalt i intervallet 3 - 5%.

Utläggning av jordmaterial i pallar medför att det bildas en slänt för varje delmaterial (se illustrationen för tätkärnan i Figur 8). Tätkärnans avsmalning uppåt avspeglas i pallarnas bredd. I fält hanterades detta genom anpassning av tätjordens och filtrens bredd för respektive pall<sup>3</sup>.

Figur 10 visar den efter fyra veckors byggtid färdiga dammen sett från ovan, strax innan montaget av det väderskyddande tältet. Givet materialdata från förprovningen så blir de förväntade vattennivåerna i dammkonstruktionen, baserat på modellering av fyra olika magasinsnivåer (vid jämvikt), enligt Figur 11.



Figur 8. Pallplan, med inklippt detalj visande utseendet för övergångarna i sidled mellan respektive material. Röda cirklar markerar läget för de fem seismikkablarna.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Tätjordens dimensionerande bredd i underkant och överkant damm är 1,6 m respektive 1,1 m. Vid materialutläggningen av den understa pallen så översattes detta till 1,8 m i underkant och 1,4 m i överkant, och för den översta pallen 1,3 m i underkant och 0,9 m i överkant. Måtten motsvaras av en pallsläntlutning om ca. 45°.





Figur 9. Pågående arbete med utlägg av det första lagret av dammens totalt 71 pallar. Från vänster: stödfyllning, grovfilter, finfilter och tätjord.



Figur 10. Färdigbyggd damm, strax innan montage av ett väderskyddande tält.





Figur 11. Förväntade vattennivåer i dammen vid fyra olika magasinsnivåer (vid jämviktsförhållanden).

#### 2.6 GEOMETRISK MODELL

En tredimensionell modell av experimentdammen med dess stödkonstruktion har tagits fram i Autodesk Civil 3D baserat på inmätningar under byggtiden (laserskanning och totalstation). Modellen innehåller data om materialgränser och sensorkablars placering (Figur 12).

Ett av syftena med modellen är att skapa förutsättningar för aktiva forskargrupper (resistivitet, temperatur, seismik och geoteknik) att använda ett gemensamt geometriunderlag för databearbetning, beräkningar och analyser.

Använt koordinatsystem är SWEREF 99 16 30.



Figur 12. Vy från experimentdammens 3D-modell, med stödkonstruktionen och linjerepresentation av dammens olika materialgränser.



# 3 Metod

### 3.1 INLEDNING

I detta avsnitt beskrivs de metoder som har använts. Dessa omfattar den byggda dammens materialkarakterisering (avsnitt 3.2), den geotekniska instrumenteringens installation i dammkroppen (avsnitt 3.3.) och använda beräkningsverktyg (avsnitt 3.4).

# 3.2 MATERIALKARAKTERISERING

Dammkonstruktionens material utifrån designkrav och förprovning presenterades i avsnitt 2.3. Det material som levererades till dammbygget togs dock ut från en annan del av täktområdet än vad som ingick i förprovningen. Den byggda dammens materialegenskaper har följts upp med hjälp av ett provprogram<sup>4</sup>. Programmet, som beskrivs i detta avsnitt, omfattar:

- Kornstorlekskurvor.
- Hydraulisk konduktivitet.
- Packning och densitet.
- Kapillär stighöjd och vattenbindningskurva.
- Hållfasthets- och deformationsegenskaper.

# 3.2.1 Kornfördelning

Ett jordmaterials kornsammansättning är avgörande för dess användning i fyllningsdammar. För material med låg finjordshalt (t.ex. grus och sand) så bestäms kornfördelningen genom torrsiktning. Vid siktning används en serie siktar av trådnät med olika maskvidd, där kornstorleken antas motsvara den fria maskvidden. Normalt siktas material mellan 0,063 mm och 63 mm. Siktserier som klarar av att hantera de minsta fraktionerna (< 0,063 mm) finns vid specialiserade laboratorier.

Vattenfall har utfört grovsiktning i eget labb. Siktningen av tätjord, finfilter och grovfilter (prover om 10 liter) har utförts vid ett externt geotekniklabb (metod enligt SS-EN ISO 17892-4). Denna siktning har gjorts för totalt 114 prover:

- Två prover i tätjorden, ett prov från respektive finfilter och ett prov från respektive grovfilter från varje färdigställd pallnivå, dvs. totalt 6 siktanalyser per pall.
- Två prover för varje färdigställd höjdmeter (fyra nivåer) för sedimentationsanalyser av tätjordens mest finkorniga fraktioner, dvs. totalt 8 analyser.

#### 3.2.2 Hydraulisk konduktivitet

Bestämning av hydraulisk konduktivitet har utförts med tre olika försöksuppställningar:

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> LTU kommer att redovisa en mer omfattande resultatgenomgång i en SVC-rapport under 2021.



- Celltryckspermeameter: Tätjord.
- Rörpermeameter: Tätjord.
- Storskalig permeameter: Tätjord, finfilter och grovfilter.

Celltryckspermeameterns utformning framgår av Figur 13, där provdiametern är 50 mm. Provningsmetoden utgår från Älvkarlebylaboratoriets ackrediterade metod VU-SC:52 (Vattenfall 2005). Flödet genom provet och tryckskillnaden över provet mäts. Ett sidotryck läggs på runt provet över gummimembranet, vilket gör att vattnet inte kan rinna utmed provets sidor. Ett mottryck appliceras på utgående vatten, vilket skapar vattenmättade förhållanden även vid ofullständig vattenmättning.

Rörpermeametern består av en packningscylinder, där den hydrauliska konduktiviteten bestäms på samma sätt som med celltryckspermeametern men utan sidotrycksättning (Figur 13). Uppställningen kan ge något högre mätvärden jämfört med celltryckspermeametern till följd av ogynnsammare randvillkor för tätningen av kontaktzonen mellan provet och rörväggen.

Den hydrauliska konduktiviteten i en fyllningsdamms grövre material kan bestämmas utifrån försök i en storskalig permeameter. Vattenfall R&D har utvecklat en sådan för att komma tillrätta med det tidigare beroendet av att göra uppskattningar utifrån empiriska samband. Utrustningen kan användas för bestämning av hydraulisk konduktivitet i material med stenstorlekar på upp till 250 mm. Principiell utformning framgår av Figur 15.



Figur 13. Vänster: Utformning av den celltryckspermeameter som används av Vattenfall vid Älvkarlebylaboratoriet. Höger: Principutformning av en rörpermeameter (Larsson 2008).





Figur 14. Utformning av Vattenfalls storskaliga permeameter.

### 3.2.3 Packning och densitet

Ett jordmaterials hållfasthet beror till stor del på dess lagring, där ökad densitet åtföljs av ökad skjuvhållfasthet. I fält utfördes packningen av experimentdammens pallar med markvibrator. Packningsförsöken vid LTU har gjorts med fallvikt, med metoden Modifierad Proctorpackning. Fallvikten ger en jämn packning av materialet i en cylinder, under det att denna roterar. Efter avslutad packning så ger uppnådd vikt och känd volym tillhörande densitet. Försöken utförs för ett antal olika vattenkvoter, vilket efter sammanställning gör det möjligt att bestämma optimal vattenkvot. Materialets torrdensitet bestäms för ett visst packningsarbete vid olika vattenkvoter, vilket ger en packningskurva som kan analyseras gentemot ställda krav (dvs. i det här fallet RIDAS).

Modifierad Proctorpackning har utförts för tätkärnans och finfiltrets material.

# 3.2.4 Kapillär stighöjd och vattenbindningskurva

Närmast över en grundvattenyta påverkas vattenkvoten främst av den kapillära stighöjden. Inom den kapillära zonen stiger vattnet kapillärt i jordens porer beroende på vattnets ytspänning. Den kapillära stighöjden beror främst på porstorlek som i sin tur beror på kornstorlek och lagringstäthet (Larsson 2008). För en fyllningsdamm så innebär detta att det (särskilt för tätkärna och finfilter) ovanför portryckslinjen kommer att finnas kapillärt vatten. Sambandet mellan kapillär stighöjd och vattenmättnadsgrad beskrivs av ett materials vattenbindningskurva.

LTU har bestämt kapillär stighöjd för tätjorden vid försök med en övertryckskapillarimeter (Figur 15). De enskilda mätvärdena från försöken behöver modellanpassas till en kontinuerlig funktion. Det finns ett flertal ekvationer för detta (Morales 2013); här har använts van Genuchten (1980):



$$S_r = \frac{1}{\left[1 + \left(\alpha \cdot \psi\right)^n\right]^m}$$
Ekv.

Där Sr är vattenmättnadsgrad och  $\alpha$  är kapillär stighöjd (övrig indata är passningsparametrar). Materialets resulterande vattenbindningskurva kan därefter användas vid numerisk modellering.

1

Eftersom de porundertryck som uppnås vid provningen, i förhållande till provkroppens storlek, är mycket större än den faktiska kapillära stighöjden så presenteras mätdata som porundertryck istället för kapillär stighöjd (se vidare under avsnitt 4.1.4).



Figur 15. Använd övertryckskapillarimeter (Soilmoisture 1500F1).

3.2.5 Hållfasthets- och deformationsegenskaper

En jordarts styvhet kan beskrivas med tre olika styvhetsmoduler:

- Sekantmodul från konventionellt dränerat triaxialförsök.
- Tagentmodul från primär pålastning i ödometerförsök.
- Modul för avlastning/pålastning i dränerat triaxialförsök.

Skjuvhållfastheten för en kohesionslös jord är den som den last som krävs för att skjuvning ska uppstå i materialet (glidning mellan partiklar). Denna har undersökts för tätjorden genom triaxialcellsprovning vid LTU<sup>5</sup>. Resultatet har därefter legat till grund för bestämning av tätjordens sekantmodul.

Bestämning av modulen för avlastning/pålastning har inte kunnat bestämmas med den använda försöksuppställning (istället har ett teoretiskt förväntat värde använts).

Sättningar i jord på grund av last på markytan eller en grundvattensänkning kan beräknas utifrån jordmaterialets kompressionsmodul. Denna modul bestäms i



<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Utrustning: Stress path Bishop & Wesley triaxial testing system.

ödometerförsök genom att det effektiva vertikaltrycket i ett prov ökas samtidigt som deformationer i horisontalled förhindras. Utifrån den primära pålastningen kan materialets tangentmodul bestämmas.

Både konventionella dränerade triaxiella försök och ödometerförsök har utförts vid LTU. Triaxialförsöken omfattar tätkärnans och finfiltrets material (d<sub>max</sub> 10 mm), och ödometerförsöken omfattar tätkärnans och fin- och grovfiltrets material.

### 3.3 GEOTEKNISK INSTRUMENTERING

Den geotekniska instrumenteringen beskrivs närmare i detta avsnitt. Deras avsedda lägen framgick av Figur 7. Faktiska lägen mättes in allteftersom installationerna fortskred för dokumentation i experimentdammens 3D-modell. Alla givare förutom den optiska fibern för töjningar, ligger utmed en och samma tvärsektion. Deras inmätta positioner framgår av Figur 16.



Figur 16. Läget för den geotekniska instrumenteringen efter inmätning (Sjödin 2021).

#### 3.3.1 Geodesi

Stödkonstruktionens läge följs upp med geodetiska mätningar (totalstation) för 14 installerade mätdubbar. Sedan konstruktionen färdigställdes så har mätningar utförts vid fem tillfällen.

Läget för fyllningsdammen som helhet har kontrollerats med hjälp av laserskanning (Leica Geosystems totalstation-baserad skanning). Sedan dammens färdigställande så har laserskanningar utförts vid tre tillfällen.

#### 3.3.2 Portrycksgivare

Vid momentan ökning av vertikaltrycket i en vattenmättad jord ökar vattentrycket i porvattnet. Är jorden normalkonsoliderad blir portrycksökningen lika stor som vertikaltrycksökningen (Larsson 2008). Portrycksmätning utförs kontinuerligt (1 ggr/h) för övervakning av portrycksfördelning och konsolidering av



dammkonstruktionen. Mätningarna gör det möjligt att följa hur portrycken byggs upp under dämningsupptagning och den tid det tar för tätkärnan att bli vattenmättad.

Den instrumenterade tvärsektionen har försetts med tolv stycken portrycksgivare. Åtta av dem är placerade på olika nivåer i tätkärnan och resterande fyra givare i fin- och grovfiltren (Figur 16). Givarna lades ut på avsedd plats på den packade ytan av de pallar som motsvarar planerad placering, se Figur 17. Med vatten i magasinet så kommer de två givare som ligger nedströms tätkärnan att i höjdled befinna sig på en nivå som alltid är ovanför den förväntade portryckslinjen.

Använd utrustning sammanfattas i Tabell 2. Portrycksgivarna kan mäta både positiva och negativa tryck. Det tryck som registreras är ett absoluttryck, vilket korrigeras för rådande lufttryck med data från en mätstation vid Älvkarleby kraftstation.



Figur 17. Foton från pågående installation av portrycksgivare. Tabell 2. Använd portrycksinstrumentering.

Utrustning	Leverantör	Modell	Kommentar
Datalogger	Cautus Geo	-	6 kanaler
Givare	Cautus Geo	Geosense VWP-3400	35 × 218 mm. Vibrerande sträng,
			mätområde -70 kPa – 345 kPa

#### 3.3.3 Inklinometer

Genom att registrera rörelser som uppstår i en fyllningsdamm så erhålls information om dammens tillstånd. Horisontalrörelser ger besked om risk för skjuvning, glidning och sprickbildning. Vertikalrörelser ger besked om dammkroppens (och undergrundens) deformationer, tätkärnans eventuella upphängning på omgivningen samt tjälens inverkan (Vattenfall 1988).



Rörelser förväntas ske i experimentdammen, speciellt i samband med ändrade belastningsfall (t.ex. vid dämningsupptagning). För att kunna följa utvecklingen av rörelser så har den instrumenterade tvärsektionen försetts med tre stycken permanent installerade inklinometrar<sup>6</sup> av typen "Shape Accelerator Array" (SAA), se Figur 18 och Figur 19. Instrumentet består av ihopkopplade 25 cm långa segment, där varje segment har tre accelerometrar som gör det möjligt att kontinuerligt mäta storlek och riktning på deformationer i tre dimensioner, baserat på lutningen från gravitationsriktningen.

Installationen förutsätter en borrhålsliknande miljö, vilket har åstadkommits genom att fästa flexibla plaströr (PipeLife) mot grundläggsytan. För att åstadkomma en fixpunkt i botten av röret så har detta limmats mot betongplattans yta (se Figur 19). Av figuren framgår också den ställning som användes för att säkerställa att röret förblir lodrätt i takt med att pallarna byggs på. Som framgår av Figur 16 har det trots denna ställning inte gått att undvika att rören drivit iväg från sin tänkta lodräta linje.

Vid installationen så sänktes segmenten ner i rören, roterades och fixerades så att x-riktningen blev parallell med den antagna största deformationsriktningen, dvs. vinkelrätt dammlinjen.

Använd utrustning sammanfattas i Tabell 3. Noggrannheten i mätningarna anges av leverantören för en given givarlängd, vilket för denna installation är ca.  $\pm$  0,2 mm.



Figur 18. Vänster: Principiell utformning av SAA (Measurand 2015). Höger: Synlig överdel efter installation i stödfyllningen.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Instrumentet finns även i en portabel version för kampanjmätningar. Se t.ex. Tornberg m.fl. (2020).





Figur 19. Foto från pågående installation av de rör som efter dammens färdigställande hyser SAA-givarna. Av figuren framgår den limmade fixeringen av röret mot bottenplattan (Kiltoflex).

Utrustning	Leverantör	Modell	Kommentar
SAA	Measurand	SAAV250	Tre längder anpassade till dammens höjd vid installationslägen (3 m, 3,5 m och 4 m). 250 mm segmentlängd.
Datalogger	Campbell Scientific	CR300	

#### Tabell 3. Använd inklinometer-instrumentering.

#### 3.3.4 Optisk fiber för töjningar

Experimentdammen har försetts med en uppsättning kablar med optisk fiber för temperatur- och töjningsmätningar (baserad på Brillouin Scattering). Mätningarna görs utmed fiberns hela längd (distribuerad mätning).

Fiberkablarna installerades i stödfyllningen 10 – 15 cm över betongplattan genom att spänna upp dem i stödkonstruktionens betongväggar. I de lägen där kablarna byter riktning användes väggmonterade rörkrökar. Töjningskabeln spändes upp med ca 10 kg dragkraft (den intilliggande temperaturkabeln lades ut utan förspänning). Vid passagerna genom grovfiltret och stödfyllningen placerades en markduk under kablarna och i denna omslutande sand, se Figur 20. Vid kablarnas passage genom finfiltret gjordes ingen åtgärd. För att minska risken för läckagevägar utmed kablarnas passage genom tätjorden så gjordes en omslutning med bentonitpulver. Efter att installationen förseglats med nästa pall gjordes en kvalitetskontroll av att kablarna var intakta (genomlysning med laser). Kablarnas placering har efter inmätning lagts in i dammens 3D-modell. Läget framgår av Figur 21.

Använd utrustning sammanfattas i Tabell 4.





Figur 20. Foto från pågående installation av fiberkablar för töjnings- och temperaturmätningar (blå respektive röd kabel).



Figur 21. Placering av fiberkablar för töjnings- och temperaturmätningar sett utifrån den färdiga dammens geometri.

Utrustning	Leverantör	Modell	Kommentar
Fiberkabel	Solifos	BRUsens DSS V9	100 m töjningsfiber.
Fiberkabel	Solifos	BRUsens DTS BSTE	100 m temperaturfiber.
Instrument	Omnisens	VISION Dual	Mätintervall 25 cm.

Tabell 4. Instrument och kabelspecifikationer för töjningsmätningar.



#### 3.3.5 Seismik

Seismiska vågor är som ljudvågor (kompressionsvågor) men fortplantar sig genom fasta material (både kompressionsvågor och skjuvvågor). Hur de breder ut sig och reflekteras beror på dess materialegenskaper, vilket främst är våghastighet, densitet och dämpningsfaktor. Kompressionsvågor är mest känsliga för materials komprimerbart, och skjuvvågor är mest känsliga för dess styvhet. Genom att mäta vågornas gångtider och reflekterade vågfält så erhålls information om passerade materials egenskaper:

- I lösa material fortplantar sig vågorna långsammare än i mer kompakta material.
- Skarpa materialkontraster i hastighet eller densitet medför att vågor reflekteras. Reflektionerna kan ge information om egenskapsförändringar.

De seismiska undersökningar som har utförts på experimentdammen har primärt varit inriktade på att identifiera inbyggda skador (se t.ex. Salas-Romero m.fl. 2020a). I denna rapport presenteras resultat från analyser där syftet har varit att bestämma tätkärnans elasticitetsmodul.

Läget för de fem seismikkablarna framgår av Figur 22. Eftersom varje kabel har 24 hydrofoner så finns det totalt 120 hydrofoner installerade. Deras individuella lägen har mätts in under byggtiden och finns inlagda i experimentdammens 3D-modell. I denna figur framgår även lägena av de plaströr som används för att generera seismiska vågor så nära tätkärnan som möjligt:

- En rad av 25 st. 75 cm. djupa rör utmed dammens krön (se Figur 23).
- Fyra djupa rör vid respektive sida som går ner till grundläggningsnivån.

Vid mellanhålsmätning i de djupa rören så används vid dessa tillfällen en sänkbar 3-komponents geofon (denna är således inte en del av permanenta installationen).

Mätningarna har genomförts i kampanjer. Inför dessa har för rördiametern anpassade plaststrumpor sänkts ner och fyllts med vatten för att på så sätt säkerställa små energiförluster mellan energikälla och dammkonstruktionen. Vid mätning har den energikälla som använts för att generera de seismiska vågorna sänkts ner i de vattenfyllda rören. Då energikällan triggas i en viss position (källpunkt) registreras konstruktionens svar i form av kompressions- och skjuvvågor i seismografer som anslutits till kablarna. I de djupa rören så har energikällan triggats för källpunkter på olika nivåer (med 0,4 meters intervall).

Den energikälla som alstrar kompressionsvågor har även använts i vattenmagasinet med hjälp av en uppspänd vajer. Energikällan har då flyttats successivt utmed vajern, med aktivering i källpunkter med 0,2 meters avstånd (totalt 100 mätningar).

Använd utrustning sammanfattas i Tabell 5.





Figur 22. Geometri för hydrofoner och källpunkter för energikällorna.



Figur 23. Foto från pågående installation av de 25 plaströren utmed tätkärnans överkant. Läget framgår även för de tre intilliggande seismik-kablarna (röda hydrofoner).

Utrustning	Leverantör	Modell	Kommentar
Instrument	Geometrics	GEODE-24	5 seismografer med 24 kanaler
Givarkabel	Guideline Geo	BHC4	5 kablar: 24 kanaler / SQ54 hydrofoner (cc 0,8 m)
Energikälla 1	Geotomographie	SBS42	Elektrisk P-vågskälla (kompressionsvåg)
Energikälla 2	Geotomographie	BIS-SH	Elektrisk S-vågskälla (skjuvvåg)
Energikälla 2	PASI	CHE	Mekanisk borrhålshammare för P- och S-vågor

Tabell 5. Instrument och kabelspecifikationer för den seismiska instrumenteringen.



### 3.4 BERÄKNINGSMODELLER

#### 3.4.1 PLAXIS

Modellering av vattenmättnad, portryck och deformationer har gjorts i 2D med hjälp av finita elementprogrammet PLAXIS (version 2D 2019). I FE-modellen, som baseras på experimentdammens CAD-modell, har bottenplattans tjocklek överdrivits för att undvika randeffekter (Figur 24).. Av samma anledning så antas tvärsektionen ligga tillräckligt långt ifrån den anslutande stödkonstruktionens sidoväggar<sup>7</sup>.

Programvarans verktyg "SoilTest" gör det möjligt att utifrån triaxial-försökens spännings-töjningsrespons anpassa materialparametrar för den konstitutiva spänningsberoende modellen "Hardening soil". Denna modell gör det möjligt att låta jordens styvhet följa den rådande spänningssituationen (vilket inte uppnås med ett enkelt linjär-elastiskt samband). Modelleringen hanterar kopplade 2Danalyser, där portryck och deformationer tillåts att utvecklas samtidigt. Modelleringen har den framtagna vattenbindningskurvan som indata.

För att kunna jämföra resultaten mellan mätdata från portrycksgivarna och SAAinklinometrarnas givare så har deras respektive inmätta positioner lagts in i FEmodellen.



Figur 24. 2D-vy av experimentdammen i PLAXIS 2D, med dess elementnät (Sjödin 2021).

#### 3.4.2 Seismik-modellering

Genom att generera seismiska vågor i ett av de djupa rören på ena sidan dammen och samtidig mäta med den sänkbara geofonen i motsvarande rör på andra sidan tätkärnan så kan kompressions- och skjuvvågors utbredningshastighete genom denna beräknas, och därefter materialets elasticitetsmodul. Det gäller då att bestämma vågornas första ankomsttider och att veta källpunktens och mottagarpunktens koordinater. Eftersom kompressionsvågor ankommer före skjuvvågor så är dessa enklare att hastighetsbestämma, men båda vågornas hastighet behövs.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Planeringen av den geotekniska instrumenteringens placering omfattade en analys av randeffekter genom kontrollberäkningar utifrån Coulombs jordtrycksteori med jordkilar.



Den processeringssteg som har använts på insamlad rådata beskrivs inte här. Se istället Salas-Romero m.fl. (2020b).

Utbredningshastigheten av kompressions- och skjuvvågor ( $V_p$  respektive  $V_s$ ) bestäms av moduler och densiteten av materialen som de fortplantar sig igenom enligt:

$$V_{p} = \sqrt{\frac{\kappa + (4/3)\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$
  

$$V_{s} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$
  
Ekv. 2

Med kända seismiska hastigheter och densitet ( $\rho$ ) för ett material så kan Bulkmodulern (*K*), Skjuvmodulen ( $\mu$ ) och Elasticitetsmodulen (*E*) beräknas utifrån ekvation 2:

$$\mu = \rho V_s^2$$

$$\lambda = \rho V_p^2 - 2\mu$$

$$K = \lambda + \frac{2\mu}{3}$$

$$E = \frac{9K\mu}{3K+\mu}$$
Ekv. 3

där  $\lambda$  är Lames koefficient. Den på detta vis erhållna elasticitetsmodulen för tätkärnan kan användas vid FE-modelleringar av dess deformationer.



# 4 Resultat från mätningar

### 4.1 MATERIALKARAKTERISERING

#### 4.1.1 Kornfördelning

LTU har genom siktning bestämt kornfördelningen för de material som användes för experimentdammens finfilter, grovfilter och tätkärna (Toromanovic m.fl. 2021). Vattenfall har även gjort siktning av prover från respektive pall (totalt 114 prover), men resultaten finns ännu inte sammanställda. Siktkurvorna från LTU presenteras i Figur 25, tillsammans med siktkurvorna från den förprovning som beskrevs i Avsnitt 2.3.2.

Som framgår av diagrammet så är finfiltermaterialen från förprovningen och byggnationen i stort sett identiska. Den morän som användes för att bygga tätkärnan innehåller dock mer finmaterial än vad förprovningen visade. Skillnaden kommer sig av att moränen hämtats från olika områden av samma täkt.



Figur 25. Resultat efter siktning av tätkärna och finfilter, jämfört med siktkurvorna ("dim.") från förprovningen (jämför med Figur 6). (Sjödin 2021).

#### 4.1.2 Hydraulisk konduktivitet

Resultaten från provning av tätjorden i celltryckspermeameter (Vattenfall) presenteras i Tabell 6. Försöken har utförts på 2-3 prover vid vattenkvoterna 6% respektive 10%, och vid konstant packningsgrad. I tabellen redovisas också resultaten från fyra provningar av samma tätjord i en rörpermeameter (LTU) tillsammans med respektive provs torrdensitet. Som framgår av mätvärdena så är konduktiviteten drygt 10 gånger högre vid provningen i rörpermeametern. För finfiltret, grovfiltret och stödfyllningen så finns även provningsresultat från den storskaliga permeametern redovisade i Tabell 6.



Permeameter	Material	Vattenkvot [%]	Torrdensitet [t/m³]	Hydraulisk konduktivitet [m/s]	Utförare
Celltryck 1	Tätjord	6	2,12	5,99 × 10 <sup>-9</sup>	VRD
Celltryck 2	Tätjord	6	2,12	3,74 × 10 <sup>-10</sup>	VRD
Celltryck 3	Tätjord	10	2,10	8,41 × 10 <sup>-10</sup>	VRD
Celltryck 4	Tätjord	10	2,13	1,92 × 10 <sup>-10</sup>	VRD
Celltryck 5	Tätjord	10	2,08	4,64 × 10 <sup>-10</sup>	VRD
Rör 1	Tätjord	-	2,25	5,15 × 10 <sup>-8</sup>	LTU
Rör 2	Tätjord	-	2,20	3,11 × 10 <sup>-8</sup>	LTU
Rör 3	Tätjord	-	2,20	9,18 × 10 <sup>-8</sup>	LTU
Rör 4	Tätjord	-	2,13	3,82 × 10 <sup>-8</sup>	LTU
Storskalig	Finfilter	1,0	2,01	5,60 × 10 <sup>-5</sup>	VRD
Storskalig	Grovfilter	0	1,49	2,70 × 10 <sup>-1</sup>	VRD
Storskalig	Stödfyllning	0	1,48	4,50 × 10 <sup>-1</sup>	VRD

Tabell 6. Resultat från permeameterförsök av experimentdammens material vid Vattenfall (VRD) och LTU.

#### 4.1.3 Packning och densitet

Resultatet från två försöksserier vid LTU med Modifierad Proctor presenteras i Figur 26, tillsammans med acceptansgränser från RIDAS (se avsnitt 2.3.1). Den första serien omfattade sex prover med vattenkvoter som varierades mellan 2,27% och 9,20%. Den andra serien begränsades till två prover, där syftet var att göra en kvalitetskontroll. Samband har lagts in för två olika kriterier, där gröna begränsningslinjer är den standardgräns som exemplifieras i RIDAS, och röda linjer baseras på resultat från pyknometerprovning vid LTU.

Vid den maximala torrdensiteten 2,21 t/m<sup>3</sup> så blir packningsgraden i medeltal 92% (med minimum 85% och maximum 98%). Dessa packningsgrader är direkt jämförbara med pallarnas under byggtiden uppmätta torrdensiteter (baserade på mätningar med vattenvolymeter).

Eftersom moränens vattenkvot under byggtiden varierade mellan 8% -10%, och torrdensiteten medelvärde var 2,09 t/m<sup>3</sup> så ligger värdena inte konsekvent inom förväntat intervall.





Figur 26. Tunghet för tätkärnans material från packningsförsök enligt Modifierad Proctor.

#### 4.1.4 Kapillär stighöjd och vattenbindningskurva

Resultat från två provningar av tätjorden med övertryckskapillarimetern redovisas i Figur 27. De enskilda mätvärdena har anpassats till en kontinuerlig funktion (vattenbindningskurva) med Ekvation 1 (van Genuchten). Vattenmättnadsgraden har beräknas på två olika sätt vid resultatutvärderingen, där den ena avser vattenkvoten innan torkning (S<sub>r.1</sub>) och den andra vattenkvoten efter det att uttaget prov torkats (S<sub>r.2</sub>).

Använd försöksutrustning är anpassad för jordar med en maximal partikelstorlek 4 mm. Tätjordens fraktioner > 4 mm har därför siktats bort.





Figur 27. Resultat från övertryckskapillarimeterprovning av tätjorden, samt två till dessa mätvärden anpassade vattenbindningskurvor (Sjödin 2021).

#### 4.1.5 Hållfasthets- och deformationsegenskaper

LTU har utfört dränerade aktiva triaxialförsök vid tre effektiva celltryck (15 kPa, 50 kPa och 100 kPa). Det lägre av dessa tryck representerar rådande spänningsförhållanden i dammkonstruktionen. Figur 28 redovisar en till försöksresultaten anpassad Mohr-Coulombs brottlinje. Från denna kan brottparametrarna för kohesion (c) och friktionsvinkel (φ) utvärderas. Försöksresultaten i form av deviatorspänning som funktion av axialtöjning gör det möjligt att utvärdera tätjordens sekantmodul. Resultaten presenteras i Tabell 7.



Figur 28. Grafisk utvärdering av tätkärnans friktionsvinkel och kohesion (Sjödin 2021).



	Celltryck			
Parameter	15 kPA	50 kPA	100 kPA	Enhet
Sekantmodul	19,07	13,52	17,85	MPa
Dilatationsvinkel	8,51	3,93	3,70	Grader
Största huvudspänning	219,5	415,7	615,1	kPa
Minsta huvudspänning	17,9	52,3	102,0	kPa

Tabell 7. Resultat från triaxialförsök av tätkärnans morän (Sjödin 2021).

# 4.2 VATTENBALANS

#### 4.2.1 Magasinsnivå

Dämningsupptagning med vatten från ett intag i Dalälven påbörjades 17 mars 2020. Stighastigheten hölls konstant med 0,2 meter per dygn under vardagar och konstant nivå under helger (dvs, med vattentillförsel motsvarande aktuellt läckvattenflöde). Efter 25 dagar uppstod ett läckage som översteg läckvattenpumpens kapacitet. Dämningsupptagningen avbröts och magasinet tömdes i takt med läckvattenflödet. Händelsen föranledde uppgradering av läckvattensystemet . Dämningsupptagningen återupptogs 5 maj och dämningsgränsen 3,3 m nåddes 3 juni. Nivån justerades senare ner i två omgångar till 3,1 m, se Figur 29. Fortsatt drift har kortvarigt avbrutits av en tillfällig sänkning under sen höst till följd av ett pumpfel.



Figur 29. Vattennivån i experimentdammens magasin med start från den återupptagna dämningsupptagningen 5 maj och fram i slutet av november.

#### 4.2.2 Läckage

Läckaget genom dammen mäts, som beskrivits tidigare, för åtta sektioner i direkt anslutning till dammtån. I Figur 30 redovisas det totala läckaget för samtliga sektioner, tillsammans med magasinsnivån. Som ses så ökar läckaget under dämningsupptagningen, för att därefter falla tillbaka något under helgernas stillestånd. Ett undantag är i mitten av juni då läckaget ökar vid konstant



magasinsnivå. Denna ökning kan bero på en kortvarig överdämning av tätkärnan. Under resten av sommaren och fram till slutet av mätserien så sker en i princip linjär minskning av läckaget.



Figur 30. Magasinsnivåer (blå linje) över tid tillsammans med aktuellt totalt läckage (röd linje) genom dammen under perioden maj till november 2020.

#### 4.3 DAMMENS BETEENDE OCH EGENSKAPER

#### 4.3.1 Portryck

För atmosfärstryck korrigerade portryck i filter och tätkärna presenteras i Figur 31 - Figur 33 (se även Figur 16 för givarnas placering).

Figur 31 visar - som förväntat - att portrycket i uppströms finfilter (P5 och P6) ökar med dämningsupptagningen. När vattennivån närmar sig dämningsgräns, och tiden därefter, så sjunker nedströmssidans portryck (P1 och P2). I finfiltret (P2) beror portryckssänkningen på finmaterialrelaterad kapillär stigning. Även i grovfiltret (P1) sker en viss sänkningen (oaktat dess mindre andel finmaterial). Turbiditetsmätningar visar att det sker en viss transport av finmaterial (minskande över tid) som gör att det initialt kan finnas en förhöjd andel finmaterial i grovfiltret.

I Avsnitt 5.3, så görs en jämförelse mellan dessa uppmätta portryck med resultat från FE-modelleringen i PLAXIS.





Figur 31. Portrycksutveckling och vattennivå över tid från första dämningsupptagning till juli 2020 för portrycksgivarna i finfiltren (P2, P5 och P6) och nedströms grovfilter (P1).

Figur 32 visar - som förväntat – med viss fördröjning successivt ökande portryck utmed tätkärnans uppströmssida. Portrycken följer av respektive givares placering. De negativa portryck som råder för den överst belägna givaren (P12) med vattenytan vid dämningsgräns - motsvaras av en portryckslinje som ligger ca 25 cm under denna givare.



Figur 32. Portrycksutveckling och vattennivå över tid från första dämningsupptagning till juli 2020 för portrycksgivarna utmed tätkärnans uppströmssida (P4, P8, P10 och P12).



Figur 33 visar att de tre givarna utmed tätkärnans nedströmssida (P3, P7 och P9) känner av den första dämningsupptagningen. Motsvarande respons sker dock endast för en av dessa (P7) under den återupptagna dämningsupptagningen. En förklaring kan vara att vattnet på grund av utbildning av preferentiella flödesvägar tar sig förbi moränen i anslutning till P3 (särskilt) och P9. Data som insamlats under december månad 2020 (utanför diagrammets tidsfönstret) visar att portrycket vid P9 har börjat öka mot förväntade värden.



Figur 33. Portrycksutveckling och vattennivå över tid från första dämningsupptagning till juli 2020 för portrycksgivarna utmed tätkärnans nedströmssida (P3, P7, P9 och P11).

#### 4.3.2 Rörelser

De kontroller som gjorts vid inmätning av stödkonstruktionens mätdubbar visar att konstruktionen inte rör sig, dvs. dess elastiska rörelser är mycket små.

Rörelseutvecklingen mellan den laserskanning av fyllningsdammen som utfördes 2020-02-25 och en kontrollmätning 2020-12-14 visar att det inte har skett några större rörelser i sidled (precisionen i mätningen är  $\pm$  1 cm.). Utmed dammkrön finns det lokalt sättningar i storleksordningen 3 cm (se Figur 34).

SAA-instrumenteringens högre noggrannhet (± 0,2 mm över dess givarlängd) fångar upp deformationer som inte kan detekteras med laserskanning. Mätresultaten indikerar deformationer över tid men det återstår dataprocessering innan det finns resultat framme för publicering.





Figur 34. Jämförelse mellan punktmoln från två laserskanningar (februari och december 2020). I vyn syns dammen uppifrån, med dammkrön (streckad röd linje) och nedströms stödfyllning. Mörkare blå partier utmed dammkrön representerar sättningar om max 3 cm. Den geotekniska instrumenteringen återfinns i en sektion utmed den röda linjen.

#### 4.3.3 Töjningar

Mätresultaten från töjningsmätningarna har ännu inte färdigbearbetats vid LTU. Presentation av resultat får anstå till senare publikationer.

#### 4.3.4 Deformationsmoduler (fält)

Efter analys av insamlad data från mellanhålsmätningarna i de djupa plaströren har tätkärnans kompressionsvågs- och skjuvvågshastighet bestämts. Värdena avser tätkärnans nedre del. På grund av att ankomsttiden för kompressionsvågorna är något osäker så anges korresponderande hastigheter i ett intervall. Skjuvvågens ankomsttid är också osäker, men värden varierar inte lika mycket som för kompressionsvågen.

Det mättillfälle som har analyserats är från innan påbörjad dämningsupptagning (2020-02-17). Tätkärnans densitet är ca 2300 kg/m<sup>3</sup> vilket med sambanden i avsnitt 3.4.2 ger att dess bulkmodul respektive skjuvmodul blir 337-544 MPa respektive ca 23 MPa (se Tabell 8). Efter vattenmättnad så bör skjuvmodulen förbli densamma och bulkmodulens värde bör öka markant. Detta beror på att materialet efter vattenmättning blir mindre komprimerbart. Materialets styvhet påverkas i mindre grad.

Ekvation 3 ger, med data från mätningarna, att tätkärnans elasticitetsmodul är 68 MPa. Vid en jämförelse med moduler från triaxialförsök så skall denna göras för det intervall som representerar små töjningar inom det elastiska området, vilket är precis i början av sådana försöks spännings-töjningskurvor. Värdet på sekantmodulen i Tabell 7 representerar ett område med större töjningar. För små töjningar så ger triaxialförsöken en sekantmodul i storleksordningen 55 MPa, vilket ligger i linje med det seismik-baserade värdet (68 MPa).



Parameter	Värde	Тур	Kommentar
v <sub>p</sub> (m/s) 400 - 500 Mätvärde H		Mätvärde	Kompressionsvågshastighet
v <sub>s</sub> (m/s)	100	Mätvärde	Skjuvvågshastighet
ho (kg/m³)	2300	Mätvärde	Densitet
λ (MPa)	322 - 529	Beräknat	Lames koefficient
K (MPa)	337 - 544	Beräknat	Bulkmodul
$\mu$ (MPa)	23	Beräknat	Skjuvmodul
E (MPa)	67,5 - 68,0	Beräknat	Elasticitetsmodul

Tabell 8. Indata till beräkning av och resulterande moduler för experimentdammens tätkärna, baserat på mätdata från seismiken.



# 5 Resultat från modelleringar

### 5.1 INLEDNING

Merparten av modelleringsarbetet har utförts av Adam Sjödin inom ramen för ett till Energiforskprojektet anslutande examensarbete vid LTU. Simuleringarna har utförts för följande fyra faser av dammens drift:

- 1. Modellering av dammens stödkonstruktion, med en antagen grundvattenyta 5 meter under grundläggningsytan (1 dag).
- 2. Dammens stegvis uppbyggnad (30 dagar), baserad på pallordningen i Figur 8, med hänsyn tagen till uppehåll (främst helger). Tätkärnans vattenmättnadsgrad styrs av data från fältmätningar av tätkärnans vatteninnehåll för respektive pall (8-10%) under byggtiden (se avsnitt 4.1.3).
- 3. Vilofas (121 dagar), motsvarande tiden mellan dammens färdigställande (2019-11-13) och första dämningsupptagning (2020-03-13).
- 4. Dämningsupptagning med fortsatt drift. I modelleringen påbörjas tillämpning av flödes-deformationsanalys och en fortsatt utveckling av vattenmättnadsgraden som styrs av aktuell vattennivå.

I den utsträckning som resultaten från fältmätningar och laboratorieförsök inte har räckt till så har kompletterande data hämtats från aningen referenssimuleringar i PLAXIS eller från referenslitteratur<sup>8</sup>. I beräkningarna har den hydrauliska konduktiviteten antagits vara lika stor i horisontell och vertikal riktning.

# 5.2 VATTENMÄTTNAD OCH RELATIV HYDRAULISK KONDUKTIVITET

Ett materials omättade hydrauliska konduktivitet är en hydrogeologisk olinjär funktion som beskriver vattentransport i den omättade zonen ovanför en grundvattenyta. Den hydrauliska konduktiviteten för ett mättade material (K<sub>s</sub>) är en specifik materialegenskap. Det omättade materialet kan beskrivas av den relativa hydrauliska konduktiviteten (K<sub>r</sub>), där K<sub>r</sub> = K(h) / K<sub>s</sub> (Filho m. fl. 2019). Den relativa hydrauliska konduktiviteten är således förhållandet mellan omättade och mättade förhållanden. De för dammens material i labb bestämda hydrauliska konduktiviteterna är utförda vid mättade förhållanden (K<sub>s</sub>).

Resultatet från FE-modellering av vattenmättnadsgradens utveckling, och den till denna kopplade relativa hydrauliska konduktiviteten, presenteras i Figur 35. Indata för tätkärnans mättade hydrauliska konduktivitet är i det här fallet  $5,2 \times 10^{-8}$ m/s, i enlighet med resultat från labbförsöken med rörpermeametern (Tabell 6). Eftersom försöken med celltryckspermeametern gav att tätjorden är betydligt tätare så har en modellering gjorts även med en lägre mättad hydraulisk konduktivitet (5 × 10<sup>-10</sup> m/s) som indata. Resultatet efter 189 dagar, som skall jämföras med resultatet i Figur 35, presenteras i Figur 36. Det är tydligt att vid den lägre hydrauliska konduktiviteten så går utvecklingen av vattenmättning och portryck betydligt långsammare.



<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Vattenbindningskurvor för övriga material utom tätjorden.



Figur 35. Resultat från modellering av dammkonstruktionens vattenmättnadsgrad (till vänster) och relativ hydraulisk konduktivitet (till höger) över tid (Sjödin 2021)<sup>9</sup>. Resultaten baseras på att startvärdet för tätkärnans hydrauliska konduktivitet är 5,2 × 10<sup>8</sup> m/s.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Dagarna motsvaras av följande datum: 2020-03-13 (0 dagar), 2020-04-02 (20 dagar), 2020-05-05 (53 dagar), 2020-05-20 (68 dagar), 2020-07-06 (115 dagar) och 2020-09-18 (189 dagar).





Figur 36. Resultat från modellering av dammkonstruktionens vattenmättnadsgrad efter 189 dagar. Startvärdet för tätkärnans hydrauliska konduktivitet är 5 × 10<sup>-10</sup> m/s (jämför med resultaten i Figur 34k).

#### 5.3 PORTRYCK

Resultatet från FE-modellering av portrycken i dammkonstruktionen, med datapunkter på motsvarade lägen som installerade givare, presenteras i Figur 37 -Figur 39 tillsammans med tidigare redovisad mätdata (se avsnitt 4.1).

Figur 37 visar att den utifrån modellering prognostiserade portrycksutvecklingen i uppströms finfilterunder dämningsupptagningen stämmer väl överens med motsvarande uppmätta portryck (portrycksgivare P5 och P6). Vid jämvikt, dvs. en tid efter det att dämningsgränsen nåtts, så är de modellerade portrycken högre än vad mätdata visar (portrycken överskattas).

Som framgår av Figur 38 och Figur 39 så resulterar modelleringen i att porundertrycken underskattas i början av magasinsupptagningen. Detta är något som kommer ses över i det fortsatta modelleringsarbetet framöver.



Figur 37. Portrycksutvecklingen från modellering i läget för givarna P1, P2, P5 och P6, tillsammans med motsvarande uppmätta portryck (Sjödin 2021).





Figur 38. Portrycksutvecklingen från modellering i läget för givarna P3, P7, P9 och P11, tillsammans med motsvarande uppmätta portryck (Sjödin 2021).



Figur 39. Portrycksutvecklingen från modellering i läget för givarna P4, P8, P10 och P12, tillsammans med motsvarande uppmätta portryck (Sjödin 2021).

#### 5.4 **DEFORMATIONER**

Vid dämningsupptagningen så sker en deformation av dammkonstruktionen. Eftersom tätkärnan till stor del bär upp vattnets horisontella last så förändras huvudspänningsriktningen i denna från att innan dämningsupptagningen enbart bero på belastning av egenvikter till att därefter bli vinkelrät i förhållande till kontaktytan mot uppströms finfilter. Ett nytt jämviktsläge uppnås då magasinsnivån ligger vid dämningsgräns (inträffar efter 115 dagars simulering), dvs. därefter är effektivspänningarna konstanta både till sin storlek och riktning.



Dammkonstruktionens deformation fortgår i takt med den ökade belastningen från dämningsupptagningen. I Figur 40 redovisas hur ett tvärsnitt av dammen har deformerats efter 115 dagar (räknat från tidpunkten för den första dämningsupptagning 2020-03-13). Av resultatet framgår att övergången mellan uppströms finfilter och tätkärnan fungerar som en gräns för hur deformationerna utbildas. För de vattendränkta genomsläppliga materialen på uppströmssidan så sker deformationerna i riktning mot magasinet. Tätkärnan deformeras som en fast inspänd konsol, med en nedströms utböjning som ökar med dess höjd över grundläggningen.

Som tidigare nämnts så har mätdata från dammens tre inklinometrar ännu inte färdigställts. PLAXIS-modelleringen har dock utförts så att horisontella deformationer kan bestämmas vid godtycklig tidpunkt i lägena för respektive inklinometers mätpunkter (på samma sätt som för portrycksgivarna). Dessa deformationer kan senare utvärderas gentemot data från de tre inklinometrarna. De resultat som på detta sätt har tagits ut från modelleringarna vid tre tidpunkter presenteras i Figur 41, Figur 42 och Figur 43. Det ses här att för samtliga datapunkter så leder ökad belastning (högre magasinsnivå) till större horisontella deformationer, och en minskad belastning (sänkt magasinsnivå) på motsvarande sätt till mindre horisontella deformationer. Av Figur 42 så framgår att egenskaperna för det grova bärlager som överlagrar tätkärnan leder till deformationer som avviker från tätkärnans respons.



Figur 40. Dammkroppens totala deformationer efter avslutad dämningsupptagning (Sjödin 2021). Deformationernas generella riktning har illustrerats med svarta pilar.





Figur 41. Modellerad utveckling, vid tre tidpunkter, av horisontella deformationer uppströms tätkärnan, i lägena för denna inklinometers respektive mätpunkter (Sjödin 2021).



Figur 42. Modellerad utveckling, vid tre tidpunkter, av horisontella deformationer i dammlinjen, i lägena för denna inklinometers respektive mätpunkter (Sjödin 2021).





Figur 43. Modellerad utveckling, vid tre tidpunkter, av horisontella deformationer nedströms tätkärnan, i lägena för denna inklinometers respektive mätpunkter (Sjödin 2021).



# 6 Diskussion och slutsatser

Syftet med detta projekt har varit att undersöka utvecklingen av deformationer och portryck vid dämningsupptagning och fortsatt drift. De resultat som redovisas baseras på vad som har uppnåtts till och med utgången av november månad 2020. Hittills är det främst portrycksdata som har utvärderats, vilket betyder att det dels återstår att analysera töjningsdata från den optiska fibern och data från inklinometrarna.

Den installerade geotekniska instrumenteringen möter de behov som finns för att utifrån dammens förutsättningar kunna validera geoteknisk modellering av beteendet i form av portryck, spänningsförhållanden och deformationer för ett tvärsnitt genom konstruktionen (2D). Motsvarande validering för dammen som helhet (3D) skulle kräva ytterligare givarinstallationer utmed dammlinjen.

Stödkonstruktionen kom att färdigställas senare än planerat vilket medförde att fyllningsdammen med alla dess installationer byggdes under besvärliga väderförhållanden. Trots detta så har både byggnationen och installationsarbetena överlag gått bra.

De i dammen installerade kablarna för geofysiska mätningar syftar främst till att detektera inbyggda skador i tätkärnan. Seismiken kan även användas för att bestämma tätkärnans elasticitetsmodul utifrån mellanhålsmätningar. Det har varit krävande att utifrån registrerade seismogram tolka vilken väg de seismiska vågorna tar och att identifiera deras ankomsttider. På det hela taget så är resultaten intressanta och visar att det är möjligt att, som ett alternativ eller komplement till triaxialförsök, bestämma elasticitetsmoduler för modellering av deformationer där sådan information saknas i övrigt (vilket i regel är fallet).

Utvärderingen av lufttryckskorrigerad data från portrycksgivarna görs med förutsättningen att givarna inte känner av något tryck innan dämningsupptagningen påbörjats, dvs. givarnas utsignal har nollställts inför detta (så att inga givare startar med att visa positiva tryck). Detta förfarande diskuteras för närvarande med leverantören av givarna, utifrån att det eventuellt kan ha byggts upp ett litet tryck i samband med installationen (givarnas inpackning) som behöver tas hänsyn till. Överlag så beskrivs dammens beteende väl av hittills insamlad portrycksdata. De fortsatta mätningarna kommer att utgöra ett bra underlag till analysarbetet, särskilt vad gäller utvecklingen av portryck i området vid tätkärnans nedre del mot nedströmssidans finfilter.

Det pågår ett omfattande arbete med att karakterisera fyllningsdammens material genom provning i labb. Resultat finns från undersökning av tätkärnans hydrauliska konduktivitet utifrån två typer av permeametrar - rörpermeameter och celltryckspermeameter – där den senare indikerar ett närmare 100 gånger tätare material (ca. 5×10<sup>-8</sup> m/s respektive ca. 5×10<sup>-10</sup> m/s). I och med att en celltryckspermeameter minskar risken för oönskat läckage utmed utrustningens väggar så är en viss skillnad förväntad, men när den är så här pass stor så innebär det påtagligt olika utveckling av tätkärnans vattenmättnadsgrad över tid. FE-modelleringen har främst utförts med det högre värdet på den hydrauliska konduktiviteten, med



överlag god överensstämmelse med data från portrycksgivarna. Mätningarna med celltryckspermeametern tycks därför resultera i en något för låg hydraulisk konduktivitet för tätkärnan.

Adam Sjödins examensarbete (Sjödin 2021) visar att det går att modellera en dammkonstruktionens förväntade beteende på ett bra sätt. Följande slutsatser kan dras utifrån resultaten:

- Tätkärnans låga hydrauliska konduktivitet medför att dess vattenmättnad tar lång tid att byggs upp. Tätkärnans uppströmssida reagerar följaktligen snabbare på förändringar i vattennivå jämfört med dess nedströmssida. Detta bedöms att simuleras väl i FE-modellen.
- Det modellerade tvärsnittets deformation följer med vattnets ökade belastning vid dämningsupptagningen. I och med att det framförallt är tätkärnan som är lastbärande, vilket åskådliggörs av FE-modelleringen, så utgör övergången mellan uppströms finfilter och tätkärnan en gräns för hur deformationer utbildas. Tätkärnans deformation sker på motsvarande sätt som en fast inspänd konsol, med en utböjning som ökar med tätkärnans höjd.
- Experimentdammens stödfyllning har inte genomgått ett styrt packningsarbete på samma sätt som skett för dess tätkärna och filter. Tätkärnan (och nedströms filter) kan således deformeras utan att motsvarande deformation förs över till stödfyllningens nedströmssida, vilket får till konsekvens att (små) rörelser i tätkärnan inte kan förväntas kunna detekteras genom global rörelsemätning av dammens nedströmssida. Laserskanning av en damms nedströmssida kan således inte kan ersätta direkta mätningar i en tätkärna (t.ex. genom inklinometer-mätningar).

Vad gäller på vilket sätt som den valda instrumenteringen lämpar sig för användning i befintliga dammar så kan det så här långt konstateras att portrycksgivare som installeras på samma sätt som i experimentdammen, i linje utmed en tätkärnas uppströms- och nedströmssida samt nedströms finfilter, ger mycket goda möjligheter till att analysera en tätkärnas dämmande funktion, inklusive dess respons vid magasinsförändringar. Inklinometrar med utformning som i experimentdammen ger detaljerad kontinuerlig information om dynamiken för finfilter och tätkärna, under förutsättning att de används tillsammans med en väldefinierad fixpunkt.

För geotekniska aspekter av seismik-relaterade installationer så visar hittills uppnådda resultat att de fyra meter långa rör, som löper ned till övergången mellan finfilter och tätkärna vid dammens respektive anslutning till betongkonstruktionen, hade varit bättre placerade närmare dammens mitt. På så vis skulle inverkan kunna minskas från interferens av vågor som reflekteras och refrakteras från och i stödkonstruktionens betongväggar. Vidare så skulle en fast installation av geofoner i några av rören underlätta analys av förändringar i kompressions- och skjuvvågshastigheter, och därmed förändringar i dammens elastiska egenskaper över tid.

Läckagemätningarna visar att det pågår en kontinuerlig självläkning, med ett linjärt minskat läckage över tid. Resultaten visar att det kan vara positivt att gå upp till dämningsgräns i två omgångar (med en avsänkning däremellan). Den



självläkning som på så sätt ges möjlighet att utbildas i dammens nedre delar medför att dammen klarar att ta ett större vattentryck med ett relativt litet läckage vid den återupptagna dämningsupptagningen.

Förbättrad materialrespons från simulering av experimentdammen kan åstadkommas med följande kompletterande laboratorieundersökningar:

- Bestämning av tätkärnans modul för av- och pålastning i triaxialförsök och tangentmodul från ödometerförsök.
- Bestämning av finfiltrets styvhetsmoduler genom laboratorieförsök.
- Bestämning av återfuktande vattenbindningskurvor för tätkärnan och finfiltret.



# 7 Referenser

- Johansson, S. och Bernstone, C. (2021). Temperature modelling and distributed temperature sensing using optical fibres in a test dam, International Congress of Large Dams (ICOLD), Marseille, November 2021. Will be published.
- Lagerlund, J., Toromanovic, J., Dahlin, T., Juhlin, C. & Johansson, S. (2020). Testdamm i Älvkarleby för skadedetektering. Bygg & Teknik, Nr. 1, s. 31-34.

Filho, T. B. O., Alvarez, M. G. L., Ottoni, M. V., och Amorim, A. B. B. D. (2019). Extension of the Gardener exponential equation to represent the hydraulic conductivity curve, J. of Hydrol. Hydromech., Vol. 67, No. 4, s. 359 - 371.

- Larsson, R. (2008). Jords egenskaper. Information 1, 5:e utgåvan. Statens Geotekniska Institut, ISSN 0281-7578, 62 s.
- Mayne, P.W. och Mitchell, J.K. 1988. Profiling of OCR in clays by field vane. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, No. 1, 150-157.
- Measurand (2015). Instruction manual SAA description & installation, Revision 5, Measurand Inc., Canada, 121 s.
- Atkinson, J.H. 2000. Non-linear soil stiffness in routine design, Géotechnique, Vol. 50, No. 5, s. 487-508.
- Morales, W.F. (2013). River dyke failure modeling under transient water conditions, Doktorsavhandling. ETH Zurich, Diss. ETH No. 21580. 430 s.
- Nooroz, R. Olsson, P-E, Dahlin, T. Günther, T., Bernstone, C. (2021). A geoelectrical pre-study of Älvkarleby test embankment dam: 3D forward modelling and effects of structural constraints on the 3D inversion model of zoned embankment dams, J. of Applied Geophysics, submitted.
- RIDAS Tillämpningsvägledning Avsnitt 7.2 (2011). Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet. Fyllningsdammar. Svensk Energi 2011-12-15. 63 s.
- Salas-Romero, S., Juhlin, C. and Bernstone, C. (2020a). The potential of detecting flaws in an experimental dam at Älvkarleby, Sweden, using P-wave traveltime tomography. Abstract EGU2020-6140.
- Salas-Romero, S., Juhlin, C. and Bernstone, C. (2020b). Blind testing using seismic methods for detecting flaws in an experimental embankment dam in Älvkarleby, Sweden. Abstract AGU Fall Meeting, 1-17 December 2020.
- Sjödin, A. (2021). Numerisk modellering av deformationer och portryck i en experimentdamm - Jämförelse mellan in situ-mätningar och FE-simuleringar i PLAXIS 2D, Examensarbete, Luleå tekniska universitet. 150 s.
- http://ltu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1521428&dswid=8944.
- Tornberg, R., Bernstone, C., Viklander, P. och Haas, H. (2021). SAA measurement for positioning filter tips of standpipes in embankment dams, International



Congress of Large Dams (ICOLD), Marseille, November 2021. Will be published.

- Toromanovic, J., Lagerlund, J., Viklander, P. och Laue, J. (2020). Geotechnical instrumentation of an experimental embankment dam. Proceedings of the 4th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics. s. 171 – 176.
- Toromanovic, J., Laue, J., Mattsson, H., Knutsson, S., Viklander, P. och Bernstone, C. (2021). Observations from initial impoundment of an experimental embankment dam – field data and modelling, International Congress of Large Dams (ICOLD), Marseille, November 2021. Will be published.
- Toromanovic, J., Laue, J. & Bernstone, C. (2021). Determination of material parameters of the material from the Älvkarleby test embankment dam. SVC-report in preparation.
- van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, No. 5., s. 892-898.
- Vattenfall (1988). Jord- och stenfyllningsdammar. Stockholm: Happy Printing AB. ISBN 91-7186-271-4
- Vattenfall (2015). Bestämning av hydraulisk konduktivitet med celltryckspermeameter, Provningsmetod VU-SC:52 revision 3, 2015-12-02, 6 s.



# DEFORMATIONER OCH PORTRYCK I EN EXPERIMENTELL FYLLNINGS-DAMM

Genom den experimentella fyllningsdammen i Älvkarleby, som har inbyggda sensorkablar och konstgjorda defekter, har möjligheterna att lokalisera olika defekter kunnat undersökas. Här har forskarna följt hur en fyllningsdamms egenskaper utvecklas efter att den har färdigställts. Syftet har varit att studera deformationer och portryck vid dämning och under fortsatt drift.

Resultaten fram till hösten 2020 visar både fördelar och utmaningar med att verifiera designparametrar och prognostisera en fyllningsdamms funktion. Resultaten visar också att instrumenteringen med portrycksgivare i tätkärna och filter ger värdefull information om dammens respons vid dämningsupptagning och under kontinuerlig drift.

# 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

