

ÖVERVAKNING AV I BERG VERKANDE UPPTRYCK PÅ BETONGDAMMAR

RAPPORT 2023:942



 VATTENKRAFT

VATTENKRAFTENS BERGFRÅGOR



Övervakning av i berg verkande upptryck på betongdammar

En vägledning

BENNY MOHLIN
LEONARD SANDSTRÖM
ALEXANDRA ÅLENIUS
MANOUCHER HASSANZADEH

ISBN 978-91-7673-942-6 | © Energiforsk maj 2023

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

Förord

Uptrycket under en betongdamm beror bland annat av bergets egenskaper och kan variera betydligt på kort tid. Om det verkande uptryckets storlek är kritisk för en damms stabilitet kan uptrycket hållas under uppsikt med hjälp av givare i berget. Om arbetssättet för mätning omfattar glesa manuella avläsningar av givarna registreras inte kortvariga maxvärden. I denna rapport presenteras riktlinjer för hur vattenkraftindustrin ska hantera uptrycksmätningar.

I projektet Övervakning av i berg verkande uptryck på betongdammar har olika metoder för uptrycksmätningar analyserats i syfte att ta fram riktlinjer för hur uptrycksmätningar bör hanteras. Dessa riktar sig framför allt till dammägare för deras förvaltning av befintlig instrumentering och som stöd inför investeringar i ny sådan instrumentering. I riktlinjerna hanteras bland annat frågorna om på vilket sätt data från uptrycksmätningar bör presenteras, placering och val av uptrycksgivare, hantering av dränage i anslutning till uptrycksövervakning och funktionskontroll.

Projektet har utförts av Benny Mohlin, Leonard Sandström, Alexandra Ålenius och Manouchehr Hassanzadeh, konsulter med expertis inom bland annat mätteknik, betongteknik och dammsäkerhet på Sweco Sverige AB. Uppdraget ingår i Energiforsks FoU-program Vattenkraftens bergfrågor etapp 2020–2022, med intressenterna Vattenfall, Fortum, Uniper/Sydkraft Hydropower, Statkraft, Skellefteå Kraft, Jämtkraft och Karlstads Energi. Projektets referensgrupp har utgjorts av styrgruppen för Vattenkraftens bergfrågor.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Rapportförfattarna ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Upptäck i anliggningsytan mellan betong och berg samt i berggrunden är av stor vikt för betongdammars stabilitet. Det är dock ofta svårt att uppskatta då upptäck är beroende av flertalet faktorer såsom dammens geometri, grundläggningens beskaffenhet, spänningsfördelningen i den potentiella brottytan samt förekomst av upptücksreducerande åtgärder.

För enkla konstruktioner där utbredning i längdled förutsätts vara stor ges i RIDAS samt flertalet andra riktlinjer för dammsäkerhet anvisningar om upptücksfördelningar som kan antas vid kontroll av dammars stabilitet. En sammanställning av ett flertal typfall inklusive schematiska figurer har sammanställts i denna rapport. För mer komplexa fall rekommenderas att mer avancerade metoder, till exempel finit elementanalys, tillämpas. För dessa fall kan det vara lämpligt att kalibrera och verifiera beräknat upptäck medelst övervakning.

Övervakning av upptäck är också ofta ett krav vid tillgodoräknande av upptücksreducerade åtgärder såsom till exempel installation av ett dränagesystem. Syfte med övervakningen är då dels att säkerställa åtgärdens upptücksreducerande verkan, dels att säkerställa denna verkan över tid.

Trots detta saknas idag tydliga rekommendation om hur övervakning av upptäck bör utföras och utvärderas och frågor uppkommer ofta i samband med såväl projektering och installation av övervakning som vid utvärdering av mätningar. Frågor uppstår också gällande hur uppmätt upptäck används. En trolig anledning till detta är att även övervakning av upptäck är svårt och bör anpassas till platsspecifika förhållanden samt syftet med övervakningen. Det finns dock ett antal steg som rekommenderas att man följer vid utformning och installation av ett övervakningssystem.

Syftet med övervakningen samt hur man avser att utvärdera mätdata, detta kan till exempel avse jämförelse med uppsatta larm och varningsvärden och/eller verifiering av antagen upptücksreduktion, är ett viktigt första steg vid utformning av ett övervakningssystem. Baserat på detta kan parametrar som ska **övervakas**, till exempel portryck, läckage, magasin nivå och temperatur, fastställas. Även antal och placering av givare bör bestämmas utifrån syftet med övervakningen. Till exempel kan antal givare och placering av givare skilja sig åt om syftet med övervakningen är att fånga förändringar över tid på grund av till exempel igensättning av dränagehål jämfört med mätningar som syftar till att erhålla en mer fullständig bild av hur upptäck varierar under dammen.

Lämplig instrumentering väljs med hänsyn till syfte, kostnader och underhållsbehov. Gällande borrhållmetoder vid installation rekommenderas generellt kärnborrning kompletterad med borrhållsfilmning. Kärnborrning förespråkas dels av praktiska skäl då det ger en bättre kvalitet på borrhållen vilket underlättar installation av mätutrustning, dels då de borrhåll som erhålls ger en direkt bild av berggrunden. Baserat på den information som erhålls kan då en optimering och

anpassning utförs på plats, till exempel justering av mätområdes storlek och placering. För att detta är det dock viktigt att ett kontrollprogram baserat på utförda stabilitetsberäkningar och förväntade förhållande på plats utformas i förväg.

Även redovisning och utvärdering av mätdata bör utformas utifrån syftet med mätningen och en tydlig instruktion om hur detta är tänkt att utföras bör tas fram redan under projekteringsskedet.

Nyckelord

Berg, Betongdammar, Upptryck, Upptrycksfördelning, Stabilitetsberäkningar, Övervakning, Instrumentering, Verifikationstester, Portryck, Dränage

Summary

Uplift in the interface between concrete and rock as well as in rock fractures has a large effect on the stability of concrete dams. However, it is often hard to estimate the uplift as it is dependent on several factors such as the geometry of the dam, the nature of the rock, stresses in the potential failure plane as well as the presence of uplift reducing measures.

For simple structures where length of a dam body can be assumed to be large the Swedish guidelines RIDAS as well as others give direction on how to estimate the uplift distribution. A compilation of several cases is presented in this report along with figures showing their uplift distribution. For more complex cases it is recommended to use more advanced methods such as FE-analysis is used. For these cases it can be useful to calibrate and verify the calculated uplift with measurements of the uplift. In the guidelines the surveillance of uplift is often a requirement if uplift reducing measures, such as installation of a drainage, are to be considered when evaluating the stability of the dam. The purpose of the surveillance is then both to ensure the function of uplift reducing measures and to ensure it keeps its function over time.

Despite this there is no recommendation on how to carry out surveillance and evaluation of uplift which leads to uncertainties when designing and installing surveillance systems, as well when evaluating their measurements. A possible reason for this is that surveillance of uplift is difficult and must be adapted to site specific conditions and to the purpose of the surveillance. There are however a few recommended steps to follow when designing and installing a surveillance system.

The purpose of surveillance and how the measurement data will be evaluated is the first thing to decide when designing the surveillance system. Based on this the parameters that will be monitored such as pore pressure in the dam foundation, leakage, reservoir level and temperatures, can be established. For example, the number of sensors to install and their placement depends on if the purpose is to monitor the function of the drainage, or if one wants to establish a more complete picture of how the uplift varies under the dam.

Suitable instrumentation is selected based on purpose, cost, and maintenance requirements. Core drilling is the recommended drilling technique for the drainage and measurement holes. The reason being both practical as it gives a better quality of the drill hole which facilitates the installation of monitoring equipment, it also makes it easier to collect geological information using the drilled core. Based on the information provided, the instrumentation can be optimized and adapted on site, for example the measurement range and the placement of sensors. However, for this to be successful it is necessary to beforehand design a control program based on stability calculations and the expected site conditions.

Presentation and evaluation of measurement data should be done based on the purpose of the surveillance and an instruction on how this is to be carried out should be produced during the planning of the surveillance program.

Innehåll

1	Introduktion	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Mål och syfte	9
1.3	Avgränsningar	9
1.4	Rapportens upplägg	9
2	Litteraturstudie - beskrivning av upptryck	11
2.1	Inledning	11
2.2	Representativa typfall	11
2.2.1	Massiva dammar	12
2.2.2	Utskovskonstruktioner	13
2.2.3	Lamelldammar	16
2.2.4	Injekteringsskärm	17
2.2.5	Dränagesystem	18
2.2.6	Förlängd läckageväg	22
2.2.7	Sprickplan i berg	23
2.3	Rekommendationer gällande Övervakning av upptryck	26
3	Design av övervakning samt presentation och utvärdering av mätdata	28
3.1	varning och larm	28
3.1.1	Larm	28
3.1.2	Varning	28
3.2	Vad och var mäta	29
3.3	Mätintervall	30
4	Metoder för övervakning av upptryck	32
4.1	Vattennivåmätning i magasin	32
4.1.1	Radar	32
4.1.2	Ultraljudsmätare	32
4.2	Läckagemätning	32
4.2.1	Läckagemätning ur dränagehål	33
4.2.2	Mätöverfall	34
4.3	Portrycksmätning	35
4.3.1	Relativa portrycksgivare	36
4.3.2	Absoluta portrycksgivare	37
4.3.3	Temperaturmätning i portryckshål	37
4.3.4	Portryckspetsar	37
4.4	Signalöverföring	39
5	Installation och kvalitetssäkring	40
5.1	Installation	40
5.1.1	Djup av dränagehål	40
5.1.2	Djup för portrycksmätning	40

5.2	Val av borrhmetod	40
5.2.1	Underhåll av dränage och portrycksinstallationer	41
5.2.2	Utfällningar innehållande arsenik	42
5.3	Verifikationstester	42
5.3.1	Dränage	43
5.3.2	Portryck	43
5.4	Utbildning av personal	44
5.5	Noteringsprotokoll vid installation av dränage	44
5.6	Noteringsprotokoll vid installation av portrycksgivare	45
6	Slutsatser och rekommendationer	47
7	Rekommenderade fortsatta studier	49
8	Referenser	50
Bilaga A:	Noteringsprotokoll vid installation av dränage	51
Bilaga B:	Noteringsprotokoll vid installation av portrycksgivare	55

1 Introduktion

1.1 BAKGRUND

Upptäck är av stor vikt för betongdammars stabilitet men ofta svårt att uppskatta då det är beroende av flertalet faktorer. I RIDAS (Energiföretagen, 2020) samt flertalet internationella riktlinjer och normer för dammsäkerhet presenteras rekommenderade upptäcksfördelningarna för olika typfall. Dessa är ofta baserade på antagande om en enkel konstruktion med stor utbredning i längdled. Ett sätt att kontrollera rådande upptäck under en damm för att verifiera antagen upptäcksfördelning i stabilitetsberäkningar är genom övervakning. Övervakning av upptäck kan också utföras för att kontrollera och kalibrera antagna förhållanden, till exempel i komplexa fall där upptäcksfördelning beräknas med finit elementanalys.

Övervakning av upptäck under betongdammar i Sverige utförs också i anslutning till dränagehål för att säkerställa dränagets upptäckreducerade verkan över tid. Detta är extra viktigt i de fall betongdammens stabilitet är beroende av ett fungerande dränage.

Trots detta saknas rekommendation om hur övervakning av upptäck bör utföras och utvärderas och frågor uppkommer ofta i samband med såväl projektering och installation av övervakning som vid utvärdering av mätningar och bestämmande av upptäcksfördelning för användande i stabilitetsberäkningar

1.2 MÅL OCH SYFTE

Syftet för denna studie är att analysera ett antal frågeställningar där resultaten ska utgöra en vägledning för utformning av övervakningssystem samt presentation av och utvärdering av mätdata.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Studien behandlar endast betongdammar grundlagda på berg. Fyllningsdammar och betongdammar grundlagda på jord betraktas inte.

1.4 RAPPORTENS UPPLÄGG

En kort genomgång görs avseende upptäck samt rekommenderade upptäcksfördelningar för olika representativa typfall för betongdammar grundlagda på berg enligt RIDAS (Energiföretagen, 2020) samt internationella riktlinjer och ramverk. Även instruktioner/rekommendationer gällande övervakning av upptäck i studerade riktlinjer och ramverk redovisas.

I kapitel 3 presenteras upptäcksmätningar där bland annat vad som är lämpligt att mäta, placering av mätare samt presentation av mätdata med hänsyn till mätningarnas syfte går igenom.

En översiktlig genomgång görs av olika typer av portrycksgivare samt andra mätare och installationer som alla inverkar på utvärdering av upptrycket, till exempel vattennivåmätning och placering av packers samt svanhalsar i dränagehål, presenteras i kapitel 4.

Rutiner för kvalitetssäkring presenteras i kapitel 5, följt av slutsatser och rekommendationer i kapitel 6.

2 Litteraturstudie - beskrivning av upptryck

2.1 INLEDNING

Upptryck utgörs av ett invändigt vattentryck i dammkroppen, anliggningsytan mellan betong och berg eller sprickor i berget. Vid traditionella handberäkningar antas det generellt tillräckligt konservativt att anta att upptrycket varierar linjärt från trycket H på uppströmssidan till trycket h på nedströmssidan baserat på en kontinuumbetraktelse där flödet antas ske jämnt fördelat genom ett homogent material.

Det finns dock flera faktorer som inverkar på flödet och därmed upptrycksfördelningen. Dessa utgörs bland annat av förekomst av dränagesystem och/eller injekteringsskärm, bergmassans uppsprickning, spänningsfördelningen i den potentiella brottytan samt ytans storlek. För konstruktioner med begränsad utbredning kan även tredimensionella randvillkor inverka på upptrycksfördelningen.

I de svenska riktlinjerna för dammsäkerhet, RIDAS (Energiföretagen, 2020), ges anvisningar för antaganden om upptrycksfördelning vid olika dammtyper och utföranden i Tillämpningsvägledning 9 Betongdammar, delavsnitt 9.1.3. Anvisningarna ges för enkla konstruktioner där utbredning i längdled förutsätts vara stor och innefattar bland annat massiva dammar, utskovsdammar och lamelldammar. Anvisningar ges också för inverkan av injekteringsskärm samt dränagehål på antagen upptrycksfördelningen.

Liknade anvisningar ges även i andra normer och riktlinjer. Nedan ges en kort introduktion och jämförelse gällande avvisningar för ett antal olika typfall redovisade i RIDAS (Energiföretagen, 2020), (NVE, 2005), (USACE, 1995), (USACE, 2005), (FERC, 1997), (FERC, 2002) samt (CDA, 2007) inklusive schematiska figurer för rekommenderade upptrycksfördelningar. Anvisningarna i riktlinjerna anses generellt tillräckligt konservativa för tillämpning vid konventionella 2D-handberäkningar. Det bör dock påpekas att en värdering bör ske vid varje enskilt fall och vid mer komplexa geometrier eller vid förekomst av till exempel slag eller krosszoner i berget under dammen kan det vara lämplig att anta större upptryck. Det kan även bli nödvändigt att tillämpa mer avancerade metoder, till exempel beräkning av upptrycksfördelning med finit elementanalys, ekvipotentiallinjer eller liknande, samt kalibrering/verifiering av upptrycksfördelningen genom övervakning.

2.2 REPRESENTATIVA TYPFALL

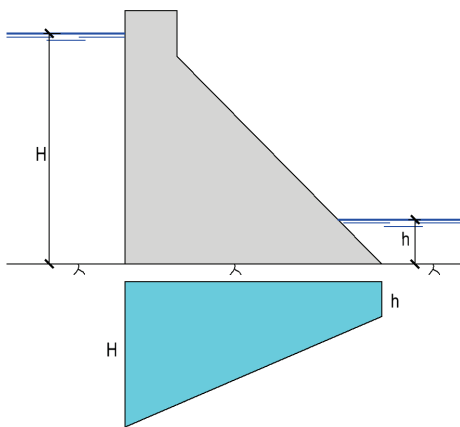
De typfall som presenteras i avsnitt 2.2.1 till 2.2.7 utgörs av:

- Massiv damm
- Massiv damm med del av anliggningsytan dragen
- Massiv damm med lutande sprickplan
- Skibord med pelare/skivor
- Dammpelare mellan skibord

- Ytterpelare
- Lamelldamm med dämmande frontplatta och pelartjocklek < 2 m
- Lamelldamm med dämmande frontplatta och pelartjocklek > 2 m
- Inverkan av dränagesystem
- Inverkan av förlängd läckageväg
- Sprickplan i berg

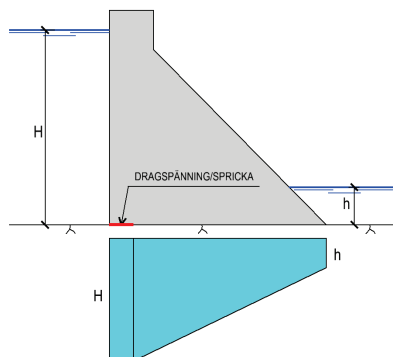
2.2.1 Massiva dammar

För massiva dammar utan dränage där hela grundläggningsarean bedöms vara tryckt antas upptrycket generellt som linjärt avtagande från trycket H på uppströmssidan till trycket h på nedströmssidan, se Figur 2–1.



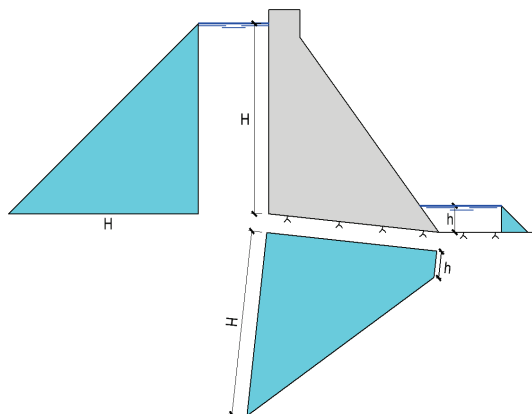
Figur 2–1 Schematisk upptrycksfördelning under massivdamm utan dränage, baserad på RIDAS (Energiföretagen, 2020). Samma antagna fördelning återfinns i anvisningarna i samtliga studerade riktlinjer.

I de fall där en del av grundläggningsytan inte är tryckt behandlas detta generellt som en spricka och fullt upptryck antas, se Figur 2–2. I (USACE, 1995) görs undantag från detta för de fall där en kortvarig förändring av trycket i grundläggningsytan och uppkomst av dragspänningar antas inträffa i samband med kortvariga jordbävningsslaster.

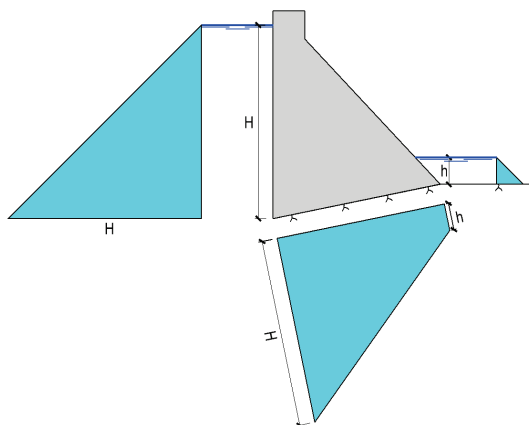


Figur 2–2 Schematisk upptrycksfördelning under massivdamm utan dränage då del av anliggningsytan antas dragen (röd markering). Baserat på anvisningar i samtliga studerade riktlinjer.

I de flesta riktlinjerna för dammsäkerhet visas den schematiska upptrycksfördelningen för massiva dammar med en horisontell anliggningsyta mellan betong och berg. Det är dock troligt att det förekommer fall där grundläggningssytan lutar något. Inga sådana exempel har återfunnits i studerade riktlinjer men i Figur 2—3 och Figur 2—4 visas två fall, framtagna baserat på samma princip som rekommendationerna för lutande sprickplan i berg i (USACE, 1995), se Avsnitt 2.2.7.



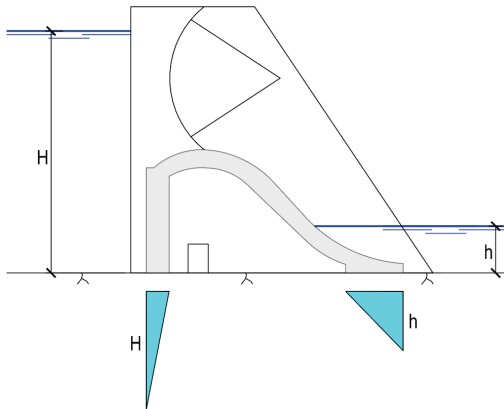
Figur 2—3 Schematisk upptrycksfördelning under massivdamm utan dränage med lutande anliggningsytan. Baserat på anvisningar för lutande sprickplan i berg i (USACE, 1995)



Figur 2—4 Schematisk upptrycksfördelning under massivdamm utan dränage med lutande anliggningsytan. Baserat på anvisningar för lutande sprickplan i berg i (USACE, 1995)

2.2.2 Utskovskonstruktioner

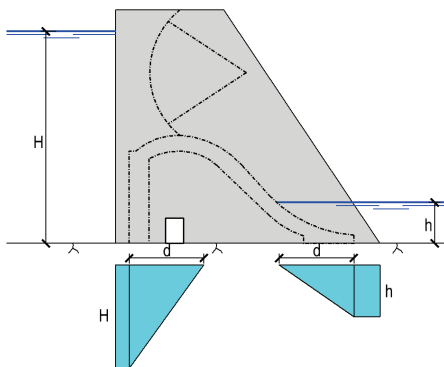
Enligt RIDAS (Energiföretagen, 2020) kan upptrycket för utskovskonstruktioner där skibordet är massivt beräknas som för en massivdamm. Om skibordet är understött av pelare/skivor ansätts i stället upptrycken vid uppströms- och nedströmsklackar Figur 2—5.



Figur 2—5 Schematisk upptrycksfördelning för skibord med pelare/skivor.

Upptrycksfördelningen enligt Figur 2—5 tillämpas oavsett förekomst eller inte av ett dränagesystem i berggrunden. Den förutsätter dock fungerande dränagepumpar vid pumpgropparna. Detta då ej fungerade pumpar kan resultera i att vatten samlas under skibordet. Det är då vattennivån i skibordet som kommer styra vilken reduktion av upptryck som kan antas. Det är därför viktigt att pumparnas funktion säkerställs genom till exempel redundanta system och/eller att utskovets stabilitet kontrolleras för det fall som uppstår vid icke fungerande pumpar på liknande sätt som till exempel igensatt dränage kontrolleras.

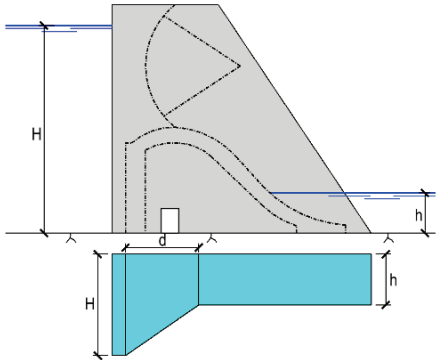
Enligt anvisningarna i RIDAS kan upptrycket under dammpelare mellan skibord understötta av pelare/skivor antas avta linjärt från fullt tryck vid skibordets uppströmskant till 0 efter en sträcka d som motsvarar pelarens tjocklek, se Figur 2—6.



Figur 2—6 Schematisk upptrycksfördelning för dammpelare mellan skibord. Fullt upptryck antas fram till klacken för intilliggande skibord, upptrycket avtar därefter linjärt över en sträcka d som motsvarar pelarens tjocklek, baserat på RIDAS (Energiföretagen 2020).

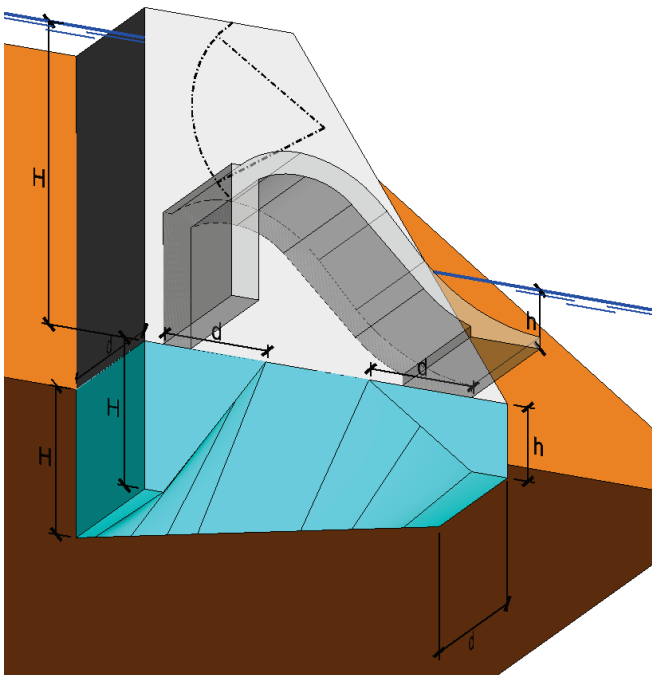
Även upptrycksfördelningen enligt Figur 2—6 förutsätter att fungerande dränagepumpar finns vid pumpgropparna. Detta då en ansamling av inläckande vatten under utskovet medför att en reduktion av upptrycket till 0 inte är realistisk. Om pelaren har en tjocklek som överskrider 2 m, bör längsgående och tvärgående

trycket under pelarväggen beaktas på liknande sätt som för stödskivan hos en lamelldamm, se Figur 2—7.



Figur 2—7 Schematisk upptrycksfördelning för dammpelare mellan skibord där pelarens tjocklek överskrider 2 m. Antagen upptrycksfördelning baseras på anvisningar i RIDAS (Energiföretagen, 2020).

Vid ansättning av upptrycket under ett utskov är det viktigt att förstå dess uppbyggnad och vilken del av konstruktionen som utgör en monolit samt hur den samverkar med omgivande konstruktioner. Till exempel är anvisningarna i RIDAS för antagande om upptrycksfördelning för ytterpelare annorlunda än för pelare mellan skibord då det antas att flödet inte kan dräneras på yttersidan. Upptrycket där antas därför på samma sätt som för en massiv damm, medan fördelning enligt Figur 2—6 antas för innersidan/sidan mot skibordet. Detta resulterar i en tredimensionell upptrycksfördelning liknande som visas i Figur 2—8.

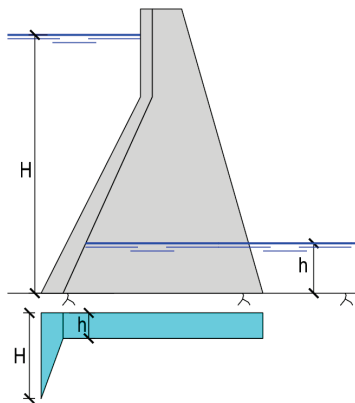


Figur 2—8 Schematisk upptrycksfördelning under ytterpelare baserat på anvisningarna i RIDAS (Energiföretagen, 2020).

Även bottenplattor, energiomvandlare och erosionskydd installerade nedströms om skibordet kan leda till förlängd läckageväg och en mer ogynnsam tryckfördelning, se Avsnitt 2.2.6.

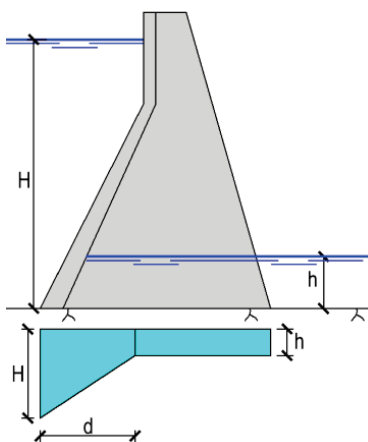
2.2.3 Lamelldammar

Lamelldammar har normalt inget dränage under den tätande frontskivan, varvid upptrycket under frontskivan kan antas linjärt avtagande från trycket H på uppströmssidan till trycket h på nedströmssidan på samma sätt som för massiva dammar, se till exempel RIDAS (Energiföretagen, 2020) och (FERC, 1997). Trycket under den stödjande pelaren kan antas påverkas av skivans tjocklek och möjlighet till dränering i sidled. Enligt anvisningarna i RIDAS (Energiföretagen, 2020) kan upptrycket utöver nedströmsvattenyta under en tunn pelare (tjocklek mindre än cirka 2 m) försummas, vilket ger en upptrycksfördelning enligt Figur 2–9.



Figur 2–9 Schematisk upptrycksfördelning under lamelldamm med dämmande frontplatta och pelartjocklek < 2 m, baserat på anvisningar i RIDAS (2020).

Är pelartjockleken större tas i RIDAS (Energiföretagen, 2020) även hänsyn till bidrag från uppströms vattentryck H varvid det antas att upptrycket minskar linjärt på en sträcka motsvarande pelarbredden (d), se Figur 2–10. I (FERC, 1997) så rekommenderas upptrycksfördelningen under den stödjande pelaren enligt Figur 2–10, oavsett pelarens tjocklek.



Figur 2—10 Schematisk upptrycksfördelning under lamelldamm med dämmande frontplatta och pelartjocklek > 2 m, baserat på anvisningar RIDAS (2020).

I flertalet andra riktlinjer saknas specifika anvisningar för lamelldammar. En anledning till detta skulle kunna vara att upptryck under tunna valvdammar och lamelldammar inte anses lika kritiskt som för massiva dammar. Detta då ytan på vilken upptrycket verkar är begränsad, se till exempel (FERC, 2002). Det bör dock noteras att undantag utgörs av fall där större flacka slag med aperturer på några millimeter till några centimeter förekommer relativt ytligt i berggrunden under dammen, se Avsnitt 2.2.7. Upptrycket kan då antas angripa en betydligt större area än anliggningsytan mellan berg och betong. Baserat på sprickplanets djup och orientering kan den tillkommande tyngden av bergkilen eventuellt inte vara tillräcklig för att kompensera för det ökade upptrycket.

Det bör också noteras att ovan beskrivna upptrycksfördelningar avser slanka konstruktioner där grundläggningens storlek och djup är begränsad. Vid stödjande pelare nedströms frontskivan som genom sin mäktighet tillsammans med frontskivan kan liknas med en massiv damm antas upptrycksfördelningar på liknande sätt som beskrivet i Avsnitt 2.2.1. Detsamma gäller om dammen är grundlagd på en platta eller om tätande material omger monoliten.

2.2.4 Injekteringsskärm

Injekteringsskärmar under betongdammar installeras för att reducera vattenflödet i bergmassan och minska läckaget men antas också ha en upptrycksreducerande effekt. I RIDAS rekommenderas att injekteringsskärmar främst betraktas som en extra säkerhet såvida inte tryckmätning och vid behov återinjektering sker. Detta då en successiv nedbrytning av injekteringens cementbruk över tid inte kan uteslutas, eftersom cementbaserade material inte är kemiskt stabila i kontakt med strömmande vatten vilket kan resultera i ökat upptryck, se till exempel (Rosenqvist, 2020) för en ingående beskrivning av injekteringsskärmars beständighet.

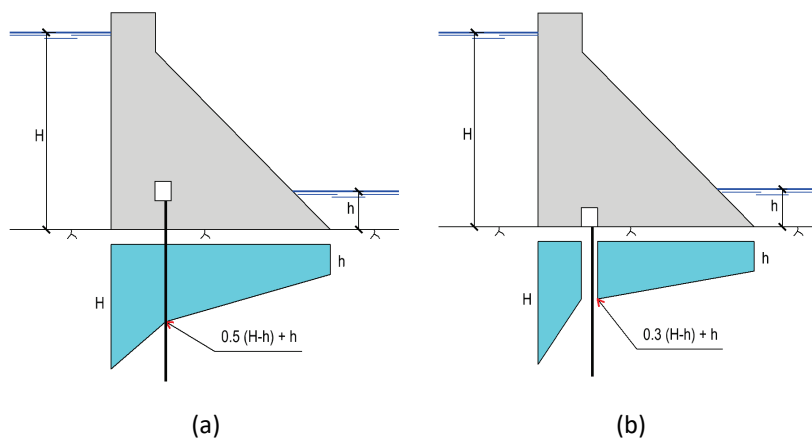
Liknade anvisningar återfinns i andra riktlinjer, till exempel så tillåter inte (FERC, 2002) att någon upptrycksreduktion medräknas till följd av endast injekteringsridå

med hänsyn till just risken för urlakning och injekteringskärmens funktion över tid. Man rekommenderar i stället att även ett dränagesystem installeras nedströms om injekteringsridån och att övervakning av upptrycket utförs i syfte att mäta faktiskt upptrycksreducerande effekt.

2.2.5 Dränagesystem

För att erhålla en upptrycksreducerande effekt kan ett dränagesystem i berggrunden under dammen installeras. Enligt anvisningarna i samtliga studerade riktlinjer/normer antas upptrycket då variera linjärt från H på uppströmssidan till ett upptryck reducerat med en reduktionsfaktor k vid dränagehålens läge och sedan till h på nedströmssidan.

I RIDAS ges anvisningar för två fall, ett med dränagetunnel i dammen och dränagehål i betongen och i berget, se Figur 2—11a, och ett med dränagehål i berget och dränagetunnel vid bergytan med olika upptrycksreducerande effekt vid dränagehålens läge, se Figur 2—11b.



Figur 2—11 Schematisk upptrycksfördelning för massiva dammar med dränage baserat på RIDAS (Energiföretagen, 2020).

Detta utgör ett undantag från anvisningarna i (NVE, 2005), (FERC, 2002) och (USACE, 2005) där endast fallet med dränagetunnel i dammen och dränagehål i betongen och i berget berörs, troligtvis då det ofta förutsätts att dränagegången är installerad ovan nedströmsvattenytan, se till exempel (NVE, 2005).

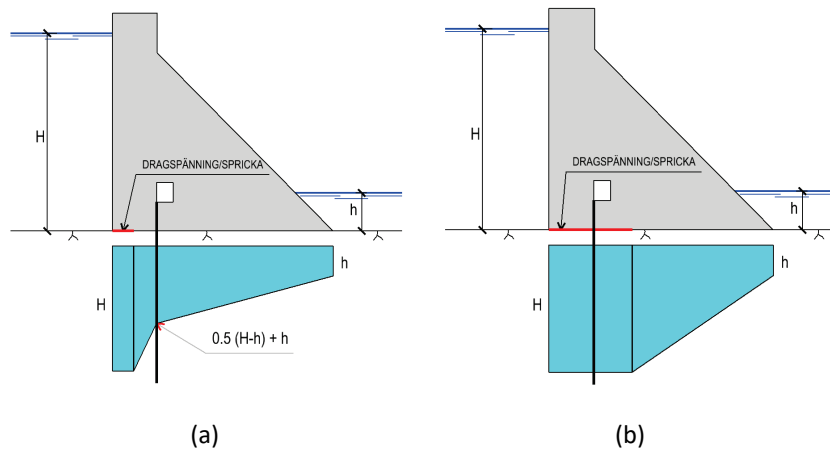
Även den upptrycksreducerande effekten som antas erhållas som följd av dränaget skiljer sig åt i de olika riktlinjerna. En sammanställning av reduktionsfaktorn k vid förekomst av dränage under massiva dammar redovisas i Tabell 2-1. Det saknas generellt information om var dessa reduktionsfaktorer kommer ifrån annat än att de är baserade på tidigare erfarenhet.

Tabell 2-1 Sammanställning av rekommenderade reduktionsfaktorer vid förekomst av dränagesystem i RIDAS, USACE, NVE och FERC (2002)

Riktlinje	Reduktionsfaktor, k	Övrigt
RIDAS	0,5	Dränagetunnel i dammen.
RIDAS	0,3	Dränagetunnel vid bergytan.
USACE	0,33 – 0,75	Ska baseras på mätningar och får enligt (USACE, 2005) vara lägst 0,5 om inte mätningar och flödesanalyser visar att dränagesystemets effektivitet kan motivera en lägre reduktionsfaktor. Enligt (USACE, 1995) får reduktionsfaktorn inte sättas lägre än 0,33 även i det fall denna baseras på mätningar och flödesanalyser.
NVE	0,33	Rekommenderat värde, om tester och mätningar inte ger underlag för annat värde.
FERC		Ingen generell rekommendation gällande k utan ska utvärderas baserat på tester och övervakning av dränagesystemets effektivitet. Generellt antas uppmätt effektivitet endast tillämplig för den magasinsnivå för vilken mätning utförts, dvs extrapolering till högre nivåer tillåts inte annat än vid enstaka fall.

Gemensamt för samtliga riktlinjer är att reduktionseffekten måste verifieras genom övervakning. Enligt (USACE 1995, 2005), (NVE 2005) och (FERC 2002) ska reduktionsfaktorn k baseras på mätningar av upptrycket, dock så saknas instruktioner om hur mätdata ska användas för framtagande av k . Enligt RIDAS (Energiföretagen 2020) så ska resultat från upptrycksmätningar endast användas för att verifiera funktion hos dränage och inte som indata i en stabilitetsanalys med hänsyn till igensättning samt till att upptrycksfördelningen är beroende av aktuell belastningssituation.

På samma sätt som för dammar utan dränage behandlas de delar av grundläggningsytan som inte är tryckt som en spricka. I RIDAS anges att om området utan tryckspänning överskrider sträckan fram till dränagehålet kan dräneringen inte längre anses vara funktionell och bör därmed inte medräknas. Figurer som illustrerat detta fall saknas i RIDAS men återfinns i till exempel (USACE, 1995). I Figur 2–12 nedan visas en schematisk bild av upptrycksfördelningen för en damm med dränage då del av kontaktytan inte är tryckt, framtagen baserat på anvisningarna i RIDAS (Energiföretagen, 2020). Upptrycksfördelning för fallet med dränagehål i berget och dränagetunnel vid bergytan kan antas på liknande sätt.



Figur 2—12 Schematisk bild av antagen upptrycksfördelning för damm med dränage då del av kontaktytan inte är tryckt (röd markering indikerar område som antas draget). I fall (b) överskrider området utan tryckspänning sträckan fram till dränagehålet varvid dräneringen inte längre anses vara funktionell. Bilderna är baserade på tolkning av rekommendation i RIDAS (Energiföretagen 2020), USACE (1995) samt FERC (2002) för de fall då det inte kan verifieras att dränagehålens funktion inte påverkas av spänningsfördelningen.

I (FERC, 2002) behandlas delar av grundläggningsytan som inte är tryckt också som en spricka där fullt upptryck råder. Dock så tillåts en viss reduktion av upptrycket med hänsyn till dränaget även i de fall området utan tryckspänning överskrider sträckan fram till dränagehålet om mätningar kan verifiera att dränaget fortfarande har viss upptrycksreducerande effekt. Schematiska fördelningar för sådana fall visas i Figur 2—13, där:

$$H_3 = k * (H - H_4) + H_4 \quad \text{då } H_4 > h$$

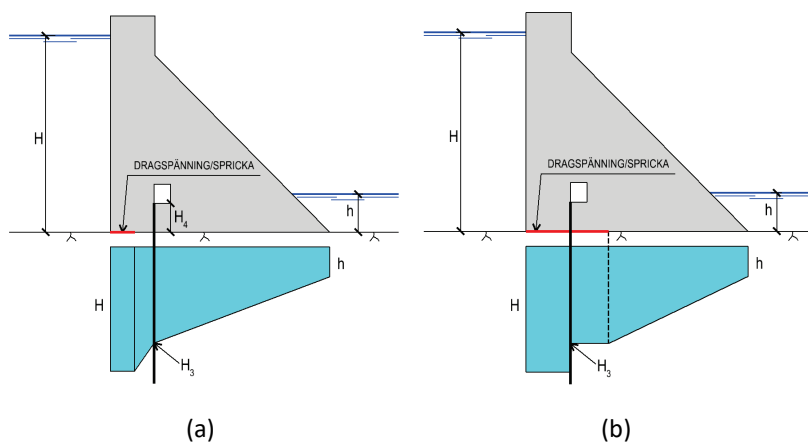
$$H_3 = k * (H - h) + h \quad \text{då } H_4 < h$$

för fall A och

$$H_3 = k * \left[(H - h) * \frac{L - X}{L - T} + h - H_4 \right] \quad \text{då } H_4 > h$$

$$H_3 = k * \left[(H - h) * \frac{L - X}{L - T} \right] + h \quad \text{då } H_4 < h$$

För fall B där T är sprickans längd och L är basens längd.



Figur 2—13 Schematisk bild av antagen upptycksfördelning för damm med dränage då del av kontaktytan inte är tryckt enligt (FERC, 2002)

I (USACE, 1995) samt (FERC, 2002) anges att dränagesystemet behöver utformas baserat på specifika platsförhållande och generella instruktioner gällande utformning saknas. I RIDAS (Energiföretagen, 2020) och (NVE, 2005) återfinns generella rekommendationer gällande utformning av dränagesystemet, dock så saknas förklaring och bakgrund till vald utformning. En sammanställning av kraven i de studerade riktlinjerna visas i Tabell 2-2. Det kan där noteras att till exempel i (NVE, 2005) inkluderas instruktioner om borrhålens placering i strömningsriktningen samt krav gällande hantering av läckagevatten vilket inte finns i RIDAS (Energiföretagen, 2020).

Tabell 2-2 Sammanställning av rekommendationer/krav gällande utformning av dränagesystem i de studerade riktlinjerna

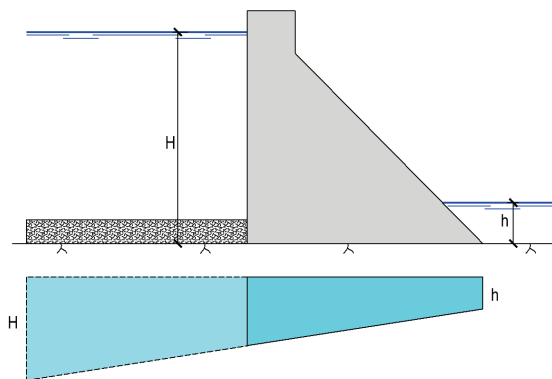
Riktlinje	Diameter	Djup	c/c-avstånd	Övrigt
RIDAS	75-100 mm	0,5H	1,5 – 3,0 m	
NVE	≥ 100 mm	0,5H	≤ 3,0 m	<p>Det förutsätts att läckagevattnet från samtliga hål är synligt i inspektionsgången och att vattnet dräneras frostfritt ur dammen via självfall.</p> <p>Inspektionsgången ska placeras så att den ligger över normal nedströmsvattenyta.</p> <p>Dränagehål borras nedströms om en eventuellt tät skärm och inte närmare uppströmskanten än 1 m plus 5% av dammens höjd.</p>
FERC				Samtliga antaganden gällande dränagesystemets effektivitet ska verifieras medelst testning och övervakning.

I de flesta riktlinjerna krävs också att en underhållsplan för dränagesystemet tas fram och implementeras för att den upptrycksreducerande effekten ska få tillgodoräknas i stabilitetsberäkningar med hänsyn till risken för igensättning av dränagehålen. Enligt (FERC, 2002) bör underhållsplanen minst omfatta:

- Periodiska tester för att lokalisera igensatta dräner och dräner som inte längre fungerar.
- Korrigeringsåtgärder som borring av nya hål eller renspolning av igensatta dränagehål.
- Installation av kompletterande dränagehål i syfte att uppfylla designen.
- Periodisk övervakning och kalibrering av givare.

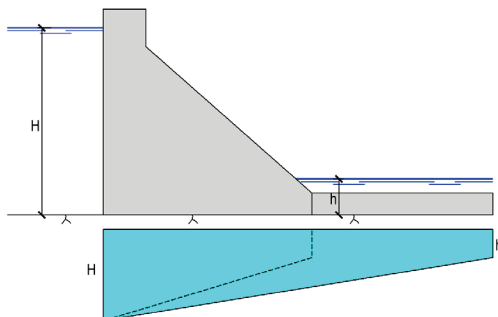
2.2.6 Förlängd läckageväg

Ytterligare ett sätt att reducera det upptryck som verkar på en betongdamm är att installera en tätande panur uppströms om dammen och på så sätt förlänga läckagevägen. I RIDAS (Energiföretagen, 2020) saknas anvisningar för denna typ av åtgärd men anvisningar finns i till exempel (FERC, 2002), se Figur 2–14. Det är för dessa fall viktigt att säkerställa panurens täthet och att verifiera bedömd upptrycksreduktion med mätningar.



Figur 2—14 Schematisk upptrycksfördelning under massiv damm utan dränage med tätande panur installerad på uppströmssidan. Endast upptrycket under dammen antas inverka på dammens stabilitet om panuren och dammen utgörs av olika monoliter. Streckad fördelning visar upptrycket under panuren som inte inkluderas i stabilitetsberäkningarna av dammonoliten. Baserat på FERC (2002).

På liknade sätt kan täta installationer nedströms om dammen, till exempel energiomvandlare eller erosionsskydd nedströms en utskovskonstruktion, förutsättas leda till ett ökat upptryck under dammen, se exempel i Figur 2—15. I dessa fall är det enligt (FERC, 2002) godtagbart att anta att upptrycket under "plattan" maximalt motsvarar det upptryck som skulle resultera i att plattan lyfter.

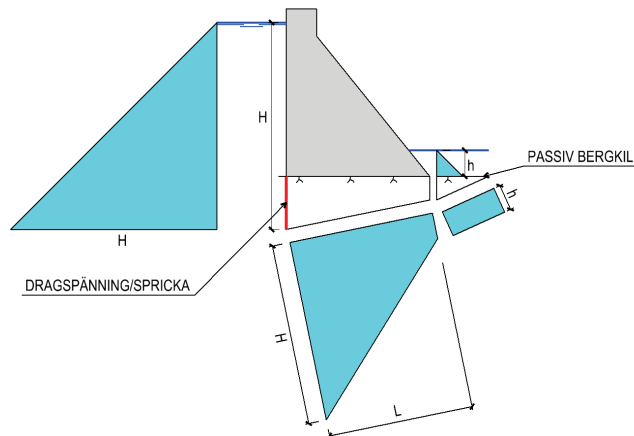


Figur 2—15 Schematisk upptrycksfördelning under massiv damm utan dränage med tätande konstruktion installerad nedströms. Baserat på FERC (2002).

2.2.7 Sprickplan i berg

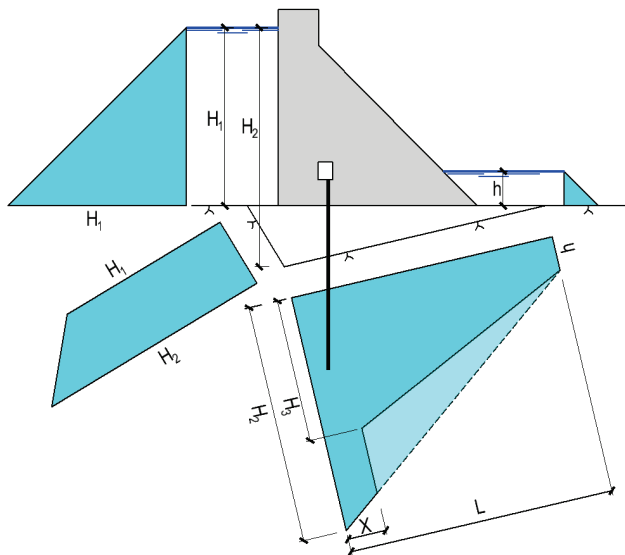
För sprickplan i berg antas i de flesta riktlinjerna upptrycksantaganden för en massivdamm gälla då den tillkommande bergkilen ovan sprickplanen kan likställas med en bottenplatta. Enligt RIDAS kan upptrycksfördelning för ett sprickplan i berg som inte genomkorsas av dränagehål antas enligt Figur 2—1, om hela ytan är tryckt och enligt Figur 2—2 om del av ytan inte är tryckt. Om dränagehål finns hänvisas till Figur 2—11a.

I de fall sprickorna har en gynnsam lutning, dvs. att de stiger åt nedströmshållet, och bergytan är relativt horisontell kan även mothållet från en passiv kil bidra till grundens stabilitet. Schematisk upptrycksfördelning för det fallet visas i Figur 2—16. Det är då viktigt att upptrycket under den passiva kilen beaktas vid beräkning av det passiva mothållet från kilen.

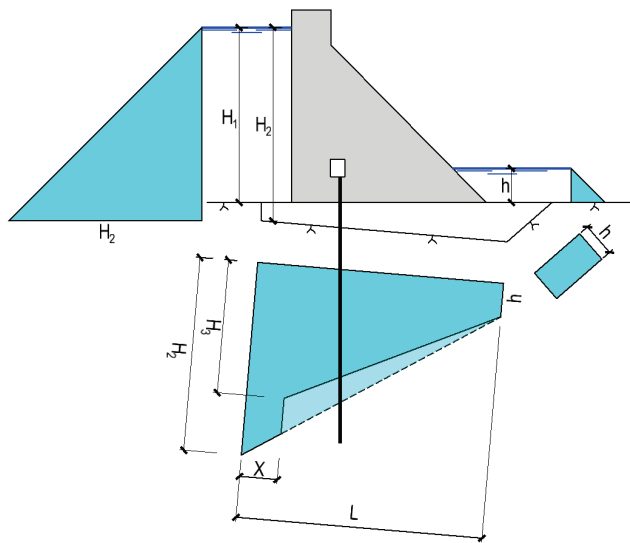


Figur 2—16 Schematisk upptrycksfördelning för sprickplan i berg då mothåll från en passiv bergkil tillgodoräknas.

I schematiska figurer för upptryck under massiva dammar antas ofta brottytan vara horisontell med undantag av (USACE, 1995) där schematiska figurer redovisas även för lutande sprickplan, se Figur 2—17 och Figur 2—18 där streckad fördelning avser fallet där dränaget inte anses ha en upptrycksreducerande effekt på sprickplanet. Det bör noteras att även det hydrostatiska trycket bör korrigeras med hänsyn till sprickplanens lutning såsom visas i Figur 2—18. Dvs då antagen bergkil under dammen begränsas av ett horisontellt sprickplan eller en dragspricka ska horisontellt vattentryck antas verka på både berget och bergkilens horisontella uppströmsyta.



Figur 2—17 Schematisk upptrycksfördelning för lutande sprickplan under betongdamm men och utan dränage. Baserat på USACE (2005)



Figur 2—18 Schematisk upptrycksfördelning för lutande sprickplan under betongdamm med och utan dränage. Baserat på (USACE, 1995).

Ovan beskriven betraktelse är i många fall acceptabel vid kraftigt uppspruckna bergmassor. För fall där flödet sker i enskilda sprickor kan dock förändringar i aperturen innebära att det för vissa sprickor finns en större risk för att bygga upp höga upptryck i berggrunden under en damm. En beskrivning av hur en sprickans förändring i apertur påverkar upptrycksfördelning återfinns i till exempel (Johansson m fl, 2017). Även hur sprickan samverkar med andra sprickor har en avgörande roll för hur flödet genom sprickan kommer att ske. Det är således mycket viktigt att identifiera om större genomgående och ytliga slag existerar i berggrunden under dammar och samtidigt utforma lämpliga åtgärder för att reducera potentiellt höga portryck i dessa slag i syfte att säkra stabilitet mot glidning. I dessa fall bör också den upptrycksfördelningen som används i stabilitetsberäkningar verifieras medelst mätningar då det med hänsyn till de stora osäkerheterna är svårt att bestämma en representativ fördelning.

2.3 REKOMMENDATIONER GÄLLANDE ÖVERVAKNING AV UPPTYCK

Så som beskrivits ovan så är övervakning av upptrycket ofta ett krav i de fall en upptrycksreducerande effekt, till exempel baserat på installerat dränagesystem eller en tätande panur, antas för att uppfylla ställda stabilitetskrav. Övervakning av upptryck kan också vara lämpligt för komplexa fall där beräknat upptryck behöver verifieras.

Övervakning av upptryck är dock svårt och kräver kunskap om olika strömningsförhållanden under dammen. I RIDAS rekommenderas därför att en modell av det förväntade upptrycket upprättas innan installation av portrycksmätare i syfte att erhålla en korrekt utvärdering av mätvärden. Dock ges inga generella instruktioner gällande övervakningssystemets utformning, till exempel antal, typ och placering av givare, mätintervall osv.

I (FERC, 2002) rekommenderas por- och upptrycksgivare ingå som del i övervakningen för alla nya dammar. För befintliga dammar anses installation av por- och tryckgivare nödvändig endast om upptrycksreduktion antagits för att uppfylla ställda stabilitetskriterier, eller om speciella förhållanden misstänks. Antal och placering ska då utformas så att en komplett bild av den parameter som mäts erhålls. För portrycksgivare anses generellt 2 till 3 givare behövas i det tvärsnitt där maximalt upptryck förväntas. Ytterligare tvärsnitt kan behöva övervakas vid komplexa förhållanden eller om jämförelse mellan olika tvärsnitt önskas. Det rekommenderas också att mätning utförs på flera isolerade tvärsnitt om grundläggningen är stratifierad/skiktad, dvs en variation av upptrycket på grund av andra orsaker än endast djup kan förväntas i olika lager av den ytliga berggrunden. Installation av givare och kablar ska utföras så att inga läckagevägar öppnas upp i anslutning till dessa.

Enligt (FERC, 2002) bör bygghandlingar tas fram och tidigare erfarenheter vägas in vid val av entreprenör. Leverantören ska upprätta stegvisa instruktioner gällande installation av utrustning, insamling samt kvalitetssäkring av data.

Vidare ska enligt (FERC, 2002) ett övervakningsprogram tas fram som beskriver:

- Ansvarsfördelning
- Rutiner för datainsamling, databehandling och presentation
- Rutiner för rapportering av resultat som också säkerställer att problem som uppdragas i samband med övervakningen åtgärdas i rätt tid.

Varnings- och larmvärden ska också tas fram och dokumenteras i övervakningsprogrammet. Även kriterierna som använts för framtagning av värdena ska framgå. Dessa kan i vissa fall utgöras av värden för vilka dammens stabilitet ej längre är uppfyllda. I andra fall kan de baseras på observerade värden eller värden som enligt ansvarig ingenjör kräver vidare utvärdering. Värden ska fastställas avseende faktisk magnitud, men också avseende förändringshastighet.

För installerad övervakning bör enligt (FERC, 2002) också dokumentation som innehåller följande utarbetas:

- Syftet för respektive givare
- Förväntat mätområde samt larm- och varningsvärden för respektive givare

- Tillverkarens specifikationer
- Installationsloggar
- Kalibreringsdata
- Inledande avläsningar
- Plan- och sektionsritningar som visar antal givare och dess placering, och eventuella detaljer
- Information om berggrunden

I (USACE, 1994) görs en genomgång av olika typer av givare, och dess för- och nackdelar. Gällande presentation anges att mätdata ska presenteras så att trender kan observeras och så att mätdata kan jämföras med förväntat beteende.

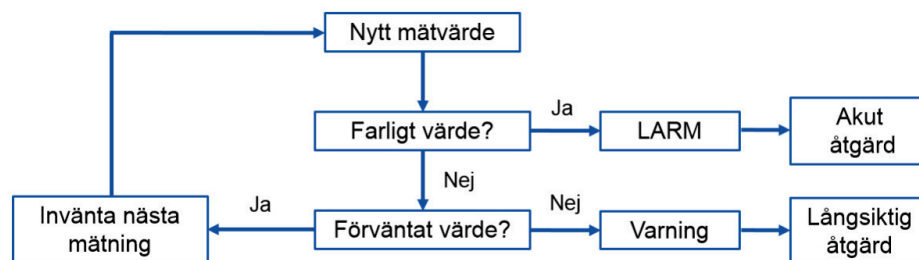
3 Design av övervakning samt presentation och utvärdering av mätdata

För att kunna utforma ett övervakningssystem är det viktigt att förstå syftet med övervakningen samt hur mätdatat avses att användas.

3.1 VARNING OCH LARM

Inom dammövervakning är larm och varning (alarm & alert) två centrala begrepp för meddelanden om upptäckten av en potentiell dammsäkerhetsrisk, se till exempel Bulletin 158, (ICOLD, 2018).

Larm är kopplat till ett akut farligt beteende varför det bör efterföljas av en omedelbar översyn. Varning kopplas till ett oförväntat beteende och en misstanke om skada och kan i regel hanteras på lite längre sikt (Hellgren m fl, 2019). Nedan ges en kort introduktion till begreppen, för en mer utförligt beskrivning se Bulletin 158, (ICOLD, 2018). För en mer utförlig beskrivning om hur värden kan definieras se till exempel (Hellgren m fl, 2019).



Figur 3—1 Flödesschema för dammövervakning från Modeller för övervakning av betongdammar, (Hellgren, Nordström, & Malm, 2019).

3.1.1 Larm

Om ett larm utlyses behöver akuta åtgärder genomföras för att garantera dammsäkerheten. Larmet kan vara kopplat till en stor förändring i portrycket eller läckageflödet som då innebär att acceptabelt upptryck enligt utförda stabilitetsberäkningar överskrids och dammsäkerheten är därmed äventyrad. Larmvärdet bör således bestämmas utifrån värden på upptrycket som motsvarar dammens säkerhetsfaktorer för stabilitet. Vid ansättandet av larmvärdet är det också viktigt att ta hänsyn till var mätning av portrycket sker. Detta så att uppmätt värde kan översättas till motsvarande värde vid den brottyta som avses, till exempel så mäts ofta portrycket i berggrunden men beräknad stabilitet avser ett brottplan i anliggningsytan mellan betong och berg. I sådana fall behöver uppmätt värde justeras med hänsyn till skillnad i elevation mellan mätområde och brottplan. Värdet bör också kopplas till andra randvillkor, till exempel magasinshöjd.

3.1.2 Varning

En varning innebär att dammens beteende avviker från det förväntade, dock inte tillräckligt mycket för att dammsäkerheten ska anses vara direkt hotad. Syftet med

varningsvärden är att tidigt bli medveten om förändringar eller upptäcka skador på dammen som påverkar dess beteende och ger utslag i mätvärdena. Lämpliga åtgärder kan då sättas in i syfte att förhindra att situationen försämras. En sådan förändring kan till exempel vara påbörjan till igensättning av ett eller flera dränagehål varvid en lämplig åtgärd kan vara utförande av falling head test eller urpumpningsförsök i hålen för jämförelse mot referensmätning utförd i anslutning till installation av dränagehålen, se Avsnitt 5.3.1.

Vid nyinstallation av givare kan varningsvärden temporärt sättas utifrån stabilitetsberäkningar. När mätningar har pågått under åtminstone ett år så kan varningsvärden i stället justeras utifrån mätserien och den förväntade variationen.

För att ge handlingsutrymme innan larmgränsen för upptricket nås bör ett värde motsvarande en högre säkerhetsfaktor än för ett normalt lastfall tillämpas. Det är också viktigt att beräknat värde kalibreras mot uppmätta värden eftersom mätdata erhålls. Detta för att undvika att onödigt lång tid hinner gå innan ett förändrat beteende upptäcks i de fall en stor avvikelse mellan uppmätt värden och varningsvärden erhållna ur en stabilitetsberäkning förekommer då det kan ha en inverkan på nivån av lämpliga åtgärder. Till exempel kan en upprymning av dränagehål alternativt borrning av nya hål bli nödvändig i stället för urspolning om inte processen upptäcks och åtgärder sätts in i rätt tid.

Vid ansättning av varningsvärden och tillhörande åtgärder är det viktigt att parametrar som påverkar upptricket, till exempel magasinsnivå och spill, beaktas. Modellen som prognosen baseras på måste därför fånga dessa variationer och ändringar så att en varning inte utlöses vid ett spill om det inte leder till ett portryck högre än vad som är väntat vid just ett spill. I flera av de studerade internationella riktlinjerna nämns också att mätvärden erhållna under normala driftförhållanden ej bör omräknas för att erhålla värden vid till exempel spill. I stället bör varningsvärden för dessa situationer baseras på värden uppmätta i samband med spill.

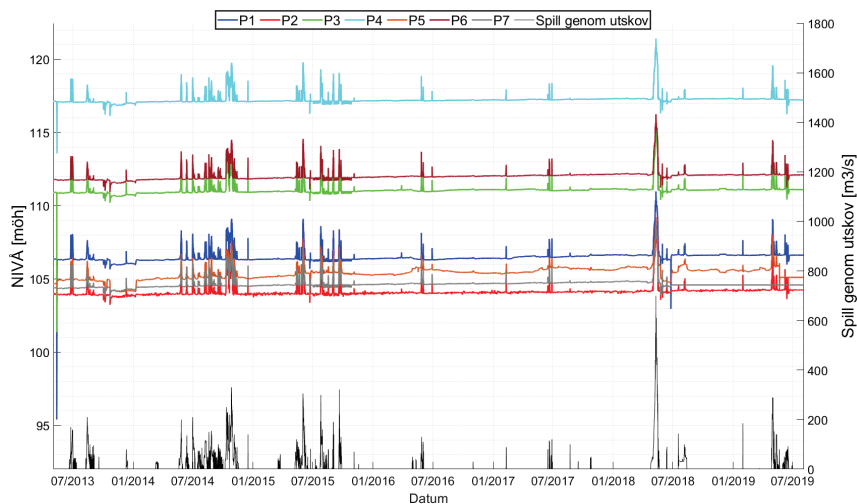
3.2 VAD OCH VAR MÄTA

I svenska dammar så mäts generellt upptricket vid en punkt i en eller flera tvärsnitt. Om dränagehål finns installerade så mäts portrycket ofta direkt nedströms från dränaget i syfte att kontrollera/verifiera dränagets funktion. Detta ger information om portrycket vid den punkten och eventuella förändringar över tid men det kan då ifrågasättas om det är rimligt att verifiera/härledda antagen upptricksfördelningen under en hela monoliten baserat på mätning i en punkt. I (FERC, 2002) rekommenderas till exempel att 2–3 givare installeras i en sektion för att på så sätt få en så komplett bild som möjligt av portrycket under dammen.

Vattenföringen i kristallin berggrund är beroende av antalet sprickor och deras orientering, till vilken grad dessa är sammanhängande och mineraliserade men också rådande bergspänningar. Givarnas placering i höjddled samt mätområdets storlek är därför viktig för att erhålla en så korrekt bild som möjligt av upptricket under dammen och bör väljas med hänsyn till de specifika förhållandena på plats. Förekomst, läge (djup) och orientering av vattenförande sprickplan i berggrunden är viktiga parametrar att beakta.

För att kunna tolka och utvärdera mätdata från portrycksmätningarna är också mätdata från stödinstrumentering och detektorer viktiga, till exempel vattennivåmätningar från dränagehål samt temperaturmätningar, dessa beskrivs närmare i avsnitt 4. Även mätning av läckageflöden ur dränagehål installerade i berggrunden kan användas som stöd vid tolkning och utvärdering av framför allt ändringar i uppmätt portryck. Till exempel kan en reduktion av läckageflöden indikera på igensättning av dränagehålen. Dessa givare presenteras mer i detalj i Avsnitt 4.

Även information gällande drift av dammen och underhållsåtgärder, till exempel datum och tid för spill samt underhåll på instrument är viktigt att dokumentera, då det har inverkan på tolkning av temporära variationer i mätningarna. Figur 3-2 visar uppmätt portrycksnivå över tid för ett antal givare och spillet genom intilliggande utskov. Mätvärden för läckage och portryck i sprickplan kan påverkas av yttre faktorer såsom spill genom utskov, se till exempel (Mohlin & Åström, 2019). För att bättre förstå sådana falska positiva larm och utvärdera baserat på rätt antagna lastfall för stabilitetsberäkningarna kan kompletterande instrumentering så som nederbörds mätning också vara till hjälp.



Figur 3-2 Portrycksmätningar plottade mot spillet (nedersta grafen) genom intilliggande utskov. Uppmätt portryck korrelerar starkt med spillet.

3.3 MÄTINTERVALL

Mätning bör utföras kontinuerligt. På många anläggningar där portrycksgivare finns installerade sker idag automatiserad mätning vilken innebär att mätintervall ofta är tillräckligt för utvärdering. På äldre installationer där portrycket mäts manuellt bör mätdata inte utnyttjas för att bestämma varningsvärden. Mätningarna kan dock ändå ge en fingervisning om dränagets effektivitet och ifall givaren fungerar.

Mängden mätdata som produceras av kontinuerlig mätning med kort mätintervall innebär ofta inga större problem när det gäller att lagra och överföra data. Dock kan utvärderingen av mätdata behöva anpassas efter datamängden, till exempel kan en stor datamängd behöva glesas ut för att underlätta hantering vid till

exempel transformation av uppmätta värden till värden som använts för utvärdering av dammstabiliteten.

4 Metoder för övervakning av upptryck

Övervakning av upptryck görs typiskt genom att mäta portryck. Dock finns det också andra mätningar som kan påverka och underlätta utvärderingen av erhållna mätdata, till exempel påverkas upptrycket av vattennivån i magasinet. Mätdata från stödinstrumenteringen kan också utgöra ett viktigt underlag vid analys och utvärdering av förändringar i upptrycket och vilken inverkan det kan förväntas ha på dammens bedömda stabilitet samt vilka åtgärder som är lämpliga. anledning till förändringar.

En introduktion till metoder för vattennivåmätning i magasin, läckagemätning samt mätning av portryck ges i Avsnitt 4.1 till 4.3 nedan.

4.1 VATTENNIVÅMÄTNING I MAGASIN

Det förväntade upptrycket är direkt korrelerat till vattennivån i dammens magasin. För att utvärdera uppmätt upptryck och bedöma rimlighet i erhållna värden samt anledning till eventuell variation utgör magasinets vattennivå viktig indata. Kontinuerlig mätning av magasinets vattennivå utförs redan i de flesta anläggningarna bland annat produktionsmässiga skäl. För att mäta vattennivån finns flera typer av mätsystem att välja mellan. Det vanligast förekommande är ultraljudsgivare eller radar. Nedan följer en kort beskrivning av några olika metoder att mäta vattennivån.

4.1.1 Radar

Vattennivån i magasinet kan mätas med en radar som skickar ut en radarpuls som studsar mot vattenytan och reflekteras tillbaka till instrumentet, genom att mäta tiden det tar för pulsen att reflekteras tillbaka kan vattennivån beräknas, SMHI (2018).

4.1.2 Ultraljudsmätare

Vattennivån kan också mätas med en ultraljudsmätare som skickar ut ultraljudsvågor som reflekteras tillbaka till instrumentet. För att kunna ta emot vågorna behöver givaren ställa om till en mottagare av ultraljud. Vattennivån beräknas utifrån tiden det tar ultraljudet att spridas till vattenytan och reflekteras till instrumentet.

4.2 LÄCKAGEMÄTNING

Vattenläckage genom berg kan mätas vid dränagerören om dessa utrustas med en s.k. svanhals. Läckaget samlas upp så att flödet kan mätas. För att kunna mäta vattenläckage installeras en mekaniskt åtdragbar packer mellan utsidan av dränageröret och berget som hindrar vattnet från att rinna ut i ytliga sprickor och i stället stiga upp genom svanhalsen.

På vissa anläggningar förekommer inte svanhalsar då turbulent strömning i rören medför luftning av dränerat vatten vilket kan bidra till utfällning av till exempel

trevärt järn. Detta kan motverkas med underhåll, dvs att dränagehålen/svanhalsen blåses ur med jämna mellanrum. Om svanhalsar inte finns installerade ökar risken att läckageförändringar missas. De stora underhållsfrågorna kommer framför allt då artesiskt tryck uppstår i ett dränagehål eftersom vatten som luftas då leder till utfällningar. Dock kan igenslammning/igensättning av dränagehål ändå ske trots att ett dränagehål inte är artesiskt trycksatt. Därför bör ett underhållsprogram finnas som inkluderar renblåsning av dränagehålet med jämna mellanrum.

4.2.1 Läckagemätning ur dränagehål

Packerns funktion är att täta dränagehålet så att eventuellt läckage leds genom svanhalsen och inte läcker ut utanför röret och därmed inte går att mäta. Packern behöver placeras ovanför vattenförande sprickor men under ytliga icke vattenförande sprickor för att artesiskt tryck ska kunna upptäckas och mätas, se Figur 4–1. Artesiskt tryck visas då vatten rinner från svanhalsen.

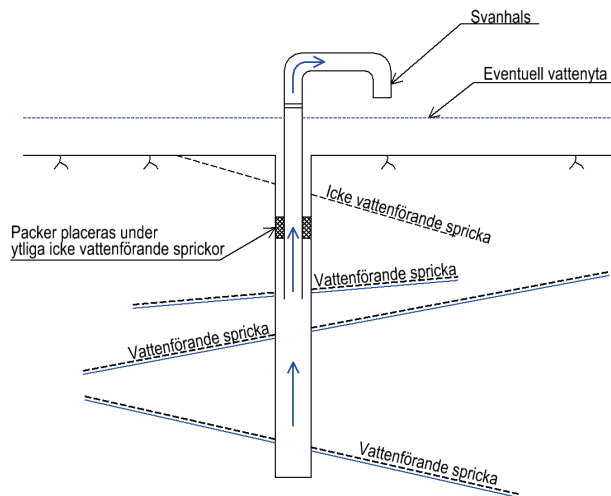
För att bestämma placering av packer i ett **icke artesiskt** dränagehål kan följande procedur följas:

- Studera borrhprotokollet, förekommer det ytliga sprickor eller är berget fast ≤ 3 m från bergöverytan?
- Kontrollera om karteringen av borrhkärnorna alternativt BIPS-filmningen visar vilka sprickor som är vattenförande.
- Bedöm om det finns andra faktorer som påverkar vilken höjd packern bör sitta på, till exempel bergets lutning inom monolitfacket.

För att bestämma placering av packer i ett **artesiskt** dränagehål kan följande procedur följas:

- Undersök var den vattenförande sprickan finns ned till 3 meters djup genom att placera en tät packer på succesivt djupare nivå, börja på en meters djup under bergöverytan. Om vattnet fortsätter rinna så finns en vattenförande spricka inom den första metern. Packern flyttas då successivt upp tills den är över det vattenförande sprickan.
- Om flödet slutar placeras packern på 2 meters djup. Om det flödar vatten då finns den vattenförande sprickan mellan 1–2 meters djup.
- Om det inte flödar vatten så är den vattenförande sprickan djupare i borrhålet. Undersökningen fortsätter i så fall, dock så begränsas ofta packernivån till 3 meter av praktiska utrymmesskäl. I fall där det finns en fyllning som överlagrar berget kan dock en betydligt längre packer krävas. Detta kan då träs ned via ett foderrör ned till friskt berg.

Till sist gängas svanhalsen på förlängningsröret. Alla gängor behöver tätas med till exempel gängtätningstejp för att undvika att vattnet tränger ut där i stället för att gå upp genom svanhalsen. Detta är viktigt för att kunna mäta ändringar i den hydrauliska konduktiviteten samt i läckageflödet. **Svanhalsen bör monteras så nära berget som möjligt** för att även ett litet artesiskt tryck ska upptäckas, dock ovanför eventuell vattenyta i monolitfacket.

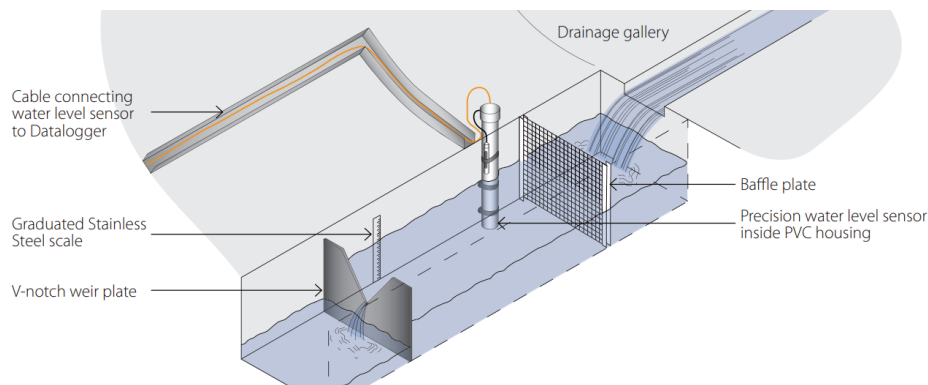


Figur 4—1 Illustration av dränehål med installerad mekanisk packer och svanhals

4.2.2 Mätöverfall

Mätning av vattenläckage görs vanligtvis med ett mätöverfall, (Enzell et al, 2019). Vattnet samlas upp i en ränna som är uppdämd av en plåt med ett V-format överfall, se Figur 4—2. Flödet som passerar överfallet kan mätas manuellt med en skala som anger vattennivån. Vanligast är att flödet mäts med en ultraljudsgivare eller radar med även en tryckgivare kan användas. Det är även möjligt att automatisera mätningarna och koppla givaren till en logger.

Vid flera anläggningar kan läckage från både en fyllningsdamm och upptrycksflöden i berg samlas i samma mätbrunn. Det bör i sådana fall etableras flera mätpunkter för att kunna särskilja om läckageflödet kommer från upptrycksmätningarna i berg eller från fyllningsdammen.



Figur 4—2 - Mätöverfall med V-format överfall från Soil Instruments (2020)

Vanligtvis samlas läckaget från flera monoliter upp på samma plats där det mäts, därav görs ingen individuell mätning av läckaget vid ett visst dränagerör eller en viss monolit.



Figur 4—3 Läckageuppsamling med mätöverfall vid en svensk betongdamm

4.3 PORTRYCKSMÄTNING

Portryck i berget mäts i förborrade hål borrade till strax under den nivå där portrycket ska mätas. Nivån där portrycket mäts bör bestämmas baserat på läge för definierade brottplan för dammen. Då aktuellt brottplan utgörs av ett sprickplan i berggrunden kan mätning utföras i anslutning till detta sprickplan. Om flera sprickplan eller potentiella brottplan förekommer kan ett konservativt tillvägagångssätt där upptrycket mäts vid det läge som bedöms ge det högsta värdet tillämpas. Utvärdering av lämplig nivå bör då väljas utifrån de geologiska förhållandena på plats, till exempel baserat på borrhäror som erhålls i samband med borrning av hål för installation av givare.

Om brottplan utgörs av anliggningsytan mellan betong och berg är det ofta inte möjligt att mäta vid själva brottplanet, åtminstone inte i läge för dränagegalleriet om detta ansluter direkt till bergöverytan. Upptrycket mäts då i berggrunden och räknas om till motsvarande värde vid anliggningsytan baserat på skillnaden i elevation. Då det portryck som mäts i berggrunden kan vara både större och mindre än det faktiska upptrycket i anliggningsytan är det även i dessa fall lämpligt att tillämpa ett tillvägagångssätt där upptrycket mäts vid det läge som bedöms ge det högsta värdet. Val av nivå att mäta portrycket på diskuteras vidare i avsnitt 5.1.2.

Vid installation av givare placeras en portrycksspets monterad längst ned på ett rostfritt förlängningsrör i det borrhålet. Portrycksgivaren sänks därefter ned igenom förlängningsröret och ansluts till portrycksspetsen. Det är även möjligt att i stället sänka ned givaren direkt i borrhålet och gjuta igen ovanför givaren. Detta innebär dock att givaren ej går att plocka upp och verifikationstestas eller bytas ut.

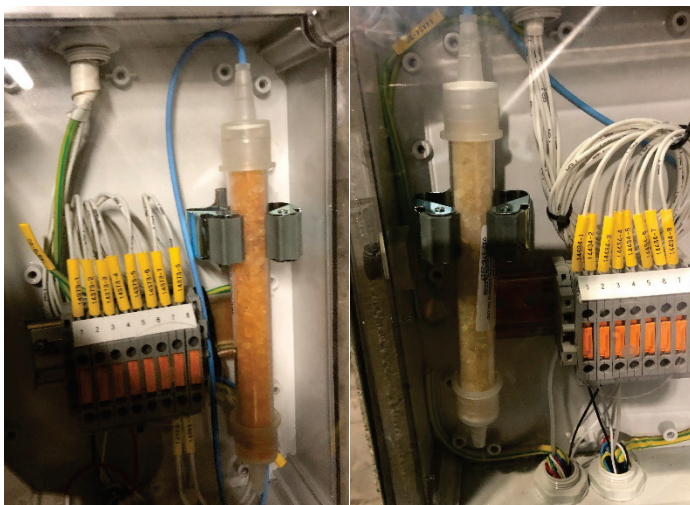
Precis som vid dränagehålen är förlängningsröret i portryckshålet försett med en mekanisk packer vars nivå behöver bestämmas som i dränagehålen. Till skillnad från dränagehålet behöver packern i detta fall inte vara demonterbar, i stället bör borrhålet gjutas igen ovanför packern, runt förlängningsröret. Detta görs för att se till att borrhålet och eventuella ytliga sprickor tätas så att korrekt portryck mäts.

Det finns både öppna och slutna system för att mäta portryck. Ett öppet system innebär att vattnet tillåts stiga i röret och att portrycket läses av som höjden för vattenytan. I ett slutet system försluts givaren så att portrycket byggs upp och mäts av en givare. Slutna portrycksmätning kan göras med flera typer av givare:

- BAT-portrycksgivare består av en filterspets med inbyggt tätande gummimembran med ett munstycke med ett gummimembran genom vilket en injektionsnål kan föras igenom. Injektionsnålen är kopplad till en elektrisk portrycksgivare, exempelvis en vibrerande sträng-sensor eller trådtöjningsgivare. Givaren kan tas upp och för verifikationsprovning eller kalibreras om, eller flyttas till ett annat borrhål vid behov.
- Elektriska portrycksgivare mäter deformationen av membranet elektriskt, exempelvis en vibrerande sträng eller trådtöjningsgivare.
- Hydrauliska portrycksgivare har ett membran i filterspetsen kopplat till en vattenfylld slang. Tryckförändringar kan avläsas vid ytan automatiskt eller via manometer.
- Pneumatiska portrycksgivare har ett membran kopplat till en slang med ett konstant luftflöde. Trycket avläses som ett mottryck vid markytan.

4.3.1 Relativa portrycksgivare

Om det relativa portrycket är det som mäts så behövs en luftslang i kabeln mellan givare och markyta. Vid markytan behöver luftslangen vara försedd med en avfuktare för att hindra fukt från att tränga ned till givaren. Detta eftersom fukt kan påverka limningen i givaren, ett vanligt symptom på detta är att givarens nollvärde börjar driva. Ifall gelen i avfuktaren inte byts ut i tid när den blivit vattenmättad kan problem uppstå med mätningarna därav blir det en viktig fråga vid framtida underhåll. En avfuktare tillhörande en relativ portrycksgivare visas i Figur 4–4.



Figur 4—4 Till vänster, en nyinstallerad avfuktare kopplad till en relativ portrycksgivare via den blå slangen. Till höger, en avfuktare där gelen är förbrukad och behöver bytas.

4.3.2 Absoluta portrycksgivare

Absoluta portrycksgivare mäter totaltrycket, det vill säga atmosfärstrycket plus porvattentrycket. Därav behövs en extern barometer (instrument som mäter lufttryck) för att räkna av atmosfärstrycket. Eftersom variationerna i portryck kan vara väldigt små behöver barometern ha en hög upplösning för att inte bli en felkälla vid mätningarna. Det rekommenderas att barometern har en känslighet på 0,01 mBar. Normalt kan barometern som ingår i dammens basutrustning användas. Generellt kan man räkna med att 8 meters höjdskillnad mellan barometer och givare ger 1 cm skillnad i vattenpelare. Om höjdskillnaden mellan givare och barometer är 40 meter innebär det till exempel 5 cm fel i det rapporterade upptycket. Detta fel är i sammanhanget litet men däremot kan det vara gynnsamt att installera flera barometrar för att ha redundans ifall en slutar fungera. En felande barometer kan annars orsaka felaktiga mätvärden.

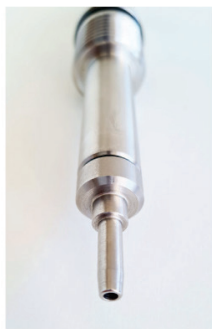
4.3.3 Temperaturmätning i portryckshål

Tryckgivare kan vara försedda med inbyggda temperatursensorer som antingen är analoga eller digitala. Temperaturanalyser kan vara till hjälp vid utvärdering av upptycket i berget.

4.3.4 Portrycksspetsar

Förutom givaren finns också flera typer av portrycksspetsar. Figur 4—5 visar två portrycksspetsar med olika anslutning. Den vänstra har en rörnippelanslutning vilket innebär att den saknar membran och är ett öppet system till dess att givaren har installerats vilket innebär att vattnet kan stiga i röret. Till höger visas en portrycksspets med kanylanslutning som har ett membran i toppen vilket hindrar vattnet från att stiga upp i förlängningsröret även då givaren inte är ansluten. Systemet blir alltså direkt slutet till skillnad från portrycksspetsen med nippel där givaren måste installeras för att sluta systemet. Fördelen med den nippelförsedda portrycksspetsen är att den inte har en kanyl som är orsaken till de flesta problem

som uppstår med den spetsen. Portryckspetsar av BAT-typ kan ha både nippelanslutning och kanylanslutning. Fördelen med BAT-systemet är att det tillåter en givare att tas upp för att kontrolleras. Givaren kan även flyttas mellan olika portryckshål för att göra punktvis manuella mätningar.



Elit FTS

Art Nr S1010239

Syrafast portryckspets
med rörnippelanslutning



GeoN FTS

Art Nr 1010240

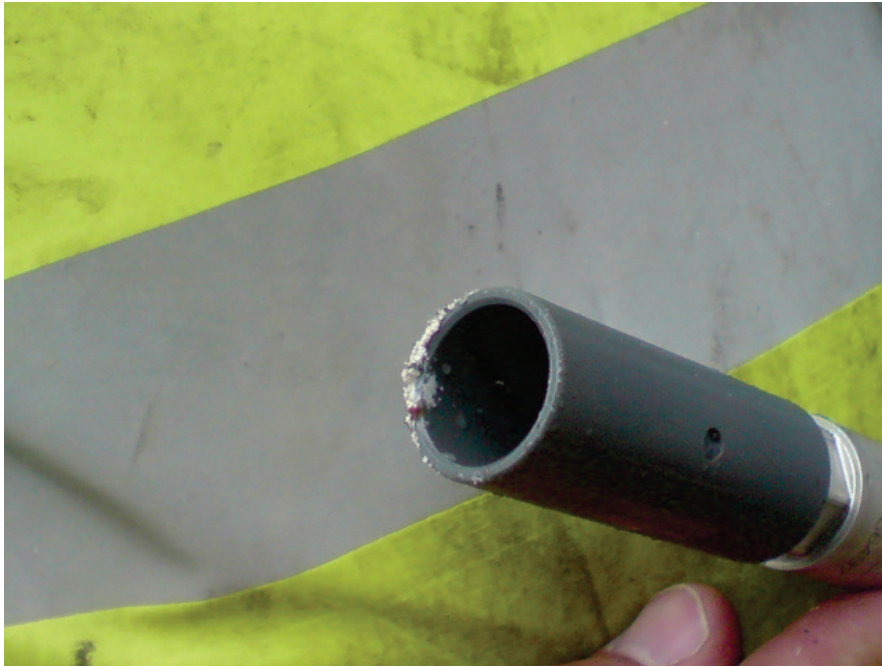
Syrafast portryckspets
med kanylanslutning

Figur 4—5 Två typer av portryckspets. Till vänster en portryckspets med nippelanslutning. Till höger är en med kanylanslutning och ett membran i toppen.



Figur 4—6 Rostfri portryckspets av BAT-typ

Vid användning av BAT portryckspetsar så bör förlängningsrören vara rostfria molybden-legerade. Det är vanligt att förlängningsrören är tillverkade av galvaniserade rör. I dessa finns det ofta ett överskott av zinkoxid som kan falla ut i rören och ned på portryckspetsen, på Figur 4—7 syns zinkoxid som fastnat på styrhylsan. Detta kan blockera membranet i portryckspetsen och orsaka stopp i kanylen eller nippeln.



Figur 4—7 Zinkoxid som fastnat på styrhylsan till en portrycksgivare typ BAT.

4.4 SIGNALÖVERFÖRING

För att överföra signalen från givarna till stationsdatorn finns flera alternativ. Överföring kan ske via digitala eller analoga signaler (4-20 mA). Signalerna kan skickas via fiber till en dammdator (HMI). Överföringen kan också göras trådlöst via GSM-nätet eller radiolänk (LoRa).

I ett tidigt skede behöver dammägaren ta ställning till hur signalen från givarna ska samlas in. Om överföringen sker via analog signal och om temperaturmätning också ska göras behöver det bestämmas om överföringen görs med tre trådar med gemensam jord för tryck och temperatur. Alternativt fyra trådar med två trådar för tryck och temperatur. Detta val påverkar elprojektören och elentreprenören i deras projektering för att alla delkomponenter i mätsystemet ska passa. När elprojektören tar fram sin konstruktion är detta en viktig detalj för att systemet ska fungera som avsett.

Även strömförsörjning till givarna behöver tas i åtanke. Strömförsörjning kan ske via kabel alternativt via ett batteri (som ibland förstärks med solceller eller vindsnurra).

5 Installation och kvalitetssäkring

5.1 INSTALLATION

Flera aspekter vid installationen av dränage och portrycksgivare kan påverka hur effektiv övervakningen av upptryck blir för dammägaren.

5.1.1 Djup av dränagehål

I RIDAS Tillämpningsvägledning 9 (Energiföretagen, 2020) rekommenderas att dränagehål borraras till halva djupet av magasinet under grundläggningsytan. I praktiken så varierar bergnivån i monolitfacket och även i magasinet. Därav brukar den lägsta punkten i monolitfacket bli styrande och dränagehålen borraras där till ett djup av halva magasinnivån +2 meter. Om en annan punkt i monolitfacket ligger 3 meter högre än den lägsta punkten borraras dränagehålet där ned till samma djup och blir därav 3 meter längre än hålet som borraras vid den lägsta punkten. För att bestämma djup för respektive hål måste därmed bergytan först avvägas.

5.1.2 Djup för portrycksmätning

Rekommendationer gällande djup av hål för installation av portrycksgivare och mätområde saknas då de bör anpassas till aktuella brottplan och berggrunden under dammen, se Avsnitt 4.3. Generellt brukar hålen för installation av givare göras ca 6 m långa mätt från bergets överkant. Det är dock oklart varför givarna placeras på detta djup. En anledning skulle kunna vara att det är i huvudsak ytligt belägna sprickplan som anses ha inverkan på betongdammars stabilitet. I samband med design av övervakningssystem bör i stället en kontroll utföras för om mätning behöver ske på ett mindre eller större djup baserat på platsspecifika förhållanden. I samband med installation av givarna bör projekterad nivå verifieras baserat på den tillkommande information som erhålls i samband med installation. Det bör påpekas att mätning på flera djup kan vara nödvändig för att erhålla en så korrekt bild som möjligt av upptrycksfördelningen i grundläggningen.

5.2 VAL AV BORRMETOD

Olika borrar metoder innefattar olika kostnader och förutsättningar. Vid installation av nya portrycksmätare kan valet av borrar metod för hålet vara av stor vikt för kvaliteten på resultatet. De två borrar metoder som vanligen används är hammarborrning eller kärnborrning. Hammarborrning innebär att borrkronan krossar berget och borrhålet får en skrovlig och ibland något elliptisk yta. Vid kärnborrning kan borrkärnor tas upp och karteras för respektive borrhål. Borrhålet får även en slätare yta än vid hammarborrning. Hammarborrning är generellt billigare än kärnborrning men ger inte samma möjligheter till kartering. För att kartera ett hammarborrat hål kan BIPS-filmning användas. Även borrar protokollet kan vara till stöd då kartering ska göras. Hammarborrning kan även medföra vissa praktiska problem vid installation. Eftersom borrhålet får en mer ojämn form blir

det svårare att tätta med packer än om kärnborrning hade använts. Även pumpning försvåras av detta då pumputrustning kan fastna i borrhålet.



Figur 5—1 Dränagehål med åtdragen packer i berg och utan svanhals installerad.

Med kärnborrning kan även kartering av borrhålen göras. Kärnkarteringen kan även kombineras med BIPS-filmning för att få en ännu bättre bild av berggrunden och därmed också dammens grundläggning. Detta medför extra kostnader men kan också innebära att mindre tid behöver läggas på kärnkartering jämfört med om det hade varit den enda karteringsmetoden. Då kärnor erhålls direkt kan också en tolkning av bergkvalitet samt lämplig placering av mätområde och om flera mätområden behövs göras på plats vilket är svårare med hammarborrade hål.

Den samlade bedömningen är att kärnborrade hål är att föredra. Det är lättare att installera en packer i borrhålet och den tätar bättre i ett helt runt hål. Det är också mindre risk att pumputrustning fastnar i borrhålet (vid referensmätningar av den hydrauliska konduktiviteten i ett dränagehål).

Det är också lättare att utvärdera placering av packer och göra eventuella justeringar på plats. För att påskynda denna process då det sällan finns tid i samband med installation av övervakningssystemet, kan en kontrollplan i vilken kriterier för val av mätområde baserat på syftet med mätningen tas fram av projektören redan i samband med design av övervakningssystemet.

5.2.1 Underhåll av dränage och portrycksinstallationer

Regelbundet underhåll av dränagehål behöver genomföras eftersom t.ex. järnoxidutfällningar över tid kan sätta igen dränagehål. Utfällningar som fastnar i svanhalsens mynning och får sitta kvar kommer över tid att hårdna, därför viktigt

att de tas bort i tidigt skede. Problemet uppstår när utfällningarna kommer i kontakt med syre och bildar järnoxid som sätter igen röret. Om röret blockerats behöver packern demonteras och dränagehålet och röret genom packern blåsas ren. Detta kan göras med tryckluft om det görs i tid, de kan annars bli för hårda för att spolas bort. Det är viktigt att förekomst av arsenik kontrollerats innan spolning eftersom det då krävs ytterligare skyddsrutiner. Föroreningen måste då hindras från att spridas dit den kan torka och andas in.



Figur 5—2 Svanhals med artesiskt tryck som satts igen av järnoxidutfällningar som bildats i kontakt med syre. Notera att svanhalsen i bilden är placerad onödigt högt ovan berg vilket innebär att artesiskt tryck först upptäcks när trycket är en bra bit ovanför bergövertytan.

5.2.2 Utfällningar innehållande arsenik

I samband med dränageborrning uppkommer ofta problem med utfällningar av järnoxid i dränagehålet och från sprickor i berggrunden. Utfällningarna kan ha höga halter av arsenik. Prover bör därför uttas för att entreprenörer och driftpersonal ska veta hur utfällningarna bör hanteras. Innan prover tagits bör utfällningarna betraktas som farligt avfall.

5.3 VERIFIKATIONSTESTER

Verifikationstester innebär att en enhets karakteristik eller egenskap kontrolleras för att visa om den överensstämmer med angivna krav eller inte, (Energiföretagen, 2020). För att genomföra underhåll och verifikationstester av dränage och porttrycksinstrument krävs att driftpersonal eller annan anlita personal har förutsättningar för att genomföra åtgärderna. Det är dock viktigt att den som genomför verifikationstesterna får tillräcklig utbildning och stöd för att genomföra dem korrekt.

5.3.1 Dränage

När en portrycksgivare installerats kan det efter några år synas att portrycket succesivt ökar. Ett skäl till det kan vara att dränagehålet håller på att sätta igen. Olika orsaker till igensättning av dränage beskrivs i Energiforskrapport 2017:369 (Johansson m.fl., 2017). Kortfattat så kan dränaget sätta igen genom till exempel mekanisk igensättning, kemisk utfällning, biologisk utfällning eller en kombination av dessa. Igensättningen påverkas av flera orsaker som tiden, vattenföringen samt bergets och vattnets egenskaper.

De horisontella sprickplanen som korsar dränagehålet kan även sättas igen. I de fall då detta skett har det inte hjälpt att spola hålen utan man har i stället behövt borra nya dränagehål, alternativt borra upp de gamla, denna metod beskrivs av (Johansson m.fl., 2017). För att undvika detta behöver förändringar i uppmätt uppträck fångas i ett tidigt skede genom till exempel ansättande av varningsvärden utifrån prognos för förväntat beteende.

Andra orsaker till ökat portryck kan vara att injekteringsridåns funktion har försämrats till följd av urlakning. För att kunna kontrollera ifall det är dränagehålets funktion som orsakar det högre portrycket så rekommenderas att den hydrauliska konduktiviteten för hålet kontrolleras. För att kunna jämföra den hydrauliska konduktiviteten krävs att en nollmätning har gjorts då hålet borrades. Mätningen görs på olika sätt beroende på om hålet är torrt eller har över 2 m stående vatten eller artesiskt tryck. Denna gräns bedöms som lämplig för att det vid konduktivitetmätningen inte tillförs ett för stort konstgjort uppträck mot dammens grundläggning.

För dränagehål som är torra eller har en vattenpelare under 2 m rekommenderas att testet utförs som ett s.k. falling head test. Under testet fylls dränagehålet med vatten till en bestämd nivå. Vattnets nivå noteras medan det sjunker tillbaka till ursprunglig nivå. Nivån bör noteras efter 1, 3, 5, 10 och 30 minuter samt efter 2 timmar.

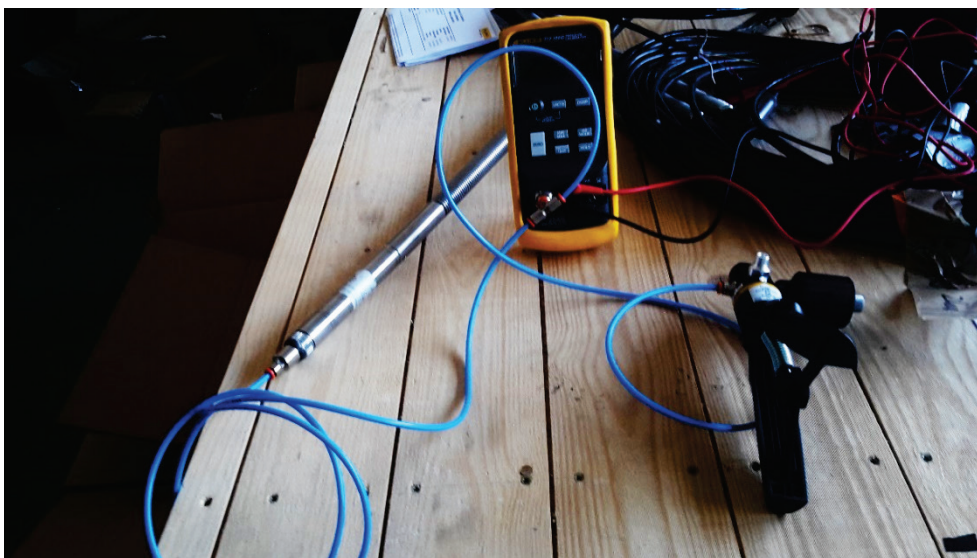
Om borrhålet har mer än 2 m stående vatten görs i stället ett urpumpningsförsök. Först mäts nivån för vattenytan i borrhålet. Sedan pumpas borrhålet torrt. Därefter mäts tiden det tar för hålet att återfyllas till ursprunglig nivå. Även här noteras vattennivån vid 1, 3, 5, 10 och 30 minuter samt efter 2 timmar.

I de fall då dränagehålet har artesiskt vattentryck så kan flödet mätas genom att installera en svanhals kopplad till ett mätkärl med ett tidtagarur. Ett högre flöde kan vara tecken på ökat läckage --, ett lägre flöde kan vara en indikation på igensättning av dränaget, ICOLD (2018).

5.3.2 Portryck

Verifikationstester av tryckgivare bör göras vid såväl installation som med jämna intervall, förslagsvis vartannat år. Nollvärdet för givaren kontrolleras genom mätning i luften för att kontrollera att nollvärdet inte drivit. En relativgivare ska visa noll då den är i atmosfärstryck, en absolutgivare ska visa aktuellt atmosfärstryck då den är i luften. Givaren bör sedan utsättas för ett provtryck.

Detta kan göras genom att sänka ned givaren i ett vattenkärl alternativt genom att ansluta givaren till en tryckanordning, se Figur 5–3.



Figur 5—3 En Fluke 717 tryckkalibrator ombyggd för att utsätta en tryckgivare för ett fingerat tryck.

Ytterligare ett test som kan göras är att skicka ett konstgjort tryck från en kopplingspunkt inne i betongdammen upp till en dammdator (HMI) för att kontrollera att skalning av mätområdet är korrekt utförd vid programmering. Testet utförs lämpligtvis vid nyinstallation och ifall det uppkommer misstankar om realistiska mätvärden.

5.4 UTBILDNING AV PERSONAL

Ett underhållsprogram bör upprättas både gällande givare och dränagehål i de fall det förekommer sådana. Personal som ska utföra underhåll bör ha genomgått en utbildning som minst bör omfatta:

- Grundläggande dammsäkerhet (orsaker till dammbrott osv)
- Syfte med övervakningen på den specifika anläggningen
- Rutiner och metod för kontroll av givare och utförande av verifikations tester
- Rutiner och metod för insamling av mätdata
- Åtgärder som ska vidtas vid observerade avvikelser

5.5 NOTERINGS PROTOKOLL VID INSTALLATION AV DRÄNAGE

Exempel på protokoll vid installation av dränage framgår av Bilaga A.

- Kolumn 0, Beteckning, Dränagehålen bör namnges så det är lätt att orientera.
- Kolumn 1, Ange dränagerörets diameter och material.
- Kolumn 2, Borrdjup, här ska noteras hur djupt hålet är borrarat för dränaget.
- Kolumn 3 Bergövertyta, Här noteras plusnivån för bergytan där dränagehålet borraras.

- Kolumn 4, notera avstånd mellan packer och svanhals.
- Kolumn 5, notera avståndet i borrhålet från packern till bergöverytan.
- Kolumn 6, Ange nivån för svanhalsens vattengång i aktuellt höjdsystem.
- Kolumn 7, Nivån för packerns centrum.
- Kolumn 8, längd på foderröret/uppsticket över bergöverytan. Obs, vid fyllning på berg är det avstånd från bergöverytan till svanhals som ska anges.
- Kolumn 9, Betongtjocklek på berg, I de fall där dränagehål har borrats genom en platta eller pelare noteras här längden betong innan borrhålet övergår till berg.
- Kolumn 10, Grusfyllning på berg, Höjden grusfyllning ovan bergets överyta i förekommande fall.
- Kolumn 11, lutning av borrhål, Förslagsvis anges lutningen i grader från horisontalplanet så att ett rakt dränagehål har lutningen 90°. Viktigt är att lutningen mäts och anges konsekvent.
- Kolumn 12, Ange foderrörets längd om aktuellt.
- Kolumn 13, I de fall det förekommer artesiskt vatten ur dränagehålet noteras flödet och enheten.
- Kolumn 14, datum artesisk flödesmätning, ange datum för flödesmätningen.

5.6 NOTERINGSPROTOKOLL VID INSTALLATION AV PORTRYCKSGIVARE

Exempel på protokoll vid installation av portrycksgivare framgår av Bilaga B.

- Kolumn 0, Beteckning, Portryckshålen bör namnges så det är lätt att orientera.
- Kolumn 1, Skarvrör, ange skarvrörets typ och dimension.
- Kolumn 2, Ange vilket typ av portrycksspets, till exempel BAT med kanylanslutning eller nippelanslutning. Även material som rostfri eller av plast.
- Kolumn 3, Ange givarens serienummer som används för att underlätta identifiering.
- Kolumn 4, Ange typ av givare då det är viktigt att veta om givaren mäter relativt eller absoluttryck.
- Kolumn 5, Mätområde kPa, ange givarens mätområde (range).
- Kolumn 6, Mätområde °C, ange för vilket temperaturomfång givaren fungerar.
- Kolumn 7, Ange om utsignalen är analog (4-20 mA) eller digital (RS485). Särskilt viktigt om flera olika typer förekommer vid anläggningen.
- Kolumn 8, Lutning av borrhålet, behövs för att kunna ange korrekt plusnivå och nivån för filtrets centrum.
- Kolumn 9, Bergöverytans nivå angiven i det gällande höjdsystemet.
- Kolumn 10, Packerrörets längd, avser längden från överkant förlängningsrör till underkant packer.
- Kolumn 11, filterlängd på portrycksspetsen. Se Figur 4–6 där filterlängden på portrycksspetsen är 4 cm.
- Kolumn 12, Invändig lodning från röröverkant till membran eller nippel (beroende på vilken typ av portrycksspets som används).
- Kolumn 13, borrhålets botten angiven i meter under bergytan.
- Kolumn 14, filtrets centrum på filterspets, angiven i meter under rörets överkant.

- Kolumn 15, centrum filter på filterspets, angiven i aktuellt höjdsystem. Obs, plusnivå behöver justeras med hänsyn till eventuell lutning på borrhålet.
- Kolumn 16, Givarnivå angiven i gällande höjdsystem. Givarnivån ska vara korrigerad för avläsningsfaktor dvs lodad nivå enligt kolumn 14. Givarnivån blir då ca 17 mm lägre vid portryckspets med kanylanslutning och 45 mm lägre vid portryckspets med nippelanslutning. Obs, givarnivån behöver justeras efter eventuell lutning på borrhålet.
- Kolumn 17, Packernivå angiven i meter under bergytan, avser centrum på den tätande gummimanschetten.
- Kolumn 18, Rörets uppstick angiven i meter över bergytan.
- Kolumn 19, Rörets överkantsnivå angiven i aktuellt höjdsystem.
- Kolumn 20, Foderrörets längd i meter ifall aktuellt.
- Kolumn 21, Grusfyllnadens höjd på berget ifall aktuellt.
- Kolumn 22, Betongplattans höjd på berget ifall aktuellt.
- Kolumn 23, Notera Avläst portrycksnivå.
- Kolumn 24, datum för portrycksavläsning.

Vid trådlös överföring från givarna ska anges typ av signalöverföring. Aktuellt höjdsystem kan variera mellan olika anläggningar, för många anläggningar används det äldre höjdsystemet RH00.

6 Slutsatser och rekommendationer

Upptäck i anliggningsytan mellan betong och berg samt i berggrunden är av stor vikt för betongdammars stabilitet men är ofta svårt att uppskatta. I de flesta riktlinjer gällande dammsäkerhet ges anvisningar för ett antal typfall med enkel geometri och schematiska figurer presenteras. Det rekommenderas att mer avancerade metoder, till exempel finit elementanalys, tillämpas för mer komplexa fall.

Rekommendationerna för beräkning av upptäck stämmer ofta väl överens mellan de olika riktlinjerna. Ett fall där vissa skillnader förekommer är fallet med dränagesystem där anvisningarna skiljer sig åt något både gällande vilken reduktionsfaktor som är lämplig att använda och till viss del också hur dränagesystemet bör utformas. Gemensamt för dessa fall är att beräknat upptäck bör verifieras med övervakning.

Trots att övervakning ofta är ett krav för att kontrollera och verifiera beräknat upptäck då upptücksreduktion antas i stabilitetsberäkningar eller för mer komplexa förhållanden, saknas i regel rekommendationer gällande utformning av övervakningssystem. En trolig anledning till detta är att även övervakning av upptäck är svårt och bör anpassas till platsspecifika förhållanden.

Följande steg bör hanteras vid utformning av övervakningssystem:

- Det är viktigt att tidigt bestämma vad syftet med övervakningen är samt hur man avser att använda erhållna mätdata. I detta skede kan det också vara bra att bestämma om man vill att ytterligare information ska framkomma i samband med installation av övervakningssystemet, som kan vara av nytta vid såväl placering av givare, utvärdering av mätdata och uppdatering av stabilitetsberäkningar som vid utformning av själva övervakningssystemet. Denna information kan till exempel utgöras förekomst av sprickplan/spricksystem, nivå och orientering av förekommande sprickplan, förekomst av sprickfyllning samt sprickplans egenskaper såsom friktionsvinkel.
- Bestämma vad som ska övervakas utöver portrycket, dvs behov av stödjande parametrar exempelvis läckage, magasin nivå, spill och temperatur som ska användas vid utvärdering av uppmätt portryck.
- Bestämma antal och placering av givare. Om syftet endast är att övervaka ett dränagesystems funktion kan det vara tillräckligt med en mätpunkt per tvärsnitt placerad nedströms om läget för dränagesystemet. Om syftet är att erhålla en så komplett bild som möjligt av upptäcksfördelningen under dammen kan flera givare behövas per tvärsnitt. Också djupet för mätområdet bör bestämmas utifrån syftet med instrumenteringen och geologiska förhållanden på plats, till exempel nivå för potentiella brottplan samt spricksystem i berggrunden under dammen.
- Val av lämpligt typ av instrumentering med hänsyn till syfte, kostnader, underhållsbehov. Detta då varje modelltyp har olika egenskaper med för- och nackdelar, till exempel har BAT-givare fördelen att de kan tas upp och verifikationstestas.

- Val av borrhmetod. Här förespråkas generell kärnborrning då borrhkärnor erhålls borrhkärnor som ger en direkt bild av berggrunden och som kan användas till optimering av mätsystemet på plats i samband med installation erhålls.
- Ett kontrollprogram utformas baserat på syfte med övervakningen. Syftet med kontrollprogrammet är att en optimering av övervakningssystem ska kunna utföras installation av givare baserat på information som framkommer I samband med borrning av hål för placering av givare. Det kan till exempel vara justering av längd för mätstålet eller justering av givarens placering samt mätområde med hänsyn till berggrundsegenskaper så att så representativa värden som möjligt erhålls för de potentiella brottplanen.
- Varnings- och larmgränser tas i samband med installation av övervakningssystem fram baserat på stabilitetsanalyser. När mätningar har pågått under åtminstone ett år så kan varningsvärden i stället justeras utifrån mätserien och den förväntade variationen.
- Utvärdering av mätdata anpassas till syftet med mätningen, detta kan till exempel avse jämförelse med uppsatta larm och varningsvärden och/eller verifiering av antagen upptycksreduktion i stabilitetsberäkningarna. Det kan också vara att långsiktigt säkerställa ett dränagesystems funktion.
- Resultat från upptycksmätningar bör dock inte användas som indata i en stabilitetsanalys, detta med hänsyn till risk för igensättning samt till att upptycksfördelningen är beroende av aktuell belastningssituation.

7 Rekommenderade fortsatta studier

För att bestämma antalet givare och deras placering måste syftet med instrumenteringen vara beslutad. Om syftet till exempel är att övervaka förändring av dränagesystemets funktion över tid kan en mätpunkt per sektion nära dränagehålen vara tillräcklig. Om man vill få en bild av hur portrycket under en hel sektion genom dammen varierar med hänsyn till exempelvis dränagesystemet eller komplexa geologiska förhållanden är det troligtvis lämpligt med fler givare per tvärsnitt. Det saknas riktlinjer för var givare ska placeras samt hur många givare som behövs i en sektion och fortsatta studier rekommenderas om detta.

Mätning av portryck bör utföras på samma djup som studerat brottplan alternativt i anslutning till sprickplan som tros ha inverkan på upptrycket vid studerat brottplan. Trots detta placeras portrycksgivare ofta 6 meter under bergöverytan. Bakgrunden till detta är okänt. Vidare studier skulle behövas för att utreda vilken inverkan djup på mätområde har på omräknat upptryck i brottplanet, till exempel anliggningsytan mellan betong och berg. Även framtagandet av en metodik för fastställande av mätområde för portrycksgivare i berg under svenska förhållanden samt omräkning av uppmätt värde till värde som utgör indata i stabilitetsberäkningen och representerar varnings- och larmgränser skulle underlätta vid utformning av övervakningssystem och utvärdering av mätdata.

8 Referenser

- CDA. (2007). *Dam safety guidelines*. Canadian Dam Association CDA.
- Energiföretagen. (2020). *RIDAS - Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet. Tillämpningsvägledning Kapitel 9*. Energiföretagen.
- FERC. (1997). *Federal guidelines for dam safety. Chapter X Other dams*. FERC.
- FERC. (2002). *Federal guidelines for dam safety. Chapter 9 Instrumentation and monitoring*. Federal Energy Regulatory Commission.
- FERC. (2002). *Federal Guidelines for Dam Safety. Chapter III Gravity Dams*. Federal Energy Regulatory Commission.
- Hellgren, R., Nordström, E., & Malm, R. (2019). *Modell för övervakning av betongdammar*. Energiforsk: Energiforskrapport 2019-580.
- ICOLD. (2018). *Dam surveillance guide - bulletin 158*. International commission on large dams.
- Johansson, F., Krounis, A., & Westberg Wilde, M. (2017). *Igensättning av dränage under betongdammar*. Energiforskrapport 2017-369. Energiforsk.
- Mohlin, B., & Åström, A. (2019). *Erfarenheter av damminstrumentering*. Energiforskrapport 2019-596.
- Mohlin, B., Enzell, J., & Malm, R. (2019). *Kartläggning av instrumenteringssystem för betongdammar*. Energiforskrapport 2019-596.
- NVE. (2005). *Retningslinjer for betongdammer*. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Rosenqvist, M. (2020). *Beständighet hos injekteringsskärmar under svenska dammar*. Energiforskrapport 2020:646. Energiforsk.
- USACE. (1994). *Rock foundations - Engineer manual EM 1110-1-2908*. US Army Corps of Engineers.
- USACE. (1995). *Gravity Dam Design - Engineer manual 1110-2-2200*. US Army Corps of Engineers.
- USACE. (2005). *Stability analysis of concrete structures - Engineer manual EM 1110-2-2100*. US Army Corps of Engineers.

Bilaga A: Noteringsprotokoll vid installation av dränage

Bilaga B: Noteringsprotokoll vid installation av portrycksgivare

ÖVERVAKNING AV I BERG VERKANDE UPPTRYCK PÅ BETONGDAMMAR

Upptryck i anliggningsytan mellan betong och berg samt i berggrunden är av stor vikt för betongdammars stabilitet. Däremot är det ofta svårt att uppskatta då upptrycket är beroende av flertal faktorer som dammens geometri, grundläggningens beskaffenhet, spänningsfördelningen i den potentiella brottytan samt förekomst av upptrycksreducerande åtgärder.

Denna rapport sammanställer information från flera riktlinjer och syftar till att vara ett stöd vid installation och förvaltning av instrumentering för upptrycksmätning. Den ska även vägleda vid utvärdering av mätdata och vid stabilitetsberäkningar genom att presentera upptrycksfördelningar för flera olika typfall.

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