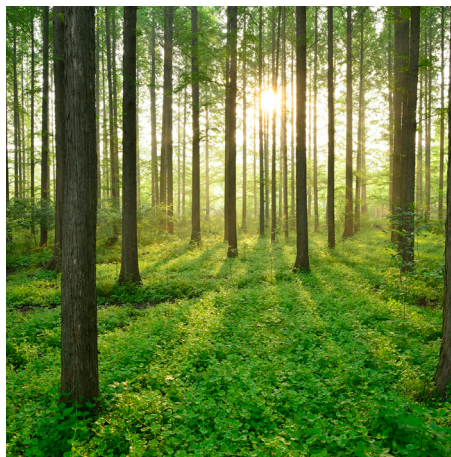


STATUSBEDÖMNING AV INJEKTERINGSRIDÅER

RAPPORT 2026:1174



DAMMSÄKERHET



Statusbedömning av injekteringsridåer

YANTING CHANG, HANS FRIDHOLM, BENNY MOHLIN
INGRID KJELLSTRÖM

Förord

Injekteringsridåer är en viktig del av dammkonstruktionens tätskikt, med uppgift att begränsa vattenläckage och minska upptryck i berggrunden. Som en del av arbetet med att försäkra dammsäkerheten behövs tillförlitliga metoder för att bedöma injekteringsridåns effektivitet, vilka beskrivs i den här rapporten.

Projektet har genomförts inom Energiforsks program för Dammsäkerhet, som fokuserar på att bidra med kunskap i det strategiska arbetet med dammsäkerhet och för att främja den svenska vattenkraftsproduktionens långsiktiga utveckling.

Författarna till rapporten är Yanting Chang, Hans Fridholm, Benny Mohlin och Ingrid Kjellström från Sweco. Referensgruppen bestod av Niklas Widenberg, Vattenregleringsföretagen, Linda Ormann, Fortum, Anders Isander, Uniper, Marie Westberg Wilde, Afry, Fredrik Johansson, Afry samt Maija Ausekle, Vattenfall.

Rapportförfattarna ansvarar för alla resultat och slutsatser i rapporten.

Bilden på framsidan tillhandahölls av rapportförfattarna.

Sammanfattning

Detta projekt har genomförts inom ramen för Energiforsks arbete med dammsäkerhet och syftar till att utveckla och utvärdera metoder för statusbedömning av injekteringsridåer under betongdammar. Injekteringsridåer är en viktig del av dammkonstruktionens tätskikt, med uppgift att begränsa vattenläckage och minska upptryck i berggrunden. Eftersom dess funktion kan försämrats över tid krävs tillförlitliga metoder för att bedöma injekteringsridåns effektivitet.

Projektet har kombinerat tre huvudsakliga metoder: numerisk modellering, porttrycksmätning och vattenkemiska analyser. Skålandammen, som är en lamelldamm, har använts som referensobjekt. De numeriska analyserna visar att porttrycksvariationer har ett begränsat samband med ridåns permeabilitet, medan vattenflödes hastighet i bergmassan har ett tydligt samband med ridåns täthet. Detta innebär att mätningar av vatteninläckage i borrhål är en mer robust indikator än porttrycksmätningar.

De vattenkemiska analyserna visar skillnader mellan vattenprover från olika delar av dammen. Prover från delar som injekterats uppvisar längre uppehållstid, högre halter av koldioxid samt förhöjda halter av järn och mangan, jämfört med motsvarande prover från andra icke-injekterade delar av anläggningen. Dessa resultat indikerar längre uppehållstid för vattnet där injektering skett samt reducerande förhållanden i berget, vilket i sin tur ger kompletterande information om flödesvägar och täthet i berggrunden.

Slutsatsen är att statusbedömning av injekteringsridåer bör baseras på en kombination av metoder. Flödesmätningar i avskilda borrhålssektioner bör utgöra den primära indikatorn, medan porttrycksmätningar och vattenkemiska analyser fungerar som kompletterande verktyg. Rekommenderade åtgärder för statusbedömning av injekteringsridåer inkluderar sektionerade vattenförlustmätningar, filmning av torrlagda borrhål och riktad modellering för att verifiera effekter av planerade insatser.

Genom att integrera dessa metoder kan dammägare få en mer tillförlitlig bild av injekteringsridåns status, vilket bidrar till bättre beslutsunderlag för underhåll och eventuella förstärkningsåtgärder.

Studien baseras på en typsektion av lamelldammen och modellerar bergmassan som ett homogent kontinuum. Resultaten är därför indikativa och bör tolkas tillsammans med övriga undersökningsdata.

Nyckelord

Injekteringsridå, Porttrycksmätning, Dammsäkerhet, Numerisk modellering, Betongdamm

Summary

This project was conducted within Energiforsk's dam safety program and aims to develop and evaluate methods for assessing the condition of grout curtains beneath concrete dams. Grout curtains are a key component of the dam's sealing system, designed to reduce water seepage and uplift pressure in the rock foundation. As their performance may deteriorate over time, reliable assessment methods are essential.

Three main approaches were combined: numerical modeling, pore pressure monitoring, and water chemistry analysis. The Skålan Dam served as the reference site. Numerical results show that variations in pore pressure have a weak correlation with grout curtain permeability, while groundwater flow velocity is strongly linked to curtain tightness. This indicates that borehole inflow measurements are a more reliable indicator of curtain performance than pore pressure readings.

Water chemistry analyses revealed differences between samples taken near the spillway and those from adjacent areas. The latter showed higher electrical conductivity, excess carbonic acid, and elevated levels of iron and manganese — suggesting longer residence times and reducing conditions. These findings provide valuable insights into flow paths and sealing efficiency in the rock mass.

The study concludes that grout curtain assessments should be based on a combination of methods. Sectioned flow measurements in boreholes should be the primary indicator, supported by pore pressure data and water chemistry analyses. Recommended complementary actions include water loss tests, borehole video inspections, and targeted modeling to verify the effects of planned interventions.

By integrating these methods, dam owners and authorities can gain a more reliable understanding of grout curtain performance, supporting long-term dam safety and informed decisions regarding maintenance and reinforcement.

Innehåll

1	Introduktion	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Mål och syfte	8
1.3	Avgränsningar	8
1.4	Metod	9
1.4.1	Numerisk modellering	9
1.4.2	Fältnätning av porttryck	9
1.4.3	Vattenkemiska analyser	9
2	Teoretisk bakgrund och litteraturstudie	11
2.1	Injekterings historia och utveckling	11
2.2	Nedbrytningsprocesser och beständighet	11
2.2.1	Nedbrytningsmekanismer	11
2.2.2	Livslängd	12
2.2.3	Praktiska observationer	12
2.3	Porttrycksmätning under dammar	12
2.3.1	Porttrycksmätning och dränage	13
2.3.2	Instrumentering och metodik	13
2.3.3	Placering och mätfrekvens	14
2.4	Internationella riktlinjer för injektering och övervakning	14
2.4.1	RIDAS (Sverige)	14
2.4.2	FERC (USA)	15
2.4.3	ICOLD (internationellt)	15
3	Referensprojekt: Skålandammen	17
3.1	Val av referensdamm	17
3.2	Bakgrund om Skålandammen	17
3.2.1	Konstruktion och tekniska specifikationer	18
3.3	Injektering av Skålandammen	18
3.3.1	Injekteringsmetodik	18
3.3.2	Geologiska förhållanden	19
3.4	Geologiska undersökningar av Skålandammen	19
3.4.1	Vattenförlustmätning	20
3.5	Slutsatser och stabilitetsanalyser	20
4	Numeriska analyser	22
4.1	Modelluppbyggnad och utförande	22
4.2	Beräkningsresultat	24
4.3	Porttrycksmätning vid Skålandammen	26
5	Vattenkemiska analyser	29
5.1	Resultat	29
5.1.1	Mängden lösta joner och elektrisk konduktivitet	29

5.1.2	Kalk-kolsyrasystem och jämviktsanalys	29
5.1.3	Järn, mangan och turbiditet	29
5.1.4	Redoxförhållanden och kvävefraktioner	29
5.1.5	Fördelning av lösta joner	30
6	Analys och utvärdering	32
6.1	Numeriska analyser	32
6.2	Portrycksmätning	32
6.3	Vattenkemiska analyser	32
6.4	Skillnader mellan modell och verklighet	33
6.5	Bedömning av injekteringsridåns status	33
6.6	Osäkerheter och begränsningar	34
7	Slutsatser	35
7.1	Rekommendationer för praktisk statusbedömning	35
7.1.1	Tolkning av flödesmätningar	36
7.1.2	Tolkning av portrycksmätningar	37
7.2	Internationella riktlinjer i jämförelse	37
7.3	Förslag till fortsatt arbete	37
8	Bilagor	39
9	Referenslista	40

1 Introduktion

1.1 BAKGRUND

Injekteringsridåer under dammar är en viktig del av dammsäkerheten. Dess främsta funktion är att begränsa vattenflödet i berggrunden och minska det upptryck som verkar på dammens konstruktion. Ett förhöjt upptryck kan hota glidstabiliteten hos betongdammar och öka risken för erosion i fyllningsdammar. RIDAS (Energiföretagen, 2020) anger att injekteringsridåer kan reducera portrycket med upp till 50 %, men betonar att denna effekt endast bör betraktas som en extra säkerhet om inte portryckmätning och återinjektering sker regelbundet som kan verifiera injekteringsridåns funktion.

Cementbaserade injekteringsmaterial är känsliga för kemisk nedbrytning i kontakt med strömmande vatten, vilket kan leda till försämrad täthet över tid. Många svenska dammar med injekteringsridåer byggdes under 1950–70-talet, vilket gör frågan om beständighet särskilt aktuell. För att bibehålla hög dammsäkerhet krävs metoder för att bedöma ridåns status och fatta välgrundade beslut om eventuell återinjektering.

Trots att injekteringsridåer länge har använts för att täta och stabilisera dammars undergrund finns fortfarande begränsad kunskap om deras långsiktiga funktion. Framför allt saknas systematiska studier av hur portryck, läckage och vattenkemi utvecklas över tid samt hur dessa parametrar kan användas för att bedöma ridåernas effektivitet.

Direkt provtagning av injekteringsridån är ofta otillförlitlig, då borrhning riskerar att störa strukturen och skapa nya läckagevägar och endast ger punktvis information om injekteringsridån. Kemisk analys av borrhkärnor ger begränsad information om ridåns funktion i större skala. En mer framkomlig väg bedöms därför vara indirekt bedömning genom att jämföra uppmätta portryck med predikterade värden från numeriska modeller. Denna metod kan kompletteras med vattenkemiska **analyser** för att identifiera nedbrytningsprocesser och deras aggressivitet. Även om modellering av injekteringsridåns nedbrytning är förenad med osäkerheter, kan kombinationen av mätdata och kemiska analyser ge en grund för statusbedömning.

Denna rapport syftar därför till att utvärdera genomförbarheten av denna metodik för bedömning av injekteringsridåers status genom en kombination av portryckmätningar, numerisk modellering och vattenkemiska analyser.

1.2 MÅL OCH SYFTE

Syfte med denna studie är att ta fram ett metodikförslag för statusbedömning av injekteringsridåer under dammar. Genom en fallstudie av en instrumenterad betonglamelldamm kan metodikens genomförbarhet testas och verifieras. Målet är att ge dammägare ett verktyg för att bedöma injekteringsridåns funktion och hållbarhet, som stöd för beslut om underhåll och återinjektering.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Studien fokuserar på en specifik betongdamm med befintlig instrumentering för portrycksmätning. Den omfattar inte långtidsövervakning, utveckling av reparationsmetoder eller andra injekteringsmaterial än cementbaserade. Resultaten är främst tillämpliga på betongdammar med liknande geologiska och tekniska förutsättningar.

Denna studie är baserad på en betonglamelldamm med en grundläggningsyta med begränsad utbredning i flödesriktningen. Därför ska resultaten av denna studie tolkas med försiktighet för massiva betongdammar eller fyllningsdammar.

1.4 METOD

För att utvärdera injekteringsridåns status har följande metoder använts:

1. Numerisk modellering av grundvattenströmning och portryck med Plaxis 2D
2. Fältmätningar av portryck
3. Vattenkemiska analyser

Som referensprojekt har betonglamelldammen Skålan använts, en är en kombinerad betong- och stenfyllningsdamm med en total längd på cirka 240 meter. Se mer under avsnitt 3.

Metoderna har kombinerats med syftet att erhålla en helhetsbild av injekteringsridåns funktion. Modelleringen ger en teoretisk förståelse av strömningförhållandena, mätningarna visar det faktiska beteendet i dammen och vattenkemin tillför information om långsiktiga transportprocesser och förändringar i material eller vattnets ursprung.

Genom att väga samman styrkor och begränsningar från de tre metoderna erhålls en robustare bedömning än om en enskild metod hade använts.

1.4.1 Numerisk modellering

Grundvattenströmning och portryck i området kring dammen modellerades med hjälp av Plaxis 2D. Modellen byggdes upp i två dimensioner utifrån dammens geometri, topografi och kända geologiska förhållanden.

Modellen kalibrerades mot uppmätta portryck och inflöden för att säkerställa rimlig överensstämmelse. Därefter modellerades fyra olika scenarier med varierande grad av ridåns genomsläpplighet, för att analysera konsekvenser av en successivt försämrade injektering, i form av portrycks- och vattenflödesvariationer.

1.4.2 Fältmätning av portryck

För att verifiera modellens antaganden och följa dammens utveckling över tid har mätdata från portrycksmätningar i borrhål nedströms injekteringsridån med automatiska givare (BAT-system) analyserats. Mätningarna täcker olika driftförhållanden, inklusive högflödesperioder, för att undersöka eventuell påverkan på vattenkemi och portryck.

1.4.3 Vattenkemiska analyser

Vattenprov har tagits från följande punkter på referensprojektet Skålandammen:

- Ett prov togs vid höger anfang i magasinet som referensvatten.
- Två prover togs på vardera sida av utskovet: monolit 2 samt 10, vilka är injekterade
- Ett prov togs vid utskov 2, monolit 7 (ej injekterad)

Analyserna omfattar huvudsakliga joner (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^-), pH, alkalinitet och elektrisk konduktivitet. Analyserna togs för att upptäcka förändringar som kan indikera nedbrytning av injekteringsbruket samt för att utvärdera långsiktiga trender i vattenkemi kopplade till ridåns täthet.

Ett prov togs vid höger anfang i magasinet som referensvatten. De tre övriga proverna togs inne i betongdammen: M02-D01H på vänster sida om utskovet, M10-D02V på höger sida om utskovet samt M07-D02V vid utskov 2.

2 Teoretisk bakgrund och litteraturstudie

2.1 INJEKTERINGENS HISTORIA OCH UTVECKLING

Att täta sprickor i berg med injektering – alltså att pressa in cement- eller kembaserat bruk – är en metod som använts länge. Redan på 1800-talet började tekniken användas i järnvägs- och vattenbyggnadsprojekt (Houlsby, 1990; Weaver & Bruce, 2007). Under första halvan av 1900-talet fick den sitt verkliga genomslag inom dammbyggnad. Ett välkänt exempel är Hoover Dam på 1930-talet, där metoden utvecklades till att omfatta allt från dimensionering av ridåer till tryckstyrning och kvalitetskontroller (Rogers, 2005; Weaver & Bruce, 2007).

I Sverige blev injektering vanlig i samband med vattenkraftsutbyggnaden under slutet av 1930-talet (Rosenqvist, 2020). Under 1950–70-talen utformades många injekteringsridåer av cementbruk, ofta i kombination med ytinjektering. Arbetet styrdes då mest av praktiska tumregler – till exempel att ridådjupet skulle motsvara en fjärdedel av halva dammhöjden att hålen skulle placeras med 1–3 meters avstånd och att injekteringen avbröts när vattenflödet eller materialåtgången minskade. Parametrar som materialegenskaper och sprickhydraulik var mindre relevanta i sammanhanget (Houlsby, 1990; Weaver & Bruce, 2007).

Från 1980-talet utvecklades tekniken snabbt. Mikrocement och finfördelade bruk gjorde det möjligt att nå in i små sprickor, kemiska bruk började användas, och nya arbetsmetoder som nivåinjektering och hålförtätning ökade täckningsgraden. Samtidigt förbättrades stabiliteten med superplasticerande tillsatser och antiurvaskningsmedel. Genom aktiv tryckstyrning kunde man också minska risken för uppspräckning i berget. Parallellt gick kontroller från rena visuella observationer till instrumentering och numeriska modeller (Weaver & Bruce, 2007; Zhang et al., 2021; Mohlin et al., 2023).

I dagens svenska praxis betonas att injektering inte är en garanti för täthet utan en kompletterande säkerhetsåtgärd. RIDAS understryker att effekten av en injekteringsridå bara får tillgodoräknas vid stabilitetsanalyser om funktionen kan verifieras med mätningar och följas upp med underhåll (Energiföretagen, 2020).

2.2 NEDBRYTNINGSPROCESSER OCH BESTÄNDIGHET

En injekteringsridå är inte en permanent installation – dess funktion påverkas av flera nedbrytningsprocesser. Cementbaserade bruk är till exempel kemiskt instabila i vatten, vilket gör att ridåernas täthet kan försämrats över tid (Rosenqvist, 2020; ICOLD, 2000). Livslängden varierar mycket och beror på faktorer som material, utförande och miljöförhållanden (Alemo et al., 1988; Rosenqvist, 2020).

2.2.1 Nedbrytningsmekanismer

De vanligaste processerna vid nedbrytning är:

- **Kemisk urlakning:** vissa kemiska ämnen löses upp och transporteras bort från betongen, vilket kan påverka dess struktur och hållbarhet. Detta kan leda till bl.a. ökad porositet, karbonatisering eller ettringitbildning, processer som i sig orsakar volymändringar och sprickbildning (ICOLD, 2000; Zou et al., 2022).
- **Inre erosion:** Strömmande vatten kan föra bort finkornigt sprickfyllnadsmaterial i berggrunden under dammen vilket skapar ökade upptryck och därmed minskad glidstabilitet. I fyllningsdammar kan detta leda till rörbildning och sjunkhål (Johansson, Krounis & Westberg Wilde, 2017).

- **Fysisk nedbrytning:** Temperaturväxlingar, frost/tö-cykler och uttorkning orsakar sprickor och krympning i det hårdnade cementbruket, särskilt i torrlagda zoner eller under byggskedet (Rosenqvist, 2020).
- **Mekanisk påverkan:** Spänningsförändringar, vibrationer eller höga tryckgradienter kan vidga sprickor eller skapa öppningar i bruk eller mellan bruk och berg (Rafi & Stille, 2015).
- **Biologiska processer:** Mikrobiell aktivitet spelar oftast liten roll i svenska dammar, men kan i vissa fall påverka brukets struktur (Rosenqvist, 2020).
- **Synergieffekter:** Ofta samverkar mekanismerna – urlakning kan till exempel göra bruket porösare och mer känsligt för erosion (Rosenqvist, 2020).

2.2.2 Livslängd

Livslängden för injekteringsridåer kan påverkas av flera faktorer:

- **Bruk och geologi:** Lågt vct (<0,6) ger tät struktur men historiskt sämre inträngning i bergsprickorna, även om det idag finns tillsatsmedel som gör att bruket har längre öppethållandetid och bättre flytegenskaper. Högre vct ger bättre inträngning men sämre hållbarhet. Även partikelstorlek, tillsatser och klinkersammansättning spelar roll (Houlsby, 1990; Zhang et al., 2021).
- **Utförande:** Noggrann styrning av injekteringstryck och materialåtgång är avgörande för att uppnå hög fyllnadsgrad, det vill säga att bruket tränger in i fler sprickor och fyller dem mer fullständigt. Om trycket är för högt riskerar man att skapa nya sprickor, medan för lågt tryck ger ofullständig fyllning. Genom stegvis injektering och kontroll av materialåtgång kan inträngningen optimeras utan att orsaka skador i berget (Weaver & Bruce, 2007; Zhang et al., 2021).
- **Hydrauliska förhållanden:** Stora tryckgradienter ökar risken för urlakning och erosion. Sprickornas utformning och läge i förhållande till magasinet är avgörande. Långa transportvägar är gynnsamma för att minska urlakning och erosion (ICOLD, 1993; Ruggeri, 2004).
- **Geokemi:** Vatten med lågt pH eller högt CO₂-innehåll påskyndar kemisk nedbrytning (Rosenqvist, 2020).

2.2.3 Praktiska observationer

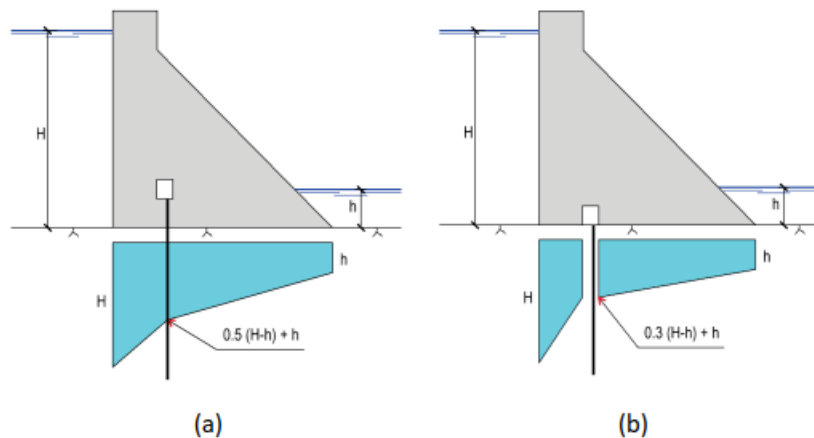
Ytinjektering är ofta först att brytas ned eftersom den utsätts för växlande fukt och temperatur samt högre lokala flöden. I fyllningsdammarna kan en försämrade ridå bidra till inre erosion om filtren inte fungerar. I betongdammarna kan en förlorad tätning leda till högre upptryck och försämrade stabilitet, särskilt om dräneringen inte fungerar som planerat (Energiföretagen, 2020; Johansson et al., 2017). Därför är kontinuerlig övervakning och möjligheten till återinjektering avgörande i dammarnas förvaltningsverksamhet. (Alema et al., 1988; Rosenqvist, 2020).

2.3 PORTRYCKSMÄTNING UNDER DAMMAR

Portryck är en av de mest avgörande parametrarna för dammsäkerhet med avseende på dammstabilitet. Högt portryck innebär högre lyftkrafter och minskad effektivspänning i berg eller dammkropp, vilket kan försämrade stabiliteten, öka erosionsrisken och i värsta fall orsaka dammhaveri. Därför rekommenderar både svenska RIDAS och internationella riktlinjer att portrycket övervakas och att redundanta system med både dränering och mätning används (Energiföretagen, 2020; FERC, 2002; Mohlin, Enzell & Malm, 2019; Ruggeri, 2004).

2.3.1 Porttrycksmätning och dränage

Dräneringssystem placeras vanligtvis nedströms injekteringsridån och fungerar som säkerhet genom att minska upptryck i berggrunden och därmed förbättra stabiliteten. Ett stigande porttryck kan tyda på igensatta dränagehål eller en försämrade injekteringsridå, och kräver åtgärder som spolning, urblåsning, borrhning av helt nya dränagehål och kompletterande injektering (Johansson, Krounis & Westberg Wilde, 2017). Se Figur 3.1 för en schematisk upptrycksfördelning för massiva dammar med dränage.



Figur 2-1 Schematisk upptrycksfördelning för massiva dammar med dränage baserat på RIDAS anvisningar med två olika fall (Energiföretagen, 2020). Till vänster (a) ett med dränagetunnel i dammen och dränagehål i betongen och i berget (fall 1), och till höger (b) ett med dränagehål i berget och dränagetunnel vid bergytan med olika upptrycksreducerande effekt vid dränagehålens läge (fall 2).

Porttrycksmätningar används för att upptäcka läckage, följa ridåinjekterings- och dränagefunktioner, analysera säsongsvariationer och sätta larmnivåer. I fyllningsdammar är det särskilt viktigt att kontrollera att porttryckslinjen hålls inom säkra gränsvärden, eftersom avvikelser kan signalera inre erosion (Ekström et al., 2019; Bernstone et al., 2021).

Mätningarna används främst för övervakning, inte som direkt indata i beräkningar, eftersom lokala effekter och osäkerheter kan påverka resultaten (Energiföretagen, 2020; FERC, 2002).

2.3.2 Instrumentering och metodik

För att få en rättvisande bild krävs noggranna mätinstrument. I berg och betong används ofta vibrerande stränggivare eller andra elektriska tryckgivare. Ett vanligt system är BAT, där givarna kan bytas utan att hela installationen görs om – en stor fördel för underhållet (Mohlin et al., 2023).

Borrhning, tätning och dokumentation av sprickor är viktiga steg i installationen. I fyllningsdammar används piezometrar som placeras i olika zoner. Här är det avgörande att borrhningen inte stör materialet, därför används skonsamma metoder som OD- eller DR-borrhning (Perman, 2011; Energiföretagen, 2020).

Mätningarna kan göras med relativa eller absoluta givare. För att säkerställa tillförlitligheten görs regelbundna kalibreringar och tester mot kända trycknivåer (Mohlin et al., 2023).

Porttrycksmätning kombineras alltid med andra data, som magasinets nivåer, läckageflöden och ibland temperatur. Det gör det möjligt att bättre tolka resultat och undvika falska larm (Mohlin et al., 2023; Nilsson & Johansson, 2020).

2.3.3 Placering och mätfrekvens

Placeringen av porttrycksgivarna är avgörande. I betongdammar placeras de ofta 6 m djupt från lägsta bergövertytan, nedströms dränagehålen. 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 fyllningsdammar placeras de oftast i filtren, stödfyllningen och undergrunden för att följa porttryckslinjen (Energiföretagen, 2020; Mohlin et al., 2023).

Automatiserade, kontinuerliga mätningar är att föredra, eftersom manuella avläsningar riskerar att missa snabba tryckförändringar. Mätdata måste dessutom kopplas till driftförhållanden, som tappningar och underhåll, för att analysen ska bli korrekt.

Ett kvalitetssäkringsprogram med kalibreringar, funktionstester och tydliga larmrutiner är centralt. Larmnivåer sätts initialt utifrån beräkningar men justeras efter erfarenheter från ungefär ett års drift. Både absoluta nivåer och förändringstakter följs – långsamma trender kan vara lika viktiga som plötsliga toppar (Johansson et al., 2017; Mohlin et al., 2023).

När ett larm aktiveras bör en tydlig process följas: kontroll av givaren, jämförelse med andra mätpunkter och magasinnivåer, test av dränhålets funktion och eventuella åtgärder. Om problemet kvarstår kan det vara tecken på att ridån eller dränagehålen har tappat effekt, vilket kan leda till beslut om reoperationsinjektering eller uppborrning av nya dränagehål (Johansson et al., 2017; Mohlin et al., 2023).

2.4 INTERNATIONELLA RIKTLINJER FÖR INJEKTERING OCH ÖVERVAKNING

I detta avsnitt har vi granskat riktlinjerna med fokus på tre aspekter: övervakning, åtgärder och injektering, särskilt i relation till hur ett ökat porttryck – exempelvis orsakat av en nedbruten injekteringsridå – bör hanteras enligt respektive riktlinje. Jämförelsen omfattar hur RIDAS, FERC och ICOLD rekommenderar instrumentering och övervakning, vilka åtgärder som föreslås vid avvikande porttryck, samt synen på injektering som underhållsåtgärd, se Tabell 2-1 (Energiföretagen, 2020, FERC 2002, ICOLD, 1993).

2.4.1 RIDAS (Sverige)

RIDAS (Riktlinjer för Dammsäkerhet) utges av Energiföretagen Sverige och fungerar som branschgemensam standard för svenska dammägare. Dokumentet är inte juridiskt bindande, men följs i praktiken som norm av tillsynsmyndigheter och branschen. Nedan text kommer från Kapitel 11 Övervakning och instrumentering samt 12 Reoperationsåtgärder i TV 9 Betongdammar.

- **Övervakning:** RIDAS rekommenderar att dammar i högre säkerhetsklass instrumenteras med porttrycksgivare, läkagemätning och ibland deformationsmätning. Övervakningen ska anpassas till dammens dammsäkerhetsklass och dokumenteras i dammsäkerhetsrapport (DSR).
- **Åtgärder:** Om förhöjda läckage eller avvikande mätdata registreras ska dammägaren utreda orsaken och ta fram en åtgärdsplan. RIDAS betonar att beslut ska baseras på dammsäkerhetsklass och dammens specifika förhållanden.
- **Injektering:** Används främst vid nybyggnation och större ombyggnader. Vid dokumenterat ökande läckage kan underhållsinjektering övervägas, men alltid efter en föregående geologisk och hydraulisk analys.

2.4.2 FERC (USA)

Federal Energy Regulatory Commission (FERC) ansvarar för tillsynen av vattenkraftsdammar i USA. Deras riktlinjer (Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects, särskilt *Chapter 3: Surveillance and Monitoring*) är juridiskt bindande krav för berörda dammägare.

- **Övervakning:** FERC kräver omfattande instrumentering, ofta tätare än i Europa. Porttryck, läckage och deformationer ska följas och rapporteras minst årligen.
- **Åtgärder:** Snabb rapportering krävs om mätdata visar på avvikelser. Myndigheten kan kräva akuta åtgärder eller förstärkningar.
- **Injektering:** FERC rekommenderar rutinmässigt underhållsinjektering i äldre dammar om förhöjt läckage påträffas, även om ingen akut säkerhetsrisk föreligger. Den amerikanska traditionen är mer handlingsinriktad och mindre riskbaserad än den svenska.

2.4.3 ICOLD (internationellt)

International Commission on Large Dams (ICOLD) ger sedan 1930-talet ut tekniska bulletiner med riktlinjer för dammsäkerhet. Dessa är inte juridiskt bindande men fungerar som internationell best practice.

- **Övervakning:** ICOLD betonar långsiktig instrumentering och framför allt trendanalys av data. Regelbundna mätningar av porttryck, läckage och vattenkemi rekommenderas.
- **Åtgärder:** Riskbaserad syn – små ökningar i läckage kan accepteras om stabiliteten inte hotas, men snabb förändring eller trendbrott ska alltid leda till åtgärd.
- **Injektering:** Ses som ett verktyg för att begränsa läckage, inte eliminera det. Underhållsinjektering ska föregås av analys av grundorsak och geologiska förhållanden.

Tabell 2-1 Jämförelse mellan RIDAS, FERC och ICOLD

	RIDAS (Sverige)	FERC (USA)	ICOLD (Internationellt)
Övervakning	Instrumentering enligt dammsäkerhetsklass; portryck, läckage, deformationer; rapporteras i Dammsäkerhetsrapport	Omfattande krav; mätdata ska rapporteras årligen till FERC	Rekommenderar mätning och trendanalys, utan bindande krav
Åtgärder vid förhöjt läckage	Utredning och åtgärdsplan baserat på dammsäkerhetsklass	Omedelbar rapportering och ibland krav på åtgärd	Riskbaserad: små ökningar accepteras om stabilitet ej hotas
Injektering	Främst vid nybyggnad eller vid dokumenterad försämring	Rutinmässig underhållsinjektering i äldre dammar	Rekommenderar noggrann analys före injektering; syftet är att minska, inte eliminera, läckage

3 Referensprojekt: Skålandammen

3.1 VAL AV REFERENDAMM

En central del i projektet var att välja en referensdamm där metodiken för statusbedömning av injekteringsridåer kan prövas och verifieras. Urvalet styrdes av flera kriterier som dammen behövde uppfylla för att möjliggöra en helhetsbild av bergmassans egenskaper och ridåns funktion:

- Befintlig och dokumenterad injekteringsridå
- Instrumentering för mätning av porttryck
- Tillgång till data från tidigare berggrundsundersökningar (borrkärnekartering och vattenförlustmätningar)
- Vattenkemiska analyser

Att finna en damm som uppfyllde samtliga kriterier visade sig vara utmanande, främst eftersom dokumentationen av injekteringsridåer ofta varit begränsad.

3.2 BAKGRUND OM SKÅLANDAMMEN

Skålandammen är en del av Trångfors kraftverk, beläget i Ljungan i Bergs kommun, Jämtland. Se Figur 3-1 för översiktsskildringar över anläggningen. Kraftverket ägs av Uniper Sverige AB och byggdes mellan 1970 och 1974 (Björkman, 2005).



Figur 3-1 Skålandammen (sett från nedströmssidan). Uppe till vänster visas typmonoliterna 15-10, uppe till höger visas utskoven monolit 9-4 och nere till höger visas typmonoliterna 3-1. Nere till vänster visas utskoven vid spill av vatten. Foto: Norconsult (2004)

3.2.1 Konstruktion och tekniska specifikationer

Skålandammen är en kombinerad betong- och stenfyllningsdamm med en total längd på cirka 240 meter. Den är uppdelad i tre sektioner:

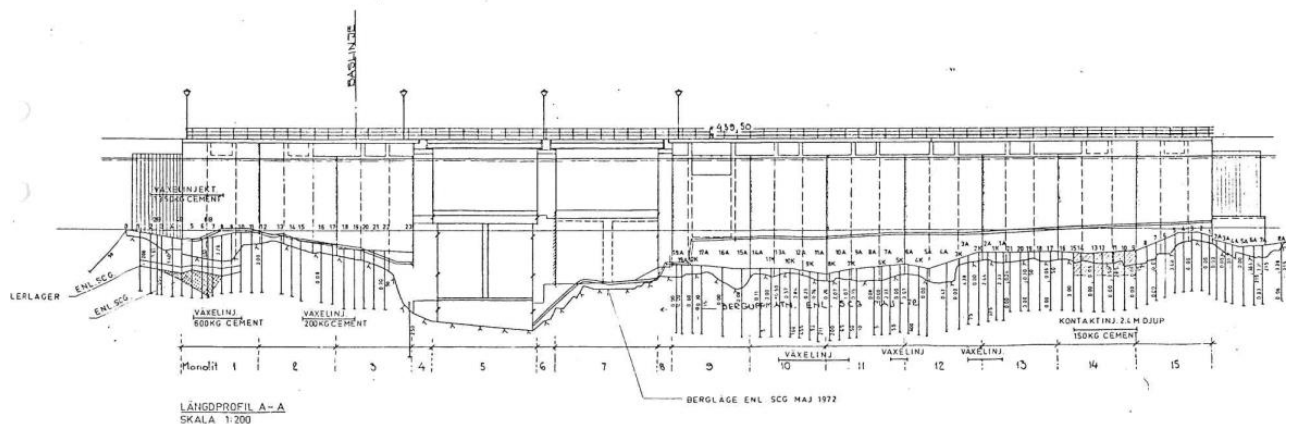
- Stenfyllningsdamm (90 m, vänstra delen)
- Betonglamelldamm (110 m, mittdelen)
- Stenfyllningsdamm (40 m, högra delen)

Betonglamelldammen har en vertikal uppströmssida och består av 15 monoliter. Varje monolit utgörs av en frontplatta som tar upp vattentrycket samt en stödpelare som överför lasten till berggrunden. Monoliterna har anpassats efter den underliggande berggrunden och försetts med expansionsfogar för att hantera rörelser och spänningar i konstruktionen.

3.3 INJEKTERING AV SKÅLANDAMMEN

För att säkerställa täthet, stabilitet och långsiktig hållfasthet genomfördes berginjektering i samband med anläggandet. Arbetet redovisades i en teknisk sammanställning av VBB den 26 maj 1978 (VBB, 1978). Fullständig dokumentation återfinns i Bilaga 1.

Injekteringen utfördes längs hela dammens längd, förutom under utskoven, vilket framgår av ritningen "Längdprofil A-A" i skala 1:200, se Figur 3-2.



Figur 3-2 - Uppströmssidan av Skålandammen (del av ritning från relationshandling injektering 10074 VBB, 1972).

3.3.1 Injekteringsmetodik

Injekteringen har utförts i flera zoner med varierande cementmängder beroende på berggrundens permeabilitet och behovet av tätning. Följande metoder och mängder har använts:

- **Kontaktinjektering** med ett djup på ca 2,4 meter och 150 kg cement per punkt, för att förbättra vidhäftningen mellan betongkonstruktionen och berggrunden.
- **Växelinjektering** i flera sektioner, med ett djup på ca 7 meter och cementmängder på 150 kg, 200 kg och upp till 600 kg per punkt, beroende på vattenförlust och bergkvalitet (VBB, 1978).

Injekteringspunkterna är fördelade längs dammens 15 monoliter, och placeringen har anpassats efter berglagrets variationer enligt SGU:s geologiska undersökning från maj 1972 (SGU, 1972). Ritningen, se Figur 3-2 visar att injekteringen har utförts nedströms betonglamellerna, med särskild fokus på sektioner med hög vattenförlust.

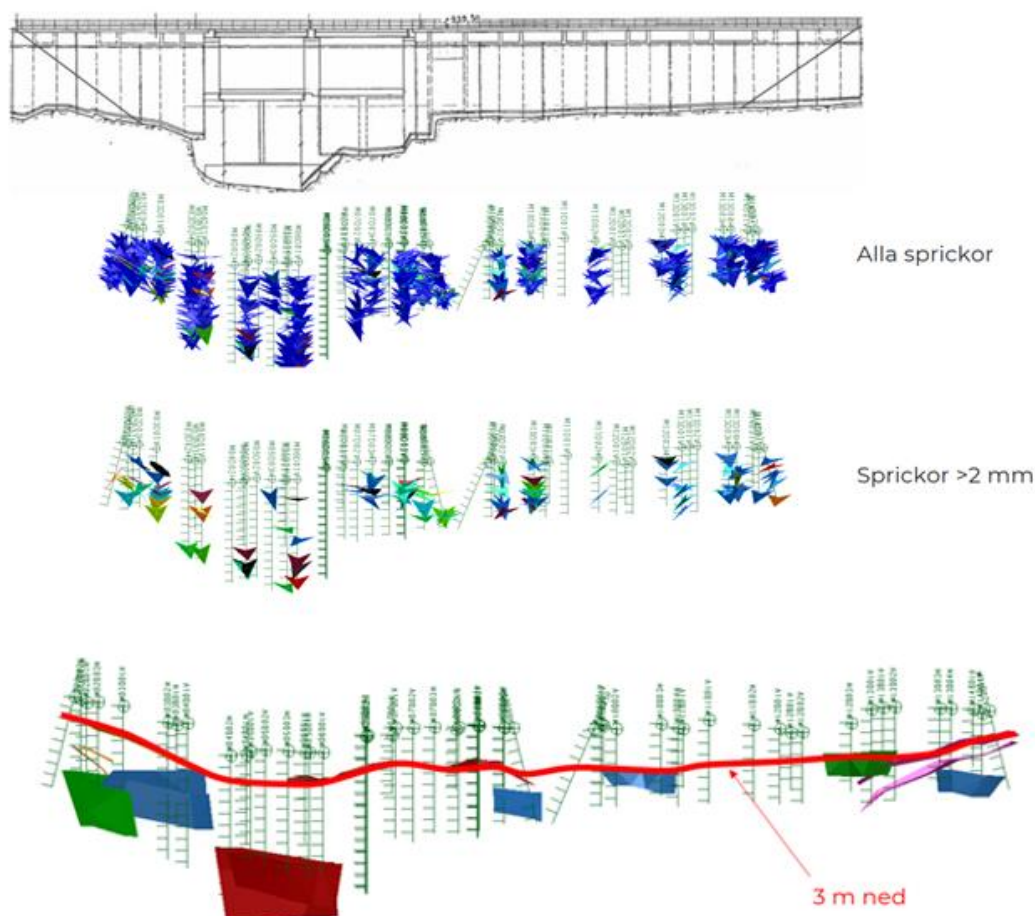
3.3.2 Geologiska förhållanden

Berglagret under dammen uppvisade varierande permeabilitet innan injektering utfördes. Vattenförlustmätningar (VFM) visade spridning mellan olika sektioner, där vissa uppmätta värden nådde upp till 0,50 L/min-m vid ett tryck på 10 atm. Ett sådant värde indikerar ett sprickigt och relativt genomsläppligt berg, vilket motiverade behovet av en tät injektering för att minska vattenläckage och upptryck. Borrprover och profiler visar att friskt berg nås vid nivåer mellan +420 och +430 m ö.h., medan den ursprungliga markytan före schaktning låg högre (VBB, 1978).

3.4 GEOLOGISKA UNDERSÖKNINGAR AV SKÅLANDAMMEN

WSP genomförde 2018–2021 en geologisk undersökning av Skålans berggrund. Detta gjordes som underlag till en 3D-modellering av strukturer under dammen med syftet att utreda förekomst av horisontella sprickplan och svaghetszoner som kan påverka storstabiliteten. Totalt borrades 52 hål mellan monoliterna, varav 30 filmades med BIPS (Borehole Image Processing System). BIPS-filmningen gav högupplösta, orienterade bilder av borrhäggarna och användes för att kartlägga bergets foliation och sprickor, samt förekomst av mylonit (bergart) i tre dimensioner.

Resultaten visar att bergarten huvudsakligen är en folierad, veckad, fin- till medelkornig gråvacka. Foliationsriktningarna varierar med veckningen: i söder lutar lagren mot väst och i norr mot syd, vilket tyder på en flack veckomböjning under dammen. Två mylonitzoner identifierades: en nedre zon cirka 10 m under utskoven (stupande västerut) och en övre, ytligare zon (~1 m tjock) som sträcker sig ~22 m vid luckorna på 2–3 m djup. Sprickorna grupperades i fem strukturgupper efter öppningsstorlek och orientering, där vissa sprickor (t.ex. grupp 2 i norr) kan vara lerfyllda och med sprickbredder på 10–20 mm, se Figur 3-3 för resultat från 3D modelleringen (WSP, 2021).



Figur 3-3 – Resultat från WSP:s 3D-modellering av geologiska strukturer under Skålandammen. Källa: WSP (2021).

3.4.1 Vattenförlustmätning

Som komplement till BIPS-filmningen utfördes vattenförlustmätningar i borrhålen för att lokalisera vattenförande sprickor. Detta genomfördes av Sweco efter att dränagehål och porttryckshål hade borrats.

I dränagehålen användes en tät packer med ett invändigt öppet rör, vilket möjliggjorde upptäckt och mätning av eventuellt artesiskt flöde. Packern flyttades till olika nivåer (exempelvis 1,0 m och 2,0 m under bergytan) och eventuellt utflöde observerades.

När det gäller porttrycksmätning placerades packern enligt ovanstående metod, men utan det öppna röret, i syfte att isolera specifika sektioner för att mäta tryck eller flöde.

I många borrhål noterades inget flöde vid 1–2 m djup, men i flera hål uppträdde flöde på större djup, vilket indikerar djupare vattenförande sprickor. Om artesiskt vatten konstateras ur borrhålet, så monteras först en tät packer på 1 m djup. Om det då slutar strömma vatten så visar det att den vattenförande sprickan är belägen längre ned i borrhålet. Då flyttas packern ytterligare 1 m ned i berget och samma procedur upprepas.

På så sätt är det möjligt att placera packern som sitter monterad runt förlängningsröret för själva porttrycksmätningen på rätt djup i berget. Om packern skulle placeras ytligt i berget finns en risk att trycket från en vattenförande spricka på djupet skulle dräneras bort via en ytlig spricka nära ytan, d.v.s. ett korrekt mätvärde skulle inte mätas.

Mätningarna visade artesiskt vatten i flera borrhål, med flöden upp till ca 2 l/min. I monolitfack 2/3 varierade flödet mellan 0,44–2,07 l/min beroende på packerns nivå (1–3 m under bergytan), vilket indikerar flera vattenförande sprickor. Liknande provningar i monolit 6/7 och 9/10 visade att sprickor oftast ligger djupare än 1,5 m, ibland ned mot 3 m. Detta bekräftar att vattenförande zoner finns på varierande djup (Sweco, 2020).

3.5 SLUTSATSER OCH STABILITETSANALYSER

Den genomförda 3D-modelleringen indikerar en relativt flack veckstruktur i berggrunden under Skålandammen. Denna struktur kan ge upphov till horisontella sprickplan med potentiell påverkan på dammens storskaliga glidstabilitet. I norra delen identifierades sprickor med lerfyllning (strukturgrupp 2) samt en horisontell mylonitzon vid luckorna (strukturgrupp 1). Om dessa zoner är hydrauliskt sammanlänkade kan de utgöra en sammanhängande svaghetsstruktur. På grund av begränsad videokvalitet i vissa borrhål, till följd av smutsigt vatten, kunde en sådan koppling varken bekräftas eller uteslutas (WSP, 2020).

För att bedöma konsekvenserna av en möjlig svaghetsstruktur genomfördes stabilitetsberäkningar med antagandet om ett horisontellt sprickplan cirka 3 meter under dammen. Glidstabiliteten analyserades för samtliga monoliter. Inledande beräkningar visade låg säkerhetsmarginal för vissa lastfall, särskilt vid islast, i scenarier där dränagehål saknades.

Mot bakgrund av dessa resultat initierades kompletterande åtgärder. Dränagehål borrades och porttrycksgivare installerades för att förbättra kunskapen om upptryckets storlek och fördelning. Beräkningar visade att variationer i upptryck har stor inverkan på glidstabiliteten. Generellt sett visade porttrycksmätningarna lägre värden än de antaganden från RIDAS (Energiföretagen, 2020), vilket resulterade i en större säkerhetsmarginal i beräkningarna (Westberg Wilde et al, 2024).

Efter att ha utvärderat alternativen – fler undersökningar för större exakthet mot förstärkning – valde Uniper, dammägaren, att genomföra förstärkningsåtgärder. Dessa bestod av installation av bergförankrade spännkablar. Efter genomförd stabilisering uppfyller dammen de kritiska lastfall som tidigare identifierats, inklusive islast och ett antaget horisontellt glidplan på 3 meters djup.

4 Numeriska analyser

I detta avsnitt redovisas resultat från numeriska analyser utförda i syfte att undersöka sambandet mellan injekteringsridåns egenskaper och hydrauliska parametrar såsom porttryck och vattenflöde. Fyra modeller med totalt tolv beräkningsfall har genomförts, där variationer i permeabilitet, geometrisk uppbyggnad och förekomst av sprickzoner har studerats. Se Bilaga 2 för detaljerna av samtliga beräkningar.

4.1 MODELLUPPBYGGNAD OCH UTFÖRANDE

De numeriska modellerna har byggts upp utifrån geometri och materialegenskaper som dokumenterats vid Skålandammen. Centrala indata redovisas i Tabell 4-1 nedan. Dessa värden har valts baserat på:

- **Geologiska undersökningar** (borrkärnekartering, vattenförlustmätningar) som utförts av Sweco och WSP 2018–2021.
- **Relationshandlingar från injektering** vid dammens byggnation (VBB, 1972).
- **RIDAS-rekommendationer** för antaganden om betong och injekteringsridå (Energiföretagen, 2020).

Tabell 4-1 Antagna permeabilitetsvärden i beräkningsmodellerna

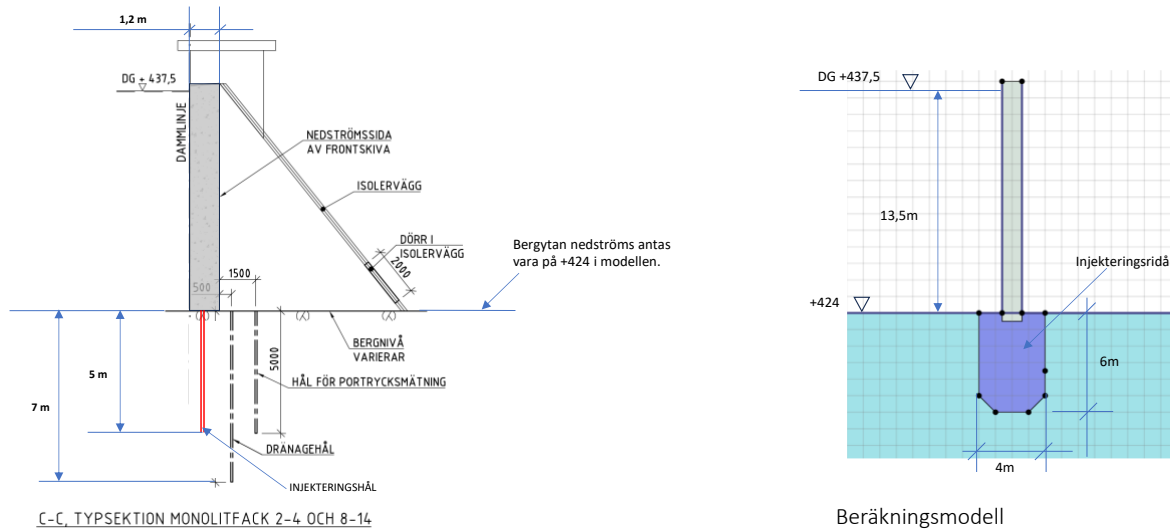
Material	k-värde [m/s]	Källa/underlag
Betongdamm	1×10^{-10}	RIDAS (Energiföretagen, 2020)
Injekteringsridå	3×10^{-8}	VBB (1972), Sweco (2019)
Grundare bergmassa	3×10^{-7}	Vattenförlustmätningar, WSP (2021)
Djupare bergmassa	9×10^{-8}	Vattenförlustmätningar, WSP (2021)

Vattennivåer har antagits till +437,5 m uppströms och +424 m nedströms, i enlighet med driftdata från Skålandammen. Randvillkor har satts öppna vid vertikala sidor och låsta vid botten, vilket motsvarar verkliga hydrauliska förhållanden.

Koppling till undersökningar:

- Permeabilitetsvärden för berg har kalibrerats mot uppmätta vattenförluster i borrhål (Sweco, 2020).
- Modellgeometri baseras på typsektion C–C för monolitfack 2–4 (WSP, 2019).
- Antaganden om injekteringsridåns utbredning (4 m horisontellt, 6 m vertikalt) bygger på dokumenterade injekteringsmetoder vid byggnation (VBB, 1972).

Beräkningsmodellen är baserad på typsektion C–C för monolitfack 2–4, se Figur 4-1. Injekteringshålen är 5 meter långa, medan injekteringsridån i modellen antas ha en bredd på 4 meter och ett djup på 6 meter. Antagandet bygger på en teoretisk spridning av cementbruk: 2 meter vinkelrätt från hålet och 1 meter i hålbotten.



Figur 4-1 Typsektion av monolitfack (WSP, 2019) och beräkningsmodell, uppströmsvy.

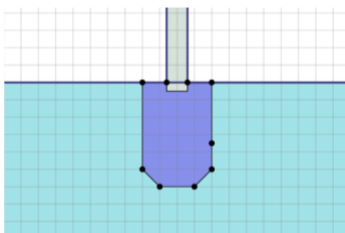
Syftet med modelleringen är att analysera sambandet mellan porttrycksvariationer och injekteringsridåns täthet. De tolv beräkningsfallen har genomförts med varierande materialegenskaper och geometriska konfigurationer se Tabell 4-2 och Figur 4-2.

Bergmassan och injekteringsridån har modellerats som isotropa och homogena material. Enskilda sprickplan och svaghetszoner har dock inkluderats i en av modellerna. Dränagehål har inte modellerats explicit, men deras effekt diskuteras i analysen.

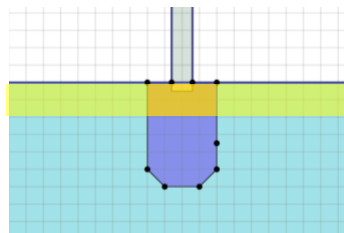
Tabell 4-2 Utförda modeller och beräkningsfall

Utförd modell	Beskrivning och beräkningsfall
Modell - 0	Denna modell utförs som grundmodell för rimlighetskontroll av valda materialparametrar, modellgeometrier, randvillkor och resultat.
Modell - 1	Denna modell är baserad på grundmodell Modell-0 och utförs med 4 beräkningsfall där injekteringsridåns permeabilitet varierar.
Modell - 2	I denna modell indelas injekteringsridån i två lager. Fyra beräkningsfall utförs med varierande k-värde för den övre delen av injekteringsridån.
Modell - 3	Denna modell är baserad på Modell-2 och utförs med 3 beräkningsfall där sprickplan och svaghetszon är inkluderade i injekteringsridån.

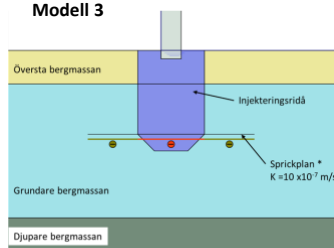
Modell 0 och 1



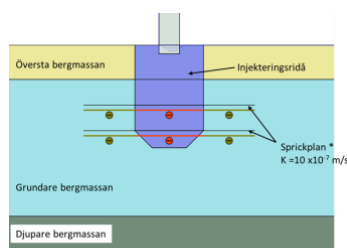
Modell 2



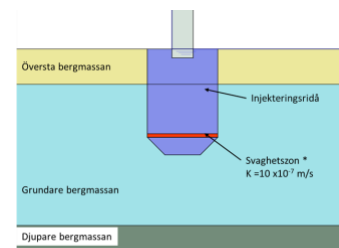
Modell 3



Modell 3-1



Modell 3-2



Modell 3-3

Figur 4-2 Uppbyggande av utförda modeller .

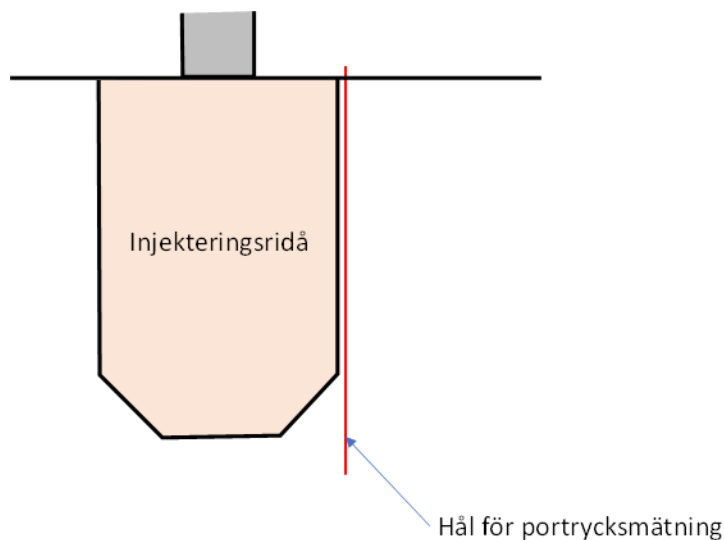
4.2 BERÄKNINGSRESULTAT

Porttrycksfördelningar beräknade i modellerna redovisas längs ett simulerat mätningshål nedströms, motsvarande placeringen av porttrycksmätningarna, se Figur 4-3. Sammanställning av resultat från samtliga modeller och beräkningsfall visas i Figur 4-4, där medelvärden från uppmätta data har inkluderats för jämförelse.

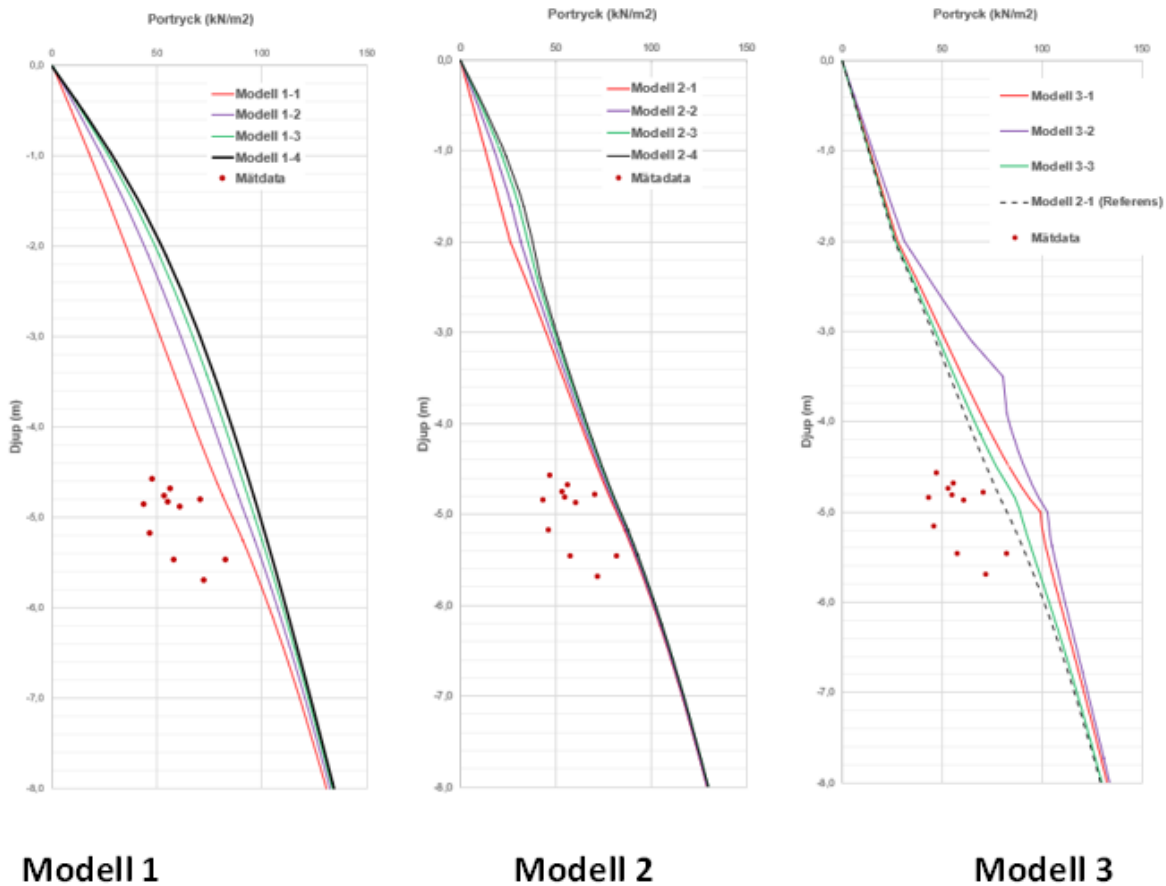
Porttrycksmätningar från de 12 givarna har pågått kontinuerligt mellan 2020-09-23 och 2024-12-22, med undantag för vissa driftstörningar under slutet av 2023 och början av 2024. Dessa störningar har dokumenterats och åtgärdats. Systemet har i övrigt visat god stabilitet och tillförlitlighet. Vattenytan har under perioden varierat mellan +436,5 och +437,5 meter, med ett medelvärde på +437,3 meter. Fullständiga mätdata återfinns i Bilaga 3.

De förenklingar och antaganden som gjorts i modellerna bedöms vara motiverade, eftersom beräknade porttryck i huvudsak överensstämmer med uppmätta värden. De beräknade värdena ligger något högre än de uppmätta, vilket sannolikt beror på att effekterna av dränage vid dammens nedströmssida inte har beaktats i modellerna. Resultaten visar att sambandet mellan porttrycksvariationer och injekteringsridåns permeabilitet är begränsat, även om skillnader på upp till 30 % förekommer.

Resultaten visar att variationer i porttryck har ett begränsat samband med injekteringsridåns permeabilitet. I Modell 3, där sprickzoner har inkluderats, är variationerna något mer uttalade.



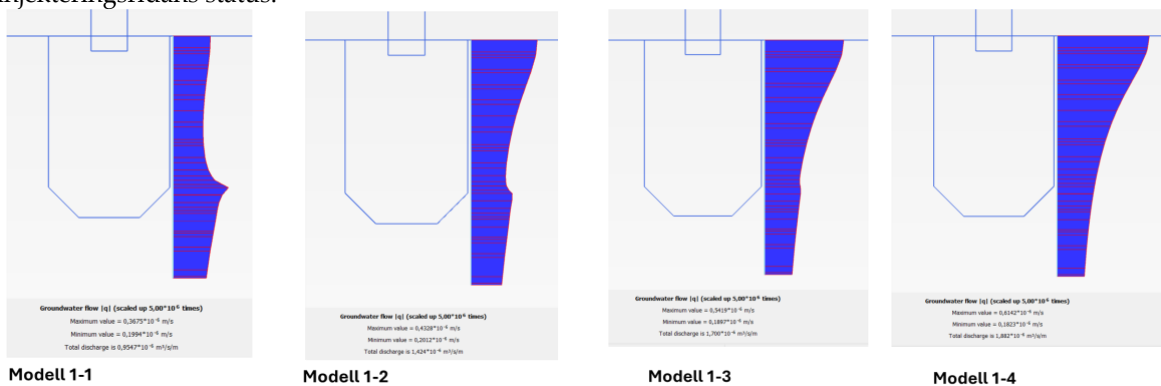
Figur 4-3 Placeringen av porttrycksmätningarna i beräkningsmodellen.



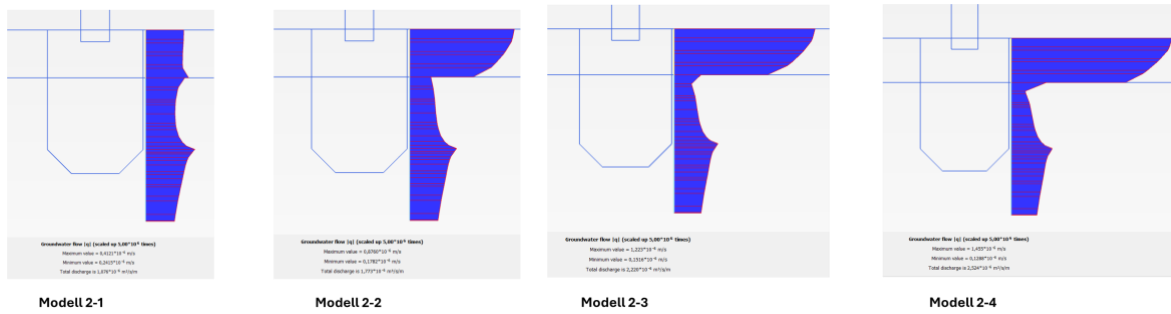
Figur 4-4 Portryckfördelning längs mätningshål för samtliga beräkningsfall jämfört med mätdata från 12 mätvärden.

Fördelning av beräknad vattenflöde längs simulerat mätningshål nedströms framgår av Figur 4-5 till Figur 4-7 för respektive utförda modeller.

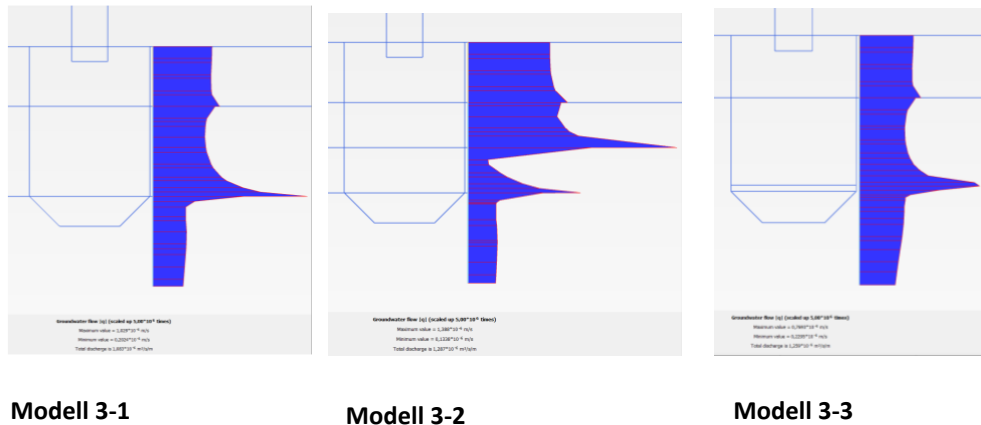
Beräkningsresultaten visar ett starkt samband mellan vattenflödes hastighet och injekteringsridåns täthet. Vattenflödes hastigheten i bergmassan har ett direkt samband med inflödet till ett borrhål, vilket innebär att mätning av vatteninläckage (mL/min) i ett borrhål anses vara ett pålitligt alternativ för att bedöma injekteringsridåns status.



Figur 4-5 Fördelning av vattenflöde längs mätningshål för samtliga beräkningsfall i modell-1



Figur 4-6 Fördelning av vattenflöde längs mätningshål för samtliga beräkningsfall i modell-2



Figur 4-7 Fördelning av vattenflöde längs mätningshål för samtliga beräkningsfall i modell-3

Det finns teoretiska förklaringar till ovannämnda beräkningsresultat. Vattenflöde i ett poröst medium styrs av Darcys lag som uttrycks i en förenklad form som:

$$q_x = k \cdot i_x$$

$$q_y = k \cdot i_y$$

Där

k = hydraulisk konduktivitet [m/s]

q_x, q_y = flödes hastighet [m/s] $oi_x,$

i_y = hydraulisk gradient [enhetlös]

Som Darcys lag visar finns det direkt samband mellan mediets permeabilitet (k) och flödes hastighet (q_x och q_y). Därför visar modellerna tydliga variationer av vattenflödet vid olika egenskaper hos injekteringsridån. Porttryck har däremot indirekt teoretiska samband med permeabiliteten (k), eftersom porttryckets fördelning bestäms av geometriska och materialmässiga faktorer. Porttrycksfördelningen i en modell beräknas således genom att vattenflöden ska uppfylla både Darcys lag och vattenflödeskontinuitetsvillkoret enligt nedan:

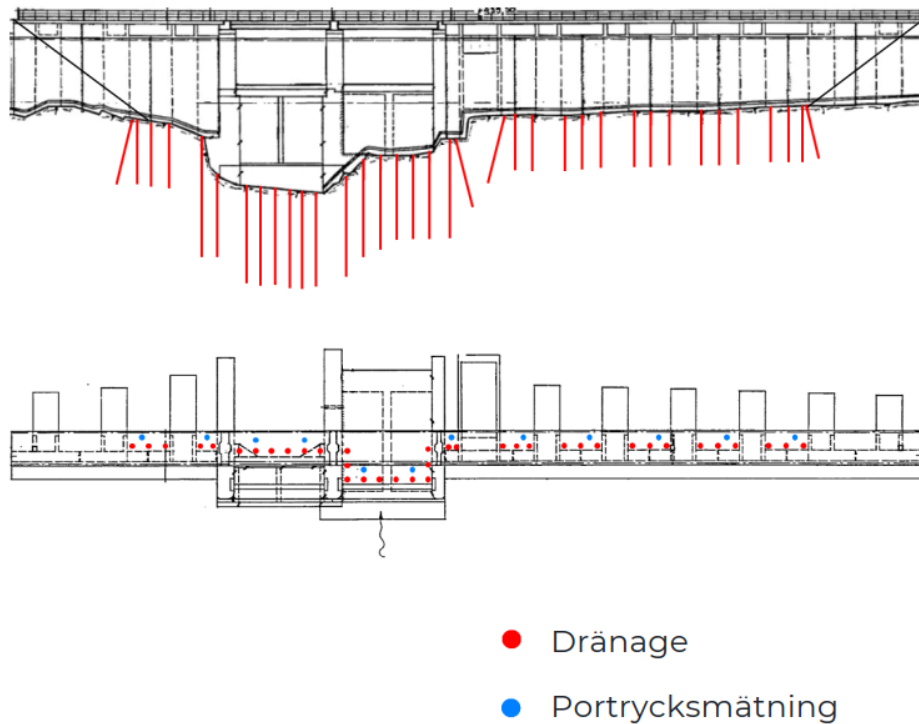
$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0.$$

Resultaten av modellerna visar att det sambandet mellan porttryck och permeabiliteten (k) är begränsat i denna kontext.

4.3 PORTTRYCKSMÄTNING VID SKÅLANDAMMEN

Under 2020 installerades ett nytt system för porttrycksmätning vid Skålandammen, i samband med de geotekniska undersökningar som beskrivs i Avsnitt 0. Systemet omfattar 12 porttrycksgivare av typen Metrometrik (porttrycksspets)/Keller PAA-36XW (givaren), med mätområden på 80–300 kPa (RS485) respektive 80–380 kPa (4–20 mA), samtliga utrustade med digital temperaturgivare.

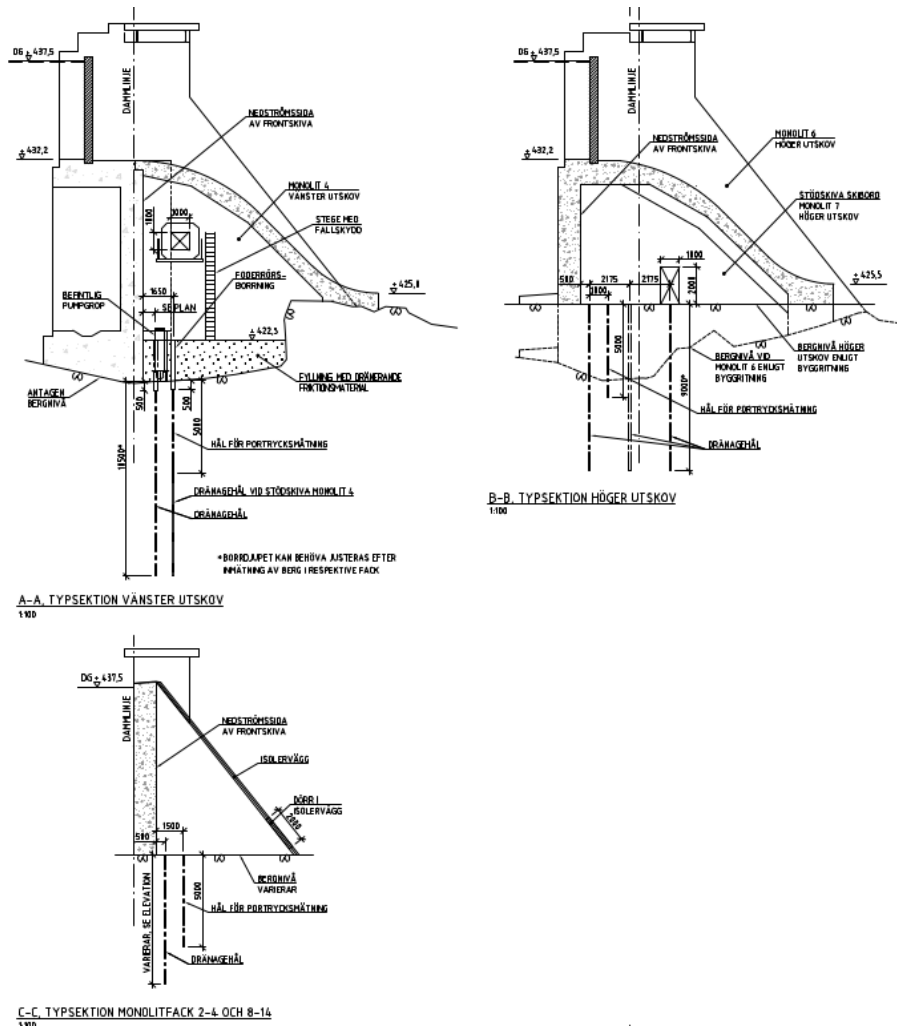
Givarna är installerade i samtliga monolitfack från nr 2 till 14, samt under utskov 1 och 2, se Figur 4-8 för placering. Installationen har utförts med rostfria rör, tätande packers, BAT-spetsar och expanderbetong. Filtersand har fyllts från borrhålets botten upp till installationsnivån för BAT-spetsen, varefter filterspetsen och skarvrör monterats. Packersystemet tätar mellan rör och berg, och kabeldragning har utförts till kopplingsskåp, med vissa kablar fixerade med vajer (Sweco, 2020). Porttrycksmätningen fungerar både som säkerhetsåtgärd och som verifierande kontroll av ridå- och dränfunktion.



Figur 4-8 Installation av porttrycksgivare och dränageborrning på Skålandammen. Källa: Westberg Wilde et al (2024).

Parallellt borrades 40 dränagehål genom betonglamelldammen, nedströms om frontplattan samt under skiborden i läget för utskoven ned genomgående rör, tätsittande packers och svanhalsar för läckageobservation och avlastning av upptryck. Se Figur 4-9 för typsektion av borrning av dränagehål (Sweco, 2020).

Mätdata samlas in via boxloggers av modell ARC-1 Box 3G Keller, som även innehåller barometer för lufttryckskompensation. Loggarna är konfigurerade för automatisk registrering med timintervall, och data sänds trådlöst till Unipers driftcentral. Systemet möjliggör kontinuerlig övervakning av upptryck i berggrunden med hög upplösning över tid, vilket ger förbättrade möjligheter till trendanalys och tidig upptäckt av förändringar.



Figur 4-9 – Typsektion för borrning av dränagehål (Ritning nr 1622-018-0003). Källa: Sweco (2020).

5 Vattenkemiska analyser

Vattenproverna togs på fyra olika platser vid Skålandammen den 30 april 2025. Ett prov togs vid höger anfang i magasinet som referensvatten. De tre övriga proverna togs inne i betongdammen: M02-D01H på vänster sida om utskovet, M10-D02V på höger sida om utskovet samt M07-D02V vid utskov 2. Samtliga prover togs ur dränagerör där det förekom artesiskt vatten, det vill säga att vatten rann ut ur rören. Laboratorieanalyserna utfördes av ALS Scandinavia AB 8 maj 2025 och omfattade metaller, oorganiska ämnen och fysikaliska parametrar. Se Bilaga 4 för fullständig analysrapport.

5.1 RESULTAT

Vattenkvalitet är en viktig indikator vid bedömning av berg- och jordmassors hydrauliska egenskaper samt injekteringsgridans effektivitet. Genom analys av lösta joner, pH-värde, kolsyraöverskott och kvävefraktioner kan uppehållstider och redoxförhållanden i vattenflödet bedömas. Resultaten av analyserna redovisas nedan.

5.1.1 Mängden lösta joner och elektrisk konduktivitet

När vatten passerar genom berg eller jord ökar normalt mängden lösta joner, vilket kan indikera längre uppehållstid. Den totala jonhalten mäts som elektrisk konduktivitet. Vattenproverna visar tydlig skillnad mellan magasinet (2,9 mS/m) och dränagevattnet (9,3–10,1 mS/m), vilket är förväntat då dränagevattnet har interagerat med omgivande material.

5.1.2 Kalk-kolsyrasystem och jämviktsanalys

Mineralutlösning och nedbrytning av organiskt material kan påverka kalk-kolsyrasystemet, vilket ger avvikande pH-värden och kolsyraöverskott. Beräkningar av jämvikts-pH och kolsyraöverskott visar att vatten från utskov 2 (M07-D02V) är nära jämvikt med atmosfären, medan vatten från sidorna om utskovet (M02-D01H och M10-D02V) uppvisar tydligt överskott av kolsyra och lägre uppmätt pH. Överskottet indikerar längre uppehållstid i berg eller jord. Se Tabell 5-1 för uppmätta värden.

Tabell 5-1 Uppmätt pH i dränagevattnet samt beräknat jämvikts-pH och överskott av kolsyra.

Parameter	Enhet	M07-D02V (utskov 2)	M02-D01H (vänster om utskov)	M10-D02V (höger om utskov)
pH (uppmätt)	-	8,5	7,1	7,2
Jämvikts-pH (beräknat)	-	8,7	8,8	8,9
Överskott av kolsyra (beräknat)	mg/l	0,2	10,1	7,5

5.1.3 Järn, mangan och turbiditet

Förhöjda halter av järn och mangan är vanliga vid längre uppehållstider. Proverna från M02-D01H och M10-D02V visar högre halter än M07-D02V. Turbiditeten i samtliga prover är låg (1,05–1,49 FNU), vilket är en indikator på att grumlighet inte har påverkat analysen.

5.1.4 Redoxförhållanden och kvävefraktioner

Syrehalten i grundvatten minskar med ökad uppehållstid, vilket leder till reducerande förhållanden. Fördelningen av kväveformer visar att ammonium dominerar i M02-D01H och M10-D02V, medan

kväveparametrar i M07-D02V ligger under analysens detektionsgräns. Se Tabell 5-2 för fördelning av olika kvävefraktioner.

Tabell 5-2 Fördelning av olika kvävefraktioner i dränagevattenproverna.

Parameter	Enhet	M07-D02V (utskov 2)	M02-D01H (vänster om utskov)
Ammoniumkväve	mg/l	<0,040	0,292
Nitratkväve	mg/l	<0,10	<0,10
Nitritkväve	mg/l	<0,002	<0,002
Andel som ammoniumkväve	%	-	>74

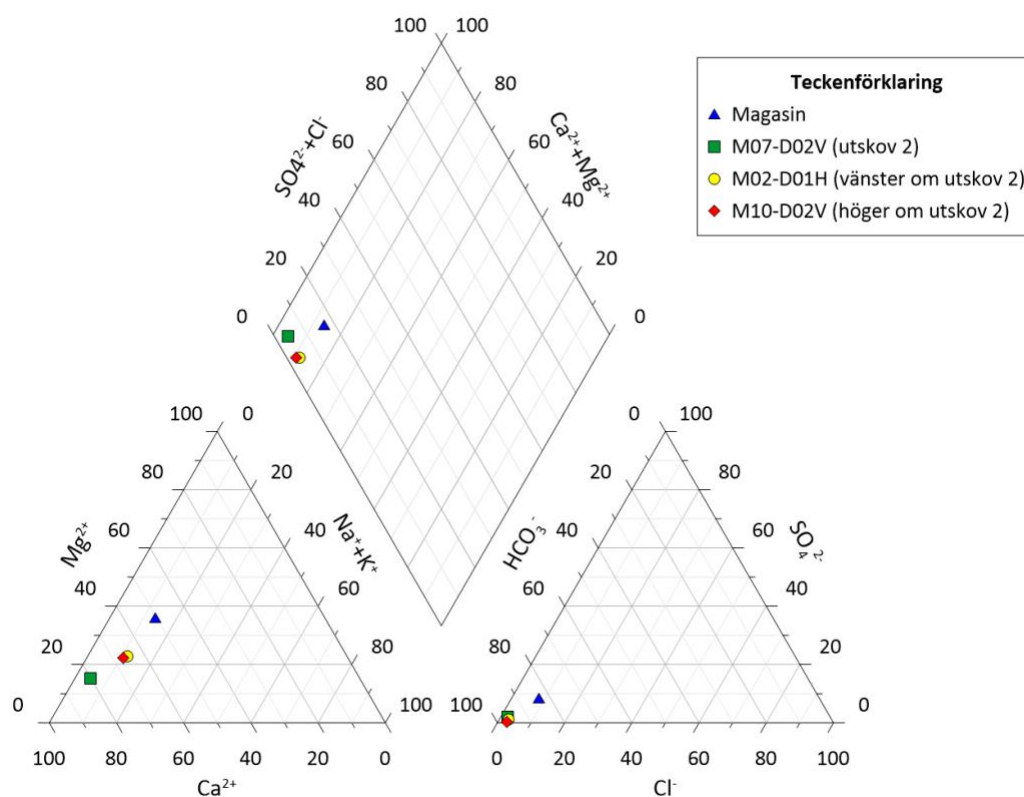
5.1.5 Fördelning av lösta joner

För att jämföra de olika vattenprovernas fördelning av lösta joner kan en Piper-plot användas. Den visar den procentuella fördelningen av de dominerande jonslagen för respektive vattenprov. De jonslag som ingår i Piper-plotten är:

- **Katjoner:** kalcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), natrium (Na^{+}), kalium (K^{+})
- **Anjoner:** klorid (Cl^{-}), sulfat (SO_4^{2-}), vätekarbonat (HCO_3^{-})

Om olika vattenprover placerar sig nära varandra i diagrammet har de en likartad fördelning av de dominerande jonslagen. Det är dock viktigt att notera att halterna ändå kan variera.

Figur 5-1 visar en Piper-plot över de fyra vattenproverna från Skålandammen.



Figur 5-1 Piper-plot över vattenprover från magasin och dränagerör.

Diagrammet visar att vattenproverna generellt har en likartad jonfördelning, vilket framgår av den övre delen av diagrammet. De huvudsakliga jonslagen är vätekarbonat och kalcium (för magasinet även magnesium). Det finns dock vissa skillnader mellan vattenproverna:

- **Vattenproverna till höger och vänster om utskov 2** (M10-D02V respektive M02-D01H) har en mycket lik fördelning av de utvärderade jonslagen.
- **Vattenprovet från utskov 2** (M07-D02V) har en likartad fördelning av anjoner som de övriga vattenproverna från dränagerören, men katjonfördelningen skiljer något.
- **Vattenprovet från magasinet** har vissa skillnader i fördelningen av både anjoner och katjoner jämfört med vattenproverna från dränagerören.

Indikationerna på längre uppehållstider i vattenproverna från M10-D02V och M02-D01H baseras främst på de kemiska egenskaperna: överskott av kolsyra, förhöjda halter av järn och mangan samt tecken på reducerande förhållanden. Dessa parametrar tyder på att vattnet haft längre kontakt med berg eller jord, vilket möjliggör kemiska reaktioner som exempelvis reduktion av metalljoner.

Vattenprovet från M07-D02V har däremot lägre halter av järn och mangan samt ett mindre överskott av kolsyra, vilket tyder på kortare uppehållstid. Den något högre andelen kalcium i detta prov kan bero på snabbare kontakt med kalkhaltiga mineraler, men i detta sammanhang bedöms det inte vara en stark indikator på längre uppehållstid. Sammantaget stödjer de kemiska skillnaderna mellan proverna slutsatsen att dränagevattnet från injekterade delar (M10-D02V och M02-D01H) har längre uppehållstid än från oinjekterade delar (M07-D02V), vilket sannolikt beror på den högre tätheten som injekteringen medför.

6 Analys och utvärdering

6.1 NUMERISKA ANALYSER

Beräkningsresultaten indikerar en begränsad koppling mellan ändringar i portryck och injekteringsridåns egenskaper. Trots att sambandet inte är linjärt, kan skillnader på upp till ungefär 30 % (exempelvis från 100 kPa till 70 kPa) observeras, vilket är praktiskt betydelsefullt. Detta innebär att portrycksmätning inte bör användas som ensam indikator för ridåns funktion, eftersom flera andra faktorer kan påverka portrycket, exempelvis:

- Förändring av vattenstånd uppströms.
- Naturliga sprickor i berget som ger ojämn tryckfördelning.
- Lokala störningar, såsom borrning av spännstag under mätperioden.

Bedömning av metoder:

- Filmning av borrhål kan ge värdefull information om sprickor och spår av injekteringsbruk, men det är svårt att avgöra om vatten kommer in från uppströmssidan enbart genom filmning. Därför bör metoden ses som ett komplement, inte en huvudindikator.
- Flödesmätning i avskilda borrhålssektioner framstår som den mest robusta och praktiskt genomförbara metoden för att bedöma ridåns funktion. Den ger direkt information om vatteninläckage och är enklare att tolka än portrycksmätningar.
- Vattenförlustmätning (VFM) kan ge missvisande resultat om den utförs nedströms ridån, eftersom det är svårt att bedöma hur en ökad genomsläpplighet i injekteringsridån påverkar mätvärdena. Därför bör VFM användas med försiktighet och alltid tolkas tillsammans med övriga data.
- Vattenkemiska analyser är ett viktigt komplement för att indikera förändringar i uppehållstid och redoxförhållanden, men bör inte användas isolerat.

Rekommendation:

Portrycksmätning har fortsatt en viktig roll för kalibrering av modeller och trendanalys, men den mest tillförlitliga metoden för statusbedömning är flödesmätning i avskilda borrhålssektioner, kompletterad med vattenkemiska analyser och, i vissa fall, borrhålsfilmning.

6.2 PORTRYCKSMÄTNING

Portrycksmätning har en viktig funktion i syfte att kontrollera dränagefunktioner för minskning av upplyfttryck. Resultat från portrycksmätning kan också användas för att kalibrera och validera de numeriska modellerna, samt för att bedöma om antaganden om portryck i stabilitetsberäkningar är rimliga. Vissa avvikelser mellan mätdata och modellresultat förekommer ofta och kan förklaras av lokala variationer i bergmassans struktur, sprickbildning eller packernivåer.

6.3 VATTENKEMISKA ANALYSER

Vattenkemiska analyser kan ge värdefull kompletterande information vid statusbedömning av injekteringsridåer. Genom att studera kemiska parametrar i dränagevatten går det att indirekt uppskatta uppehållstider och därmed få en indikation på ridåns täthet. Längre uppehållstid innebär normalt att vattnet har haft mer kontakt med berggrunden, vilket kan kopplas till en tätare injekteringsridå.

Parametrar som överskott av kolsyra, förhöjda halter av järn och mangan samt reducerande förhållanden är typiska indikatorer på lång uppehållstid. Dessa egenskaper kan användas för att jämföra olika delar av dammen och identifiera sektioner där injekteringen eventuellt har försämrats.

För praktisk tillämpning kan vattenkemiska analyser utföras med regelbundna intervall, exempelvis vart femte eller tionde år, för att följa förändringar över tid. Om jonhalter eller redoxparametrar visar en trend mot kortare uppehållstid kan detta tolkas som ett tecken på minskande funktion hos injekteringsridån. På motsvarande sätt kan ökande halter av vissa joner indikera igensättning av dränagehål eller förändringar i bergmassans hydrauliska egenskaper.

Sammanfattningsvis fungerar vattenkemiska analyser som ett indirekt verktyg för att bedöma injekteringsridåns långtidseffektivitet. De bör inte användas isolerat, utan som ett komplement till flödesmätningar och andra metoder, men kan ge en viktig dimension i en helhetsbedömning genom att belysa förändringar i vattenkemi som speglar ridåns funktion över tid.

6.4 SKILLNADER MELLAN MODELL OCH VERKLIGHET

De numeriska modellerna visar tydliga samband mellan injekteringsridåns täthet och vattenflödes hastighet, men endast begränsade samband med porttrycksvariationer. I verkligheten påverkas porttrycket av flera faktorer som inte fullt ut kan fångas i modellerna, exempelvis naturliga sprickor, variationer i bergmassans struktur och förändringar i vattenstånd. Detta innebär att porttrycksmätningar kan ge missvisande indikationer om ridåns funktion om de inte kompletteras med andra metoder.

6.5 BEDÖMNING AV INJEKTERINGSRIDÅNS STATUS

Sammanställningen av mätdata från Skålandammen visar att injekteringsridåns funktion varierar längs dammens sträckning. Vattenflödesmätningar i borrhål indikerar att vissa sektioner har högre genomsläpplighet. Detta kan dock inte entydigt tolkas som en nedbruten injekteringsridå, eftersom höga flöden även kan bero på naturligt genomsläppligt berg nedströms ridån. Därför är det avgörande att resultaten inte analyseras isolerat.

För att avgöra om variationerna beror på försämrad injektering eller naturliga geologiska förhållanden måste resultaten samtolkas med övriga undersökningar, exempelvis:

- Geologiska data från borrhärnekartering och BIPS-filmning, som visar sprickzoner, svaghetsstrukturer och variationer i bergmassan längs dammen.
- Porttrycksmätningar, som kan indikera förändringar i tryckgradienter och ge en kompletterande bild av hydrauliska förhållanden.
- Vattenkemiska analyser, som ger information om uppehållstid och redoxförhållanden i vattenflödet, vilket kan indikera om vattnet har haft längre kontakt med berggrunden.

Indikationer på längre uppehållstid och reducerande förhållanden i dränagevatten från injekterade delar tyder på att injekteringen där är mindre effektiv eller har försämrats över tid. Men även dessa resultat måste vägas mot ursprungliga geologiska variationer, eftersom sprickighet och svaghetszoner kan ge liknande effekter.

En hög genomsläpplighet i ett borrhål är inte i sig ett bevis på nedbruten injekteringsridå. Bedömningen kräver en integrerad analys där flödesmätningar, vattenkemiska data och geologiska observationer kombineras. Endast genom denna helhetsmetodik kan man avgöra om injekteringsridån har tappat funktion eller om variationerna beror på naturliga bergförhållanden.

6.6 OSÄKERHETER OCH BEGRÄNSNINGAR

Modelleringen bygger på antaganden om isotropi och homogenitet i bergmassan, vilket förenklar verkligheten. Vattenkemiska analyser påverkas av provtagningsmetod, turbiditet och detektionsgränsen. Portrycksmätningar kan störas av igensättning, felaktig installation eller lokala effekter. Sammantaget krävs en kombination av metoder för att uppnå en robust bedömning av injekteringsridåns status.

7 Slutsatser

Syftet med denna studie var att utveckla en metod för att utvärdera statusen på injekteringsridåers effektivitet genom att kombinera numeriska analyser, portrycksmätningar, vattenkemiska analyser och flödesmätningar, med Skålandammen som referensprojekt. Resultaten visar att injekteringsridån fortfarande bidrar till att minska upptryck och vattenflöde i berggrunden, men att dess effektivitet varierar längs dammens sträckning.

Vissa sektioner, särskilt i anslutning till sprickzoner, uppvisar indikationer på försämrad täthet och att dränagevattnet har längre uppehållstider i undergrunden. Detta tyder på att injekteringen i dessa delar är mindre effektiv eller har försämrats över tid. Samtidigt måste resultaten tolkas med försiktighet, eftersom variationer även kan bero på naturliga geologiska förhållanden nedströms ridån.

Det är svårt att ange en exakt procentuell reduktion av ridåns effektivitet, eftersom resultaten påverkas av flera faktorer:

- Geologiska variationer längs dammen (sprickzoner, svaghetsstrukturer) som ger olika grundförutsättningar.
- Dränagefunktion som samverkar med ridån och påverkar uppmätt portryck.
- Mätosäkerheter i både portryck och flödesmätningar samt antaganden i modellerna.

De numeriska modellerna indikerar att en försämrad ridå kan ge upp till 30 % högre portryck i vissa scenarier jämfört med en intakt ridå, vilket är praktiskt relevant. Flödesmätningar i borrhål visar lokalt höga inflöden, men dessa kan inte isolerat kopplas till ridån utan måste samtolkas med geologiska data och vattenkemiska analyser.

Ridån har kvar viss täthet, men effektiviteten är heterogen och lägre i sprickrika zoner. Indikationer på längre uppehållstid i vattenkemiska analyser tyder på att injekteringen i vissa delar är mindre effektiv. För att kvantifiera reduktionen mer exakt krävs kompletterande data, exempelvis:

- Referensmätningar av flöde vid nyborrade hål.
- Långtidsserier av portryck och vattenkemi.
- Utökad modellering med spricknätverk och dränageeffekter.

En viktig slutsats är att portrycksmätningar i sig inte är tillräckliga för att bedöma injekteringsridåns status, eftersom de kan påverkas av en rad faktorer. Däremot utgör de ett viktigt stöd för kalibrering av modeller och för att identifiera långsiktiga trender. Flödesmätningar i avskilda borrhålssektioner framstår som den mest robusta metoden, medan vattenkemiska analyser tillför en kompletterande dimension genom att indikera uppehållstider och redoxförhållanden i grundvattenflödet. Kombinationen av dessa metoder ger den mest tillförlitliga helhetsbedömningen.

7.1 REKOMMENDATIONER FÖR PRAKTISK STATUSBEDÖMNING

Resultaten från denna studie med Skålandammen som referensobjekt visar att statusbedömning av injekteringsridåer bör utgå från en kombination av följande metoder:

- **Primär metod: Flödesmätning i avskilda borrhålssektioner.**
Flödesmätning är den mest tillförlitliga metoden för att bedöma injekteringsridåns täthet, dränagehållens funktion och geologiska förhållanden. Mätdata används även för kalibrering

av numeriska modeller. För att tolkningen ska bli korrekt krävs en referensmätning när borrhålet är relativt nyborrat. Se 7.1.1 för tolkning av mätningar.

- **Sekundär metod: Kontinuerlig porttrycksmätning** för övervakning av porttryck över tid. Mätdata kan även användas för kalibrering av indata till numeriska modeller. Se 7.1.2 för tolkningar av mätdata.
- **Kompletterande metod:** vattenkemiska analyser som kan indikera förändringar i ridåns funktion, exempelvis längre uppehållstider i dränagevatten.

Ytterligare undersökningsmetoder kan ge förbättrade underlag för bedömningen, såsom:

1. Filmning av borrhål

Ger möjlighet att visuellt identifiera spår av injekteringsbruk i borrhållsväggarna och att kartera sprickor i berget. Detta kan ge indikationer på ridåns utbredning och eventuella otätheter.

2. Vattenförlustmätningar med trycksättning

Utförs med enkel- eller dubbelmanchetter där berget trycksätts mellan borrhålets botten och manschetten (eller mellan manschetterna) och flödet mäts. Metoden kan ge information om sprickornas genomsläpplighet, men det finns frågetecken kring lämpligheten att utsätta befintliga sprickor för högt externt tryck, då detta kan förändra sprickornas egenskaper.

3. Falling/rising head-tester

Dessa tester ger ett mått på bergmassans permeabilitet runt borrhålet och kan användas som referensvärde för framtida kontroller av dränagehålens och injekteringsridåns funktion.

- När nya dränagehål borras intill befintliga och porttrycket sjunker tillbaka, återgår permeabiliteten till ursprungsvärdet.
- Om porttrycket i omgivande mätpunkter stiger samtidigt som permeabiliteten sjunker, tyder det på att horisontella sprickor håller på att sättas igen, exempelvis genom mineralutfällning.
- Om permeabiliteten i stället ökar över tid är det en indikation på att injekteringsridån har försämrats.

4. Numerisk modellering

Kan användas för att verifiera effekterna av planerade åtgärder och för att analysera hur förändringar i ridåns täthet påverkar hydrauliska förhållanden.

7.1.1 Tolkning av flödesmätningar

1. **Ökat flöde över tid:** Indikerar att injekteringsridån tappat funktion.
2. **Minskat flöde kombinerat med ökat porttryck eller att porttrycket sjunker när nya dränagehål borras:** Tyder på att dränagehålen inte fungerar (till exempel igensättning), snarare än att ridån är skadad.
3. **Porttrycket kvarstår högt efter nyborrning:** Indikerar att injekteringsridån är skadad.
4. **Minskning av flöde vid långtidsmätning (till exempel efter 10 år):** Kan bero på mineralisering som sätter igen horisontella sprickor.

7.1.2 Tolkning av porttrycksmätningar

Vid analys av porttryck bör särskild uppmärksamhet ges åt mönster i givardata:

- Ett artesiskt tryck i en enstaka givare kan indikera en lokal vattenförande spricka.
- Gradvisa ökningar i porttryck kan tyda på igensättning av dränagehål eller försämrad täthet i berget, exempelvis till följd av urlakning av injekteringsridån eller mineralutfällningar.

Långsiktig uppföljning

För att säkerställa en robust bedömning över tid rekommenderas:

- Systematiska referensmätningar av flöde och porttryck minst vart tionde år.
- Noggrann dokumentation av var injekteringsåtgärder har utförts, eftersom variationer i ridåns funktion annars kan misstolkas.

7.2 INTERNATIONELLA RIKTLINJER I JÄMFÖRELSE

Jämförelsen mellan RIDAS, FERC och ICOLD visar att synen på injektering och övervakning varierar betydligt mellan olika länder och organisationer. RIDAS representerar en riskbaserad och dokumentationsfokuserad modell där åtgärder vid avvikelser styrs av dammens klassificering och specifika förhållanden. FERC:s riktlinjer är mer regelstyrda och handlingsinriktade, med krav på omfattande instrumentering och snabb rapportering till myndighet. ICOLD:s rekommendationer är mer flexibla och betonar långsiktig trendanalys snarare än omedelbara åtgärder.

När det gäller injektering är RIDAS restriktiv och ser metoden som en kompletterande säkerhetsåtgärd, medan FERC förespråkar rutinmässig underhållsinjektering i äldre dammar. ICOLD intar en mellanposition och betonar vikten av geologisk analys före injektering, med målet att minska – inte nödvändigtvis eliminera – läckage.

Vattenkemiska analyser har en varierande roll: de är inte ett krav enligt RIDAS, men används i vissa fall. FERC inkluderar dem som en del av övervakningen, medan ICOLD rekommenderar dem som stöd för att förstå vattenursprung och flödesvägar.

Sammanfattningsvis visar jämförelsen att svenska riktlinjer är mer försiktiga och analysdrivna, medan amerikanska riktlinjer är mer operativa och regelstyrda. ICOLD:s internationella perspektiv erbjuder en balanserad syn med fokus på långsiktig förståelse. För svenska dammägare kan en kombination av dessa synsätt ge ett mer robust underlag för beslut om injektering och övervakning, särskilt i komplexa geologiska miljöer.

7.3 FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

Studien har identifierat flera områden där ytterligare forskning och metodutveckling är nödvändig för att förbättra statusbedömningen av injekteringsridåer:

1. Placering av porttrycksmätare

Genom att till exempel installera porttrycksmätare både uppströms och nedströms om injekteringsridån blir det möjligt att få en mer detaljerad bild av tryckgradienter och täthetsförhållanden. Stora skillnader i porttryck kan indikera otätheter eller förändringar i genomsläpplighet, vilket ger bättre underlag för tolkning av injekteringens effektivitet och behovet av kompletterande åtgärder.

2. Utveckling av nya injekteringsmaterial

Traditionella cementbaserade bruk har begränsningar när det gäller långtidshållbarhet och

kemisk resistens. Forskning bör inriktas på alternativa material med högre beständighet, mindre krympning och bättre miljöprestanda.

3. **Långtidsövervakning och dataanalys**

Det finns ett stort behov av systematiska tidsserier för porttryck, flöde och vattenkemi, som möjliggör trendanalyser över flera decennier. Här finns potential för att utveckla digitala övervakningssystem och automatiserad databehandling.

4. **Internationella jämförelser**

Sverige kan dra lärdom av länder med mer strukturerade tillsyns- och underhållsprogram. Ett internationellt samarbete, exempelvis inom ICOLD:s ram, skulle kunna ge en tydligare bild av hur olika länder hanterar injekteringsridåers långtidseffektivitet.

5. **Integrerade modeller**

Framtida studier bör utveckla integrerade modeller där hydrauliska, geokemiska och mekaniska processer kombineras. Detta kan ge en mer realistisk bild av hur ridåns funktion förändras över tid och under varierande belastningsförhållanden.

6. **Annan dammtyp**

Genomföra en motsvarande studie för en massivdamm för att se om tydligare samband mellan porttryck och injekteringsskärmens status kan påvisas.

8 Bilagor

Bilaga 1 – VBB. (1978). *Trångfors kraftverk. Grundundersökning och berginjektering sammanställning*. Ritningsnummer 10074.

Bilaga 2 – Beräkningsbilaga Plaxis 2D beräkningar

Bilaga 3 – Porttrycksdata Skålan 2020-2024

Bilaga 4 – Vattenprover Skålan 2025

9 Referenslista

- Alemo, J., Bergman, R. & Westerberg, B. (1988). *Urlakning av cementinjektering – Fältundersökningar och laboratorieförsök*. Vattenfall Utveckling AB, Rapport U 88:7.
- Bernstone, C., Lagerlund, J., Toromanovic, J. & Juhlin, C. (2021). *Deformationer och porttryck i en experimentell fyllningsdamm – Mätningar under dämningssupptag*. Energiforskrapport 2021:772.
- Björkman, H. (2005). *Stabilitetsberäkningar och åtgärdsförslag vid islast på Skålandammen (Stability Calculations and Proposal Measures Regarding Ice Load for the Skålan Dam)*. M.Sc. Thesis, UPTEC W 05 042, Uppsala University. ISSN 1401-5765.
- Ekström, I., Ljunggren, M. & Nilsson, Å. (2019). *Dimensionerande läckage för fyllningsdamm*. Energiforskrapport 2019:584.
- Energiföretagen. (2020). *RIDAS - Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet. Tillämpningvägledning Kapitel 9. Energiföretagen. Tillämpningvägledning Kapitel 9*. Energiföretagen.
- FERC. (2002). *Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects*. Washington, DC: Federal Energy Regulatory Commission.
- Houlsby, A.C. (1990). *Construction and Design of Cement Grouting*. New York: John Wiley & Sons.
- ICOLD. (1993). *Bulletin 88: Rock Foundation for Dams*. Paris: International Commission on Large Dams.
- Johansson, F., Krounis, A. & Westberg Wilde, M. (2017). *Igensättning av dränage under betongdamm – Orsaker, övervakning och åtgärder*. Energiforskrapport 2017:369, Stockholm: Energiforsk AB.
- Mohlin, B., Sandström, L., Ålenius, A. & Hassanzadeh, M. (2023). *Övervakning av i berg verkande upptryck på betongdamm*. Energiforskrapport 2023:942, Stockholm: Energiforsk AB.
- Nilsson, C.-O. & Johansson, F. (2020). *Mätdatahantering inom Uniper – Larm och varningshantering*. PowerPoint-presentation, Uniper/KTH/AECOM.
- Perman, M. (2011). *Borr- och arbetsmetoder vid instrumentering av fyllningsdamm*. Examensarbete, Luleå tekniska universitet.
- Rosenqvist, M. (2020). *Beständighet hos injekteringsskärmar under svenska dammar*. Energiforskrapport 2020:646, Stockholm: Energiforsk AB.
- Ruggeri, G. (2004). *Uplift pressures under concrete dams: Final report*. ICOLD European Club.
- Sweco (2020) , *Installationsrapport Skålandammen*. Uppdragsnummer 15006090.
- VBB. (1978). *Trångfors kraftverk. Grundundersökning och berginjektering sammanställning*. Ritningsnummer 10074,
- Weaver, K.D. (1991). *Dam Foundation Grouting*. New York: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Weaver, K.D. & Bruce, D.A. (2007). *Dam Foundation Grouting, Revised and Expanded Edition*. Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Westberg Wilde, M., Andersson, P. & Dyberg, J. (2024). *Sprickplan i berg och svårigheterna med det*. Presentation, AFRY/WSP/KTH. Konferensbidrag med exempel från Skålandammen, Trångfors kraftverk.
- WSP (2021). *Skålan – PM 3D-modellering av geologiska strukturer*. Rapport 10285736.
- Zhang, S., Johansson, F. & Stille, H. (2021). *Design of grout curtains*. Energiforskrapport 2021:720, Stockholm: Energiforsk AB.

Zou, L., Billstein, M., Hellström, G. & Selroos, J-O. (2022). *Degradation of grout injection in hydropower dams – coupled hydrogeological-geochemical modeling to predict dam condition and remaining lifetime*. SVC-ansökan.

STATUSBEDÖMNING AV INJEKTERINGSRIDÅER

Injekteringsridåer är en viktig del av dammkonstruktionens tätskikt, med uppgift att begränsa vattenläckage och minska upptryck i berggrunden. Som en del av arbetet med att försäkra dammsäkerheten behövs tillförlitliga metoder för att bedöma injekteringsridåns effektivitet, vilka beskrivs i den här rapporten.

Slutsatsen är att statusbedömning av injekteringsridåer bör baseras på en kombination av metoder. Flödesmätningar i avskilda borrhålssektioner bör utgöra den primära indikatorn, medan porttrycksmätningar och vattenkemiska analyser fungerar som kompletterande verktyg. Rekommenderade åtgärder för statusbedömning av injekteringsridåer inkluderar sektionerade vattenförlustmätningar, filmning av torrlagda borrhål och riktad modellering för att verifiera effekter av planerade insatser. Genom att integrera dessa metoder kan dammägare få en mer tillförlitlig bild av injekteringsridåns status, vilket bidrar till bättre beslutsunderlag för underhåll och eventuella förstärkningsåtgärder.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

