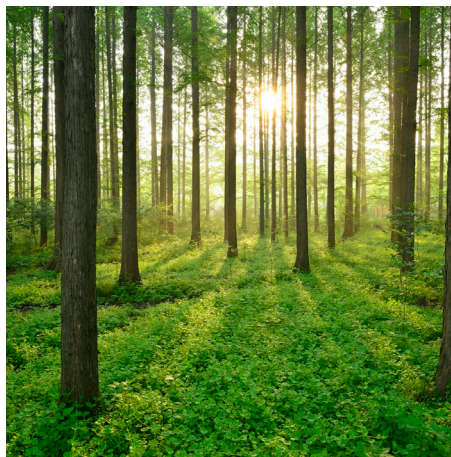


BERGKVALITET I BERGFÅROR

RAPPORT 2025:1080



VATTENKRAFTENS BERGFRÅGOR



Bergkvalitet i älvfåror

En undersökning i samband med två
dammbyggnadsentreprenader

FRANCISCO RÍOS BAYONA

FREDRIK JOHANSSON

ISBN 978-91-89919-80-8 | © Energiforsk januari 2025

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

Förord

Projektet "Bergkvalitet i älvfåror - en undersökning i samband med två dammbyggnadsentreprenader" har jämfört tolkad bergyta vid byggnadstiden med uppmätt bergyta vid två dammanläggningar för att belysa de osäkerheter som kan finnas beroende på kvaliteten hos relationshandlingar och förundersökningar.

Uppdraget har genomförts inom Energiforsks program Vattenkraftens bergfrågor, som fokuserar på att stärka och bredda den forskning som finns om bergtekniska frågor inom vattenkraften i Sverige.

Författare till rapporten är Francisco Ríos Bayona, AECOM AB och Typsa AB, och Fredrik Johansson, Kungliga Tekniska Högskolan. Referensgruppen har bestått av Christian Bernstone, Vattenfall AB, och Magnus Svensson, Fortum AB.

Rapportförfattarna ansvarar för alla resultat och slutsatser i rapporten.

Bilden på framsidan tillhandahölls av Francisco Ríos Bayona.

Sammanfattning

Vid ombyggnation av befintliga kraftstationer och dammar är information om grundläggningen ofta bristfällig. I detta projekt har tolkad bergyta från byggnadstiden jämförts med uppmätt bergyta vid två pågående ombyggnationer. Resultaten visar att tolkad bergyta kan vara förknippad med stora osäkerheter beroende på kvalitet på relationshandlingar och vilken typ av förundersökning som användes. Detta utgör värdefull information för framtida projekt.

Ett problem vid ombyggnation och uppgradering av befintliga kraftstationer och dammar är att information om grundläggningsförhållanden kan vara bristfällig. Detta innebär att bedömningen av grundläggningsförhållandena vid ombyggnation är förknippade med osäkerheter. Syftet med föreliggande projekt är att bidra med erfarenhetsåterföring avseende grundläggningsaspekter utifrån pågående ombyggnation av två befintliga svenska betongdamm. Målet är att jämföra grundläggningsnivån vid två dammanläggningar samt frilagda bergytors strukturer utifrån förundersöknings- och projekteringsresultat med faktiska utfall. För att uppnå projektets syfte karaktäriserades grundläggningsytan efter utrivning med konventionell kartering i kombination med fotogrammetri baserad på bilder tagna med drönare. Resultaten jämfördes sedan med existerande relationshandlingar och resultat från förundersökningar från drifts- och byggnadstiden.

Vid den ena anläggningen visade jämförelsen på en skillnad på 2 till 5 m mellan sjömätning med ekolod och inmätt bergöveryta. Denna skillnad visar att tolkade bergnivåer baserad på sjömätning med ekolod bör användas med försiktighet vid projektering, speciellt nära betongdammen. Bergnivån bör verifieras med annan metod. Vid den andra anläggningen visade jämförelsen på en skillnad i bergnivå inom intervallet $\pm 0,35$ m och mellan $\pm 0,35$ och ± 1 m för ca 30% respektive 50% av de jämförda punkterna. Denna skillnad ligger inom ramen för vad som kan förväntas med tanke på avstånden mellan utförda Jb-sonderingar. Resultatet visar även att metoden med fotogrammetri och bilder tagna med drönare är ett bra verktyg för inmätning av bergnivåer.

Sprickgrupper identifierade med konventionell kartering jämfördes med karterade sprickgrupper utifrån uppbyggda 3D-modeller baserat på fotogrammetri och bilder tagna med drönare. Jämförelsen visade på en god överensstämmelse. Orsaken till observerade avvikelser bedöms i första hand bero på begränsat antal karterade sprickor i kombination med naturlig variation i strykning och stupning för de olika sprickgrupperna.

Sammanfattningsvis visar erfarenheterna av att mäta in bergytan med drönare i detta projekt att tekniken fungerar bra och är relativt enkel att använda. För att möjliggöra att inverkan från större bergklackar i grundläggningsytan ska kunna medräknas vid stabilitetanalys rekommenderas att samtliga bergytor vid ny- och ombyggnation mäts in med drönare vid framtida projekt. Detta kan möjliggöra en optimering av nya betongdamm och kan minska behovet att dammsäkerhetshöjande åtgärder med exempelvis förspända linstag för existerande dammar.

Nyckelord: berggrundläggning, betongdamm, ombyggnad, drönare, kartering

Summary

When existing power stations and dams are rebuilt, information about the rock foundation is often inadequate. In this project, the interpreted rock surface from the construction period has been compared with the actual measured one at two ongoing projects. The results show that interpreted rock surface can be associated with significant uncertainties depending on quality of as-built drawings and type of pre-investigations. This constitutes valuable information for future projects.

A problem when rebuilding and upgrading existing power stations and dams is that information about the rock foundation often is inadequate. This means that the assessment of the rock foundation during reconstruction is associated with significant uncertainties. The aim of the current project was to contribute with experience regarding the rock foundation of existing dams based on ongoing reconstruction of two existing Swedish concrete dams. The aim was to compare both the actual level and geology of the exposed rock surfaces after demolition with the results from preliminary investigations and design phase. To achieve the aim of the project, the exposed rock surface after demolition was characterized with conventional mapping in combination with photogrammetry based on images taken with drone. The results were then compared with existing as-built drawings and results from preliminary investigations from the operating and construction period of the dams.

At the first dam, the comparison showed a difference of 2 to 5 m between surveying using sonar and the actual measured surface. This difference shows that interpreted rock levels based on sea measurement with sonar should be used with caution in design, especially when the sonar is performed near the existing concrete dam. The rock level should be verified by another method. At the second dam, the comparison showed a difference in rock level within the interval ± 0.35 m and between ± 0.35 and ± 1 m for about 30% and 50% of the points compared, respectively. This difference is within the range of what can be expected in terms of the distance between Jb probing performed. The result also shows that the method with photogrammetry and images taken with drones is acceptable for measuring rock levels.

Joint sets identified with conventional mapping were compared with mapped joint sets from the 3D models built based on photogrammetry. The comparison showed a good agreement. The reason for observed deviations is primarily considered to be due to the limited number of mapped joints in combination with natural variation of strike and dip for the different joints.

In summary, the experience from this project of measuring the rock surface with drone shows that the technology works well and is relatively easy to use. To enable accounting for larger asperities on the foundation surface to be included in stability analysis; it is recommended that all rock surfaces for new dams, and when rebuilding existing ones, are measured using drone in future projects. This can enable an optimization of new concrete dams and can reduce the need for dam safety measures with, for example, pre-stressed anchor cables for existing dams.

Keywords: rock foundation, concrete dams, rebuilding, drones, mapping

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	8
1.3	Disposition	8
1.4	Avgränsningar	8
2	Metod för uppföljningsarbeten	9
2.1	Inför uppföljningsarbete	9
2.2	Konventionell kartering i fält och bearbetning av data	10
2.3	Fotogrammetrimodell i 3D och bearbetning av data	10
2.4	Jämförelse	12
3	Dammyggnadsprojekten	13
3.1	Dammanläggning 1	13
3.1.1	Sammanställning av tidigare undersökningar	13
3.2	Dammanläggning 2	17
3.2.1	Sammanställning av tidigare undersökningar	17
4	Resultat	25
4.1	Dammanläggning 1	25
4.1.1	Fältundersökning och kartering av synlig berggrund	25
4.1.2	Fotogrammetrimodell i 3D och digital kartering	26
4.1.3	Jämförelse av bergnivån	28
4.2	Dammanläggning 2	29
4.2.1	Fältundersökning och kartering av synlig berggrund	29
4.2.2	Fotogrammetrimodell i 3D och digital kartering	31
4.2.3	Jämförelse av bergnivån	32
5	Diskussion av resultat	34
5.1	Jämförelse av bergnivå	34
5.2	Jämförelse av karteringsresultat	35
5.3	Användning av drönarteknologi för att mäta bergytan	36
6	Slutsatser och rekommendationer	37
7	Referenser	39

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Sveriges investeringar av vattenkraft i större skala påbörjades i början av 1900-talet, och merparten av de största anläggningarna uppfördes under åren 1950–1970. Därefter har nybyggandet avtagit successivt till förmån för ombyggnationer och uppgraderingar av befintliga kraftstationer och dammar.

En avgörande fråga för dammarnas bärförmåga, stabilitet, täthet och beständighet är dess grundläggning. Dammars grundläggning regleras bland annat i branschgemensamma riktlinjer för dammsäkerhet (RIDAS) [1]. Normalt är de stora svenska kraftverksdammarna av jord och betong grundlagda på berg, och enligt RIDAS bör gränssnittet mellan berg och betong bland annat kontrolleras för att säkerställa att erforderlig säkerhet mot glidning uppnås [2]. Detta innebär att kunskap om grundläggningsytans lutning och råhet i form av större bergklackar är nödvändig för att kunna bedöma glidstabiliteten korrekt. Dessutom rekommenderas att potentiella glidplan i bergmassan identifieras och att deras glidstabiliteten kontrolleras.

Vidare bör det enligt RIDAS kontrolleras att grunden har tillräcklig bärförmåga, vilket innebär att kunskap om bergmassans kvalitet är nödvändig. Variationer i bergmassans kvalitet kan även ge upphov till differentialsättningar, vilka bland annat kan generera spänningskoncentrationerna i dammen. Om stora variationer i berggrundens kvalitet förekommer under större dammkonstruktioner rekommenderar RIDAS att grunden inkluderas i en finit elementmodell. Sammantaget innebär detta att kunskap om berggrundens karakteristiska egenskaper är en förutsättning för att säkerställa en acceptabel dammsäkerhet.

Ett problem vid ombyggnation och uppgradering av befintliga kraftstationer och dammar är att information om grundläggningsförhållandena är bristfällig och ibland helt saknas. Dammyggen från tidigt 1900-tal kännetecknas av entreprenader som genomförts under bitvis svåra förhållanden. Bergrensning för grundläggning av dessa dammar genomfördes utifrån vad förutsättningarna tillät och dokumentationen genomfördes inte alls eller med mycket enkla metoder. Detta har resulterat i att bedömningen av grundläggningsförhållandena vid ombyggnation av befintliga anläggningar är förknippade med osäkerheter.

I dagsläget pågår ombyggnation av två större dammanläggningar i Sverige. Dessa entreprenadarbeten utgör en unik möjlighet att följa upp dokumenterade grundläggningsförhållanden från byggnadstiden mot faktiska observationer vid ombyggnation. Detta möjliggör erfarenhetsåterföring inför framtida likartade arbeten. Entreprenadarbetena innebär också en möjlighet att prova ny teknik för att karaktärisera berggrunden, såsom digitalisering med hjälp av drönare.

1.2 SYFTE

Syftet med föreliggande projekt är att bidra med branschgemensam erfarenhetsåterföring avseende grundläggningsaspekter i älvfåror utifrån pågående ombyggnation av två befintliga svenska betongdammar. Målet är att jämföra hur väl dokumenterad information om grundläggningsförhållanden från byggnadstiden, eller från tolkningar baserade på utförda kompletterande fältundersökningar efter att dammen togs i drift, stämmer överens med observationer från de två pågående projekten.

De parametrar som studeras är bergytans läge och geometri, bergmassans kvalitet, orientering och karakteristiska egenskaper för bergsprickor samt var eventuella svaghetszoner är belägna.

För att karaktärisera grundläggningsytan efter utrivning av uttjänta delar av anläggningarnas betongdammar har konventionell kartering i kombination med mer modern drönarteknik använts. Det utförda arbetet ger därmed även värdefull information för branschen om hur drönarteknik kan kombineras med konventionell kartering för att karaktärisera berggrundläggningen.

1.3 DISPOSITION

Rapporten inleds i kapitel 2 med en kort beskrivning av de två pågående dammbyggnadsprojekten där anläggningarna beskrivs och tidigare undersökningar av grundläggningen sammanställs. Därefter följer i kapitel 3 en beskrivning av den metodik som använts för att uppnå projektets syfte. I kapitel 4 presenteras resultaten följt av en diskussion i kapitel 5. Slutsatserna presenteras i kapitel 6.

1.4 AVGRÄNSNINGAR

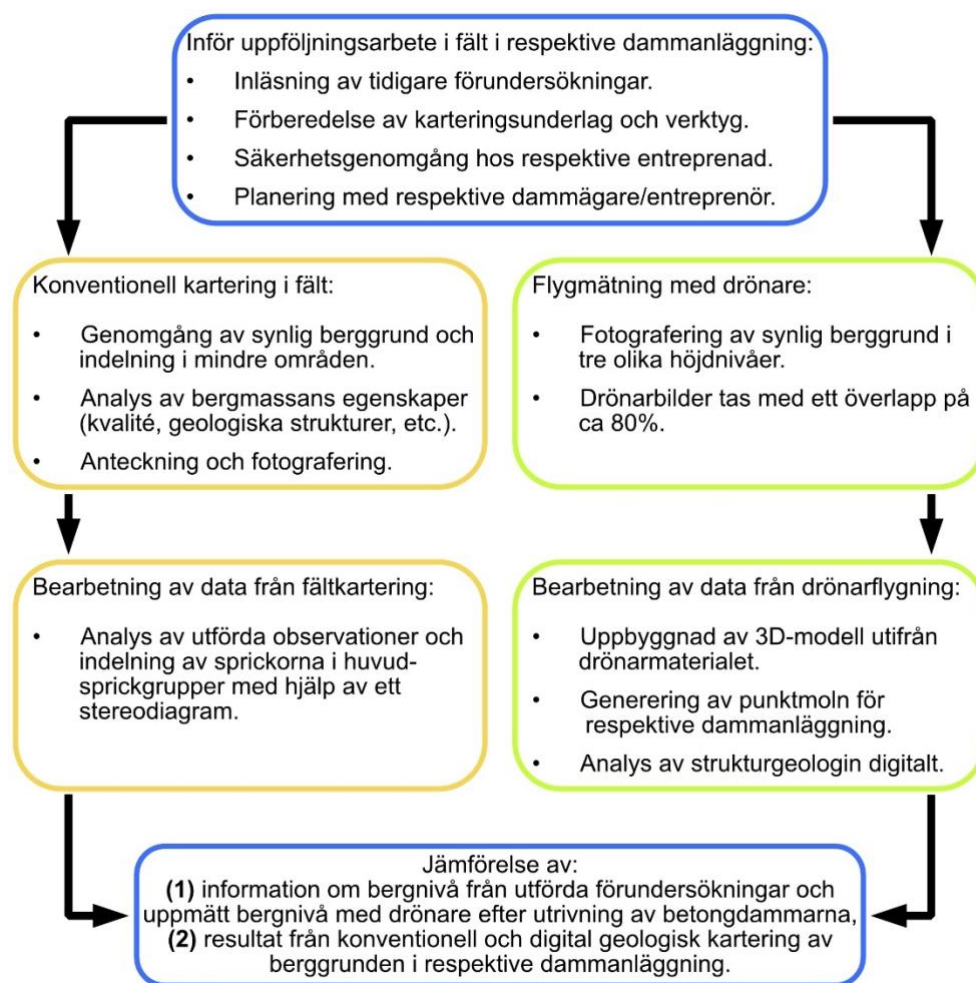
De karakteristiska grundläggningsförhållandena vid en damm är alltid unika. I föreliggande rapport presenteras en jämförelse mellan dokumenterade grundläggningsförhållanden från byggnadstiden mot faktiska observationer vid ombyggnation för två anläggningar. Även om vissa generella slutsatser kan dras från denna jämförelse bör det påpekas att resultaten inte per automatik kan överföras till andra anläggningar. En bedömning av grundläggningsförhållanden måste alltid utföras från fall till fall baserat på tillgänglig information.

2 Metod för uppföljningsarbeten

För att uppnå syftet med detta projekt har uppföljningsarbeten av den frilagda grundläggningytan efter utrivning av respektive dammanläggning utförts genom en kombination av konventionell kartering/observationer i fält och en digitalisering av berggrunden med bilder tagna med drönare. Ett översiktligt flödeschema för uppföljningsarbetena i respektive dammanläggning redovisas i Figur 1.

2.1 INFÖR UPPFÖLJNINGARBETE

Inför fältarbeten och kartering i fält vid respektive dammanläggning gjordes en inläsning av tidigare genomförda förundersökningar vilka redovisas i avsnitt 3. Därefter planerades platsbesök vid respektive damm i samarbete med både dammägare och entreprenör och säkerhetsgenomgång genomfördes.



Figur 1 Flödesschema med metod för uppföljningsarbeten i respektive dammanläggning.

2.2 KONVENTIONELL KARTERING I FÄLT OCH BEARBETNING AV DATA

Konventionell kartering av synlig berggrund utfördes i samband med platsbesök vid respektive dammanläggning. Syftet med karteringen var att göra en bedömning av bergmassans kvalitet, dominerande sprickgrupper och sprickornas egenskaper. Bergartens beskaffenhet och tryckhållfastheten för det intakta berget bedömdes okulärt. Bergmassans hållfasthet bedömdes med hjälp av systemet GSI [3]. Orientering och stupning av synliga strukturer i berggrunden uppmättes med kompass med inklinometer. Uthållighet, sprickavstånd, sprickvidd och sprickfyllnad av de karterade sprickorna bedömdes okulärt.

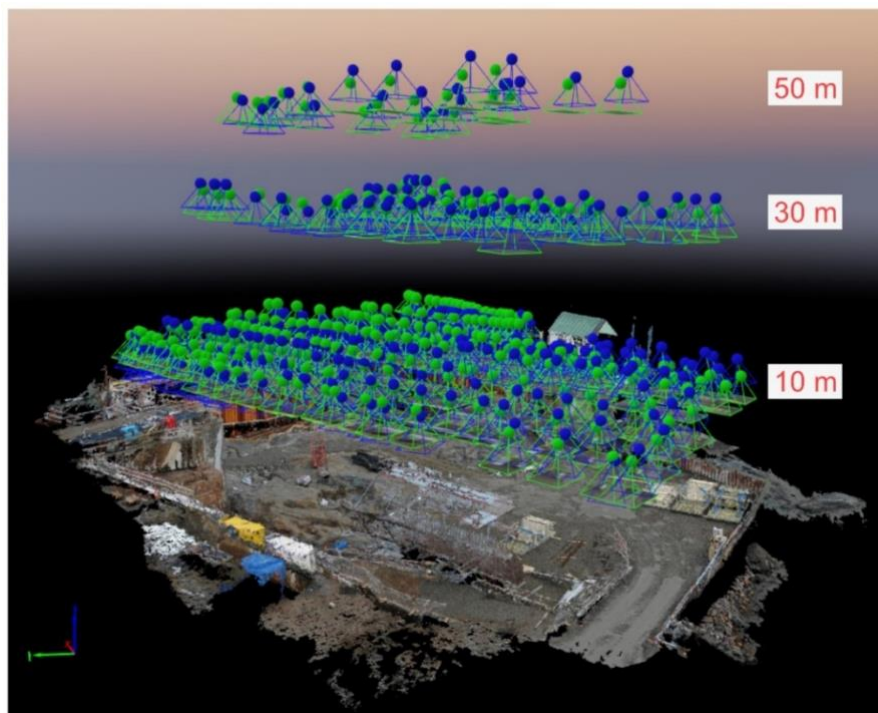
De observerade parametrarna för varje karteringstillfälle vid respektive dammanläggning noterades i ett karteringsprotokoll. Representativa bilder togs för tillhörande fotobilaga. Analys av utförda observationer från konventionell kartering och indelning i olika sprickgrupper baserat på uppmätta värden av strykning och stupning utfördes med hjälp av ett stereodiagram.

2.3 FOTOGRAMMETRIMODELL I 3D OCH BEARBETNING AV DATA

En fotogrammetrimodell i 3D av avtäckt berggrund byggdes upp för respektive dammanläggning utifrån 2D-foton tagna med drönare. De uppbyggda 3D-modellerna användes för att jämföra hur väl information om grundläggningsytan och bergnivåer från utförda förundersökningar stämmer överens med verkligheten i de två pågående ombyggnationerna. Strukturgeologin i de studerade områdena har även analyserats digitalt med hjälp av de genererade punktmolnen i 3D för respektive dammanläggning. Resultaten från de två använda metoderna för att analysera de geologiska strukturerna i respektive berggrund utvärderades och jämfördes. Denna jämförelse ger därmed värdefull information för branschen om hur drönarteknik kan kombineras med konventionell kartering för att karaktärisera dammars grundläggningsytor – utöver projektets huvudsyfte att jämföra bergnivåer under dammen baserat på förundersökningsresultat med faktiskt utfall under ombyggnationen.

I båda dammanläggningarna användes en drönare av typ DJI Mavic 2 för att fotografera respektive berggrund. Denna drönare har en traditionell GPS-mottagare som normalt ger en position med en noggrannhet på 2–4 m. Drönarflygningarna utfördes i samarbete med både respektive dammägare och entreprenör. Fotografering med drönare utfördes vid tre olika höjdnivåer för att fånga upp de viktigaste detaljerna. Berggrunden fotograferades vid en höjd på ca 50, 30, och 10 m från markytan, se Figur 2. Överlapp mellan bilderna var ca 80%. Inga kontrollpunkter användes för att georeferera de uppbyggda 3D-modellerna för respektive dammanläggning. Inverkan från kontrollpunkter i georeferering av de uppbyggda 3D-modellerna tas upp i diskussionskapitlet.

För dammanläggning 1 fotograferades den avtäckta berggrunden med 154 bilder med ett överlapp på ca 5 bilder över det fotograferade området. Fotograferingen utfördes under juni 2022. En 3D-modell utifrån tagna 2D-bilder med drönare byggdes upp med programvaran ContextCapture [4]. Det använda koordinat-systemet för plan- och höjdkoordinater för att bygga upp 3D-modellen i denna dammanläggning var SWEREF 99 TM respektive RH00.



Figur 2 Uppbyggt punktmoln i 3D för dammanläggning 2 med positionering av bilder tagna under drönarflygning.

För dammanläggning 2 fotograferades den avtäckta berggrunden med 325 bilder med ett överlapp på ca 5 bilder över det fotograferade området. Fotograferingen utfördes under november 2022. En 3D-modell utifrån tagna 2D-bilder med drönare byggdes upp med programvaran PIX4D mapper [5]. Det använda koordinatsystemet för plan- och höjtkoordinater för att bygga upp 3D-modellen i denna dammanläggning var SWEREF 99 12 00 respektive RH00.

Skillnad mellan antalet tagna bilder i det studerade dammanläggningarna berodde på den totala bergytan som fotograferades i respektive anläggning. De programvarorna som har använts för att bygga upp 3D-modellerna för respektive dammanläggning, alltså ContextCapture [4] och PIX4D mapper [5], är likvärdiga.

Sprickkartering (strykning och stupning) utifrån den uppbyggda 3D-modellen med drönarbilder utfördes dels med hjälp av programvaran CloudCompare [6] och det strukturgeologiska tillägget qFacets, och dels med programvaran Leapfrog [7]. En fördel med att använda information från de uppbyggda 3D-modellerna är att det är möjligt att analysera geologisk information i områden som inte kan nås i vid en vanlig platsundersökning. Dessutom kan de identifierade egenskaperna i 3D-modellen georefereras i globala koordinater (X, Y och Z). Identifiering av geologiska strukturer utifrån punktmolnen har först utförts med programvaran CloudCompare och den automatiserade funktionen i tillägget qFacets. I ett andra steg har identifiering av geologiska strukturer utförts manuellt med programvaran Leapfrog. I Leapfrog har analysen utförts med 3D-ytor genererade utifrån punktmolnen för respektive dammanläggning. En fördel med programvaran Leapfrog är att den gör det möjligt att lätt integrera och visualisera tillgänglig

information från olika skeden i projektet (förundersökningar, fältmätningar, etc.) med syfte att utföra en mer fullständig analys.

2.4 JÄMFÖRELSE

Bergnivån för den frilagda bergytan uppmätt med drönare vid respektive dammanläggning jämfördes med befintliga resultat från förundersökningar såsom Jb-sonderingar, ekolod-mätningar och kärnboringar.

För dammanläggning 1 jämfördes bergnivån i den uppbyggda 3D-modellen baserat på drönarbilder med resultat från ekolod och sjömätningar både uppströms och nedströms dammen. Resultat från dessa undersökningar redovisas i avsnitt 3.1.1. Denna jämförelse mellan uppmätta bergnivåer i ekolod- och sjömätningar och bergnivåer i 3D-modellen baserad på drönarbilder utfördes visuellt. Detta på grund av att ingen 3D-modell med prognosticerad bergyta baserat på resultat från förundersökningar byggdes upp innan ombyggnation av dammanläggning 1.

För dammanläggning 2 jämfördes bergnivån i den uppbyggda 3D-modellen baserat på drönarbilder med en prognosticerad bergmodell i 3D uppbyggd med resultat från utförda förundersökningar. 3D-modellen med prognosticerad bergyta presenteras i avsnitt 3.2. Jämförelsen mellan de båda 3D-modellerna (förundersökningsmodell vs. drönarmodell) gjordes med hjälp av programvaran 3D Reshaper från Hexagon [8].

Karterade sprickgrupper under platsbesök vid respektive dammanläggning jämfördes med karterade sprickgrupperna utifrån uppbyggda 3D-modeller från drönarmaterial. Jämförelsen gjordes med hjälp av ett stereodiagram.

3 Dammbyggnadsprojekten

3.1 DAMMANLÄGGNING 1

Dammanläggning 1 byggdes mellan 1917 och 1921 i Dalälven. Dammen är 125 m lång och 15 m hög med huvudpartier i stenkädd betong. Enligt SGU [9] domineras berggrunden i det aktuella området av granitiska bergarter som bildades för ca 1850 miljoner år sedan. Berget överlagras oftast av blockig morän och glacial silt. Enligt tidigare beskrivningar består huvudbergarten av en massiv, medel- till grovkornig granit av bra kvalitet. Ställvis förekommer andra bergarter såsom en fin- till medelkornig amfibolit, finkornig diabas med klorit samt kvartsit. Även dessa sekundära bergarter har bedömts vara av bra kvalitet. Diabasgångarna genomskär huvudbergarten. Enligt tidigare utförda observationer genomskärs huvudbergarten i huvudsprickriktning med en strykning i NV-SO riktning med brant stupning.

3.1.1 Sammanställning av tidigare undersökningar

I den utförda litteraturstudien för dammanläggning 1 beskrivs berggrundläggningen under dammen generellt vara av bra kvalitet. Sedan byggtiden har det gjorts en del reparationer kopplade till framför allt betongkonstruktionen i olika delar av dammen. Detta avsnitt redovisar resultat från tidigare utförda undersökningar som har genomförts med syfte att få fram en tydligare bild av bergets egenskaper för bergmassan under dammen. Informationen som presenteras i detta avsnitt kommer från en litteraturstudie i dammägarens arkiv utförd år 2021 samt en teknisk utredning utförd av WSP år 2022 [10], [11], [12], [13].

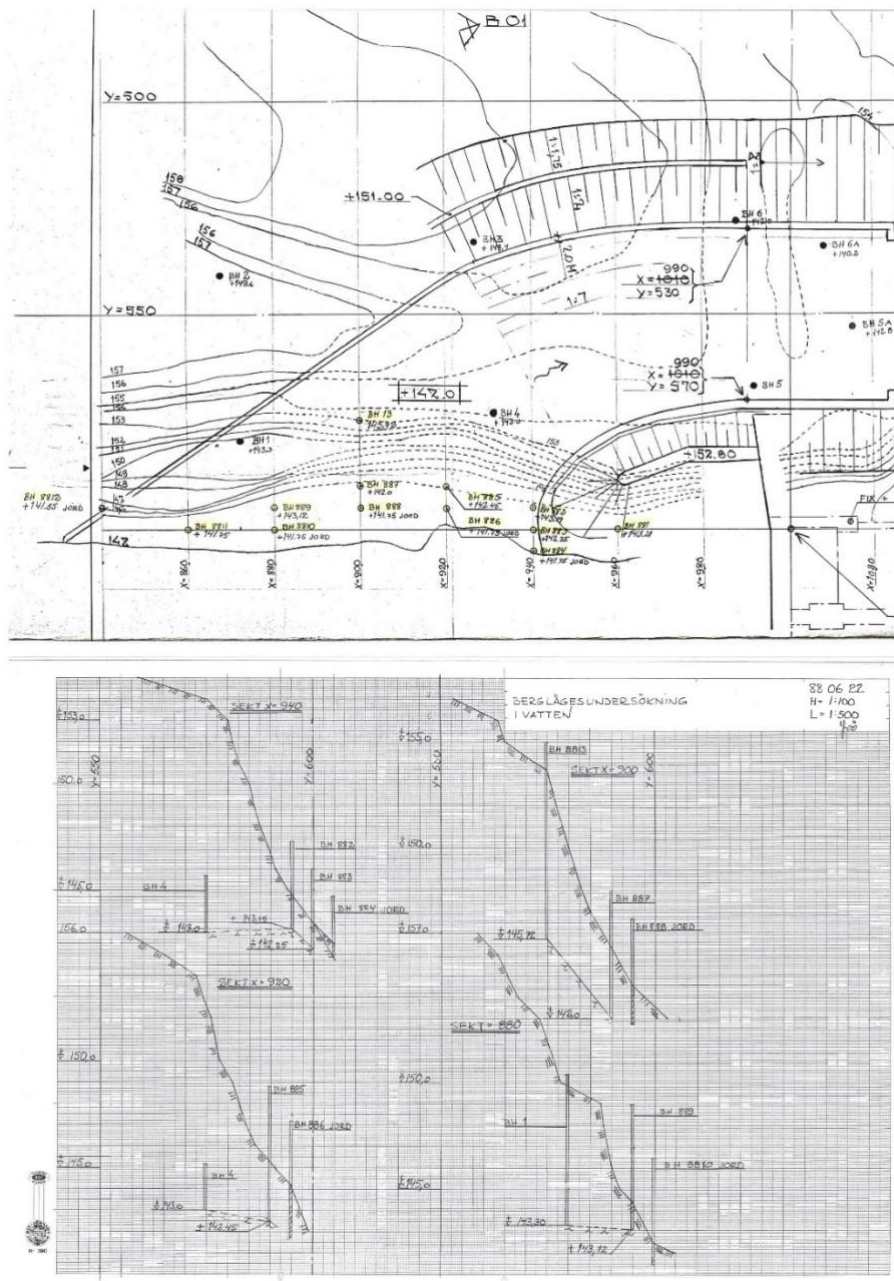
Sonderingar och geofysiska mätningar

Med syfte att öka kunskapen om bergytans läge både uppströms och nedströms dammanläggning 1 har undersökningar av älvbotten utförts med olika sonderingar samt med geofysiska metoder.

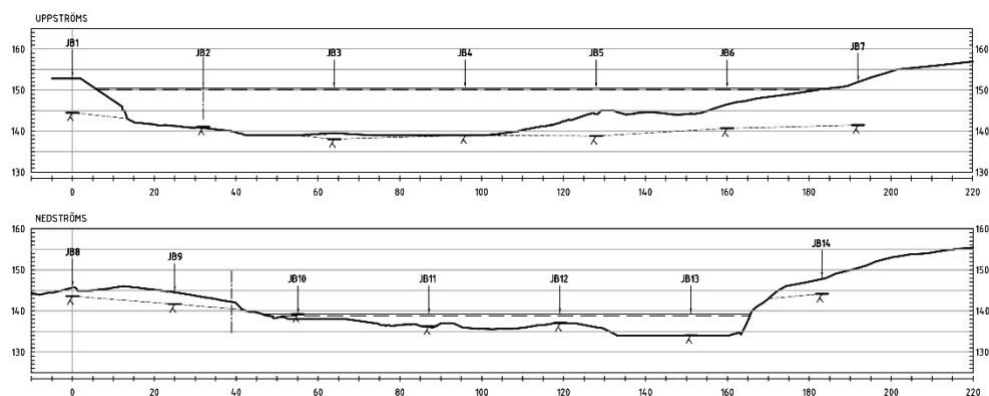
1975 utfördes grundundersökningar vid dammanläggning 1 för att mäta jorddjup och seismiska hastigheter i berget. Mätningar utfördes i 11 profiler med en total längd på 897 m. Beskrivningar av resultat som har kunnat läsas inför denna rapport visade att bergnivån i det studerade området varierade mellan ca +131 och +146 möh. Två krosszoner tolkades utifrån uppmätta våghastigheter varav en bredare (ca 115 m). Bergytans läge undersöktes år 1988 med Jb-sonderingar. Resultaten från dessa undersökningar visade att bergnivåerna i det studerade området varierade mellan ca +143 och +155 möh, se Figur 3.

År 2015 utfördes 15 Jb-sonderingar, varav 7 utfördes uppströms dammen och 8 utfördes nedströms. Sondering nr. 1, 7, 8, 9 och 14 utfördes på land och resten av provningar utfördes på vatten från pråm. Borrningarna utfördes minst 5 m ned i berg. Resultat från tolkad bergyta uppströms respektive nedströms dammen redovisas i Figur 4 [10]. Bergnivån på uppströms och nedströms sida varierar mellan +145 och +138 möh respektive +143 och +134 möh. Dessa bergnivåer har även bekräftats med resultat från utförd ekolodning och sjömätning mellan år 2015 och 2019 [12]. Analys av utförd inmätning av sjöbotten nedströms dammen visade en

mängd av troliga erosionsskador på berget och betongen i området nedanför utskovsluckorna. Dessa erosionsskador har även observerats i en dykundersökning som utfördes år 2016 och vid ett platsbesök år 2021 efter torrläggning, se Figur 5 [12] [11].



Figur 3 Tolkade bergnivåer utifrån utförda Jb-sonderingar år 1988.



Figur 4 Tolkade bergnivåer utifrån utförda Jb-sonderingar år 2015 [10].



Figur 5 Observerade erosionsskador i området nedanför utskovsluckorna vid (a) utförd dykundersökning år 2016 [12] och (b) utfört platsbesök år 2021 efter torrläggning [11].

Borrning och kärnkartering

Med syfte att undersöka berggrundens beskaffenhet samt sprickegenskaper i dammanläggning 1 utfördes 5 kärnborrhål år 2022 [13]. Borrningsriktning, stupning samt längd av de utförda kärnborrhålen redovisas i Tabell 1. Borrkärnorna borrades med en lutning på ca 5–10 grader och med en längd på ca 12 m. Håldiameter för samtliga borrkärnor var 56 mm. Berget i de karterade borrkärnorna, vilka överensstämmer med data från SGU, består huvudsakligen av 4 olika bergarter (granit, kvartsit, amfibolit och diabas). Granit och kvartsit tillhör de hårdare bergarterna som är av högre kvalitet och uppvisar bättre sprickegenskaper och hållfasthet. Amfibolit och diabas som är mörkare och mjukare bergarter uppvisar sämre sprickegenskaper och hållfasthet [13].

Tabell 1 Borrningsriktning, stupning och borrlängd [13].

Hål ID	Riktning (grader)	Stupning (grader)	Längd (m)
1	5	5–10	12,45
2	50	5–10	12,36
3	50	5–10	12,24
4	360	5–10	12
5	230	5–10	12,39

Utförda observationer från borrkärnor i kärnborrhål nr. 4 och 5 visar att bergmassan var kraftigare uppsprucken och sprickorna har en större sprickvidd i jämförelse med borrkärnor från kärnborrhål nr. 1-3. En lerfylld spricka med en öppning på ca 3 cm observerades i borrkärnan från kärnborrhål nr. 4, se Figur 6. Denna lerfyllda spricka kunde inte observeras i någon av de andra utförda kärnborrhålen. De beräknade RQD-värdena under kartering av samtliga borrkärnor varierar generellt mellan ca 70 och 90, med undantag för två sektioner i borrkärnorna från kärnborrhål nr. 4 och 5 där RQD-värdet var ca 50 respektive 60. Ett lägre RQD-värde indikerar en högre uppsprickningsgrad hos bergmassan. Dessa två sektioner med lägre RQD-värde i borrkärnorna från kärnborrhål nr. 4 och 5 hade en sprickfrekvens på ca 20 sprickor per meter. Sprickfrekvensen i de andra karterade sektionerna i samtliga borrkärnor varierade mellan 2–10 sprickor per meter. Bergmassan i de utförda borrkärnorna karaktäriserades med systemet GSI [3]. Det beräknade GSI-värdet under kärnkartering varierade mellan 60 och 90, vilket motsvarar en bergmassa med medel- till mycket bra kvalitet. Den dominerande sprickgruppen stryker i NV-SO riktning och stupar brant (70–90 grader). Två underordnade sprickgrupper i (1) NS riktning med brant stupning respektive (2) NV-SO riktning med flack stupning förekommer i de karterade borrkärnorna.



Figur 6 Lerfylld spricka observerad i borrkärna från kärnborrhål nr. 4 (markerat i rött) [13].

Vattenförlustmätningar och injektering

Vattenförlustmätningar utfördes år 2022 efter uppstart av entreprenadens första etapp för att karakterisera bergmassans genomsläpplighet och injekterbarhet. Vattenförlustmätningar utfördes i samtliga kärnborrhål (nr. 1–5, se Tabell 1) med både enkelmanschett för att mäta bergets genomsläpplighet i hela borrhålet samt med dubbelmanschett och 2 m intervall för att fånga upp genomsläppligheten i olika nivåer. Resultaten visade på en relativt hög genomsläpplighet i berget med vattenförluster mellan ca 8 och 15 Lugeon. Analys av utförda mätningar med dubbelmanschett tyder på att dessa höga vattenförluster möjligen beror på kontinuerliga öppna sprickor. Vattenförluster var högre i kärnborrhål nr. 4 och 5 som också enligt utförd geologisk kärnkartering hade en relativt sämre bergkvalitet och högre sprickfrekvens. Enligt rapporten [13] utfördes en omfattande ridåinjektering i flera omgångar med goda resultat.

3.2 DAMMANLÄGGNING 2

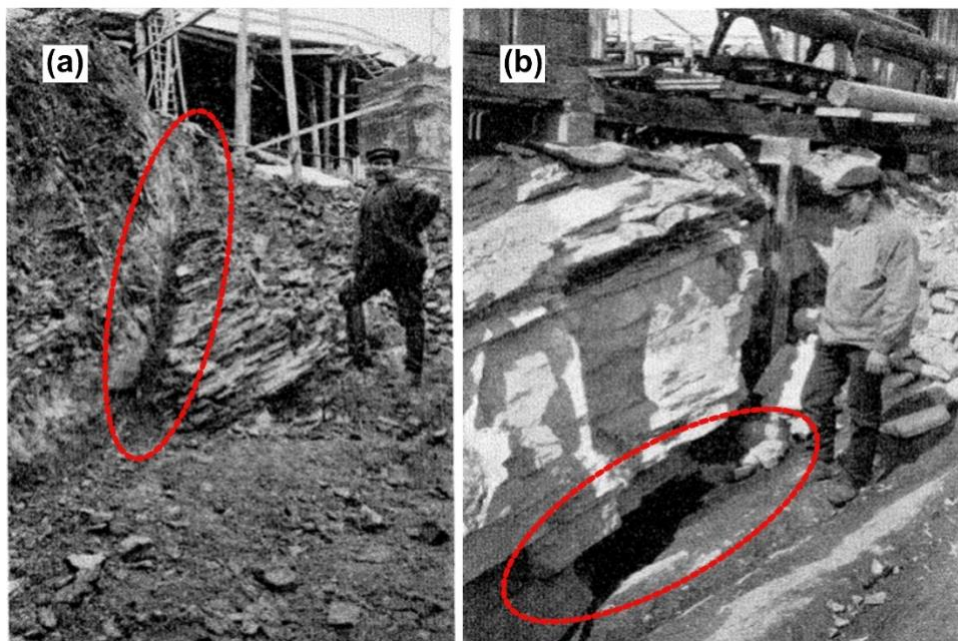
Dammanläggning 2 byggdes mellan 1918 och 1926 i Göta älv. Dammen är 195 m lång och 12,5 m hög. Göta älv följer en äldre förkastningszon som bildades för ca 1600 miljoner år sedan och som sträcker sig i ca N-S riktning från Göteborgstrakten upp mot Väneren [14]. Enligt tidigare rapporter består berggrunden under dammen av glimmerrik gnejs med en tydlig foliation som stupar mot sydväst med mindre inslag av granit och pegmatit. Den dominerande sprickgruppen bedöms följa gnejsens foliation. Utförda observationer visar att berget är uppsprucket längs glimmerband som bildar svaghetszoner i bergmassan. Berget är även genomskuret av ett antal kraftigare sprickzoner som är vattenförande, där vissa är ler- eller sandfyllda. Bergets kvalitet har bedömts variera från bra till zoner med uppkrossad bergmassa med öppna och vattenförande slag. Under byggskedet observerades två större slag. Ett vertikalt lerslag upptäcktes vid sprängningen för sugrören samt ett flackare slag sub-parallellt med foliationsstrukturer som löper under hela dammanläggningen och var kraftigt vattenförande, se bilder från 1921 i Figur 7 [14], [15].

3.2.1 Sammanställning av tidigare undersökningar

Ett flertal osäkerheter kring bergmassans mekaniska och hydrogeologiska egenskaper under dammen har funnits sedan byggtiden [16]. Detta avsnitt redovisar resultat från tidigare undersökningar som har genomförts med syfte att få fram en tydligare bild av bergmassans egenskaper under dammens. Information som presenteras i detta avsnitt kommer från ett examensarbete från Chalmers Tekniska Högskola [14] utförd år 2006 samt en teknisk rapport från Vattenfall utförd år 2016 [16].

Sonderingar och geofysiska mätningar

Med syfte att öka kunskapen om bergytans läge i det aktuella området för dammanläggning 2 har undersökningar av älvbotten utförts med både sonderingsborrning och geofysiska metoder.



Figur 7 (a) Vertikalt lerslag observerat vid sprängningen för sugrören; (b) ett flackare öppet slag sub-parallellt foliationsstrukturer som löper under hela dammanläggningen [15].

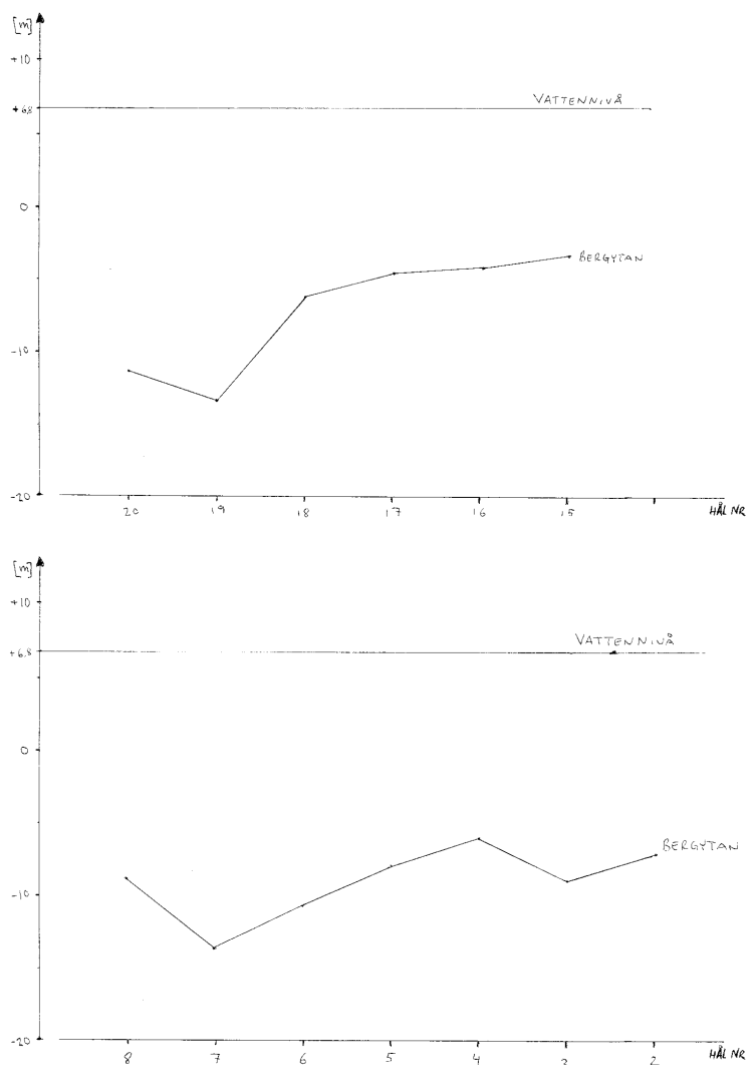
År 1983 utfördes 8 Jb-sonderingar vid en sluss som ligger väster om dammen. Resultaten från utförda sonderingar visade att det fanns ca 1,5–3 m fyllning med grus och sand. Under fyllningen observerades ca 2–5 m av grovblockig grå morän. Under moränen tolkades ca 2–4 m material som bedömdes bestå av lerig siltig morän [14]. Bergnivån i området där dessa sonderingar utfördes tolkades variera mellan ca -3 och -10 möh.

År 1997 utfördes 20 nya Jb-sonderingar i två profiler i samma anläggningsdel där resultaten visade på att bergytans lutning varierade kraftigt i vissa områden. Tolkad bergyta längs de två profilerna väster respektive öster om slussdelen i dammanläggning 2 redovisas i Figur 8. Enligt kommentarer från sonderingsprotokoll avbröts både hål nr. 7 och 19 vid djupet ca 20,5 m innan fast berg kunde tolkas, vilket redovisas som en "sänka" i Figur 8. Bedömningen gjordes att utförda observationer kunde tyda på förekomsten av ett vertikalt slag med mycket uppsprucket berg som skär berggrunden [14]. Bergnivån i dessa sonderingar tolkades variera mellan ca -5 och -15 möh i den västra profilen respektive -9 och -15 möh i den östra profilen.

För att bättre studera bergytans läge både uppströms och nedströms dammanläggning 2 utfördes 16 Jb-sonderingar år 2018, varav 11 sonderingar utfördes uppströms dammen och 5 sonderingar utfördes nedströms. En planvy över dammanläggning 2 med ungefärlig placering av utförda Jb-sonderingar redovisas i Figur 9 [17]. Den tolkade bergytan utifrån Jb-sonderingarna nr. 1-3 varierade mellan ca -4 och -5,5 möh. I Jb-sonderingarna nr. 4, 5 och 8 tolkades bergnivån mellan ca +0,5 och -6 möh. I Jb-sonderingarna nr. 6, 9, 10 och 11 tolkades bergnivån mellan ca +1 och -5 möh. På nedströms sida tolkades bergnivån utifrån JB-

sonderingar nr. 12 och 13 mellan ca -2,5 och -3,5 möh. I Jb-sonderingarna nr. 15-16 tolkades bergnivån mellan ca -1,5 och -11 möh.

Bergytans läge har även studerats år 2015 med refraktionsseismik samt ekolodning och sub-bottom profiling. Syfte med mätningarna med ekolod och sub-bottom profiling var att samla information från bergtopografi under sedimentlagren som delvis täcker älvbotten för att kunna användas som underlag till modellering av älvans vattenföring. Resultaten från refraktionsseismiken visade på att uppmätta hastigheter i berg var generellt höga [16].



Figur 8 Tolkad bergytta baserat på utförda sonderingar år 1997 väster om slussdelen (överdel) respektive öster om slussdelen (underdel) [14].

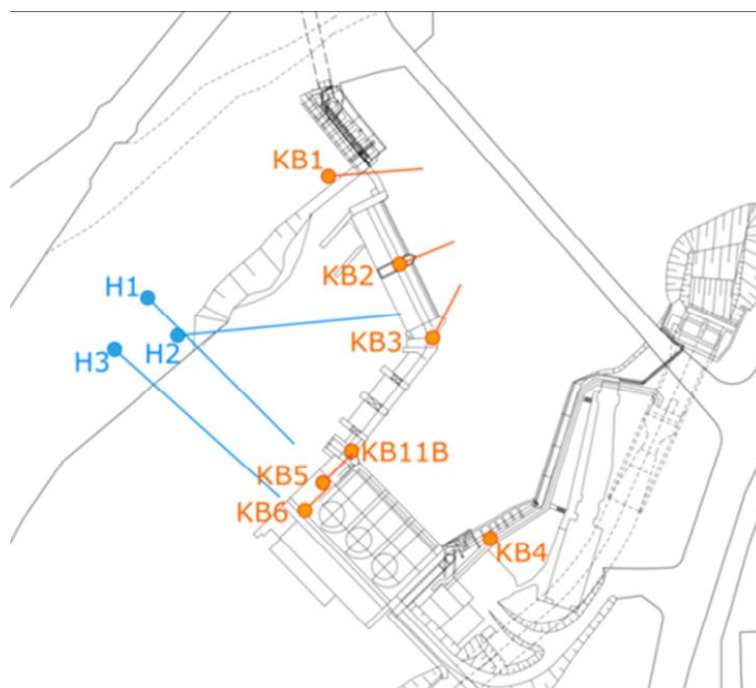


Figur 9 Planvy över dammanläggning 2 med ungefärlig placering av utförda 16 Jb-sonderingar (röda cirklar) uppströms och nedströms dammen.

Borrning och kärnkartering

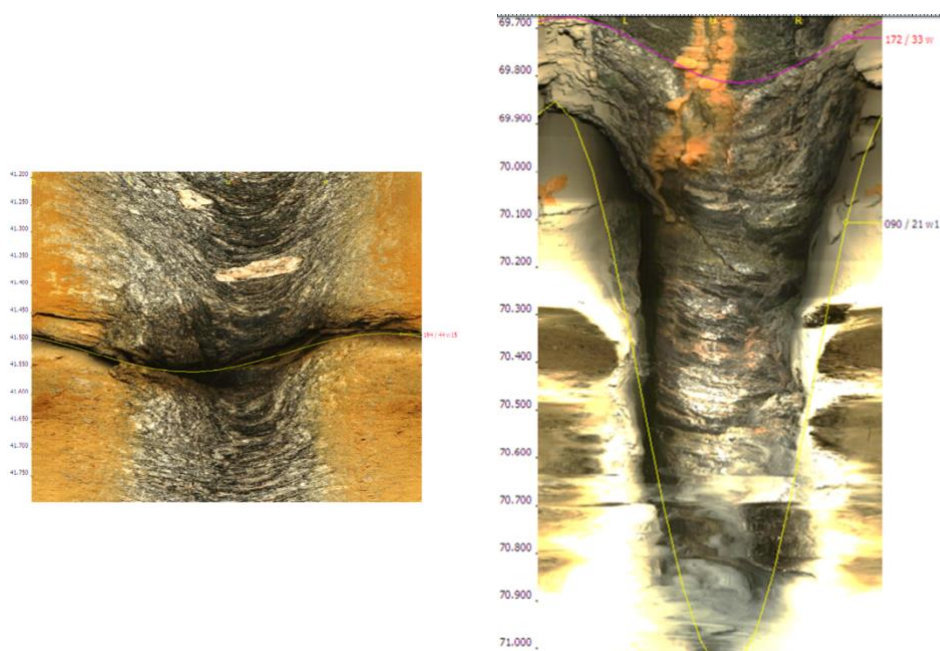
I syfte att undersöka både betongdammens egenskaper och berggrunden i dammanläggning 2 utfördes kärnbörning i totalt 25 hål mellan år 2003 och 2004 [14]. Vissa kärnborrhål utfördes enbart i betongen medan andra borrades djupare i berget. Dessa kärnborrhål var inte orienterade vilket betyder att sprickornas riktning och stupning inte kunde bestämmas. Observationerna baserat på kartering av borkärnorna indikerar att bergmassan i det aktuella området generellt är av bra kvalitet med partier av relativt uppsprucket berg med mindre krosszoner. De observerade krosszonerna förekommer i olika djup och kan vara fyllda med lera, silt och injekteringsbruk. I bergmassan som bedöms vara av bra till medelbra kvalitet varierar RQD-värden mellan 60 och 100. RQD-värden uppskattades till 0–10 i delar av borkärnor där krosszoner förekommer. Den dominerande sprickgruppen stryker parallellt med gnejsens foliation med en stupning som varierar mellan ca 5 och 30 grader. Dessa sprickor är generellt ofyllda och vattenförande.

År 2016 utfördes ytterligare undersökningsborring i totalt 10 hål i dammanläggning 2 [16]. Borrningen utfördes dels med hammarborringsteknik (3 st.) och dels med kärnbörningsteknik (7 st.). Borrhålen filmades med OPTV-teknik. En översiktlig bild över dammanläggning 2 med ungefärlig placering av utförda borrhål



Figur 10 Översiktlig bild över dammanläggning 2 med utförda prover i år 2016 [16].

redovisas i Figur 10. Två av borrhålen utfördes vertikalt (KB4 och KB11B) medan resterande borring utfördes med lutning 15 till 60 grader från horisontalplanet. Hammarborringar och kärnborrhål utfördes med håldiameter 115 mm respektive 76 mm. Hammarborrhål H1 kunde inte slutföras på grund av att borrhålet rasade in. Det observerades en eller flera sprickor fyllda med lera och silt som troligtvis bidrog till borrhålets instabilitet [16]. Hammarborrhål H1 borrades med vinkel 15 grader och efter analys av resultaten från hammarborrhål H2 och H3 gjordes bedömningen att den hamnade sub-parallellt i en markant ler- och siltfylld spricka. Bergnivån i samtliga hammarborringar låg under -7 möh [16]. De mest markanta strukturerna som kunde fångas under filmning av hammarborrhål H2 respektive H3 redovisas i Figur 11. I hammarborrhål H2 påträffades strukturen efter ca 41,5 m borring (ca -10,5 möh). Sprickan stupade ca 44 grader mot sydväst och hade en sprickvidd på ca 2 cm. Det bedömdes att den påträffade sprickan låg för djupt för att kunna ha någon större inverkan på dammens storskaliga stabilitet. I hammarborrhål H3 påträffades två markanta strukturer efter ca 62,5 m respektive 70,3 m borring. Den första strukturen stupade ca 36 grader mot älvbotten, vilket anses kunna förklara det relativt stora vattenflödet som noterades. Det bedömdes att denna struktur med stor sannolikhet hade en bra hydraulisk kommunikation med älvens vatten på nedströmssidan [16]. Den andra strukturen som påträffades vid ca 70,3 m (ca -18,3 möh) stupade ca 21 grader mot väst och var troligen fylld med silt, se Figur 11.



Figur 11 Markanta strukturer som påträffades under borrning av hammarborrhål H2 på ca -10,5 möh (till vänster) respektive H3 på ca -18,3 möh (till höger).

Kärnbrörning av sju hål genomfördes med tekniken Triple-tube NQ3, wire-line. Kärnkartering av kärnborrhål KB1–KB3 utfördes detaljerat då dess syfte var att fånga upp information med avseende på bergets egenskaper under dammanläggning 2 samt för att ge underlag till numeriska analyser. Dessa tre kärnborrhål utfördes med flack vinkel mot horisontalplanet för att bättre observera de övre delarna av berggrunden. För kärnborrhålen KB11B samt KB4–KB6 noterades generellt strukturer sub-parallellt med bergmassans foliation samt enskilda strukturer som bedömdes kunna vara vattenförande och/eller viktiga för bergmassans stabilitet. Enligt utförda observationer noterades i genomsnitt ca 8 sprickor per meter borrhål. Majoriteten av de observerade sprickorna, ca 85 %, var sub-parallella med bergets foliation. RQD-värden i kärnborrhål KB1–KB3 låg generellt under 50 i de första metrarna medan längre ner i kärnborrhålen låg RQD-värdena över 90. Gnejsens foliation samt sub-parallella strukturer hade en varierande stupning mellan 5 och 20 grader. Foliationens strykning varierade mellan ca 090–180/0–030 grader.

Vattenförlustmätningar och injektering

Ett omfattande tätningsarbete utfördes under våren år 1993 med syfte att täta inläckaget i en del av dammen [14]. Totalt borrades 30 borrhål till ett djup av 2,4 m med c/c avstånd 0,8 m. Det borrades 13 vertikala borrhål samt 17 borrhål med en lutning mellan 50 och 80 grader mot horisontalplanet. Vattenförlustmätningar utfördes i de vinklade borrhålen med enkelmanshett. Resultaten visade på en hög genomsläpplighet i 11 av borrhålen med en varierande vattenförlust på mellan ca 9 och 90 Lugeon. Under utförandet av injekteringen observerades samband mellan vissa borrhål och bergssprickor någon meter bort från injekteringsområdet, vilket bedömdes vara kopplat till vattenförande slag som upptäcktes under borrningen.

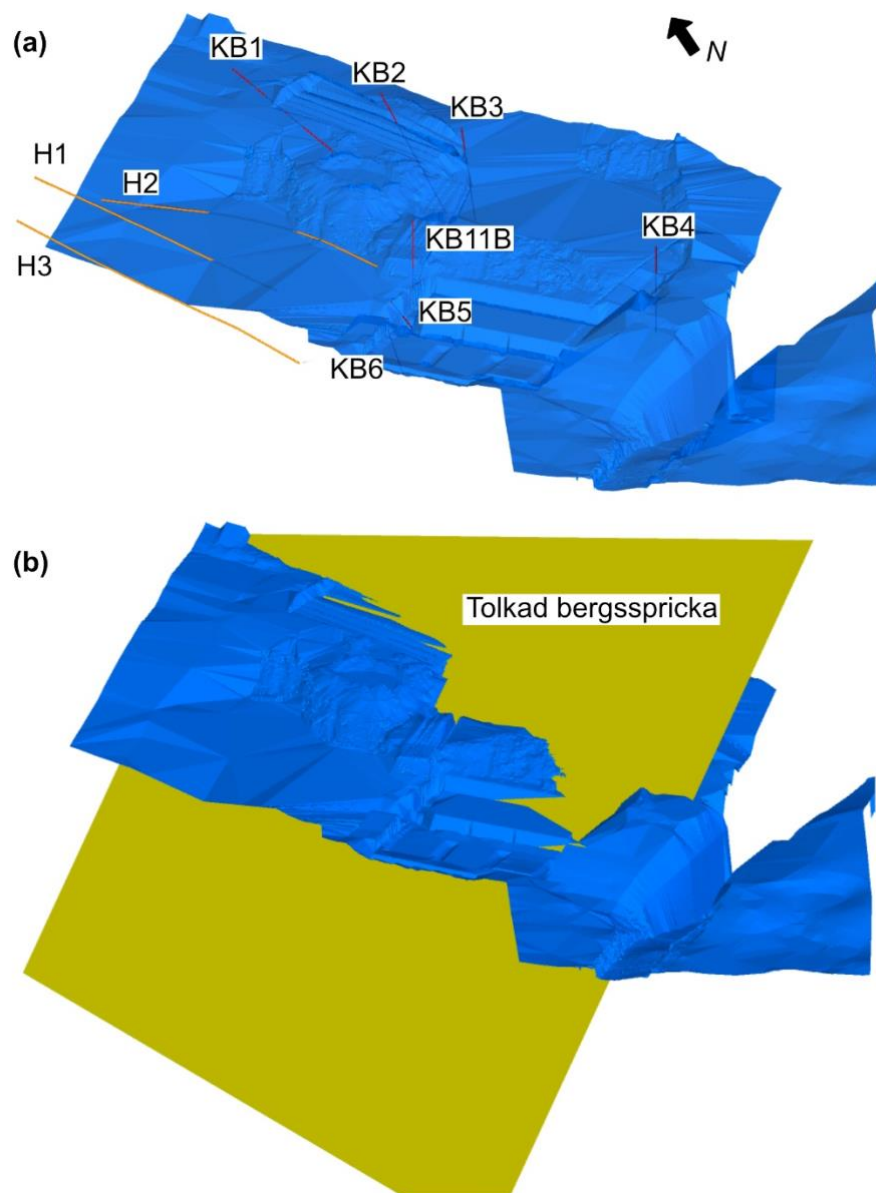
Det tolkades att de vattenförande strukturerna stupade ca 10 grader, dvs., subparallellt med foliationsstrukturer i berget. Injekteringen utfördes sedan i flera omgångar tills erforderligt sluttryck uppmättes. En till två ton cement per borrhål användes.

I samband med ett spontarbete år 2005 utfördes ytterligare injektering med cement i närheten av injekteringsområdet som beskrivs ovan [14]. Vattenförlustmätningar utfördes i 7 borrhål med enkelmanschett som borrhålen ned till ett djup av 4,8 m. Resultaten visade på en relativt hög genomsläpplighet i ca 40% av borrhålen med en vattenförlust på ca 5,5 Lugeon. Berget injekterades därefter i två omgångar. Därefter utfördes vattenförlustmätningar i 2 kontrollhål där det konstaterades att inga vattenförluster kunde uppmätas.

Inför ombyggnation av dammanläggning 2 utfördes vattenförlustmätningar i kärn- och hammarborrhålen under januari och februari år 2016 [16]. En översiktlig bild med utförda kärn- och hammarborrhålen redovisas i Figur 10. Vattenförlustmätningarna utfördes med enkelmanschett i samtliga hål. I kärnborrhålen utfördes mätningar som halv- och helhålsmätning, och i två hål utfördes vattenförlustmätningarna med 3 m intervall. Mätningarna utfördes med manchett placerad 55 m i hålet (mätlängd ca 20 m) och med manchett placerad strax under bergytan (ca 40 m mätlängd). I ett hål utfördes mätningarna med placering av manchett dels i betong och dels i berg för att undersöka genomsläppligheten i gränssnittet mellan betongen och berget. Manschetten placerades generellt i övriga hål i betong, eller precis i underkant av betongen. De erhållna resultaten visade på en relativt högre genomsläpplighet i det yttnära berget (5-8 m) jämfört med det djupa berget. De högsta flöden i utförda mätningar uppgick till 50-85 l/min, vilket ger en vattenförlust på ca 6-30 Lugeon. Den lägsta hydrauliska konduktiviteten i berget uppskattades till 0,6-3 Lugeon beroende på sektionsstorlek. Det har inte utvärderats hur tidigare injektering av berget eventuellt påverkade genomsläppligheten i anslutning till respektive hål.

Tredimensionell bergmodell

En tredimensionell modell med prognosticerat bergytans läge i dammanläggning 2 byggdes upp år 2017 med hjälp av information från utförda förundersökningar. I modellen har information från byggskede såsom planritningar och sektioner används. Bergnivåerna har tolkats utifrån refraktionsseismiken, ekolodning samt äldre och nyare Jb-sonderingar samt borrhningar. En översiktlig bild över den uppbyggda 3D-modellen med prognosticerat bergytans läge i dammanläggning 2 redovisas i Figur 12a. Den mest markanta bergsprickan som observerades under filmning av hammarborrhål H2 och H3 redovisas i 3D i Figur 12b. Det uppskattades att denna struktur hade en stupning på ca 44 grader mot sydväst.



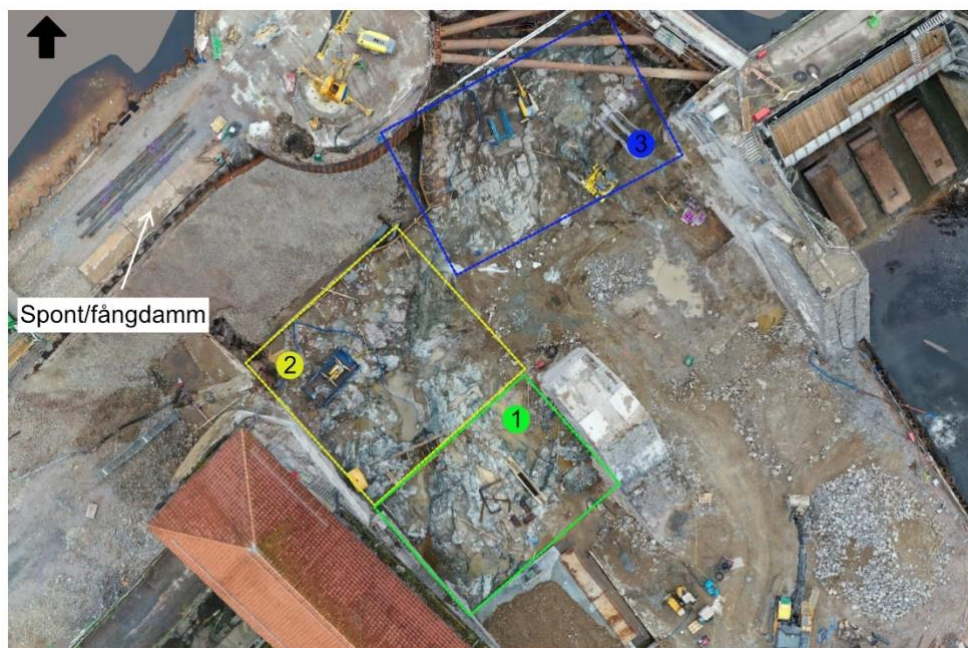
Figur 12 Uppbyggd 3D-modell med prognosticerat bergytans läge utifrån information från utförda förundersökningar i dammanläggning 2 med (a) inlagd position för utförda kärn- och hammarborringar och (b) tolkad ler- och siltfylld bergsspricka observerad i hammarborrhål H1–H3 med stupning ca 44 grader mot sydväst.

4 Resultat

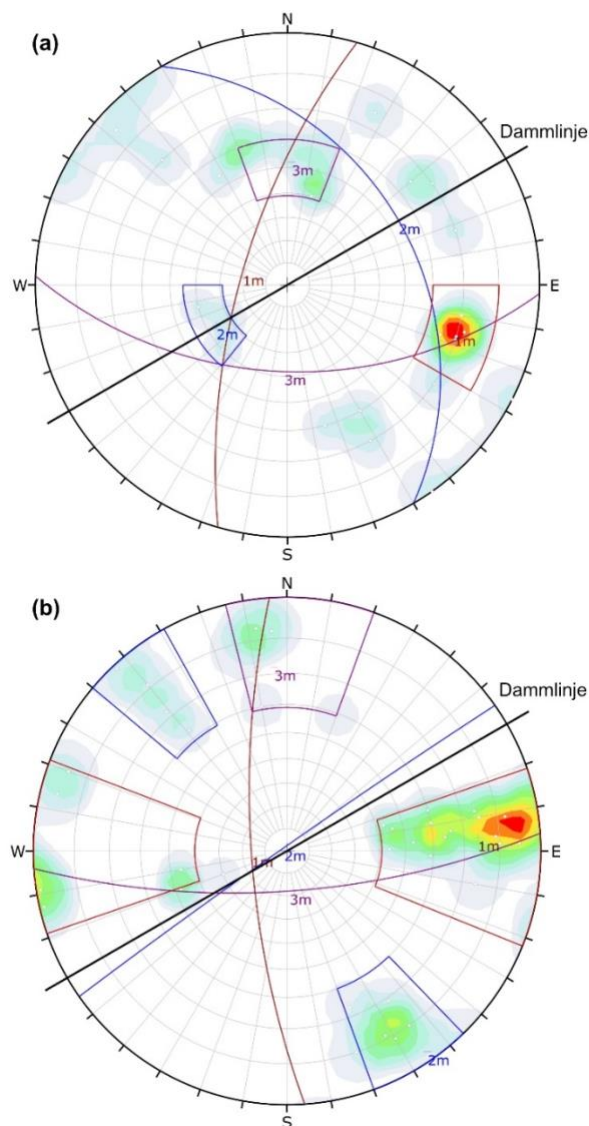
4.1 DAMMANLÄGGNING 1

4.1.1 Fältundersökning och kartering av synlig berggrund

Ett platsbesök i dammanläggning 1 utfördes i augusti 2022 efter utrivning av utskov 1 och 2 samt rensning av en stor del av berggrunden under denna dammdel. En planvy över entreprenaden med tillgängliga områden för kartering under platsbesöket redovisas i Figur 13. Det var svårt att identifiera bergsprickor trots rensat berg. Bergmassan i det aktuella området består huvudsakligen av en massiv, medel- till grovkornig granit. Ställvis förekommer andra bergarter såsom pegmatit, kvartsit, amfibolit och diabas. Totalt uppmättes ca 30 sprickor i områdena med rensat berg. Den dominerande sprickgruppen i de karterade områdena stryker i ca N-S riktning och stupar ca 70–80 grader. Två andra sprickgrupper med medelbrant stupning i (1) O-V riktning (ca 40–60 grader) respektive (2) NV-SO riktning (30–40 grader) förekommer i den synliga berggrunden. Det karterade huvudsprickgrupperna vid utfört platsbesök i dammanläggning 1 redovisas i Figur 14a. Bergmassan var generellt av medel- till bra kvalitet med GSI-värden [3] som varierade mellan 60 och 70.



Figur 13 Planvy över entreprenaden i dammanläggning 1 där markerade områden illustrerar rensat berg vid platsbesöket.



Figur 14 Stereodiagram med karterade huvudsprickgrupper i dammanläggning 1: (a) uppmätta sprickor från fältundersökningar vid platsbesök (30 st); (b) uppmätta sprickor utifrån uppbyggd 3D-modell baserat på drönardata (40 st).

4.1.2 Fotogrammetrimodell i 3D och digital kartering

En fotogrammetrimodell i 3D av avtäckt berggrund efter utrivning av utskov 1 och 2 i dammanläggning 1 skapades utifrån 2D-foton tagna med drönare. Metodiken som användes för att skapa 3D-modellen med hjälp av programvaran ContextCapture [4] redovisas i avsnitt 2.3. Huvudsyftet med fotogrammetrimodellen i 3D var att kunna jämföra verkliga bergnivåer efter utrivning av dammen med information som redovisats i tidigare förundersökningar. Den uppbyggda 3D-modellen användes även för att analysera strukturgeologin med hjälp av programvarorna CloudCompare [6] och Leapfrog [7] (se avsnitt 2.3).



Figur 15 Övergripande bild över den uppbyggda 3D-modellen utifrån drönbilder för dammanläggning 1: (a) med uppmätta bergnivåer från uppbyggd 3D-modell utifrån drönbilder tagna i områden med rensad berggrund; (b) med karterade sprickor tolkade med programvarorna CloudCompare och Leapfrog.

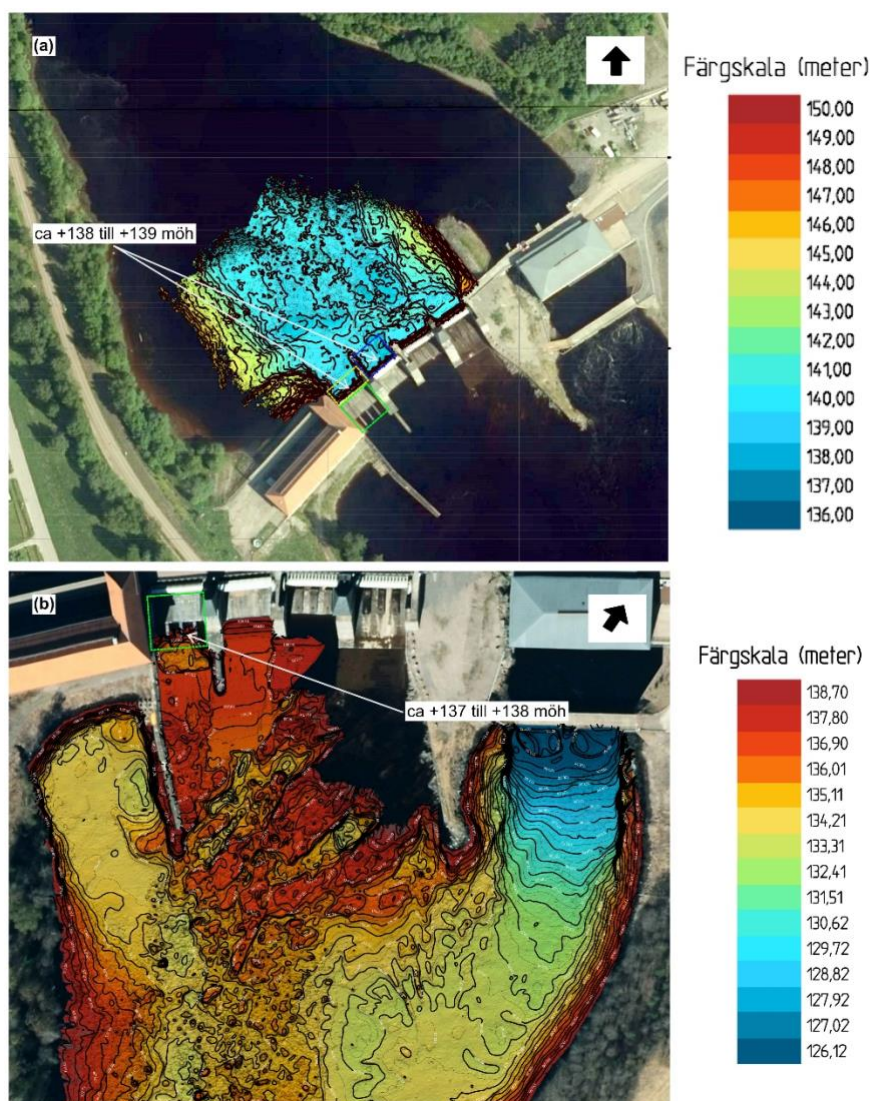
En övergripande bild av den uppbyggda 3D-modellen utifrån drönbilder tagna i dammanläggning 1 med uppmätta bergnivåer i områdena med rensat berg samt karterade sprickor med programvarorna CloudCompare [6] och Leapfrog [7] redovisas i Figur 15a och b. Bergnivåerna i Figur 15a uppmättes från den uppbyggda 3D-modellen utifrån drönbilder. Den generella bergnivån för det synliga berget i det aktuella området varierar mellan ca +132,5 och +136,5 möh. Det bör poängteras att 3D-modellen i dammanläggning 1 byggdes upp utan kontrollpunkter, vilket bedöms kunna ha en inverkan på modellens positionering i det globala koordinatsystemet.

Resultatet från den digitala karteringen av bergsprickor utifrån uppbyggd fotogrammetrimodell i dammanläggning 1 redovisas i Figur 14b. Totalt karterades 40 sprickor utifrån den uppbyggda 3D-modellen och tre huvudsprickgrupper identifierades. En sprickgrupp stryker i ca N-S riktning och har en varierande stupning mellan 50 och 80 grader. Den andra sprickgruppen stryker i ca NO-SV riktning och stupar brant (70 till 90 grader). Den tredje sprickgruppen som har identifierats i 3D-modellen stryker i ca O-V riktning och har en brant stupning (70

till 90 grader). Dessa uppmätta sprickgrupper stämmer någorlunda bra överens med observerade huvudsprickgrupper i fält (se Figur 14a).

4.1.3 Jämförelse av bergnivån

Bergnivån för den frilagda bergytan i dammanläggning 1 som fångades under drönarflygning har jämförts visuellt med resultat från ekolod- och sjömätningar både uppströms och nedströms dammen utförda år 2016 [12]. I jämförelse med andra utförda förundersökningar i dammanläggning 1 (se avsnitt 3.1.1) så gav resultat från ekolod- och sjömätningar en bra bild av bergnivåer i det studerade området. Uppmätta bergnivåer uppströms och nedströms damm 1 under sjömätning med multibeamekolod redovisas i Figur 16. De utförda mätningarna innan ombyggnationen visar att sjöbotten varierar mellan ca +138 och +139 möh uppströms respektive ca +137 och +138 möh nedströms dammen. Dessa uppmätta



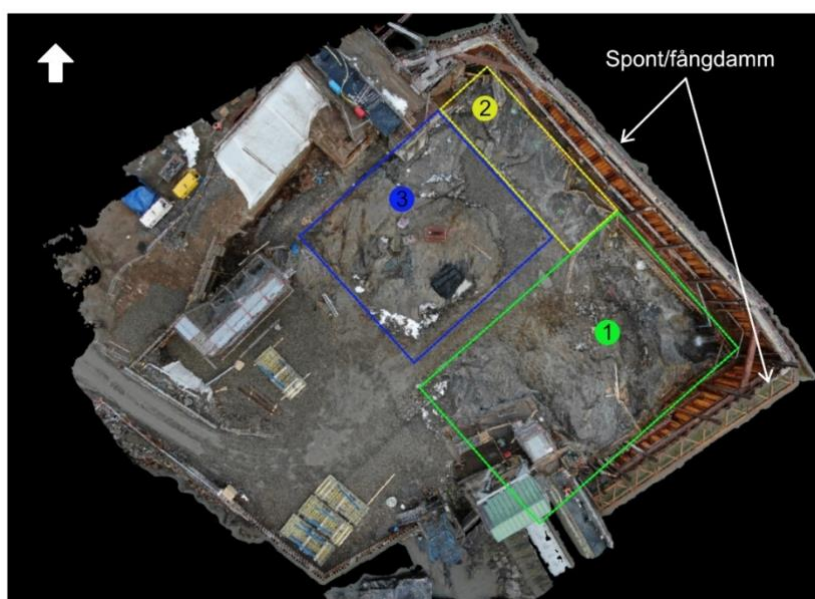
Figur 16 Resultat från utförd sjömätning år 2016 i dammanläggning 1: (a) bergnivåer uppströms dammen; (b) bergnivåer nedströms dammen.

nivåer av sjöbotten i förundersökningarna är något högre (3 till 5 m) än de bergnivåer som har kunnat mätas efter rensning i den uppbyggda 3D-modellen baserat på drönardata illustrerade i Figur 15. Anledningen till diskrepansen mellan observerade nivåer i förundersökningarna och efter rivning kan dels bero på (1) inverkan från bottensediment och/eller lösa block i de utförda sjömätningarna, dels (2) en osäkerhet kopplad till verklig positionering av 3D-modellen i det globala koordinatsystemet på grund av att inga kontrollpunkter togs under flygning. Det bör poängteras att bergnivån under dammen uppmättes inte med de utförda sjömätningarna.

4.2 DAMMANLÄGGNING 2

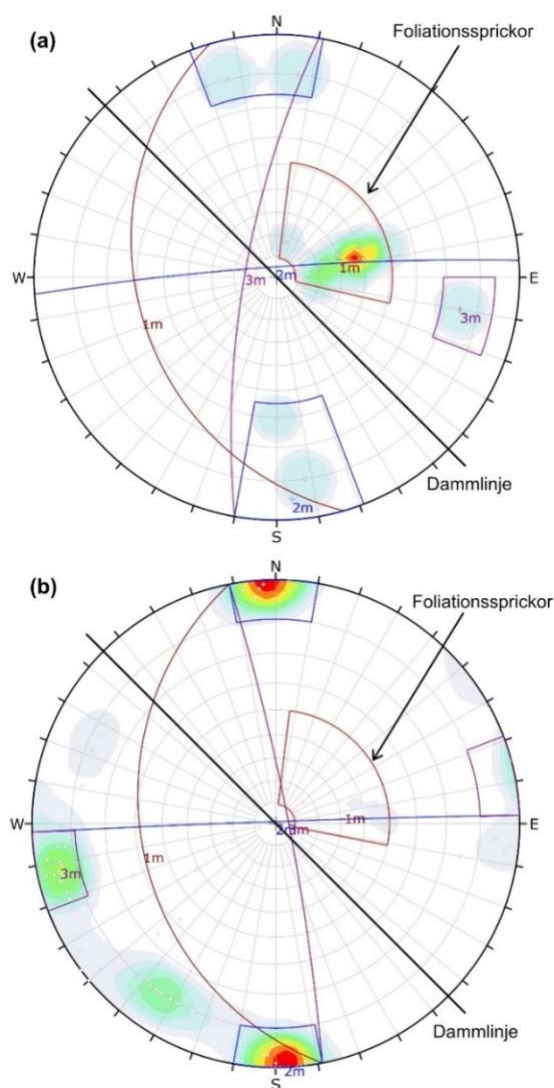
4.2.1 Fältundersökning och kartering av synlig berggrund

Ett platsbesök vid dammanläggning 2 utfördes i november 2022 efter utrivning av det första utskovet och rensning av en stor del av berggrunden under denna dammdel. En planvy över entreprenaden med tillgängliga områden för kartering under platsbesöket redovisas i Figur 17. I det utförda platsbesöket observerades att bergmassan består av gnejs med en tydlig foliation. Gnejsen är generellt av medeltill bra kvalitet. Den observerade foliationen har en varierande strykning på mellan ca N-S och O-V riktning och en varierande stupning mellan ca 15 och 40 grader. Den dominerande sprickgruppen i de karterade områdena följer gnejsens foliation. Foliationsparallella strukturer samverkar med två underordnade sprickgrupper som stryker i N-S respektive SO-NV riktning och stupar brant (70–80 grader). De karterade huvudsprickgrupperna vid utfört platsbesök i dammanläggning 2 redovisas i Figur 18a. Totalt uppmättes ca 30 sprickor i områdena med rensat berg.



Figur 17 Planvy över entreprenaden i dammanläggning 2 med markerade områden med rensat berg vid platsbesöket.

Utförda observationer visar att berget är uppsprucket längs foliationsplanen. Sprickorna är fyllda med mjukare mineraler såsom biotit och pyrit, se Figur 19a. I karterat område nr. 1 observerades en pegmatitgång som genomskrär huvudbergarten i ca N-S riktning och har en stupning på ca 40 grader. Tjockleken på pegmatitgången var ca 1 m. Även pegmatiten är av bra kvalitet. I karterat område nr. 1 observerades en sänka i berggrunden mot hörnet av den uppförda fångdammen. Skillnaden i bergnivå mellan sänkan och den omkringliggande berggrunden uppskattades till ca 3 m. En övergripande bild över karterat område nr. 1 med observerad sänka i berggrunden redovisas i Figur 19b. I sänkan observerades en svaghetszon med mycket uppsprucket berg samt lerfyllda och vattenförande sprickor. Svaghetszonen följer bergmassans foliation, se Figur 19c. Bergmassan var generellt av medel- till bra kvalitet med GSI-värden [3] som varierade mellan 60 och 70. I svaghetszonen uppskattades ett GSI-värde på 30, vilket motsvarar en bergmassa med mycket dålig kvalitet.



Figur 18 Stereodiagram med karterade huvudsprickgrupper i dammanläggning 2: (a) uppmätta sprickor från fältundersökningar vid platsbesök; (b) uppmätta sprickor utifrån uppbyggd 3D-modell baserat på drönardata.

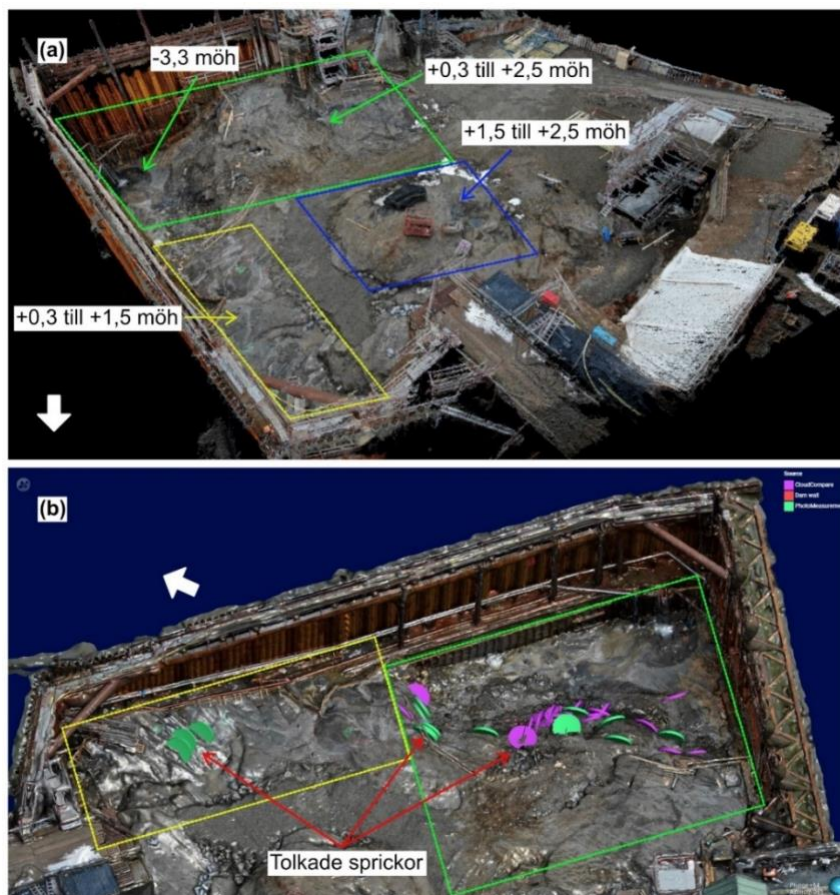


Figur 19 Dammanläggning 2: (a) observerad foliation i bergmassan; (b) övergripande bild över de karterade områdena 1 och 2 med sänkan i berggrunden mot fångdammens hörna; (c) observerad svaghetszon i sänkan med uppsprucket berg och lerfyllda och vattenförande sprickor i foliationsriktningen.

4.2.2 Fotogrammetrimodell i 3D och digital kartering

En fotogrammetrimodell i 3D av avtäckt berggrund efter utrivning av första utskovet i dammanläggning 2 skapades utifrån 2D-foton tagna med drönare. Metodiken som användes för att skapa 3D-modellen med hjälp av programvaran PIX4D mappar [5] redovisas i avsnitt 2.3. Huvudsyftet med fotogrammetrimodellen var att kunna jämföra verkliga bergnivåer efter utrivning av dammen med information som redovisats i förundersökningar. Den uppbyggda 3D-modellen användes även för att analysera strukturgeologin med hjälp av programvarorna CloudCompare [6] och Leapfrog [7] (se avsnitt 2.3).

En övergripande bild av den uppbyggda 3D-modellen utifrån drönarbilder tagna i dammanläggning 2 med uppmätta bergnivåer i områdena med rensat berg samt karterade sprickor med programvarorna CloudCompare [6] och Leapfrog [7] redovisas i Figur 20a och b. Den generella bergnivån för det synliga berget i det aktuella området varierar mellan ca +0,3 och +2,5 möh. I sänkan låg berget på ca - 3,3 möh. Det bör poängteras att 3D-modellen i dammanläggning 2 byggdes upp utan kontrollpunkter vilket bedöms kunna ha en inverkan på modellens positionering i det globala koordinatsystemet.



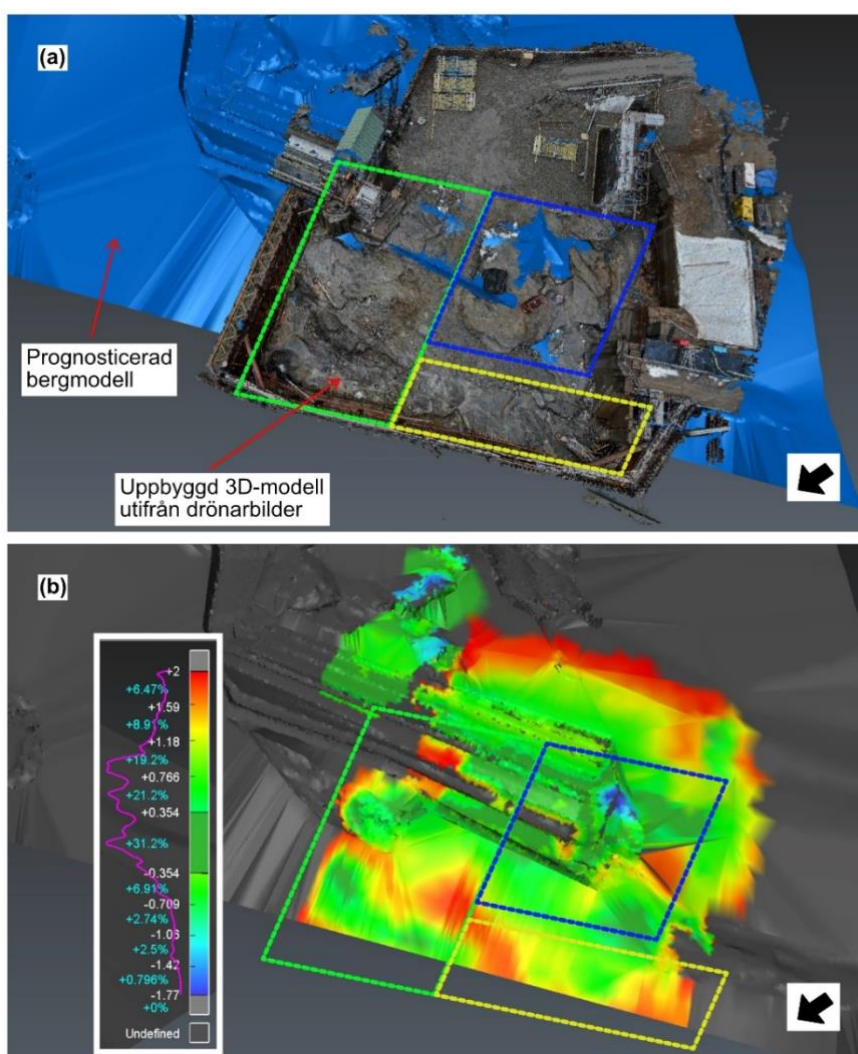
Figur 20 Övergripande bild över den uppbyggda 3D-modellen för dammanläggning 2: (a) med uppmätta bergnivåer i områden med rensad berggrund; (b) med karterade sprickor med hjälp av programvarorna CloudCompare och Leapfrog.

Resultatet från den digitala karteringen av bergsprickor utifrån uppbyggd fotogrammetrimodell i dammanläggning 2 redovisas i Figur 18b. Totalt karterades 33 sprickor utifrån den uppbyggda 3D-modellen. Resultaten visar att uppmätta huvudsprickgrupper i fotogrammetrimodellen stämmer bra överens med resultat från utförd geologisk kartering i fält (se Figur 18a och b). Foliationssprickor stryker i ca NV-SO riktning och stupar mellan 10 och 40 grader. De två andra underordnade sprickgrupperna stryker i ca N-S respektive O-V riktning och stupar brant. Utifrån fotogrammetrimodellen har även andra slumpmässiga sprickgrupper uppmätts.

4.2.3 Jämförelse av bergnivån

Bergnivån av den frilagda bergytan i dammanläggning 2 som fångades under drönarflygning har jämförts med modellerad bergnivå utifrån förundersökningsresultat som redovisas i avsnitt 3.2 och Figur 12. En övergripande bild över uppbyggda 3D-modeller utifrån förundersökningsresultat respektive drönarflygning redovisas i Figur 21a. Bergnivån i de två 3D-modellerna har jämförts med hjälp av programvaran 3D Reshaper från Hexagon [8]. Resultatet från jämförelsen redovi-

sas i Figur 21a och b. Uppbyggd 3D-modell utifrån drönbilder är väsentlig mindre än uppbyggd 3D-modell utifrån utförda förundersökningar i dammanläggning 2. Anledning till detta är att ombyggnationen görs i olika etapper. Resultat från jämförelsen i Figur 21a visar att uppbyggd 3D-modell utifrån drönbilder generellt ligger högre än 3D-modellen från förundersökningar. I Figur 21b kan det observeras att skillnaden i bergnivå ligger inom intervallet $\pm 0,35$ m för ca 30% av de jämförda punkterna, mellan $\pm 0,35$ och ± 1 m för 50% av de jämförda punkterna, samt mellan ± 1 m och ± 2 m för ca 20% av de jämförda punkterna. Som tidigare nämnts så finns en osäkerhet kopplad till verklig positionering av uppbyggd 3D-modellen utifrån drönbilder på grund av att inga kontrollpunkter användes i det utförda arbetet.



Figur 21 (a) Övergripande bild över uppbyggda 3D-modeller i dammanläggning 2 utifrån förundersökningsresultat respektive drönbilder (den blåa ytan representerar 3D-modellen baserat på förundersökningar); (b) resultat från jämförelse av bergnivåer från de två 3D-modellerna av det synliga berget under dammen. Mätintervallet för bergnivåer har begränsats till ± 2 m.

5 Diskussion av resultat

5.1 JÄMFÖRELSE AV BERGNIVÅ

Huvudsyftet med detta projekt är att jämföra hur väl information om grundläggningsytan från byggnadstiden, eller från tolkade nivåer baserade på utförda kompletterande fältundersökningar efter att dammen togs i drift, stämmer överens med verkligheten i de två studerade dammanläggningarna. För att kunna analysera och jämföra den verkliga bergnivån vid respektive dammanläggning med förundersökningsresultat har en digitalisering av den frilagda bergytan utförts med fotogrammetri och bilder tagna med drönare. Att kombinera konventionell kartering med fotogrammetri från bilder tagna med drönare för att mäta bergytor och karaktärisera bergmassan är en teknik som utvecklas snabbt. Exempelvis använde [18] drönare i kombination med fältundersökningar och geofysiska mätningar för att utvärdera bergmassans kvalitet och känsligheten för glidbrott i en bergsslänt.

I föreliggande studie har uppmätt bergnivå av den frilagda bergytan vid dammanläggning 1 jämförts med resultat från sjömätningar utförda år 2016. Utförd jämförelse av bergnivån visar att den uppmätta nivån av den frilagda bergytan med drönare (Figur 15a) ligger mellan 2 och 5 m lägre än uppmätta nivåer med sjömätning med ekolod (Figur 16). Den observerade diskrepansen mellan bergnivåerna i 3D-modellen (från drönare) mot sjömätningar med ekolod kan dels bero på att 3D-modellen är uppbyggd utan kontrollpunkter vilket bedöms kunna ha en inverkan på modellens positionering i det globala koordinatsystemet, dels bero på inverkan från bottensediment och bergblock i de utförda sjömätningarna. Frånvaron av kontrollpunkter skulle kunna orsaka en avvikelse på 2 till 5 m. Det kan emellertid inte uteslutas att bottensediment och stenblock ligger bakom den observerade skillnaden. Samtidigt ligger de frilagda bergytorna nedströms utskoven, och mängden bottensediment och bergblock bör därför vara begränsad. Det är också möjligt att närheten till betongdammen har påverkat ekolodningens resultat. De erhållna resultaten visar emellertid att tolkade bergnivåer baserad på sjömätning med ekolod bör användas med försiktighet vid projektering, speciellt nära en betongdamm. Bergnivån bör först verifierats med annan metod. Ingen jämförelse mellan bergnivåer baserat på 3D-modeller (tolkad bergyta baserat på utförda förundersökningar mot genererad bergyta baserat på fotogrammetri och bilder tagna med drönare) har kunnat genomföras för dammanläggning 1, då en 3D-modell baserad på förundersökningar saknades i erhållet underlag.

I dammanläggning 2 har uppmätta bergnivåer av den frilagda bergytan baserat på fotogrammetri och bilder tagna med drönare jämförts med den uppbyggda 3D-modellen utifrån förundersökningar utförda vid byggtiden samt vid utredningsstade inför ombyggnationen (se Figur 12). Utförd jämförelse av de bergnivåer som redovisas i Figur 21b visar på en god överensstämmelse mellan de uppbyggda 3D-modellerna. Skillnaden i bergnivå i de jämförda bergmodellerna ligger inom intervallet $\pm 0,35$ m och mellan $\pm 0,35$ och ± 1 m för ca 30% respektive 50% av de jämförda punkterna. Resterande 20% av jämförda punkterna låg inom intervallet mellan ± 1 och ± 2 m. Resultat från denna jämförelse visar även på att utförda

förundersökningar i dammanläggning 2 utgjorde ett underlag med bra information från bergnivåer inför kommande ombyggnation av dammen. Dock finns det en osäkerhet kopplad till verklig positionering av den uppbyggda 3D-modellen utifrån drönbilder på grund av att inga kontrollpunkter har använts. En annan osäkerhet är kopplad till upplösningen av de jämförda 3D-modellerna. Storleken på uppbyggd 3D-mesh utifrån förundersökningar varierar kraftigt, och ytorna kan ibland vara flera kvadratmeter stora (se Figur 12). Upplösningen i den uppbyggda 3D-modellen utifrån drönbilder är däremot ca 0,5 till 1 cm, och erhållna skillnaderna i bergnivåer ligger därför inom ramen för vad som kan förväntas med tanke på avstånden mellan utförda Jb-sonderingar.

5.2 JÄMFÖRELSE AV KARTERINGSRESULTAT

Karterade sprickgrupper under platsbesök vid respektive dammanläggning jämfördes med karterade sprickgrupper utifrån uppbyggda 3D-modeller från drönbild-data, där identifierade sprickgrupper plottades i ett stereodiagram.

Vid dammanläggning 1 visade fältkarteringen att den dominerande sprickgruppen hade en strykning i ca N-S riktning med en stupning på ca 70–80 grader (Figur 14a). Två andra sprickgrupper med medelbrant stupning observerades vid fältkarteringen. En sprickgrupp med O-V strykning med stupning 40–60 grader stupning samt en sprickgrupp med NV-SO strykning med stupning 30–40 grader. Tre sprickgrupper identifierades även i karteringen baserad på data från drönare (Figur 14b). En sprickgrupp med strykning i ca N-S riktning med en varierande stupning på mellan 50 och 80 grader. Den andra sprickgruppen hade en strykning i ca NO-SV riktning med brant stupning (70 till 90 grader), och den tredje sprickgruppen hade en strykning i ca O-V riktning med en brant stupning (70 till 90 grader).

Vid dammanläggning 2 visade fältkarteringen att huvudsprickgruppen följer gnejsens foliation med en strykning på ca N-S och O-V och en varierande stupning på mellan ca 15 och 40 grader (Figur 18a). Dessutom observerades två underordnade sprickgrupper med strykning i N-S respektive SO-NV riktning med brant stupning (70–80 grader). Med data från drönare identifierades foliationssprickor som stryker i ca NV-SO riktning med en stupning på mellan 10 och 40 grader (Figur 18a). Utöver detta identifierades två andra underordnade sprickgrupper med strykning i ca N-S respektive O-V riktning som båda hade en brant stupning.

För dammanläggning 1 stämde de båda karteringarna någorlunda bra överens med observerade huvudsprickgrupper i fält, medan överensstämmelsen var bättre för dammanläggning 2. Skillnader i karteringsresultat mellan de båda metoderna kunde emellertid observeras. Orsaken till dessa skillnader är oklar, men kan delvis bero på det begränsade antalet karterade sprickor med de båda metoderna. Det är också möjligt att sprickyrtornas storlek skilde sig åt till en viss del mellan båda metoderna. Vid tidigare mätning av sprickors orientering har det observerats att variationen är större desto mindre yta som mäts, och en studie utförd av [19] visade på större variabilitet för sprickors orientering uppmätt med drönare och fotogrammetri jämfört med de kompassbaserade mätningarna. Samma studie visade även på bra en överensstämmelse i uppmätt strykning och stupning för de

båda metoderna (med en maximal skillnad på 11 grader i strykning och 5 grader i stupning). Enligt [19] visar resultaten på den potentiella tillförlitligheten och nyttan av drönarbaserad kartering av bergmassor i miljöer med risk för mänsklig exponering, såsom bergsmassiv och bergslänter i dagbrott med risk för fallande block eller för dammar med hög risk. Resultaten från [19] indikerar att det troligtvis inte är själva metoden (fotogrammetri baserad på drönarbilder) som har genererat skillnaderna i resultat, utan troligtvis det begränsade antalet karterade sprickor i kombination med den naturliga variationen i strykning och stupning för de olika sprickgrupperna. Om så är fallet kan emellertid inte med säkerhet konstateras inom ramen för denna studie. Hur många sprickor i respektive sprickgrupp som bör karteras och hur stora sprickytor som bör användas vid kartering för att uppnå en representativ beskrivning av sprickgruppers strykning och stupning, och samtidigt uppnå en bra överensstämmelse mellan de båda metoderna, är något som rekommenderas att studera i framtida studier.

5.3 ANVÄNDNING AV DRÖNARTEKNOLOGI FÖR ATT MÄTA BERGYTAN

I båda dammanläggningarna användes en drönare av typ DJI Mavic 2 för att fotografera respektive berggrund. Denna drönare har en traditionell GPS-mottagare som normalt ger en position med en noggrannhet på 2–4 m. Fotografering av berggrunden utfördes i tre olika höjdnivåer för att fånga upp de viktigaste detaljerna. Berggrunden fotograferades vid en höjd på ca 50, 30, och 10 m från markytan, med ett överlapp mellan bilderna på ca 80%.

Uppmätning av bergytan med drönare var relativt enkelt att genomföra, där relativt stora och svårtillgängliga ytor på ett enkelt sätt kunde mätas upp. Samtidigt är det enkelt att följa upp med utförda observationer från kartering i fält, och det är möjligt att digitalt kombinera 3D-modellen uppbyggd med drönardata med erhållen information från förundersökningar i samma modell. Det var en nackdel att inga kontrollpunkter användes i detta projekt, då tiden för platsbesök var begränsad. För framtida mätningarna vid andra anläggningar bör detta genomföras.

Att på ett detaljerat sätt kunna dokumentera grundläggningsytan är viktigt i samband med att glidstabiliteten ska analyseras för betongdammar. I RIDAS kapitel för grundläggning [2] är det numera möjligt att tillgodogöra inverkan från större bergklackar i grundläggningsytan. En detaljerad dokumentation av grundläggningsytan vid ny- och ombyggnation möjliggör ett sådant förfarande. Resultat från modellförsök på en lamellmonolit utförda av [20] har visat att skjuvhållfastheten för kontaktytan är väsentligt högre om större bergklackar medräknas. Det är därför av intresse att kunna medräkna denna effekt för att kunna optimera konstruktionen för nybyggda dammar eller minska behovet att dammsäkerhetshöjande åtgärder med exempelvis förspända linstag för existerande dammar. Det rekommenderas därför att samtliga bergytor vid ny- och ombyggnation mäts in med drönare vid framtida projekt för att möjliggöra dessa typer av analyser.

6 Slutsatser och rekommendationer

Projektets övergripande syfte var att bidra med branschgemensam erfarenhetsåterföring avseende grundläggningsaspekter i älvfåror utifrån pågående ombyggnation av två befintliga svenska betongdammar. Målet var att jämföra hur väl information om grundläggningsytan från byggnadstiden stämmer överens med verkligheten i de två pågående ombyggnationerna.

Vid den ena av anläggningarna som analyserades i denna studie jämfördes tolkad nivå för bergytan baserat på sjömätning ekolod med yta baserad på fotogrammetri och bilder tagna med drönare. Jämförelsen visade på en skillnad på 2 till 5 m. Denna skillnad visar att tolkade bergnivåer baserad på sjömätning med ekolod bör användas med försiktighet vid projektering, speciellt nära betongdammen. Bergnivån bör verifieras med annan metod.

Vid den andra anläggningen visade jämförelsen av den frilagda bergytan baserat på fotogrammetri och bilder tagna med drönare mot den uppbyggda 3D-modellen utifrån förundersökningar på en skillnad i bergnivå inom intervallet $\pm 0,35$ m och mellan $\pm 0,35$ och ± 1 m för ca 30% respektive 50% av de jämförda punkterna. Restande 20% av jämförda punkterna låg inom intervallet mellan ± 1 och ± 2 m. Denna skillnad ligger inom ramen för vad som kan förväntas med tanke på avstånden mellan utförda Jb-sonderingar, och visar även att metoden med fotogrammetri och bilder tagna med drönare är ett bra verktyg för uppmätning av bergnivåer. Dessa resultat visar också att det bör vara en väl värd investering att - trots svårigheter - utföra förundersökningar för att få fram ett underlag som inte medför ovälkomna överraskningar vid en senare entreprenad när det kommer till vilken bergnivå som kan förväntas gå att bygga på. Vid båda anläggningarna inmättes inga kontrollpunkter med drönarna, vilket skapade en osäkerhet för den genererade 3D-modellen. För att eliminera denna osäkerhet rekommenderas att kontrollpunkter alltid mäts in i framtida projekt.

Vid båda anläggningarna jämfördes identifierade sprickgrupper med konventionell kartering med karterade sprickgrupper utifrån uppbyggda 3D-modeller från fotogrammetri och bilder tagna med drönare. Jämförelsen visade på en god överensstämmelse mellan de båda metoderna, även om vissa skillnader kunde observeras. Orsaken till dessa skillnader kunde inte fastställas, men bedöms i första hand bero på det begränsade antalet karterade sprickor i kombination med den naturliga variationen i strykning och stupning för de olika sprickgrupperna.

För framtida studier rekommenderas att det analyseras hur många sprickor i respektive sprickgrupp som bör karteras och hur stora sprickytor som bör användas vid kartering för att uppnå en representativ beskrivning av sprickgruppens strykning och stupning.

Sammanfattningsvis visar erfarenheterna av att mäta in bergytan med drönare i detta projekt att tekniken fungerar bra och är relativt enkel att använda. För att bland annat möjliggöra att inverkan från större bergklackar i grundläggningsytan ska kunna medräknas vid stabilitetanalys rekommenderas att samtliga bergytor vid ny- och ombyggnation mäts in med drönare vid framtida projekt för att möjlig-

göra dessa typer av analyser. Detta kan möjliggöra en optimering av nya betongdammar och kan minska behovet av dammsäkerhetshöjande åtgärder med exempelvis förspända linstag för existerande dammar.

7 Referenser

- [1] Energiföretagen, "RIDAS - Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet," 2020.
- [2] Energiföretagen, "RIDAS – Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet - Tillämpningsvägledning Kapitel 9 (Grundläggning)," 2020.
- [3] E. Hoek och E. T. Brown, "Practical estimates of rock mass strength," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 34, nr 8, pp. 1165-1186, 1997.
- [4] Bentley, [Online]. Available: <https://bdn.bentley.com/product/2474>.
- [5] PIX4D, [Online]. Available: <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/>.
- [6] CloudCompare, "https://www.danielgm.net/cc/," 2023. [Online].
- [7] Seequent, "https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-geo/," 2023. [Online].
- [8] 3D Reshaper by Hexagon, [Online]. Available: <https://hexagon.com/>.
- [9] SGU Sveriges geologiska undersökning, [Online]. Available: <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-berg-50-250-tusen.html>. [Använd 2024].
- [10] WSP, "Dammanläggning 1: Förfrågningsunderlag dammsäkerhetsåtgärder - Resultat från JB-sonderingar," 2019.
- [11] WSP, "Dammanläggning 1: Geologisk kartering av berggrunden," 2021.
- [12] WSP, "Dammanläggning 1: Förfrågningsunderlag dammsäkerhetsåtgärder - Dykundersökning och sjömätning," 2019.
- [13] WSP, "Dammanläggning 1: Förfrågningsunderlag dammsäkerhetsåtgärder - Kärnkartering," 2022.
- [14] "Karakterisering av vattenförande sprickor i berg i dammanläggning 2. Examensarbete," Chalmers Tekniska Högskola, 2006.
- [15] "Redogörelse för arbetena med dammanläggning 2 kraftverks första utbyggnad," Kungl. Vattenfallstyrelsen, 1932.
- [16] J. Berglund, "Resultat från teknikstöd angående dammsäkerhetshöjande åtgärder vid dammanläggning 2 - Bilaga 3: Utredning om berggrundsförhållandena," Vattenfall, 2016.
- [17] H. Ericsson, "Dammsäkerhetshöjande åtgärder dammanläggning 2 - Markteknisk Undersökningsrapport Geoteknik (MUR/Geo)," Norconsult, 2018.
- [18] F. Filice, A. Pezzo, P. Lollino och M. Perrotti, "Multi-approach for the assessment of rock slope stability using in-field and UAV investigations.," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 81(12), nr 502, 2022.
- [19] L. G. Netto, K. Singha, C. A. Moreira, O. C. B. Gandolfo och D. S. N. A. Albarelli, "Investigation of fractured rock beneath a uranium-tailing storage dam through UAV digital photogrammetry and seismic refraction tomography," *Frontiers in Earth Science*, vol. DOI 10.3389/feart.2023.1281076, 2023.
- [20] G. Sas, C. Popescu, D. Bista, A. Seger, B. Arntsen, L. Johansson och L. Lia, "Influence of large-scale asperities on the shear strength of concrete-rock interface of small buttress dams," *Engineering structures*, vol. 245, nr 112952, 2021.

BERGKVALITET I ÄLVFÅROR –

EN UNDERSÖKNING I SAMBAND MED TVÅ DAMMBYGGNADSENTREPRENADER

Det här projektets mål är att bidra med branschgemensam erfarenhetsåterföring avseende grundläggningsaspekter i älvfåror utifrån pågående ombyggnation av två befintliga svenska betongdammar. Projektet har jämfört tolkad bergyta vid byggnadstiden med uppmätt bergyta vid två dammanläggningar för att belysa de osäkerheter som kan finnas beroende på kvaliteten hos relationshandlingar och förundersökningar.

Resultaten visar att tolkad bergyta kan vara förknippad med stora osäkerheter beroende på kvalitet på relationshandlingar och vilken typ av förundersökning som användes. Detta utgör värdefull information för framtida projekt.

Sammanfattningsvis visar erfarenheterna av att mäta in bergytan med drönare i detta projekt att tekniken fungerar bra och är relativt enkel att använda. För att möjliggöra att inverkan från större bergklackar i grundläggningsytan ska kunna medräknas vid stabilitetanalys rekommenderas att samtliga bergytor vid ny- och ombyggnation mäts in med drönare vid framtida projekt. Detta kan möjliggöra en optimering av nya betongdammar och kan minska behovet av dammsäkerhetshöjande åtgärder med exempelvis förspända linstag för existerande dammar.

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.

