

# NY SUGRÖRSAVSTÄNGNING I KRÅNGEDE KRAFTVERK

## NEW TAIL RACE TUNNEL GATES IN KRÅNGEDE HYDRO POWER PLANT

*Tomas Karlberg, AFRY*

*Marcus Hautakoski, Fortum*

*Magnus Svensson, Fortum*

### 1. Sammanfattning

Krångede Kraftverk, beläget i Indalsälven mellan Stugun och Hammarstrand, producerar årligen ca 1650 GWh, vilket motsvarar ca 2,6 % av Sveriges vattenkraftproduktion. Kraftverket togs i drift 1936 och många av de driftkritiska system som byggdes på 1930-talet används fortfarande. Ett av dessa system är avstängningen av sugrören nedströms kraftverket, som innebär ett tidskrävande och arbetsmiljömässigt farligt arbete när bågsättare ska travas på plats för att stänga vattenvägen. För att minska produktionsbortfallet vid avställningar och förbättra arbetsmiljön har Fortum tagit ett investeringsbeslut om att bygga en ny tillfartstunnel och nya vertikalschakt för en mer rationell sugrörsavstängning med hjälp av luckor. Projektet innebär att nya bergutrymmen tas ut i anslutning till det befintliga kraftverket, som kommer att vara i drift under hela byggtiden. Planerade schakt och tunnlar passerar mycket nära befintlig anläggning, i flera passager med endast ca 2-3 m bergtäckning. I kombination med en i övrigt komplex bergmekanisk situation och hårda krav på begränsning av vibrationer ställs höga krav på berguttaget och tillhörande kontroller under utförandet, bland annat utförs flera kritiska delar med hjälp av sågning. Projektet genomförs som en samverkansentreprenad med Fortum som byggherre, YIT som entreprenör, samt ÅF som projektör, tekniskt stöd och byggplatsuppföljning. Projektet innehåller en hög grad av aktiv design och denna artikel syftar till att redovisa de bergtekniska och bergmekaniska utmaningar som projektet innebär och hur dessa har hanterats för att minimera störningarna för den pågående vattenkraftproduktion.

Nyckelord: Krångede, vattenkraft, vajersågning

## 2. Bakgrund och beslut

### 2.1 Krångede kraftverk

Krångede Kraftverk är beläget i Indalsälven mellan Stugun och Hammarstrand i Ragunda kommun. Kraftverkets började byggas 1936 av Krångede AB och det första av de totalt sex aggregaten togs i drift 1936 och det sista aggregatet 1947. Idag äger Fortum 90,8 % och Uniper 9,2 % av Krångede kraftverk.



Figur 1. Karta Krångede kraftverk.

Kraftverket har en installerad effekt på 248 MW och producerar årligen ca 1650 GWh (medelår), vilket motsvarar ca 2,6 % av Sveriges vattenkraftproduktion. Det är också Fortums största vattenkraftverk sett till årsproduktion och det andra största sett till installerad effekt. Under hela 1940-talet och fram till 1952 var det också Sveriges största vattenkraftverk sett både till årsproduktion och installerad effekt.

Kraftverket har en fallhöjd på 60 meter och maskinsalen är insprängd i berget ca 40 meter under markplanet. Kraftverket saknar tillfartstunnel så för att transportera ner utrustning och maskindelar mm vid underhållsarbeten och större projekt används ett stort lyftschakt mellan markplanet och maskinsalen. Under tiden som lyft av maskindelar utförs är det ej möjligt att använda traversen för att transportera upp och ned verktyg eller andra maskindelar. Man blir således väldigt låst utan en tillfartstunnel. De sex turbinerna av typen vertikala (stående) Francisturbiner har vertikala intagstuber

direkt från magasinet uppströms. Utloppet från turbinerna består av sex stycken sugrör<sup>1</sup> som leds samman till två separata (116 m<sup>2</sup> vardera) och 1,4 km långa utloppstunnlar som leder vattnet till nedströms kraftverksmagasin tillhörande Gammelänge kraftverk. Kraftverkets utbyggnadsvattenföring är 500 m<sup>3</sup>/s (full drift).



Figur 2. Flygfoto över Krångede kraftverk.

## 2.2 Problematisk sugrörsavstängning

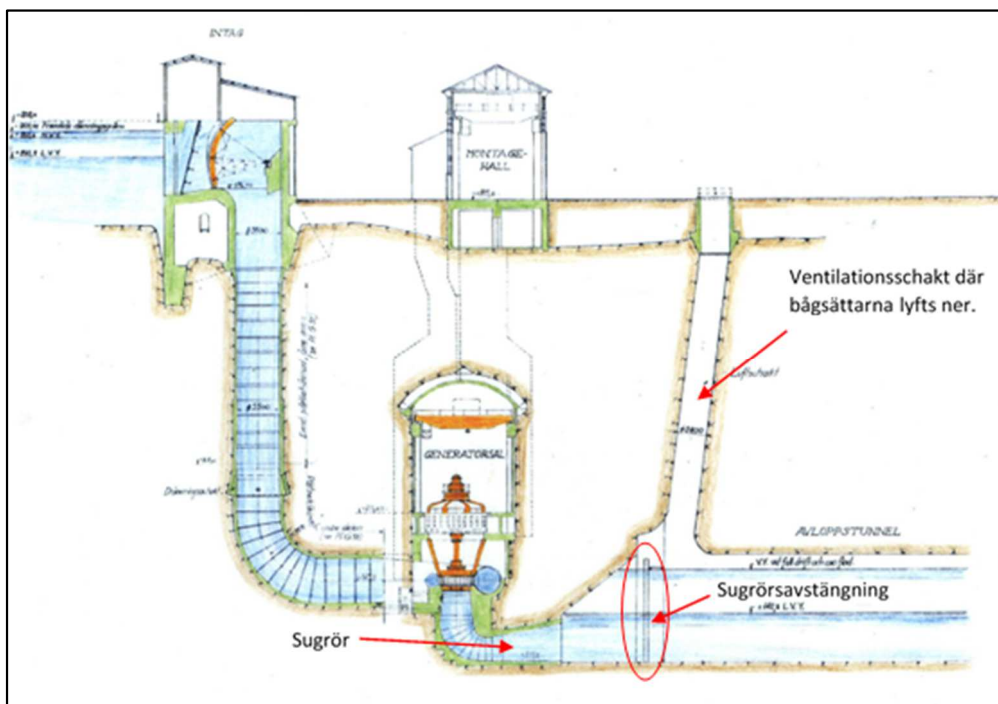
Det har sedan tidigare varit känt att arbetena med de nedströms avstängningar som används för att torrlägga respektive sugrör inför inspektioner och underhåll är svåra, riskabla, tidskrävande och kostsamma.

För aggregat 1-4 används en typ av sugrörsavstängning som kallas bågsättsavstängning. Det innebär för sugrören i Krångede att 72 stycken, ca 350 kg tunga, valvformade stålbalkar ska lyftas ner och placeras ovanpå varandra på en betongtröskel i botten till den turbin/sugrör som ska torrläggas. För aggregat 1 och 2 lyfts sättarna ner från markytan genom ett vertikalt, något lutande ventilationsschakt ner till ca 50-60 meters djup. För aggregat 3 och 4 sänks sättarna ner genom vertikala ventilationsschakt från en arbetstunnel som finns nedströms kraftverket ca 25 meter under markytan. De vertikala schakten har en diameter på ca 3,5 m och sättarnas längd är ca 7,2 meter. Att lyfta ner sättarna en och en i de vertikala schakten är både svårt och riskfyllt på grund av att det är trånga utrymmen och besvärliga lyft. I vattnet krävs det insats av dykare som ser till att bågsättarna hamnar i sitt läge och tätar mot varandra och mot bottentröskeln. Vidare

---

<sup>1</sup> Sugrör är den del av vattenvägen som kommer efter turbinen och där vattenhastigheten sänks genom en kraftigt ökad tvärsnittsarea.

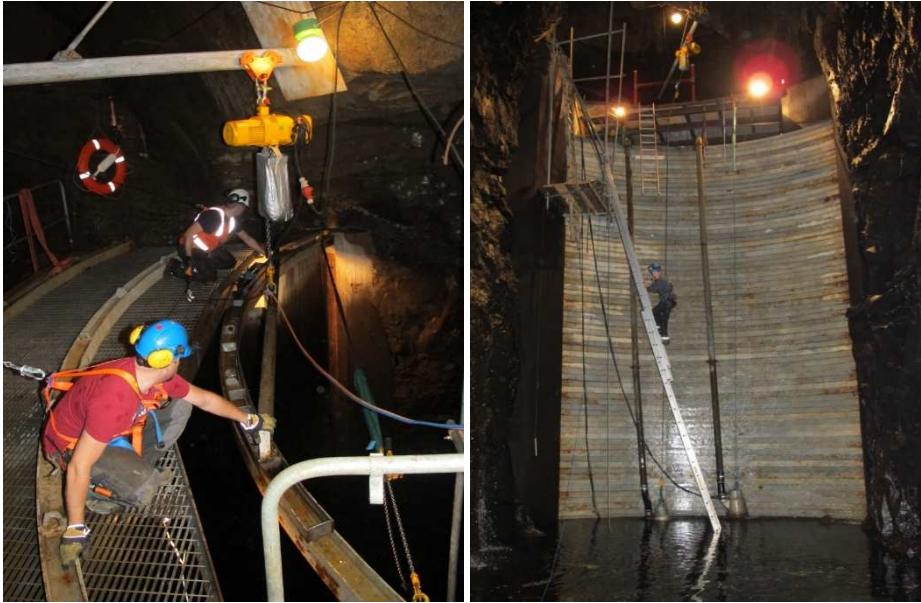
så krävs kompletterande tätningsarbeten för att få bågsättarna så pass täta att länsumpning av sugröret är möjlig utan att för stor pumpkapacitet krävs.



Figur 3. Tvärsnitt genom kraftstationen och aggregat 1.

För aggregat 5 och 6 finns en bättre avstängningskonstruktion som är lättare att utföra och inte för med sig samma arbetsmiljöproblem.

Att montera en sugrörsavstängning med bågsättar i Krångede tar idag ca två veckor att utföra. Ungefär samma behövs vid demontaget. Sugrören går ihop strax efter varje sugrör i en gemensam utloppstunnel för aggregat 1-3 och en utloppstunnel för aggregat 4-6. Detta innebär med de höga vattenhastigheter, turbulens och vattenståndsvariationer som förekommer vid drift, att även de intilliggande aggregaten som delar samma utloppstunnel som det som ska monteras bågsättar på, måste stängas ner under montage och demontage. Halva kraftverket blir i dessa situationer stillastående. Även om detta utförs under den torra perioden av året så innebär det i Krångede att mycket vatten måste spillas förbi kraftverket genom utskovsluckorna vilket medför stora produktionsförluster.



Figur 4. Foto från montage av bågsättar samt färdig sättavstängning med urpumpat sugrör, gammal bild.

### 2.3 Förbättrande åtgärder - Förstudie och utredning av alternativ

Fortum inledde 2013 en förstudie för hur man skulle komma tillrätta med arbetsmiljöproblemen och de kostsamma och tidskrävande sugrörsavstängningarna. Ett antal alternativ togs fram och studerades enligt nedan:

- Klaffluckor i befintliga sugrör (med gångjärn i ena änden)
- Torrläggning av bägge utloppstunnlarna och anläggande av nya trösklar och bågsättsavstängningar med förvaring och lyftanordningar nere vid sugrören.
- Ny tillfartstunnel och nytt sugrörsgalleri och användande av befintliga bågsättsfalsar för avstängning.
- Ny tillfartstunnel och sugrörsgalleri och nya sugrörsluckor som installeras mellan turbinerna och de gamla bågsättslägena.

Det sista alternativet med en ny tillfartstunnel, sugrörsgalleri och nya sugrörsluckor var det alternativ Fortum valde att gå vidare med. Flera olika tunnelsträckningar studerades innan det slutgiltiga alternativet valdes som innebar ett tunnelpåslag på andra sidan riksväg 87 ca 500 meter från kraftverket. De andra alternativen valdes bort med hänsyn till grundförhållanden.

Under hösten 2016 lämnades tillståndsansökan in till Mark- och miljödomstolen i Östersund och tillstånd erhöles i Juni 2017. I början av 2018 tog Fortum ett slutgiltigt investeringsbeslut att genomföra de planerade åtgärderna.

## 2.4 Utförande

Projektet upphandlas i flera delentreprenader:

- Tunnel- och byggentreprenad
- Mekentreprenad (nya luckor och falsar)
- Ventilation
- Elinstallationer och brandlarm
- Travers för lyft av luckor och utrustning

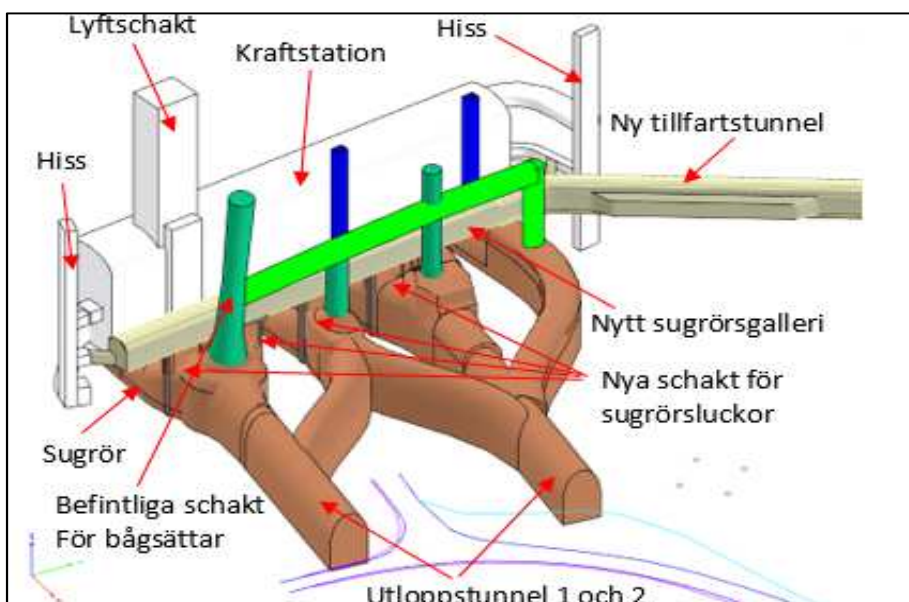
I denna artikel behandlas Tunnel- och byggentreprenaden.

Detaljprojektering utförs av AFRY (ÅF) och utförare är YIT Sverige AB.

Tunnel- och byggentreprenaden har delats upp i fem etapper:

- Etapp 1: Tillfartstunnel (500m) och sugrörsgalleri (ca 100m)
- Etapp 2: Luckschakt 4
- Etapp 3: Luckschakt 3
- Etapp 4: Luckschakt 2
- Etapp 5: Luckschakt 1

Etapp 1 påbörjades under våren 2018 och beräknas vara färdig under 2020. Etapp 2 inleds under våren 2020 och kommer att pågå samtidigt som ett turbinbyte (annat projekt) på aggregat 4 utförs under 2020. Etapp 3-5 utförs i samband med kommande underhållsprojekt på aggregat 1-3 under åren 2021-2023.



Figur 5. 3D-vy av befintlig anläggning och nya tunnlar.



Figur 6. Översikt av ny tillfartstunnel, sugrörsgalleri och sugrörsschakt.

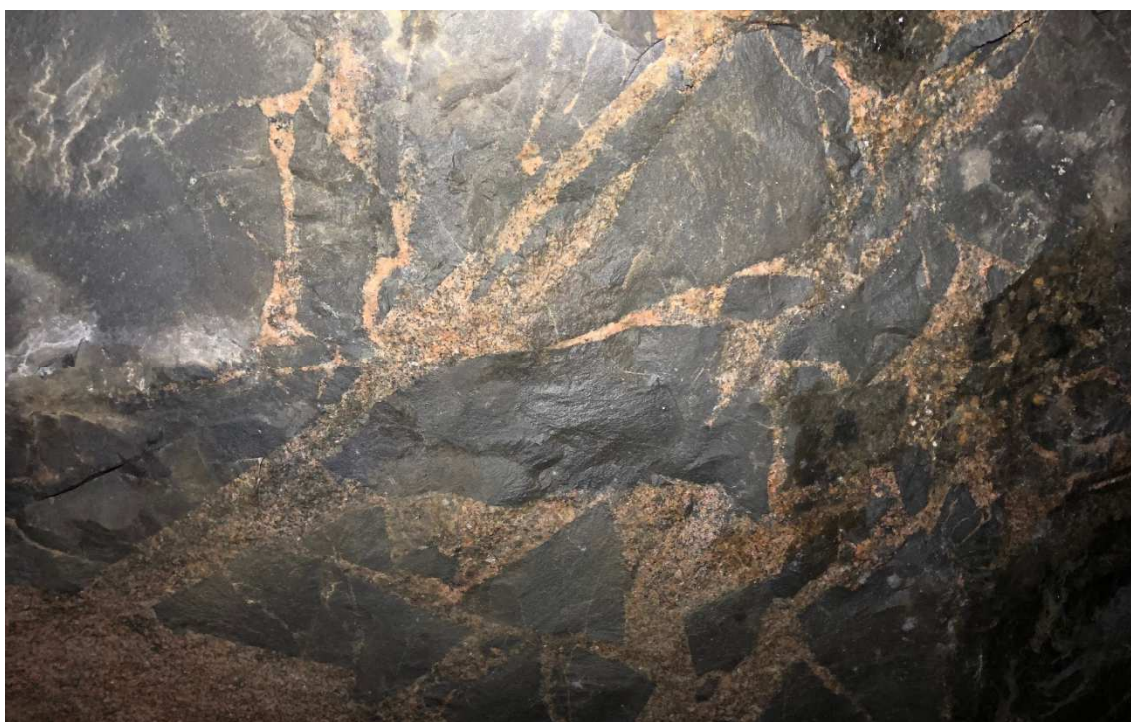
### 3. Geologiska förutsättningar

För projektet har i princip inga geologiska undersökningar med provborrningar utförts, utan kunskap om de lokala förhållandena har främst inhämtats från kartering av bergutrymmen i den befintliga anläggningen. Utifrån att få ytor är förstärkta med sprutbetong finns gott om information att inhämta från utrymmen i direkt närhet till det nya galleriet. Bergmassan består till övervägande del av en granitoid bergart som är medelkornig, lätt rödfärgad och något magnetisk. Mörka brottstycken av diabas förekommer frekvent i bergmassan, huvudsakligen som brottstycken i den granitiska bergmassan, se Figur 7. Strukturgeologiskt framträder subhorisontella bankningsplan mycket tydligt, vilka tillsammans med brantstående strukturer resulterat i en mycket karakteristisk rektangulär tunnelform där anfang i flera fall saknas helt, se Figur 8.

Bergkvalitémässigt förekommer inte några betydande svaghetszoner i den befintliga anläggningen. Bergkvalitet uttryckt i Q-värden visar på berg av acceptabel till god kvalitet med Q-värden som generellt överstiger 1. Inför drivning av arbetstunnel och sugrörsgalleri har en prognos tagits fram med procentuella fördelningar av bergkvalitet enligt Tabell 1.

Tabell 1. Prognosticerad fördelning av bergkvalitet, samt utfall från drivning av tillfartstunneln.

Bergtyp	Q-intervall	Prognosticerad Andel (%)	Prognosticerad Längd (m)	Utfall (%) Tillfartstunnel
A	$Q > 10$	34	207	47
B	$4 < Q < 10$	32	191	21
C	$1 < Q < 4$	29	173	31
D	$0,1 < Q < 1$	5	29	1
E	$Q < 0,1$	0	0	0



Figur 7. Typisk geologi i området med brottstycken av mörk diabas i en rödfärgad granit.



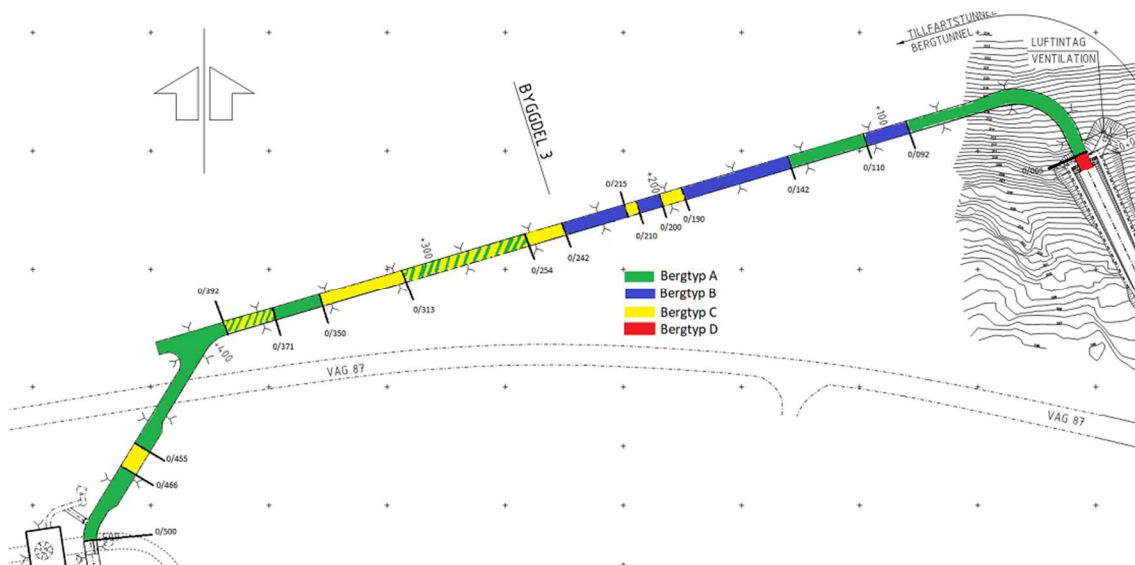


Figur 8. Foto från befintlig arbetstunnel där för området typiska strukturer resulterar i en rektangulär tunnelsektion.

### 3.1 Uppföljning av geologiska förhållanden i byggskedet

De geologiska förhållandena följs upp löpande under byggskedet med ett förenklat förfarande där en Q-värdesbedömning utförs baserat på observation i tunneln. Geologisk kartering enligt mer traditionell metodik med inmätning av strukturer och mer detaljerad dokumentation utförs inte. Istället har en dokumentation av bergtyper i tunneln utförts med fotogrammetri.

I samband med drivning av den nya tillfartstunneln har det visat sig att bergmassans generella karaktär i stort stämmer väl med de förhållanden som dokumenterats i den befintliga kraftstationen. Bergkvalitetsmässigt visar uppföljningen från de första 500 meterna av tunneldrivning (tillfartstunneln), se Tabell 1 och Figur 9, att bergkvaliteten varit något bättre än förväntat, framförallt har andelen bergtyp A varit större än förväntat. Den mer betydande avvikelser som kunnat konstateras är att den diabas som förekommer som spridda brottstycken i befintlig anläggning påträffades redan i förskärningen till Tillfartstunneln som en mer tydligt utbildad gång. Diabasgångens riktning redovisas i Figur 9 och kunde alltså tidigt konstateras ha en riktning som troligen skulle påverka en längre sträcka inne i Tillfartstunneln, vilket också skedde, se Figur 10. Diabasgångens karaktär har inneburit en mer uppsprucken bergmassa och omfattande vattenföring, vilket avspeglas i längre sträckor i bergtyp C.



Figur 9. Uppföljning av bergkvalitet i Tillfartstunneln och påträffad diabasgång.



Figur 10. Diabasgång i Tillfartstunnelns stoff.

#### 4. Designfilosofi

Designfilosofin i projektet är relativt enkel och bygger i stort på tillämpning av observationsmetoden och ”design as you go”. Som grund har fyra typförstärkningsklasser tagits fram som kopplar till de olika bergtyperna. Typförstärkningarna grundas dels på den empiriska Q-metoden, kompletterat med

analytiska metoder baserat på förväntat beteende i bergmassan. Exempelvis har typförstärkningarna verifierats för upphängning av en kraftigt skiktad bergmassa, motsvarande de frekvent förekommande bankningsplanen. Typförstärkningslösningarna tillämpas i normalfallet i alla okomplicerade delar av Tillfartstunneln och förstärkningsklass väljs baserat på en översiktlig Q-kartering löpande under drivning.

Typförstärkningskonceptet utgör även grunden i mer komplicerade dimensioneringssituationer, men kompletteras då utifrån resultat av undersökningar i byggskedet, lokala behov och respons vid drivning. För att säkerställa att rådande förhållanden avspeglas i vald design och att bergmassans respons är enligt vad som förväntas har även ett tullgränskoncept tillämpats, med beprövad systematik inför kritiska bergschaktmoment.

Nyckelfaktorer som har gjort att designfilosofin fungerat i praktiken kan sammanfattas i följande punkter:

- Samverkan mellan beställare, entreprenör och projektör i ett prestigelöst arbetsklimat.
- Väl sammansvetsad projekteringsgrupp med god närvaro på byggarbetsplatsen.
- 3D-projektering av kritiska anläggningsdelar med beredskap för löpande anpassningar och justeringar.
- Möjlighet att utföra kompletterande numeriska analyser i 3D en ajourhållen beräkningsmodell.
- Möjlighet att observera responsen i bergmassan med hjälp av bergmekaniska mätningar och observationer.

## **5. Bergtekniska utmaningar**

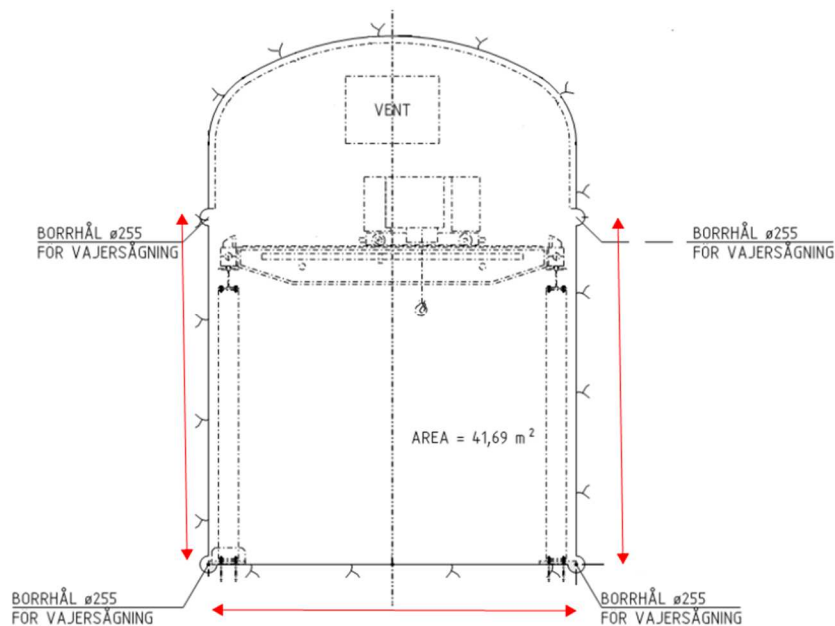
En betydande bergteknisk och bergmekanisk utmaning i projektet är att bergguttaget ska utföras under pågående drift. Den befintliga kraftstationen innehåller härtill utrustning som är känslig för både deformationer och vibrationer. Detta innebär exempelvis att deformationer i bergmassan vid bergguttag har behövt analyseras och följas upp och att metodval som begränsar vibrationer krävs.

Den mest kritiska delen av den nya anläggningen är utan tvekan det ca 100 m långa luckschaktgalleriet ("galleritunneln") och de fyra vertikalschakt som ansluter ner till befintliga vattenvägar och nya lucklägen. Galleritunneln är inklämd mellan maskinsal

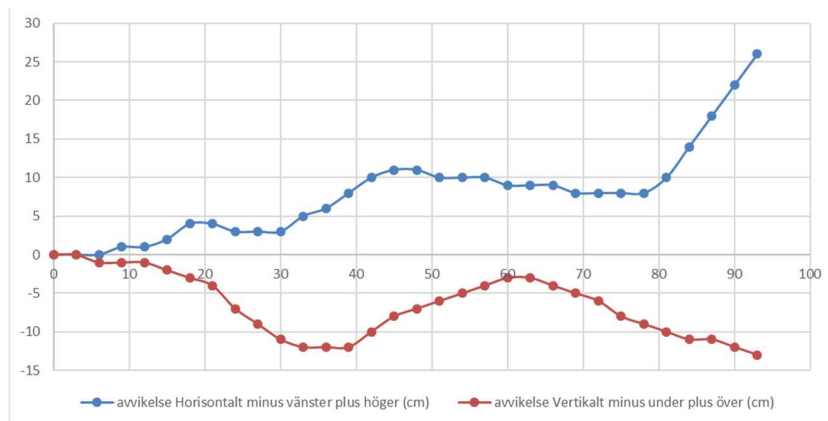
och befintlig arbetstunnel och har ett flertal passager som är mycket nära befintliga svallschakt och elschakt. I flera passager är det horisontella avståndet mindre än två meter från teoretisk bergkontur i galleritunneln till befintliga utrymmen. Vidare ska genomslag till vattenvägarna i vertikalschakten, samt nya anslutningar till maskinsalen utföras under pågående drift.

### *5.1 Berguttag med sågning*

För att hantera omgivningsriskerna utförs berguttaget i galleritunneln och vertikalschakten med anpassade metoder och restriktioner. Den metodik som valts är vajersågning. I galleritunneln har inledningsvis kärnborrning utförts enligt princip i Figur 11. Kärnborrhålen har utförts med styrd borrning med mycket god precision, maximal avvikelse för de ca 100 m långa horisontella hålen har varit som mest ca 0,25 m, se Figur 12. Efter utförd kärnborrning har borrhålen rymts upp i två omgångar till 255 mm diameter för att rymma sågutrustningen. Därefter har vägg- och bottenytor frilagts med hjälp av sågning. Ambitionen har varit att såga längre sträckor, upp mot 25 m i taget. I praktiken har detta visat sig svårt att genomföra, istället har sågsnittet varit mellan 3 upp till 10 m, därefter har problem med fastkilning av sågvajern uppstått. Orsakerna till att längre sågsnitt inte kunnat utföras har ej utretts i detalj, men beror troligen på en kombination av strukturgeologiska faktorer samt att bergmassan där galleritunneln byggs troligen är avlastad, då den ligger i spänningsskugga från befintlig maskinsal. Efter att sågningen utförts borras en tätsöm längs tak och anfang, samt salvhål i övriga delen av sektionen, därefter sprängs tunneln ut med salvlängden 2 m. Utifrån kontinuerlig vibrationsmätning har salvlängden kunnat anpassas när fronten närmat sig maskinsalen. Friläggningen med sågning i kombination med korta salvor har visat sig fungera mycket bra för att begränsa vibrationer mot närliggande anläggningar. Mätpunkter på markytan har visat på något högre vibrationsnivåer, vilket antagligen beror på att tak och anfang loss hålls utan sågning. Utförandet med sågning har även hittills fungerat väl för att undvika påverkan på befintliga bergutrymmen, även om mindre bergutfall förekommit.



Figur 11. Placering av hål för vajersågning. Ytor som sågas markerat i rött.

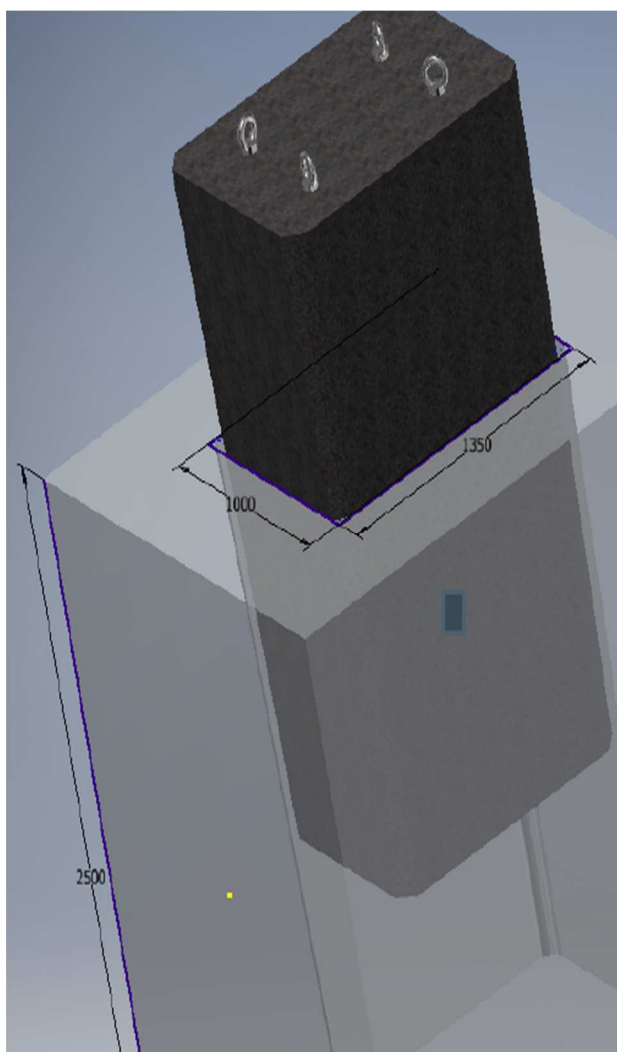
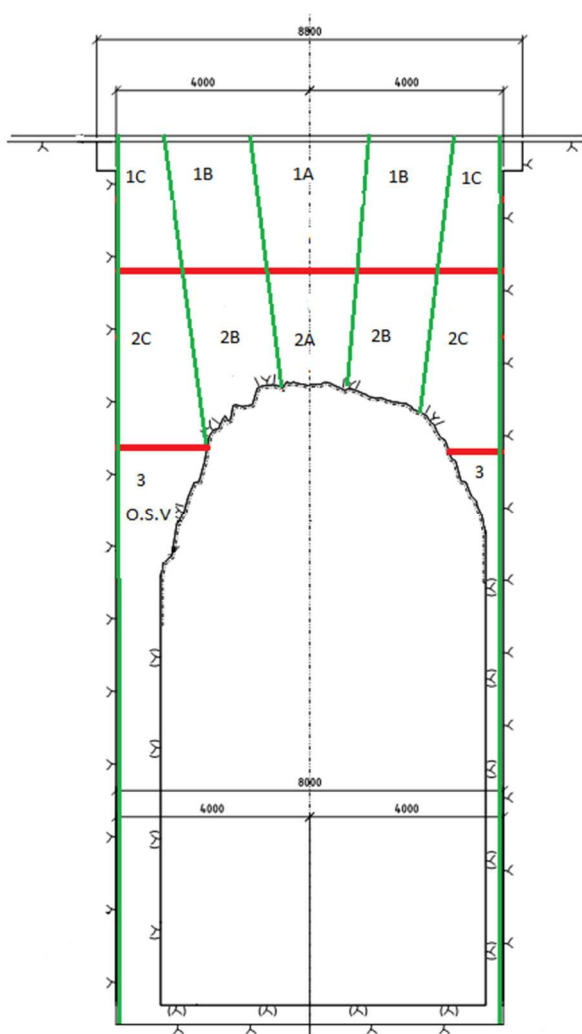


Figur 12. Uppmätt borrhålsavvikelse i utfört 100 m långt horisontellt kärnborrhål.

## 5.2 Berguttag av vertikalschakt

Berguttaget av vertikalschakten har vid tidpunkten för denna artikel ej påbörjats, uttaget för det första schaktet kommer att påbörjas under våren 2020. Metodiken för berguttaget går i stort ut på att efter ridåinjektering och förbultning frilägga bergblock med hjälp av sågning och sedan lyfta dessa upp ur schakten. Blocken sågas upp i storlekar upp till max 10 ton och lyfts sedan upp i galleritunneln med kranbil för borttransport och sprängning. Principen för uttag av bergblocken redovisas i Figur 13. Inledningsvis kommer hål för sågningen att borrar. Borrhålen borrar en aning vinklade för att bilda block som låser ihop nedåt och således inte kan falla ner av egentyngd i vattenvägen.

Därefter sågas vertikala snitt ner till ca 2,5 m djup, varefter ett horisontellt snitt sågas som frigör blocket som sedan kan lyftas upp i ingjutna ögglebultar. Bergblocken sågas och lyfts sedan upp stegvis enligt princip för uttagsordning enligt Figur 13. När genombrott skett ner till vattennivån i sugrörstunneln utförs avstängning med de befintliga sättarna. När sättarna är på plats kan sugrörstunneln torrläggas uppströms och väggar och tak kan skrotas och säkras. Därefter sågas den avslutande delen ut för den nya luckans falslägen, varefter konstruktion av falsar i det nya schaktet kan utföras.



Figur 13. Princip för berguttag i vertikalschakt. Den befintliga tunneln i figuren till vänster är i drift och vattenfylld upp till ca anfangsnivå under berguttaget.