

## **UNDERSJØISKE BERGHALLER I SINGAPORE – BERGMEKANISKE UTFORDRINGER**

### **Subsea rock caverns in Singapore – rock mechanical challenges**

PhD Kristin H. Holmøy, SINTEF Byggforsk, Siv ing. Petter Plassbak, Multiconsult, PhD Ming Lu, Nanyang Technological University, Singapore

### **SAMMENDRAG**

Jurong Rock Caverns prosjektet i Singapore er det første undergrunnsanlegget for flytende hydrokarboner i Sørøst Asia, og ble offisielt åpnet 2. september 2014. Det er sprengt ut 9 berghaller under Banyan bassenget ved Jurong øy i Singapore. Lagerhallene har et totalt volum på 1,47 millioner m<sup>3</sup> og frigir 60 hektar landareal for bruk til annen industri/annen virksomhet. Dette er svært viktig for et land som Singapore med begrenset areal tilgjengelig. Byggherren er Jurong Town Cooperation (JTC) og STM-konsortiet (SINTEF, Tritech og Multiconsult) har vært ansvarlig for prosjektledelse og teknisk oppfølging på vegne av byggherren. De geologiske forholdene i området er beskrevet som grunnlag for å forstå utfordringer som ble møtt som for eksempel driving av to vertikale sjakter og utfordringer i forbindelse med vannlekkasjer. Design og sikringsomfang er beskrevet; samt kort om forundersøkelsene.

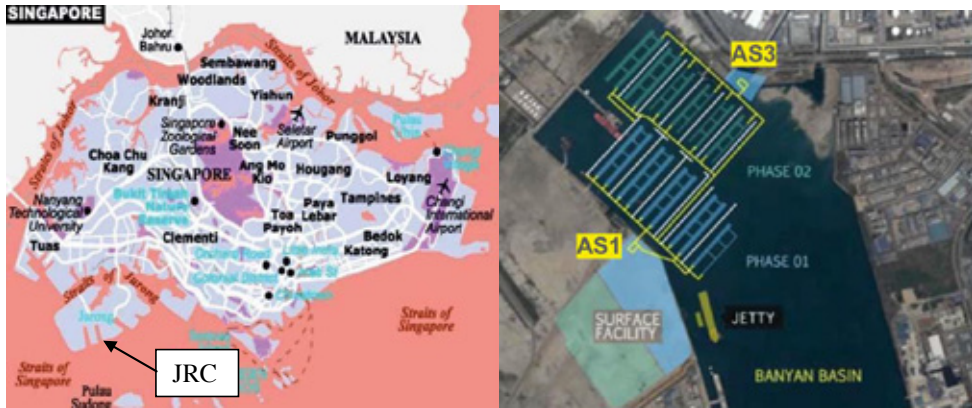
### **SUMMARY**

At the Jurong Rock Caverns Project 9 subsea caverns are built under the Banyan basin at the Jurong Island Singapore. The JRC-project is the first commercial underground rock cavern storage facility for hydrocarbons in Southeast Asia, and was officially opened on 2<sup>nd</sup> of September 2014. The rock caverns have a total storage capacity of 1.47 million cubic meters; the caverns freed up 60 hectares of surface land for higher-value facilities. This is very important for Singapore since they have limited space available. The builder and owner of the JRC-project is Jurong Town Cooperation, and for this project the STM Consortium (SINTEF, Tritech and Multiconsult) has been responsible for project management and technical follow-up on behalf of JRC. The geological conditions are described as basis for understanding the challenges met during excavation of two vertical access shafts and water inflow. Design and rock support are described as well as a brief description of the site investigations carried out.

### **INNLEDNING**

"Jurong Rock Caverns"-prosjektet (heretter kalt JRC-prosjektet) har vært under bygging i Singapore de siste 8 årene, og før det var det et omfattende undersøkelsesprogram som gikk over tre år (2003 – 2007). Ved å bygge undergrunnsanlegg for lagring av oljeprodukter frigis 60 hektar landareal, og dette er viktig for Singapore som har begrenset med areal tilgjengelig. Hallene er plassert under sjøen ved øya Jurong som er delvis kunstig oppbygd og er etablert med vertikale adkomstsjakter fra overflaten. Det er sprengt ut 9 berghaller med et totalt volum på 1,47 millioner m<sup>3</sup> for lagring av oljeprodukter. Figur 1 viser plasseringen av JRC-prosjektet. Jurong Rock Cavern er det første kommersielle underjords lagringsanlegget for

flytende hydrokarboner i Sørøst-Asia. De to første berghallene ble åpnet og tatt i bruk i september 2014, og alt av sprengningsarbeider er nå ferdig. To adkomstsjakter og flere km med adkomst tunneler er sprengt ut.



Figur 1 Til venstre: plassering av JRC-prosjektet på øya Jurong (Winn et al. 2012); til høyre: oversikt over plassering av berghallene under havnivå i Banyan bassenget (Tee et al. 2012)

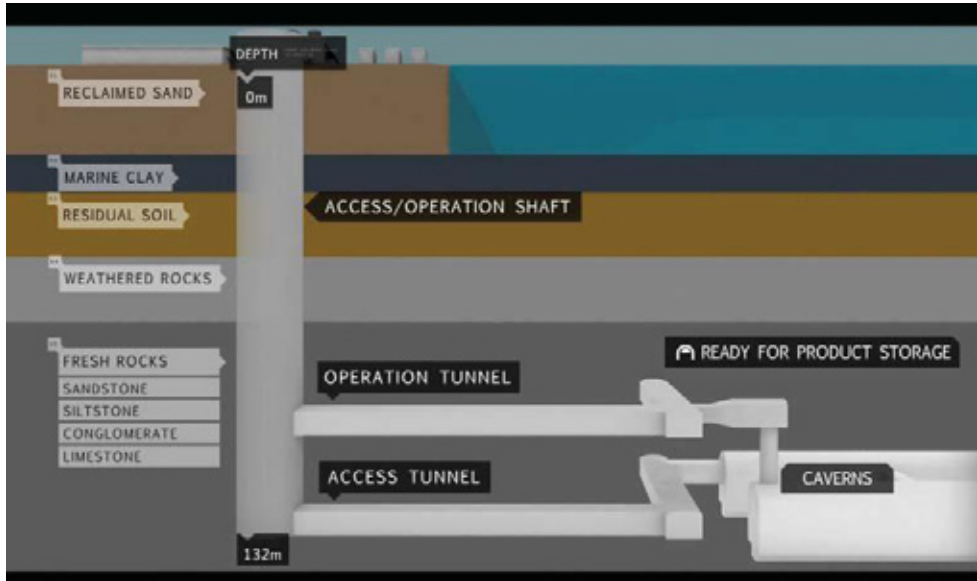
SINTEF tok sammen med Tritech på seg det tekniske ansvaret med å planlegge og utføre geologiske undersøkelser for dette prosjektet der DEVICO var engasjert for å gjennomføre et omfattende opplegg med avviksboring for spenningsmålinger og prøvetaking av berggrunnen. Spenningsmålinger ble også utført i sandsteinen på Jurong Island. I dag er dette et prosjekt der SINTEF sammen med Multiconsult og vår samarbeidspartner Tritech i Singapore er i førersetet som prosjektets Project Manager. SINTEF, Tritech og Multiconsult dannet et konsortium i forbindelse med planlegging og oppfølging av JRC-prosjektet. Oppdraget til SINTEF-Tritech-Multiconsult konsortiet inkluderer prosjektledelse og teknisk oppfølging på vegne av byggherren som er Jurong Town Cooperation (JTC). Byggingen er utført som totalentrepriser; for drivingen av sjaktene (fase 1) var det Sato Kogyo som var entreprenør og for drivingen av berghallene (fase 2) har Hyundai vært entreprenør.

Største bergmekaniske utfordringene har vært knyttet til drivingen av de vertikale sjaktene og større innlekkasje enn forventet i enkelte områder.

## GEOLOGISKE FORHOLD

Området ligger sørvest i Singapore og bergartene tilhører Jurong formasjonen med sedimentære bergarter fra sein Trias til tidlig Jura. Sjaktene ligger på øya Jurong, i et område som er kunstig oppbygd, og de øverste 15 meterne består av tilført sand, deretter er det 30 meter med forvitringsjord over et ca. 8 m tykt lag med forvitrede sedimentære bergarter. Det vil si at friske sedimentære bergarter bestående av lag av siltstein, sandstein, konglomerat, leirstein og kalkstein først påtreffes ca. 53 m under overflaten. Se Figur 2 for en oversikt over de geologiske lagene. De sedimentære bergartene skjæres gjennom av gangbergarter som porfyritt og diabas. Selve berghallene blir drevet med bunnen 132 m under havnivå, og minste overdekning er 70m. De sedimentære bergartene er svakt metamorfisert og er derfor noe hardere enn vanlige sedimentære bergarter. Bergmassekvaliteten har vist seg å være god og godt egnet for å bygge lagerhaller.

Strukturgeologisk er de sedimentære bergartene foldet og danner en antyklinal der foldeaksen har et svakt fall på 10°-30° mot NNØ. To hovedsprekkesett er registrert i området med strøk retning på henholdsvis NS og ØV med vertikalt til sub-vertikalt fall. Mange sprekker har noe kvarts og kalkspat belegg. Lagdelingssprekkene er for det meste tette, men det finnes også noen sprekker som har åpninger som fører vann.



Figur 2 Oversikt over de geologiske lagene og høydeplassering for JRC-prosjektet (Tee et al. 2012)

### UNDERSØKELSESPROGRAM

SINTEF i samarbeid med konsulentfirmaet Tritech (lokalt i Singapore) laget et omfattende undersøkelsesprogram for JRC-prosjektet. Figur 3 er fra planleggingen av undersøkelsesprogrammet i 2003 og viser bl.a. Professor Einar Broch, Arne Myrvang (NTNU), Jian Zhao (NTU), i forbindelse med planlegging av undersøkelsesprogrammet.

Det ble utført undersøkelser i flere omganger i perioden 2004 til 2007. Berghallenes plassering under havnivå gjorde det nødvendig med et relativt stort undersøkelsesprogram for å være sikker på at bergmassens egenskaper var egnet for bygging av store berghaller.



**Figur 3** Bildet er tatt i januar 2003 i forbindelse med planleggingen av undersøkelsesprogrammet for JRC-prosjektet (Bildet er tatt av Ming Lu).

Undersøkelsesprogrammet besto av (Lu., M et al., 2006):

- Refleksjonsseismikk (30 km marin seismikk og 10 km på land), for å finne generell geologi og markerte svakhetssoner
- Retningsstyrt kjerneboring (boring horisontalt), for å bestemme bergmassekvalitet i området for plassering av haller
- Vertikale kjerneborhull for å bestemme bergmassekvalitet mot dypet
- Orienterte kjerneboringer for å finne orientering av sprekksett og bestemme optimal orientering på hallerne
- Geofysiske målinger i borehull for å korrelere mot seismikken som ble utført samt seismisk hastighet målt på kjerne i laboratorium
- Hydrogeologiske tester in-situ for å finne hydraulisk konduktivitet og vurdere hvordan vann/olje vil bevege seg i bergmassen
- Spenningsmålinger for å bestemme in-situ spenningsforhold i forbindelse med plassering av berghallene
- Laboratorium testing; mekaniske egenskaper (E-modul, Poisson's forhold, enaksialtrykkfasthet) + testing av borbarhet

SINTEF utførte spenningsmålinger, og Figur 4 viser et bilde tatt i forbindelse med hydraulisk splitting i mars 2004.



**Figur 4 Utførelse av hydraulisk splitting (SINTEF Byggforsk)**

Retningsstyrt kjerneboring ble blant annet brukt for å få informasjon om bergmassen under havnivå. Det norske firmaet Devico AS var med og samarbeidet med Tritech i forbindelse med den retningsstyrte boringen.

## DRIVEMETODE OG SIKRING

### *Sjakter*

To sjakter, AS1 og AS3 på hver sin side av Banyan bassenget, se Figur 1, ble drevet for å få adkomst til undergrunnsanlegget. Sjaktene har en varierende diameter på 21 til 24 m øverst til 18,3 m nederst, og ble drevet ned til 132 meters dyp for å komme ned til berg med god bergmassekvalitet. Fra disse sjaktene ble det drevet med konvensjonell boring og sprengning; flere adkomst tunneler, lagerhaller og vanngardinsystem fra nivå 1 (100 meter under hav nivå) og selve berghallene fra nivå 0 (132 meter under havnivå).

Drivingen av sjaktene startet tidlig i 2007 og var ferdigstilt mot slutten av 2009. I de øverste lagene med tilført sand og forvittringsjord ble massene gravd ut med gravemaskin og heist opp. Boring og sprengning tok over da de kom ned i forvitret bergmasse. Det ble benyttet varierende sikringsmetode i de forskjellige geologiske lagene (Tee et al. 2012):

- Plasstøpte slissevegger ("diaphragm walls") pluss ringbjelker av betong for hver 4. meter i sand og forvittringsjord
- Betongutstøpning (1 m tykk) på stedet i forvitret bergmasse
- Fiberarmert sprøytebetong og bolter i frisk bergmasse

Figur 5 viser driving av sjakt.



**Figur 5** Til venstre vises en typisk seksjon av slissevegger og ringbjelker av betong; Til høyre sees overgangen mellom slissevegger og betong utstøpning (Tee et al. 2012)

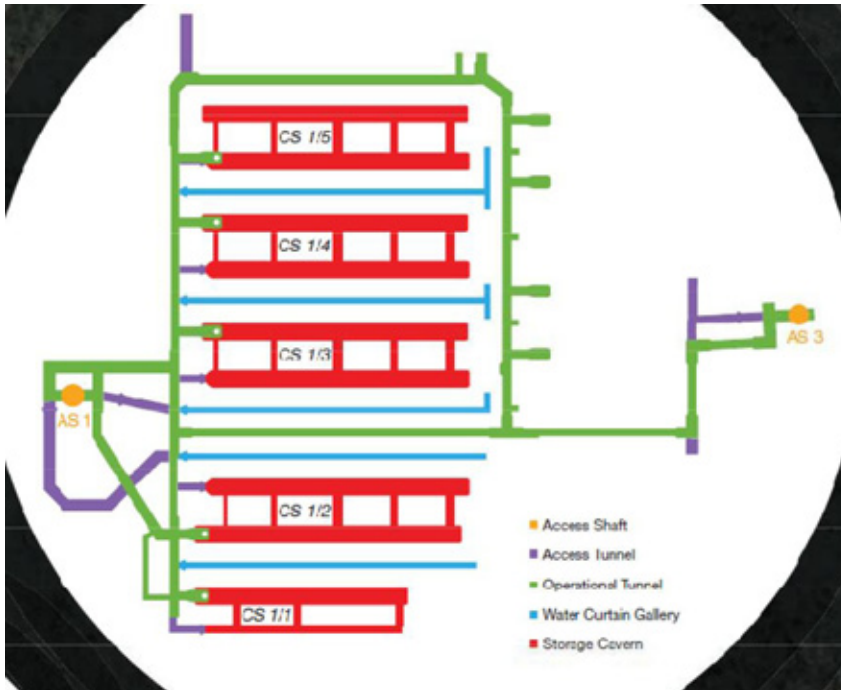
Da installasjon av de prefabrikerte betongsegmentene var ferdig ble det utført boring av 4 vertikale sonderhull for å kontrollere om det var svakhetssoner og/eller vannlekkasjer i de neste 20 meterne. Om det ble påtruffet vannlekkasjer ble det gjennomført injeksjon. Nye sonderhull ble boret når drivingen av sjakten var kommet 15 m dypere (Tee, et al. 2012). Det ble påtruffet en del vannlekkasjer og utført injeksjon som medførte forsinkelser og at drivingen av sjaktene tok lenger tid enn opprinnelig planlagt.

### *Haller*

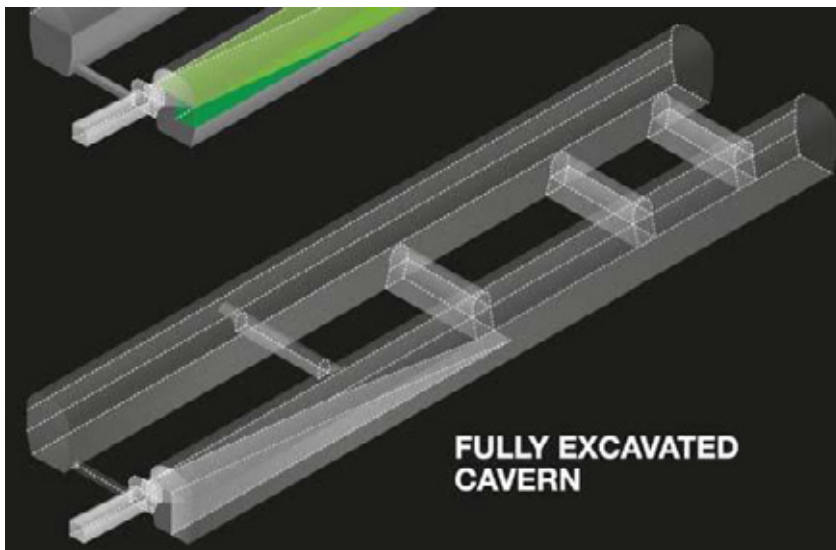
Figur 6 viser planløsningen for berghallene; der 8 av de 9 berghallene er koblet sammen to og to til en enhet. Figur 7 viser hvordan to og to haller er koblet sammen. Vanngardinsystemet ble bygget og trykksatt før berghallene ble bygget; dette for å hindre uttørking bergmassen samt for å sikre at vanntrykket til enhver tid er tilstrekkelig høyere enn trykket inn i berghallene.

Berghallene er 340 m lange, 20 m brede og 27 m høye. Sprengningen ble utført i tre trinn; først ble det tatt ut en takort (top heading), deretter ble det sprengt to benker på 9 meter høyde hver, se Figur 8.

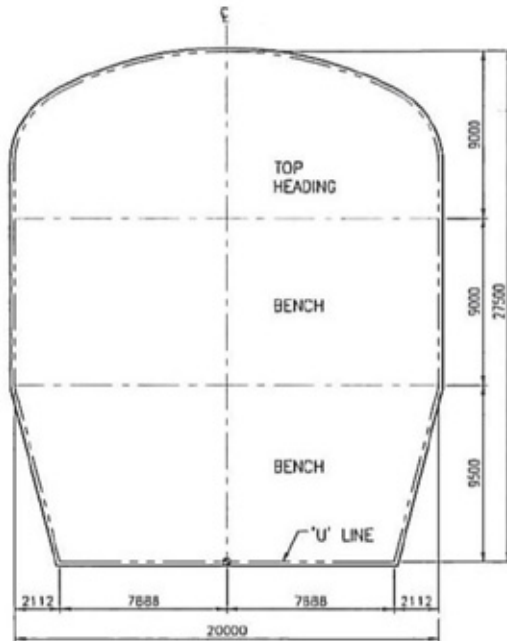
I forbindelse med bestemmelse av permanent sikring og endelig bestemmelse av design utførte personell fra STM-konsortiet analytiske beregninger og numeriske analyser for å kontrollere om forslaget fra entreprenør til endelig design, drivemetode og sikring av berghallene var optimal (Winn et al. 2012). Sikringen ble bestemt ut fra Q-systemet. Det ble brukt flere typer programvare for numeriske analyser.



Figur 6 Planløsning for berghallene CS1/1 til CS1/5, (Tee et al. 2012)



Figur 7 Skisse som viser hvordan to og to haller er koblet sammen., (Tee, et al. 2012)



Figur 8 Typisk tverrsnitt for berghallene (Tee et al. 2012)

Examine2D fra Rocscience ble brukt for å vurdere forholdet mellom forventet påført spenningslast og bergmassens styrke i gitte punkt. Det ble funnet at spenningene var små sammenlignet med bergmassens styrke. En analyse av 3-Dimensjonal kile geometri ble utført med bruk av "Unwedge program" også fra Rocscience. Dette programmet ble brukt for å studere hvordan de forskjellige sprekkesettene kan danne kiler som kan skape instabilitet.

UDEC 2D ble også brukt (diskontinuerlig programvare fra Itasca); resultatene viste at det er mest gunstig å orientere berghallene omtrent vinkelrett på foliasjonssprekkene, og at de høyeste spenningene vil opptre i hengen. Noen av de verste tilfellene av kiler som ble funnet i "Unwedge" ble også testet og stabilisert av den påførte sikringen.

Rocscience programmet Phase2 (2-dimensjonal endelig element metode) ble også brukt for å teste forskjellige løsninger for bergsikring (sprøytebetongtykkelse og boltetyper, lengde og avstander). Basert på resultatene fra de numeriske analysene nevnt over ble det konkludert med at foreslått design og sikring så ut til å være tilstrekkelig.

Foreslått sikring (basert på Q- verdier) ble lagt inn i en tredimensjonal UDEC-modell (3DEC fra Itasca) (Winn og Ng, 2012). Den tredimensjonale UDEC-modellen ga også resultater som ble brukt til å forutsi hvor store deformasjoner som kunne forventes i heng av hallene. Resultatene viste en maksimal vertikal deformasjon i heng på ca. 8 cm, noe som er 0,3% av høyden på hallen (Winn og Ng, 2012). Den reelle deformasjonen viste seg å bli mindre enn estimert.

Endelig sikring av berghallene som foreslått av entreprenør Hyundai (Winn og Ng, 2012) består av sprøytebetong og bolter med varierende tykkelse og bolteavstander avhengig av Q-



verdi, se tabell 1. Det ble brukt glassfiber bolter som standard bolter for permanentsikring. For Q-verdier høyere enn 10 ble det brukt sprøytebetong uten fiber.

**Tabell 1 Bergsikring som foreslått ut fra Q-verdier (Winn og Ng, 2012)**

Struktur	Q-verdi	Heng / endevegg			Side vegg / endevegg		
		Bolte avstand	Bolte lengde	Tykkelse spr betong (u/fiber)	Bolte avstand	Bolte lengde	Tykkelse spr betong u/fiber
Berg hall	>40	Spredd bolting	4,4 m	80 mm	Spredd bolting	5,3 m	80 mm
	10-40	1 bolt / 5,2 m <sup>2</sup>	4,4 m	80 mm	Spredd bolting	5,3 m	80 mm
	4-10	1 bolt / 4,4 m <sup>2</sup>	4,4 m	60 mm *	1 bolt / 5,2 m <sup>2</sup>	5,3 m	90 mm
	1-4	1 bolt / 2,8 m <sup>2</sup>	4,4 m	110 mm *	1 bolt / 4 m <sup>2</sup>	5,3 m	100 mm *
	<1	1 bolt / 1,9 m <sup>2</sup>	4,4 m	140 mm *	1 bolt / 2,5 m <sup>2</sup>	5,3 m	130 mm *
* Fiberarmert sprøytebetong ved Q-verdier <10.							

Boring og sprengning startet fra sjakt AS1 med tre stuffer, og etter en bratt læringskurve økte antall stuffer for driving raskt til 12. Det var 7 borerigger på anlegget som helst ikke skulle ha for mye nedetid. Dette var en svært krevende jobb med tanke på logistikk, ventilasjon og arbeidstider. Ekstra komplisert ble det da det var mange underleverandører/selskap involvert med spesialist kompetanse som måtte koordineres. Det var strenge regler rundt håndtering av eksplosiver, og et eget firma med de riktige tillatelser hadde ansvaret for sprengning (Kim, et al. 2012). Det å lede et så stort undergrunnsanlegg med usikkerhet rundt geologiske forhold som bergmassekvalitet og vannlekkasjer var krevende.

## UTFORDRINGER KNYTTET TIL VANN

Berghaller og omkringliggende tunnelsystem ble alle drevet i sedimentære bergarter; de vanligste bergartene var sand-, leir- og kalkstein. I tillegg er det en del vertikale til subvertikale gangbergarter som skjærer gjennom de sedimentære lagene. De fleste lagdelingsprekkene var tette, men det ble påtruffet noen lagdelingsprekker og løse bergartslag som førte vann. I tillegg var det noen av de vertikale sprekkene og gangbergartene som førte vann (Kim, et al. 2012).

En nærmere beskrivelse av vannlekkasjer og tettingstiltak er gitt i (Kim, et al. 2012). De største vannlekkasjene ble påtruffet i nivå 1 (100 muh.); vanntrykket ble i enkelte punkt målt til nær statisk vanntrykk fra havoverflaten. I nivå 0 (132 muh.) hvor berghallene ble tatt ut var det mindre vannlekkasjer. Men i nivå 1 ble det utført injeksjon i stort omfang. For det meste ble det brukt sementbaserte masser, og normal prosedyre med sonderboring, injeksjon og kontrollboring ble gjennomført. I enkelte områder ble det nødvendig med mer enn en injeksjonsomgang for å oppnå tilfredsstillende tetthet. Vanligvis ble det boret 15 m lange injeksjonsskjerm, og ny skjerm ble boret etter to salvelengder (2 \* 4,5 m). Injeksjonshullene ble forsøkt boret slik at borehullene skar lagdelingsprekken med størst mulig vinkel. Injeksjonsskjermene ble tilpasset de geologiske forholdene til enhver tid. Det ble likevel

observert vannlekkasjer i boltehull som hadde penetrert den tette sonen rundt tunnelen. Selv om injeksjon ble utført ble det i ettertid registrert vannlekkasjer som medførte behov for etterinjeksjon.

## KONKLUSJONER

JRC-prosjektet har vært et krevende prosjekt hvor samarbeidet med JTC har vært bra. Det har vært bergmekaniske utfordringer der STM-konsortiet har fått bruke sin kompetanse og erfaringer fra kraftverksbransjen samt olje- og gasslager haller i Norge. En viktig del av arbeidet har vært prosjektledelse og risikohåndtering på vegne av JTC. Gjennom dette prosjektet er det dannet en god plattform for videre samarbeid i STM-konsortiet mot nye utfordringer innenfor undergrunnsteknologi i Singapore.

## REFERANSER

Kim, Y., Teo, T.Y, and Ng, M. (2012): "Construction of Tunnels and Caverns for Phase 1 Jurong Rock Caverns" ACUUS-Conference in Singapore, Advances in Underground Space Development – Zhou, Cai & Sterling (eds), The Society for Rock Mechanics & Engineering Geology (Singapore)

Lu, M., Cai, J.G. and Beitnes, A. (2006): "Site Investigation for Subsea Oil and Gas Storage Rock Caverns at Jurong Island of Singapore", International Workshop on the Underground Storage Facilities in the Conjunction with the 4<sup>th</sup> Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS 2006), ISRM International Symposium.

Tee, W.S., Young, T.T., Chih, C.P and Ng, M. (2012): "Development of Jurong Rock Caverns in Singapore" ACUUS-Conference in Singapore, Advances in Underground Space Development – Zhou, Cai & Sterling (eds), The Society for Rock Mechanics & Engineering Geology (Singapore)

Winn, K., Ng, M., Young, T.T. and Chih, C.P. (2012): "Comparison of Rock Support Design for Underground Hydrocarbon Storage Caverns" World Tunnel Conference in Bangkok, Thailand 2013

Winn, K and Ng, M. (2012): "Rock Support Design Underground Hydrocarbon storage Caverns in Singapore", ACUUS-Conference in Singapore, Advances in Underground Space Development – Zhou, Cai & Sterling (eds), The Society for Rock Mechanics & Engineering Geology (Singapore)