© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

AVANCERAT BERGUTTAG FÖR ETT INKLÄTT GASLAGER, LRC DEMO, I GETINGE

Camilla Allvin, Skanska Sverige AB
Robert Sturk, Skanska Sverige AB
Per Tengborg, LRC Demo AB

1. INLEDNING

I Getinge utanför Halmstad byggs världens första demonstrationsanläggning för naturgaslagring enligt konceptet LRC, Lined Rock Cavern. Lagringskonceptet innebär att gasen lagras i gasfas i ett stålinklätt bergrum under mycket högt tryck (20 MPa). Denna lagringsteknik har utvecklats i Sverige under de senaste 20 åren och har gått från förstudier, via pilotförsök i Grängesberg till den nu aktuella demonstrationsanläggningen. I föredragen från Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte –99 finns en artikel, "Inklätt bergrumslager för lagring av naturgas vid Halmstad" (Tengborg 1999), där funktion och teknik för inklädda bergrumslager beskrivs ytterligare.

Bergrummet sprängs ut som en stående cylinder med kupolformat tak och välvd botten, en ovanligt komplicerad geometri att bygga. Diametern på rummet är 36 m och höjden 52 m. Kraven på berguttaget har varit exceptionella med avseende på geometri, skadepåverkan vid sprängning och bergytans "skrovlighet". Detta för att säkerställa gaslagrets funktion vid det höga lagringstrycket.

2. OMRÅDETS GEOLOGI

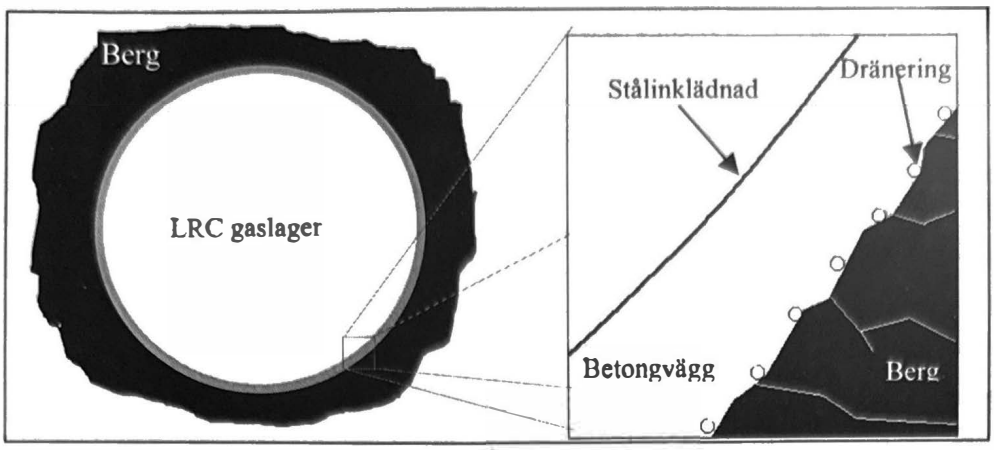
Bergmassan i området domineras av en grå till grå-röd gnejs. Kvaliteten är generellt god med Q-värden större än 10 och med låg sprickfrekvens, RQD-värden från borrkärnor ligger oftast över 80%. Bergmassan genomskärs dock av zoner av lägre kvalitet och med en hög sprickfrekvens och viss vittring. Dessa zoner kan härröras till de amfibolitgångar som uppträder i bergmassan och som sammanfaller med foliationen.

3. KRAVSPECIFIKATION FÖR LRC KONCEPTET

I förfrågan till entreprenörerna framlades beställarens krav och avseende uttaget av bergrummet preciserades dessa för slutlig geometri och ytstruktur. Entreprenören har själv föreslagit produktionsmetod för uttag av bergrum och montage av dräneringssystem. Anslutningspunkten för den nedre tunneln var låst men inte den övre. Huvudsyftet med detta var att möjliggöra ett effektivt berguttag.

Toleranserna på bergrumsväggens slutkontur har för bergsammanhang varit mycket höga, vilket bland annat leder till en väldefinierad tjocklek av slutlig betonginklädnad. Av funktionstekniska skäl infördes kravet att slutförstärkt yta ska vara inom 0,3 m toleran s, det vill säga före montage av dräneringssystemet, se Figur 1 nedan.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



Figur 1. Horisontellt tvärsnitt genom lagret med uppförstorad vägg

En speciell sprutbetong togs fram i samverkan mellan entreprenör och beställare. Målet var att ta fram en sprutbetong med goda produktionsegenskaper och samtidigt relativt låg hållfasthet och förhöjd permeabilitet.

4. BERGRUMSUTTAG LRC DEMO

Den verkliga produktionen av tillfartstunnlar och bergrum har präglats av att vara en dynamisk process. En aktiv design har tillämpats med avsikt att baserat på erfarenheter på plats kunna anpassa det verkliga uttaget till det mest fördelaktiga. Uttaget av bergrummet och färdigställandet av väggytan är uppdelat i många olika moment som endast kan utföras i en viss ordning. Detta har gjort att möjligheten till parallella aktiviteter varit mycket liten.

4.1 NEDFARTSTUNNLAR

Nedfartstunnlarna har en tvärsnittsarea av 28 m^2 (5,8 m bred och 5 m hög). Tunnlarna har drivits med konventionella metoder, dvs borrning, sprängning och utlastning. Till följd av bergets kraftiga inspänning fick antalet salvhål ökas med ca 25 %, från ca 60 till ca 75 st. Den specifika borrningen blev därmed ca 2,7 bm/m^3. Sprängmedelsförbrukningen ökade i motsvarande mängd till ca 1,9 kg/m^3. Då det gäller nyckeltalet för specifik borrning är detta normalt för en tunnelarea av denna storlek. Nyckeltalet för specifik laddning är högt till följd av inspänningen, ett "normalberg" brukar motsvara en specifik laddning på ca 1,0 kg/m^3.

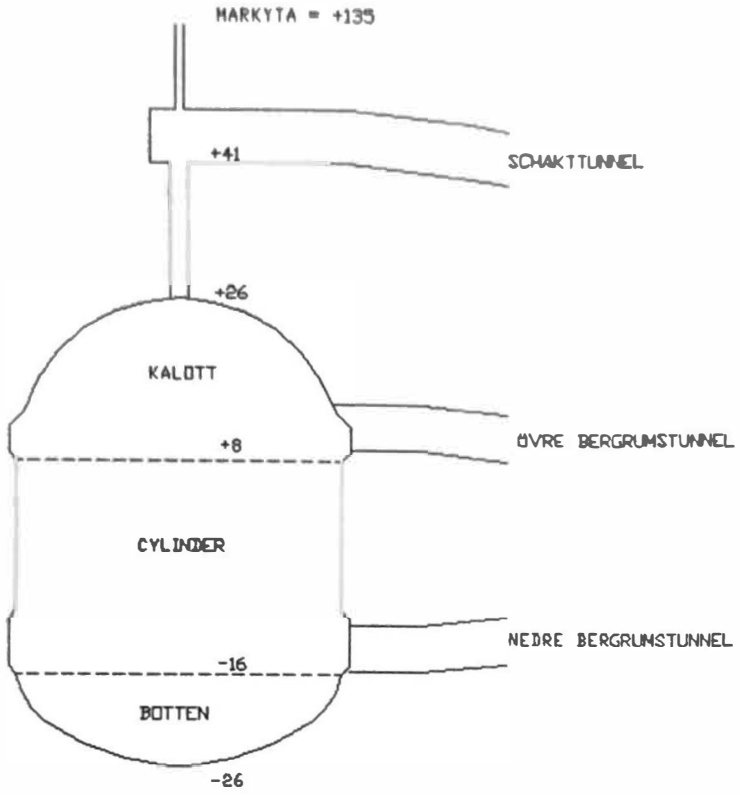
Utlastningen har skett med bandlastare med sidotippande skopa. Tack vare att en sidotippande lastare inte behöver svänga in över flaket på en lastbil utnyttjas det knappa utrymmet direkt framme vid tunnelstuffen maximalt.

Vid tunnlarnas övergångar till bergrummet har sk barriärlägen utförts. I dessa kommer en betongplugg att gjutas med syfte att hålla emot vid trycksättningen av lagret. Barriärlägena har drivits väldigt försiktigt, dels med en pilottunnel och efterföljande stross och dels med en avslutande slätsprängning. Slätsprängningen utfördes med borrning med centrumavståndet 150 mm och med laddning i vartannat hål med skonsamma sprängämnen, Gurit 11 mm. Barriärlägena har utförts med en areaökning in mot bergrummet så att betongpluggarna kilas fast ut mot tunneln vid trycksättningen.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

4.2 BERGRUM

I Figur 2 visas en schematisk bild över bergrummets olika delar och nivåer.

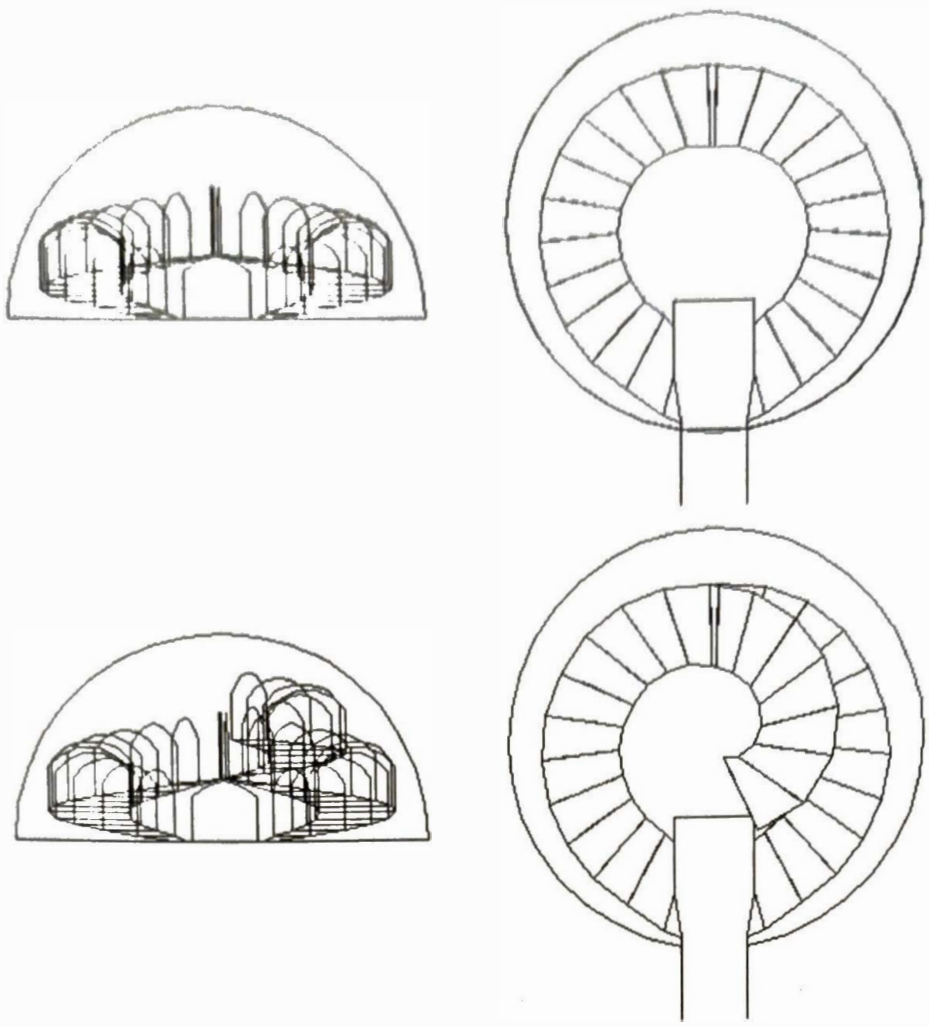


Figur 2. Schematisk bild över bergrummets olika delar och nivåer.

4.2.1 Kalott

Bergrumsuttaget inleddes med att Övre Bergrumstunneln drevs in i bergrummet. Eftersom höjden från ingångsnivån (+9) upp till kalottens högsta nivå (+26) var 17 m kunde inte kalotten tas ut i en sekvens. För att lösa uttaget skapades en övre nivån på +18. Upp till denna nivå drevs två spiraltunnlar runt i den blivande kalotten med början direkt vid ingången till bergrummet, se Figur 3. Dessa drevs åt var sitt håll med lutningen 1:6. I och med stigningen blev radien på dem mindre och mindre. Under en del partier blev lutningen så brant som 1:5, särskilt då rampbygget gjordes över spiraltunnlarna. Detta i kombination med den allt snävare radien gjorde att en del problem uppstod vid transport av fordon upp och ner för rampen. En hel del arbete fick läggas ned på vältning av vägbanan för att tex. borrvagnen skulle kunna ta sig upp. Det yttre anfanget hölls hela tiden ca 1-3 meter innanför slutlig kontur. Spiraltunnlarna möttes på andra sidan, mitt emot ingången, på nivån ca +15. Därifrån fortsatte den vänstra spiraltunneln upp i en ramp över den högra. Takstrossar bildade de erforderliga massorna för rampbygge i den högra spiraltunneln. När denna spiraltunnel kommit upp till nivån ca +18 började en större yta tas fram. När en tårtbit av tillräcklig storlek för konturspräng ning tagits fram påbörjades borrningen för denna. När området var färdigsprängt ut till slutlig kontur förstärktes det med sprutbetong och bult och därefter gick man över till att konturspränga nästa tårtbit. På detta vis, tårtbit för tårtbit, färdigställdes nivån ner till ca +19.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



Figur 3. Spiraltunnlar plus övre ramp i kalotten.

Figur 4. Högra spiraltunneln samt ramp över den vänstra spiraltunneln.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

När högra sidan var färdigställd vände man om och gick över på den vänstra sidan. För att kunna göra det var man tvungen att lasta ut de massor som låg i den högra spiraltunneln och i stället använda den som uppfart till stigningen över den vänstra spiraltunneln, se Figur 4. På liknande sätt som den högra sidan, tårtbit för tårtbit, färdigställdes även denna sida och översta delen av kalotten var därmed framtagen.

Nu fälldes valvet över ingången och nivån +19 sänktes till ca +12. Nu kunde man färdigställa ytterligare väggyta med först grovsprängningar, därefter kontursprängningar och sist förstärkning med sprutbetong och bult.

Innan någon ytterligare sänkning kunde göras var man tvungen att montera den översta delen av dränagesystemet eftersom arbetshöjden i ett senare skede skulle bli för hög och man skulle inte räcka till med den utrustning som fanns att tillgå.

Den sista sänkningen gjordes till nivå +8 då hela kalottens "golv" jämnades av. I samband med konturskjutningarna på denna nivå togs även arbetsnischen med som är planerad att användas för stålmontage och gjutning av betongmanteln.

4.2.2 Cylinder

Uttaget av cylinderdelen inleddes med att en ringtunnel drevs runt periferin i botten av cylinderdelen. Denna tunneln drevs på nivå –17 och i samband med konturskjutningar av denna utfördes även den nedre arbetsnischen. Man drev även en tunnel in till centrum av cylindern för att hitta igen det grovhål som pilotborrats ner till nivå –22 i samband med raiseborrningen av det schakt som förbinder bergrummet och ovanjordsanläggningen. Detta grovhål utnyttjades senare för att spränga upp centrumschaktet. Långhålsborrningen av cylinderdelen inleddes innan tunnlarna på nivå –17 var färdigställda. Detta krävde noggrann koordination mellan arbetsmomenten på de två olika nivåerna. Hela cylinderns yta långhålsborrades i ett moment. Totalt borrades 649 hål med längder mellan 18 och 25 meter. Denna borrning utfördes av Svensk Maskinborrning AB med pallborrningsriggar.

Totalt borrades ca 10 850 bm vilket ger en specifik borrning på 0,63 bm/m^3. Eftersom konturraden och hjälparraderna är medtagna i beräkningen av specifik borrning är det svårt att jämföra denna borrning med konventionell pallborrning för produktionssprängning. Räknar man bort de yttersta raderna fås en specifik borrning på ca 0,29 bm/m^3 vilket ungefär motsvarar en produktionssprängning med liknande pallhöjd.

Borrningsinsatserna koncentrerades till att börja med till konturhål med tillhörande hjälparrad samt de borrhål som berörde centrumschaktet. Detta för att centrumschaktet skulle kunna sprängas upp så tidigt som möjligt och lastning inledas. Därefter borrades resterande hål upp. Då centrumschaktet, ca ϕ10 meter, sprängts och lastats ut och alla hål var färdigborrade inleddes själva cylinderuttaget. Hela cylinderdelen sprängdes direkt, i olika sekvenser, i hålens fulla längd. Ett tak sparades dock över ingången till bergrummets mitt för att möjliggöra lastning. Tack vare ringtunneln hade man tre platser att lasta på istället för en som planerades från början (endast tunneln in till centrum av cylindern). Med tre lastplatser uppnåddes dessutom ett jämnare flöde från sprängmassorna.

Med beräkning av svällvolymer kunde nivån på överdelen av sprängmassorna planeras till att läggas på nivå +10. Detta krävdes för att nå upp igen till de arbeten som fanns kvar att göra i kalottdelen, montering av dränsystem mm. Först när dessa var avklarade samt erforderligt förstärkningsarbete var utfört påbörjades utlastningen igen. Utlastningen skedde med

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

hjullastare och dumprar. Uppe på lösmassorna arbetade samtidigt en grävmaskin med omflyttning av massorna så att rasflödet hölls kontinuerligt. Man lastade ut så pass mycket att man sänkte av nivån ca 9,5 meter varvid förstärkning och montering av dräncringssystem och mätsystem återupptogs, se Figur 5. När nivån var färdigställd återupptogs utlastningen för sänkning av nivån ner till –17. I detta skede sprängdes också taket över nedre ingången bort. Detta arbete var svårare än beräknat eftersom de förborrade hålen till stor del var igenrasade samt att sprängningen av bergmassorna över taket ej hade gått ut fullständigt. Detta ledde till en stor andel omborrning av valvet samt svårigheter att komma till med utrustning, vilket inte planerats. När valvet sprängts och berget lastats ut upprepades proceduren för förstärkning och montering av dräneringssystem och mätsystem.

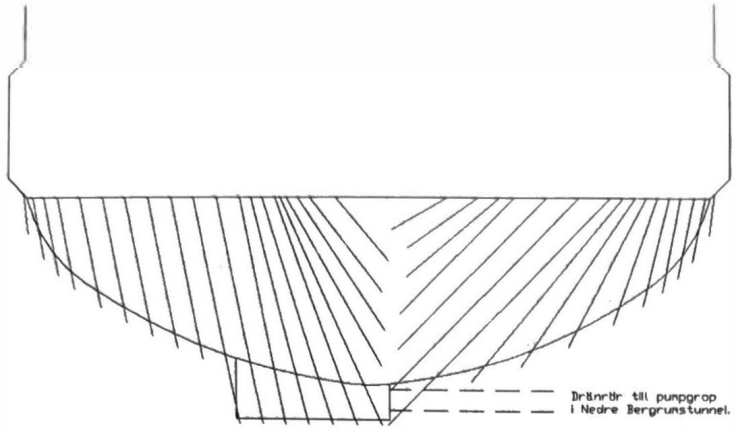
Figur 5. Pågående arbete för cylinderuttaget.

Med ner under sänkningen i cylinderdelen följde grävmaskinen med de tillhörande enheter för sprutning, bultborrning, skrotning och grävning. En skylift för diverse arbeten på väggarna fanns också med ner under utlastningen. Under den andra utlastningen byggdes en ramp ner i lösmassorna för att få ut utrustningen innan sprängningen av det kvarvarande valvet startade.

4.2.3 Botten

Bottenuttaget inleddes med att ett uppskjut i botten av den tunnel som gick in till centrum på nivån –17 gjordes. Borrplanen för bottenuttaget redovisas i Figur 6. Borrplanen gav totalt ca 1110 hål och ca 6200 borrmeter. Hållängden varierar mellan 2 och 17 meter. Den specifika borrningen blev 0,82 bm/m^3 vilket är högt till följd av den täta borrning som krävdes för att uppnå kravet på konturen i botten. Dessutom vill man inte ha ett för stort styckefall vilket skulle komplicera utlastningen. Ytterligare ett komplicerande moment i bottenuttaget är den fördjupning som måste göras i centrum av botten. Från denna fördjupning ska dräneringssystemet ledas ut till pumpgropen som utförts i Nedre Bergrumstunneln.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

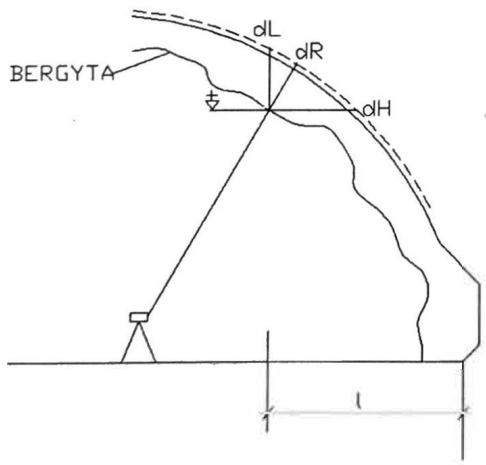


Figur 6. Borrplan för bottenuttag.

4.2.4 Utsättning och inmätning

Utsättning och inmätning för borrning av kalottdelen krävde en del utveckling av programvara. Detta arbete genomfördes i samarbete med SBG (Svensk Byggeodesi AB).

När grovsprängningar i ett område var slutfört och man hade 1-3 meter kvar till slutlig kontur målades ett mönster av kryss upp på bergväggen. Detta var kvadratiskt och hade sidomåttet 50 centimeter. Alla kryss mättes in och med hjälp av den nya programvaran fick man direkt fram ett antal längddata för det aktuella krysset, se Figur 7. Samtliga hållängder beräknades med en genomsnittlig underborrning på ca 30 centimeter. Alla tre längder, lodrätt, radiellt och horisontellt, överlämnades till borraren som själv kunde välja vilket sätt som passade bäst att borra för det aktuella hålet. Det aktuella hålmönstret har inneburit att ca 8000 hål har borrats med individuella hållängder.



Figur 7. Inmätning av kryss för konturborrning.

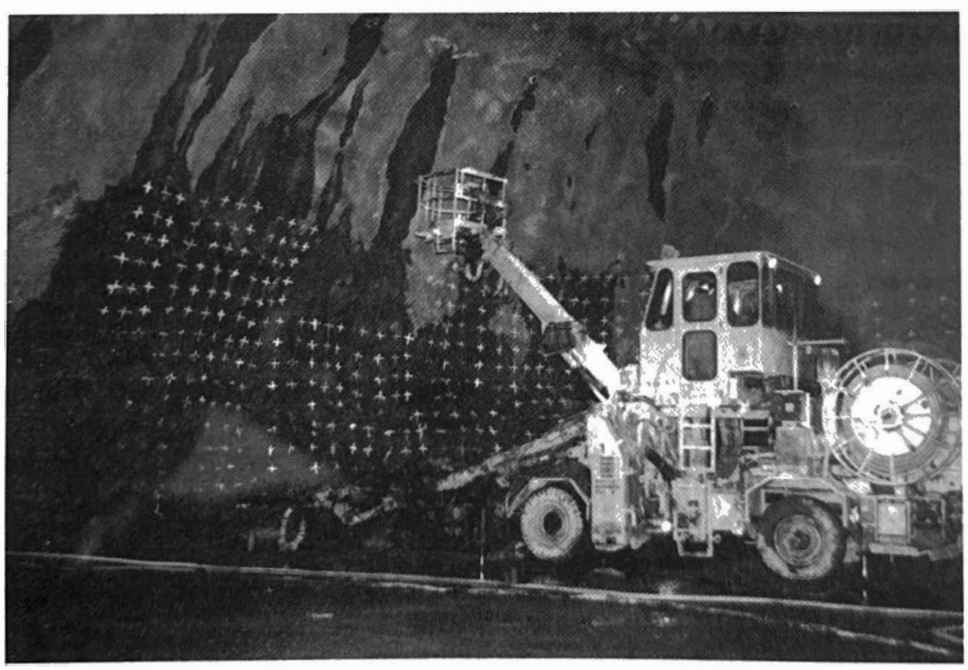
För cylinderdelen var utsättningsarbetet något enklare. De radier som var aktuella för borrhål markerades på bergytan och därefter fick borrarna själva mäta upp de inbördes avstånden mellan borrhålen. Kravet på rakheten av hålen kontrollerades genom inmätning av de hål som genomborrades till ringtunneln i botten. Efter verifikation på rakhet genom mätning av samtliga inledande hål behövde endast vart femte hål mätas in. Ett ganska tydligt system i avvikelsen av borrhålen kunde ses från resultaten av inmätningarna. Nästan samtliga hål hade en avvikelse som följde gnejsens foliation. Dessutom finns en amfibolitgång som passerar

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

rummet som också bidragit till avvikelserna. Ett fåtal hål fick borras om och övriga hål landade inom de toleranser som var satta, dvs inom 30 cm utanför teoretisk kontur.

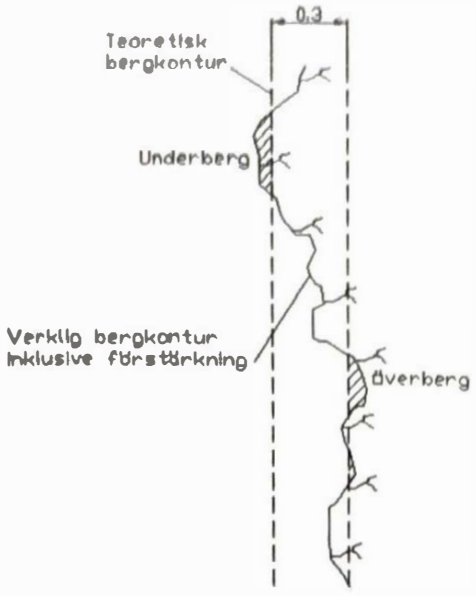
När konturspräng ningen var färdig vidtog sektionering. Denna utfördes dels direkt på bergytan efter sprängning och dels på färdigförstärkt yta (sprutbetong). Instrumentet för sektionering ställdes upp centrerat i bergrummet och profiler mättes in med ca 1 meters avstånd i både höjd- och längdled (detta avstånd gäller i cylindern, ju högre upp i kalotten man kommer desto tätare blir punktavståndet). En diskussion om punkttätheten fördes inledningsvis och tester utfördes med punktavstånd motsvarande 0,5 x 0,5 m på cylinderdelen. Testresultaten visade dock att en sektionering med tätare punktavstånd inte förbättrade detaljgraden särskilt mycket. Däremot var tidsåtgången betydligt större, varför beslut om punktavstånd 1 x 1 m togs gemensamt med LRC Demo AB.

Den täta borrningen, se Figur 8, krävdes till följd av det ytjämnhetskrav som ställdes på den verkliga utsprängda profilen, se Figur 9. Den verkliga bergkonturen inklusive förstärkning fick som högst ligga 30 cm utanför den teoretiska bergkonturen. Eventuellt överberg måste fyllas igen med sprutbetong. Tillåten skadezon från sprängningar var endast 30 cm vilket innebar att endast skonsamma sprängmedel kunde användas. Detta i sin tur har resulterat i att en del omskjutningar fått göras då underberg förekommit. Bägge dessa tillstånd, överberg och underberg har inneburit att ytterligare etableringar behövt göras för att nå ytjämnhetskravet.



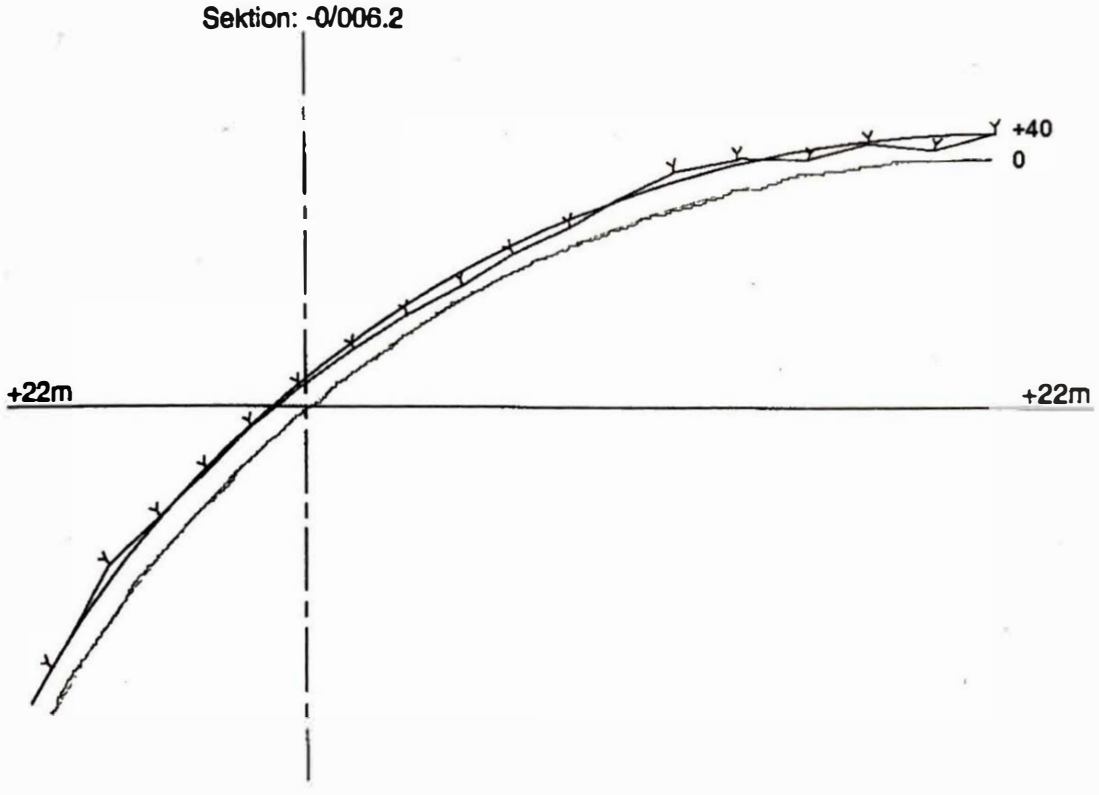
Figur 8. Mönster för konturborrning.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



Figur 9. Ytjämnhetskrav för bergrumsuttaget.

Andelen överberg respektive underberg har i kalotten varit 39 % respektive 0,1 %. I cylinderdelen är motsvarande värden 34 % respektive 1 %. En medelradie på 18,57 meter har uppnåtts för kalotten (teoretisk radie = 18,20 m) och 18,47 meter för cylinderdelen (teoretisk radie = 18,20 m). I Figur 10 visas exempel på en profil från sektionering av den verkliga bergytan i kalotten. De linjer som finns utritade är den teoretiska konturen och nivån på +40 cm utanför teoretisk kontur.



Figur 10. Profil från sektionering av verklig bergyta.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

4.3 FÖRSTÄRKNING

4.3.1 Nedfartstunnlar

Driftförstärkningen utfördes under nästan hela tunnelsystemets sträckning med ca 30 mm fiberarmerad sprutbetong som kompletterades med bultar i områden som passerade amfibolitgångar.

4.3.2 Bergrum

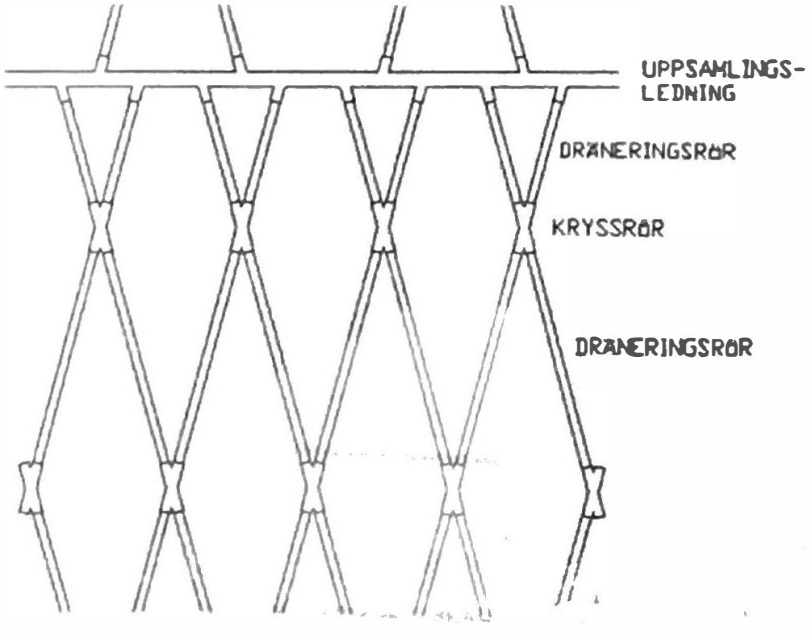
Förstärkningen i kalotten utgjordes av 10 centimeter fiberarmerad sprutbetong. Totalt har, tillsammans med en del utjämningssprutning, ca 300 m^3 sprutats. Kombinerat med detta har totalt 380 stycken bult, kamjärn Ø25 mm och längd 6 meter, systembultats i hela kalotten.

Vid uttaget av kalotten upptäcktes det att den amfibolitgång som genomskär bergrummet skulle komma att innebära en del stabilitetsproblem i cylinderväggarna. Det beslöts då att förstärka cylinderväggarna i de zoner som påverkades dels av amfibolitgången och dels av spänningssituationen. 50 mm fiberarmerad sprutbetong samt systembultning c/c 3,0 m användes på en horisontell sträcka av 2 x 15 meter och nerför hela cylinderväggen.

4.4 DRÄNERINGSSYSTEM

Ett omfattande dräneringssystem har monterats på bergrumsväggen. Totalt rör det sig om ca 9 km rör i ett diamantsystem. De ingående delarna är dräneringsrör, kryssrör och uppsamlingsledningar, se Figur 11.

Dräneringssystemet är en del av konceptets säkerhetssystem och har flera uppgifter. Dels att dränera bort det vatten som läcker in mot bergrummet och dels att möjliggöra detektering av eventuella gasläckage samt att leda bort denna gas. Det inläckande vattnet leds i dräneringssystemet till uppsamlingsledningar i botten och därefter ut till en pumpgrop i Nedre Bergrumstunneln. På liknande sätt leds den utläckande gasen till uppsamlingsledningar i kalotten och vidare upp genom schaktet till ovan jord. Dräneringssystemet har monterats successivt då bergrummet sprängts ut.



Figur 11. Principskiss över de ingående de i dräneringssystemet.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Dräneringsrören är gjorda av PEH-plast. Från början planerades de att göras i PVC-plast men detta frångicks av i huvudsak två anledningar. Dels är PEH-plasten miljövänligare och dels tål den kyla bättre. Vid en snabbtömning av lagret kan mycket låga temperaturer uppkomma. Dimensionen på rören är Ø93/80 mm, dvs den yttre diametern är 93 mm och den inre diametern är 80 mm. De är försedda med 106-113 cm^2 inloppsarea per meter dräneringsrör. Rören kläs in med fiberduk för att skyddas vid insprutning.

Hela dräneringssystemet sprutas in med en speciell permeabel sprutbetong. Insprutningen görs för att skydda dräneringssystemet dels vid det fortsatta bergrumsuttaget och dels i ett senare skede då stålmontage och ingjutning med betong ska göras. I Figur 12 visas monteringen av dräneringssystemet.

Figur 12. Montering av dräneringssystem i kalott.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

5. SLUTSATSER

5.1 BERGRUMSUTTAG

Bergrumsuttaget för demonstrationsanläggningen är mycket unikt bland annat avseende kravspecifikationen och har varit komplicerat från bergbyggnadsteknisk synpunkt. Detta gäller framförallt kraven på konturens jämnhet samt sprängskadezonens storlek. Det kupolformade taket, som har formen av en halvsfär, har varit mest komplicerat att spränga ut.

Uttaget av bergrummet har i stort skett såsom det planerades. Grundtanken som arbetades fram under anbudstiden har bibehållits och endast mindre ändringar har gjorts under produktionsplaneringen och själva uttaget.

Generellt kan man konstatera att geometrin inneburit en del svårigheter, dessa var till exempel;

- den höga höjden på kalotten vilket inneburit att man inte når det högsta taket från cylindermivån,
- rampens branta lutning i spiraltunnlarna vilket inneburit svårigheter med att etablera borrvagn och övriga fordon. Mycket tid har lagts på vägbyggnation,
- utlastningen av bottenkupolen eftersom de sista massorna i princip måste lyftas "manuellt".

På grund av projektets tekniskt svåra karaktär har man i efterhand kunnat konstatera att en del detaljer i uttaget och planeringen kunnat gjorts på ett mer optimalt sätt än vad som skett, den mest uppenbara saken är:

- Valvet över nedre ingången till bergrummet var svårt att spränga bort framförallt med avseende på rensning av gamla borrhål och problem med att ovanliggande salvor delvis stått kvar. Ett sätt att undvika detta är att spränga hela cylinderdelen på en gång och istället skapa en lastnisch utanför bergrummet.

5.2 KRAVSPECIFIKATION

De höga krav som ställts på ytjämnhet vid bergrumsuttaget har uppnåtts. Samtliga inmätta punkter från sektioneringen av bergrummet (kalott och cylinder) har sammanställts och studerats ur ett statistisk perspektiv. Resultaten är snarlika för kalotten och cylindern, se tabell 1.

Tabell 1. Sammanställning av mätdata från sektionering av bergrummet.

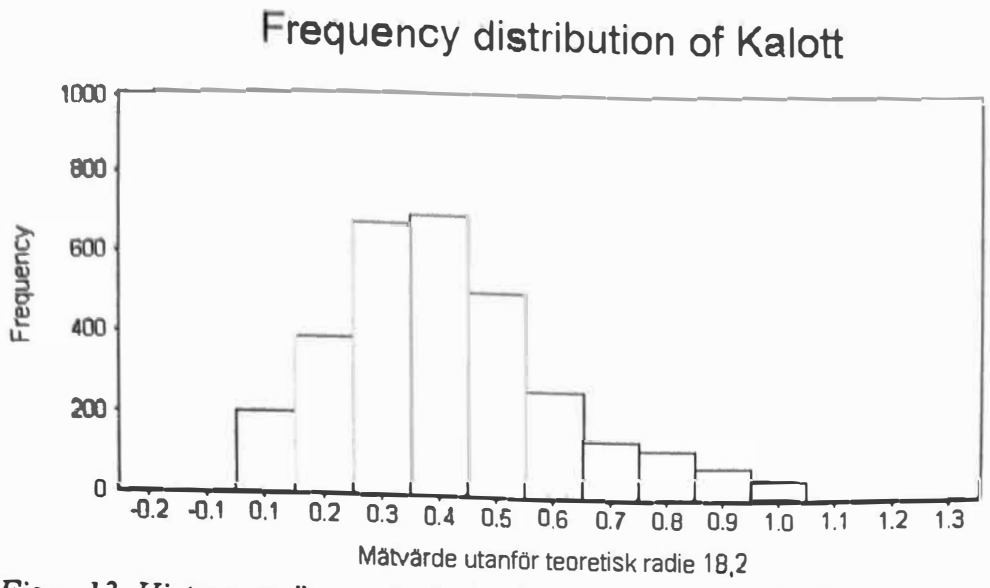
	Kalott	Cylinder
Antal punkter	3117	2829
Medelradie	18.57	18.47
Standardavvikelse	0.20	0.15
Överberg	39%	34%
Underberg	0.10%	1%

Not. Teoretisk radie är 18,20 m (inklusive sprutbetong)

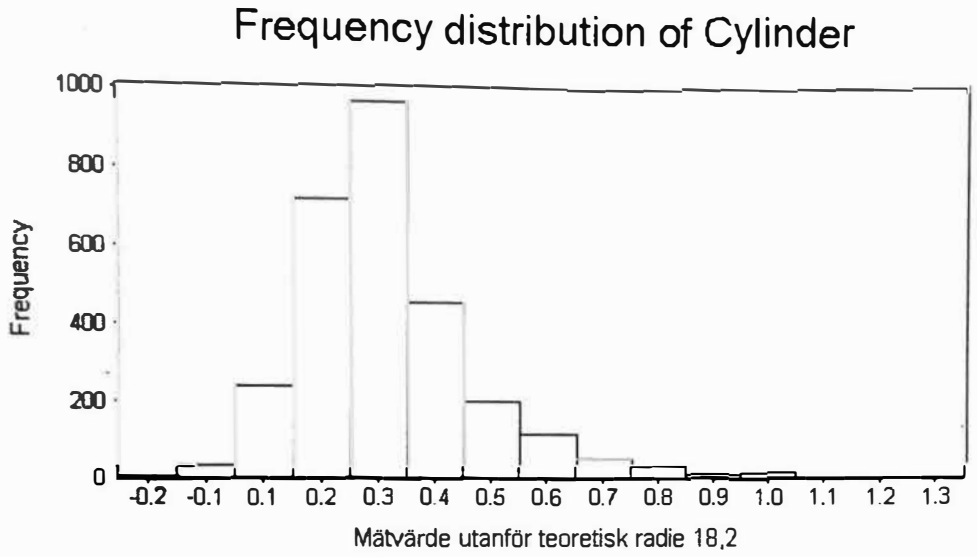
Det är värt att notera att den mycket låga andelen underberg i kalotten är något missvisande eftersom uttagsproceduren inneburit att en punktkontroll av bergytan gjorts före sektione-

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

ringen och däremellan har underberget skjutits bort. Dock har andelen omskjutningar varit liten. Resultaten kan även åskådliggöras i histogram för kalotten respektive cylindern, se Figur 13 och 14.



Figur 13. Histogram över mätvärden från sektionering av kalott.



Figur 14. Histogram över mätvärden från sektionering av cylinder.

Som framgår av histogrammen är spridningen lite större i kalotten än cylindern. Framförallt är höga mätvärden mer frekvent förekommande. Detta visar att en radiell borrning vinkelrät en yta ger mindre precision än långhålsborrning, åtminstone så länge de långa vertikala hålen borrats raka. För projekt LRC Demo har cylinderborrningen varit mycket framgångsrik med avseende på rakhet.