© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

TUNNELMYNNING MED 30 M SPÄNNVIDD, SÖDRA LÄNKEN, STOCKHOLM

Bo Karlsson, Vägverket Region Stockholm
Mats Tenne, Geokonsult Tenne AB

Inledning

Infrastrukturprojektet Södra Länken, Stockholm, startade 1997 med drivning av arbetstunnlar och är Sveriges hittills största vägtunnelbygge. Projektet innehåller ett stort antal kvalificerade utmaningar, bland annat beroende på dess geografiska belägenhet, storlek och krav från omgivningen.

Som några exempel på utmaningar kan nämnas:
Anslutningar till tunnlarna, jord-och bergschakter samt betongarbeten inom djupa sponter, arbeten i hårt trafikerade stråk och inom bostadsområden.

Korsningar under jord med befintliga tunnlar, korsningar mellan trafiktunnlarna på olika nivåer, jordfrysning där tillräcklig bergtäckning saknas, stora spännvidder vid anslutningar mellan ramp och huvudtunnlar, tunnelmynningar och broar i bergtunnlar.

Tätningsarbeten för att inte orsaka skadliga grundvattensänkningar, krav på arbetstider med hänsyn till störningar för kringboende.

Översiktliga ingående mängder:

Södra Länken	5,5 km längd (varav 4,5 km under jord)
Huvudtunnlar och ramper	16,6 km
Total bergschakt	2 035 000 m3
Total jordschakt	750 000 m3
Total betongmängd	225 000 m3
Armering	14 500 ton
Beläggning	280 000 m2
Sidobarriärer	27 500 m
Ventilationstorn vid Åbyvägen och Hammarby Fabriksväg	20-25 m höga
Fläktar	360 st
Utrymningsvägar	100 st
Broar i bergtunnlar	10 st
Driftutrymmen	14 st

Bergtunnlarna är uppdelade i 4 st entreprenader, SL01 Årsta, SL02 Bolidenplan, SL03 Hammarby och SL04 Nobelberget. Förskärningar och arbetstunnlar utfördes för SL01-SL03 i tidigare entreprenader 1997-1998.

I mitten av januari 2001 hade 90% av underjordsarbetena utförts och de beräknas vara färdigställda under första halvåret 2001. Betongarbeten, ledningsarbeten och innertak

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

för rampanslutningarna pågår. Södra Länken beräknas i sin helhet vara färdigställd år 2004.

Dagens tema för diskussionsmötet på Bergsprängningskommitten år 2001 är den stora tunnelmynningen vid Hammarby Fabriksväg med en spännvidd på 30 m och bergtäckning mindre än 10 m, vilket är unikt i bergbyggnadssammanhang, såväl i Sverige som internationellt.

Figur 1. Den stora mynningen, utsprängd och förstärkt

Den stora mynningen

Mynningens stora dimensioner har krävts av trafiktekniska orsaker och brist på utrymme för separata tunnlar i aktuellt område. Att utföra en mynning med 30 m spännvidd och mindre än 10 m bergtäckning är inget självändamål och bör om möjligt undvikas för att minska risker och kostnader under utförandet och för att minska framtida underhåll.

Tunnelmynningen är ett s k GK3-fall, geoteknisk klass 3, enligt BKR 94. I aktuellt fall är båda kriterierna i princip uppfyllda för GK3, nämligen att bergtäckningen är mindre än halva spännvidden och att bergkvaliteten enligt Q-systemet är mindre än 1. GK3-fall fordrar att en från projektet oberoende granskare, en specialist, kallas in för granskning av konstruktioner och utförande.

Vägverket utformade, efter utförda stabilitetsberäkningar, i samråd med en oberoende granskare och entreprenören Selmer uttagssekvenser med etappvis förstärkning med

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

fiberarmerad sprutbetong och systematisk bultning med slaka bultar. Typ av sprängningsteknik med borrning och laddning för skonsam sprängning överenskoms för att minimera skador och deformationer i kvarstående berg.

Arbetena med tunnelmynningen avsågs påbörjade strax efter entreprenadstart i februari 1999 men omöjliggjordes av kraftig svallis över hela bergbranten. Två pilottunnlar på 30 m2 drevs då in för att kunna starta arbetena och vidgades 20 m längre in i berget. Arbetena med mynningen omstartades på hösten 1999 men fick avbrytas igen i oktober på grund av kyla och svallis och kunde slutföras först under hösten 2000. Under sommaren 1999 utfördes en närliggande mynning med 20 m spännvidd, varifrån kompletterande information erhölls om geologin liksom erfarenheter om bergets egenskaper.

Föredraget inriktas på att ge en bild av de omfattande och tidskrävande arbeten som bedömts erforderliga för att genomföra en komplicerad bergschaktning för en tunnelmynning med en avsedd livslängd av 120 år enligt Tunnel 95.

Geologi och förförstärkningar

Berggrunden utgörs av gnejser och gnejsgraniter genomsatta av enstaka grönstensgångar. Berggrunden var i förskärningen delvis förskiffrad och genomtvärad av flera brantstående sprickgrupper samt några mindre sprickzoner. Från mynningen och inåt förbättrades bergförhållandena. Q-värdet i mynningen har bedömts till cirka 1 och det låga värdet beror mera på den begränsade bergtäckningen än på låg bergkvalitet.

Förförstärkning utfördes 1998 i annan entreprenad runt blivande mynning med en cirka 2 m bred och 70 mm tjock fiberarmerad sprutbetongbård som samverkar med dubbla rader 6-8 m långa, ingjutna bultar med bricka. Ett 40-tal bultar ovan den högra tunneldelen har utförts förspända för att ta laster från en bergkil. Från bergytan har strax innanför mynningen gjutits in en rad med vertikala bultar ned till cirka 0.5 m över mynningens hjässa.

Som start på utförandet av tunneln utfördes förinjektering av berget med cirka 20 m långa borrhål med c-avstånd cirka 2,5 m och placerade cirka 1 m utanför tunnelmynningens kontur. Vidare utfördes horisontella spilingbultar med 8 m längd med c-avstånd 2 m

Bergmekaniska beräkningar

Bergmekaniska stabilitetsberäkningar för tunnelmynningen utfördes på KTH av Jonas Holmgren och de beräknades så att en fiberarmerad sprutbetongbåge teoretiskt skulle kunna ta upp tyngden av 6-10 m av ovanliggande berg till 4 m in. Härvid förutsattes en jämn bågform. Verkligheten blir givetvis en annan efter utsprängning varför bågen förutsattes fastbultad i berget. Beräkningen utfördes så att maximal löskärnehöjd beräknades för variabel tjocklek hos bågen. Beräkningen gjordes både för maximal tryckpåkänning i bågen och för knäckning av bågens vertikala ben. Beräkningen utfördes med allmänt kända formler för tryckt treledsbåge. Beräkningar för såväl

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

sinusformad last som jämnt fördelad last har genomförts. Modellerna gav likartade resultat med något ogynnsammare resultat för jämnt fördelad last.

Beräkningarna visade att som permanent förstärkning erfordras en 400 mm tjock fiberarmerad sprutbetongbågen från mynningen och till 8 m in i den cirka 17 m djupa tunneln med omkring 30 m spännvidd. Utförandet måste i princip ske i etapper så att en 3 m bred yttre båge närmast mynningen är helt färdig innan innanför liggande schaktning och förstärkningar påbörjas.

Kontrollprogram

Kontrollprogram upprättades för deformationsmätningar med totalstation. Reflektorer för konvergensmätning i 3D monterades i en horisontell rad utmed mynningen cirka 5 m ovan tunnelns hjässa. Detta på grund av de tyngdtäckningsskydd som monterades i en balk ovanför mynningen. Från bergytan ovanför den planerade tunneln monterades extensometrar med fastgjutna ankare på olika avstånd ovan tunnelhjässan för mätning av vertikal deformation.

Efterhand som berguttaget framskred monterades även reflektorer inne i tunnelvalvet. Larmnivåer för momentan förändring valdes för konvergensmätning till 3 mm och för extensometrar till 5 mm.

Efter varje sprängningsetapp utfördes deformationsmätning, geologisk kartering och bergteknisk bedömning för förstärkning av utförd etapp liksom bedömning av utformning m m av nästa etapp.

Utförande

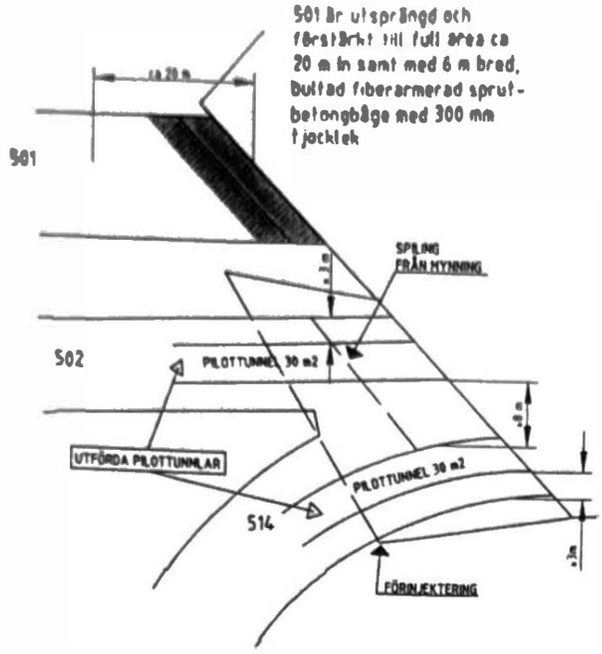
När uttaget av den stora mynningen påbörjades fanns utfört två pilottunnlar med cirka 30 m2 area till 20 m in varefter de vidgades längre in. Mellan tunnlarna fanns en bergpelare på cirka 10 m och utanför tunnlarnas sidoväggar fanns cirka 3 m kvar till slutlig kontur. Tunnlarna hade utförts med sulan i slutlig nivå medan den slutliga stora mynningens hjässhöjd var cirka 12 m.

Pilottunnlarna vidgades utåt sidorna med skonsam sprängning till slutlig kontur i cirka 4 m långa etapper och förstärktes med 200 mm fiberbetong som systematiskt bultades fast med 5 m långa, coatade bultar. Detta utfördes till cirka 10 m djup. Härefter utfördes cirka 3 m uppfyllnad med bergmassor utanför mynningarna så att förinjektering och spiling vid slutlig kontur för den stora öppningen kunde genomföras.

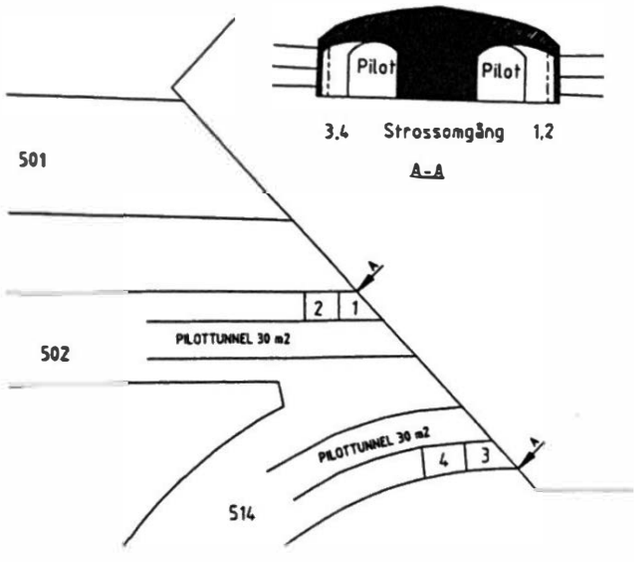
Taket i pilottunnlarna strossades ut till 10 m djup, fram till mittpelaren i cirka 5 m breda och djupa etapper med mellanliggande förstärkningar. Dessa utgjordes av 200 mm fiberarmerad sprutbetong och systematisk bultning till slutlig kontur för den stora öppningen. Svårigheter förelåg att rikta konturhålen rätt i nästkommande etapp då den stora mynningens tak sjunker inåt. I praktiken gjordes stickningen minimal med hänsyn

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

till det begränsade utrymmet för borrbommarna och en hel del fyllnadssprutning fick senare utföras.



Figur 2. Utförda arbeten vid starten av den stora mynningens uttag

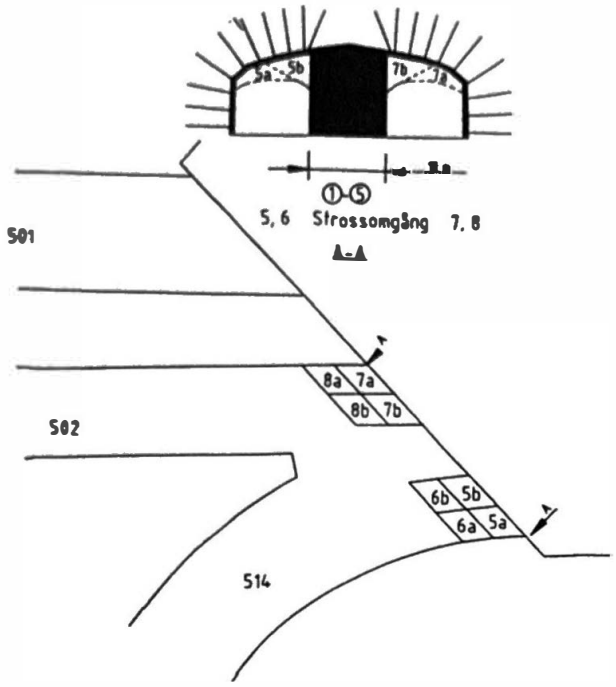


Figur 3. Breddning och förstärkning av pilottunnlarna

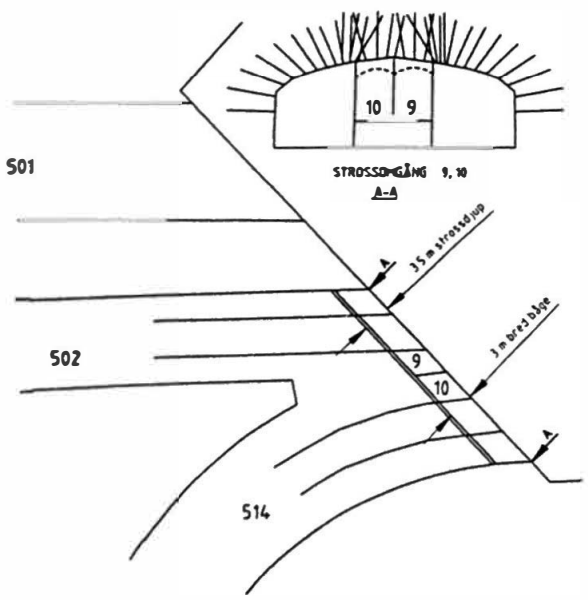
Nu återstod det att ta bort den bärande bergpelaren och ersätta den med ett fastbultat sprutbetongvalv, i samverkan med tidigare utförd sidoförstärkning. Arbetsgången blev att pelaren togs bort i 5 m breda etapper med separat sprängning av konturen i varje etapp. Varje etapp förstärktes innan nästa fick schaktas bort. Djupet på schaktetapperna valdes till cirka 4 m, så att ett 3,5 m brett och 400 mm tjockt sprutbetongvalv kunde utföras över hela slutkonturen på den stora öppningen innan vidare schaktning inåt i

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

pelaren utfördes. Tidigare förstärkningar kompletterades med 200 mm fibersprutbetong som fästades i underliggande sprutbetong med 1 m långa, coatade bultar med bricka.



Figur 4. Takstrossning och takförstärkning av pilottunnlarna



Figur 5. Utsprängning av pelaren mellan tunnelhalvorna

På motsvarande sätt togs inåt bort ytterligare cirka 4 m av pelaren och berget förstärktes med ett 400 mm tjockt sprutbetongvalv. Härmed hade totalt i hela mynningen åstadkommits ett cirka 7,5 m brett, fastbultat, fiberarmerat sprutbetongvalv. Uttaget av pelaren fortsatte inåt i sekvenser med skonsam sprängning och förstärkning. Från cirka 10 m in från öppningen utfördes 200 mm fiberarmerad sprutbetong som bultades fast systematiskt med 4 m långa coatade bultar med bricka.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Pelarmosen vid trafiktunneldelningen förförstärktes med bult innan uttag. För att förstärka den troligen hårt belastade pelarmosen förstärktes berget sedan i de båda trafiktunnlarna vid pelarmosen med en systematiskt fastbultad, fiberarmerad sprutbetongbåge.

Kvar fanns nu den undre delen av pelaren. Den togs ut i etapper med skonsam sprängning intill pelarmosen där mynningen delas upp i två trafiktunnlar.

För att ytterligare förstärka avsnittet runt den kvarstående pelaren utfördes i vardera trafiktunneln ett 5 m brett sprutbetongvalv på 200 mm med systematisk bultning.

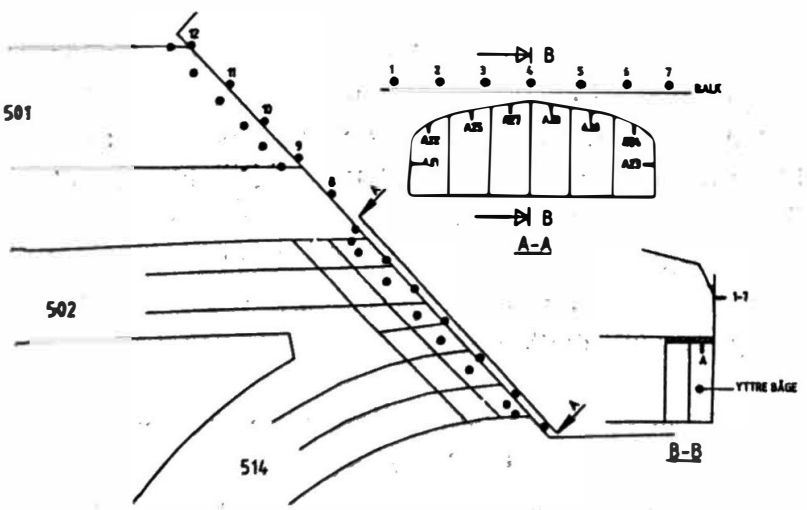
Borrning och sprängning

Schaktningsarbetena har utförts som skonsam och försiktig sprängning. Skonsamhetskravet för väggar och tak sattes till VT1, d v s med maximalt tillåten skadezon 0,1 m utanför slutkonturen. För att uppfylla kravet har all borrning utförts med max 48 mm diameter, hålavstånd i konturen normalt cirka 0,3 m. Försättning till hjälparraden var högst 0,5 m.

All laddning utfördes med patronerade sprängämnen för säker styrning av sprängningsförloppet. Merparten av all laddning har annars i övrigt på Södra Länken utförts med slurrysprängämnen. Laddning utfördes i konturen i vart annat hål med Gurit 11 mm, hjälparraden med 17 mm Gurit och resterande hål i salvan laddades med Dynamex från 22 mm till 45 mm beroende på belägenhet i salvan.

Deformationsmätningar och synliga deformationer

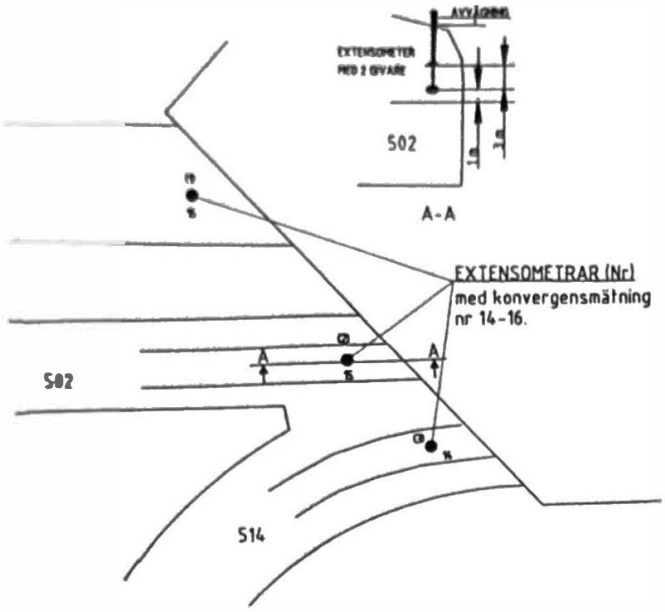
Deformationerna runt valvet har följts med konvergensmätning och extensometermätning före, under och efter utsprängningen.



Figur 6. Konvergensmätare vid mynningen

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Konvergensmätningarna har utförts med totalstation som mätt på fasta reflektorer på inslagsväggen och på efterhand monterade reflektorer i valvet. Mättekniskt har vissa svårigheter förelegat att mäta på långt avstånd från en fast punkt. Dimma, rökgaser från sprängningarna och varm luft har medfört problem liksom att den fasta uppställningsplatsen genom den långa utförandetiden fick flyttas på grund av andra arbeten.



Figur 7. Extensometrar ovan mynningen

Tolkningarna av mätningsresultaten från konvergensmätningarna i inslagsväggen är inte enkla eller entydiga men bedöms visa, inte helt oväntat, att deformationerna varierar i storlek beroende på den lokala geologin med sprickzoner och sprickgrupper och ställvis enstaka sprickor med lerbelagda ytor. Totalt kan sägas att berget i inslags väggen till största delen har sjunkit med 5-6 mm, fastän vissa delar har höjts men med mindre tal. Mera påtagligt är att valvet har rört sig utåt med 15-17 mm men även här förekommer avsevärda skillnader i resultaten. Den med förspända bultar förförstärkta bergkilen i valvets högra del har rört sig utåt mest.

Deformationerna i berget ovan öppningen mättes med extensometrar monterade i berget cirka 5 m innanför mynningskanten. Infästningspunkter sattes på två olika nivåer i respektive mäthål, 1 m respektive 3 m över tunnelns hjässa. Utförandet valdes för att kunna se om bergskivan över öppningen skulle visa tendens att dela sig. Resultaten av dessa mätningar visar att berget "satt sig" med 1,5-2,5 mm. Ändringen i avstånd mellan infästningspunkterna i respektive extensometer är mindre än 0.5 mm, vilket indikerar att bergskivan ovan tunnlarna inte är på väg att spjälkas upp.

Konvergensmätningarna i valvet utfördes efterhand som reflekterande prismor kunde monteras och försänkas i sprutbetongen som påfördes för varje etapp. Mätarna monterades i en rad cirka 2,5 m in från öppningen. Resultaten visar att deformationer på mindre än 2 mm förekommit med undantag för ett avsnitt med cirka 10 mm rörelse nedåt. Små rörelser på 1-2 mm utåt mynningen uppmättes.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Sammantaget kan konstateras att mätningar av ovanstående typ kan vara både svåra att utföra och tolka. Mätningarna skall ses som ett hjälpmedel i en totalbedömning där erfarenheter av komplicerade bergarbeten av liknande typ torde vara den viktigaste bedömningsgrunden.

Okulärt har inträffade deformationerna konstaterats på olika sätt. Berget i bergöverytan ovan öppningen har på några platser spruckit upp i tidigare släta hällar. Fenomenet kan liknas vid när man eldar på en slät hällyta. Mikrosprickor från den tidigare utförda sprängningen av förskärningen kan här ha medverkat. I samma bergavnitt har noterats sprickor i sprutbetongen utmed krönet och sprutbetongen har även lossnat i mindre flak.

Inne i valvet har uppstått 5 st sprickor med 8-10 m längd i sprutbetongen. Sprickorna är slutna och vinkelrätta mot öppningen och förekommer mest på valvets ena halva och ett stycke ned på den närmaste väggen, egendomligt nog där uppmätta deformationsrörelser i princip varit de minsta. Kortare sprickor förekommer i sprutbetongen mellan de långa sprickorna och även i anfanget ovan väggsprickorna och på tvärväggen vid pelarnosen.

Sprickigheten i valvet uppstod till mindre del i samband med utförandet och i övrigt mestadels inom cirka 1 månad härefter.

Efterinjekteringar uppifrån och inifrån

Den regniga hösten 2000 visade snart att det förstärkta valvet läckte in vatten rakt igenom berget ovan mynningen. För att minska risken för isbildning i branten hade en krönmur med ridåinjektering utförts innan schaktningen påbörjades av den stora mynningen. Bakom muren lades en dräneringsledning och fylldes singel. Att förinjekteringen skulle deformeras och släppa igenom vatten hade antagits innan schaktningsstart.

För att minska risken för vatten i berget ovan mynningen och därmed frysrisken utfördes först en efterinjektering uppifrån, från utrymmet mellan krönmuren och bergkanten. Närmare 40 st hål med längder 4-6 m utfördes. Hålen riktades med hänsyn till observerad spricktektonik. Injektering utfördes med måttlig framgång då många hål visade sig täta.

Efterhand utbildades flera mot valvet tvärgående, långa sprickor med vattenläckage, varför utfördes en injekteringsomgång nedifrån längs en av sprickorna. Även här blev det mestadels små mängder som kunde injekteras med något undantag där det gick in 250 l utöver borrhålsvolymen. En påtaglig förbättring av tätheten uppnåddes.

Nya kraftiga regn avslöjade flera läckande sprickor och en ny injekteringsomgång utfördes nedifrån med cirka 20 st hål. En klar förbättring uppnåddes men den läckande takhalvan uppvisar fortfarande avsnitt med mycket kraftigt dropp. I slutet av december har utförts ytterligare en injekteringsomgång med hål borrade utmed de längsgående sprickorna. Injekteringen utfördes nu med kemisk injektering Rescon Resfoam. Viss förbättring erhölls men fortfarande finns läckande avsnitt.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Med avseende på mynningens utsatta läge för isbildning måste vattnet förhindras att komma ut i valvet. I den stora öppningen med cirka 15 m djup har ej planerats för innertak utan i den yttre delen avses en betongportal uppförd, från några meter utanför berget till några meter in. Den har till uppgift att ta hand om nedfall av t ex is, vatten och småsten från inslagsväggen och bergets överyta.

Avsedd lösning för valvet var ursprungligen tätning med injektering och härefter montering av isolerade dräner på läckageställen. Med tanke på att vattenutträden i berg ofta flyttar sig genom igensättning m m samt svårigheterna att utföra kompletterande arbeten sedan trafiken kommit igång, bedöms det idag nödvändigt att utföra ett isolerat valv från betongportalen i mynningen och in till pelarnosen. Valvet måste utföras med möjligheter till inspektion av bakomliggande förstärkt berg.

Några erfarenheter

- Utförandet av en mynning av aktuella dimensioner och ringa bergtäckning har troligen inte utförts i Sverige och erfarenheter från liknande objekt saknas i princip. Utförandemässigt har därför stor betydelse lagts vid att ta ut berget i små etapper med åtföljande förstärkningar. Detta innebär givetsvis ett tidskrävande arbete till höga kostnader

- Väderförhållandena måste vara sådana under lång tid att injektering, bultning och betongsprutning kan utföras och med hög kvalitet. Kravet på provtagning och kontroll av bultar och sprutbetong är högre för GK3-fall än annars.

- Pilottunnlar kan drivas igenom en blivande stor mynning men genomgående transporter under uttaget till full sektion kan inte utföras bl a på grund av säkerhetsskäl.

- Ventilationstuber och ledningar i en pilottunnel igenom öppningen och till innanför liggande arbetsplatser får hängas om flera gånger vid öppningen i samband med utförandet. Om enbart en tillfartsväg finns till innanför liggande arbetsplatser och den går igenom den blivande stora öppningen kan dessa arbetsplatser tillfälligt komma att stängas.

- Mätningar av deformationer, i princip efter varje salva, kräver tid och personal.

- Borrningsprecisionen måste vara hög för att inte enskilda hål vid sprängning skall förstöra konturen.

- Hålantalet för sprängning blir stort för att i möjligaste mån skona kvarstående berg.

- Utförd förinjektering kan antas bli försämrad av deformationerna i ett stort valv. Omfattande efterinjekteringar har utförts men ett bra resultat är ändå svårt att nå. Dräner i ett brett, flackt valv fungerar dåligt. Förslagsvis skall en isolerad inklädnad av hela öppningen tas med vid projekteringen.