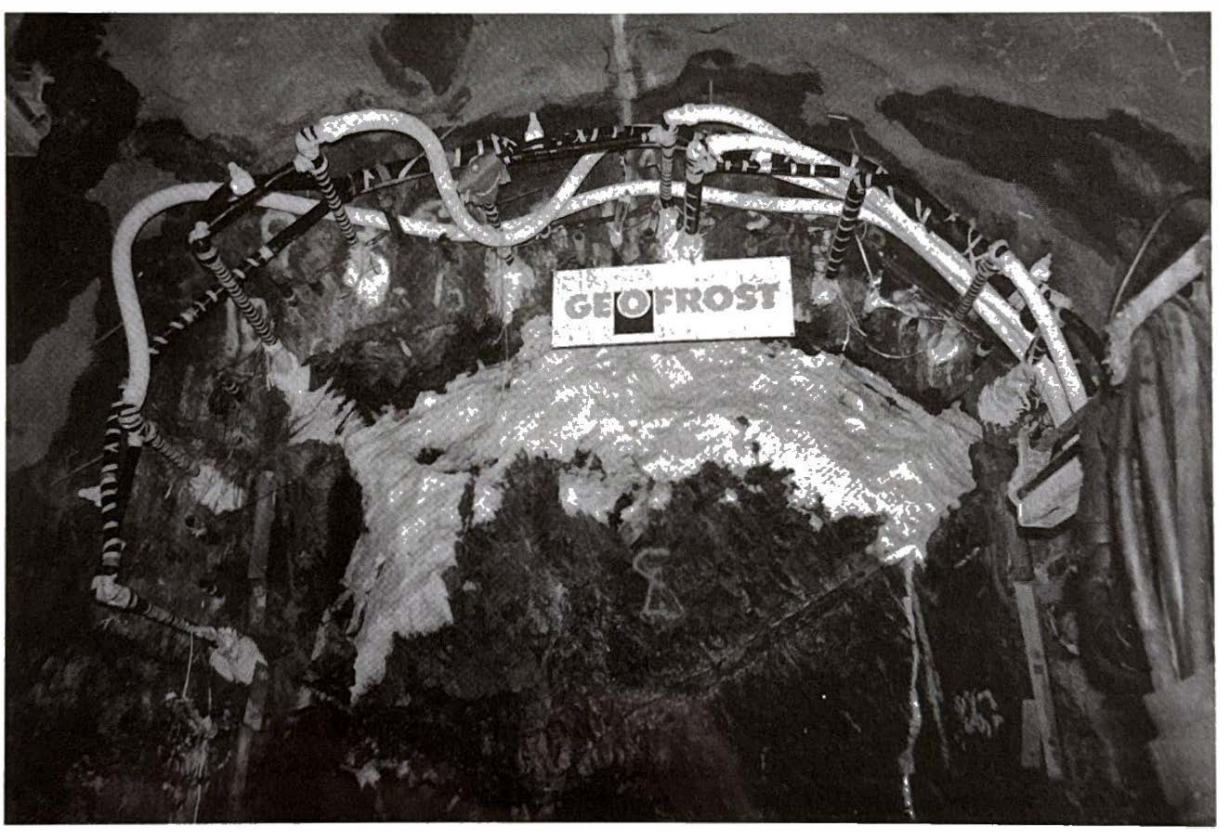
© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

TUNNELDRIVNING GENOM JORD MED HJÄLP AV KVÄVEFRYSNING
- En studie baserad på bräddavloppstunneln i Älvsjö.

Lasse Wilson, Skanska Teknik AB
Johan Brantmark, Skanska Teknik AB
Per-Anders Nilsson, Skanska Sverige AB, Division Berg & Bro.

Inledning

I vår strävan att minimera omgivningspåverkan vid undermarksbyggande i tätort har Skanska Sverige AB i samband med tunneldrivning genom en jordsvacka, utfört jordförstärkning med kvävefrysning inifrån tunneln. Detta för att påverka omkringliggande bostadsområde i så liten utsträckning som möjligt. I föreliggande artikel redovisas utförandet av bräddavloppstunnel vid Älvsjö – Långbro söder om Stockholm. Beställare har varit Stockholm Vatten. I det följande ges först en projektbeskrivning, följd av vald drivningsmetod som beskriver användandet av flytande kväve vid jord frysning från tunneln. I artikeln konstateras att kvävefrysning från tunneln är en metod som tillåter tunneldrivning med minimal omgivningspåverkan. Metoden ger en vattentät konstruktion vilken effektivt kan förstärkas med sprutbetong. Vidare konstateras att ett väl fungerande övervakningsprogram är synnerligen viktigt för att drivningen skall kunna genomförs säkert och med optimerad förstärkning. Artikeln avslutas med sammanfattning och slutsatser.



Figur 1. Nedfrysning av berget runt de ca 15m långa frysrören.

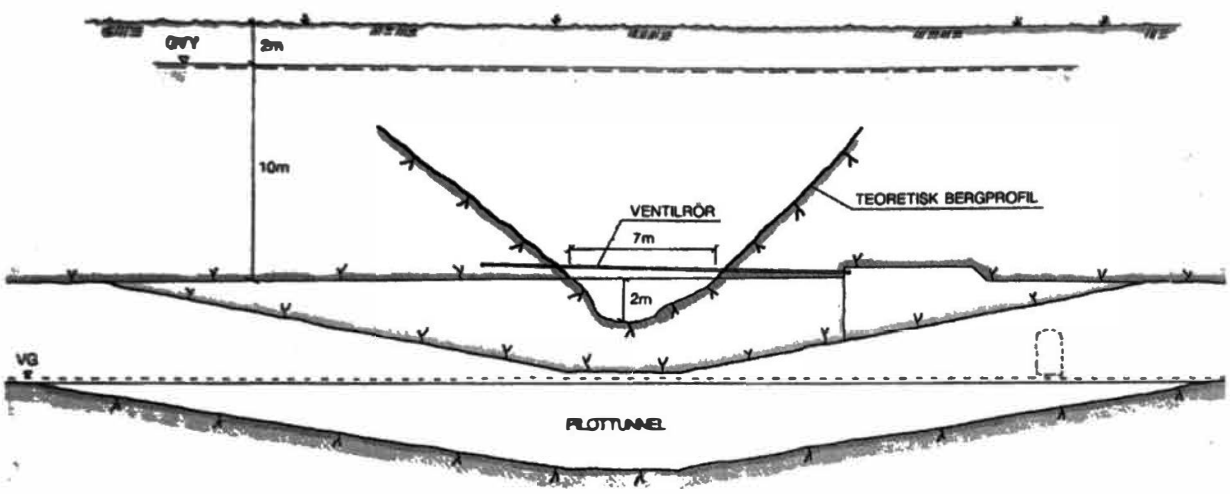
© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Projektbeskrivning / bakgrund

Delar av Älvsjö och Långbro i södra Stockholm har i många år varit utsatta för besvärande källaröversvämningar i samband med kraftiga regn. Det rör sig totalt om cirka 50-60 fastighetsägare som återkommande anmält översvämningar till Stockholm Vatten. Problemet försvåras av att ledningsnätet ger möjlighet för spillvatten att brädda över till dagvattenledningar. Successiv förtätning av bebyggelsen i området kombinerat med allt högre andel inredda källare gjorde till slut situationen ohållbar. Stockholm Vatten beslutade därför att utreda möjligheter att bygga en tunnel för att avlasta det befintliga ledningsnätet och minska riskerna för framtida översvämningar.

Bräddavloppstunneln som är en förlängning av det befintliga Älvsjö - Mälarmagasinet är cirka 1400m lång och har en tvärsnittsarea på 13-15 m^2.

Vid Långsjövägen, kvarteret Siken, drevs den fyra meter breda tunneln genom en djup jordsvacka. Passagen av Kv. Siken är uppdelad i två entreprenader. I generalentreprenaden dyker här tunneln för att erhålla tillfredställande bergtäckning samt att möjliggöra fortsatt tunneldrivning.



Figur 2. Den fyra meter breda tunneln drevs genom en jordfylld svacka.

Passagen genom svackan drevs som totalentreprenad. Den geotekniska undersökningen visar att jordmäktigheten är ca tolv meter med tio meter grundvattentryck. Det översta jordlagret är en fyllning på ca 1m som vilar på ett lager av lera med 5 till 7 meters mäktighet, följt av 1 till 7 meter friktionsjord, (grusig siltig sandmorän). På en sträcka av ca åtta meter saknas bergtäckning och drevs här med jord i dess övre del. Jordens permeabilitet har testats i form av falling-head tester. Permeabiliteten varierar mellan $1x10^{-4}$ m/s och $5x10^{-5}$ m/s.

Trots tunnelns självklara berättigande överklagades både byggnadslov och ledningsrätter i flera instanser vilket kom att förskjuta byggstarten flera år. I september 1997 fick Skanska Sverige med Per-Anders Nilsson som produktionschef i uppdrag av Stockholm Vatten att bygga tunneln och arbetet startade samma höst. Injekterings- och sprutbetongarbetena utfördes av Stabilator AB. Skanska Teknik AB har projekterat

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

sträckan i jord och med liten bergtäckning. Arbete med frysning har utförts av Geofrost Engineering A.S. Prof. Håkan Stille, KTH, fungerade som omberoende granskare av arbetet med frysning.

Skanska planerade först att täta jordsvackan med jordinjektering utförd från tunneln. Ventilrör, "Alviksrör J60/51", installerades därför med c/c 25cm, 40 cm utanför teoretisk kontur. Efter försök med cementbaserade injekteringsmedel, följda av provborrningar kunde dock konstateras att erforderlig täthet ej kunde uppnås. För att kunna genomföra en säker tunneldrivning med minimal påverkan på miljön valdes istället tätning och förstärkning med frysning. En 15 meter lång skärm ovan tunneltak skulle då skapas. För detta ändamåla användes redan installerade Alviksrör som foderrör till frysrören.

Design filosofi.

Det som karaktäriserar förstärkningsinsatserna vid tunneldrivningen genom jordsvackan är dels de komplicerade geotekniska förhållandena samt att tunneln drivs mycket nära två fastigheter i det aktuella området. I vår strävan att minimera omgivningspåverkan och minska störningarna till intill liggande bostäder valde Skanska att angripa svackan med metoder utgående helt från tunneln. Då tunneln är smal kunde inga andra arbeten företas under nedfrysning och drivning av svackan. Målsättningen var därför att använda en metod för frysning och drivning som var så snabbt som möjligt.

Frysningen baserades därför på en metod med flytande kväve. För att minimera frysningen används ett förstärkningssystem där den frysta jorden, sprutbetong och spiling används i samverkan.

På grund av projektets komplexitet och svårighetsgrad drevs arbetet strikt enligt principen för aktiv design. Detta innebär att en prediktion med avseende på deformationer, temperaturutveckling i jord och berg, hållfastheter i betong, och drivningshastigheter upprättades. Observationer utfördes i form av mätningar och utvärdering och åtgärder vidtogs vid regelbundna möten (varannan dag).

Frysning med kväve från tunneln är en ovanlig lösning vilken kräver speciella restriktioner med avseende på arbetsmiljön. I arbetsberedning och projektering beaktades därför dessa frågor särskilt.

Frysning med kväve

Passagen genom svackan delades upp i fyra arbetsmoment: Inledande nedfrysning, takfällning med underhållsfrysning, temporär förstärkning och slutligen permanent gjuten betonglining.

Frysning som metod har en mängd fördelar. Den är bland annat miljövänlig genom att jorden och berget förblir oförändrad efter frysningen. För att göra drivning möjlig måste jorden i svackan först frysas till is, därefter färdigställs tunneln. De frysta zonerna runt

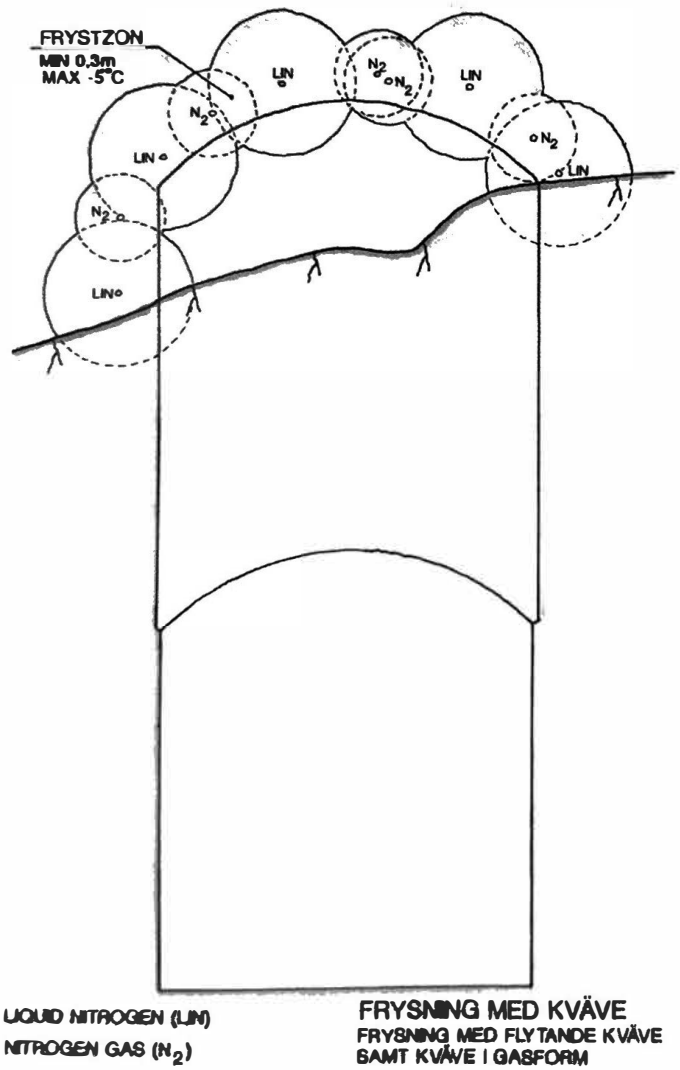
© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

frysrören växer gradvis till för att så småningom sammanbindas med varandra och på så sätt bilda en frysen, vattentät vägg. Denna fas kallas primär fasen och är den mest energikrävande. När den frysta konstruktionen är klar krävs mindre energi för att bibehålla marken frusen. Det behövs endast underhållsfrysning i denna fas, den sekundära fasen.

För att minimera såväl omgivningspåverkan som konstruktionstid utfördes frysningen med flytande kväve från tunneln. Systemet är öppet och köldmediet som är det flytande kvävet förångas vid en temperatur av –196°C vid tillströmningen av värme från omgivande berg och jordmassor. Den gas som bildas när kvävet kokar släpps ut till atmosfären där den lägger sig på marken om den inte släpps ut ur en skorsten. Genom att systemet är öppet förbrukas ganska stora mängder kvävgas så kvävet mellanlagras i en tak som fylls på från en tankbil.

Dimensionering av fryst zon.

Den temporära förstärkningen består av två delar, is och spiling samt sprutbetong.



Figur 3. Sektionen visar principiell utformning av den frysta zonen. Nedersta delen i fig. är pilot-tunneln. Övre delen är den strossade sektionen.

Sprutbetong appliceras direkt efter salvan. Det första steget i dimensioneringen är att säkerställa stabiliteten i den blottade jorden mellan senaste salvans sprutbetong och stuffen. Det är här den frysta zonen skall bära lasten från ovanliggande material samt vattentrycket. Fryst jord bär här dels genom valvbildning tvärs tunneln, dels genom att last förs ner i spilingen som löper längs med tunneln. Längs tunneln antas den frysta jorden tillsammans med spilingen utgöra en balk, armerad i sin undre del. Lasten kommer att föras ned via det styvaste av dessa upplag. Det innebär att lasten i första hand tas upp mellan fronten och den påförda förstärkningen som befinner sig två meter bakom fronten. I denna riktning är spilingrören det styvaste materialet och det är dessa som i första hand tar last.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Två brottmekanismer kan identifieras. Den ena innebär att spilingrören skjuvas av till följd av den jämnt utbredda lasten. Det andra fallet är att upplaget som består av färsk sprutbetong ej förmår bära upp spilingrören och kollapsar.

Lastens varaktighet har en betydelse för isens hållfasthet. Isens korttidshållfastheten kan vara 8-12 gånger högre än långtidshållfastheten. För vårt aktuella dimensioneringsfall gäller att lastens varaktighet är relativt kort från uttag av salva till dess att sprutbetongen bär last.

I detta fall resulterade utförda beräkningar och överväganden i att en 0,5 meter tjock zon av frusen jord med maximal temperatur av -5° krävs efter uttaget av bergmassan. Detta under förutsättning att sprutbetongen uppnått en hållfasthet av ca 20 MPa 4m från stuff.

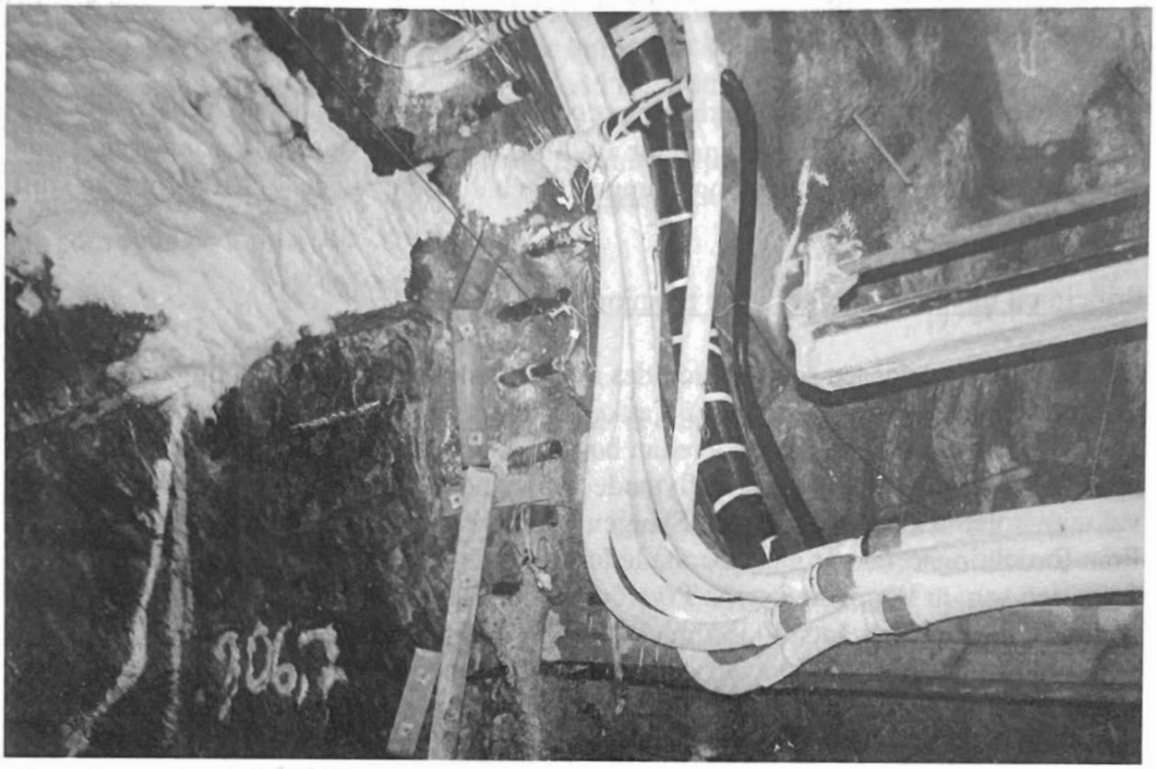
Principiell uppställning för kväve frysning i Älvsjö.

Den flytande kvävgasen som levererades av AGA mellanlagrades i en liggande tank med en volym på 37m^3 (10m lång). Tanken ställdes upp vid Långsjövägen. Som en del av övriga projektet hade Skanska redan borrat ett hål som leder från gatan ner till tunneln. Från gastanken ledes det flytande kvävet ned genom det borrade hålet i en vakuumisolerad slang till tunneln. Slangen kopplades samman med ett fördelningsrör. Från fördelningsröret går det separata ledningar som leder det flytande kvävet till frysrören som är kopplade i serie. Frysrören var monterade med flänsar i Alviksrören som tidigare hade använts till jordinjekteringen. I snitt användes vart tredje Alviksrör 60/51mm (c/c 0,75m) till kvävefrysningen. Det flytande kvävet ledes in i ändan av det första frysröret. I röret förångas kvävet till gasform och avger på så sätt en del av sitt energiinnehåll. Den kalla gasen leds ut ur röret och in i ändan av det andra röret och kyler då ner jorden ytterligare. Kvävgasen leds sedan ut genom hålet till markytan och släpps vid en rörskorsten på Långsjövägen.

Figur 4. Kvävgastanken uppställd på Långsjövägen. Kall returnerad kvävgas från frysrören kommer ur skorstenen under pågående frysning.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Under nedfrysningen, den primära fasen, fylldes tanken med kvävgas ca 2 ggr per dygn· därutöver utfördes inga aktiviteter från markytan, utan allt arbete skede under jord· Eftersom inga motorer behövs till anläggningen produceras därför heller inget buller. När nedfrysningen är klar stoppas kvävetillförseln och tunneldriften kan börja· Vartannat dygn var man tvungen att underhållsfrysa svackan, den sekundära fasen. Detta för att upprätthålla tillräcklig hållfasthet i iskonstruktionen.



Figur 5. Frysrör seriekopplade parvis.

Kvävgas och arbetsmiljö

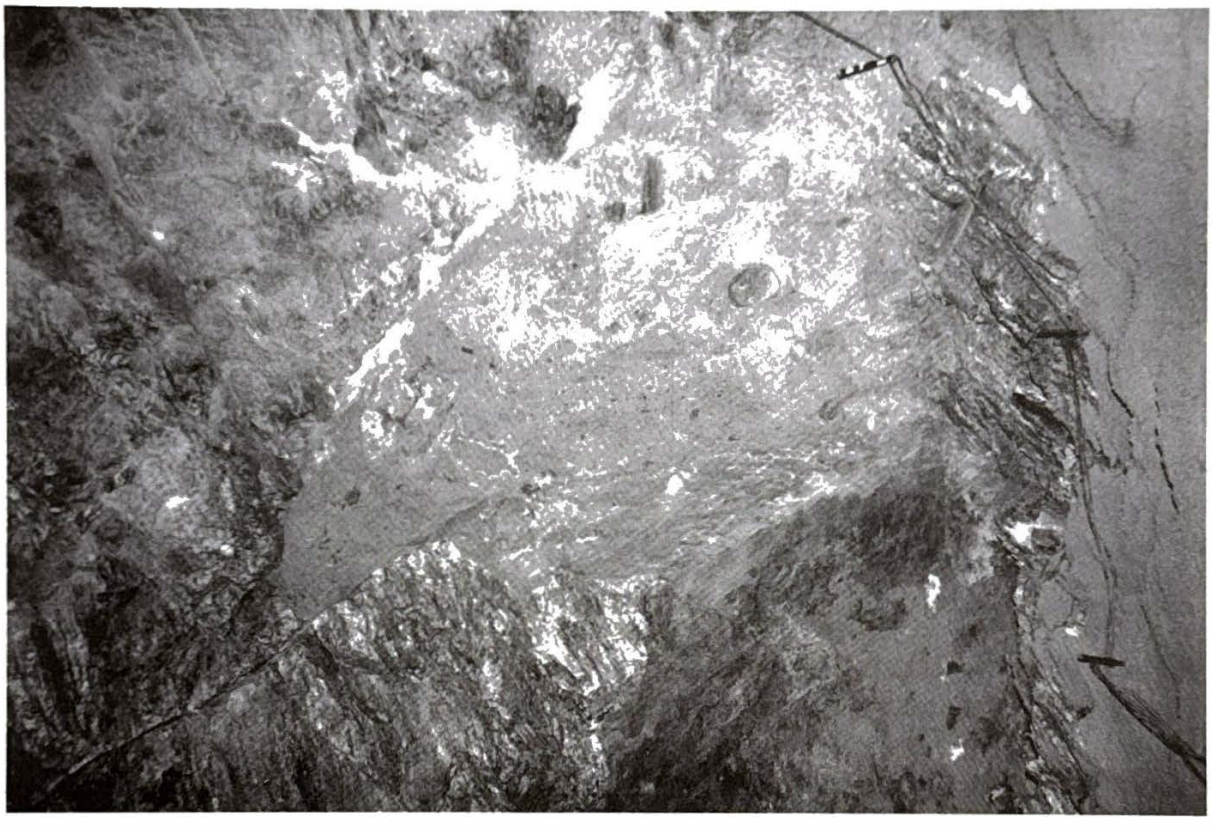
Kvävgasen är i sig ej giftig, atmosfären består av 78% kvävgas, men det är farligt att andas in ren gas, därför släpptes den ut i en skorsten som var ca 5m hög. Anläggningen inhägnades med staket för att skydda obehöriga från den kalla gasen som släpptes ut ur skorstenen.

Kondenserad kvävgas (flytande) expanderar kraftigt vid förångning och undanträngер då luftens syrgas. Detta är speciellt farligt i slutna utrymmen som en tunnel. Det finns små möjligheter för kvävgasen att blandas ut med atmosfären. Kvävningsrisk föreligger vid läckage i tunneln och någon varning i form av andnöd uppträder inte utan medvetslöshet uppträder mycket snabbt. För att säkerställa att arbetet kunde utföras på ett säkert sätt informerades all personal på arbetsplatsen om riskerna med kvävgasen samt hur man skulle agera vid en eventuell olycka. Dessutom var all personal som arbetade i tunneln försedda med gasdetektorer med både akustiskt och visuellt larm. Tunnelventilationen var påslagen undertiden frysning pågick.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Uttagsprincip av jord och bergmassor

Uttaget av berg och jordmaterialet utfördes med skonsam sprängning, dels eftersom att dämpningen av primärstötvågen från laddningarna är lägre i frysen jord än för berg pga det höga vatteninnehållet. Detta betyder att vibrationsrestriktionerna måste beaktas än mer jämfört med sprängning i rent berg. Dels därför att frysrören inte fick skadas eller friläggas för att kunna möjliggöra underhållsfrysningen.



Figur 6. Övergången från berg till den blottade frysta friktionsjorden i mitten på bilden.

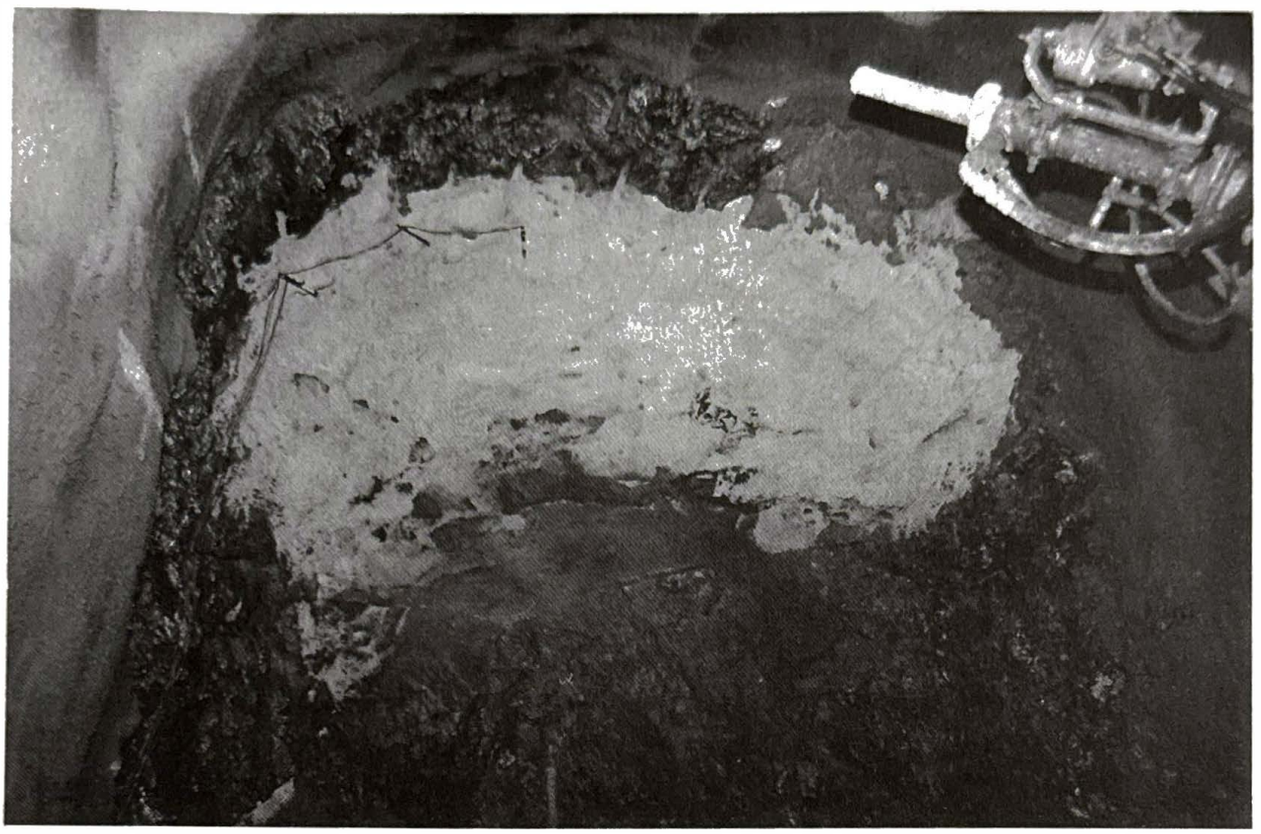
Salvlängden var 2 meter och takfällningen delades upp i två sprängningar. I den första sköts strosshålen och i den andra sköts konturhålen. Strosshålen initierades med Nonelsprängkapslar. Konturraden sprängdes med detonerande stubin med momenten upptändning (inom 1 ms). Resultatet blev bra med en kontur som i stort följde teoretisk och som inte påverkat frys och spilingrören negativt.

Temporärförstärkning

Efter uttag av salvan påfördes den temporära förstärkningen. Förstärkningen bestod av fiberarmerad sprutbetong med en tjocklek på 150mm. Vid anfangen var tjockleken 200mm. Att spruta betong mot en fryst yta medför risk att betongen inte uppnår den avsedda hållfastheten pågrund av att vattnet i betongen fryser och bildar iskristaller innan det har bundits av cementet. Berg har en stor värmekapacitet och temperaturen i betongen närmast berget kommer att kylas ned, detta motverkas dock av den värme som utvecklas när betongen härdar. Det är därför viktigt att temperaturen i kontaktpunkten

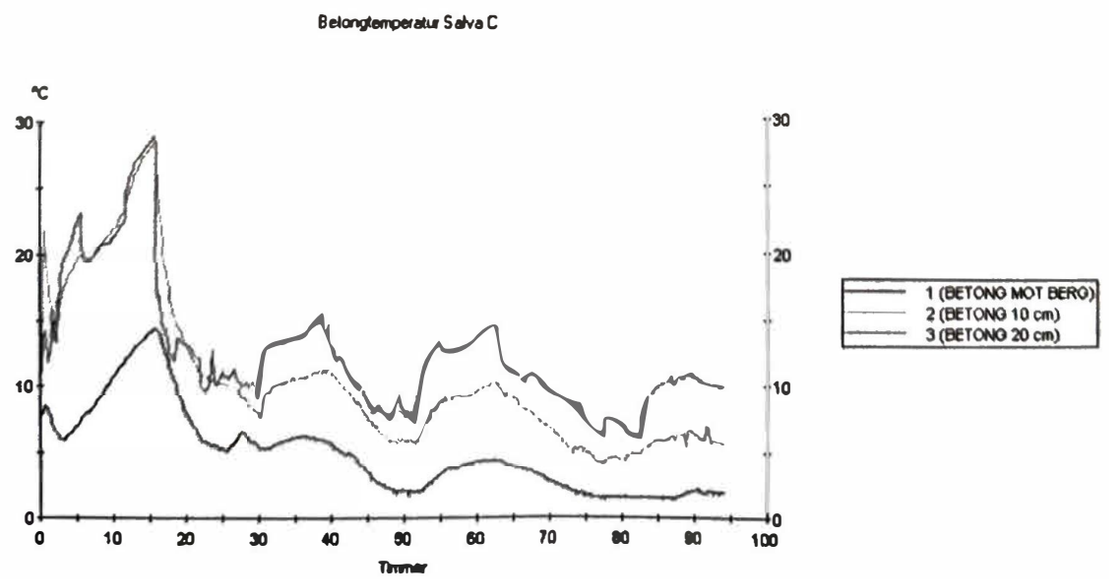
© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

mellan betong och berg/jord är tillräckligt hög för att betongen ska hinna uppnå en hållfasthet på 5 MPa innan den fryser.



Figur 7. Efter att salvan är uttagen förstärks sektionen med fiberarmerad sprutbetong. Tunneltaket består av fryst jord.

För att säkerställa att betongen inte frös för tidigt och att betongen alltid hade uppnått 20 MPa fyra meter bakom stuff innan uttag av ny salva upprättades ett omfattande kontrollprogram. Temperaturen mättes i betongen i ett antal olika kritiska punkter. Därefter beräknades betongens hållfasthet med hjälp av datorprogrammet "Betong Datorn 4". Man var tvungen att beakta att härdningshastigheten reduceras i den kalla miljön. Risken är att betongen inte utvecklar tillräcklig hållfasthet innan den måste



Figur 8. Betongtemperaturen i anfang efter sprutning.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

uppta laster från kringliggande jord.

För att säkerställa att hållfastheten enligt arbetsmodellen överensstämde med verkliga förhållanden i konstruktionen togs 6 stycken provcylindrar ur sprutbetong konstruktionen. Dessa provtrycktes och tryckhållfastheten som uppmättes var mellan 33-35MPa efter 96 timmar.

Deformationsmätningar

Svackan var enligt prognosen något lägre i ena sidan av tunneln. För att säkerställa att inte förstora deformationer i anfang uppstod och att man överbelastade valvet utfördes deformationsmätning med konvergensmätare. För att komplettera mätningarna kontrollerades sprutbetongens yta okulärt för att upptäcka sprickbildningar. Väldigt små deformationer uppmättes, dels för att i stort sett teoretisk form togs ut samt att betongen uppnådde en hög hållfasthet och således erhölls mycket hög styvhet i valvet.

Sammanfattning/Slutsatser

Drivningen av bräddavloppstunneln genom svackan i Älvsjö – Långbro innebar att en 4 meter bred tunnel skulle drivas genom jord på en sträcka av ca 8 meter och med låg bergtäckning på ytterligare ca 4 meter. Tunneln överlagras av totalt 12 meter mäktiga lager av morän, silt och lera. Ovanför svackan passerar Långsjövägen och i dess omedelbara närhet ligger två stycken fastigheter. För att minimera miljö och omgivningspåverkan har Skanska drivit tunneln genom svackan med kvävefrysning installerad helt från tunneln.

Metoden är ovanlig i världen och i det närmaste helt okänd i Sverige. Inom ramen för projektet sökte många produktionstekniska frågor sin lösning. Exempel på dessa är: vilken istjocklek krävs för stabilitet? Hur fungerar det att spruta betong på -25° grader kallt berg/jord? Hur långa salvor kan tas ut? Hur reagerar installerade stålrör på den låga temperaturen (-196°C)? Vidare var ett antal arbetsmoment kvalitetskritiska, såsom borrningsprecisionen för installationen av frysrör och spiling samt härdningen av sprutbetongen som var påförd en frystyta med en temperatur ned till –25°C.

I artikeln konstateras att med 0.5m tjock zon av fryst jord erhölls i detta fall en god bärighet då uttaget integrerades med förstärkningen och då salvlängden begränsades till 2m. Stålrören fungerade väl då de tätats med invändigt kopparrör och med noggrann borrning kunde hål borras som inte avviker mer än 1% från tänkt linje. Installation av sprutbetong fungerade mycket väl.

På grund av arbetets komplexitet tillämpades principen för aktiv design. Noggranna arbetsberedningar och ett väl fungerande övervakningsprogram är synnerligen viktigt för att drivningen skall kunna genomförs säkert och med optimerad förstärkning. Viktiga observationer är deformationer, temperaturer och sprutbetongens hållfasthet. Takfällningen har genomförts med mycket försiktig sprängning. Inga onödiga utfall erhölls utan tunnelprofilen kunde hållas inom 20 cm från teoretisk kontur.