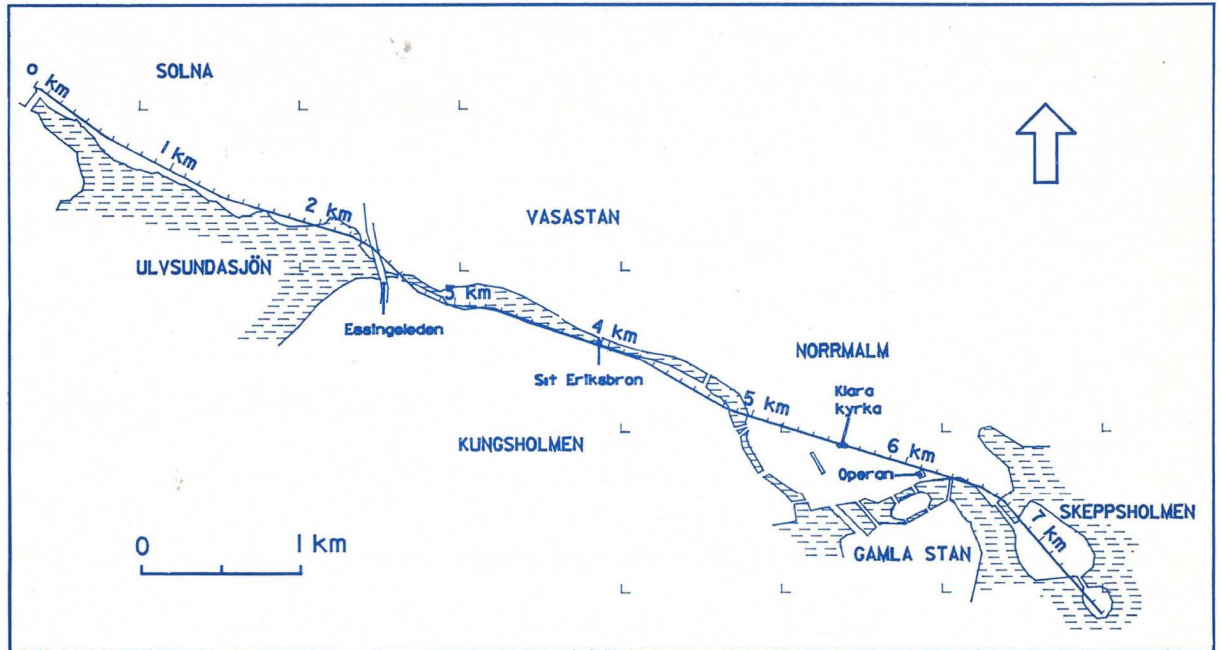


# BeFo



## Tunnelborrning i tätort Saltsjötunneln, Stockholm

## Sammanfattande huvudrapport

Stiftelsen Bergteknisk Forskning — BeFo  
Swedish Rock Engineering Research Foundation

**BeFo 220:5/89**

**Tunnelborrning i tätort  
Saltsjötunneln, Stockholm**

**Sammanfattande huvudrapport**

**Tunnel boring in the city of Stockholm,  
the Saltsjö Tunnel**

**Summary of project**

Torbjörn Hahn, Conswede  
Eric Karnelo, Industrieberatung  
Lars Lundström, Hagconsult  
Nils-Olof Sundin, Högskolan i Luleå  
Håkan Westerlund, STOSEB  
m.fl.

Redigerad av Annica Nordmark och Bengt Steen

**Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo  
Swedish Rock Engineering Research Foundation  
Stockholm 1989**

**TUNNELBORRNING I TÄTORT  
SALTSJÖTUNNELN, STOCKHOLM**

**STYRGRUPP**

Håkan Westerlund, STOSEB, ordförande  
Sven-Erik Bergman, Atlas Copco  
Göran Bäckblom, SKB  
Tomas Franzén, BeFo  
Ulf Ljungberg, STOSEB  
Carl-Olof Morfeldt, Hagconsult  
Leif Tollerup, SIAB  
Ivar Öhman, TYRENS  
Tommy Flodin, STOSEB, projektkoordinator

**PROJEKTGRUPPER**

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1 Ingenjörsgologi                    | Torbjörn Hahn, Conswede, projektledare<br>Mats Tenne, TYRENS   |
| 2 Vattenströmning i berggrunden      | Lars Lundström, Hagconsult, projektledare<br>Karin Rybäck, Hagconsult  |
| 3 Drivningsdata prognos och utfall   | Nils-Olof Sundin, Högskolan i Luleå, projektledare<br>Torgeir Blindheim, O T Blindheim<br>Hans Janzon, Atlas Copco MCT<br>Leif Tollerup, SIAB  |
| 4 Arbetsmiljö och omgivningspåverkan | Eric Karnelo, Industrierberatung   |
| 5 Sammanfattande huvudrapport        | Torbjörn Hahn, Conswede<br>Eric Karnelo, Industrierberatung<br>Lars Lundström, Hagconsult<br>Nils-Olof Sundin, Högskolan i Luleå<br>Håkan Westerlund, STOSEB<br>m fl<br>Redigerad av Annica Nordmark och Bengt Steen |

## **FÖRORD**

I Solna kommun har man byggt ett värmepumpverk som utnyttjar värmen i avloppsvatten från Bromma reningsverk. Vattnet leds i en 5 km lång, sprängd tunnel till värmeverket där värmepumparna levererar upp till 120 MW till fjärrvärm nätet. Det kylda vattnet förs sedan via en 7,6 km lång tunnel från Solna till Saltsjön utanför Kastellholmen i Stockholm.

I stället för att driva utloppstunneln med borrhning och sprängning valde man fullborrning, som särskilt i stadsmiljö kan innebära vissa fördelar jämfört med konventionell teknik. Bland annat kunde man driva hela tunneln från ett enda påslag i Solna och därmed slippa störande tunnelpåslag med åtföljande bergtransporter på Kungsholmen. Man bedömde också att borrhningens alternativet skulle ge mindre störningar i form av buller och vibrationer och att det skulle vara lättare att åstadkomma en tät tunnel och därmed minska riskerna för skadliga grundvattensänkningar. Vidare ansåg man att arbetsmiljöfrågorna skulle få en "puff" framåt genom att fullborrningstekniken erbjuder vissa nya möjligheter.

Saltsjötunneln är det första större fullborrningsprojekt som har genomförts i hårt berg i stadsmiljö och det var därför intressant att noga följa arbetet ur flera olika synvinklar. Inom ramen för BeFos forskningsprogram och i samverkan med berörda företag organiserades därför ett forskningsprojekt med uppgift att följa upp ingenjörsgéologi, hydrogéologi och drivningsdata samt miljöaspekter, såväl arbetsmiljön i tunneln som inverkan på omgivningen. Kompletterande finansiering erhöles också genom SBUF (Byggbranschens utvecklingsfond) och SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB).

Forskningsprojektet har genomförts med tonvikt på jämförelsen mellan TBM-tekniken och konventionell borrhning och sprängning. En av BeFos programstyrelse utsedd styrgrupp har lett arbetet som genomförts i form av delprojekt. Utöver delrapporter från dessa har de viktigaste resultaten och diskussionerna sammanfattats i rapporten "Tunnelborrning i tätort - Saltsjö tunneln, Stockholm. Sammanfattande huvudrapport".

Därtill har ett särskilt seminarium hållits med syfte att redogöra för projektet och diskutera fullborrningsteknikens möjligheter i kommande tunnelarbeten i hårt berg i Sverige och utomlands.

Till alla som på olika sätt aktivt bidragit till projektets genomförande vill vi rikta ett varmt tack.

Håkan Westerlund  
Ordförande i styrgruppen

Tomas Franzén  
Forskningsdirektör BeFo

## **INNEHÅLL**

	<u>Sid</u>
1. SAMMANFATTNING	1
2. INLEDNING	4
3. PROJEKTBSKRIVNING OCH UPPHANDLINGSFÖRFARANDE	6
4. METOD OCH TEKNIKVAL	13
5. MOTIV FÖR FOU-PROJEKTET	17
6. REDOVISNING AV DELRAPPORTER	19
6.1 Ingenjörsgologi	20
Appendix: Borrhålsradarundersökning vid Saltsjö- tunneln	32
6.2 Vattenströmning i berggrunden	35
6.3 Drivningsdata, prognos och utfall	44
6.4 Arbetsmiljö och omgivningspåverkan	59
7. SAMMANFATTANDE SLUTSATSER	75
8. SUMMARY	79
BILAGOR	

## 1. SAMMANFATTNING

Forskningsprojektet i samband med fullborrningen av Saltsjö tunneln påbörjades under 1986 men har huvudsakligen genomförts under 1987 och 1988. Tunneln borrades till genomslag i januari 1989. Det övergripande målet för projektet har varit att belysa frågan om fullborrning (TBM) under olika omständigheter och särskilt i känslig stadsmiljö kan vara att föredra framför konventionell sprängningsteknik i den hårda berggrund vi har i Sverige.

En stor mängd data har samlats in under projektets gång och avrapporterats i fyra delrapporter (se nedan). Projektets fältarbete har huvudsakligen utförts i den fullborrade tunneln, 50-60 m under markytan i ett nära och gott samarbete med arbetsplatsen. Miljöstudier ovan mark har även genomförts.

Som utgångspunkt för jämförelsen mellan borrning-sprängning och fullborrning har några grundläggande skillnader noterats som är direkt förknippade med metoderna som sådana. Borrning-sprängning är en metod som är flexibel och relativt okänslig för exempelvis växlande geologi. Tunnelns tvärsektion och riktning kan lätt modifieras med hänsyn till bergförhållanden eller andra omständigheter. Kompletterande arbeten som sonderingsborrning, injektering eller bultförstärkning kan relativt enkelt samordnas med drivningen. Fullborrningens största kostnadsposter är normalt kapitalkostnad och skärrulleförbrukning. När maskinen går utan störningar är den effektiv och betydligt snabbare än borrning och sprängning. Kompletterande arbete måste planeras noga för att kunna integreras med drivningen bl a med hänsyn till det begränsade utrymmet i tunneln omkring maskinen.

Flera faktorer som är svåra att värdera rent ekonomiskt kan också ha stor betydelse i valet mellan fullborrning och sprängning, särskilt vid arbeten i storstadsmiljö. Sådana aspekter har värderats framför allt i delprojektet "Arbetsmiljö och omgivningspåverkan", se nedan.

Delprojektet **ingenjörsgologi** redovisar framför allt bergarternas och sprickfördelningens inverkan på indriften. De resultat som redovisas med markerade skillnader i indriftshastighet för olika bergarter med samma uppsprickningsgrad är viktiga. Bergarters inverkan är relativt sett mindre ju större antal sprickor som finns. Vad gäller förstärkningsinsatser bedömdes fullborrningstekniken innebära mindre insatser jämfört med konventionell tunnelsprängning, bl a grundat på en enkel analys av spänningsförhållanden runt cirkulära tunnlar. Den verkliga omfattningen av förstärkningsinsatser visade sig bli mindre än vad som antagits i anbudet.

Till projektet anslöts också en undersökning av SKB och SGAB av **borrhålsradarteknikens** förmåga att förutsäga geologiska förhållanden i Saltsjötunneln. Metoden har stor potential men ytterligare utveckling krävs innan den kan sägas vara ekonomiskt försvarbar för förutsägelser i samband med normala tunneldrivningar.

Studierna av **vattenströmning i berggrunden** under drivning av Saltsjötunneln har gett ett värdefullt underlag för värdering av möjligheterna att i en fullborrade tunnel bättre kunna bemästra problemen med vatten i bergmassan. Genom dokumentation underlättas möjligheterna att förutse hur vattenströmningen kan ske. Den statistiska bearbetningen indikerar också hur vattengenomsläppligheten varierar i denna del av Stockholms bergmassa på nivå -50 till -60 m.

Någon ingående analys av samband mellan vattenförhållanden i tunneln, tätningsåtgärder och effekter på grundvattenbalans har inte ingått i uppföljningsprojektet. Allmänt kan dock konstateras att grundvattensänkningar och läckage endast inträffat vid några enstaka tillfällen. Infiltration gjordes under byggtiden för att upprätthålla grundvattennivån vid t ex S:t Eriksbron, Tekniska Nämndhuset och Centralen. Efter det att tunneln tagits i drift i juni 1989 och därmed står under ett mindre övertryck (0,5 MPa) har grundvattennivåerna blivit återställda.

**Drivningsdata, prognos och utfall.** Erfarenheter från fullborrning i hårt kristallint berg är begränsade. Variationer i bergmassan påverkar resultatet av TBM-drivning i betydligt högre grad än vid konventionell borrning och sprängning. Denna studie beskriver bl a arbetsorganisationen, uppföljningen av TBM och "back-up system". Utfallet av prognoserna visar att det är möjligt att med relativt enkla medel göra acceptabla förutsägelser för bergarters borrarbarhet när de geologiska förhållandena är väl kartlagda. I den dominerande bergarten - granit - med block/linser av gnejs och få sprickor, har en nettoindrift på ca 1,8-2,3 m/h varit vanlig.

Delrapporten om **arbetsmiljö och omgivningspåverkan** sammanfattar och analyserar olika studier och mätningar som gjorts både på arbetsplatsen i tunneln och bebyggelsen ovanför. Målsättningen har varit att utröna om drivning med TBM är miljömässigt fördelaktigt i jämförelse med borrning och sprängning. Mätningar av damm, buller, vibrationer och klimatförhållanden har dokumenterats liksom en intervju med arbetarna om deras inställning till de båda metoderna. Det sistnämnda har givit vid handen att man föredrar TBM-drivning men att vissa förbättringar av metoden är angelägna. Måttliga, kortvariga bullerstörningar har förekommit i ovanförliggande bebyggelse vid några tillfällen.

## 2. INLEDNING

För att ta till vara värmen i det renade avloppsvattnet från Bromma reningsverk, har Solna och Sundbybergs kommuner byggt ett värmepumpverk vid Bällstaviken, som är en del av Mälaren. Verket levererar värmen till fjärrvärmenätet.

En tid innan värmepumpverket stod färdigt framfördes från Stockholms Stads sida önskemålet att utloppet från anläggningen inte skulle ledas till Mälaren, trots att det var fråga om ett renat avloppsvatten, eftersom Mälaren utgör färskvattentäkt för Stockholm. Att med hjälp av en tunnel föra spillvattnet direkt ut till Saltsjön skulle alltså vara fördelaktigt med hänsyn till Mälärvattnets kvalitet.

Av tekniska och ekonomiska skäl måste detta projekt - en nästan 7,6 km lång tunnel under Solna och de centrala delarna av Stockholm - genomföras inom en begränsad tid, varför man beslöt sig för ett snabbt upphandlingsförfarande, under vilket man också måste klara av erforderliga tillstånd m m.

Projektorganisationen för värmepumpverket gavs uppdraget att även svara för tunnelprojektet. Till organisationen anslöts byggledningen från Stockholm Energi, som engagerade konsultföretagen Hagconsult och TYRÉNS för projekteringsarbetet. Koncession för tunnelprojektet ordnades till största delen av Stockholms va-verk. De ekonomiska mellanhavandena mellan Solna och Sundbybergs kommuner och Stockholms Stad reglerades och projekt Saltsjötunneln kunde starta den 19 december 1985, sedan man antagit SIAB som entreprenör.

För att driva tunneln valde man fullborrning med en tunnelborrningsmaskin (TBM) från Atlas Copco. Genom valet av fullborrning i stället för konventionell borrning och sprängning kunde man driva tunneln från ett enda påslag i Solna till Kastellholmen vid Saltsjön i det centrala Stockholm. Detta innebar att man inte behövde något extra tunnelpåslag på Kungsholmen med dess täta bostadsbebyggelse.

Fullborrningsmaskinen drevs igenom den hårda stockholmsgraniten med upp till 2,5 m/tim till en blivande tunnel med 3,5 m diameter.

Saltsjötunneln är det första projektet med fullborrning som utförts i vårt land med svensk utrustning och svensk entreprenör. Det är också det första större fullborrningsprojekt som genomförts i hårt granitiskt berg i storstadsmiljö. Det fanns därför stort intresse från många håll att följa upp och dokumentera arbetet. Ett forskningsprojekt organiserades således inom Stiftelsen Bergteknisk Forskning-BeFo i samverkan med berörda företag och med kompletterande finansiering från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).

Forskningsprojektet, som letts av en särskild styrgrupp, fick till uppgift att följa upp ingenjörsgologi, vattenföring i berggrunden, drivningsdata, miljöaspekter samt upphandlingsförfarandet. Projektet har genomförts med tonvikt på jämförelsen mellan fullborrning med TBM-tekniken och konventionell borrning och sprängning av en tunnel.

Förutom fristående delrapporter från de nämnda områdena har de viktigaste resultaten och diskussionerna sammanfattats i föreliggande huvudrapport.

Ett särskilt seminarium har också hållits i Stockholm hösten 1989. Seminariet hade till uppgift att redovisa projektet och diskutera fullborrningsens framtida möjligheter i samband med tunnelarbeten i hårt berg såväl i Sverige som utomlands.

### 3. PROJEKTBEKRIVNING OCH UPPHANDLINGSFÖRFARANDE

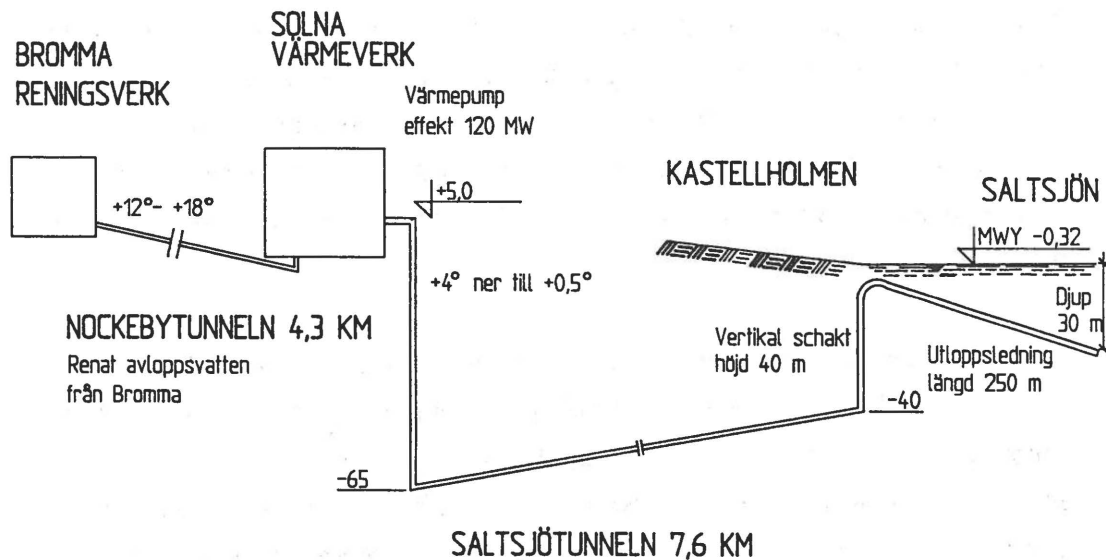


Fig. 3:1 Principskiss över "Nockeby-tunneln" till värmeverket och Saltsjötunneln

Beslutet om Saltsjötunneln togs i ett sådant skede att tiden för upphandling blev mycket knapp.

Värmepumpverkets tidplan innebar att produktion av värme skulle påbörjas omkring årsskiftet 1985/86. De inledande diskussionerna fördes hösten 1984. För att inte störa värmepumpverkets drift var man tvingad att ta beslut under april-maj månader 1985.

Kostnaderna för en eventuell försening beräknades uppgå till 1 Mkr per dygn med hänsyn till utebliven värmeproduktion.

Byggledningen från Stockholm Energi engagerades i projektet tämligen omgående. Projekteringsresurser knöts till projektledningen och olika förslag till lösningar och sträckningar presenterades.

Parallellt med det arbete som skulle leda fram till detaljprojektering av utvalt förslag pågick arbetet med att få fram koncession för projektet. I stor utsträckning utförde Stockholms va-verk detta. Utredningar om eventuella förändringar av vattenmiljön i Saltsjön utfördes, likaså bedömdes konsekvenserna av det utsläpp som under ca 3 år måste ske i Mälaren, dvs i Bällstaviken, utanför värmepumpverket. Den koncessionsansökan som skulle beviljas var viktig för det förfrågningsunderlag som skulle upprättas. Därför drevs arbetet med koncessionsfrågorna mycket snabbt av va-verket.

De ekonomiska mellanhavanden som fanns mellan Stockholms Stad och Solna/Sundbybergs kommuner var också viktiga att klara ut innan man kunde ge klartecken till projektet. Eftersom alla parter strävade mot ett och samma mål var förutsättningarna goda för en rak och snabb beslutsgång i den politiska delegation som var bildad för projektet.

Förslagsskrivelser togs fram för att anslag skulle kunna beviljas mot bakgrund av det avtal som upprättades mellan kommunerna.

Beslutsgång:

- Huvudförhandling 22 april 1985
- Värmepumpdelegerade 23 april 1985
- Förslagsskrivelse 9 maj 1985
- Koncessionsbeslut 23 maj 1985
- Industriverksstyrelsen 23 maj 1985

Den 31 maj 1985 utgick den avtalade tiden för att det pågående bygget av värmepumpverket inte skulle störas.

I den teknisk-ekonomiska utredning som arbetades fram för beslut i Värmepumpdelegerade uttalades:

"Av utredningen framgår att de geologiska och hydrologiska förutsättningarna är gynnsamma för det föreslagna tunnelprojektet.

En fullbördad tunnel under centrala Stockholm innebär flera tekniska och miljömässiga fördelar jämfört med en konventionell tunnelsprängning. Tidsåtgången för här föreslagna tunneldrivningsmetoder bedöms likvärdig och uppgår till ca 3 år.

Totala kostnaden innebär att 75 miljoner kronor exklusive ränta bör reserveras för projektet räknat i dagens prisnivå. Räntan kan högst uppgå till 16 Mkr."

Innan projektledningen kommit så långt hade ingående diskussioner förts huruvida man över huvudtaget skulle våga gå fram med tunneln under den centrala stadskärnan. Ett alternativt förslag att driva tunneln under Solna fram till Lilla Värtan vid Stocksundstorp fanns med under lång tid. De överväganden som gjordes baserades dels på skillnader som följde av olika utsläppspunkter, dels på det faktum att tunneln efter byggnadstiden skulle fyllas med vatten. I och med att anbud kunde infördras från åtminstone fyra entreprenörer för ett fullborrat alternativ valdes tunnelsträckningen under centrala delar av Stockholm.

Kunskapen om berget utefter sträckningen var mycket god eftersom många tunnlar m m fanns att få erfarenheter från. Om man förlade tunneln på tillräckligt stort djup skulle man dels gå fri från andra projekt, dels nå ett allt bättre berg.

Att förinjektera berget vid framdriften var ett krav som gällde för både sprängnings- och fullborrningsalternativen. Därför fanns det all anledning att begära anbud från intresserade entreprenörer både på ett sprängt och ett fullborrat utförande.

En grannlaga uppgift var att bedöma om en fullborrad tunnel skulle tillåtas kosta mera än en sprängd.

Den uppgift byggnadsavdelningen på Stockholm Energi fick var att precisera ett förfrågningsunderlag enligt vad som här anförts.

Eftersom ny teknik skulle kunna användas var det inte möjligt att utan vidare ta en "entreprenörlösning", beställaren hade att själv ta ställning till det tekniska utförandet fullt ut.

Handlingar togs fram som redovisade berggrunden utifrån kända data, brunnar, grundvattennivåer, tillåten inläckning samt planer, sektioner och profiler. Avsikten var att anbudshandlingar skulle lämnas ut för räkning före midsommar 1985, för en odelad entreprenad.

Med ledning av de anbud som kom in i slutet av september 1985 bedömdes att en förhandlingsgrupp skulle tillsättas samt att vissa kompletteringar skulle införas. En månad senare återstod två intressanta anbud. Dessa entreprenörer ombads att bekräfta att anbuden skulle gälla till årsskiftet.

De båda entreprenörerna låg relativt lika, dock bedömdes det ena anbudet mindre preciserat.

Ett kompletterande förfrågningsunderlag togs fram och skriftligt slutanbud från entreprenörerna begärdes. Anbudsöppning bestämdes till den 10 december 1985, klockan 10.00.

Upphandlingsmöte med aktuell entreprenör bestämdes till den 19 december, klockan 10.00.

Efter det slutliga anbudsöppnandet sammanställdes anbuden omgående, utbetalningsplaner ränteberäknades och mötet ajournerades.

Efter nödvändiga överväganden beslutade ledningsgruppen att välja anbud B som var SIAB.

Ett preliminärt upphandlingsprotokoll begärdes fram för att få beslut i delegationen den 16 december. Anbudsgivare A fick ej kontaktas under dessa dagar.

Delegationens beslut:

"att upphandling enligt huvudalternativ fullborrning sker hos SIAB".

Som framgår av här gjord redovisning var tävlan mycket god i slutfasen. Spridningen av anbuden i det tidigare skedet var tämligen stor, många lämnade också tävlingen efter den första omgången.

Den andra fasen av bedömningen, den om teknikvalet, fick delvis en lösning i och med att man kunde bedöma entreprenörernas uppfattning om kostnadsskillnaderna mellan sprängt och fullborrat utförande. Skillnaden var inte så stor att den bedömdes avskräckande. (Jfr Bilaga 1a och b.)

De kvaliteter fullborrningstekniken förväntades innehålla var avgörande:

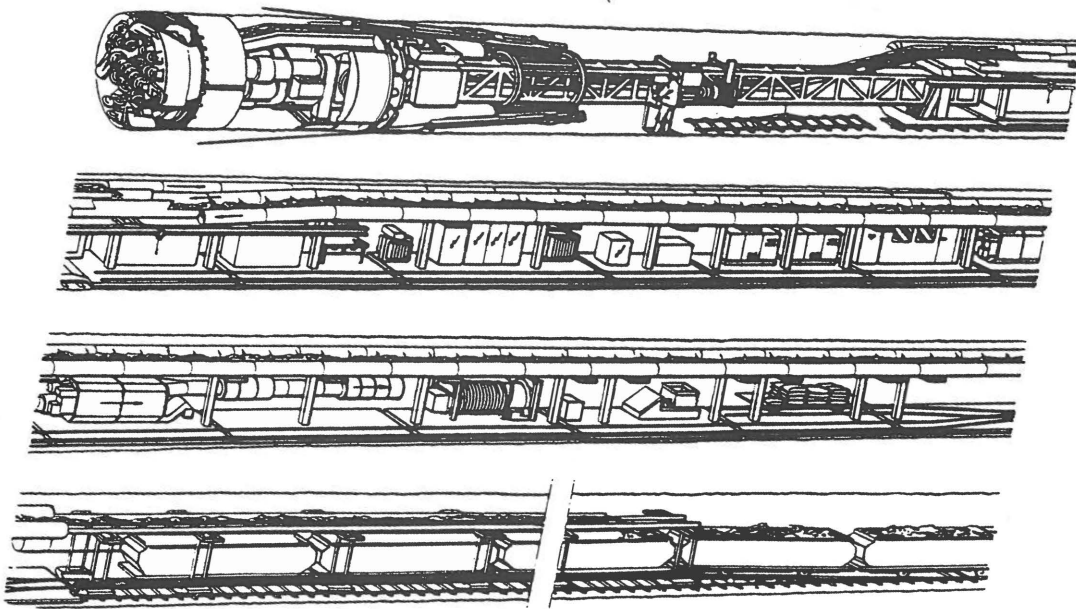
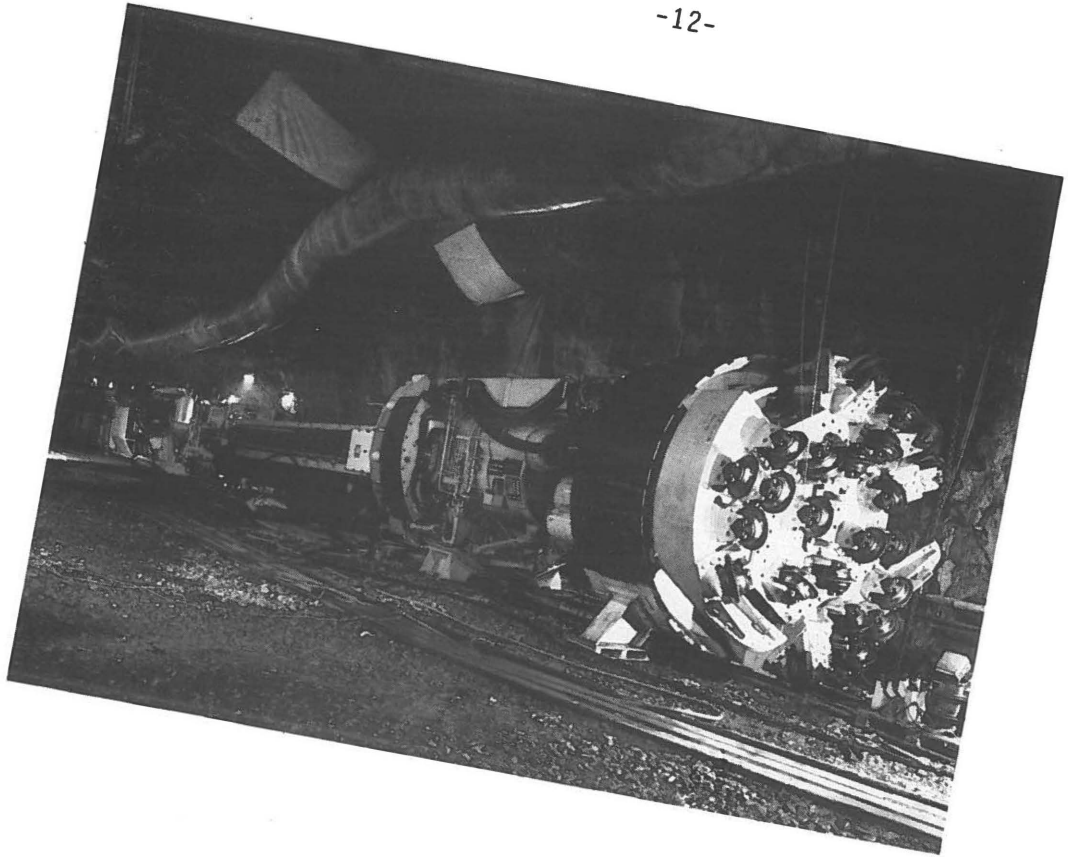
- att man inte spränger sönder berget,
- att man ej stör ovan jord genom ytterligare påslag,
- att omgivningen knappast störs av buller och vibrationer
- att arbetsmiljön förbättras,
- att en tunnel med bestämd diameter erhålles,
- att man lättare kan bedöma tätningar och efterinjekteringar samt
- att utvecklingen förs framåt.

Sammantaget ansågs en fullborrad tunnel på underlag av SIABs från reservationer rena handlingar vara värd en viss merkostnad, dock mindre än 10 % av anbudsbeloppet.

Den valda upphandlingsformen innebar att entreprenören hade att även ansvara för bl a tätning och förstärkning så att grundvattenbalansen runt tunneln inte påverkades och att tunnelns stabilitet skulle säkerställas. Fullborrningstekniken bedömdes innebära mindre förstärkningsinsatser jämfört med konventionell sprängning.

I och med att fullborrningstekniken valdes fanns också anledning att organisera en uppföljning av projektet, vilket gjordes i form av ett forskningsprojekt vid Stiftelsen Bergteknisk Forskning - BeFo.

En särskild styrgrupp tillsattes med representanter från beställare, projekterande konsulter, entreprenör och maskinleverantör.



Foto/ill.: Atlas Copco

#### 4. METOD- OCH TEKNIKVAL

Som tidigare nämnts fanns det olika skäl att överväga att fullborra Saltsjötunneln. Att driva en flera kilometer lång tunnel med konstant tvärsnitt och i stort sett i en riktning är rent allmänt en gynnsam förutsättning för fullborrning.

Goda erfarenheter från fullborrning i andra länder, inte minst i Norge och Mellaneuropa, har lett till att metoden kan anses etablerad som ett tekniskt och ekonomiskt intressant alternativ, numera även i hårdare bergarter. Utöver en direkt jämförelse av kostnaderna för fullborrning respektive sprängning måste man emellertid väga in andra faktorer som kan vara svåra att värdera i pengar.

Speciellt i tätortsmiljö kan fullborrning ha vissa påtagliga fördelar, framför allt med hänsyn till inverkan på den omgivande miljön. Med tanke på nuvarande och framtida krav på minsta möjliga störningar på omgivningen fanns det intresse från beställarens sida att pröva en teknik som i framtiden kan väntas bli än mer använd för tunnelarbeten i tätort.

Fullborrning innebär normalt att man kan driva en tunnel från ett påslag, dvs man kan eliminera några tillfartstunnlar som annars också används för uttransport av berg. Man får mindre buller och vibrationer ovan mark som skulle kunna skada byggnader och känslig apparatur eller störa de boende samt - eventuellt - bättre möjligheter att tillfredsställa stora täthetskrav och därmed minska risken för skadliga grundvattensänknings.

De geologiska förutsättningarna för tunnelarbeten i stockholmsområdet är allmänt väl kända även för den aktuella sträckan, bl a från karteringar av en energiverkstunnel och tunnelbanan som på flera ställen på 25-30 m djup korsar Saltsjötunneln, som i sin tur ligger på 50-60 m nivå.

Från tunnelpåslaget i Solna valde entreprenören att spränga ut nedfarten och ett parti fram till längdmätning ca 1 km, där en montagehall och omlastningsstation sprängdes ut. De övriga 6,5 km tunnel har fullborrats fram till Kastellholmen vid Saltsjön med en av Atlas Copco nykonstruerad tunnelborrningsmaskin, TBM FORO 900 S med diameter 3,5 m och konstruerad för att klara hårda, kristallina bergarter. Tunneln borrades således till stor del under det centrala Stockholm.

Tunnelsträckningen innebar stora krav på att undvika inläckning av vatten för att inte sänka den befintliga grundvattennivån under byggnadstiden, vilket skulle kunna medföra sättningar i ovanförliggande bebyggelse. För att klara tätningsarbeten med minsta möjliga störning av drivningen kompletterades maskinen med en speciell utrustning (se kap. 6.3) för att kunna borra sonderingshål framför tunnelfronten och förinjektera berget vid behov.

En kort beskrivning av tunnelarbetet ges nedan.

#### Fakta i sammandrag

Saltsjötunnelns längd: 7,6 km.

I den 200 meter långa omlastningsstationen på 65 m djup utfördes montage och demontage av TBM och även omlastning av de utborrade bergmassorna till lastbil. Där fanns också en serviceverkstad för den dagliga tillsynen av bormaskinen och transportutrustningen.

Den borrade tunneln har en area på  $9,6 \text{ m}^2$  medan nedfartstunnelns area är  $25 \text{ m}^2$ .

Tunneln lutar 2,5 ‰ och slutar vid Kastellholmen på nivån 50 m under havsytan. Tunnelns djupa förläggning innebär att man passerar under alla tidigare utförda tunnlar i Stockholm som ligger betydligt grundare.

När fullborrningsmaskinen nått Kastellholmen och avslutat borrhningsarbetet, monterades borrhuvudet ned varefter hela utrustningen drogs tillbaka på befintlig räls till omlastningsstationen. En stigort utfördes som mynnar i berget på Kastellholmen.

Stigorten avslutas med en brunn som också är en anslutningspunkt för utloppsledningen i Saltsjön. Utloppsledningen består av en trätub med diameter 1600 mm. Den är 250 m lång och släpper ut vattnet från tunneln på 30 meters djup.

Tunneln är i driftskedet helt vattenfylld och vattentransporten sker med svagt övertryck.

**ATLAS COPCO TUNNELBORRNINGSMASKIN**

**TYP FORO 900 S/3.5**

Tunneldiameter	3,5 m
Installerad borrhuvudseffekt	675 kW
Slaglängd	1,5 m
Matningskraft, max.	7000 kN
Skärrullar, diameter	394 mm resp. 413 mm
Vikt (uppskattad)	130 ton
Maskinlängd	
- min.	6,2 m
- max.	7,7 m
Borrhuvud, rotationshastighet	12,3 varv/min

## 5. MOTIV FÖR FOU-PROJEKTET

Från beställarens sida var intresset för fullborrning av Saltsjö tunneln stort eftersom man därmed skulle få mindre störningar på omgivningen. Det fanns också ett starkt engagemang i fullborrningsteknikens möjligheter bl a från tekn dr Carl-Olof Morfeldt, ledamot av BeFos styrelse, vilket ledde till att man beslöt anslå medel inom BeFos ramprogram för en större FoU-insats. Kompletterande finansiering erhöles från SBUF och SKB som därmed också fick en möjlighet till en samordnad fältprovning av den s k borrhålsradarn. Intresset för en noggrann uppföljning och dokumentation var i första hand knutet till möjligheten att utvärdera vilka fördelar som fullborrning i stadsmiljö skulle kunna erbjuda i jämförelse med konventionell borrning och sprängning.

Frågor av intresse var bl a hur vattenströmningen sker i olika typer av spricksystem och vattenförande zoner. Man ville finna praktiska regler för att förutse vattenförekomst i bergmassan vid både projektering och tunneldrivning och även klarlägga om fullborrningstekniken ger bättre möjligheter än konventionell borrning/sprängning när det gäller att få en tillräcklig tätning. Man ville också belysa frågan om det är lättare att bemästra oväntade problem i en fullbördad tunnel än i en konventionellt utförd tunnel.

Vidare ville man jämföra prognoser med faktiska drivningsdata genom att mäta indrivningshastigheten och studera betydelsen av sprickighet och bergstrukturer för nettoindriften.

Man ville slutligen dokumentera arbetsmiljön i tunneln och få en uppfattning om arbetarnas inställning till TBM-tekniken, bl a hur man klarade den förhållandevis mycket trånga arbetsplatsen framme vid borrhuvudet med tunga lyft och hög temperatur.

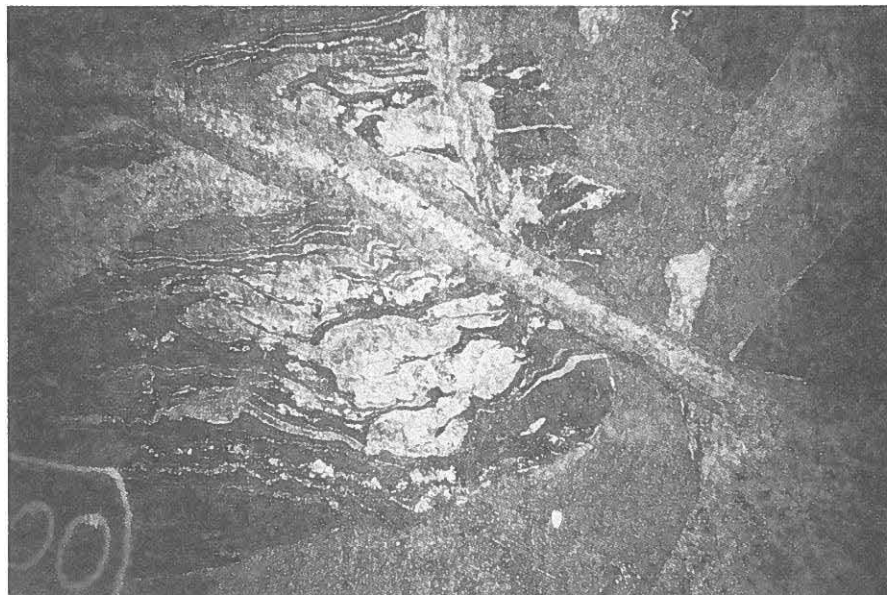
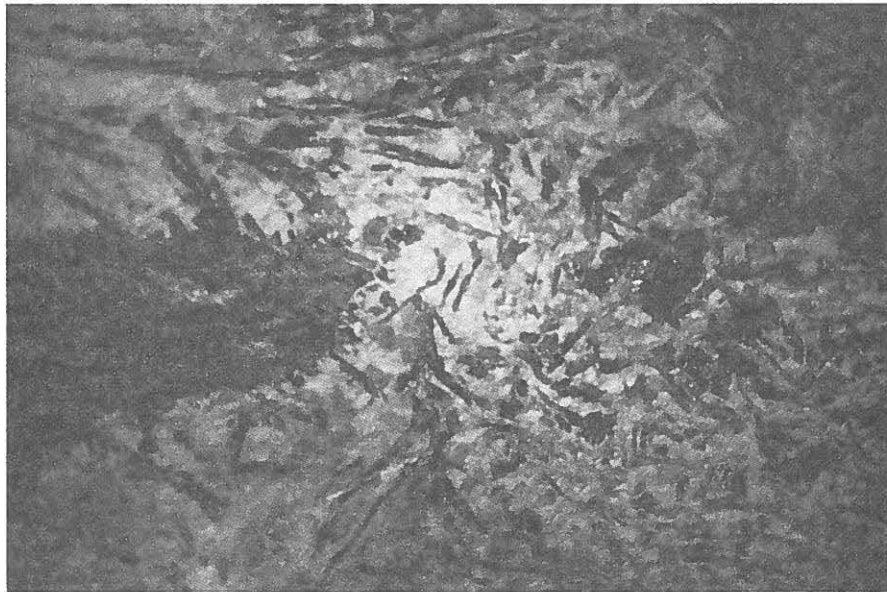


Foto: Torbjörn Hahn

**6. REDOVISNING AV DELRAPPORTERNA**

**6.1 INGENJÖRSGEOLOGI**

**6.2 VATTENSTRÖMNING I BERGGRUNDEN**

**6.3 DRIVNINGSDATA, PROGNOSEN OCH UTFALL**

**6.4 ARBETSMILJÖ OCH OMGIVNINGSPAVERKAN**

## 6.1 INGENJÖRSGEOLOGI

Som en del av uppföljningen av Saltsjö tunneln har delprojektet ingenjörsgologi syftat till att belysa bergmassans inverkan ur två aspekter. Den ena är hur bergmassan inverkar på drivningen och den andra hur den cirkulära tunnelutformningen påverkar resultatet från stabilitetssynpunkt. Föreliggande rapport vill belysa vilken kännedom man hade om bergmassan före entreprenaden och hur resultaten blev när det gäller omfattningen och inverkan av olika bergförhållanden. Projektet behandlar således bergarternas och sprickförhållandenas betydelse för variationer i indriften, liksom inverkan av svaghetszoner och vatteninflöden.

Tunnelsträckningen bedömdes innehålla medelkornig granit, gnejsgranit, olika gnejser samt vissa områden med amfibolit. De strukturgeologiska huvuddragen ligger med liten vinkel mot tunnelns längdaxel och t ex vissa mindre gångar av avvikande bergarter bedömdes följa tunnelsträckningen under längre avsnitt och påverka indriften såväl positivt som negativt. Detta gällde också avsnitt med mera sprickig bergmassa samt sprick- och krosszoner. Dokumentation av större och tydliga strukturer ingick i den normala uppföljningen. Mindre tydliga strukturer, såsom förändring i bergarternas textur antogs ge små förändringar i indrift. Om dessa förändringar upptog en större del av tunnelsträckningen kunde de dock påverka den totala indriften. Bergarterna avsågs alltså bli dokumenterade på ett antal signifikativa sträckor i fråga om mineralinnehåll, textur och anisotropi. Detta skulle ske, förutom genom kartering i tunneln, genom tunnslipsanalyser av ett antal bergartsprov, tagna i tunneln. Bergmassans sprickstrukturer föreslogs på samma sätt detaljkarterade inom ett antal provsträckor vad gäller sprickavstånd, öppenhetsgrad, sprickfyllnad samt sprickornas och sprickgruppernas orientering.

Prognostisering av indrift. Prognosen för indrift (borrbarhet) byggde på tester utförda på borrkärnor från borrhål och från delprover från närliggande tunnlar. Använda metoder för tester var enaxlig tryckhållfasthet, "Point-load-test", Cerchars abrasivitetstest och Handewiths modifierade inträngningstest. Resultatspridningen var emellertid stor

och gav osäkerhet åt antagna Npr-värden (net penetration). En korrelationsstudie av dessa metoder mot verklig indrift på ett antal utvalda sträckor bedömdes ha hög angelägenhetsgrad.

Bland annat avsågs följande frågeställningar att studeras:

- Ger ett stort antal mätningar i följd med lägre precision bättre underlag än ett fåtal laborietester med stor noggrannhet?
- Hur påverkar anisotropin resultaten i de olika bergartsleden?
- Finns det någon eller några kombinationer av testmetoder som ger bättre underlag vid projektering av TBM-borrning än andra testmetoder?
- Hur påverkar variationerna i bergarternas kvartshalt skärrulle-slitaget i hård bergmassa vid ett givet matningstryck?

Det kunde också vara av intresse att utföra spänningsmätningar i bergmassan men det bedömdes utifrån erfarenheter av andra tunnlar i stockholmstrakten att spänningarna sannolikt inte skulle leda till några stabilitetsproblem. Spänningsmätningar skulle dock utföras om så smått smällbergsfenomen uppträdde.

I områden med krosszoner avsågs i vissa fall deformationsmätningar bli utförda som ett led i att dimensionera förstärkningarna. Ytterligare en uppgift var att från framtagna information om bergarterna inom delsträckorna göra jämförelser med erhållna TBM-data.

De geologiska huvuddragen som underlag för prognosen framträdde bäst ur den topografiska och geologiska kartan och bergytans läge som de presenterades i förfrågningsunderlaget för entreprenaden. Av en översiktsritning framgick att depressionerna i markytan förväntades yttra sig som svaghetszoner i tunneln medan någon bergartsfördelning däremot inte angavs. En allmän uppfattning om bergförhållandena kunde man få genom de tunnelkarteringar från energiverkstunnel (E-tunnel) och tunnelbana (T-bana) som redovisades i förfrågningsunderlaget.

Omfattningen av svaghetszonerna bedömdes genom studier av sprickzonernas omfattning i befintliga tunnlar. Det konstaterades att en sådan vid t ex Stockholms Energis tunnel under Birger Jarlsgatan inte visade mer än 25 meters bredd och inte krävt speciella förstärkningar mer än sprutbetong. Det gjordes en värdering av zonerna där hänsyn togs till att Saltsjötunneln skulle komma att skära flertalet zoner under en liten vinkel. Ett försök till klassindelning gjordes avseende sprickklass med användandet av det klassifikationssystem som utvecklats vid Norges Tekniska Högskola (NTH).

Bergarterna uppgavs i förfrågningsunderlaget bestå av gnejs och granit med inslag av amfibolit. I bedömningarna för entreprenaden antogs "granitisk berggrund" där endast sprickklass och sprickorientering bedömdes inverka på indriften. För prognosen antogs därför bergarternas högre hållfasthetsvärden såsom de redovisats i underlaget, och ett värde för enaxlig tryckhållfasthet på 200 MPa ingick i SIABs prognos för beräkning av indriften. Vattenproblem som medförde injektering bedömdes uppträda i de svaghetszoner som tolkades från översiktsritningen. Några större förstärkningar förväntades inte störa indriften. Inverkan på indrift av injektering och förstärkning bedömdes till ca 7% av fullborrningstiden men ändrades under anbudets gång till 10%.

Den geologiska verkligheten visade att omfattningen av sprickzoner var i stort densamma som antagits i anbudets bergbedömning. Bergartsfördelningen visar att andelen granit var mindre än vad som bedömdes i prognosen. Detta har betydelse då skillnaden mellan indrift i gnejs respektive granit har visat sig vara väsentligt större än vad som antogs. Anledningen till att granitandelen har överskattats är sannolikt att graniten är mer resistent än gnejsen, vilket ger en överrepresentation i de blottade hållarna som framträder i de uppstickande höjderna. Andra bergarter som förekommer här är aplit, pegmatit och amfibolit. De uppträder som underordnade gångar i gnejsen och graniten. Tunnelsträckningen ligger i liten vinkel mot den förhärskande NV-SO-orienterade strukturen, varför det "snitt som skurits i jordskorpan" är förhållandevis litet, ca 2 km. Det har bl a inneburit att några större variationer inte har förekommit, dvs att samma växling mellan gnejs och granit har återkommit utefter hela tunnelsträckningen.

De strukturella dragen i markytan i form av svackor framträder på tunnelnivå normalt som svaghetszoner. Svaghetszonerna har oftast varit vattenförande. Sprick- och stickklasser har definierats enligt det system som utvecklats vid NTH (Norges Tekniska Högskola). Lerfyllda sprickor av större omfattning konstaterades endast vid position 2600 m, vilket medförde att man där omedelbart förstärkte med armerad sprutbetong. Sprickigheten ökar i svaghetszonerna där den ökar till II-III enligt det använda klassificeringssystemet, vilket utvecklats vid Norges Tekniska Högskola (NTH).

Bergarterna. De dominerande bergarterna består som tidigare nämnts av gnejs och granit. Av bergarterna utmed hela tunnelsträckningen utgörs 60% av ovittrad gnejs, 35% av ovittrad granit och 5% av markerade svaghetszoner, delvis vittrat och uppsprucket berg av varierande bergarter. Gnejsen uppvisar stor typvariation, alltifrån amfibolitisk gnejs till kraftigt rekristalliserad ådergnejs samt mer ljus- och glimmerfattig gnejs. Övergångarna till graniten är skarpa. Eftersom gnejsen är den äldre bergarten av de båda genomsätts den av en yngre granit, den så kallade stockholmsgraniten, som ofta bryter igenom gnejsen i form av granitgångar. I denna granit ligger gnejsen som brottstycken och ibland i stor omfattning. När gnejsen är kraftigt uppbruten av granit har bergarten kallats migmatit. Graniten har högre kvartshalt än gnejsen och lägre andel av fältspat och glimmermineral. Graniten och gnejsen är båda pjämkorniga. Gnejsen visar en reglering av de enskilda mineralkornen och en tydlig glimmerorientering. Gnejsen är genomgående grovkornigare än graniten. Någon större skillnad i mineralinnehåll mellan förekommande röda och grå graniter har inte kunnat konstateras enligt mikroskopering. Den röda graniten är mestadels en indikation på närhet till vattenförande och vittrade zoner. Generellt innehåller den mer sprickor än den grå. Sprickorna är ofta läkta med kvartsådror eller kalcit.

Graniterna är massformiga och isotropa utan någon synlig mineralorientering. Gnejsen och amfiboliten uppvisar däremot på många ställen en tydlig anisotropi. Gnejsen är ibland utbildad som ådergnejs och uppvisar en vindlande struktur. Bredden av ljusa och mörka band i gnejsen varierar starkt från centimetrar till decimetrar.

Hållfastheten. Prov för hållfasthetstester har tagits såväl före som under entreprenaden. Enaxliga tryckhållfasthetstester, point-load-tester samt inträngningstester enligt modifierad "Handewith"-metod har utförts vid KTH. Atlas Copco har utfört "Cerchars" abrasivitetstest och brottseghetstester. Generellt har gnejs gett lägre hållfasthetsvärden än granit. (Se Tabell 6.1:1.)

Tabell 6.1:1 Genomsnittliga hållfasthetsvärden för prover tagna i tunneln

Provning	Granit	Gnejs
Enaxiell tryckhållfasthet	204 (MPa)	122 (MPa)
Point Load	9.2 (MPa)	7.6 (MPa)
Handewith inträngningstest	0.041 mm/kN	0.054 mm/kN

#### Samband mellan geologi och indrift

I detta avsnitt behandlas inverkan av olika geologiska förhållanden på indriften. Av stor betydelse är svaghetszoner och bergarter samt förekomsten av sprickor och "stick"\*. Exempel på presentation ses i Bilaga 2.

Med geologiska svaghetszoners inverkan på indriften avses här i första hand driftstopp på grund av tätningsarbeten och förstärkningar. Tätningsarbeten har utförts som för- och efterinjektering. I entreprenörens prognos antogs sprickzonernas inverkan på indriften för tätning och förstärkning till ca 10%. Det är endast förinjekteringen som påverkar själva indriften. Vid ett tillfälle har dock TBM stoppats i samband med efterinjekteringsarbeten. De förhoppningar man hade på utrustningen för förinjektering med en borrhög monterad bakom borrhuvudet har inte helt infriats. Det sammanhänger framför allt med att en sektor i tunnelns botten och tak inte går att nå med borren (se Fig. 6.1:1).

---

\* Norsk beteckning som inte har någon bra motsvarighet i svenska språket. Med stick avses mindre, icke genomgående spricka.

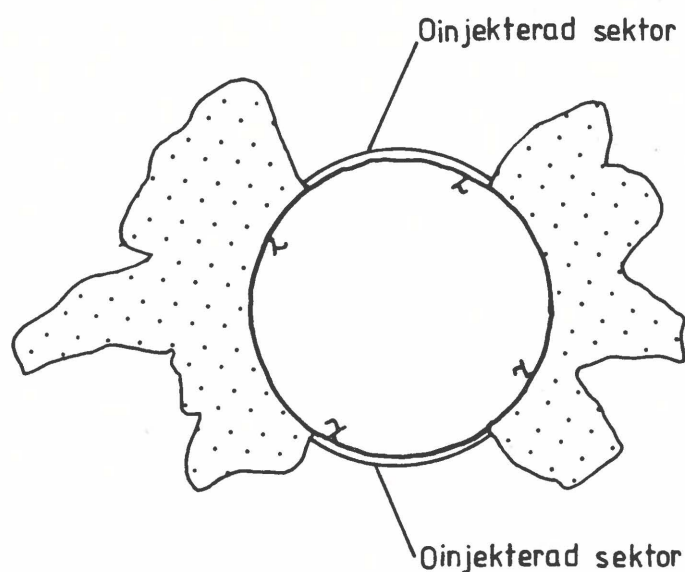


Fig. 6.1:1 Injekteringszoner med använd förinjekteringsutrustning

De begränsade möjligheterna att rikta injekteringshålen medför också att det fordras ca 20-30 m långa borrhål framför maskinen för att man skall få ett tillräckligt litet avstånd mellan borrhålen i denna sektor. Då kan den vattenförande zonen redan vara passerad. Detta har lett till att en stor del av injekteringsarbetet har utförts som efterinjektering. Stora ansträngningar har därför lagts ned på att finna lämpliga injekteringsmaterial och metoder. En avsevärd begränsning är att efterinjekteringen i princip måste vänta tills hela bakriggen har passerat den vattenförande zonen, vilket kan medföra problem både i och utanför tunneln. Dröjsmålet beror på att man av säkerhetsskäl inte kan utföra injekteringen utmed transportbandet under drift. Efterinjekteringen har därmed blivit mycket svår att placera in i tidplanen. Mellan kvälls- och morgonskift kan normalt endast ca fyra timmar komma ifråga, beroende på transporter i tunneln.

Efterinjekteringsarbetena har därför utförts under helger. Även detta har mestadels varit svårt eftersom dessa tidsperioder använts för service av TBM, vilket för med sig hindrande trafik i tunneln.

Vid endast två tillfällen, vid positionerna 2000-2010 m och 2600 m, har förstärkningar och driftförstärkning med sprutbetong utförts.

Förstärkningsarbetena har blivit mindre omfattande än beräknat och till detta bidrar frånvaron av sprängskador i konturen samt tunnelns cirkulära form:

- Den cirkulära formen ger (teoretiskt) inga dragspänningar i tunnelkonturen för normala variationer i största och minsta huvudspänning.
- Vid normal tunneldrift genom borrhning och sprängning uppstår normalt en uppsprucken zon i kvarstående bergmassa ofta mer än 0,5 m utanför konturen, även vid slätsprängning. TBM ger ingen sådan skadezon.

När det gäller vatteninläckningar finns det (teoretiskt) inga skäl till att en fullborrade tunnel skulle ge väsentligt mindre vatteninläckning än en sprängd. Tunnelns area har i och med TBM-borrhningen kunnat göras mindre än om tunneln hade utförts konventionellt. Det medför möjligen att färre vattenförande zoner punkteras, eftersom korsande sprickor och spricksystem mestadels är vattenförande i **kanaler** i sprickans plan.

Det finns anledning att anta att väsentligt större förstärkningsproblem hade uppkommit i en konventionellt borrade och sprängd tunnel. En indikation på detta är den förstärkning som utförts i den sprängda delen av tunneln vid passerandet av en sprickzon. Där behövdes såväl bultning som bitvis fiberarmerad sprutbetong.

Bergartens inverkan. I forskningsuppgiftens arbetshypotes antogs att även små variationer i en i övrigt god berggrund kunde ha en betydelsefull inverkan på indriften. Normalt och bra berg antogs nämligen vara dominerande och en liten avvikelse i borrhbarhet kunde få stor betydelse genom sin ackumulerande effekt. Det framgår också av resultaten att indriften skiljer sig för samma sprick- och stickklass mellan de olika bergarterna.

Bergartens inverkan kan konstateras genom att man jämför indriftshastighet i olika bergarter men med samma sprick- och stickklass.

I tunneln är den dominerande sprick- och stickklassen 0-I. Enligt

Fig. 6.1:2 ger gnejsen i genomsnitt en 50%-ig höjning av indriften för samma sprickklass. Eftersom matningstrycket har sänkts när indriftshastigheten överstiger 2,5 m/h har de erhållna värdena dividerats med matningstrycket och maskinberoende parametrar för att filtrera bort nämnda inverkan. Man erhåller då ett tryckoberoende borrarbarhetsindex  $I_b$  (se även Fig. 6.1:3). För såväl sprickklass 0-I som I-II är skillnaderna tydliga mellan de olika bergarterna.

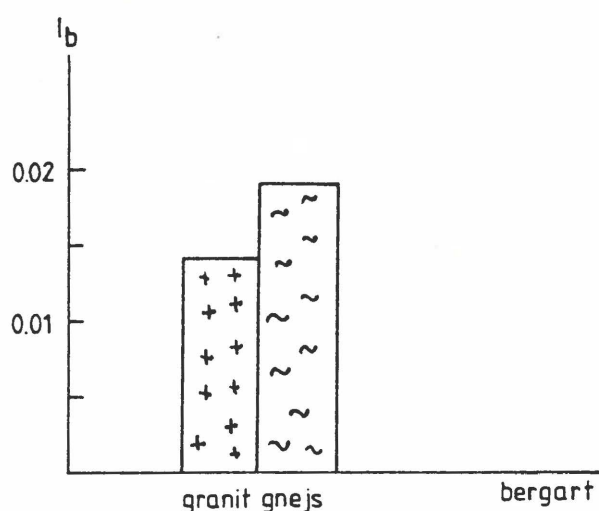


Fig. 6.1:2 Borrarbarhetsindex  $I_b$  för granit respektive gnejs för sprickklass 0-I

I enlighet med belastningskurvan för maskinens diskar, redovisad av Atlas Copco, framgår att brytpunkterna ligger högt i den hårda bergmassan. Det krävs således en viss minsta belastning för att kunna åstadkomma en sönderbrytning av berget. Mindre tryck ger en mycket låg indrift då berget mer eller mindre "slipas" ned. Brytpunkten kan konstateras ligga högre för graniten än gnejsen. Använda tryck har legat något högre än brytpunkten på kurvan. Det innebär att inverkan av den branta delen på kurvan påverkar skillnaden eftersom granitens ligger strax ovanför brytpunkten, dvs derivatan på den branta delen ger en i förhållande till matningstrycket högre effekt. (Se även Fig. 6.3:2 sid 57.)

Sprickor och stick inverkar positivt på borrarheten men här i mindre grad genom att deras orientering har liten vinkel mot tunnelaxeln. Sprickigheten har en större inverkan än skillnaderna i bergarterna granit och gnejs, vilket framgår av Fig. 6.1:3. Genom att sprickzonerna endast upptar 5% av tunnel längden blir deras inverkan mindre på det totala driftsresultatet. Eftersom sprick- och stickorienteringen varit likartad efter hela tunnelsträckningen har det inte bedömts meningsfullt att vidare studera sprick- och stickorienteringens inverkan.

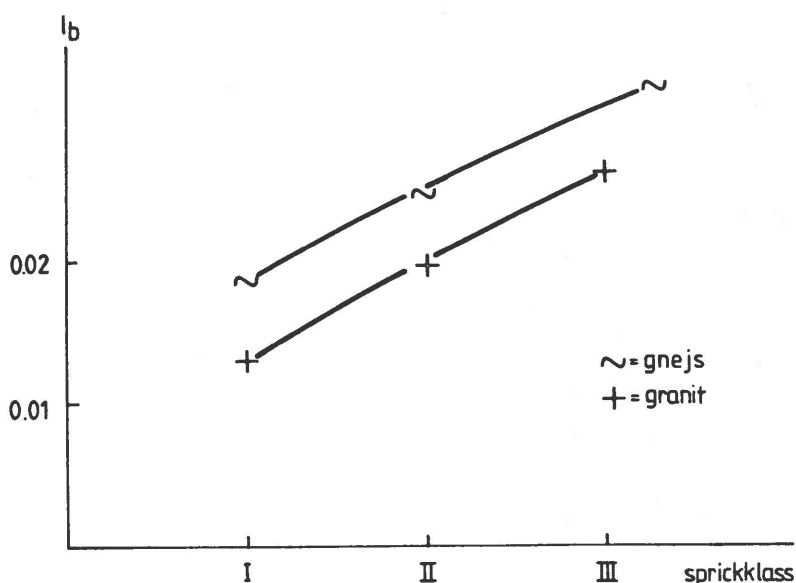


Fig. 6.1:3 Diagrammet visar skillnaden i borrarhet  $I_b$  för gnejs och granit för olika sprickklasser såsom de uppmätts i Saltsjö tunneln

Sprickzonernas inverkan på maskinens driftsäkerhet. Det finns vissa tecken som antyder att sprickzonerna, trots lättborrat berg, kan ha gett maskinstörningar. Maskinhaveriet under hösten 1987 skedde t ex i anslutning till de omfattande sprickzonerna mellan 2000 och 2600 m när utmattning uppstod i planetväxeln på grund av resonansfenomen. Maskinen (TBM) utsätts för extra påfrestningar, i synnerhet när sprickigheten ligger med liten vinkel mot tunnelaxeln, dvs påfrestningarna sker excentriskt. Kraftöverföringssystemen utsätts härigenom för momentpå-känningar som kanske kan medföra materialutmattningar i den stora omfattning som varit fallet i Saltsjö tunneln. På samma sätt uppträdde maskinproblem i anslutning till störningszonen vid 5200 m.

Inverkan av geologin på det totala driftresultatet. Av den totala entreprenadtiden har man fullborrat 31% av tiden. Detta om man bortser ifrån flera stora driftstopp som ej kan anses vara normala driftstörningar. Sprick- och stickklasserna ligger i genomsnitt inom området 0-I. I anbudet utgick man från sprickklass I för 90% av tunnelsträckningen. I entreprenörens prognos utgick man från i huvudsak granitisk berggrund med gnejs- och amfibolitinslag. Resultatet från fullborrningen visar på genomsnittligt 50% större indriftshastighet i gnejsen jämfört med graniten. Förekomsten av sprickzoner har ej påverkat det totala resultatet på ett avgörande sätt, på grund av att över 90% av tunneln går genom sprickfattigt berg (0-I).

Kännedom om bergartsfördelningen är därför av avgörande betydelse för en riktig prognos. Resultatet visar att inverkan av bergarter har varit minst lika betydande som driftstörningar orsakade av tättnings- och förstärkningsåtgärder.

#### Jämförelser mellan sprängd och fullborrad tunnel

Tunnelns sprängda och fullborrade avsnitt går delvis genom samma berggrundssnitt varför man, med viss försiktighet, kan dra vissa slutsatser. Den mest uppenbara skillnaden mellan den fullborrade och sprängda tunneln är givetvis den cirkulära sektionen och de släta väggarna efter fullborrning men även den större uppsprickningen längs svaghetsplan i bergmassan i den sprängda tunneln. Tolkningen av sprickigheten blir således olika i respektive tunnel. Det visar också att det finns betydligt fler svaghetsplan än vad som syns i en fullborrad tunnel.

Vidare framträder de naturliga sprickorna tydligare i den fullborrade tunnelns väggar. Samtidigt kan emellertid svårigheter förekomma att bedöma spricklutningarna i en fullborrad tunnel då sprickyterna är dolda i bergmassan. Spricktolkningen, som är av betydelse för ansättningen och riktningen av injekteringsborrhål, kan därmed påverkas både positivt och negativt i en fullborrad tunnel.

Förundersökning av berggrunden bör utföras med delvis olika inriktning för fullborrade respektive sprängda tunnlar. För fullborrning bör bergarternas kvartshalt studeras, då den har stor betydelse för cutter-slitaget. Likaså bör s k inträngningstest utföras för att kunna bedöma erforderlig matningskraft för optimal indrift. En huvudorsak till ovanstående är att fullborrningsmaskinen utgör en stor investering och att den därmed bör gå så många timmar som möjligt varje dygn.

Vid fel på TBM stoppar nästan all verksamhet medan man vid konventionell drift enkelt kan byta ut t ex ett borrhaggat, utföra sonderingsborrning, förinjektering etc.

För vissa tunneltyper där en flexibel layout är möjlig, t ex för kabeltunnlar och fjärrvärmegtunnlar, kan man i viss mån under arbetets gång vid sprängning ändra tunnelns höjd- och sidoläge, t ex vid en oförutsedd svacka i berget eller dåliga bergförhållanden. Med fullborrning är möjligheterna till riktningsändringar starkt begränsade.

Fullborrningstekniken medför givetvis att spränggasventilation ej krävs, varför antalet tillfartsorter kan minimeras. För hela Saltsjö-tunnelns 7,6 km finns således enbart en tillfartstunnel belägen vid Saltsjö-tunnelns början vid Solna Värmeverk.

Skrotnings- och förstärkningsbehovet blir i en fullborrade tunnel nära nog försumbart jämfört med sprängda tunnlar i "normalsprickig granitisk berggrund".

Sonderingsborrning och borrning för förinjektering bedöms enklare att utföra med gott resultat vid konventionellt sprängda tunnlar då tunnelgaveln bättre kan observeras och borriktningen kan ändras i större omfattning. Framtidens fullborrningsmaskiner bör konstrueras så att förinjektering och sondering kan utföras såväl under som ovanför maskinen, vilket nu ej varit möjligt. Tunnelbotten är svår att rensa och åtgärda i efterhand även om det är lättare i en fullborrade tunnel.

Dammar för att mäta vatteninläckningen bör i fullborrningstunnlar enkelt kunna anordnas med förtillverkade betongelement som gjutes fast. Risken att vattnet skall passera i berget under dammen är ringa, då berget ej spräckts upp som vid sprängda tunnlar. Vid rälsburen utlastning måste dammarna kunna placeras under rälsen, som då måste utformas med hänsyn till detta.

Slutligen skall nämnas den stora fördelen med minskade bullerstörningar för omgivningen vid fullborrning i tätort. Endast i undantagsfall har störningar kommit från fullborrningsmaskinen och då främst vid borrning med de sidomonterade små borrar-maskinerna för sonderingsborrning.

Omgivningsstörningar har uppstått vid passage under t ex bostadshus grundlagda på berg och under Operan vid dess föreställningar.

#### **SLUTSATSER**

Delprojektet redovisar framför allt bergarternas och sprickfördelningens inverkan på indriften. De resultat som redovisas med markerade skillnader i indriftshastighet för olika bergarter med samma uppsprickningsgrad är viktiga. Bergarternas inverkan kan konstateras bli större ju mindre antal sprickor som finns.

Hade matningstrycket varit större, t ex 30 ton/disk hade skillnaderna mellan bergarternas inverkan blivit mindre. Denna skillnad blir därför i hög grad knuten till använd maskin med dess givna maximitryck. Å andra sidan finns det inte något intresse av att höja matningstrycket för mycket och det återstår mycket utvecklingsarbete för att klara problemen med de ytterligare påfrestningar som höjt matningstryck innebär. En kapacitetsökning kan även medföra svårigheter att hinna transportera ut bergmaterialet med såväl transportband som vagnar.

Vidare har påvisats korrelation mellan inträngingstester och verklig indrift.

## Appendix till 6.1

### **BORRHÅLSRADARUNDERSÖKNING VID SALTSJÖTUNNELN**

*(ur Radar Investigations at the Saltsjö Tunnel - Predictions and Validation, SKB Technical Report 89-18, O Olsson, K Palmqvist)*

Syftet med undersökningen var att prova borrhålsradarteknikens möjligheter att förutsäga bergets karaktär innan tunneldrivningen genomfördes. Avsikten var att utföra projektet som ett "blindtest", dvs tolkningen av radarinformationen gjordes utan stöd av några andra data, för att se vilken typ av information man kunde få fram enbart genom radar-mätningar.

Detta blindtest blev emellertid inte helt meningsfullt, då den ursprungligen använda tomografialgoritmen hade vissa begränsningar. De första tomogrammen innehöll ett flertal felaktiga anomalier (artefakter), vilket resulterade i en radartolkning med flera felaktiga strukturer. Det ansågs därför inte relevant att jämföra den ursprungliga radarmodellen med de data som erhöles från tunneln. Jämförelsen har i stället gjorts med den reviderade radarmodell som gjorts med utgångspunkt från nya tomogram som tagits fram med en ny tomografialgoritm.

Den första frågeställningen är huruvida radarns prognoser stämmer överens med geologin och om de data som erhöles var relevanta i förhållande till drivningen av tunneln. Generellt uttryckt är överensstämmelsen mellan radarmodellen och de geologiska förhållandena på platsen god. Det finns en huvudstruktur som identifierats av radarn. Denna struktur har observerats såsom en nästan horisontell zon ungefär 25 m ovanför tunneln med en liten stupning mot öster. Zonen beräknades korsa tunneln någonstans i intervallet 1/860-1/910. Den faktiska skärningen visade sig ligga vid 1/880. Man kan konstatera överensstämmelsen mellan en rad mindre strukturer som uttolkats från radardata och sprickzoner eller koncentrationer av mindre sprickor, som observerats i tunneln eller borrhålen.

Vad gäller konstruktionen av tunneln, så står det klart att endast en sprickzon ("A") (se Fig. 6.1:4) har visat sig ha betydelse under borrhingsarbetet i tunneln. Där tunneln korsades av denna zon blev det nödvändigt med en ganska omfattande injektering för att minska vatteninläckningen i tunneln. Det står också klart att de mindre strukturer som observerats i radardata inte har haft någon inverkan på tunneldrivningen.

I den ursprungliga radartolkningen från Saltsjötunneln (och även från andra platser som undersöktes vid denna tid) gjordes försök att identifiera så många bergstrukturer som möjligt. Radar är en undersökningsmetod som ger hög upplösning, vilket innebär att det i många fall är möjligt att observera mycket små strukturer i bergmassan. Dessa strukturer har sällan någon betydelse under byggnationen. Således bör tolkning av radardata för konstruktionsändamål koncentreras till större anomalier som framträder tydligt i reflektions- och tomografidata.

Nästa frågeställning är hur man på effektivaste sätt använder borrhålsradarn i samband med tunnelbyggande. Det sätt som använts i detta experiment kan i de flesta fall inte anses kostnadseffektivt. Att borra försökshål från ytan och utföra mätningar i dessa hål är relativt kostsamt. Sådana undersökningar ger jämförelsevis detaljerad information om en relativt kort sektion av tunnelns längd (i storleksordningen 100 m). Det kan mycket väl hända, som i detta fall, att för byggnationen viktiga uppgifter ligger utanför den undersökta sektionen. Det bör emellertid påpekas att användning av borrhålsradar avsevärt ökar mängden av den information som kan erhållas i ett borrhål genom dess möjlighet att uppfatta också vad som finns i berget inom ett visst avstånd från själva borrhålet.

Användning av radar i tunneln öppnar intressanta möjligheter. Radarmätningar kan göras i borrhål framför tunnelfronten eller i själva tunneln. Det är också möjligt att göra mätningar där en av antennerna är placerad i ett borrhål och den andra inne i tunneln. Det borde vara möjligt att genomföra radarmätningar i en tunnel på sådant sätt att de kontinuerligt kan ge förhandsinformation om förhållandena framför tunnelfronten till en förhållandevis låg kostnad. Detta är ett område som motiverar fortsatt forskning.

Detta projekt har demonstrerat borrhålsradarteknikens förmåga att förutsäga geologiska förhållanden, som kan vara av betydelse för kostnad och säkerhet när man driver en tunnel. Ytterligare utveckling av metoden behövs dock för att göra den kostnadseffektiv i detta sammanhang.

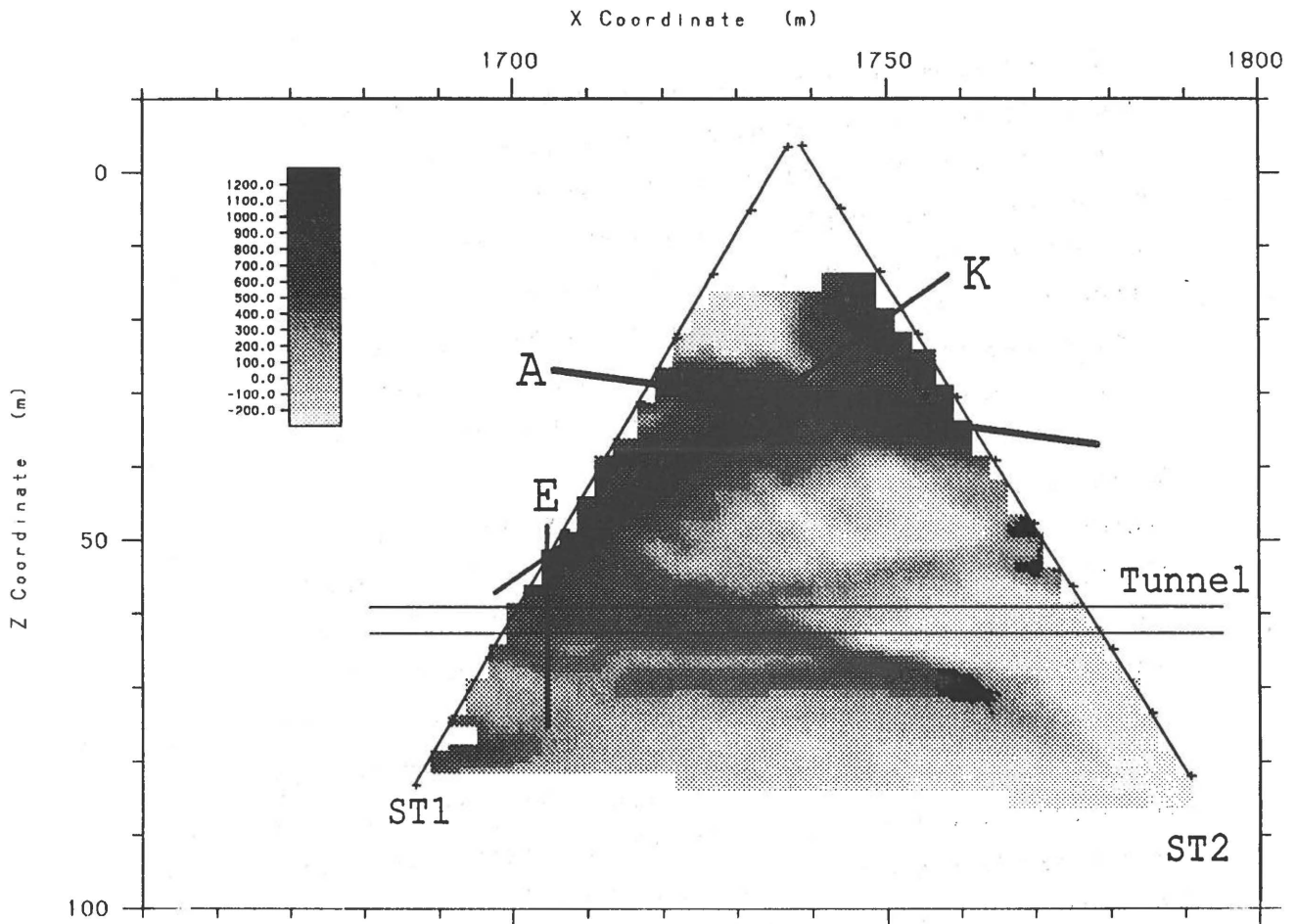


Fig. 6.1:4 Exempel på radartomogram

## 6.2 VATTENSTRÖMNING I BERGGRUNDEN

### BAKGRUND

Ett av de största problemen vid tunnelbygge i det svenska urbeget är vatten. Speciellt vid tunneldrivning under stadsbebyggelse utgör tätningen en stor del av den totala tunnelkostnaden. Man måste då ställa särskilt höga krav på tunnelns täthet med tanke på risken för skadliga grundvattensänkningar.

Grundvattenströmning i granitisk berggrund sker längs med bergets sprickor. Storleken hos de vattengenomsläppliga sprickorna och kanalerna i berget kan variera kraftigt och det är svårt att i förväg klara ut hur stor vattenföringen i en viss bergmassa är och hur besvärligt det är att täta de vattenförande sprickorna.

Det är därför angeläget att vi förbättrar vår kunskap om hur vattenströmningen i berggrunden sker, detta för att vi i framtiden skall kunna ställa riktiga prognoser avseende de geohydrologiska förhållandena.

Detta delprojekt har haft som målsättning

- att bestämma hur vattenströmningen sker i olika typer av spricksystem och vattenförande zoner,
- att finna praktiska regler för att förutse vattenförekomsten i berg vid såväl projekteringen som vid tunneldrivningen,
- att klarlägga om fullborrningstekniken ger bättre möjligheter än konventionell borrning/sprängning och att oavsett berg- och grundvattenförhållanden erhålla en tillräcklig tätning,
- att belysa frågan om det är lättare att bemästra oväntade problem i en fullborrade tunnel än i en konventionellt utförd tunnel.

Projektet har genomförts av Hagconsult AB under ledning av civilingenjör Lars Lundström. Fältarbetet med insamling av data har utförts huvudsakligen av geolog Karin Rybäck och civilingenjör Lars Lundström under tiden 1986-1988 med tyngdpunkten av arbetet hösten 1988.

#### UTFÖRANDE

Forskningsarbetet har baserats på studier nere i tunneln och på entreprenören SIABs dokumentation från vattenförlustmätningar i sonderingshål samt från injekteringsarbetena. I tunneln studerades partier med uppenbar vattenförlust vid sonderingsborrningen samt avsnitt med vattenläckage. De geologiska orsakerna till läckaget noterades. Utöver dessa mer noggranna studier gjordes också en översiktlig granskning längs med större delen av tunneln, varvid synliga vattenläckage noterades. Denna modell valdes i stället för att i detalj dokumentera samtliga diskontinuiteter på vissa utvalda 20-meters avsnitt, vilket från början var tänkt.

Förutom studier av vattenförekomsten i bergmassan i den fullborrade tunneln har, som inledningsvis nämnts, entreprenörens dokumentation utnyttjats. Dokumentationen innehåller uppgifter om vattenförluster i ostört berg erhållna vid mätningar i försonderingshålen framför tunnelfronten. Materialet innehåller också protokoll från förinjekteringar och efterinjekteringar med uppgifter om borrhålens lägen och injekterade mängder. Resultaten från läckvattenmätningarna över mätdammar och likaså uppgifter från vatteninfiltration i några borrhål har studerats.

Fyra tunnelsträckor har detaljgranskats, varvid alla synliga sprickor noterats. Sprickkaraktär, sprickfyllningar, sprickornas längd och läge i tunneln har lagts in på ritningar. Vidare har vattenläckage, mineralutfällningar och spår av injekteringsmedel noterats. Totalt 38 tunnelavsnitt har studerats i tunneln, särskilt med inriktning på vattenströmning och vattenläckage. På dessa platser har det man kan iaktta i tunneln korrelerats med vattenförlustmätningarna gjorda i sonderingshålen. Vidare studerades vattenläckagen ur sprickorna och noterades karaktären av läckage. Typen av sprickor och sprickkonstellationer,

relaterade till vattenläckagen, bestämdes. En serie exempel på olika typer av vattenförande sprickor har fotograferats och är redovisade i rapporten över delprojektet.

## REDOVISNING

### Sammanställning av uppgifter om vatten i berggrunden

Olika slags uppgifter som direkt eller indirekt indikerar vattenströmning i berggrunden har sammanställts i form av en sektion längs tunneln, se Fig. 6.2:1. Här framgår varje sonderingshåls läge, längd och vattenförlust vid vattenintryckning hål för hål. Ett medelvärde av vattenförlusten i ett visst avsnitt i tunneln är framräknat och redovisas. Den högsta specifika vattenförlusten som erhållits i ett visst snitt är också visat, uttryckt i l/min m MPa. Injekterade mängder vid förinjektering och efterinjektering är sammanställda i längdsektionen.

### Sammanställning av läckage, sonderingar och injekteringar

	2/550	2/600	2/650
Synliga läckage (överblickligt)			
Sonderingsborrning med vattenförlust och injekterad mängd per bh	0 3,4,1,0,3,1,4,8	3 3,4 4 30,0,2,0,30	20,0 10,5,1,15 0,3,3,5,1,1 2,2,4,6,8 1,4,3,6
Spec. vattenförlust	1 (2)	2 (2)	17 (10) 2 (8)
Förinjektering med mängd injekt.medel/m	c=64	c=140 m=4	c=940 m=18 c=510 m=8
Efterinjektering med mängd injekteringsmedel			u=1
Granskat avsnitt			0,3 0,1

Fig. 6.2:1 Utdrag ur delprojektrapportens sammanställning av läckage, sonderingar och injekteringar. Exempel från tunnelavsnittet under Karlbergskanalen.

### Granskning av tunnelavsnitt

De avsnitt som studerats nere i tunneln beskrivs med avseende på spricksituationen och vattenutträden m m. Beskrivningarna med tillhörande fotografier visar att även i en relativt homogen berggrund uppträder vatten på en mängd olika sätt. Alla sprickobservationerna har använts för en statistisk bearbetning. En del av resultaten presenteras nedan.

### RESULTAT OCH ANALYS

Saltsjötunneln med dess relativt släta väggar efter fullborrning har givit en unik möjlighet att studera grundvattenströmningen i Stockholms berggrund.

Den hydrogeologiska studien omfattar 5,8 km av den totala tunneln. Flera sätt att direkt eller indirekt undersöka vattenströmningen har använts:

- Studie av resultaten från vattenförlustmätningarna i sonderingshålen, borrade från fronten av TBM. Borrhålen är gjorda i en bergmassa som i övrigt till stor del är opåverkad av fullborrningen.
- Injekteringsprotokollen har varit ett bra komplement till vattenförlustmätningarna även om använd mängd injekteringsbruk inte är något absolut mått på sprickporositeten. Emellertid visar protokollen de tätningsproblem som vattenförekomsten i bergmassan orsakat.
- Studier av synliga läckage i tunneln har gett en bild av hur och var vatten rinner i bergmassans sprickor. En kvantitativ värdering av vattenströmningen kunde dock inte erhållas eftersom de vattenförande sprickorna i vissa fall var injekterade. På mer än halva tunnellängden har det emellertid inte gjorts någon injektering. Det innebär att vid måttlig vattenföring i bergmassan har den naturliga vattenströmningen kunnat studeras.

Värdena från vattenförlustmätningarna ger en uppfattning om berggrundens olika konduktivitet längs tunneln. I Fig. 6.2:2 och :3 visas resultat från bearbetningen av protokollen från vattenförlustmätningarna.

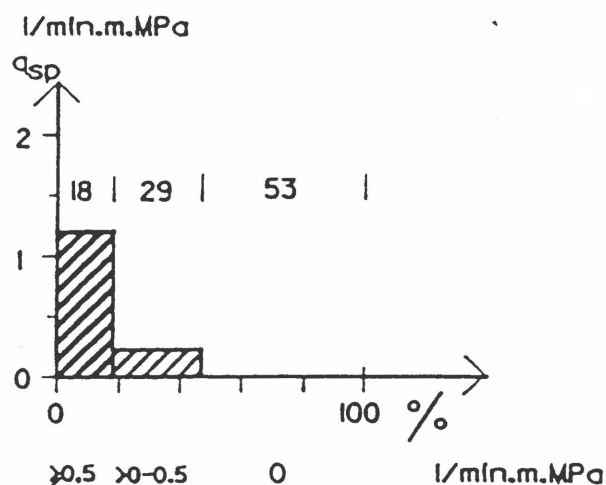


Fig. 6.2:2 Den specifika vattenförlusten ( $q_{sp}$ ) i sonderingshålen är indelad i tre grupper. Diagrammet visar fördelningen mellan dessa grupper uttryckt i procent av tunnelängden samt den genomsnittliga specifika vattenförlusten för respektive grupp. (Gäller medelvärde för samtliga hål i varje avsnitt.)

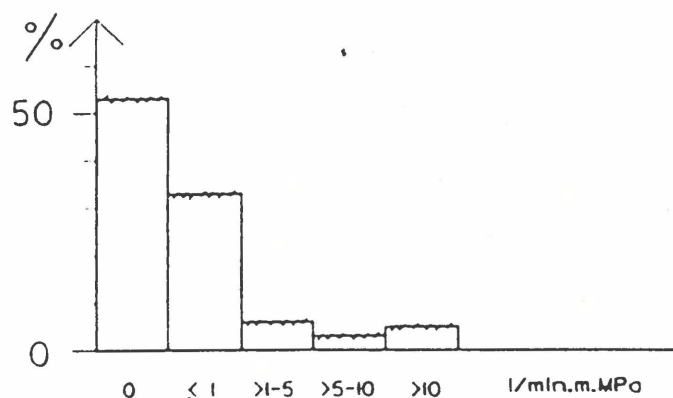


Fig. 6.2:3 Fördelning av den specifika vattenförlusten ( $q_{sp}$ ) enligt vattenförlustmätningarna på tunnelsträckan 1/215-7/050. (Gäller max värde för ett enskilt hål inom varje avsnitt.)

Det är intressant att konstatera att på mer än 50 % av sträckan är berget tätt enligt mätresultaten. Den huvudsakliga vattenströmningen tycks ske på ca 18 % av sträckan. På 82 % av tunnelsträckan är medelvärdet av den specifika vattenförlusten 0,5 l/min m MPa eller mindre. Detta värde utgör en praktisk undre gräns för injekterbarhet med cement. Endast på 14 % av tunnelsträckan har man haft ett borrhål som givit högre specifik vattenförlust än 1 l/min m MPa. På den sträcka som studien omfattar, 5,8 km tunnel, är det ca 3 km där ingen vattenförlust registrerats. Omkring 20 % eller 600 m av denna sträcka utgör avsnitt där man efterinjekterat eller som har synliga vattenläckage.

Tjugofem avsnitt med mer omfattande förinjektering förekommer. Det motsvarar i genomsnitt 1 à 2 vattenförande sonderingsavsnitt per 200 m tunnel. Ett sådant avsnitt är ca 25 m. Dessa vattenförande partier är tämligen jämnt fördelade längs tunneln.

Uppgifter om sprickor från vilka det rinner eller droppar vatten eller som visar spår av injektering har bearbetats, se Fig. 6.2:4. Följande har då framkommit: mer än 95 % av de vattenförande diskontinuiteterna är enskilda sprickor och inte fullt 5 % utgörs av sprick- eller krosszoner. Nästan hälften (47 %) av de vattenförande sprickorna är flacka, i de flesta fall med ca 5-15° lutning. De branta sprickorna som för vatten ligger vanligen (ca 85 %) i huvudsprickriktningen, dvs är nästan parallella med tunneln, riktning i stort NV-SO. Vattenförande sprickor har till mer än 75 % lång utsträckning och kan följas runt hela tunnelperiferin. Även kortare sprickor för vatten men då oftast tillsammans med någon eller flera längre sprickor. Ibland uppträder emellertid vattenläckande korta sprickor utan något synligt samband med andra diskontinuiteter. De synliga läckagen i tunneln har olika karaktär. Det kan rinna vatten längs hela spricköppningen och det kan rinna eller droppa från skärningspunkterna mellan olika sprickor. Utfällning av mangan- och järnföreningar ger tydliga indikationer i tunneln om vattenströmningen i sprickorna. Vi fann också, att det är vanligt med vattenförluster i ett sonderingshål på en sida av tunneln medan det är helt torrt i ett hål 1-3 m därifrån. Det är bara inom de väsentligt vattenförande avsnitten som samtliga eller nästan samtliga hål i en sektion läcker vatten.

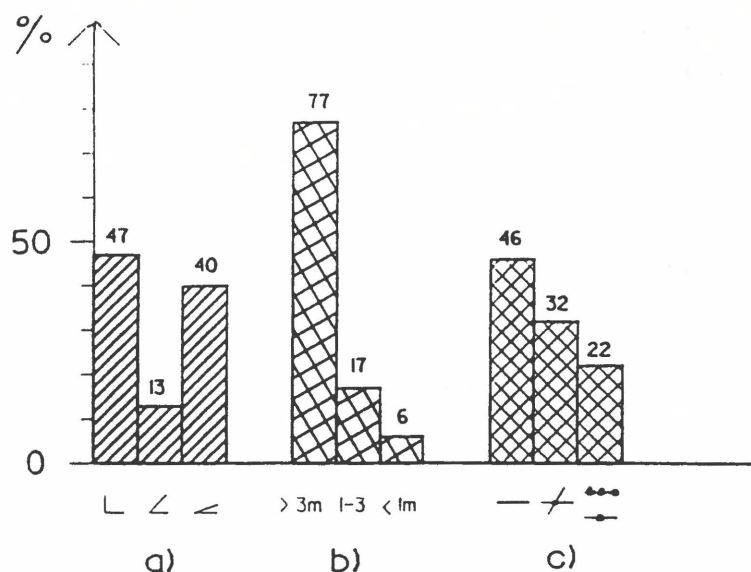


Fig. 6.2:4 Vattenförande sprickor. Fördelningen av  
 a) olika spricklutningar 0-30°  $\angle$ , 30-60°  $\angle$ , 60-90°  $\angle$   
 b) olika spricklängder samt  
 c) karaktären hos vatteninrinningen från sprickorna  
 kontinuerligt längs sprickan —  
 punktvis i sprickkorsning ↗  
 punktvis längs en spricka, } →  
 på ett eller flera ställen —

### DISKUSSION OCH SYNPUNKTER

Utredningen bekräftar tidigare erfarenheter om att större svaghetszoner i bergmassan kan man i stort förutse, indikera, genom vanliga förundersökningar. Man kan i förväg varna för vattenförekomst i indikerade zoner men bara gissa på flödets storlek.

Andra vattenförande avsnitt, i vilka relativt omfattande förinjekteringar gjordes, var svåra att förutse. Endast omkring hälften av dessa fanns indikerade i form av depressioner i berggrunden. Svårigheten att i projekteringskedet bedöma vattenföringen i en normalsprickig bergmassa är uppenbar när man finner att även sonderingshål från tunnelfronten allt som oftast borrar på sidan om vattenförande sprickor.

Det finns att välja mellan ett antal olika åtgärder under tunneldrivningen för att förhindra besvärande och skadliga grundvattenuttag:

- sonderingsbörning och förinjektering
- efterinjektering
- vatteninfiltration via borrade hål inifrån tunneln.

Oftast blir det en kombination av de två första åtgärderna som kommer till användning vid tunneldrivning i tätort. Även infiltration förekommer.

Den fullborrade tunneln erbjuder bättre möjligheter att se var och hur vatten tränger in i tunneln. Det blir därför lättare att planera för efterinjekteringar. Det är också lättare att avgöra hur lång sträcka som behöver injekteras. Det största problemet är det starkt begränsade utrymmet i en fullborrade tunnel av Saltsjötunnelns storlek (3,5 m diameter). Efterinjektering kräver dessutom gott om tid, vilket man inte har när service av TBM-utrustning, transporter etc tidsmässigt skall trängas in i dygnsrytmen med efterinjekteringen.

I stället för efterinjektering kan det både gå fortare och vara billigare att genom vatteninfiltration kompensera vattenläckaget till tunneln. Det bör alltså snabbt kunna borrar hål från den fullborrade tunneln, vilka penetrerar de konduktiva sprickorna och sedan sätta dessa under vattentryck. Metoden bör kunna vidareutvecklas och anpassas för den fullborrade tunneln. Temporär vatteninfiltration kan kombineras med senare efterinjektering. Den släta ytan i en borrar tunnel bör kunna ge möjlighet till utveckling av nya metoder att efterinjektera.

En metod som använts i Saltsjötunneln med viss framgång är s k skinninjektering. Den går ut på att korta hål borrar längs läckande sprickor. Borrhålen injekteras med mikrocement och/eller polyuretan.

#### **SLUTSATSER**

Studierna av Saltsjötunneln och av arbetena i denna har gett ett värdefullt underlag för värdering av möjligheterna att i en fullborrade tunnel bättre kunna bemästra problemen med vatten i bergmassan. Några intressanta rön har i samband med studierna också gjorts som ökar vår kunskap om problemkomplexet: Vattenströmning i berggrunden. Genom dokumentation underlättas möjligheterna att förutse hur vattenströmningen kan ske. Den statistiska bearbetningen indikerar också hur vattengenomsläppligheten varierar i denna del av Stockholms bergmassa på nivå -50 till -60 m.

Studierna har bl a visat

- att flacka sprickor ofta är vattenförande,
- att två nästan parallella spricksystem ofta indikerar förhöjd vattengenomsläpplighet,
- att kalцит i bergmassans sprickor ofta indikerar en relativt tät bergmassa,
- att skjuvning längs en spricka kan uppkrossa en spröd bergart, inbäddad i en segare bergart.

På den 5,8 km långa, studerade tunnelsträckan var vattenförlusterna, mätta i sonderingshål, i regel små. Endast på omkring 15 % av sträckan mättes en vattenförlust på 1 l/min m MPa eller mer (motsv ca  $2 \cdot 10^{-7}$  m/s). På 5 % av sträckan var den specifika vattenförlusten större än 10 l/min m MPa (motsv ca  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s). Med undantag av de utpräglade sprick- och krosszonerna sker vattenströmningen till största delen i enstaka, relativt få sprickor och som har lång utbredning. Dessa sprickor tillhör till största delen huvudspricksystemen. Flertalet sprickor är parallella med tunnelsträckningen, de är brantstående eller nästan horisontella.

### 6.3 DRIVNINGSDATA, PROGROS OCH UTFALL

Vid utbyggnaden av den 7,6 km långa spillvattentunneln mellan Solna och Stockholm (Kastellholmen) användes en av Atlas Copco för hårda, kristallina bergarter nykonstruerad tunnelborrningsmaskin (TBM), FORO 900S/3,5 för 6,5 km av sträckan. I delprojektet "Drivningsdata" redovisas drivningsprognoser och borrhingsdata som följts upp och analyserats av SIAB, Atlas Copco MCT, konsultfirman O T Blindheim och Högskolan i Luleå (HLu), avdelningen för Bergteknik.

Tunneln började fullborras i januari 1987. Fullborrningen avslutades i januari 1989. Bergarterna består huvudsakligen av grå gnejser och graniter. Uppsprickningsgraden är låg; ett fåtal inre krosszoner uppträder längs tunnelsträckningen. Den totala utnyttjandegraden för fullborrning och omtag var 34,5 %. Nettoindriften var 2,5 m/h.

SIABs prognos över variationsområdet för bergmassans borrhbarhet stämde bra och visade, totalt sett, en liten avvikelse. Den största avvikelsen gällde uppskattningen av tillgängligheten, i detta fall utnyttjandegraden av TBM. I avdelningen för Bergtekniks, HLu, prognos delades tunneln in i sju zoner. Varje zon bedömdes med avseende på maskinens matningskraft och utnyttjandegrad samt på bergarternas och svaghetszonernas inverkan på drivningsresultatet. I prognosen bedömdes den totala arbetstiden för fullborrning till att omfatta 795 arbetsskift inklusive tid för oförutsedda problem. Detta skall då jämföras med det verkliga utfallet som blev 997 arbetsskift. Avvikelsen på 25 % beror huvudsakligen på en felbedömning av TBMs tillgänglighet för borrhning. Om antalet arbetsskift utan fullborrning inte räknas med blir prognosen 722 arbetsskift. Motsvarande för fullborrningen blir då 737 arbetsskift. Avvikelsen mellan prognos och verkligt utfall blir då endast 2 %.

Utfallet av prognoserna visar att det är möjligt att med relativt enkla medel göra acceptabla förutsägelser för bergarters borrhbarhet när de geologiska förhållandena är väl kartlagda.

Vid fullborrningsprojekt är det särskilt viktigt att drivningsdata följs upp eftersom metoden är känslig för variationer i bergmassan. De höga fasta kostnaderna som drivningsmetoden med TBM för med sig ökar också kravet på att maskinen utnyttjas optimalt. Borrningshastigheten för TBM kan variera med en tiopotens beroende på bergart samt bergmassans grad av uppsprickning. Vanligtvis brukar medelvärdet för ett fullborrningsprojekts nettohastighet variera mellan 2 och 3 m/h för en TBM när det gäller tunneldiameter 3,5-4,5 m. Jämfört med konventionell drivning krävs således för TBM en mer omfattande geologisk undersökning av projektområdet.

Fullborrningsstekniken skiljer sig från konventionell drivning även när det gäller systemteknik, arbetsorganisation och fasta kostnader. Vid fullborrningsprojekt använder man sig av ett 150-200 m långt, kontinuerligt drivningssystem som fordrar att varje enhet fungerar. Detta förutsätter i sin tur att personalen är väl intrimmad så att maskinservice och underhåll utföres på ett snabbt och riktigt sätt. På grund av fullborrnings höga fasta kostnader förekommer det att maskinen utomlands utnyttjas under rådande förhållanden under dygnets 24 timmar och under alla veckans dagar. För Saltsjötunneln valde man att fullborra i två arbetsskift per dygn. Dels mellan kl 06 och kl 14, dels mellan kl 14 och kl 02, fem arbetsdagar per vecka.

Uppföljningen av projektet Saltsjötunneln har utförts i form av flera delprojekt, där ett av målen har varit att öka kunskapen om fullborrnings i hårda, kristallina bergarter för att därigenom kunna förbättra prognoserna för drivning och kostnader. Delrapporten "Drivningsdata, prognos och utfall" har tagits fram av flera medverkande:

**Leif Tollerup, SIAB**, har skrivit om hur arbetet organiserades och om uppföljningen av TBM och dess bakre utrustningssystem.

**Torgeir Blindheim, O T Blindheim**, har skrivit om hur SIABs prognos togs fram och en analys av prognosens utfall.

**Hans Janzon, Atlas Copco MCT**, har skrivit om TBM med bakrigg samt förbrukning av skärrullar av stål och utförda maskintester.

**Nils-Olof Sundin, HLu**, har skrivit om drivningsprognosen och den modell som utvecklats vid avdelningen för Bergteknik vid Högskolan i Luleå. Vidare om uppföljning och analys av drivningsdata samt om borrarhetstester på prover från tunneln. Sundin är även ansvarig för sammanställning och slutlig utformning av rapporten.

På arbetsplatsen har SIABs och Atlas Copcos personal välvilligt ställt upp. Särskilt bör här nämnas Hans Törnros och Robert Hillbom.

#### **ARBETSORGANISATIONEN**

Fullborrningen startade i januari 1987 med två arbetsskift per dygn, fem vardagar i veckan. Arbetstiden var dels från kl 06 till kl 14, dels från kl 14 till kl 02. Detta ger 10 arbetsskift med 100 timmars arbetstid per vecka. På grund av störande buller till den omgivande bebyggelsen från fullborrningen måste under två kortare avsnitt arbetstiden begränsas. Det första avbrottet inträffade när fullborrningen skedde under bostadshus på Kungsholmen i Stockholm. Borrningarna måste då avbrytas kl 22. Det andra avbrottet skedde under Operan. Fullborrningen måste då avbrytas under föreställningstid i två veckor, dvs så länge som TBM störde föreställningen. Vid organisationen av arbetstiden har SIAB i princip använt samma system som för de norska oljeborrningarna på Nordsjön. Det innebär att varje skiftlag arbetade i två veckor och att man sedan var ledig i en vecka. Varje fullborrande skift bestod av sex man som arbetade vid tunnelfronten. Av dessa var en TBM-förare, en elektriker, en maskinist, två berg- och injekteringsarbetare samt en lokförare. För att få ett så jämspelt team som möjligt tillämpades arbetsrotation.

Från augusti 1987 bedrevs arbetet även under vardagsnätter och helger. I huvudsak utgjordes arbetet då av reparation och underhåll av TBM och övrig utrustning. Två man arbetade nattetid mellan kl 02 och kl 06. Under lördagar och söndagar arbetade i genomsnitt tre man i tolvtimmarsskift. En man arbetade kontinuerligt i verkstaden under jord med byte av skären på skärrullarna. Fullborrningen planerades att ske utan avbrott under hela arbetsskiftet. Därför monterades en personalbod på den 172 m långa bakriggen.

## TBM MED BAKRIGG

Atlas Copcos tunnelborrningsmaskin, typ FORO 900 S/3,5, består av två huvuddelar som är sammankopplade genom axiella cylindrar. Detta gör att huvuddelarna kan röra sig i axiell riktning i förhållande till varandra inom cylindrarnas slaglängd. Den främre delen är maskinens arbetande del med borrhuvudet som roterar och trycks framåt under fullborrningen. Vid den arbetande delen är monterad den främre fastspänningsenheten som bär och stabiliserar maskinens främre parti. Den andra huvuddelen utgörs av den bakre fastspänningsenheten som spänns in mellan tunnelväggarna och överför matningskrafts- och vridmomentsreaktionerna till berget. Denna enhet bär också TBMs bakre parti.

Borrhuvudet har 27 skärrullar av stål som kan pressas mot berget med en maximal last av ca 25 ton per rulle. Dessa består av diskar i speciallegerat stål, monterade på nav som har förspända koniska rulllager. Skärrullarna monteras i sin tur på borrhuvudet i sadlar med fyra bultar framifrån. Det lossborrade bergmaterialet lyfts upp med skrapor och skopor till maskinens transportband och förs sedan hela vägen till slutet av bakriggen. Vid huvudet har man bevattningsanordningar. Sugfläktar suger upp borrhuvudet. Luften från fläktarna renas i ett jetslangfilter.

För sondering och injektering har en s k PHD 35 monterats direkt efter TBM. PHD 35 består av två hydrauliska bergborrmaskiner, typ Atlas Copco COP 1238, som borrar 26 m långa (51 mm diam) undersökningshål i 60° vinkel från tunnelriktningen framför TBM. Hålen kan också utnyttjas för tätinjektering. Eftersom detta sker långt framför tunnelfronten förebyggs på detta sätt grundvatteninträngning i tunneln. Under en 20 m lång stålbygga läggs rälsen successivt ut som sedan den 172 m långa bakriggen rullar på. Rälsen används också för alla in- och uttransporter av material. Längst fram på ena sidan av bakriggen sitter TBM-operatören som på sin manöverpanel kan följa allt som sker med maskinen. På den andra sidan av bakriggen finns räls för materialtransport fram till tunnelfronten.

Längre bak från tunnelfronten räknat finns alla fasta installationer som hör till TBM. Det är hydraulpaket, elskåp, transformator, kompressor och dammsugningsutrustning. Dessutom finns det en arbetsbänk och en personalbod. Hela vägen från TBM över bakriggen löper ett transportband som för ut det fragmenterade borrarade berget som sedan lastas i gruvvagnar. Bakriggen, typ Mühlhäuser, är försedd med ett halvautomatiskt rangersystem. Detta gör att kvarvarande vagnar kan lastas även när loket står vid omlastningsstationen. TBM konstruerades för att bli så kort som möjligt och därmed lättare klara riktningsändringar. Det bakre utrustningssystemet som valdes för tunneln var ett en-spårsystem. I detta fall innebar det att man använde sig av tretton  $8 \text{ m}^3$  vagnar. Vagnarna lastades oberoende av loket. Vid planeringen av drivningen var man osäker på denna lösning. Det visade sig dock att framdriften ej påverkades i någon högre grad.

#### **PROGNOS - DRIVNINGSTID**

SIABs prognos för Saltsjötunneln baserades på följande grunddata:

- . geologiska data enligt anbudsunderlaget samt egen kartering
- . testresultat på borrarprover från teletunnlar och borrar kärnor
- . besiktning av området och näraliggande tunnlar.

Följande slutsatser kom man fram till:

Berget domineras av fin- till medelkornig granit och av en granitisk gnejs med låg glimmerhalt. Gnejsen förväntades ha samma tryckhållfasthet som bedömdes gälla för graniten. Berggrunden delas upp av tektoniska svaghetszoner, mest som sprickzoner och omvandlad granit, s k rödberg. Svaghetszonerna antogs omfatta mellan 5 och 10 % av tunnelsträckningen. Testresultaten varierade. En exakt tryckhållfasthet på ca 200 MPa antogs motsvara genomsnittet. Högsta testresultatet visade 247 MPa. Punktlasttesterna visade indirekt att draghållfastheten varierade mellan ca 8 till 17 MPa. Bergarternas slitegenskaper bedömdes utifrån hållfasthet, kvartsinnehåll och slitningstester.

Avstånden mellan de genomgående sprickorna bedömdes ligga mellan 0,5 och 2 m. Till detta kommer ett antal s k foliationsstick. Dessa var svaga och förekom sällan med större frekvensavstånd än 2 till 4 meter

enligt besiktningen av borrhärnorna. I de mer uppspruckna partierna bedömdes sprickavstånden variera mellan 0,2 och 0,4 m, sällan mindre. Beräkningarna baserades på Norges Tekniska Högskolas (NTH) prognosmodell från 1983 (Johannessen et al., 1983).

Genomsnittlig nettoindrift beräknades till 2,6 m/h för en TBM med 13 RPM (varv per minut). Indriften förväntades variera från under 2 m/h till över 4 m/h, beroende på variationerna i bergart och uppsprickningsgrad.

Bergförstärkning, såsom skrotning, bultning och järnbågar i sprickzonerna, antogs få en liten omfattning och ej nämnvärt påverka projekt-tiden.

Injektering antogs omfatta zoner med en sammanlagd utsträckning av 12 % av tunnelsträckningen. Sju procent bedömdes vara lätt uppsprucken bergmassa och 5 % tätt uppsprucken. Zonerna bedömdes kräva "ganska mycket" eller "mycket" förinjektering.

Utnyttjandegraden för fullborrning bedömdes uppgå till 45 % av en normal arbetsvecka. Då är inte tid för omtag för TBM eller injektering inräknad. Byte av skärrullar bedömdes ta upp till 15 % av disponibel arbetstid.

Den totala arbetstiden för 6,5 km tunnel beräknades till 72 arbetsveckor av vilka ca 13 veckor är mertid (18 %) för zoner som kräver injektering. Brutto genomsnittlig veckoindrift blev ca 96 m/vecka och totala utnyttjandegraden av TBM för fullborrning blev ca 38 %.

Prognos HLu för borrningstiden för Saltsjötunneln utarbetades under våren 1986 av avdelningen för Bergteknik. Prognosen baserades på följande data:

- . borrhärdhetstester på bergprover tagna i olika tunnlar i närheten av den planerade tunnelsträckningen,
- . en översiktlig "berggrundskarta" över området med större sprickzoner inlagda,

- . en topografisk karta över området,
- . erfarenhetsdata från tidigare prognosarbeten och uppföljningar.

I prognosen delades tunnelsträckningen upp i zoner beroende på hur berget och vatteninläckningen bedömdes påverka fullborrningen.

Vid prognoser av drivningshastigheter för TBM används vid HLu ett inträngningstest. För att kunna göra en ingenjörsgelogisk bedömning av projektområdet undersöktes ett antal näraliggande tunnlar för bedömning av bergarter, strukturer samt för provtagning. Proverna testades av HLu. På basis av provtagningen och studier av geologiska kartor bedömdes projektområdets huvudbergarter vara röda och grå graniter. Dessutom finns det ett stort antal gnejser, gnejsgraniter och ett mindre antal amfiboliter. Eftersom tunneln skulle gå under vissa delar av det centrala Stockholm ställdes det mycket höga krav på tunnelns täthet. Av den anledningen bedömdes generellt 30 % av totala arbetstiden gå till sonderingsborrning, injektering och driftförstärkning. Utnyttjandegraden sattes därför lågt jämfört med vad som normalt sker vid TBM-projekt. Svaghetsplanens vinkel till tunnelaxeln uppmättes till ca 20°. I prognosen för drivningstiden delades tunneln in i sju zoner beroende på hur berget förväntades påverka borrningen.

#### UPPFÖLJNING

De fullborrande skiftlagen förde protokoll och upprättade skiftrapporter över flera olika deloperationer. Några liknande rapporter gjordes inte av de underhålls- och reparationsskift, som senare togs i anspråk på helger och nätter. Tiden för sistnämnda skift uppgick till ca 10 % av den totala tiden. Tidsåtgången för sonderingsborrning och injektering blev 11 % av den totala drivningstiden, vilket kan jämföras med HLus prognos på 30 % (inkl driftförstärkning). Orsaken till HLus bedömning var byggherrens krav beträffande maximal vatteninläckning under tunneldrivningen. Ett krav som var maximalt 3 l/min, 100 m under det centrala Stockholm. Detta gör att Saltsjö tunneln även här skiljer sig från andra TBM-projekt. För fullborrning och omtag har använts 34,5 % av den totala tiden. Om man ej räknar med tiden för injektering och sonderingsborrning blir siffran i stället 38,5 %. En låg siffra jämfört

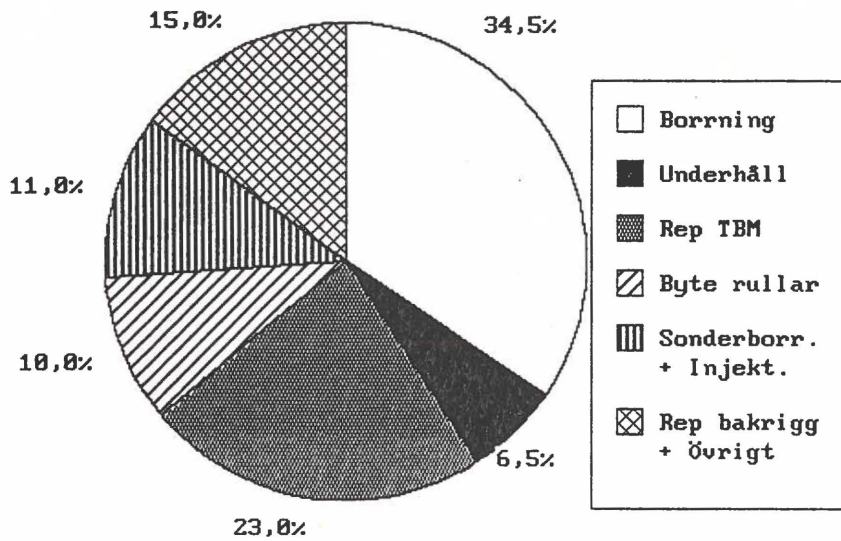


Fig. 6.3:1 Total tidsfördelning för olika arbetsmoment

med andra projekts 45-50 %. Den mycket stora tidsåtgången för reparationer, 23 %, kan förklaras av att en för tillverkaren ny typ av TBM har använts.

Uppsprickningsgrad och bergart har stor betydelse för drivningshastigheten. Nettodriften har totalt varierat mellan 0,8 och 6,0 m/h. Borrbarheten för bergmassan längs tunnelsträckningen är låg, första delen av tunneln är något mer svårborrad än andra delen. Tunneln passerar inte genom några bredare sprick- eller krosszoner men mindre sprickzoner uppträder vid tunnelsektionerna 2070, 2550, 4100 och 5940 m (se Bilaga 3 och 4).

Skärrulleförbrukningen. När en skärrulle byts på borrhuvudet noteras rullens nummer, position, borrlängd och orsak till bytet. På så sätt kan varje skärrulle och position följas upp. Totalt har 781 skärrullar av stål bytts under de 6 485 m som fullborrats. Räknar man med att ca 50 % av rullarna på borrhuvudet är utslitna vid tunnelborrningens slut får man totalt 795 byten för en fullborrad bergvolym om 62 385 m<sup>3</sup>. Detta motsvarar 79 m<sup>3</sup> per byte. Prognosen för förbrukning av skärrullar var 70 m<sup>3</sup> per byte. Den genomsnittliga rulldistansen för alla skärrullar i position 5-27 var i genomsnitt 630 km. Generellt kan man säga att den genomsnittliga rulldistansen i ren granit uppgår till

ca 550-575 km. I gnejs, som har något lägre kvartshalt, uppgår den till ca 650 km. Position 1-4 är här undantagna eftersom dessa delvis "dras" runt i stället för att rulla. Orsaken till att en rulle byts ut kan vara:

- att disken har slitits ned till minimilängd,
- att lagren i skärrullen har skurit,
- att rullen har blivit otät och läcker olja,
- att disken sitter lös på rullen, materialfel eller andra orsaker.

På grund av bergets snabbt skiftande karaktär är det svårt att veta rullförbrukningen per bergart. Allmänt kan konstateras att graniten förbrukar ca 10-20 % fler rullar än gnejsen.

Avgörande för verktygsförbrukningen är även bergets sprickighet eftersom denna styr nettoborrjunkningen.

Maskin och bakrigg. I skiftrapporterna bokfördes åtta TBM-beroende faktorer med en ospecificerad rad för bakutrustningssystemet, en för sonderingsborrningen och injekteringen samt ytterligare en rad för övriga tidsstopp. Av denna sammanställning framgår att 7 % av den totala tiden gått åt för underhåll av TBM, 4 % för reparation av elfel, 4 % för reparation av hydrauliska fel, 13 % för reparation av mekaniska fel samt 15 % för reparation och underhåll av bakriggen. Följande kan alltså konstateras:

- . mekaniska fel har klart dominerat,
- . tiden för underhåll uppgår till omkring en fjärdedel av tiden för reparation av maskin,
- . tiden för reparation och underhåll av bakriggen är förhållandevis stor.

Motsvarande värden för det senaste året (1988) för fullborrningen visar en klar förbättring av maskinens utnyttjandegrad. Tiden för t ex reparation av mekaniska fel har halverats och tiden för reparation och underhåll uppgår till 23 %. Vid jämförelse med andra TBM-projekt framgår det att Saltsjö tunneln har onormalt hög tidsandel för reparation och underhåll av både TBM och baksystem. Eftersom maskinen var en ny och helt oprövad konstruktion kan en stor del av denna tid hänföras

till utvecklingsarbetet. Huvudansvaret för den ingenjörsgelogiska karteringen av Saltsjötunneln har åvilat Torbjörn Hahn, Conswede. Hans detaljrika kartering har utnyttjats för en mera generell klassindelning av bergarterna och för en redovisning av bergmassans frekvens av svaghetsplan. Klassindelningen användes senare vid analysen av drivningsprognosen som tagits fram vid HLu.

Den fullborrade tunneln har passerat genom fem uppenbara svaghetszoner: Bällstaviken, Karlbergskanalen, Vasagatan, Brunkebergsåsen och vid Strömbro.

#### PROGNOSE OCH DRIVNINGSDATA - JÄMFÖRELSE

SIABs prognos för fullborrningen gav ett medelvärde för nettoindriften på 2,6 m/h och för den totala utnyttjandegraden ren borring 38 %. Dessa värden ligger högre än de uppnådda som blev 2,52 m/h respektive 27 %. Detta ger avvikelserna ca 3 respektive ca 40 %. Alltså en rimligt bra överensstämmelse för nettoindriften men en betydligt sämre för totalutnyttjandet. För nettoindriften kan avvikelsen förklaras av att man fullborrade med en lägre rotationshastighet på borrhuvudet, RPM 12,3, än förutsatta 13,0 varv/min. Den lägre rotationshastigheten motsvarar dock en lägre indrift på ca 6 %. När det sedan gäller totalutnyttjandet av TBM beror den dåliga överensstämmelsen mellan prognos och uppnått resultat på en sämre tillgänglighet av TBM än vad som förutsattes. Prognosens 45 % i utnyttjandegrad för enbart fullborring utan injektering under vanliga arbetsveckor är rimlig för den aktuella situationen. Reparation o d för TBM brukar ju normalt ligga på ca 10-15 %. Emellertid är detta värde för Saltsjötunnelns del nästan fördubblat. Zonernas sammanlagda längd med injektering motsvarar prognosen. NTHs prognosmodell (1983) tillämplighet kan inte bedömas i detalj eftersom det inte finns direkt jämförbara data. Nettoindriften har varierat från 0,8 m/h i det hårdaste, mest massiva berget till ca 6 m/h i det mest uppspruckna. I den dominerande bergarten - granit - med block/linser av gnejs och få sprickor, har en nettoindrift på ca 1,8-2,3 m/h varit vanlig. Den goda överensstämmelsen mellan prognos och verklig genomsnittlig indrift kan bero på att mer svårborrade bergarter, som graniter, här har kompenserats av en större andel mer lättborrade gnejser.

SIABs drivningsprognos baserades på en bedömning av ett troligt variationsområde för bergets borrhetsbarhet. Prognosen har stämt bra och visar totalt sett en liten avvikelse. Den största avvikelsen beror på den sämre tillgängligheten av TBM. Däremot har byte av skärrullar och tilläggstid för injektering utgjort en mindre andel än förutsatt. Tid för reparation och underhåll av TBM har varit nästan det dubbla mot vad som gäller normalt. Som väntat uppstod inga större stabilitetsproblem i svaghetszonerna. Det beror främst på att zonerna är sprickzoner med liten lerhalt. Stabiliteten gynnas också av tunnelns relativt lilla cirkulära tvärsnitt samt av att förinjekteringen som bieffekt kan vara stabiliserande. En studie av nettoindriften i massivt och uppsprucket berg tyder på att den använda prognosmodellen (NTH, 1983) ger något för optimistiska värden jämfört med uppnådda. För Saltsjö tunneln verkar detta ha kompensats av att berget, särskilt då för tunnelns senare parti, är något mer lättborrat än förutsatt. Detta beror i hög grad på en större andel gnejs.

De faktorer som ingår i HLus drivningsprognos har jämförts med motsvarande drivningsdata och med resultaten från den geologiska karteringen i tunneln. Syftet har varit att stegvis analysera varje enskild faktor så att eventuella avvikelser i sin tur kan analyseras och göra det möjligt att förbättra prognosmodellen. Totala antalet arbetsskift som användes i projektet för drivning var 997. Motsvarande för prognosen var 795 skift inklusive tid för oförutsedda problem. Avvikelsen blir alltså 25 %. Om antalet arbetsskift helt utan fullborrning inte räknas med blir avvikelsen mellan prognos och verkligt utfall endast 2 %. Prognosens mycket höga värde för borrhetsbarheten orsakas av att det beräknade borrhetsbarhetsvärdet är 38 % för högt och att matningskraften per skärrulle är 6 % för hög.

Orsaken till skillnaden mellan prognosens och drivningens totala antal skift är att den verkliga tidsåtgången för oförutsedda problem är för hög. Den är ca 3,5 gånger högre än vad som är normalt vid TBM-projekt. Detta beror främst på att den nykonstruerade TBM inte var helt utvecklad vid starten för fullborrningen. Vid jämförelse mellan drivningens antal skift för samtliga zoner måste utfallet av prognosen bedömas som mycket bra eftersom avvikelsen blev mindre än 5 %.

I nedanstående tabell visas en jämförelse mellan HLus prognos (prog) och motsvarande data från skift med borrning (driv).

Tabell 6.3:1

	Längd (m)	Antal skift (skift)		Indrift (m/h)		Utnyttjande (%)		Last/disk (kN)	
		prog	driv	prog	driv	prog	driv	prog	driv
1.	403	158	82	2,06	1,87	13	27,6	180	185,4
2.	542	100	64	2,29	2,88	25	30,9	200	180,9
3.	450	39	64	3,46	2,45	35	30,2	190	171,7
4.	2100	148	213	4,97	2,25	30	46,0	180	180,4
5.	300	27	33	5,78	2,78	20	34,4	100	149,3
6.	400	24	41	4,94	2,48	35	41,5	200	164,2
7.	2290	226	240	3,56	2,86	30	35,1	200	180,5
Tot	6485	722	737						
Mv				3,68	2,52	25,7	36,8	189,2	177,9

Följande kan konstateras:

- största avvikelserna i prognosen är bedömningen av utnyttjandegraden (43 % för låg) och svaghetsplanens inverkan (32 % för hög),
- prognosens bedömning av matningskraften per skärrulle och inträngningstestets värden stämde bra överens med uppnådda drivningsresultat. Dessa faktorer avvek med 6 % respektive 4 %.

Det bör observeras att prognosens värden jämförs med de vid fullbörningen utnyttjade antal arbetsskift för samtliga zoner. Det innebär att alla hela arbetsskift som ej medfört fullbörning, dvs 270, inte tagits med. Den för fullbörningen beräknade utnyttjandegraden 37 % är således i själva verket för hög jämfört med verkligt resultat.

## TESTER

**Borrbarhetstest.** För att få en uppfattning om bergets borrarbarhet blev i samband med monteringen av TBM ett prov taget från den utsprängda starttunneln. Detta prov bedömdes av NTH vara en bandad, medelkornig gnejs med borrsjunkningsindex DRI=34, dvs låg borrarbarhet.

I tunneln togs ett flertal prover på olika platser längs tunnelsträckningen. Åtta prover redovisas av HLu i delrapporten i form av testresultat. Syftet med provtagningen var att utvärdera inträngningstestet mot drivningsdata och tunnelkartering. Data för svaghetsplanens inverkan på borrningshastigheten har tagits från NTHs prognosmodell -79.

Tänkbara orsaker till skillnaden mellan tidigare tester på hårda gnejsgraniter från Kymmentunneln jämfört med Saltsjötunnelns kan vara:

- . Få testade prover, vilket kan innebära att de inte är tillräckligt representativa.
- . Det är svårt att se svaghetsplanen i en fullborrade tunnel, vilket kan innebära en undervärdering vid klassindelningen.
- . Två personer med olika bakgrund utförde karteringarna.
- . Olika bergarter ger olika faktorer.

Under drivningen har indriftstester med TBM utförts för att vid fem mätstationer bedöma drivningshastigheten. Se Tabell 6.3:2. För varje station har mätningar vid fyra olika matningskrafter utförts. Varje gång har matningskraften hållits konstant under fem minuter. Därefter har indriftens längd registrerats. Se Fig. 6.3:2.

Indriftstesterna visar på ett överskådligt sätt att sprickighet och foliation/förgnejsningsgrad har mycket stor betydelse för nettoindriften.

Tabell 6.3:2 Data om mätstationerna vid tester i full skala

Station	Längd (m)	Bergart	Sprickighet	Anmärkingar
1	3785	Grå granit	En stor spricka	spricka 35° mot tunneln, 30% kvarts, ca 200 MPa tryckhållf.
2	4455	Grå granit	Stick I*)	Lite gnejsig, 10-20° mot tunneln, ca 200 MPa tryckhållf.
3	5815	Röd gnejs, biotitrik	Stick III Sprickor II-III**)	gnejsighet parallell med tunneln, rikliga sprickor, två system
4	6337	Röd gnejsgranit	Stick I Sprickor I	gnejsig 20-30° mot tunnel, vattendropp från sprickor
5	7265	Mörk biotitgnejs med kvartsslir.	Stick III	biotitrik, klara svaghetsplan, gnejsig 25° mot tunnel

- \*) Enligt NTH 1-83 nomenklatur. Avstånden mellan foliationsplanen är för "Stick klass I" 40 cm och för "Stick klass IV" 5 cm.  
\*\*) Enligt NTH 1-83 nomenklatur. Avstånd mellan sprickor "Sprick klass I" är 40 cm och för "Sprick klass IV" är 5 cm.

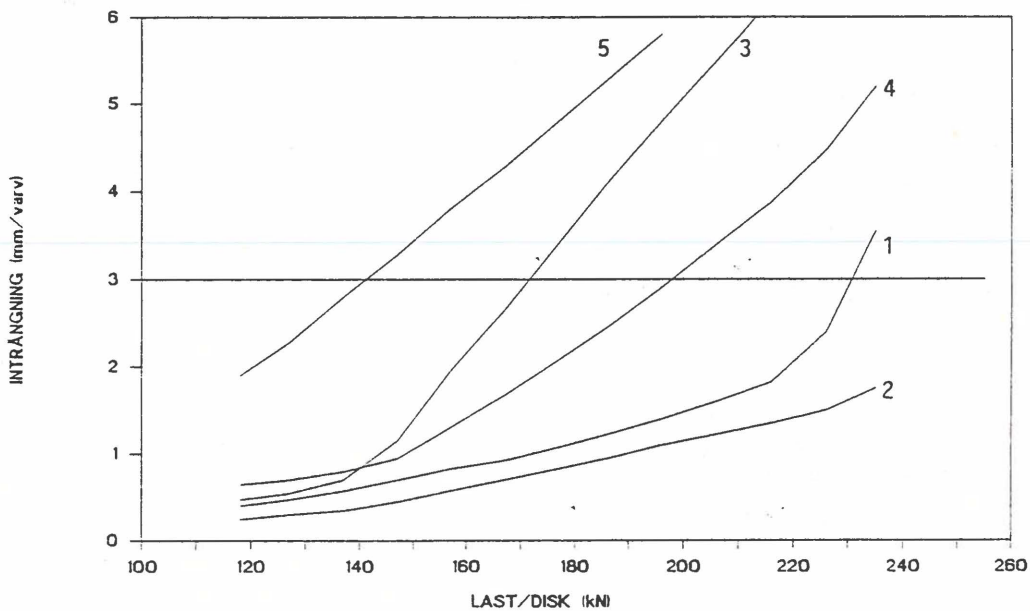


Fig. 6.3:2 Indriftstester i Saltsjötunneln

## SLUTSATSER

Det kan konstateras efter en analys av drivningen och SIABs drivningsprognos att det är fullt möjligt att med relativt enkla medel få en rimligt god översikt över borrarhetsförhållandena. Detta när de geologiska förhållandena är väl kartlagda, möjliga variationer är noga värderade och när i synnerhet uppsprickningsgraden kan studeras i tidigare utsprängda bergrum och tunnlar. Högskolans i Luleå drivningsprognos visar också att det med en systematisk indelning av tunnelsträckan går att göra en god bedömning av totala tiden för borrning. Behovet av provtagningar och tester kan emellertid lätt bli undervärderat. Borrbarheten för vanlig gnejs och granit i stockholmsområdet vid fullborrning varierar mer än vid konventionell borrning. Uppsprickningsgraden har ett väsentligt inflytande, något som gäller för alla hårda bergarter, eftersom TBM av i dag har en matningskraft som är väl liten (kritisk) för bergarternas fragmentering. Nya värderingar av uppsprickningsgradens betydelse utifrån bergblottningar, borrhärnor och existerande tunnlar är därför viktiga. När TBM försågs med en utrustning för sonderingsborrning och injektering inom TBMs "normala" area skapades utrymmesproblem för arbetet runt maskinen. Denna utformning bör därför helst förbehållas TBM för större tunneldiameter än 3,5 m. Insatser bör också göras för att lösa problemet med det onormalt omfattande slitaget av de fyra yttersta skärrullarna av stål. Det synes också vara lätt att övervärdera maskinens tillgänglighet för nya och ej helt prövade TBM-konstruktioner.

Anbudshandlingar för TBM-projekt bör innehålla åtminstone en uppskattning av följande:

- Bergartsfördelning i procent eller längdenhet.
- Gnejsighet - avstånd mellan plan, riktning.
- Sprickor - avstånd mellan plan, riktning.

#### 6.4 ARBETSMILJÖ OCH OMGIVNINGSPÅVERKAN

Denna delrapport om arbetsmiljön vid fullborrningen av Saltsjö tunneln sammanfattar och analyserar olika studier och mätningar som gjorts både på arbetsplatsen i tunneln och bebyggelsen ovanför.

Tunneln fullborrades under stadsmiljö i det centrala Stockholm, vilket ställde stora krav på att undvika inläckning av vatten och att ej sänka den befintliga grundvattennivån. För att klara av detta redan under drivningens gång måste kontinuerlig sonderingsborrning ske framför TBM. Likaså måste nödvändig förinjektering göras för att tätta berget. TBM måste alltså tillföras en undersökningsutrustning för att man skulle kunna borra 26 m långa sonderingshål framför tunnelfronten. Detta måste kunna ske utan att störa arbetet med fullborrningen. Tekniskt sett har denna utrustning fungerat bra, men det blir ont om utrymme att utföra vissa arbetsmoment. Bullernivån blir också högre än vid vanlig TBM-drivning.

Berggrunden i denna del av Stockholm utgörs av gnejs/granit med hög kvartshalt. Det krävs en bra ventilation för att klara av dammbildningen. De hygieniska gränsvärdena för finkornig kvartsdamm har varit svåra att ej överskrida. Damnavskiljaren fordrar dessutom en noggrann och kontinuerlig skötsel för att den skall fungera som avsett.

Störningar från fullborrningen på bebyggelsen ovanför har särskilt noga studerats. Det visade sig att i hus som grundlagts direkt på berg måste man räkna med att de boende störs under en viss, begränsad tid. Då får man undvika borrning nattetid, även om man i förväg har informerat de boende om tunnelarbetet och på så sätt ökat deras förståelse och tolerans för bullerstörningarna.

För att få en uppfattning om arbetarnas inställning till TBM-drivningen jämfört med konventionell tunneldrivning har de vid personliga samtal var och en för sig fått svara på ett antal i förväg bestämda frågor. Det allmänna intrycket blev att de föredrog TBM-drivning framför borrning och sprängning men med vissa förbättringar. Arbetstidsfördelningen

med två veckors arbete och en veckas ledighet har uppskattats, i synnerhet av dem som har långt hem.

Delrapporten har utarbetats av Eric Karnelo med hjälp av platschefen vid tunneldrivningen Hans Törnros, SIAB, och hans medhjälpare Robert Hillbom. Den slutliga redigeringen har utförts av Annica Nordmark, BeFo i samråd med författaren.

### **BAKGRUND OCH MÅLSÄTTNING**

En av de viktigaste orsakerna till att man valde att driva Saltsjötunneln med en tunnelborrningsmaskin (TBM) var, att man med ledning av erfarenheter bl a från Norge och Mellaneuropa ansåg att detta var en bättre metod. Dels gav TBM-metoden en mindre påverkan på den yttre miljön, dels skulle arbetsmiljön bli bättre inne i tunneln.

När man driver tunnlar i tätorter ställs det stora krav på att inte påverka bebyggelsen ovanför, t ex genom grundvattensänkning, skada byggnader och känslig apparatur och utrustning på grund av vibrationer eller störa de boende med alltför högt buller. De flesta TBM-projekt som tidigare har drivits har legat långt utanför tätbebyggelse. Man har då kunnat konstruera maskiner och annan utrustning samt organisera arbetet helt med tanke på att få ett maximalt utnyttjande med en hög drivningshastighet. Bergarterna i Mellaneuropa är oftast betydligt lösare än den gnejs/granit som finns i stockholmsområdet. Inverkan på omgivande miljö från fullborrningen blir givetvis större när berget måste bearbetas med maximalt möjliga matningstryck för optimal ekonomi. I andra områden med höga krav på att minimera verkan från vibrationer, såsom i Mellaneuropa, har man många gånger kunnat ersätta sprängning för tunnlar med bergfragmentering (Roadheaders - "bomfräs-maskiner"). Den förutsättningen hade vi inte i Stockholm eftersom fräsning inom överskådlig tid inte är möjlig i våra gnejs/granitbergarter.

Målsättningen för denna miljöstudie har därför varit att försöka svara på frågan om fullborrning med TBM från miljösynpunkt är att föredra framför konventionellt drivna tunnlar. Detta skall också ses ur kommu-

nens synvinkel för drivning av tunnlar inom tätbebyggda områden. Studien är i stor utsträckning baserad på observationer och mätningar som under arbetets gång har gjorts av olika organisationer och konsultföretag. Våra egna observationer och samtal med arbetare, arbetsledare och maskinleverantör kompletterar dessa undersökningar.

En viktig faktor för arbetsmiljön är ventilationen och hur man måste bekämpa den besvärande dammbildningen. Vid TBM-drivning har under senare år utvecklats en standard som i de flesta fall fungerat tillfredsställande. Det innebär att frisk luft blåses in till maskinen och luft och damm framför skärhuvudet sugas ut. Den dammiga luften renas sedan i en dammavskiljare till en så hög reningsgrad att den kan blåsas ut i tunneln bakom maskinen. Om anläggningen fungerar som den skall kan den rena luften till 99,9 %. Det skall därför inte vara något problem att blåsa ut luften i tunneln efter reningen. För att klara av att få in tillräckligt med ventilationsluft när tunneln nått djupt in i berget har man låtit installera en hjälpfläkt vid sektion 1 100 m med en effekt av 37 kW.

Pålastningen av vagnarna som transporteras ut ur tunneln övervakas och styrs av en man som sitter vid sidan av bakriggens slut. Operatören kan kontrollera lastningen med hjälp av en TV-skärm. Det finns en signalanordning som stoppar bandet om det skulle behövas. Råsläggningen sker med förtillverkade räselement som forslas in i tunneln från verkstaden under jord. Räselementen byggs ihop där och transporteras in på en specialtillverkad vagn. De läggs sedan vid bryggan mellan maskin och bakrigg och direkt på tunnelbotten på stålsyllar som anpassats till den cirkulära formen på tunneln. Borrhuvudet är bestyckat med 27 ståldiskförsedda verktyg ("cutters") som väger 127 kg vardera. I centrum används två dubbla cutters som var och en väger 200 kg. Skärrullarna på borrhuvudet byts när diskarna slitits ned till en viss gräns eller när de inte fungerar som de skall, t ex vid lagerhaveri. I slutet av varje skift kontrolleras om någon skärrulle måste bytas. I genomsnitt byter man ca 5 skärrullar varannan arbetsdag.

Uttransporten av det fragmenterade berget sker med vagnar som dras av ett diesellok. Spårvidden är 750 mm. För att öka utnyttjandetiden för

fullborrningen kör man ut och tömmer ett antal vagnar medan de kvarvarande fylls tills ett nytt sätt kan köras ut. Dieselloket har så stort utrymme i förarhytten att det även rymmer viss persontransport. All personal måste nämligen åka in och ut med tåget eftersom det skulle vara livsfarligt att gå i den trånga tunneln och mötas av ett tågsätt i full fart. För persontransporten vid byte av arbetsskift har framställts en speciell vagn, liknande den som finns vid arbete i kolgruvor. Den kommer dock sällan till användning här. Man använder sig av det rymliga loket. Om det inte skulle räcka till sätter man sig i en transportvagn för bergmassor som inte lastas full.

### **ARBETSORGANISATION**

Det krävs mycket förberedelse och en särskild monteringshall för att sätta samman alla komponenter när man skall montera ett helt system för fullborrning av en tunnel. Det gör att man vill driva en så lång tunnel som möjligt från ett enda påslag. Saltsjö tunnelns längd, närmare 7 600 m, är relativt optimal. Med den längden klarar man fortfarande uttransporten av berget med enkelspår och ventilationen är kontrollerbar. Genom att endast ett påslag behövdes sparade man in en arbetsplats på Kungsholmen. Denna hade varit nödvändig om man i stället hade valt att borra och spränga. Fullborrning innebär en väsentlig miljöförbättring för de boende i området. De hade annars fått räkna med betydande bullerstörningar och andra störningsmoment under lång tid.

Investeringskostnaden för ett TBM-system är hög. Därför vill man utnyttja det under så lång tid som möjligt av dygnets alla timmar. I Saltsjöprojektet har man valt att använda sig av två långa arbetsskift per dygn om totalt 20 timmar. Det gör att ett tredje skiftlag kan vara ledigt en hel vecka. Det här systemet som började användas på oljeplattformarna i Nordsjön och därför stundtals kallas Nordsjöorganisationen har under senare år använts på praktiskt taget alla TBM-projekt i Norge och Mellaneuropa. En fördel med systemet är att den personal som inte bor på orten och har långt hem kan få en lång sammanhängande ledighet var tredje vecka. I Saltsjöprojektet har man fått dispens för att driva två långa skift, dels mellan kl 06 och kl 14, dels mellan

kl 14 och kl 02. De fyra övriga timmarna används oftast för annan personal till service- och reparationsarbeten.

I princip utgörs ett skiftlag av:

- 1 Operatör
- 1 Elektriker, hjälpare
- 1 Vagnslastare
- 1 Lokförare
- 2 Rälsläggare (sonderingsborrare)
- 1 Injekterare

För att undvika monotoni och ensidig belastning använder man sig av arbetsrotation inom laget så att alla kan hjälpa till där det behövs. Naturligtvis specialiserar man sig på vissa arbetsuppgifter. Injekteringsarbetet t ex utförs oftast av en specialist från en underleverantör. På varje skift finns dessutom en serviceman från leverantören som hjälper till med service och underhåll. På fullborrmaskinens bakrigg finns en personalbod med pentry. Här kan man hålla maten varm och koka kaffe t ex. Det finns också tillgång till telefon. Detta är viktigt för säkerheten och det psykiska välbefinnandet i tunneln långt inne i berget på 50-65 m djup och med endast en utgång.

#### **MILJÖN PÅ ARBETSPLATSEN I TUNNELN**

Under arbetets gång har mycket få skador inträffat. I och med att berget har fragmenterats på ett skonsamt sätt genom fullborrningen och det mycket sällan har krävts någon egentlig skrotning av tunneltaket är risken för fallande sten betydligt mindre än i konventionellt drivna tunnlar. I andra bergförhållanden än den stockholmska gnejs/graniten kan det däremot vara befogat att mer uppmärksamma problemet med fallande sten.

Risken för klämskador finns alltid, speciellt när man måste arbeta med tunga saker i trånga och svåra lägen, exempelvis vid byte av skärrullar, rälsläggning eller reparation. Det har emellertid inte inträffat många tillbud eller skador som föranlett anmälan. Den svåraste klämskadan är en klämd hand vid rivning av en av mätdammarna som har byggts

för kontroll av vatteninläckningen i tunneln. (Skadan har inte direkt samband med TBM-metoden som sådan.)

I och med att tunneln är cirkelformad är det besvärligt att ta sig fram så snart man har lämnat de gångbryggor och liknande som finns på maskin och bakrigg. Risken att halka eller snubbla måste då bedömas vara relativt stor eftersom dessa gångstråk dessutom kan vara hala av olja och fett. Emellertid har man även här varit förskonad från skador.

Transporten av berg och material är spårbunden och om alla iakttar förbudet att gå i tunneln minskar risken för fordonsolyckor. Det stora problemet är vad som skulle kunna hända vid urspårningar. Den planerade tunnelriktningen har inte alltid kunnat hållas, det gäller även i höjded, varför tåget ibland måste passera relativt långa sträckor där vatten stått över rälsen. Att sedan åter få upp urspårade vagnar eller lok på rälsen är ett riskfyllt arbete. Ett olycksfall har också inträffat i samband med transporten. Vid hopkoppling av vagnar vid uttransporten felbedömde lokföraren avståndet. Vid kollisionen fick han en kraftig stöt som skadade nacken. Följden blev att han inte kunde arbeta under åtta månader.

I ett TBM-system finns det förhållandevis mycket brännbart material, såsom gummiband, elkablar och olja. Det är därför nödvändigt med eldsläckningsutrustning. Information måste också finnas om hur man beter sig vid brandfara. Något tillbud har dock inte förekommit när det gäller Saltsjötunneln. Den elektriska utrustningen till TBM-systemet kan också ha sina risker. För att undvika olycksfall är det bäst att bara tillåta behörig personal att svara för arbetena med det elektriska systemet.

Den stora förbättringen med fullborrning i förhållande till konventionell borrning och sprängning är att inga spränggaser förekommer. Halten av fordonsgaser kan hållas inom gränsvärdena med de relativt höga krav på ventilationen som man har för att klara av dammet och värmen framme vid arbetsplatsen. Mängden radongas ligger klart under det hygieniska gränsvärdet. Dammbildningen vid fullborrningen från främst finkornig kvarts kan man hålla under kontroll genom att spruta vatten framför

skärhuvudet och vid andra kritiska ställen, framför allt vid överlastningsställena. För mycket vatten är dock inte heller bra eftersom det finkrossade berget då kommer att klibba fast i reningsfilter, på transportbandens omlänkrullar och i transportvagnarnas botten. Berget som främst består av gnejs/granit innehåller ca 40 % kvarts. Det är alltså inte mycket damm som kan tillåtas innan gränsvärdena överskrids.

Det är lätt att tro att bullernivån från TBM skulle vara betydligt lägre än från konventionell borrhning för sprängning. Fullborrningen har dock många bullerkällor. Först och främst från bergfragmenteringen när berget bryts loss av skärrullarna. Ju hårdare berg desto högre buller. På TBM finns också bullerkällor, främst hydraulaggregatets pumpar. Sonderingsborrningen som utförs med hammarbormaskiner ger ungefär samma bullernivå som spränghålsborrning. En jämförande miljöstudie visar att det i stort sett är samma bullerförhållanden vid fullborrning som vid sprängning. I manöverhytten på TBM uppgick bullernivån till 90 dB(A), vilket kräver hörselskydd eftersom 85 dB(A) och därutöver annars medför risk för hörselskador.

Det största problemet med vibrationer från TBM har man kunnat eliminera genom att placera manöverhytten på bakriggen. Om manöverhytten placeras på själva maskinen kan vibrationerna bli mycket bevärande för operatören efter en längre tid i hytten. Arbetsrotation bland personalen hjälper också till att minska dessa problem. Med TBM hade man förväntat sig liten risk för sk oljedimma. Den mätning som har gjorts visar dock att halten oljedimma var något högre än med hydrauliska hammarbormaskiner, som man numer använder vid sprängborrning. Halterna för de båda metoderna låg emellertid under gränsvärdet.

Problem med varm och fuktig luft vid TBM-borrhning är känt från utlandet, där man ibland arbetar med stor övertäckning (t ex i Alperna) eller på stora djup (t ex i kolgruvor). Problemet är inte så stort hos oss. Den högsta temperatur vid vilken man måste arbeta är vid byte av skärrullarna framför skärhuvudet. Lufttemperaturen är där mycket hög och rullarna dessutom mycket heta (och tunga!).

Manöverhytten till den använda TBM var till en början inte särskilt bra utformad. Eftersom tunnelns diameter bara är 3,5 m var utgångsläget dåligt. Operatören satt på tvären i hytten för att kunna övervaka instrumenten samtidigt som han måste se framåt mot i första hand TV-monitorn som visar drivningsriktningen. Under arbetets gång gjordes dock uppenbara förbättringar. Operatören kan nu svänga den nya stolen i olika riktningar. Belysningen har dämpats genom att lysrören ovanför manöverpanelen har målats. På så sätt blir det lättare att läsa av instrumenten. I operatörens uppgift ingår också att reglera matningskraften till det optimala, anpassad till varierande bergförhållanden. Detta kräver en oupphörig passning. En automatisk kontroll av matningskraften har därför införts. Operatören får därmed mer tid till kontroll av övriga instrument och reglage.

Att styra en TBM påminner mycket om att styra ett stort och klumpigt flygplan.

Operatören måste styra maskinen i alla riktningar, även vertikalt. Risken är att det kan uppstå en överstyrning. Den typ av TBM som använts för Saltsjöprojektet är mycket kort och kan styras både fram- till och baktill. Den är därför lättstyrd och känslig för avvikelser. Tyvärr tillåter inte det begränsade utrymmet kring maskinen att operatören avläser lasertavlorna direkt. Två TV-kameror måste till som överför träffbilden till monitorer inne i hytten. Ofta fungerar de inte eftersom de inte klarar av den svåra och besvärliga miljön i tunneln. Styrningen kan då ske genom att någon utanför manöverhytten observerar lasertavlorna samtidigt som denna instruerar operatören per kommunikationsradio. En liknande TBM i Norge har en större diameter, 4,5 m. Eftersom man inte heller behöver utrymme för något PDH-aggregat har det varit möjligt att utforma manöverhytten och laseravläsningen på ett från ergonomisk och driftteknisk synpunkt betydligt bättre sätt. Tunneln har där också kunnat drivas med mindre avvikelser än Saltsjö-tunneln.

Sonderingsborrningen kan utföras av två man. En sköter manöverorganen medan den andre hjälper till att skarva ihop borrhängarna. Framtransporten av rälselement och andra tunga enheter underlättas av monorailbanan på vänster sida om maskinen. Utläggningen av rälselementen eller

rensningen av tunnelbotten kan man inte utföra stående för fackverksbalken mellan TBM och bakrigg kommer då i vägen. Höjden är endast ca 1 m, vilket innebär att man måste arbeta i en tröttsam, hukande ställning. Byte av skärrullar innebär dock den kanske största ergonomiska belastningen vid fullborrning. Varje skärrulle väger 127 kg. En centrumskärrulle väger 200 kg. De lyfts över till en monorail under bryggan med hjälp av ett block. De dras sedan in genom den lilla öppning som finns i skärhuvudet (ca 50x60 cm). Genom den öppningen måste också montören kunna ta sig igenom. Skärhuvudet kan roteras med en hjälpmotor så att montören lättare kan komma åt utan att behöva klättra. Lyftet sker också här med hjälp av ett block. Byte av skärrullar sker dessbättre inte under varje arbetsskift.

På bakriggen och fram till slutet av TBM har man en bra belysning som minskar risken för olycksfall och belastningsskador. I tunneln finns det däremot ingen belysning. Det har inte ansetts nödvändigt eftersom all trafik sker med spårbundet tåg. Loket har dessutom starka strålkastare både fram och bak.

Hur uppfattade nu arbetarna fullborrningen jämfört med traditionell borrning och sprängning av tunnlar? Det gjordes en enkel intervju med två arbetslag i samband med byte av skift. En i förväg utformad blankett användes så att likadana frågor ställdes till samtliga intervjuade. De som tillfrågades hade mycket skiftande erfarenheter. De flesta hade inte alls någon erfarenhet av TBM-borrning förrän i Saltsjöprojektet. Några hade arbetat med TBM i Kymmentunneln i Värmland. En arbetare hade erfarenhet av TBM från projekt i Panama och Peru. Slutligen fanns det några som aldrig hade sysslat med bergarbeten under mark. De flesta hade ingen högre skolutbildning men en hade gymnasieexamen och examen från bergsskolan i Filipstad.

Genomsnittsåldern på de intervjuade låg på 42 år och antal år i yrket på 17 år. I Saltsjöprojektet hade de vid tiden för intervjun i genomsnitt arbetat i 19 månader. De intervjuade fick också svara på hur de själva uppfattade arbetsriskerna vid konventionell borrning och sprängning jämfört med fullborrning med TBM. Riskerna angavs i en skala från 0 (ingen risk) till 10 (största risk). Det måste dock poängteras att

dessa intervjuer inte kan ses som någon vetenskaplig undersökning. Det är mer frågan om "systematiska" samtal där var och en ger sina spontana reaktioner. Samtalen ägde rum under ganska pressade former vid skiftbytena. Totalt sett kom man fram till att intervjuerna gav samma genomsnittsvärden för de båda metoderna. Riskerna för ohälsa och olycksfall bedömdes vara mindre för fullborrningen (TBM) medan arbetsbelastningen (ergonomi) däremot var större än för sprängning. Svaren på vilka de största miljöproblemen är för respektive metod ställdes upp i den ordning de förekom mest. Främst för sprängning angavs "spränggaser" och "diesलगaser" och för TBM "damm" och "trångt". Här har dock tagits med svar från dem som aldrig har arbetat med konventionell borrning och sprängning, vilket man bör ta hänsyn till när man tolkar resultatet. Det framkom också vad som var positivt med de olika metoderna: För sprängning angavs "att man lätt kan byta ut delar och komponenter vid reparation" och "att man själv kan påverka ackordet". Motsvarande för TBM var: "slippa spränggaser" och "slippa diesलगaser". Synpunkter på organisationen för fullborrning gav i första hand: "Bra med varierande arbetsuppgifter (arbetsrotation)" och "Skiftindelning med en vecka fri". Förslag till förbättringar av TBM gällde främst: "Mer plats, dvs större tunneldiameter" och "Mindre trångt vid vissa arbeten (men man vänjer sig)". Frågan om de intervjuade skulle föredra fullborrning framför sprängning gav följande fördelning av synpunkterna: "Gärna" (1), "Ja" (6), "Ja, med förbehåll om vissa förbättringar" (3), "Ja, om man har samma skiftorganisation" (1), "Ja, det beror på omständigheterna. En flerfrontsdrivning vid sprängning är för jäktig" (1). Ingen svarade "Nej".

#### **DEN EXTERNA MILJÖN (OVANFÖR TUNNELN)**

Störningar från tunnelarbetet för de boende i närheten kan begränsas med TBM-metoden. Metoden gör det möjligt att tekniskt och ekonomiskt driva en långsträckt tunnel från ett enda påslag. En arbetsplats vid ett påslag innebär nämligen inte minst för de boende i närheten störningar av olika slag från t ex ventilationsfläktar och kompressorer. Den största störningskällan är emellertid all trafik tidigt och sent på dygnet med tunga lastfordon för borttransport av bergmassorna.

Vid drivningen av Saltsjötunneln ordnade man påslaget i anslutning till värmeverket i Solna där det inte fanns några boende som kunde störas. Inte heller behövde man köra med tunga lastbilar nattetid. I stället utnyttjade man den buffert som finns under jord vid tömningsstationen för de spårbundna vagnarna. Därifrån transporterades bergmassorna med lastbil till ett mellanlager utanför tunneln. Från detta lastades de ytterligare en gång med en frontlastare på lastbilar som således endast behövde köras under dagtid. Omlastningen fördröjde i viss mån transporten men får betraktas som ett bidrag till en bättre miljö. (I viss utsträckning kan metoden också tillämpas vid konventionell sprängning och borrning av tunnlar.)

**Störningar från fullborrningen.** Vid drivningar på försök med TBM i stockholmstrakten för nästan 20 år sedan klagades det på störningar i största allmänhet. Dessa tunnlar drevs dock betydligt närmare markytan än Saltsjötunneln. Det första avsnittet av Saltsjötunneln drevs långt ifrån bostadsbebyggelse och därför blev det aldrig några klagomål från några boende. När man sedan passerade Huvudsta Gård med fullborrningen kunde man i källaren höra TBM som ett svagt malande ljud men uppe i byggnaden hördes ingenting. Bergtäckningen var 70-75 m. Vid Kungsholmsstrand började dock klagomålen. Innovation AB fick i uppdrag att reda ut det hela. 3K Akustikbyrån AB gjorde mätningar av buller och vibrationer i ett par av bostadshusen på olika våningar.

Vid TBM-borrningarna under Kungsholmsstrand uppmättes bullernivåer mellan 36 dB(A) i en lägenhet på 6 tr till 61 dB(A) i porten ut till gatan. Sonderingsborrningarna gav mellan 38 dB(A) och 41 dB(A). Även om de sistnämnda värdena låg betydligt under dem som på samma plats uppmättes för TBM så uppfattades de i stort som lika störande. Vid passerande av vissa bostadsområden blev man alltså tvungen att stoppa TBM-borrningen efter kl 22. Tiden fram till skiftets slut kl 02 användes i stället till översyn och förebyggande service av maskin och utrustning.

Problemen blev dock inte oöverstigliga. Hotellen Royal Viking och Continental i centrala Stockholm kunde passeras utan några klagomål. En störningszon förutsåg man vid Operan där berggrunden går upp i dagen.

Mycket riktigt blev det klagomål från Operan där man givetvis är speciellt ljudkänslig. I spiraltrappan under scenen uppmättes 54 dB(A) till 60 dB(A). Även i orkesterdiket var det störande bullret från TBM högt. Maximalt uppmättes 45 dB(A). Bullret från TBM i salongen och i gångarna till sittplatserna var så besvärande att man fick undvika att borra under föreställningarna. (Tyvärr gick man inte med på att ändra repertoaren under denna tid till "Orfeus i underjorden".) Drivningen kunde sedan ske utan att man behövde korta av den normala arbetstiden fram på natten mer än ett par gånger.

Vid samtal med en person i ett av de bullerstörda husen framförde denne att han hade blivit mycket störd. Efter det att han hade fått en redogörelse för Saltsjöprojektet svarade han efter en vecka: "Det är egentligen inte så farligt nu när jag vet vad det är." Man kan alltså öka förståelsen för en viss form av bullerstörning om de utsatta har blivit informerade om bakgrund, orsak och hur länge de måste stå ut. Exempelvis kan man informera i ett meddelande eller i en broschyr uppsatta i de aktuella trappuppgångarna.

**Bullrets avståndsberoende.** Vid mätningarna under bebyggelsen vid Kungsholmsstrand fick man en viss uppfattning om hur bullernivån påverkas av avståndet till TBM. Ett unikt tillfälle att mer i detalj studera bullrets utbredning i gnejs/granitisk berggrund fick man när fullboringen passerade under en befintlig Energiverkstunnel (E-tunnel) i närheten av S:t Eriksbron. Bullret mättes vid sju olika tillfällen med bullermätare, typ B&K-2209, på ett antal fasta punkter i E-tunneln. Man kunde då registrera hur bullernivån ändrades allteftersom TBM närmade sig korsningspunkten mellan Saltsjö tunneln och E-tunneln för att där efter minska. Det går alltså att avläsa ett beroende av avståndet när det gäller buller men spridningen är stor. Spridningsgraden beror antagligen på bergmassans variationer, t ex typ av berg, slag och sprickor där berget kan reflektera eller absorbera bullret. Vid värderingen av mätningar har man dragit följande slutsats: "Om man utgår ifrån att man kan acceptera en extern bullerkälla på 50 dB(A) skulle bostäder i hus grundlagda på berg med ett vertikalt avstånd till TBM på ca 12 m störas framför maskinen 165 m och bakom 100 m." Med det aktuella djupet på Saltsjö tunneln på 50-60 m blir bullerstörningen framåt 100 m och bakåt 50 m, således totalt 150 m i längdriktningen.

**Vibrationsmätningar.** I E-tunneln gjordes också mätningar och analyser av vibrationer från fullborrningen med TBM. Resultatet av de tre mätningarna: vertikalt, och i två horisontella riktningar, vinkelrätt mot varandra, blev  $<0,2$  mm/s för maximal svängningshastighet och  $<0,02$  g i maximal acceleration. De uppmätta vibrationerna i samtliga riktningar hade en lägre nivå än vad mätinstrumenten kunde registrera. De redovisade signalerna är bara instrumentbrus. Man bör alltså kunna helt bortse från problem med vibrationer i samband med TBM-borrning.

För att undvika en minskning av den effektiva tiden för fullborrning per dygn måste man redan i planeringsstadiet försöka undvika bostadsområden där byggnaderna är grundlagda direkt på berg. Det går givetvis inte alltid att göra och då får man söka skaffa förståelse hos de boende genom att i god tid informera om arbetet. Det gäller då att också påpeka TBM-metodens fördelar, t ex att man slipper bullret och vibrationerna från sprängningsarbeten och att fullborrningens störningar är förhållandevis snart övergående.

#### **SLUTSATSER OCH SYNPKUNKTER**

Det har i Saltsjöprojektet kunnat visas att fullborrning med TBM i många avseenden är ett realistiskt alternativ till konventionell sprängning och borrning. Den momentana borrhastigheten i den hårda bergmassan i stockholmsområdet, gnejs/granit, har varit 2,4 m/h. Detta är ganska exakt vad som förutsades i prognoser och genom förundersökningar. Maskinen är den första i sitt slag och i ett nytt utförande. Utnyttjandetiden har därför blivit lägre än väntat eftersom det alltid tar en viss tid att komma till rätta med inkörningsproblemen. Ett speciellt problem vid fullborrning i tätbebyggt område är att man måste förhindra vatteninläckning vid drivningen och att avloppsvatten kan läcka ut till omgivningen vid den slutliga användningen av tunneln. För att effektivt hindra vatteninläckning är det helt nödvändigt att vid vattenförande zoner kunna förinjektera. En ständig övervakning av vattensituationen är därför viktig så att injekteringen kan starta i tid. Sonderingsborrningen måste också kunna ske utan att den normala driften störs.

De försök som gjorts vid fullborrning av tunnlar utomlands visar att det är oerhört svårt att på TBM integrera utrustningen för sonderingsborrning. Den lösning som man har kommit fram till i Saltsjöprojektet med att förbinda TBM och bakrigg med en kraftig fackverkskonstruktion på vilken borraragregatet sitter har fungerat bra. Samtidigt har tillgängligheten för att lägga räls och komma fram till den främre delen av TBM blivit begränsad. Tyvärr måste man konstatera att arbetet vid t ex räsläggningen framför bakriggen måste ske i hukande, obekväma arbetsställningar. Det är också besvärligt att utföra service- och reparationsarbete på TBM. Utrymmet är även begränsat när det gäller att planera för måltavlorna för riktningskontrollen med laserstråle. Trots att den nuvarande lösningen är den bästa hittills är det angeläget att finna bättre lösningar för systemet. Sonderingsborrning och förinjektering måste man alltid räkna med vid tunnelarbete i tätbebyggda områden.

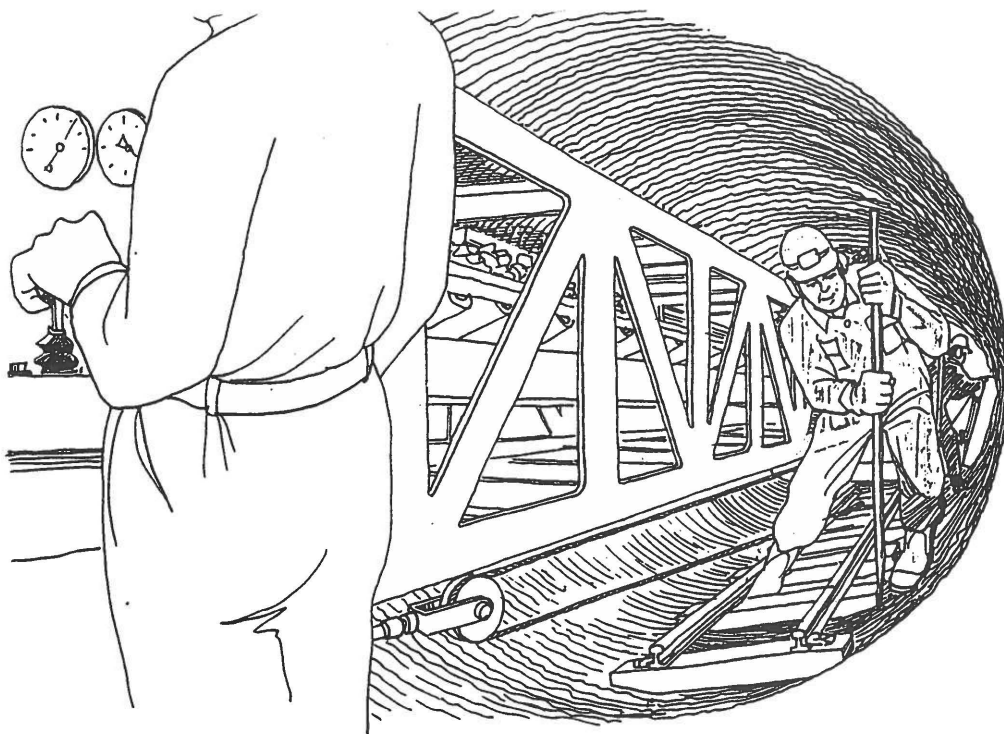


Fig. 6.4:1 Räsläggning

Ett annat svårt problem vid fullborrning med TBM är arbetet med byte av skärrullar. Frånsett att det är ovanligt tungt och varmt samt ansträngande i största allmänhet med en mycket påfrestande arbetsställning så reducerar det en inte obetydlig del av den tillgängliga tiden för fullborrning.

Det miljöproblem som denna studie visar är svårast att komma tillrätta med är problemet att begränsa respirabelt kvartshaltigt borrhåll. Tidigare erfarenheter från liknande projekt utomlands visar att dammproblemet kräver stor uppmärksamhet på att ventilationsutrustning och dammavskiljare sköts noga och kontrolleras ofta. Problemen ökar för de bergarter som innehåller stora mängder kvarts, vilket oftast gäller de svenska. Arbetarna upplever dammproblemen vid tunnelborrning med en känsla av stor osäkerhet. Buller förekommer åtminstone vid sonderingsborrning nästan i samma utsträckning som vid hammarborrning för sprängning. Bullret kan man skydda sig mot med utprovade och ganska lätt applicerade bullerskydd. Bra andningsskydd, bl a mot damm är däremot besvärliga att använda och undviks därför oftast. Man kan inte heller se hur mycket farligt findamm som finns i luften man andas. En sjuklig förändring hos den som kommer i beröring med det tar dessutom lång tid att utveckla och upptäcka.

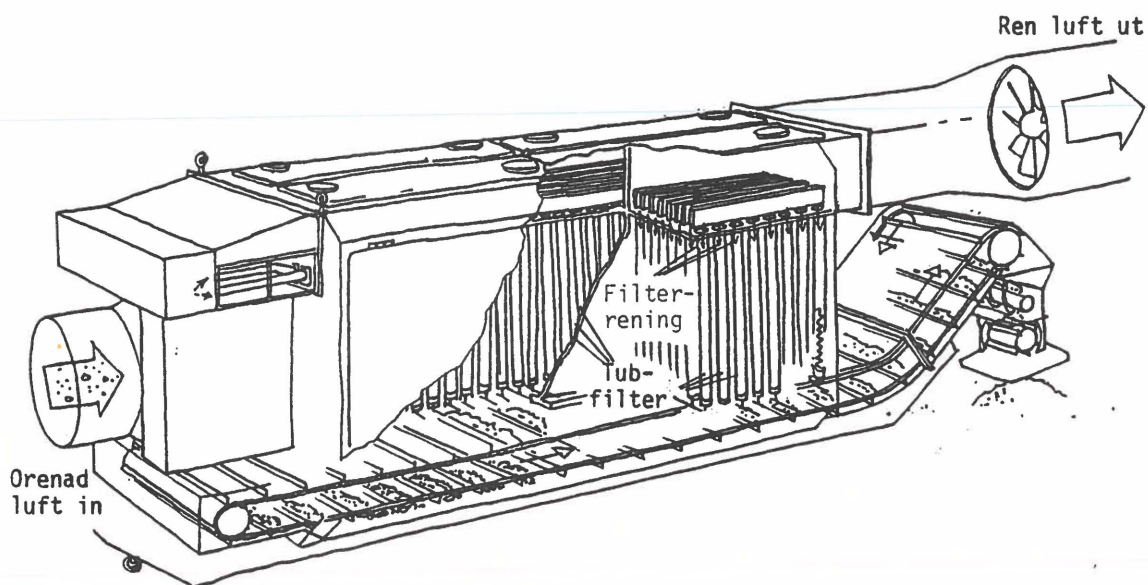


Fig. 6.4:2 Principskiss av "scrubber"

Vid samtal med arbetarna har konstaterats att de föredrar drivning av tunnlar med TBM, dvs fullborrning, som en i de flesta fall bättre metod än konventionell borrning och sprängning. Olycksfallsfrekvensen har dessutom varit låg både vad gäller i absoluta tal och jämfört med den för konventionellt drivna tunnlar och för industrin i övrigt. Fullborrningen upplevs som mindre jäktig jämfört med vid en eller flera salvor vid sprängning. Den momentana framdriften styrs av TBMs inbyggda kapacitet och av den bergmassa man också på ett automatiserat sätt träffar på. Endast vid avbrott för byte av skärrullar samt vid reparationer och underhåll utsätts arbetarna för krav på effektivitet och hårdare belastning. Arbetsorganisationen är väl anpassad till förutsättningarna för TBM-drift.

Försöket att driva en tunnel i hårt berg i tätbebyggt område med TBM måste på basis av denna studie anses ha lyckats, framför allt från miljösynpunkt.

## 7. SAMMANFATTANDE SLUTSATSER

Forskningsprojektet Saltsjö tunneln har redovisats i fyra delrapporter och med tonvikten lagd på att belysa frågan om fullborrning (TBM) under olika omständigheter och särskilt i känslig stadsmiljö kan vara att föredra framför konventionell sprängningsteknik i den hårda berggrund vi har i Sverige.

Från den ingenjörsgelogiska uppföljningen kan konstateras att en skillnad mellan den fullborrade och den sprängda delen av tunneln är den större uppsprickningen längs svaghetsplan i berget som sprängningen ger. Det finns betydligt fler svaghetsplan i berget än vad som syns i den fullborrade tunneln och som positivt påverkar borrarheten. De sprickor som ändå syns i den fullborrade tunneln framträder mycket tydligt, vilket underlättar såväl tolkningen av bergstrukturen som bedömningen för en riktig efterinjektering.

Andra erfarenheter från projektet rör kraven att förhindra vatteninläckning under drivning och utläckning av avloppsvatten till omgivningen vid den slutliga användningen av tunneln. Det är som regel nödvändigt att förinjektera vid vattenförande zoner. Det är också viktigt att injekteringen startar i tid. Sonderingsborrning måste kunna ske utan att den normala driften störs. Studierna av Saltsjö tunneln har gett ett värdefullt underlag för att värdera möjligheterna att i en fullborrad tunnel bättre kunna bemästra problemet med vatten i bergmassan. Bland annat har man kunnat konstatera att flacka sprickor ofta är vattenförande; att två nästan parallella spricksystem ofta indikerar förhöjd vattengenomsläpplighet; att kalцит i bergmassans sprickor ofta indikerar en relativt tät bergmassa och att skjuvning längs en spricka kan uppkrossa en spröd bergart inbäddad i en segare bergart.

Vad gäller möjligheterna att ställa korrekta prognoser har det visat sig möjligt att med relativt enkla medel göra en god bedömning av borrarheten. Detta i synnerhet som de geologiska förhållandena var väl kartlagda, möjliga variationer noga värderade och uppsprickningsgraden kunnat studeras i tidigare utsprängda berggrum och tunnlar i området. Indriftshastigheten visade sig vara beroende av antalet sprickor i

berget. Då sprickigheten är hög har detta normalt större inverkan än bergarten som sådan, i detta fall gnejs eller granit. Det återstår ännu en del utvecklingsarbete för att utan problem klara de stora påfrestningar på maskinens skärrullar som ett högt matningstryck innebär. Det finns också en kapacitetsbegränsning av utlastningen på grund av transportbandens begränsning.

En analys av buller och vibrationer från TBM har visat att om man utgår från att man kan acceptera en extern bullerkälla på 50 dB(A) så skulle bostäder i hus grundlagda på berg med ett vertikalt avstånd till TBM på ca 12 m störas framåt 165 m och bakåt 100 m. Med det aktuella djupet på Saltsjötunneln - 50-60 m - blir bullerstörningen framåt 100 m och bakåt 50 m, således totalt 150 m i maskinens längdriktning.

Vibrationsmätningar som gjordes visar att man helt kan bortse från problemen med vibrationer i samband med TBM-drivning.

En del förbättringar av TBM-tekniken bör övervägas inför kommande arbeten. Den integrerade undersökningsutrustningen på TBM har delvis varit svår att hantera och rälsläggningen måste ske i obekväma arbetsställningar. Det är också besvärligt att utföra service- och reparationsarbeten på TBM. Det har ofta varit svårt att förinjektera och efterinjektering måste då tillgripas. Man måste också bättre komma tillrätta med kvartsdammet. TBM-systemet är känsligt för störningar och måste ha kontinuerligt underhåll.

Trots nämnda svårigheter som snarast bör betraktas som incitament för den fortsatta utvecklingen av TBM-tekniken, kan man sammanfattningsvis konstatera:

- att fullborrning från miljösynpunkt många gånger kan vara att föredra vid tunneldrivning i tätorter
- att TBM-tekniken har stora utvecklingsmöjligheter
- att arbetsmiljön i vissa avseenden redan är bättre än vid sprängning men att ytterligare förbättringar är angelägna.

Det kommer alltid att kunna diskuteras om valet av fullborrning av Saltsjötunneln var ett riktigt val, tekniskt, ekonomiskt och från miljösynpunkt.

Utan tvekan har dock projektet varit av stort värde som utvecklingsfrämjande insats och givit en stor mängd erfarenheter att ta tillvara inför kommande tunnelarbeten i stadsmiljön. Med en viss ytterligare utveckling torde såväl kostnader som arbetsmiljö vid fullborrning väl kunna hävda sig i jämförelse med konventionell teknik.

## **8. SUMMARY**

The heating plant in the Solna municipal recovers heat from the treated effluent from the Bromma sewage works. The water runs through a 5 km long, excavated tunnel to the heating plant where the heating pumps deliver up to 120 MW out to the district heating net. The cooled water is thereafter led via a 7.6 km long tunnel from Solna to an outlet off the islet Kastellholmen in Stockholm and discharged into the Baltic.

Instead of driving the outlet tunnel by means of drilling and blasting the TBM (tunnel boring machine) method was chosen which, particularly in urban areas, offers certain environmental advantages. For example, it was possible to drive the tunnel from one adit only thereby avoiding additional access tunnels with disturbing traffic with rock loads in the city. The TMB-alternative was also considered to reduce disturbances of noise and vibration and - perhaps most important - this method would make it easier to achieve a water-tight tunnel and thereby reducing the risk of lowering the ground water level.

As the Saltsjö Tunnel is the first larger TBM project in hard rock in a city, it offered an outstanding opportunity to carry out various investigations and studies during construction. A research work was hence organized within the main programme of the Swedish Rock Engineering Research Foundation-BeFo to follow up the engineering geology, hydrogeology, TBM performance as well as working conditions in the tunnel and effects on the surface environment. The objective of the research was to compare the TBM technique with conventional drilling and blasting. Sponsoring the research work were also the Swedish Nuclear and Waste Management Co (SKB) and the Development Fund of the Swedish Construction Industry (SBUF).

Brief descriptions of the specific research areas are given below. Complete information of the investigations may be found in separate reports with corresponding titles.

### **1 Engineering geology**

The objective with this study was to illustrate from two viewpoints the rock mass influence during full face boring. One how the rock mass affects the driving and the other how the favourable tunnel design influences the result from stability viewpoint. The report wants to show the expectations on the rock mass before construction of the tunnel and the result with regard to the extent and influence of disturbances, or in other words prognosis - reality. In order to draw conclusions from the TBM penetration rate and its variations, which are not depending on the equipment, it is necessary to make a geological mapping along the tunnel which gives information about type of rock, structure, boreability and includes studies of how water leakage and grouting affects the driving.

### **2 Water flow in the rock mass**

A hydrogeological research study was performed. The water appearance connected to geological features was investigated. The smooth rock walls of the tunnel gave an unusual opportunity to observe how the water percolation in the rock mass takes place. The water leakage was compared with the water loss measurements. The study showed i.a. that the flat and horizontal fissures often are water-carrying, that existence of two fracture systems with almost the same orientation indicate an increased conductivity and that calcite in the fissures often means low conductivity.

### **3 TBM performance - prognosis and evaluation**

Experience from full face boring in hard crystalline rock is limited. Variations in the rock mass affect the results of full face boring to much higher degree than conventional drilling and blasting. The penetration rate for a TBM can vary by a factor of 10 depending on rock type, the tectonics and the amount of fractures present in the rock mass. This study describes, i.a., the work organization and the follow-up of the TBM and back-up system, the prediction for excavation with a TBM, how it was developed and a follow-up of the result as well

as analysis of TBM performance data and boreability tests performed on rock specimens from the tunnel.

#### **4 Working conditions and effects on the surface environment**

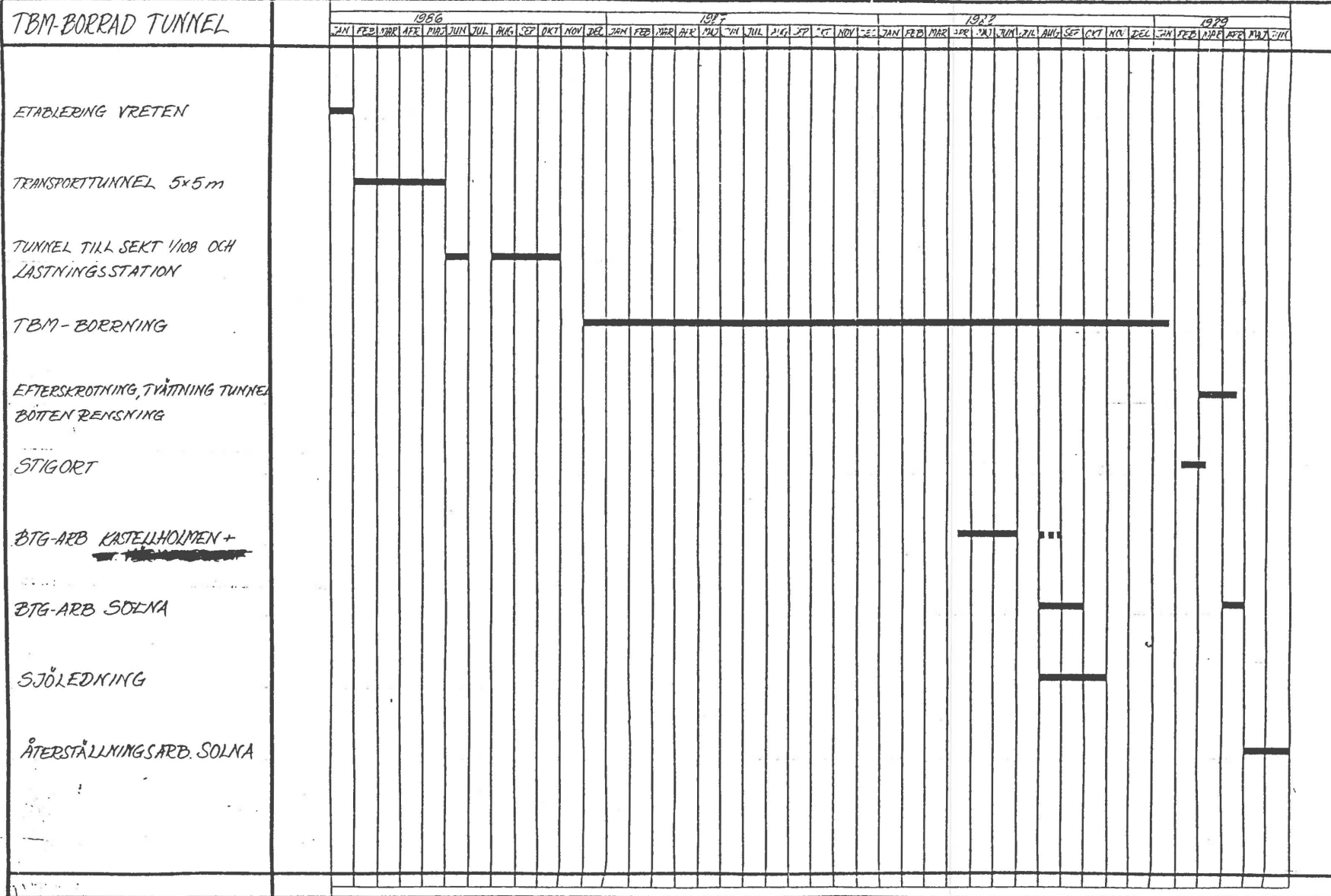
This report describes and evaluates different studies and measurements carried out during the driving of the tunnel both on the working site (inside the tunnel) and in the surface environment. The ambition has been to establish if driving with a TBM is environmentally preferable to drilling and blasting. Measurements of e.g. dust, noise, vibration and climate conditions are documented together with an enquiry put to the workers to find out their acceptance of the TBM. The result of the enquiry was that driving with TBM is to prefer to drilling and blasting but that certain improvements on the TBM-system are desirable.



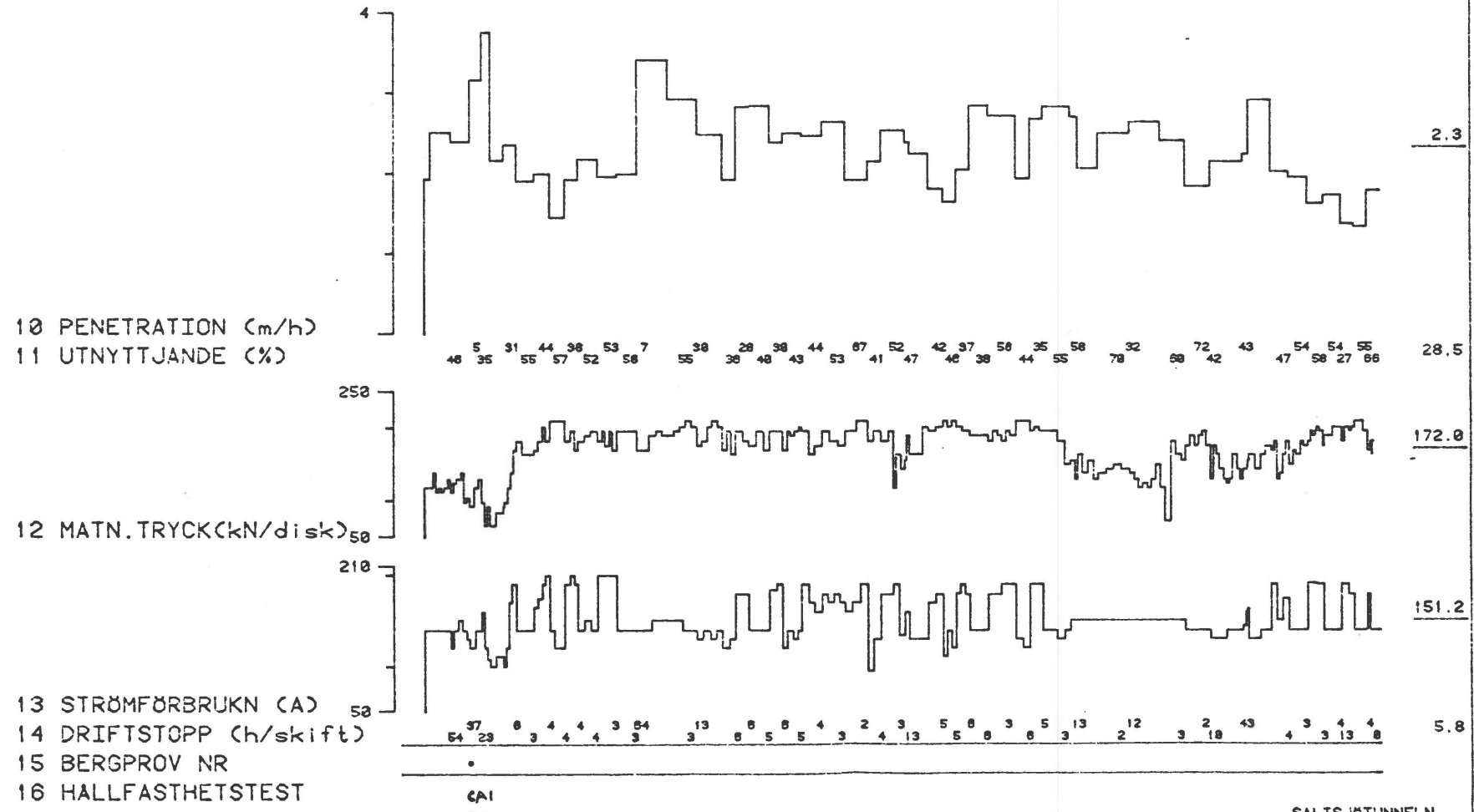


# 65529 SPILLVATTENTUNNEL SOLNA-SALTSJÖN

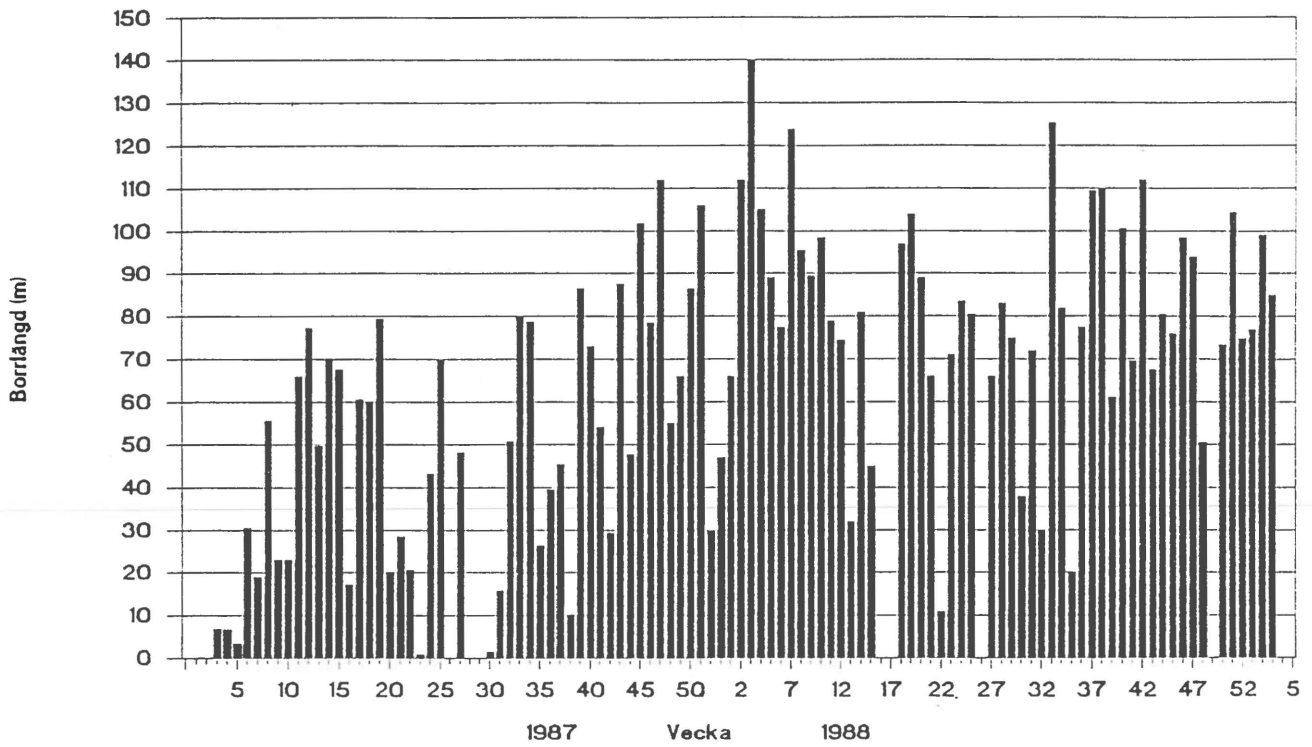
Pr. 8712 01



1 TUNNELMETER	2300	2700	2900	2900	3200	3100	SIAB
2 GEOLOGI							
3 SPRICKORIENTERING	50/40	50/30	10/40	10/40	20/30	20/40 10/6	40/70 30/50
4 SPRICK-/STICKKLASS	2/2	1/1	0-1/0-1	1/2	1/1	0-1/1	1/1 1/2 2/2 1/2 1/1 1/2
5 VATTENINLÄCKNING	3		2		2 2		2 2
6 VATTENFÖRLUST (l/min)	691	54	24			42	8 18 8 2
7 FÖRINJEKTERING (ton)	19.8	13.8	2.3			1.3	8.5 2.3 3.6
8 EFTERINJEKTERING (kg)	292				75		
9 FÖRSTÄRKNING							

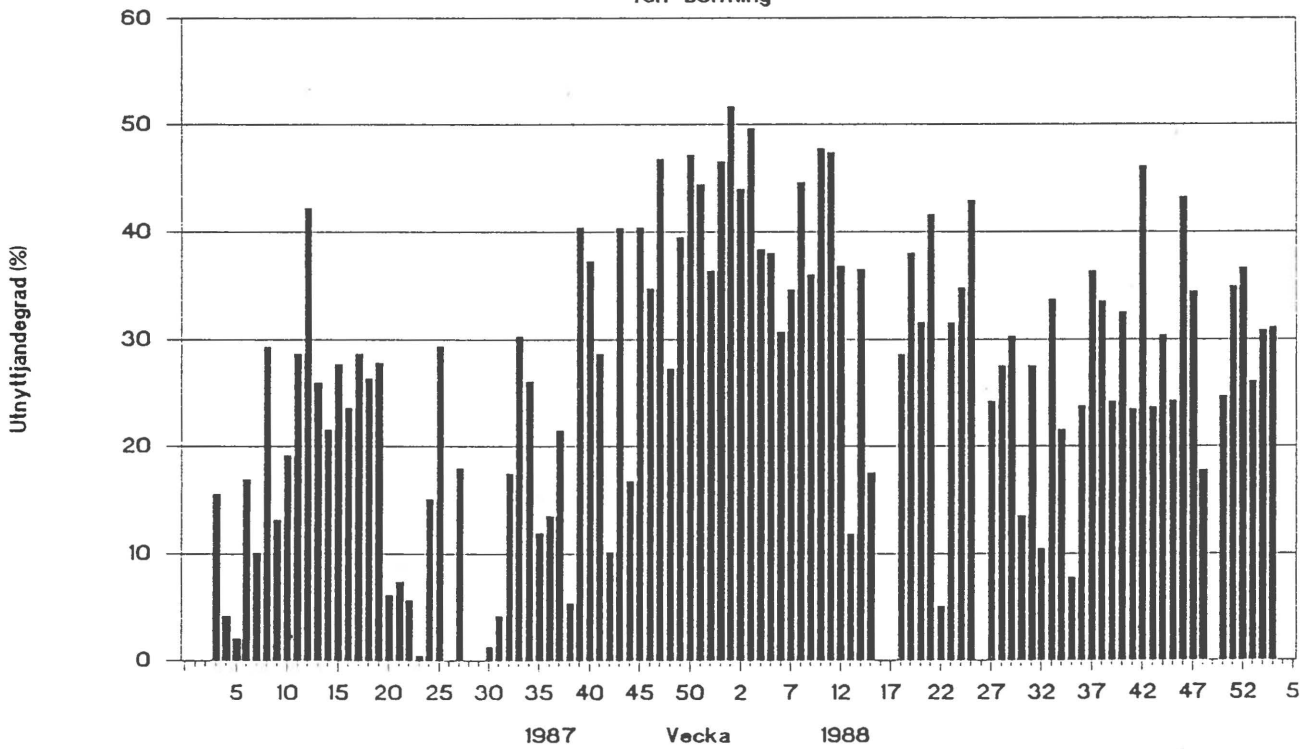


### Borrlängd per vecka

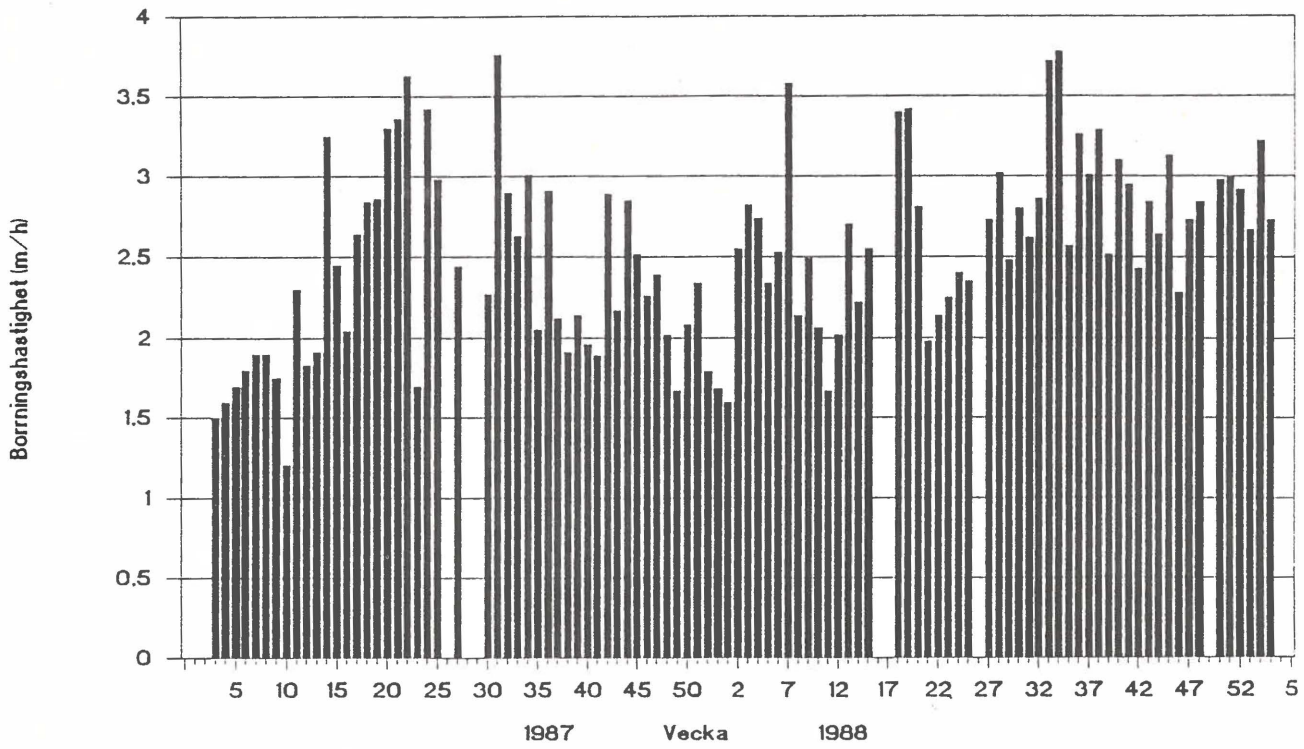


### Utnyttjandegrad per vecka

"ren" borrning



### Borrningshastighet per vecka



### Last per rulle och vecka

