

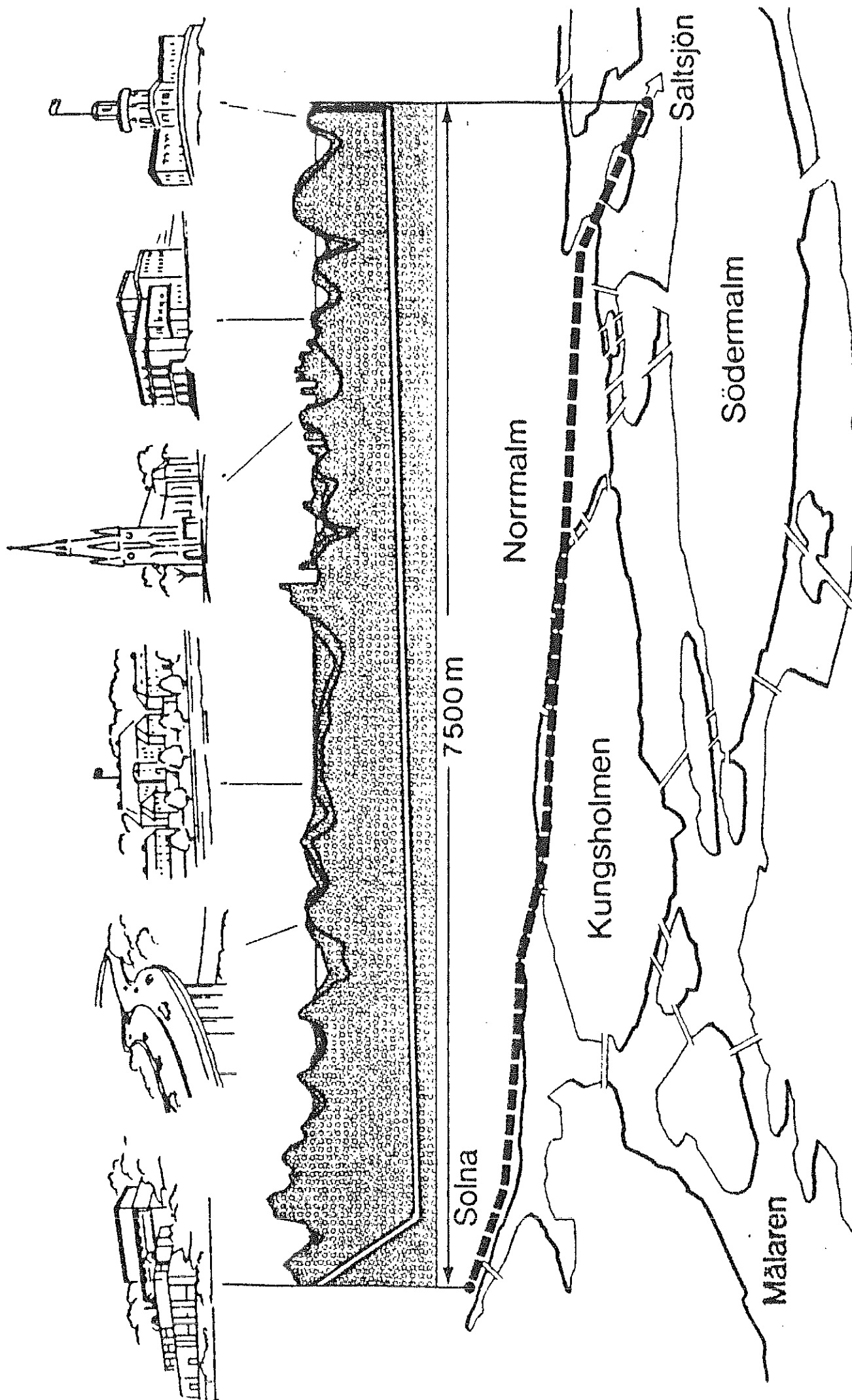
Tunnelbörning i tätort Saltsjötunneln, Stockholm

3 Drivningsdata, prognos och utfall

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

3 TBM performance, prognosis and evaluation

Nils-Olof Sundin, Högskolan i Luleå
Torgeir Blindheim, O.T. Blindheim
Hans Janzon, Atlas Copco MCT
Leif Tollerup, SIAB



TUNNELBORRNING I TÄRTORT 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 Ingenjörsgéologi | Torbjörn Hahn, Consweide, projektledare
Mats Tenne, TYRENS |
| 2 Vattenströmning i berggrunden | Lars Lundström, Hagconsult, projektledare
Karin Rybäck, Hagconsult |
| 3 Drivningsdata prognos och utfall | Nils-Olof Sundin, Högskolan i Luleå, projektledare
Torgeir Blindheim, O T Blindheim
Hans Janzon, Atlas Copco MCT
Leif Tollerup, SIAB |
| 4 Arbetsmiljö och omgivningspåverkan | Eric Karnelo, Industrierberatung |
| 5 Sammanfattande huvudrapport | Torbjörn Hahn, Consweide
Eric Karnelo, Industrierberatung
Lars Lundström, Hagconsult
Nils-Olof Sundin, Högskolan i Luleå
Håkan Westerlund, STOSEB
m fl
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 fjärrvärmenätet. 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 borrhningssalternativet 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 ingenjörsgeologi, hydrogeologi 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 borrning 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 - Saltsjötunneln, Stockholm. Sammanfattande huvudrapport".

Därtill har ett särskilt seminarium hållits med syfte att redogöra för projektet och diskutera fullbörningsteknikens 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

SAMMANFATTNING

Vid utbyggnad av en 7,8 km lång spillvattentunnel mellan Solna och Kastellholmen användes en av Atlas Copco nykonstruerad tunnelborrningsmaskin (TBM) med beteckningen FORO 900S/3,5 för drivning av 6,5 km.

Värmen från spillvattnet tas till vara i ett nybyggt värmepumpverk i Vreten.

Byggherre för tunneln är Stor-Stockholms Energi AB (STOSEB) och entreprenör är SIAB.

Huvudsponsor för forskning och uppföljning har varit Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo).

I uppföljningen ingick tre olika delprojekt som ingenjörsgéologi, hydrogéologi och drivningsdata.

I denna rapport redovisas drivningsdata som följts upp och som presenteras av SIAB, Atlas Copco MCT, O T Blindheim (Norge) och Tekniska Högskolan i Luleå (LuTH).

Två drivningsprognoser utvärderas. Dessa utarbetades före projektets start av SIAB och LuTH.

Tunneln började fullborras januari 1987 och avslutades januari 1989.

Bergarterna i tunneln består i huvudsak av grå gnejser och graniter. Uppsprickningsgraden är låg, ett fåtal mindre krosszoner uppträder längs tunnelsträckan. Totala utnyttjandegraden för fullborrning inkl omtag var 35% och med en nettoindrift av 2,52 m/h.

SIABs prognos över variationsområdet för bergmassans borrarbarhet stämmer bra och visar totalt sett en liten avvikelse (nettoindrift 2,6 mot uppnådda 2,52 m/h). Den största avvikelsen var uppskattningen av tillgängligheten och därmed utnyttjandegraden vid borrning (38% mot uppnådda 28%) med TBM.

I avdelningen för Bergteknik, LuTH's prognos delades tunneln in i sju zoner, där varje zon bedömdes med avseende på maskinens matningskraft och utnyttjandegrad, samt bergarters och svaghetszoners inverkan på drivningsresultatet. I prognosen bedömdes den totala arbetstiden för fullborrning till 795 skift inklusive tid för oförutsedda problem. Detta kan jämföras med det verkliga utfallet som blev 997 skift. Avvikelsen på 25% beror i huvudsak på en felbedömning av TBM's tillgänglighet för borrning. Om antalet skift utan fullborrning tas bort blir prognosens värde 722 skift och motsvarande för drivningen 737 skift. Denna jämförelse ger en avvikelse på endast 2%.

Utfallet av prognoserna visar att det är möjligt att med relativt enkla medel skapa acceptabla förutsägelser för bergarters borrarbarhet. Behovet av provtagning och testning får dock inte underskattas.

SUMMARY

During the last 20 year period, fullface boring has become a competitive for tunnelling in soft rock. A great deal of experience from these environments exists up till today. Experience from tunnelling in hard crystalline rock is limited. The existing knowledge comes mainly from tunnelling projects in Norway.

While planning sewage tunnel under central Stockholm, the Saltsjö tunnel, about 6.5 km were considered suitable for fullface boring. Hard granites and gneisses are present in the area.

With fullface boring projects it is especially important to perform a follow-up of the tunnel boring machine (TBM) performance data since the method is very sensitive to variations in the rock mass. The high initial costs regarding fullface boring increases the demands for an optimum usage of the TBM.

Variations in the rock mass affect the results of fullface 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 and the amount of fractures present in the rock mass. The performance of a TBM thus depends a great deal on the rock type and the tectonics of the rock mass. Usually the average penetration rate varies between 2 to 3 m/h for a TBM with a diameter of 3.5 to 4.5 meters. A thorough investigation of the geology of the site is necessary to be able to compare fullface boring with conventional drilling and blasting.

One of the goals of the Saltsjö tunnel research project has been to increase the knowledge of fullface boring in hard rock and thereby improve present time and cost predictions.

The writing of this report has involved a number of persons, who in different ways have participated in and contributed to the Saltsjö tunnel project:

Mr Leif Tollerup, SIAB, describes the work organization and the follow-up of the TBM and back-up system.

Mr Torgeir Blindheim, O.T Blindheim, presents the SIAB prediction for excavation with a TBM, how it was developed and a follow-up of the result.

Mr Hans Janzon, Atlas Copco MCT, describes the TBM and back-up equipment, consumption of cutters and performed machine tests.

Mr Nils-Olof Sundin, LuTH, presents the excavation prediction developed at the Division of Mining and Rock Excavation, follow-up and analysis of TBM performance data and boreability tests performed on rock specimens from the tunnel. Mr Sundin is also responsible for the layout of the report.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid	
1	INLEDNING	1
2	ARBETSORGANISATION	3
3	MASKIN OCH BAKRIGG	4
4	PROGNOS AV DRIVNINGSTID	7
4.1	<u>Prognos SIAB</u>	7
4.1.1	Grunddata	
4.1.2	Prognosmodell och basdata	
4.1.3	SIAB prognos	
4.2	<u>Prognos Tekniska Högskolan i Luleå (LuTH)</u>	9
4.2.1	Prognosmodell	
4.2.2	Borrbarhetstest	
4.2.3	LuTH prognos	
5	UPPFÖLJNING	13
5.1	<u>Drivningsdata</u>	13
5.2	<u>Stålrulleförbrukning</u>	15
5.3	<u>Maskin och bakrigg</u>	18
5.4	<u>Tunnelkartering</u>	19
6	JÄMFÖRELSE PROGNOSE OCH DRIVNINGSDATA	21
6.1	<u>SIAB prognos - Drivningsdata</u>	21
6.1.1	Nettoindrift	
6.1.2	Prognosmodell	
6.1.3	Kommentar	
6.2	<u>LuTH prognos - Drivningsdata</u>	23
6.2.1	Kommentar	
7	TESTER	28
7.1	<u>Borrbarhetstest</u>	28
7.1.1	Norges Tekniska Högskola (NTH)	
7.1.2	Tekniska Högskolan i Luleå (LuTH)	
7.2	<u>Indriftstest med TBM</u>	29
8	SLUTSATSER	31
9	REFERENSER	32
BILAGOR	1.1	Teknisk specifikation FORO 900S/3.5
	2.1-3	Prognos LuTH - Drivningsdata
	3.1-2	Drivningsdata per vecka

I lösare bergarter har fullborrning under den senaste 20-årsperioden, blivit en konkurrenskraftig drivningsmetod för längre tunnlar. Från dessa miljöer finns i dag en hel del erfarenheter. Begränsade kunskaper finns däremot om fullborrning i hårda kristallina bergarter. Den kunskap som finns kommer främst från tunneldrivningar i Norge.

Vid planläggningen av en spillvattentunnel under centrala Stockholm, den s.k. Saltsjötunneln, bedömdes att ca 6,5 km av tunneln var lämpad för fullborrning. I området finns hårda graniter och gnejser. Saltsjötunneln är alltså en av de första fullborrningsprojekten i hårt berg och den andra fullborrade tunneln i Sverige, där drivningen utförts med TBM-maskiner anpassade för hårt berg. Den första tunneln drevs i Kymmen, Värmland. Tidigare har drivits två tunnlar i Stockholms området 1969-70 med dåtida konventionella "lösbergs"-maskiner. Detta medförde dåliga drivningsresultat.

Vid fullborrningsprojekt är det speciellt viktigt att drivningsdata följs upp eftersom metoden är känslig för variationer i bergmassan. De höga fasta kostnader som drivningsmetoden medför, ökar även kraven på att maskinen utnyttjas optimalt.

Variationer i bergmassan påverkar i högre grad drivningsresultatet vid fullborrning än vad som sker vid konventionell drivning med sprängningsteknik. Drivningshastigheten för en tunnelbormaskin (TBM) kan variera med en tiopotens, beroende på bergart och bergmassans grad av uppsprickning. Typ av bergart och bergmassans tektonik har således stor betydelse vid fullborrning. Vanligen brukar medelvärdet för ett projekts nettohastighet variera mellan 2-3 m/h för en maskin med tunneldiametern 3,5-4,5 m. Vid en jämförelse med konventionell drivning krävs, på grund av ovan nämnda skäl, en mer omfattande geologisk undersökning av projektområdet.

Fullborrningstekniken skiljer sig från konventionell drivning även vad gäller systemteknik, arbetsorganisation och fasta kostnader. Vid fullborrning nyttjas ett över 100 m långt kontinuerligt drivningssystem, som kräver att varje enhet fungerar. Detta förutsätter att personalen är väl intrimmad, så att maskinservice och underhåll utförs på ett riktigt sätt.

Fullborrningens höga fasta kostnader medför att maskinen bör utnyttjas i så hög grad som möjligt. Utomlands förekommer det att maskinen utnyttjas under dygnets alla 24 timmar och under alla veckodagar. För Saltsjötunneln valde man generellt att utföra arbetet i två 10 timmars skift per dag och 5 dagar per vecka.

Uppföljningen av Saltsjötunneln har utförts som ett samarbetsprojekt inom BeFos ramprogram. Representanter från följande företag och institutioner har deltagit; Atlas Copco, konsultföretaget O.T. Blindheim (Norge), Conswede, Hagconsult, LuTH, Industrierberatung (Schweiz), SIAB, STOSEB, KBS och Tyrens.

Ett av målen med forskningsprogrammet för Saltsjötunneln har varit att öka kunskapen om fullborrning i hårda kristallina bergarter, för att därigenom förbättra nuvarande drivnings- och kostnadsprognoser.

Under ca 10 års tid har forskning om mekanisk bergfragmentering bedrivits vid avdelningen för Bergteknik, LuTH. Teoretiska studier om fragmentering har bedrivits, samt prognoser och fältuppföljningar har utförts för ett flertal tunnelprojekt.

Denna rapport har författats av flera personer, som på olika sätt varit inblandade i prognos, uppföljning eller analys av fullboringen. I rapporten skriver i huvudsak :

Leif Tollerup, SIAB, om hur arbetet organiserades samt uppföljningen av TBM-maskin och baksystem.

Torgeir Blindheim, O.T Blindheim, om hur SIAB's prognos togs fram för drivning med en fullboringssmaskin, samt en analys av prognosens utfall.

Hans Janzon, Atlas Copco MCT, om TBM-maskin och bakrigg, förbrukning av stålrullar och utförda maskintester.

Nils-Olof Sundin, LuTH, om drivningsprognosen och den modell som utvecklats vid avdelningen för Bergteknik, uppföljning och analys av drivningsdata samt borrarbarhetstester på prover från tunneln. Sundin är även ansvarig för sammanställning och utformning av rapporten.

Huvudfinansiär för uppföljningen av projektet har varit Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo).

Avslutningsvis vill författarna framföra ett stort tack till SIABs och Atlas Copco's personal på arbetsplatsen och då främst Hans Törnros och Robert Hillbom.

TBM-utrustning är en stor ekonomisk investering. Det är därför angeläget att uppnå en så hög utnyttjandegrad som möjligt. Vid planeringen av Saltsjö tunneln bestämdes därför att arbetet borde bedrivas enligt "Nordsjömodellen". Detta innebar att 3 skiftlag arbetar 2 veckor, 5 dagar per vecka och 10 timmar per dag. Den tredje veckan är skiftlaget ledigt. För att kunna genomföra detta arbetsschema för Saltsjö tunneln måste en överenskommelse träffas med Byggnadsarbetareförbundet.

Borrningen startades i januari 1987 med två "borrande" skift per dygn. Arbetstiden har varit från kl 06.00 till 16.00 och från 16.00 till kl 02.00 nästa dags morgon. Borrning har i huvudsak kunnat bedrivas under dessa tider.

På grund av störande buller till omgivningen måste under två kortare avsnitt borrningstiden minskas. Borrningen fick avbrytas kl 22.00 vid passerandet under bostadshus på Kungsholmen, då bullernivån 50 DbA uppmätts i hus grundlagda på berg. När TBM passerade rakt under Operan gjordes även två veckors uppehåll under själva tiden för föreställningen.

Varje borrande arbetslag har bestått av 7 man, elektriker, maskinist, TBM-förare, två berg- och injekteringsarbetare, lokförare och person för underhåll och byte av stålringarna (diskarna) på brytrullarna. För att få ett så allsidigt team som möjligt, har arbetarna fått rotera mellan de olika arbetsuppgifterna.

Sedan augusti 1987 har även arbeten bedrivits under vardagsnätter och helger. I huvudsak har arbetet bestått av reparation och underhåll. Två man har arbetat nattetid mellan 02.00 och 06.00. Under lördagar och söndagar har ca tre man arbetat i 12 timmar per skift.

Totalt har arbetsplatsen varit bemannad med 30 personer inkl platsledning och skiftbefäl.

Borrningen planerades att sker kontinuerligt under hela skiftets längd. Detta har medfört att en rastbod måste monterats på bakkanten.

FORO 900S/3,5 består av två huvuddelar som är sammankopplade genom axiella cylindrar så att huvuddelarna i axiell riktning kan röra sig i förhållande till varandra inom cylindrarnas slaglängd. Den främre delen är maskinens arbetande del med borrhuvudet som roterar och trycks framåt under borrning. Till den arbetande delen är monterad den främre fastspänningsenheten, i form av en ringformad glidsko i en nedre och en övre halva, som bär och stabiliserar maskinens främre del och som håller maskinen vid omställning av den bakre fastspänningsenheten. Den andra huvuddelen utgörs av den bakre fastspänningsenheten som spänns in mellan tunnelväggarna och överför matningskrafts- och vridmomentsreaktionerna till berget. Samtidigt bär den bakre fastspänningsenheten massan av den bakre delen av TBM.

Cylindrar mellan maskinens två huvuddelar levererar matningskraften till borrhuvudet och överför vridmomentsreaktionen från den arbetande delen till den bakre fastspänningsenheten.

En tvärsnitt av TBM presenteras i fig 3.1. Maskinens tekniska specifikation finns beskriven i bilaga 1.

Borrhuvudet har 27 stålruddar, vilka kan pressas mot bergväggen med en maximal last av ca 25 ton per rulle. Dessa består av diskar i speciallegering av stål, monterade på nav försedda med förspända dubbla koniska rull-lager. Stålruddarna monteras i sadlar med fyra bultar framifrån på huvudet. De borrarade massorna lyfts upp med hjälp av skrapor och skopor till maskintransportbandet och förs sedan hela vägen till bakriggens slut (190 m). Vid huvudet har man bevattning och dessutom sugts damm upp av sugfläktar. Den avsugna luften renas i ett jetslangfilter.

En borrhningscykel kan beskrivas i korthet som följer:

1. När matningscylindrarna uppnått sin fulla slaglängd av 1,5 m, blir de avlastade. De främre fastspänningsringen låses i de övre spänncylindrarna mot berget. Borrhuvudet fortsätter att rotera.
2. Stödbenen ansättes mot släpskon på sulan med ett tryck, som motsvarar den på benen vilande delen av maskinvikten. Maskinen står kvar på sina backventiler, då de bakre spännskorna lös-görs från tunnelväggarna genom att göra spänncylindrarna trycklösa.
3. Matningscylindrarna reverseras och för den bakre fastspänningsenheten framåt 1,5 m.
4. De bakre spänncylindrarna trycksättes för att förankra spännskorna mot väggarna.
5. Stödbenen avlastas och trycket i de övre främre spänncylindrarna reduceras till den nivå man normalt har för att stabilisera maskinens arbetande del under borrning.
6. Riktningskontroll med hjälp av tevekameror och laser utföres.

7. Efter eventuella styrningsrörelser för riktningskorrigering trycksätts anslagscylindrarna på nytt.
8. Matningscylindrarna trycksättes och borrarningen fortsätter ytterligare 1,5 m.

För sondering och injektering har en s.k. PHD 35 monterats direkt efter tunnelborrmaskinen. Denna består av två hydrauliska bergborrmaskiner typ Atlas Copco COP 1238, som borrar 26 m långa (51 mm diameter) undersökningshål i 6° vinkel framför TBM. Utrustningen är rörlig på en stålbygga bakom TBM, så att den kan utnyttjas separat utan att störa tunnelborrningen. Vid behov kan undersökningshålen utnyttjas för tätinjektering. Eftersom detta sker långt framför tunnelfronten, förebygger man inträngning av grundvatten i tunneln.

Under den 20 m långa stålbyggan läggs rälsen som den 172 m långa bakriggen rullar på. Rälsen utnyttjas också för samtliga 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 finns räls för materialtransport fram till tunnelfronten.

Längre bak finns alla fasta installationer som hör till TBM hydraulpaket, elskåp, transformator, kompressor och dammsugarutrustning. Dessutom finns en arbetsbänk och en personalhytt. Hela vägen från TBM över bakriggen löper ett transportband, som för ut de utborrade bergmassorna och lastar i gruvvagnar längst bak på bakriggen. Bakriggen som är av typ Myhlhäuser är försedd med ett halvautomatiskt rangeringssystem, som gör att kvarvarande vagnar kan lastas även när loket är borta vid omlastningsstationen.

FORO-maskinen konstruerades för att bli så kort som möjligt. Detta resulterar bland annat i att maskinen är väldigt lättstyrd. Som en följd av detta uppfattades maskinen till en början som mycket svår att hålla i en stabil riktning, maskinen kunde styras både med hjälp av främre gripperring och bakre grippers. Efter att ha infört mekaniska stopp för maximal rörelse i främre gripperring eliminerades de värsta styrfelen.

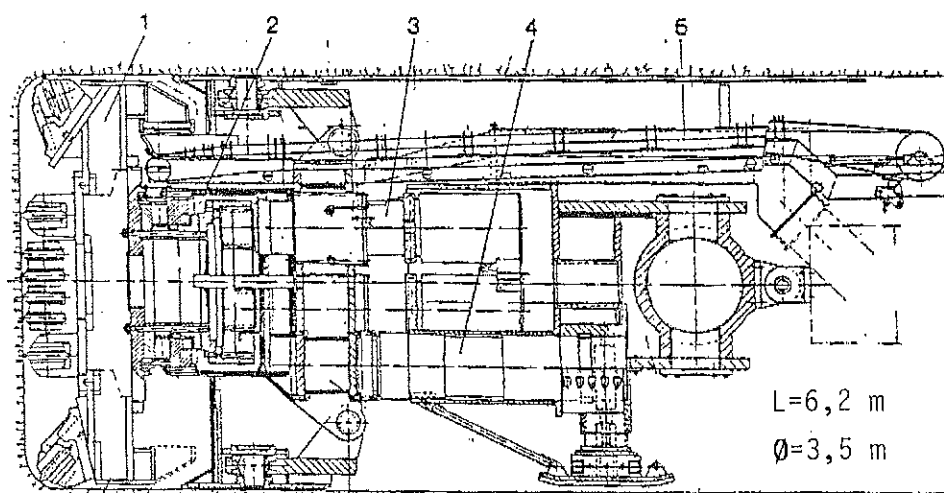


Fig 3.1 Tvärsnitt av TBM, FORO 900S/3,5. Diameter 3,5 m.

7. Efter eventuella styrningsrörelser för riktningskorrigering trycksätts anslagscylindrarna på nytt.
8. Matningscylindrarna trycksättes och borrarningen fortsätter ytterligare 1,5 m.

För sondering och injektering har en s.k. PHD 35 monterats direkt efter tunnelbormaskinen. Denna består av två hydrauliska bergbormaskiner typ Atlas Copco COP 1238, som borrar 26 m långa (51 mm diameter) undersökningshål i 6° vinkel framför TBM. Utrustningen är rörlig på en stålbrygga bakom TBM, så att den kan utnyttjas separat utan att störa tunnelborrningen. Vid behov kan undersökningshålen utnyttjas för tätinjektering. Eftersom detta sker långt framför tunnelfronten, förebygger man inträngning av grundvatten i tunneln.

Under den 20 m långa stålbryggan läggs rälsen som den 172 m långa bakriggen rullar på. Rälsen utnyttjas också för samtliga 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 finns räls för materialtransport fram till tunnelfronten.

Längre bak finns alla fasta installationer som hör till TBM hydraulpaket, elskåp, transformator, kompressor och dammsugarutrustning. Dessutom finns en arbetsbänk och en personalhytt. Hela vägen från TBM över bakriggen löper ett transportband, som för ut de utborrade bergmassorna och lastar i gruvvagnar längst bak på bakriggen. Bakriggen som är av typ Myhlhäuser är försedd med ett halvautomatiskt rangeringssystem, som gör att kvarvarande vagnar kan lastas även när loket är borta vid omlastningsstationen.

FORO-maskinen konstruerades för att bli så kort som möjligt. Detta resulterar bland annat i att maskinen är väldigt lättstyrd. Som en följd av detta uppfattades maskinen till en början som mycket svår att hålla i en stabil riktning, maskinen kunde styras både med hjälp av främre gripperring och bakre grippers. Efter att ha infört mekaniska stopp för maximal rörelse i främre gripperring eliminerades de värsta styrfelen.

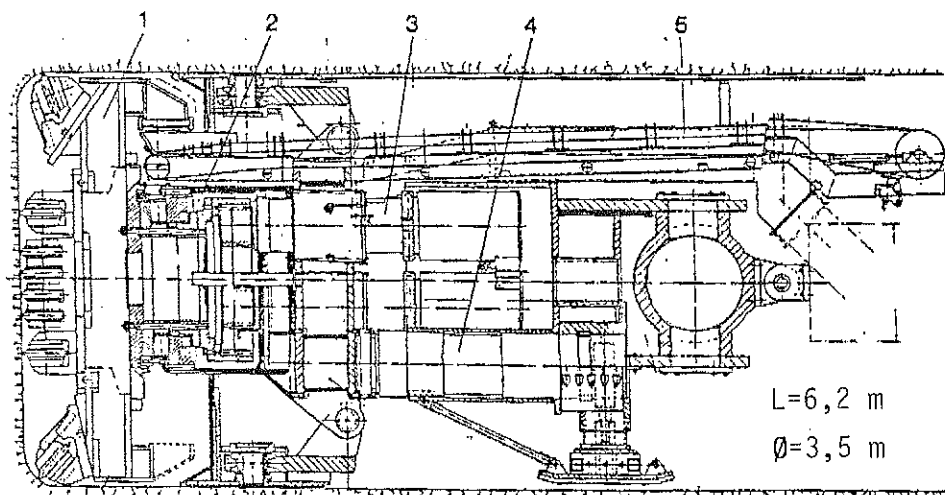


Fig 3.1 Tvärsnitt av TBM, FORO 900S/3,5. Diameter 3,5 m.

Siffrorna i figuren visar:

1. Borrhuvudet.
2. Ett hus med huvudlagret samt slutväxeln.
3. Drivenheterna som utgörs av elektromotorer som via vridmomentbegränsade slirkopplingar driver planetväxlar. Planväxlarnas utgående pinjonger driver slutväxelns tandkrans och därmed borrhuvudet.
4. Matningscyklindrarna som trycker borrhuvudet framåt och överför matnings- och vridmomentsreaktionerna till den bakre fastspänningseenheterna.
5. Bandtransportör för transport av den utborrade bergmassan.

En generell beskrivning av den kompletta anläggningen syns i fig 3.2. Maskinen är dessutom försedd med automatisk matningskontroll som innebär att strömförbrukningen för borrhuvudets motorer kontinuerligt reglerar matningstrycket. Det sker på så sätt att motorernas installerade kapacitet utnyttjas maximalt utan att å andra sidan överbelasta motorerna. Maskinen blir med andra ord självreglerande mot högsta möjliga prestanda i olika bergarter.

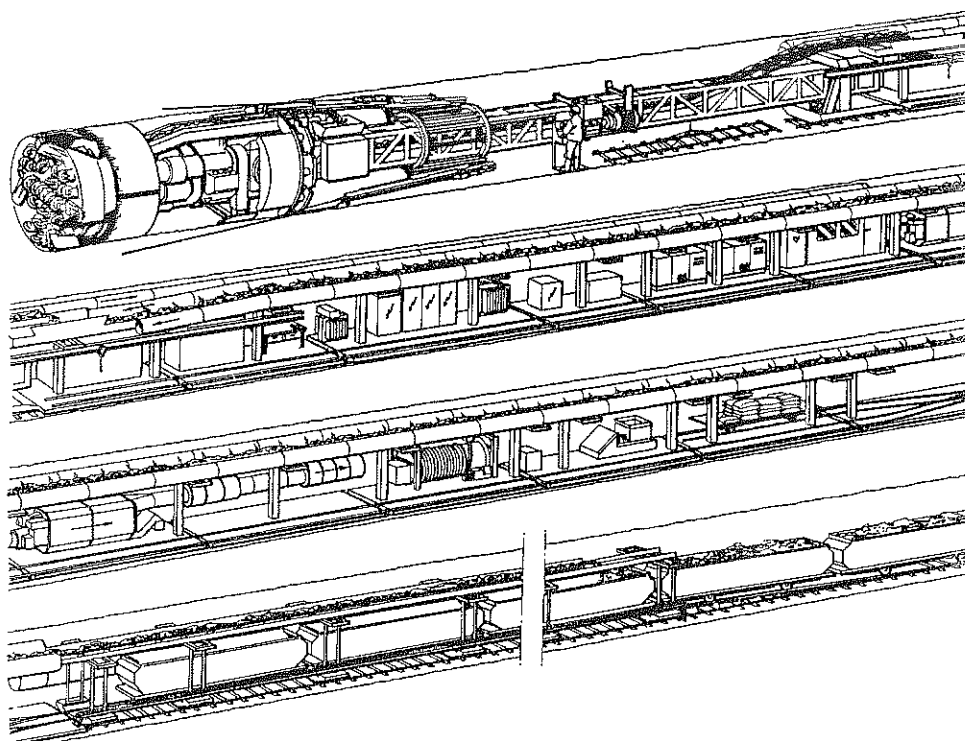


Fig 3.2 Principskiss visande TBM och bakrigg.

Baksystemet som valdes för tunneln var ett enspårssystem. Detta innebär att man i SIAB's fall använde 13 st 8 m^3 vagnar. Systemet kan anpassas till fler eller färre vagnar beroende på transportlängd. Vagnarna lastades oberoende av loket. Vid planeringen av drivningen fanns osäkerhet om denna lösning, utan växlar eller annan hydraulik, skulle klara en acceptabel indrift mot slutet av drivningen. Det visade sig att framdriften ej i någon större grad påverkades när näst sista veckan gav 115 m.

4 PROGNOSE AV DRIVNINGSTID

4.1 Prognos SIAB

4.1.1 Grunddata

SIAB's prognos för Saltsjö-tunneln baserades på följande grunddata:

- geologiskt material som ingick i anbudsunderlaget, samt egen kartläggning.
- resultat från tester utförda av Atlas Copco på prover från teletunnlar i området och borrhärlor från diamanthärlor.
- besiktning av området och närliggande tunnlar.

Kortfattat resulterade dessa undersökningar i att följande slutsatser drogs:

Berget domineras av en fin- till medelkornig granit och en granitisk gnejs med låg halt av glimmer. Gnejsen förväntades uppvisa samma tryckhållfasthet som bedömdes gälla för graniten.

Berggrunden delas upp av tektoniska svaghetszoner, mest i form av sprickzoner och omvandlad granit ("rödberg"). Dessa zoner antogs uppträda med en omfattning av storleksordning 5 till 10% längs tunnelsträckan.

Testresultaten som ingick i anbudsunderlaget visade en viss variation. En enaxlig tryckhållfasthet på ca 200 MPa antogs vara representativt för genomsnittet. Högsta testresultatet var 247 MPa. Punktlasttesterna visade indirekt att draghållfastheten varierade från ca 8 till 17 MPa. Bergarternas slitande egenskaper bedömdes utifrån hållfasthet, kvartsinnehåll och utförda slitagetester.

Avstånden mellan genomgående sprickor bedömdes ligga mellan 0,5 och 2 m. Till detta kommer ett antal foliationsstick. Dessa var dock svaga och förekom sällan med större frekvensavstånd än ca 2 till 4 m vid besiktning av borrhärlor. I de mer uppspruckna partierna bedömdes sprickavstånden variera mellan 0,2 och 0,4 m, sällan mindre.

4.1.2 Prognosmodell och basdata

Beräkningarna baserades på NTH's prognosmodell av årgång 1983. Följande ingångsparametrar valdes ut från ovan beskrivna basmaterial och testresultat:

- Borrsjunksindexet DRI= 42 antogs gälla med utgångspunkt från en tryckhållfasthet av 200 MPa och erfarenheter från liknande bergarter.
- Uppsprickningsgraden antogs normalt ligga mellan 0-I, med enstaka partier med klassen I-II. I genomsnitt baserades prognosen på klassen 0-I/I. Vinkeln mellan sprickriktning och tunnelaxel sattes till 20°.

Tabell 4.1 visar prognoser för nettointrängning i genomsnitt och i sprickzoner. Tabellen gäller för en matningskraft av 200 kN per disk.

Tabell 4.1 Prognos för nettointrängning i genomsnitt och i sprickzoner.

DRI	Basinträngn. (mm/varv)	Sprick- klass	Sprick- korr.	Nettointrängning (mm/varv)
42	4,2	0-I/I	0,80	$4,2 \cdot 0,80 = 3,36$
42	4,2	I-II	1,35	$4,2 \cdot 1,35 = 5,67$

Förbrukningen av stålruddar antogs utifrån bedömningar av bergets egenskaper samt erfarenhetsdata.

4.1.3 SIAB prognos

Genomsnittlig nettoindrift beräknades till 2,6 m/h för en TBM med 13 RPM. Maskinen förväntades kunna arbeta kontinuerligt med en bruttomatningskraft av 200 kN. Indriftshastigheten förväntades kunna variera från under 2 m/h till över 4 m/h beroende på variationer i bergart och uppsprickningsgrad.

Bergförstärkning, tex skroting, bultning och järnbågar i sprickzoner, antogs få en liten omfattning och således medföra liten påverkan på projektiden.

Förinjektering blev efter en noggrann värdering antagen att omfatta zoner med en sammanlagd utsträckning av 12% av tunnellängden, av vilket 7% bedömdes vara moderat uppsprucket berg och 5% tätt uppsprucket. Zonerna bedömdes kräva ganska mycket eller mycket förinjektering.

Utnyttjandegraden för borrar bedömdes bli 45% av en normal arbetsvecka. Tid för omtag för TBM och förinjektering är inte inberäknad. Byte av stålruddar bedömdes ta upp till 15% av disponibel arbetstid.

För ovannämnda zoner med förinjektering sattes utnyttjandegraden till 25 och 15%. Den sist nämnda zonen skulle dock kombineras med en något försiktigare borrar dvs med en drivningshastighet av 2.0 m/h. Detta skulle ske på grund av möjligheter för utfall av block, stora vibrationer i maskinen etc.

Sammantaget ger detta för 100 h disponibel arbetstid per vecka, en möjlig genomsnittlig veckoindrift av 117 m/vecka för en normal arbetsvecka utan problem med berget. För veckor med förhållandevis "lätt" och "omfattande" injektering beräknades veckoindriften bli 65 respektive 30 m/vecka.

Den totala drivningstiden för 6900 m tunnel beräknades till 72 arbetsveckor, av vilka ca 13 veckor är mertid (18%) på grund av zoner som kräver injektering.

Brutto genomsnittlig veckoindrift blev ca 96 m/vecka och totala utnyttjandegraden av TBM för borrhning ca 38%.

Enär entreprenören enligt kontraktet skulle stå för risktagandet vad gäller injektering och förstärkning, lade SIAB avslutningsvis in extra tid som gardering.

Inkörningsperioden med reducerad utnyttjande av TBM sattes till ca 3 månader.

I specifikationen för TBM ingick krav på "fingersköld" och effektiva metoder för sonder- och injekteringsborrning. Krav förelåg också på 200 kN som normal matningskraft per verktyg.

4.2 Prognos Tekniska Högskolan i Luleå (LuTH)

En prognos av drivningstiden för Saltsjötunneln utarbetades våren 1986 vid avdelningen för Bergteknik, LuTH. Prognosen baserades på:

- borrbarhetstester på stenprover tagna i olika tunnlar i närheten av den tänkta tunnelsträckningen,
- en översiktlig "berggrundskarta" över området med större sprickzoner inlagda,
- en topografisk karta över området,
- erfarenhetsdata från tidigare prognosarbeten och uppföljningar.

I prognosen delades sedan tunnelsträckan upp i zoner, beroende på hur bergmassan och vatteninläckning bedömdes påverka borrhningen.

4.2.1 Prognosmodell

Bakgrunden till den systematik som används vid utarbetandet av prognoser för drivningstid, finns tidigare beskriven i rapporterna Sundin & Lindqvist (1983) och Sundin (1988). Då denna bakgrund inte är nödvändig att känna till för att följa systematiken, kommer därför här endast att redovisas de ekvationer och faktorer som användes vid utarbetandet av prognosen.

$$P_{BI} = n / \sum (P / D) \quad (\text{mm/kN}) \quad (1)$$

$$I_B = ((\sum P_{BI} \cdot k_B) / n) \cdot k_J \quad (\text{mm/kN}) \quad (2)$$

$$n_{pr} = I_B \cdot F \cdot \text{RPM} \cdot 60 / 1000 \quad (\text{m/h}) \quad (3)$$

$$sh_z = L / n_{pr} \cdot h_{sh} \cdot U \quad (\text{sh}) \quad (4)$$

$$sh_{az} = \sum sh_z \quad (\text{sh}) \quad (5)$$

$$sh_t = sh_{az} (1 + k_T / 100) \quad (\text{sh}) \quad (6)$$

där: P_{BI} = index för inträngningstestet (mm/kN)
 n = antalet last-inträngningscykler

P	= maximal last per cykel	(kN)
D	= kvarstående inträngningsdjup vid avlastning per cykel	(mm)
I_B	= borrarbarhetsindex	(mm/kN)
k_B	= en faktor för inträngningstestet inkl. svaghetsplanens inverkan	
k_T	= faktor för svaghetsplanens inverkan Blindheim (1981).	
npr	= indriftshastigheten netto	(m/h)
F	= last/rulle	(kN)
RPM	= borrhuvudets varvtal	(r/min)
sh _z	= antalet arbetade skift för varje zon	(sh)
L	= zonens längd	(m)
h _{sh}	= arbetstid i timmar per skift	(h/sh)
U	= utnyttjandegraden då "ren" borrning utförs	(%)
sh _{az}	= totala antalet skift i alla zoner	(sh)
sh _t	= totala antalet skift för borrning i projektet	(sh)
k_T	= faktor för "oförutsedda" driftstörningar	

4.2.2 Borrbarhetstest

Vid prognoser av drivningshastigheter (npr) för TBM-maskiner, används vid LUTH ett inträngningstest, beskrivet av Rånman (1981). Kortfattat går testet till på följande sätt. Ett verktyg, med hemisfärisk spets av hårdmetall och med radien 6 mm, pressas stegvis in i ett sågat och ingjutet bergartsprov. Inpressningen sker i 5 cykler, med en successiv inträngning av 0,5 mm per cykel. Last och inträngningsdjup tas upp på en XY-plotter. För varje cykel noteras sedan maximal last (P) och hur långt verktyget trängt in i provet vid avlastning (D). Utifrån dessa värden kan sedan inträngningsindex (P_{BI}) för varje bergartsprovs bestämmas. För att få ett säkrare index för själva bergarten, bör testet utföras på minst 3 stycken prover per bergart.

Vid uppföljningen av TBM-borrningen i Wölla, Österrike (Sundin & Lindqvist 1983), konstaterades att en konstant för testmetodens verktyg (k_B) måste ingå vid beräkningarna av en bergarts borrarbarhet. För Wöllaområdet sedimentära bergarter varierade värdet mellan 1.1 och 1.3. Detta förhållande verkade inte gälla för gnejserna i Kymmen, där faktorn beräknades till 1.0. Eftersom bergarterna i Stockholm mer liknar de som finns i Kymmen, har faktorn k_B i prognosen för Saltsjötunneln satts till 1,0.

För att kunna göra en ingenjörsgelogisk bedömning av projektområdet, undersöktes ett antal närliggande tunnlar för bedömning av bergarter, strukturer samt för provtagning. Proverna testades i Luleå med ovan nämnda inträngningstestet. Resultaten kan ses i tabell 4.2.

I tabell 4.4 visas de i prognosen ingående faktorerna och den beräknade drivningstiden för varje zon samt totalt.

Tabell 4.4 Prognos av antalet arbetade skift per zon och totalt.

Zon	Zon- längd	Last per disk	Faktor för svaghets- plan	Indrifts- hastighet	Utnytt- jande- grad	Skift
	L (m)	F (kN)	k_J	npr (m/h)	U (%)	sh_z (skift)
1.	403	180	1,00	2,06	13	158
2.	542	200	1,00	2,29	25	100
3.	450	190	1,25	3,46	35	39
4.	2100	180	1,55	4,97	30	148
5.	300	100	2,55	5,78	20	27
6.	400	200	1,55	4,94	35	24
7.	2290	200	1,25	3,56	30	226
Tot	6485					722
Mv		189,2	1,32	3,68	25,7	

Nedan följer en kortfattad motivation till zonindelningen.

- Zon 1.** Intrimning av personal och maskin bedömdes medföra en låg utnyttjandegrad och liten last per stålrulle.
- Zon 2.** Drivning genom en hård granit beräknades medföra en låg drivningshastighet och utnyttjandegrad.
- Zon 3.** Borrning genom granit med en ökad frekvens av svaghetsplan kommer att medföra en ökning av drivningshastigheten.
- Zon 4.** Zonen går parallellt med och nära Klarabergskanalen, vilket bedömdes medföra risk för lerzoner och större vatteninläckning på tunnelnivån. Förväntade bergarter är röd och grå gnejs. Strängare krav på vatteninläckning samt passerandet under bostäder bedömdes medföra lägre utnyttjandegrad.
- Zon 5.** En kort zon som går under Bannhusviken förväntades huvudsakligen bestå av uppspruckna amfiboliter med en bredare krosszon, vilket skulle medföra en stor risk för större ler- och vatteninläckning. Detta bedömdes resultera i en låg last per disk och en låg utnyttjandegrad. Mycket tid bedömdes också åtgå för injektering och förstärkning.
- Zon 6.** En kort zon som bedömdes bestå av flera bergarter med liknande frekvens av svaghetsplan som för zon 4. Utnyttjandegraden bedömdes bli högre i zon 6 än i zon 4.
- Zon 7.** Tunneln avslutas med en lång zon som går under Stockholm C och ut under Kastellholmen. Berggrunden bedömdes bestå av gnejser och graniter med relativt ringa uppsprickning. Långa transporter och på sina ställen problem med vatteninläckning skulle komma att medföra relativt låg utnyttjandegrad.

5 UPPFÖLJNING

5.1 Drivningsdata

De borrande skiftlagen under vardagarna förde redan från första borrhningen skiftrapporter över flera olika deloperationer. Motsvarande rapporter fördes inte av de underhålls- och reparationsskift som senare började utnyttjas. Tiden för dessa skift uppgår till ca 10% av den totala arbetstiden. Nedan redovisas endast jämförelser mellan olika deloperationer som bokförts av de borrande skiften.

Totala tidsåtgången för de olika deloperationerna visas i tabell 5.1. Tidsåtgången som utnyttjats för sonderborrning och injektering blev 10%, vilket kan jämföras med LuTH's prognos på 30%. Orsaken till denna stora skillnad beror på att i prognosen bedömdes att de krav som ställt upp, för maximal vatteninläckning under drivning av tunneln, skulle medföra tidskrävande tätningsarbeten. Som exempel kan nämnas att kravet på maximal vatteninläckning var 3 liter per minut och hundra meter under centrala Stockholm. Detta gör att Saltsjötunneln skiljer sig klart från hittills "vanliga" TBM-projekt.

För borrhning inklusive omtag har utnyttjats 35% av tiden. Om tiden för injektering och sonderborrning tas bort blir siffran 39%. Det är en låg utnyttjandegrad av maskinen jämfört med normala projekts 45 till 50%.

Tabell 5.1 Tidsfördelning för olika arbetsoperationer.

Deloperation	Arbetstid (%)
Borrhning	28
Omtag	7
Underhåll TBM	7
Reparation TBM	21
Rullbyte och inspektion	10
Reparation Bakrigg	15
Sonderborrning och injektering	10
Övrigt	2

Data för själva drivningen presenteras med hjälp av filtrerade kurvor för momentana indriftshastigheten (n_{pr}) och för borrhbarhetsindexet (I_B). Filtrering innebär, att varje punkts mätvärde viktas mot närmast liggande punkter för att utjämna kurvan så att denna blir visuellt lättare att tolka. I detta fallet har använts ett triangelfilter. I fig 5.1 åskådliggörs detta för n_{pr} -värdena per skift.

Uppsprickningsgrad och bergart har stor betydelse för drivningshastigheten. Nettoindriften har totalt varierat mellan 0,7 och 5,0 m/h.

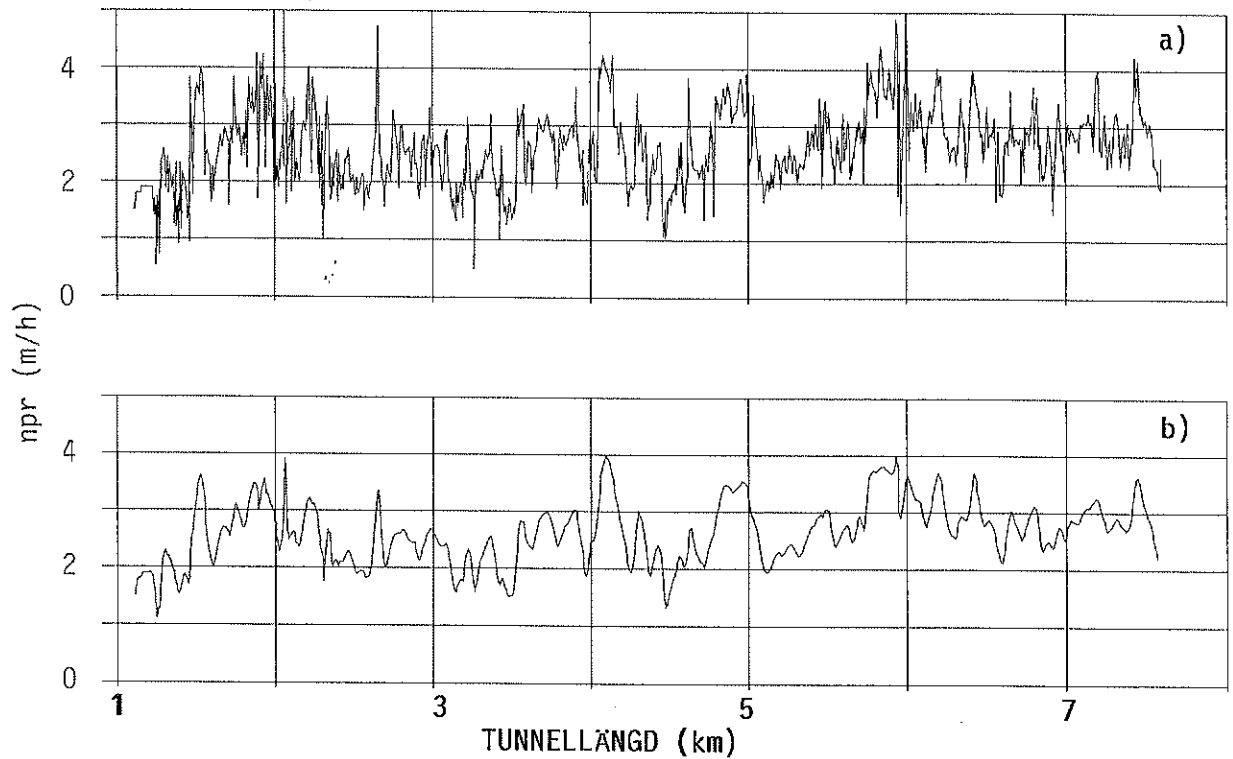


Fig 5.1 Figuren visar drivningshastigheten npr för a) ofiltrerade värden och i b) filtrerade värden.

I_B har beräknats ur ekvationen (3), kap 4.2.1. Tillämpning av metoden innebär att de maskinberoende faktorerna F och RPM tas bort, så att i huvudsak enbart bergets borrarbarhet längs tunneln kvarstår, se fig 5.2.

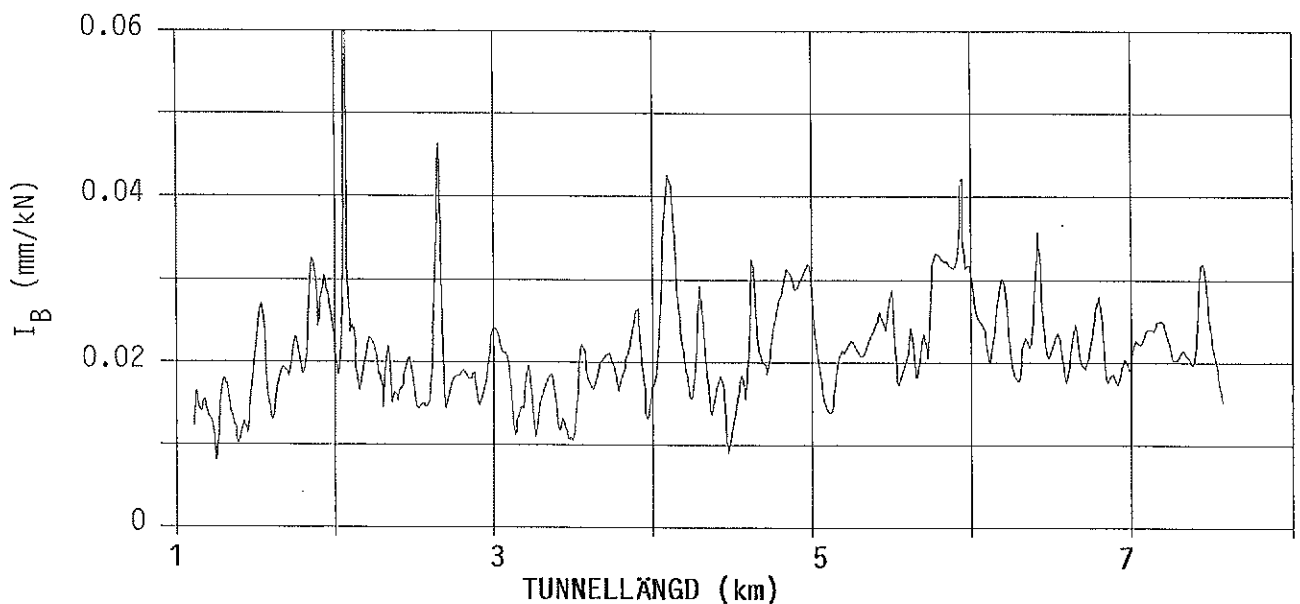


Fig 5.2 Filtrerade värden för borrarbarhetsindex I_B . Faktorn är framräknad ur verkliga drivningsdata.

Faktorn kan med fördel praktiskt användas vid jämförelser mellan bergarters borrarbarhet för olika TBM-projekt.

I tabell 5.2 har borrarbarhetsindexet I_B delats in i fem stycken borrarbarhetsklasser, från mycket låg till mycket hög.

Tabell 5.2 Indelning av borrarbarhetsklasser.

I_B (mm/kN)	Borrarbarhetsklass
< 0,01	mycket låg
0,01 - 0,02	låg
0,02 - 0,03	medel
0,03 - 0,04	hög
> 0,04	mycket hög

Tillämpas denna klassindelning på kurvan i fig 5.2, kan följande konstateras:

- borrarbarhetsklassen för bergmassan längs hela tunneln är låg.
- första delen av tunneln är något mer svårborrad än andra delen.
- tunneln går inte genom några bredare sprick- eller krosszoner.
- sprickzoner uppträder vid 2070, 2650, 4100 och 5940 m.

5.2 Stålrulleförbrukning

När en rulle (eng. "cutter") byts på borrhuvudet, noteras dess nummer, positionen, borrarlängd och orsaken till bytet. På så sätt kan varje rulle och varje position på borrhuvudet följas upp.

Totalt har 781 stycken stålrullar bytts under de 6485 m som fullborrats. Räknar man med att ca 50% av rullarna på maskinen är slitna vid tunnelns slut, ger detta totalt 795 byten för en borrarad volym av 62385 m³. Detta motsvarar 79 fm³ per byte. Prognosen för konsumtion av stålrullar var 70 fm³ per byte. I fig 5.3 visas antalet bytta rullar för varje position på borrhuvudet.

Den genomsnittliga rulldistansen för alla stålrullar i position 5-27 var 630 km. Generellt kan sägas att den genomsnittliga rulldistansen i ren granit är ca 550-575 km. I gnejs, som har något lägre kvartshalt, är den ca 650 km. Position 1-4 är undantagna eftersom dessa delvis "dras" runt i stället för att ha en naturlig rullning.

Orsaken, till att en rulle byts ut kan vara att:

- disken, som består av en speciallegering av stål, har slitits ned till en viss på förhand bestämd längd
- rullen har blockerats, lagren i stålrullen har skurit
- rullen har blivit otät och läcker olja
- övriga orsaker, tex disken sitter lös på rullen, materialfel

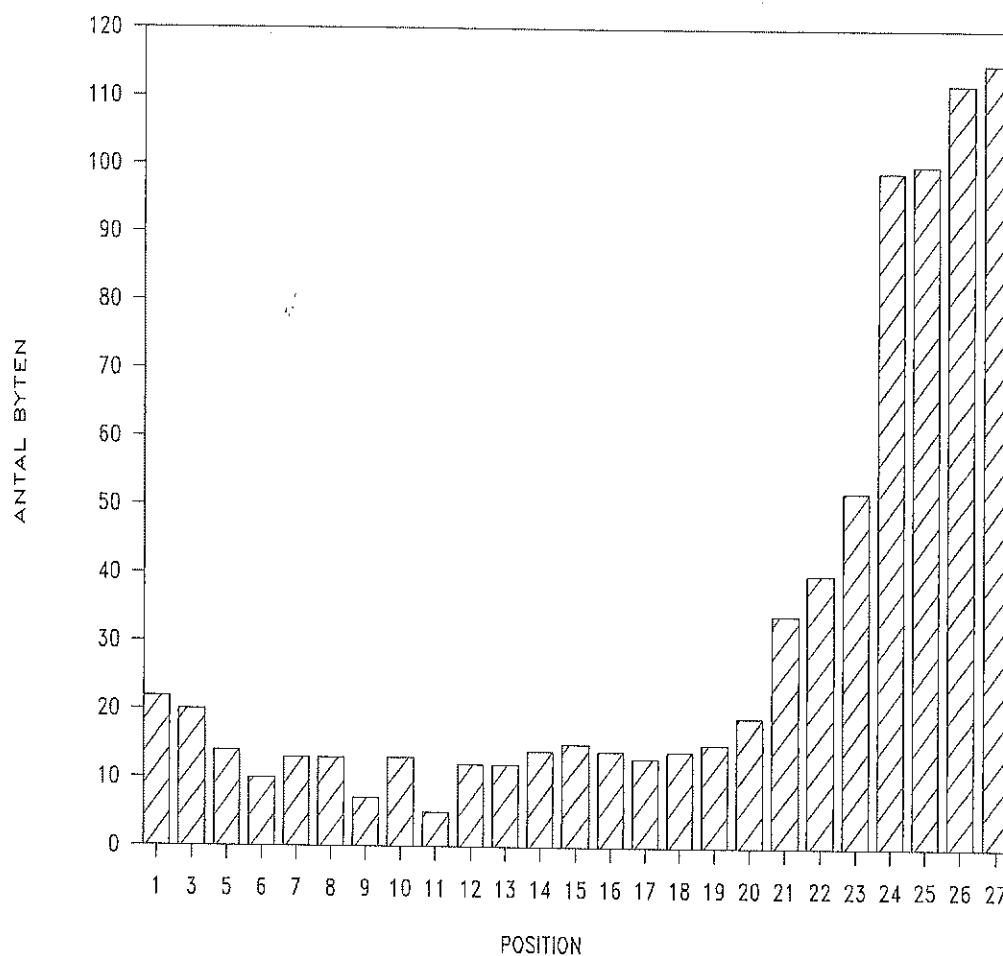


Fig 5.3 Totala antalet byten av stålrullar för varje position på borrhuvudet.

Av figuren framgår att de fyra yttersta diskarna svarar för mer än 50% av den totala rullförbrukningen.

I fig 5.4 visas den procentuella fördelningen av orsaken till bytet av stålrullar i Saltsjötunneln.

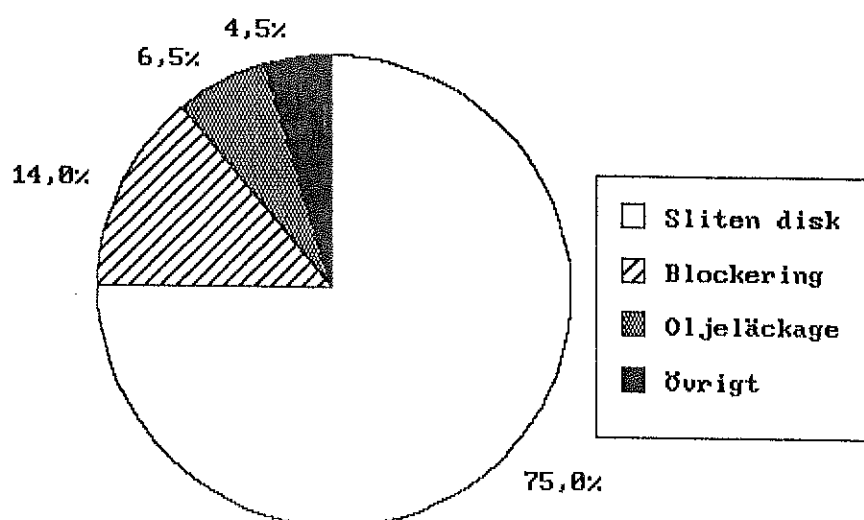


Fig 5.4 Procentuella fördelning av orsaker till rullbyten.

På grund av bergets snabbt skiftande karaktär är det svårt att göra en uppdelning av rullförbrukningen per bergart. Som en allmän iakttagelse kan konstateras att graniten förbrukar ca 10 till 20% fler rullar än gnejsen.

Bergmassans inverkan på förbrukningen av stålrullar längs tunneln, kan ses i fig 5.5. Här redovisas medelvärden för rullförbrukningen i fm^3 per enskilt rullbyte och tunnellängd. Medelvärdet har tagits fram utifrån antalet fm^3 berg som serier av 27 rullar, vilket är totala antalet rullar på borrhuvudet, har avverkat. Av figuren framgår att:

- volymen utbrytet berg per rulle varierar kraftigt och uppvisar en stor spridning, mellan ca 40 och 130 fm^3 , längs tunnelsträckan.
- en zon med större slitage uppträder mellan 2800 m och 4400 m. Orsaken till denna kan, enligt tunnelkarteringen, vara att zonen innehåller en större procentuell andel granit.
- en zon med lägre slitage uppträder mellan 4800 m och 6300 m.

Avgörande för verktygsförbrukningen är även bergets sprickighet, då denna styr nettoborrsjunkningen.

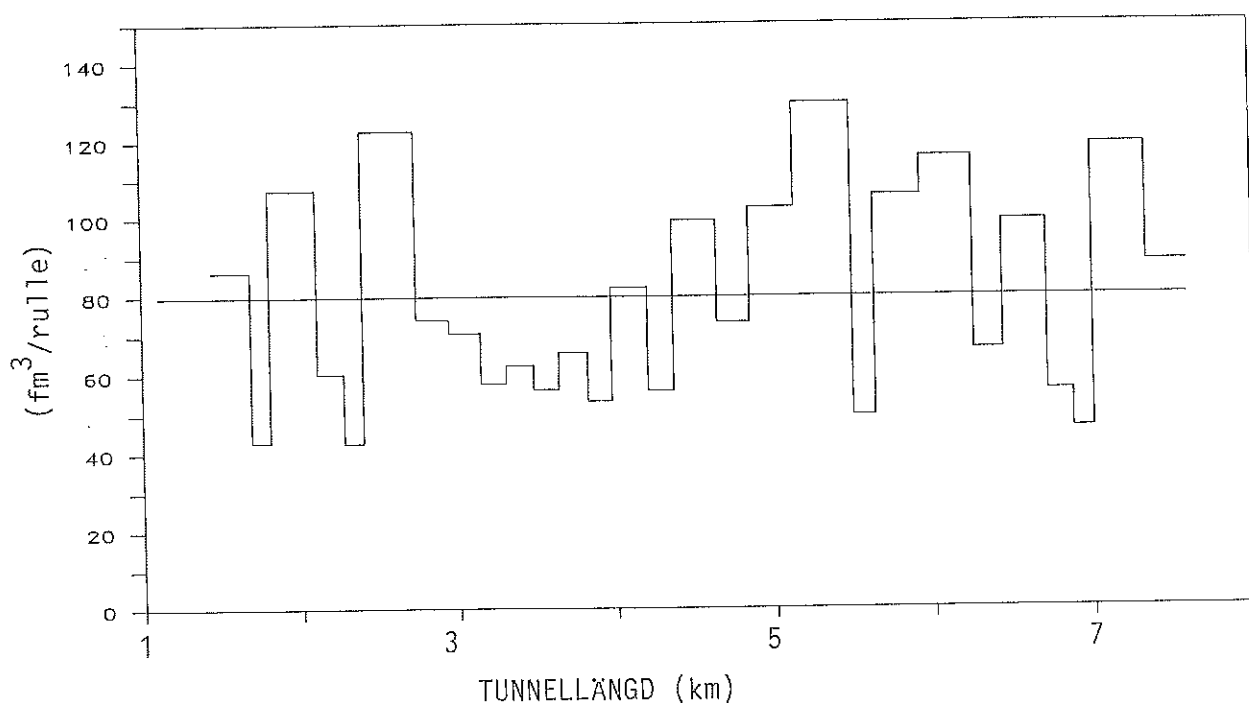


Fig 5.5 Volymen utbrytet berg per stålrulle och tunnellängd.

5.3 Maskin och bakrigg

Tidigare, under avsnitt 5.1, har visats en sammanställning för drivningen totalt. Här kommer att redovisas en uppdelning av de fel på maskin och bakrigg som påverkat drivningen. En jämförelse med andra TBM projekt kommer även att göras.

Maskinen hade under de första km vissa styrningsproblem. Den främsta orsaken till detta var att fyra tandemcylindrar (två på var sida), som skulle reglera maskinkroppens läge i främre grippersystemet, inte arbetade synkront. Detta medförde att maskinkroppen inte höll sig i centrum. Detta var framförallt ett hydraulproblem, som sedan åtgärdades. Problemet med cylindrarna gjorde att vissa mekaniska komponenter utsattes för onormala belastningar, vilket medförde att dessa inte höll. Vissa förstärkningar vidtogs också här. Under senare halvan av tunneln var dessa styrningsproblem åtgärdade.

Under drivningen fördes kontinuerligt skiftrapporter. I dessa bokfördes åtta TBM beroende faktorer, en ospecificerad rad för baksystemet, en för sonderingsborrning och injektering samt en rad för övriga tidsstopp. Utifrån denna sammanställning så har 7% av tiden utnyttjats för underhåll av TBM, reparation av elektriska fel 4%, reparation av hydrauliska fel 4%, reparation av mekaniska fel 13% och reparation och underhåll av bakrigg 15%. Observera att procenttalen är osäkra, då under ett stopp flera olika typer av arbetsinsatser kan utföras samtidigt. De redovisade procenttalen baseras på vad som uppgivits i skiftrapporterna. Av uppföljningen kan dock följande konstateras totalt att:

- mekaniska fel har varit den klart dominerande faktorn, nästan dubbelt så stor som de övriga två tillsammans.
- tiden för underhåll är ca en fjärdedel av den tid som använts för reparation av maskinen.
- tiden för reparation och underhåll av bakriggen är förhållandevis stor.

Motsvarande värden för det senaste året visar dock en klar förbättring av maskinens tillgänglighet. Tiden för reparation av mekaniska fel har halverats och tiden för reparation och underhåll minskats från 28% till 23%.

I tabell 5.3 jämförs den procentuella fördelningen av arbetstiden, för några arbetsmoment, för Saltsjö tunneln med fyra andra TBM-projekt. Tunneldiametern är den samma, utom för Kymmen som borrades med en diameter av 4,5 m. Bergmassans hårdhet är likartade för de tre första projekten, i Renoxvatten var bergmassan lösare men stod under höga bergspänningar och slutligen Wölla där berget var mycket lösare Drake, Björkman & Helfrich (1987) och Sundin & Lindqvist (1983).

Man bör inte dra alltför långtgående slutsatser utifrån denna jämförelse, då uppföljning och redovisning av data kan skilja mellan projekten.

Tabell 5.3 Jämförelse mellan fem TBM- projekt vad gäller utnyttjandet av arbetstiden.

	Saltsjön (%)	Kymmen (%)	Ulla-Förre (%)	Renoxv (%)	Wölla (%)
Borrning + omtag	35	46	39	40	57
Rullbyte + insp.	10	16	15	8	9
Rep. + underh. TBM	28	18	22	12	10
Rep.+ underh. Bakrigg	15	5	2	4	7
Övrigt	12	15	22	36	17

Av tabellen framgår dock att Saltsjötunneln uppvisar de klart högsta värdena för reparation och underhåll. Då främst TBM var en helt ny oprövad konstruktion, kan en stor del av reparationstiden hänföras till utvecklingsarbeten. Detta framgår även av att mindre tid lagts ned på reparationer under det senaste året.

5.4 Tunnelkartering

Huvudansvaret för den ingenjörsgelogiska karteringen av Saltsjötunneln har Hahn, Consweide, haft. Hahns detaljrika kartering kommer här att redovisas mer generell vad gäller klassindelningen av bergarter och bergmassans frekvens av svaghetsplan. Klassindelningen används senare vid analysen av drivningsprognosen, som utarbetat vid LuTH.

Bergmassan består i huvudsak av två bergarter vilka är gnejs och granit. Dessa har tilldelats var sin enhet, se tabell 5.4. I fig 5.6 visas fördelningen av bergklasserna längs tunnelsträckan.

Tabell 5.4 Fördelning bergklasser.

Enhet	Bergklass	Andel (%)
1	Gnejs	60
2	Granit	40

Enaxlig tryckhållfasthet är i snitt för granit ca 200 MPa och för gnejs ca 170 MPa.

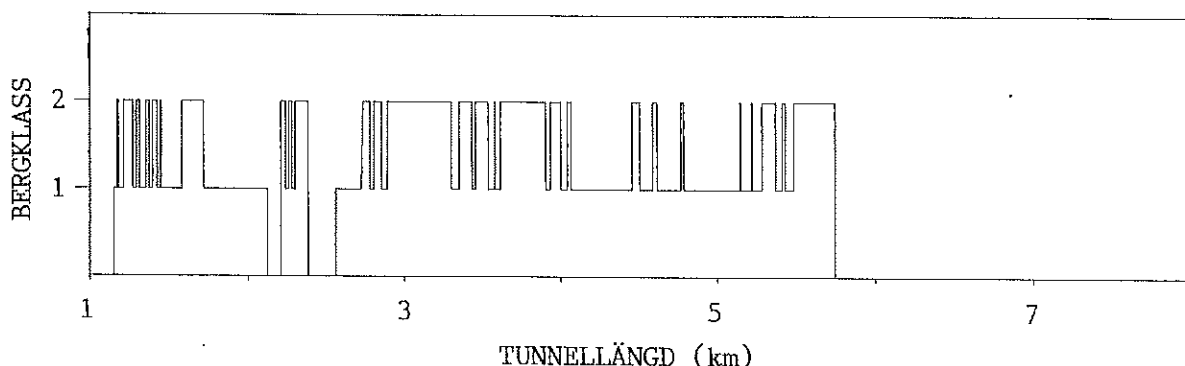


Fig 5.6 Klassindelning av bergarter längs tunnelsträckan.

Av figuren framgår att gnejs och granit uppträder oregelbundet längs hela tunnelsträckan. Gnejszoner dominerar fram till 2900 m och mellan 4600m och 5500m. Granit förekommer i större procentuell andel mellan 3000 m och 4600 m.

Avstånden mellan svaghetsplanen har sammanställts i 10-meters intervall. I fig 5.7 visas karterade värden. Även här har använts ett filter för att bättre visa frekvensen av svaghetsplan. Av figuren framgår att berget är relativt ouppsprucket. Smalare zoner uppträder dock sporadiskt längs tunnelsträckan.

Observera att när värdena i figuren visar 60 cm, innebär detta att avstånden mellan svaghetsplanen kan vara större. Detta på grund av att 60 cm karterades som det största avståndet mellan planerna.

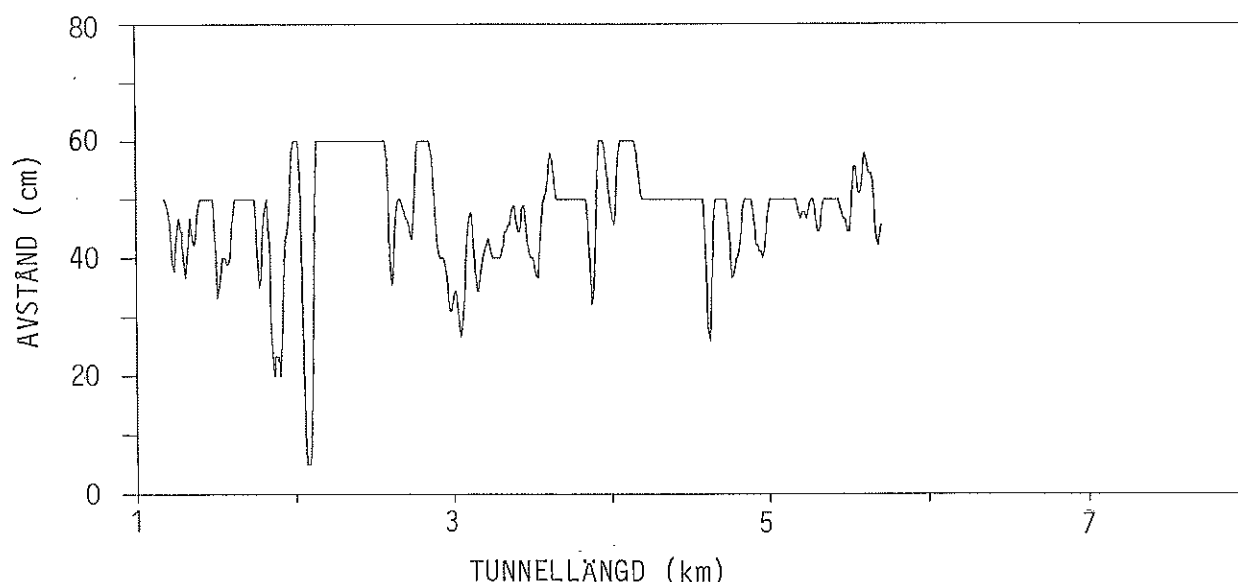


Fig 5.7 Avstånd mellan svaghetsplan, filtrerade värden.

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

6 JÄMFÖRELSE PROGNOSE OCH DRIVNINGSDATA

6.1 SIAB prognos - Drivningsdata

6.1.1 Nettoindrift

SIAB's prognos gav ett totalt medelvärde för nettoindriften a' 2,6 m/h och utnyttjandegraden a' 38% ,enbart borrar. Dessa värden är högre än de uppnådda resultaten som blev 2,52 m/h och 27%. Detta ger en ungefärlig avvikelse av 6 och 40%.

Prognosen visade således en rimligt god överensstämmelse för genomsnittlig indrift men en sämre överensstämmelse för totalutnyttjandet.

För nettoindriften beror avvikelsen på att det borrades med en lägre RPM (12,3) än förutsatt (13,0). Det lägre varvtalet motsvarar en lägre indrift a' 6%, dvs balanserande hela prognosdifferensen för totala medelvärdet.

Det genomsnittligt använda nettomatningskraften på 176 kN per disk ligger mycket nära prognosens 200 kN brutto. Differensen motsvarar 12% i friktionsförluster. Det är vanligt att räkna med 10%, eventuellt upp mot 15% i friktionsförluster, beroende på maskintyp, hur maskinen körs etc. Uppmätt friktionsförlust är ca 10%.

En stor andel av sträckan har borrats med högre matningskraft, dvs upp mot ca 220 kN, undantagsvis 225 kN brutto genomsnittlig matningskraft per stålrolle.

För genomsnittsvärdena föreligger det således en mycket god överensstämmelse mellan prognos och uppnådda resultat. Det antagna variationsområdet från under 2 m/h till över 4 m/h stämmer också väl för de mest typiska värdena men är lågt för extremvärdena.

För totalutnyttjandet beror den dåliga överensstämmelsen mellan prognosens ca 38% och uppnådda resultatets ca 28% på en sämre maskintillgänglighet än förutsatt. Problem med TBM gav väsentligt mer tidsförluster, speciellt under 1987 men även för hela drivningstiden. Injekteringsarbeten försenade drivningen mindre än antaget och tiden för rullbyten på ca 10% är också något lägre än prognosens 15%. Detta beror också på att totala arbetsinsatsen har ökats på grund av maskinproblem.

Prognosens 45% i utnyttjandegrad, för enbart borrar under vanliga arbetsveckor utan injektering, kan sägas ha varit en rimlig konservativ prognos för den aktuella situationen. Reparation och liknande för TBM brukar normalt utgöra mellan ca 10 och 15%. För Saltsjö tunneln är detta värde fördubblat.

Längden zoner med injektering motsvarar prognosvärdena. Den effektiva uppläggnings- och sonderborrning och injektering har reducerat den nödvändiga tilläggstiden, speciellt minskat tiderna för omställning mellan arbetsoperationerna.

6.1.2 Prognosmodell

Prognosmodellens (NTH 1983) tillämpbarhet kan inte bedömmas i detalj eftersom det inte finns direkt jämförbara data från tunneln. En grov värdering utgående från typiska indriftsnivåer kan dock ge en viss indikation.

Nettoindriften har varierat från 0,8 m/h i de 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 nettoindrifter på mellan ca 1.8 och 2.3 m/h varit vanlig.

Som en illustration har i tabell 6.1 sammanställts nettoindrifter, beräknade utifrån prognosmodellen med antagna representativa DRI-värden, observation av uppsprickning samt typisk använd nivå för matningskraft för vanliga situationer. Detta gäller hård, massiv granit, vanligen lite uppsprucken gnejs och sprickzoner i "rödberg". Beräkningarna i tabellen baseras på ett varvtal (RPM) av 12,3 v/min.

Tabell 6.1

DRI	Matnings- kraft (kN/disk)	Basintäng- ning (mm/varv)	Sprick- klass	Sprick- korr.	Nettoin- drift (m/h)
35	225	4,3	0	0,36	1,1
42	220	4,9	0-I	0,70	2,5
50	165	3,5	II-III	2,50	6,5

En sådan jämförelse kan enbart bli rent orienterande, men som ett generellt intryck verkar det som om prognosmodellen ger något högre värden för nettoindrift än det som har uppnåtts i de typiska situationerna, i storleksordningen mellan ca 10 och 15%.

Den goda överensstämmelsen mellan prognos och verklig genomsnittlig nettoindrift, kan bero på att mera svårborrade bergarter som graniter, har kompenserats av en större andel mer lättborrade gnejser.

6.1.3 Kommentar

SIABS's drivningsprognos baserades på en bedömning av troligt variationsområde för bergmassans borrarbarhetsegenskaper. Prognosen för genomsnittlig nettoindrift baserades på ett indirekt antaget borrsjunksindex DRI och uppsprickningsgrad. Prognosen har stämt bra och visar liten avvikelse totalt sett.

Den största avvikelsen beror på den låga tillgängligheten av maskinen, medan både rullbyte och tilläggstid för injektering har utgjort en mindre andel än förutsatt. Tid för reparation och underhåll av TBM har varit dubbelt så stora som vad gäller normalt.

Som väntat uppstod inga större stabilitetsproblem i svaghetszonerna. Detta beror i huvudsak på att zonerna är sprickzoner med låg lerhalt. Stabiliteten är vidare gynsam på grund av det cirkulära, lilla tvärsnittet, samt att förinjekteringen för tätning av ev vatteninläckning 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 vid jämförelser med uppnådda värden. För Saltsjö-tunneln verkar detta ha blivit kompenserat av att bergmassan, speciellt för sista delen av tunneln, är något mer lättborrad än förutsatt, väsentligen beroende på en större andel gnejs.

6.2 LuTH prognos - Drivningsdata

Ingående faktorer i LuTH's drivningsprognos kommer här att jämföras med motsvarande drivningsdata och med resultaten från den geologiska karteringen i tunneln. Syftet är att stegvis analysera varje enskild faktor, så att eventuella avvikelser kan analyseras och möjliggöra en förbättring av prognosmodellen.

Jämförelser mellan prognos och motsvarande data från drivningen presenteras i 8 stycken tabeller. Tabellerna redovisar totala värden och medelvärden för tunneln. Data för varje zon kan ses i bilagorna 2-1, 2-2 och 2-3.

I tabellerna 6.2 till 6.5 visas jämförelser mellan total drivningstid, drivningshastighet och utnyttjandegrad, se kap 4.2.1 ekvationerna (4) till (6). Både absoluta värden och kvoter mellan prognos och drivning redovisas. Kvoterna är beräknade så att prognosdata multiplicerad med kvoten, ger värdet för motsvarande drivningsdata. Ett exempel. Om prognosens last per rulle F_p multipliceras med kvoten för lasten $Q(F)$ fås den från drivningen beräknade lasten F_D .

I tabellerna 6.2 och 6.3 jämförs prognosens och verkliga drivningens totala antal skift (sh_t) och tiden som utnyttjats för alla zoner (sh_{az}). En faktor för "oförutsedda" problem (k_T) ingår.

Tabell 6.2 Jämförelse prognos och drivning.

	Prognos (skift)	Drivning (skift) (tom v4)
Projekttid 1987 - 1989		
Totala antalet skift sh_t	795	997
Hela skift utan fullborrning inklusive oförutsedda problem k_T	- 73	- 260
Antal skift för alla zoner sh_{az}	722	737

Totala antalet skift som användes i projektet (sh_t) för drivning var 997, vilket kan jämföras med prognosens 795 skift. Prognosen var således 25% för optimistisk. Motsvarande jämförelser för oförutsedda problem (k_T) och antalet skift för alla zoner (sh_{az}) visar att prognosen var 256% respektive 2% för optimistisk.

Tabell 6.3 Kvoten mellan drivning och prognos

$Q(sh_t)$	$Q(sh_{az})$	$Q(k_T)$
1,25	1,02	3,56

I fig 6.1 visas en jämförelse mellan den verkliga drivningens totala antal arbetade skift och prognosens beräknade värden för totala antalet skift (sh_t) och antalet skift för alla zoner (sh_{az}).

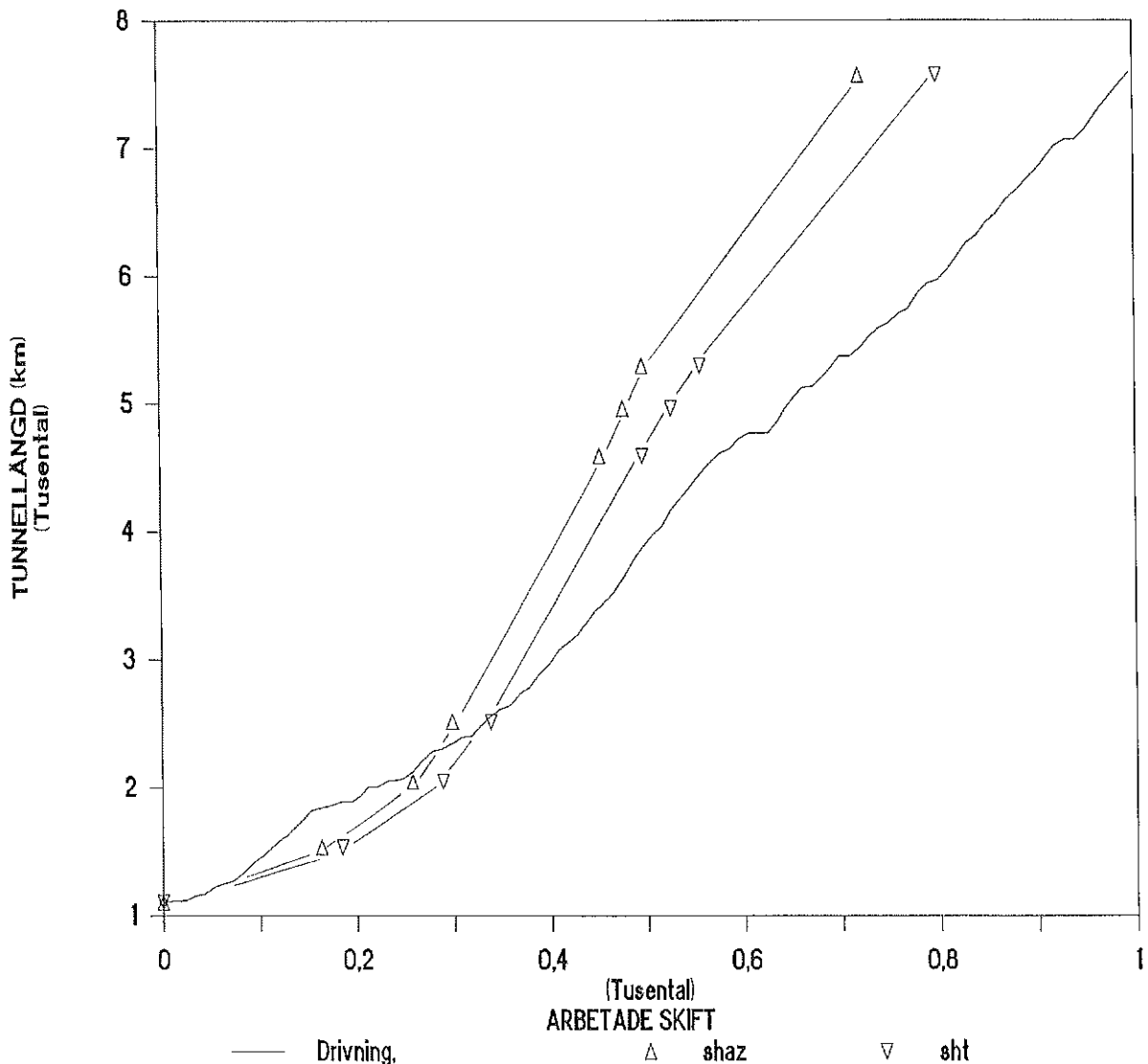


Fig 6.1 Jämförelse mellan verklig drivningstid och motsvarande data för prognosens antal skift för alla zoner (sh_{az}) och totala antalet skift (sh_t).

I tabell 6.4 och 6.5 jämförs prognosens faktorer för antalet skift för alla zoner (sh_{az}), hastigheten (npr) och utnyttjandegraden (U) med motsvarande från drivningen framräknade faktorer. Se ekvation (4).

Tabell 6.4 Jämförelse prognos och drivning.

	Antal skift		Nettoindrifts- hastighet		Utnyttjandegrad	
	sh_t (skift) progn	drivn	npr (m/h) progn	drivn	U (%) progn	drivn
Tot	722	737				
Mv			3,68	2,52	25,7	36,8

Tabell 6.5 Kvoten mellan drivning och prognos

Zon	$Q(sh_{az})$	$1/Q(npr)$	$1/Q(U)$
Mv	1,02	1,46	0,70

Prognosen för npr är 46% för hög, medan utnyttjandegraden är 43% för låg.

I bilaga 2-1 redovisas motsvarande data för varje enskild zon.

I tabellerna 6.6 till 6.9 jämförs drivningshastighet, indexet för borrhårhet, last per rulle, faktorn för svaghetsplan och indexet för inträngningstestet. Se ekvationerna (1) till (3) kap 4.2.1. Även här redovisas kvoter mellan motsvarande värden från prognos och drivning. Bedömningen av svaghetsplanens inverkan baseras på uppföljningar utförda och redovisade av Norges Tekniska Högskola i Trondheim (Blindheim 1981).

I tabell 6.6 och 6.7 jämförs prognosens faktorer för hastighet (npr), borrhårhetsindex (I_B) och last per rulle (F) med motsvarande från drivningen framräknade faktorer, se ekvation (4).

Tabell 6.6 Jämförelse prognos och drivning.

	Nettoindrifts- hastighet		Borrhårhetsindex		Last per rulle	
	npr (m/h) progn	drivn	I_B (mm/MN) progn	drivn	F (kN) progn	drivn
Mv	3,68	2,52	26,4	19,2	189,2	177,9

Tabell 6.7 Kvoten mellan drivning och prognos

Zon	$Q(npr)$	$Q(I_B)$	$Q(F)$
Mv	0,68	0,73	0,94

Det mycket höga värdet i prognosen för borrarshastigheten orsakas av att beräknade borrarbarhetsvärdet I_B är 38% för högt samt att matningskraften per rulle 6% för hög.

Motsvarande jämförelser för varje enskild zon, kan ses i bilaga 2-2.

I tabell 6.8 och 6.9 jämförs prognosens faktorer för borrarbarhetsindex (I_B), faktorn för svaghetsplanen (k_J) och indexet för inträngningstestet (P_{BI}) med från drivningen framräknade faktorer, se ekvation (2), kap 4.2

Tabell 6.8 Jämförelse prognos och drivning.

	Borrarbarhetsindex		Svaghetsplans-faktor		Inträngningstest-index	
	I_B (mm/MN)		k_J		P_{BI} (mm/MN)	
	progn	drivn	progn	drivn	progn	drivn
Mv	26,4	19,2	1,32	1,00	20,0	19,2

Tabell 6.9 Kvoten mellan drivning och prognos

	$Q(I_B)$	$Q(k_J)$	$Q(P_{BI})$
Mv	0,73	0,76	0,96

Prognosen för k_J är 32% för hög, samt P_{BI} är 4% för hög.

För varje enskild zon kan resultatet ses i bilaga 2-3.

6.2.1 Kommentar

Orsaken till skillnaden mellan prognosens och drivningens antal skift är, att verkliga tidsåtgången är för hög för oförutsedda problem (k_T). Denna siffra 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 av borrarningen. Utfallet av prognosen, vid jämförelse med drivningens antalet skift för alla zoner, måste bedömas som mycket god då avvikelsen blev under 5%.

Om man tittar närmare på de i prognosen ingående faktorerna och motsvarande uppnådda drivningsdata, kan följande konstateras:

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

Observera att prognosens värden jämförs med de vid borrningen utnyttjade antalet arbetade skift för alla zoner, vilket innebär att alla hela skift som ej medfört borrning (270 st) inte medtagits. Den för borrningen beräknade utnyttjandegraden (37%) är således i själva verket för hög.

Under denna rubrik kommer dels borrhbarhetstester på prover tagna i tunneln, dels indriftstester med TBM att redovisas.

7.1 Borrhbarhetstest

7.1.1 Norges Tekniska Högskola (NTH)

För att få en uppfattning om bergets borrhbarhet blev under monteringen av TBM ett prov taget från den utsprängda starttunneln. Detta prov bedömdes vara en bandad medelkornig gnejs med borrh-sjunkningsindexet $DRI = 34$, dvs låg borrhbarhet.

7.1.2 Tekniska Högskolan i Luleå (LuTH)

I tunneln togs ett flertal prover på olika platser längs tunnelsträckan. I denna rapport kommer testresultaten för åtta prover att redovisas, se tabell 7.1. Syftet med provtagningen var att utvärdera inträngningstestet mot drivningsdata och tunnelkartering. Kvoten mellan från drivningen framräknade P_{BI} -värden och motsvarande värden från labtesterna har betecknats som faktorn k_B . Data för svaghetsplanens inverkan på borrhningshastigheten har tagits från NTH's prognosmodell -79.

Tabell 7.1 Jämförelse drivningsdata och inträngningstest.

Prov (nr)	Prov- plats (m)	Berg- klass	npr driv (m/h)	F driv (kN)	I_B driv ($\dot{m}/kN$)	k_J	P_{BI} driv lab ($\dot{m}/kN$)	k_B
1	1210	Gnejs	1,90	196	13,1	1,0	13,1	0,60
2	1811	Granit	3,23	183	23,9	1,0	23,9	1,47
3	1862	Granit	3,64	173	28,2	1,6	17,8	0,80
4	2165	Metavul- kanit	2,85	189	20,4	1,0	20,4	0,80
5	2520	Gnejs	1,80	174	14,0	1,0	14,0	0,54
6	2667	Metavul- kanit	2,03	173	15,9	1,0	15,9	0,78
7	2835	"Rödberg"	2,54	188	18,3	1,0	18,3	0,74
8	3315	"Rödberg"	2,56	182	19,1	1,0	19,1	0,77

Totala medelvärde för faktorn k_B , utom för prov nr 2, blir 0,72 p 0,10.

Tidigare tester på hårda gnejsgraniter från Kymmentunneln indikerade att faktorn k_B bör ha värdet 1,02 p 0,08. Tänkbara orsaker till skillnaden, vid jämförelsen med Saltsjötunneln, kan vara:

- få testade prover, vilket kan medföra att dessa tex inte är representativa
- det är svårt att se svaghetsplan i en fullborrad tunnel, vilket kan medföra en undervärdering vid klassindelningen och som i sin tur leder till att k_B -faktorn blir för låg
- två olika personer utförde karteringarna.
- olika bergarter ger olika faktorer.

7.2 Indriftstest med TBM

Under drivningen har indriftstester med maskinen utförts, för att bedöma drivningshastigheten vid fem mätstationer. Mätstationernas position och geologiska data presenteras i tabell 7.2. För varje station har mätningar vid fyra olika matningskrafter utförts. Matningskraften har varje gång hållits konstant under 5 minuter. Därefter har indriftens längd registrerats.

Tabell 7.2 Data om mätstationerna vid tester i full skala.

Sta- tion	Längd (m)	Bergart	Sprickig- het	Anmärkningar
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 gnejs-granit	Stick I Sprickor I	gnejsig 20-30° mot tunnel, vattendropp från sprickor
5	7265	Mörk biotit-gnejs 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.

Vid station 3 och 4 har två "face cutters" tagits ut, så att för dessa stationer är totala antalet rullar på borrhuvudet 25. Detta ökar den nominella matningskraften per stålrulle.

Resultatet av indriftstesterna visas i fig 7.1. I figuren har indriften räknats om till ett inträngningsvärde (mm/varv). Notera att vid 20 ton/rulle (nominellt) varierar indriften med 500% mellan lägsta värdet vid station 2 och högsta värdet vid station 3 ! från 1 till 5 mm/varv. Om mätningar hade utförts med 20 ton/rulle vid station 5, så tycks skillnaden mellan lägsta och högsta värde bli hela 600% !. Observera att uppmätta tryckhållfastheten på prover tagna i Saltsjötunneln bara varierar med mellan 50-80 MPa. Tryckhållfastheten verkar således vara ett dåligt test på en bergmassas borrarbarhet. Förekomsten av svaghetsplan har en mycket större betydelse.

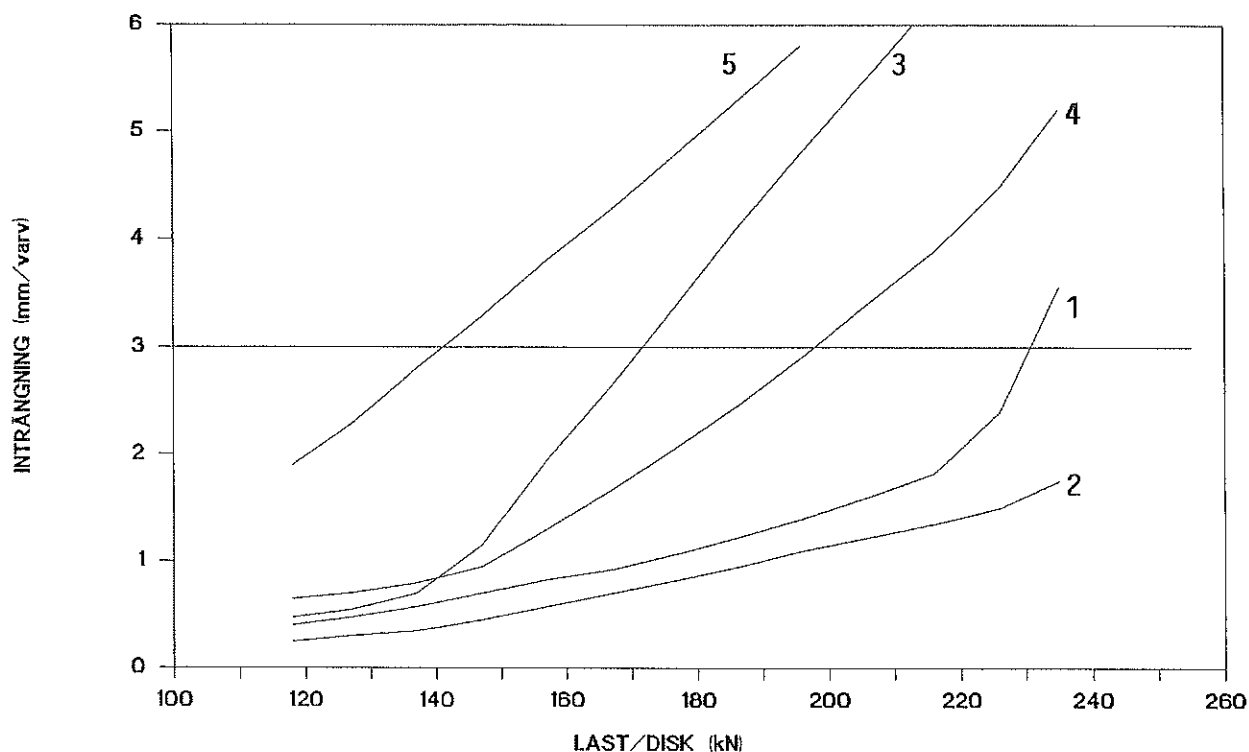


Fig 7.1 Indriftstester i Saltsjötunneln.

Dessa indriftstester visar på ett överskådligt sett att sprickighet och foliation/förgnejsningsgrad har mycket stor betydelse för nettoindriften. Stationerna 3 och 5 har en klart gnejsig karaktär, vilket klart avspeglar sig i kurvorna. Station 2 visar att kompakta, intrusivbergarter utan sprickor är mycket tungborrade.

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

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

Vid en analys av drivningen kan konstateras att det med relativt enkla prognoser är möjligt att få en rimligt god översikt över borrhetsförhållandena. Detta när de geologiska förhållandena är bra kartlagda, möjliga variationer är nogt värderade och speciellt uppsprickningsgraden kan studeras i tidigare utsprängda bergrum och tunnlar.

Behovet av provtagning och testning kan emellertid lätt bli undervärderad. Borrhetssegenskaperna för vanlig gnejs och granit i Stockholm, med hänsyn till fullborrning, varierar mer än vad man kanske får intryck av vid konventionell borrning. Uppsprickningsgraden har ett väsentligt inflytande, vilket gäller för alla hårda bergarter, enär dagens TBM har en matningskraft, som är väl låg (kritisk) för bergarternas fragmentering. Nya värderingar av uppsprickningsgradens betydelse utifrån bergblottningar, borkärnor och existerande tunnlar är därför viktig.

Då maskinen försågs med en borrhutrustning för sonderborrning och injektering inom TBM's "normala" aria, skapades utrymmesproblem för arbetet runt maskinen. Denna utformning bör göras på maskiner med större diameter än 3,5 m.

Ett entydigt ställningstagande "fullborrning är bättre än sprängning eller tvärtom" kan inte göras. Det måste bedömas från projekt till projekt. Med erfarenheter från drivningen av Saltsjötunneln kan dock följande konstateras:

- att arbetsmiljön vid fullborrning är bättre och medför en minskad risk för skador. Luften upplevs vara bättre då inga spräng- och diselgaser förekommer. Nivån på farligt respirabelt damm kan dock i vissa fall bli för högt, vid borrning i kvartsrikt berg.
- den yttre miljön påverkas mindre då inga vibrationsskador kan uppstå på tex husgrunder. Lägre bullernivåer alstras vilket medför att tunneldrivningen kan bedrivas i stort sett utan att störa omgivningen.
- behovet av förstärkningar och tätningsarbeten minskar radikalt vid fullborrning, tex har ingen bult satts i den fullborrade delen.
- det är möjligt att från tunnelpåslaget borra minst 8 km och klara en bra ventilation vid arbetsfronten. Detta är omöjligt vid sprängning där jämförbara förhållanden med rimliga utvärderingstider är ca 2 km.
- vid enfrontsdrift finns ingen snabbare metod. Med erfarenheter från Saltsjötunneln, beroende på förinjekteringens omfattning, är framdriften 60 till 90 m/vecka i granit. Jämförbara data för borrning-sprängning är 30 till 50 m/vecka.

Nackdelar kontra sprängd tunnel är sämre flexibilitet och det stora beroendet av att varje del i systemet fungerar.

Insatser bör göras för att lösa problemet med det onormalt höga slitaget av de fyra yttersta stålrullarna.

Det är lätt att övervärdera maskintillgängligheten för nya och ej genomprovade TBM-konstruktioner.

För att ett projekt skall vara ur ekonomisk aspekt möjlig att fullborra krävs i dag generellt att tunnelns längd är minst 2 km, om endast ett påslag är möjligt. Om fler angreppspunkter är möjliga krävs en tunnellängd av 3 till 4 km. Vid dessa längder är TBM kostnadsmässigt konkurrentkraftig och oftast billigare vid längre tunnlar.

9

REFERENSER

Björkman M, 1987. Fullborrning av Kymmentunneln. Bergsprängningskommitten BK -87, sid 223-230.

Blindheim O T, 1981. Fullprofilboring av tunneler. Prosjektrapport 1-79. Institutt for Anleggsdrift og Geologisk Institutt, Norges Tekniske Høgskole, Trondheim.

Drake J, 1987. Erfaringer med fullprofilboring innom statkraft. Bergsprängningskommitten, BK -87, sid 193-222.

Johannessen O & Lislerud A & Johannessen S & Bruland A & Movinkel T, 1983. Fullprofilboring av tunneler. Prosjektrapport 1-83. Institutt for Anleggsdrift og Geologisk Institutt, Norges Tekniske Høgskole, Trondheim.

Handewith H, 1972. Suggested tunnel investigation criteria for rock boring machines. The 8th Canadian symposium on rock mechanics, Nov 30 - Dec 1, University of Toronto.

Helfrich H K, 1987. Fullortsborrning av Kymmentunneln. Bergsprängningskommitten, BK -87, sid 231-244.

Ljungberg U & Tollerup L, 1987. Fullborrning under Stockholm City - Projekt Saltsjötunneln. Bergsprängningskommitten, BK -87, sid 251-258.

Rånman K E, 1981. Boreability tests for full-face boring. Literature survey. Luleå University, Sweden, Div of Mining and Rock Excavation. Technical report 1981:69 T.

Sundin N-O & Lindqvist P-A, 1983. Comparision of predicted and encountred TBM performance for the Wöllatunnel. Luleå University, Sweden, Dept of Mining and Underground Construction. TULEA 1983:41.

Sundin N-O, 1988. Fullborrad tunnei i Kymmen, NV Värmland. Prognos uppföljning och analys av drivningsdata samt geofysiska mätningar ovan jord och i tunneln. BeFo 140:1/88.

Tollerup L & Bergman S-E, 1988. Fullborrning under Stockholms City - Projekt Saltsjötunneln. Bergsprängningskommitten, BK -88, sid 89-110.

Tollerup L, 1989. Fullborrning under Stockholms City - Projekt Saltsjötunneln. Bergsprängningskommitten, BK -89.

BILAGOR

Bilaga 1-1

TEKNISK SPECIFIKATION FORO 900S/3,5

Borrhuvud

- diameter	3,5	m
- diameter, max. i hårt berg	3,8	m
- diameter, min.	3,0	m
- installerad effekt	662	kW
- rotationshastighet	12,3	r/min
- vridmoment	485	kNm
- matningskraft, max.	7005	kN
- elmotorer	3 • 220,6	kW

Matningssystem

- slaglängd	1,5	m
-------------------	-----	---

Fastspänningskraft

- främre grippers	1200	kN
- bakre grippers	20500	kN

Hydraulsystem, max, kont. arbetstryck	345	bar
---	-----	-----

Elsystem

- transformatorkapacitet	1200	kVa
- primärspänning	5000	-
	10000	V
- drivmotorspänning	500	V
- drivmotor, frekvens	50	Hz

Kylvattenbehov	160	l/min
Transportbandkapacitet, för en indrift av	6	m/tim
Maskinlängd, min.	6,2	m
Maskinlängd, max.	7,7	m
Maskinvikt, inkl. komponenter på bakrigg	105	ton
Svängradie, min.	60	m
Diameter på stålrullar	15 1/2	" alt
	16 1/4	"
Antal stålrullar	27	

Vid jämförelsen ingår i prognosen de 10% som avsatts för oförutsedda problem. Detta medför ändringar av antal skift per zon och utnyttjandegrad. Antal arbetade skift per zon (sh_z), zonlängd (L), nettoindriftshastigheten (npr), nettoutnyttjandegraden (U), arbetade timmar per skift (h_{sh}) = 9,5 h.

$$sh_z = L/npr \cdot h_{sh} \cdot U$$

Zon	Antal skift		Zon	Nettoindrifts- hastigheten		Utnyttjande- grad	
	sh_z (skift)		L (m)	npr (m/h)		U (%)	
	progn	drivn		progn	drivn	progn	drivn
1.	158	82	403	2,06	1,87	13,0	27,6
2.	100	64	542	2,29	2,88	25,0	30,9
3.	39	64	450	3,46	2,45	35,0	30,2
4.	148	213	2100	4,97	2,25	30,0	46,0
5.	27	33	300	5,78	2,78	20,0	34,4
6.	24	41	400	4,94	2,48	35,0	41,5
7.	226	240	2290	3,56	2,86	30,0	35,1
Tot	722	737	6485				
Mv				3,68	2,52	25,7	36,8

Kvot (drivn/progn)

Zon	Q (sh_z)	1/Q (npr)	1/Q (U)
1.	0,52	1,10	0,47
2.	0,64	0,80	0,81
3.	1,64	1,41	1,16
4.	1,44	2,21	0,65
5.	1,22	2,08	0,58
6.	1,71	1,99	0,84
7.	1,06	1,24	0,85
Mv	1,02	1,46	0,70

Nettoindrifshastigheten (npr), Borrbarhetsindex (I_B) och Last per disk (F).

$$npr = I_B \cdot F \cdot rpm \cdot 60 / 1000 \quad (\text{m/h})$$

$$rpm = 12,3 \quad (\text{varv/min})$$

Zon	Nettoindrifshastighet		Borrbarhetsindex		Last per disk	
	npr (m/h)		I_B (mm/MN)		F (kN)	
	progn	drivn	progn	drivn	progn	drivn
1.	2,06	1,87	15,5	13,7	180	185,4
2.	2,29	2,88	15,5	21,6	200	180,9
3.	3,46	2,45	24,7	19,4	190	171,7
4.	4,97	2,25	37,4	16,9	180	180,4
5.	5,78	2,78	78,3	25,3	100	149,3
6.	4,94	2,48	33,5	20,4	200	164,2
7.	3,56	2,86	24,1	21,5	200	180,5
Mv	3,68	2,52	26,4	19,2	189,2	177,9

Kvot (Drivn/Progn)

Zon	Q (npr)	Q (I_B)	Q (F)
1.	0,91	0,88	1,03
2.	1,26	1,39	0,90
3.	0,71	0,79	0,90
4.	0,45	0,45	1,00
5.	0,48	0,32	1,49
6.	0,50	0,61	0,82
7.	0,80	0,89	0,90
Mv	0,68	0,73	0,94

Borrbarhetsindex (I_B), svaghetsplansfaktor (k_J) och testindex (P_{BI}).

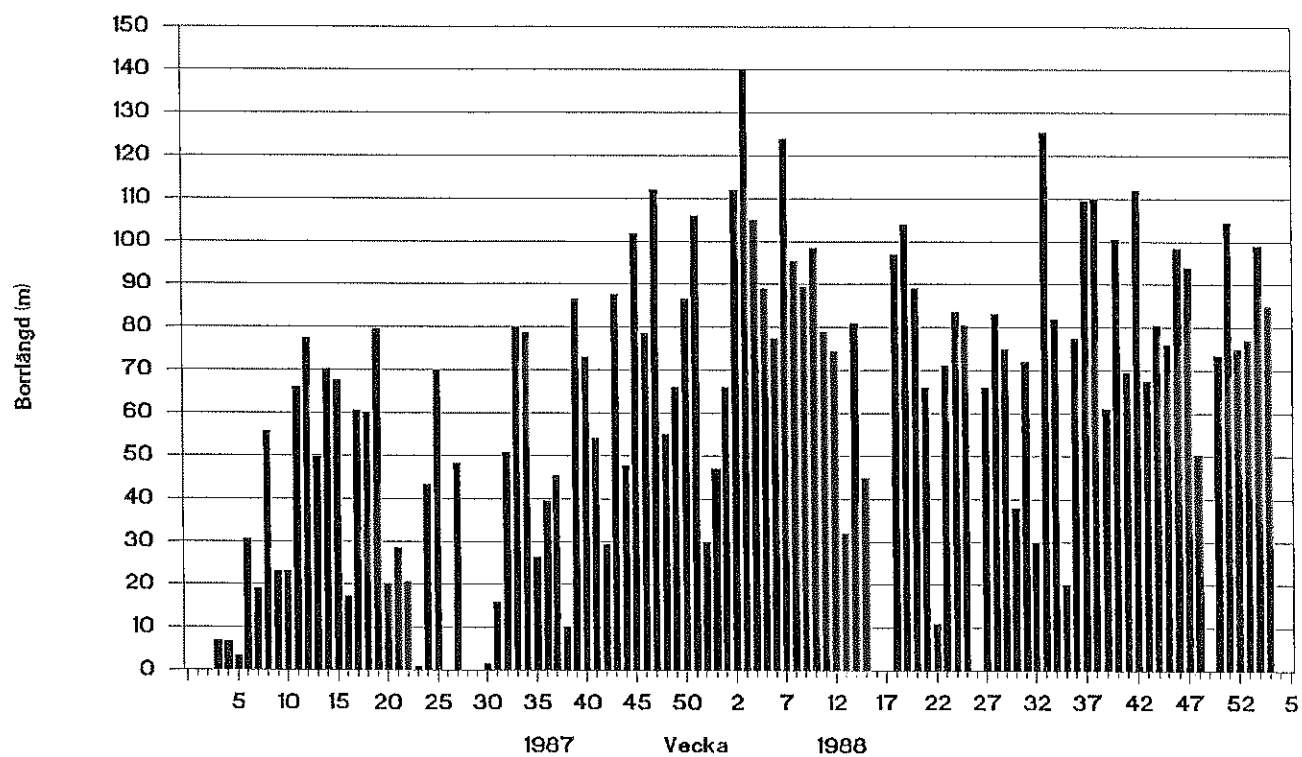
$$I_B = k_J \cdot P_{BI} \quad (\text{mm/MN})$$

Zon	Borrbarhetsindex I_B (mm/MN)		Svaghetsplan k_J		Testindex P_{BI} (mm/MN)	
	progn	drivn	progn	drivn	progn	drivn
1.	15,5	13,7	1,00	1,00	15,5	13,7
2.	15,5	21,6	1,00	1,00	15,5	21,6
3.	24,7	19,4	1,25	1,00	19,8	19,4
4.	37,4	16,9	1,55	1,00	24,1	16,9
5.	78,3	25,3	2,55	1,00	30,7	25,3
6.	33,5	20,4	1,55	1,00	21,6	20,4
7.	24,1	21,5	1,25	1,00	19,3	21,5
Mv	26,4	19,2	1,32	1,00	20,0	19,2

Kvot (Drivn/Progn)

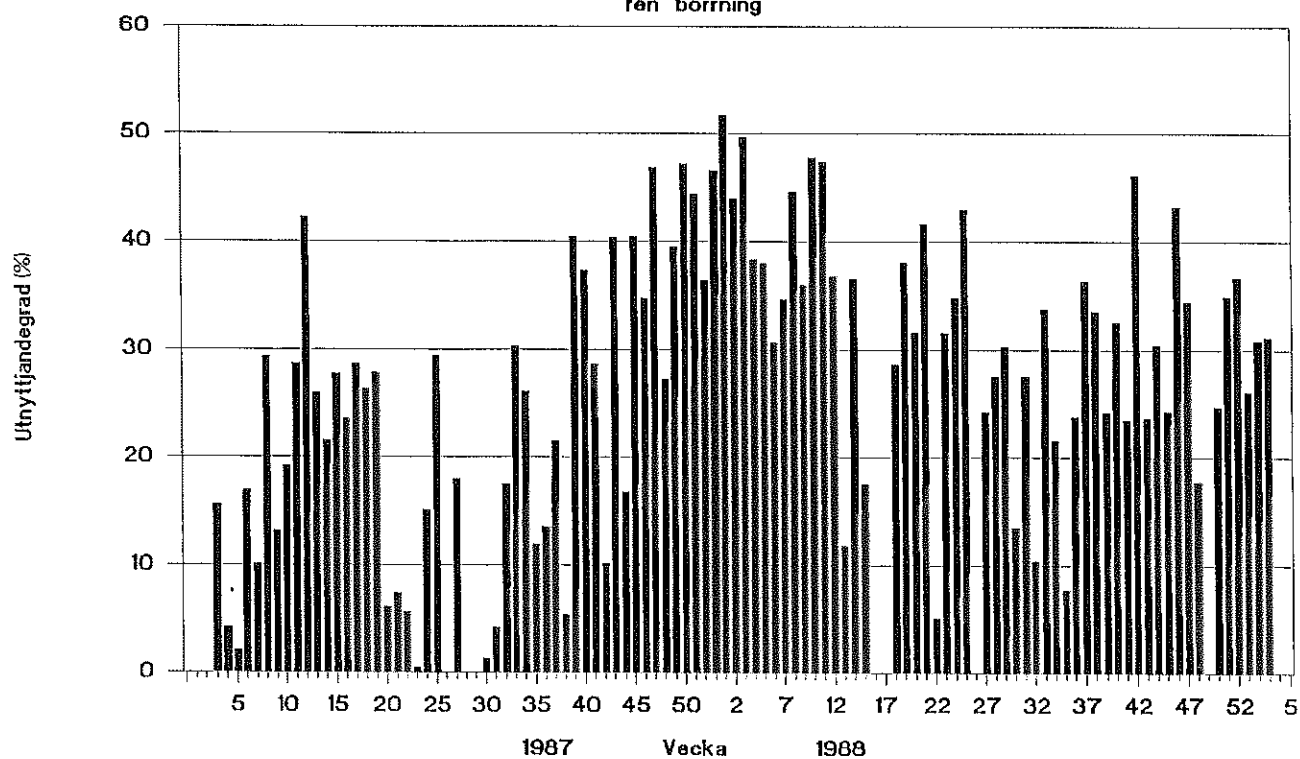
Zon	Q (IB)	Q (kJ)	Q (PBI)
1.	0,88	1,00	0,88
2.	1,39	1,00	1,39
3.	0,79	0,80	0,98
4.	0,45	0,65	0,70
5.	0,32	0,39	0,82
6.	0,61	0,65	0,94
7.	0,89	0,80	1,11
Mv	0,73	0,76	0,96

Borrlängd per vecka

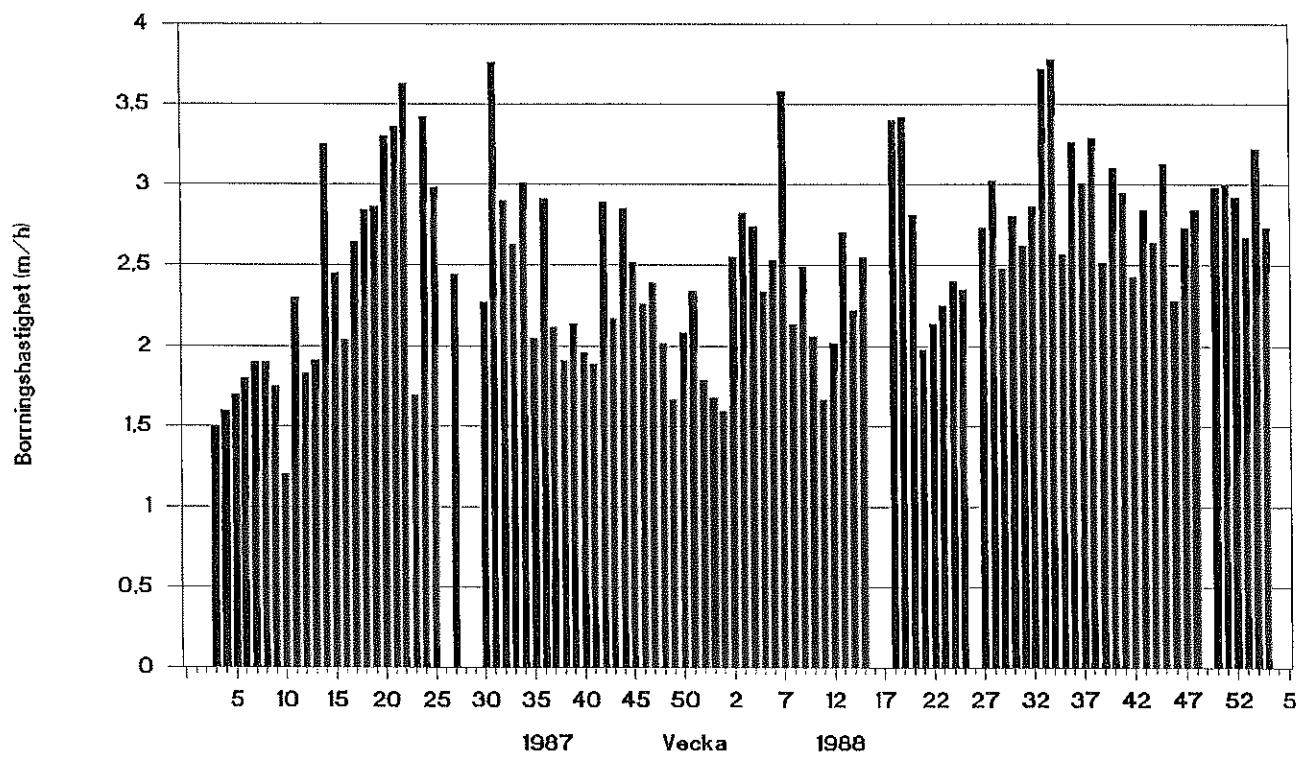


Utnyttjandegrad per vecka

"ren" borrning



Borrningshastighet per vecka



Last per rulle och vecka

