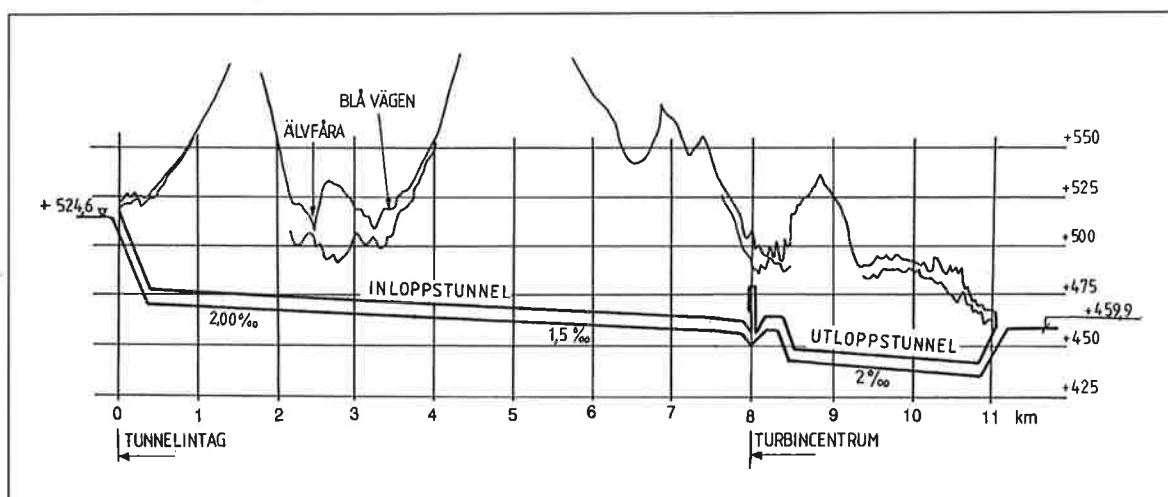




FULLBORRNING AV KLIPPEN-TUNNELN I LAPPLAND

Prognos, uppföljning och analys av drivningsdata.

Nils-Olof Sundin
Anders Lundqvist

FÖRORD

I tidigare forskningsprogram vid BeFo och Tekniska Högskolan i Luleå, har prognosteknik för fullborrning i hårt berg utvecklats och prövats vid ett antal tunnelarbeten. Systematisk uppföljning har skett av de borrade tunn-larna vid Wölla i Österrike, Kymmen i Värmland (1985 - 1986), Saltsjö-tunneln och den s k Ormentunneln i Stockholm. En betydande utveckling av maskinutrustningen har skett under de senaste tio åren, då allt större och kraftigare tunnelbormaskiner (TBM) har tagits fram av tillverkarna.

Inför det fjärde större fullborrningsprojektet i landet, vattenkrafttunneln i Klippen, beslöts att även detta skulle följas upp med avseende på prognos-utfall och drivningsresultat med ett försök till en översiktlig teknisk/ekonomisk värdering av tekniken i jämförelse med alternativet borring och sprängning.

Projektet har liksom de tidigare uppföljningarna genomförts vid avdelningen för Bergteknik vid Tekniska Högskolan i Luleå med Nils-Olof Sundin som projektledare, och följts av en referensgrupp, representerande några av SveBeFo:s huvudmän, nämligen Mats Alestam, Sydkraft Konsult, ordförande, Anders Lundqvist, Kraftbyggarna, Hans Janzon och Gunnar Nord, Atlas Copco/Robbins, Christer Svemar, SKB, Leif Tollerup, Siab, samt Per Andersson, SveBeFo.

Rapporten innehåller en stor mängd sammanställd och kommenterad in-formation, som dokumenterar drivningsarbetet och bekräftar att fullborr-ning numera kan betraktas som en väl etablerad teknik för tunneldrivning även i hårt, skandinaviskt berg. Diskussioner som förts inom projektet och med referensgruppen har samtidigt visat på de typiska svårigheter som lig-ger i att dra mer allmängiltiga slutsatser från uppföljningen av ett enskilt objekt med dess specifika förutsättningar. Den jämförande, principiella kostnadsanalys som gjorts, demonstrerar tydligt att det krävs en noggrann ekonomisk värdering av ett stort antal faktorer för att man i ett aktuellt fall ska kunna välja lämpligaste drivningsmetod.

Till projektledaren och referensgruppen, som tillsammans visat stort enga-gemang och uthållighet i arbetet med att fullfölja projektet i form av en in-tressant och innehållsrik slutrapport, framförs härmed ett stort tack!

Stockholm i april 1995

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

Under mitten av 70-talet undersöktes för första gången möjligheten att utnyttja fallsträckan mellan den redan reglerade sjön Överuman och Klippens by NV Lappland. 1990 godkände vattendomstolen en modifierad utbyggnad. Vattnet från sjön Överuman skulle ledas i en ca 11 km lång fullborrade tunnel, via ett kraftverk. Huvudmotivet till valet av drivningsmetod var miljöskäl, genom att borrhning innebär färre påslag, mindre mängd bergmassor att deponera i omgivningen, samt mindre störning av den yttremiljön (buller, vibrationer etc.). Borrhningen startade vecka 43 1991 och avslutades vecka 22 1994. Tunneln borrades med en Atlas Copco TBM, Jarva Mk 27, Ø 6.5 m. Byggherre för utbyggnadsprojektet är Vattenfall AB och ansvarig entreprenör Kraftbyggarna Entreprenad AB.

I Klippen har flera nya tekniska lösningar testats. Bergmassorna mellanlagrades i horisontella "tunnor" på bakriggen. Ett spårbundet transportsystem för branta lutningar togs fram för projektet och modifierades under projektets gång. Ett kontinuerligt registreringssystem av drivningsdata (MWB) testades.

Målet med föreliggande forskningsprojekt har varit att utvärdera och analysera de fullborrade tunneldelarna i utbyggnaden av vattenkraften i Klippen, samt fortsatt utveckling av den prognosmodell för drivningstid som tagits fram vid avdelningen för Bergteknik, LuTH. Klippen-projektet är det femte fullborrningsprojekt som avdelningen följt upp och analyserat.

Berget i tunneln består i huvudsak av glimmergnejs, som generellt är sprickfattig. Tre zoner med större vatteninläckning (1.5, 0.6 och 0.5 m³/minut), korsades vid drivningen under Umeälven.

Arbetstiden totalt har fördelats enligt följande: borrhning och omtag 34.3%, byte och inspektion av brytrullar 12.4%, reparation och underhåll av TBM och bakrigg 13.1%, bergförstärkning och injektering 11%, transportsystemet 22%, samt andra orsaker 7.2%.

För att göra en jämförelse av driftskostnader mellan TBM och borrhning/sprängning, måste ett antal grova antaganden göras. Dessa antaganden baseras på den information som finns i föreliggande rapport och övriga avrapporteringar av projektet. Resultatet av kostnadsjämförelsen visar att TBM-alternativet (ca 12 tkr) är billigare än borrhning/sprängnings-alternativet (ca 13 tkr) när man jämför kostnader per tunnelmeter. Samtidigt skulle kostnaderna räknade per kubikmeter uttaget berg vara ca 30 % lägre vid det borrhade/sprängda alternativet. Resultatet är mycket beroende av de antaganden som gjorts bl.a. att tunnelarean vid TBM-drivning var 33 m² och att tunnelarean vid en borrhad/sprängd tunnel var 52 m². Varför jämförelsen skall tas för vad den är.

Kontinuerlig registrering av MWB data kommer i en framtid att öka kunskapen om fullborrnings av tunnlar i olika bergförhållanden och därmed leda till ett bättre utnyttjande av drivningsmetoden. MWB data kan då användas både under drivning, för att på förhand

indikera viktiga bergförändringar och vid uppföljningen för att optimera framtida fullborrningsprojekt.

Prognosmodellen för drivningstid vid fullborrning av tunnlar, blir osäker då drivningen utförs med icke beprövad och tidigare testad tunneldrivningsteknik. Matningskraften för de nya brytrullarna som användes i Klippen, utnyttjades inte till förväntad kapacitet. En ökning av tillämpad nominell matningskraft per diskulle med 20 % (från 220 till 270 kN), medför att indriftshastigheten ökar med 60 % (från 1.99 till 3.18 m/tim).

Av total tillgänglig arbetstid, utnyttjas generellt vid TBM-projekt ca 40 % för borrning och omtag, 40 % för systemberoende faktorer (reparationer, service, underhåll etc för systemet), medan ca 10 % kan relateras till bergberoende orsaker (injekterings-, förstärkningsarbete etc) och 10 % till övrig ospecificerad tid. Dessa procenttal uppnåddes även vid borrningen av Klippen-tunneln. Förbättringar av systemberoende faktorer har därför den största potentialen att öka utnyttjandegraden av TBM för borrning.

En del av subsystemen vid TBM-drivning har fungerat mycket bra efter en tids inkörningsproblem (TBM, Bakrigg, Tipp), medan andra (transportsystem, diskullar etc) inte uppnått ställda förväntningar. RH-Systemet för transport var en prototyptrustning, vilket medförde en hel del störningar. Tunga arbeten vid fullborrning är svetsningsarbeten vid byte av slitdelar, rullbyten etc. Svåra arbetsmoment är slamrensning vid drivning i nedförslutning.

fullborrning (TBM), drivningsdata, drivningsprognos, uppföljning, analys, kostnad, kontinuerlig registrering under borrning (MWB)

ABSTRACT

The idea of taking advantage of the fall of the river between the already regulated lake Överuman and Klippens village in north-western Lapland, originates from the mid 70-ties. In 1990 permission was granted for a modified extension. The water from the lake Överuman was to be led through an 11 km full face (TBM) bored tunnel, via an electric power plant. The excavation method was chosen mainly from environmental aspects. Excavation commenced in week 43 in 1991 and was finished in week 22, 1994. The tunnel was bored with equipment manufactured by Atlas Copco, more precisely a Jarva Mk 27 with a 6.5 m diameter head. Builder of the project is Vattenfall AB and the contractor is Kraftbyggarna Entreprenad AB.

Several new technical developments have been tested during the project. Excavated rock masses were stored in horizontally mounted bins at the backup rig. Also, a train system capable of climbing steep grades was developed. Finally, data concerning excavation rate and machine performance were recorded continuously (MWB).

The objective of the research project presented in the report has been to evaluate and analyze the parts of the tunnels excavated with the TBM, and to continue the development of the prognosis model developed at the department of Mining Engineering at Luleå University of Technology. The Klippen-project is the fifth TBM-project that has been evaluated and analyzed by the department.

The rock mass surrounding the tunnel consists mainly of mica gneiss, which normally is almost unfractured. Three zones with significant inflow of water were encountered (1.5, 0.6 and 0.5 m³/minute), when tunneling below Ume river.

All working hours can be divided into one of the following groups: boring and regripping 34.3%, changing and inspection of cutters 12.4%, repairs and maintenance 13.1%, rock reinforcements and grouting 11%, activities concerning the transportation system 22% and other 7.2 %.

To compare excavation costs between TBM and conventional drilling and blasting some rough assumptions are necessary. These assumptions are based on the information in the report and other reports from TBM-projects. The result of the comparison shows that the TBM alternative is less expensive (12 000 SEK/meter of tunnel) than drilling and blasting (13 000 SEK/m). These results are to a great deal depending on the assumptions made and should be studied with this in mind.

Continuous recording of MWB-data will in the future increase the knowledge about boring in different rock environments and as a result lead to more efficient use of the boring technique.

There is some uncertainty when using the model for prognosis of excavation time of tunnels, with a TBM system comprising new, not previously tested, technology. The cutters used at Klippen could not withstand as high thrust as expected. As a consequence

the excavation rate decreased. 20 % increase in thrust per cutter (220 to 270 kN) results in an increase of the penetration rate with 60 % (1.99 to 3.18 m/h).

In general about 40 % of a TBM-project is used for boring and regripping, 40 % is used for system related activities such as maintenance and repairs, while about 10 % are related to problems caused by the rock properties, e.g. grouting and reinforcements. The remaining 10 % of time are other activities. During the Klippen project the distribution of activities were about the same as the above. The greatest potential for increases of the utilization of the TBM is, as a consequence, achieved by improving system-dependent activities.

Some of the subsystems (TBM, backup rig, dump) have worked well after solving some initial problems, while a few other systems (transportation, cutters, etc.) have not fulfilled expectations. The transportation system, being a prototype, resulted in some disturbances. Heavy manual activities during full face boring are for instance, welding when exchanging parts subjected to wear and changing cutters. A difficult activity is removing mud while excavating along a descent.

full-face boring (TBM), drifting, prognosis model of time, follow up, analys, costs, measurement while boring (MWB)

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING

	<u>sida</u>
0. BEGREPP, SYMBOLER OCH FÖRKORTNINGAR	1
1. BAKGRUND	4
2. KLIPPENPROJEKTET	7
2.1 Arbetsorganisation	8
2.2 TBM - MWB	9
2.3 Erfarenheter från drivningen	9
3. JÄMFÖRELSE KOSTNADER FULLBORRNING OCH BORRNING/SPRÄNGNING	11
4. UPPFÖLJNING OCH ANALYS AV TBM DRIVNINGEN	14
4.1 Tunnelkartering	14
4.1.1 Tunnelkartering, Norges Tekniska Högskola	14
4.1.2 Tunnelkartering, Vattenfall Hydro Power Ludvika	16
4.2 Inträngningstest	16
4.3 Drivningsdata	17
4.3.1 Borrbarhet vid drivning av tunneln	20
4.4 Maskintester	22
4.5 Kommentarer	24
5. KONTINUERLIG REGISTRERING AV DRIVNINGSDATA UNDER BORRNING (MWB)	26
6. PROGNOSS DRIVNINGSTID FÖR KLIPPEN	29
6.1 Prognos 2	29
6.2 Kommentarer	31
7. JÄMFÖRELSE LUTHS PROGNOSS MED DRIVNINGSDATA	33
7.1 Jämförelse prognos-drivning	33
7.2 Kommentarer	37
8. REFERENSLISTA	39

BILAGOR

FULLBORRNINGSSYSTEM
 DRIVNINGSDATA
 DRIVNINGSPROGNOS 1
 ANALYS PROGNOSS - DRIVNING
 MASKINTESTER
 MÄTDATA UNDER BORRNING (MWB)

0. BEGREPP, SYMBOLER OCH FÖRKORTNINGAR

I detta kapitel kommer kortfattat att beskrivas de begrepp, symboler och förkortningar som används i föreliggande rapport, samt som ett första försök beskriva några ord och facktermer som nu används inom fullbörningsindustrin.

TBM, är en förkortning för tunnelbörningsmaskin och är det subsystem som utför själva brytningen av berget. TBM består generellt av en borrh- och en fastspänningsenhet.

BAKRIGG, är det subsystem som är själv "motorn" i fullbörningssystemet. På bakriggen finns platsen för TBM-operatören, transportanordningar för material och borrhkax, hydraulpaket, elskåp, transformatorer, kompressorer, damfilter etc.

BRYTRULLE, (engelska cutter) är det cirkulära verktyg som rullar, krossar och bryter sönder berget i tunnelfronten. Andra namn som förekommer är disktrulle eller kutter. Cutter bör ej användas då missförstånd lätt kan uppstå (Svenska Akademiens ordlista).

TRANSPORTSYSTEM, är det subsystem som ombesörjer frakten av lossbrutet berg och material i tunneln. Om transporten är spårbunden ingår lok, vagnar, räls etc i subsystemet.

MEDIA, ledningar och tillförsel av vatten, ventilation, elström och tele till systemet.

RH-S, är ett spårbundet transportsystem (Rapid Haulage System) som kan utföra transporter vid stora lutningar (20 %) uppåt eller nedåt. Transportsystemet har tagits fram av Kraftbyggarna AB och används för första gången i Klippen.

BSP, är en förkortning för konventionell drivning av tunnlar med borrhning och sprängning.

FULLBORRNING, är en metod att mekaniskt sönderdela berg i full skala vid drivning av tunnlar eller orter. Det internationellt vedertagna engelska namnet för metoden är "full-face boring" (Tekniska nomenklaturcentralens bergteknisk ordlista). Vid översättningar av ordet (full)borrhning till engelska bör således "boring" användas och vid borrhning av sprängborrhål "drilling".

MWD, (Measurement While Drilling) kontinuerlig registrering av data vid klenhålsborrhning.

MWB, (Measurement While Boring) kontinuerligt registrering av drivningsdata vid TBM borrhning.

PROGNOSMODELL FÖR DRIVNINGSTID

ZONINDELNING, den blivande tunneln delas in i zoner (längdsektioner) efter hur omgivningen (variationer i bergmassan, yttre störningar etc.) bedöms påverka drivningen.

P_{BI} = Inträngningsindex.

Beräknas med hjälp av testdata från ett modifierat inträngningstest (Handewith 1972), där verktyg med hemisfäriskt (Ø 12 mm) spets, pressas in etappvis i en sågad yta på bergprovet. Parametern beräknas enligt följande ekvation :

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

där: n = antalet last - inträngningscykler (normalt 5 stycken)

F_C = maximal matningskraft per cykel (kN)

D = kvarstående inträngningsdjup vid avlastning per cykel (mm)

I_B = Borrbarhetsindex.

Borrbarhetsindexet för en bergmassa kan tas fram på två sätt, dels vid prognosen av drivningstid och dels baserad på borraringsdata under drivningen av tunneln. Vid prognostillfället kan borrbarhetsindexet beräknas med hjälp av resultatet från borrbarhetstestet (P_{BI}) samt en faktor för bergmassans uppsprickning (k_J). Detta borrbarhetsindex kallas i rapporten "prognosens borrbarhetsindex" och betecknas $I_B(\text{test})$. Om fler än en bergart förekommer i zonen, viktas dessa per volymsandel. Prognosens borrbarhetsindex per zon beräknas enligt följande ekvation :

$$I_B(\text{test}) = k_J * (\sum P_{BI} * \text{Vol}\%) \quad (\text{mm/kN})$$

Den andra metoden är att under borrarngen av tunneln beräkna indexet med hjälp av drivningsdata. Detta borrbarhetsindex kallas i rapporten "borrbarhetsindex vid drivning" och betecknas $I_B(\text{driv})$. Borrbarhetsindexet vid drivning beräknas enligt ekvationen nedan:

$$I_B(\text{driv}) = n_{pr} * 1000 / (F * \text{RPM} * 60) \quad (\text{mm/kN})$$

där: n_{pr} = indriftshastigheten netto vid borrarng (m/tim)

F = nettobelastning per brytrulle vid borrarng (kN/brytrulle)

RPM = borrhuvudets varvtal (varv/minut)

n_{pr} = Indriftshastighet

Indriftshastigheten är den hastighet som maskinen uppnår vid enbart borrarng (nettoborrjunkning), alltså exklusive omtag. Vid prognostillfället beräknas indriftshastigheten enligt nedanstående ekvation:

$$n_{pr} = I_B * F * \text{RPM} * 60 / 1000 \quad (\text{m/tim})$$

Beräkningen av indriftshastigheten vid drivning av tunneln baseras på uppgifter om borrhängd (l) och borrhäns (t) för ett skift eller slaglängd. Indriftshastigheten vid drivning beräknas enligt nedanstående ekvation :

$$npr = l / t \quad (\text{m/tim})$$

U = Utnyttjandegrad

Utnyttjandegraden för TBM beräknas genom att dela borrhäns tid (exklusive omtagstid med arbetad tid. Vid prognosarbetet påverkas utnyttjandegraden av bergmassan, valet av maskinsystem, arbetsorganisation, yttre och inre restriktioner etc. Största osäkerheten vid prognostillfället är att bedöma utnyttjandegraden, då detta kräver stor erfarenhet från tidigare TBM-uppföljningar.

Baserad på drivningsdata beräknas utnyttjandegraden enligt följande ekvation :

$$U_{..} = \text{netto-borrhäns} \cdot 100 / \text{arbetad tid} \quad (\%)$$

sh_b = Antal borrhäns skift per zon

Antalet borrhäns skift per zon (sh_b), beräknas med hjälp av npr, zonens längd (L), arbetstiden per skift (h_{sh}) och utnyttjandegraden (U) vid borrhäns. I drivningsprognosens parameter för borrhäns skift (sh_b) ingår endast de skift där någon del av arbetstiden under ett skift har utnyttjats för borrhäns. Antalet borrhäns skift per zon beräknas enligt följande ekvation :

$$sh_b = L / (npr \cdot h_{sh} \cdot U) \quad (\text{skift})$$

sh_{tb} = Totala antalet borrhäns skift

Totala antalet borrhäns skift är summan av samtliga zoners borrhäns skift enligt ekvationen :

$$sh_{tb} = \sum sh_b \quad (\text{skift})$$

sh = Arbetade skift per zon

Med arbetade skift per zon avses totala antalet skift som utnyttjats per zon. Alltså i parametern ingår samtliga skift, borrhäns skift och skift där ingen borrhäns har utförts. Av erfarenhet från tidigare uppföljningar av TBM projekt, är antalet arbetade skift i normala fall ("tumregel") ca 10 % (k_t) fler än antalet borrhäns skift. Se nedanstående ekvation :

$$sh = sh_b (1 + k_t / 100) \quad (\text{skift})$$

sh_t = Totalt arbetade skift för hela drivningen av tunneln

Totalt arbetade skift för hela drivningen av tunneln, är summan av antalet arbetade skift per zon. I faktorn ingår inte tid för etablering och nedmontering av fullborrningssystemet. Se nedanstående ekvation :

$$sh_t = \sum sh \quad (\text{skift})$$

1. BAKGRUND

Drivning med TBM innebär att ett långt (100-200 m) kontinuerligt, eldrivet system skall fungera i en slitande och påfrestande miljö. De relativt höga fasta kostnader som följer med drivningsmetoden, medför att maskinen måste utnyttjas i så hög grad som möjligt.

Syftet med utbyggnaden av Klippen-projektet är att vattnet från sjön Överuman skall, när tunneln är färdig, ledas i en ca 11 km lång fullborrad tunnel, via ett kraftverk, till älven nedanför Klippens by (NV Lappland). Borrningen som startade vecka 43 1991, utfördes med en Atlas Copco TBM, Jarva Mk 27.

Variationer i bergmassan påverkar i högre grad drivningsresultatet vid fullborrning än vid t.ex. borrning och sprängning. Drivningshastigheten för en TBM (tunnelborrningsmaskin) kan uppvisa stora variationer beroende på skillnader i bergart och bergmassans uppsprickningsgrad. Generellt krävs därför en mer omfattande geologisk undersökning av projektområdet än vid konventionell drivning. Fullborrningstekniken skiljer sig även från konventionell drivning på tre andra områden, dels vad gäller systemteknik, dels arbetsorganisation och dels kostnadsbild.

I nedanstående tabell visas i procent den tid som utnyttjats för olika arbetsmoment som ingår vid fullborrning för sex olika fullborrningsprojekt. Berget i Ulla-Förre, Kymmen, Saltsjön och "Ormen", bestod i huvudsak av kristallina gnejser och graniter. Sedimentära gnejstrar och skiffrar var de dominerande bergarterna som borrades i Renoxvatten och Wölla.

Tabell 1.1 Drivningsdata från TBM-projekt.

	Wölla (%)	Ulla-Förre (%)	Renoxvatten (%)	Kymmen (%)	Saltsjön (%)	"Ormen" (%)
Borrning + omtag	57	39	40	46	35	38
Rullbyte + inspektion	9	15	8	16	10	7
Rep + underhåll TBM	10	22	12	18	28	26
Rep.+ underhåll Bakrigg	7	2	4	5	15	4
Övrigt	17	22	36	15	12	25

Av tabellen framgår att maskinen generellt inte utnyttjas för borrning inklusive omtag till mer än ca 40 % av tillgänglig arbetstid. I de hårdare granitiska bergarterna som förekom i Ulla-Förre, Saltsjön och "Ormen", underskreds även detta procenttal.

Vid de flesta projekt som personal från Luleå Tekniska Högskola (LuTH) varit med att följa upp, har projekten startat med ett lågt utnyttjande av TBM för borrhning. Personalen har trots viss förberedande utbildning behövt använda produktionstiden för att skola in sig på drivningsmetoden. Den produktionstid som här går förlorad på grund av lågt utnyttjandegrad för borrhning, är svår att arbeta in under den resterande borrhningen. Andra orsaker till lågt utnyttjandegrad, vilket oftast inte ingår vid planeringen av ett TBM projekt är att helt nya systemlösningar och konstruktioner kräver en extra lång inkörningsperiod (exempel Saltsjötunneln, Stora Bält etc), med ofta förekommande reparationer och omkonstruktioner. Dålig förberedelse för insatser vid förändringar i berget, krosszoner, smällberg etc. försenar även projekten (t.ex. Kymmen, Ulla-Förre, Renoxvatten, Kobbelv). Alla dessa problem går att minska med hjälp av bra utförda förundersökningar och att ny teknik utnyttjas för att indikera zoner i bergmassan som kan förorsaka kostsamma driftstopp, väl testade maskinkonstruktioner och delar, kompetent arbetsledning, samt väl intrimmad och motiverad personal. Erfarenhet från tidigare drivningsprojekt måste utnyttjas tillsammans med forskning, för att påskynda framåtskridandet inom området. Det är således mycket viktigt att TBM-projekt följs upp och analyseras noggrant.

Under ca 15 års tid har forskning om mekanisk bergfragmentering bedrivits vid avdelningen för Bergteknik, Luleå Tekniska Högskola (LuTH). Två datorbaserade prognosmodeller för drivningstid och kostnader har tagits fram. Prognoser och fältuppföljningar av fullborrningsprojekt har utförts i Österrike, Norge och de tre tunnelprojekten i Sverige (Kymmen-, Saltsjö och Ormen-tunneln).

I Klippen testades flera nya systemlösningar vid fullborrnings av tunnlar, bl.a. en kraftfullare TBM, helt nya system för bakrigg och transporter, samt en ny filteranläggning. Ett nytt system för kontinuerlig datainsamling av drivningsdata har även testats.

De lossbrutna massorna mellanlagras i horisontella "tunnor" på bakriggen. Transporterna sker med ett RH-S (Rapid Haulage System) system som har gjort det möjligt att med spårbunden transport klara branta lutningar (upp till ca 20°). En helt ny tippstation har även utnyttjats för de ur tunneln transporterade massorna.

I förundersökningen av Klippen-området konstaterade kortfattat om geologin:

Bergblottningar finns endast på några få ställen längs tunnelsträckan. Dessa platser ligger vid inloppstunnelns början, vid tunnelns korsning av Umeälven, i branterna vid maskinstationsområdet och vid utloppstunnelns mynning. Följande beskrivning av områdets geologi baseras på kartering av dessa bergblottningar och utförda kärnborrhningar. Den dominerande bergarten längs inloppstunneln består av en grå medelkornig glimmergnejs. Denna gnejs konstaterades vid kärnborrhning vid intaget, älvkorsningen och området vid maskinstationen. Vid maskinstationen genomsätts gnejsen av ljusa pegmatitgångar. Även granitiska intrusiv förekommer i området. Berghällar och kärnborrhål längs utloppstunnelns nedre del, visar att bergmassan där i huvudsak är en fyllitisk glimmerskiffer med mycket flack förskiffringsstruktur. Kontakten i tunneln mellan glimmergnejs och glimmerskiffer kan antas ligga cirka 800 m från utloppstunnelns mynning.

Målsättningen med föreliggande forskningsprojektet var att följa upp och utvärdera fullborrningen av Klippen-tunneln, samt att vidareutveckla avdelningens prognosmodell för drivningstid. I forskningsprojektet ingick att omarbete en prognos för drivningstiden av tunneln, analys av drivnings- och geodata, samt att utföra inträngningstester på några bergprover från tunneln.

Klippenprojektet utförs som ett "in-house"-projekt dvs inom Vattenfallskoncernen. För forskningsprojektet har SveBeFo tillsatt en referensgrupp bestående av följande personer:

Mats Alestam	Sydkraft Konsult AB
Per Andersson	SveBeFo
Anders Lundqvist	Kraftbyggarna Entreprenad AB
Gunnar Nord	Robbins Europe AB
Christer Svemar	SKB
Leif Tollerup	SIAB Bygg och Anläggning

I kapitel 2, bidrar Anders Lundqvist (chef för TBM-borrningarna i Klippen) med erfarenheter från fullborrningen av Klippen-tunneln och Birger Nilsson (marknadschef Kraftbyggarna Entreprenad AB) med historik. Kapitel 3, som är ett försök att jämföra kostnader vid fullborrning med borrning/sprängning, har författats av Hans Törnros (SIAB), Gunnar Nord (Robbins Europe AB) och Per Andersson (SveBeFo).

Ett stort tack riktas till Bengt Toolanen Kraftbyggarna för hans mod att testa nya tekniklösningar, en del lyckade medan andra kräver mer utvecklingstid. Tack till platsledningen och övrig personal vid anläggningen i Klippen för gott samarbete. Ett speciellt tack riktas till Birger Nilsson, som under projektets gång bidrog till att den information som efterfrågades också fanns tillgänglig för FoU-projektet.

Huvudsponsor för forskningsprojektet har varit SveBeFo och Luleå Tekniska Högskola, samt Kraftbyggarna Entreprenad AB i Luleå.

2. KLIPPENPROJEKTET

Under mitten av 70-talet undersöktes för första gången möjligheten att utnyttja fallsträckan mellan den redan reglerade sjön Överuman och Klippens by. Överuman är belägen i Lappland vid Ume-älvens övre lopp, ca 25 km norr om Tärnaby och ca 80 km från Mo i Rana i Norge. Flera förslag med alternativa dammplaceringar och tunnellängder studerades. Efter prövning övergavs alternativ med en ny och högre damm, huvudalternativet blev en ca 11 km lång tunnel om 50 m², 7 km inloppstunnel, underjordisk maskinstation, avslutad med en ca 4 km lång utloppstunnel. Konventionellt utförande med borrhning-sprängning krävde mellanpåslag längs inloppstunneln för optimal drivning.

Vattendomstolen ogillade denna ansökan, varför projektet avfärdades tillfälligt.

Under mitten av 80-talet uppdrog Vattenfall åt NTH i Trondheim att utreda möjligheten att driva tunneln med fullortsborrning., detta för att tillmötesgå kraven om minimering av miljöingrepp. Resultatet av utredningen utföll till nackdel för fullortsmetoden, med motiveringen att tekniken inte ansågs klara den aktuella geologin med hårt och sprickfritt berg. Utredningen bordlades tills vidare.

Mot slutet av 80-talet inventerades all tänkbar vattenkraftsreserv med tanke på den kommande avvecklingen av kärnkraften. Klippen aktualiserades ytterligare en gång. Den fallhöjd om 67 meter längs den aktuella älvsträckan skulle ge 27 MW effekt, en medelårsproduktion om 97 GWh, därav 75 % under vinterhalvåret.

1990 ansöktes återigen hos vattendomstolen om tillstånd att bygga ut sträckan mellan Överuman och Klippens by, enligt ett modifierat konventionellt alternativ med någon förändring i minimitappning men med bibehållande av mellanpåslaget längs inloppstunneln. Domstolens utslag blev positivt och projektstart planerades till slutet av 1991.

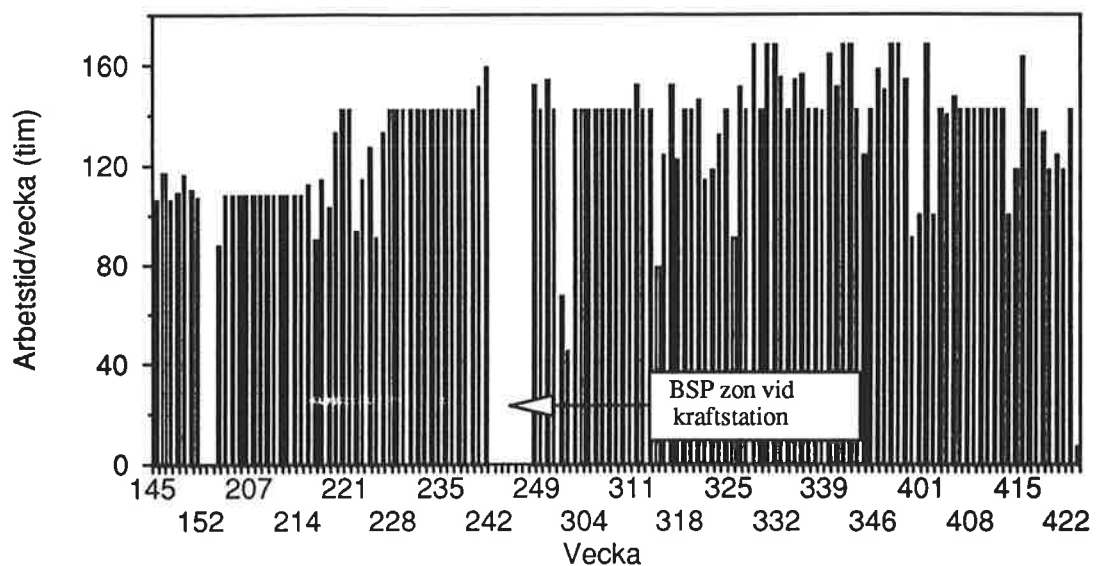
Som entreprenör utsågs Kraftbyggarna Entreprenad AB i Luleå, ett dotterföretag till beställaren Vattenfall.

Med bakgrund av utvecklingen som skett inom fullprofiltekniken de senaste åren gjordes före projektstart en förnyad metodstudie. Det bedömdes nu fördelaktigast att utföra maskinstation, tillfartsorter, delar av svallschaktet med borrhning-sprängning och svallschakten med stigfullborrning (raise boring). Till- och utloppstunneln planerades att fullborras med start från utloppet. Passagen av maskinstationen utnyttjas som en del i svallgalleriet. Diametern bestämdes till 6.5 meter (33.18 m²), vilket innebar 40 % reduktion av tunnelarean jämfört med det tänkta konventionella alternativet. Mellanpåslaget slopades, masshantering och tipparealer minskade med därtill hörande miljövinster. Projektet påbörjades hösten 1991 och tunnelborrningen avslutades 6 juni 1994.

Specifikation av TBM, bakrigg och transportsystem kan ses i bilaga Fullborrningssystem.

2.1 Arbetsorganisation

Arbetstiden under fullborrningen av Klippen-tunneln ändrades under tiden som tunneln borrades. Vid uppstarten av drivningen bestämdes att 2 skiftlag skulle arbeta 10 timmar/skift under vardagarna plus ett 8 tim skift under lördagar. Arbetsorganisationen ändrades efter ca 6 månader då ytterligare ett skiftlag (totalt 4 st) sattes in. Tillgänglig arbetstid per vecka ökades från 108 till 142 timmar. Denna arbetsorganisation användes i stort sett under resterande del av drivningen. Första skiftet startade på söndag kväll kl 20⁰⁰ och pågick till 06⁰⁰ på måndag morgon. Under vardagarna arbetade skiftlagen mellan följande tider; nattsiftet mellan 00⁰⁰ till 06⁰⁰, morgonskiftet mellan 06⁰⁰ och 15⁰⁰, kvällsskiftet mellan 15⁰⁰ och 24⁰⁰. Under lördagarna arbetade två skift från kl. 00⁰⁰ till 09⁰⁰ och från 09⁰⁰ till 18⁰⁰. Arbetstidens längd per vecka kan ses i figur 2.1.



Figur 2.1 Arbetstidens längd per vecka vid fullborrningen av Klippen-tunneln. X-axelns första siffra representerar året. Siffran 145 avser år 1991 vecka 45 osv.

Efter omorganisationen har totala antalet personer involverade i fullborrningsdelen för Klippen-projektet varit 28.5 plus en teknisk specialist från TBM-leverantören. 4 st skiftlag för borringen á 5 personer, 3 arbetsledare, 2 st reparations- och serviceskift á 2 personer, en produktionschefsassistent på deltid samt en produktionschef.

2.2 TBM-MWB

TBM i Klippen var utrustad med ett Mitsubishi PLC-system för styrning och reglering av maskinen. Till detta system fanns ett antal givare (sensorer) inkopplade, så systemet även kunde användas för mätning och registrering av drivningsdata (matningskrafter, varvtal och vridmotstånd för borrhuvudet, slaglängd m.m.). Genom att mäta borrarad längd per tidsenhet, kunde ett mått på borrarjunkningen erhållas. De data som PLC-systemet registrerade och samlade in, lagrades i en handdator som kopplades in på PLC-systemet. Data från denna handdator tömdes senare över till en PC för vidare behandling och sammanställning av insamlat data.

Systemet med dessa handdatorer var dock inte bra då tillförlitligheten hos handdatorerna inte var speciellt hög. Kopplingen mellan handdatorerna och PLC-systemet var en svag länk i kedjan. Vi kunde vid ett stort antal tillfällen konstatera att den elektriska kontakten mellan handdatorn och PLC-systemet var bruten. Ett stort bortfall av data p.g.a. detta kunde noteras. Detta gjorde att utvärderingen av data var tidskrävande då inte samtliga mätsträckor kom med.

En specifikation för ett system som säkrar data bättre finns framtagen men är ännu ej testad.

2.3 Erfarenheter från drivningen

Klippen-tunneln, som är en vattentunnel för ett kraftverk, drevs från utloppssidan mot inloppet. Tunneln, som egentligen är tre tunnlar, består av en utloppstunnel, en förbifartstunnel och en inloppstunnel.

Utloppstunneln börjar från utloppssidan sett med en brant nedfart (lutning 1:10) i ca 150 meter, för att sedan plana ut i en svag stigning på 3 ‰ i ca 3200 meter mot kraftstationsläget.

Förbifartstunneln började vid sugröret alldeles nedströms kraftverksläget och fungerade som tunnel för att kunna ta TBM förbi kraftstationsläget samt som svallschakt då anlägget tas i drift. Förbifartstunneln var en ganska komplicerad tunnel att driva då den var kort och till övervägande del bestod av vertikala (konkava och konvexa) och horisontella kurvor med för TBM relativt snäva radier. Lutningen var dessutom upp till 1:10. Längden på tunneln är ca 400 meter.

Inloppstunneln börjar från kraftstationen sett med en svag lutning uppåt på 3 ‰ mot intaget, där de sista 150 metrarna borrarades i lutning 1:10.

TBMen fungerade mycket bra under hela projektet ur tillgänglighetssynpunkt. Det som krävde underhåll var rena slitagedelar som skrapstål, skopor, mantelplåtar och släpplåtar. Efter drivningen av utloppstunneln (3407 meter) utfördes ett längre servicestopp vid kraftstationen. Under drivningen av inloppstunneln uppstod sprickbildningar i fastspänningsplattorna och diverse andra fel, vilket medförde en veckas stopp för reparationer.

Det som föranledde det stora diskussionsämnet var brytrullarna. I utloppstunneln användes en utformning på sadeln (den del i vilken brytrullen är fäst vid borrhuvudet) som var mindre lyckad. Utformningen medförde onödigt många axelbrott på brytrullarna. När inloppstunneln borrades hade utformningen på brytrullarna ändrats och bekymren med axelbrott upphörde. En annan detalj på brytrullarna som begränsade matningskraften var brytrulleringen. Ringarna hade en tendens att spricka om de var för mycket härdade.

Å andra sidan tenderade de att plattas ut om de hade härdats för lite. Vad brytrullarna beträffar så har maskinleverantören en hel del utvecklingsarbete på materialsidan att göra vad stålet beträffar om det ska kunna matcha det som själva TBM kan prestera.

Den nya bakriggen orsakade en del bekymmer framförallt i början av projektet, trumfunktionen (mellanlagringen av massor), skyttelfunktionen och en del konstruktionsfel för ventilationsmagasin. Vid borrning i kurvor med en lång bakrigg som den i Klippen, kan en del bekymmer uppstå med transportörer och framförallt med en lång skyttlande transportör. I kurvor tenderade skytteln att spåra ur. I uppför- och nedförslut förorsakade bromsarna i vajermotorerna för skyttelfunktionen bekymmer.

I och med att roterande trummor användes som mellanlager, medförde denna konstruktion en obalans i trummorna när fuktiga massor fastnade i botten på dem. Detta fick till följd att tömningen av trummorna inte fungerade som de skulle. En åtgärd för att eliminera detta problem var att montera en mantelbroms på trummorna. Efter denna åtgärd fungerade även tömningen av trummorna relativt klanderfritt.

Principiellt fungerade det nya RH-Systemet (framtaget av Kraftbyggarna) som det var tänkt, men utvecklingstiden tog längre tid än beräknat. Då uttransporten av massorna utfördes med vad som skulle kunna kategoriseras som en prototypustrustning, uppstod en hel del störningar på grund av testning av helt ny teknik. De erfarenheter vi trots allt kan dra är att kapaciteten är väldigt stor när RH-S fungerar. Vi har också visat att man kan driva TBM tunnlar i stark lutning med tåg som enda transportsystem hela vägen från bakrigg till tipp. Under projektets gång fick många ändringar göras, för att inte säga utveckla hela transportsystemet, för att öka tillgängligheten för transportsystemet.

Konceptet som sådant vill vi påstå var en succé med tanke på att det var första gången tekniken provats.

Om fullborrningen i Klippen kan generellt sägas att tunga arbeten var svetsningsarbeten vid byte av slitdelar (skopor, skrapor, kaxringsplåt efter 3 km, skyddsplåtar), rullbyten etc. Svåra arbetsmoment var även slamrensning vid drivning i nedförslutning.

Injekteringsutrustningens placering och konstruktion var heller inte speciellt lyckad.

3. JÄMFÖRELSE KOSTNADER FULLBORRNING OCH BORRNING/SPRÄNGNING

Bakgrunden till föreliggande kapitel är att SveBeFos programstyrelse och den till projektet knutna referensgruppen ansett det som viktigt att försöka relatera de rörliga kostnaderna vid fullborrning mot kostnaderna vid borrning/sprängning inom Klippen-projektet. Man bör vara fullt medvetna om att det är mycket vanskligt att genomföra en enkel jämförelse av ekonomin (kr/m, kr/m³ el. dyl.) därför att ekonomin på ett fullbörningsprojekt är avhängigt avskrivningen av maskinkostnaden. I detta sammanhang bör det poängteras att det är jämförelsen mellan de två drivningsmetodernas ekonomi som är intressant och inte entreprenörens ekonomi.

För att göra en ansats till den efterfrågade jämförelsen måste ett antal grova antagande göras utifrån den information som finns i denna rapport och övriga avrapporteringar av projektet. Eftersom ingen av författarna till föreliggande kapitel (Hans Törnros SIAB, Gunnar Nord Robbins Europe AB och Per Andersson SveBeFo) har haft någon detaljerad insyn i Klippen-projektet, har vissa antaganden baserats på personlig erfarenhet från tidigare liknande projekt och uppföljningar. Nedan redovisas ett antal grundläggande antaganden för den kommande jämförelsen:

- Arean på TBM-tunneln är 33 m² (330 00 fm), medan arean på den borrarade/sprängda (B/S) tunneln är 52 m² (520 000 fm). Tunneln är i båda fallen 10 km.
- I detta grova exempel jämförs TBM-alternativet med en en-fronts borrarad/sprängd tunnel. Kostnaden för ett extra påslag vid B/S antas vara i samma storleksordning som vinsterna vid de då kortare transportavstånden.
- Antalet man vid TBM-driften antas vara sju gubbar per skift. Kostnaden för arbetskraft sätts till 300 kr/tim för båda alternativen.
- Den borrarade/sprängda tunneln går med full front och fyra meters salvlängd. Salvcykeln är 9.5 timmar inkluderande alla störningar, alltså långtidskapacitet.
- I B/S-alternativet "köper" man utlastningen av underentreprenörer (UE). Kostnaderna uppskattas dock nedan.
- Från uppföljningen av Klippen-tunneln framgår att indriftshastigheten var 2 m/tim under den tid aggregatet borrarade, vilket inte är ett fullt tillgodogörande av maskinens kapacitet. Utnyttjandegraden i projektet var cirka 40 % vilket innebär att den faktiska indriftshastigheten var cirka 0.8 m/tim. I analysen har det bedömts som rimligt att utnyttjandegraden sätts till 50 %, dels för att underlätta beräkningarna, dels för att det är en rimlig nivå på denna typ av projekt där inte injektering är aktuellt och begränsande på borrarningen. Med en 50 %-ig utnyttjandegrad blir indriften 1 m/tim, dvs totalt 10 000 timmar för hela tunnelns längd.
- I TBM-alternativet har vi räknat på ett "konventionellt" utlastningståg (ej RH-systemet eftersom investerings- eller driftskostnad inte kunde ansättas). Detta innebär att det finns en post för utlastning upp till ytan. Denna post läggs på UE och antas göras via tippficka, lastare och lastbil.

- TBM-maskinen och bakrigg antogs kosta 65 Mkr i inköp. Till detta kommer 7 Mkr för tåg och vagnar, 1 Mkr för fläkt och pumpar och 1.5 Mkr för borrhutrustning och injektering. Detta innebär en total investering av 75 Mkr varav 45 % avskrivs under projektet. Detta innebär att 33 Mkr avskrivs på projektet.
- Vid utlastningen i TBM-alternativet uppskattades lastvolymen till 60 m³ berg = 33 fm berg = ett tågsätt per längdmeter tunnel. Bränsleförbrukningen ansattes till 24 l/m = 240 m³ totalt.
- Kostnaden för diesel är 3 200 kr/m³. Elkostnaden är 60 öre/kWh.
- Räntekostnaderna för TBM-alternativet beräknas grovt enligt: Efter avskrivning återstår cirka 40 Mkr. Kapital lånas till 10 % ränta (antaget). Med 10 000 timmars beräknad byggtid (71 veckor med 140 tim/vecka) skall ränta betalas under cirka 19 månader (1.6 år). Effektiv ränta blir då 9.1 Mkr totalt vilket avrundas till 10 Mkr.
- Förstärkningsinsats och mängden sprutbetong är försumbar vid TBM-alternativet.
- Vid B/S-alternativet antas att borrhigen hyrs in till en antagen kostnad av 200 000 kr/månad, vilket gör cirka 10 000 kr/dag. Detta innebär att hyran blir 6 000 kr/salva (9.5 tim av 16 tim) och 1 500 kr/m.

I tabell 3.1, redovisas sammanställningar av kostnader för TBM.

Tabell 3.1 Sammanställning av kostnader för TBM-alternativet.

Post	Antagande	Kostnad (kr/fm) *	Kostnad (kr/m)
Arbetskraft	7 man * 10000 (tim) * 300 (kr/tim) / 330 000 (fm)	63	2080
Material/utrustning	räls: 300 (kr/m); ventilationstub: 150 (kr/m); Elkabel: 150 (kr/m); vattenrör tfn: 80 (kr/m); verktyg: 50 (kr/m)	22	730
Brytrullar (Cutters)	60 (kr/fm)	60	1980
El, TBM	30 (kWh/fm) * 0.60 (kr/kWh)	18	590
Diesel	loket antogs ha 200 (hp), med en förbrukning av 0.15 (g diesel/hp-timme) = 30 (l/tim)	2	75
Reservdelar, TBM	20 (kr/fm)	20	660
Reservdelar, backup	15 (kr/fm)	15	495
Reservdelar, tåg och vagnar	4 (kr/fm) (2+2)	4	132
Upplastning (UE)	18 (kr/fm)	18	594
Service och driftskostnad: fläkt, pump	10 (kr/fm)	10	330
Maskininvestering	33 (Mkr) avskrivs på projektet / 330 000 (fm)	100	3300
Räntekostnader	9.1 (Mkr) / 10 000 (m)	30	1000
Summa		362	11 966

* fm = fast kubikmeter berg

I tabell 3.2, redovisas sammanställningar av kostnader för det borrarade/sprängda alternativet.

Tabell 3.2 Sammanställning av kostnader för borrarade/sprängda alternativet.

Post	Antagande	Kostnad (kr/fm) *	Kostnad (kr/m)
Arbetskraft	0.22 (mantim/fm) 0.14 för borra, ladda, spränga och 0.08 för skrotning, service o. dyl. * 300 (kr/tim) = 66 (kr/fm)	66	3 432
Maskinhyra, borrhugg	1500 (kr/m)	30	1 500
Underhåll, borrhugg	4 (kr/borrmeter) = 8 (kr/fm)	8	416
Material/utrustning	ventilationstub, elkabel, vattenrör, tfn: 350 (kr/m)	7	350
Sprängmedel, tändare	1900 (kr/m) baserat på en kombination av Prillit och Dynamex	37	1 900
Borrstål och kronor	10 (kr/fm)	10	520
El	9 (kr/fm)	9	470
Verktyg	2 (kr/fm)	2	104
Dränageledning vid drivning i nedförslut	2 (kr/fm)	2	104
Upplastning, transport (UE)	45 (kr/fm)	45	2 340
Förstärkning	2 st bult á 400 (kr per meter)	15	800
Sprutbetong	skyddssprutning; 0.3 (m ³ sprutbtg/lm) * 3000 (kr/m ³) = 900 (kr/m)	17	900
Summa		248	12 836

fm = fast kubikmeter berg

Som synes så är TBM-alternativet billigare (9 %) än B/S-alternativet i denna grova jämförelse när man jämför kostnader per tunnelmeter. Samtidigt är kostnaderna per kubikmeter uttaget berg billigare vid det borrarade/sprängda alternativet (ca 30 % lägre än TBM) vilket visar på betydelsen av tunnelarean för det ekonomiska utfallet. Resultatet är dock väldigt beroende av de antaganden som gjorts varför jämförelsen skall tas för vad det är: *en grov jämförelse av de båda metoderna*. Exempelvis så styr ju avskrivningen av TBM:en utfallet kraftigt. Vidare är, som nämnts, tunnelarean för det borrarade/sprängda alternativet helt avgörande för utfallet. Kan tunnelarean minskas så blir B/S alternativet fort konkurrenskraftigt mot TBM alternativet. Avslutningsvis så får man kritiskt granska antagandet att kostnaden för ett extra påslag vid B/S antas vara i samma storleksordning som vinsterna vid de då kortare transportavstånden. Ett extra påslag och fler-frontsbrytning med borrhugg/sprängning ändrar ju förutsättningarna radikalt.

4. UPPFÖLJNING OCH ANALYS AV TBM DRIVNINGEN

4.1 Tunnelkartering

Tunneln har karterats av dels Norges Tekniska Högskola (Sandberg 1993) och dels av Vattenfall HydroPower i Ludvika. Syftet med karteringarna har dock varit olika, liksom tillämpad metodik. NTH klassar berget och uppsprickningsgraden enligt en metodik som NTH länge har tillämpat vid uppföljningar av fullborrade tunnlar. Syftet med Vattenfall HydroPowers kartering har främst varit att kartera större spricksystem av betydelse för bergstabiliteten och vatteninläckningen i tunneln.

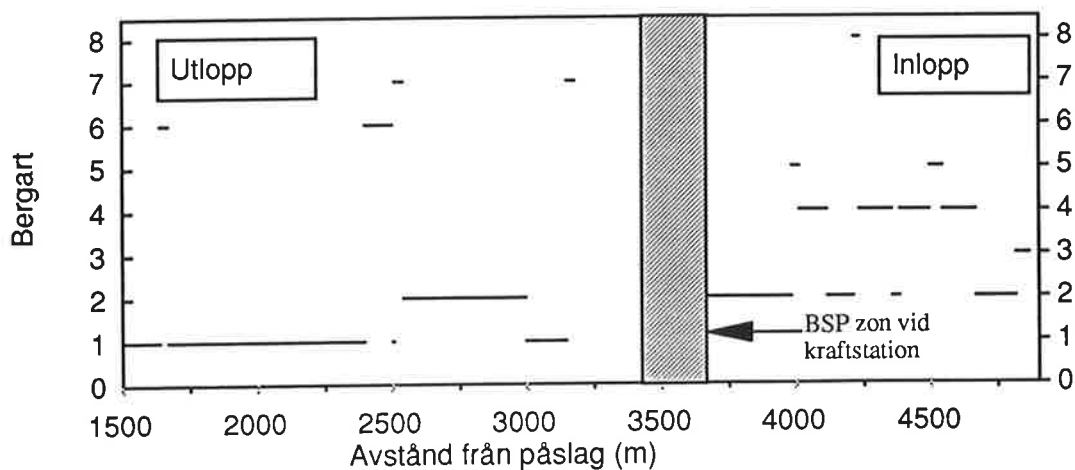
4.1.1 Tunnelkartering, Norges Tekniska Högskola

Personal och elever från Norges Tekniska Högskola i Trondheim (NTH) har, karterat totalt 2880 meter av den fullborrade tunnelsträckan i Klippen. I utloppstunneln karterades 1680 meter (sektion 1500-3180 m från start) och i inloppstunneln 1200 meter (sektion 3672-4872 m från borrhstarten vid utloppet). I karteringen ingår klassning av berget och uppsprickningsgraden i 10 meters sektioner. Den karterade delen av tunneln består av följande bergartsklasser:

- 1) Mörk glimmergnejs: Medel- till finkornig, biotitrik, skiffriheten utvecklad, rostutfällning förekommer.
- 2) Mörk glimmergnejs: Medel- till finkornig, biotitrik, skiffriheten svagt utvecklad, varierande kvartsinnehåll, delvis genomsatt av kvartsgångar eller kvartslinser, även förekommer granater och kismineral i varierande grad.
- 3) Mörk strippad gnejs/bandgnejs: Strippad med markerad bandning, övergång till mer migmatitisk struktur.
- 4) Hornblände/amfibolitgnejs: Varierande andel av amfibolitmineral, osystematisk struktur.
- 5) Ljus gnejs/granitisk gnejs: Granitisk struktur, finkornig, homogen med lite utvecklad foliation.
- 6) Granitisk gnejs/glimmergnejs: Blandad bergartsklass, glimmergnejs med tydlig foliation och en mer homogen ljus (granitisk) bergart.
- 7) Granitisk gnejs/pegmatit: Homogen och ljus, liten foliation.
- 8) Kristallin kvarts/pegmatit: Grovkornig, homogen, består huvudsakligen av kvarts, andra mineral är fältspat, muskovit och kismineraler.

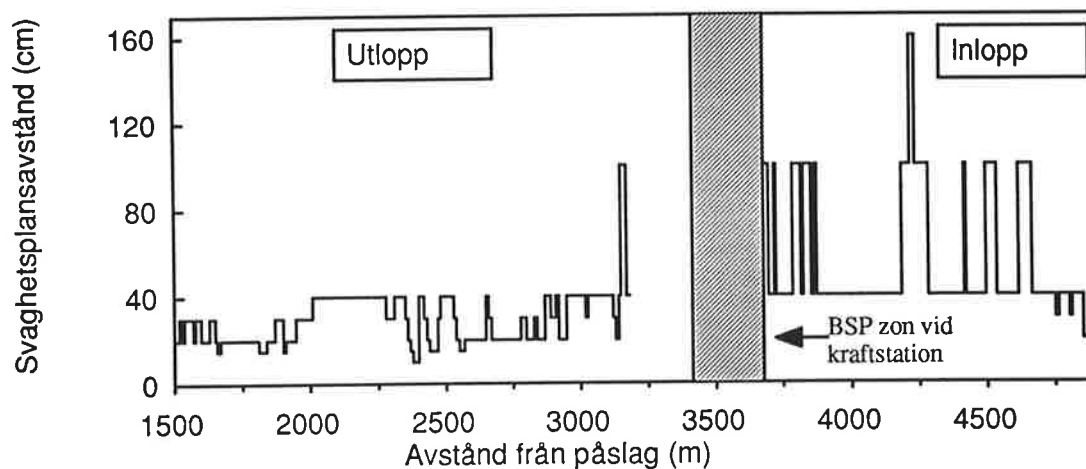
NTHs bergkartering visas i figur 4.1. Bergartsklasserna presenteras i form av horisontella streck. Snedsträckt del i figuren visar den del av tunneln som borrhades och sprängdes vid kraftstationen (sekt. 3407-3672 m från utlopp).

Huvudbergarterna i karterad del av utloppstunneln, är två mörka glimmergnejsar med utvecklad (bergart 1) och svagt utvecklad (bergart 2) skiffrihet. I den karterade delen av inloppstunneln är huvudbergarterna dels den mörka glimmergnejsen med svagt utvecklad skiffrihet (bergart 2) och dels en hornblände/amfibolitgnejs (bergart 4).



Figur 4.1 Kartade bergartsklasser i Klippen-tunneln, utförd av Norges Tekniska Högskola i Trondheim (NTH).

NTH delar upp svaghetsplan i bergmassan i stick och sprickor, där stick avser svaghetsplan som inte tvärar över hela tunnelarean och sprickor de svaghetsplan som tvärar över hela tunnelarean. I figur 4.2, visas avstånden mellan svaghetsplanen för de tunnelavsnitt som karterades i utlopps- respektive inloppstunneln.

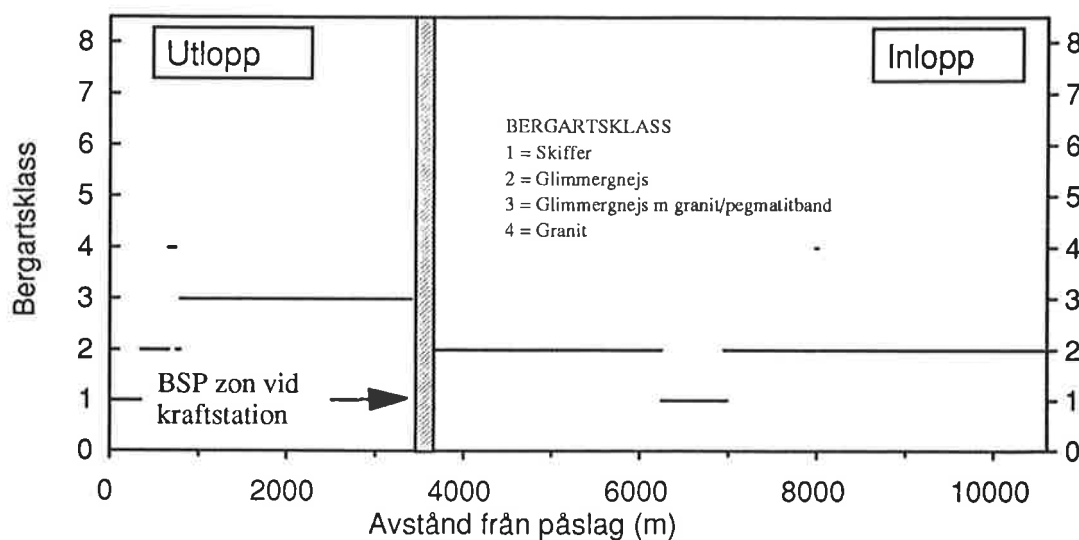


Figur 4.2 Kartade avstånd mellan svaghetsplan i Klippen-tunneln, utförd av Norges Tekniska Högskola i Trondheim (NTH).

Figuren visar bl.a. att avstånden mellan svaghetsplanen är generellt kortare (ca 30 cm) i utloppstunnel än i inloppstunneln (ca 40 cm).

4.1.2 Tunnelkartering, Vattenfall Hydro Power Ludvika

Vattenfall HydroPower har i Klippen-projektet främst varit ansvarig för design och layout av kraftstationen, men även mycket grovt klassindelad bergmassan längs hela den fullborrade tunnelsträckan. Enligt denna klassning finns endast fyra olika bergarter, se figur 4.3. Avsikten med karteringen var att bergmekanisk registrera de spricksystem och zoner i tunneln som kräver efterförstärkning/tätning. En översiktlig kartering av förekommande bergarter har även noterats. I nedanstående figur 4.3, visas Vattenfall HydroPowers bergartskartering tunneln. Horisontella streck visar bergarternas längd och vertikala streck klassgränserna.



Figur 4.3 Karterade bergartsklasser i Klippen-tunneln utförd av Vattenfall HydroPower i Ludvika.

4.2 Inträngningstest

I inloppstunneln har tre bergprover samlats in och testats med det inträngningstest som under ett flertal år använts vid avdelningen för Bergteknik, LuTH. Ett större antal prover planerades att testas, men på grund av olika anledningar kunde detta ej genomföras. Resultatet från testen kan ses i tabell 4.1. Proven har delats in efter samma bergartsklassificering som utfördes av Vattenfall HydroPower (se figur 4.3). I tabellen visas även motsvarande drivningsdata från provplatserna samt testresultatens avvikelse från drivningen. Proverna är tagna i inloppstunneln (3765 - 10576 m), vilket framgår av platsangivelsen i tabellen. Observera att Vattenfall HydroPowers klassindelning är mycket grov vilket tabellen visar. Det finns skifferpartier även i början av inloppstunneln där proverna vid 3676 och 4736 m är tagna.

Tabellen visar en god överensstämmelse mellan resultatet från inträngningstestet och motsvarande resultat från drivningen av Klippen-tunneln. Av tabellen framgår att bergklass 1 är mer lättborrad än bergart 2 och att inträngningstestets värden avviker marginellt från uppnådda resultat vid fullborrningen.

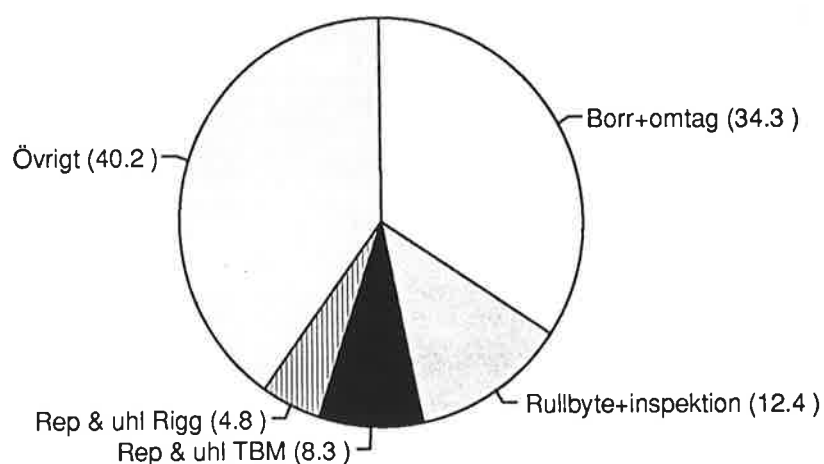
Tabell 4.1 Jämförelse mellan drivningsdata och inträngningstester på bergprover.

Plats (m)	Bergartsklass	Drivningsdata			Inträngningstest		Avvikelse Intr-Driv (%)
		Matnings- kraft (kN/rulle)	Varvtal (RPM) (v/min)	Indriftshas- tighet (m/h)	P _{BI} (mm/kN)	Indriftshas- tighet (m/h)	
3676	Skiffer	187	6.7	2.71	0.036	2.71	0
4736	Skiffer	214	6.7	2.11	0.026	2.24	6
7081	Glimmergnejs	273	6.7	1.89	0.018	1.98	5

4.3 Drivningsdata

Beräkningarna i denna del av rapporten baseras på uppgifter hämtade från sammanställningar av skiftrapporter från fullborrningen. Ett exempel på en sådan sammanställning visas i bilaga Drivningsdata.

Den totalt arbetade tiden vid drivningen av den fullborrade delen av Klippen-tunneln, har delats upp på 5 olika aktiviteter, se figur 4.4. I figuren ingår inte tid för etablering före start, eller nedmontering av systemet efter det att tunneln färdigställts. Aktiviteten övrigt, avser främst bergförstärkning och injektering (11 %), samt transport (22 %).



Figur 4.4 Procentuella fördelningen av totalt arbetad tid vid fullborrningen av Klippen-tunneln.

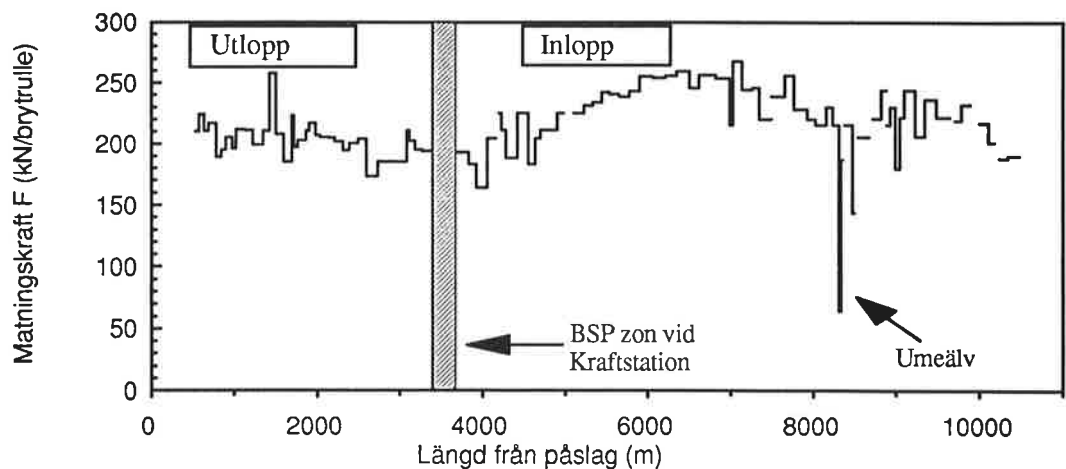
Vid en jämförelse med de fullbörningsprojekt som tidigare nämnts i föreliggande rapport (kapitel 1), kan konstateras att tiden som utnyttjats i Klippen för:

- Börning och omtag, är lägre än genomsnittet för övriga projekt.
- Rullbyte och inspektion, är som genomsnittet för övriga projekt.
- Reparation och underhåll av TBM, är lägre än genomsnittet för övriga projekt.
- Reparation och underhåll av Bakrigg, är som genomsnittet för övriga projekt.
- Övrigt inkl. bergförstärkning, lastning och transport etc., är högre än genomsnittet för övriga projekt.

Observera att varje tunnelprojekt är unikt vad gäller geologi, fullbörningssystem, arbetsorganisation etc., varför det är mycket svårt att dra mer ingående slutsatser vid jämförelser mellan olika projekt.

I bilagan Drivningsdata, redovisas diagram för drivningen av utloppstunneln respektive inloppstunneln. För inloppstunneln ökade procenttalet för reparation och underhåll av TBM, samt för posten Övrigt (VVE, transport, bergförstärkning, annat).

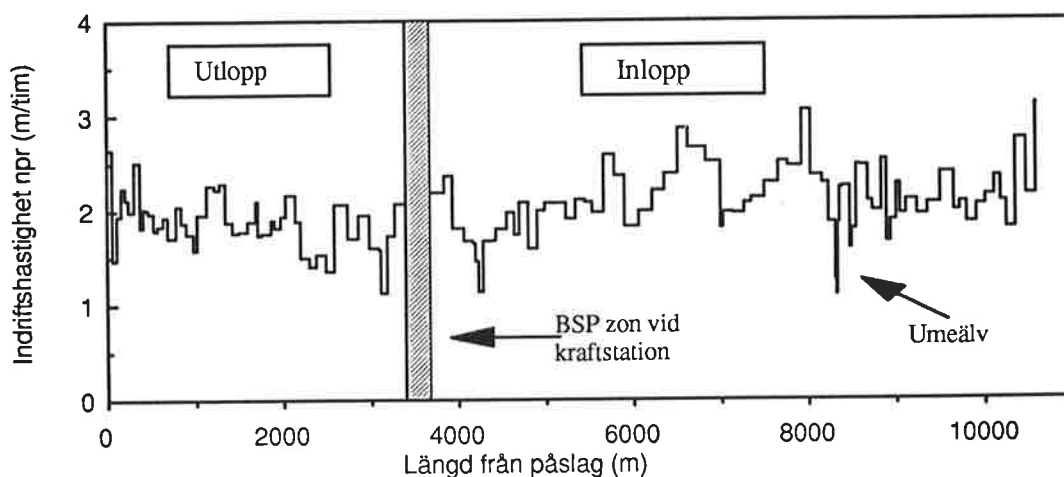
I figurerna 4.5 till 4.7, visas drivningsdata längs tunnelsträckan för de parametrar som följdes upp vid börningen av Klippen-tunneln. Dessa data kommer i kapitel 6, att användas vid utvärderingen av LuTHs prognos för drivningstid. Matningskraft, indriftshastighet och utnyttjandegrad redovisas som medelvärden och har beräknats per arbetad vecka. BSP är en förkortning av börning och sprängning. Uppgifter om matningskraften saknas för ett antal hela veckor, vilket kan ses i figuren.



Figur 4.5 Matningskraften (F) beräknad per vecka, Klippen-tunneln.

Figur 4.5, visar att matningskraften per brytrulle varierade längs drivningen av tunneln. Under de första 4000 m utnyttjades ca 200 kN/brytrulle. När börningen åter startades upp efter serviceuppehållet vid kraftstationen, ökar matningskraften successivt till en

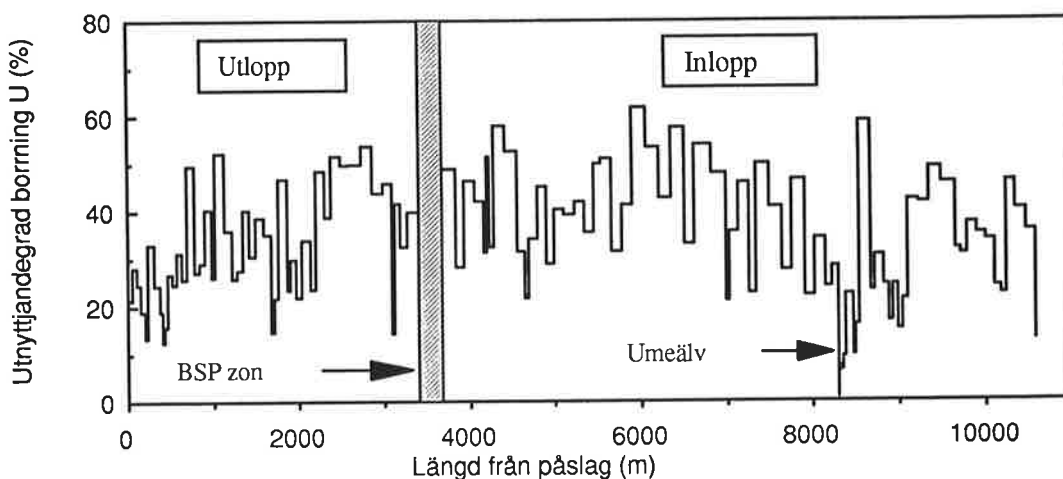
toppnivå av 260 kN/brytrulle vid 6000 m. Sedan minskar matningskraften till sin lägsta nivå (60 kN/brytrulle) vid borrhningen under älven (efter ca 8300 m). Slutet av tunneln borrhades i genomsnitt med 220 kN/brytrulle. I genomsnitt för hela tunneln utnyttjades ca 60-65 % av maskinens rekommenderade (spärrad vid 335 kN/brytrulle) matningskraft.



Figur 4.6 Indriftshastigheten (npr) beräknad per vecka, Klippen-tunneln.

Figur 4.6, visar att även indriftshastigheten minskade relativt linjärt vid drivningen av utloppstunneln. Efter stoppet i det borrhade och sprängda tunnelavsnittet, ökar indriftshastigheten succesivt till dess att drivningen nådde Umeälven. Efter passagen under älven var drivningshastigheten relativt konstant till slutet av drivningen.

I figur 4.7, har utnyttjandegraden för borrhning (U) ritats upp mot tunnelns längd.



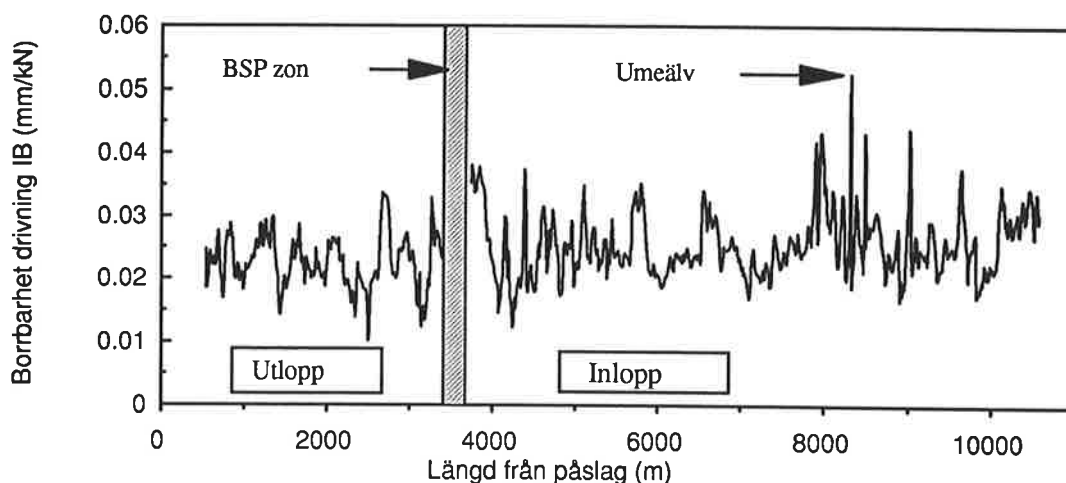
Figur 4.7 Utnyttjandegraden (U) beräknad per vecka, Klippen-tunneln.

Utnyttjandegraden vid borrhningen av tunneln, varierar mellan 20 och 60 %. Kontinuerliga förbättringar av fullborrningssystemet avspeglas i figurens första borrhade 3000 meter. Där stiger utnyttjandegraden från inkörningsperiodens (0 till ca 500 m) normalt låga utnyttjandegrad (under 20 %) till över 50 % mot slutet av utloppstunneln. Den relativt låga utnyttjandegraden för borrhning mellan 8000m till 9000 m, beror på sämre berg medförande omfattande injekteringsarbeten. Långa transportsträckor vid drivningen av slutdelen av tunneln (>5000 m) har medverkat till en minskning av utnyttjandegraden.

4.3.1 Borrbarhet vid drivning av tunneln

För att följa upp bergets borrbarhetsindex $I_B(\text{driv})$, kan indriftshastigheten (n_{pr}) delas med de två maskinberoende parametrarna matningskraft per brytrulle (F) och borrhuvudets varvtal (RPM). Detta är en enkel metod att beräkna borrbarheten, som ger en tillräckligt bra bedömning av bergets borrbarhet. Om man vill komplicera beräkningen av borrbarhetsfaktorn, så bör främst brytrullarnas kontaktyta ingå, vilken är ganska svår att beräkna (hur stor är förslitningen av brytrullens disk?, vilken inträngning ? etc).

I figur 4.8, visas det beräknade borrbarhetsindexet per skift längs hela tunnel drivningen. Linjär interpolation har använts för de skift där uppgifter saknas om matningskraft och varvtal. Kurvan har filtrerats med hjälp av successiv medelvärdesbildning.

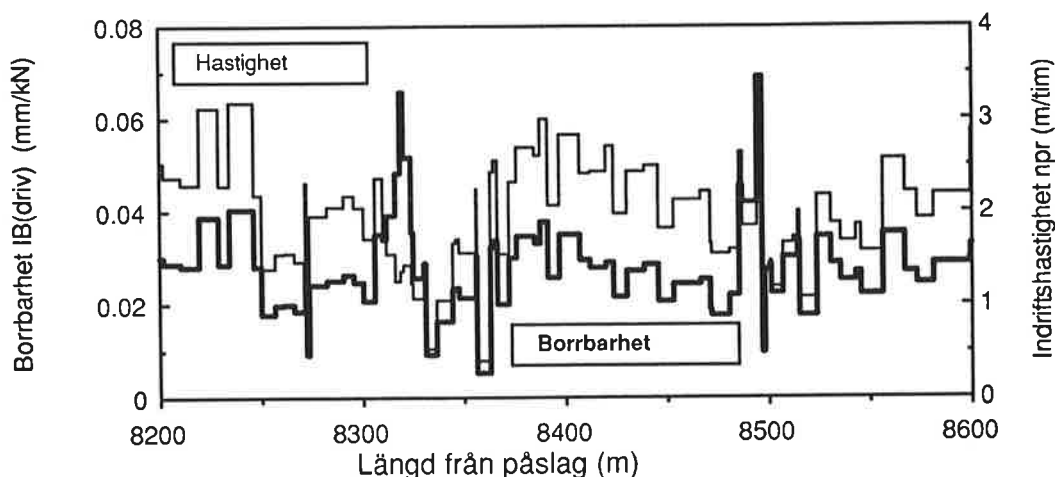


Figur 4.8 Beräknad borrbarhetsindex vid drivning (I_B) baserad på data (n_{pr} , F , RPM) från skiftrapporter.

Den stora vatteninläckningen i tunneln skedde vid tunnelsektion 8310 m ($1.2 \text{ m}^3/\text{min}$) från starten av borrhningen. Denna plats kan ses i figuren där borrbarhetsindexet vid drivningen visar det högsta värdet (över 0.05 mm/kN). Efter denna zon förekom ytterligare två zoner med stor vatteninläckning, efter 8380 m ($0.6 \text{ m}^3/\text{min}$) och 8480 m ($0.5 \text{ m}^3/\text{min}$). Beräkningen av borrbarhetsindexet vid drivningen visar att redan från ca 7600 m

börjat kurvan att stiga brant, vilket sammanfaller med det liniament som även kan ses i den topografiska kartan över området. Berget längs detta tunnelavsnitt är på flera ställen omvandlad och antalet vattenförande sprickzoner förekommer oftare vid jämförelse med tidigare i tunneln relativt homogent och torrt berg.

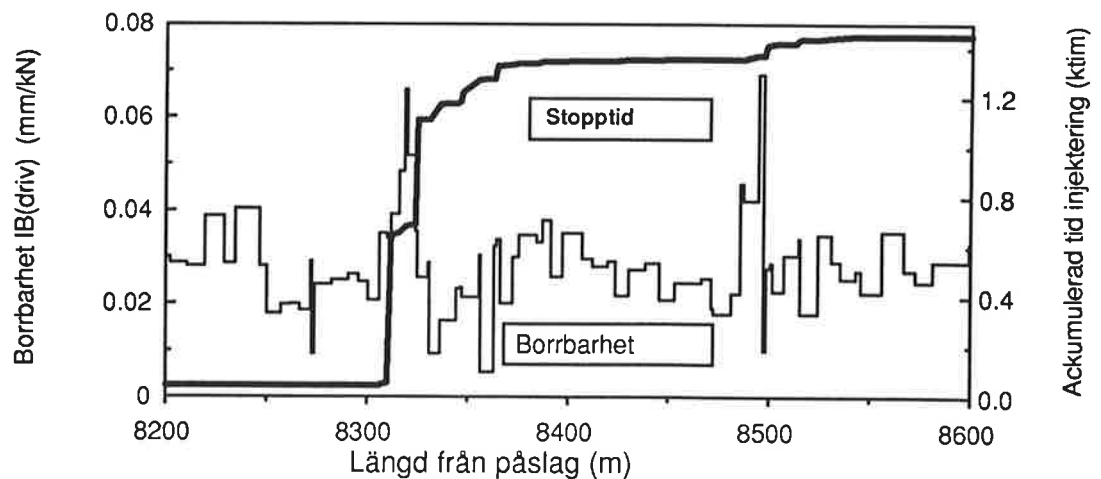
Figur 4.9, visar borrbarhetsindexet $I_B(\text{driv})$ och indriftshastighet (npr). Data har beräknats från tunneldelen där den största vatteninläckningen skedde (8310 till 8322 m), vid borrhningen under Umeälven. Den tunnare linjen representerar npr och den tjockare linjen $I_B(\text{driv})$. Jämförelsen visar att borrbarhetsindexet vid drivningen är en mer känslig parameter för att indikera bergförändringar än vad indriftshastigheten är. Kurvorna följer varandra väl, utom för den zon som förorskade det längsta driftstoppet.



Figur 4.9 Borrbarhetsindexet $I_B(\text{driv})$ och indriftshastigheten npr för tunnelavsnittet med stor vatteninläckning, Klippen-tunneln.

I figur 4.10, visas en jämförelse mellan borrbarhetsindexet vid drivningen (I_B) och den ackumulerade arbetade tid som utnyttjades för injektering och förstärkning.

Figuren visar att fram till den stora vatteninläckningen vid Umeälven (8310 m), hade ett fåtal arbetstimmar (65 tim) utnyttjats för bergförstärkning och injektering. Från 8310 m och till slutet av tunneln (totalt 2270 m) utnyttjades 33 % av arbetstiden för injektering och bergförstärkning.



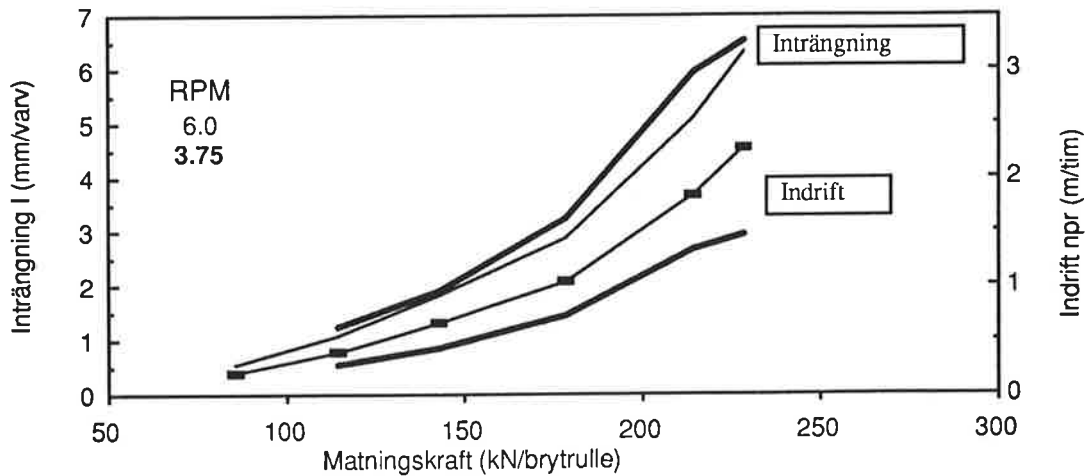
Figur 4.10 Jämförelse mellan $I_B(\text{driv})$ och ackumulerad stopptid för bergförstärkning och injektering för tunnelavsnittet med stor vatteninläckning.

4.4 Maskintester

För att öka kunskapen om hur indriften i olika bergarter påverkas vid variation av maskinparametrarna matningskraft (F) och varvtal (RPM), brukar maskintester utföras vid fullborrningsprojekt. Två olika förfaringssätt kan tillämpas, dels ett test med varierande matningskraft och dels ett med varierande varvtal, i syfte att studera brytrullarnas inträngning i berget påverkas. Det senare testet kan enbart utföras under förutsättning att maskinen är konstruerad så att varvtalet för borrhuvudet kan varieras.

Under ett matningskraftstest registreras borrlängden (inträngningen) under en viss bestämd tidsperiod (vanligtvis 3 minuter) vid borrning. Matningstrycket hålls konstant under denna tidsperiod. Testet upprepas sedan med en successiv ökning av matningstrycket. Under hela testcykeln hålls varvtalet för borrhuvudet (RPM) konstant. Vid ett varvtalstest hålls matningstrycket konstant medan borrhuvudets varvtal ändras stegvis, enligt ovanstående testcykel. Även vid varvtalstestet registreras borrlängden (indriften) per tidsperiod.

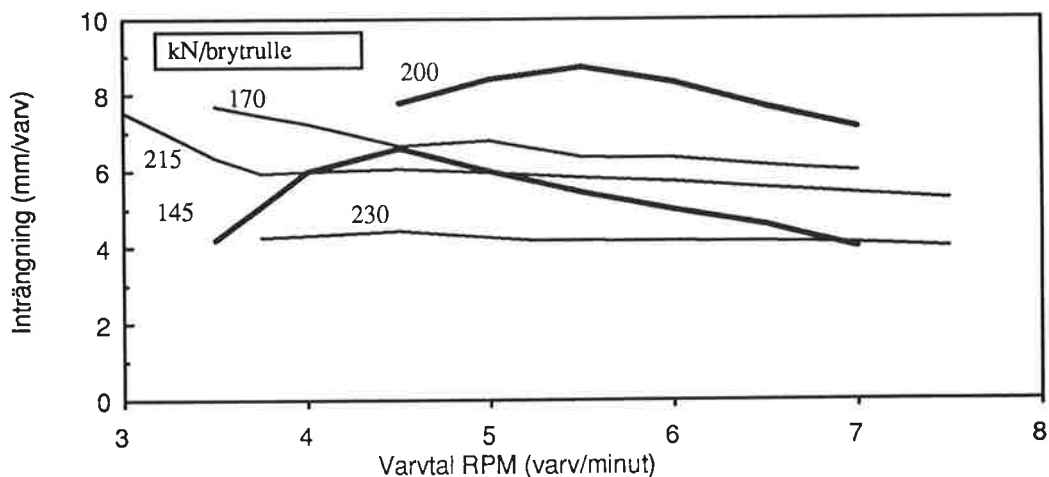
I Klippen-tunneln har totalt fyra maskintester utförts av Atlas Copco, Kraftbyggarna eller NTH. Första maskintestet utfördes efter 644 meters borrning av utloppstunneln, se figur 4.11. Maskintestet utfördes med två olika varvtal 6.0 och 3.75 (varv/minut). Bergarten karterades i efterhand och är enligt protokollet klassad att vara en ljus granitisk gnejs. I figuren visas dels inträngning per varv och dels beräknad indriftshastighet. De tunnare linjerna avser tester utförda med ett konstant varvtal av 6.0 varv/minut och den tjockare linjen med 3.75 (varv/minut).



Figur 4.11 Matningskraftstest vid position 644 meter, Klippen-tunneln.

Figuren visar ett klart samband mellan matningskraft och inträngning i mm/varv för borrhuvudet, vilket även gäller indriftshastigheten. När matningskraften ökar så ökar de två parametrarna exponentiellt. Jämförelsen av inträngningen med indriftshastigheten visar att lägre varvtal ger en högre inträngning, men däremot en lägre indriftshastighet. En fördel med att använda ett lägre varvtal kan dock vara att brytrullarna avverkar en större mängd berg (större inträngning per varv, skonsammare för maskinsystemet) innan diskarna på brytrullarna är nedslitna. Då kostnaden är hög för brytrullar vid TBM drivning i hårda slitande bergarter, kan det vara optimalt att minska varvtalet för att öka brytrullarnas livslängd.

Resultateten från varvtalstester utförda i Klippen, kan ses i figur 4.12.

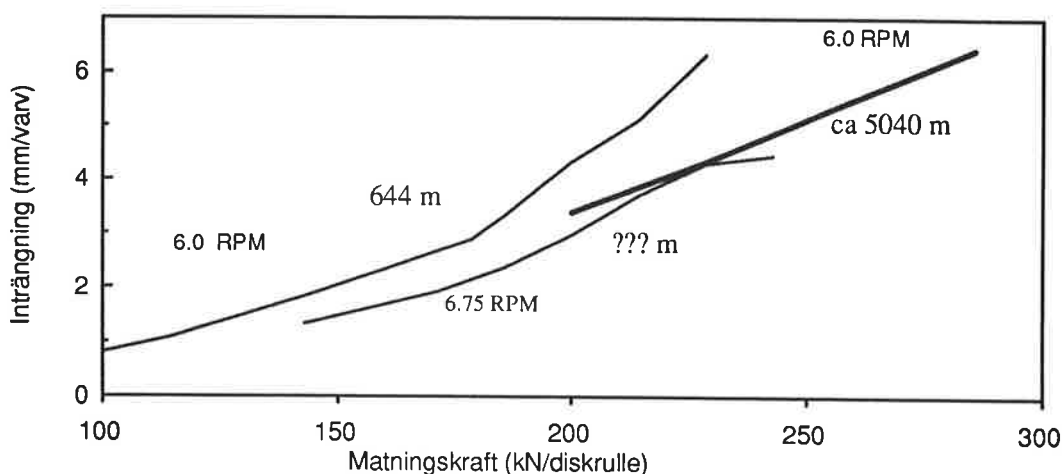


Figur 4.12 Varvtalstest efter 644 m drivning av Klippen-tunneln.

Figuren 4.12, visar hur inträngningen av borrhuvudets brytrullar varierar vid olika varvtal för borrhuvudet och vid konstanta matningskrafter. Testerna är utförda på olika platser i tunneln, vilket medför att endast kurvornas utseende går att jämföra.

Det är svårt att förklara orsaken till att några av kurvorna visar stigande värden (145 och 200 kN/brytrulle), för att sedan falla vid ökande varvtal (RPM). Enligt NTHs erfarenheter från tester och analyser av andra TBM projekt, kan dessa variationer bero på lokala geologiska variationer. Ojämn fördelning av sprickfrekvens, bergartsfördelning etc längs teststräckan kan således vara orsaken till kurvornas utseende. Personer insatta i TBM-drivningar anser att inträngningen bör minska vid ökande varvtal vid drivning i homogent likartat berg (skriftliga referenser saknas).

I figur 4.13, visas slutligen resultaten från tre av maskintesterna.. Platserna för testen var dels vid 644 m i utloppstunneln, dels NTHs test 9/3 -1993, efter ca 5000 m i inloppstunneln och slutligen ett test som utfördes på okänd plats. I figuren visas även vid vilka RPM (varv/minut) testen utfördes. Ett beräkningsexempel med data tagna från figur 4.13, ger följande resultat att för att uppnå en indriftshastighet av 2.0 m/timme krävs att matningskraften per brytrulle måste vara mellan 220 och 260 kN per brytrulle. En beräkning av medelvärde för hela drivningen av tunneln, visar att matningskraften per brytrulle var 219 kN och indriftshastigheten 1.99 m/tim.



Figur 4.13 Maskintester utförda på tre platser i Klippen-tunneln.

4.6 Kommentarer

Vid fullborrning av tunnlar finns enligt författaren inga tidigare skriftligt (därimot muntligen) avrapporterade resultat att lägre varvtal för borrhuvudet, medför att brytrullarna kan avverkar en större mängd berg innan diskarna på brytrullarna måste bytas. Att lägre varvtal medför mindre slitage och är skonsammare för maskinsystemet, är troligen en

förväntad konsekvens. Optimering av varvtalet med avseende på drivningskostnaden är ett område som bör studeras närmare.

Svårigheter uppstår när flera icke samspelta kartörer skall kartera en fullborrad tunnel, vilket exemplifieras av ovanstående kapitel. Vid personberoende metoder minskar resultatets grad av tillförlitlighet med ökande informationsmängd. Den av NTH sedan länge tillämpade karteringsmetoden, har hittills varit en acceptabel karteringsmetod. Vid karteringen bedöms huvudbergart och sprickfrekvenser i 10 m sektioner. Acceptabel noggrannhet då övriga data från drivningen (manuella skiftrapporter) varit grova vad gäller uppgifter om maskindata etc. Att prognostisera bergmassan framför drivningsfronten har dessutom inte varit en av huvuduppgifterna. Ändrade krav på bergkännedom kommer att medföra att mer objektiva undersökningsmetoder av bergmassan (MWD, geofysik etc), måste börja användas som hjälpmedel vid förundersökningar och under själva drivningen.

Stabilitet och byggbarhet är de två viktigaste parametrarna vid tunneldrivning. Jag är övertygad att om det funnits ett kontinuerligt registrerande mätsystem att tillgå i Klippen, så hade injektering kunnat förberedas och sättas in i tid för tätning av de vattenförande zonerna vid drivningen under Umeälv. Tidsvinsten för projektet skulle ha varit betydande. Det finns ett stort antal tunnelprojekt som drivits under det senaste årtiondet som kunde ha drivits mer optimalt om tillgänglig teknik (borrhålsgeofysik, MWD etc) hade använts både vid förundersökningen och under drivningen. Resurser bör skapas för forskning och utveckling vilket även gäller MWB (kontinuerlig registrering av TBM-data).

5. KONTINUERLIG REGISTRERING AV DRIVNINGSDATA UNDER BORRNING

Kontinuerlig registrering av borrhingsdata vid klenhålsborrning MWD (Measurement While Drilling), är nu en accepterad undersökningsmetod inom oljeindustrin och vid byggande i berg. Intresset att ta fram snabba tolkningsprogram för tekniken har därför ökat från byggherrar, entreprenörer och konsulter.

Metodiken att registrera TBM data kontinuerligt med hjälp av givare är inte ny. Vid TBM projektet i Wölla Österrike i början av 80-talet, användes givare på maskinen för att registrera TBM data. Via teleledningar ut ur tunneln och till platskontoret, kunde analoga bläckskrivare kontinuerligt med angivandet av tid registrera parametrarna matningstryck, strömförbrukning (vridmoment) och borrhuvudets position (slaglängd). Då analys och sammanställning av registreringar med analoga bläckskrivare blir tidskrävande, minskades intresset för tekniken och involverade parter ansåg att manuellt förda skiftrapporter var en tillräckligt noggrann metod att dokumentera drivningen.

Vid tunneldrivning har ökade krav på bl.a. kostnadseffektivitet och bättre arbetsmiljö medfört att en bättre bergkännedom nu eftersträvas för att optimera drivningen. I och med den snabba utvecklingen på elektronik och datorsidan samt erfarenheter från MWD mätningar, finns det nu möjligheter att förbättra övervakningen och registreringen av tunneldrivningen vid fullborrning.

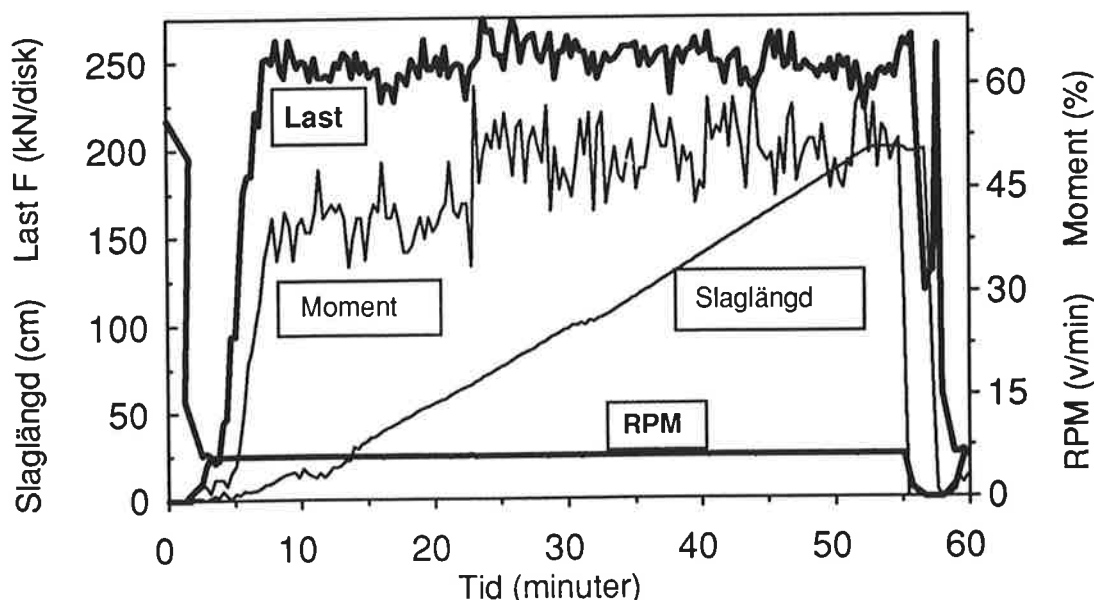
Då tekniken att kontinuerligt registrera drivningsdata vid TBM borrning inte har något vedertaget namn, kommer tekniken i fortsättningen att kallas MWB (Measurement While Boring). Detta för att skilja registreringstekniken vid fullborrning från tekniken vid klenhålsborrning (MWD).

I Klippen har utförts ett pilotförsök att kontinuerligt registrera MWB data. Förutom registrering av drivningsdata har även uppgifter om själva maskinens kondition kontinuerligt registrerats. I bilaga Mätdata under borrning sidan 1, finns listade de 80-talet parametrar som har varit möjliga att följa upp. Då inte en analys av dessa kontinuerligt registrerade MWB-data ingår i föreliggande rapport, kommer därför enbart metodik, basdata och framtida tillämpningsområden att redovisas. Beskrivning av hur datainsamlingen gick till i Klippen finns tidigare beskrivet i kapitel 2.

Andra aktiviteter i TBM projektet med högre prioritet och problem med insamlingssystemet, medförde att datainsamlingen av MWB data inte kunde starta förrän efter det att utloppstunneln (3407 m) var färdigborrad. MWB data saknas även från merparten av inloppstunnel. För inloppstunneln finns totalt ca 400 m av borrhningen registrerats med MWB, fördelade i 10m till 80 m långa tunnelavsnitt från position 3980 m från borrhstarten vid utloppet och till position 9410 m.

Följande parametrar redovisas redovisas från MWB-registreringarna i Klippen: matningskraft, vridmoment, varvtal, slaglängd och tid, se bilaga Mätdata under borrning.

Under borrhningen registrerades ett mätvärde per parameter var 20' de sekund. I figur 5.1, visas ett exempel på hur parametrarna varierar under en slaglängd.



Figur 5.1 MWB data registrerade från en slaglängd, Klippen-tunneln.

Momentet för att vrida runt borrhuvudet, är angivet i % av maximala motorbelastningen (eg. motorens strömförbrukningen). Med last avses den matningskraft (F) som utnyttjats för att trycka borrhuvudet mot bergytan i tunnelgaveln. Borrhuvudets rotationshastighet har i figuren betecknats RPM.

I bilagan Mätdata under borrhning visas även från MWB-data beräknade värden för bergmassans borrhbarhet. En bergmassas borrhbarhet är en viktig parameter vid prognosarbete och analys av drivningsdata. Denna parameter ingår i avdelningen för Bergtekniks prognosmodell för bedömning av drivningstider vid fullborrning av tunnlar. Ett borrhbarhetsindex har därför tagits fram. Indexet kan både beräknas via testning av små bergprover i laboratorier och betecknas då som $I_B(\text{test})$, eller kan beräknas med hjälp av drivningsdata från fullborrningen och betecknas då som $I_B(\text{driv})$. Vid tidpunkten då prognosen för drivningstid utförs, ingår $I_B(\text{test})$ som en viktig parameter. Vid uppföljning och analys av TBM-projekt beräknas $I_B(\text{driv})$ baserat på drivningsdata.

Borrhbarhetsindexet vid drivning $I_B(\text{driv})$, beräknas genom att dividera indriftshastigheten (npr) med de två maskinberoende parametrarna matningskraft per brytrulle (F) och borrhuvudets rotationshastighet (RPM). Problemen hittills vid uppföljningar av TBM drivningar har varit tillförlitligheten för dessa data i de av maskinföraren manuellt förda skift-rapporterna.

Data i manuellt förda skiftrapporter kan vara osäkra på grund av maskinförarens motivation, intresse och kunnsighet att avläsa och bedöma medelvärden från "fladdrande" analoga visarinstrument. Denna osäkerhet ökar vid drivning i dåligt uppkrossat berg, då själva borrarngen måste prioriteras. Kontinuerlig registrering av MWB data skapar en större möjlighet att dels under drivningen i tid upptäcka viktiga bergförändringar och dels i efterhand skapar möjligheten att på ett mer objektivt sett öka kunskapen om fullbörningsmetoden vid drivning i olika bergförhållanden.

Maskintester kan troligen utföras oftare, snabbare och med säkrare dataregistrering än vad som sker med nuvarande "manuellt" utföra maskintester. Testerna kan utföras med en mindre störning av produktionen. Teststräckorna måste besökas i efterhand för kartering, vilket inte skiljer sig från nuvarande metod.

Jämförelsen mellan MWB data och karterade bergklasser kan utföras och ge ökad kunskap vid framtida drivningar.

I dag saknas ett lätthanterligt insamlingssystem för MWB data. Detta gäller även modeller och snabba tolkningsprogram som kan indikera trender av betydelse vid den fortsatta borrarngen.

Kontinuerlig registrering av MWB data har potentialen att i en framtid att öka kunskapen om fullbörning av tunnlar i olika bergförhållanden och därmed leda till ett bättre utnyttjande av drivningsmetoden. MWB data kan då användas både under drivning, för att på förhand indikera viktiga bergförändringar och vid uppföljningen för att optimera framtida fullbörningsprojekt.

6. PROGNOSEDRIVNINGSTID FÖR KLIPPEN

Januari 1990, nästan två år innan tunneln började fullborras i Klippen, utarbetade avdelningen för Bergteknik, LuTH en drivningsprognos för den tänkta tunnelsträckan.

Prognosen baserades på ett fältbesök med provtagning av borrhälskärnor, protokoll från kärnkartering, kartor från området som visade topografi, planerad tunnelsträckning och kärnborrhålens placering. Till detta fanns refraktionsseismiska profiler med utlägg längs två delavsnitt för alternativet att borra och spränga tunneln. Kärnproverna som togs vid fältbesöket testades sedan i Luleå med ett inträngningstest och ett slitagetest (CAI).

Lämplig TBM specifikation valdes ut och en första preliminär drivningsprognos för borrhningstid togs fram. Denna prognos (1) visas i bilaga Drivningsprognos 1.

När entreprenören för Klippen-projektet utsetts valdes bl.a. ett annat TBM koncept än det som ingick i LuTH's drivningsprognos 1, för fullbörning. Entreprenören valde att använda nya utvecklade brytrullar, som av tillverkaren bedömdes klara matningskrafter upp till 350 kN/brytrulle (i prognos 1, max 200 kN/brytrulle). Detta var en ökning med ca 40 % jämfört med de brytrullar som antogs vid prognostillfälle 1. Entreprenören valde dessutom en annan arbetstid (108 tim/vecka) än vad som antogs i prognos 1 (100 tim/vecka). Baserad på dessa nya uppgifter omarbetades drivningsprognosen innan drivningen startades. Denna omarbetade prognos (2) för drivningstiden är den prognos som kommer att användas vid analys och jämförelser med verkliga drivningsdata från Klippen.

6.1 Prognos 2

En prognos 2, utfördes under hösten 1991 och baserades på av Vattenfall HydroPower utlämnat förundersökningsmaterial (kartor, tunnelsträckning, protokoll från kärnkarteringar, refraktionsseismik), inträngningstester på 7 borrhälskärnor (borrade vid utloppet, maskinstationen, älvkorsningen, intaget), maskinspecifikationer och uppgifter om utvecklingen av nya brytrullar som bedömdes kunna belastas med maximalt 350 kN per brytrulle. Observera att ingen geologisk berggrundskarta över området fanns tillgänglig vid prognostillfället. I nuvarande prognosmodellen finns ingen korrektionsfaktor för brytrullens storlek då själva kontakttrycket är den väsentligaste faktorn vid brytning, ingår bedömningen i matningskraften per zon.

Inträngningstest utfördes 1990 vid avdelningen för Bergteknik, LuTH, på borrhälskärnor från fyra avsnitt längs den planerade tunnelsträckningen (vid utloppet, maskinstationen, älvkorsningen och intaget), se tabell 6.1. Tabellen visar platsens läge för kärnborrhålet, borrhålens numrering, provets bergartsnamn, testmedelvärde från fyra inträngningstester per bergart och slutligen bergprovets slitagevärde (CAI). I Mellaneuropa finns stor erfarenhet av detta slitagetestet. I bilagan Drivningsprognos, visas en sammanställning av CAI tester för olika bergarter utförda vid universitetet i Bern, Schweiz.

I prognos 2, valdes arbetstiden att bestå av 2 st 10 timmars skift per dygn under vardagar och ett skift på lördagen à 8 timmar, totalt ger detta 108 timmar per vecka. Varvtalet för TBM valdes till 6.7 varv/minut baserat på uppgifter om vald maskin.

I prognos 2, delades tunneln in i 6 stycken zoner baserat på hur variationen i bergmassan bedömdes komma att påverka TBM-borringen. Vid platsbesöket 1990 kunde konstateras att på de platser där kärnboringar hade utförts, var berget mycket sprickfattigt. Detta gällde även kärnborrhålet som borrats ett hundratal meter nedströms tunnelpassagen under Umeälv.

Tabell 6.1 Resultat från inträngnings- och slitagetester på borrhärlor.

PLATS	BORRHÄL (beteckning enl. protokoll)	BERGART	INTRÄNGNING PBI (mm/kN)	SLITAGE CAI (1/10 mm)
UTLOPP	11	Gråsvart skiffer	0.055	2.9
MASKINSTATION	C3/70°	Glimmergnejs	0.039	1.8
	23/45°	Gnejs	0.035	
	22	Granitisk gnejs	0.015	
	22	Gnejs	0.040	
ÄLVKORSNING	E2/45°	Glimmergnejs	0.024	4.6
INLOPP	A11	Glimmergnejs	0.037	2.8

I tabell 6.2, visas de i prognos 2, ingående parametrarna och deras värden.

Tabell 6.2 Prognos 2, 12/9 1991, zonindelning och data för parametrar.

Zon	Längd (m)	Last/rulle F (kN/rulle)	Svaghets plans faktor kJ	Borrbar- het I _B (mm/kN)	Hastig- het npr (m/h)	Utnytt- jande- grad U (%)	Antal skift boring sh _b (sh)	Antal skift totalt sh (sh)
1)	270	150	1.1	0.060	3.51	10	76	83
2)	330	200	1.1	0.060	4.68	15	47	52
3)	3600	280	1.0	0.035	3.93	40	227	250
4)	3000	300	1.0	0.027	3.16	45	209	230
5)	1200	200	1.5	0.024	1.93	30	205	226
6)	2400	300	1.0	0.026	3.23	45	160	176
Totalt Medel- värde	10800	270	1.1	0.030	3.17	...36.1 (sh 32.8)	924	1017
Total arbetstid = 102 veckor								
Inkl. semester = 27 månader								

Parametrarna i tabellen ingår vid beräkningen av antalet skift borrhning som utnyttjats per zon sh_b (skift där någon del av tiden utnyttjats för borrhning) och skift totalt sh . Vid beräkningen av antalet skift totalt per zon (sh), ingår en faktor för oförutsedda problem som alltid förekommer vid fullborrning.

Baserad på erfarenheter från tidigare uppföljningar av "normala" TBM-projekt är faktorn för oförutsedda problem ca 10% av antalet skift borrhning.

Zonerna 1), 2) och 5) visar de största avvikelserna jämfört med prognosens medelvärden beträffande matningskraft och utnyttjandegrad. Prognosens värden för utnyttjandegrad och matningskraft per brytrulle har satts låga för zon 1) och 2). Dessa värden har satts mycket lågt. Så gott som alla TBM-projekt som hittills följts upp och även beskrivits i litteraturen, visar att vid starten av projektet åtgår extra tid för inkörning av de olika subsystemen (TBM, bakrigg, transport, utlastning etc), samt upplärning och samordning av arbetet. Detta påverkar negativt möjligheten att hålla en hög utnyttjandegrad för borrhning.

Under drivningen uppstår de största problemen när borrhningen skall ske genom zoner med dåligt, uppkrossat berg. Längs tunnelsträckan i Klippen finns en zon som kan ställa till problem vid drivningen och det är vid borrhningen under Umeälven, zon 5) i prognosen. Även om kärnborrhålet nedströms älvkorsningen inte indikerade någon förekomst av dåligt berg, visar både topografiska kartan och besöket på platsen att zonen kunde komma att medföra problem med låg utnyttjandegrad och sänkt matningskraft som följd.

Att matningskraften i zon 3) satts lägre än den i zon 4), beror på osäkerhet var gränsen går mellan skiffern och glimmergnejsen. Denna liksom övriga bergartsgränser fick sättas ut baserad på topografiska kartor och de kärnborrhål som borrats.

6.2 Kommentarer

En kriterielista på hur ett bra bergtest för fullborrning bör vara utformad, ställdes upp av författaren redan i början av 80-talet (Sundin 1981). Testet bör likna det avverkningssätt och slitage som sker vid verklig avverkning, ha god reproducerbarhet och vara enkel att utföra så att många prover snabbt kan testas. Dessa kriterier håller ännu i dag.

Mekanismen vid fullborrning är inträngning av en brytrulle i en inspänd bergyta och krossande avverkning. Testutrustningar som baseras på andra avverkningsprinciper (skärande, slående, sågande etc), måste därför betraktas som mer eller mindre osäkra.

Bedömningen av utnyttjandegraden är en av de parametrar som är svårast att göra vid prognostillfället. Av total tillgänglig arbetstid, kan generellt ca 40 % av tiden utnyttjas för borrhning, 40 % beror på systemberoende faktorer (reparationer, service, underhåll etc) och återstående delen 20% beror på geologi (bergförstärkning, injektering etc), inmätning av tunneln och annat. Det största problemet är således att kunna bedöma hur hela systemet kommer att fungera, från TBM i fronten till tipp. Hur arbetsorganisationen kommer att fungera tillhör även det ett av de större problemen att prognostisera.

Geologins betydelse spelar mindre roll, under förutsättning att förundersökningen är väl utförd och att det finns en plan över hur eventuella problem skall lösas och att utrustning för arbetet finns på plats. Enligt min erfarenhet från TBM projekt måste optimering och samordning av själva fullborrningssystemet ha en hög prioritet. Detta för att kunna utnyttja TBM i så hög grad som möjligt för borrhning.

För att öka kunskapen om hur fullborrningens olika delar fungerar, visas senare i rapporten (kapitel 8) ett första försök att med en statistiskt analysmetod undersöka om de olika subsystemen som användes i Klippen uppvisar några trender.

7. JÄMFÖRELSE LuTHs PROGNOSE MED DRIVNINGSDATA

I detta avsnitt kommer drivningsprognosen som togs fram av författaren till föreliggande rapport (prognos 2) att jämföras med motsvarande data från drivningen av Klippen-tunneln. Drivningsdata från borrhningen har registrerats av Kraftbyggarnas personal i Klippen. Data i form av skiftsammanställningar har sedan skickats till LuTH för vidare bearbetning och analys, se exempel i bilaga Drivningsdata.

7.1 Jämförelse prognos - drivning

Jämförelsen mellan drivningsprognosen och faktiska uppnådda drivningsdata, redovisas nedan i form av ett antal tabeller och figurer. I jämförelsen har varje zon (6 st) analyserats varför sig med de i prognosen ingående parametrarna matningskraft per brytrulle, utnyttjandegrad och indriftshastighet när maskinen borrar. Då tunneln inte har karterats mer än ca 2900 m, har inte svaghetsplanens inverkan på borrhningshastigheten analyserats för Klippen-tunneln.

I början av drivningen (21 veckor) användes i huvudsak två stycken 10 timmars skift under vardagar och ett 8 timmars skift under lördagen. Skiftens längd ändrades sedan till att täcka hela dygnets alla timmar (två 9 tim skift och ett 6 tim skift) under vardagar och med en varierande tidsinsats under lördagar och söndagar. För att kunna jämföra prognos 2, med faktiska drivningsdata, kommer en skiftlängd av 10 timmar per skift att användas som bas. Orsaken är att skifttiden ändrades under projektets gång, se kapitel 2.

Tabell 7.1 Jämförelse prognos och drivning.

	Prognos normerade skift (10 tim/skift)	Drivning normerade skift (10 tim/skift)
Projekttid 1991 - 1994		
Totala antalet skift sh_t	1017	1665
Hela skift utan borrhning	- 93	- 389
Antalet skift borrhning sh_b	924	1276

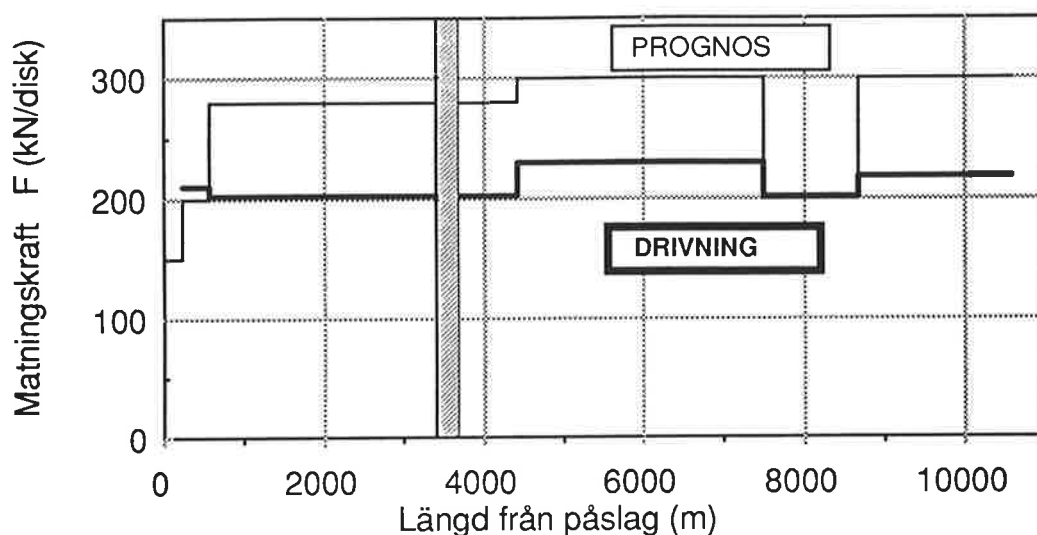
Totala antalet skift (sh_t) som prognostiserades till 1017 avviker med 64 % från drivningen av tunneln. Drivningen av Klippen-tunneln tog således längre tid att driva än vad som bedömdes i prognosen. Antalet skift där ingen del av tiden utnyttjades för borrhning blev betydligt fler än vad som prognostiserats, vilket även gäller antalet skift där borrhning utförts under någon tid av skiftet.

I skiftrapporterna kan ibland saknas uppgifter om vilken matningskraft som har använts. Detta är vanligt i början av projekt där TBM används vid tunneldrivningen. För Klippen gäller att uppgifter saknas om använd matningskraft för de första 500 m av drivningen.

Detta gäller således hela prognosens zon 1 (270 m). Om noteringar i skiftrapporter efter 500 m saknas, har dessa beräknats med hjälp av linjär interpolation mellan närmast registrerade matningskrafter.

Prognosens avvikelse från motsvarande resultat vid drivningen, visas i fyra figurer och efterföljande tabeller. Prognosens zonindelning har använts vid beräkningar av medelvärden baserad på drivningsdata.

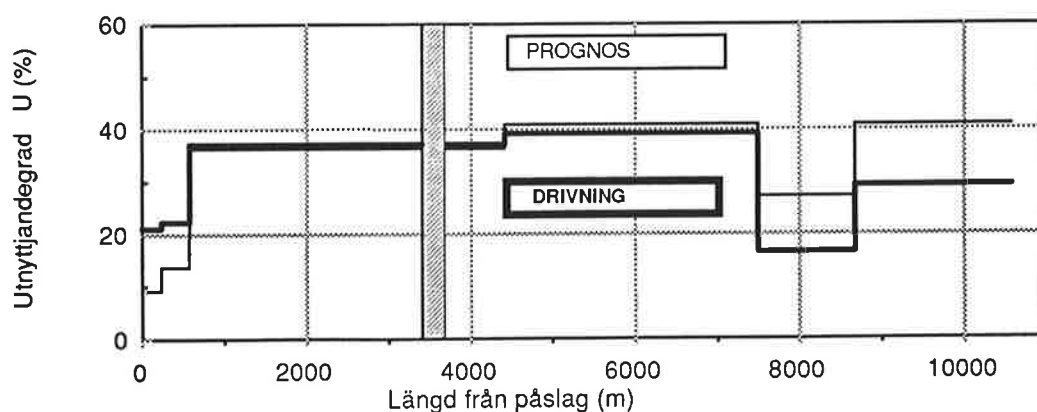
I figur 7.1, jämförs drivningsprognosens matningskraft per brytrulle med motsvarande beräkning för i skiftrapporter noterade matningskrafter. Den tunnare linjen visar värden för prognosen längs tunnelsträckan. Det sträckade området som ritats in efter 3000 m visar den del av tunneln som borrades och sprängdes vid den blivande kraftstationen.



Figur 7.1 Jämförelse prognos och drivning med avseende på matningskraft per brytrulle (kN).

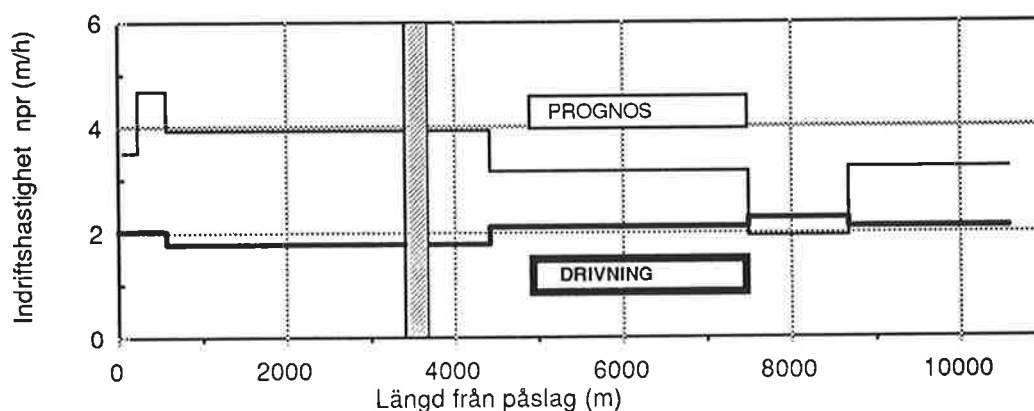
Av figuren framgår att drivningsprognosens värden klart överskrider de matningskrafter som använts vid borrningen. Detta gäller dock inte för den korta zonen 2) och för zon 5, som borrades under älvmörningen. För dessa zoner stämmer prognosens värden bra överens med uppgifterna från drivningen.

I figur 7.2, kan drivningsprognosens utnyttjandegrad vid borrning jämföras med motsvarande beräknade data från drivningen av tunneln. Den tjockare linjen visar beräknade data från drivningen. Prognosens bedömning av parametern utnyttjandegrad för borrning (U) är bättre totalt sett än för oavstående bedömning av matningskraften. Två större avvikelser finns dock, i början av tunneldrivningen och i slutet. I början av tunneldrivningen utnyttjades TBM i högre grad än vad som bedömdes i prognosen, medan i slutet av drivningen utnyttjades TBM i lägre grad för borrning än i prognosen.



Figur 7.2 Jämförelse mellan prognos och drivning med avseende på utnyttjandegrad av maskinen (%).

I figur 7.3, jämförs drivningsprognosens indriftshastighet (npr) med motsvarande uppnådda resultat från drivningen. Den tunnare linjen visar prognosens värde. I beräkningen av indriftshastigheten ingår parametern matningskraft, se bilaga Drivningsprognos. Då denna parameter visade sig vara för optimistisk i prognosen, påverkar detta även prognosens beräkning av indriftshastigheten. Prognosens beräkning av indriftshastigheten är högre än vad som presterades vid borringen, vilket kan ses i figuren. Detta gäller för samtliga zoner utom för en (zon 5), zonen där drivningen under älvfåran ingår.



Figur 7.3 Jämförelse mellan prognos och drivning med avseende på indriftshastighet (m/h).

I följande tabeller jämförs de i den totala drivningsprognosen ingående parametrarnas bedömda och beräknade värden med motsvarande data från den verkliga drivningen. Jämförelsen för varje zon kan ses i bilaga Analys prognos - drivning. I tabell 7.2 och

7.3, visas en jämförelse mellan prognos och drivning för antalet skift där någon del av arbetstiden har utnyttjats för borrar (shb), indriftshastigheten (npr) och utnyttjandegraden av maskinen då den borrar.

Tabell 7.2 *Jämförelse prognos och drivning.*

	Antalet normerade skift borrar sh _b (skift)		Nettoindriftshastighet npr (m/tim)		Utnyttjandegrad netto borrar U (%)	
	prognos	drivning	prognos	drivning	prognos	drivning
Totalt	924	1276				
Medelv.			3.17	1.99	36.1	31.2

Tabell 7.3 *Kvoter mellan parametrar vid drivning och prognos.*

Antalet normerade skift borrar Kvot (shb)	Nettoindriftshastighet 1/Kvot (npr)	Utnyttjandegrad netto borrar 1/Kvot (U)
1.38	1.59	1.16

Av tabellerna framgår att prognosens värden för parametrarna överstiger vad som totalt uppnåddes vid drivningen av Klippen-tunneln.

En fortsatt jämförelse av prognos och drivning för indriftshastigheten (npr), visas i tabellerna 7.4 och 7.5. Indriftshastigheten beräknas i prognosen med hjälp av dels en bedömning av matningskraften per brytrulle (F) och dels med prognosens borrarbarhetsindex (I_B) för bergmassan som tunneln skall drivas igenom.

Tabell 7.4 *Jämförelse prognos och drivning.*

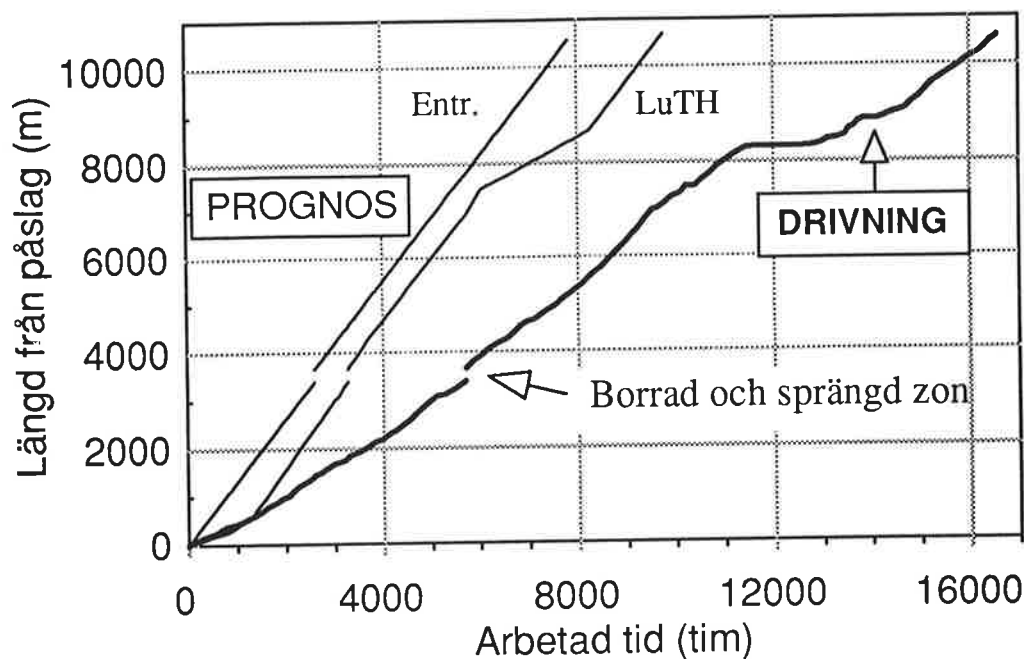
	Nettoindriftshastighet npr (m/tim)		Borrarbarhetsindex I _B (mm/kN)		Matningskraft per brytrulle F (kN)	
	prognos	drivning	prognos	drivning	prognos	drivning
Medelv.	3.17	1.99	0.030	0.024	270	216.2

Tabell 7.5 *Kvoter mellan parametrar vid drivning och prognos.*

Nettoindriftshastighet Kvot (npr)	Borrarbarhetsindex Kvot (I _B)	Matningskraft per brytrulle Kvot (F)
0.63	0.80	0.80

Tabellerna visar att prognosens stora avvikelse för indriftshastigheten beror på att bergmassan var mer svårborrad (25%) än vad som prognostiserades och att lägre matningskraft per brytrulle (25%) utnyttjades vid borrhningen av Klippen-tunneln.

I figur 7.4, visas slutligen en jämförelse mellan drivningsprognosen och motsvarande resultat från drivningen vad avser antalet arbetade timmar längs hela tunnelsträckan.



Figur 7.4 Jämförelse mellan LuTHs och Entreprenörens prognoser med resultatet från drivningen..

7.2 Kommentarer

Jämförelsen mellan prognos och drivning visar generellt att prognosens värden för ingående parametrar ligger högre än vad som uppnåddes vid själva drivningen. Den parameter som visar bästa överensstämmelsen är utnyttjandegraden. De två första zonerna prognostiserades alltför pessimistisk. Observera att dessa zoner är korta (totalt 600 m). För zonerna 3) och 4) (totalt 6600 m) visar prognosen en god överensstämmelse med resultatet från drivningen.

Avvikelsen i LuTHs prognos för belastning per brytrulle, påverkar både beräkningen av indriftshastigheten och drivningstiden i form av antalet arbetade skift. En beräkning av lasten per brytrulle för drivningen ger medelvärde 214 kN, att jämföras med prognosens 270 kN. Maskintester utförda i Klippen-tunneln, se kapitel 4.4, visar att en ökning av matningskraften med 50 kN (från 220 till 270 kN), kan medföra att indriftshastigheten ökar med ca 60 %. Denna ökning av matningskraften gör att indriftshastigheten totalt ökar från 1.99 m/tim till 3.18 m/tim och att antalet arbetade skift under drivningen minskar från 1618 till 1011 skift. Alltså små avvikelser från prognosens värden (3.17 m/tim respektive 924 skift). Orsaken till att man inte kunde använda full matningskraft per brytrulle (över 300 kN), förklaras i kapitel 2. Om högre matningskraft kunde ha utnyttjats i Klippen skulle troligen transportsystemet inte klarat av en högre massvolym vilket innebär att den totala drivningstiden skulle blivit densamma. Däremot skulle utnyttjandegraden för borrhning bli lägre och eventuellt lägre förbrukning av brytrullar och en större påfrestning (ökad service) av TBM. Vad detta skulle innebära ur kostnadssynpunkt är ytterligare en hypotetisk frågeställning som här inte kan besvaras.

Utnyttjandegraden för borrhning i början och i slutet av tunneldrivningen uppvisar skillnader mellan prognos och uppnådda resultat vid drivningen. I början av tunneldrivningen utnyttjades TBM i högre grad än vad som bedömdes i prognosen, detta till trots av stora problem med transportsystemet (mittskenan etc), felvända tunnor för mellanlagring på bakriggen, frysta vattenledningar etc. I slutet av tunneldrivningen har långa transporter med för låg lastkapacitet varit en förklaring till avvikelsen i utnyttjandegrad mellan prognos och utfall.

Det är svårt att bedöma hur och i vilken grad tiden för utvecklingen av det nya transportsystemet eller andra störningar av produktionen skulle ha kunnat utnyttjas för borrhning. Observera att under väntetiden på att transportsystemet åter skulle börja fungera, företogs underhåll och service av övriga system. Tider för detta redovisas inte i skiftrapporterna. Att "dålda" tider finns kan eventuellt indikeras av de, jämfört med andra TBM-projekt, låga procenttalen för service, reparation och underhåll av övriga system (TBM, bakrigg, VVE etc). I föreliggande rapport redovisas fakta om drivningen, eventuella spekulationer utifrån dessa får läsaren själv stå för.

8. REFERENSLISTA

Bergteknisk ordlista. Glossary of Rock Engineering. Tekniska nomenklaturcentralen, Stockholm, TNC 73, 1979.
Svenska Akademiens ordlista över svenska språket. 11 upplagan, ISBN 91-1-863722-1, 1986.

TESTMETODER BERG

- American National Standard ANSI/ASTM. Resistance to abrasion of large size coarse aggregate by use of the Los Angeles machine. Annual book of ASTM standards, C 535, 1969.
American National Standard ANSI/ASTM. Resistance to abrasion of small size coarse aggregate by use of the Los Angeles machine. Annual book of ASTM standards, C 131, 1976.
Belougou, P & Valantin, A & Guillon, P. Study of the picks of mining machines. Revue de l'Industrie Minerale, no 10, p 815-848, 1964.
Blindheim O T, Kielland B & Ousdal H. Borsynkindex-DRI. Prosjektrapport 6-75. Institutt for Anleggsdrift, Geologisk Institutt, NTH, Trondheim, 1975.
Burbank B B. Measuring the relative abrasiveness of rocks, minerals and ores. Pit and Quarry, vol 248, no 2, 1955.
Dubugnon O & Janach W, 1981. Small scale disc cutter tests for predicting TBM performance. Tunnel 81, Düsseldorf, 1981.
Fowell R J. A simple method for assessing the machineability of rocks. Tunnels and Tunneling, 1970.
Handewith H: Suggested tunnel investigation criteria for rock boring machines. The 8th Canadian symposium on rock mechanics, Nov 30 - Dec 1., pp. 177-186, University of Toronto, 1972.
ISRM. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. Int J of Rock Mech Min Sci & Geom Abstr. vol 15, 1978.
Lindqvist P-A & Rånman K E. Mechanical Rock Fragmentation. Chipping under a Disc Cutter. University of Luleå, Technical Report 1980:59 T.
Lindqvist P-A. Rock fragmentation by indentation and disc cutting. Some theoretical and experimental studies. University of Luleå. Doctoral thesis 1982:20 D.
Lindqvist P-A. Some comments on the Standardization of Boreability and Cuttability tests. University of Luleå. Technical report 1983:15 T.
Lindqvist P-A. Spår- och brytrulle för fullborrning. Avdelningen för Bergteknik, LuTH. Teknisk rapport 1983:66 T.
Morris R I. Rock drillability related to a roller cone bit. Dresser Industries, Hibbing. Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas. SPE 2389, 1969.
Protodyakonov M M. Mechanical properties and drillability of rocks. Fifth Symposium of Rock Mechanics, University of Minnesota, 1963.
Rånman K E. Mekanisk bergfragmentering. Optimalt radavstånd. Avdelningen för Bergteknik, LuTH. Teknisk rapport 1980:58 T.
Rånman K E. Boreability tests for full-face boring. Literature survey. Luleå University, Sweden, Div of Mining and Rock Excavation. Technical report 1981:69 T.

- Rånman K E. Borrbarhetstest med disksegment. Avdelningen för Bergteknik, LuTH. Teknisk rapport 1983:58 T.
- Schimazek J & Knatz H. Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meisselverschleiss von Streckenvortriebsmaschinen. Glückauf 1970, vol 106, 1970.
- Sundin N-O. Metoder för bedömning av slitage vid fullborrning. Litteraturstudie. Avdelningen för Bergteknik, LuTH. Teknisk rapport 1981:04T.
- Tarkoy P J & Hendron A J. Rock hardness index properties and geotechnical parameters for predicting tunnel boring machine performance. Department of Civil Engineering, Illinois University of Urbana-Champaign, 1975.

KLASSIFICERINGSMODELLER

- Barton N, Lien R & Lunde J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics, Vol 6, No 4, 1974.
- Bergman S G-A & Carlsson A. Förundersökningar i berg. Rekommendationer för förundersökningar, prognoser och utlåtande. BeFo 86:1/86, 1986.
- Bieniewski Z T. The Geomechanics classification in rock engineering applications. Int. Congr. Rock Mech., Montreaux, Vol 2, 1979.
- Bieniewski Z T. Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling. A. A. Balkema Rotterdam, Boston, 1984.
- Büchi E. Einfluss Geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine. Doktorsavhandling vid Universitetet i Bern, Schweiz, 1984.
- Detzelhofer H. 25 Jahre Gebirgsklassifizierung nach "Lauffer" im Wandel der Stollenbautechnik. Österreichische Wasserwirtschaft 31, 1979.
- Helfrich H K & Bergman M & Carlsson A & Franzen T & Granlund N & Nord G & Palmqvist K & Stanfors R. Förundersökningars värde och omfattning-BeFo 18. BeFo-rapport nr 18:2/79, 1979.
- Johannessen O & Bruland A & Johannessen B-E & Lislérud A & Movinkel T & Myrvold K. Hard Rock Tunnel Boring. Project report 1-88. The Norwegian Institute of Technology, the Division of Construction Engineering, NTH Trondheim, 1988.
- Lindqvist P-A & Sundin N-O. Den ingenjörsgelogiska förundersökningen för fullborrning. Bergsprängningskommittén, diskussionsmöte BK -85, sid 27-33, 1985.
- Nelson P & Kulhawy F. Factors affecting TBM penetration rates in sedimentary rocks. 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp 227-237, June 1983.
- Ozdemir L & Wang F D. Mechanical tunnel boring prediction and machine design. Final report. Excavation Engineering and Earth Mechanics Institute, Colorado School of Mines, Golden, 1979.
- Ross N & Hustrulid W. Development of a tunnel boreability index. Department of Mining, Colorado School of Mines, Golden, 1972.
- Sundin N-O, 1991. Prognosmodell för fullborrning av tunnlar. Tekniska Högskolan i Luleå, Avd för Bergteknik. Licentiatuppsats 1991:08 L.
- Sundin N-O & Wänstedt S. A boreability model for TBM's. The First North American Rock Mechanics Symposium, Austin. Rock Mechanics, ISBN 90 5410 380 8, 1994.
- Wang, F-D & Ozdemir, L & Miller, R: "Mechanical tunnel boring prediction and machine design". Golden, Colorado, 1977.

- Wanner H & Aeberli U. Tunneling machine performance in jointed rocks. International Congress of Rock Mechanics, Montreux, pp 573-580, 1979.
- White C G. Rock drillability index. Quart Colorado School of Mines, vol 64, no 2, 1969.
- Wickham G E, Tiedemann H R & Skinner E H. Ground Support Prediction Model - RsR Concept. Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference, AIME, New York, 1974.

FULLBORRNINGSPROJEKT

- Björkman M: Fullortsborrning av Kymmentunneln. Produktionstekniska erfarenheter. Bergsprängningskommittén, BK 87, sid 223-230, 1987.
- Buechi, E & Karnelo, E: "Preinvestigation and geological follow- up of a TBM project in Austria". ISRM Symposium, Aachen, June 26-28, pp. 771-777, 1982.
- Gustafsson G. Fullortsborrning med Wirt-maskin i Solna. Bergsprängningskommittén, sid 35-60, 1970.
- Hahn T & Tenne M. Tunnelborrning i tätort Saltsjötunneln, Stockholm. 1- Ingenjörsgologi. BeFo 220:1/89, 1989.
- Helfrich H K, 1986. Kymmen: Ingenjörsgologiska förutsättningar för TBM-drift. BeFo Bergmekanikdag, sid 279-293, 1986.
- Höglund B, Söder P-E & Forsberg B. Klippen Hydropowerstation, Geology, Investigations, Design and Construction of TBM tunnels. TBM Symposium Lucia 1994.
- Karnelo E. Tunnelborrning i tätort Saltsjötunneln Stockholm. 4 Arbetsmiljö och omgivningspåverkan. BeFo 220:4/89, 1989.
- Ljungberg U & Tollerup L. Fullborrning under Stockholm City - Projekt Saltsjötunneln. Bergsprängningskommittén, BK -87, sid 251-258, 1987.
- Lundström L & Rybäck K. Tunnelborrning i tätort Saltsjötunneln, Stockholm. 2 Vattenströmning i berggrund. BeFo 220:2/89, 1989.
- Sundin N-O & Buechi E. Follow-up the Wöllabach TBM project in Austria. Working paper, 1982.
- Sundin N-O & Karnelo E. Förundersökningsmetodik för fullborrning. Bergsprängningskommittén, sid 175-196, 1983.
- Sundin N-O & Lindqvist P-A. Comparison of predicted and encountered TBM performance for the Wöllatunnel. Luleå University, Sweden, Dept of Mining and Underground Construction. TULEA 1983:41.
- Sundin N-O. Fullortsborrning av Kymmentunneln. Prognos och uppföljning av drivningsdata för TBM. Bergsprängningskommittén, BK -87, sid 245-250, 1987.
- Sundin N-O. Fullborrad tunnel i Kymmen, NV Värmland. Prognos uppföljning och analys av drivningsdata samt geofysiska mätningar ovan jord och i tunneln. BeFo 140:1/88, 1988.
- Sundin N-O, Blindheim T, Janzon H & Tollerup L. Tunnelborrning i tätort Saltsjötunneln, Stockholm. 3 Drivningsdata, prognos och utfall. BeFo 220:3/89.
- Sundin N-O & Karlsson B. Fullborrning av Ormentunneln, Stockholm.. Prognos, uppföljning och analys av drivningsdata. BeFo 451:1/92.
- Tollerup L & Bergman S-E. Fullborrning under Stockholms City-Projekt Saltsjötunneln. Bergsprängningskommittén, BK -88, sid 89-110, 1988.
- Tollerup L. Fullborrning under Stockholms City - Projekt Saltsjötunneln. Bergsprängningskommittén, BK -89, 1989.

- Toolanen B & Nilsson B. Uppföljning av TBM-borrning i Klippen samt utblick mot Hal-landsåsen. Bergsprängningskommittén, Diskussionsmöte BK -94, sid 119-124, 1994.
- Toolanen B & Nilsson B. Uppföljning av TBM-borrning i Klippen samt utblick mot Hal-landsåsen. Bergsprängningskommittén, Diskussionsmöte BK -94, sid 119-124, 1994.
- Öhman I. Fullortsborrning med Demag-maskin i Huddinge. Bergsprängningskommittén, sid 61-79, 1970.

ÖVRIGT

- Blindheim O T & Olsson M, 1983. Undermarksbyggande i svagt berg. 2B Fullortsborr-ning, Fräsande brytning. BeFo 106, 1983.
- Ozdemir L & Miller R J. Cutter Performance Study for Deep Based Missile Egress Excavation. Department of Mining, Colorado School of Mines, Golden, 1986.
- Persson P A & Schmidt R L. Mechanical Boring or Drill and Blast Tunnelling. First US - Swedish Underground Workshop Stockholm, December 5-10, 1976. ISBN 91-540-2675-X, 1977.

BILAGOR

	<u>Antal sidor</u>
FULLBORRNINGSSYSTEM	2
DRIVNINGSDATA	2
DRIVNINGSPROGNOS 1	3
ANALYS PROGNOS-DRIVNING	1
MASKINTESTER	1
MÄTDATA UNDER BORRNING (MWB)	6

TUNNELBORRNINGSMASKIN

TBM	Atlas Copco Jarva Mk 27
Vikt	650 ton
Diameter	6.5 meter
Matningskraft framåt	1850 ton, spärrad vid 1400 ton
Antal fastspänningsplattor ("grippers")	2 par
Matningskraft fastspänningsplattor	2 800 ton/par
Antal brytrullar	totalt 41 st varav 4 center, 31 front och 6 periferi
Max rotationshastighet borrhuvud	7.5 varv/minut
Antal motorer	6 st elektriska, 660 V asynkron om 525 W
Kraftöverföring	6 st planetväxellådor monterade på elmotorena, utväxling 1450:1
Styr- och reglersystem	PLC Mitsubishi Melsec A2N, 24 V

BAKRIGG

Bakrigg	Fosdalen Industrier (Norge)
Längd	140 meter
Mellanlager	12 st roterande trummor a' 10 m ³
Vikt mellanlager	Tom 300 ton, fullastad 520 ton
Spårssystem	Enkelspår med mittskena för RH-Systemets friktionsdrift
Filtersystem	ABB Fläkt med självrensande keramiska filter, stoftavskiljningsgrad 99.99 %
Styr-och reglersystem	PLC Mitsubishi Melsec A2C, 110 Vt
Bandtransportör	2 st varav en skyttlande, Fosdalen Industrier
Elsystem	220/380 V
Ventilationssystem	Inkommande Ø 1400 mm

TRANSPORTSYSTEM

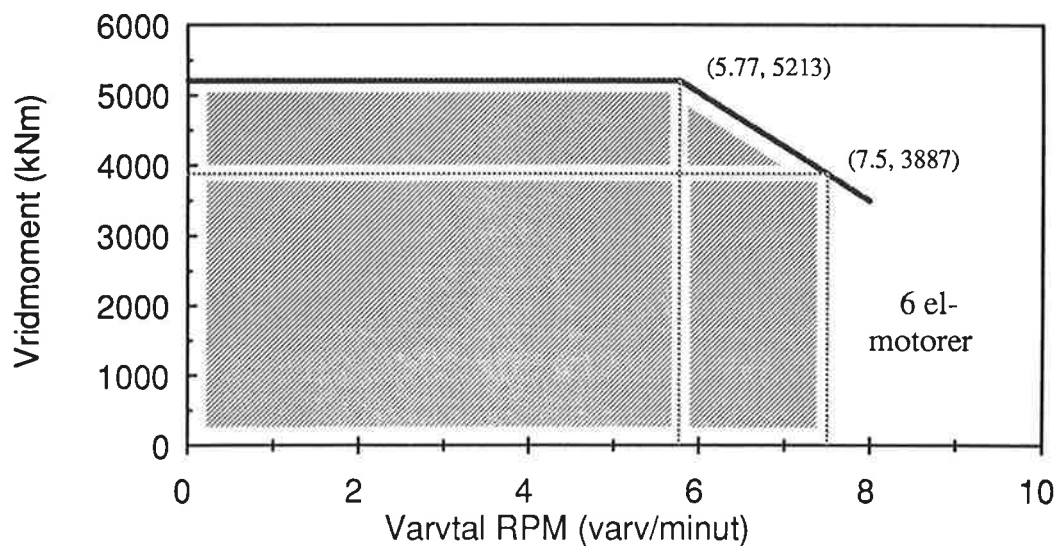
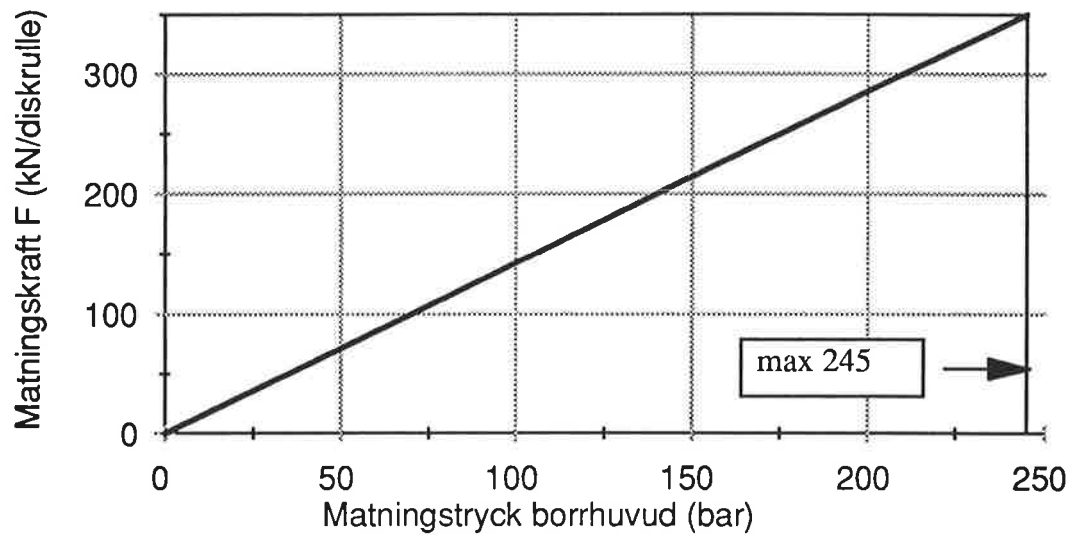
RH-System	Kraftbyggarna Entreprenad AB
Spårvidd	891 mm
Lok motorenhet	
Vikt	20 ton
Längd	7.1 meter
Bredd	1.7 meter
Höjd över r.ö.k.	2.05 meter
Motor	Scania DH 14 C, 470 hk
Dragkraft boggiedrift	Max 250 kN
Dragkraft friktionsdrift	Max 250 kN
Max hastighet boggiedrift	32 km/tim
Max hastighet friktionsdrift	10 km/tim
Bromssystem	Hydrostatiskt, boggie- och friktionsdrift
Styr- och reglersystem	HTC, KG Knutsson
Hydraulmotor boggiedrift	Poclain MS 05
Hydraulmotor friktionsdrift	Poclain MS 83

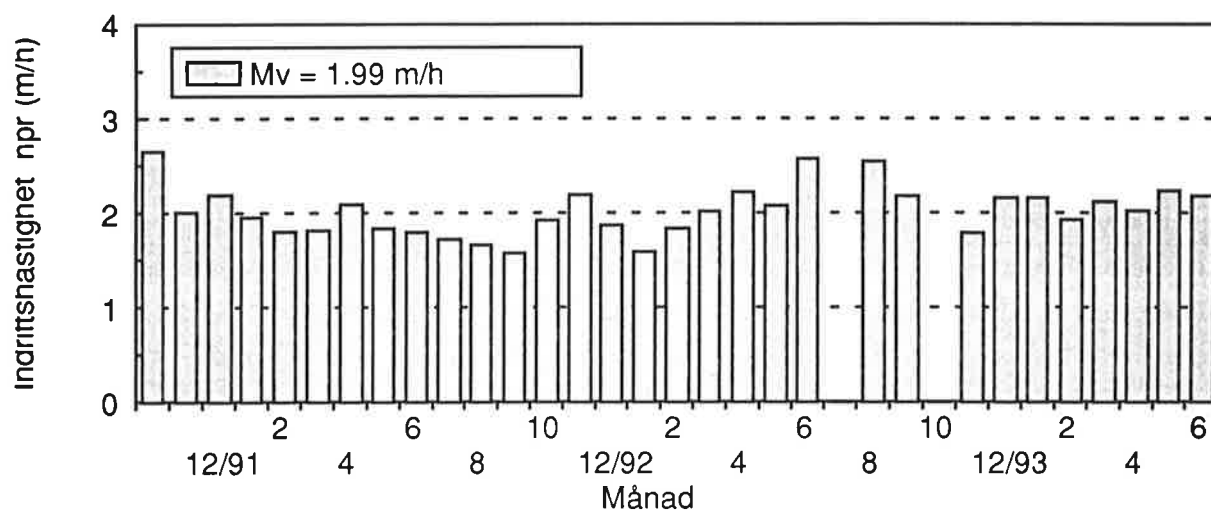
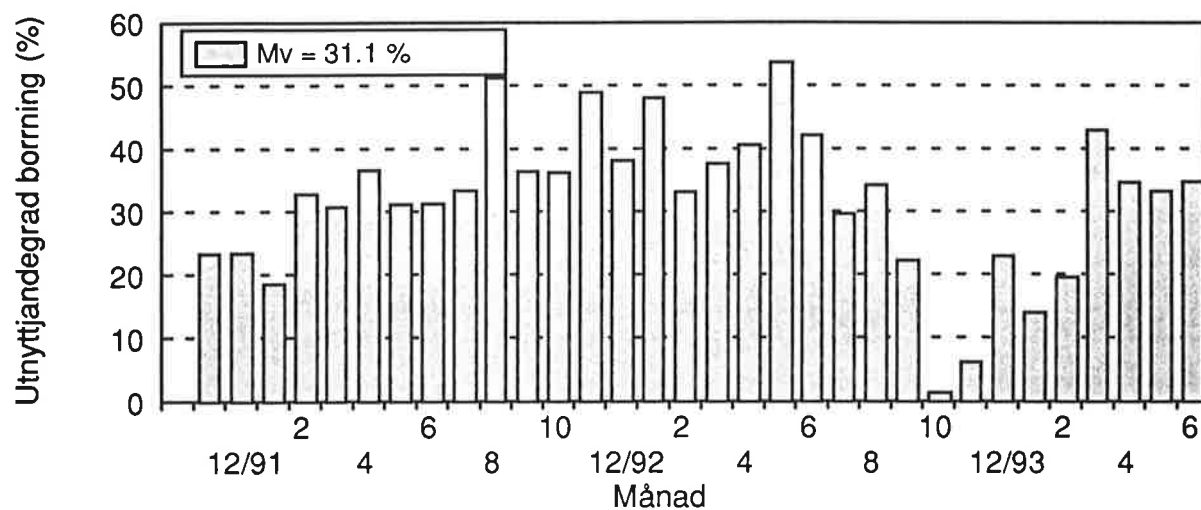
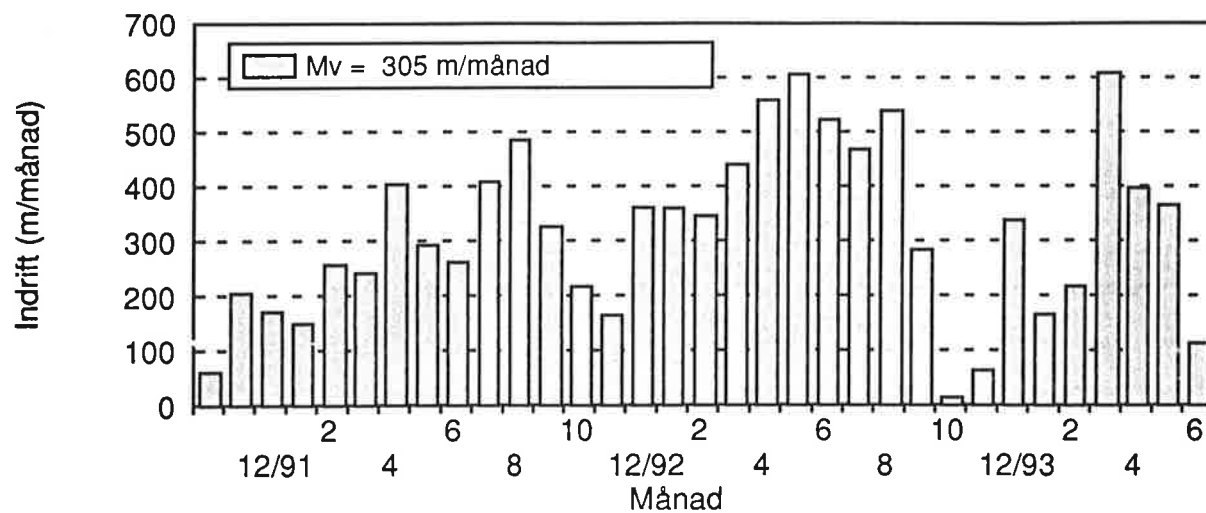
Förarenhet lok

Vikt	10 ton
Längd	7.5 meter
Bredd	1.7 meter
Höjd över r.ö.k.	2.0 meter
Sittplatser	10 st inkl. förare
Nödbroms bromskraft	500 kN

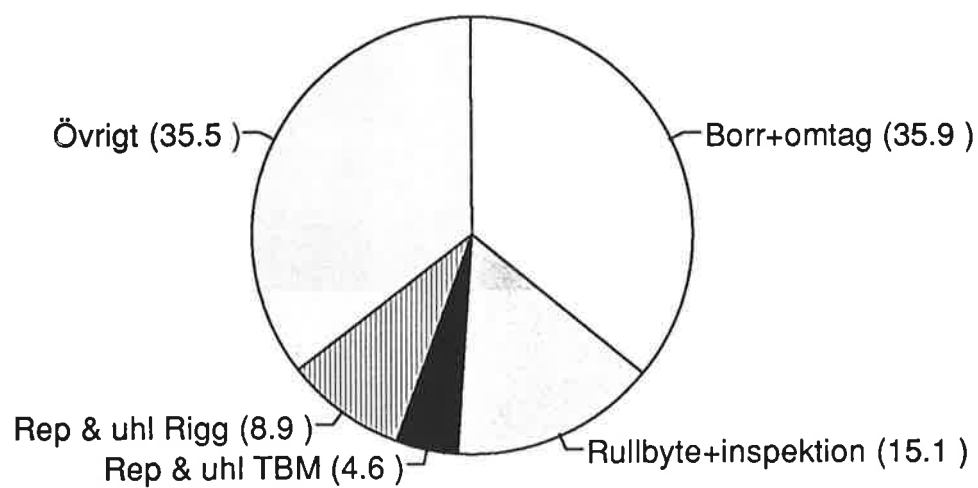
Vagnar

Vikt	7 ton
Längd	9 meter
Höjd över r.ö.k.	2.0 meter
Lastkapacitet	20 m ³ , max last 35 ton
Antal vagnar per tågset	5 st vid lutning 1:7 och dubbla dragare

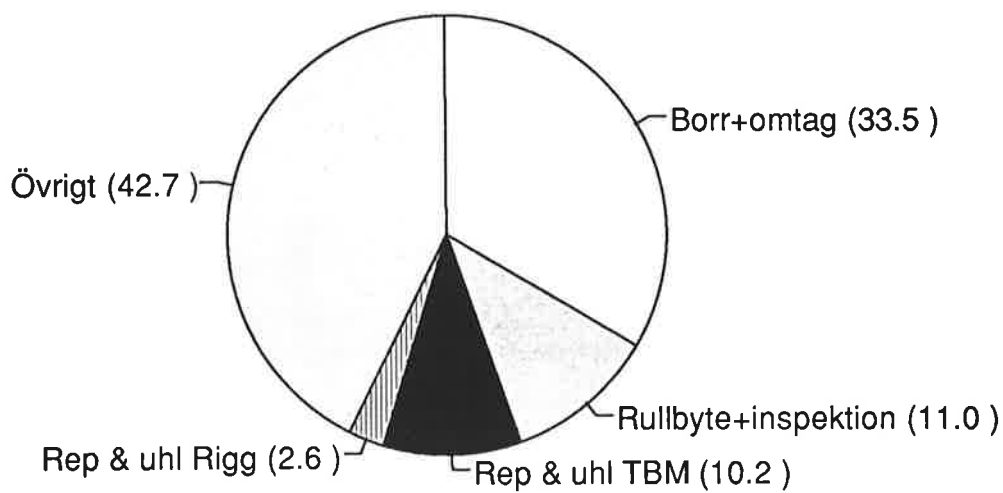




UTLOPP



INTAG



KLIPPEN PROGNOS DRIVNINGSTID TBM (PROGNOS 1, 1990)

En TBM borrar tunnel med diametern 6.5 m, area 33 m² anses vara nödvändig för att klara av vattenföringen i Klippen. För att klara samma vattenföring krävs att den sprängda starttunneln och avslutningen vid dammen utförs med en area av 55 m². Orsaken till detta är att vid fullbörning skapas en cirkulär tvärsnittsarea med jämna, släta väggar som underlättar laminär strömning och motverkar turbulens i vattnet.

Generellt planeras fullbörningen att utföras av tre skiftlag, som arbetar 10 tim/skift i totalt 10 skift per vecka. Till detta kommer ett 8 tim skift på lördagen, totalt således 108 h/vecka. Varje lag består av 6 man plus en extra man under dagtid.

TESTER**Slitage-test**

Vid det franska forskningsinstitutet Cerchar har man tagits fram ett slitagetest, där ett cylindriskt stål-stift med 90° konisk spetsvinkel som testare. Stiftet trycks med en last av 70 N mot en rå provyta och dras 10 mm. Diametern på stiftets slitageyta mäts sedan i ett mikroskop. Detta mått i tiondels mm används sedan som ett mått på bergprovets slitande förmåga. Medelvärde från 5 stiftdragningar per bergart ger slitagevärdet CAI. Skalområdet går från 0 till 6.

Resultaten i tabellen kommer från en sammanställning av slitagetester (CAI) utförda på ett stort antal bergarter vid Universitetet i Bern, Schweiz.

Bergart	Medelv. (CAI)	1 (CAI)	2 (CAI)	3 (CAI)	4 (CAI)	5 (CAI)	6 (CAI)
Kalksten	1.2	-----O-----					
Sandsten *	2.5		-----O-----				
Sandsten **	3.4			-----O-----			
Basalt	2.7		-----O-----				
Andesit	3.0			--O--			
Amfibolit	3.7				---O---		
Kristallin	3.2			-----O-----			
Skiffer							
Gnejs	4.4				-----O-----		
Diorit	4.6					---O---	
Granit	4.9						---O---

* Karbonatisk matrix

** Kvartsitisk matrix

KLIPPEN PROGNOS DRIVNINGSTID TBM (PROGNOS 1, 1990)

En TBM borrar tunnel med diametern 6.5 m, area 33 m² anses vara nödvändig för att klara av vattenföringen i Klippen. För att klara samma vattenföring krävs att den sprängda starttunneln och avslutningen vid dammen utförs med en area av 55 m². Orsaken till detta är att vid fullborrning skapas en cirkulär tvärsnittsarea med jämna, släta väggar som underlättar laminär strömning och motverkar turbulens i vattnet.

Generellt planeras fullborrningen att utföras av tre skiftlag, som arbetar 10 tim/skift i totalt 10 skift per vecka. Till detta kommer ett 8 tim skift på lördagen, totalt således 108 h/vecka. Varje lag består av 6 man plus en extra man under dagtid.

TESTER**Slitagetest**

Vid det franska forskningsinstitutet Cerchar har man tagits fram ett slitagetest, där ett cylindriskt stålstift med 90° konisk spetsvinkel som testare. Stiftet trycks med en last av 70 N mot en rå provyta och dras 10 mm. Diametern på stiftets slitageyta mäts sedan i ett mikroskop. Detta mått i tiondels mm används sedan som ett mått på bergprovets slitande förmåga. Medelvärde från 5 stiftdragningar per bergart ger slitagevärdet CAI. Skalområdet går från 0 till 6.

Resultaten i tabellen kommer från en sammanställning av slitagetester (CAI) utförda på ett stort antal bergarter vid Universitetet i Bern, Schweiz.

Inträngningstest

Vid prognoser av drivningshastigheter (npr) för TBM projekt, används vid LuTH ett inträngningstest. Tillämpning och utformning av testet har ursprungligen beskrivits av Handewith, 1972. Ett modifierat test har sedan tagits fram vid LuTH och beskrivits av K E Rånman, 1982. Kortfattat går testet till på följande sätt. Det verktyg som används vid LuTH har en hemisfärisk spets av hårdmetall, radie 6 mm. Verktöget pressas stegvis in i ett sågat och ingjutet bergartsprov. Inpressningen sker i ca 5 st cykler, med en successiv inträngning av 0,5 mm per cykel. Last och inträngningsdjup registreras på en XY-plott. För varje cykel noteras sedan maximal last (P) och hur långt verktyget trängt in i provet vid avlastning (D). Utifrån dessa värden kan sedan varje bergartsprovs inträngningsindex (P_{BI}) bestämmas. För att få ett säkrare index för själva bergarten, bör testet utföras på minst 4 stycken prover. Baserat på resultaten från dessa tester beräknas sedan ett medelvärde.

Restresultat från tester på Klippen-prover

Inträngningstester har utförts på 7 bergartsprover från borrhålor. På 4 av dessa har även ett franskt slitagetest utförts. I tabellen visas provplats, borrhål, bergart och värdena för inträngning och slitage.

PLATS	BORRHÅL	BERGART	INTRÄNGNING P_{BI} (kN/mm)	SLITAGE CAI (1/10 mm)
UTLOPP	BH 11	Skiffer gråsvart	0.055	2.9 ± 0.3
MASKINSTATION	BH C3/70°	Glimmergnejs	0.039	1.8 ± 0.4
	BH 23/45°	Gnejs grå	0.035	
	BH 22	Granitisk gnejs ljus	0.015	
	BH 22	Gnejs grå	0.040	
ÄLVKORSNING	BH E2/45°	Glimmergnejs ljusgrå	0.024	4.6 ± 0.7
INTAG	BH A11	Glimmergnejs ljusgrå	0.037	2.8 ± 0.2

Prognos drivningstid Klippen

Prognosen baserades på:

- Borrbartestester på kärnor borrade i området.
- Topografiska kartor över området.
- Refraktionsseismiska mätningar.
- Erfarenhetsdata från tidigare prognosarbeten och uppföljningar.

I prognosen har tunneln delats in i 6 zoner, i riktning från utloppet till intaget. I prognosen börjar tunneln med en 200 meter lång borrhål och sprängd startkammare. Varje zon har bedömts med avseende på maskinens tänkta matningskraft och utnyttjandegrad, samt förekommande bergarters och svaghetszoners inverkan på drivningsresultatet. Maskindata som ingår är en TBM (6.5 m i diameter) med ett varvtal av 8 r/min. I prognosen antas maximal matningskraft vara 200 kN/brytrulle. Beräknade värden för varje zon samt totalt kan ses i tabellen nedan.

ZON	ZONLÄNGD	LAST/BRYT -RULLE	FAKTOR SVAGHETS -PLAN	INDRIFTS- HASTIGHET	UTNYTT- JANDEGRAD	ANTAL SKIFT
	L (m)	F (kN)	k_I	npr (m/h)	U (%)	sh_h (skift)
1)	300	180	1.0	4.72	15	43
2)	300	200	1.0	5.24	30	19
3)	3600	200	0.7	2.39	40	377
4)	3000	200	0.7	2.07	45	322
5)	1200	180	1.5	3.07	30	131
6)	2200	200	0.7	2.04	45	240
TOTALT	10600					1132
MEDEL				2.33	36.5	

Prognosen 1132 skift är optimistisk då inte tid för oförutsedda problem ingår. En troligare siffra är 1245 skift (+10 %). I sämsta fall tar det ytterligare 10% tid att driva tunneln med ovanstående förutsättningar. Motsvarande veckoindrifter blir för "optimistisk" prognos 94 m/v (inga skift utan borring), trolig 85 m/v och för "pessimistisk" prognos 78 m/v.

REKOMMENDATIONER

Vid förundersökningar där fullboring kan tänkas ingå som ett alternativ bör följande bergmasseparametrar beaktas:

- zoner med riktigt dåligt berg som t.ex. krosszoner, vittrat instabilt berg etc.
- breda zoner med mycket hårt och ouppsprucket berg.

Provtagningsmetoder

Provtagning bör ske av huvudbergarterna. Borring av kärnor är den enda metoden som går att använda då tunnelväggen är slät. Lämpliga testmetoder kan vara tryckhållfasthet, punktlasttest, inträngningstest och slitagetest. Omfattningen av provtagningen måste bestämmas på platsen. Antalet test bör dock kunna begränsas till ett 10-tal.

Ett antal maskintester bör ske i olika berartszoner längs tunneln, för bestämning av hur variationer i matningskraft påverkar indriften.

Uppföljning

Tidigare uppföljningar av TBM projekt har visat att arbetet med underhåll är mycket viktigt för att upprätthålla en så hög utnyttjandegrad av maskinen som möjligt.

Drivningsdata bör registreras på bra utformade skiftrapporter. Om möjligt bör en skrivare installeras så att varje borrhängd kan registreras vad gäller tid, längd, matningstryck och strömförbrukning (se Wölla rapporten).

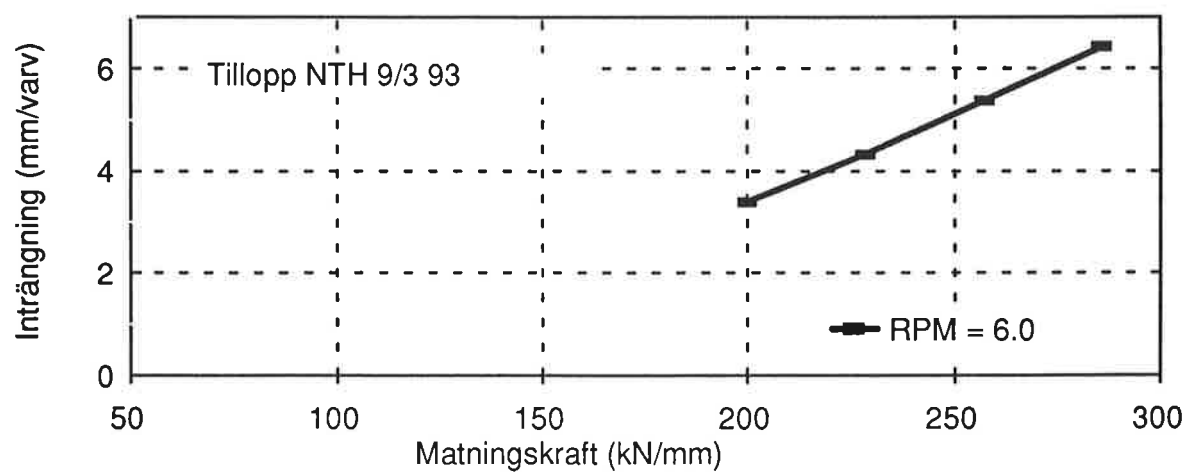
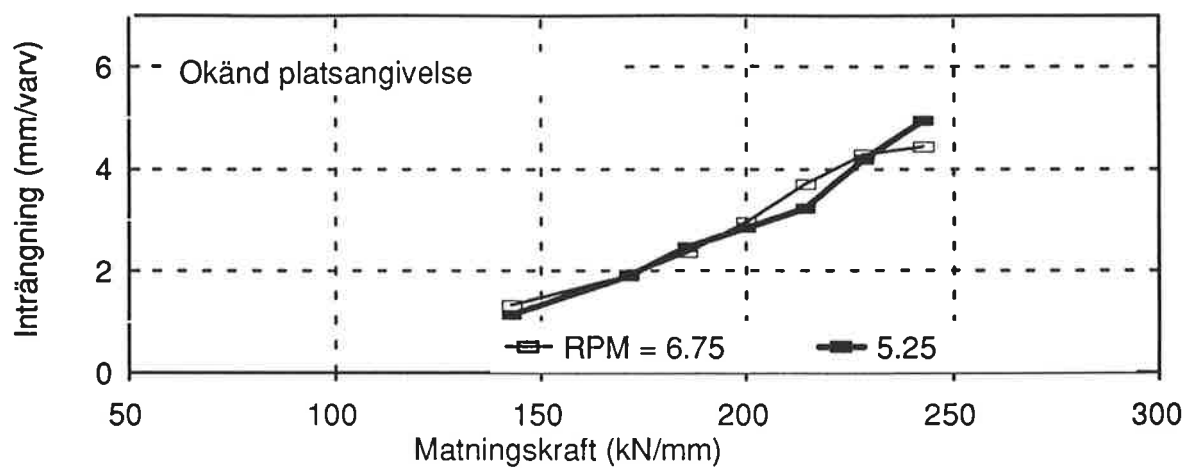
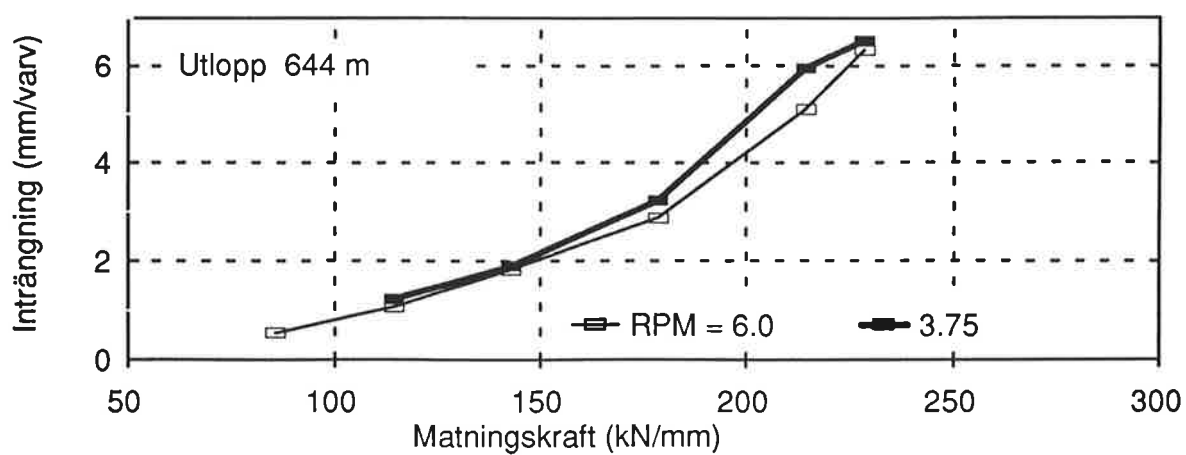
För att underlätta den geologiska karteringen av tunneln, bör längdmätning utföras av maskinföraren och noteras på tunnelväggen.

Zon	Antalet normerade skift borrhning sh_b (skift)		Nettoindrifths-hastigheten npr (m/tim)		Utnyttjandegraden vid borrhning U (%)	
	prognos	drivning	prognos	drivning	prognos	drivning
1)	76	58.8	3.51	2.02	10	23.2
2)	47	42.5	4.68	2.10	15	19.7
3)	227	493.8	3.93	1.78	40	37.0
4)	209	294.7	3.16	1.78	45	40.8
5)	205	145.4	1.93	2.23	30	15.9
6)	160	240.8	3.23	2.12	45	30.2

Zon	Antalet normerade skift borrhning K_{vor} (sh_b)	Nettoindrifths-hastigheten $1/K_{vot}(npr)$	Utnyttjandegraden vid borrhning $1/K_{vot}(U)$
1)	0.77	1.74	0.43
2)	0.90	2.23	0.76
3)	2.18	2.21	1.08
4)	1.41	1.78	1.10
5)	0.71	0.87	1.89
6)	1.51	1.52	1.49

Zon	Nettoindrifths-hastigheten npr (m/tim)		Borrhbarhetsindex $I_B(\text{driv})$ (mm/kN)		Matningskraft per brytrulle F (kN)	
	prognos	drivning	prognos	drivning	prognos	drivning
1)	3.51	2.02	0.060		150	
2)	4.68	2.10	0.060		200	
3)	3.93	1.78	0.035	0.022	280	206.7
4)	3.16	1.78	0.027	0.020	300	237.7
5)	1.93	2.23	0.024	0.028	200	209.5
6)	3.23	2.12	0.026	0.026	300	212.9

Zon	Nettoindrifths-hastigheten $1/K_{vot}(npr)$	Borrhbarhetsindex $K_{vot}(I_B(\text{driv}))$	Matningskraft per brytrulle $K_{vot}(F)$
1)	1.74		
2)	2.23		
3)	2.21	0.63	0.74
4)	1.78	0.74	0.85
5)	0.87	1.17	1.05
6)	1.52	1.00	0.71



MWB-registrerade parametrar.

MÄTDATA	HÄNDELSER	HÄNDELSER
Datum	Fastsp. bak V In	Kylfläkt omformare 1
Analog tidpunkt	Fastsp. bak V Ut sakta	Kylfläkt omformare 2
Tidpunkt	Fastsp. bak V Ut fort	Omformare huvudmotor 1
Loggtyp	Fastsp. bak H In	Omformare huvudmotor 2
Loggkod	Fastsp. bak H Ut sakta	Omformare huvudmotor 3
Big time	Fastsp. bak H Ut fort	Omformare huvudmotor 4
Maskinstatus	Fastsp. fram V In	Omformare huvudmotor 5
P matning ÄR	Fastsp. fram V Ut sakta	Omformare huvudmotor 6
P matning BÖR	Fastsp. fram V Ut fort	Jogmotor normal rotation
P matning MAX	Fastsp. fram H In	Jogmotor omvänd rotation
Moment ÄR	Fastsp. fram H Ut sakta	Värmare huvudmotorer
Moment BÖR	Fastsp. fram H Ut fort	Fettsmörjsystem
Moment MAX	Matning Autoläge	Fettsystem automatik
Varvtal ÄR	Matning Retur	Smörjolja främre lager
Varvtal BÖR	Matning Framåt	Smörjolja bakre lager
Varvtal MAX	Matning Framåt fort	Oljedimsmörjsystem
Slaglängd	Bottenskrapa överst	Påfylln.pump fettsmörjsys
Borrsjunkning	Bottenskrapa Upp	Manöverspänning
Ack indr skift	Bottenskrapa Stödläge	220 v huvuddelskåp
P bottenskrapa ÄR	Bottenskrapa Flytläge	Vattenventil
P bottenskrapa BÖR	Bottenskrapa Fort	Lampa alarmnivå låg
P fastsp. fram kolvsida	Bottenskrapa Sakta	Lampa alarmnivå hög
P fastsp. bak kolvsida	Bakre stödben V avlastat	Lampa nödstopp
P fastsp. bak H kolvstång	Bakre stödben H avlastat	
P fastsp. bak V kolvstång	Broms huvudm. trycksatt	
P släpcylindrar	Broms till	
Temp. främre huvudlager	Tr.-band framskjutet	
Temp. bakre huvudlager	Tr.-band tillbakadraget	
	Transp.band normal riktn.	
	Transp.band omvänd riktn.	
	Bandförskj. Framåt	
	Bandförskj. Bakåt	
	Cirk.pump hydraulaggr.	
	Fastsp.pump hydraulaggr.	
	Matningspump hydraulaggr.	
	Hjälppump hydraulaggr.	
	Värmare huvudmotorer	
	Värmare pumpmotorer	
	Avlastning fastsp.pump	
	Avlastning matningspump	
	Avlastning hjälppump	

Datum	Analog tid	Status	Matning (bar)	Moment (%)	Varvtal (%)	Slaglängd (mm)	Ack indr (cm)
15/3 94	2.4914	5	139	29	83	2000	391
15/3 94	2.4967	5	134	30	83	2000	391
15/3 94	2.5019	5	131	30	83	1999	391
15/3 94	2.5072	5	137	28	83	1998	391
15/3 94	2.5125	4	150	26	83	1981	390
15/3 94	2.5178	4	179	0	74	1998	390
15/3 94	2.5231	4	178	0	41	1998	390
15/3 94	2.5283	4	179	0	20	1996	390
15/3 94	2.6947	0	2	0	0	1999	390
15/3 94	2.7403	1	129	0	0	1999	
15/3 94	2.7478	0	88	0	0	1295	
15/3 94	2.7531	6	90	0	0	614	390
15/3 94	2.7583	6	34	0	0	9	390
15/3 94	2.7636	6	183	0	0	5	390
15/3 94	2.7794	4	19	2	21	10	390
15/3 94	2.7847	4	20	2	52	-14	390
15/3 94	2.7900	4	19	2	81	-8	390
15/3 94	2.7953	4	15	2	83	20	390
15/3 94	2.8006	4	13	3	83	-4	390
15/3 94	2.8058	4	13	3	83	20	390
15/3 94	2.8111	4	13	3	83	-10	390
15/3 94	2.8164	4	13	3	83	29	390
15/3 94	2.8217	4	12	2	83	-11	390
15/3 94	2.8269	4	13	2	83	-8	390
15/3 94	2.8322	4	13	2	83	5	390
15/3 94	2.8375	4	20	2	83	24	390
15/3 94	2.8428	4	26	3	83	18	390
15/3 94	2.8481	4	26	3	83	13	390
15/3 94	2.8533	4	27	3	83	14	390
15/3 94	2.8586	4	27	3	83	32	390
15/3 94	2.8639	4	26	2	83	20	390
15/3 94	2.8692	4	26	3	83	28	390
15/3 94	2.8744	4	42	3	83	34	390
15/3 94	2.8797	4	54	4	83	-8	390
15/3 94	2.8850	4	56	4	83	20	390
15/3 94	2.8903	4	55	5	83	-1	390
15/3 94	2.8956	4	55	5	83	-9	390
15/3 94	2.9008	5	80	8	83	28	390
15/3 94	2.9061	5	82	8	83	39	391
15/3 94	2.9114	5	78	9	83	24	389
15/3 94	2.9167	5	81	9	83	9	388
15/3 94	2.9219	5	91	10	83	52	392
15/3 94	2.9272	5	107	13	83	24	389
15/3 94	2.9325	5	105	14	83	63	393
15/3 94	2.9378	5	116	18	83	40	391
15/3 94	2.9431	5	113	19	83	53	392
15/3 94	2.9483	5	114	18	83	78	395

Status : 1 = TBM klar på stödben; 2 = TBM klar inspänd; 3 = huvudet joggas;
4 = huvudmotor igång; 5 = TBM borrar; 6 = TBM gör omtag

