© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

BORRNING MED 9 m TBM I HALLANDSÅSEN

Sverker Hartwig
ATLAS COPCO MECHANICAL ROCK EXCAVATION AB, Stockholm

INLEDNING

De allra första Tunnel Borrnings Maskinerna (TBM), som var praktiskt brukbara, kunde endast användas i mycket mjuka bergarter. Detta gäller för såväl de "antika" TBM, som utvecklades under förra seklets andra hälft som de, som tillhörde den första generationen av moderna TBM.

Den maskin, som utvecklades och byggdes av Col. Beaumont och English 1880 sattes in 1881/83 för att driva undersökningstunnlar på den engelska och den franska sidan för en fast förbindelse under den Engelska Kanalen – redan då på tal! – i mjuk krita och i en tunnel under floden Mersey i leraktiga bergarter.

Robbins första moderna maskin kom 1951 till insats vid Oahe dammbygget i USA, där den arbetade i mycket lösa skifferformationer.

Ingen av dessa maskiner skulle ha varit så framgångsrik som den var om berget hade varit något hårdare.

De uppenbara fördelar, som är förknippade med borrade tunnlar, ledde till utveckling av maskiner, som kunde tackla allt hårdare bergarter med teknisk och ekonomisk framgång. Det går inte att förneka att dagens TBM på den punkten är långt överlägsna även dem, som kom på marknaden för inte mer än ens 20 år sedan.

Det är framför allt en ständigt ökande rotations-effekt och matningskraft, som – tillsammans med metallurgiska framsteg inom kutterutvecklingen för att kunna tillgodogöra sig den högre installerade effekten – ligger bakom de anmärkningsvärda driftsresultat som numera uppnås med hänsyn till bergets hårdhet.

De problem vi upplever idag förorsakas därför numera inte så ofta av berghårdheten i sig. Ett bevis därför levereras av det stora antalet tunnlar som med framgång drivits i det Skandinaviska urberget – och på andra ställen – i mycket hårda bergarter, som kompakt granit, gnejs och ren kvartsit.

Idag oroar vi oss dock så mycket mera över de sträckor med *dåligt* berg, som vi av erfarenhet har lärt oss kommer med mycket stor sannolikhet att dyka upp som "geologiska överraskningar" utefter tunnelsträckningar, som för övrigt helt ligger i hårda, ståndfasta bergarter.

Hur skall då en TBM vara konstruerad, som kan uppnå bra driftsresultat också under sådana förhållanden?

Det är denna fråga vi här skall försöka besvara mot bakgrund av ett aktuellt projekt, järnvägstunneln genom Hallandsåsen.

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

HALLANDSÅS-PROJEKTET

Den ca 150 m höga Hallandsåsen – ca 9 mil norr om Malmö – skiljer de annars tämligen flacka områdena utefter västkusten norr och söder om den. Den befintliga jämvägslinjen mellan Malmö och Göteborg korsar åsen via en kurvrik dalgång nära kusten söder om Båstad. För en modernisering av linjen skall en tunnel drivas genom åsen.

Anderson och Bjömer [1] har redogjort för projektets historik och den blivande tunnelns geologiska data, som sammanfattats nedan.

PROJEKT HISTORIK

Tunneln blev föremål för utredning redan 1985, då länsstyrelserna i Hallands-, Kristianstads- och Malmöhus län, tillsammans med Båstads kommun och SJ utredde en lämplig sträckning för en tunnel genom Hallandsåsen. Banverket gav 1989 Sydkraft i uppdrag att göra en förstudie av de tekniska förutsättningarna för en tunnel genom Hallandsåsen, som gav vid handen att ett tunnelbygge i den tänkta sträckningen – med anslutning till den befintliga järnvägslinjen strax öster om Båstad på den norra sidan och strax väster om Förslöv i söder – skulle vara genomförbar.

Därefter erhöll VBB VIAK uppdraget att genomföra detaljerade förundersökningar och banutredning, samt att upprätta bygghandlingar, som färdigställdes våren 1991. Banverket började förbereda upphandling med en prekvalificering vid ungefär samma tidpunkt. 91-07-10 gick anbudsförfrågan ut till de entreprenörer, som anmält sitt intresse och prekvalificerat sig. Anbuden skulle vara Banverket tillhanda 91-08-24.

Frågan om inte en dubbelspårstunnel – i stället för de två parallella enkelspårstunnlarna specifierade i bygghandlingarna – skulle vara ett lämpligt alternativ var dock icke avgjord, varför bygghandlingar också för denna lösning togs fram och sändes till entreprenörerna 91-08-16, med förlängning av anbudstiden till 91-11-28.

Vid analys av de nio anbud, som kom in, och teknisk utvärdering av de två olika alternativen, bedömdes de mot kriterierna investering, stabilitet, säkerhet och driftförhållanden. Detta gav följande vid handen:

- Dubbelspårsalternativet krävde räddningstunnlar på C/C ca 1'000 m, vilket i detta projekt var nästan ogenomförbart och skulle direkt påverka investeringskostnaden.
- Tillgängligheten för två enkelspårstunnlar under driftperioden var vida överlägsen andra alternativ.
- För två enkelspårstunnlar har Räddningstjänsten i Båstad föreslagit tvärförbindelse-tunnlar på C/C 500 m, men detta avstånd är icke låst utan avgörs under projektets gång.
- Erfarenhet från Tyskland, Schweiz, Österrike och Frankrike indikerar att särskild brandventilation icke krävs.

Utvärderingen av anbuden blev komplicerad och kompletteringsfrågor fick ställas till flera anbudsgivare. Efter intensiva förhandlingar med ett fåtal entreprenörsgrupper i början av 1992 kunde Banverket 92-03-05 meddela att entreprenaden hade tilldelats SVENSKA KRAFTBYGGARNA ENTREPRENAD AB (SKE), Luleå.

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Det intressanta i detta sammanhang är, att SKE's anbud är ett sido-anbud, baserat på drivning av tunnlarna med TBM. SKE's huvud-anbud – enligt Banverkets ursprungliga specifikation på sprängda tunnlar – låg ca 6 % högre i pris.

GEOLOGISKA DATA

Berggrund

Hallandåsen utgör ett förkastningselement – urbergshorst – vars tektoniska bildning förmodligen tilldrog sig i yngre krita, för ca 75 miljoner år sedan. Avslutningen mot Laholmsslätten i norr är markant, medan den i söder förlöper något flackare.

Berggrunden i tunnelsträckningen består i huvudsak av gnejs, ofta förkommande som granitiska ådergnejser. Foliationen är N till NV, stupningen uppgår generellt till 20 - 40°. Detta gäller framför allt den grå till grå-röda gnejsen; den röda varianten har noterats nästan massformig.

Vid kraftig foliation uppträder ofta glimmermineral i utpräglade skikt. Parallellt med förskiffringen förekommer relativt stora inslag av amfibolit, varierande från några centimeter tjocka till mäktigheter av flera tiotals meter. Amfiboliterna kan pga mineralomvandling ha biotitiserats och kloritiserats.

Genom förkastningszonerna i NV - SO riktning har magma trängt upp till ytan, sk NV diabas (som dock i engelskspråkiga rapporter benämns *dolerite*). Huvuddiabasgångarna stupar brant mot SV och kan vara upp till 100 m breda.

Det finns fyra olika spricksystem i regionen, som samtliga stupar 70 - 90°. I åsens centrala och norra delar förväntas sprickorna till stor del vara öppna och därmed sannolikt vattenförande. I den södra delen bedöms sprickorna vara igensatta av till lera omvandlat material.

Ca 1'500 - 2'000 från tunnelns södra ända förekommer en lerfylld krosszon, som man tror kan gå upp till en mäktighet av 200 m.

Ingenjör-geologiska aspekter

Vid drivningen av tunneln kommer förstärkningar av olika slag och dimensioner att vara nödvändiga, dels för att uppfylla säkerhetskraven vid själva drivningsarbetena, dels för att tillgodose säkerhetskraven för den slutgiltiga tunneln.

Förstärkningen har indelats i olika klasser kopplade till ett motsvarande Q-index intervall. Allt från enstaka bergbultar till systematisk bultning och nätning till stålbågar i kombination med extra kraftig betongsprutning förväntas komma till användning.

SMHI anger att årsnederbörden på Hallandsåsen är ca 1'000 mm. Efter avdunstning utgör ca 550 mm yt- och grundvattentillskott. Mht ovan nänmda sprickor kan höga vattentryck förväntas inom flera sektioner vid tunnelns drivning.

Ett genomgående krav från beställaren är att hela tunneln – även vid högt Q-index – skall betongsprutas. Detta krav skall ses mot bakgrund av att det totala vattenflödet i de två tunnelrören ej får överstiga 12 l/min per 100 m tunnellängd.

Vattendomstolens utlåtande gör det nödvändigt att förinjektera tunneln i zoner med öppna sprickor; i zoner med lerfyllda sprickor skall behovet av förinjektering bestämmas efter sonderingsborrning under pågående drivning.

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

PETROGRAFISK UNDERSÖKNING

I en för ATLAS COPCO's räkning sammanställd rapport lämnar Dr Ernst Büchi, från firman GEOTEST AG, Schweiz, följande uppgifter:

- Core samples from borcholes along the tunnel route and irregular samples show the following compressive strength – σ_c – values:

Rock type	Weathered	σ_c - MPa	% of tunnellength
1a Gneiss	no	195.3 ± 43.7	58
1b Gneiss	yes	86.6 ± 37.0	23
2a Amphibolite	no	207.1 ± 8.2	14
2b Amphibolite	yes	105.5 ± 19.8	4
3a Dolerite dyke	no	140 (estimate)	1
3b Dolerite dyke	yes	60 (estimate)	<1

- Photographs of the coreboxes show a quite high joint frequency. 10 - 20 cm joint distance seems to be a good average, with several areas of 2 - 10 cm joint distance.
- In general we must expect "mixed ground" conditions for the TBM excavation. This means a mixture of gneiss and amphibolite with quite different rock strength ..... the close jointing and blocky ground conditions will reduce the average applied thrust to approx. 250 kN per cutter.
- Calculated Rate of Penetration for the Mk 27 TBM: 2.1 - 3.0 (average 2.25) m/hr based on an average rpm of the cutterhead of 4.2 - 4.8 and an average cutter load of 250 kN and 200 kN for very closely jointed and weathered rock masses respectively.
- The major risk is considered to be the rock mass condition, the tunnel face stability, the influence of water and strongly weathered rock material. All of these factors may influence TBM performance in a quite significant way.

TUNNELDRIVNING

Att Büchi nämnar TBM Mk 27 beror på att SKE har valt just denna maskin för drivning av tunnlarna genom Hallandsåsen.

SKE äger sedan tidigare en Mk 27 med 6.5 m diameter för drivning av tillopps- och avloppstunnlar i Klippen vattenkraftprojektet i Norrland. Baserat på de driftsresultat, som vunnits med denna maskin – som Büchi i en annan rapport har utvärderat för ca 3 km avloppstunnel – har de satsat på ännu en maskin ur samma familj.

För Hallandsåsen projektet kommer Mk 27 att ha en nominell borrningsdiameter av 9,1 m, som framgår av maskinens huvudspecifikation, som följer härnedan:

Mk 27 - HALLANDSÅSEN – HUVUD-SPECIFIKATION

Borrnings diameter

- generellt för maskintypen 6,4 - 12,4 m
- nominell för detta projekt 9,1 m
- överborrningsdiameter upp till 9,4 m

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Borrhuvud

▫ installerad effekt	3'360 kW
▫ rotations hastighet	0 - 5,77 rpm (konstant vridmoment)
	5,77 - 10,0 rpm (konstant effekt)
▫ vridmoment	5'560 kNm (0 - 5,77 rpm)
▫ matningskraft	18'550 kN maximum
▫ kuttrar - 9,1 m diam	4 centerkuttrar, 16¼ tum
	52 front och periferikuttrar, 20 tum
- 9.4 m diam	4 överborrn. kuttrar, 16¼ tum på svängarm
▫ matningsslaglängd	2'050 mm

Fastspänning

▫ max total fastspänningskraft	67'360 kN maximum
▫ antal fastspännare	4, anordnade som främre och bakre par
▫ specifikt yttryck mot berget	2,84 MPa maximum

Drivanordning

▫ huvudmotorer, antal/typ	6 st/TEWC, 560 kW, 660 V/50 Hz
▫ reduktion, planetväxlar	43,714 : 1
pinjong/kugghjul	5,889 : 1
	257,427 : 1 total reduktion
▫ jog/start av borrhuvudet	elektrisk, med frekvens omformning
▫ förbindelse motor/planetväxel	vridmomentsbegränsningskoppling med ställbart max. överfört moment

Bandtransportör

▫ bandbredd	1'200 mm
▫ bandhastighet	0 - 2,5 m/sek
▫ kapacitet	korresponderande med ROP 6.0 m/hr
▫ bandförskjutningsdistans	5,1 m

Elektriskt system

▫ installerad effekt	- TBM	4'000 kVA
	- övriga förbrukare	360 kVA
		4'360 kVA total

Styrsystem, operatörs arbetsplats

▫ PLC baserad, manual manövrering från manöverpanel med manöverströms-nyckelbrytare, vridbrytare, tryckknappar och fel-indikeringssystem, placerad i luftkonditionerad och ljuddämpad hytt, med sluten krets TV övervakning.

Huvuddimensioner och vikt

▫ TBM längd	21,0 m total
	17,1 m till baksidan av drivanordningen
	3,9 m transportör överhäng
▫ utrustningens vikt	~ 950 ton, TBM för sig
	~ 25 ton, komponenter på bakriggen

DRIVNINGSSEKVENS

Tvillingstunnlarna kommer att drivas i följande ordning:

1. Med start vid den norra portalen kommer den östra tunneln att drivas i en i huvudsak syd-västlig riktning.
2. Efter genombrott vid den södra portalen vrids maskinen 180° i det horisontella planet och förflyttas i sidled mot väst, som förberedelse för drivning av den andra tunneln.

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

3. Med start vid den södra portalen drivs sedan den västra tunneln parallellt med den östra till genombrott vid den södra portalen.

Mk 27 - KONSTRUKTIONSBETINGELSER

Av det som sagts hittills framgår med all önskvärd tydlighet att den TBM, som skall borra sig genom Hallandsåsen, har att klara av både hårt berg och zoner med svåra förhållanden beroende på svaga bergarter och vattenförande sprickor.

Maskinen måste alltså vara något av en hybrid på så sätt, att den först och främst har kapacitet att framgångsrikt borra hårt berg men samtidigt är upplagd – och försett med sådan tillsatsutrustning – så att den också kan ta sig genom de besvärligare zonerna och kan svara mot de krav som ställts vad gäller sondering och förinjektering av berget.

I de avsnitt, som följer nedan, skall båda aspekter belysas mot bakgrund av den maskin ATLAS COPCO har utvecklat i intimt samarbete med SKE för Hallandsåsen projektet.

TBM KONSTRUKTION FÖR HÅRT BERG

TBM Mk 27 är baserad på den erfarenhet ATLAS COPCO har haft av att konstruera, bygga och lämna service till ett 70-tal TBM från 1965 tills dags dato. Det är klart att inte alla dessa har varit "stora" TBM och varit lämpliga för arbete i hårt berg; men de har alla bidragit till att utveckla fullortsborrningstekniken och de maskiner man använder till den.

Det är först under senare år man har lyckats att uppnå en sann förståelse för de problem som därmed är förknippade. Att lära sig inse vad det *egentligen* är fråga om – och att hitta de på denna insikt baserade lösningarna – kunde knappast har gjorts tidigare, för det krävde en *allmän tillgänglighet och användning av datorer* för analys av massor av fält-data, för komplexa hållfasthetsberäkningar – ofta enligt FEM (Finita Element Metoden) – för utvärdering av olika konstruktionsalternativ, för att åstadkomma mängder av sammanställnings- och detaljritningar mha CAD (Computer Aided Design), för att sätta ihop och "debugga" styrsystem, osv.

Kuttrar

Under årens lopp har kraven på höga indrifter – i allt hårdare bergarter – mötts genom att ständigt öka kutterbelastningen samt att rotera borrhuvudet allt snabbare. Detta blev möjligt genom att göra kuttrarna allt större, från en diameter på 12 tum (1980) till 15½, 16¼ och 17 tum, som blev den allmänna standarden under den senare hälften av 1980-talet.

Diameterökningen medgav användning av större lager, som tålde högre belastningar. 12 tums kuttrarna kunde ej ta mer än ca 12 ton kutterbelastning. Sedan 1985 kan de större kuttrarna ta en kontinuerlig belastning på upp till 25 ton och en rullningshastighet på 2,5 m/sek. Metallurgiska framsteg ledde samtidigt till utveckling av kutterringar i ständigt förbättrade materialkvaliteter, så att acceptabla ringlivslängder nu också uppnås i mycket hårda och abrasiva bergarter, som t ex massiv granit och ren kvartsit.

Sent på 1980-talet introducerade Robbins en 19 tums kutter med ännu större lager. Den påstås tåla 30 ton kontinuerlig belastning.

När kutterbelastningen och rullningshastigheten ökar, dyker ett problem upp, som

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

icke var så utpräglat under de tidigare åren, dvs det som har att göra med *höga kutter-drifts-temperaturer*. Den största delen av den effekt, som tillförs en kutter, omvandlas till värme. Detta sker i kontaktzonen kutterring - berg. En del av denna värme försvinner med kaxet. Pga ett mycket högre värmeledningstal flödar en mycket större del in i själva kutterringen och därifrån tillbaka in i kutternavet. Denna värme har ett negativt inflyttande på livslängden för alla kutterkomponenter och sänker kvaliteten på den olja, varmed en kutter är fylld för att smörja dess lager.

För ca tre år sedan startade ATLAS COPCO utvecklingen av en ännu kraftigare kutter, med en specifierad belastning på 35 ton. Medveten om värmeproblemet, så inriktade man sig på *vattenkylning* av kuttern från början. Denna 20 tum kutter blev tillgänglig i rätt tid för applikation på den första Mk 27 TBM, den som levererades till SKE för Klippen projektet.

Fast kuttern visade några barnsjukdomar under maskinens första körning – för den 2,8 km långa avloppstunnelsektionen i detta projekt – så överträffade livslängden såväl som borrningshastigheten de kalkyler vi gjorde före projektstarten. Eftersom orsakerna till barnsjukdomarna är kända krävs inte allt för vidlyftiga "läkarinsatser" för att kurera dem.

Även två ytterligare Mk 27 levererade till Korea för att driva pilottunnlar för motorvägstunnlar under staden Seoul samt den nu aktuella Mk 27 maskinen för Hallandsåsen är försedda med denna typ av kutter.

Borrhuvud konstruktion

Kuttrar kan endast köras under hög belastning om de är monterade på ett borrhuvud, som är "styvt" nog konstruerad för att kunna fördela den totala matningskraften helt jämnt till samtliga därpå monterade kuttrar. Ingen av dem skall få chansen att fjädra tillbaka när kutterkraft-reaktionen från berget inverkar på den: de skall alla tränga in i berget till samma djup och vid samma tillfälle, om borrhuvudet skall arbeta med optimal effekt.

Vid borrning av hårt, slitande berg kommer kutterförbrukningen att vara tämligen hög och kutterbyten måste då göras relativt ofta. För att underlätta dylika byten, måste det vara lätt att komma till huvudets framsida. Kuttrar är tunga detaljer, besvärliga att hantera, speciellt i trånga utrymmen. Huvudet bör därför ha en sk *öppen* konstruktion och skall vara relativt kort, vilket ger vida och korta passager för folk och material till framsidan och tillbaka.

Ett kort huvud har även andra fördelar:

- Det har kortare överhäng framför huvudlagret och är lättare, vilket förorsakar mindre tipp-moment på detta lager.
- Ju kortare huvudet är, desto lättare rinner kaxet in i de bak på huvudet monterade skoporna.
- I trasigt, blockigt berg löper ett kort huvud mindre risk av att blockeras utefter sin periferi och det har mindre "friktionsförluster".
- Det gör det möjligt att "tidigt" nå tunneltaket för bergförstärkning bakom dammskärmen, dvs på relativt kort distans från tunnelgaveln.

Borrhuvud stabilitet

Medan borrhuvudet pressas och roteras mot tunnelgaveln, krossar kuttrarna berget i botten på de koncentriska spår, som kuttrarna följer, varvid de tränger in en 5 - 12 mm per borrhuvud-varv, beroende på bergets motstånd och kutterbelast-

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

ning en. Under inverkan av den spänning, som på detta sätt introduceras i berget, kommer sprickor att bildas från spårets botten.

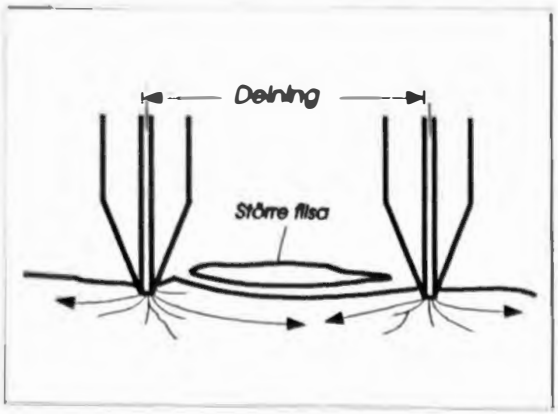

Fig. 1 Berglosstagning

Dessa sprickor utvecklar sig i ett radiellt mönster och de, som befinner sig närmast bergets fria yta kommer att sträcka sig längst, se Fig. 1. När sprickorna från två angränsande spår möts, spräcks stora flisor bort från gaveln. På detta sätt sänks ytan mellan två spår, utan att berget egentligen berörs direkt av kuttrarna. Det är logiskt att den distans över vilken sprickoma utsträcker sig är beroende av kutterbelastningen och motståndet berget erbjuder mot processen.

När en TBM skall konstrueras för en viss typ av berg, har man två variabler att "leka med": *belastningen* på varje kutter och *delningen* mellan spåren. Det är också logiskt, att – när delningen en gång "konstruerats in i maskinen" – operatören endast kan inverka på förloppet genom att ändra matningskraften.

Om en TBM skall arbeta med optimal effektivitet och minimalt kutterslitage – dvs med bästa möjliga ekonomi – är det mycket viktigt att huvudet hålls på ett *helt stabilt* sätt mot gaveln under borrning, så att det inte kan utföra excentriska rörelser och kuttrarna alltid rullar i exakt samma spår. Om en kutter tillåts att avvika i sidled, måste den börja "tillverka ett delvist nytt spår". Detta betyder att det på nytt måste penetrera berget genom att bilda en ny kross-zon under ringen och genom att bilda nya spricksystem från denna zon. Mao: den måste upprepa en del av det arbete den redan utrett förra gången den kom förbi samma ställe. Detta betyder naturligtvis minskad effektivitet, ökat slitage och höga sidobelastningar.

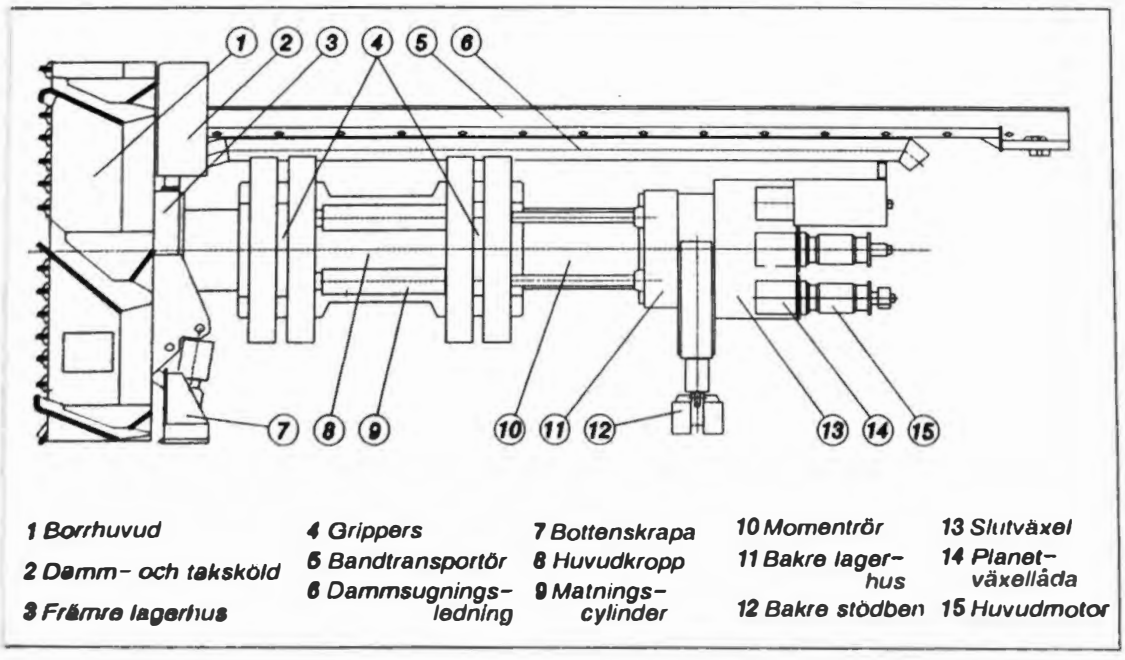

Fig. 2 Mk 27 - 9,1 m diameter version – Huvudkomponenter

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

För att säkerställa den bästa möjliga borrhuvudstabiliteten har ATLAS COPCO TBM – från allra första början – alltid varit utrustade med *dubbla "gripper"-par* – vid fram- och bakändan av huvudkroppen, så långt isär som praktiskt möjligt – för att förankra maskinen i tunneln på ett absolut stabilt sätt – se Fig. 2, som illustrerar Mk 27's allmänna uppbyggnad för 9.1 m versionen.

På detta sätt blir borrhuvudet oberoende av en stabiliserande sko direkt bakom huvudet, som glider utefter sulan – såsom används av några av ATLAS COPCO's konkurrenter – och borrhuvudet kommer att röra sig i en absolut rak linje, även när maskinen befinner sig i berg som varierar i hårdhet över tunnelgaveln.

Momentröret – som, via det främre lagret, bär upp borrhuvudet och glider genom huvudkroppen under ett borrningsslag – vilar i och styrs av stora, *lätt justerbara* glidlager av brons, utrustade med automatisk fettsmörjning för att minska friktionsförluster och slitage. Det normala lagerspelet på några tiondels mm kan således hållas i det närmaste konstant under TBM-ens livslängd.

Dessa två kännetecknande drag tillsammans – *dubbla "grippers" och justerbara glidlager* – garanterar en i det närmaste perfekt borrhuvudstabilitet.

Huvudlager, typ och konstruktion

En TBM's huvudlager bär upp borrhuvudet och är utan tvekan en av maskinens mest kritiska komponenter. Speciellt i maskiner konstruerade för att tackla hårt berg utsätts det för höga axialbelastningar och måste också ta radiella och – ibland avsevärda – excentriska laster, speciellt i berg av "blandad" hårdhet.

För mindre maskiner – säg upp till en diameter på ca 4,5 m – används i allmänhet standard dubbla koniska rullager. Denna typ är normalt lätt tillgänglig, men dess kapacitet för axiell belastning är begränsad. Större TBM, med en matningskraft på över säg 800 ton förses därför i allmänhet med special-konstruerade lager av olika andra typer.

Ett huvudlager-haveri är en mycket dyrbar historia: först och främst pga kostnaden för själva lagret, men i mycket högre grad därför att maskinen kommer att stå stilla i flera veckor för reparation, medan de fasta kostnaderna för arbetsplatsen "på tomgång" hopar sig hela tiden. Det finns naturligtvis möjligheter att – redan på konstruktionsstadiet – förkomma sådana haverier genom att:

- omsorgsfullt och exakt specifiera alla de belastningsfall lagret kommer att arbeta under, inklusive en tidsfördelning för de olika fallen;
- beräkna lagret för en tillfredsställande livslängd mot bakgrund av det specifierade belastningsspektret. ATLAS COPCO kräver en beräknad B_{10} livslängd på 30'000 hr, vilket korresponderar till ca 100 km tunneldrivning;

Medan vi, som TBM tillverkare, kan specifiera belastningsspektret, så förstår vi att lagrets konstruktion – baserad på detta spektrum – bör lämnas till specialister på området tunga lager, som t ex SKF. Lagrets konstruktion och dess arbetsmiljö, dvs det sätt på vilket det är monterat i och stöds av lagerhuset, samt dess smörjning och tätningssystem, arbetas fram i nära samarbete med denna firma.

Special-konstruerade, sfäriska rullager av olika konfigurationer används i stor utsträckning för att ta de höga axiella belastningarna på borrhuvudet.

TBM Mk 27 visar ett intressant exempel på modern lagerkonstruktion: de två huvudsakliga belastningar – radiella och axiella – tas av två *olika typer* av lager, som dessutom är monterade på två helt *olika ställen* i maskinen, se Fig. 3.

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

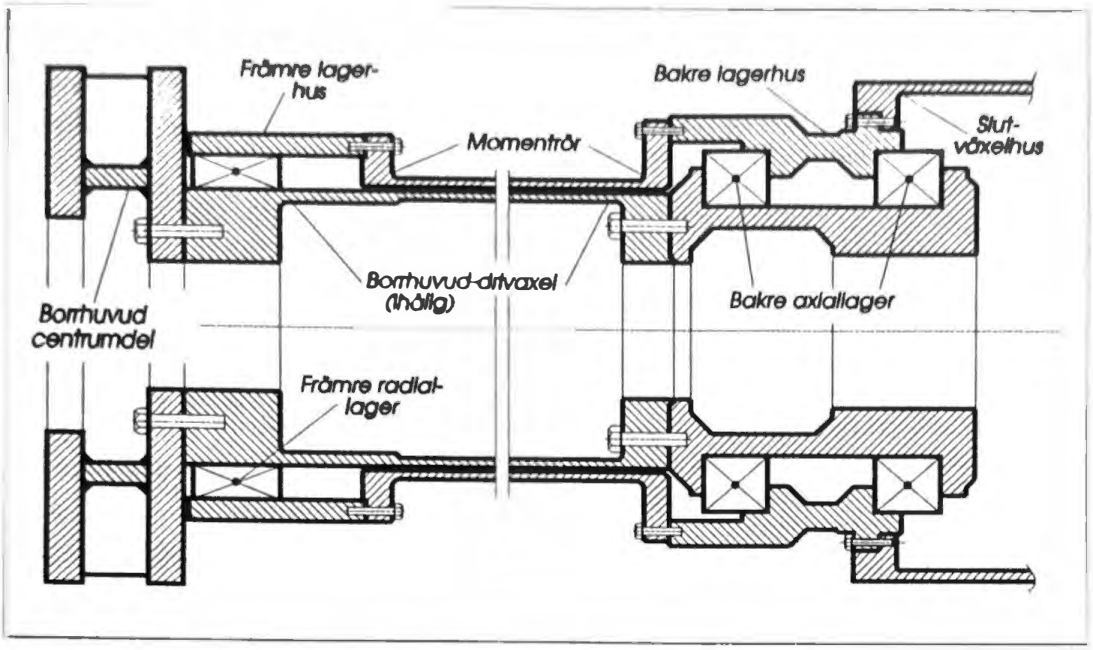

Fig. 3 Mk 27 - Huvudlagerarrangemang

Borrhuvudets vikt och de radiellt på huvudet arbetande krafterna tas av ett enda sfäriskt rullager i det främre lagerhuset direkt bakom borrhuvudet. De axiella krafter, som förorsakas av maskinens matning framåt, överförs till den stora, 1,9 m ϕ, *ihåliga* drivaxeln och tas upp av det främre av två identiskt lika – men spegelvänt monterade – sfäriska axialrullager i maskinens bakre lagerhus. Eftersom det bakre av dessa två lager knappast belastas alls, kan dessa lager efter ett tag byta plats – detta görs då i samband med en normal maskin-renovering – för att dubblera livslängden för hela paketet.

Vilken lagertyp som än används, så är huvudlagrets *smörjning* och *tätningssystem* mot utifrån inträngande föroreningar – i form av vatten, damm och fint grus, som tillsammans bildar ett mycket effektivt slipmedel! – minst lika viktiga faktorer som lagrets bärighetstal. Huvudlager-smörjning kan arrangeras på olika sätt:

- *Fett* med automatisk och kontinuerlig inpumpning under tryck; mindre lämpligt för hårt belastade lager.
- *Oljebad*; tämligen riskabelt: om tätningssystemet fallerar kan all olja rinna ut på mycket kort tid utan att det märks med det samma och ett lagerhaveri blir det sannolika resultatet.
- *Oljecirkulation*; ger bra möjligheter till:
  - styrning av temperaturen (kylning eller värmning);
  - filtrering;
  - automatiskt borrhuvud-stopp vid smörjsystemfel.

Idag används oljecirkulationssystem på så gott som all ATLAS COPCO TBM. De har befunnits vara mycket lämpliga även för högt belastade huvudlager.

OPTIMALT UTNYTTJANDE AV INSTALLERAD EFFEKT

Allt eftersom elektroniska system blev tillgängliga blev det "naturligt" att använda dem för att optimera utnyttjandet av den effekt, som finns "inbyggd" i en modern

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

TBM. Ända sedan 1984 har alla ATLAS COPCO TBM därför varit försedda med Automatisk Matnings Reglering (AMR) och vi har också varit pionjärer i att applicera elektrisk Variabel Hastighets Drift (VHD) – mha frekvensomformning av elkraften till huvudmotorerna – för bergborrningsändamål.

Automatisk Matnings Reglering

På äldre TBM brukade operatören ställa trycket i matningskretsen för hand, varvid han naturligtvis siktade på en så hög indrift som möjligt, dock *utan att pressa motorernas Ampèremätare-nålar över det röda streck, som anger motorns nominella strömförbrukning*. Då kunde han känna sig säker på att få en rimlig indrift utan att riskera att bränna upp en motor.

Det var dock sällan att matningstrycket justerades mer än en gång per borrningsslag och många operatörer hade fått den dåliga vanan att köra hela skiftet med samma tryckinställning. Detta betyder, att dessa maskiner ej kördes på optimalt sätt: i snitt utnyttjade de ej mer än ca 60 % av den installerade effekten.

Detta beror på att bergsöndertagning icke är en mjuk och stabil process, som försig går på en konstant effektnivå. Det är i mångt och mycket en diskontinuerlig process, med snabbt växlande effektbehov, även om berget skulle ha en konstant kvalitet. I själva verket så finns det inga bergtyper, som har sådana konstanta egenskaper, och detta förorsakar ytterligare effektbehovs-svängningar.

I stället för att låta en – kanske inte ens så värst intresserad – människa försöka att kontinuerligt för hand justera matningstrycket för att uppnå optimala prestanda på ett sätt som samtidigt ej kan skada maskinen, så är det hel klart bättre att tilldela en elektronisk utrustning denna uppgift. Man kan lita på att den "svarta lådan" kommer att läsa inkommande signaler på ett mycket noggrant sätt samt att den utför snabba justeringar så ofta de behövs, och utan att någon gång tröttna på uppgiften.

I grund och botten består AMR av en regulator, som styr trycket i matningskretsen *baserat på huvudmotorernas effektuttag*. Justering av matningstrycket sker tiondelar av en sekund och görs så ofta som berget indikerar behov därav. AMR verkar på så sätt, att effektuttaget ej tillåts att sjunka så mycket innan matningstrycket justeras uppåt för att höja effektuttaget till ett värde mycket nära det max tillåtna. Samtidigt så sänks trycket omedelbart om effektuttaget skulle stiga över det tillåtna max-värdet, vilket förhindrar att motorerna någonsin kan överlastas.

Med AMR kommer en TBM – i snitt – att utnyttja ca 90 % av den installerade effekten, vilket betyder en *50 %-ig förbättring* över den manuella metoden.

Variabel Hastighets Drift

VHD – som ger möjlighet att reglera borrhuvudets varvtal mha frekvensomformning – kan installeras på samtliga ATLAS COPCO TBM som tillsatsutrustning. Huvudmotorerna har – mht deras elektriska specifikation och kylning – från början konstruerats för att tåla den något högre värmeutveckling som denna typ av drift för med sig. VHD systemet har utarbetats tillsammans med ASEA BROWN BOVERI, som även levererar själva utrustningen.

Möjligheten att kunna variera borrhuvudets hastighet är speciellt värdefull vid drift under mycket varierande bergförhållanden, från mjukt till hårt och från kompakt till trasigt eller blockigt berg. Mjukt berg kräver ett högre vridmoment vid samma kutterbelastning an hårt berg; i hårt berg kan det vara svårt att helt utnyttja maskinens installerade effekt om man ej kan gå upp i varvtal.

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

I blockigt berg kan det vara rekommendabelt att ta ner hastigheten, för att ej slita loss bergblock ur tunnelgaveln eller -taket och att undvika risken av skador på huvudet. Samtliga dessa krav kan tillgodoses med VHD, som visas i Fig.4 nedan.

Figuren visar att en elmotor, som körs med frekvensomformning, i området från 0 till 50 Hz utvecklar fullt nominellt vridmoment. Detta kalls för *konstant moment* området.

Området utöver 50 Hz kallas för *konstant effekt* området. Här, momentet sjunker medan hastigheten går upp, eftersom produkten

Vridmoment · Hastighet (eller Hz) = Effekt

naturligtvis är konstant.

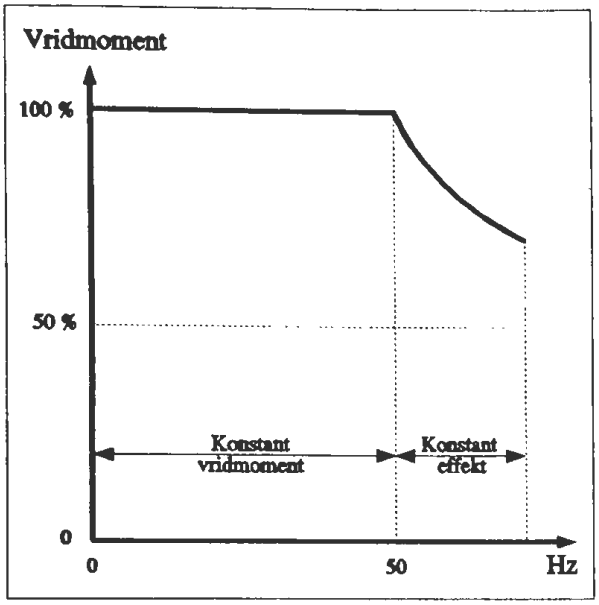

Fig. 4 Vridmoment kontra Hastighet

I blockigt berg kan borrhuvudets hastighet sänkas till under den som gäller vid 50 Hz till motorerna medan fullt vridmoment bibehålls.

Att fullt moment står till förfogande vid låga hastigheter, även från start – då Hz = 0 – är mycket värdefullt, speciellt i mjukt, plastiskt material, som har en tendens att låsa borrhuvudet vid stillestånd.

Ytterligare en fördel av VHD är att borrhuvudets hastighet är mycket enkel att anpassa om maskinen för sitt nästa jobb måste byggas om till en annan diameter.

På en maskin utan VHD skulle man behöva ändra den mekaniska utväxlingen mellan motorerna och huvudet – antingen i planetväxellådorna eller mellan stora slutväxel-kugghjulet och pinjongerna – för att erhålla den nya hastigheten.

PLC styrning

Det är väl nästan självklart att ett tämligen komplicerat system måste till för att styra en TBM med så många självreglerande delsystem och en sådan flexibilitet i det sätt på vilket den kan köras. Samtidigt är det så, att ju mera komplex en maskin blir, desto större är behovet av automatisering och av förreglingar för att skydda både maskinen och folket i tunneln mot misstag från operatörens sida.

För att erbjuda den nödvändiga styrningen medan man samtidigt skapar den flexibilitet, som behövs för att klara av alla de olika geologiska förutsättningar man möter vid praktisk tunneldrivning, har vi introducerat ett PLC (Programmable Logic Controller) baserat styrsystem för alla ATLAS COPCO TBM för ca fem år sedan.

Ett sådant system ordnar "drifts-instruktioner" till elektriska och hydrauliska komponenter, sekvens-körning och förreglingar inte på det traditionella sättet via reläer (hårdvaran), men via programmet (mjukvaran) till PLC-en. Det gör det också oerhört mycket lättare att snabbt åstadkomma ändringar i det sätt på vilket maskinen körs, när omständigheterna så kräver. Man slipper installera nya eller koppla ihop befintliga reläer på ett nytt sätt: det räcker med att skriva om en del av programmet istället.

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

TBM KONSTRUKTION FÖR DÅLIGT BERG

Bland de ingenjör-geologiska aspekter, som nämnts tidigare, har följande punkter ä knats upp beträffande åtgärder föreskrivna av myndigheter eller byggherren såväl som de planerade bergförstärkningsmetoderna:

- borrning av hål för - sondering
  - injektering
  - bergbultning
- betongsprutning
- stålbågar
- kombinationer av dessa

Härnedan skall belysas hur dessa projekt-betingade förutsättningar har inverkat på Mk 27's konstruktion för Hallandsåsen.

Borrningsutrustning

Att borra *sonderings-* och *injekteringshål* i samband med tunneldrivning med TBM är ingen ny metod i sig. Tidigare har det varit brukligt att dra maskinen tillbaka från tunnelgaveln, transportera all nödvändig utrustning till området framför borrhuvudet, rigga upp utrustningen där och borra hålen. När de var färdiga, fick man ta ner utrustningen och transportera den tillbaka igen, innan TBM-en kunde flyttas framåt och borrningen återupptas.

Medan detta naturligtvis låter sig göras, så innebär det en del nackdelar:

- det är besvärligt och tar tid, vilket får hela tunneldrivningsprocessen att bli mycket långsam;
- det tvingar små-håls-borrningspersonalen att arbeta framför borrhuvudet, där de antingen kommer att vara oskyddade från berg som ramlar från gaveln eller taket eller blir tvungna att spendera ännu mera tid på att säkra berget innan de kan sätta igång med sin egentliga borrningsuppgift;
- om det blir stångbrott i ett hål borrat i gaveln och den i hålet kvarvarande delen av borrsträngen ej kan "fiskas upp", så kommer den att ställa till stort besvär för kuttrarna senare, när TBM-en borrar på den.

I samband med borrningen av Saltsjö-tunneln under Stockholm på slutet av 1980-talet – tunneln gick nära ytan i spruckna och vattenförande formationer, bl a för ca 3 km under Klarasjön, där förinjektering inte bara var föreskriven, men en tvingande nödvändighet för projektets genomförande över huvud taget – utvecklade ATLAS COPCO därför en ny, patenterad metod för borrning av sådana hål från en punkt längre tillbaks och *ej* i tunnelgaveln. Schematiskt illustreras detta i Fig. 5.

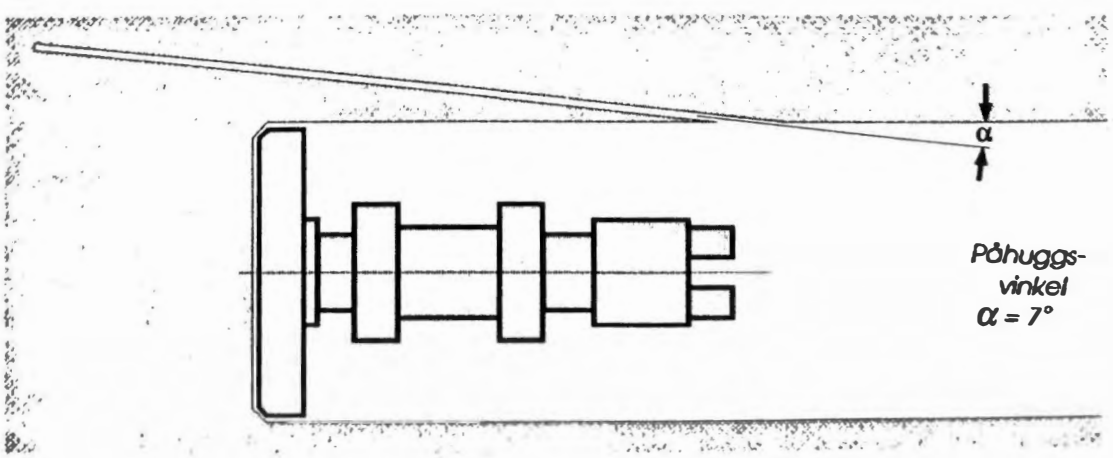

Fig. 5 Princip för långhålsborrning förbi en TBM

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Sonderingshål – som också kan användas till förinjektering – borras i ett konmönster förbi maskinen. För endast sondering räcker det i de flesta fall med ett fåtal – ett till tre – hål i de flesta fall. För förinjektering beror antalet hål på den grad av täckning man eftersträvar.

Om det är endast fråga om att täta några få sprickor *ovanför* tunneln, så kan man normalt nöja sig med att borra hålen i den övre delen av tunnelns tvärsektion. Om berget är mycket sprucket och håller vatten under högt tryck, så blir det nödvändigt att borra hålen i en full kon runt tunneln.

Problemet med att borra hål på detta sätt ligger i påhugget, eftersom så pass "flacka" hål kräver en mycket liten påhuggsvinkel. Med den speciella påhuggsstyrning, som vi har utvecklat, är det möjligt att rikta hålen utåt så litet som 7°, som visats i Fig. 5.

För att vinna tid – genom att låta långhålsborrningen interferera så litet som möjligt med tunnelbormingen – är det önskvärd att montera långhålsborrningsutrustningen på någon form av "åkanordning", så att den kan förbli stationär i tunneln då hålen borras, medan TBM-en går framåt under tiden.

Hur långt tillbaka hålen huggas på är i det närmaste beroende på TBM-diametern: vid mindre maskiner – som fyller utrymmet i tunneln nästan helt och hållet – blir det nödvändigt att placera borrningsutrustningen *bakom* maskinen, dvs på någon form av arbetsplattform mellan TBM-en och bakriggen. Det var på detta sätt det var ordnat i Saltsjötunneln.

Vid större diameter TBM – som t ex Mk 27 – finns det plats nog för att kunna montera borrningsutrustningen på själva maskinen och hål kan då huggas på direkt bakom maskinens taksköld, se också Fig. 9 längre ner.

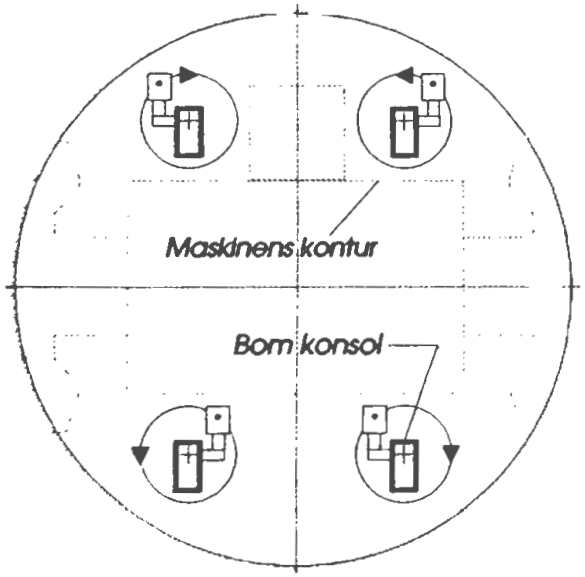

Fig. 6 Bomplacering på Mk 27

I Mk 27 - Hallandsåsen fallet bärs fyra stycken hydrauliska bergborrningsmaskiner av fyra rota-extensionsbommar, vars konsoler är infästa på åkplattformar – åklängd i tunnelns längdriktning 3,0 m – som är monterade på TBM-ens huvudkropp, en av varje i tunnelns fyra kvadranter, se Fig. 6.

Med denna anordning skall 40 m långa hål borras, som skall bottna max 5 m utanför tunneldiametern. Tre sådana kommer att borras som sonderingshål: ett uppåt och ett åt varje sida.

Som ett minimum kommer sedan ytterligare 11 hål att borras med placering mellan de tidigare tre för att bilda en komplett kon, så att alla 14 hål kan användas för injektering, när sonderingshålen visar att behov därav föreligger eller när förinjekterlng har föreskrivits över huvud taget.

Borrning av *bergbultshål* kan ske med samma utrustning som används för sonderings- och injekteringshål, som finns beskriven härovan. Detta är möjligt i en tunnel med en så pass stor diameter, där det fria utrymmet tillåter att vinkla in

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

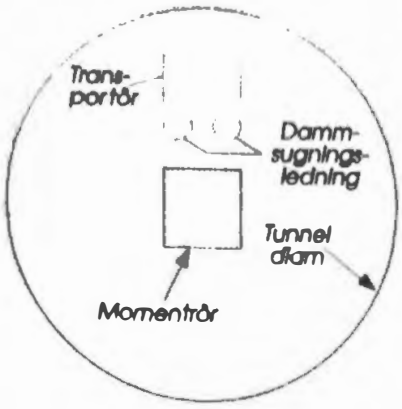

Fig. 7 Optimalt fritt utrymme

bomhuvuden så mycket, att matningarna kan positioneras i ett plan i rätt vinkel mot tunnelns längdaxel. På detta sätt kan ett nästan obegränsat antal hål för bergbultar borras i ett något så när radiellt mönster.

För att skapa ett så stort fritt utrymme som möjligt för borrning av dessa radiella hål, så kan maskinens bandtransportör och dammsugningsledningar dras tillbaka under tiden. Detta lämnar den 2 x 2 m stora momentrörs-tvärsektionen som ända "skugga" i området omedelbart bakom dammskärmen och takskölden, så att bergbultar kan placeras "tidigt", på kort avstånd från tunnelgaveln, se Fig. 7.

Överborrningsutrustning

Det har redan nämnts att stålbågar – möjligen kompletterade med extra tjock sprutbetong – kan komma att placeras i dåligt-berg zoner i Hallandsås-tunneln.

Om denna typ av bergförstärkning placeras *innanför* tunnelns nominella diameter, så krymper det fria utrymmet i tunneln och maskinens borrhuvud kan ej längre passera den förstärkta sträckan. Det är därför endast möjligt att i så fall placera förstärkningen *bakom* huvudet, allt efter som maskinen går framåt.

Om det – av någon anledning som helst – blir nödvändigt att dra maskinen tillbaka från gaveln, så kan den endast backas så långt att huvudet når den främre kanten på den förstärkta sträckan; sedan är det stopp. Under vissa förutsättningar så kan detta betyda en allvarlig begränsning.

Det kan också hända att berget är så svagt, att förstärkning behöver göras direkt bakom gaveln, dvs när berget icke står för sig självt under den tid det tar för att maskinen skall borra sig in tillräckligt långt för att placera bågarna bakom borrhuvudet. Men varje typ av bågar placerad *innanför* den nominella diametern skulle bli i vägen för huvudet, när maskinen borrar vidare igen.

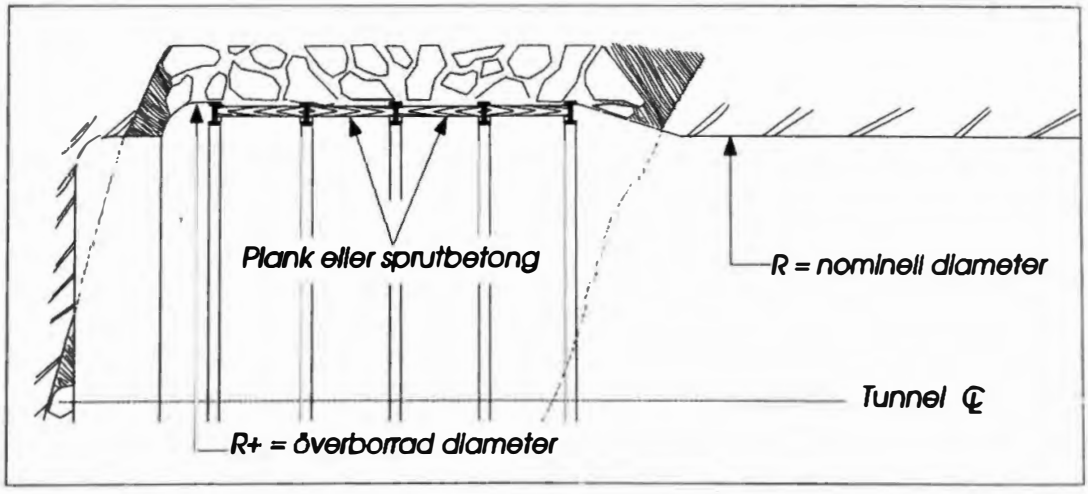

Fig. 8 ATLAS COPCO's överborrnings-system

Syftet med det överborrnings-system – se Fig. 8 – som ATLAS COPCO TBM kan utrustas med, är att kringgå dessa problem genom att temporärt borra tunneln

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

med en något större diameter, så att bågar kan installeras *utanför* den nominella diametern, nära gaveln och utan att vara i vägen för maskinen när den skall borra vidare eller dras tillbaka.

Fyra sk *överborrnings-kuttrar* – som utgörs av standard 16¼ tums periferikuttrar – är var för sig monterade på hydrauliskt aktiverade armar, som vid behov svängs ut för att öka tunneldiametern med upp till 0,30 m. Armarnas rörelser styrs mha ventiler monterade i maskinens bakända. Åtgärder har också vidtagits för att göra det möjligt för huvudet att fortfarande rensa sulan, som ligger 150 mm lägre i den överborrade delen av tunneln.

När berget blir mera ståndfast igen och kan säkras mha endast bergbultar eller ett tunnare lager sprutbetong applicerat längre bak, så svängs överborrningskuttrama in i huvudet igen och maskinen fortsätter att borra med den normala diametern.

Överborrningsmetoden och -utrustningen utvecklades i slutet på 1980-talet och kom till användning för första gången 1990, på en ATLAS COPCO Mk 18 TBM i drift på Sicilien. Denna maskin borrade en vattensamlingstunnel – betrakta den som en lång, något uppåt lutande brunn med stor diameter – i tuffarna på vulkanen Etna's sluttningar, för att komma åt en värdefull källa till drickbart vatten för staden Catania. Entreprenören, som äger maskinen, påstår att "med överborrningssystemet kan vi tackla vilken bergart som helst".

Det är självklart att tillgängligheten till VHD blir en stor fördel på Mk 27 i samband med överborrning. Den tillåter operatören att "ta det litet försiktigt" medan överborrningskuttrarna svängs ut och att hålla ett lågt varvtal på huvudet under själva överborrningen, för att undvika hög hastighets-shockbelastning på kuttrarna och deras armar i blockigt berg.

Även AMR är till stor nytta under dessa förutsättningar: eftersom det kan ställas ner till extremt låga matningskrafts-värden, kommer det automatiskt att skydda överborrningskuttrarna när en redan borrad tunnelsträckning skall "rymmas" i efterhand. Då är det endast dessa kuttrar, som skall ta hela matningskraften. Utan AMR föreligger mycket stor risk för överbelastning av överborrningskuttrarna vid en sådan rymning.

Borrhuvudets uppbyggnad

På en TBM, som endast skall gå i hårt, kompakt berg, har borrhuvudet normalt en sk *öppen* konstruktion. Generellt kan man påstå att den ger den enklast möjliga åtkomligheten för detaljer som behöver bytas regelbundet – dvs kuttrar o dyl – och gör det enkelt att utföra underhållsarbeten på huvudet i allmänhet.

Å andra sidan, när man på förhand vet att maskinen också kommer att behöva arbeta i dåligt berg – det må vara blockigt, icke ståndfast, plastiskt, osv, så som det kommer att bli fallet i Hallandsåsen – konstrueras huvudet normalt på så sätt att dess utsida – som är i "nästan-kontakt" med berget i gaveln och i taket hela tiden – blir så stängd och jämn som möjligt. På detta sätt kommer bergblock att "haka i" utstickande delar och att blockera huvudet mycket mindre – vilket reducerar shockbelastningar i drivanordningen – och det blir enklare att hålla huvudet i jämn rotation samt att starta det från stillestånd.

På Hallandsåsen Mk 27 är därför huvudet försett med en sk *falsk front*. Den består av plåtar, som fyller utrymmet mellan kuttrarna för att skaffa en nästan helt plan framsida. Större berg-bitar hindras på detta sätt från att slå mot kuttersadlarna och kila fast sig mellan dem och tunnelgaveln.

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Samtidigt så hjälper huvudets falska front till med att hålla gaveln uppe, om den skulle ha en tendens att rasa.

Även utefter huvudets periferi så stängs öppningarna mellan huvudets ekrar och skopor så mycket som möjligt av välvda plåtsektioner för att bilda en nästan obruten cylindrisk yta. Vid normal drift är de öppningar, genom vilka överborrnings kuttrarna på deras armar skall svängas ut när de behövs, täckta av välvda luckor som lätt kan tas bort när det blir dags för överborrning.

Utrustning för sättning av stålbågar

Stålbågar består av ett antal böjda stål-profil-sektioner, som bultas ihop eller förbinds med varandra på annat sätt, så att de bildar en komplett ring. Svårigheten med att placera ringarna ligger i att föra sektionerna över maskinen, att hålla dem i position medan de bultas ihop och att sedan lyfta upp och pressa an dem mot tunneltaket, när bottensektionen skall sättas dit för att avsluta ringen.

För att *delvis* mekanisera detta arbete har Mk 27 försetts med en enkel sättningsanordning – den engelska termen *beam erector* är kanske mera deskriptiv – som finns direkt bakom dammskärmen, så att stålbågar kan sättas så långt fram som möjligt. Anordningen kan hantera stålbågar satta i såväl det överborrade utrymmet som inom den nominella diametern. Avsikten är att undvika att utnyttja den senare möjligheten, men man vet ju aldrig.....

Bandförskjutning

Då vi tittade på borrning av bergbultshål, så nämndes redan att transportbandet – tillsammans med dammavsugningsledningarna kan förskjutas bakåt för att skaffa ett så oinskränkt arbetsutrymme som möjligt direkt bakom maskinens dammskärm och taksköld.

Alla TBM är försedda med någon typ av bandförskjutning. I de flesta fall är för – skjutningslängden begränsad till det minimum som behövs för att kunna dra bandet bort från under kaxtratten för renhållnings- och reparationsändamål. På Mk 27, däremot, är förskjutningslängden hela 5,1 m, så att hela området bakom dammskärmen kan läggas fritt, även när huvudet har matats fram hela vägen.

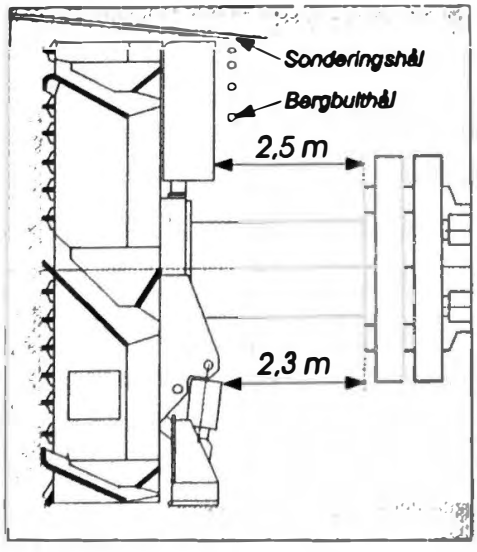

Fig. 9 Fritt utrymme framme

Hur mycket utrymme som står till förfogande, när transportören dragits tillbaka hela vägen, framgår av Fig. 9: längs taket och väggarna finns ett fritt utrymme på 2,5 m. Nära sulan är det något mindre: 2,3 m.

Detta utrymme skulle aldrig vara så pass fritt tillgängligt om Mk 27 hade haft sina motorer, planetväxlar och slutväxeln monterade direkt bakom det främre lagerhuset, en konfiguration som är standard hos några av våra konkurrenter.

Detta är en av anledningarna varför ATLAS COPCO "envisas" med att bygga sina TBM med hela drivanordningen monterad längst bak: att skaffa en "ren" plats med god åtkomlighet där framme.

De andra anledningarna har att göra med att man vill lätt kunna nå drivanordningens komponenter för service ändamål,

© 1993 Svenska Bergteknikföreningen och författare

att man på detta sätt uppnår en mycket bättre balans för hela maskinen. Har man alla driv-komponenter monterade direkt bakom borrhuvudet, så koncentreras den största delen av maskinens vikt där framme och maskinen blir klart framtung. Om man delar upp komponenterna – borrhuvudet med lagerhuset där framme, drivanordningen längst bak – så som det är fallet på samtliga ATLAS COPCO TBM, så blir maskinen mycket bättre balanserad, oberoende av var inom borrningsslaget huvudet befinner sig.

SLUTSATS

Med detta föredrag har vi visat att konstruktionskraven för en stor TBM av typisk hårtbergskaraktär kan uppfyllas utan att äventyra maskinens möjligheter att kunna fungera tillfredsställande även i dåligt, besvärligt berg. De tillkommande egenskaper, som behövs för att göra maskinen så flexibel, kan "byggas in" i dess konstruktion på ett förhållandevis enkelt sätt, *om de är kända från början*.

Att installera den nödvändiga tillsatsutrustningen *i efterhand*, när maskinen redan har kört fast pga dåliga bergförhållanden, som först upptäckts en bit in i tunneln, skulle betyda en "större huvudvärk" – om det vore möjligt över huvud taget.

I det aktuella fallet anser vi att tillräckligt utförlig geologisk information var till förfogande då vi skulle börja konstruera Mk 27 för Hallandsåsen, så att vi kunde skräddarsy maskinen från start. Eftersom Murphy's lagar tycks gälla världen över – dvs också i Skåne – är det förstås inte uteslutet att vi kommer att uppleva någon otrevlig överraskning ändå . . . , men vi räknar i alla fall med att SKE's Mk 27 har blivit mångsidig nog för att kunna ta en dust med Mr Murphy om han dyker upp i Båstadstrakten de närmaste åren.

Referens

[1] Andersson, Jan och Björner, Anders, BANVERKET
Hallandsåsen-projektet - Föredrag vid *TBM Symposium – Lucia 1992* organiserat av ATLAS COPCO, BeFo och BK