© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

2 INGENJÖRSGEOLOGISKA ERFARENHETER

Professor Hans K Helfrich

2.1 Uppföljningssystem

Med syftet att kunna erhålla en total bild av de geologiska och bergtekniska förhållandena i TBM-tunneln åtföljdes förundersökningsarbeten av en detaljerad uppföljning av de ingenjörsgeologiska förhållandena i tunneln.

Följande uppföljningssystem har tillämpats:

- Geologisk-tektonisk kartering 1 : 250.

- Fotodokumentation.

- Registrering av nettoborrsjunkning (m/t), matningstryck (psi) och strömstyrkan (amp-tal). Dessa parametrar registrerades eller beräknades i genomsnitt för varannan meter.

- Detaljstudie av geologi, materialtester och borregenskaper i 13 mätstationer respektive mätsektioner.

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

2.2 Bergartsenheter

Berggrunden längs tunnelsträckan uppbyggs av följande bergartsenheter (se sektionsbilaga):

Tabell 1

Tunnelmeter	Bergart med tektoniska huvuddrag	Grönstensinslag i %	Enhet
0 - 290	Medelkornig gnejsgranit	12	A
- 291	Överskjutningszon	100	
- 500	Medelkornig gnejsgranti	20	A
- 630	Förskiffrad och breccierad gnejsgranit	20	B
- 640	Mylonit (förkastning)		
- 800	Förskiffrad och breccierad gnejsgranit	15	B
- 1.945	Homogen grovkornig gnejsgranit	9	C
- 2.000	"Granit"/grönsten	36	D
- 2.035	Finkornig, randig-bandad gnejsgranit	9	E
- 2.070	"Granit"/grönsten	14	D
- 3.000	Finkornig, randig-bandad gnejsgranit	9	E
- 3.340	Tämligen homogen gnejsgranit, något bandad	8	F
- 3.350	Mylonit (överskjutning)	100	
- 3.655	Leptitgnejs	3	G
- 3.740	Gabbro	100	H
- 3.920	Leptitgnejs	3	G
- 4.025	Finkornig, randig-bandad gnejsgranit	9	E
- 4.090	Gabbro	100	H
- 4.527	Finkornig, randig-bandad gnejsgranit	9	E

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Sammanställningen visar att 8 olika bergartsenheter med viss upprepning kan urskiljas. Enheterna skiljer sig i sammansättningen (gnejsgranit/grönsten, kornstorlek (grov-, medel-, finkornig och tät) och främst i förskiffringsgraden (osammanhängande glimmeraggregat till utvecklade diskontinuitetsytor). Sistnämnda gäller även samma enhet. Kontakterna mellan de olika enheterna är ingalunda skarpa. Tvärtom finns övergångar med subjektiv gränsdragning.

Skiffrighetsstrukturen överlagras av en makrosprickighet som genom speciella kännetecken (t ex förkastningstendenser eller avbrott i den jämna tunnelprofilen) kan urskiljas.

Som ett generellt inslag i gnejsgraniten framträder grönstenslager av växlande mäktighet. 10 lager (inklusive gabbro) har en mäktighet överstigande 10 meter (genomsnitt 29 m). Övriga lager visar en varierande mäktighet från 0,1 m och uppåt. Den sammanlagda mängden grönsten utgör 13% av berggrunden och fördelar sig enligt följande:

Tabell 2

Enhet	Grönstensandel
A	15
B	17
C	9
D	28
E	9
F	8
G	3
H	100
Grönsten	587

Undantas "granit"/grönsten och gabbro, avtar grönstenshalten med tilltagande avstånd till Stora Finnsjölinjen och är minst i leptitgnejsen. Efter leptitgnejsen sker återigen en viss ökning.

Som senare kommer att visas påkallade 20% av sträckan med grönsten förstärkningsåtgärder, främst inom tektoniska zoner. Övriga grönstenssträckor (80%) har varit godartade ur stabilitetssynpunkt.

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

2.3 Sprickighets- och skiffrighetsgrad

Beträffande strukturobservationer erbjuder en fullborrad tunnel fördelar men även stora nackdelar. Det senare gäller främst sprickighetsgraden. Normal sprickinitiering, som är regel i en sprängd tunnel, är undantaget i en fullborrad tunnel. En konventionell sprickanalys är således ej genomförbar.

Varje sprickobservation är följaktligen en selektiv process och enbart delar av sprickinnehållet är tillgängliga för analysen. Förnämliga hjälpmedel är fototgrafier av tunnelväggarna för jämförelsestudier. Med hjälp av fotografier kan en principiell klassificering av den synliga sprickighetsgraden genomföras.

Med fördel bör tillämpas sprickintervallerna, ingående i "Geomechanics Classification" eller ISRM:s "geotekniska bergbeskrivning (Basic Geotechnical Description BGD). För de olika bergartsenheterna kalkylerades följande sprickighet:

Tabell 3

Bergartsenhet	Sprickavstånd (cm)				
	>200	200 - 60	60 - 20	20 - 6	<6
A	-	-	40	20	40
B	-	-	10	20	70
C	-	20	40	30	10
D	-	-	80	20	-
E	-	10	20	50	20
F	-	10	80	10	-
G	-	10	90	-	-
H	-	40	50	10	-
Genomsnitt för alla	-	10	40	30	20

Enligt denna sammanställning uppvisar 50% av berget längs tunnelaxeln ett sprickavstånd mindre än 20 cm.

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

I samband med förundersökningen utfördes 3 kärnborrhål (sammanlagt ca 120 m). Med ledning av dessa borrhål erhålles föjande fördelning av sprickavstånden:

Tabell 4

Sprickavstånd (cm)	Procent
> 200	-
200 - 60	5
60 - 20	30
20 - 6	50
< 6	15

Jämföres de båda tabellerna så framträder ett något sprickintensivare berg i borrhålen, vilket t ex kan ha sin förklaring i bergtäckningen som vid borrplatserna har varit lägre än längs huvuddelen av TBM-tunneln. Dessutom representerar borrhålen enbart ett par procent av tunnelsträckan. Trendindikationen kan vara en tillfällighet. Betraktas dock borrhålen i sitt geologiska sammanhang (hällobservationer), så representerar dessa en strukturell realitet.

Skiffrigheten eller gnejsigheten (parallellstruktur genom orienterade glimmermineral och utvalsade fältspat-kvartsaggregat) visar en uthållighet både vad strykningen och stupningen beträffar. Strykningen ligger i stort sett NNW-SSE och stupningen varierar mellan 30 och 90° mot SW. Huvuddelen av tunneln har legat gynnsamt orienterad i förhållandet till huvudstrukturen.

Gnejsigheten har växlande karaktär. Mest bestämmande för gnejsigheten är orienteringen och mängden av glimmermineral. Endast i undantagsfall saknas en glimmerorientering (inslag av lokal granit). Huvudsakligen konstateras 3 grader av orientering:

- En svag orientering, strövinkel 90°
- Bra orientering, strövinkel 45°
- Utmärkt orientering, strövinkel 23°

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

E Büchi (Einfluss geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine (mit besonderer Berücksichtigung der Gesteinsanisotropie), Bern 1984) har dessa grader av orientering associerat med indexvärden:

- Ingen orientering 1
- Svag orientering 2
- Bra orientering 3
- Utmärkt orientering 4

Likaså har Büchi en värdering av diskontinuitetsytor (parallellstrukturen utgör svaghetsplan) enligt följande:

- Diskontinuitetsytor saknas: Grad 1
- Svagt utvecklade ytor: Grad 2
- Bra utvecklade ytor: Grad 3
- Utmärkt utvecklade ytor: Grad 4

Båda dessa parametrar, glimmerorienteringen och utvecklingen av diskontinuitetsytor, utgör tillsammans en s k s[illegible]turindex GgI (Glimmergefügeindex).

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

I TBM-tunneln karakteriserar följande indexvärden de olika bergenheterna:

Tabell 5

Bergart	Enhet	Glimmer-orientering	Utveckling av diskont. ytor	GgI
Gabbro	H	1	1	2
Leptitgnejs	G	1	1	2
Granit/grönsten	D	2	1	3
Homogen grovkornig gnejsgranit	C	2	2	4
Tämligen homogen gnejsgranit	F	2	2-3	4-5
Medelkornig gnejs-granit	A	2-3	2-3	4-6
Finkornig randig-bandad gnejsgranit	E	3	3-4	6-7
Förskiffrad-breccie-rad gnejsgranit	B	4	4	8

2.4 Läckvatten

Vattenläckage har påträffats såsom fukt, dropp, lätt rinnande, rinnande till starkt rinnande, samt i enstaka fall som artesiskt vatten. Det största enskilda vatteninflödet uppskattas till ca 50-100 l/min. För hela tunneln uppmättes en max vattenmängd på 1,2 m^3/min, motsvarande ca 0,3 l/min/m tunnel eller ca 300 l/km tunnel.

Flera avsnitt med frekvent förekommande läckställen har påträffats:

- 300 - 650 m
- 750 - 1.100 m
- 1.750 - 1.770 m
- 2.200 - 4.300 m
- 4.000 - 4.250 m

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Den största specifika vatteninläckningen registrerades längs avsnittet 300-650 m med ca 2 l/min/m tunnel (Stora Finnsjölinjen). Artesiskt vatten förekommer på några ställen inom avsnitt 2.200-3.400 m, ett avsnitt som i stort sammanfaller med en depression i terrängen (Betlehem).

Inget läckage har behövts åtgärdas med injektering. Vattentillrinningen avtog efter några dygn för att sedan ha stabiliserats på en betydligt lägre nivå, artesiskt vatten undantagen. Därmed är de redovisade värdena indikativa och inte absoluta (inga initialdata föreligger). Den specifika vattenföringen varierade mellan 0,3 och 2,1 l/min/m tunnel.

Som tillrinningskanaler observerades sprickor (mest uthålliga och parallellt med skiffrigheten, men även tvärgående) samt kontaktzonerna mellan gnejsgranit och grönsten.

Genom att vattnet ej påverkade driften utfördes beträffande läckageförhållandena ingen särskild analys.

2.5 Förstärkningsåtgärder

Ur förstärkningssynpunkt kan tunneln indelas i följande avsnitt:

Tabell 6

Tunnel-avsnitt m	Sektions-längd m	Förstärk ningslängd m	Procent inom sektion	Procent av total förstärkn
0 - 285	285	0	0	0
- 435	150	15	10	9
- 655	220	137	62	77
- 710	55	4	7	2
- 980	270	0	0	0
- 1.030	50	11	22	6
- 3.335	2.305	0	0	0
- 3.350	15	10	67	6
- 4.527	1.177	1	1	1
	4.527	178		4

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Av översikten framgår att den Stora Finnsjöstörningszonen har varit mycket förstärkningsintensiv. Seismiska mätningar hade indikerat en störningszon på sammanlagt 290 m, varav 165 m med seismiska hastigheter 4.000 m/s. På tunnelnivån reducerades denna genom seismiken indikerade svaghetszon till ca 220 m. Av denna sträcka förstärktes 137 m (62%), varav 79 m (36%) som driftsförstärkning. Förstärkningen inom Stora Finnsjölinjen utgör 77% av den totala förstärkningsinsatsen i TBM-tunneln.

Slutsats

27% av den indikerade svaghetszonens längd åtgärdades genom driftsförstärkning. Totalt förstärktes inom zonen (markytan) endast 47% eller som nämnts 62% av zonens längd på tunnelnivån.

Följande förstärkningsåtgärder tillämpades:

Tabell 7

Förstärkningsklass	Förstärkningstyp	Procent
A	Ingen förstärkning (4.349 m)	96
B	Bultning, sprutning, nät, lokal armering (112 m)	2,5
C	Bågar utan bottenplatta (26 m)	0,6
D	Bottenplatta som tillägg (40 m)	0,9

Endast 4% av den totala tunnelsträckan påkallade förstärkningsåtgärder. 38% av förstärkningsåtgärderna kan betecknas som mycket intensiva (klass C-D). Driftsförstärkningen, eller den förstärkningen som direkt påverkar maskinens arbete, erfordras längs 1,5% av tunnelsträckan. Dessa 1,5% förbrukade ca 13% av maskintiden.

Slutsats

Kunskap om förväntade störningszoner och maskinens utrustning för att kunna ta hand om nödvändiga åtgärder är centrala driftsfrågor.

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

2.6 Jämförelse fullborrad - sprängd tunnel ur förstärkningssynpunkt

Från Granån och uppströms (i riktning mot TBM-tunneln) sprängdes ca 850 m tunnel fram till genomslaget med den borrade tunneln. Berget längs den sprängda tunneln kan jämföras med berget i TBM-tunneln.

I denna del av den sprängda överledningstunneln erfordrades förstärkning längs 630 m eller ca 75% av sträckan. Huvudsakligen tillämpades 1-2 lager sprutbetong, lokalt armerad sprutbetong och sporadiskt lite bult.

Skillnaden mellan fullborrad och sprängd tunnel kan anges enligt följande:

Tabell 8

Längd (m)	Förstärkningssträcka (m)	Procent
TBM 4.527	178	4
Sprängd 850	630	75

Den stora skillnaden antas bero huvudsakligen på skiffrighetsfrekvensen i kombination med sprickighet. Båda initieras inte normalt i fullborrade tunnlar, men fullt ut i en sprängd tunnel.

I det aktuella fallet påkallade endast svaghetszoner med friktionsnedsättande ler- och/eller kloritbildning och krosszoner förstärkningsåtgärder. Skillnaden mellan borrad och sprängd tunnel bedöms vara minst 2 berg- eller förstärkningsklasser.

Driftstekniskt är det mycket viktigt att stand up tiden av tunnelvalvet ej överskrides. Vid bedömningen av stand up tiden måste beaktas att TBM-tunnelprofilen genom dess perfektion kan ge sken av en felaktig stabilitet. Dåligt berg reagerar omedelbart efter sprängningen medan fullborrningen åstadkommer en viss fördröjning, lagom för att berget kommer att rasa först efter några meters indrift.

Varje inträffat ras påverkar helt onödigt utnyttjandegraden av tekniken. I det aktuella fallet stod maskinen stilla under 77 skift eller 12,8% av totaltiden.

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

2.7 Erfarenheter och slutsatser

Erfarenheterna från driftsuppföljningen, både tekniskt och ingenjörsgeologiskt, leder till följande slutsatser:

- Den ingenjörsgeologiska karteringen av tunneln kan begränsas till att omfatta en avgränsning av större bergartsenheter, där den strukturella uppbyggnaden är viktigare än bergets identitet och uppkomst.

- Olika bergarter kan förhålla sig lika ur borrningssynpunkt.

- Detaljeringsgraden skall vara jämförbar med förutsättningarna vid prognostillfället.

- Registrering av svaghetszoner som påkallar förstärkningsåtgärder. Även här skall detaljeringsgraden vara jämförbar med prognostillfället.

- Att göra sprickfrekvensanalyser såsom i sprängda tunnlar är ej praktiskt genomförbart på grund av att sprickinitiering saknas och endast sprickor med särskilda kännetecken kan observeras. Detta leder till en selektiv sprickanalys. För prognosjämförelser erfordras snarare principiella sprickdata än vetenskapligt utseende mängdanalyser.

- En systematisk fotografering av tunnelvägg ger ett mycket värdefullt bidrag i sprick- och strukturanalysen.

- Normalt är det tillräckligt att registrera nettoborrsjunkningen/skift för att nöjaktigt kunna jämföra geologi och borresultat.

- Vid uppställandet av prognosen är det viktigt att urskilja geologiska "borrenheter", främst sådana med förväntad låg nettoborrsjunkning.

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare

- Allra viktigast är det att vid prognostillfället kunna selektera (särskilja) mängden av förstärkningsintensiva driftsförstärkningsavsnitt med risk för kort stand up tid.

- Detta betyder att man måste göra bedömningar om störningszoners utveckling mot den aktuella tunnelnivån.

- Påträffas berg med kort stand up tid på tunnelnivån bör prognoskriterier upprättas från fall till fall med målsättningen att förhindra inras av tunnelkontur.

Slutligen bör konstateras att den ingenjörsgeologiska uppföljningen har två syften:

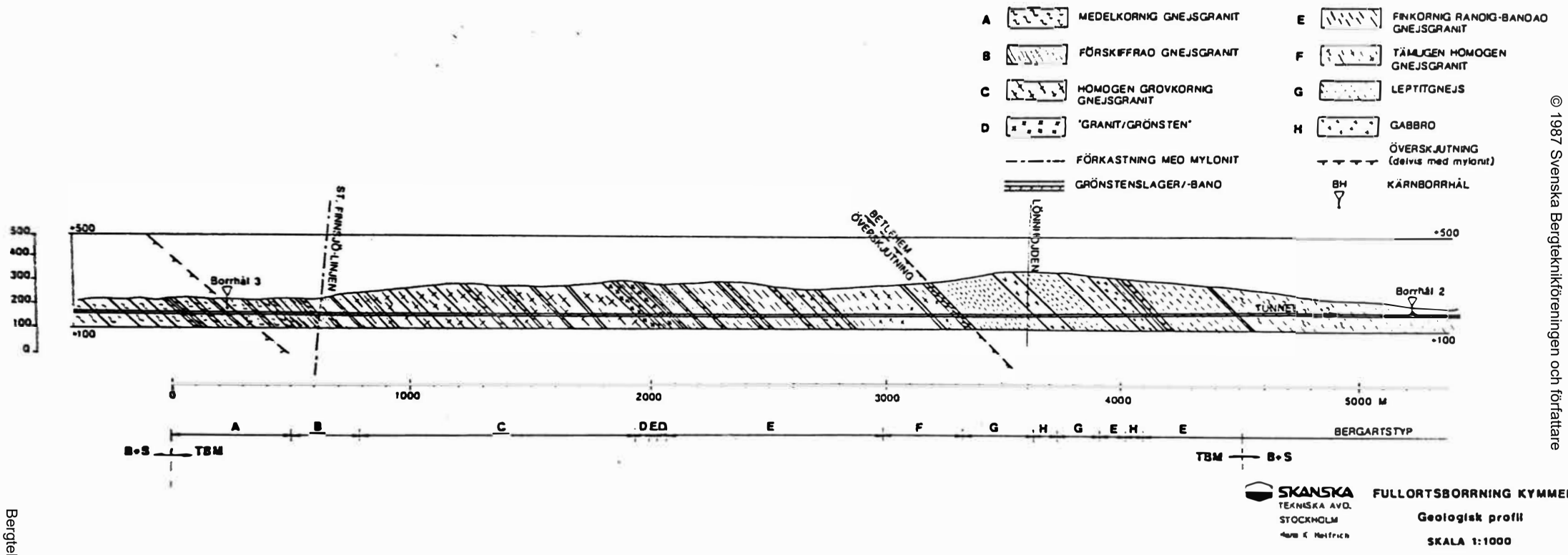
- att dokumentera de bergtekniska förhållanden som kan ha betydelse för tunnelns bestånd

- att utveckla prognosarbetet, där hänsyn tas till omständigheten att blottningar som åstadkommes i tunneln vid prognostillfället i regel saknas.

Litteratur

Helfrich H, K: Kymmen - Ingenjörgeologiska förutsättningar för TBM - drift. BeFo-dagen 1986, Stockholm.

Thunehed Hans, Helfrich Hans, Andersson Elsa och Nilsson Lena: Geofysiska undersökningar vid Kymmen. Geo-bygg 1986, Nr 1.



SKANSKA
TEKNISKA AVD.
STOCKHOLM

FULLORTSBORRNING KYMMEN

Geologisk profil

SKALA 1:1000

© 1987 Svenska Bergteknikföreningen och författare