© 1999 Svenska Bergteknikföreningen och författare

TUNNELDRIVNING MED LITEN BERGTÄCKNING.

Johan Brantmark — Skanska Teknik AB
Tommy Forsgren — Skanska Anläggning AB
Lasse Wilson — Skanska Teknik AB

Inledning

I samband med ökade satsningar på infrastruktur i närheten av, och i våra tätorter ställs allt större krav på omgivningspåverkan. Lösningar som involverar stora bergskärningar eller "cut and cover" ratas ofta av miljöskäl. Detta medför att det många gånger är att föredra att förlägga väg och järnväg i tunnlar. Vilket allt oftare innebär att tunnlar skall drivas även under svåra förhållanden på ett säkert sätt, i passager med liten eller ingen bergtäckning. I föreliggande artikel redovisas ett fall från snabbspårvägen i Stockholm där tunnel passerat en sträcka med liten bergtäckning. Drivningen och förstärkningsåtgärderna har här utförts helt från tunneln för att skona omkringliggande bostadsområden i så stor utsträckning som möjligt. I det följande ges först en projektbeskrivning, följd av vald drivnings-metod och en redogörelse för arbetsprincipen aktiv design. Artikeln avslutas med sammanfattning och slutsatser.

Projektbeskrivning

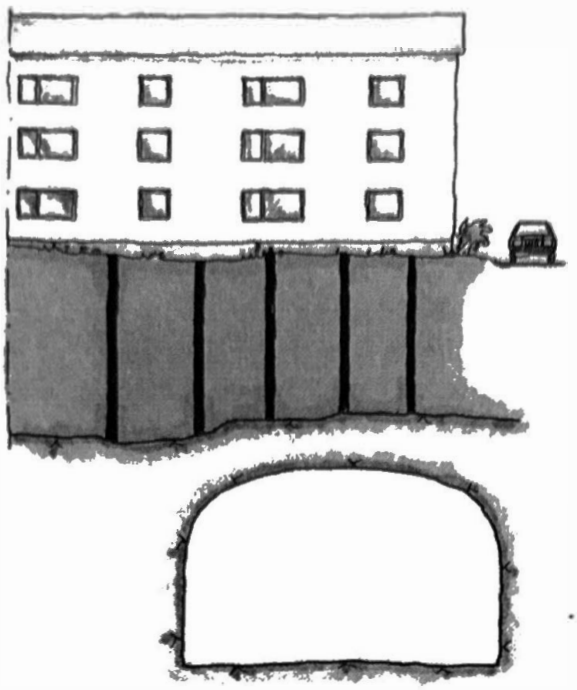
Snabbspårvägen är en av de sex huvuddelar för kollektivtrafikens förbättring i Stockholm som ingick i det havererade Dennispaketet. Snabbspårvägen byggs på sträckan Gullmarsplan – Årsta – Liljeholmen – Stora Essingen – Alvik. Från Alvik in i berget under Traneberg byggs en depåtunnel samt första delen av ytterligare en tunnel för att möjliggöra en framtida förlängning mot Sundbyberg, Solna och Universitet.

Projektet "Snabbspårvägen, Depåspåret, KM 0/688-1/456 ägs av SL Bansystem AB och AB Storstockholms lokaltrafik och är upphandlat som funktionsentreprenad. Entreprenör är Skanska Anläggning AB med Tommy Forsgren som produktionschef. Injekterings- och sprutbetongarbeten utförs av Stabilator AB. Skanska Teknik har design ansvar (detaljprojektering) för utformning av förstärkningssystem för en kortare sträcka av tunneln där bergtäckningen är mycket liten. Övrig bergtunnelprojektering med normal bergtäckning utförs av J&W.

Vid Vidängsvägen passerar den 11,2 m breda bergtunneln under en djup svacka, sektion 1/207-1/221. Svackan har en begränsad utsträckning, delen med bergytan lägre än +12 m är runt 4 m lång, bergytan är som lägst belägen på nivå runt +10,5

© 1999 Svenska Bergteknikföreningen och författare

m. Tunneltaket ligger på nivå +9 m. På en kortare sträcka är bergtäckningen således 1-1,5 meter. Den geotekniska undersökningen visar att jordmäktigheten är ca 10 meter i svackan. Bergmassan överlagras av en friktionsjord (Sandig grusig siltig morän) med en tjocklek mellan 1–2 m , ovan den en medelfast till fast lerlager på 6-7 m samt överst en fyllning på 1-2 meter.



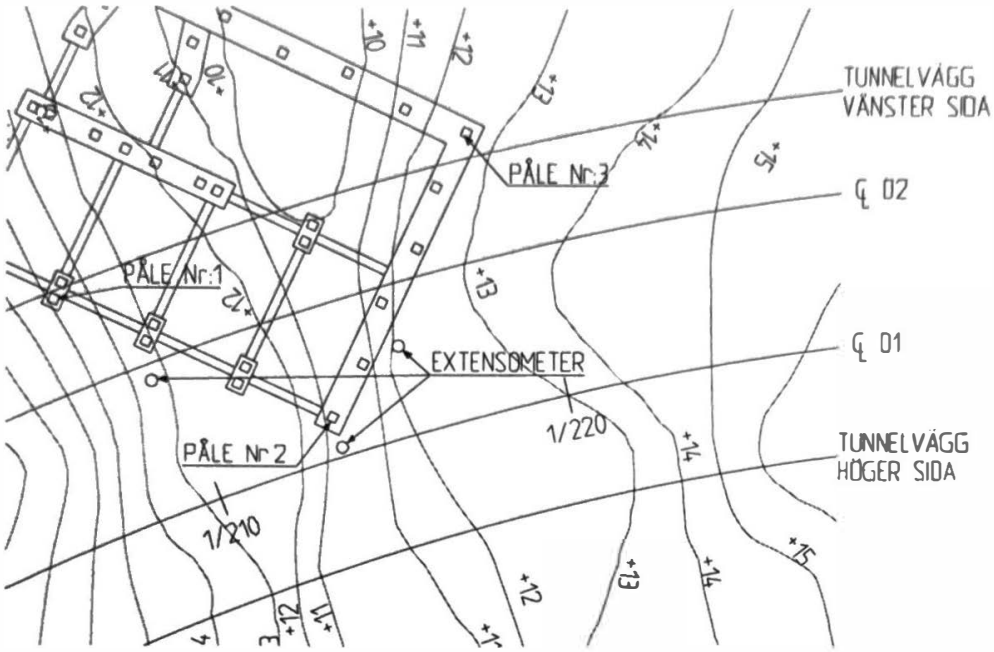
Figur 1 *Principiell placering av fastighet, tunnel och grundläggning*

När tunneln passerar svackan drivs den under det syd-östra hörnet av fastigheten kv. Snasahögarna nr 9. Grundläggningen är delad, på berggrunden och pålad över svackan. Pålgrundläggningen i svackan är nerförd på tunneltaket där man har minst bergtäckning. Gamla bygghandlingar (1937) från Stockholms Stadsbyggnadskontor visar att pålarna är stoppslagna i friktionsmaterialet mellan ca 0,3-0,5 m från bergytan. Varje enskild påle antas föra ner en last på 20 ton. Fastigheten är ett treplans hyreshus med källare och vind, uppförd 1937 med gjuten bärande stomme med murade ytterväggar som är putsade. Vibrationskraven på sprängningsarbetena är på 5-10 m avstånd 40 mm/s och 10-15 m avstånd, 30 mm/s.

Grundvattnet tillåts ej sänkas under tidigare lägsta nivån i samband med att man driver tunneln. Detta för att eliminera risken för sättningar. Grundvattenmätningar utförs i 5 punkter parallellt med Vidängsvägen. Grundvattenytans nivåtopp kommer i april-maj och är då belägen på nivån runt +17 m. Mätningarna visar stora nederbördsberoende variationer. Högsta respektive lägsta uppmätta grundvattennivåerna varierar upp till 4,5 m sedan 1994. För att möjliggöra artificiell infiltration i området har ett infiltrationsrör installerats i svackan.

© 1999 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Inläckningskrav i bergtunneln är för "Svackan" 1 l/min.20 m och för övriga tunneln 2 l/min.100 m.



Figur 2 *Grundritning Snasahögarna nr 9 med nivåkurvor av bergytan från förundersökning. Markytans snittnivå +19,5 m, tunneltak +9 m.*

Design filosofi

Drivning och förstärkning av tunneln under Snasahögama 9 skall utföras på ett sådant sätt att fastigheten ej skadas. Tunneldesignen baseras på att bergmassan med förstärkningen av fiberarmerad sprutbetong, bult, spiling samt armerade sprutbetongbågar skall förmå att bilda ett valv tillräckligt starkt för att bära lasterna från ovanliggande jordmassa och pålar. Trots att svackan har undersökts noggrant i förundersökningen är de verkliga förhållandena delvis okända. För att möta denna osäkerhet har permanentförstärkningen av svackan konstruerats för två typfall. I bergförstärkningsklass 1 är bergförhållandena förhållandevis bra (Q>1). Det andra fallet, bergförstärkningsklass II, skall utföras vid Q<1, vid signifikanta svaghetszoner och då en deformation i bergytan överstiger 10 mm.

Då de geotekniska förhållanden till stor del är osäkra genomförs projektet enligt principen för aktiv design. Detta innebär att en prediktion av förhållanden görs, observationer dokumenteras och utvärderas sedan och eventuella åtgärder vidtas.

Tunnelavsnittet vid passage av svackan har klassats som Geoteknisk Klass 3, dvs. framtagna handlingar har granskats av Prof. Håkan Stille som oberoende

© 1999 Svenska Bergteknikföreningen och författare

granskare. Löpande granskning av utfört arbete genomförs genom granskningsmöte efter varje takfällning- och strossning i svackan.

Vald metod för drivning och förstärkning

I strävan att minska omgivningspåverkan och störningar för omkringboende valde Skanska att angripa svackan med metoder utgående helt från tunneln. För att få en så säker lösning som möjligt till en begränsad kostnad valdes en metod som baseras på samverkan mellan sprutbetong, bult, spiling och bergmassan. Under antagande att bergmassan var bättre än Q>1 har bergmassan tillskrivits en hållfasthet större än ca 5MPa. I det följande beskrivs tunneldrivningen och vald förstärkningsmetod för bra berg. Därefter berörs sprängtekniken mer i detalj.

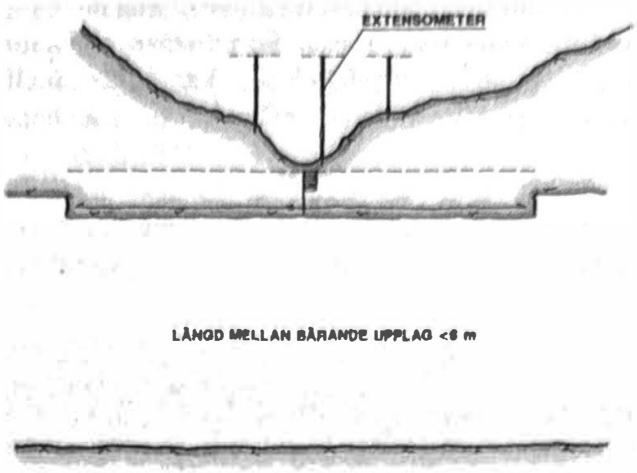
Drivning och förstärkning

Tunneldrivningen vid passage av svackan genomförs i två steg. I steg ett drivs en pilottunnel under svackan med minst 4 m bergtäckning. Pilottunneln karterades kontinuerligt så att en noggrann prognos kunde upprättas för det efterföljande strossnings arbetet. Pilottunneln är 6,5 x 6 m och möjliggör att den övriga produktionen i tunneln inte störtes av arbetet i svackan..

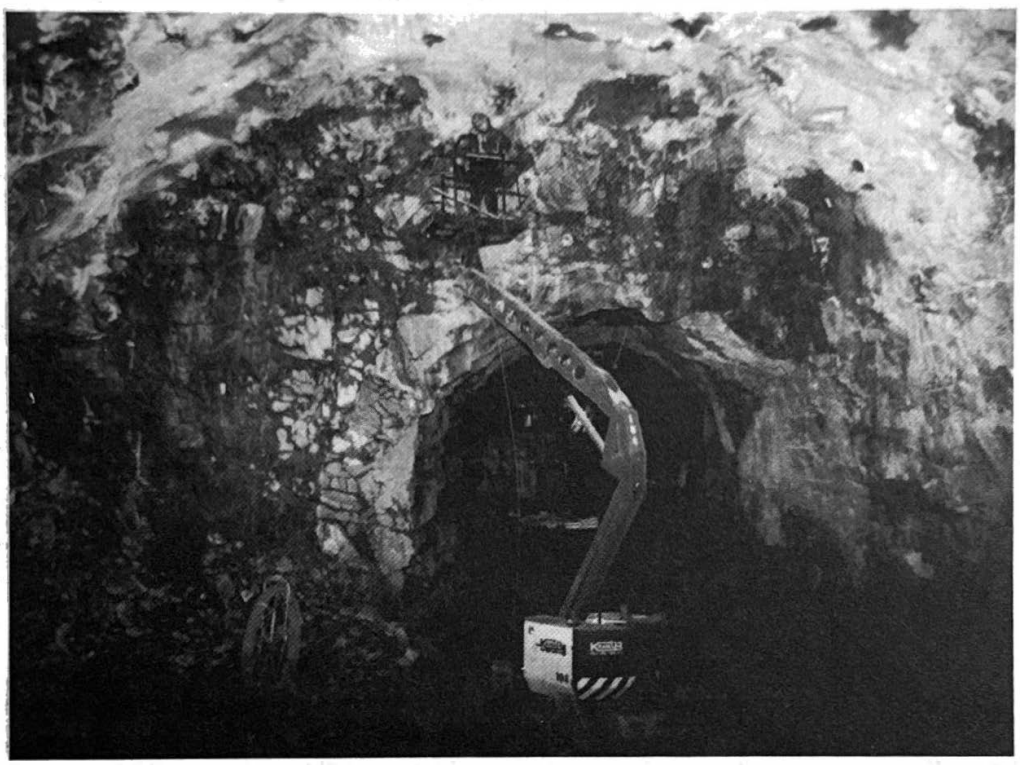
I steg två utförs takfällning och strossning till full höjd. Vid uttag till full sektion skall spiling först installeras. Syftet med spilingen är att ge bergmassan sådan stadga att stora deformationer och kollaps undviks även om bergmassans kvalitet är sådan att ett valv tvärs tunneln ej kan utbildas. Som kriterium för spilingens hållfasthet förutsätts att den skall ha sådan hållfasthet att tre salvor (6 m) kan tas ut utan att ett valv tvärs tunneln utbildas. Här antas att bergmassan kan liknas vid en fritt upplagd balk vilken armeras i underkant av spilingstag. Spilingen skall då vara sådan att den klarar de moment och de tvärkrafter som utbildas vid ett spann av 6 meter. I sin främsta ände kan balken antas vara upplagd på den ännu ej uttagna bergmassan, i sin bakre ände antas balken upplagd på ett stabilt valv av berg eller betong (Fig 3).

Spilingen som används är Titanstag 40/16 mm med ett c/c avstånd på 0,3 –0.5 m i ett mönster som tillåter att bultar borras mellan stagen. Spilingen installeras i hål borrade med 76mm krona och med styrstänger. Då läget av borrhålen för stagen hör till de mest kvalitetskritiska arbetsmomenten mättes hålen in i hela sin längd. Denna mätning visade att hålen kunnat borras helt rakt.

© 1999 Svenska Bergteknikföreningen och författare



Figur 3 *Principiell modell över samverkanskonstruktionen berg-spiling*



Figur 4 *Drivningen görs i två steg, först en pilottunnel, därefter strossning till full storlek*

Då spilingen monteras nära tunnelytan krävs en konstruktion för att garantera att de vertikala tvärkrafterna från spilingen förs upp i det bärande bergvalvet. Denna konstruktion består av en 400mm bred, 200mm hög sprutbetongbåge vilken förankras i berget med bult. Bågen armeras med 4 st kamstål Ø 20 mm och bultarna, belagda med dubbelt rostskydd, kamstål Ø 32 mm, är placerade c/c 0,8 m i varje båge. Bågarnas inbördes avstånd är 2 m. Vid passagen av svackan med minst bergtäckning är c/c avståndet på bågarna 1 meter.

© 1999 Svenska Bergteknikföreningen och författare

På detta vis utgör bulten, spilingen och sprutbetongbågarna det bärande huvudsystemet tillsammans med bergmassan. Sprutbetong krävs för att ge bergmassan ett ytskydd som stabiliserar block som kan falla ut mellan spilingstagen. Vidare skall sprutbetongen överföra kraften från bågen och ut i bulten.

I händelse att bergmassan är så dålig eller att deformationerna är så stora att den utökade förstärkningen skall användas, installeras 500mm sprutbetong direkt vid stuff.

Sprängtekniska aspekter

Eftersom betongpålar från huset står rakt ovanför tunneln med endast 1,5m bergtäckning så är mycket försiktig sprängning nödvändig för att undvika skador på pålarna eller onödig sättning. Takfällning och strossning utförs med dubbla slätsprängningsrader, korta salvor (max 2m) svaga laddningskoncentrationer samt speciell tändteknik. Vissa salvor har sprängts med elektroniksprängkapslar. Utsättning av förstärkningsbult för sprutbetongbågar utföres med stor noggrannhet så att installerad spiling inte skadas vid borrningen.

I samband med strossningen till full höjd har det varit av stor vikt att kvarvarande bergmassa förstärkts så att inga extra oönskade utfall sker i samband med strossningen.

Aktiv design

Som tidigare nämnts har projektet drivits enligt principen för aktiv design. I det följande beskrivs mer ingående de olika stegen, prognos, observation och utvärdering-åtgärd. Vidare redogörs för gjorda observationer.

Prognos / Förutsägelse

Med utgångspunkt från den geologiska karteringen och erfarenheter från drivningen av pilottunneln upprättades en bergmekanisk prognos över den förväntade bergkvaliteten i svackan med avseende på material, Q-värde, sprickfrekvens, vattenförekomst mm. Vidare utfördes en beräkning av erfoderlig hållfasthet på bergmassan. Denna beräkning visade att bergmassan bör ha en hållfasthet över 5MPa och ingen extremt ogynnsam sprickstruktur för att ett fullgått valv skall kunna utbildas i samverkan med förstärkningen.

© 1999 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Risk analys

Riskanalysen är en del av aktiv design processen och har för Depåtunneln, Alvik utförts i två steg:

1. Inledningsvis har, före designarbetet, en genomgång av projektet och en brainstorming om möjliga faror och skadehändelser gjorts. De identifierade farorna har sedan legat till grund för och beaktats under designarbetet.
2. Som ett andra steg har, baserat på vald design, en mer noggrann genomgång av potentiella faror och skadehändelser gjorts vilket har utmynnat i rekommendationer på åtgärder som bör vidtas under tunnelarbetet för att så långt som möjligt förhindra att faror utlöses.

Rekommendationerna har resulterat i att kontrollplaner har upprättats. På så sett erhålls en verifikation att egenkontrollen fungerar och att arbetsordningen fungerar som det är tänkt.

Problemområden som utkristalliseras i riskanalysen är förknippade med bergytans läge, dvs. möjlighet för farorna running och flowing ground samt instabilitet i tunneltak, och med vattensituationen. Till följd av liten bergtäckning eller stort vatteninflöde identifierades följande möjliga skadehändelser:

- För stor *deformation i tunneltak*, kan leda till *sättning* i hus och även till att rör nergrävda i marken knäcks.
- *Nedfall av nyckelblock (även mindre block)*, ger eventuellt för *stor deformation i tunneltak*.
- För stor *vatteninläckning*, ger minskat portryck i leran vilket på sikt leder till *sättningar* i omgivande bebyggelse.
- *Tunnelras*, kan leda till *totalkollaps*.
- För *stora vibrationer*, kan ge *sättningar eller sprickbildning* i närliggande byggnader.
- *Sonderingsborrning*, kan ge skada på pålar som ger *sättningar* i ovanliggande byggnad.

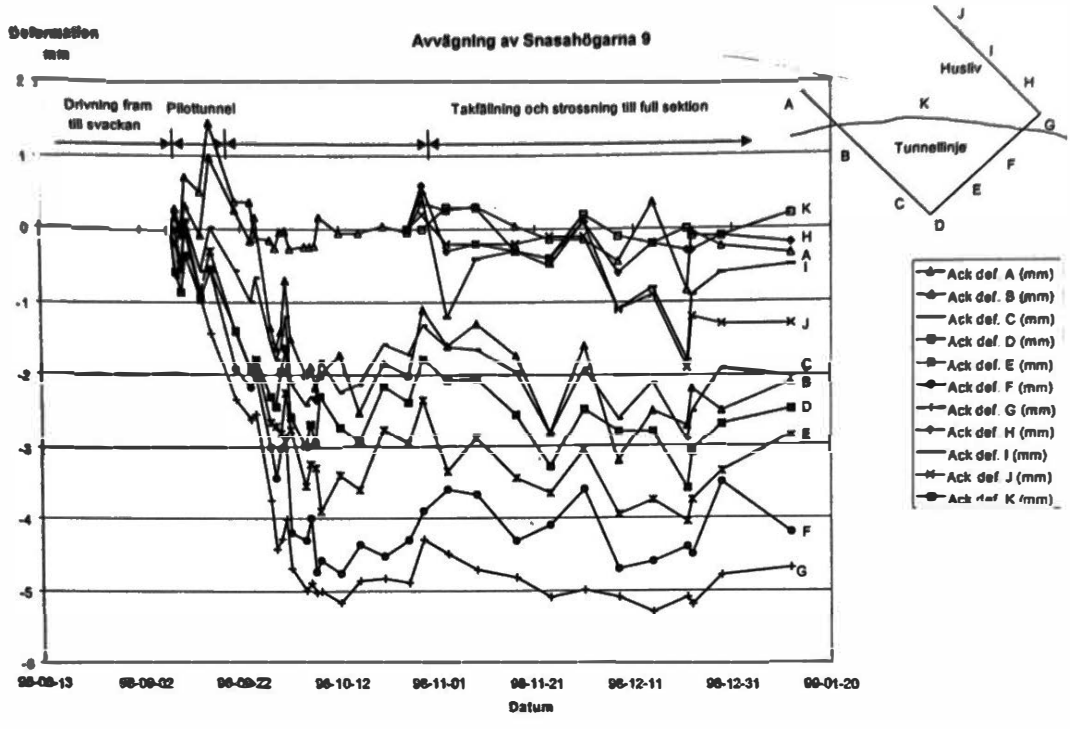
Observationer

Vid bergdriften utförs ett omfattande mätprogram i enlighet med upprättade kontrollplaner samt kartering av berget efter varje salva. Mätprogrammet som är baserat på riskanalysen omfattar 3 punkts konvergensmätning ifrån tunneln, avvägning av fastigheten Snasahögarna nr 9 i 11 punkter, tre stycken extensometrar som mäter deformationer i bergytan i förhållande till markytan, mätning av grundvattenytans nivå samt sondringsborrning innan varje salva. Bergdriften samt förstärkningen anpassas efter underlaget ifrån mätprogrammet tillsammans med karteringen. I det följande redovisas resultat från de observationer som utförts fram till skrivandet av denna artikel.

© 1999 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Avvägning av fastigheten Snasahögarna nr 9 och extensometermätning.

Från mätningar kan konstateras att huset har satt sig totalt 9 mm i båda de hörn som kontrollmätts. Sedan regelbundna mätningar inleddes har det hörn som befinner sig över tunnelns ytre kant (punkt G) satt sig mest, ca 5 mm emedan det andra hörnet (punkt D) satt sig 4 mm. Från dess att pilottunnel passerat svackan har inga deformationer uppmätts. Alla mätpunkter är stilla. Inga deformationer har uppmätts i extensometrarna som lästs av dagligen i samband takfällning och strossning i svackan (fig. 5).



Figur 5 *Resultat från avvägningen av fastigheten Snasahögarna nr 9. Maximalt tillåten deformation = 10 mm.*

Första salvan av pilottunneln sköts 980907 och upprymningen till full sektion på andra sidan av pilottunneln avslutades v38 (980919). Första takfällning och strossningen till full sektion i svackan sköts 981029, den andra salvan 981127 och den tredje 981222. Läggs denna information tillsammans med utförda mätningar visar detta att friktionslager som överlagrar berget har packats till följd av de vibrationer som uppkommit i samband med sprängning. Denna packning har lett till att pålarna satt sig, vilket i sin tur leder till sättningar i huset. Sättningarna i huset avtar mot den del som är grundlagd på berg. De deformationer som kunnat uppmätas fram till idag visar att huset nu utsatts för en diffrentialsättning

© 1999 Svenska Bergteknikföreningen och författare

motsvarande 9mm/10m eller ca 1:1000. För att skador skall uppkomma krävs normalt en deformation motsvarande 1:500.
Byggnaden är således ej ännu utsatt för några skadliga sättningar.

Uppskattning av spänningar med konvergenmätning

I ett försök att uppskatta de horisontella bergspänningarna i området har en konvergensmätning nära stuff i sektion 1/215 utförts i samband med drivning av pilottunneln. Mätsektionen installerades ca 0,5m från tunnelfronten, varefter konvergensen till följd av uttaget mättes. Resultaten visar att huvudspänningen är horisontell och ligger mellan 3,5 till 7 MPa.

Grundvattenytans läge

Grundvattenytans läge följer den naturliga fluktuationen med de lägsta nivåerna i augusti-september varje år. Grundvattenytans läge har inte varit lägre än det tidigare uppmätta lägsta nivåerna. Mätningarna visar på stora nederbördsberoende variationer.

Utvärdering/ Åtgärd.

Vid regelbundna möten mellan ansvarig konstruktör och entreprenör utvärderas gjorda observationer. Förslag på åtgärder läggs fram och fastställs. Fram till idag har inga mätningar föranlett större åtgärder, dock har antal mätpunkter och intensiteten av mätningar justerats upp i samband med passagen av pilottunneln och i samband med takfällning.

Vidare hålls regelbundet (efter varje takfällning) ett GK3 möte där utförda arbeten redovisas och gjorda observationer studeras. Denna del av processen har fungerat som en viktig länk i kvalitetssäkringen av projektet.

© 1999 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Sammanfattning/Slutsatser

Drivningen av depåspåret genom svackan i Alvik innebar att en 12m bred tunnel togs ut med endast 1-1,5m bergtäckning. Bergmassan överlagras av ett totalt 10m mäktiga morän och lerlager. En 3 våningars fastighet är grundlagd på pålar vilka är stoppslagna mot bergytan. För att skona de boende i området har Skanska drivit tunneln genom svackan med alla åtgärder utgående helt från tunneln.

Drivningen och förstärkningen av tunneln har utförts med spiling, bult och sprutbetong som installerats och utnyttjats i samverkan med bergmassan. Genomförandet av projektet har baserats på två grundkrav, dels skall inläckningen i tunneln aldrig överstiga specificerade 1l/min,20m, dels skall fastigheten ej skadas vilket innebär en tillåten sättning av maximalt 1:500.

I artikeln har vald förstärkningsmetod och valt system för övervakning beskrivits. Hela arbetet har lagts upp enligt principer för aktiv design, dvs med en prediktions-fas, följd av en observationsfas vilken sedan utvärderas och åtgärder vidtas. I skrivande stund kan det konstateras att detta system ger en väl strukturerad byggprocess där samtliga inblandade parter varit väl insatta i problematiken och med den dags-aktuella situationen.

Då bergmassans kvalitet i svackan inledningsvis var okänd har två olika konstruktioner projekterats, en för bra berg och en för dåligt berg. Då förundersökningen indikerade skapliga förhållanden påbörjades arbetet i enlighet med antaganden om bra bergförhållanden. Som kriterie för övergång till alternativ design valdes en vertikal deformation i bergytan av 10mm eller en snedsättning hos fastigheten överstigande 1:500.

De mest kvalitetskrisiska arbetsmomenten var borrningen för installation av spilingen, injekteringen samt takfällningen. Det kan här konstateras att man med styrstänger kunde borra raka hål som inte avviker mer än 1% från tänkt linje. Injekteringen var så lyckosam att samtliga spilinghål utom ett var helt torra. Takfällningen har genomförts med mycket försiktig sprängning. Inga onödiga utfall erhölls utan tunnelprofilen kunde hållas inom 20 cm från teoretisk kontur. Försök med elektroniksprängkapslar var lyckosamma.