© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Järnvägstunnel Hede – Älvängen under byggnation med nydesignad fyrbomsrigg

Anders Östberg, Veidekke AB Sweden, anders.ostberg@veidekke.se
Mathias Edhammer, Atlas Copco AB, Sweden, mathias.edhammer@se.atlascopco.com
Mr. Gunnar Nord, Atlas Copco AB, Sweden, gunnar.nord@se.atlascopco.com

Sammanfattning

I Skandinavien tillämpas den mest utvecklade förinjekteringstekniken vid nästan all tunneldrivning. Den drivande kraften bakom att tekniken används är kravet att inte påverka grundvattennivåerna. Miljökonsekvenserna av att inte ta hänsyn till grundvattenläckage har visat sig katastrofala – i form av omfattande och ojämna sättningar i byggnadsgrunder och kraftig påverkan av vegetationen.

Förinjekteringsarbete med hög standard har visat sig vara förhållandevis tidsödande och därmed kostsamt - eftersom det råder ett starkt samband mellan tid och pengar vid tunneldrivning. Stora ansträngningar görs för att minska tidsåtgången för tätning. Typiskt används 50 % av tiden för borrning och 50 % för injektering och härdning av injekteringsbruket.

Denna artikel behandlar tunnelbygget Hede – Älvängen i Sverige, där ett nytt angreppssätt på borrning tillämpas. Borriggen har en ny konstruktion som nästan har fördubblat borrkapaciteten och därmed nästan halverat tiden för borrning. Noggrannheten i borrhålplaceringen har inte försämrats – snarare tvärtom. Den drastiskt ökade borrkapaciteten har medfört stora tidsbesparingar – så stora att en investering i en borrigg av detta slag blir ekonomiskt rimlig.

Dessutom kan borriggen skötas av en ensam operatör. Detta ökar säkerheten eftersom risken att av misstag skada en kollega elimineras. All borrning avbryts om operatören lämnar riggen, t.ex. för att byta borrverktyg eller utföra någon annan åtgärd framför riggen.

Den nya borriggen har konstruerats och tillverkats inom ramen för ett samriskprojekt mellan kunden Veidekke och tillverkaren Atlas Copco. Samarbetet har resulterat i en mycket användbar produkt som hittills inte har uppvisat några mer allvarliga barnsjukdomar.

Nyckelord: förinjekteringsborrning, noggrann hålpositionering, arbetsmiljö, kapacitetsökning, tidsbesparing

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Inledning

Förinjektering är en viktig verksamhet vid all tunneldrivning i Skandinavien. Knappast något civilt tunnelprojekt genomförs utan momentet förinjektering. Så är fortfarande inte fallet i de flesta andra delar av världen, och vi ska därför inleda med en kortfattad förklaring av begreppet.

Urberget i Skandinavien är till ca 80 % av kristallint berg av förkambriskt ursprung. Det är i stort sett lämpligt för bergbyggnad eftersom materialet är stabilt och hållbart. Icke desto mindre förekommer ett visst mått av sprickzoner och andra svagheter. Det betyder att nästan inga konventionellt brutna tunnlar förses med lining av betong. Permanenta stödstrukturer utgörs normalt av gjutna bultar och sprutbetong.

Jordlagren ovanpå urberget består ofta av så kallade marina leror. De avlagrades mot slutet av den senaste istiden och är inte konsoliderade. Grundvattennivån ligger ofta nära markytan i Skandinavien och vatten som läcker in i en grunt liggande tunnel skulle snabbt sänka grundvattennivån i marken över tunneln. Konsekvensen av detta är sättningar i den okonsoliderade leran, något som i de flesta fall är oacceptabelt för dem som utnyttjar markytan. Alla dessa problem har tydligt illustrerats av tunnelprojektet under Hallandsåsen.

Det kan antas att ovan beskrivna situation är av intresse även i andra delar av världen, där tätning av berget är en billigare lösning än att göra tunneln vattentät med lining.

Det är ekonomiskt betydelsefullt att borrning och förinjektering görs snabbt och med hög kvalitet. Tätningsarbetet står för en stor andel av den totala tunneldrivningstiden, och att tid är pengar är ett välkänt förhållande inom tunnelindustrin. Förinjekteringshålen i järnvägstunneln Hede – Älvängen borras med en nyutvecklad rigg som är särskilt konstruerad för just förinjekteringsarbete. Det valda projektet har hittills uppvisat kvalitets- och kapacitetsdata som gör det till ett lämpligt objekt för att presentera borrtekniken.

Projektet

Den 130 m^2 stora tunneln är en del av uppgraderingen av järnvägslinjen mellan Göteborg och Trollhättan. Det är en dubbelspårig tunnel för höghastighetståg, med total längd på 1,1 km. En räddningstunnel på 35 m^2 löper parallellt med huvudtunneln på en sträcka av 0,6 km. För att öka produktionshastigheten, men även för att ge åtkomst till räddningstunneln, har ett 500 m långt mellanpåslag brutits. Primära data för projektet framgår av tabellen nedan.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tabell 1 Primära data för tunnelprojektet

Bergavverkning	m^3	281 000
Borrade meter spränghål	m	560 000
Borrade meter injekteringshål	m	130 000
Sprutbetong	m^2	77 000
Bergbultar	m	16 000
Avlopp för av läckvatten	m^2	21 000

Den svenska divisionen av det norska företaget Veidekke är underentreprenör till PEAB Company, som har fått en stor del av uppgraderingsprojektet för järnvägslinjen på sin lott. Veidekke har sitt huvudkontor i Oslo och har totalt 16 000 medarbetare. Den årliga omsättningen uppgår till 2,4 miljarder Euro.

All tunnelbyggnad, inklusive byggnad av permanenta stödstrukturer, ska genomföras på 21 månader. Själva tunnelbrytningen beräknas ta 18 månader. Av dessa 18 månader avsätts normalt omkring 6 månader för tätningsarbete i form av förinjektering, för att hindra att vatten läcker in i tunneln.

Geologin i området domineras av icke-eroderad gråröd granitisk gnejs, med ögon av fältspat på 3 till 4 cm. Det finns en hög halt av biotit. Bergarten är folierad och uppvisar en del obetydlig yterosion Det finns skikt av amfibolit parallellt med folieringen. Dessa skikt är utpräglat sprickiga och eroderade. Klorit- och lerförändringar är vanligt förekommande längs sprickorna i amfiboliten. Gnejsen har däremot råare ytor och saknar vanligtvis inslag av andra bergarter.

Fig. 1 Kartan visar läget förtunnelprojektet i sydvästra Sverige

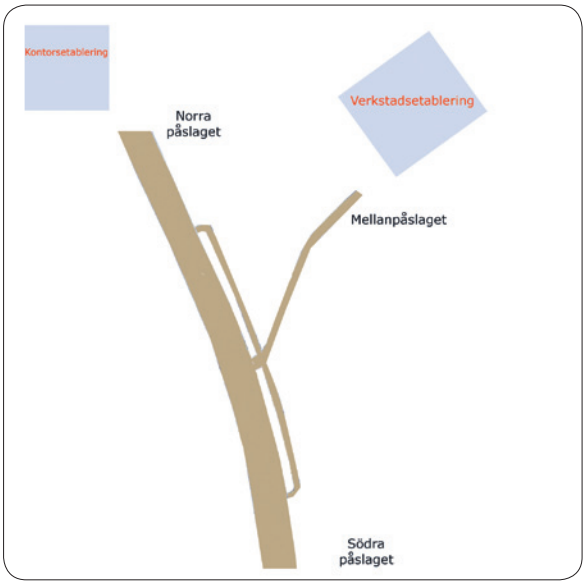

Fig. 2 visar tunnellayouten med huvudtunnel, räddningstunnel och mellanpåslag

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tre större tensionssprickuppsättningar har identifierats och de uppmätta RQD-värdena är mycket höga. I mynningsområdena är det överliggande berget ner till 4 meter tjockt, vilket är ett lågt värde för tunnelspannet på 15 m.

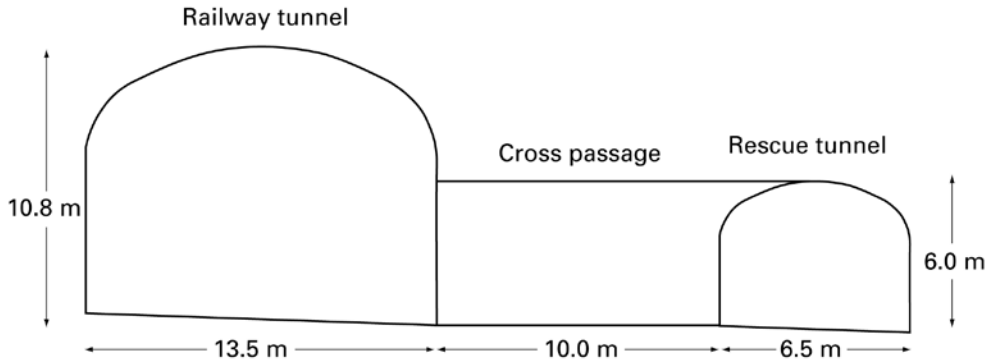

Fig. 3 Tvärsnitt genom huvudtunnel och räddningstunnel

Förinjekteringsborrning med det senaste inom tekniken

Nästan all injektering i Skandinavien utförs före brytning. De som inte är insatta i det praktiska injekteringsarbetet tror förmodligen spontant att det vore mera rationellt att täta efter att vattenläckage har hittats. Så är inte fallet. Tiotals år av erfarenhet visar tydligt att den enda framkomliga vägen är att hålla vattnet ute från början - i synnerhet när acceptansen för läckage är liten.

Förinjektering betyder att injekteringshålen borras i berg där tunneln ännu inte har brutits. Det vanligaste sättet att borra är att placera hålen i trattform längs tunnelfrontens periferi. Figur 4 visar den konfiguration av injekteringshål som används i denna järnvägstunnel. I detta fall borras 38 hål. Antalet hål styrs av bergförhållandena och kraven på tätningseffekt. Tätningsresultatet mäts i enheten ”liter vatteninflöde per 100 meter tunnel och minut”. Godkända värden ligger normalt mellan 0,5 och 10. I detta fall är målet 8 l/100 m och minut. Proceduren har i många år varit att börja med ett mindre antal injekteringshål och övervaka resultatet genom att mäta vattenflödet i särskilt borrade mäthål. Därefter etableras ett förhållande mellan uppmätt läckage och förväntat inflöde. Detta har visat sig vara en tidsödande procedur. Nya metoder att bedöma markförhållandena har gjort det möjligt att noggrant bestämma antalet hål som krävs för att ett specificerat maximalt vatteninflöde inte ska överskridas. Det betyder sannolikt att flera meter hål borras, men istället går arbetet fortare. Mätning av vattenförlust tillämpas fortfarande.

De långa injekteringshålen kräver borrning med förlängningsstänger Det innebär att ett antal sammankopplingar och isärkopplingar av borrstål måste utföras för varje hål. Tills för inte så länge sedan sköttes den uppgiften manuellt av tunnelarbetare

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

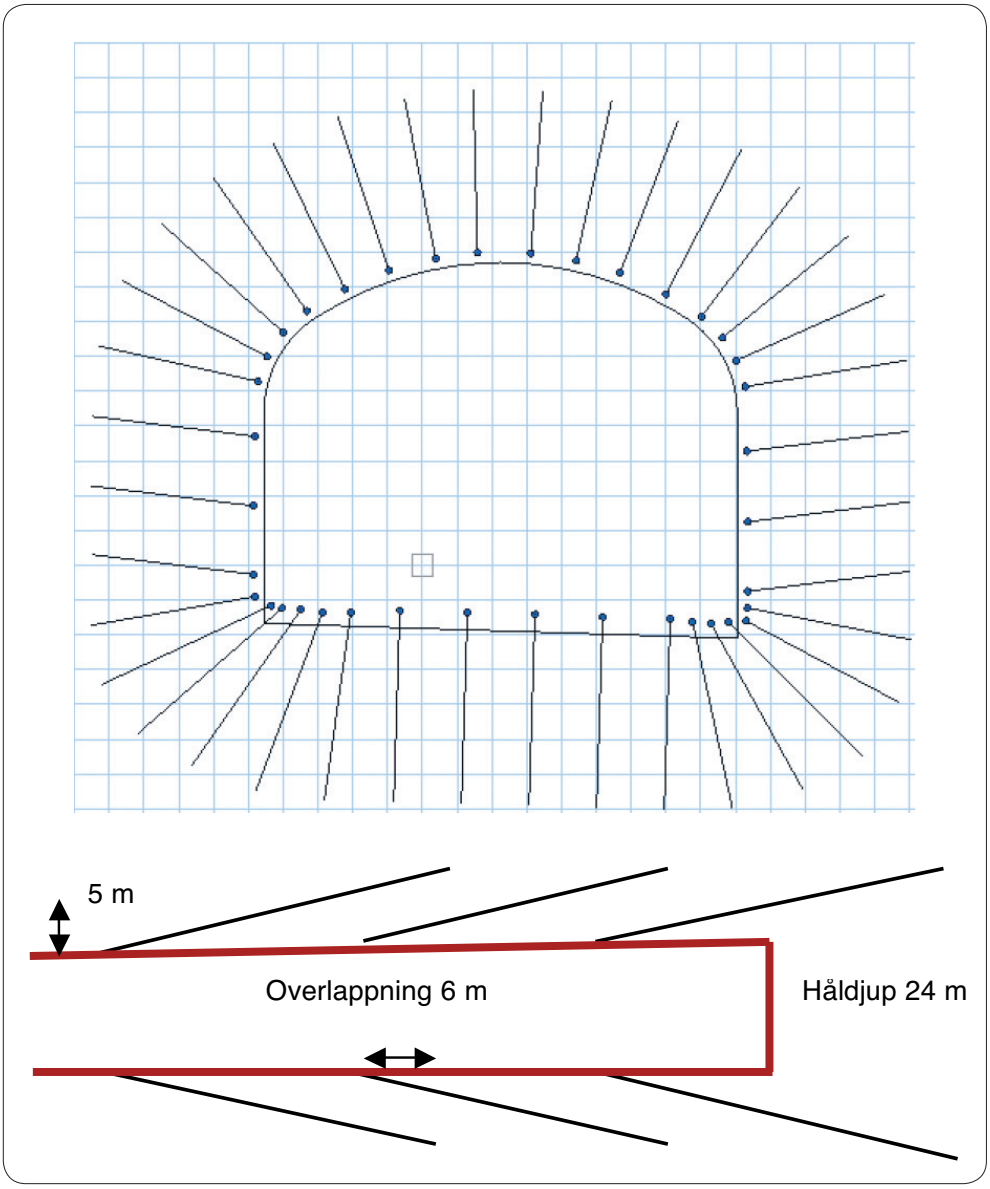

Fig. 4 Injekteringshålmönster för den dubbelspåriga järnvägstunneln Heby-Älvängen. Antalet hål är 38

från borriggens serviceplattform. Säkerhetskraven anger att inga människor får befinna sig framför borriggen medan borrning pågår. Eftersom säkerhetsföreskrifterna tillämpas strikt blev borrningen mycket mera tidsödande och tunneldrivningen kostsammare. Dessa förhållanden har drivit på utvecklingen av helt mekaniserad hantering och sammankoppling av borrstänger.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Ytterligare en faktor som har drivit på mekaniserad hantering är hårdare krav på korrekt placering av borrhålen och minskad tolerans för riktningsavvikelse. En konsekvens av detta är att styvare borrstänger började användas. Det har medfört att borrstängerna är tyngre än förr, och därmed mer krävande att hantera manuellt. Manuell hantering förekommer numera bara i tunnlar som är så smala att riggar med mekaniserat stånghanteringssystem inte kan användas. Manuell hantering innebär att varje borrstång läggs på mataren av en operatör som står på en serviceplattform.

Standardproceduren för borrning av injekteringshål är numera att ha en 2- eller 3-bomsrigg av tyngre typ, med bommar som är tillräckligt starka och styva för att bära ett förråd av borrstänger. Förrådet ska vara stort nog för en borrsträng på 25 till 30 meter. Normalt förses bara 2 bommar med RHS (Rod Handling System – stånghanteringssystem), även om riggen har 3 bommar. Riggen används naturligtvis även för att borra spräng- och bulthål. Dessa operationer kan utföras med RHS monterad på mataren. Användare som föredrar att arbeta utan stångförråd kan snabbt montera av det. Med ”snabbt” menas i detta sammanhang en halvtimmes arbete för av- eller påmontering av förrådet.

Denna standardmässiga borrningsprocedur för en uppsättning injekteringshål, så som beskrivs nedan i figur 4, tar omkring 10 timmar. Till detta kommer tiden för injektering och härdning av injekteringsbruket – tillsammans ytterligare 10 timmar. Det betyder att ett helt dygn går åt för tätningsarbetet. Efter avslutad tätning kan 18 meter tunnel brytas. Normalt kräver 18 meter tunnel 3 (3*6 m) omgångar, och tiden för en omgång är omkring 12 timmar för den tunneldimension som är aktuell vid Hede – Älvängen. Det betyder att tiden för tätning motsvarar omkring 35 % av den totala tunneldrivningstiden för en tunnel av detta slag, och tidsandelen för borrning är ca 17 %.

Veidekkes koncept för borrning av injekteringshål

Med tanke på att borrning för injekteringshål kan ta upp till 17 % av den totala tunneldrivningstiden ligger det nära till hands att tänka sig flera borrmaskiner på riggen. Dubblerad borrningskapacitet skulle teoretiskt minska byggtiden med 9 %.

Om vi antar en tunneldrivningskostnad med en enda rigg på SEK 150 miljoner skulle den tidsrelaterade kostnaden vara omkring SEK 100 miljoner. 9 procent (17 % / 2) skulle betyda en besparing på SEK 9 miljoner för ett enda projekt. Givetvis kommer andra kostnader in i bilden, och tidsbesparingen kanske inte blir så stor som antagits, men den principiella tanken att ha flera borrmaskiner på samma rigg förefaller rimlig. Dessa tankar föranledde Veidekke Company att bilda ett samriskprojekt med Atlas Copco i Örebro, med syftet att bygga en rigg med 4 bommar och utrusta den med borrmaskiner med hög kapacitet, avsedda för att borra långa injekteringshål.

Riggen var avsedd att kunna användas för alla förekommande typer av borrning, både i grävda och sprängda tunnlar. Riggens största konkurrensfördel skulle ligga

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

i borrning av injekteringshål. Borriggen skulle få de bästa funktionerna som är tillgängliga på marknaden. ”Bäst” står i det sammanhanget för säkerhet, kvalitet och kapacitet. Avsikten var att lyfta dessa egenskaper till nya och högre nivåer.

Riggen har 4 likadana bomsystem och har räckvidd för en tunnelfront på 200 m^2. Riggen och dess aktionsradie visas i bilderna 5 och 6. Matningsenheterna är 21 fot långa och är alla är utrustade med RHS. Detta ger maskinen kapacitet att borra 30 meter långa hål med T45-stål, lämpliga för 64 mm borrkronor av retrac-typ. Borrmaskinerna är av typ Cop 3038. Riggens styrsystem (RCS) tillåter drift med en ensam operatör. Styrsystemet bygger på totalsystemet ABC, där riggen utför alla förprogrammerade arbetssekvenser, men där operatören har möjlighet att ingripa vid behov. Systemet har fått namnet ”Auto RHS”. En situation när denna möjlighet kan behövas är när den faktiska situationen avviker från de förhållanden som antogs vid förprogrammeringen av hela borrningsproceduren. I det nya riggkonceptet har operatören fått en mer aktiv roll. Operatören har möjlighet att påverka hålmönster och borrningsinställningar. Denna egenskap benämns ”active operator design”. Det innebär operatören får en viktigare roll att spela för att uppnå optimalt tätningsresultat. Förutom att injekteringshålen placeras mera precist går borrningsarbetet fortare. Det bästa av två världar kombineras - operatörens förmåga att anpassa borrningen efter nya förutsättningar, och maskinens förmåga att snabbt manövrera bommarna.

För att positionera riggen så noggrant som möjligt tillämpas totalstationsteknik. Det innebär att riggpositionen kan etableras med en precision på 1 cm. Detta kan ses som något överambitiöst då det gäller injekteringshål men man ska minnas att riggen även är avsedd för att borra vanliga spräng- och bulthål.

Fig. 5 Boomer XE4 C-riggen, med RHS-förråd monterade på alla fyra bommarna, vid tunnelfronten i Hede – Älvängen

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

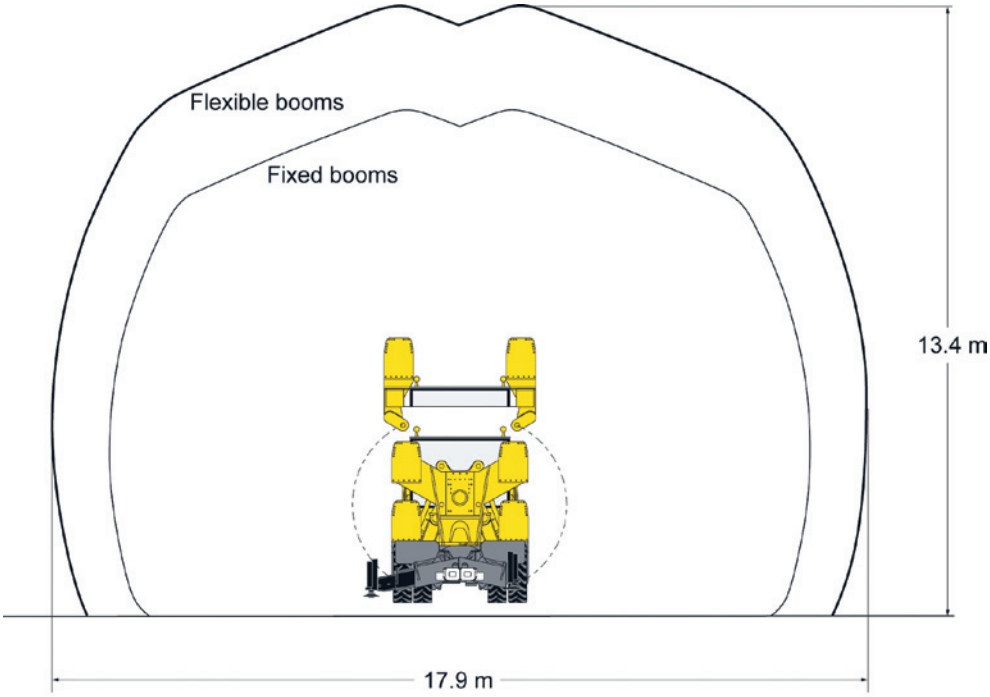

Fig. 6 Räckvidd hos Boomer XE4 C-riggen

Specifikationerna för riggens konstruktion och tillverkning visade sig vara lämpliga för järnvägstunnelprojektet Hede – Älvängen. Projektet är beräknat med kontinuerlig förinjektering och förhållandevis kort byggtid. Gränsen för acceptabelt vattenläckage är 8 l/min och 100 m – alltså inte bland de strängaste. Tillåten avvikelse hos injekteringshål var 4 %, vilket innebär att botten av ett 24 meter lång injekteringshål inte får avvika mer än 1 m från planerad position. Brytningsarbetet är fortfarande i sin inledande fas och inga definitiva resultat kan presenteras. Vad som hittills har uppnåtts är uppmuntrande och motiverar en utförlig presentation av Hede – Älvängen-projektet och den nya 4-bomsriggen.

Prestanda hos fyrbomsriggen i järnvägstunneln Hede – Älvängen

Noggrannheten i injekteringsborrningen mäts kontinuerligt. Resultaten från en håluppsättning framgår av bild 7 nedan. Samtliga hål ligger inom den stipulerade toleransen på 96 cm, som representeras av cirkeln. Självklart förekommer det omgångar där ett eller ett par hål får en oacceptabel avvikelse. Detta kan förklaras av strukturövergångar i berget. Det är känt att när borrkronan passerar ett svagare

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

parti av berget kan hålriktningen påverkas kraftigt. Typiska svagare partier är sprickuppsättningar av något högre frekvenser, foliationer och skiktgränser i sedimentära bergarter. Hålen får i sådana fall inte jämn spridning. En tendens till kluster uppstår vid vinkeln 270 grader, med ett radiellt avstånd på 60 cm. Det skulle kunna förklaras av svagare plan som lutar svagt längs tunnelaxlarna, eller av att borrsträngen böjs. En närmare granskning av hålen och deras placering visar att det är svårt att hitta en rationell förklaring till de observerade avvikelserna, åtminstone för denna omgång. Uppenbart är dock att om toleranserna blir striktare än i detta fall kommer ytterligare förbättringar av borrningstekniken att krävas.

Slagfrekvensen vid injekteringshålborrning ligger i linje med vad som kan förväntas från en borrmaskin på 30 kW och en 64 mm borrkrona i denna typ av berg. Borrsjunkningen varierar mellan 1,5 och 2 m/minut. För 48 mm spränghål fördubblas borrsjunkningen.

Vad innebär detta för förbättringar sett till tunneldrivningshastigheten? Redan på detta stadium kan hävdas att de förväntade förbättringarna har förverkligats. Då det gäller borrning av spränghål kan det verka tveksamt om så mycket tid sparas då man går från 3 till 4 borrmaskiner på riggen. Teoretiskt, även om vi bortser från monterings- och demonteringstid, innebär ett högre antal borrmaskiner att komplexitet och tidsåtgång ökar. Därför kan kapaciteten inte öka med 33 % (4/3 = 1,33) Den traditionella uppfattningen är att det effektiva antalet bommar beskrivs av ekvationen nedan, där ”n” står för det faktiska antalet borrmaskiner och ”ed” står för effektivitetsminskningen med en tillkommande borrmaskin.

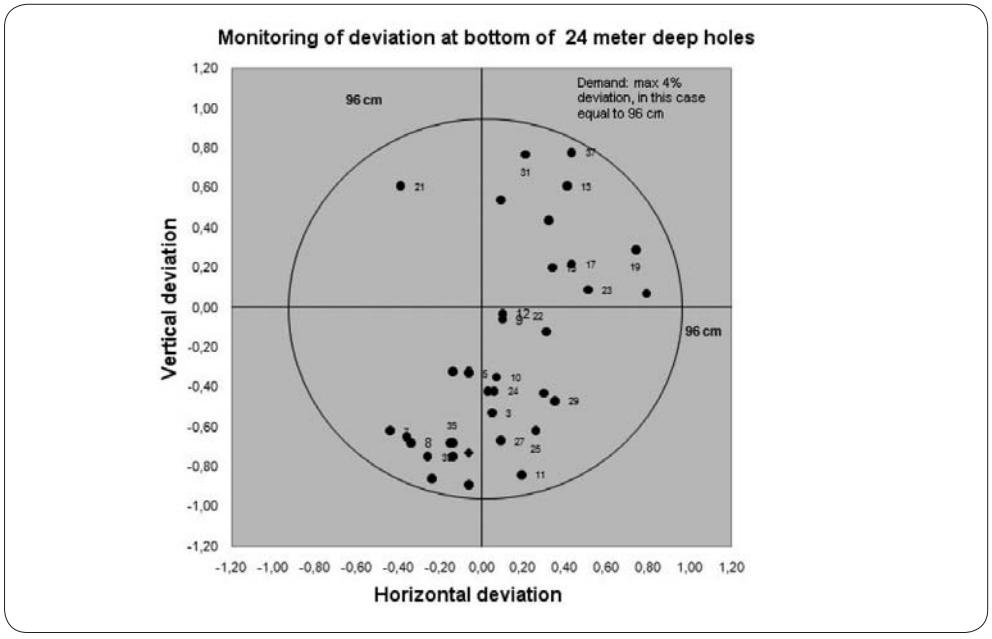

Fig. 7 Avvikelse längst in i de 24 m långa injekteringshålen från en komplett omgång.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Effektivt antal bommar = n*(1-ed)^n

Enligt denna algoritm och med det traditionella antagande av att produktionskapaciteten minskar med 5 % för varje tillkommande borrmaskin får vi resultatet som framgår av tabell 2 nedan. Om detta gamla antagande är korrekt skulle kapacitetsökningen bli 3,4/2,7 = 1,27, dvs. en ökning med 27 %.

Detta värde överensstämmer väl med resultaten som har noterats vid detta projekt, i jämförelse med ett annat där förhållandena är mycket lika och där en XE3C-rigg används tillsammans med borrmaskinen Cop 3038.

Tabell 2. Utgående från den beskrivna algoritmen visar tabellen nedan det effektiva antalet borrmaskiner, som funktion av det faktiska antalet

Effektivitetsminskning för en tillkommande borrmaskin	5 %	5 %	5 %	5 %
Faktiskt antal borrmaskiner	1	2	3	4
Effektivt antal borrmaskiner	1,0	1,9	2,7	3,4

Vid övergång från 2 till 4 borrmaskiner på riggen har ingen algoritm etablerats för att bestämma ökningen av kapacitet för att borra injekteringshål. Men det är enkelt att tillämpa formeln för att kontrollera vilket resultat som skulle kunna förväntas inom detta område. 3,4 dividerat med 1,9 blir 1,8, vilket inte ligger alltför långt från den erfarenhet som hittills har gjorts. Jämförelsen mellan empiriska resultat har gjorts på motsvarande sätt som då det gäller spränghål.

Fig. 8 Boom BUT 45 med monterat stånghanteringssystem

Riggbemanning och säkerhetsaspekter

Storleken på arbetslaget för en borrigg varierar kraftigt internationellt sett. I ett projekt med starkt fackligt inflytande kan den fackliga organisationen kräva att varje borrmaskin ska bemannas av 2 personer. Det betyder att en 3-bomsrigg kräver 6 operatörer. I utvecklingsländer är det vanligt med en operatör per borrmaskin. I Europa arbetar typiskt 2 operatörer på en 3-bomsrigg.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

I fallet Hede – Älvängen räcker det med en operatör för att sköta 4-bomsriggen. Operatören tar hand om hela processen – transport fram till tunnelfronten, anslutning av matning, navigering och borrning. Detta betraktas som ett mycket säkert sätt att arbeta, eftersom det utesluter varje risk för kommunikationsmissar operatörer emellan. Dessutom behöver ingen person arbeta från serviceplattformen. Stånghanteringssystem gör den verksamheten överflödig. Hittills har förväntningarna på säkerhetsförbättring infriats. Antalet ackumulerade mantimmar vid borriggen torde fortfarande vara för litet för att bekräfta att säkerheten har förbättrats.

Ekonomiska aspekter på 4-bomsriggen

Tidigare i artikeln har konstaterats att produktiviteten med en 4-bomsrigg är avsevärt högre än med en 3-bomsrigg. 4-bomsriggen uppfyller utan problem kvalitetskraven och erbjuder troligen en högre säkerhetsnivå och ännu lägre personalbehov. Alla dessa förhållanden bidrar till att pressa kostnaderna.

En snabb titt på tidsbesparingen visar följande:
Borrning av spränghål står typiskt för omkring 20 % av den totala tiden vid tunnelfronten. 20 % minskning av borrningstiden som kan uppnås vid övergång från 3 till 4 bommar, skulle innebära att brytningstiden minskar med 4 %, och den totala tunneldrivningstiden med 2,7 %. Den tidsrelaterade kostnaden för detta projekt, och för denna borrigg, har tidigare i artikeln uppskattats till SEK 100 miljoner. Besparingen blir då SEK 2,7 miljoner.

Diskussionen om besparingar ovan, för injektering, slutade på SEK 9 miljoner. Att minska antalet operatörer betyder troligen ytterligare 2 miljoner i ett projekt av detta slag. Det innebär att besparingar på omkring 14 miljoner kan förväntas. Givetvis finns det även faktorer som ökar kostnaderna, som inköp av en dyrare rigg, personalutbildning och inkörningsproblem som oundvikligen uppstår med en ny rigg. På lång sikt förefaller Veidekkes princip vara ekonomiskt sund för nya tunnelprojekt under den närmaste framtiden.

Slutsatser

När nya produkter lanseras finns det alltid ett starkt intresse från marknaden att få veta om den nya produkten är en förbättring eller ej, sett till aspekter som säkerhet, miljö, produktivitet och kvalitet i utfört arbete. Därför har denna artikel tagits fram kort tid efter att riggen tagits i bruk. Så skulle inte ha varit fallet om användare och leverantör inte hade haft förtroende för produkten.

Den drivande kraften bakom utvecklingen av den nya borriggen var ett starkt önskemål från tunneldrivningsentreprenören Veidekke till borriggtillverkaren Atlas Copco. Veidekke visste vad de behövde och Atlas Copco visste vad som var möjligt.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tillsammans tog företagen fram en specifikation för en borrigg för injekteringshål. Riggen skulle kunna klara all hålborrning som förekommer vid tunneldrivning, men med särskilt tonvikt på borrning av injekteringshål.

Riggen tillverkades och levererades i mitten av 2010 och har hittills – hösten 2010 – levt upp till de höga förväntningarna. Frågan är vilka lärdomar som kan dras av detta? Diskussionerna kring riggen inleddes på ett tidigt stadium och det fanns gott om tid för att utbyta idéer och även för att kontrollera ordentligt. Projektet inleddes alltså med mycket ambitiös planering, och det har visat sig vara värdefullt.