

BERGMEKANISKA ANALYSER FÖR STATIONSUTRYMMEN FÖR NY TUNNELBANA AKALLA-BARKARBY

ROCK MECHANICAL ANALYSIS FOR UNDERGROUND STATIONS FOR NEW METRO LINE AKALLA–BARKARBY

Fredrik Perman, Itasca Consultants AB

Linda Jonsson, Itasca Consultants AB

Christer Andersson, Ramböll

Miriam Isaksson-Mettävainio, Ramböll

Jonny Sjöberg, Itasca Consultants AB

Ulf Lindfors, Itasca Consultants AB (numera ÅF Infrastructure)

Martin Brantberger, Förvaltning för utbyggd tunnelbana (SLL)

SAMMANFATTNING

Stockholms läns landsting ansvarar för den pågående utbyggnaden av tunnelbanan och har bildat en förvaltning för att planera och genomföra utbyggnaden, Förvaltningen för utbyggd tunnelbana. Den nya tunnelbanans sträckning mellan Akalla–Barkarby utgör en av etapperna i utbyggnaden, och går från Akalla station i öst, över Järvafältet till Barkarby i väster. Längs den nya sträckningen finns två stora underjordsstationer planerade – Barkarbystaden och Barkarby. I denna artikel beskrivs de bergmekaniska analyser som utförts för stationsutrymmena vid båda dessa stationer. Projekteringsprocessen beskrivs översiktligt i sin helhet, följt av utfört arbete för att ta fram indata till dimensionering. Stationsutrymmena utgörs av relativt komplexa tredimensionella geometrier och dimensioneringsanalyser har företrädesvis utförts med 3D numerisk modellanalys. Ett antal svaghetszoner finns också i båda stationsområdena. Såväl kontinuum- som diskontinuum-analyser har därför utförts. Kompletterande analytiska beräkningar för dimensionering av förstärkning har också genomförts.

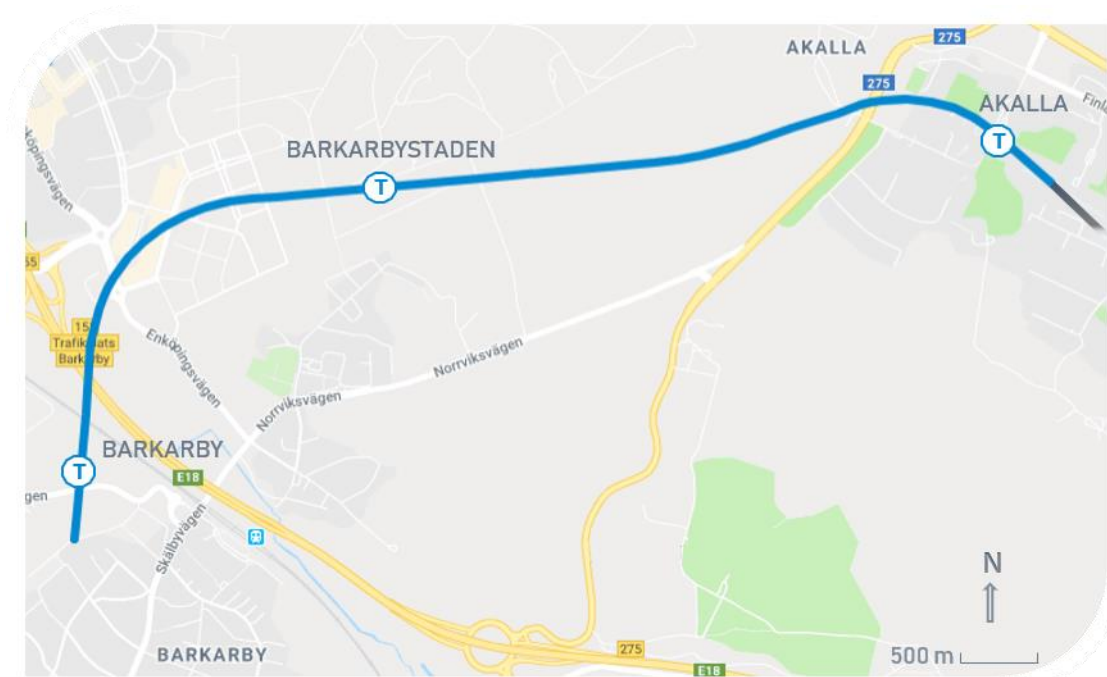
SUMMARY

The Stockholm County Council is responsible for the development of the metro and has tasked the "Förvaltning för utbyggd tunnelbana" to develop three new metro lines in Stockholm. For one of the three lines, Akalla–Barkarby, two large underground stations are planned — Barkarbystaden and Barkarby. This paper describes the rock mechanical analyses conducted for these stations. The design process is described followed by conducted work to derive input data for design. The station exhibits relatively complex three-dimensional geometries and analyses have primarily been conducted using three-dimensional numerical modeling. A number of weakness zones exist in the area, and both continuum and discontinuum modeling has been conducted. Supplementary analytical calculations for reinforcement design have also been performed.

1 INLEDNING

Stockholms läns landsting ansvarar för den pågående utbyggnaden av tunnelbanan och har bildat en förvaltning för att planera och genomföra utbyggnaden, Förvaltningen för utbyggd tunnelbana. Ramböll har tillsammans med Tyrens och White haft projekteringsuppdraget för den nya tunnelbanans sträckning Akalla–Barkarby, med bl.a. Itasca Consultants AB som underkonsult. Detta utgör en av totalt fyra etapper i utbyggnaden och går från Akalla station i öst, över Järvafältet till Barkarby i väst. Den nya sträckningen är ca 4 km lång och två stora underjordsstationer är planerade – Barkarbystaden och Barkarby, se Figur 1. Stationsområdena inkluderar stationsrum med en parallell servicetunnel, tvärtunnlar och anslutande spårtunnlar. Vid båda stationerna finns två rulltrappsschakt som ansluter till markytan och vertikalschakt för ventilation.

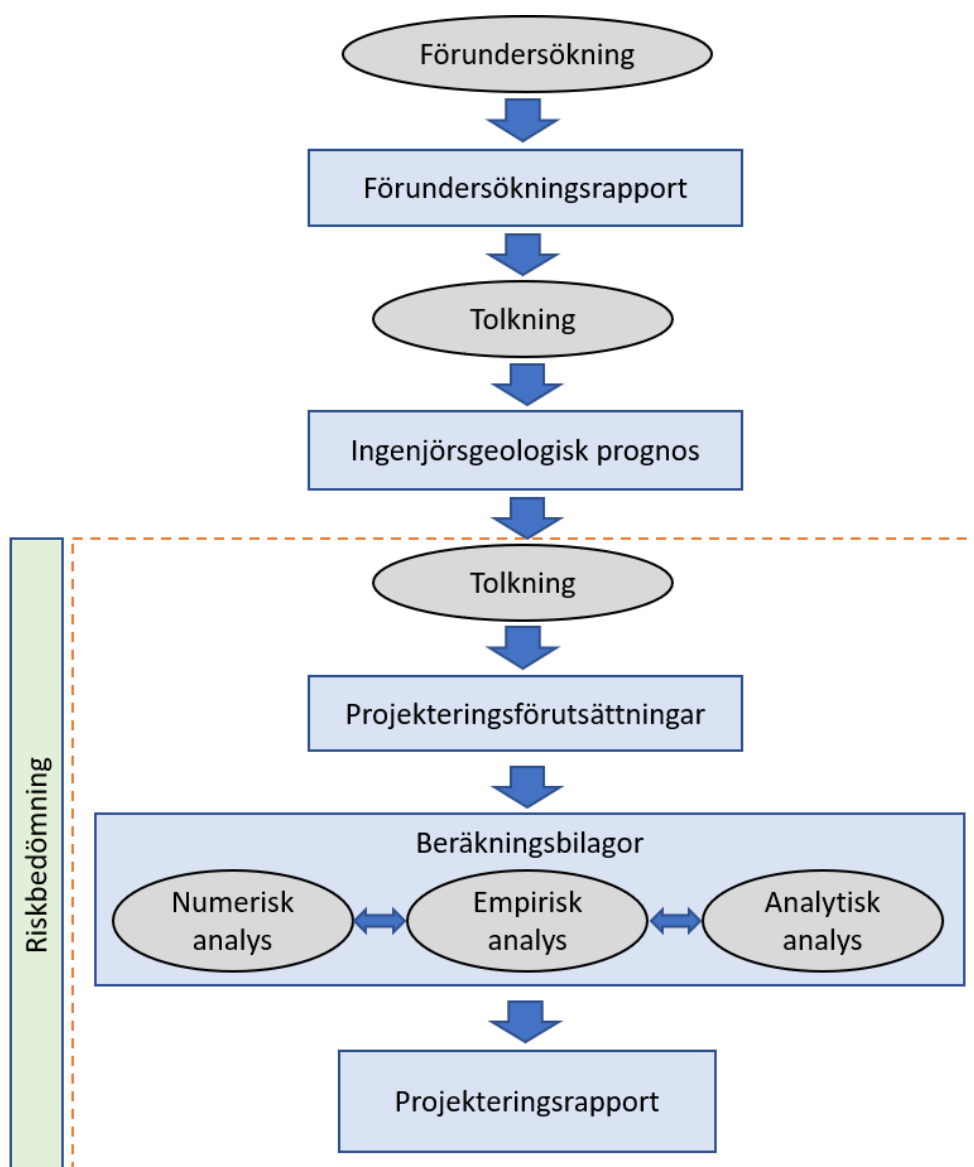
Denna artikel beskriver arbetet med utformningen och dimensioneringen för de två planerade stationerna. För båda stationsområdena har stabiliteten i bergmassan undersökts genom beräkningsmodeller i programmet *3DEC* (Itasca, 2016), i vilka uttaget av de nya stationsområdena simulerats. Stabiliteten i bergmassan har studerats genom att analysera spänningar, plasticering och deformationer runt tunnarna efter uttag av de planerade stationsområdena. För att ta fram en erforderlig förstärkningslösning har arbetet kompletterats med analytiska och empiriska analyser. Den slutliga utformningen och förstärkningen baseras på resultat och tolkning av de utförda analyserna.



Figur 1 Översikt för utbyggnaden av tunnelbanan mellan Akalla och Barkarby.

2 PROJEKTERINGSPROCESS

Utformningen och projekteringen har baserats på metoder och principer som finns redovisade i Trafikverkets publikation "Projektering av bergkonstruktioner" (Trafikverket, 2015). Utgångspunkten för utformningen och projekteringen är även TRVK tunnel med tillägg och avsteg angivna av Förvaltning för utbyggd tunnelbana samt förvaltningsgemensamma typhandlingar för t.ex. bergförstärkning. Projekteringsprocessen har utförts enligt Figur 2 som visar leveranser, dvs. rapporter, bilagor, m.m., i blått. Artikeln fokuseras på delar inom den streckade rutan.



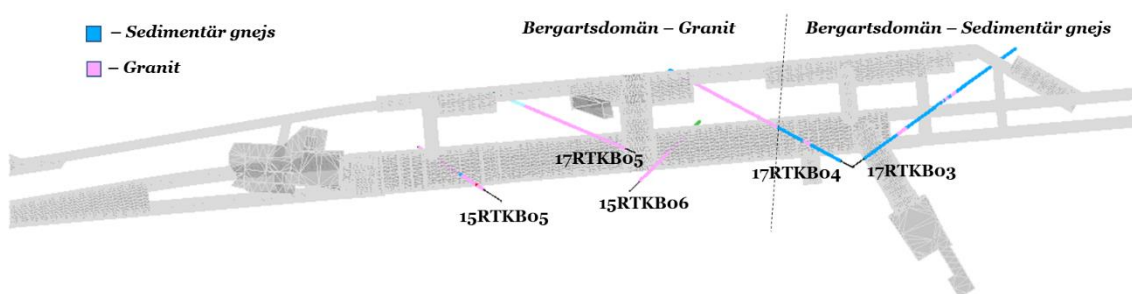
Figur 2 Flödesschema för projekteringsprocessen (streckad ruta är artikelns fokus).

3 ANALYSER AV STATIONSUTRYMMEN

Stationsområdena Barkarbystaden och Barkarby innehåller flera komplexa geometrier där exempelvis rulltrappsschakt möter plattformstunnel samt ett stort antal korsningspunkter och geometriförändringar. Undersökningar har identifierat ett antal svaghetszoner som lokalt kan bli dimensionerande för bergförstärkningen.

3.1 Projekteringsförutsättningar

I den ingenjörsgelogiska prognosen för varje delområde har information hämtats från borrhålsdata för att bestämma bergartsfördelning, huvudsprickgrupper och svaghetszoner i området för stationerna. Bergartsfördelningen har sedan legat till grund för uppskattning av bergmassans egenskaper. Ett exempel visas i Figur 3.



Figur 3 Bergartsdomäner och borrhål i området för Barkarbystaden.

Framtagandet av parametrar till numeriska, empiriska och analytiska analyser har skett enligt metodik beskriven i det interna dokumentet *Projekteringsförutsättningar för dimensionering av typförstärkningar i bygghandlingsskede* vilken följer metodiken beskriven i Trafikverket (2015). Varje station har i den ingenjörsgelogiska prognosen indelats i ett antal olika bergartsdomäner med avseende på den bergartsfördelning som råder i området. Det intakta bergets egenskaper har tagits fram med hjälp av enaxiella tryckförsök på borrhärlor. För att ta fram det intakta bergets egenskaper för respektive bergartsdomän har bergarternas egenskaper viktats med hänsyn till respektive bergarts procentuella förekomst i borrhärlor. Beräkningsgången för viktningen är enligt samma metodik som beskrivs i Trafikverket (2015).

För bergmassan har två uppsättningar parametervärden tagits fram, typ- och minvärden, för varje bergartsdomän. Typvärdet motsvarar medelvärdet och minvärde motsvarar medelvärdet minus en standardavvikelse. Som indata för att bedöma bergmassans egenskaper i varje bergartsdomän har GSI , σ_{ci} , m_i , E_i och σ_{3max} använts. Uppskattade värden för bergmassans mekaniska egenskaper (c_m , ϕ_m , E_m och σ_{tm}) har tagits fram via bergklassificering och Hoek-Browns brottvillkor samt med hjälp av programmet *RocLab* (RocScience, 2013).

I utvärderingen av bergmassans mekaniska egenskaper har störningsfaktorn, D , som tar hänsyn till skador från sprängningar, antagits till 0, motsvarande mycket försiktig

sprängning. För att kunna omvandla resultaten från Hoek-Browns krökta brottenvelop till ekvivalenta parametrar för den linjära Mohr-Coulomb materialmodellen har spänningsintervallet definierats med σ_{tm} som lägsta värde och σ_{3max} som högsta värde, där σ_{tm} bestäms enligt ekvation (2) och där σ_{3max} bestäms enligt ekvation (2) (Hoek m.fl., 2002).

$$\sigma_{tm} = \frac{S\sigma_{ci}}{m_b} \quad (1)$$

$$\sigma_{3max} = 0,47 * \sigma_{cm} \left(\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{primär}} \right)^{-0,94} \quad [\text{GPa}] \quad (2)$$

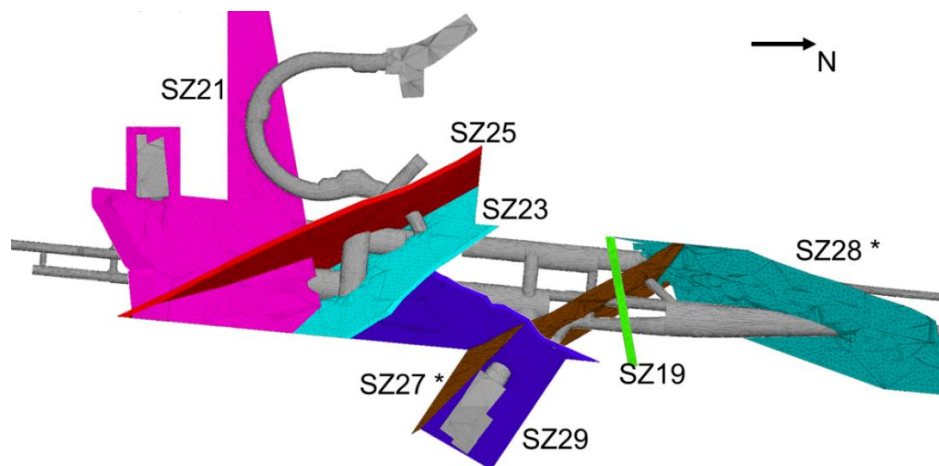
där:

σ_{cm} = bergmassans globala hållfasthet och

$\sigma_{primär}$ = största initialspänning på aktuellt djup.

I ovan ekvation är $\sigma_{primär}$ den största initialspänningen före tunneldrivning, vilket i detta fall är horisontalspänningen, σ_H .

Svaghetszoner i området för var och en av stationerna har tolkats utifrån data från kärnborrhål och med hjälp av anomalier i seismik- och resistivitetslinjer samt utifrån topografiska lineament. I Figur 4 ses en tolkning av de svaghetszoner som finns i området för stationen i Barkarby. Materialegenskaper i dessa zoner är framtagna på samma sätt som för bergmassan i de olika bergartsdomänerna.



Figur 4 Tolkade svaghetszoner i området för stationen i Barkarby.

Sprickors mekaniska egenskaper har tagits fram genom att först bestämma den residuala friktionsvinkeln för huvudsprickgrupperna genom att analysera J_a värdet från bergkaraktärisering och välja ett konservativt värde runt 80-percentilen. Därefter har JRC uppskattats baserat på karaktäriseringsparametrarna "Yta" och "Råhet" från sprickkarteringen. Uppskattningen av JRC görs i laboratorieskala motsvarande 200 mm för att sedan korrigeras till blockstorlek som används vid skjuvförsök motsvarande 700 mm.

Uppskattningen av sprickyornas tryckhållfasthet, JCS , har baserats på det intakta bergets tryckhållfasthet, σ_{ci} . Detta värde har korrigerats för eventuell vittring och skaleffekter. Korrigering av JCS med hänsyn till skala har utförts på motsvarande sätt som för JRC . Normal- (k_n) och skjuvstyvhets (k_s) för sprickor har beräknats från elasticitetsmodul, tvärkontraktionstal och skjuvmodul från intakt berg och bergmassa samt medelsprickavstånd enligt ekvation (3) och (4) från Barton (1972).

$$k_n = \frac{E_i E_m}{t_n (E_i - E_m)} \quad (3) \quad k_s = \frac{G_i G_m}{t_n (G_i - G_m)} \quad (4)$$

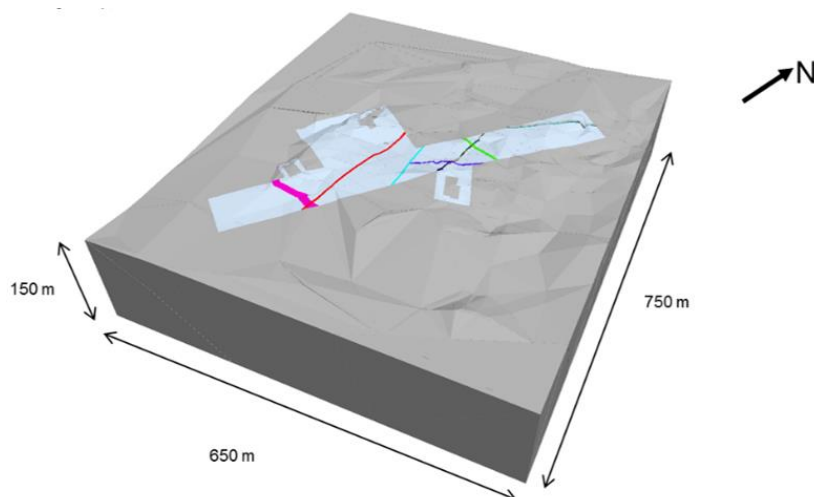
där

E_i och E_m = elasticitetsmodul, G_i och G_m = skjuvmodul,
 i = intakt berg, m = bergmassa, t_n = medelsprickavstånd.

Initialspänningsfältet har valts utifrån sammanställning av tidigare utförda bergspänningsmätningar i Stockholmsområdet och för området Norrmalm (norra Stockholm), se Perman och Sjöberg (2007).

3.2 Numerisk analys

De tredimensionella modellgeometrierna för stationerna Barkarbystaden och Barkarby är uppbyggda genom att placera en box med dimensionerna 750 x 650 x 150 m (Barkarbystaden) respektive 700 x 900 x 90 m (Barkarby) runt tunnelgeometrin, se Figur 5. Denna box har sedan indelats i flera mindre boxar för att succesivt öka upplösningen närmare geometrin för stationsområdena. Större svaghetszoner har inkluderats i modellerna. Utöver det har även de två identifierade huvudsprickgrupperna inkluderats i ett begränsat område med stor spännvidd i stationen i Barkarbystaden. För att undvika skjuvspänningar längs ränderna har modellen roterats så modellränderna blir vinkelräta respektive parallella med de initiala horisontalspänningarnas riktning.



Figur 5 Modellgeometri för stationen i Barkarby med berg (grå och ljusgrå), svaghetszoner (rosa, röd, grön, turkos, lila och mörkgrön).

Bergmassan och svaghetszoner i modellen simulerades som elasto-plastiskt material med Mohr-Coulombs brottkriterium. De svaghetszoner som har en bredd som är lika med eller understiger en halvmeter har simulerats som enskilda sprickplan i modellen med elastiskt-plastisk materialmodell och med brottvillkor enligt Coulomb.

Flera olika beräkningsfall har analyserats, med typ- och maximala differentialspänningar, min- och typvärden för egenskaperna på bergmassa samt med bergmassa simulerad som ett kontinuum (utan sprickor) och diskontinuum (med sprickor).

Den numeriska modellen beräknades i följande steg:

Diskontinuum

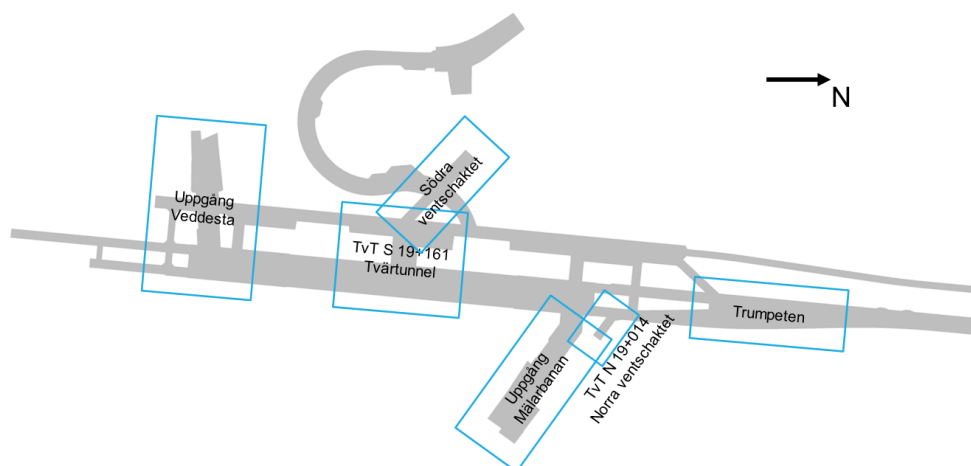
1. Initial jämvikt
2. Nollställning av deformationer
3. Aktivering av strukturer
4. Beräkning till jämvikt
5. Uttag av stationsområdet
6. Nollställning av deformationer
7. Beräkning till ny jämvikt

Kontinuum

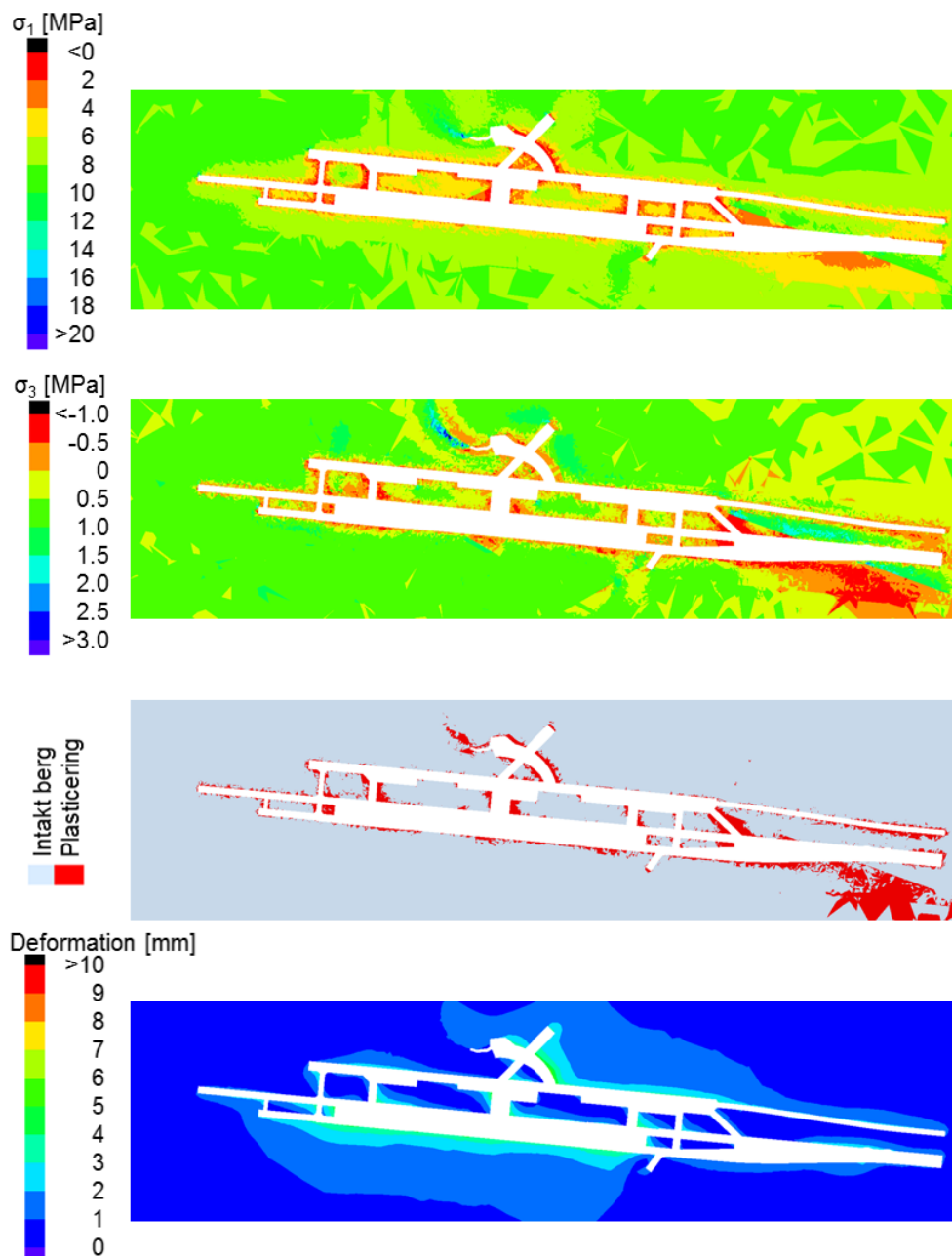
1. Initial jämvikt
2. Nollställning av deformationer
3. Uttag av stationsområdet
4. Beräkning till ny jämvikt

Utvärdering av modellen har skett i olika delområden med uppgångar, tvärtunnlar, tunnlar med stor spännvidd, låg bergtäckning, svaghetszoner, etc. enligt Figur 6. I varje delområde har följande utvärderats (se resultatexempel i Figur 7):

- Största huvudspänning i bergmassan.
- Minsta huvudspänning i bergmassan.
- Differentialspänning i bergmassan efter uttag av tunnelbanan.
- Plasticering (lokalt överskridande av hållfasthet) i bergmassan.
- Deformationer i bergmassan.
- Glidning längs sprickor i modellen (endast i stationen i Barkarbystaden).



Figur 6 Delområden för utvärdering, stationen i Barkarby.



Figur 7 Exempel på resultat, stationen i Barkarby.

3.3 Empiriska analyser

För tunnlar med en spännvidd > 20 m fanns ingen typförstärkningslösning framtagen. För stationsrummen och övriga utrymmen med spännvidd upp till 22 m togs därför förslag till förstärkning fram för olika intervall av bergkvalitet via en empirisk analys med Q -systemet (NGI, 2015). Intervallen baserades på de bergklasser som finns definierade i den framtagna typförstärkningen. Intervallen för de olika bergklasserna är angivna i

klassificeringsvärden enligt RMR_{bas} . För att göra en analys med Q -systemet har värden för RMR_{bas} omvandlats till ett Q -index enligt ekvation 5 (Barton, 1995).

$$Q = 10^{(RMR-50)/15} \quad (5)$$

Tabell 1 Bergklasser enligt typförstärkningen redovisade som RMR_{bas} och Q_{bas} .

Bergklass	RMR_{bas}	Q_{bas}
A	75 – 100	46,4 – 2154
B	60 – 75	4,6 – 46,6
C	45 – 60	0,5 – 4,6

Förslag till förstärkning för två svaghetszoner i stationen i Barkarbystaden och en svaghetszon i stationen i Barkarby togs också fram med Q -systemet. Dessa zoner bedömdes kunna påverka stabiliteten och därav kräva specifika förstärkningsåtgärder.

3.4 Analytiska analyser

3.4.1 Sprutbetongförstärkning

För två svaghetszoner i stationen i Barkarbystaden utfördes analytiska beräkningar för ett tyngdkraftsbelastat valv för att kontrollera erforderlig sprutbetongtjocklek. Sprutbetongen dimensionerades för att kunna bära lasten av den löskärna som bildades i tunneltaket där zonerna var prognostiserade att skära. Storleken på löskärnan bedömdes utifrån resultaten från den utförda numeriska analysen genom att kontrollera hur stort område i anslutning till zonen där bergmassan var avlastad.

I en av zonerna i stationen i Barkarbystaden hade svällande lermineral påträffats vid kärnborrningen. Inget svälltest hade utförts på leran och det var därför okänt vilken påverkan leran kunde ha på förstärkningen. Utgångspunkten vid projekteringen var att leran kunde utöva ett högt svälltryck på förstärkningen och därför dimensionerades sprutbetongbågar som skulle bära lasten av ett svälltryck. Svälltrycket finns definierat av Norska bergmekanikgruppen (NBG, 2000). Vid beräkningarna reducerades svälltrycket genom att skapa ett utrymme som tillåter svällning. Med 5 % tillåten svällning kan svälltrycket reduceras med 50 % eller mer (Brekke och Selmer-Olsen, 1965; Skrede, 2017). Lasten från svälltrycket kommer till en början inte att vara fullt utvecklad eftersom det skapas ett svällutrymme. Därför kan sprutbetongbågarna installeras när hela tunnelsektionen är uttagen och då permanent förstärkning med systembult och sprutbetong redan är installerad. Syftet med sprutbetongbågarna var att skapa en stabil förstärkningslösning som långsiktigt kan bära lasten av ett svälltryck från leran.

3.4.2 Blockanalyser

Blockanalyser för tunnlar har utförts med programvaran *Unwedge* (Rocscience, 2014). Analyserna utfördes för tunnlar med olika spännvidder och orienteringar. Indata till analysen var identifierade huvudsprickgrupper och sprickornas uppskattade egenskaper. Syftet med analyserna var att verifiera att förstärkningsmönstren var tillräckliga för att förankra block som kan bildas av de förekommande huvudsprickgrupperna. Vid analyserna installerades förstärkning med bultmönster enligt den framtagna typförstärkningen. Om stabilitet erhöles antogs den projekterade typförstärkningen vara verifierad för att kunna hantera de block som kunde bildas.

3.5 Teknisk lösning i projekteringsrapport

Baserat på resultaten och tolkningar av de utförda analyserna har slutlig utformning och förstärkningsförslag tagits fram. Generellt består den tekniska lösningen av systematisk bultning med bergförankrad fiberarmerad sprutbetong. Förstärkningsmönstren har anpassats beroende av bergmassans kvalitet, tunnarnas spännvidd, vägghöjd och närhet till andra tunnlar. Den slutgiltiga förstärkningslösningen har i möjligaste mån baserats på de olika klasserna i den framtagna typförstärkningen.

Slutsatsen av resultaten för den numeriska analysen var att båda stationsområdena var storskaligt stabila. Analysen visade dock att det kan uppstå dragspänningar i väggarna i stora delar av de båda stationerna. Utförda blockanalyser visar att de block som bildades förankrades med förstärkning enligt den framtagna typförstärkningen (Johansson, 2017b). Därav är det inte blockanalyserna som varit den dimensionerande faktorn för framtagandet av förstärkning. Det som styr behovet av förstärkning är resultaten från de utförda numeriska analyserna. Eftersom dessa visar att det kan uppstå dragspänningar i väggarna dimensionerades förstärkningen för att undvika utfall av block p.g.a. dragspänningar, vilket innebar att bultmönster och bultlängder anpassas för att bultarna ska förankras i bergmassan bakom dragspänningarna. I områden där dragspänningar uppstår i väggarna skall även dessa förstärkas med fiberarmerad sprutbetong.

Den empiriska analysen som utfördes för att ta fram en förstärkning för olika intervall av bergkvalitet för stationsrummet resulterade i förstärkningsmönster enligt Tabell 2. Ett avsteg från rekommendationen från Q -systemet är bultlängden, som är något kortare än rekommenderat. Med den spänningsbild som uppstår enligt utförda analyser bedöms det att en bultlängd på 5 m är tillräckligt för att skapa stabilitet.

Förstärkningslösningen för de svaghetszoner som bedöms kunna påverka stabiliteten har tagits fram baserat på resultat från de analytiska och empiriska analyserna. De empiriska analyserna gav förstärkningsförslag med systematisk bultning, fiberarmerad sprutbetong och sprutbetongbågar. Bedömningen av resultaten från den numeriska analysen i kombination med de analytiska analyserna var att sprutbetongbågar inte är nödvändigt vid zonerna. För att förankra löskärnan i zonerna krävs förstärkning med systematisk bultning och bergförankrad sprutbetong. Behovet av sprutbetongbågar vid den tolkade lerzonen kvarstår dock om svällande lera påträffas.

Tabell 2 Framtagen förstärkning för tunnlar med spännvidd $16 < B \leq 22$ m.

Berg- klass	Berg- kvalitet	Bultar, $l = 5$ m	Sprutbetong	Vidhäftningskrav mellan sprutbetong och berg (MPa)
		Bultavstånd (m)	Tjocklek (mm)	
		Tak/anfang och väggar	Tak/anfang och väggar	
A	> 75	1,8	65	0
B	60 - 75	1,8	90	0
C	45 - 60	1,5	150	0

4 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Projekteringsarbetet har bedrivits enligt den metodik som Förvaltningen för utbyggd tunnelbana definierat och som i sin tur bygger på den process som Trafikverket tagit fram för projektering av bergkonstruktioner (Trafikverket, 2015). Detta strukturerade arbetssätt har varit till stor hjälp för hela arbetet med den nya tunnelbanesträckningen mellan Akalla–Barkarby.

De numeriska analyserna har legat till grund för att bedöma stationernas storskaliga stabilitet och när detta verifierats har indata från dessa nyttjats i de analytiska beräkningarna för bedömning av löskärnans storlek, erforderlig bultlängd och avlastning i väggar. På så sätt har en erforderlig förstärkningslösning tagit fram för stationsområdena. Stationerna längs tunnelbanesträckningen mellan Akalla–Barkarby har bedömts storskaligt stabila och för dessa fall var det därför inte nödvändigt att utföra numerisk analys med förstärkningselement inkluderade.

Osäkerheter vid dimensionering av förstärkningslösningarna har hanterats genom att exempelvis utföra beräkningar med flera uppsättningar parametervärden som bedöms vara trovärdiga. Under byggnationen ställs krav på bl.a. RMR_{bas} -kartering för att verifiera att framtagna förstärkningslösningar är giltig för de aktuella förhållandena i bergmassan. En fullständig verifiering av bergmassans bärförmåga kan inte göras förrän under byggskedet eftersom att det först är då man kan få en full kunskap om de verkliga förhållandena. Detta innebär att dimensioneringen inte kan avslutas förrän under byggskedet, och att principerna för observationsmetoden bör användas för detta ändamål.

Utförda förundersökningar i detta projekt bedöms vara av bra kvalitet. Detta bedöms till stor del kunna hänföras till arbetet med en kontinuerlig process med undersökningsprogram, genomgång tillsammans med beställarens specialister samt värdering av undersökningsresultat och behov av kompletterade undersökningar.

För många infrastrukturprojekt är dock ofta mängden undersökningsborrhål begränsad. Särskilt vid komplexa geometrier kan man diskutera om t.ex. ytterligare undersökningsborrhål kan bidra till reducerad osäkerhet vid dimensionering. En ökad kostnad i för-

undersökningsskedet kan potentiellt ge reducerade kostnader vid byggande och förvaltning. Detta kräver dock att "osäkerhet" (eller reducerad osäkerhet/risk) kostnadsätts – helst kvantitativt men åtminstone via uppskattningar. Hur detta lämpligen görs bör utredas vidare, t.ex. i ett forsknings- och/eller utvecklingsprojekt.

ERKÄNNANDE OCH TACK

Vi vill rikta ett stort tack till beställaren, Förvaltning för utbyggd tunnelbana, som medgivit publicering och presentation av denna artikel.

REFERENSER

Barton, N. R. 1972. A model study of rock-joint deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **Vol. 9**, 579-602.

Barton, N. 1995. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. *Proceedings 8th ISRM Congress (25-29 September, Tokyo, Japan)*. Rotterdam: Balkema.

Brekke, T.L och Selmer-Olsen, R. 1965. *Stability problems in underground constructions caused by Montmorillonite-carrying joints and faults*. Institute of Engineering Geology, The Technical University of Norway, Trondheim (Norway).

Itasca. 2016. **3DEC Version 5.2**. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.

NBG (Norwegian Group for Rock Mechanics). 2000. *Engineering Geology and Rock Engineering Handbook No.2*.

NGI. 2015. *Using the Q-system. Rock mass classification and support design*. URL: www.ngi.no

Perman, F. och Sjöberg, J. 2007. *Initiala bergspänningar i Stockholmsområdet – Underlag för projektering av Citybanan*. Vattenfall Power Consultant rapport till WSP, 2007-04-10.

RocScience, 2013. **Roclab. Version 1.033. User's Guide**. Toronto: RocScience Inc.

RocScience, 2014. **Unwedge Version 3.0. User's Guide**. Toronto: RocScience Inc.

Skrede, S-E. 2017. *Stability Assessment of Hydropower Tunnel in Swelling and Slaking Rock Mass*. Master Thesis, Department of Geoscience and Petroleum, Norwegian University of Science and Technology.

Trafikverket. 2015. *Projektering av bergkonstruktioner*. Publikation 2014:144, ISBN: 979-91-7467-671-6.