

SPÄNNINGSMODELLERING AV STORSKALIGA STRUKTURER I STOCKHOLMSOMRÅDET

Stress modelling of large-scale structures in the Stockholm area

Ulf Lindfors, Itasca Consultants AB

Diego Lope Álvarez, Itasca Consultants AB

Fredrik Perman, Itasca Consultants AB

Fredrik Johansson, Sweco Civil AB

Björn Stille, Sweco Civil AB

SAMMANFATTNING

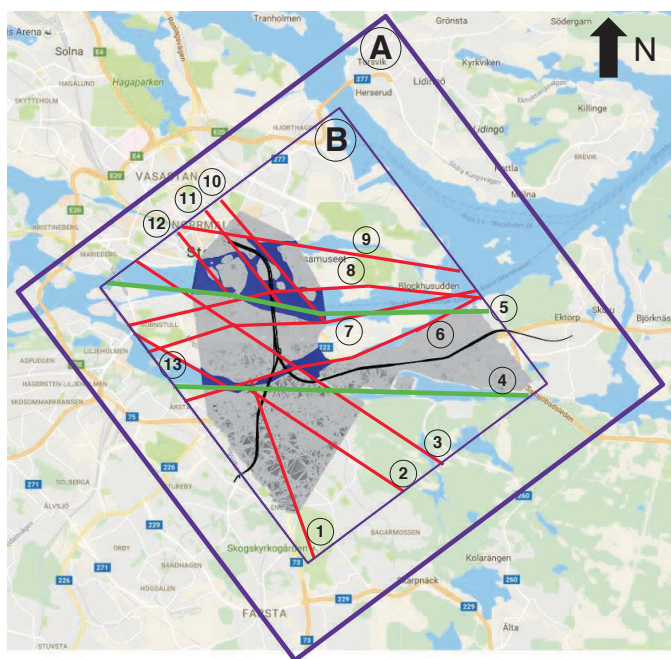
Utbyggnaden av tunnelbanan i Stockholm omfattar flera förlängningar och en ny linje. Utbygganden i söder kommer att passera genom ett antal regionala strukturer. Spänningarnas storlek och riktning kring strukturerna är osäkra och spänningsmätningar är inte praktiskt möjliga att genomföra. För att skapa en bättre förståelse av spänningsförhållandena på södra sidan av Stockholm och för att kvantifiera förhållanden nära strukturer har en spänningsanalys i regional skala längs den nya planerade sträckningen av tunnelbanan genomförts. Analysen genomfördes med hjälp av tredimensionell numerisk modellering, där topografier och kända strukturer inkluderades. I modellen inkluderades elva mindre strukturer som antogs vara vertikala och två större strukturer som antogs stupa 70°. Resultaten visade bl.a. att en spänningsomfördelning sker på ett avstånd upp till 50 m från strukturerna, där högre respektive lägre spänningsmagnitud är att förvänta i vardera sidan av strukturerna.

SUMMARY

The expansion of the new metro in Stockholm includes several extensions and a new line. The expansion and the new line in the south will pass through a number of regional large-scale structures. The magnitude and orientation of the stresses close to structures are uncertain and stress measurements are not practically possible to conduct. To increase the understanding of the rock stress situation in the southern side of Stockholm and to quantify stress conditions near the structures, a stress analysis in regional scale along the planned extension was conducted. The analysis was performed using three-dimensional numerical modeling, where topography and known structures were included. The model included eleven minor structures assumed to be vertical and two major structures dipping 70°. The results showed that stress re-distributions occurs for a distance up to 50 m from the structures where, for example, higher or lower stress magnitudes are to be expected depending on the side of the faults.

1 INLEDNING

Stockholm läns landstings förvaltning för utbyggd tunnelbana ska bygga ut det nuvarande tunnelbanesystemet både norr och söder om Stockholms centralstation. Hela utbyggnaden omfattar ungefär 20 km tunnel med 10 nya stationer placerade under jord. Spårtunnlarna som planeras från Kungsträdgården och söderut passerar ett flertal större strukturer längs sträckorna till Nacka respektive söderort, se Figur 1. Den kanske mest kritiska passagen för den nya tunnelbanan är sträckan under Saltsjön och passagen genom den så kallade Saltsjö-strukturen. Här planeras tunneln att gå ungefär 100 m under havsnivån och med en bergtäckning på mindre än 20 m. Längre söderut längs sträckningen kommer sedan den första nya stationen, station Sofia, vilken planeras på ett djup av ca 90-100 m under markytan. Erfarenheter visar att bergmassan i Stockholmregionen har relativt höga bergspänningar redan nära markytan och därför är god insikt om spänningsförhållandena av stor betydelse vid projektering av infrastrukturanläggningar. Tidigare utförda bergspänningsmätningar på södra sidan om Saltsjön har dock gett spridda resultat gällande både magnitud och orientering av huvudspänningarna.



Figur 1 Plankarta över Stockholmsområdet med omfattningen av modellen som lila boxar, de regionala strukturer som ingår i modellen i grönt och rött.

Plan view of the Stockholm area and model limits as purple boxes, structures included in green and red.

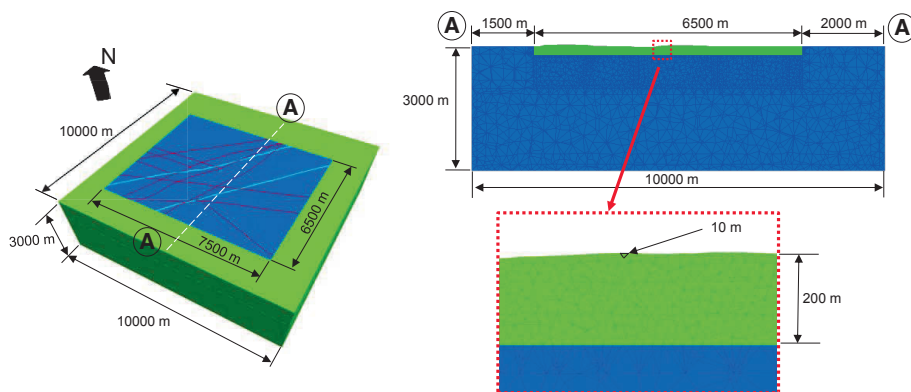
Arbetets syfte är att öka förståelse av spänningsförhållandena på södra sidan av Stockholm och för att kvantifiera förhållanden nära strukturer samt att använda resultaten för att kontrollera giltigheten av analyser på lokala delar av utbyggnaden. Arbetet är beställt av Sweco Civil AB som ser arbetet som en nödvändig strategisk del i verifieringsarbetet med utbyggnad av tunnelbanan till Nacka och söderort.

Utifrån den geografiska omfattningen av både intresseområde och strukturer användes en 3D diskontinuum numerisk modell. Distinkta element-programmet *3DEC* (Itasca, 2016) användes eftersom ett stort antal strukturer därmed kunde inkluderas i analysen. I detta tidiga skede av projekteringen finns dock begränsad information kring strukturerna och därför var det nödvändigt att genomföra känslighetsanalyser där olika indata varierades för att studera nyckelparametrarnas inverkan på spänningsnivåer och omfördelning.

2 BERÄKNINGSMODELL

2.1 Modellstorlek, topografi och storskaliga strukturer

Modellen omfattar en yttre box med måtten 10000 x 10000 x 3000 m och en inre box med måtten 7500 x 6500 x 200 m, se Figur 2. I den inre boxen är zonernas (beräkningselementens) sidor 10 m eller kortare och totalt har modellen ungefär 5.3 miljoner zoner. Den topografiska information som finns tillgänglig täcker dock inte hela modellens yta utan enbart den grå- och blåfärgade ytan i Figur 1. Övrig yta i modellen har antagits vara horisontell på havsnivå.



Figur 2 Beräkningsmodell i 3DEC, perspektivbild till vänster och snitt A-A överst till höger och med en detaljerad bild nederst till höger.

Numerical model in 3DEC, perspective view to the left and cut A-A to the upper right and a zoomed-in area to the bottom left.

Strukturernas riktning har bestämts från Geoarkivet (2016) som endast tillhandahåller information om strukturernas läge på markytan, medan stupning och stupningsriktning inte anges. Orienteringen av strukturerna har förenklats till räta linjer enligt Figur 1.

Mängden data för strukturernas stupning och mäktighet är begränsad och strukturerna har delats in i två grupper: mindre (typ A) och större (typ B) strukturer där de senare antogs ha lägre hållfasthetsvärden. Typ B strukturerna (de gulmarkerade strukturerna 4 och 5 i Figur 1) antogs ha en stupning på 70° baserat på information från Olsson m.fl. (2014). Övriga strukturer (rödmarkerade strukturer i Figur 1) antogs ha en stupning på 90°. Den begränsade datamängden indikerade mäktigheter på mindre än 10 m för majoriteten av strukturerna. Utifrån den begränsade mäktigheten i kombination med modellens omfattning bedömdes det som lämpligt att strukturerna modellerades som diskreta plan (ingen mäktighet) i analysen.

2.2 Materialparametrar

Bergmassans egenskaper i 3DEC-modellen representeras av elastiska egenskaper motsvarande "Bergtyp B" ($50 \leq \text{RMR} < 70$) enligt den nomenklatur som använts i Citybanan (Lindfors m.fl., 2009). Bergmassans materialparametrar redovisas i Tabell 1. Som beskrevs ovan delades strukturerna in i två kategorier (typ A och B) vilka simulerades med en linjärelastisk-plastisk Mohr-Coulomb modell med parametervärden enligt Tabell 2. Normalstyvheten för typ A strukturerna är beräknad från angiven elasticitetsmodul (Bayona m.fl., 2015) och antagandet att typ A strukturerna är 10 m breda. För typ B-strukturerna antas att egenskaperna för Singözonen är representativa värden (Glamheden m.fl., 2007).

Tabell 1 Materialegenskaper för intakt bergmassa i den numeriska analysen.
Material properties for intact rock mass used in the numerical analysis.

Material	E_{rm} [GPa]	ρ [kg/m ³]	ν_{rm} [-]
Bergmassa	42	2650	0.25

E = elasticitetsmodul, ρ = densitet, ν = tvärkontraktionstal.

Tabell 2 Materialegenskaper för strukturer i den numeriska analysen.
Material properties for structures used in the numerical analysis.

Struktur	k_s [MPa/m]	k_n [MPa/m]	c_j [MPa]	ϕ_j [°]	σ_{ij} [MPa]
Typ A	35	700	1.1	31.0	0.1
Typ B	10	200	0.4	31.5	0.1

k_s = skjuvstyvhet, k_n = normalstyvhet, c_j = kohesion, ϕ_j = friktionsvinkel, σ_{ij} = draghållfasthet.

2.3 Initialspänningar och randvillkor

Initialspänningarna för modellen hämtades från det spänningsförhållande som togs fram för området Normalm i Citybanan-projektet (Perman & Sjöberg, 2007):

$$\sigma_H = 4.7 + 0.075z, \quad (1)$$

$$\sigma_h = 2.3 + 0.0125z, \quad (2)$$

$$\sigma_v = 0.0265z, \quad (3)$$

där σ_H är största horisontalspänningen orienterad 143° från norr, σ_h är minsta horisontalspänningen, σ_v är vertikalspänningen, och z är djup under markytan. Gravitationskonstanten är satt till 9.81 m/s^2 . Randvillkoren till beräkningsmodellen utgörs av rullstöd längs de vertikala ränderna samt den nedre horisontella randen. Den övre randen har simulerats som en fri yta, motsvarande markytan.

2.4 Analysfall

Totalt har fyra olika beräkningsfall ingått i analysen och för alla fall användes typvärdena för initialspänningarna (både magnitud och orientering) samt hållfasthetsparametrar för bergmassan. Endast hållfasthetsparametrarna för strukturerna varierades. Först har typvärden på hållfasthetsparametrar (se Tabell 3) för strukturerna analyserats (Fall 1). Detta beräkningsfall bedöms som den mest troliga kombinationen av belastning och hållfasthet och är det som redovisas i denna artikel. Övriga tre fall bör ses som känslighetsanalyser och redovisas inte här.

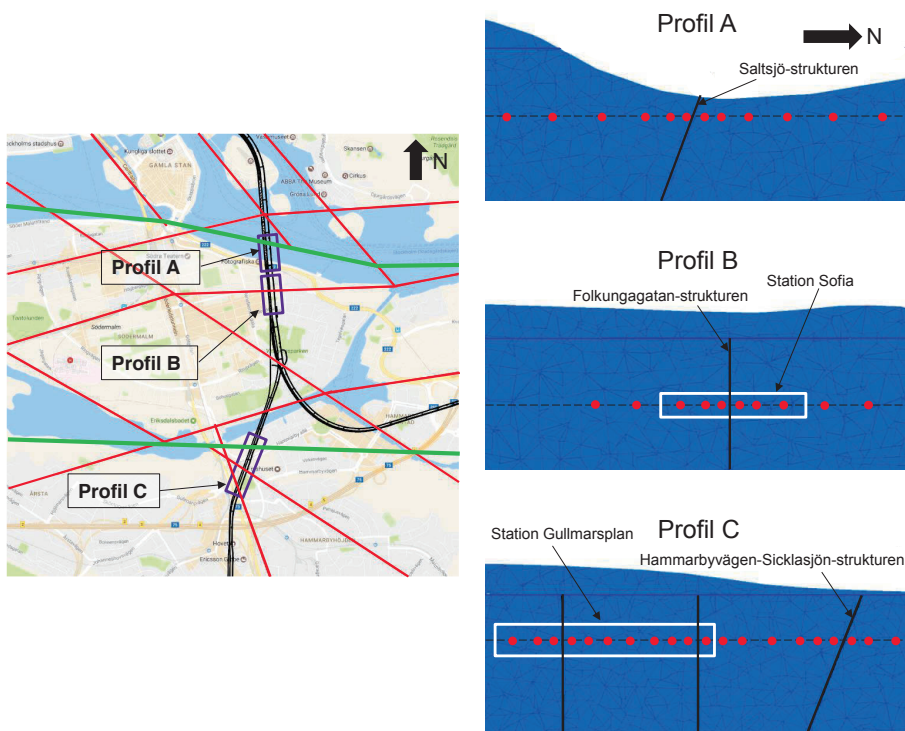
Tabell 3 Analysfall med angiven variation i form av procentuell ändring.
Analyzed cases and multiplying factors for the input parameters.

Analys	Materialparametrar strukturer
Fall 1	Typ
Fall 2	Typvärde x 1.25, d.v.s. 25 % höjning av alla hållfasthetsparametrar, där $\tan\phi$ ökats med 25 %
Fall 3	Typvärde x 0.75, d.v.s. 25 % minskning av alla hållfasthetsparametrar, där $\tan\phi$ minskats med 25 %
Fall 4	Typvärde på hållfasthet och 10 ggr högre k_n , och k_s

3 UTVÄRDERING AV RESULTAT

3.1 Metodik

Utvärdering av resultaten har gjorts med avseende på erhållna magnituder och orienteringar (stupningsriktning/stupning) av huvudspänningarna för alla beräkningsfallen i de utvalda områdena. Utvärdering har gjorts längs tre snitt i 3D-modellen som motsvarar tunnelsträckningen på Södermalm (riktning 355° från norr) och vid Gullmarsplan (riktning 200° från norr), se Figur 3. Fokus på utvärderingen har varit över de tre utvalda områdena; passagen av Saltsjö-strukturen (Profil A), stationsområde Sofia (Profil B) och stationsområde Gullmarsplan (Profil C). Resultaten redovisas i profiler längs med tunnelsträckningen i de tre utvalda områdena. Detta gjordes i syfte att bedöma om stora omfördelningar i spänningsbilden sker i närheten av strukturer som korsar tunnlar eller stationsområden.



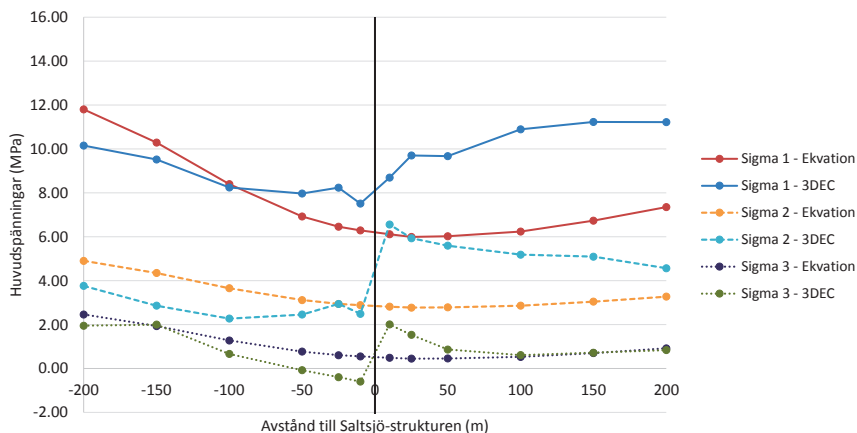
Figur 3 Plankarta med placering av utvärderingssnitten i plan till vänster, och de längsgående tvärsnitten av de analyserade områdena till höger.

Plan view with the location of the analyzed profiles to the left, and long sections of the analyzed areas to the right.

3.2 Resultat

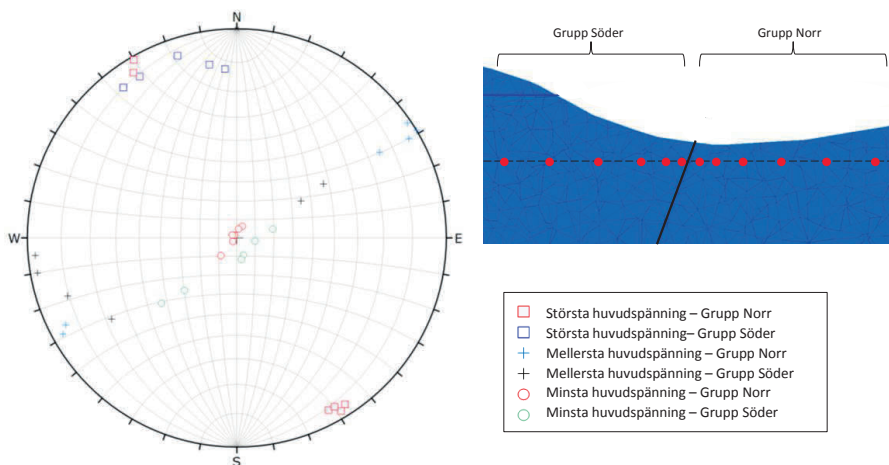
Det sker en omfördelning av huvudspänningarna kring Saltsjö-strukturen, mest vad gäller magnitud för största och mellersta huvudspänning, men närmast strukturen även med avseende på orientering (stupningsriktning/stupning). I Figur 4 redovisas initialspänningarna enligt antagna spänningssamband för initialspänningar (Perman & Sjöberg, 2007) och de i modellen erhållna spänningarna på tunnelnivån. I Figur 5 visas spänningsriktningarna som polpunkter i en sfärisk projektion (stereonät), vilket visar att största huvudspänning (σ_1) är sub-horisontell och att riktningen är marginellt påverkad av strukturen. För mellersta och minsta huvudspänningarna (σ_2 och σ_3) finns skillnader i både stupningsriktning och stupning på vardera sidan av strukturen. Notera att initialspänningarna anges som "Ekvation" samt de i modellen erhållna spänningarna anges som "3DEC" i Figur 4 nedan samt Figur 6 och Figur 7 längre fram i texten.

Figur 6 visar att relativt små spänningsomfördelningar sker i modellen för stationsområde Sofia jämfört med Saltsjö-området, med lite skillnad mellan magnituderna för initialspänningar och från modellen erhållna spänningar. Orienteringen på huvudspänningarna σ_2 och σ_3 är endast marginellt påverkade av Folkungagatan-strukturen i Sofias stationsområde, där σ_1 och σ_2 är sub-horisontella och σ_3 är sub-vertikal.



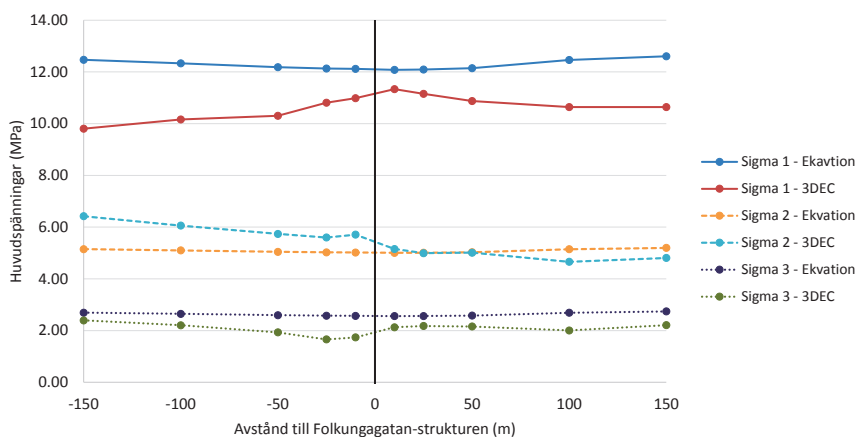
Figur 4 Beräknade magnituder på huvudspänningar (i MPa) för profil A. Positiva x-värden motsvarar norra sidan av Saltsjö-strukturen (som representeras av den svarta linjen).

Calculated principal stress magnitudes (in MPa) for the evaluation points along the profile A. Positive distance values on the x-axis indicate northern side of the Saltsjö structure (shown as the black vertical line).



Figur 5 Beräknad stupningsriktning och stupning på huvudspänningar för profil A, redovisade som polpunkter i sfärisk projektion, nedre hemisfär.

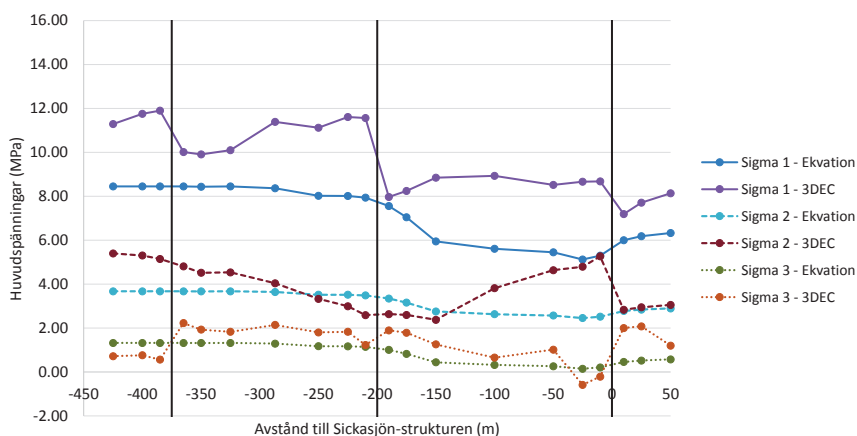
Calculated principal stress orientations (trend/plunge) for the profile A, shown as pole plots in a lower hemisphere projection.



Figur 6 Beräknade magnituder på huvudspänningar (i MPa) för profil B. Positiva x-värden motsvarar norra sidan av Folkungagatan-strukturen (som representeras av den svarta linjen).

Calculated principal stress magnitudes (in MPa) for the evaluation points along the profile B. Positive distance values on the x-axis indicate northern side of the Folkungagatan structure (shown as the black vertical line).

Kring stationsområde Gullmarsplan erhålls spänningsomfördelningar i närheten till strukturerna, se Figur 7. Flera strukturer korsar läget för station Gullmarsplan och alla strukturer skapar omfördelningar av huvudspänningarna, mest i magnitud men närmast mot strukturen även små ändringar i orientering. Högre värden på största huvudspänning (σ_1) fås på södra sidan av strukturerna under Hammarbybacken och Nynäsvägen än på norra sidan.



Figur 7 Beräknade magnituder på huvudspänningar (i MPa) för profil C. Positiva x-värden motsvarar norra sidan av strukturen Hammarbyvägen-Sicklasjön (som representeras av den svarta linjen till höger).

Calculated principal stress magnitudes (in MPa) for the evaluation points along the profile C. Positive distance values on the x-axis indicate northern side of the Hammarbyvägen-Sicklasjön structure (shown as the black vertical line to the right).

4 DISKUSSION

Den tredimensionella regionala spänningsmodellen har gett en ökad förståelse för den övergripande spänningssituationen över den södra delen av Stockholm. Modellen har också hjälpt till att kontrollera giltigheten hos andra lokala analyser som också har utförts i arbetet att ta fram systemhandling för tunnelbana till Nacka och Söderort.

En viktig slutsats är att den regionala modellen tenderar att bete sig mindre styvt och med större kinematisk frihet än lokala modeller, vilket möjliggör större spänningsomfördelningar. Detta kan förklaras av såväl zonstorlek som och antalet strukturer som ingår i den regionala spänningsmodellen vilket orsakar spänningsförändringar i närheten av strukturer och korsningar av strukturer. Dessa skillnader i modellskala och deras

inverkan på spänningar i modeller är en viktig aspekt att beakta när man hanterar förenklade numeriska modeller med färre strukturer än i verkligheten.

Resultaten visar att strukturernas hållfasthetsparametrar påverkar resultaten till viss del men att den största inverkan på resultaten är strukturernas orientering i förhållande till initialspänningarna. Detta understryker vikten av att utföra geotekniska undersökningar i ett tidigt skede av projektet. Samtidigt är det fördelaktigt att undersöka känsligheten på både materialparametrar och geometrier (mäktighet, etc) av strukturerna i en regional skala.

Bergspänningsmätningar har även utförts i området kring station Sofia. Vid en jämförelse av resultaten mellan bergspänningsmätningarna och den numeriska analysen visas på ungefär likvärdiga värden på spänningsmagnituderna och stupningsriktning på största huvudspänningen (σ_1). Däremot är det skillnad mellan uppmätt och beräknad stupning för σ_1 . Vidare så är resultaten gällande orientering omkastade mellan mätningarna och modellresultatet för σ_2 och σ_3 . En orsak till dessa skillnader kan vara att bergmassan simulerats som homogen och isotrop i modellen medan bergspänningsmätningarna genomfördes i ett lokalt starkt anisotropt berg.

5 SLUTSATER

Baserat på resultaten kan följande slutsatser dras:

- Varken extremt höga eller låga spänningsmagnituder uppkommer på samma djup under markytan som den planerade tunnelbanan.
- Spänningsomfördelning sker i närheten till strukturer men spänningsomfördelningen avklingar med avståndet till strukturen och närmar sig de antagna initialspänningarna redan på ca. 50 m avstånd från strukturen om inga andra strukturer påverkar spänningsbilden.
- Orienteringen av spänningarna påverkas i närheten av en struktur, där största huvudspänning tenderar att orienteras vinkelrätt mot strukturen.
- Både strykning och stupningsriktning på de stora strukturerna påverkar resultaten, främst för strukturer med låg skjuvhållfasthet.
- Ökad normal- och skjuvstyvhet på strukturerna leder till mindre spänningsomfördelning kring strukturerna, framförallt avseende på magnituderna på spänningarna.
- De strukturer som har en stupningsvinkel på 70° i analysen ger störst spänningsomfördelning och dragspänningar uppkommer främst på "hängväggssidan" d.v.s. den del av bergmassan som ligger över strukturen.

ANSLAGSGIVARE OCH TACK

Detta arbete har finansierats i sin helhet av förvaltning för utbyggd tunnelbana, och beställts av Sweco. Arbetet har varit en nödvändig strategisk del i verifieringsarbetet med utbyggnaden av tunnelbanan till Nacka och söderort, och utföraren av arbetet har varit Itasca Consultants AB, med stöd av Björn Stille och Fredrik Johansson, Sweco Civil AB.

REFERENSER

Bayona, F. R., Skrobic, K. & Johansson, F. (2015). Förslag till typförstärkning i systemhandlingskede – Dimensionering av typförstärkningsklasser för utbyggnad av tunnelbanan.

Geoarkivet. 2016. Byggnadsgeologisk karta över Stockholm. Tillgänglig på: <https://iservice.stockholm.se/open/GeoArchive/Pages/Search.aspx> Hämtad den 2016-04-01.

Glamheden, R., Röshoff, K., Karlsson, J., Hakami, H. & Christiansson, R. 2007. *Rock Mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB- R-07-31*. Svensk Kärnbränslehantering AB. Tillgänglig på: <http://www.skb.com/publication/1607109/R-07-31.pdf>

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

Lindfors, U., Rosengren, L. & Matérn, M. 2009. Design of Standard Reinforcement Classes for a New Commuter Train Tunnel in Stockholm. ***SINOROCK2009, Proceedings, ISRM Symposium on Rock Mechanics (Hong Kong, May 2009)***, pp. 812-816, ISRM.

Olsson, A., Hermansson, J. & Maersk Hansen, L. 2014. *Geomodell Strömmen*. Golder rapport.

Perman, F. & Sjöberg, J. 2007. *Initiala bergspänningar i Stockholmsområdet – underlag för projektering av Citybanan*. Vattenfall Power Consultant AB rapport till WSP, 122 p.