

Omgivningspåverkan vid djupa schakter (11536)

Värdering av markrörelser är viktig del vid schaktningsarbeten i stadsmiljö eftersom för stora rörelser kan skada intilliggande byggnader och konstruktioner. För att minimera rörelserna i omgivande jord används stödkonstruktioner för att erbjuda ett horisontellt stöd.

Projektet har behandlat olika metoder för att förutsäga jordrörelserna i anslutning till djupa schakter i lös lera samt vilka jordtryck som förväntas belasta stödkonstruktionen. En översyn av: -viktiga jordegenskaper för beräkning av deformationer och jordtryck, -tillgängliga empiriska metoder för uppskattning av marksättningar, -olika klassiska sätt att beräkna jordtryck, -olika jordmodellerings metoder med fokus på elasto-plasticitet har presenterats i litteraturstudien. Omfattande fältmätningar har genomförts vid de temporära schakterna i samband med byggandet av Götatunneln i centrala Göteborg.

Beräkningar har genomförts för att studera olika möjligheter att förutsäga rörelser och laster samt för att tolka de fältresultat som erhållits. Dessa beräkningar har genomförts med icke linjära finita element beräkningar (FE-beräkningar) med tre olika konstitutiva modeller:

- perfekt linjär elasto-plastisk modell med Mohr-Coulombs brottvillkor (PLEP-MC)*
- e-ADP, en totalspänningsbaserad modell med kapacitet att beskriva anisotropi och icke-linjär styvhet.*
- MIT-S1, en bounding surface model baserad på effektivspänningar*

Resultaten från dessa tre beräkningsmodeller har jämförts och diskuterats, särskilt fokus har lagts på utvärderingen av materialmodellen MIT-S1 jämfört med avancerade laboratorieförsök.

Bakgrund

När djupa schakter utförs i stadsmiljö är det av stor vikt att tillförlitliga prognoser av deformationerna inom schakten och utanför schakten kan utföras.

Två huvudfrågor är kopplade till djupa schakter i i stadsmiljö

1. designen av den temporära eller permanenta stödkonstruktionen måste uppfylla samhällets krav på säkerhet.
2. minimering eller förhindrade av skador, orsakade av schaktningsarbetn, på intilliggande konstruktioner.

En stödkonstruktion för djupa schakter i anslutning till befinliga konstruktioner leder till ett väldigt komplext system där interaktionen mellan jord och konstruktion påverkas av en lång rad faktorer där några är listade nedan:

- Jord beteende
- Schaktningsförfarande och schaktningskompetens
- Styheten hos stödkonstruktionen
- Schaktgeometrin
- Avstånd till fast botten

- Underslagningslängd
- Avstånd til angränsade konstruktioner
- Grundläggning av intilliggande byggnader
- Vidhäftningsförmågan mellan jord och stödvägg
- Förändringar i porvattentrycket och efterföljande konsolidering i jorden.
- etc.

En av de mer komplexa faktorerna är hur jordbeteendet skall beskrivas. Några viktiga egenskaper som kännetecknar jordsegenskaper icke-linjär spännings töjnings respons, anisotropi, effekt av töjningshastighet och hysteres. Dagligt injenjörarbete tar dock bara en bråkdel av dessa faktorer i beaktande när stödkonstruktioner för djupa schakter dimensioneras.

Syfte

Syftet med arbetet har varit att fördjupa kunskapen och förståelsen av hur djupa schakter påverkar omgivningen och att belysa det komplexa samspelet mellan spänningsändringar och utvecklandet av deformationer i anslutning till djupa schakter. Frågeställningar som hur spänningsfältet och deformationsmönstret bakom stödväggen påverkas av schaktningarbeten har studerats.

Ett kompletterande mål har varit att öka kunskapen hur FE-metoden kan användas vid såväl schakter som att förklara hur jord beter sig vid olika typer av belastningar.

Genomförande

Med stöd från SBUF, Skanska, Vägverket och VägBroTunnel har arbetet utförts av Anders Kullingsjö som ett doktorandprojekt vid Chalmers. Projektet har också kunnat genomföras genom ett avtal mellan Vägverket, Skanska och Chalmers om total öppenhet gällande arbetsmetoder och fältmätningar. I och med den externa finansieringen har omfattande fältmätningar och laborieförsök kunnat genomföras. Ett utbyte med några av de mest meriterande universiteterna inom området har också varit möjligt. Samarbetet har främst varit med MIT (USA) men också med Imperial Collages (UK) och NTNU (Norge).

En litteraturstudie har genomförts map

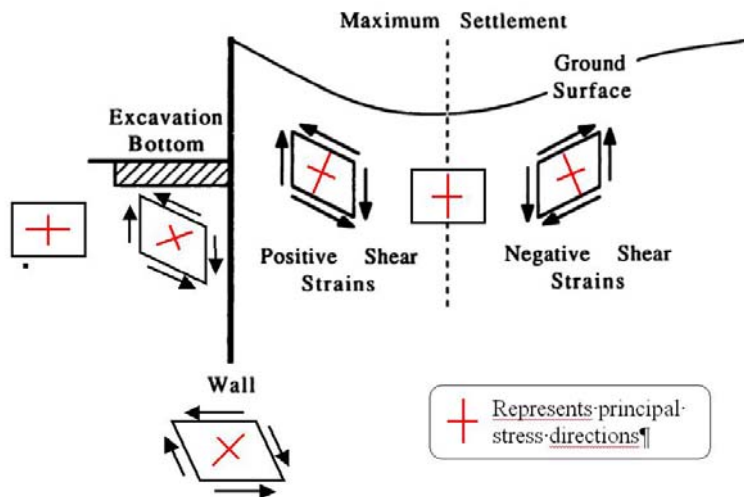
- olika empiriska metoder för att prognosticera marksättningar runt en schakt
- viktiga jordegenskaper för beräkning av deformationer och jordtryck
- tillgängliga empiriska metoder för uppskattning av marksättningar
- olika klassiska sätt att beräkna jordtryck
- olika jordmodellerings metoder med fokus på elasto-plasticitet

Omfattande fältmätningar vid Götatunneln har utförts i kombination med avancerade laborieförsök. Olika modeller för att beskriva jords beteende har använts i kombination med FE-beräkningar, dels i labratorieskala som vid djupa schakter. Tyngdpunkten har varit att penetrera hur materialmodellen MIT-S1 fungerar och vilka olika typer av jordbeteende som kan beskrivas med en avancerad jordmodell.

De olika jordmodellerna har applicerats på typschakter där den relativa skillnaden mellan de olika modelleringsätten kunnat belysas samt på beräkningar som jämförts med de fältmätningar som erhållits från Götatunneln.

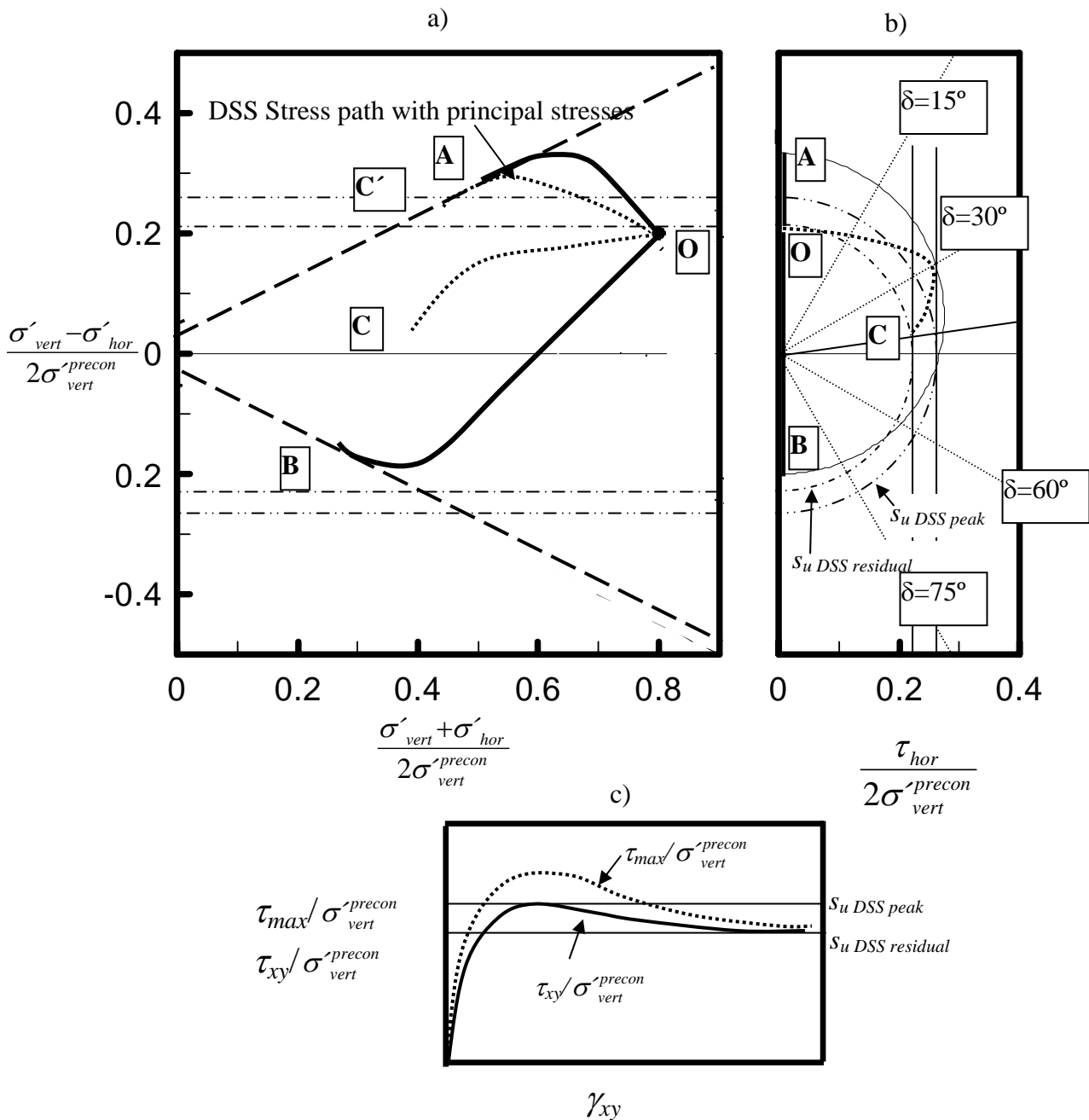
Resultat

De omfattande fältmätningarna och laboratorieundersökningarna har belyst vikten av att ta spänningshistorien i beaktande samt att det vid FE-beräkningar är nödvändigt att ta hållfasthetsanisotropin i beaktande. Området runt en schakt utsätts för olika belastningsfall vilket ger att det är nödvändigt att studera inte bara hållfastheten utifrån ett belastningsfall utan för flera. Figur 1 visar översiktligt de spänningsändringar/belastningsriktningar som uppkommer i samband med schakt.



Figur 1: Skiss över utvecklade skjuvkrafter och rotation av huvudspänningsriktningar

De olika belastningsriktningarna kommer att uppvisa olika skjuvhållfastheter. I de allra flesta fall inom svenska projekt finns bara en hållfasthet tillgänglig vilket medför problem vid användandet av FE-beräkningar. Figur 2a visar spänningvägen för de tre vanligaste belastningsfallen vid odränerad skjuvning, aktiv, passiv och direkt skjuvning. Observera att redovisad spänningväg vid direkt skjuvning uppvisar rotation av huvudspänningsriktningarna vilket redovisas i Figur 2b. I den senare figuren framgår också verklig hållfasthet (heldragen ellips) jämfört med effekten av att endast använda en konstant hållfasthet. I detta exempel visas att mobiliseringsgrade initiiellt ökar från 60% till 80% om endast hållfastheten från exempelvis direkta skjuvförsök (alternativt vingsonderingar eller fallkons försök) gentemot att utnyttja den aktiva hållfastheten. Från Figur 2b framgår också att den verkliga hållfastheten i jordprovet är något högre än vad som vanligtvis utvärderas vid direkt skjuvning eftersom aktuell skjuvspänning är avståndet från origo i Figur 2b och inte den horisontella komponenten. Denna skillnad framgår i Figur 2c. Beteendet vid exempelvis direkt skjuvning har kunnat skisseras med hjälp av simuleringar utförda med materialmodellen MIT-S1 eftersom de effektiva vertikala och horisontella spänningarna är okända vid konventionella direkt skjuvförsök.



Figur 2: Idealiserat beteende vid odränerad skjuvning i olika belastningsriktningar för en normalkonsoliderad lera

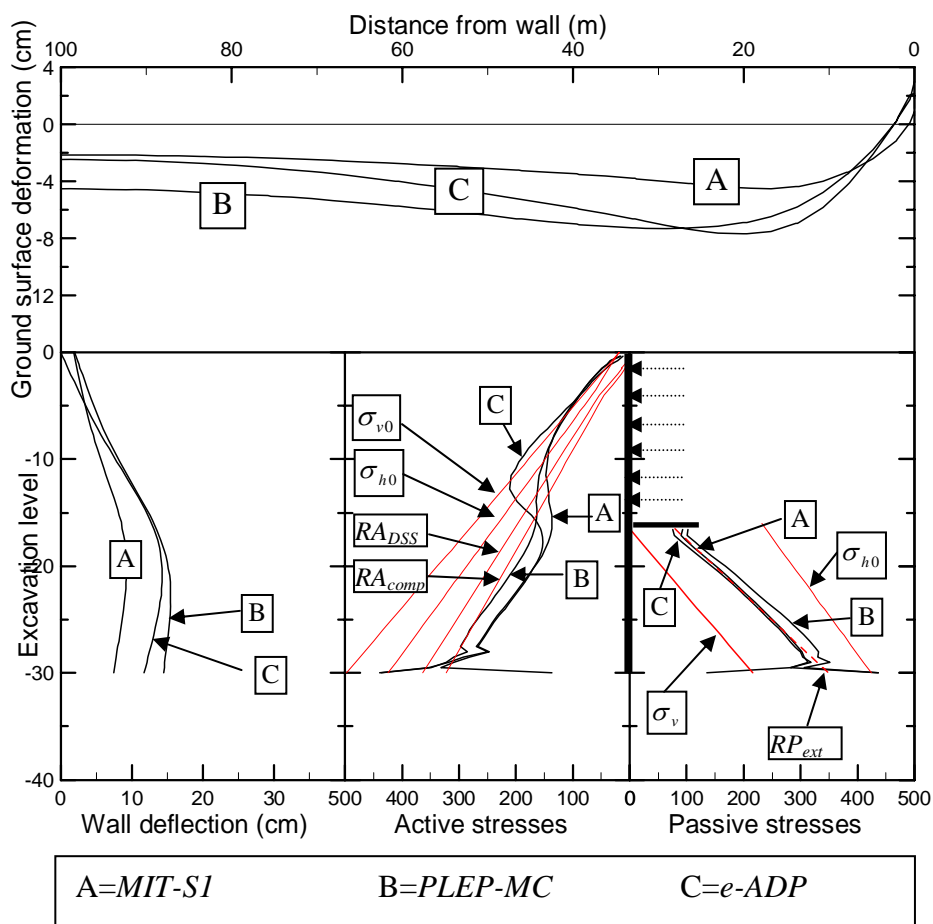
a) Spänningsväg vid odränerade belastning: OA-aktivt, OB-passivt, OC-direkt skjuvning (vertikal and horisontal spänning) and OC'- direkt skjuvning (huvudspänningar)

b) Visualisering av spänningsrotation under olika test. Punktad linje visar resultat från ett direkt skjuvförsök. Ellipsen anger hållfastheten för olika spänningsrotationer och de bågiga halvcirklarna visar effekten av att använda en konstant hållfasthet.

c) Jämförelse mellan verklig hållfasthet och den som utvärderas i direkta skjuvförsök.

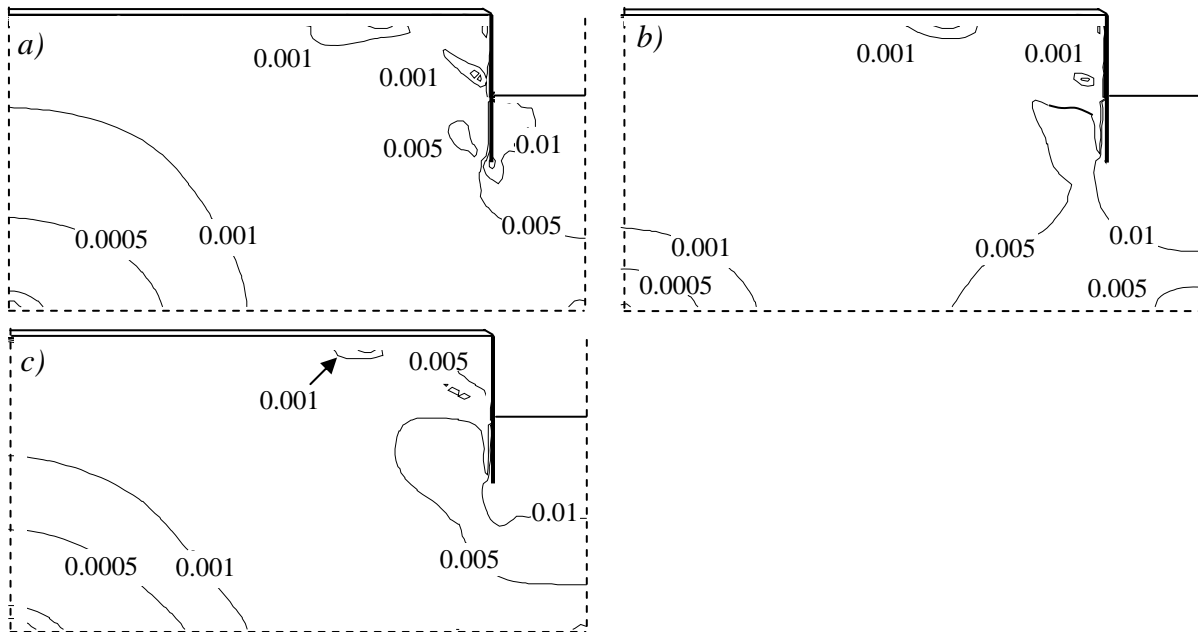
Idealiserad schakt-jämförelse mellan olika jordmodeller

Vid simuleringen av en idealiserad schakt med de tre studerade materialmodellerna kan relativt stora effekter på grund av den inre formuleringen skönjas. Figur 3 visar skillnaderna mellan de tre olika modellerna för en idealiserad schakt till 16,5 meters djup med en 30 m lång spontplanka. Den simulerade schakten är utförd i en jordprofilbestående av 2m friktionsjord som schaktas bort samt 60 meter homogen lera med OCR 1,25 men med ett förkonsolideringstryck på minst 50 kPa vilket ger en varierande OCR inom de översta metrarna. De ingående parametrarna till respektive modell har kalibrerats så att de skall ge så god överensstämmelse som möjligt. Som synes ger beräkningen med MIT-S1 minst deformationer, men långt ifrån spontväggen visar e-ADP och MIT-S1 god överensstämmelse. Detta beror på dessa bägge modellens förmåga att beskriva styvt beteende vid små töjningar. Studeras exempelvis jordtrycken framgår dock stora skillnader mellan e-ADP och MIT-S1. Detta beror på e-ADP:s oförmåga att beskriva icke-linjär styvhet vid avlastning. De olika röda linjerna visar gränsvärden och initiella värden för jordtrycken enligt klassiska metoder. För fler analyser mellan de olika modellerna hänvisas till Kullingsjö (2007)



Figur 3: Jämförelse mellan de tre olika materialmodellerna, MIT-S1, PLEP-MC och e-ADP. Spontlängd $L=30$ m, schaktdjup $H=16.5$ m, djup till översta stämpnivån $h_u=1.5$ m och avstånd mellan de olika stämpnivåerna $h=2.5$ m.

Vid användandet av en enkel jordmodell som PLEP-MC är det viktigt att utgå från vilken töjningsnivå som förväntas. I den aktuella beräkningen har en töjningsnivå på 0,3% ansatts. De erhållna töjningsmönstret från de olika beräkningarna framgår i Figur 4. Skillnaderna mellan den enkla modellen och de övriga två framgår tydligt. Den antagna töjningsnivån stämmer relativt väl inom den aktiva zonen. Däremot överskattas styvheterna inuti schakten men de underskattas också på stort avstånd från sponten.

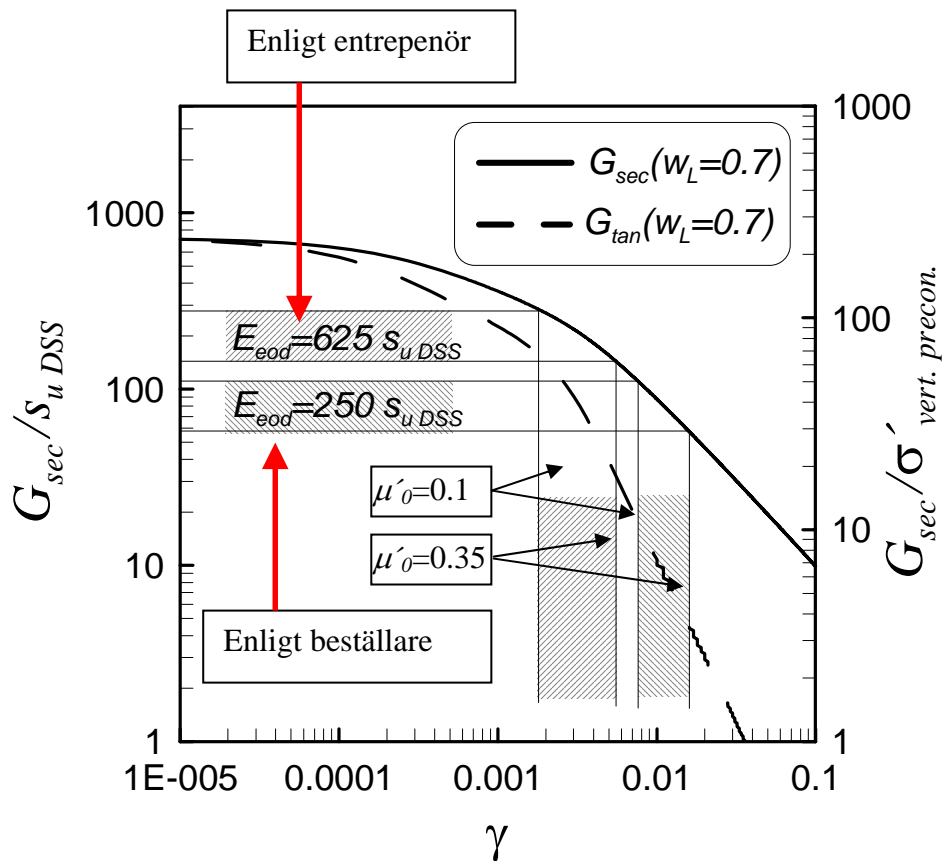


Figur 4: Töjningsnivåer, γ , för idealiserad schakt, $H=16.5$ m, $h_u=1.5$ m och $h=2.5$ m.
 a) MIT-S1 b) PLEP-MC c) e-ADP

Beräkningsresultat kontra uppmätta deformationer och spänningar.

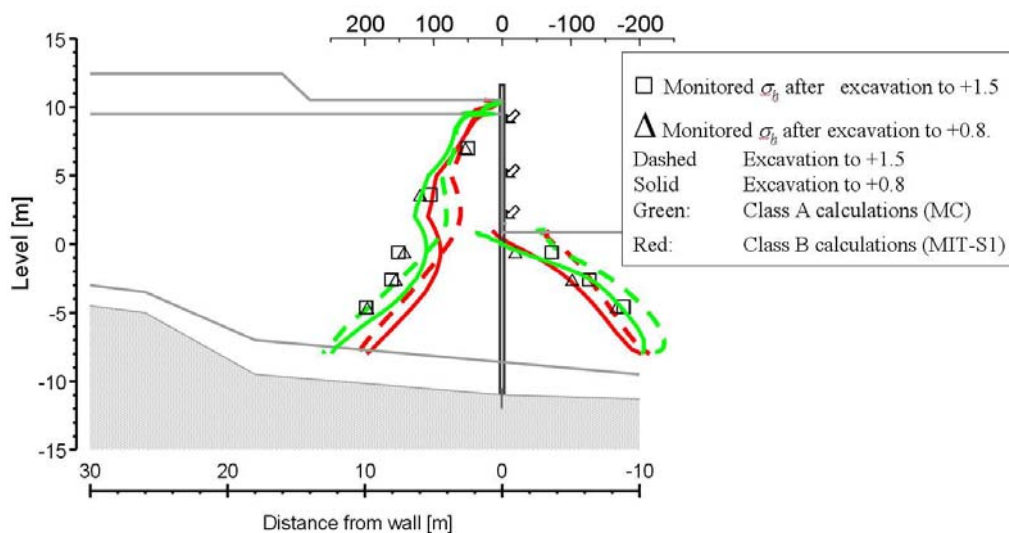
Vid den ursprungliga deformationsprognosen användes de förutsättningar som tillhandahölls av beställare. Dessa värden grundas på hållfastheter utvärderade från vingsondering, ingen effekt av anisotropi utnyttjades. De deformationsegenskaper som angavs korrelerade empiriskt till en töjningsnivå på 1%. Det är allmänt känt att jords styvhet är avsevärt högre vid små töjningar än vid stora varför förväntad töjningsnivå är avgörande vid valet av styvhet då en enkel modell utan förmåga att beskriva detta beteende används. Med tanke på de hårda krav gällande acceptabla deformationer gjorde entreprenören antagandet att det skulle komma att krävas lägre töjningsnivåer än 1%, varför jordens styvhet höjdes till en nivå motsvarande 0,3%. Figur 5 visar hur skjuvmodulen, G , minskar med ökande töjning. Med en enkel jordmodell som PLEP-MC kan bara ett konstant värde ansättas. Beställaren hade i sitt kontrakt med entreprenören korrelerat ödometermodulen, E_{eod} , till skjuvhållfastheten. Då G också beror på det effektiva tvärkontraktionstalet, μ'_0 , som inte angetts, redovisas i figuren intervall inom vilken föreskriven modul respektive använd modul är giltig.

Efter komplettering med de undersökningar som gjorts inom detta doktorandprojekt har jordmodellen MIT-S1 kalibrerats för att beskriva den aktuella lerans beteende.

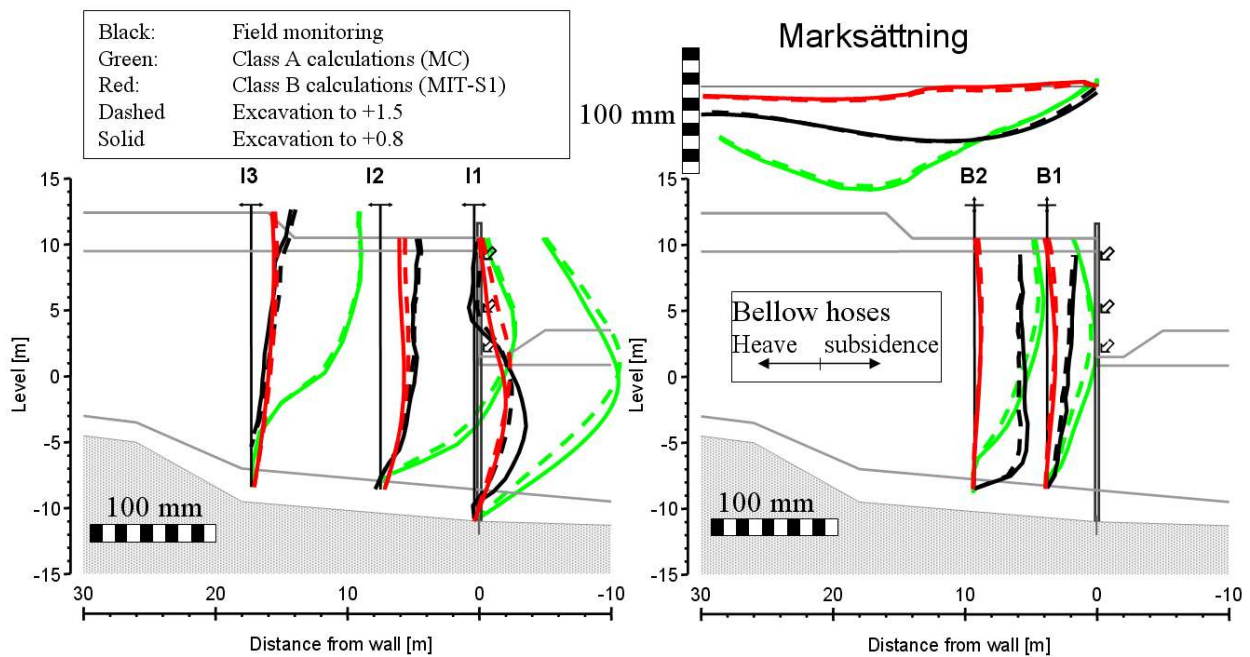


Figur 5: Empirisk skjuvmodul som funktion av töjningsnivån.

Vid en jämförelse mellan de bägge sätten att beskriva beteendet benämns de första beräkningen med materialmodellen PLEP-MC för Class A och den med MIT-S1 för Class B.



Figur 6: Uppmätta jordtryck samt beräknade jordtryck



Figur 7: Tv. Uppmätta och beräknade horisontella deformationer
Th. Uppmätta och beräknade vertikala deformationer

Figur 6, visar överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta jordtryck. Skillnaden mellan de bägge beräkningarna är inte särskilt stor, men beräkningen med den enklare jordmodellen verkar visa bättre överensstämmelse än den mer avancerade beräkningen. Analyseras däremot varje enskild punkt i jordvolymen avseende exempelvis portryck som uppmätts visar den mer avancerade beräkningen ett bättre resultat. Det som verkar vara en bättre prognos av jordtryck är i själva verket en effekt av flera fel som sammantaget blir ett bra resultat.

Studeras deformationerna så framgår det att den avancerade beräkningen är överlägsen den enklare. Figur 7, visar uppmätta deformationer kontra beräknade. Den mer avancerade beräkningen förutsäger de uppmätta horisontella deformationerna med mycket god noggrannhet, medan den enklare modellen överskattar deformationerna med 300%. De vertikala deformationerna är här ett stort problem. Som synes visar mätningarna att sandlagret har komprimerats ca 4 cm. Denna rörelse uppkom i samband med stagborrningen i området. Sådana rörelser är svåra att förutse och ingår inte i den numeriska modelleringen.

Slutsatser

Beräkningarna visar på fördelen med att använda FE-beräkningar i kombination med en avancerad jordmodell, som MIT-S1, gentemot att använda FE-metoden med en allt för enkel beskrivning av jordens beteende. MIT-S1 är exempelvis kapabel att beskriva jords icke-linjära beteende mellan spänning och töjning, anisotropi, kontraktans, dilatans, hysteres och kvarstående töjningar vid avlastning och återbelastning. Beräkningarna visar också vikten av att jämföra beräkningsresultaten med empiriska metoder för att uppskatta marksättningar orsakade av schaktningsarbeten.

Fältmätningarna visade också på att deformationer inte enbart uppkommer genom mobilisering av jordens hållfasthet ofta dominerar deformationer orsakade av andra aktiviteter på arbetsplatsen eller på grund av ett misstag/bristande kunskap på arbetsplatsen. Vikten av nära samarbete mellan produktionen och geoteknikern är återigen belyst.

Ytterligare information

Kontaktpersoner:

Anders Kullingsjö, Skanska, tel 031-771 1420, e-post: anders.kullingsjp@skanska.se

Litteratur:

Kullingsjö, A. (2007). Effects of deep excavations in soft clay on the immediate surroundings - Analysis of the possibility to predict deformations and reactions against the retaining system. Department of Civil and Environmental Engineering. Chalmers University of Technology, Gothenburg: 343 pp.

Internet:

www.chalmers.se