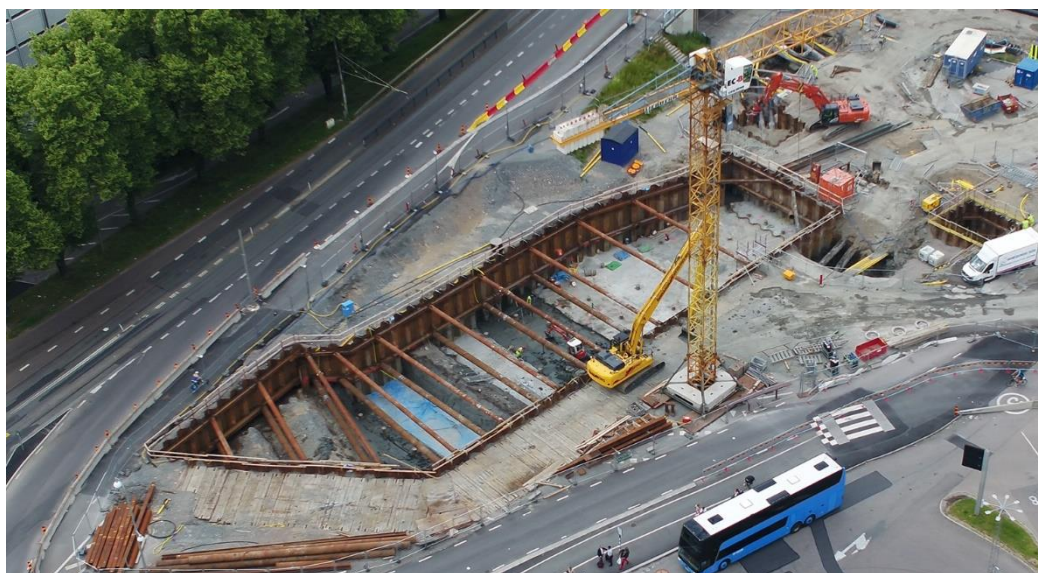


TIDSBEROENDE EFFEKTER AV SCHAKT I LÖS LERA



Johannes Tornborg
Skanska Sverige AB, Teknik
2020

FÖRORD

Detta projekt har genomförts vid Chalmers tekniska högskola (CTH), avdelningen för Geologi och geoteknik, forskargrupp Geoteknik - under ledning och stöttning av Professor Minna Karstunen, Lektor Mats Karlsson och industrihandledare Anders Kullingsjö (Skanska). Projektet i sin helhet påbörjades med en förstudie år 2017 (SBUF rapport 13303 *Svälltryck pga avlastning i lös lera*). Det aktuella SBUF-projektet har delfinansierat doktorandstudier fram till så kallat mittseminarie (eng. mid-term seminar), vilket hölls 2020-09-04 på Chalmers. Diskussionsledare var professor Helmut Schweiger, Graz University of Technology. Föreliggande rapport utgör en exekutiv sammanfattning av projektet. För fullständig redovisning se Tornborg (2020) med titeln *Rate-dependent response of excavations in soft clays*.

Ett stort tack riktas till finansiärerna av detta projekt: SBUF, Skanska, Chalmers och Trafikverket (via Branschsamverkan i Grunden, BIG). Utöver den finansiella del som dessa aktörer bidrar med, har den bredd som de representerar bidragit till kunskapsutbyte och branschsamverkan inom ramen för projektet.

En referensgrupp bestående av följande personer har varit kopplad till projektet: Claes Alén (Chalmers/prof emeritus), Bengt Askmar (Norconsult), Torbjörn Edstam (Skanska), Jan Ekström (Trafikverket), Anna Gjers (Trafikverket), Gunnar Holmberg (Skanska), Leif Jendeby (COWI), Jenny Langford (NGI), Sven Liedberg (Skanska), Michael Sabattini (Peab), Johan Vium-Andersson (WSP), Tara Wood (Ramböll), Jorge Yannie (NCC). Deras stöttning, synpunkter och rekommendationer har varit mycket värdefulla för projektet.

Tre examensarbeten har varit kopplade till projektet och handletts av undertecknad. Examensarbetena redovisas i Hasselberg (2018), Asadi & Sokhango (2018) och Harlén & Poplasen (2019). Hasselberg (2018) var nominerad till SGF:s årliga pris för bästa examensarbete och Harlén & Poplasen vann detta pris året därefter.

Förutom ovannämnda personer och finansiärer riktas ett stort tack till mina kollegor på Chalmers och Skanskas geoteknikavdelningar. Samt professor emeritus Göran Sällfors (Chalmers) för värdefulla diskussioner under projektets gång. Jag är även tacksam för hjälp och stöttning från Jorge Yannie och Anders Bergström (båda NCC). Sammanfattningsvis är det ett nöje att arbeta med personer som delar samma intresse för ämnet geoteknik med grundläggning.

Göteborg, september 2020

Johannes Tornborg

1 INTRODUKTION

1.1 Bakgrund

När städer expanderar och förtätas ökar djupet och omfattningen av schakter och konstruktioner under mark. Ett ökat byggande under mark drivs bland annat av samhällets omställning till hållbar infrastruktur och hållbara transportsystem. Komplexiteten för schakterna ökar ytterligare då det ofta ställs snäva krav på tillåtna deformationer i omgivande mark och anläggningar. Detta påverkar jordtrycken inte enbart i byggskedet, utan även jordtrycken mot permanenta konstruktioner (Carder & Darley 1998; Richards et al. 2007). Då komplexiteten ökar krävs tillförlitliga prognoser avseende jordtryck och deformationer. Prognoser krävs för såväl byggskedet (korttidsfall) som driftskedet (långtidsfall).

Prognoserna behöver inkludera modellering av relevanta egenskaper hos jordlagren i samverkan med konstruktionen (samverkansanalys), med adekvata numeriska materialmodeller. Om så inte sker kan det å ena sidan resultera i fördyringar (materialmängder, CO₂-ekv. och SEK), eller omvänt kan säkerheten i schakten och konstruktionen äventyras. Detta kan leda till skadefall om deformationskrav överskrids eller i värsta fall till kollaps (t.ex. Magnus et al. 2005). Kunskap om bland annat jordtryck är därför av största vikt för design geokonstruktioner, då det möjliggör optimering av t.ex. betongmängder. Sådan kunskap kan även bidra till att förflytta gränserna för implementeringen av nya innovativa material och metoder.

2017 inleddes en förstudie (Tornborg 2017) kring vertikala uppåtriktade jordtryck (så kallade svälltryck) orsakade av schakt i lera. Förstudien resulterade i enklare riktlinjer för branschen samt förslag till ett fortsatt FoU-projekt vid Chalmers tekniska högskola. Referensgruppen hade bred förankring för det fortsatta doktorandprojekt vilket initierades inom ramen för SBUF projekt 13416 *Tidsberoende effekter av schakt i lös lera*. Projektet påbörjades i november 2017.

1.2 Syfte och mål

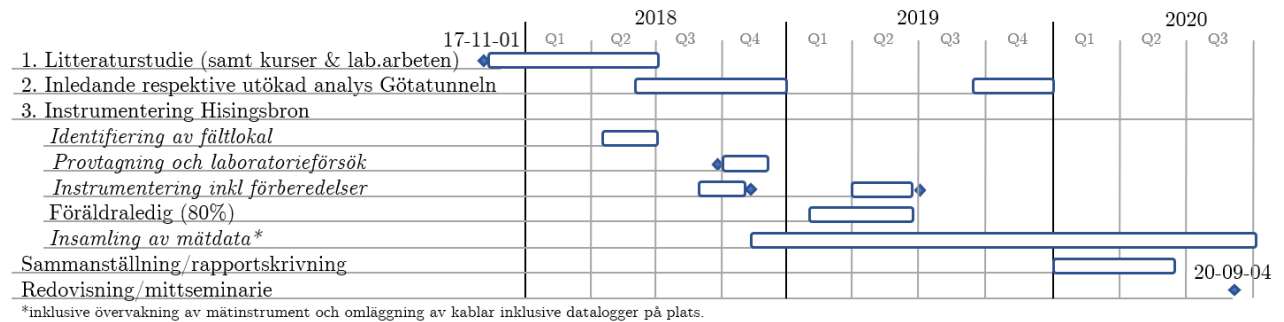
Syftet med projektet är att öka kunskapen om de effekter som uppstår vid schakt i lera, med särskilt fokus på effekternas tidsberoende och de krafter som uppstår mot geokonstruktioner.

Målet med projektet är att ta fram konceptuella modeller och beräkningsmodeller för att på korrekt sätt analysera och prognosticera krafter som kan uppkomma mot geokonstruktioner i såväl bygg- som driftskedet.

2 GENOMFÖRANDE

2.1 Huvudsakliga moment och tidslinje

Genomförandet av doktorandprojektet så här långt kan sammanfattas i tre huvuddelar; litteraturstudie inklusive doktorandkurser och inledande laboratoriearbeten, fallstudie av schakt vid Götatunneln i Göteborg, samt ny instrumentering inom projektet Hisingsbron i Göteborg för uppföljning av jordtryck i bygg- och driftskedet. I avsnitt 2.2-2.4 beskrivs genomförandet av dessa huvuddelar och i avsnitt 3.1-3.2 återges utvalda resultat. Ungefärlig fördelning av projektets huvuddelar redovisas mot tid i Figur 1.



Figur 1. Ungefärlig fördelning av projektets huvuddelar.

2.2 Litteraturstudie inklusive state-of-the-art

Litteraturstudien belyser bland annat avsaknaden av uppföljning av jordtryck mot permanenta konstruktioner i lös plastisk lera, så som för svenska förhållanden. Det beslutades därför att utföra instrumentering för långtidsuppföljning av jordtryck. Den instrumenterade schakten ingår i projektet Hisingsbron i Göteborg, se avsnitt 2.4.

Vidare belyses i litteraturstudien att vilojordtryckskoefficienten, K_0 , i dagsläget används för uppskattning av horisontella jordtryck vid design av permanenta konstruktioner. Genom att basera uppskattningen av jordtryck med koefficienter så som K_0 , hanteras principiellt samverkan mellan jord och konstruktion rudimentärt genom en serie oberoende fjädrar utmed gränssnittet. Jordtrycket relaterar genom K_0 endast till jordlagrens densitet. Jordens och konstruktionens styvheter och möjlighet att omfördela laster bortses ifrån. Vidare bortses även ifrån byggskedets påverkan (schaktmetod, arbetsordning, utbildade rörelser) på jordtrycken i driftskedet. Baserat på litteraturstudien finns en optimeringspotential genom att beakta byggskedets inverkan samt de ingående delarnas styvheter på jordtrycken. För entreprenörer finns här en särskild vinst då man i t.ex. totalentreprenader kan erhålla optimerade lösningar för driftskedet genom att anpassa utförandet i byggskedet.

Genom att utföra numeriska analyser kan rörelser i byggskedet beaktas vid dimensionering. Dock krävs materialmodeller som kan beakta relevanta egenskaper för lös lera. En sådan modell är Creep-SCLAY1S, vilken har utvecklats på Chalmers och tidigare utvärderats mot resultaten från laboratorieförsök och fältmätningar, dock ej för lastfall med avlastning/schakt. Modellen kräver således utvärdering mot fältmätningar från schakter.

De två huvuddelarna av doktorandprojektet så här långt har därför innefattat

1) jämförelse av prognos med Creep-SCLAY1S mot mätdata från byggskedet av Götatunneln samt 2) ny instrumentering vid Hisingsbron för att erhålla data från driftskedet. Dessa två huvuddelar av utfört arbete beskrivs nedan.

2.3 Fallstudie Götatunneln entreprenad J2 - utvärdering av numerisk materialmodell

Den materialmodell (Creep-SCLAY1S) som utvecklats på Chalmers ger unika möjligheter att modellera relevanta egenskaper hos lös lera (ett mycket komplext material t.ex. visköst, anisotropt, sensitivt dvs känsligt för störning). Modellresponsen har tidigare utvärderats mot lab.försök och fältmätningar gällande pålastning (t.ex. byggnation av järnvägsbankar). Dock ej mot schakter/avlastning. Det beslutades därför att utvärdera modellen genom att jämföra prognoser mot mätdata från en väl instrumenterad schakt av Götatunneln (Kullingsjö, 2007). Om utvärdering av modellresponsen föll väl ut skulle modellen kunna nyttjas med större trygghet även för design och vidare studier av schakter och konstruktioner under mark. Utvalda resultat från utvärderingen återges i avsnitt 3.1.

2.4 Instrumentering för uppföljning av jordtryck i bygg- och driftskede

Mätresultaten från Götatunneln innehåller förvisso unika mätdata från byggskedet, dock innefattas ej mätning av vertikala jordtryck. Vidare avslutades mätningarna i samband byggskedet. Det beslutades därför att instrumentera en schakt i syfte att studera jordtrycken i driftskedet. En schakt och konstruktion inom Skanskas pågående projekt Hisingsbron i Göteborg instrumenterades därför med start 2018.

Fältmätningarna möjliggör viktiga insikter och lärdomar om jordens och konstruktionens beteende samt deras samspel i fullskala/fält. För att planera instrumenteringen utfördes ett omfattande provtagnings- och laboratorieprogram för karakterisering av lerans egenskaper och upprättande av förväntade mätvärden. Mätningar under schaktskedet innefattade t.ex. horisontella deformationer, porvattentryck, stämpkrafter och vertikala deformationer (bålgslangsmätning i schakten).

Omedelbart efter schaktning installerades ett stort antal mätinstrument i leran under bottenplattan. Detta föregicks av omfattande kontroller avseende mätinstrumentens funktion och kalibreringsfaktorer i det geotekniska laboratoriet på Chalmers. Samt provinstallationer i fält för att utarbeta en metodik för installation av mätutrustningen. Mätutrustningen installerades i leran under bottenplattan i slutet av juni 2019. Utvalda resultat återges i avsnitt 3.2.

2.5 Kort beskrivning av övrigt arbete och analyser

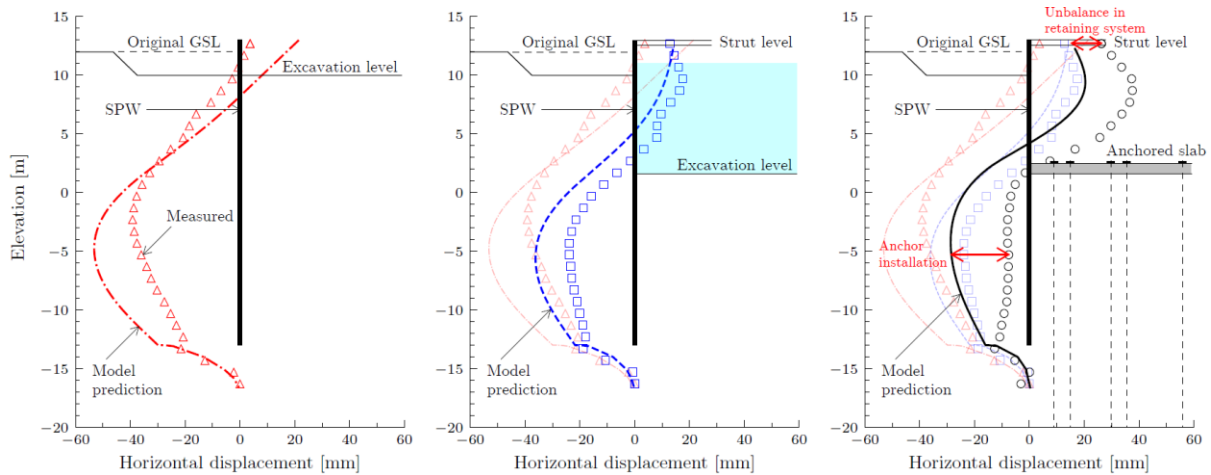
Utöver det arbete som presenterats ovan har insamling av mätdata utförts för ytterligare en fallstudie. Fallstudien avser Trafikverkets utbyggnad av järnväg i Uppsala vilket inkluderande en permanent spont. Trafikverket önskar studera denna spont då den innehåller mätdata från byggstart år 2015 till nutid (driftskede). Dessa mätdata har dock varit svåra att erhålla då Trafikverkets konsult ej haft möjlighet att leverera och överlämna dessa. Under våren 2020 erhöles dock material och inom ramen för BIG-projektet planeras därför för kompletterande provtagning och analyser under hösten 2020. Utvärderingen av Creep-SCLAY1S för studier av schakt breddas därmed geografiskt till en lokal på östkusten.

Ytterligare studier har utförts och presenterats inom ramen för examensarbeten kopplade till projektet. Arbetena har innefattat; laboriemetoder för undersökning av avlastningsmodul i lera (Hasselberg, 2018), fallstudie av Götatunneln entreprenad L3 (Asadi & Sokhango, 2018) samt så kallad Class A (á-priori) prognos av den instrumenterade schakten vid Hisingsbron (Harlén & Poplasen, 2019).

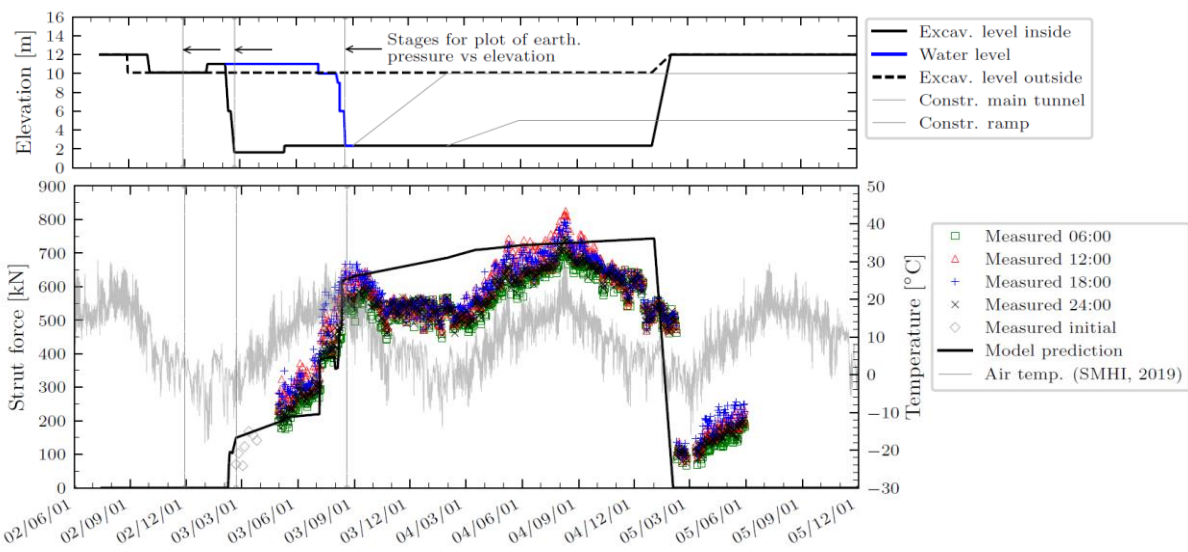
3 RESULTAT

3.1 Jämförelse av prognos med numerisk modell och fältmätningar vid Götatunneln

Sammanfattningsvis visade prognosticerade rörelser, jordtryck, portryck och stämpkraft god överensstämmelse med uppmätta värden. Inledande analyser presenterades av Tornborg et al. (2019) och en utökad analys har skickats till journalen *Computers and Geotechnics*. Materialmodellen Creep-SCLAY1S har således stor potential för detaljerad prognos och design av jordtryck mot temporära och permanenta konstruktioner i lera. En stor fördel med att använda denna modell är att samma parameteruppsättning kan användas för prognoser av bygg- och driftskedet. Således erhålls optimeringspotential med hänsyn till att tidseffekter inkluderas och modellen beaktar långtidsdeformationer/ krypsättningar. Resultaten belyser att det också är viktigt att beakta och modellera installationseffekter avseende t.ex. borrhning och installation av massundanträngande pålar. Exempel på resultat ges i Figur 2 och 3 visande god överensstämmelse mellan uppmätta och prognosticerade värden. Avvikelser i jämförelserna beror t.ex. på installationseffekter av stagborrning samt temperaturvariationer i stämp, vilket ej inkluderats i modelleringen.



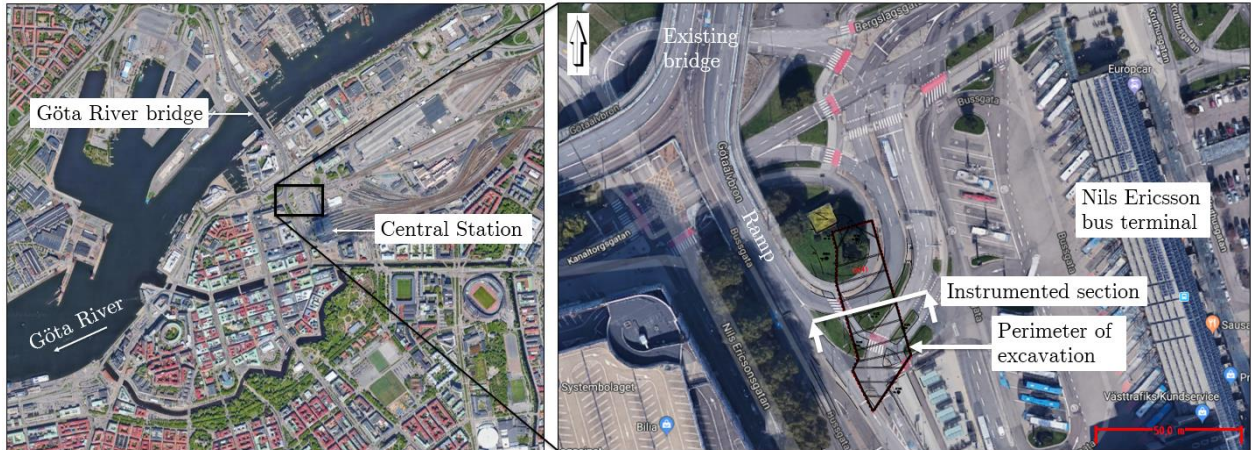
Figur 2. Exempel på resultat från fallstudien: uppmätta jämför prognosticerade horisontella deformationer vid spontvägg. a) efter pålning b) efter undervattenschakt och c) efter installation av dragstag och länsning. Figur B.10 i Tornborg (2020) försedd med förklarande text.



Figur 3. Exempel på resultat från fallstudien: a) byggsekvens och b) uppmätt jämför prognosticerad stämpkraft över tid. Figur B.16 i Tornborg (2020).

3.2 Instrumentering för uppföljning av jordtryck vid Hisingsbron i Göteborg

Vid en schakt inom projektet Hisingsbron i Göteborg har instrumentering och mätningar utförts i såväl schaktskedet som det skede som innefattade gjutning och uppförande av den permanenta konstruktionen. Läge för schakten visas i Figur 4. Mätningarna planeras att utföras för uppföljning av jordtryck även i driftskedet.

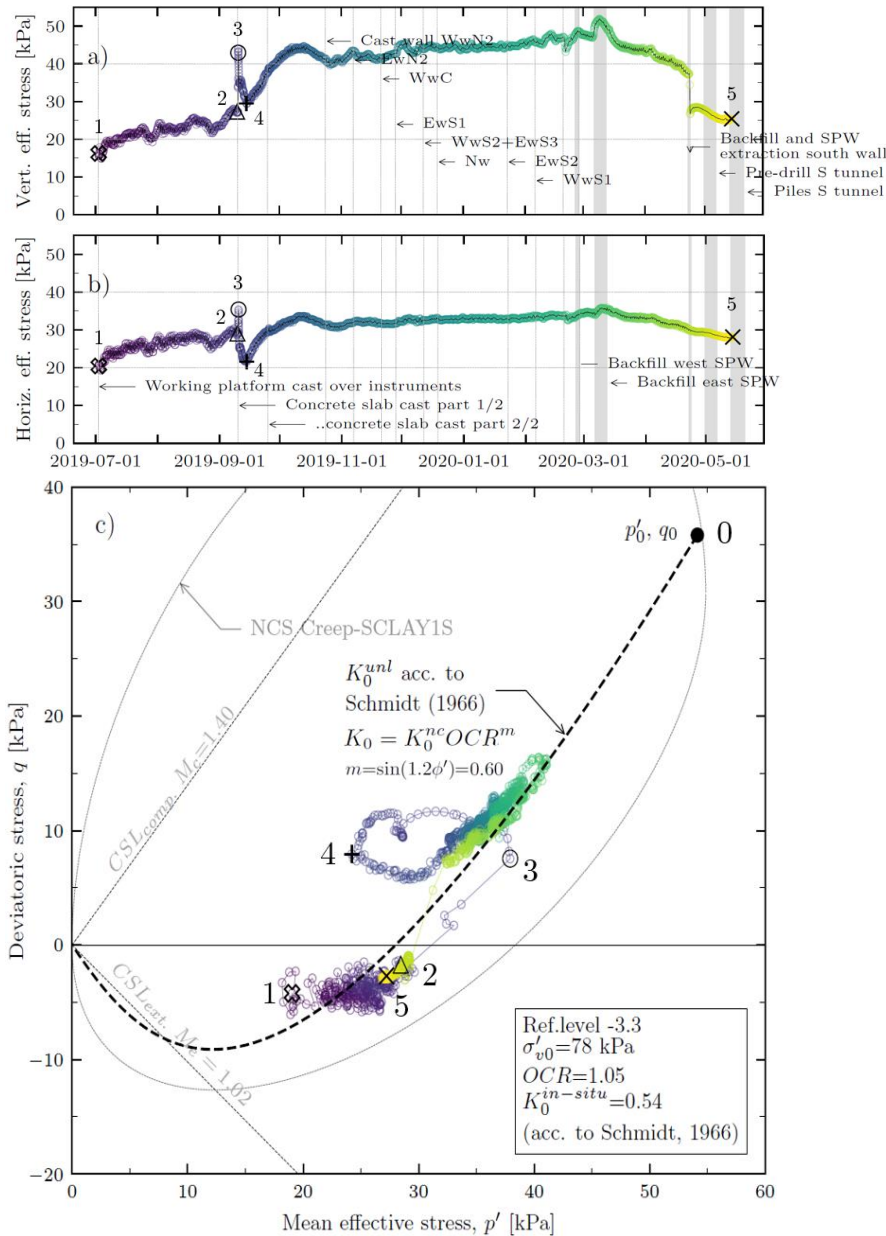


Figur 4. Läge för instrumenterad schakt. Figur 4.1 i Tornborg (2020). Ett foto av den aktuella schakten återfinns på försättsidan till föreliggande rapport.

Inför instrumenteringen utfördes omfattande laboratorieundersökningar för att bestämma lerans egenskaper. Viktiga resultat från dessa undersökningar är kunskap om lerans omrörda egenskaper samt resultat från triaxialförsök anpassade för aktuell problemställning/schakter. Dränerade triaxialförsök utförs ofta enligt ”rutinförfarande” oberoende av aktuell problemställning. Arbetet visar försök som är mer lämpliga för studier av schakter. Således kan problem med s.k. ”aktiva” dränerade triaxialförsök undvikas för schakter (så som vid laborieförsök för detaljprojekteringen av Västlänken i Göteborg).

I dagsläget är konstruktionen färdigställd och mätningarna är fortsatt pågående. Detta möjliggör att responsen från byggstart till och med driftskedet kan följas. Instrumenteringen och inledande resultat presenterades på Grundläggningdagen och Nordic Geotechnical Meeting, båda 2020. De inledande resultaten styrker så här långt uppkomsten av ett s.k. svälltryck mot bottenplattan i storleksordning med de resultat som presenterades i förstudien till doktorandprojektet. Vidare innebär mätningarna av horisontella och vertikala jordtryck samt portryck att unik information om lerans beteende vid av- och pålastning kan erhållas. Således möjliggörs jämförelser mot tidigare laboriestudier. Sammanfattningsvis kan sägas att tidigare resultat av Schmidt (1966) nu har validerats i fält. Detta stärker branschen i nyttjandet av dennes föreslagna samband för uppskattning av jordlagrens viktiga spänningsförhållanden in-situ. Exempel på resultat visas i Figur 5.

Vidare möjliggör mätresultaten att den numeriska beräkningsmodellen Creep-SCLAY1S nu även kan utvärderas mot mätresultat från driftskede. Resultaten från instrumentering bygger således kunskapsmässigt vidare på resultaten från Götatunneln.



Figur 5. Uppmätta effektivspänningar i ett av tre lägen under bottenplattan vid projektet Hisingsbron i Göteborg: a) vertikala och b) horisontella effektivspänningar samt c) redovisning i form av spänningsväg inklusive jämförelse av samband från Schmidt (1966). Figur 5.16 i Tornborg (2020).

4 SLUTSATSER

Nedan återges de viktigaste slutsatserna från projektet så här långt:

- Prognoser upprättade med materialmodellen Creep-SCLAY1S visade på god överensstämmelse jämfört med mätdata från Götatunneln, entreprenad J2. Dock avvek prognosen i de avseenden där installationseffekter, så som t.ex. stagborrning, ej inkluderats i analysen. Detta belyser vikten av att beakta installationseffekter. Sammantaget resulterade fallstudien i en rekommenderad fortsatt och utökad användning av Creep-SCLAY1S för studier av schakter och konstruktioner under mark.

- De permanenta jordtrycken mot en konstruktion under mark påverkas av aktiviteter och utbildade deformationer i byggskedet. Rådande praxis är emellertid att använda en "K₀-faktormetod" för horisontella permanenta jordtryck (anges i riktlinjer så som t.ex. Trafikverkets regelverk för tunnelkonstruktioner). Därmed antogs gränssnittet utmed jord-konstruktion verka som en serie oberoende fjädrar (Muir-Wood, 2004) och jordens och konstruktionens styvheter samt byggskedets inverkan bortses ifrån. Sådana aspekter kan dock studeras med numerisk modellering. Detta beskrivs i avsnitt 5 *Fortsatt forskning*.
- Litteraturstudien belyser hur det i Sverige saknas tydliga definitioner för de värden K₀ kan anta och att det sannolikt råder begreppsförvirring i branschen. Detta beskrivs i Tornborg (2020) avsnitt 2.1.7 och 2.2.7, förhoppningsvis bidrar arbetet till klargöranden för branschen.
- De laboratorieförsök som utförts i projektet belyser hur standardförfarande för dränerade triaxialförsök bör anpassas för aktuell typ av frågeställning. Sådana anpassningar är relativt enkla att utföra, och bidrar till korrekta studier av jordens beteende för aktuella lastfall.
- I samband med gjutning av bottenplattan vid Hisingsbron registrerades en temperaturökning om 10-15°C. Detta i tillägg till att temperaturen redan innan gjutning var 15-20°C (normalt är lerans temperatur kring 7-8°C). Detta belyser att den värmeutveckling som sker då bottenplattor eller t.ex. in-situ gjutna pålar härdar kan nyttjas som en "termisk installationseffekt". Detta bör vara till fördel då konstruktioner för geotermisk lagring i lera studeras/övervägs.
- Efter gjutning av bottenplattan ökade de vertikala effektivspänningarna under denna motsvarande 0.2-0.3σ'_{v0}, där σ'_{v0} är vertikal effektivspänning på grundläggningsnivån (innan schakt). Detta styrker uppkomsten och beaktande av ett så kallat svälltryck i linje med förstudien (Tornborg, 2017).
- Mätningarna av horisontella och vertikala jordtryck samt portryck har gett en unik möjlighet att studera lerans beteende under av- och pålastning i fält. Det samband som föreslogs av Schmidt (1966) baserat på laboratorieförsök, har nu validerats i fält. Detta stärker branschen i nyttjandet av Schmidts samband för uppskattning av jordlagrens så viktiga spänningsförhållandena in-situ.
- Inledande FE-modellering med modellen Creep-SCLAY1S visar på god överensstämmelse mellan prognosticerade och uppmätta vertikala effektivspänningar under bottenplattan.
- Den mätdata som insamlats möjliggör fortsatta utvärdering och kalibrering av Creep-SCLAY1S, nu mot mätdata från såväl bygg- som driftskede (dvs ej enbart byggskede så som för fallet Götatunneln).

5 FORTSATT FORSKNING

För att nyttiggöra den optimeringspotential som identifierats avseende dimensioneringsmetoder för jordtryck, föreslås fortsatta studier att innefatta generalisering av samspelet mellan schakt och konstruktion och de variabler som påverkar responsen. Generalisering avser i denna bemärkelse tillämpbarhet på varierande förhållanden och geometrier (ej plats-/projektspecifikt).

Fortsatt arbete inleds med kalibrering av materialmodell Creep-SCLAY1S mot mätresultaten från den nyligen instrumenterad schakten vid Hisingsbron i Göteborg. Därefter identifieras variabler för generalisering av resultaten från de platsspecifika fältmätningarna med hjälp av numeriska studier/experiment. Variablernas inverkan på primärt horisontella och vertikala jordtryck studeras. Detta rekommenderas då rådande praxis att nyttja en K_0 -faktormetod för permanenta jordtryck anses alltför förenklat relativt komplexiteten av schakter i stadsmiljö. Presentation av normaliserade resultat så att dessa blir "skalningsbara" dvs tillämpbara för t.ex. varierande geometrier, byggtider och styvhetsförhållanden mellan jord och stödkonstruktion.

Förslagen till fortsatt forskning inkluderar även kompletterande laboratoriestudier och eventuell vidareutveckling av Creep-SCLAY1S. Sammanfattningsvis förväntas den fortsatta forskningen bland annat leda till mer nyanserade designmetoder för jordtryck. Mer nyanserade designmetoder leder till optimering av geokonstruktioner (besparingar av materialmängder och därmed såväl CO₂-ekv. som SEK). Resultaten är av sådan karaktär att de relativt enkelt kan nyttiggöras genom implementering i branschgemensamma riktlinjer. En indirekt nytta av projektet förväntas vara ökad förståelse mellan teknikområdena geoteknik och konstruktion samt ett gemensamt synsätt kring jordtryck mot konstruktioner i lera.

REFERENSER

- Asadi, R. & Sokhango, E. (2018). *Heave caused by excavation in soft soil - A case study of a part of the Götatunnel project*. MSc thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Carder, D. R. & Darley, P. (1998). *The long term performance of embedded retaining walls*. Crowthorne: TRL report 381, Transport Research Laboratory.
- Harlén, M. & Poplasen, G. (2019). *Excavation in soft clay - Class A prediction of excavation in central Gothenburg*. MSc thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Hasselberg, S. (2018). *Laboratory testing related to unloading modulus of soft clay*. MSc thesis. Lund University - Faculty of Engineering, LTH, Lund.
- Karlsruud, K. (2012). *Prediction of load-displacement behaviour and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results*. PhD thesis, NTNU, Trondheim.
- Kullingsjö, A. (2007). *Effects of deep excavations in soft clay on the immediate surroundings*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Magnus, R., Teh, C. I., & Lau, J. M. (2005). *Report on the incident at the MRT Circle Line worksite that led to the collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004*. Ministry of Manpower. Singapore.
- Muir-Wood, D. (2004). *Geotechnical Modelling*. London: Spon Press.
- Richards, D. J., Powrie, W., Roscoe, H., & Clark, J. (2007). *Pore water pressure and horizontal stress changes measured during construction of a contiguous bored pile multi-propped retaining wall in Lower Cretaceous clays*. *Géotechnique*, 57(2), 197-205.
- Schmidt, B. (1966). *Earth pressures at rest related to stress history*. *Canadian Geotechnical Journal*, 3(4), 239-242.
- Tornborg, J. (2017). *Svälltryck på grund av avlastning i lös lera*. Slutrapport för SBUF projekt 13303.
- Tornborg, J., Karlsson, M., & Karstunen, M. (2019). *Benchmarking of a contemporary soil model for simulation of deep excavations in soft clay*. Proceedings of the 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE), Reykjavik.
- Tornborg, J. (2020). *Rate-dependent response of excavations in soft clays*. Technical report for mid-term seminar. Chalmers University of Technology, Gothenburg.