

## Analysis of settlements in the project The South Marieholm Bridge

A. Kullingsjö

Skanska Sweden AB, Sweden, anders.kullingsjo@skanska.se

C. Edmark, R. Oskarsson

Skanska Sweden AB, Sweden

### ABSTRACT

*Som en viktig del av Marieholmsförbindelsen byggs Södra Marieholmsbron i direkt anslutning till den befintliga Marieholmsbron och den kommande Marieholmstunneln. Projektet drivs av Skanska MTH som en totalentreprenad och inkluderar totalt 1,5 km järnvägsbro över Säveån, E45:an och Göta älv samt anslutande järnvägsbankar och tre järnvägsbroar med spännvidd mellan 20 och 60 meter.*

*Projektet innehåller ett flertal geotekniska utmaningar. Djupa schakter för brostöd på land. Stabilitetsförhöjande åtgärder utefter kajerna. Djupgrundläggning av brostöd ute i älven. Breddning av järnvägsbank samtidigt som pågående marksättningar skall brytas.*

*Samtidigt som dessa utmaningar skall bemästras skall hänsyn tas till befintlig infrastruktur och angränsande verksamheter.*

*Aktuell artikel behandlar främst hur framtida sättningar vid breddning av järnvägsbanken prognosticerats med beaktande av rådande sättningshastighet på 13 mm/år och angränsande konstruktioner.*

-----  
*As an important part of Marieholm Connection Project the South Marieholm Bridge is constructed directly adjacent to the existing Marieholm Bridge and the upcoming Marieholm Tunnel. The project is run by Skanska MTH as a design and build contract and includes a total of 1.5 km of railway bridge over the Säve river, the E45 and the Göta river together with the adjoining railway embankments and three railway bridges with spans between 20 and 60 metres*

*The project contains a number of geotechnical challenges. Deep excavation for the bridge foundations. Stability enhancing measures along the quays. Deep Foundations for bridge support, in the river and on land. Widening of existing railway embankments without causing settlement.*

*While effectively addressing these challenges existing infrastructure and associated activities must be taken into account.*

*This article deals primarily how settlements from the widening of the embankment were estimated taking into account current settlement rate of 13 mm / year and adjacent structures.*

**Keywords: Soft clay, settlements, creep, pile foundation, case record**

## 1 INLEDNING

### 1.1 Bakgrund

Södra Marieholmsbron är en del i Marieholmsförbindelsen som inkluderar vägförbindelse under och ny järnvägsförbindelse över Göta älv i Göteborg. Syftet är att öka kapaciteten av framförallt godstrafik på järnväg samt att minska trafikbelastningen i Tingstadstunneln. Bron finansieras av regionala och nationella intressenter samt genom EU bidrag.

Södra Marieholmsbron är en viktig del i den kommande utbyggnaden av Hamnbanan, järnvägslänken mellan Göteborgs Hamn och övriga Sverige, som idag är enkelspårig. Hamnbanan kommer för att klara det ökade kapacitetsbehovet byggas ut till dubbelspår. (TrV, 2014).



Figur 1. Illustration av Marieholmsförbindelsen, (TrV, 2014).

### 1.2 Entreprenad Södra Marieholmsbron

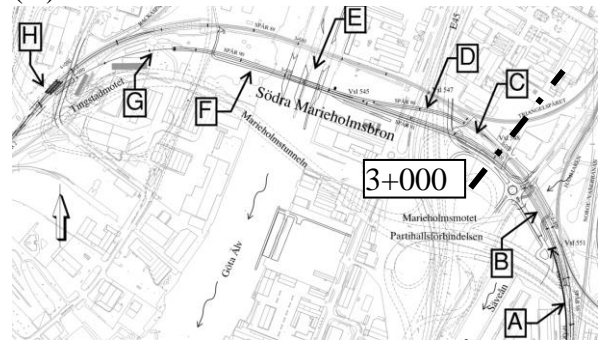
Södra Marieholmsbron avser bro över Sävån, E45:an samt en lyftsvängbro över Göta älv som byggs strax nedströms den befintliga Marieholmsbron, med en sammanlagd längd på 1,5 km. Projektet genomförs som en totalentreprenad. Utöver den långa bron ingår i projektet tre järnvägsbroar över framtida tunnelramper på Hisingsidan. Förutom projektering av bron och anslutande järnvägsbankar inkluderas projektering och färdigställande av samtliga installationer för lyftsvängbron och BEST arbetena.

I entreprenaden ingår omfattande markarbeten på ömse sidor om älven i form av miljösanering, ledningsomläggningar och grundförstärkningar inför kommande entreprenader i området.

Entreprenaden drivs av ett konsortium mellan Skanska Sverige AB (70%) och MT Højgaard (30%). Projektet bedrivs med utökad samverkan nivå II mellan beställaren trafikverket (TRV) och Skanska MTH.

En översiktsplan för SMB redovisas i Figur 2. Anslutningen mot befintliga spår mot Olskroken, söder om och under Partihallsbron (PHB), utgörs av lättfyllnadsbank (A).

Övergångskonstruktionen vid brons landfäste utgörs av bankpållning i kombination med lättfyllning. Passagen över Sävån (B) utgörs av en fackverksbro. Vid (C) skall den befintliga brons element bytas ut för att möjliggöra att trafiken leds mellan de bägge broarna. Därefter fortsätter järnvägsbron över väg E45 som trafikeras under hela projektet (D).



Figur 2. Översiktsplan för Södra Marieholmsbron

Passagen över Göta älv (E) utgörs av en lyftsvängbro av stål. På Tingstadsidan fortsätter sedan järnvägsbron ytterligare ca 200 m västerut innan spåret förläggs på bank som förstärkts med bankpålar (G). Marken runt brostöden på Tingstad sidan (F) är grundförstärkt med KC-pelare. Längre västerut mot Backa (H) ingår tre stycken tågbroar som leder trafiken över Salsmästaregatan och kommande tunnelramper.

I projektet kommer projektering och BEST arbeten utföras för drygt 50 Mkr vardera. Några övriga mängder framgår nedan:

- |                                |                               |
|--------------------------------|-------------------------------|
| – 151 000 m betongpålar        | – 2 500 m stålpålar (ø406)    |
| – 210 000 m KC-pelare          | – 10 000 m <sup>2</sup> spont |
| – 17 000 m <sup>3</sup> betong | – 1 800 ton armering          |
| – 1 950 ton brostål            |                               |

Den nya bron skall tas i drift under våren 2016 och de slutliga arbetena, främst vid Backa färdigställs under vintern 2016-2017.

### 1.3 Angränsande entreprenader

Marieholmsförbindelsen är uppdelad på olika entreprenader som på olika sätt måste beaktas vid genomförandet av entreprenad SMB, (Kullingsjö, et al., 2015). Främst är det den avslutande entreprenaden för Partihallsbron som har betydelse för de sättninganalyser som behandlas i denna artikel. Bron färdigställdes 2011, se även (Edstam, et al., 2010)

### 1.4 Geotekniska utmaningar

De olika geotekniska utmaningarna i projektet är omgivningspåverkan i såväl utförandeskedet som i driftskedet. Exempelvis bristande totalstabilitet, djupa schakter, massundanträngning till följd av pålning och installation av KC-pelare passage av såväl Sävån som Göta älv. För att få en vidare överblick av projektet hänvisas till (Kullingsjö, et al., 2015).

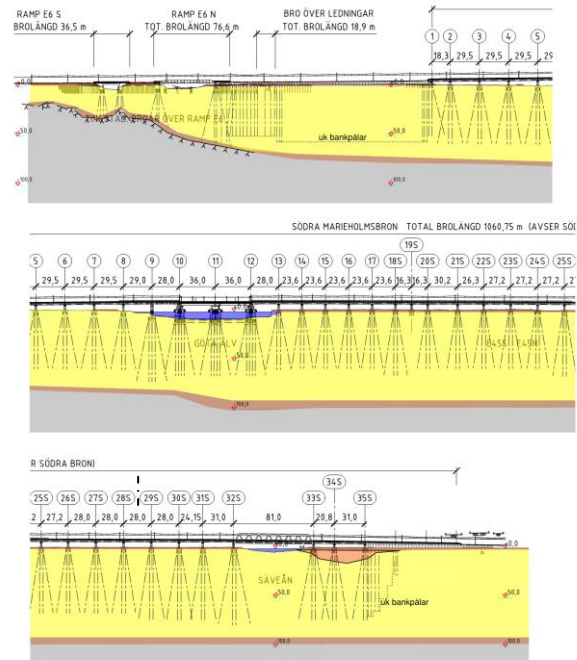
## 2 GEOTEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

Göta älvs dalgång består i höjd med Marieholm av låglänta områden med tjocka sedimentavlagringar av lera. För det aktuella området, Figur 2, är lerans mäktighet öster om älven mer än 90-100 m. Från älven och västerut är lermäktigheten 60-75 m. Vid passagen av Salsmästaregatan minskar lerans mäktighet till ca 30m vid entreprenadgränsen.

Österifrån mynnar Sävån ut i Göta älv vilket påverkat de geotekniska egenskaperna inom de ostliga delarna, (Hellgren & Svensson, 2005). Dagens flödesriktning på Sävån under PHB är en kvarleva av Göta älv som tidigare flöt runt Marieholm. Två olika områden med helt olika geotekniska egenskaper i lera har konstaterats med en geografisk gräns ungefär mellan stöd 28 och 29 (km 3+000), se Figur 2 och Figur 3.

Det ostliga området präglas av svämsediment bestående omväxlande av gytjig siltig lera, silt och sand och en större sandlins öster om

dagens Sävån. Dessa sediment överlagras idag av fyllning med 1-3 meters mäktighet. Förkonsolideringstrycket är lågt,  $OCR$ , ca 1,1, genom hela lerprofilen. Sättningar i storleksordningen 6 -13 mm/år har konstaterats.



Figur 3. Längdprofil för (södra) bron.

Det västra området karakteriseras av lera som uppvisar  $OCR$  i storleksordningen 1,2 – 1,3 vilket stämmer väl med empirin för övrig lera i Göta älv dalen. Observerade sättningar i området är 4 mm/år längst österut respektive 2 mm/år väster om Göta älv.

Vattenkvoten,  $w$ , är generellt ca 80% på nivå -5,0 avtagande till ca 60% vid ca 50 m djup. Konflytgränsen är i paritet med vattenkvoten eller något högre. Den odränerade hållfastheten,  $c_u$ , i västra området är generellt 12-13 kPa ned till 4 meters djup för att sedan öka 1,3 kPa/m.

Sandlinsen verkar haft en dränerande effekt vilket resulterat i högre  $\sigma'_{vc}$  och högre  $c_u$  inom sandlinsens närhet. Utanför den direkta påverkan av sandlinsen och svämsedimenten är hållfastheten mellan 13 och 15 kPa ned till 12 meters djup för att därunder öka ca 1,2 kPa/m.

### 3 PASSAGEN UNDER PARTIHALLSBRON

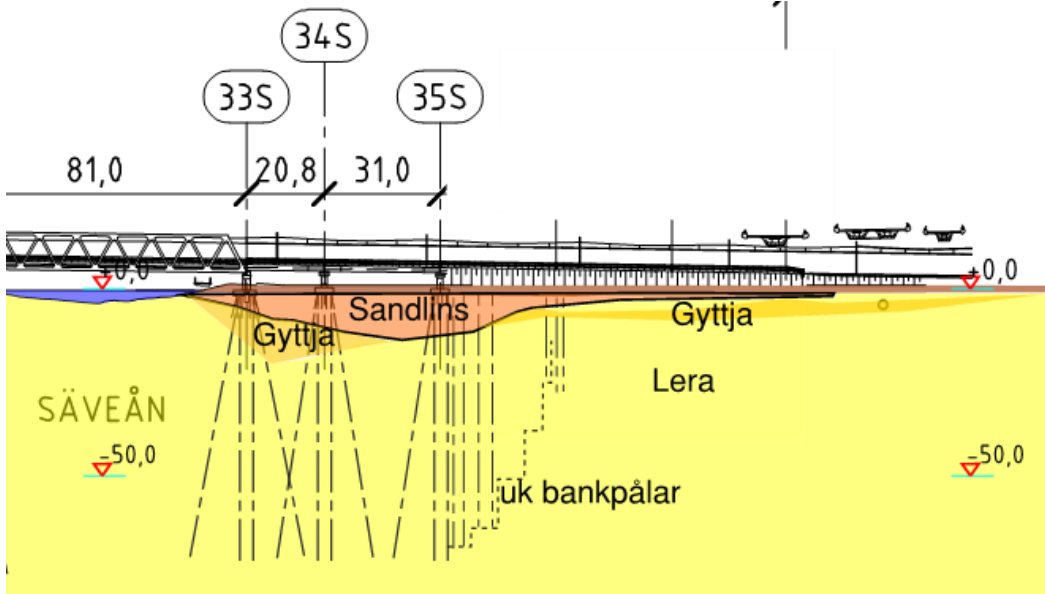
#### 3.1 Tekniska förutsättningar

Givna dimensioneringsförutsättningar för bropålar öster om Sävån fram till PHB är att marksättningar på 1080 - 1560 mm skall förväntas uppkomma under 120 år, där de största marksättningarna är närmast PHB. Pånghängslaster skall beaktas ovan neutrala lagret eller som djupast till nivå -30. Det beskrivs också att dessa marksättningar är krypsättningar

#### 3.2 Geotekniska förutsättningar

Området präglas av sandlinsen och Sävåns utlopp i Göta älv. Sandlinsen underlagras av gyttja, Figur 4.

Portrycksmätningar i området indikerar att trycknivån i friktionsjordslagret under leran motsvarar en nivå på 1,2 meter över markytan. I övre magasinet, fyllningen och sandlinsen, ligger grundvattennivån på ca 1,5 meters djup. Utförda portrycksmätningar i leran uppvisar trycknivåer som uppgår till som mest 7 mvp högre än stationärt portryck,



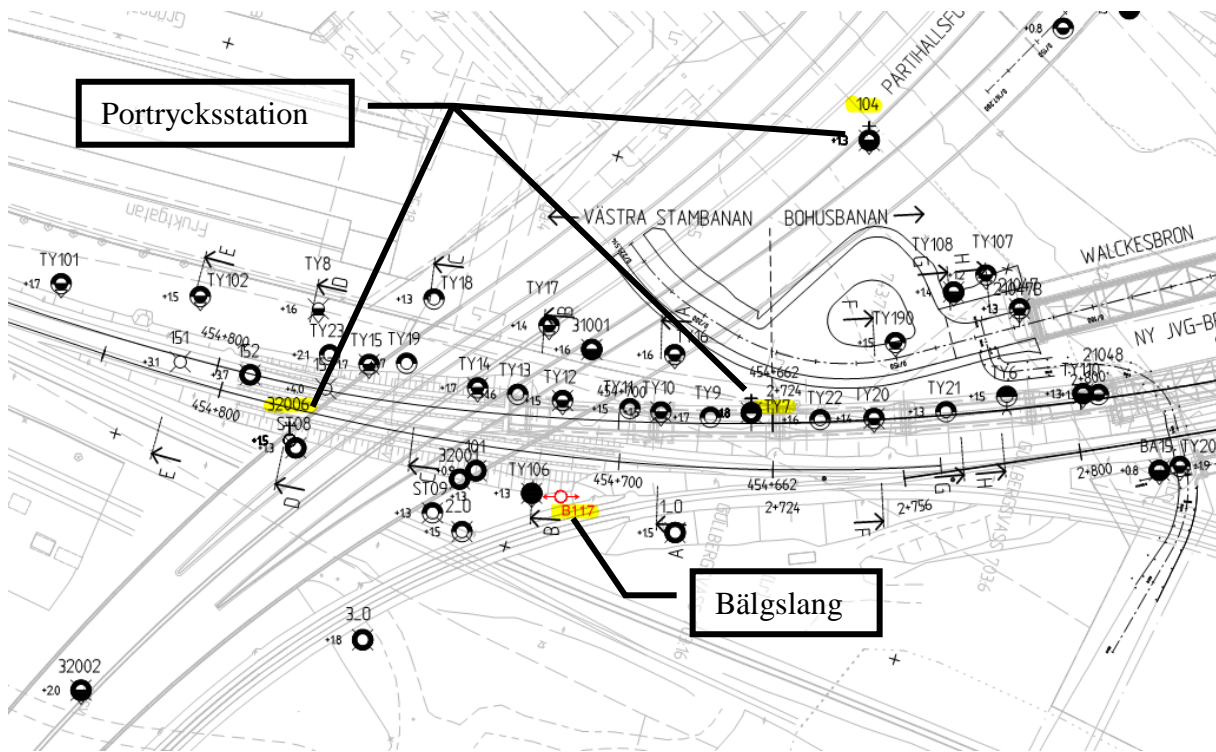
Figur 4. Jordprofil vid passagen under PHB

Figur 6. Porövertycken i mätstation 104 beror på den generella uppfyllnad som gjorts i området samt av krypinducerat porövertryck. Det förhöjda porövertrycket i mätstation 32006 och TY7 är orsakad av de befintliga järnvägsbankarna.

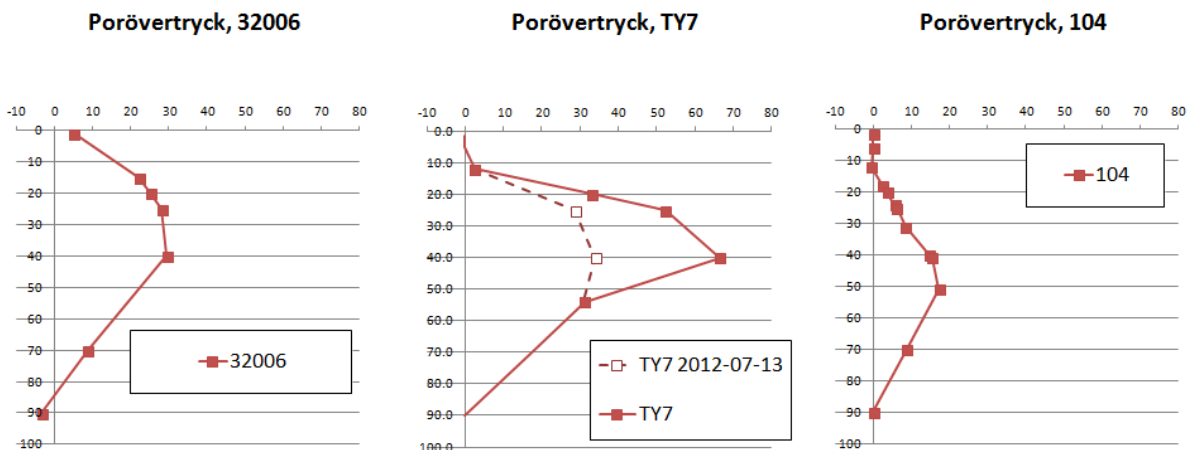
Sättningarna i området är mätt med bälgslangar installerade ned till 48 meters djup samt med markpeglar. Vid bälgslang B117 i anslutning till befintlig järnvägsbank har 114 mm marksättning konstaterats på 10 år. Den relativa sättning som mäts från underkant bälgslang och till den översta mätpunkten på 5 meters djup är 93 mm. Med antagandet att sättningen i fyllningen är försumbar under mätperioden är det rimligt att anta att sättningarna på 48 meters djup är ca 15 mm under 10-års perioden. De största sättningarna sker dock mellan 5 och 25 meters djup, ca 80 mm under motsvarande period.

Övriga markpunkter visar sättningar i storleksordningen 6 mm/år och upp till 13 mm/år i anslutning till där järnvägsbankarna är som störst.





Figur 5. Utförda undersökningar i området



Figur 6. Mätta porövertryck i området.

### 3.3 Vald lösning

Skanska MTH har förändrat TRV:s förslag baserat på genomförbarhet och för att minimera påverkan på PHB grundläggning.

Enligt förslagsritningen var bron landfäste placerat under PHB med en övergångskonstruktion med 30 m bankpålning och 60 m lättfyllnadsbank. TRV:s förslag innebar att SMB:s landfäste och anslutande bankpålning på en 30 meters sträcka skulle utföras under PHB, vilket bedömdes kostsamt och riskfyllt.

Skanska MTH valde att korta bron 3 fack. Landfästet hamnar därmed 85 m från PHB. I anslutning till landfästet utfördes bankpålning på 30 m sträcka. Resterande bank utgörs av en lättfyllnadsbank, 150 m. För att skona Partihallsbrons grundläggning från tillskottslaster från en breddad bank installerades en mindre bankpålning med injekteringspålar i direkt anslutning till det närmsta brostödet, E4.

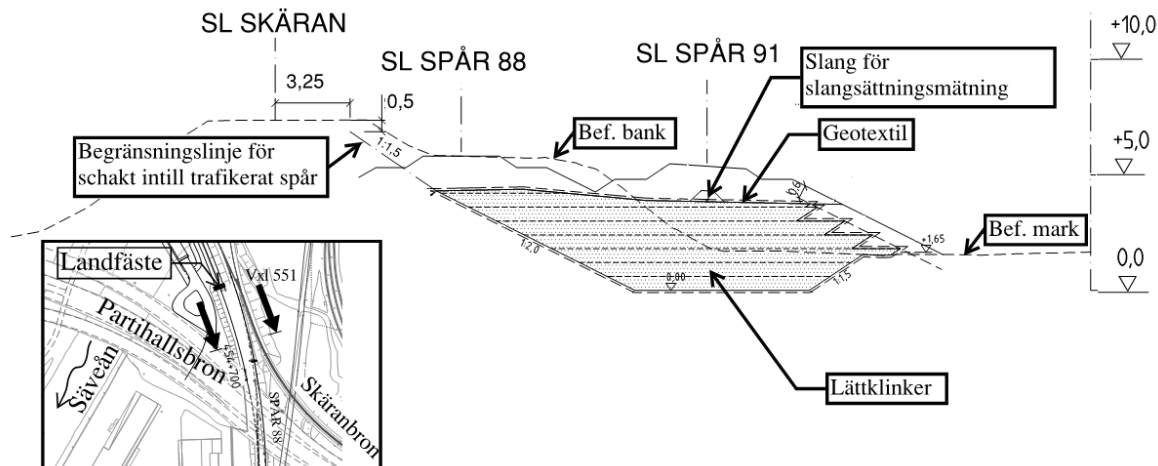
Lättfyllnadsbanken söder om PHB är oförändrad gentemot ursprungsförslaget. Under bron och norrut skiftas så mycket som möjligt, med hänsyn till stabiliteten upp mot

spåret som ansluter mot Skäranbron, ut mot lättklinker.

Baserat på de givna spänningssituationerna i förfrågningsunderlaget skulle utskiftningen innebära en avlastning som medförde OCR större än 1,25 ned till 30 m djup vilket var den nivå dit sättningarna skulle beaktas.

I detaljprojekteringskedet konstaterades dock att de spänningsnivåer som angivits i FU ej var representativa för det nya spårålaget. Detta föranledde mer omfattande analyser än vad som ursprungligen var tänkt.

Under de spårsträckor där lättfyllning nyttjats har rör för framtida uppföljning av sättningarna med slangställningsmätning installerats.



Figur 7. Tvärsektion i anslutning till PHB.

#### 4 SÄTTNINGSANALYS ÖSTER OM SÄVEÅN

##### 4.1 Konceptuell modell

###### 4.1.1 Allmänt

I den inledande detaljprojekteringen konstaterades att det pågick inte bara sekundär konsolidering utan även primär konsolidering i området. Vidare konstaterades på grund av de missledande uppgifterna i FU att urskifning ej skulle vara tillräckligt för att med en enkel analys konstatera att OCR större 1,25 skulle åstadkommas.

Den beräkningsmetodik som Skanska MTH tänkt sig använda för att dimensionera pålgrundläggningen baseras på samma metodik som PHB dimensionerats med, (Edstam, et al., 2010). Denna metodik ger spänningar och sättningar efter oändlig tid baserat på att krypdeformationerna avstannar vid ett givet OCR, ofta 1,25. Detta angreppssätt är dock EJ tillämpligt då pågående sättningar till stor del består av

konsolideringssättningar vilket innebär att tiden måste beaktas.

Ovanstående innebar att en mer detaljerad analys än vad som förutsatts i anbudsskedet krävdes. Modellen för den aktuella frågeställningen att prognostisera framtida marksättningar måste kunna beakta:

- in situ förhållandena med höga porövertryck i leran
- pågående marksättningar
- samverkan med befintliga järnvägsbankar
- samverkan med befintliga pålar
- samverkan med nya grundförstärkningar
- inverkan av existerande sandlins

Inledningsvis nyttjades geosuite för att återskapa dagens portrycksituation och sättningshastighet. Erhållen sättningshastighet var dock allt för liten jämfört med den observerade varför istället valet föll på FE-programmet PLAXIS

#### 4.1.2 Materialegenskaper

En relevant beskrivning av lerans egenskaper är av största vikt för att modellen skall vara trovärdig vid simuleringar av vad som händer under bankens livslängd. Därför används materialmodell "Soft-Soil-Creep" för att modellera lerans mekaniska egenskaper.. Kalibrering har gjorts gentemot redovisade CRS försök. Kalibreringen har gjorts såväl genom att modellera själva laborieförsöket men även med hjälp av att studera en 100 m hög jordpelare som fyllts ut på samma sätt som området generellt. Jordpelaren har studerats med avseende på primär och sekundär konsolidering genom jordprofilen och hur stor krympelaterad överkonsolideringsgrad som erhöles genom profilen. När rimliga förhållanden erhöles nyttjades först en 2D modell innehållandes såväl de befintliga tågbankarna som sandlinsen. Därigenom konstaterades att det var möjligt att med hjälp av FEA kunna återskapa dagens förhållanden på ett realistiskt sätt.

Därefter nyttjades en 3D modell för att återskapa in situ förhållanden med beaktande av dagens tågbankar och befintliga pålgrundläggningar.

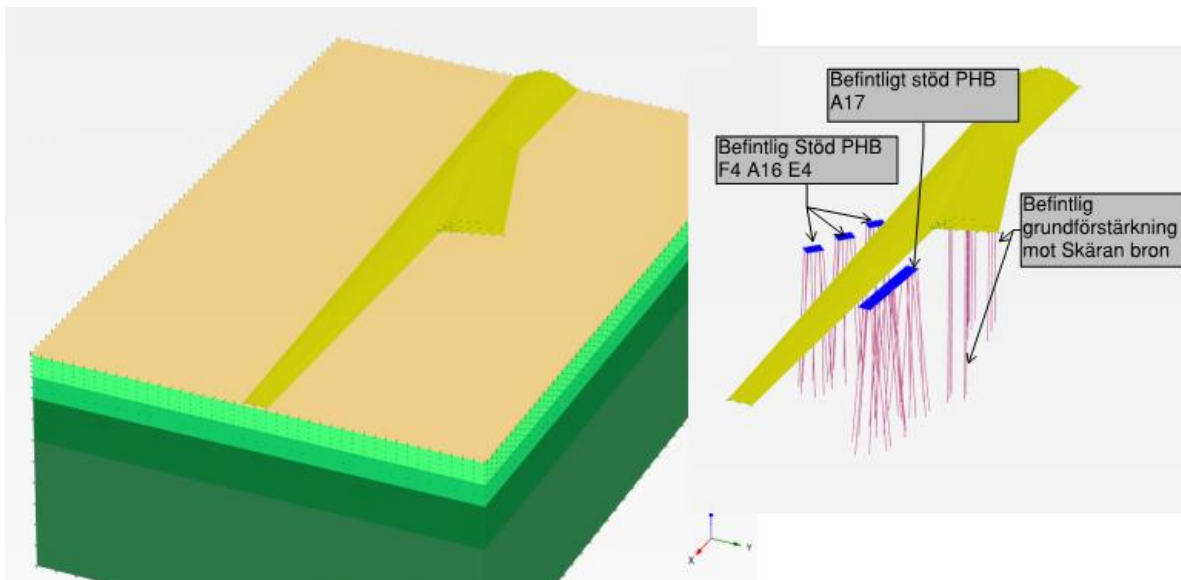
Tanken var att om dagens portryckssituation kunde återskapas i kombination med en sättnings hastighet på markytan i samklang med de uppmätta var det trovärdigt att prognosticera effekterna av den nya banken på 40 och 120 år. Vidare var målet att erhålla en liknande överkonsolideringsgrad i jordprofilen som de olika laborieundersökningarna indikerade.

#### 4.1.3 Modellering av pålar

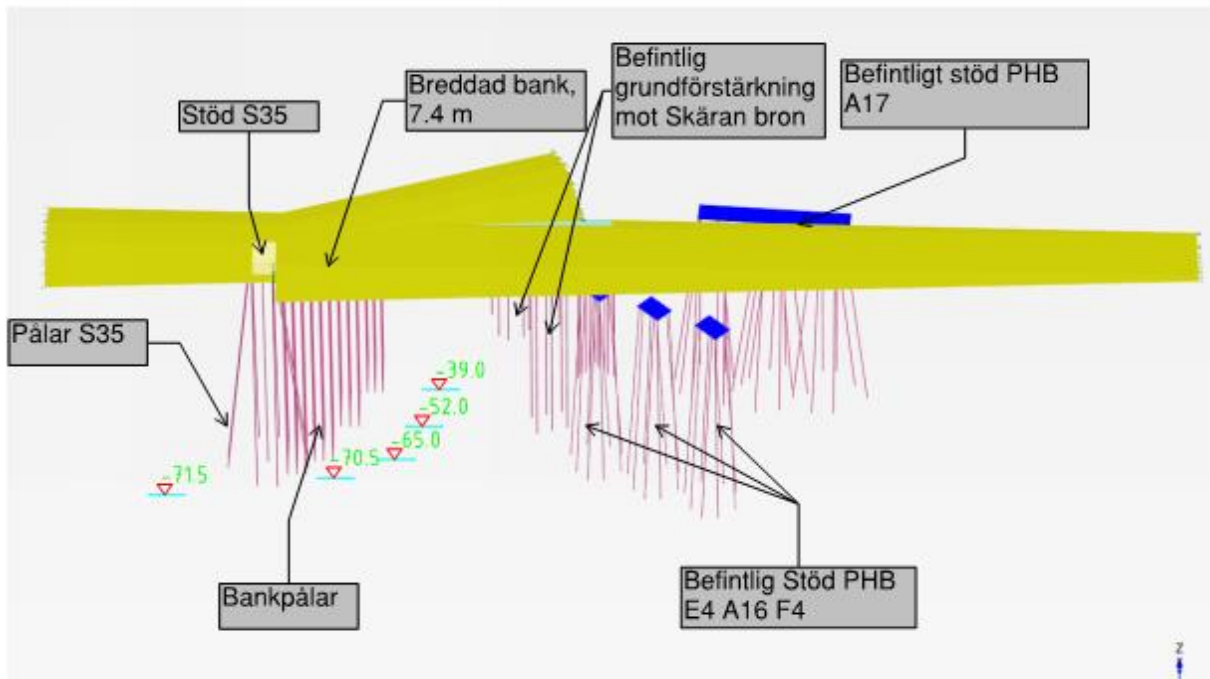
Pålarna beskrivs mha strukturelementen "embedded piles", för detaljerad beskrivning hänvisas till PLAXIS manualen. Dessa element har förmågan att överföra longitudinella krafter utefter hela längden. Dessa krafter utvecklas som funktion av relativrörelsen mellan påle och omgivande jord. Mantelkrafterna baseras på okorrigerade hållfastheter från vingborr vilka korrigerats i enlighet med Pålkommisjons rapport 100 (Eriksson, et al., 2004).

#### 4.1.4 Geometri

Då lerlagren konstaterats vara mäktigare än 90 m har en förenklad geometri enligt Figur 8 till Figur 8 använts. För att inte skapa en allt för geometrisk komplex modell har bankens krökning mellan sektion 2+820 och 454+866 försumrats.



Figur 8. Geometri för befintlig bank och angränsande pålar



Figur 9. Geometri för breddad bank och tillhörande grundförstärkning

#### 4.1.5 Modelleringssekvens

För att återskapa in situ förhållandena påbörjas beräkningen år 1700 med en antagen markyta på  $\pm 0$ .

- Steg 1: Fyllning upp till +1.5.
- Steg 2 Konsolidering fram till 1900
- Steg 3 Uppförande av befintlig bank, inklusive bank mot Skäranbron
- Steg 4 Konsolidering fram till 1985
- Steg 5 Grundförstärkning anslutningen mot Skäran. *Aktivering av pålar*
- Steg 6 Konsolidering fram till byggandet av PHB.
- Steg 7 Uppförande av PHB. *Aktivering av pålar samt permanent last*
- Steg 8 Konsolidering fram till år 2014

Utvärdering av uppmätta portryck samt pågående marksättningar för att jämföra med resultat från FE-analysen så att dessa överrensstämmer.

- Steg 9 Installation ny bank inklusive grundförstärkning
- Steg 10 Konsolidering 2 år (resterande byggtid)
- Steg 11 Konsolidering 40 år. Utifrån dessa resultat värderas såväl totalsättning som differenssättning

Steg 12 Konsolidering 120 år (ytterligare 80 år). Utifrån dessa resultat värderas sättningen för stöd 35 och påverkan på PHB grundläggning.

Initialtillståndet (år 1700 i beräkningen) definieras av att såväl primär och sekundär konsolidering har avslutats respektive har skett till en överkonsolideringsgrad till 1.25 vilket motsvara den överkonsolideringsgrad som uppträder för naturlig Göteborgslera.

Verifiering av modellen

För att verifiera modellen jämförs resultaten i modellen med uppmätta portryck och aktuell sättningshastighet, efter beräkningssekvens 8.

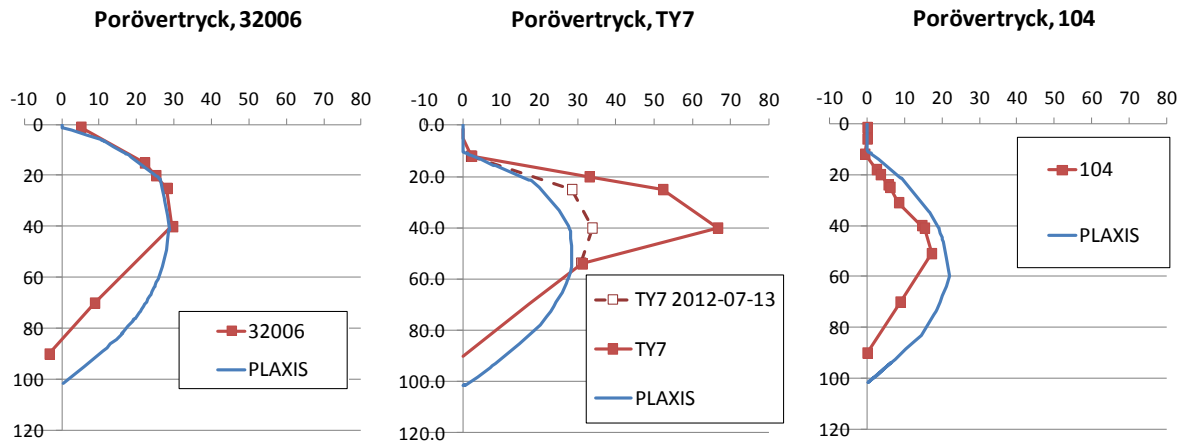
Påförd last i form av fyllning (steg 1) och existerande järnvägsbankar (steg 3) genererar primärt ett porövertryck motsvarande medelspänningsökningen i jorden. Detta porövertryck konsoliderar gradvis bort med tiden med en effektivspänningsökning som följd vilket också kommer att bidra till sekundär konsolidering. Den sekundära konsolideringen kommer fördröja portrycksutjämningen vilket förklarar den relativt stora portrycksbubblan i lerans centrala delar, även efter lång tid.



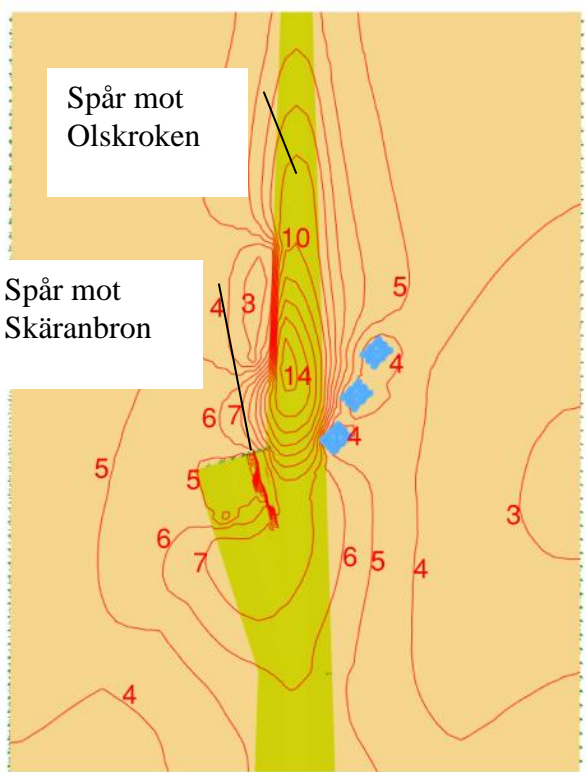
De portryck som beräknats redovisas tillsammans med mätta i form av porövertryck, Figur 10.

de sättningar som mätts i området. Studeras sättningarna på djupet i läge för bälgslang B117 verifierar beräkningen att viss sättning 1 till 2 mm/år sker under 48 meters djup.

Figur 11 visar den beräknade aktuella sättningshastigheten vilket stämmer väl med



Figur 10. Beräknade porövertryck jämfört med mätta

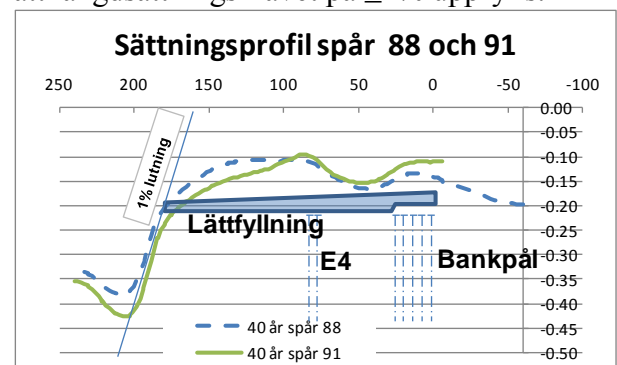


Figur 11. Beräknad sättningshastighet 2014, mm/år.

Såväl sättningshastigheten, porövertryck och spänningssituation stämmer väl med faktiska observationer.

#### 4.2 Sättningsprognos och övriga beräkningsresultat

Baserat på att den valda modellen verkar vara representativ för dagens förhållande har sättningsprognoser upprättats för kommande 40 år, se Figur 12. Aktuella grundförstärkningar har skissats in och prognosen visar att god marginal mot maximal tillåten totalsättning på 30 cm, och att längdsättningskravet på  $\leq 1\%$  uppfylls.



Figur 12. Sättningsprognos för spår 91 (heldragen linje) och spår 88 (streckad linje), 40 år, längdmätningen avser sträcka från landfastet (stöd35) och mot Olskroken.

Studeras kraftspelet i bankpålar är detta det som förväntats. Sättningarna av landfästet visar att neutrala lagret för en 70 m lång påle utbildas på 41 meters djup och att förväntad sättning för landfästet på 120 år är ca 20 cm. Då en skyddspålning utförs runt PHB:s stöd

E4 kommer SMB:s påverkan vara i stort sett försumbar.

#### 4.3 Utförande

Under ett 9 dagar långt tågstopp utfördes merparten av allt arbete med att riva bef bank och bygga ny lättfyllnadsbank på 180 m sträcka.. Arbetena flöt i stort sett utan missöden varför trafiken kunde släppas på 2,5 dygn tidigare än beräknat.

Bankpålarna installerades i förväg men några plattor installerades under tågstoppet då även den befintliga banken för spår 88 schaktades bort och den nya dubbelspårsbanken byggdes upp till stora delar med lättfyllning.



Figur 13. Utläggning av lättklinker för spår 88 och 91 under PHB. T.v. är landfästet upp mot Skäran bron.

Under utförandet uppdagades nya förutsättningar i form av ledningar som inte fick flyttas. Detta medförde att den utförda utskiftningen mellan landfästet och PHB stöd E4 ej kunde genomföras i den utsträckning som projekterats, varför det finns risk att den ”svacka” som kan skönjas ca 50 m från landfästet (stöd 35), se Figur 12 troligen blir större än enligt prognosen.

## 5 SLUTORD

Oktober 2015, då denna artikel skrevs, är arbetena i full gång på arbetsplatsen. Den breddade banken är på plats och pålarna och grundläggningen för de trebrostöden söder om Sävån är på plats. En nollmätning av slangställningsmätarna är gjord och under våren kommer vi få en första indikation på hur banken beter sig.

Den geotekniska projekteringen är i stort sett klar och har involverat ett flertal personer på heltid under ett års tid. Fokus har flyttas över till produktionsstöd istället för ren projektering, men det innebär inte att geoteknikerns roll i projektet är över. De stora utmaningarna återstår ju med att följa konstruktionernas beteende i verkligheten.

## 6 LITTERATURFÖRTECKNING

Edstam, T., Hansson, A., Holmberg, G. & Svahn, P.-O., 2010. *Partihallsbron - ingen koloss på lerfötter*. Stockholm, SGF - Svenska geotekniska föreningen.

Edstam, T. & Kullingsjö, A., 2010. *Ground displacements due to pile driving in Gothenburg clay*. Trondheim, Norway, Taylor & Francis, pp. 625-630.

Eriksson, P., Jendeby, L., Olsson, T. & Svensson, T., 2004. *Kohesionspål*, Linköping: Pålkommisionen.

Hellgren, L. & Svensson, L., 2005. Partihallslänken - en del i Marieholmsförbindelsen under älven i Göteborg. *Bygg & Teknik*, 1, pp. 29-35.

Kullingsjö, A., Edmark, C. & Oskarsson, R., 2015. *Södra Marieholmsbron*. Stockholm, SGF - Svenska geotekniska föreningen.

TrV, 2014. <http://www.trafikverket.se>. [Online] Available at:

<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Vastra-Gotaland/Marieholmsforbindelsen/>

[Använd 30 12 2014].