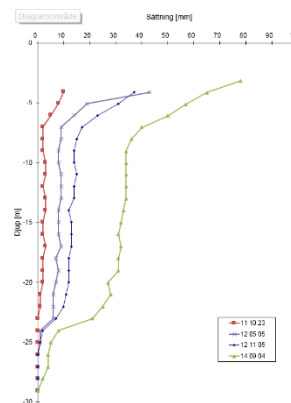
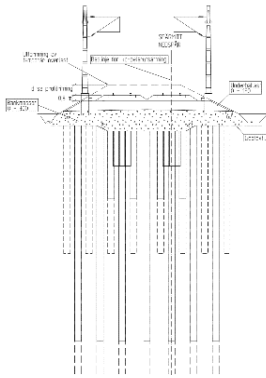


Tillförlitligare sättningsprognoser vid grundläggning med kalkcementpelare



Torbjörn Edstam

Skanska Sverige AB
Teknik

2017

FÖRORD OCH SAMMANFATTNING

Det aktuella projektet påbörjades år 2011 med det övergripande syftet att utveckla en tillförlitligare och mer nyanserad beräkningsmetodik avseende sättningsutvecklingen för väg- och järnvägsbankar grundlagda på kalkcementpelare.

Inledningsvis identifierades och instrumenterades ett antal mätsektioner längs järnvägen NorgeVänerbanan och fyrfältsvägen E45 mellan Göteborg och Trollhättan. Sedan dess har uppföljningsmätningar utförts vid ett antal tillfällen, samtidigt som tillgänglig information rörande grundförhållandena samt väg- och järnvägsbankarnas utformning och grundförstärkning i läget för mätsektionerna samlats in i regi av Trafikverket.

Hittills har inte uppmätts några tydliga ”mönster” och/eller uppenbart avtagande sättningshastigheter. Det bedöms att det erfordras en betydligt längre mätperiod än vad som kan anses vara rimligt inom ramen för det aktuella projektet för att erhålla detta och därmed möjliggöra tillförlitliga analyser och välgrundade slutsatser. Projektet slutredovisas därför i form av föreliggande rapport i vilken kortfattat redogörs för de byggnadstekniska förhållandena vid de olika mätsektionerna samt redovisas resultaten från sättningsmätningarna. Rapporten avslutas med en övergripande analys och diskussion.

Till detta dokument bifogas filen ”Tillförlitligare sättningsprognoser vid grundläggning med kalkcementpelare.zip”, vilken i sin tur innehåller kataloger och filer i vilka återfinns insamlad ”rådata” avseende de byggnadstekniska förhållandena samt mätresultaten. Därmed möjliggörs/underlättas för kommande uppföljningsmätningar och analyser inom ramen för framtida projekt med fokus på denna fråga.

Projektet har genomförts av en arbetsgrupp som, förutom undertecknad, utgjorts av följande personer:

- Anders Hallingberg, Trafikverket
- Jan Ekström, Trafikverket
- Johannes Tornborg, Skanska Sverige AB.
- Peter Jansson, ÅF

Till projektet har varit kopplat en referensgrupp enligt följande:

- Claes Alén, Chalmers tekniska högskola
- Glenn Ehlde, Skanska Grundläggning
- Mats Karlsson, Chalmers tekniska högskola
- Per-Evert Bengtsson, Statens geotekniska institut (numera egen verksamhet)
- Peter Carlsten, Trafikverket

Projektet har finansierats av SBUF (diariennr. 12527) och Trafikverket (diariennr. TRV 2011/27111).

Ett stort tack riktas till samtliga ovannämnda personer och finansiärer. Dessutom riktas ett varmt tack till Fredhy Hansen och Lennart Hedström Skanska Sverige AB som installerat mätutrustningen samt till Ingemar Forsgren, Ingefors Geoteknik AB installerat mätutrustningen och utfört mätningarna.

Göteborg i november 2017
Torbjörn Edstam

INNEHÅLL

1	INLEDNING.....	3
1.1	Bakgrund.....	3
1.2	Syfte och genomförande	3
2	STORA VIKEN.....	5
3	TPL NÖDINGE.....	9
4	TROLLEVIK	12
5	TPL NOL	16
6	TPL LÖDÖSE	19
7	ÖVERGRIPANDE ANALYS OCH DISKUSSION	22
7.1	Inledning	22
7.2	Stora Viken	22
7.3	Tpl Nödinge	22
7.4	Trollevik	23
7.5	Tpl Nol.....	23
7.6	Tpl Lödöse	23
7.7	Diskussion.....	23
7.8	En tänkbar metodik för att uppnå tillförlitligare sättningsprognoser vid grundläggning med kalkcementpelare	28
8	REFERENSER.....	30

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Utbyggnaden av dubbelspår för järnvägen NorgeVänerbanan och fyrfältsvägen E45 mellan Göteborg och Trollhättan (projekt "BanaVäg i Väst") utfördes under åren 2004-2012 och omfattar en sträcka på ca 75 km.

Inom stora delar projektet utgörs undergrunden av mäktiga lager med lös och sättningSkänslig lera, vilket medfört behov av omfattande förstärkningsåtgärder i form av kalkcementpelare. Inom stora delar av projektet är dock lerdjupen så stora att kalkcementpelarna ej kunnat installeras till "fast botten", dvs pelarna är "svävande" i leran.

I samband med förprojekteringen för Projekt Bana Väg i Väst uppfördes år 2001 fyra stycken provbankar som grundlades på "svävande" kalkcementpelare. Sättningsutvecklingen i och under markytan följdes upp under ca fyra år. Provbankarna förlades i linjen för den blivande järnvägen eftersom lokala myndigheter och intresseorganisationer ej accepterade någon annan placering. Därför var det nödvändigt att riva provbankarna i samband med järnvägsutbyggnaden, trots att endast delar av den förväntade sättningen då hunnit utbildats.

De generella erfarenheterna från uppföljningen av provbankarna är att sättningen (kompressionen) till stor del är koncentrerad till kalkcementpelarnas allra översta delar, till den övergångszon som utgörs av pelarnas underkant samt till den underliggande oförstärkta lerans övre delar.

Utgående från ovannämnda erfarenheter utvecklades ett projektanpassat produktions- och kontrollförfarande samt utvecklats projektanpassade beräkningsmetoder avseende sättningsutvecklingen med tiden vid grundläggning på kalkcementpelare. Dessa principer tillämpades vid den efterföljande bygghandlingsprojekteringen. Fördjupade analyser, i regi av Chalmers och Statens geotekniska institut (SGI), resulterade i att en mer generell beräkningsmetod tog fram i ett senare skede, se Alén et al (2006).

1.2 Syfte och genomförande

Det aktuella projektet påbörjades år 2011 med det övergripande syftet att vidareutveckla ovannämnda sättningsberäkningsmetodik, så att den blir tillförlitligare och mer nyanserad avseende sättningsutvecklingen för väg- och järnvägsbankar grundlagda på kalkcementpelare.

I inledningen av det aktuella projektet identifierades ett antal potentiella "mätsektioner" längs Bana Väg i Väst, varav nio sektioner slutligen valdes ut, se Figur 1. Några sektioner (Tpl Nödinge och Tpl Nol) hade instrumenterats tidigare, i regi av Trafikverket, medan övriga sektioner instrumenterades inom ramen för det aktuella projektet.

Sedan dess har uppföljningsmätningar utförts vid ett antal tillfällen samtidigt som tillgänglig information rörande grundförhållandena samt väg- och järnvägsbankarnas utformning och grundförstärkning i läget för mätsektionerna samlats in i regi av Trafikverket. Efter några år (år 2013) konstaterades att mätningarna dittills inte uppvisat tillräckligt tydliga "mönster" och/eller en uppenbart avtagande sättningshastighet. Därför beslutades att förlänga projektet med några år

med förhoppningen om att tydligare ”mönster” skulle utbildas samtidigt som sättningshastigheten skulle uppvisa en påtaglig minskning. Så har dock inte blivit fallet och det bedöms att det erfordras en betydligt längre mätperiod än vad som kan anses vara rimligt inom ramen för det aktuella projektet för att erhålla detta och därmed möjliggöra tillförlitliga analyser och välgrundade slutsatser.

Denna slutrapport är därför i huvudsak en ”faktarapport” i vilken kortfattat redogörs för de byggnadstekniska förhållandena vid de olika mätsektionerna samt redovisas resultaten från sättningsmätningarna. Rapporten avslutas med några övergripande kommentarer och slutsatser. Till detta dokument bifogas filen ”Tillförlitligare sättningsprognoser vid grundläggning med kalkcementpelare.zip”, vilken i sin tur innehåller kataloger och filer i vilka återfinns mer detaljerat underlag avseende de byggnadstekniska förhållandena samt mätresultaten. Därmed möjliggörs och underlättas för kommande uppföljningsmätningar och analyser inom ramen för framtida projekt med fokus på denna fråga.



Figur 1. Ungefärligt läge för mätsektionerna.

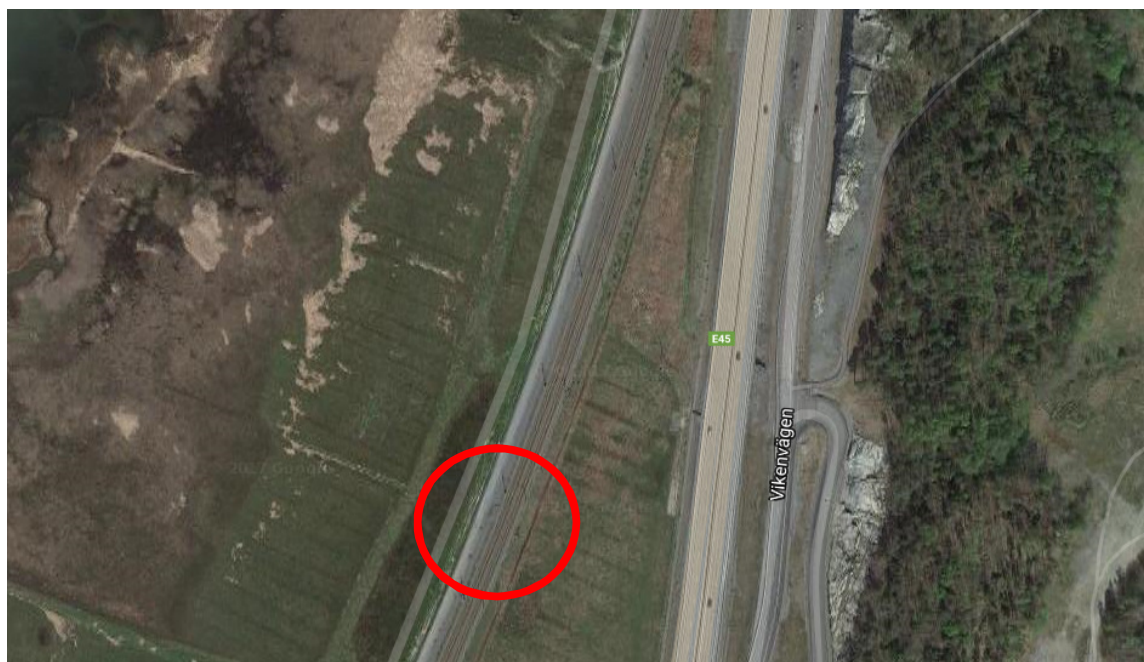
2 Stora Viken

Mätsektionen är belägen i järnvägsbankens i km 457+940. Som framgår av fotona i Figur 2 till Figur 4 passerar järnvägen en strandäng mellan väg E45 och Göta älv med järnvägsbankens överyta förlagd ca 2 m ovan omgivande naturliga markyta. Undergrunden utgörs överst av ett tunt lager med torrskorpelera och därunder lös lera till ca 28 m djup.

Järnvägsbanken uppfördes våren 2008 och är grundlagd på kalkcementpelare med varierande längd (ca 5-23 m) och varierande installationsmönster ("stegar" mht hög hastighetsfenomen och singulära pelare mht sättningar). Samtliga pelare är "svävande", dvs de når ej ned till underkant lera.

Instrumenteringen utgörs av en bälgslang som installerades genom den befintliga järnvägsbanken och ned till friktionsjorden under leran i inledningen av det aktuella projektet, i juni 2011 i samband med ett inplanerat "spårstopp", se fotot i Figur 5.

Bälgslangen har mätts vid totalt fem tillfällen, i samband med "tågstopp" och/eller tidpunkter med låg trafikintensitet. Den uppmätta sättningens variation med djupet vid varje mättillfälle redovisas i Figur 6 tillsammans med en tvärsnitt i vilken framgår den projekterade längden på kalkcementpelarna. Den uppmätta sättningens variation med tiden för olika djup redovisas i Figur 7.



Figur 2. Satellitfoto visande ungefärligt läge för mätsektionen i Stora Viken (foto: Google Maps).



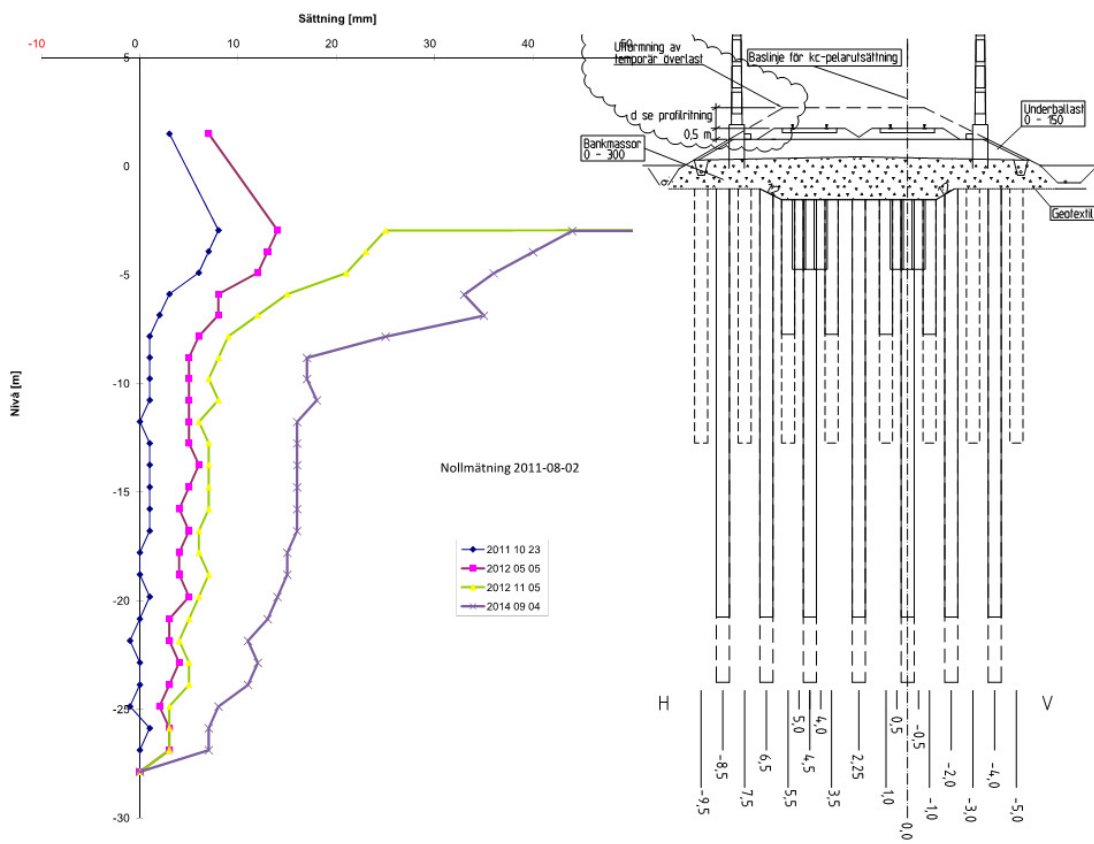
Figur 3. Markfoto visande topografin och ungefärligt läge för mätsektionen i Stora Viken (foto: Google Maps).



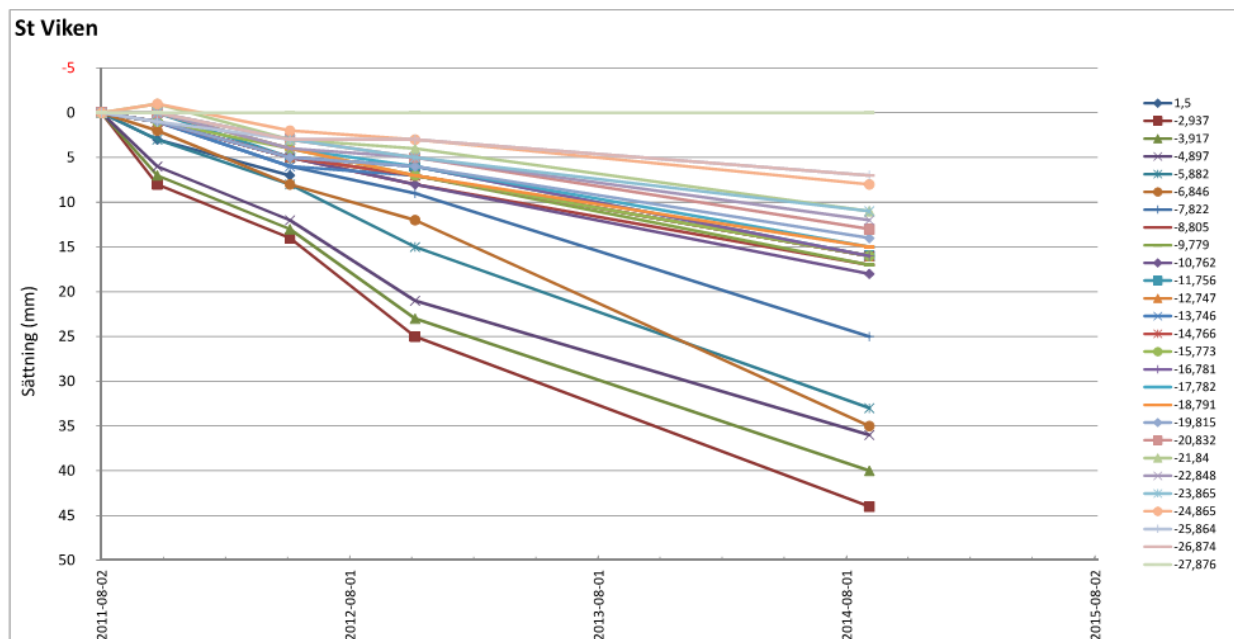
Figur 4. Foto visande topografin i läget för mätsektionen i Stora Viken.



Figur 5. Foto visande överkanten på bälgslangen i Stora Viken.



Figur 6. Uppmätt sättningsvariation med djupet i Stora Viken samt projekterad utformning på kalkcementpelarna under järnvägsbanken.



Figur 7. Uppmätt sättningsvariation med tiden i Stora Viken.

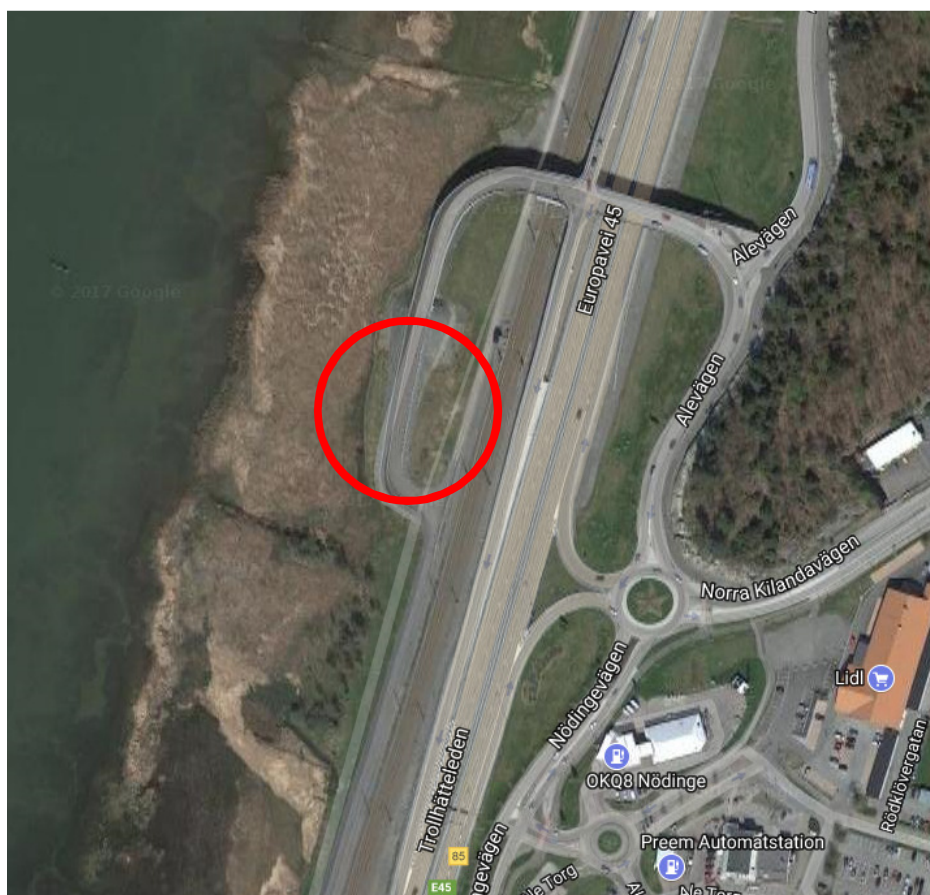
3 Tpl Nödinge

Mätsektionerna är belägna i den västra, ca 2-3 m höga, tillfartsbanken tillhörande bron som ingår i Tpl Nödinge, se Figur 8. Innan byggnationen utgjordes området av en strandäng mellan väg E45 och Göta älv. Undergrunden utgörs överst av ett tunt lager med torrskorpelera och därunder lös lera till ca 13-15 m djup.

I läget för mätsektionerna är tillfartsbanken grundlagd på kalkcementpelare med kvadratisk installationsmönster (c/c 1,5 m i södra sektionen och c/c 0,75 m i norra sektionen). Ungefär varannan pelare är installerad till underkant lera medan övriga pelare är ca 10 m långa (således "svävande").

Instrumenteringen utgörs av en bälgslang i två olika sektioner vilka installerades i samband med byggnationen av påfartsbanken hösten 2008, således några år innan det aktuella projektet påbörjades. Bäckslangarna är placerade i gc-banan och skyddade av dexlar, se Figur 9.

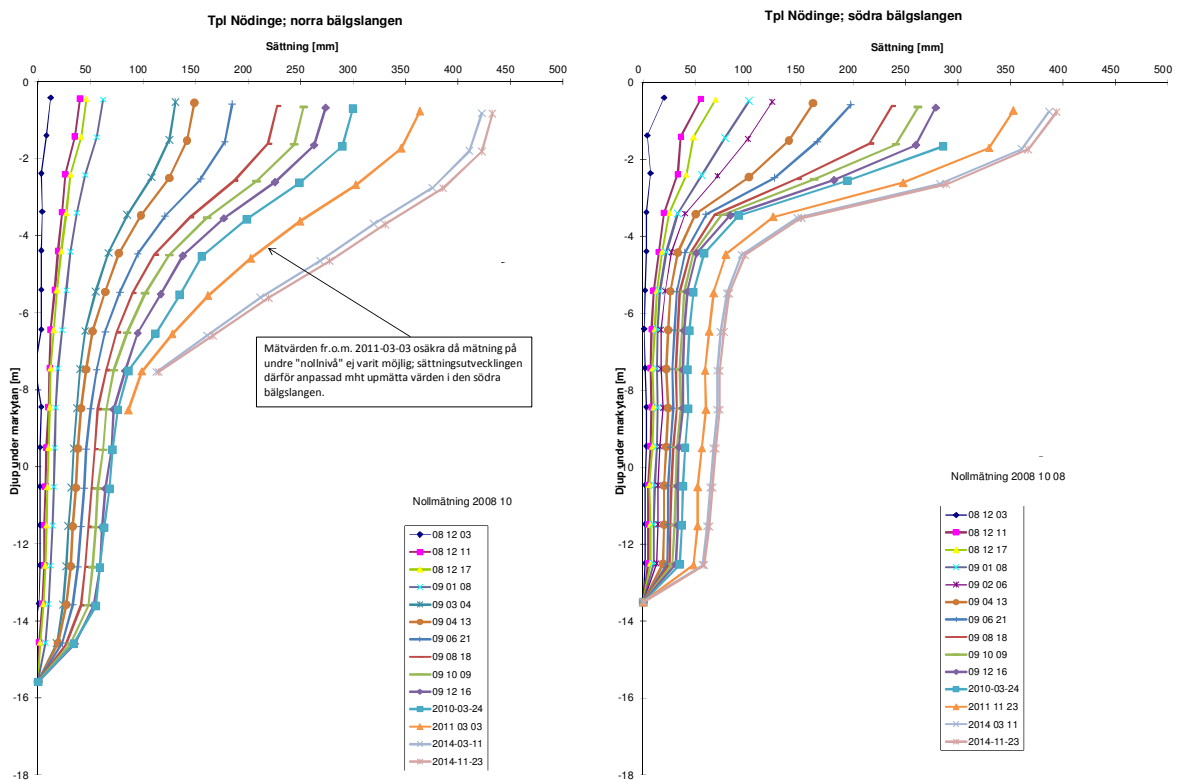
Bäckslangarna har mätts vid 15 olika tillfällen, varav de senare inom ramen för det aktuella projektet. Den uppmätta sättningen i redovisas i Figur 10 och Figur 11.



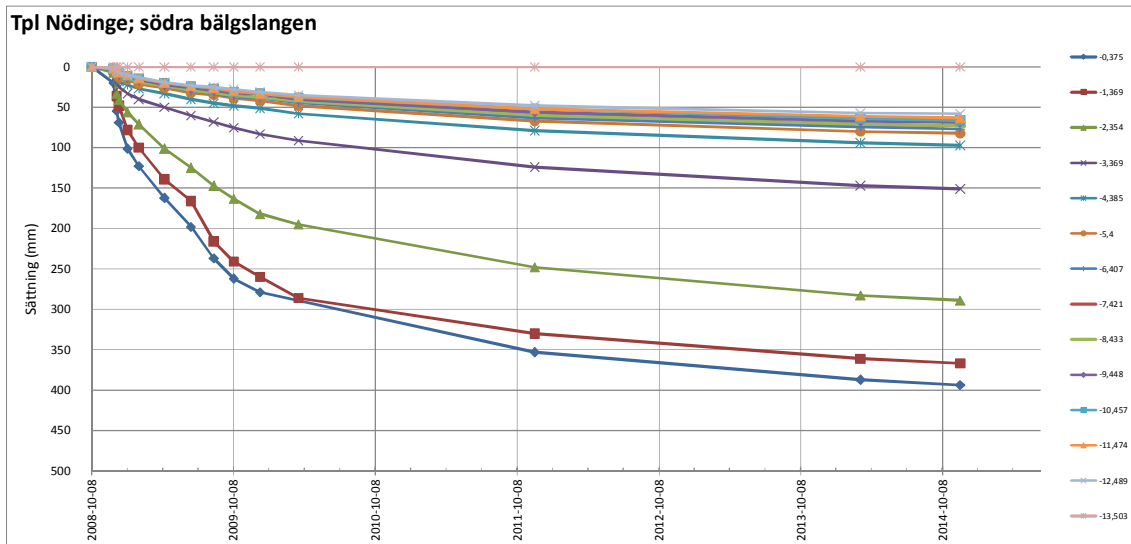
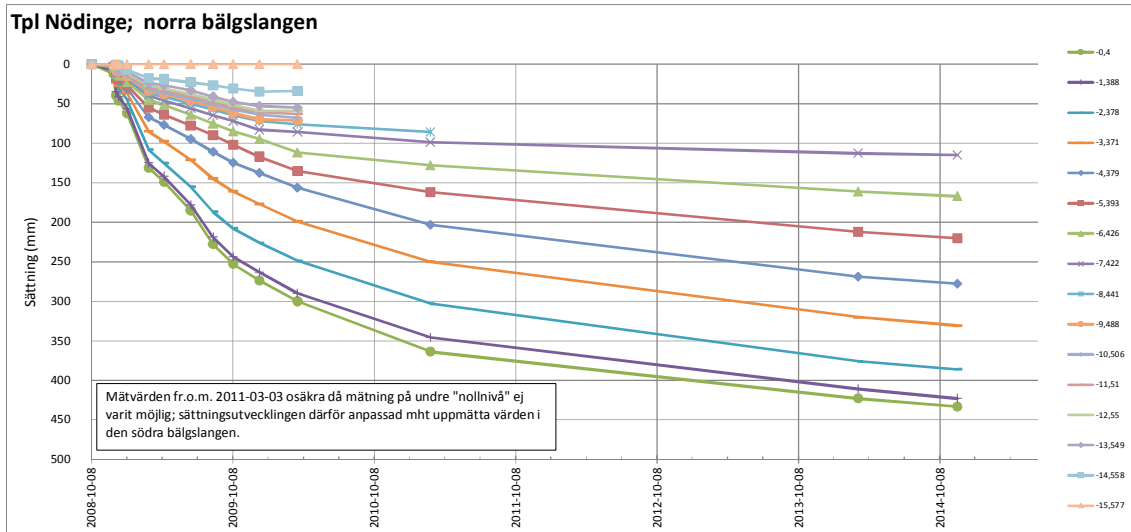
Figur 8. Satellitfoto visande ungefärligt läge för mätsektionerna i Tpl Nödinge (foto: Google Maps).



Figur 9. Markfoto visande påfartsrampen i Tpl Nödinge samt dextrarna som skyddar de två bäglslangarna.



Figur 10. Uppmätt sättningsvariation med djupet i Tpl Nödinge.



Figur 11. Uppmätt sättningsvariation med tiden i Tpl Nödinge.

4 Trollevik

Mätsektionerna är belägna i järnvägsbankens i km 455+390 respektive 455+480. Som framgår av foton i Figur 12 och Figur 13 passerar järnvägen en strandäng mellan väg E45 och Göta älv med järnvägsbankens överyta förlagd ca 2 m ovan omgivande naturliga markyta. Undergrunden utgörs överst av ett tunt lager med torrskorpelera och därunder lös lera till ca 29 m djup.

Järnvägsbanken uppfördes våren 2008 och är grundlagd på kalkcementpelare med varierande längd (ca 6-23 m) och varierande installationsmönster ("stegar" mht hög hastighetsfenomen och singulära pelare mht sättningar). Samtliga pelare är "svävande", dvs de når ej ned till underkant lera.

Instrumenteringen utgörs av en bälgslang per mätsektion vilka installerades genom den befintliga järnvägsbanken och ned till friktionsjorden under leran i inledningen av det aktuella projektet, i juni 2011 i samband med ett inplanerat "spårstopp", se foton i Figur 14 och Figur 15.

Bälgslangen har mätts vid totalt fem tillfällen, i samband med "tågstopp" och/eller tidpunkter med låg trafikintensitet. Den uppmätta sättningen i redovisas i Figur 16 och Figur 17.



Figur 12. Satellitfoto visande ungefärligt läge för mätsektionerna i Trollevik (foto: Google Maps).



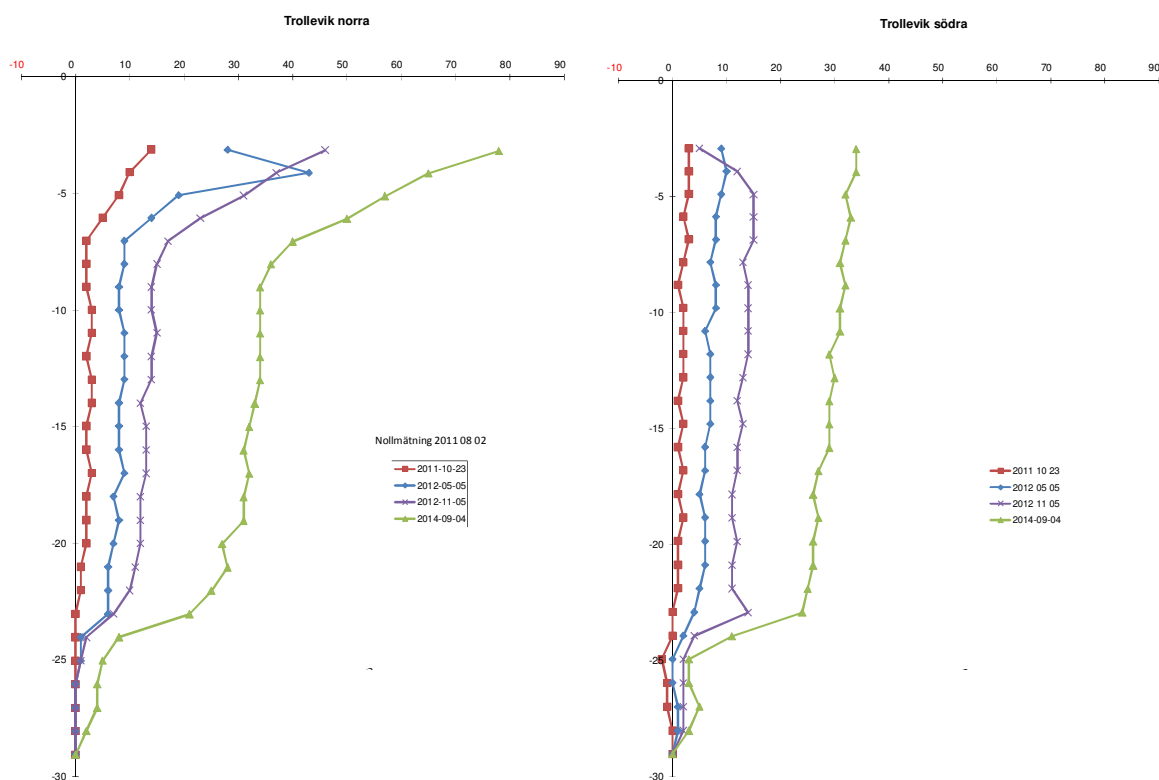
Figur 13. Markfoto visande ungefärligt läge för mätsektionerna i Trollevik (foto: Google Maps).



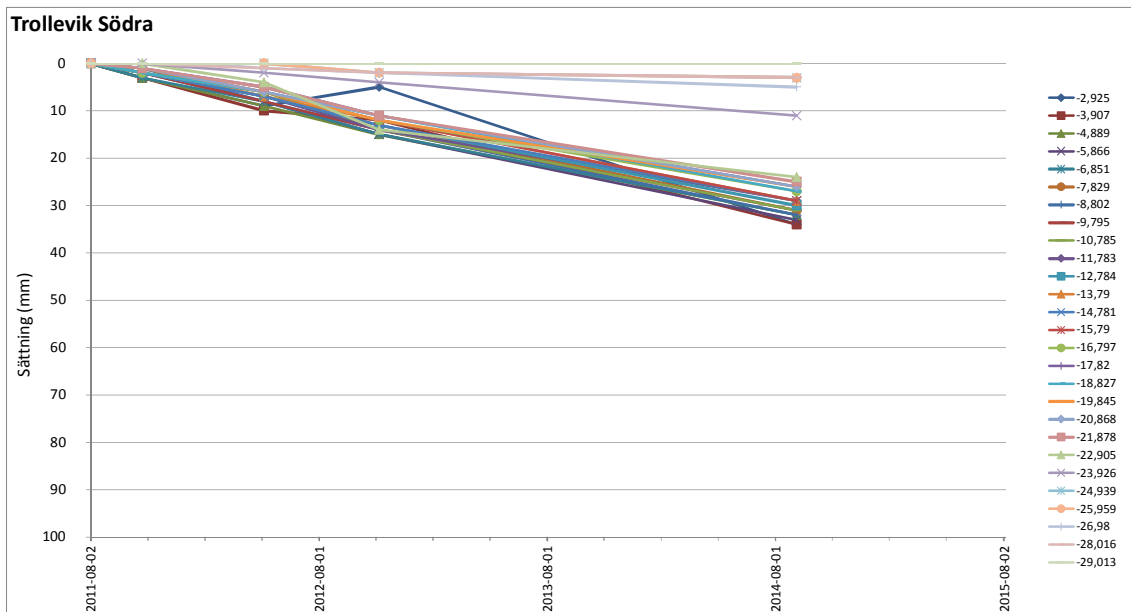
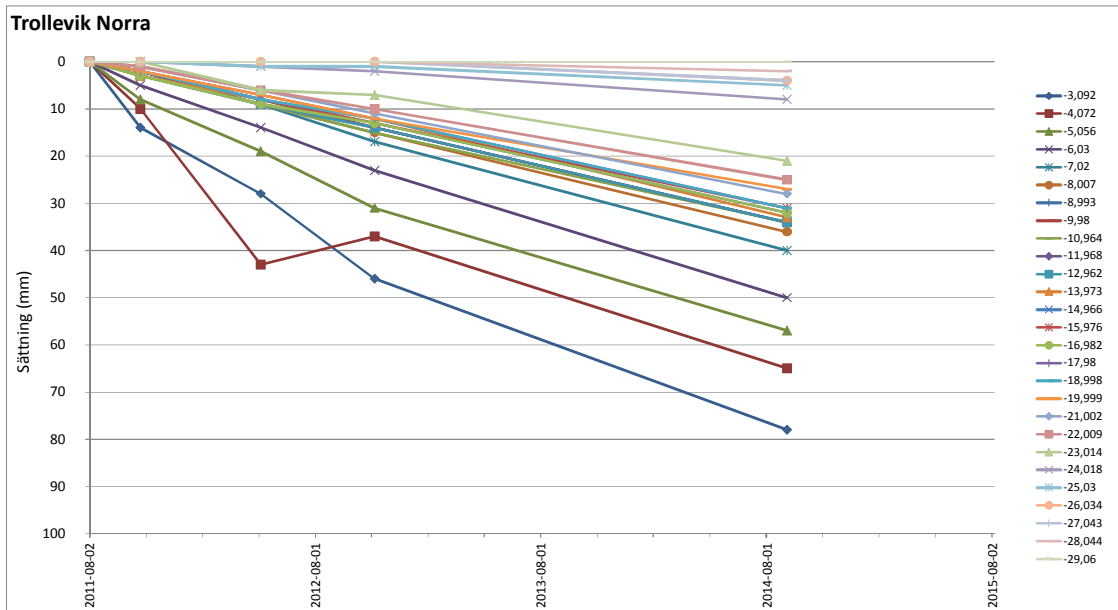
Figur 14. Foto visande topografin i läget för mätsektionen i Stora Viken samt borrhingsarbetet i samband med installationen av den södra bälgslangen i Trollevik.



Figur 15. Foto visande överkanten på den norra bälgslangen i Trollevik.



Figur 16. Uppmätt sättningvariation med djupet i Trollevik



Figur 17. Uppmätt sättningsvariation med tiden i Trollevik.

5 Tpl Nol

Mätsektionen är belägen i västra, ca 2-3 m höga, tillfartsbanken tillhörande bron som ingår i Tpl Nol, se Figur 18. Innan byggnationen utgjordes området av en strandäng mellan väg E45 och Göta älv. Undergrunden utgörs överst av ett tunt lager med torrskorpelera och därunder lös lera till ca 35-39 m djup.

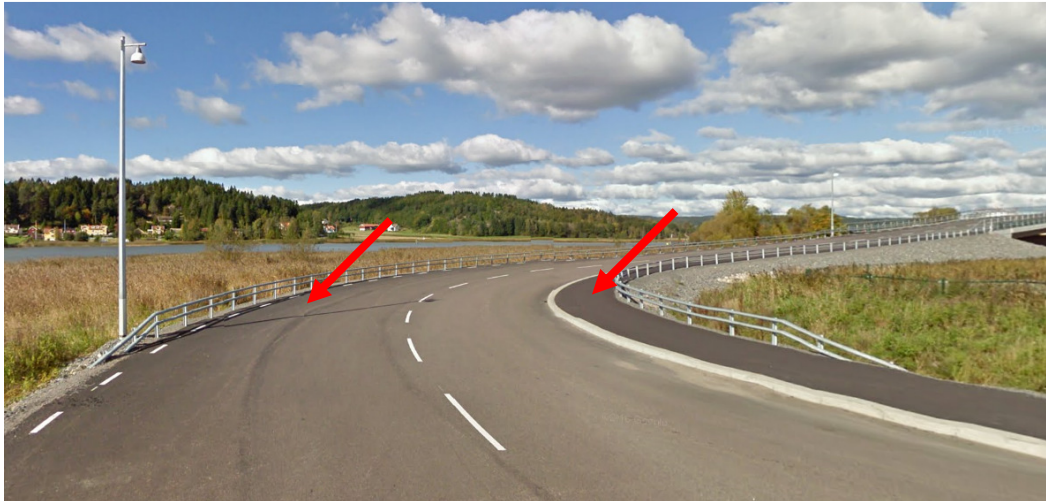
I läget för mätsektionerna är tillfartsbanken grundlagd på kalkcementpelare till ca 22 m djup (således "svävande") med kvadriskt installationsmönster (c/c 1,5 m).

Instrumenteringen utgörs av en bälgslang i vardera kanten av mätsektionen vilka installerades i samband med byggnationen av påfartsbanken hösten 2008, således några år innan det aktuella projektet påbörjades. Bälgslangarna är placerade i gc-banan respektive i ena kanten av körbanan och skyddade av dexlar, se Figur 19.

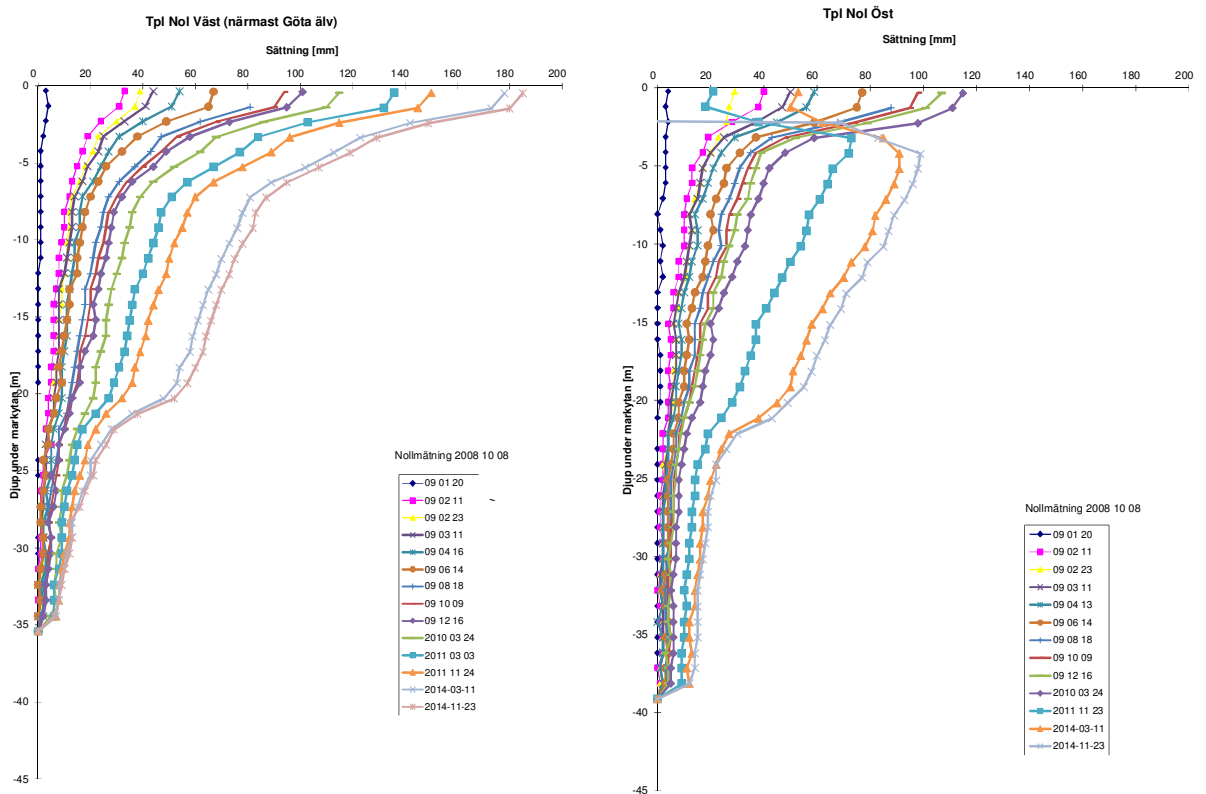
Bälgslangarna har mätts vid 15 olika tillfällen, varav de senare inom ramen för det aktuella projektet. Den uppmätta sättningen i redovisas i Figur 20 och Figur 21.



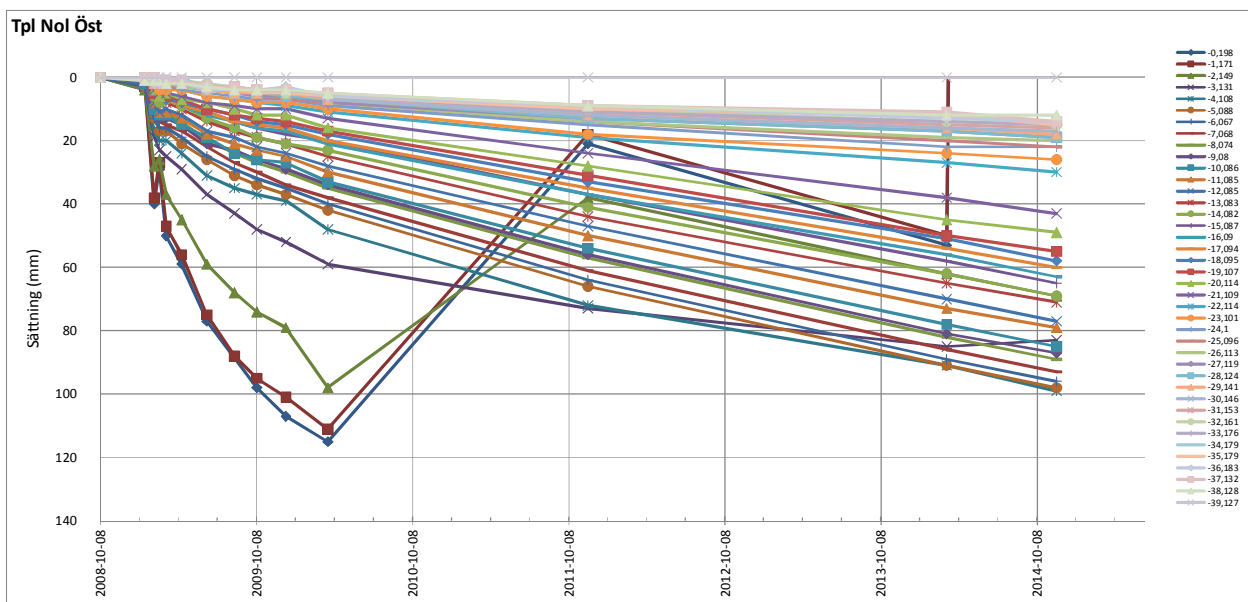
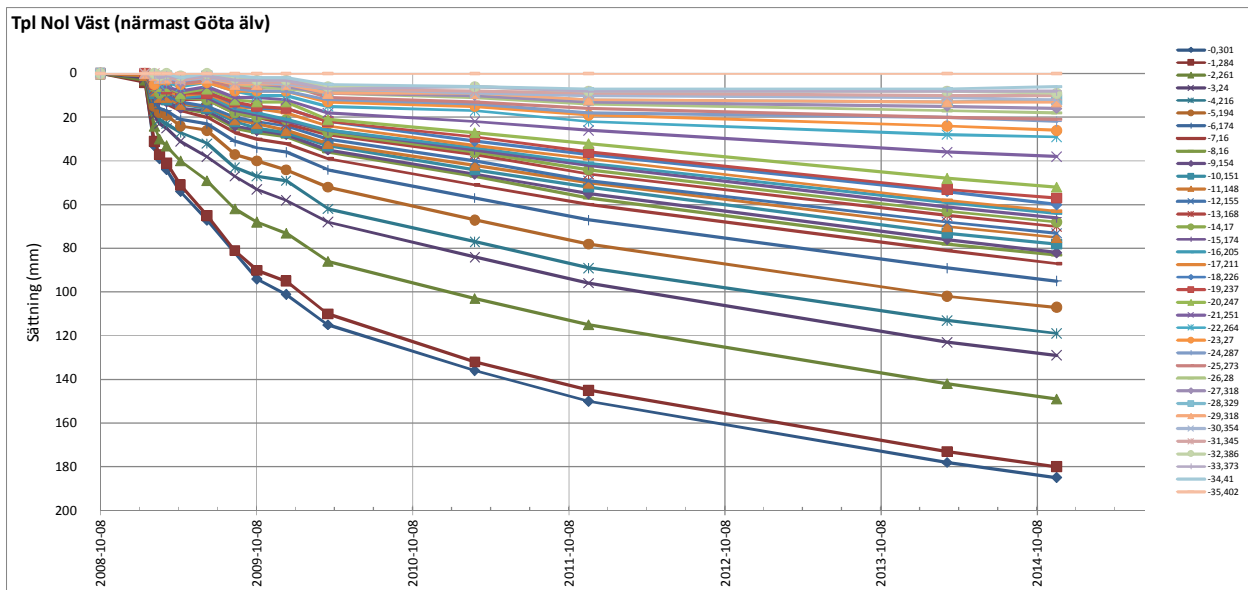
Figur 18. Satellitfoto visande ungefärligt läge för mätsektionerna i Tpl Nol (foto: Google Maps).



Figur 19. Markfoto visande påfartsrampen i Tpl Nol samt läget för dexlarna som skyddar de två bälgslangarna.



Figur 20. Uppmätt sättningsvariation med djupet i Tpl Nol.



Figur 21. Uppmätt sättningsvariation med tiden i Tpl Nol.

6 Tpl Lödöse

Mätsektionerna är belägna i västra tillfartsbanken tillhörande bron som ingår i Tpl Lödöse, se Figur 22 och Figur 23. Innan byggnationen utgjordes området i huvudsak av åkermark. Undergrunden utgörs överst av ett tunt lager med torrskorpelera och därunder lös och högsensitiv lera till ca 18-23 m djup.

I läget för mätsektionerna är tillfartsbanken grundlagd på kalkcementpelare installerade i ett mönster som utgör en kombination av skivor (vinkelrätt vägbanken) och singulära pelare. Samtliga pelare är "svävande" och med underkanten förlagd ca 6-8 m ovan underkant lera.

Instrumenteringen utgörs av en bälgslang i två olika sektioner vilka installerades i samband med byggnationen av påfartsbanken hösten 2011 inom ramen för det aktuella projektet. Bälgslangarna är placerade i gc-banan på norra sidan av vägbanken och är skyddade av dexlar.

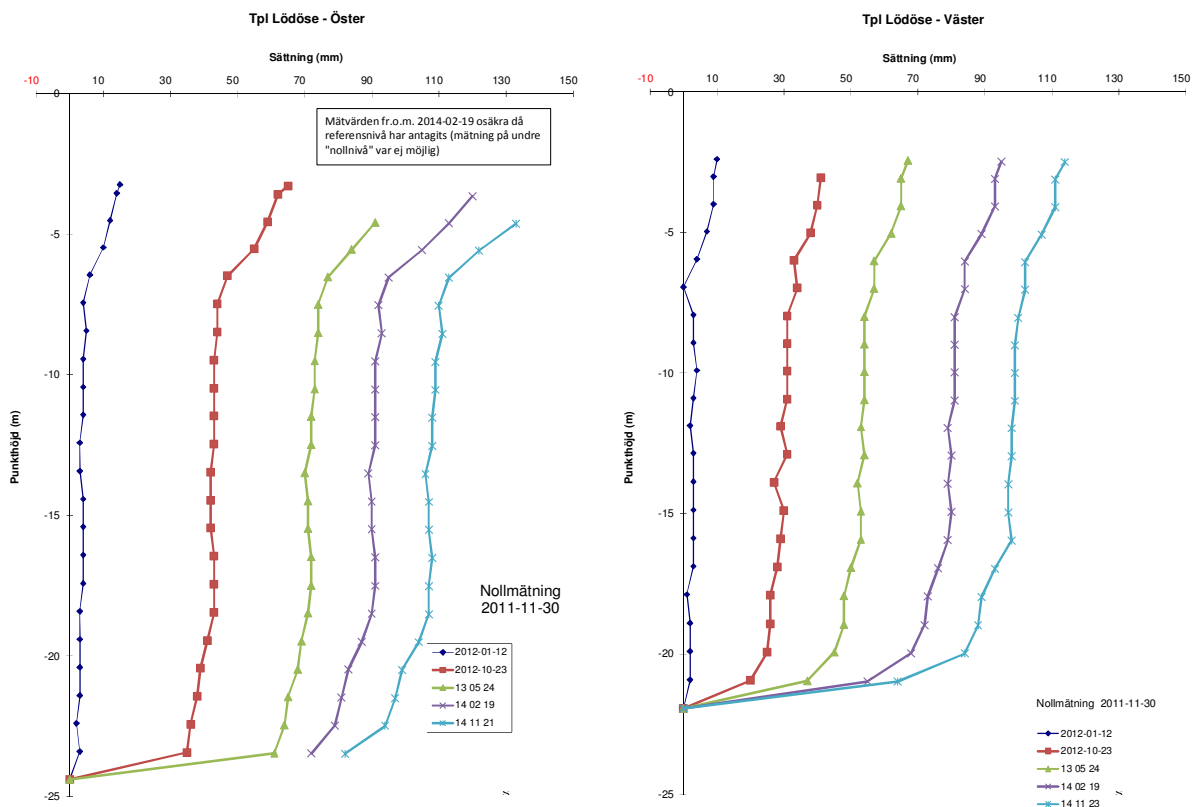
Bälgslangarna har mätts vid fem olika tillfällen. Den uppmätta sättningen redovisas i Figur 24 och Figur 25. Som framgår domineras den uppmätta sättningen av kompressionen i lerlagrets undre del. Därför avvägdes vägöverytan i december 2013, varvid konstaterades att den på detta sätt uppmätta sättningen stämde väl med uppmätt sättning i bälgslangens övre del.



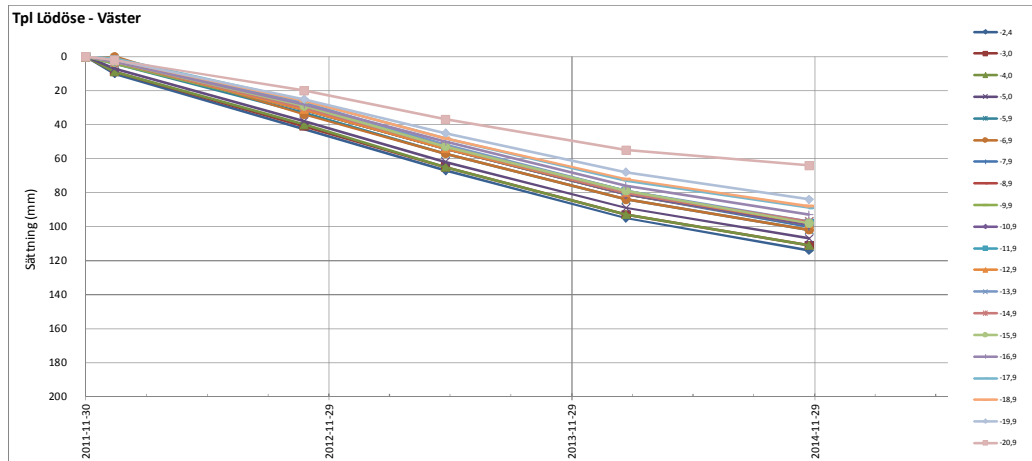
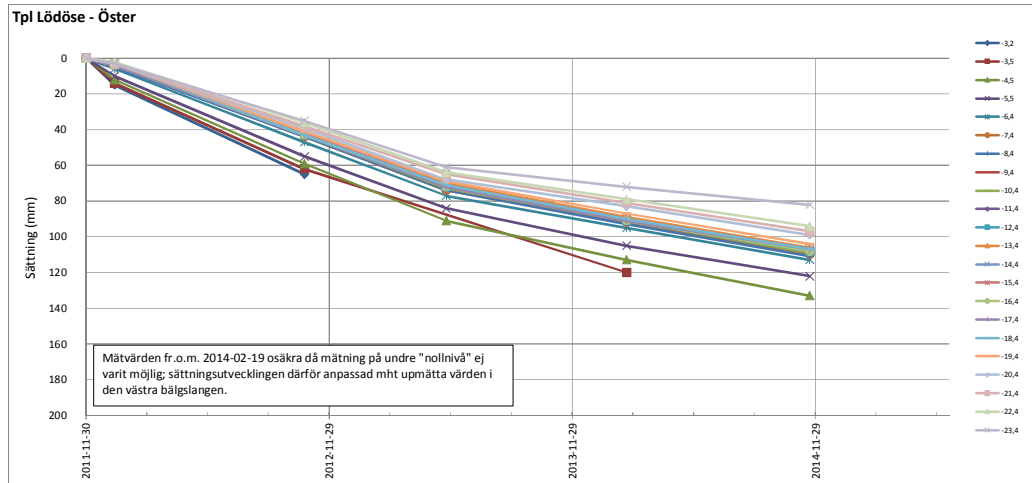
Figur 22. Satellitfoto visande ungefärligt läge för mätsektionerna i Tpl Lödöse (foto: Google Maps).



Figur 23. Markfoto visande topografin och ungefärligt läge för mätsektionerna i Tpl Lödöse (foto: Google Maps).



Figur 24. Uppmätt sättningsvariation med djupet i Tpl Lödöse.



Figur 25. Uppmätt sättningsvariation med tiden i Tpl Lödöse.

7 Övergripande analys och diskussion

7.1 Inledning

Den hittills uppmätta sättningen i respektive mätsektion redovisas i Avsnitten 2-6. Som framgår skiljer sig mätresultaten åt påtagligt mellan de olika mätsektionerna när det gäller såväl sättningarnas storlek som deras variation med tiden och djupet.

Inledningsvis bör noteras att det enbart är i Tpl Nödinge, Tpl Nol och Tpl Lödöse som sättningsförloppet kunnat följas från start. I övriga mätsektioner har bälgslangarna installerats ca 3 år efter påförd pålastning. Vidare syns i flertalet bälgslangar en tendens till en ”knäck” i sättnings/djup-kurvan mellan de 1-3 nedersta mätnivåerna, dvs i gränsen mellan lera och underliggande friktionsjord. Detta är speciellt påtagligt i Tpl Lödöse, men som framgår i Avsnitt 6 är det inte uppenbart att detta beror på något instrument- eller mätfel.

Hittills uppmätt sättning i markytan varierar mellan som minst ca 4 cm (Trollevik södra) och som mest ca 45 cm (Tpl Nödinge norra). I flertalet fall syns ännu ingen tydligt avtagande sättningshastighet med tiden, vilket gör det svårt att i dagsläget analysera mätningarna och att dra några välgrundade slutsatser. Nedan kommenteras dock mätresultaten kortfattat samt diskuteras några möjliga orsaker till den uppmätta responsen. Avslutningsvis redogörs för ett tänkbart tillvägagångssätt för bättre prognostisering av kalkcementpelarförstärkta väg- och järnvägsbankars sättning.

7.2 Stora Viken

I Stora Viken når kalkcementpelarna inte ned till fast botten. Vid det senaste mättillfället, ca 6 år efter byggnationen av järnvägsbanken, var den uppmätta sättningshastigheten ca 10 mm/år i de övre delarna. I nivå med underkanten av de längsta kalkcementpelarna var sättningshastigheten ca 4 mm/år. Sättningshastigheten uppvisar ingen tydligt avtagande tendens med tiden.

7.3 Tpl Nödinge

Den klart största sättningen har uppmätts i Tpl Nödinge, dvs i de mätsektioner där kalkcementpelarna når ned till fast botten. Ungefär 1 år efter påförd belastning hade ca 25-30 cm sättning utbildats, vilket är betydligt mer än vad som uppmättes under motsvarande tidsperiod vid den ”provbänk Nödinge” som tidigare var förlagd några hundra meter söder om de aktuella mätsektionerna, se Alén et al (2006). Sättningsvariationen med djupet antyder dock att pelarnas kvalitet varit bristfällig i dess övre delar, men orsaken till detta är ej klarlagd. Vid det senaste mättillfället, ca 6 år efter byggnationen av vägbanken, var den uppmätta sättningshastigheten ca 10 mm/år i de övre delarna. Sättningshastigheten uppvisar ingen tydligt avtagande tendens med tiden under de senaste åren.

7.4 Trollevik

I Trollevik når kalkcementpelarna inte ned till fast botten. Vid det senaste mättillfället, ca 6 år efter byggnationen av järnvägbanken, var den uppmätta sättningshastigheten ca 12-18 mm/år i de övre delarna. I nivå med underkanten av de längsta kalkcementpelarna var sättningshastigheten ca 6-8 mm/år. Sättningshastigheten uppvisar ingen tydligt avtagande tendens med tiden.

7.5 Tpl Nol

I Tpl Nol når kalkcementpelarna inte ned till fast botten. Ungefär 1 år efter påförd belastning hade ca 10-12 cm sättning utbildats, vilket är betydligt mindre än vad som uppmättes i Tpl Nödige vid motsvarande tidpunkt. Sättningsvariationen med djupet antyder att pelarnas kvalitet i dess övre delar är bättre än i Tpl Nödige. Vid det senaste mättillfället, ca 6 år efter byggnationen av vägbanken, var den uppmätta sättningshastigheten ca 10 mm/år i de övre delarna. I nivå med underkanten av de längsta kalkcementpelarna var sättningshastigheten ca 4 mm/år. Sättningshastigheten uppvisar ingen tydligt avtagande tendens med tiden under de senaste åren.

7.6 Tpl Lödöse

I Tpl Lödöse når kalkcementpelarna inte ned till fast botten. Ungefär 1 år efter påförd belastning hade ca 5-6 cm sättning utbildats, vilket är betydligt mindre än vad som uppmättes i såväl Tpl Nödige som i Tpl Nol vid motsvarande tidpunkt. Sättningsvariationen med djupet antyder att pelarnas kvalitet i dess övre delar är bättre än i såväl Tpl Nödige som i Tpl Nol. Vid det senaste mättillfället, ca 3 år efter byggnationen av vägbanken, var den uppmätta sättningshastigheten ca 25-30 mm/år i såväl de övre delarna som i nivå med underkanten av de längsta kalkcementpelarna. Möjligen uppvisar sättningshastigheten en avtagande tendens med tiden, vilket i så fall är rimligt mht sättningsutvecklingen med tiden i Tpl Nol och Tpl Nödige.

7.7 Diskussion

Den uppmätta kompressionen och därmed sättningen i de övre delarna av det kalkcementpelarförstärkta lerlagret varierar mycket påtagligt mellan mätsektionerna, vilket sannolikt avspeglar kalkcementpelarnas varierande kvalitet inom denna zon. Detta fenomen beskrivs även i Alén et al (2008) och berörs i Trafikverket (2016).

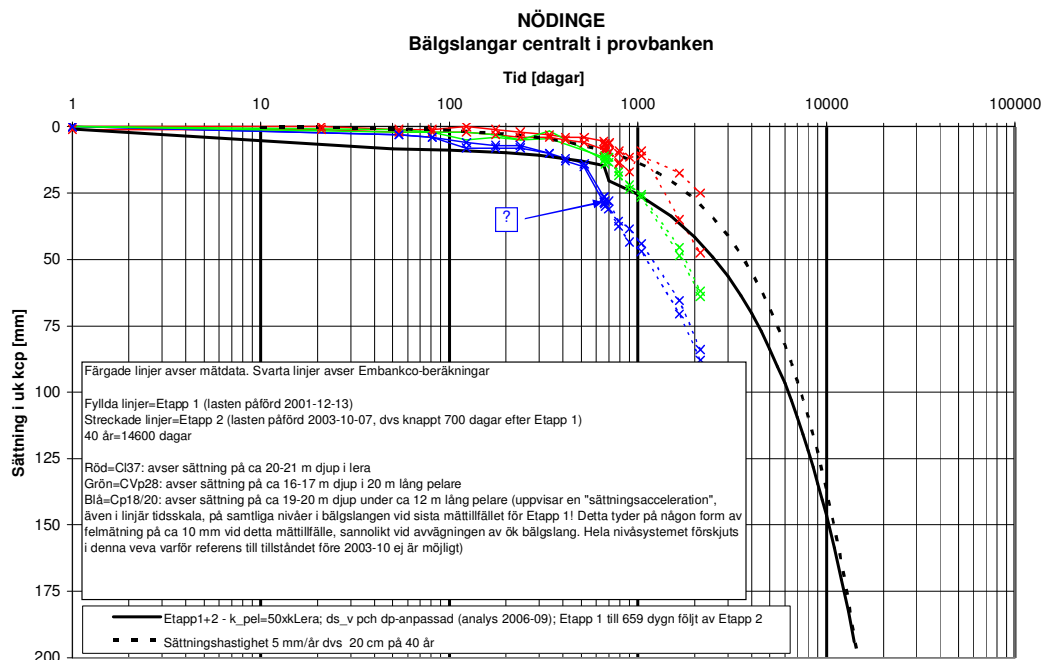
En bit ned i det kalkcementpelarförstärkta lerlagret är den uppmätta kompressionen betydligt mindre än i de övre delarna och dessutom relativt oförändrad med tiden. Även detta är i överensstämmelse med de mätresultat som redovisas i Alén et al (2008).

I de mätsektioner där kalkcementpelarna inte når ned till fast botten uppgår sättningshastigheten till i huvudsak ca 4-8 mm/år i nivå med underkanten av de längsta kalkcementpelarna. I Tpl Lödöse är motsvarande värde dock ca 25-30 mm/år, men detta kan bero på att den senaste/sista mätningen utfördes ca 3 år efter bankuppfyllnaden (vilket är efter betydligt kortare tid än i övriga mätsektioner) och dessutom förefaller det ologiskt/orimligt att kompressionen är så koncentrerad till lerlagrets underkant. De mätresultat som redovisas i Alén et al (2006) avseende provbankarna i Nödige och Surte (grundlagda på kalkcementpelare som ej når fast botten) har även analyserats vid flera tillfällen av författaren till nu aktuell rapport och som framgår i Edstam

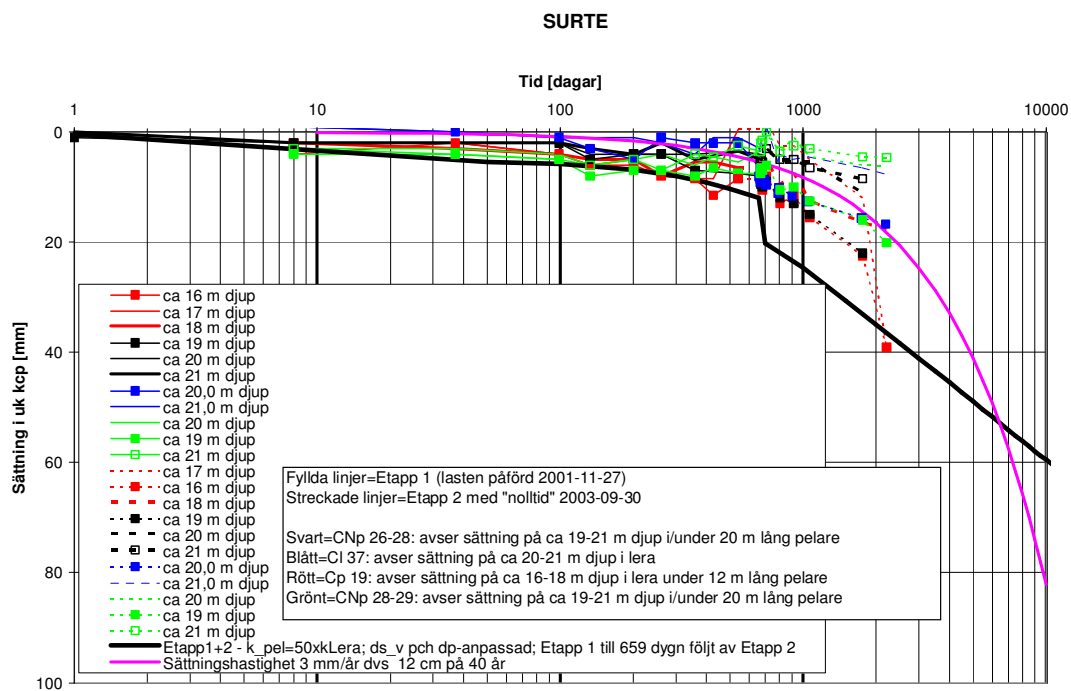
(2008) uppgår den bedömda genomsnittliga sättningshastigheten i nivå med underkanten av kalkcementpelarna till ca 3-5 mm/år, se Figur 26 och Figur 27, dvs ungefär i paritet med tidigare nämnda värden – undantaget Tpl Lödöse.

I samtliga ovannämnda fall har designfilosofin varit att pelarna skall utformas så att tillskottsspänningen i leran under pelarna inte skall överstiga ca 80 % av lerans förkonsolideringstryck för att på detta sätt minimera/begränsa framtida konsolideringssättningar i leran under pelarna. Den uppmätta sättningshastigheten i nivå med underkant pelare skiljer sig förvisso åt en del mellan mätsektionerna. Dessa värden kan dock ställas i relation till de uppmätta sättningarna för kohesionspålade byggnadsverk. Inom delar av Göteborg har uppförts såväl flera höga byggnader (ca 6 till 22 våningar) som broar som grundlagts på kohesionspålar (ca 30 m till 85 m långa). I vissa fall har sättningsutveckling med tiden följts upp och redovisats (Claesson et al, 2007 samt Trafikverket, 2013 och 2015). Den uppmätta sättningshastigheten i nivå med överkant påle varierar mellan ca 1 och 7 mm/år och förefaller efter några år bli relativt konstant med tiden, se Figur 28 och Figur 29. Delar av denna sättningshastighet beror på den successiva kompressionen av pålarna i takt med att ”nyttolasten” och eventuella påhängslaster förs längre ned i pålarna till följd av konsolidering i leran ovanför pålarnas ”neutrala lager”. På basis av de mätningar som redovisas av Claesson et al (2007), bedöms denna kompression uppgå till 1 å 2 mm/år, vilket innebär att sättningen i nivå med pålarnas underkant bör uppgå till 0-5 mm/år. Även i dessa fall har designfilosofin varit att tillskottsspänningen i leran inte skall överstiga ca 80 % av lerans förkonsolideringstryck, men såväl sättningshastigheten som dess skillnad mellan ”mätsektionerna” är i paritet med vad som uppmätts för de tidigare berörda kalkcementpelargrundlagda väg- och järnvägsbankarna. Denna ”prognostiseringsosäkerhet” kan bero på att de verkliga konsolideringsförhållandena avviker ifrån de bedömda och/eller att de nyttjade beräkningsmodellerna inte är tillräckligt nyanserade när det gäller beskrivningen av lerans och/eller kalkcementpelarnas/pålarnas verkliga respons. Även osäkerheter/felaktigheter kopplade till sättningsmätningarna kan naturligtvis bidra till variationen.

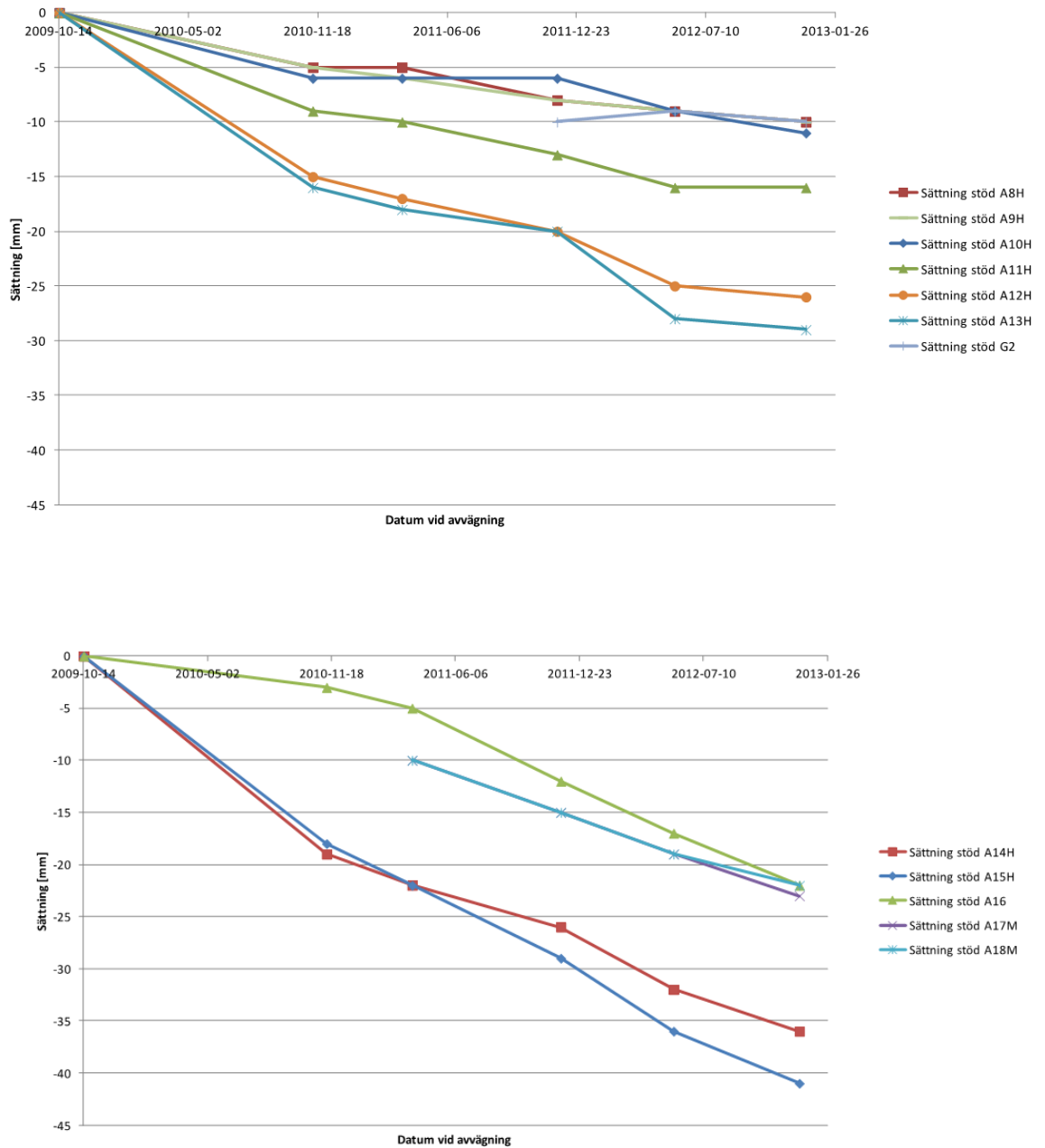
Det bedöms att det erfordras en betydligt längre mätperiod än vad som kan anses vara rimligt inom ramen för det aktuella projektet för att kunna klargöra orsakerna till ovannämnda ”prognostiseringsosäkerhet” och därefter utveckla en metodik som möjliggör tillförlitligare sättningsprognoser vid grundläggning med kalkcementpelare. I det efterföljande avsnittet beskrivs dock kortfattat vad en sådan metodik åtminstone bör innefatta.



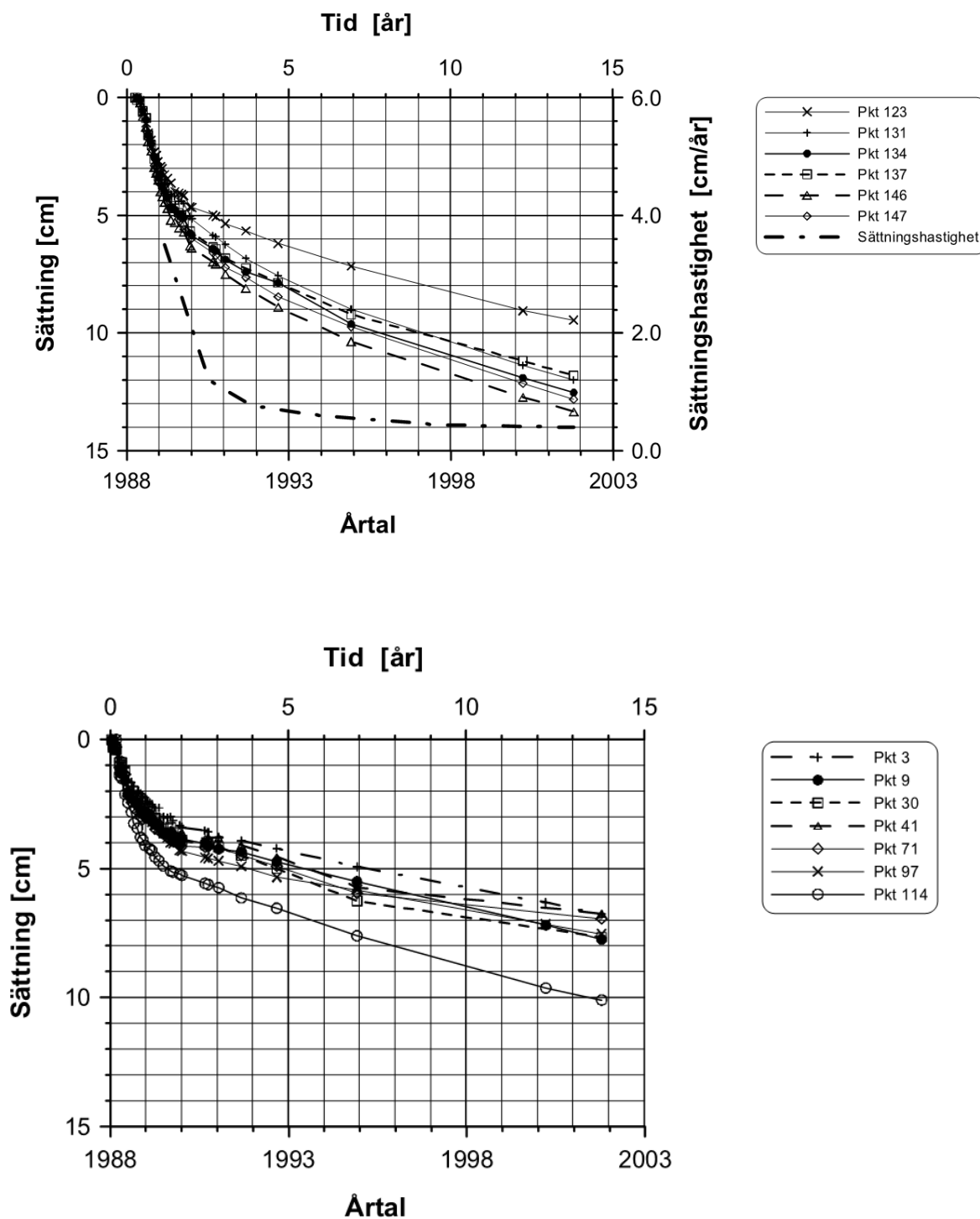
Figur 26. Uppmätt sättningsvariation med tiden i nivå med underkant kalkcementpelarna vid provbank Nödinge (från Edstam, 2008).



Figur 27. Uppmätt sättningsvariation med tiden i nivå med underkant kalkcementpelarna vid provbank Surte (från Edstam, 2008).



Figur 28. Uppmätt sättningsvariation med tiden för Partihallsbron i Göteborg (från Trafikverket, 2013). Övre figuren avser brostöden på Marieholm; Undre figuren avser brostöden öster om Säveån.



Figur 29. Uppmätt sättningsvariation med tiden för höghuset Lilla Bommen, vilket färdigställdes 1989 (från Claesson et al, 2007). Övre figuren avser höghusdelen (22 våningar); Undre figuren avser låghusdelen (6 våningar).

7.8 En tänkbar metodik för att uppnå tillförlitligare sättningsprognoser vid grundläggning med kalkcementpelare

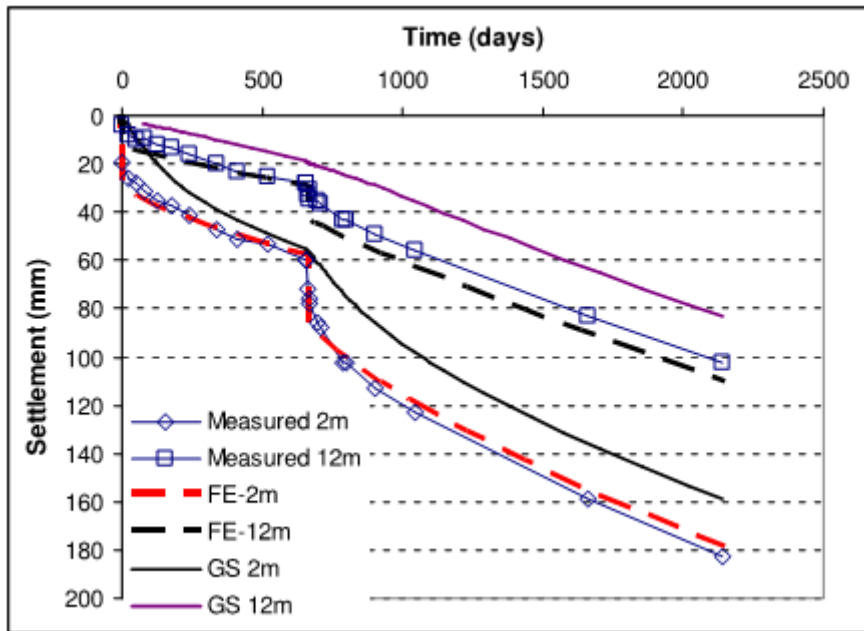
Som framgår av tidigare avsnitt domineras sättningsutvecklingen inledningsvis av kompressionen i kalkcementpelarnas övre del. På några års sikt är det dock kompressionen i leran under kalkcementpelarna som dominerar sättningsutvecklingen.

Den stora kompressionen (och/eller variationen av denna kompression) i pelarnas övre del beror på att maskinutrustningen inte alltid förmår att anpassa tillverkningsprocessen så att en jämn och god pelarkvalitet erhålls ända upp till markytan. Med dagens kontrollmetoder avseende pelarkvaliteten bedöms att detta bidrag till ”totalsättningen” inte är möjligt att prognostisera men någon större precision. I de fall där minimering av sättningarnas storlek är av stor betydelse bör förbelastning (eventuellt i kombination med temporär överlast) och/eller massutskiftning till någon/några meters djup tillgripas för att på så sätt begränsa detta presumtiva ”sättningsbidrag”.

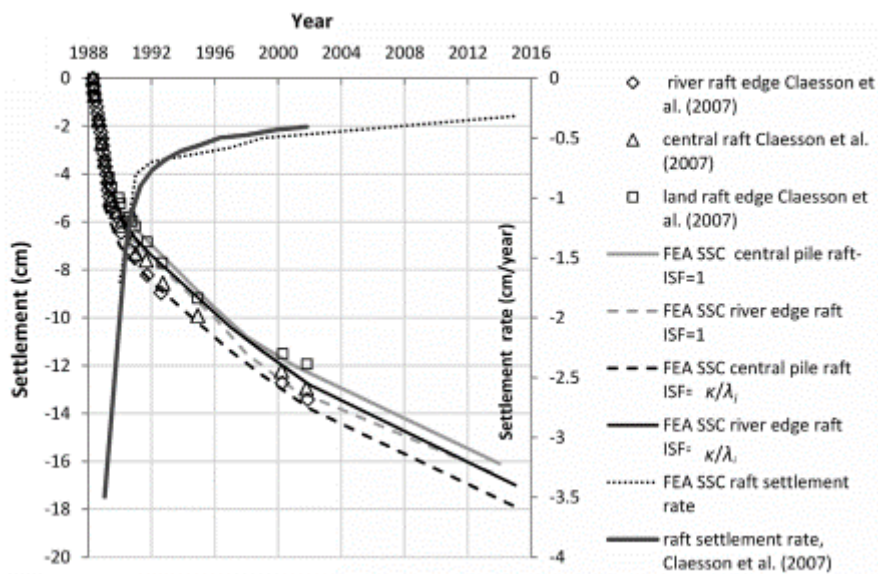
För prognostisering av kompressionen/sättningsutvecklingen i leran under kalkcementpelarna bör det vara möjligt att i huvudsak använda samma beräkningsmetodik som den som används vid sättningsprognoser avseende kohesionspålade byggnadsverk. Som framgår av tidigare avsnitt förefaller dock även den beräkningsmetodiken vara behäftad med en del osäkerheter. För att tillförlitligheten skall öka vid båda tillämpningarna behöver lerans respons (dess krypegenskaper) som funktion av (över)konsolideringsgraden hanteras på ett mer nyanserat sätt än traditionellt. Dessutom behöver grundläggningens betydligt högre axialstyvhet relativt omgivande jord beaktas på ett mer realistiskt sätt eftersom denna innebär att grundläggningen ”suger åt sig” mer vertikallaster än vad som annars är fallet. Detta accentueras ytterligare om det pågår konsolideringssättningar i lerans övre delar redan innan den aktuella konstruktionen har uppförts. För fallet kalkcementpelare tillkommer att man behöver beakta att dessa har högre permeabilitet än omgivande lera, se Baker (2000), vilket medför att konsolideringen påskyndas i leran.

För att kunna beakta ovannämnda aspekter erfordras finita element beräkningar (FE-beräkningar) eller motsvarande, vilket dock medvetet har avvaktats med att utföras i detta projekt i väntan på att tydliga ”sättningsmönster” hunnit utbildas. Så har dock inte blivit fallet - åtminstone inte ännu. Under senare år har finita element beräkningar utförts vid ”efteranalyser” i andra sammanhang vid grundläggning på såväl ”svävande” kalkcementpelare (Olsson, 2010) som kohesionspålar (Wood & Karstunen, 2017) och som framgår i Figur 30 och Figur 31 har en denna beräkningsmetod potentiellt hög precision.

Kalkcementpelare (liksom kohesionspålar) ger i realiteten upphov till tredimensionella (3D) belastnings- och deformationsmönster. Även detta kan beaktas med finita element beräkningar i 3D, men beräkningarna blir mycket tidskrävande – speciellt om varje enskild pelare/påle skall modelleras som ”volymelement”. För att i möjligaste mån begränsa beräkningstiden i 3D finns redan i dagsläget olika förenklade sätt (exempelvis ”linjeelement”) för att modellera enskilda pelares/pålars mekaniska samverkan med omgivande jord. Detta förefaller (preliminärt) ha nyttjats framgångsrikt vid prognostisering av kohesionspålade byggnaders sättningsutveckling, se Kullingsjö et al (2016). Såvitt känt finns i dagsläget dock inte något förenklat sätt att i 3D FE-beräkningar samtidigt beakta varje enskild kalkcementpelares mekaniska och hydrodynamiska samverkan med omgivande lera.



Figur 30. Uppmätt och beräknad sättning för "provbank Nödinge" (från Olsson, 2010).



Figur 31. Uppmätt och beräknad sättning för höghuset Lilla Bommen (från Wood & Karstunen, 2017).

8 Referenser

- Alén, C., Sällfors, G., Bengtsson, P-E., Baker, S. (2006). Provbankar Riksväg 45/Nordlänken Bankar på kalkcementpelarförstärkt jord – Beräkningsmodell för sättningar. Svensk Djupstabilisering, Rapport 15. Linköping
- Baker, S. (2000). Deformation behavior of lime/cement column stabilized clay. Doktorsavhandling. Chalmers tekniska högskola.
- Claesson, P., Holmberg, G., Romell, J. (2007). Höghus Lilla Bommen, Göteborg. Uppföljning av kohesionspålning i mäktiga lerlager. SBUF-Rapport 1034.
- Edstam, T. (2008). Geoteknisk rådgivning för Väg 45/NorgeVänernBanan, delen Angeredsbron-Älvängen. SIG, Diarienummer 2-0602-0132.
- Kullingsjö, A., Edmark, C., Oskarsson, R. (2016). Analysis of settlements in the project The South Marieholm Bridge. Nordic Geotechnical Meeting, NGM 2016, 17, Reykjavik, Iceland. Proceedings. Vol. 1.
- Olsson, M. (2010). Calculating long-term settlement in soft clays – with special focus on the Gothenburg region. Licentiatuppsats. Chalmers tekniska högskola.
- Trafikverket (2013). Förfrågningsunderlag E45 delen Lilla Bommen – Marieholm.
- Trafikverket (2015). Förfrågningsunderlag E6/E45/E20 Marieholmsförbindelsen för utförande av Marieholmstunneln (ED1).
- Trafikverket. (2016). ”Trafikverkets tekniska råd för geokonstruktioner-TR Geo 13”, Trafikverket, dokument-ID TDOK 2013:0668, version 2.0.
- Wood, T. & Karstunen, M. (2017). Modelling the creep of deep foundations in soft Gothenburg clays. European Journal of Environmental and Civil Engineering.

BILAGA A

Tid-sättningskurvor för samtliga mätsektioner inom ram en för detta projekt, där kalkcementpelarna inte når fast botten. Den inringade mätnivån avser nivån för underkanten av de längsta klackcementpelarna. Samtliga diagram har samma skala för att underlätta en visuell jämförelse mellan diagrammen.

