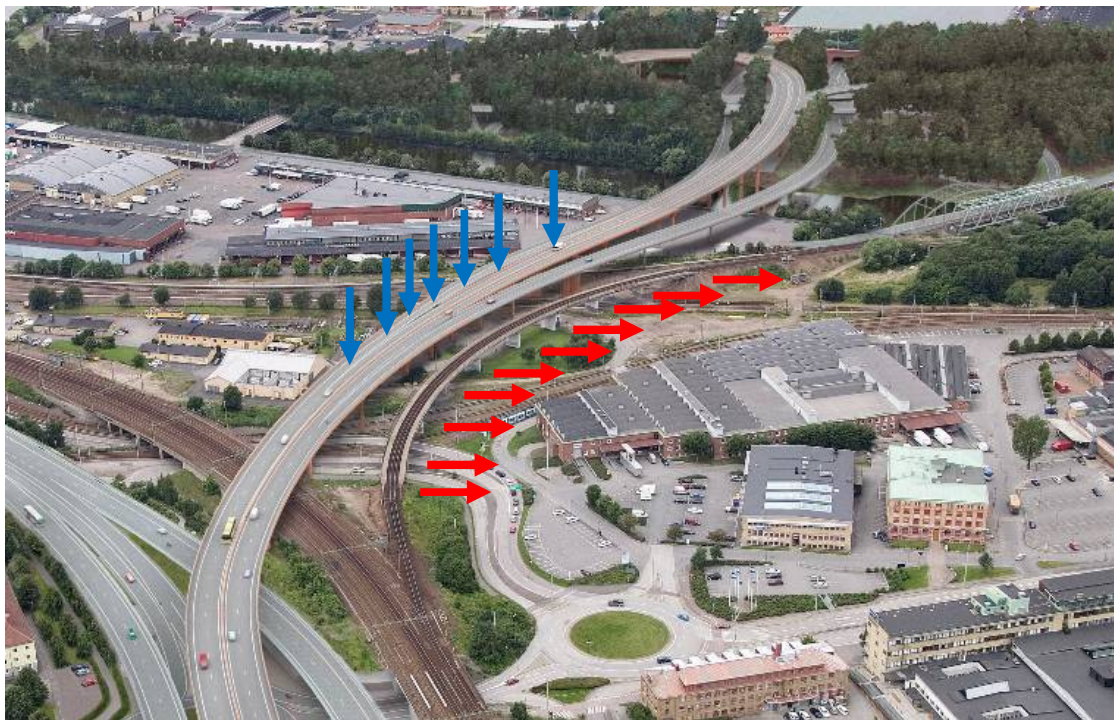


Skäranbrons rörelser vid påslagning för den närliggande Partihallsbron



Torbjörn Edstam

Skanska Sverige AB
Teknik och Projekteringsledning

2012

FÖRORD

Under perioden 2008-2011 bygger Skanska Sverige AB Partihallsförbindelsen i Göteborg av på uppdrag av Trafikverket. Huvuddelen av Partihallsförbindelsen utgörs av den ca 1,2 km långa Partihallsbron, vilken bärs upp av ett flertal brostöd. Stöden är grundlagda på ett stort antal pålar som slagits ned till stort djup i "Göteborgsleran".

Pålningens arbetena i anslutning till den befintliga järnvägsbron "Skäran" har inneburit stora utmaningar, eftersom de acceptabla pålningsinducerade rörelserna i Skäranbron är mycket små. Genom ett tätt samarbete mellan geotekniker, produktionspersonal och mättekniker har pålningen dock kunnat utföras inom ramen för beställarens och intilliggande anläggningsägares krav.

I detta SBUF-projekt har mätresultaten från ovannämnda pålningsarbeten nyttjats, varvid dessa jämförts med några alternativa prognosmetoder.

Inom ramen för SBUF-projektet har även genomförts ett examensarbete kopplat till Chalmers (Nenonen & Ruul, 2011).

Till SBUF-projektet har varit kopplat en referensgrupp enligt följande:

- Claes Alén, Chalmers
- Leif Jendeby, Trafikverket
- Tara Wood, NCC/Chalmers

Projektet har finansierats av SBUF och Skanska Sverige AB.

Ett stort tack riktas till ovannämnda finansiärer samt till referensgruppen. Dessutom riktas ett varmt tack till Anders Hansson, som varit Skanskas ansvarige geotekniker i projektet Partihallsförbindelsen, samt till examensarbetarna Paulina Nenonen och Johanna Ruul och deras handledare Anders Kullingsjö.

Göteborg i december 2011

Torbjörn Edstam

SAMMANFATTNING

Omgivningspåverkan i samband med påslagning är en företeelse som kan skapa omfattande problem, vilka inte sällan leder till långa och svåra diskussioner av ekonomisk art. Bland annat kan massundanträngningen leda till sidoförskjutningar och markhävningar som i sin tur ger rörelsepåverkan på befintliga byggnader och anläggningar. Således är det önskvärt att kunna prognostisera de förväntade markrörelserna, så att den tekniska designen kan anpassas mot de krav som ställs mht de specifika byggnadstekniska förutsättningarna.

I denna Slutrapport redovisas en studie vars syfte är att utreda hur väl olika beräkningsmetoder förmår prognostisera de pålningsinducerade effekterna i en befintlig konstruktion under komplexa förhållanden.

Studien baseras på uppföljningar utförda vid pålningsarbetena för Partihallsbron i Göteborg, varvid fokus legat på pålningsarbetet i nära anslutning till den rörelsekänsliga järnvägsbron ”Skäran”. Den sammanlagda effekten av pålningsarbetet är resultatet av pålningsarbetet i läget för ett flertal stöd, varierande grad av förborring samt den ordning i vilket pålningsarbetet bedrivits.

Tre olika beräkningsmetoder, vilka kräver relativt olika stor arbetsinsats, har nyttjats i syfte att prognostisera markrörelserna till följd av påslagningen. De ”enkla” (analytiska) beräkningsmetoderna är Sagasetta-metoden (en kontinuummekanisk metod som i ett tidigare SBUF-projekt visat lovande resultat) och Hellman/Rehman-metoden (en i huvudsak empirisk metod som är att betrakta som svensk praxis). Dessutom har finita element metoden (FEM) använts varvid utgått ifrån en metodik som utvecklats i ett tidigare SBUF-projekt.

De viktigaste slutsatserna från jämförelserna mellan fältmätningarna och de teoretiska analyserna är:

- Såväl Sagasetta-metoden som Hellman/Rehman-metoden leder till beräknade horisontalrörelser som är av samma storleksordning som de uppmätta. I huvudsak är de beräknade horisontalrörelserna i paritet med eller större än de uppmätta. Detta beror sannolikt på att ingen av beräkningsmetoderna kan beakta den ”mothållande effekt” som Skäranbron ger upphov till.
- Såväl Sagasetta-metoden som Hellman/Rehman-metoden leder till beräknade hävningar som är avsevärt större än de uppmätta. Detta torde bero på att ingen av metoderna kan beakta att Skäranbron är grundlagd på långa pålar.
- FE-analyserna leder till beräknade horisontalrörelser och hävningar som stämmer relativt väl med de uppmätta.

- Sammantaget bedöms att FE-analyser bör nyttjas för att erhålla bästa möjliga uppskattning av de pålningsinducerade markrörelserna och de därmed resulterande påkänningarna i närliggande befintliga konstruktioner. Vidare bedöms att Sagaseto-metoden och/eller Rehnman/Hellman-metoden kan användas för överslagsmässiga beräkningar, men man skall då vara medveten om att ingen av dessa överslagsmetoder kan beakta den eventuella ”mothållande effekt” som en befintlig konstruktion ger upphov till.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	5
1.1	BAKGRUND	5
1.2	SYFTE	6
1.3	GENOMFÖRANDE OCH OMFATTNING	7
2	PARTIHALLSBRON OCH SKÄRANBRON	7
2.1	INLEDNING	7
2.2	PÅLNINGSARBETEN OCH MÄTPROGRAM.....	8
2.3	FÖRBORRNING.....	9
2.4	MÄTRESULTAT	10
3	MODELLERING ENLIGT SAGASETA-METODEN	12
3.1	INLEDNING	12
3.2	SIMULERING AV FÖRBORRNING	13
3.3	SIMULERING AV LUTANDE PÅLAR.....	13
3.4	NYTTJANDE AV ”SUPERPÅLAR”	18
3.5	VALD APPROACH VID ANALYS AV SKÄRANBRON	19
4	MODELLERING ENLIGT HELLMAN/REHNMAN-METODEN.....	20
4.1	INLEDNING	20
4.2	SIMULERING AV FÖRBORRNING	21
4.3	VALD APPROACH VID ANALYS AV SKÄRANBRON	22
5	MODELLERING ENLIGT FINITA ELEMENT METODEN (FEM)	23
6	JÄMFÖRELSE MELLAN UPPMÄTT OCH BERÄKNAD RESPONS	24
6.1	RESPONS I SKÄRANBRONS STÖD 2-4 UNDER PÅLNINGSETAPP 1-4.....	24
6.2	RESPONS I SAMTLIGA STÖD EFTER AVSLUTAT PÅLNINGSARBETE.....	27
7	SLUTSATSER.....	30
	REFERENSER.....	31

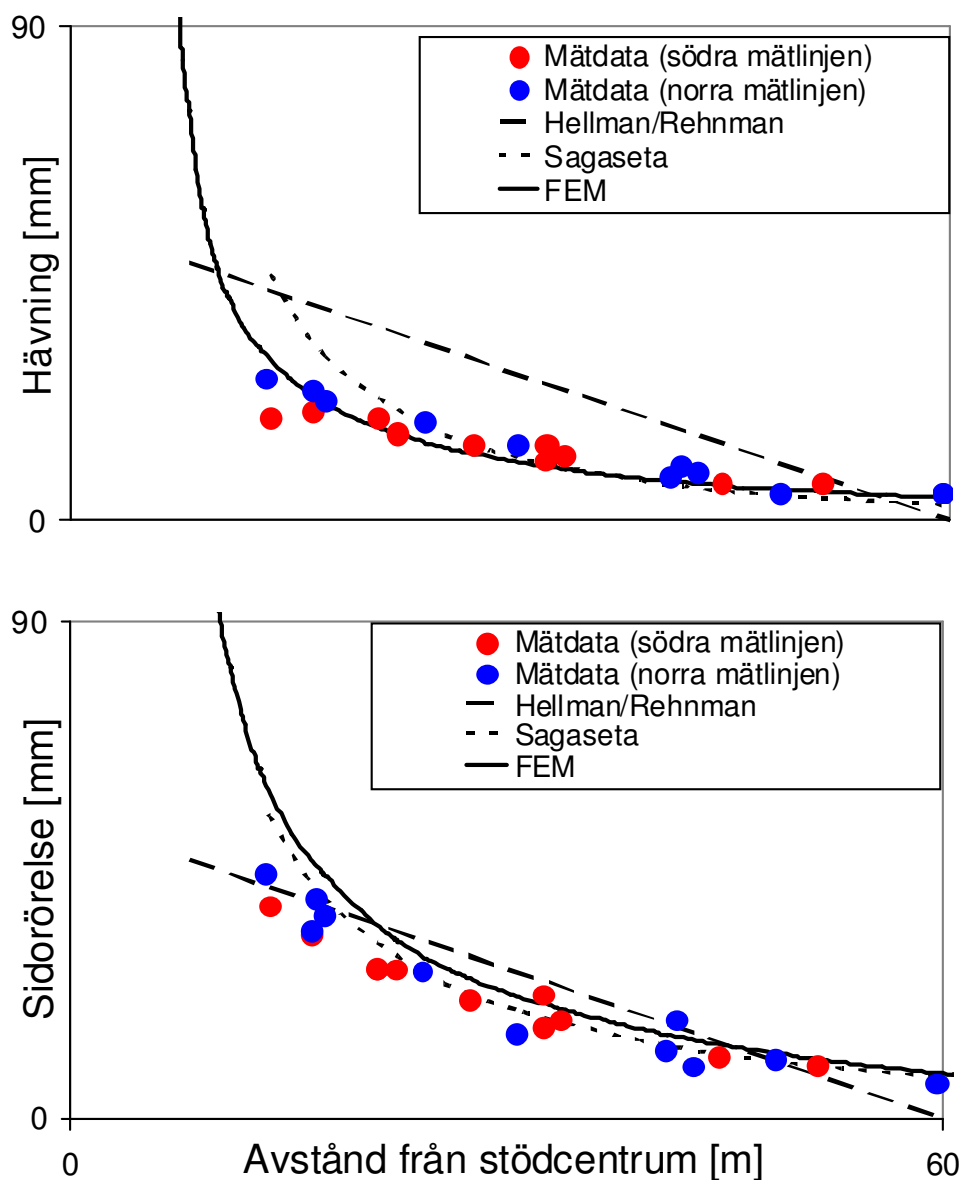
1 Inledning

1.1 Bakgrund

Omgivningspåverkan i samband med påslagning är en företeelse som kan skapa omfattande problem, vilka inte sällan leder till långa och svåra diskussioner av ekonomisk art. Bland annat kan massundanträngningen leda till sidoförskjutningar och markhävningar som i sin tur ger rörelsepåverkan på befintliga byggnader och anläggningar. Således är det önskvärt att kunna prognostisera de förväntade markrörelserna, så att den tekniska designen kan anpassas mht de krav som ställs mht de specifika byggnadstekniska förutsättningarna.

Inom ramen för det tidigare genomförda SBUF-projektet ”Massundanträngning vid påslagning i lera” (Edstam, 2011) utfördes omfattande fältmätningar och analyser i samband med påslagning för ett enskilt brostöd som valts baserat på ett antal kriterier, varav ett kriterium var att förhållandena kring det studerade brostödet skulle vara så ideala som möjligt. Det studerade brostödet, A11, ingår i Partihallsbron i Göteborg. Såväl ”enkla” (analytiska) som mer ”avancerade” (numeriska) prognosmetoder studerades. Därvid kunde det konstateras att såväl en av de ”enkla” metoderna (Sagaseta-metoden) som finita element analyser gav resultat som stämmer mycket väl med de uppmätta markrörelserna, jfr Figur 1. Den ”enkla” metod som är att anse som nuvarande svensk praxis (Hellman/Rehman-metoden) stämde dock inte lika bra med uppmätt respons.

Med hänsyn till ovannämnda erfarenheter har aktuell studie genomförts som ett led i att studera hur väl olika metoder förmår prognostisera de pålningsinducerade rörelserna vid fler väldokumenterade praktikfall med varierande grad av ökande komplexitet, jämfört med de ideala förhållanden som rådde i ovannämnda studie.



Figur 1. Exempel på uppmätta och beräknade rörelser avseende pålningen vid tidigare studerat brostöd A11.

1.2 Syfte

Syftet med denna studie är primärt att bedöma hur väl Sagaseta-modellen förmår prognostisera de pålningsinducerade rörelserna under mer komplexa förhållanden än de som rådde i den tidigare genomförda studien.

Förutom prognostisering enligt Sagaseta-modellen ingår även prognostisering enligt Hellman/Rehnman-metoden. Därmed erhålls en direkt jämförelse av hur väl de två metoderna förmår prognostisera de uppmätta rörelserna under mer komplexa förhållanden än i den tidigare studien.

Dessutom är avsikten att utvidga de mer avancerade finita element beräkningar som utförts inom ramen för den tidigare genomförda studien.

1.3 Genomförande och omfattning

Inledningsvis insamlades och sammanställdes resultaten av de rörelsemätningar på Skäranbron som utförts i samband med pålningsarbetet för Partihallsbron. Dessutom insamlades och sammanställdes protokollen avseende pålningen för relevanta stöd tillhörande Partihallsbron.

Inom ramen för ett examensarbete (Nenonen & Ruul, 2011) studerades den första delen av pålningsarbetet för Partihallsbron, varvid fokus legat på nyttjandet av finita elementmetoden (FEM), i syfte att studera Skäranbrons rörelser och påkänningarna i de pålar som Skäranbron är grundlagd på.

Dessutom har jämförts prognostiserade och uppmätta rörelser avseende slutstadiet, dvs det stadium då all pålning utförts för de av Partihallsbrons stöd som bedöms ha påverkan på Skäranbron. Härvid har såväl Sagaseto-metoden som Helleman/Rehman-metoden tillämpats.

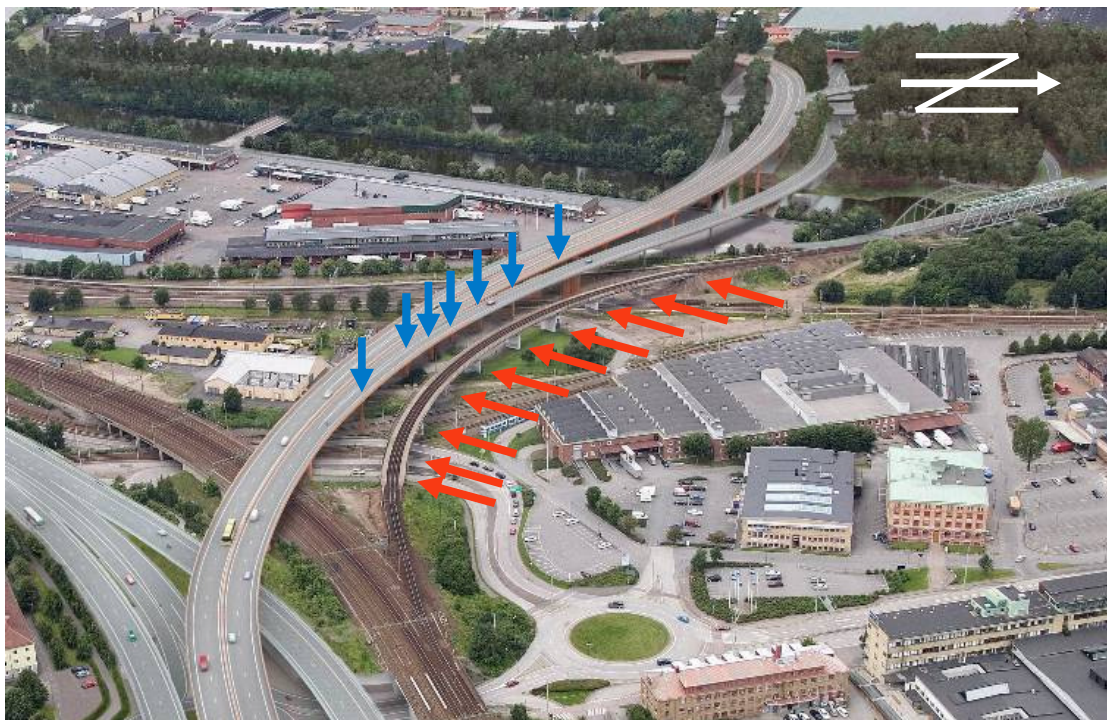
2 Partihallsbron och Skäranbron

2.1 Inledning

Partihallsbron i Göteborg utgör huvuddelen av Partihallsförbindelsen, vilken kopplar samman vägarna E20 och E45. Bron förläggs inom markområden med ca 80-100 m mäktiga lerlager. Inom dessa områden grundläggs brostöden på ca 50-80 m långa kohesionspålar. Ett flertal av dessa brostöd är förlagda i nära anslutning till den rörelsekänsliga järnvägsbron ”Skäran”, se Figur 2.

Den befintliga Skäranbron är en kontinuerlig betongbalkbro som är byggd på 1980-talet. Av brons 10 st stöd är de 6 st stöden i nordväst grundlagda på kohesionspålar medan övriga stöd är grundlagda på spetsburna pålar. Eventuell uppkomst av stora horisontella differensförskjutningar mellan Skäranbrons stöd skulle ge upphov till stora tvångskrafter i överbyggnaden varvid brons lager skulle skadas. I syfte att förhindra detta låstes lagren med en speciell anordning, se Figur 3. Låset var dimensionerad för en största tillåten relativ sidoförskjutning mellan två intilliggande brostöd uppgående till 10 mm.

Inledande prognoser av förväntade storlek på rörelserna visade att arbetet krävde noggrann styrning och kontroll för att inte förskjuta bron mer än vad som är tillåtet. Därför delades pålningsarbetet upp i ett flertal etapper, med mellanliggande förflyttning mellan etapperna, i syfte att ge bron en jämn förskjutning utefter dess längd. I syfte att minimera förskjutningarna förborrades med s.k. Augerskriv i många fall.



Figur 2. Fotomontage från öster visande den befintliga Skäranbron och dess stöd (röda pilar) samt den blivande Partihallsbron och dess stöd (blåa pilar).

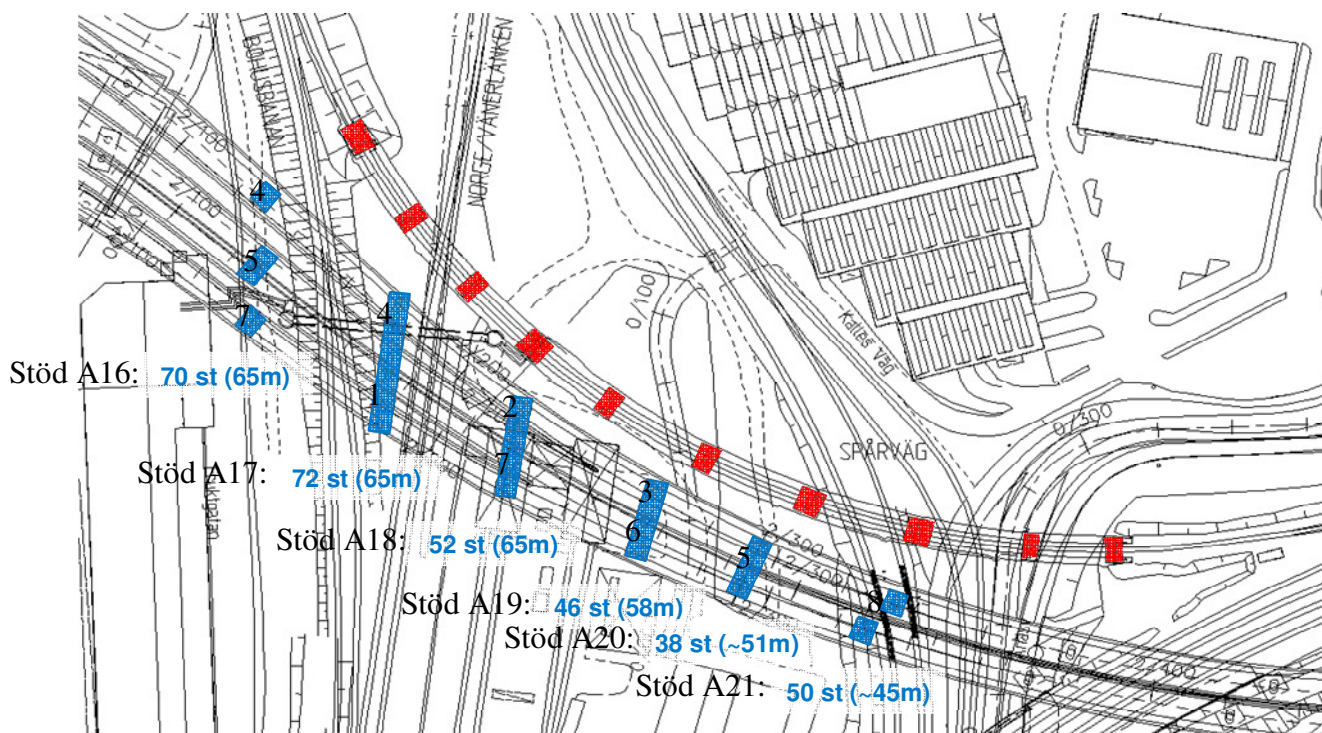


Figur 3. Anordning för låsning av Skäranbrons lager.

2.2 Pålningsarbeten och mätprogram

Det kortaste fria avståndet mellan nya och befintliga brostöd är ca 10 m. Totalt installerades ca 330 st betongpålar med tvärsnittsmåttet $275 \times 275 \text{ mm}^2$ och en längd varierande mellan 45 och 65 m i de aktuella stödlägena, se Figur 4. I figuren framgår även i vilken ordning pålningen bedrevs. Inledningsvis koncentrerades arbetet till ett stöd (del av stöd) i taget, men i senare skeden utfördes pålningen parallellt i flera stödlägen.

På Skäransbrons samtliga stöd var placerat mätprismor vilka dagligen mättes in i såväl i sidled som höjddled. Mätresultaten kontrollerades mot upprättade prognoser vilka successivt uppdaterades och användes för styrning av pålningsarbetet och förändringar av den ursprungligt upprättade arbetsordningen.



Figur 4. Installerat antal pålar och pållängder i respektive stöd (blå siffror) samt installationsordning (svarta siffror).

2.3 Förborring

Som tidigare nämnts förborrades med s.k. Augerskruv i många fall i syfte att i möjligaste mån begränsa de pålningsinducerade markrörelserna, jfr Figur 5. Borrningen utfördes till ca 10 m djup. I samband med pålning i vissa stödlägen utfördes enkla eller dubbla förborringshål för respektive påle. Dessutom utfördes förborring strax söder om några av Skäransbrons stöd, i syfte att skapa ”skyddslitsar”. Detaljerna har dock inte kunnat klargöras kring förborringens omfattning samt lerpropparnas ”effektiva volym”.

När det gäller förborringens omfattning och planläge förefaller det som att ingen förborring utfördes inför pålningen för Stöd A16. Inför pålningen för Stöd A17 Syd och A18 Norr utfördes enkel förborring för flertalet pålar, medan det inför pålningen för övriga stöd utfördes dubbel förborring för flertalet pålar.

Augerskruvens ytterdiameter uppgår till ca 320 mm. Vid förborringen fastnar en del lera mellan skären, jfr Figur 5, och det är oklart hur ofta denna lera rensas bort. Överslagsmässigt bedöms dock att innerstångens diameter (inklusive fastklibbad lera som inte rensats bort) normalt uppgår till ca 200 mm.

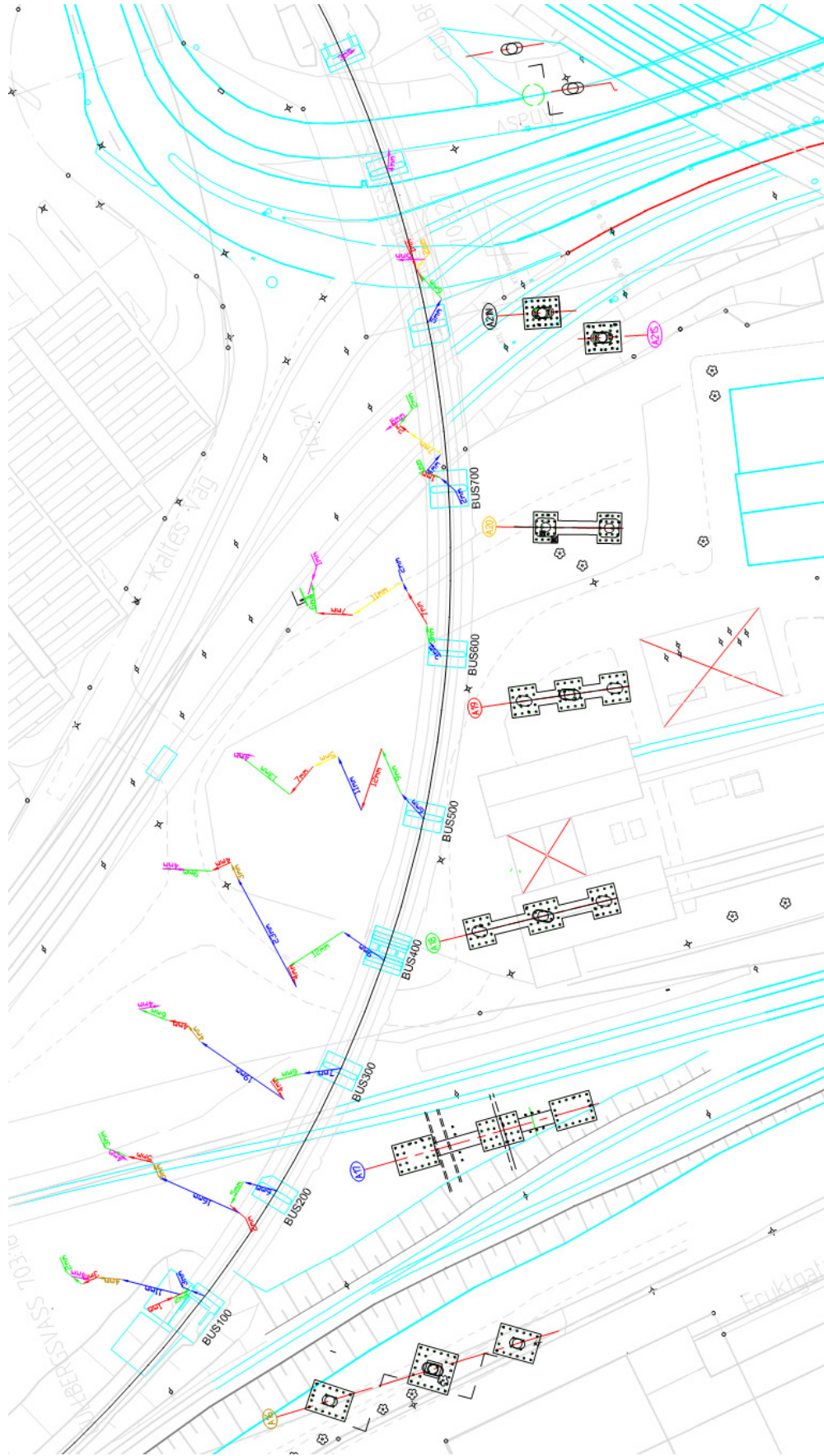


Figur 5. Augerborr för förborring innan påslagning.

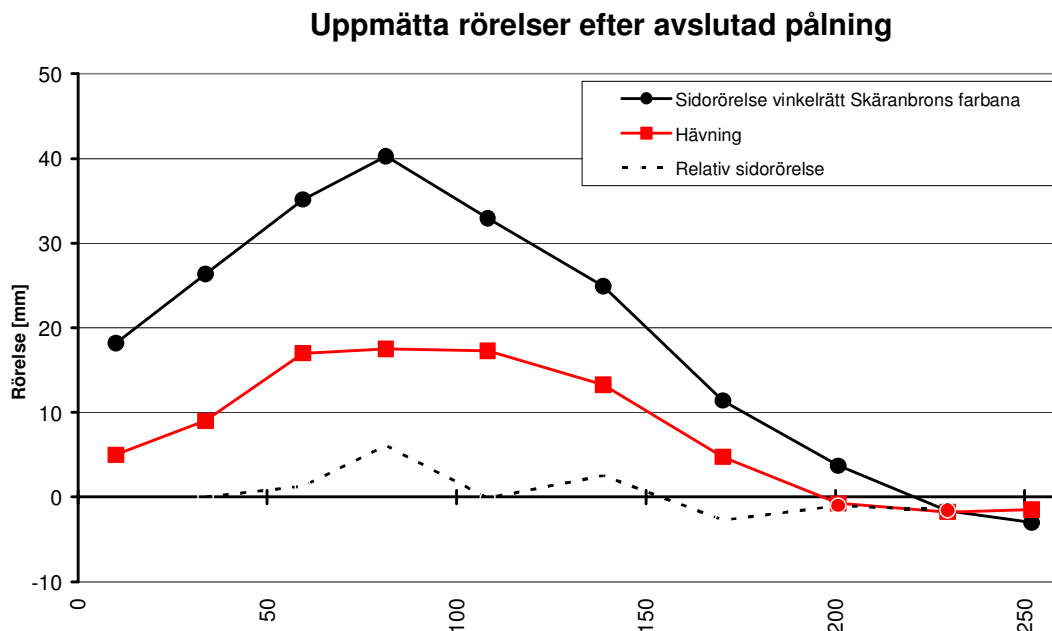
2.4 Mätresultat

Som tidigare nämnts styrdes pålningsarbetet av toleranser kopplade till Skäranbrons uppmätta horisontalrörelser, varvid dess sidorörelser vinkelrätt farbanan var av primärt intresse. I Figur 6 framgår hur de uppmätta horisontalrörelserna utvecklades i takt med pålningsarbetet.

Motsvarande mätdata, avseende situationen efter avslutad pålning redovisas i Figur 7. Som framgår uppgår den maximala sidorörelsen till ca 40 mm i Stöd BUS400 (beteckning enligt Figur 6). Den största differensförskjutningen mellan två stöd uppgick till ca 6 mm, dvs mindre än de föreskrivna toleranserna. I figuren redovisas även uppmätt hävning.



Figur 6. Uppmätta rörelser i horisontalplanet (vektorer) under pålningsarbetet. Respektive delvektor visar den uppmätta rörelsen vid respektive pålningsstapp, jfr Figur 4.



Figur 7. Uppmätta rörelser i Skäranbrons stöd efter avslutad pålningsarbete. Längdmätningen (redovisas på de horisontella axeln) startar i nordväst.

3 Modellering enligt Sagasetta-metoden

3.1 Inledning

Sagasetta (1987) föreslog en beräkningsmodell som innebär att en påle som installeras från markytan kan ersättas av ett stort antal punktformiga källor i läget för pålen. En mer omfattande beskrivning av den teoretiska bakgrunden till denna metod ges i Sagasetta (1987) och till viss del i Edstam (2011). Den resulterande horisontella (radiella) respektive vertikala rörelsen i markytan, δ_r respektive δ_v , till följd av installationen av en enskild påle kan därmed beräknas enligt:

$$\delta_r = \frac{R^2}{2} \cdot \frac{L}{r \cdot \sqrt{r^2 + L^2}} \quad (1)$$

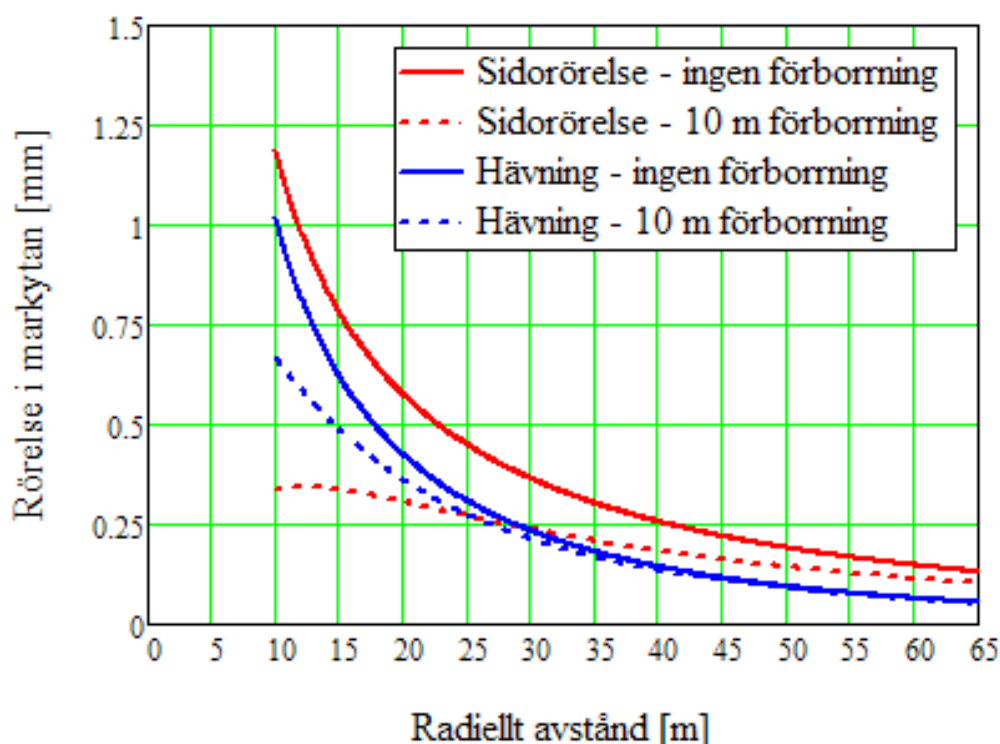
$$\delta_v = -\frac{R^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + L^2}} \right) \quad (2)$$

där: R = pålens radie; L = pålens längd; och r = radiella avståndet från pålen.

Den sammanlagda effekten av flera pålar beaktas genom superpositionering av effekten av de enskilda pålarna.

3.2 Simulering av förborring

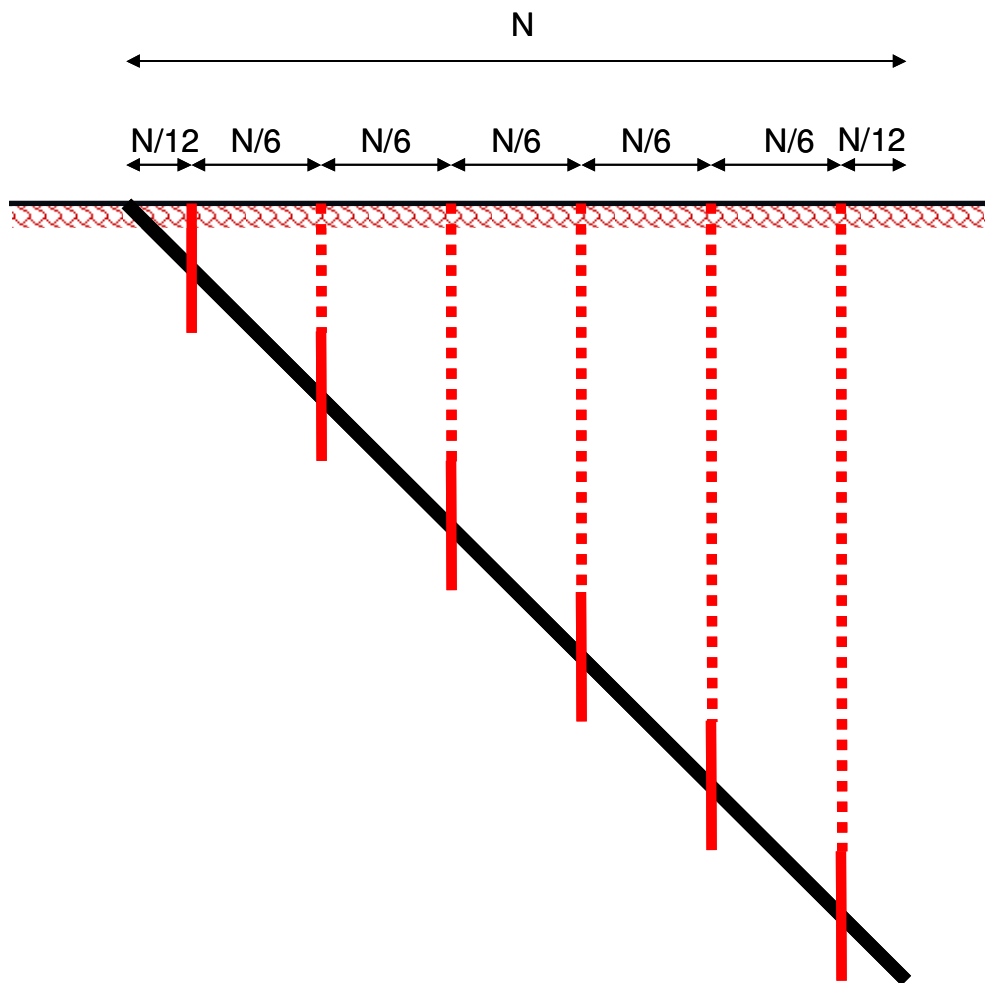
Effekten av förborring kan beaktas genom att simulera denna som en ”negativ påle”. Därvid nyttjas ekvationerna (1) och (2), varvid den ”negativa pålen” tilldelas en geometri motsvarande den hos lerproppen. Den beräknade rörelsen i markytan för en enskild påle, utan respektive med 10 m förborring, illustreras i Figur 8., varvid en 65 m lång påle med ekvivalent radie motsvarande kantmått $275 \times 275 \text{ mm}^2$ förutsatts. Som framgår antyder denna modell att förborringen har en påtaglig effekt när det gäller sidorörelsen, men en relativt begränsad effekt när det gäller hävningen.



Figur 8. Beräknad sidorörelse och hävning i markytan, utan respektive med förborring, enligt Sagasetta-modellen (65 m lång påle med ekvivalent radie motsvarande kantmått $275 \times 275 \text{ mm}^2$).

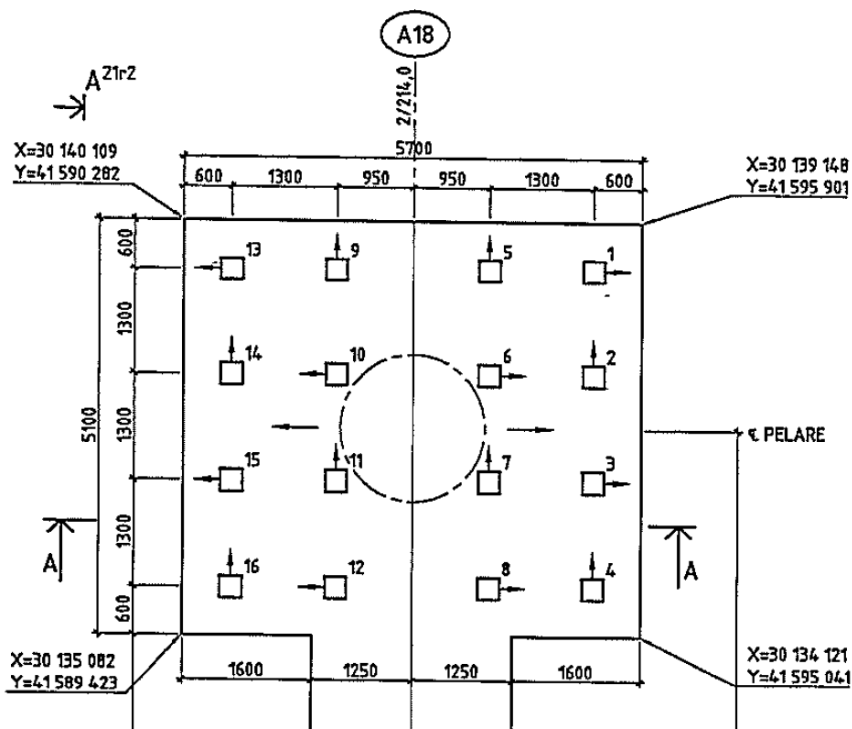
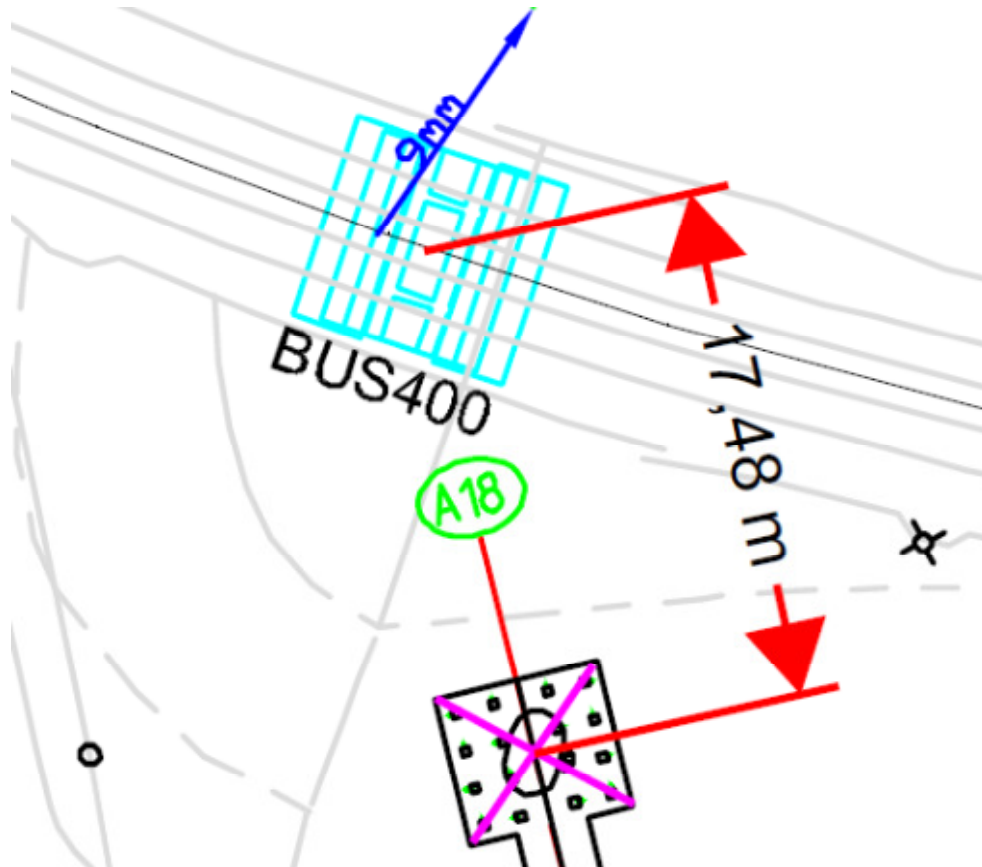
3.3 Simulering av lutande pålar

Huvuddelen av Partihallsbrons pålar installerades lutande, varvid lutning normalt var 10:1. Sagasetta-modellen (ekvationerna 1 och 2) förutsätter dock vertikala pålar. Genom att ersätta en lutande påle med en kombination av flera vertikala pålsegment och förborring, jfr Figur 9, kan således effekten av lutande pålar beaktas.



Figur 9. En enskild lutande påle (heldragen lutande svart linje) med lutning $N:1$ ersätts med exempelvis 6 st vertikala pålsegment (heldragna vertikala röda linjer), vart och ett med tillhörande "förborring" (streckade vertikala röda linjer) när så erfordras.

Detta betraktelsesätt har tillämpats i syfte att bedöma huruvida pålarnas lutning kan försummas eller ej. Därvid har de pålningsinducerade rörelserna i centrum av Skäranbrons Stöd 4 till följd av påslagning i Partihallsbrons Stöd 18N simulerats. Dessa stöd har valts eftersom det inbördes avståndet mellan dessa stöd är det minsta som förekommer i aktuellt byggprojekt, se Figur 10.



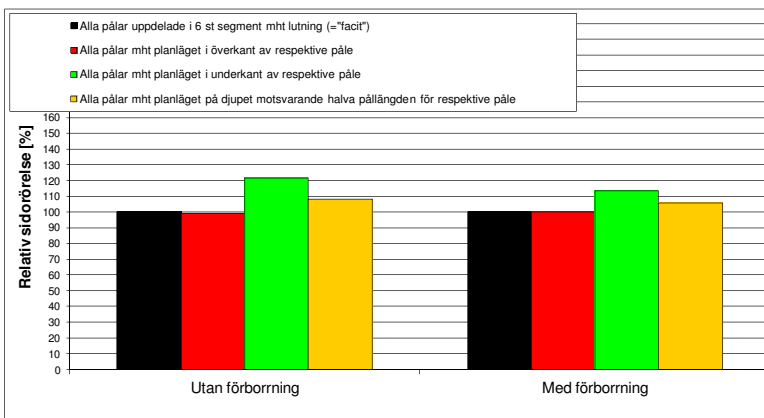
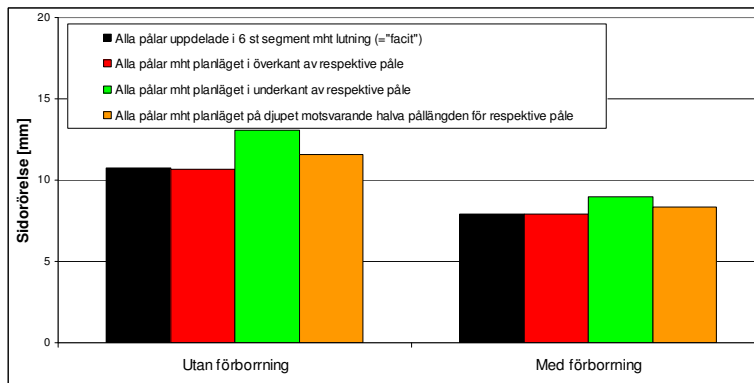
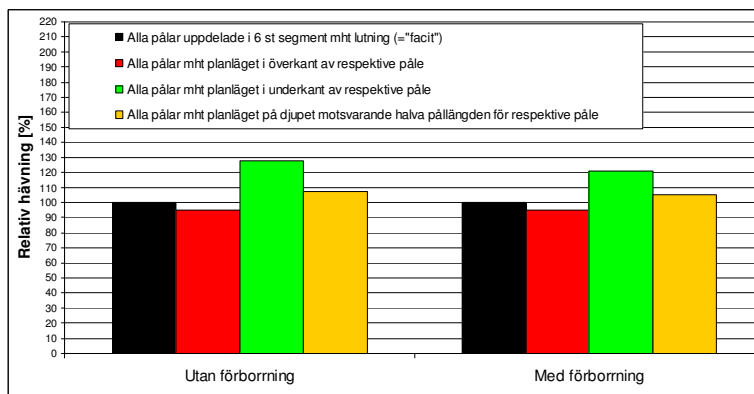
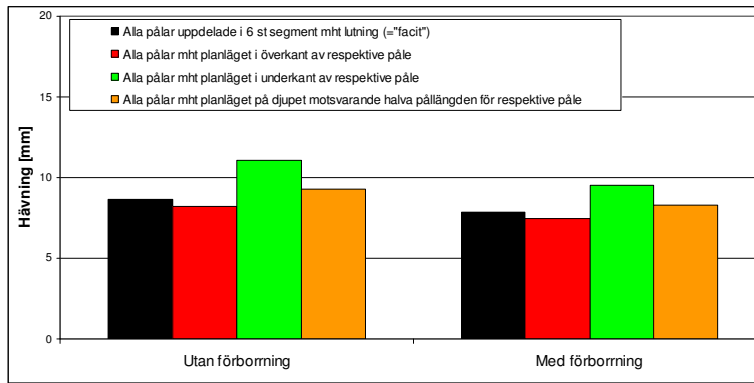
PÅLE NR	a (mm)	b (mm)	LUTNING (N:1)	LÄNGD (m)
A18:1	-14094	2250	10:1	65
A18:2	-12794	2250	10:1	65
A18:3	-11494	2250	10:1	65
A18:4	-10194	2250	10:1	65
A18:5	-14094	950	10:1	65
A18:6	-12794	950	10:1	65
A18:7	-11494	950	10:1	65
A18:8	-10194	950	10:1	65
A18:9	-14094	-950	10:1	65
A18:10	-12794	-950	10:1	65
A18:11	-11494	-950	10:1	65
A18:12	-10194	-950	10:1	65
A18:13	-14094	-2250	10:1	65
A18:14	-12794	-2250	10:1	65
A18:15	-11494	-2250	10:1	65
A18:16	-10194	-2250	10:1	65

Figur 10. Skäransbrons Stöd 4 och Partihallsbron Stöd 18N. Övre bilden: -Inbördes avstånd mellan stöden. Undre bilden samt tabellen: Utdrag från Pålplanen avseende Stöd 18N.

Effekten av de lutande pålarna beaktats enligt följande alternativa principer:

- Respektive lutande påle ersätts med 6 st vertikala pålsegment, vilka förskjutits i sidled enligt Figur 9 och Figur 10. Denna modell betraktas som "facit" vid relativjämförelserna.
- Respektive lutande påle ersätts med en vertikal påle, vars planläge sammanfaller med pålens planläge i markytan.
- Respektive lutande påle ersätts med en vertikal påle, vars planläge sammanfaller med pålens planläge i dess underkant.
- Respektive lutande påle ersätts med en vertikal påle, vars planläge sammanfaller med pålens planläge på djupet motsvarande halva pållängden.

Den beräknade hävningen och sidorörelsen enligt ovannämnda alternativa principer redovisas i Figur 11, dels i absoluta tal och dels i relativa tal. Pålning såväl utan som med 10 m förborring har studerats. Som framgår kan respektive lutande påle ersättas med en vertikal påle, vars planläge sammanfaller med pålens planläge i markytan.

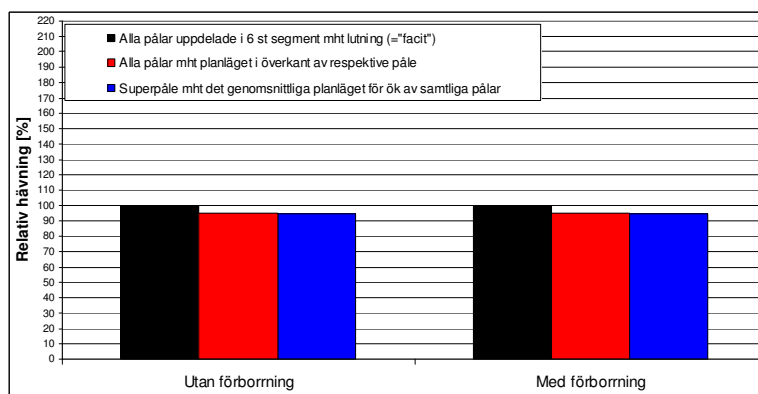
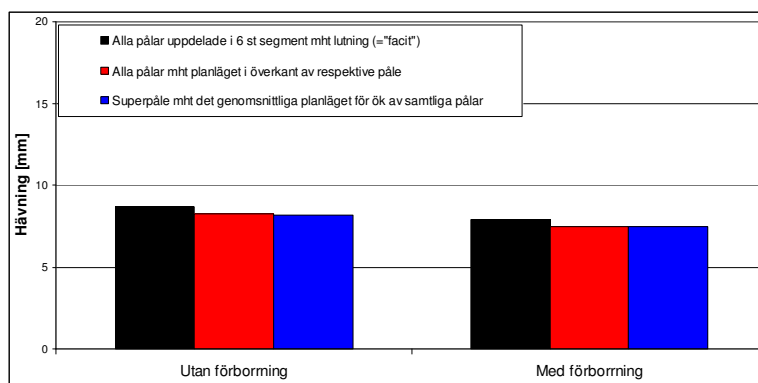


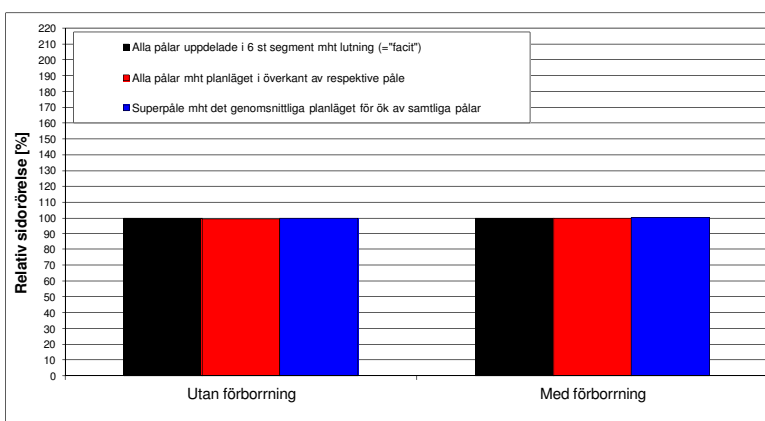
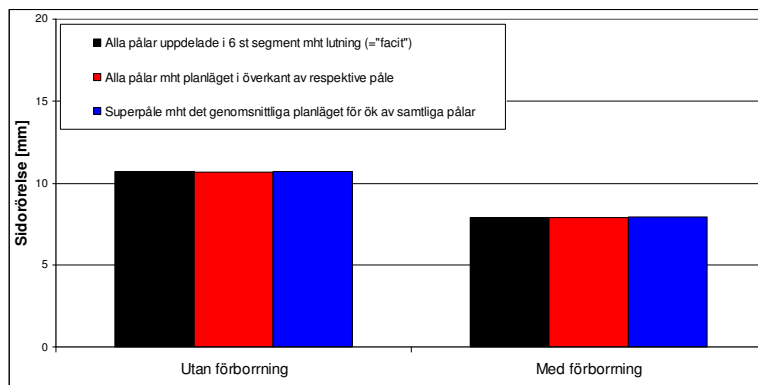
Figur 11. Beräknade markrörelser vid beaktande av lutande pålar enligt alternativa sätt.

3.4 Nyttjande av ”superpålar”

Som framgår i Edstam (2011) kan enstaka ”superpålar” representera samtliga individuella pålar inom ett område. Respektive superpåle placeras i centrum för den kvadratiska delpålgrupp som den ersätter, medan dess tvärsnittsarea uppgår till summan av tvärsnittsarean hos de pålar som ingår i delpålgruppen. Detta medför en avsevärd förenkling av beräkningsarbetet. Effekten av denna förenkling har studerats för de pålningsinducerade rörelserna i centrum av Skäranbrons Stöd 4 till följd av påslagning i Partihallsbrons Stöd 18N, jfr Figur 10. Samtliga pålar tillhörande Partihallsbrons Stöd 18N har därmed förenklats till en superpåle, varvid samtliga pålarna planläge i markytan har använts för bestämning av superpålens planläge.

Den beräknade hävningen och sidorörelsen enligt ovannämnda princip redovisas i Figur 12, dels i absoluta tal och dels i relativa tal. Pålning såväl utan som med 10 m förborring har studerats. Som jämförelse redovisas även beräkningsresultaten om de individuella pålarnas lutning beaktas. Som framgår kan en vertikal superpåle, vars planläge sammanfaller med resultaten för samtliga pålars planläge i markytan, nyttjas.





Figur 12. Beräknade markrörelser vid beaktande av samtliga individuella pålar respektive en "superpåle".

3.5 Vald approach vid analys av Skäranbron

I Avsnitten 3.2-0 har effekten av förborring, lutande pålar samt nyttjande av "superpålar" översiktligt studerats.

Figur 8 antyder att en viss effekt av förborringen kan förväntas, speciellt när det gäller sidorörelserna, i de fall när det är ett relativt litet avstånd mellan pålningsområdet och Skäranbrons stöd. Eftersom detaljerna kring förborringen är oklara, jfr Avsnitt 2.3, utförs analyserna baserat på två alternativa "extremscenarier" enligt följande:

1. Ingen förborring överhuvudtaget
2. Ingen förborring i Stöd A16, men enkel förborring i Stöd A17 Syd och A18 Norr och i övriga stöd dubbel förborring för flertalet pålar. Förborringen antas ha blivit utförd till 10 m djup varvid leproppens ytter- respektive innerdiameter uppgått till 320 mm respektive 200 mm.

Samtliga pålar ingående i respektive Stöd A16 till A21 förenklas till 1 st "superpåle", dvs totalt nyttjas 16 st vertikala "superpålar", jfr Figur 6. Respektive vertikal "superpåles" planläge förläggs i centrum för respektive Stöd A16 till A21.

4 Modellering enligt Hellman/Rehman-metoden

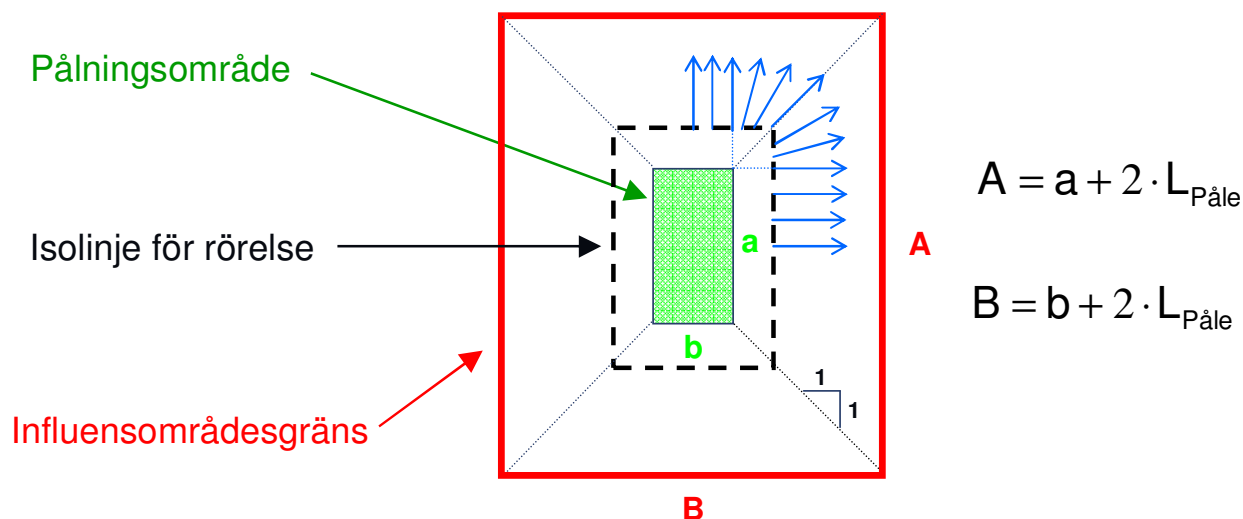
4.1 Inledning

Denna beräkningsmetod, som är att betrakta som svensk praxis, föreslogs ursprungligen av Hellman (1981). Metoden vidareutvecklades av S-E Rehman, KTH, och publicerades i Olsson & Holm (1993). Vidareutvecklingen innefattar dels en metod för att beakta effekten av närliggande byggnader med olika relativ tyngd och dels en metod för att bedöma storleken på sidorörelserna, vilken innebär att sidorörelsen och hävningen antas vara lika stor i markytan.

Metoden baseras på antagandet att att markytans hävning antas ha formen av en ”stympad kon” som sträcker sig motsvarande en pållängd utanför pålningsområdet., se Figur 13. Konens volym antas utgöra en viss andel av de installerade pålarnas volym (i lera normalt 100 %). Tillämpningen av ovan beskrivna modell medför flera oväntade och mindre realistiska effekter, vilka berörs i Edstam (2011).

I aktuellt fall bortses ifrån effekten av närliggande byggnader med olika relativ tyngd varvid hävningen och sidorörelsen i markytan kan beräknas enligt ekvation (3).

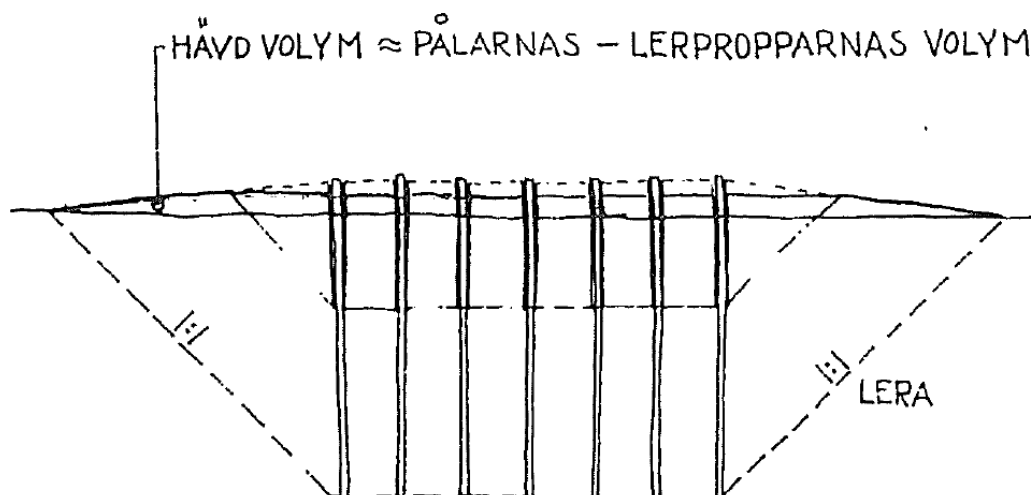
$$\delta_h = \delta_v = \frac{\sum V_{\text{Påle}}}{\left(\frac{4}{3} \cdot L_{\text{Påle}} + a + b\right) \cdot L_{\text{Påle}} + a \cdot b} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_{\text{Påle}}}\right) \quad (0 \leq x \leq L_{\text{Påle}}) \quad (3)$$



Figur 13. Modell för bedömning av hävning till följd av påslagning enligt Hellman/Rehman. De blå pilarna visar antagen riktning på sidorörelsen i olika punkter relativt pålningsområdet.

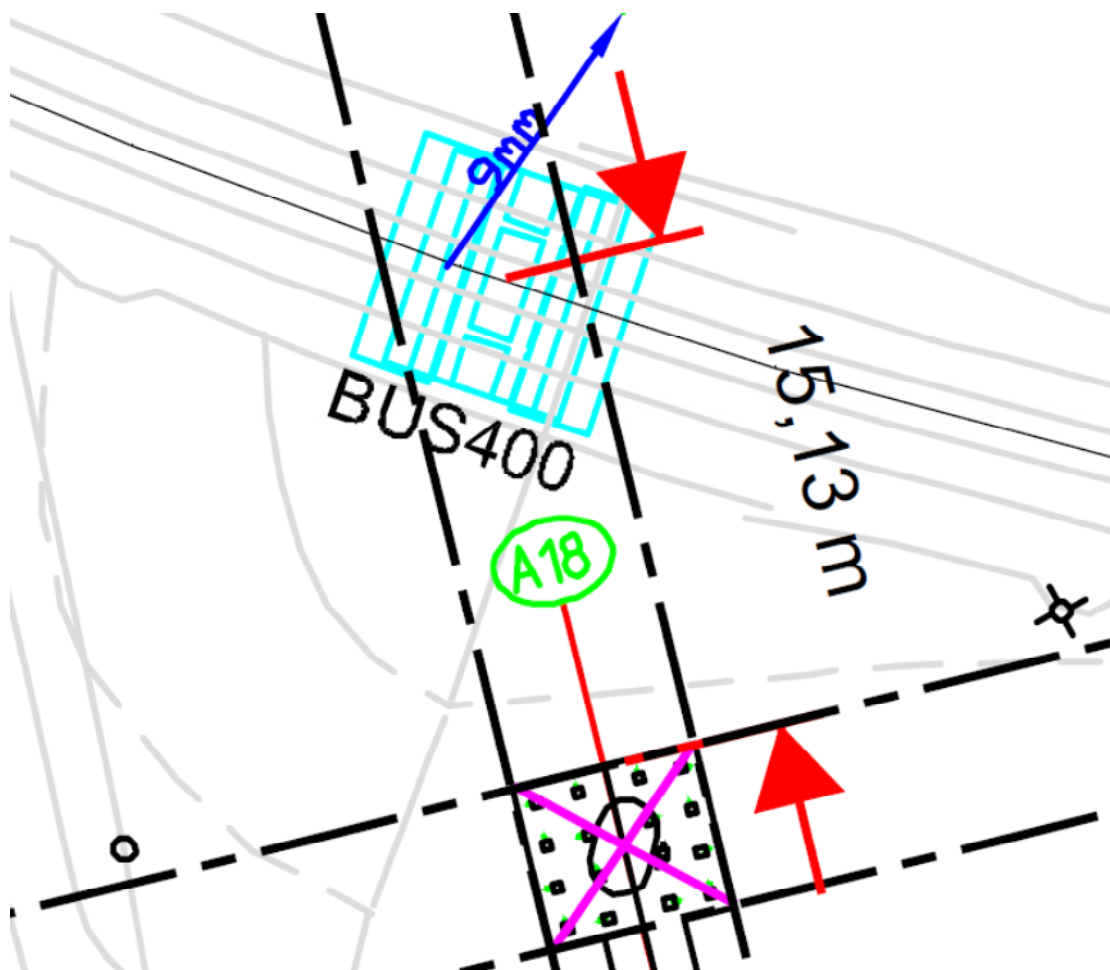
4.2 Simulering av förborring

Enligt beskrivningen i Olsson & Holm (1993) beaktas eventuell förborring genom att subtrahera lerpropparnas volym från pålarnas volym. Denna approach innebär dock att lerpropparnas längd inte beaktas explicit. I Hellman (1981) föreslås dock att effekten av förborring beaktas genom att lerpropparna betraktas som "negativa pålar", jfr Figur 14. Denna approach förefaller vara mer logisk och är ekvivalent med hur förborring beaktas vid nyttjande av Sagaseta-metoden.



Figur 14. Hantering av förborring enligt Hellman (Hellman, 1981).

Approachen enligt Figur 14 har använts för beaktande av effekten av förborring. Därvid har de pålningsinducerade rörelserna i centrum av Skäranbrons Stöd 4 till följd av påslagning i Partihallsbrons Stöd 18N simulerats. Dessa stöd har valts eftersom det inbördes avståndet mellan dessa stöd är det minsta i aktuellt byggprojekt, se Figur 15. Som framgår är avståndet från kanten från pålningsområdet (Stöd A18N) till Skäranbrons Stöd 4 drygt 15 m, dvs längre är längden på lerpropparna. Således erhålls beräkningsmässigt ingen effekt av förborringen i aktuellt fall.



Figur 15. Skäransbrons Stöd 4 och Partihallsbron Stöd 18N.

4.3 Vald approach vid analys av Skäransbron

Som framgår i föregående avsnitt medför förborrningen beräkningsmässigt ingen effekt, varför förborring ej beaktas framgent. Metoden kan ej beakta lutande pålar varför pålningsområdenas planläge i markytan används som input. Som framgår i Edstam (2011) fungerar inte ”superpositionsprincipen”, dvs om ett pålningsområde delas upp i flera delområden och beräkningsmetoden tillämpas för vart och ett av dessa blir den beräknade responsen annorlunda jämfört med om hela pålningsområdet betraktas som ett område. I aktuellt fall antas dock att pålningen för Partihallsbrons Stöd A16 till A21 beräkningsmässigt utgör 16 st pålningsområden, jfr Figur 6.

5 Modellering enligt finita element metoden (FEM)

I Edstam (2011) redovisas en metodik som möjliggör praktiskt tillämpning av FEM vid simulering av massundanträngning vid påslagning. Härvid antas att jorden uppför sig linjär-elastiskt och inkompressibelt. Vidare introduceras ”superpålar” på motsvarande sätt som vid tillämpning av Sagasetta-metoden, varvid funktionen ”volumetric strain” i FE-mjukvaran PLAXIS 3D Foundation tillämpas. Detta förfarande förefaller leda till nöjaktiga resultat vid de förhållanden som behandlas i den studien. Där visas även hur införandet av befintliga konstruktioner i anslutning till pålningsområdet påverkar de pålningsinducerade markrörelserna på ett sätt som, åtminstone kvalitativt, förefaller vara rimliga.

Inom ramen för det examensarbete som ingår i den nu aktuella studien (Nenonen & Ruul, 2011) har ovannämnda FE-metodik vidareutvecklats. Som framgår i examensarbete är det av beräkningstekniska skäl inte möjligt att inkludera samtliga påletapper för Partihallsbron samt hela Skäranbron och dess grundläggning i FE-modellen. Därför inkluderas endast pålningsstapparna 1-4 (jfr Figur 4) samt Skäranbrons Stöd 2-4 och mellanliggande farbana (jfr Figur 6). Den nyttjade FE-modellen framgår i Figur 16. Genom diverse inledande ”what if simuleringar” visas bl.a. följande:

- Nyttjandet av en mer realistisk beskrivning av undergrundens mekaniska respons (elasto-plastisk i stället för elastisk respons) har en ur praktisk synvinkel försumbar effekt.
- Simulering av förborring till ca 10 m djup leder primärt till en minskning av horisontalrörelserna från markytan och ned till ca 20 á 25 m djup i läget för Skäranbrons stöd. Däremot minskar markhävningen förhållandevis lite. En likartad effekt erhålls för övrigt med Sagasetta-metoden, jfr Avsnitt 3.2.
- Skäranbrons pålar har endast liten påverkan på de pålningsinducerade sidorörelserna i läget för Skäranbrons stöd, vilket torde bero på deras förhållandevis låga böjstyvhet. Däremot har pålarna en påtagligt reducerande effekt när det gäller hävningarna, vilket torde bero på deras förhållandevis höga axialstyvhet.
- Skäranbrons farbana bidrar påtagligt till att omfördela (jämna ut) de pålningsinducerade horisontalrörelser i läget för Skäranbrons stöd, vilket torde bero på farbanans förhållandevis höga axial- och böjstyvhet. Detta innebär att de beräknade sidorörelserna delvis påverkas av att endast Skäranbrons stöd 2-4 medtagits i beräkningsmodellen.



Figur 16. FE-modellen visande Skäranbrons Stöd 2, 3 och 4 samt mellanliggande farbana (Nenonen & Ruul, 2011). Den omgivande jorden är "visuellt släckt" för att pålarna skall synas.

6 Jämförelser mellan uppmätt och beräknad respons

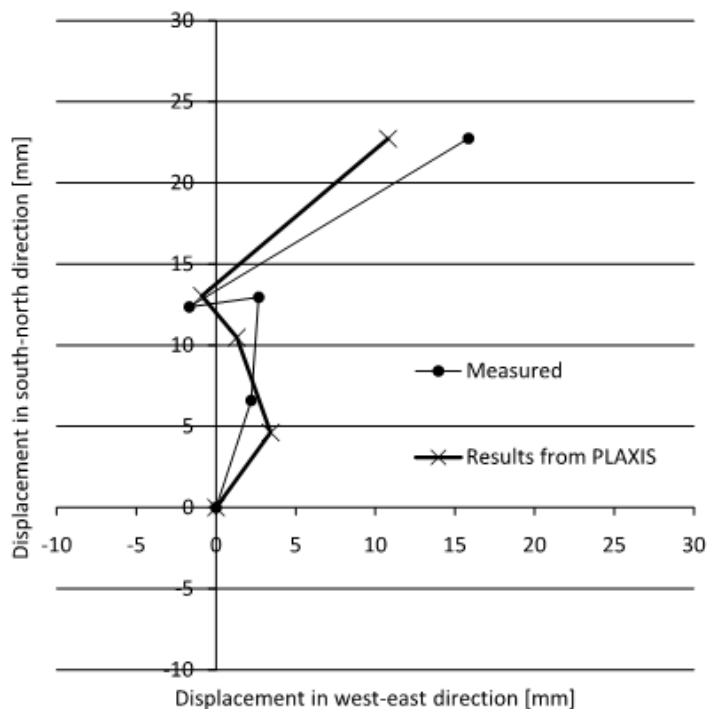
6.1 Respons i Skäranbrons stöd 2-4 under pålningsetapp 1-4

Som framgår av Avsnitt 5 var det endast möjligt att inkludera pålningsetapperna 1-4 (jfr Figur 4) samt Skäranbrons Stöd 2-4 vid FE-beräkningarna. Här behandlas dessutom endast det mellersta stödet (stöd 3). I Nenonen & Ruul (2011) behandlas övriga stöd (Stöd 2 och 4) samtidigt som mer omfattande jämförelser och analyser redovisas.

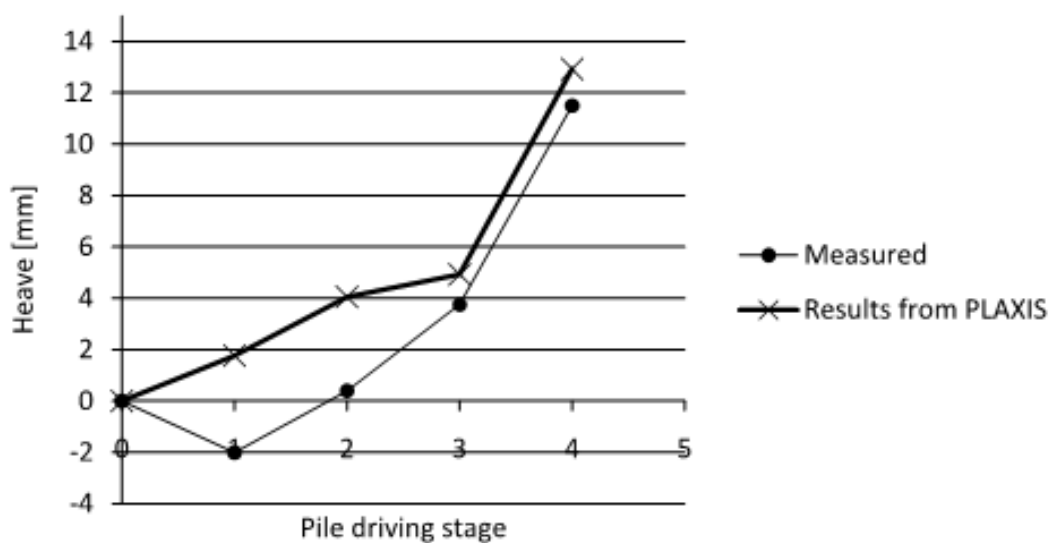
Uppmätta och FE-beräknade horisontalrörelser och hävningar i Skäranbrons Stöd 3 redovisas i Figur 17 och Figur 18 och som framgår är överensstämmelsen relativt god. Det bör dock påpekas att endast delar av Skäranbron kunnat inkluderas i FE-modellen, vilket innebär att eventuell samverkan med övriga stöd ej kunnat beaktas. Vidare bör påpekas att huvuddelen av de totalt uppmätta rörelserna, efter det att samtliga pålningsetapper utförts, utbildats under de studerade pålningsetapperna.

De FE-beräknade påkänningarna (böjmoment, skjuvkraft och axialkraft) i några utvalda pålar under Skäranbrons Stöd 3 redovisas i Figur 19 till Figur 21. Det beräknade maximala böjmomentet är i paritet med eller något högre än pålarnas böjmomentkapacitet innan betongen spricker. Den beräknade maximala skjuvkraften är dock avsevärt lägre än pålarnas skjuvkraftkapacitet innan betongen spricker. När det gäller den beräknade axialkraften i pålarna leder hävningen till att en dragkraft utbildas i pålarnas undre del. Den beräknade maximala dragkraften överstiger pålarnas dragkraftskapacitet innan betongen spricker och i vissa pålar

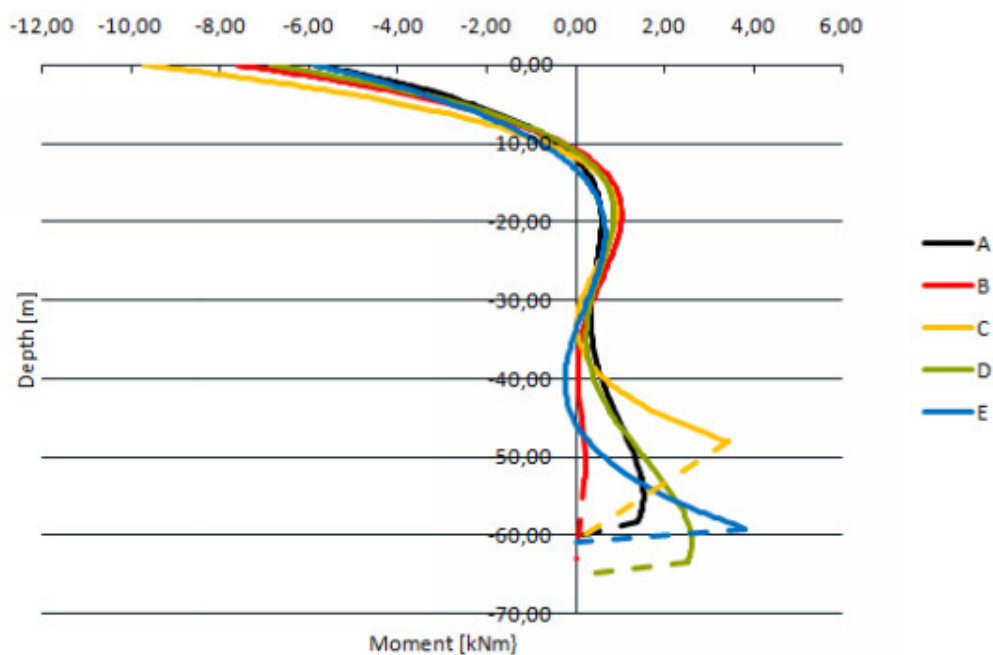
överstiger den även armeringens dragkapacitet. I FE-analysen är det dock ej möjligt att beakta att pålarnas styvhet minskar då betongen i pålarna börjar spricka varför de beräknade påkänningarna sannolikt är för stora. Vidare har effekten av påhängslaster till följd av pågående marksättningar i området ej beaktats, vilket leder till en överskattning av dragkrafterna i pålarna.



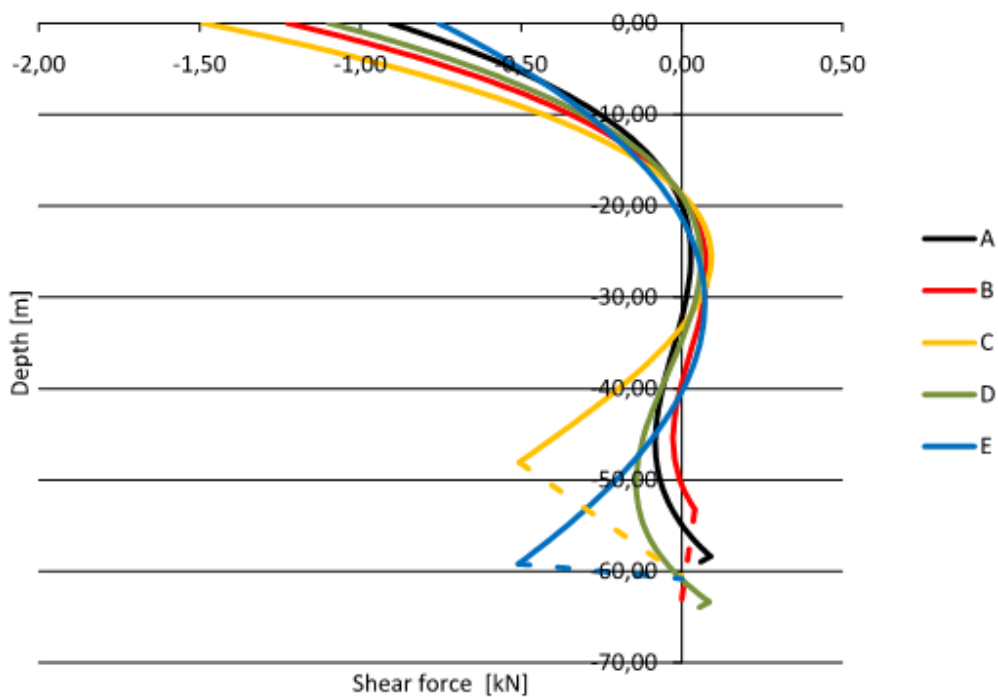
Figur 17. Uppmätt och FE-beräknad horisontalrörelse i Skäranbrons Stöd 3 under pålningsetapp 1-4 (Nenonen & Ruul, 2011).



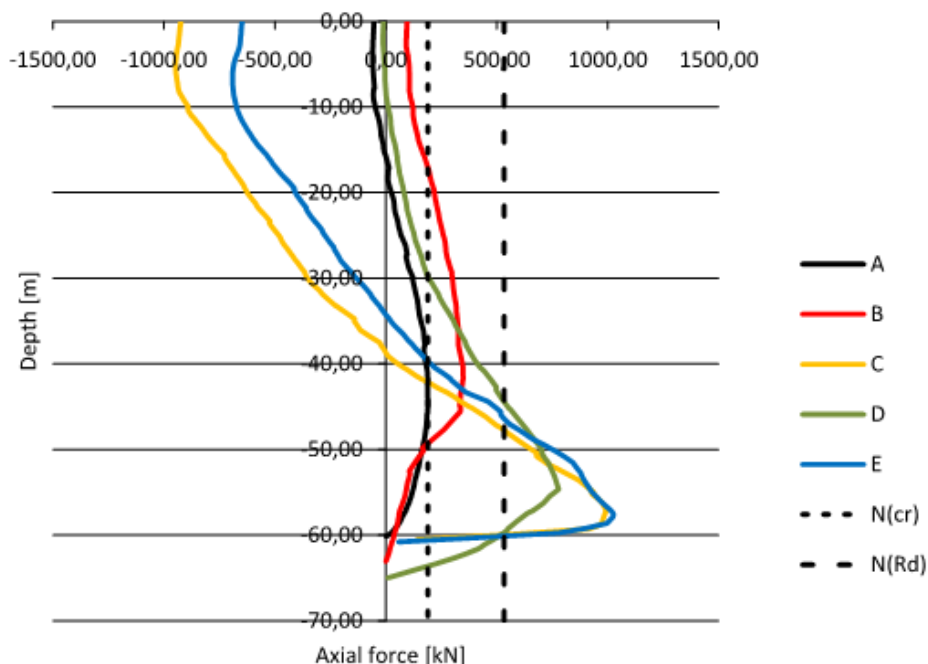
Figur 18. Uppmätt och FE-beräknad hävning i Skäranbrons Stöd 3 under pålningsetapp 1-4 (Nenonen & Ruul, 2011).



Figur 19. FE-beräknat böjmoment i utvalda pålar under Skäranbrons Stöd 3 efter pålningsetapp 4 (Nenonen & Ruul, 2011).



Figur 20. FE-beräknad skjuvkraft i utvalda pålar under Skäranbrons Stöd 3 efter pålningsetapp 4 (Nenonen & Ruul, 2011).



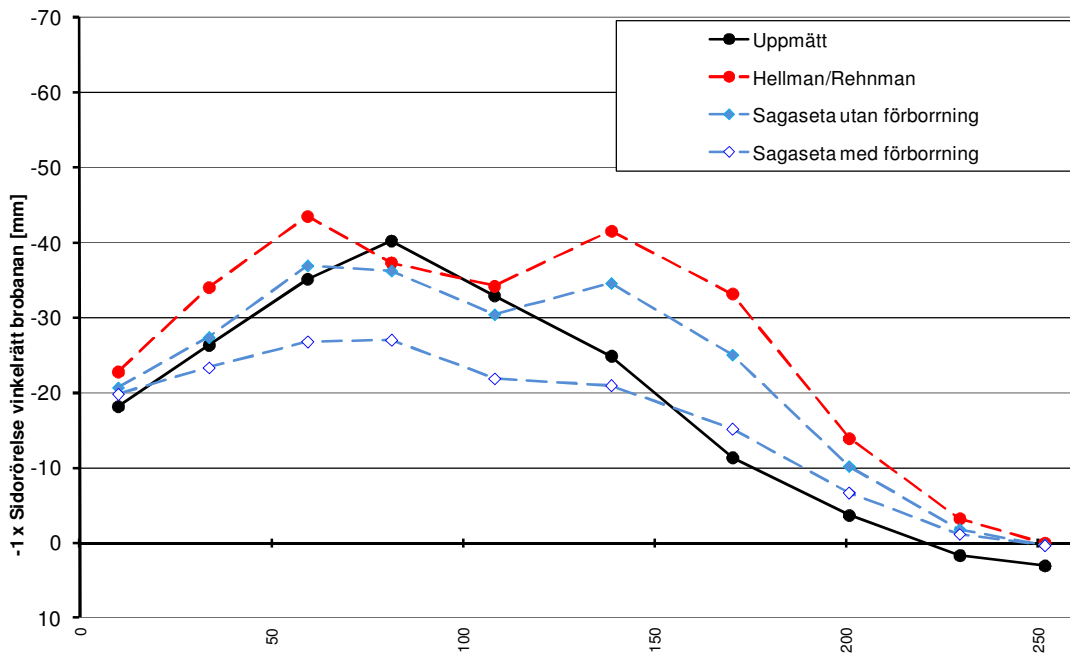
Figur 21. FE-beräknad axialkraft i utvalda pålar under Skäranbrons Stöd 3 efter pålningsstap 4 (Nenonen & Ruul, 2011).

6.2 Respons i samtliga stöd efter avslutat pålningsarbete

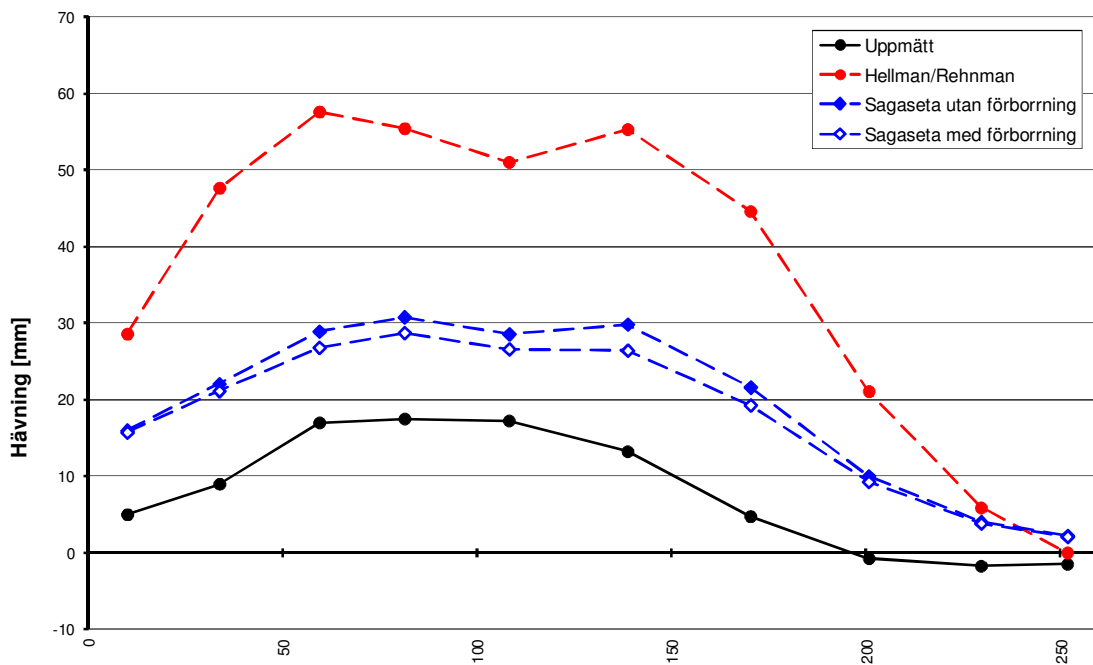
I detta stadium jämförs uppmätta rörelser med de som beräknats enligt Sagasetametoden respektive Hellman/Rehman-metoden. Vid beräkning enligt Sagasetametoden har dels förutsatts att ingen förborring utförts och dels att förborring utförts med en omfattning enligt Avsnitt 3.5. När det gäller Hellman/Rehman-metoden har dock tidigare konstaterats att i aktuell studie har förborringen inte någon effekt, jfr Avsnitt 4.2.

De uppmätta och beräknade horisontalrörelserna redovisas i Figur 22 och Figur 24. Som framgår resulterar Sagasetametoden och Hellman/Rehman-metoden i beräknade horisontalrörelser som huvudsakligen är av samma storleksordning som de uppmätta. Om förborring beaktas med Sagasetametoden erhålls dock beräknade horisontalrörelser som huvudsakligen är lägre än de uppmätta. Om förborring ej beaktas med Sagasetametoden erhålls beräknade horisontalrörelser som är ungefär lika med eller större än de uppmätta rörelserna. Hellman/Rehman-metoden leder till beräknade horisontalrörelser som huvudsakligen är större än de uppmätta rörelserna.

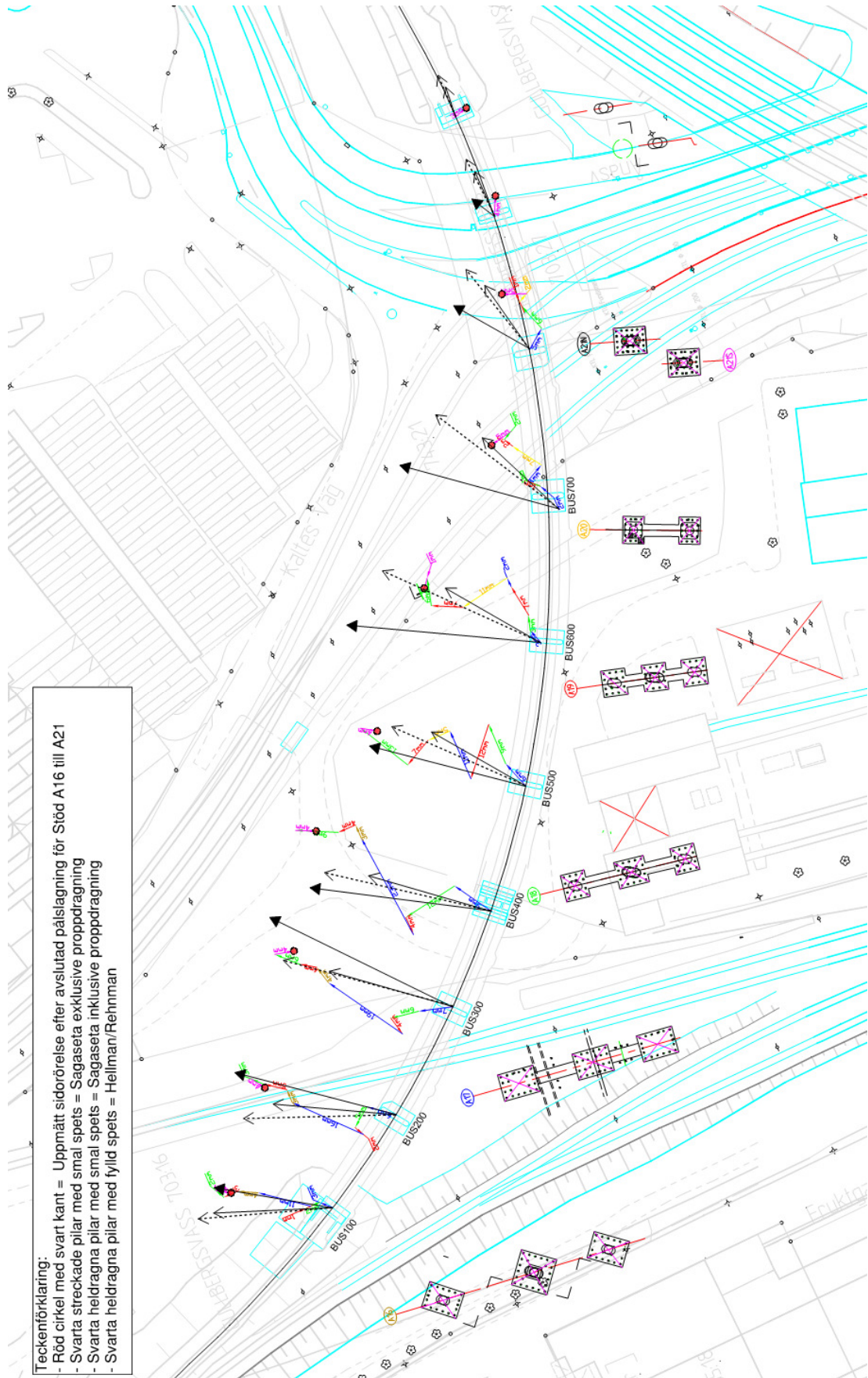
Uppmätt och beräknad hävning redovisas i Figur 23. Som framgår resulterar Sagasetametoden och Hellman/Rehman-metoden i en beräknad hävning som är avsevärt större än uppmätt, vilket huvudsakligen torde bero på att ingen av metoderna beaktar att Skäranbrons stöd är grundlagda på pålar. Sagasetametoden leder till en beräknad hävning som huvudsakligen är ca 2-3 gånger större än uppmätt, medan den beräknade effekten av förborring är förhållandevis liten. Hellman/Rehman-metoden leder till en beräknad hävning som huvudsakligen är ca 4-6 ggr större än uppmätt.



Figur 22. Uppmätt och beräknad horisontalrörelse vinkelrätt Skäransbrons farbana. Skäransbrons Stöd 1 längst till vänster



Figur 23. Uppmätt och beräknad hävning.



Figur 24. Uppmått (röda cirklar) och beräknade (svarta vektorer) horisontalrörelser efter avslutad pålning.

7 Slutsatser

Uppföljningsmätningarna vid pålningsarbetet förefaller ha fungerat väl och så vitt känt har inga skadliga påkänningar uppkommit på Skäranbron. Det har dock inte varit möjligt att i detalj klargöra omfattningen på den förborring som utförts i samband med påslagningen för Partihallsbron. Dessutom är förborringens ”verkningsgrad” osäker. Detta innebär att jämförelsen mellan uppmätt och beräknad repsons är behäftad med en viss osäkerhet.

Jämförelsen mellan uppmätta och beräknade pålningsinducerade rörelser visar dock i huvudsak följande:

- Såväl Sagasetametoden som Hellman/Rehman-metoden leder till beräknade horisontalrörelser som är av samma storleksordning som de uppmätta. I huvudsak är de beräknade horisontalrörelserna i paritet med eller större än de uppmätta. Detta beror sannolikt på att ingen av beräkningsmetoderna kan beakta den ”mothållande effekt” som Skäranbron ger upphov till. Denna effekt beror troligen på i huvudsak på farbanan mellan brostöden, medan pålgrundläggningen i sig har relativt liten effekt. I aktuellt fall förefaller Sagasetametoden överskatta effekten av förborringen medan Rehman/Hellman-metoden underskattar denna effekt.
- Såväl Sagasetametoden som Hellman/Rehman-metoden leder till beräknade hävningar som är avsevärt större än de uppmätta. Detta torde bero på att ingen av metoderna kan beakta att Skäranbron är grundlagd på långa pålar. Sagasetametoden leder till en beräknad hävning som är ca 2-3 gånger större än uppmätt medan Hellman/Rehman-metoden leder till en beräknad hävning som huvudsakligen är ca 4-6 ggr större än uppmätt. Dessa relationer bör kunna användas som ”tumregler” för överslagsmässiga uppskattningar.
- Vid FE-analyserna har endast delar av pålningsarbetet och delar av Skäranbron kunnat inkluderas i beräkningsmodellen. De beräknade horisontalrörelserna och hävningarna stämmer dock relativt väl med de uppmätta. Vidare har påkänningarna i Skäranbrons pålgrundläggning kunnat uppskattas, men jämförande mätdata är tyvärr ej tillgänglig. Sannolikt överskattas dock dessa påkänningar bl.a. pga för högt ansatt styvhet hos pålarna (osprucken betong har förutsatts).

Sammantaget bedöms att FE-analyser bör nyttjas för att erhålla bästa möjliga uppskattning av de pålningsinducerade markrörelserna och de därmed resulterande påkänningarna i närliggande befintliga konstruktioner. I och med att sådana analyser är mycket tidskrävande bör de dock endast tillgripas när så är motiverat. Vidare bedöms att Sagasetametoden och/eller Rehman/Hellman-metoden kan användas för överslagsmässiga beräkningar, men man skall då vara medveten om att ingen av dessa metoder kan beakta den ”mothållande effekt” som en befintlig konstruktion ger upphov till. Ovannämnda erfarenheter ifrån detta projekt kan dock tjäna som ”tumregler” vid uppskattning av den ”mothållande effekten”.

Referenser

Edstam, T. (2011). Massundanträngning i samband med påslagning i lera. SBUF-Rapport.

Hellman, L. 1981. Om grundläggningsteknik i tätort. Byggnadskonst, Vol. 73, No. 10.

Nenonen, P., Ruul, J. (2011). Environmental impact of pile driving - An FE-analysis of the displacement of the Skäran bridge. Chalmers University of Technology. Department of Civil and Environmental Engineering. GeoEngineering. Geology and Geotechnical Engineering Master thesis 2011:38.

Olsson, C., Holm, G. 1993. Pålgrundläggning. Statens geotekniska institut, Linköping.

Sagaseta, C. 1987. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. Geotechnique, Vol. 37 No. 3.