



MASSUNDANTRÄNGNING I SAMBAND MED PÅLSLAGNING I LERA



Torbjörn Edstam
Skanska Sverige AB
Teknik och Projekteringsledning

SKANSKA

 **TRAFIKVERKET**



Pålskommissionen

RUUKKI

 **SGF**

kompetenscentrum
infrastruktur

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	SAMMANFATTNING	4
2	INLEDNING.....	6
2.1	Bakgrund	6
2.2	Syfte	6
2.3	Genomförande och omfattning	6
3	FÄLTMÄTNINGAR.....	8
3.1	Inledning.....	8
3.2	Mätuppställning, mätinstrument och mättillfällen.....	8
3.3	Pålar, pålningsområde och påslagningsordning	11
3.4	Mätresultat.....	13
3.4.1	<i>Inledning.....</i>	<i>13</i>
3.4.2	<i>Rörelser i markytan</i>	<i>13</i>
3.4.3	<i>Vertikalrörelser i och under markytan</i>	<i>15</i>
3.4.4	<i>Horisontalrörelser i och under markytan</i>	<i>17</i>
3.4.5	<i>Rörelsemönster</i>	<i>19</i>
3.4.6	<i>Uppskattning av undanträngd jordvolym</i>	<i>19</i>
4	PROGNOMETODER.....	21
4.1	Inledning.....	21
4.1.1	<i>Hellman/Rehnman</i>	<i>21</i>
4.1.2	<i>Sagaseta et. al.....</i>	<i>25</i>
4.1.3	<i>FE-analys.....</i>	<i>26</i>
4.2	Simulering av fältmätningarna	27
4.2.1	<i>Hellman/Rehnman</i>	<i>27</i>
4.2.2	<i>Sagaseta et. al.....</i>	<i>28</i>
4.2.3	<i>FE-analys</i>	<i>34</i>
5	JÄMFÖRELSE MELLAN UPPMÄTTA OCH BERÄKNADE MARKRÖRELSE.....	38
5.1	Rörelser i markytan	38
5.2	Sidorörelser och deras variation med djupet	38
5.3	Hävningar och deras variation med djupet	38
5.4	Rörelsemönster	38
6	FE-SIMULERING AV PÅSLAGNING VID NÅGRA HYPOTETISKA SITUATIONER	43
6.1	Inledning.....	43
6.2	Beräkningsmodell.....	43
6.3	Beräkningsresultat	44
7	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER.....	47
8	REFERENSER	48

Förord

Under perioden 2008-2011 byggs Partihallsförbindelsen i Göteborg av Skanska Sverige AB på uppdrag av Trafikverket/Vägverket. 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 stora djup i "Göteborgsleran". I Skanskas uppdrag ingår även SBUF-projektet "Massundanträngning i samband med pålslagning i lera", vilket redovisas i föreliggande slutrapport.

I rapporten redovisas samtliga fältmätningar, analyser och slutsatser från projektet. Delar av arbetet har även publicerats i andra sammanhang (Edstam et al 2010a, 2010b, 2010c och 2010d). Dessutom har delar av arbetet presenterats i föredragsform vid Påldag09, Grundläggningdagen 2010, 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2010) samt vid SGF Västs Årsmöte 2011.

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

Leif Jendeby (initiativtagare, "bollplank" och granskare), Trafikverket/Vägverket
Sven Liedberg (initiativtagare och "bollplank"), Skanska Sverige AB
Anders Kullingsjö (numeriska analyser i Avsnitt 6), Skanska Sverige AB

Till projektet har varit kopplat en referensgrupp som omfattar följande personer

Claes Alén, Chalmers
Mats Larsson, Ruukki Sverige AB
Tara Wood, NCC/Chalmers

Arbetet har finansierats av ett flertal företag och organisationer enligt följande:

SBUF
Skanska Sverige AB
Trafikverket/Vägverket
Pålskommissionen
Ruukki Sverige AB
Svenska Geotekniska Föreningen
Kompetenscentrum Infrastruktur, Chalmers

Ett stort tack riktas till samtliga ovannämnda personer och finansiärer. Dessutom riktas ett varmt tack till Niklas Gottschalk, Ulf Svenhage, Dan Sundström, Staffan Högberg och Skanskas övriga "Partihallsbrobyggare" för deras engagemang och tålamod vid fältmätningarna.

Göteborg i april 2011

Torbjörn Edstam

1 Sammanfattning

Vid påslagning uppkommer bl.a. massundanträngning i undergrunden, vilken resulterar i rörelser i befintliga byggnader och anläggningar och därmed kan oönskade tvångskrafter induceras i dessa. Därför ställer beställaren ofta krav på maximalt tillåtna markrörelser i anbudshandlingen. Således behövs det metoder som möjliggör prognostisering av förväntade markrörelser så att den tekniska designen (t.ex. val av påltyp) kan anpassas mht de maximalt tillåtna markrörelserna. Den metod som utgör rådande "svensk praxis" för prognostisering av de pålningsinducerade markrörelserna anses dock ha bristande tillförlitlighet. Därför initierades aktuellt SBUF-projekt med målsättningen att öka förståelsen för hur markrörelserna varierar utanför pålningsområdet vid påslagning i lera samt att utveckla en förbättrad strategi och metodik för prognostisering av markrörelserna utanför pålningsområdet.

I föreliggande Slutrapport redogörs för de litteraturstudier, fältmätningar och teoretiska analyser som utförts inom ramen för projektet. Avslutningsvis redovisas de viktigaste slutsatser som kan dras.

Fältmätningarna utfördes i anslutning till pålningen för ett av de blivande brostöden ingående i Partihallsbron i Göteborg. Instrumenteringen var placerad längs tre mätsektioner förlagda mittför och vinkelrätt pålningsområdets kort- respektive långsidor. Instrumenteringen utgjordes av markpeglar, bälgslangar samt inklinometrar varvid rörelserna på såväl markytan som ned till ca 45 m djup kunde mätas. I försökslokalen är markytan i stort sett horisontell medan undergrunden utgörs av lera till minst 80 m djup. Mätningarna utfördes vid ett flertal tillfällen, varvid den successiva utvecklingen av markrörelserna kunde följas i takt med det ökande antalet installerade pålar.

De viktigaste observationerna/slutsatserna från fältmätningarna är:

Sidorörelsen är större än hävningen i samtliga mätpunkter.

Markrörelserna sträcker sig längre ut än en pållängd från pålningsområdets ytterkant.

Såväl sidorörelsen som hävningen i markytan varierar inte linjärt med avståndet från pålningsområdet. Variationen kan snarare beskrivas mha exempelvis en potensfunktion.

Markrörelsen mitt för pålningsområdets långsida är större än mitt för pålningsområdets kortsida i mätpunkter belägna på samma avstånd från pålningsområdets ytterkant.

Den undanträngda jordvolymen bedöms motsvara volymen hos pålarna.

Baserat på en litteraturstudie har tre olika beräkningsmetoder, vilka kräver relativt olika stor arbetsinsats, nyttjats i syfte att prognostisera markrörelserna till följd av påslagningen, nämligen:

En analytisk beräkningsmetod, baserat på empiriska fältobservationer, vilken ursprungligen föreslogs av Lars Hellman (Hellman, 1981). Denna metod vidareutvecklades av Sven-Erik Rehnman, KTH, (se t.ex. Olsson & Holm, 1993) kan numera sägas utgöra "svensk praxis".

En analytisk beräkningsmetod vilken föreslogs av Sagasetta (1987). Till skillnad från Helleman/Rehman-metoden är denna metod baserad på kontinuumsmekanik.

Numeriska simuleringar (finita element metoden - FEM), varvid förhållandena vid såväl fältmätningarna som några mer komplexa hypotetiska situationer har studerats. De senare har studerats i syfte att få en grov uppfattning om hur befintliga konstruktioner påverkas och påverkas av det pålningsinducerade markrörelserna.

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

Helleman/Rehman-metoden bör endast nyttjas för en grov uppskattning av storleksordningen på rörelserna i markytan. Metoden medger visserligen beräkning av rörelserna under markytan, men dessa avviker påtagligt ifrån de uppmätta rörelserna.

Sagasetta-metoden bör nyttjas om en bättre uppskattning av rörelserna i markytan erfordras. Metoden förefaller dessutom kunna nyttjas för bedömning av rörelserna under markytan.

FE-analyser bör nyttjas för att erhålla bästa möjliga uppskattning av rörelserna i och under markytan. Om de byggnadstekniska förhållandena är "enkla" (horisontell markyta, homogen jord, etc) är det dock tveksamt om det merarbete som FE-analyserna medför är motiverat jämfört med att använda Sagasetta-metoden. De hypotetiska situationer som analyserats visar dock att FE-analyser bör nyttjas om de byggnadstekniska förhållandena inte är "enkla".

2 Inledning

2.1 Bakgrund

Omgivningspåverkan till följd av påslagning är en företeelse som kan skapa omfattande problem, vilka inte sällan leder till långa och svåra diskussioner av ekonomisk art. Påverkan på omgivningen kan grovt sägas härröra från två övergripande fenomen. Det ena har sin grund i det dynamiska förloppet av pålningsarbetet och de vibrationer som härvid kan skada omgivande byggnader och anläggningar samt ge upphov till buller. Vibrationerna kan även ge upphov till omlagrings effekter i löst lagrad friktionsjord, varvid denna komprimeras. Det andra fenomenet grundar sig i själva massundanträngningen då pålen tränger undan den jord som den slås ner i. Såväl det dynamiska som det volymundanträngande förloppet kan även ge upphov till geomekaniska effekter såsom hållfasthetsförändringar, portrycksuppbyggnad, hävningar och sättningar. Massundanträngningen kan på så vis leda till stabilitetsproblem samt markrörelser med oönskade konsekvenser. Exempelvis kan massundanträngningen i undergrunden leda till rörelser i befintliga byggnader och anläggningar och därmed kan oönskade tvångskrafter induceras i dessa.

I den del av en anbudshandling som berör grundläggningsarbetena vid ny-, om- eller tillbyggnad av byggnader och anläggningar ställs ofta krav på maximalt tillåtna markrörelser till följd av massundanträngning vid påslagning. Efter upphandlingen blir anbudskraven en del av kontraktshandlingen. Inom ramen för projekteringen av de tekniska lösningarna (t.ex. val av påltyp), temporära skeden, arbetsmetoder så som schaktplaner, påslagning, osv åligger det därmed normalt entreprenören att välja den pålningsmetod som bedöms innehålla kraven avseende markrörelserna. Således är det önskvärt att kunna prognostisera de förväntade markrörelserna, så att den tekniska designen kan anpassas mht de krav som ställs i kontraktshandlingen.

Dagens svenska praxis för prognostisering av massundanträngning och markrörelser till följd påslagning baseras på en överslagsmässig beräkningsmodell som ursprungligen föreslogs av Lars Hellman på SGI (Hellman, 1981) och senare vidareutvecklades av Sven-Erik Rhenman (Olsson & Holm, 1993). Denna metod innehåller dock ett antal förenklingar och antaganden som leder till prognoser som i bästa fall är av samma storleksordning som verklig respons. Dessutom erhålls vissa beräkningsresultat som förefaller mindre rimliga, t.ex. att ökad pållängd medför minskad hävning i direkt anslutning till pålningsområdet.

2.2 Syfte

Syftet med projektet är att öka förståelsen för hur markrörelserna varierar utanför pålningsområdet vid påslagning i lera samt att utveckla en förbättrad strategi och metodik för prognostisering av markrörelserna i området utanför pålområdet.

2.3 Genomförande och omfattning

Inom ramen för projektet har genomförts omfattande fältmätningar av massundanträngningen vid påslagning i läget för ett av de blivande brostöden tillhörande Partihallsbron i Göteborg.

Vidare har utförts teoretiska studier, varvid några i litteraturen redovisade analytiska metoder har nyttjats för jämförelse med resultaten från ovannämnda fältmätningar. Dessutom har finita element metoden (FEM) nyttjats.

FEM har även nyttjats i syfte att studera hur markrörelserna påverkas av förekomsten av befintliga konstruktioner i anslutning till pålningsområdet. Härvid har några hypotetiska situationer studerats, varvid beräkningsresultaten avseende förhållandena vid fältmätningarna fungerat som referens.

3 Fältmätningar

3.1 Inledning

Fältmätningarna utfördes i anslutning till påslagningen för Stöd A10, A11 och A12 ingående i Partihallsbron i Göteborg, se Figur 1. De aktuella stöden är belägna på Marieholm.

Inom området utgörs undergrunden av lös lera till åtminstone 80 m djup. Ursprungligen förekom 1 á 2 m fyllning på leran, men denna schaktades bort inom stora delar av försöksområdet innan påslagningen påbörjades. Markytan var huvudsakligen horisontell vid tiden för fältmätningarna. Lerans geotekniska egenskaper är typiska för "Göteborgslera", se Figur 2. En utförligare beskrivning av grundförhållandena i området kan erhållas ur den RGeo som ingår i Vägverkets Förfrågningsunderlag för Väg E45/E20 Partihallsförbindelsen Objektnummer 423611.



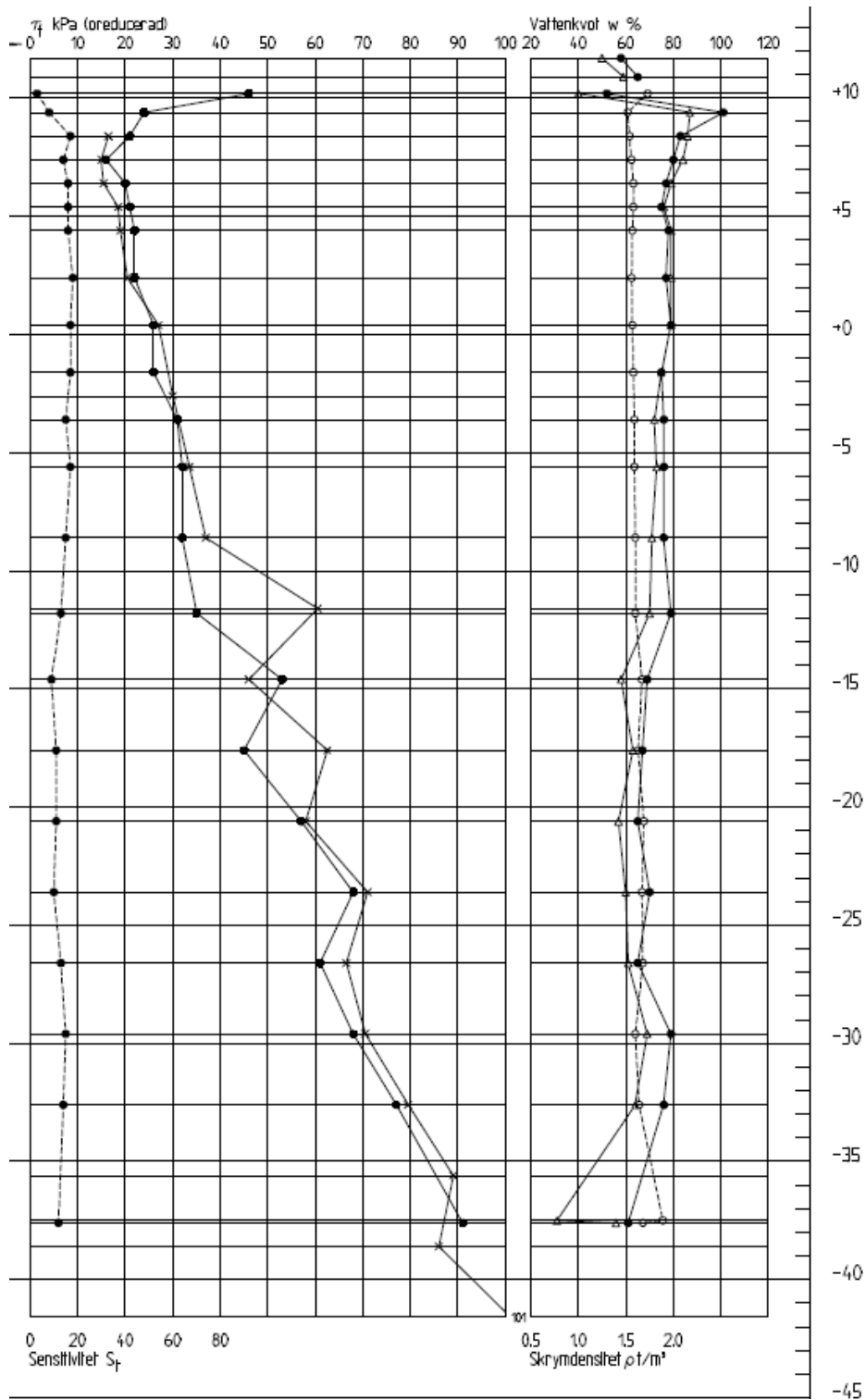
Figur 1. Fotomontage visande den blivande Partihallsbron. Det inringade området visar läget för fältmätningarna.

3.2 Mätuppställning, mätinstrument och mättillfällena

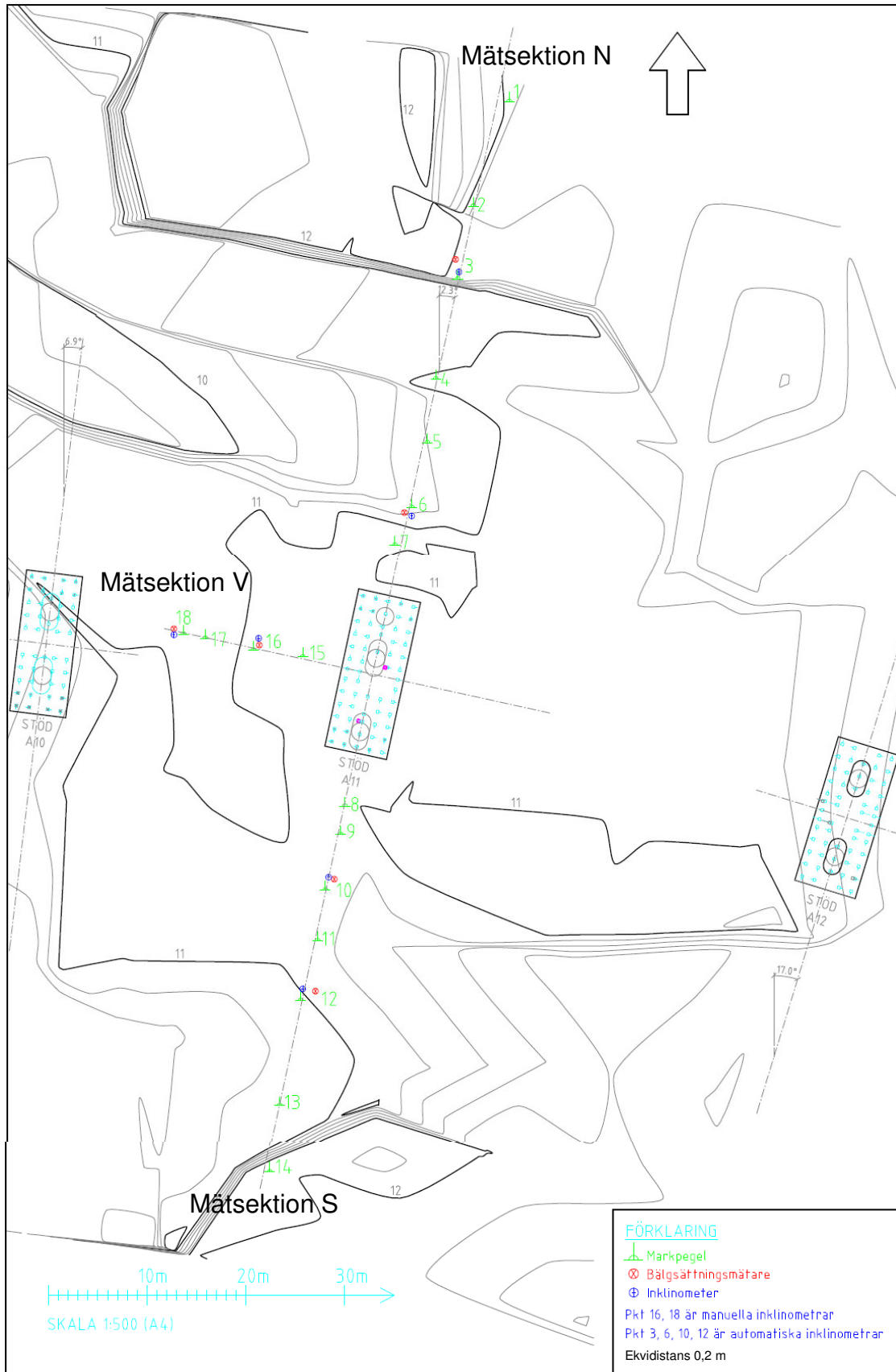
Mätningarna utfördes längs tre sektioner i anslutning till pålningsområdet för blivande brostöd A11, se Figur 3. Inom området utfördes även pålning för brostöden A10 och A12. Rörelserna i markytan mättes mha markpeglar medan rörelserna ned till ca 45 m djup under markytan mättes mha inklinometrar (sidorörelser) och bälgslangar (vertikalrörelser). Totalt installerades 18 st markpeglar, 6 st bälgslangar samt 6 st inklinometrar (varav 4 st automatiska). Instrumenteringen och förhållandena vid fältförsöken framgår översiktligt i Figur 4.

Samtliga mätinstrument "nollmättes" någon eller några dagar innan pålningen i läget för blivande brostöd A11 påbörjades. Under pålningsarbetet utfördes manuella mätningar vid ett flertal tillfällen medan de automatiska inklinometrarna registrerade

mätvärden var 10:e minut. Efter avslutat pålningsarbete utfördes manuella mätningar vid ytterligare några tillfällen under en period av ca 4 månader medan de automatiska inklinometrarna registrerade mätvärden minst en gång per dygn. I samband med att utrustningen i de automatiska inklinometrarna demonterades utfördes manuella mätningar i syfte att kvalitetssäkra de automatiska mätningarna.



Figur 2. Lerans geotekniska egenskaper i anslutning till fältmätningarna.



Figur 3. Instrumentering längs mätsektionerna N, S och V vid brostöd A11.



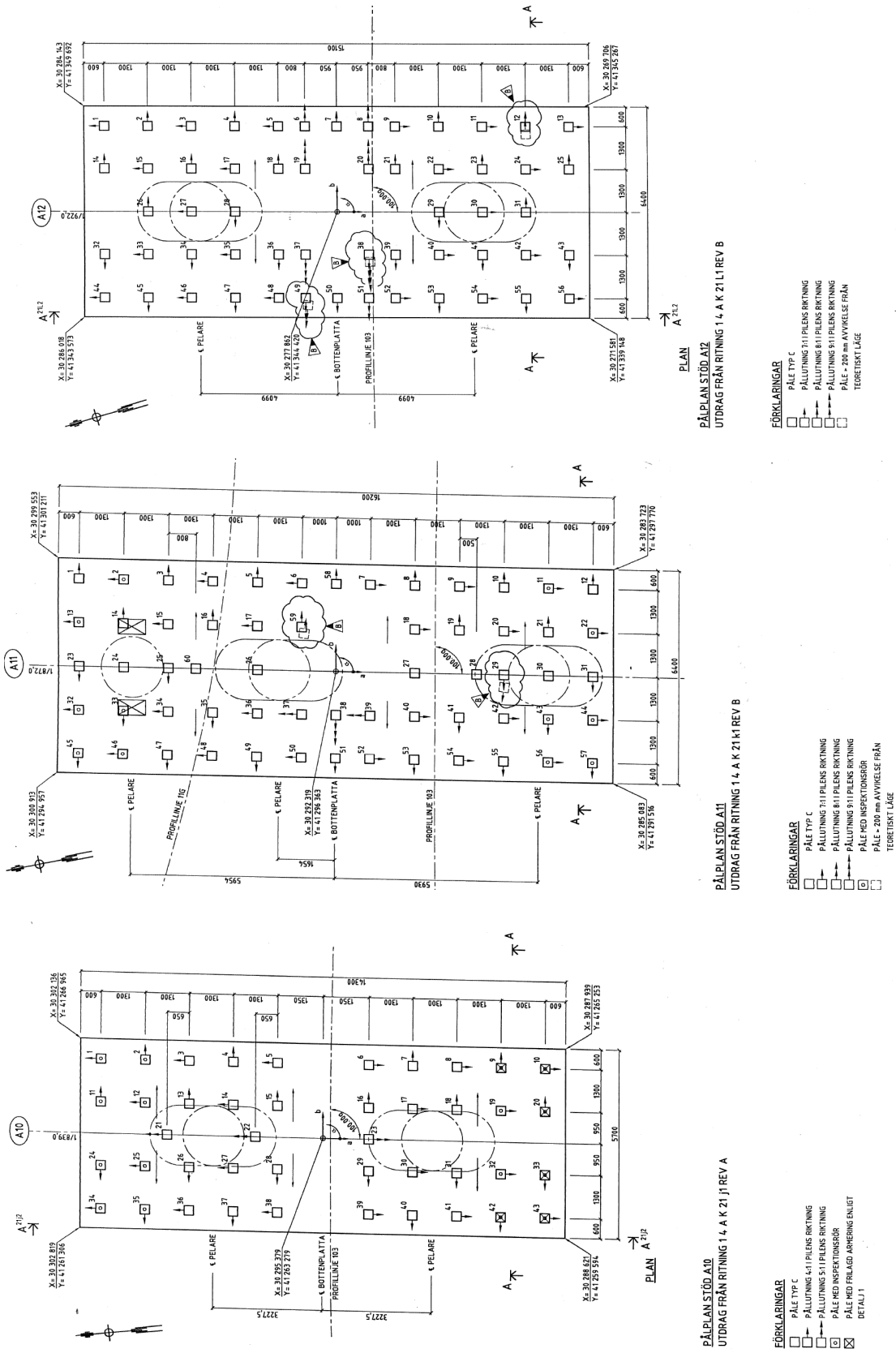
Figur 4. Vy över fältmätningarna vid påslagning för brostöd A11. Till vänster i förgrunden syns gjutformen för brostöd A10.
Cirkelsymboler=lägen för markpeglar
Kvadratsymboler=lägen där såväl markpeglar, inklinometrar som bäglslangar installerats.

3.3 Pålar, pålningsområde och påslagningsordning

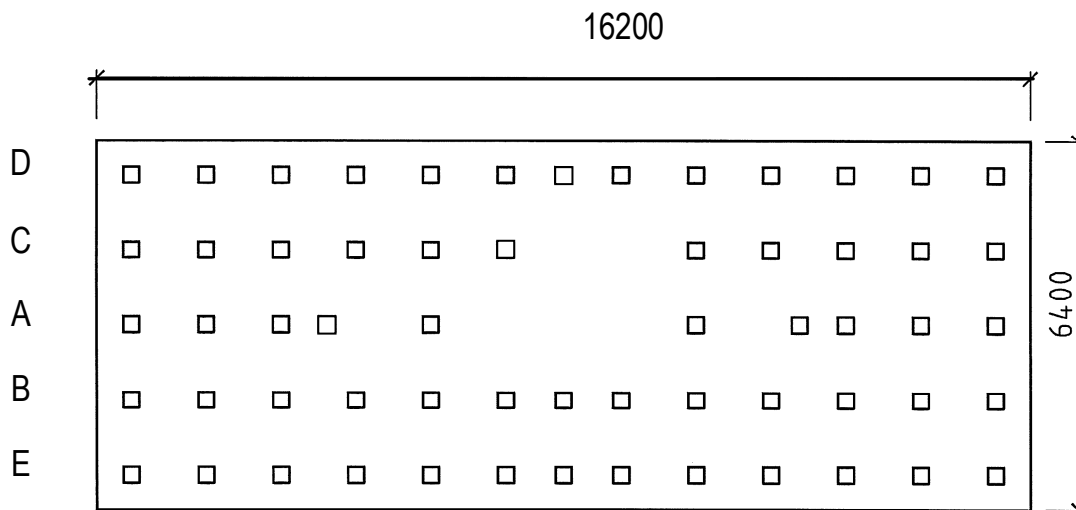
Pålningsarbetet i området utfördes under perioden december 2008 till februari 2009. Pålningen i läget för blivande brostöd A10 avslutades i januari. Därefter genomfördes pålningen för brostöd A11 under en period av ca 2 veckor, varvid huvuddelen av fältmätningarna genomfördes. Av produktionstekniska skäl utfördes även en del av pålningen i läget för blivande brostöd 11 under denna period. Huvuddelen av det pålningsarbetet genomfördes dock i slutet av februari.

Utformningen av pålarna i läget för blivande brostöd A10, A11 och A12 framgår i Figur 5. I läget för blivande brostöd A11, vilket var i fokus under fältmätningarna, installerades 60 st prefabricerade betongpålar. Pålarna är ca 52 m långa, har ett kvadratisk tvärsnitt ($275 \times 275 \text{ mm}^2$) och är installerade med centrumavståndet ca 1,3 m. Flertalet pålar lutar 9:1 till 7:1.

Påslagningsordningen i läget för brostöd A11 utformades i syfte att åstadkomma markrörelser, utanför pålningsområdet, som uppvisar så stor symmetri som möjligt. Därför inleddes pålningsarbetet med pålarna i rad A, därefter pålarna i rad B osv för att avslutas med pålarna i rad E, se Figur 6. Inom varje rad inleddes pålningen i centrum av pålningsområdet varefter den fortsatte söderut för att sedan återgå till centrum för avslutning norrut.



Figur 5. Planritningar visande utformningen av pålarna i läget för blivande brostöd A10, A11 och A12.



Figur 6. Schematisk planskiss visande pålarna i läget för blivande brostöd A11.

3.4 Mätresultat

3.4.1 Inledning

En stor mängd mätdata har genererats ifrån fältmätningarna, inte minst ifrån de automatiska inklinometrarna. Detta har medfört en omfattande hantering och värdering av mätresultaten och deras tillförlitlighet. Här redovisas dock endast de mätdata som bedömts vara relevanta för de analyser som redovisas i efterföljande avsnitt i denna rapport.

De redovisade mätresultaten avser de utbildade rörelserna vid något eller några av mättillfällena 1, 2 eller 3, vilka definieras av antalet installerade pålar, se Tabell 1 och Figur 7.

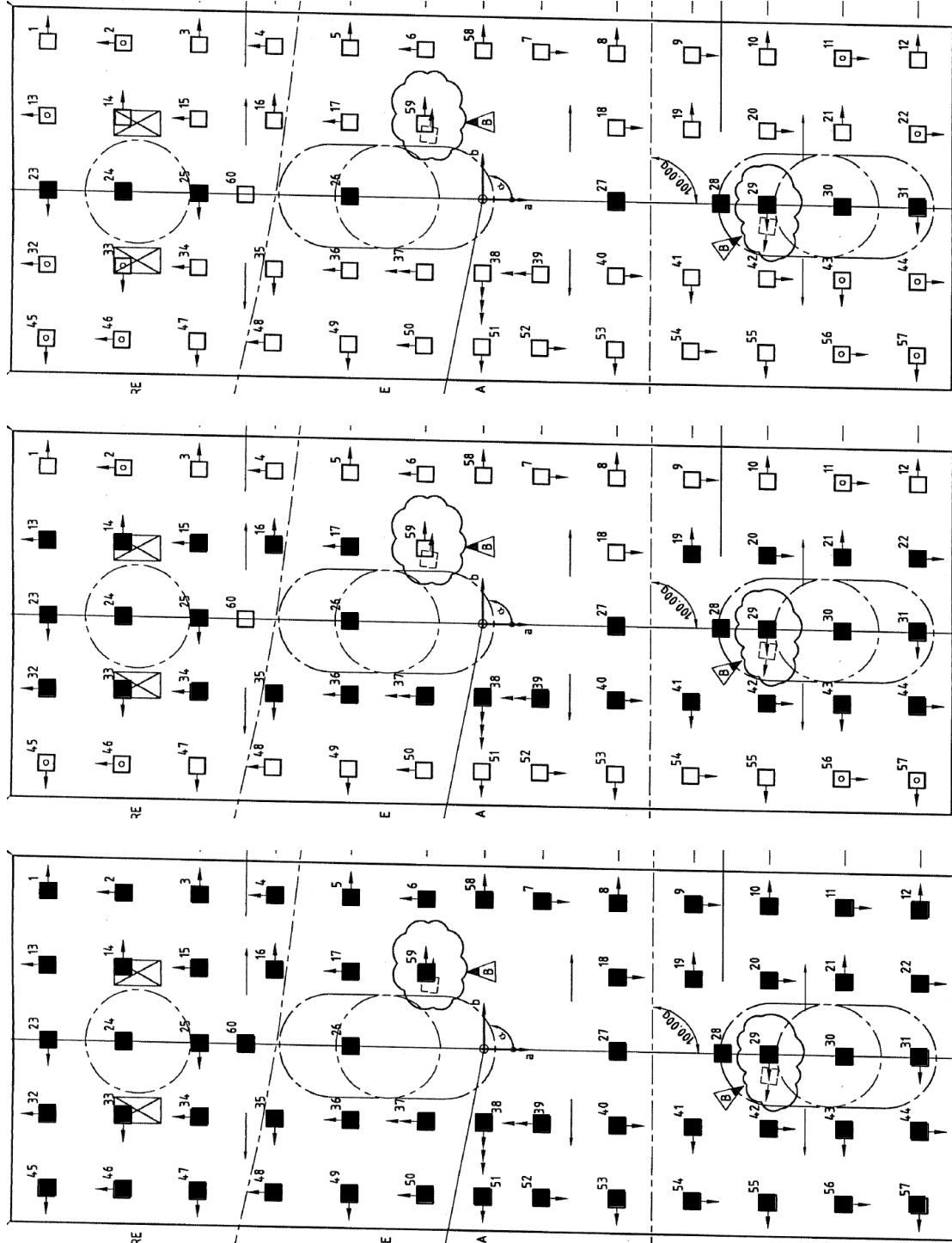
Tabell 1. Installerade pålar vid mättillfälle 1, 2 respektive 3.

Mättillfälle	Antal installerade pålar [st]	Andel installerade pålar [%]	Volym installerade pålar [m ³]
1	9	15	35
2	31	52	122
3	60	100	236

3.4.2 Rörelser i markytan

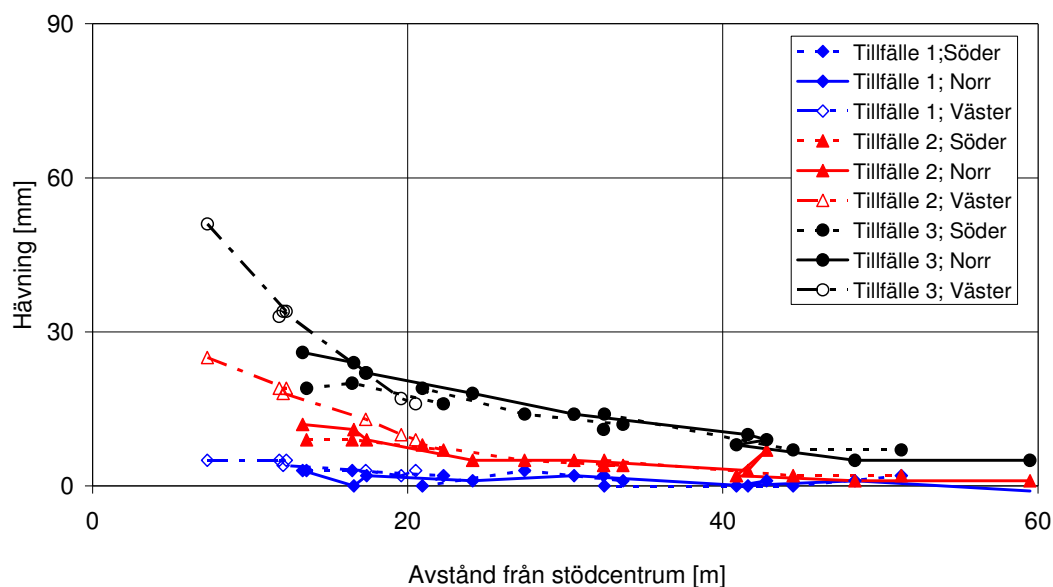
De uppmätta markrörelserna, i form av hävningar samt sidorörelser vinkelrät ut från pålningsområdet i respektive mätsektion, redovisas i Figur 8. De redovisade mätvärdena avser huvudsakligen uppmätt rörelse i toppen av markpeglarna, men i några mätpunkter redovisas även uppmätt rörelse i toppen av bälgslangarna och inklinometrarna. Som förväntat ökar rörelserna i takt med att antalet installerade pålar ökar. Vidare erhålls ungefär lika stora rörelser längs den norra och den södra mätsektionen, vilket även det är som förväntat. De uppmätta rörelserna längs den västra mätsektionen är genomgående något större än längs den norra respektive södra

mätsektionen. Även detta är som förväntat eftersom den västra mätsektionen är förlagd vinkelrätt ut ifrån pålningsområdets långsida medan de andra mätsektionerna är förlagda vinkelrätt ut från pålningsområdets kortsida. Sidorörelsen är större än hävningen i samtliga mätpunkter.

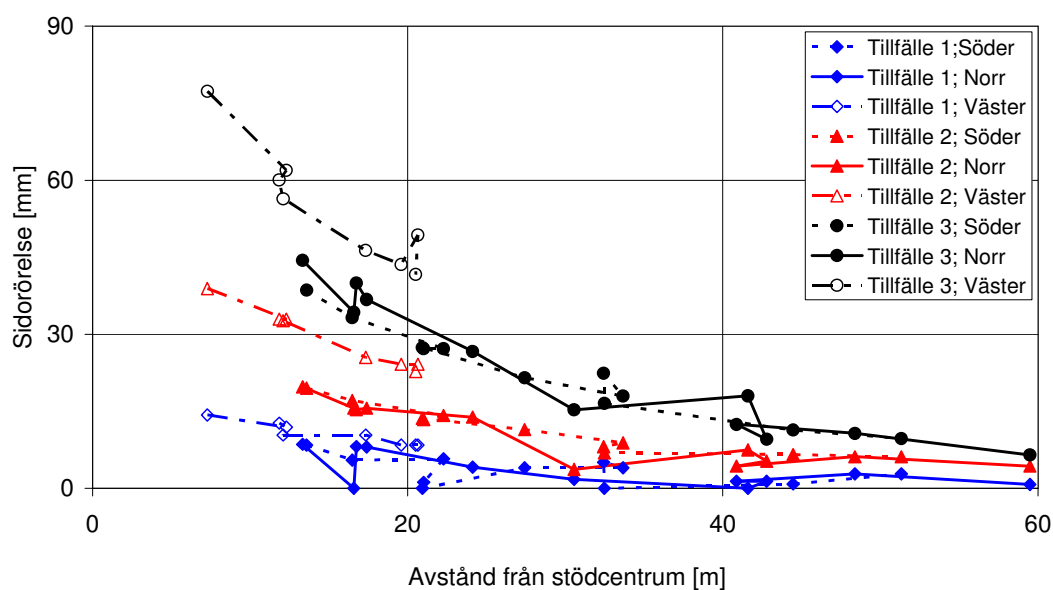


Figur 7. Installerade pålar vid mättillfällena 1, 2 respektive 3.
 Fyllda kvadrater = installerade pålar
 Oofyllda kvadrater = ej installerade pålar.

Norra, södra och västra mätlinjen



Norra, södra och västra mätlinjen



Figur 8. Uppmätta sidorörelser längs mätsektionerna N, S och V vid mättillfällena 1, 2 och 3. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid de olika mättillfällena samt läget för respektive mätsektion.

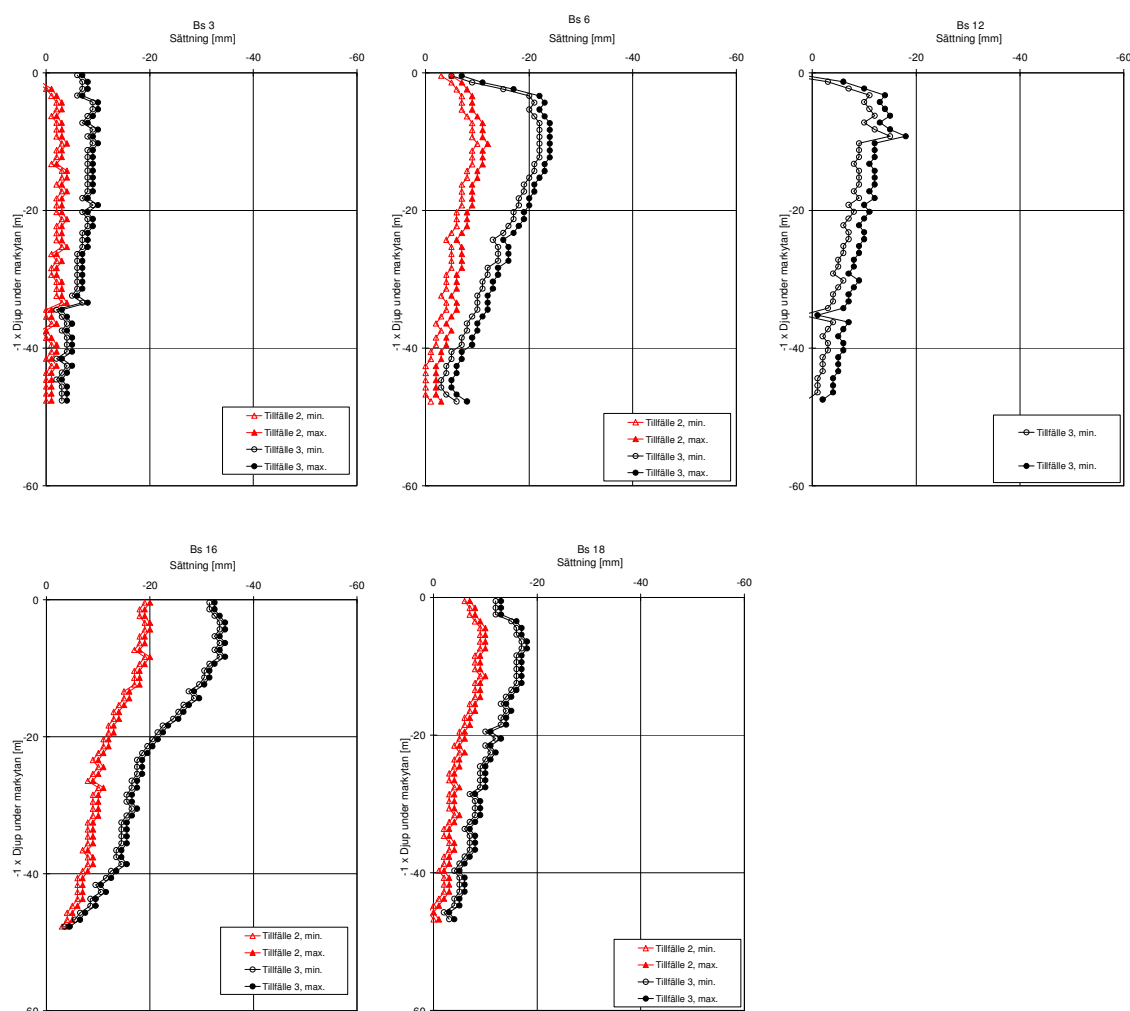
3.4.3 Vertikalrörelser i och under markytan

För bedömning av vertikalrörelsernas storlek under markytan nyttjas mätresultaten från respektive bälgslang. Eftersom bälgslangarna ej når fast botten kombineras mätresultaten från dessa med inmätt vertikalrörelse i överkant av respektive bälgslang samt relevant markpegel och inklinometererrör. Inmätningarna uppvisar dock en viss spridning avseende markhävningen i läget för bälgslangarna, se Figur 8. Därför redovisas genomgående två grafer (bedömd minsta respektive största vertikalrörelse).

Samtliga inclinometermätningar antyder att en viss vertikal kompression utbildas i jordvolymen från markytan ned till ca 4 m djup. Detta bedöms dock huvudsakligen bero på att de uppspända bälgslangarna släpper från kringliggande jord. Vid redovisningen av mätresultaten har därför antagits att vertikallrörelsen på 4 m djup sammanfaller med inmätt vertikallrörelse i markytan.

Utgående från ovanstående förfarande har vertikallrörelserna bedömts vid mättillfällena 2 och/eller 3, se Figur 9. Som förväntat ökar hävningen i respektive mätpunkt i takt med att antalet installerade pålar ökar. Vidare minskar hävningen med ökande avstånd från pålningsområdet. I läget för respektive bälgslang minskar hävningen ungefär linjärt med djupet från ca 4 m djup (som tidigare påpekats avspeglar mätresultaten närmare markytan troligen ej verklig respons).

Bälgslang 12 ingår ej i redovisningen eftersom den antydde sättningar (orimligt), troligen pga att dess överdel trycktes ned i samband med mätningarna.



Figur 9. Bedömd hävning i och under markytan i läget för bälgslangarna 3, 6, 12, 16 och 18 vid mättillfällena 2 och/eller 3. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid de olika mättillfällena samt läget för respektive bälgslang.

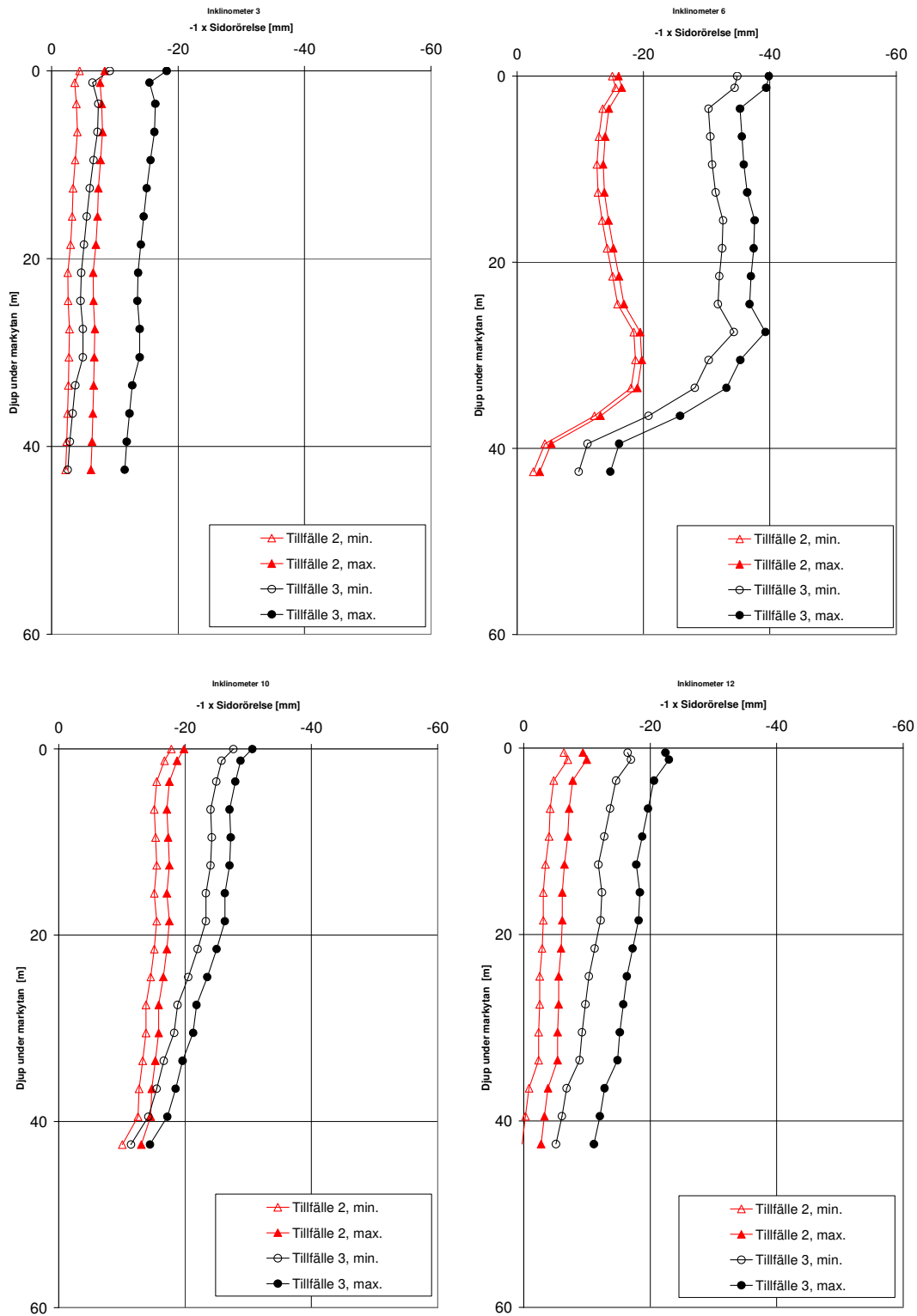
3.4.4 Horisontalrörelser i och under markytan

För bedömning av horisontalrörelsernas storlek under markytan nyttjas mätresultaten från respektive inklinometer. Eftersom inklinometrarna ej når fast botten kombineras mätresultaten från dessa med inmätt horisontalrörelse i överkant av respektive inklinometer samt relevant markpegel och bälgslang. Inmätningarna uppvisar dock en viss spridning avseende horisontalrörelsen i läget för inklinometrarna, speciellt vid mättilfälle 3 vid Inklinometer 3, se Figur 8. Därför redovisas genomgående två grafer (bedömd minsta respektive största horisontalrörelse).

Utgående från ovanstående förfarande har horisontalrörelserna bedömts vid mättilfällena 2 och 3, se Figur 10. Som förväntat ökar horisontalrörelsen i respektive mätpunkt i takt med att antalet installerade pålar ökar. Vidare är horisontalrörelsen störst nära pålningsområdet med en successiv minskning med avståndet från detta.

I läget för respektive inklinometer minskar horisontalrörelsen med ökande djup, med undantag för Inklinometer 6 som är belägen närmast pålningsområdet. I detta läget antyder mätningarna en horisontalrörelse som är ”S-formad”. Motsvarande tendens till ”S-form” kan även skönjas i läget för Inklinometer 10, men ej lika tydligt.

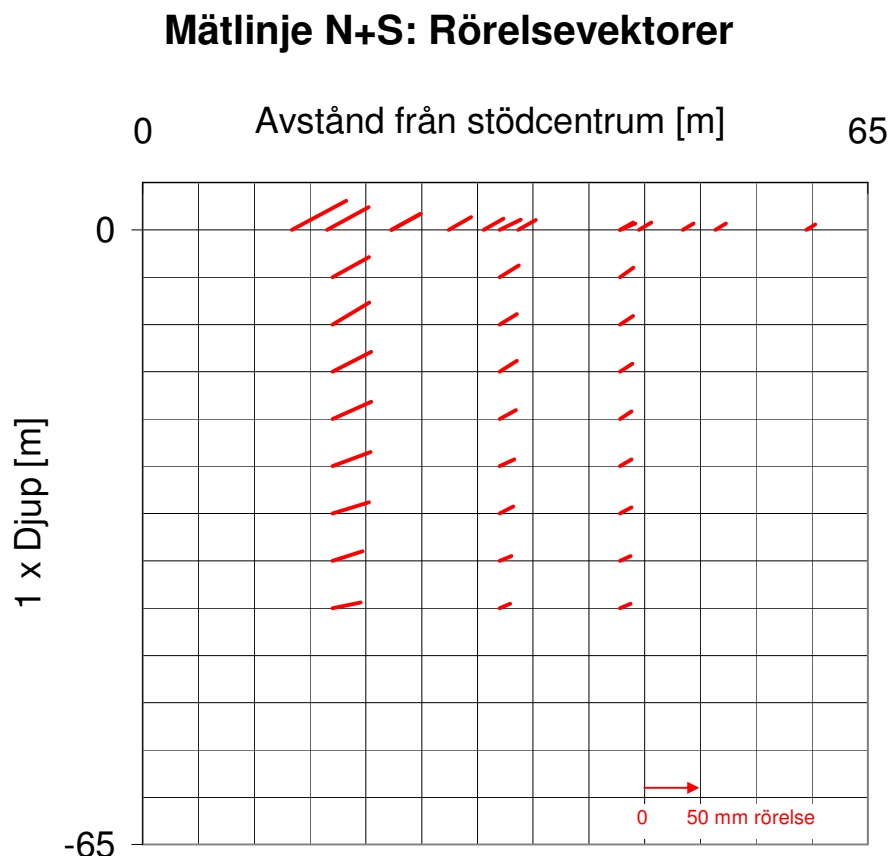
Inklinometrarna 16 och 18 ingår ej i redovisningen eftersom dessa antyder sidorörelser som huvudsakligen är riktade mot pålningsområdet vilket förefaller orimligt. Så vitt kan bedömas beror detta dock ej på presumtiva ”männliga misstag” av typen förväxling av mätpunkter och/eller rörelseriktning.



Figur 10. Bedömd horisontalrörelse i läget för inklinometrarna 3, 6, 10 och 12 vid mättillfällena 2 och 3. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid de olika mättillfällena samt läget för respektive inklinomter.

3.4.5 Rörelsemönster

Mätningarna kan även visualiseras i form av rörelsevektorer i de punkter där såväl de vertikala som horisontella rörelserna/komponenterna uppmätts. Vektorfältet längs den norra/södra mätsektionen då samtliga pålar installerats redovisas i Figur 11. Motsvarande redovisning är ej möjlig längs den västra mätsektionen eftersom tillförlitliga inklinometermätningar saknas där.



Figur 11. Rörelsevektorer längs mätsektionerna N och S vid mättillfälle 3. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid mättillfälle 3 samt läget för mätsektionerna.

3.4.6 Uppskattning av undanträngd jordvolym

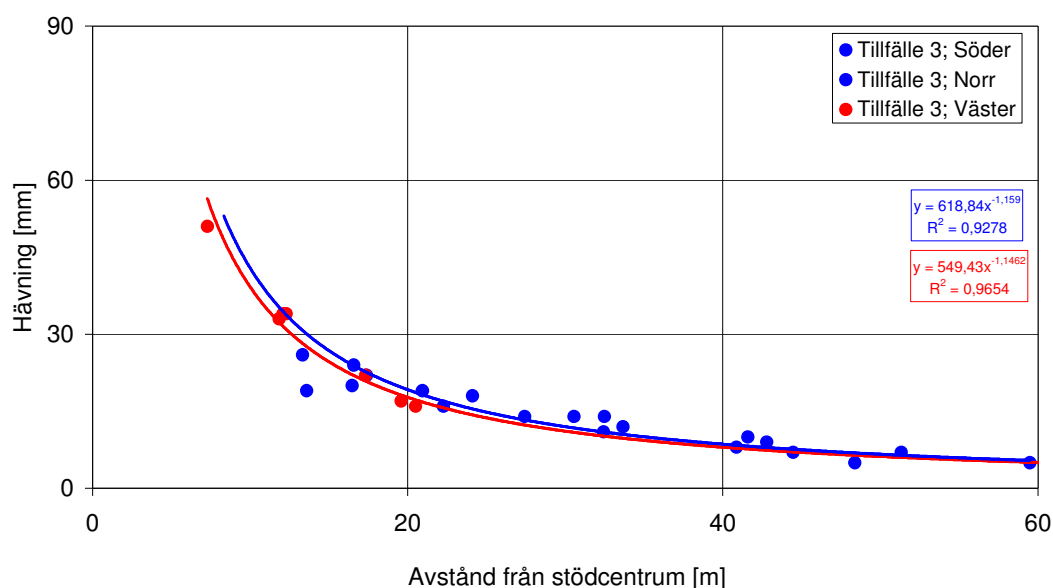
En stor mängd mätningar har utförts, men de är koncentrerade till tre sektioner varav två sektioner, som förväntat, uppvisar mycket likartad respons. En grov uppskattning av hur stor andel av de installerade pålarnas volym som resulterar i markrörelser har dock utförts enligt följande resonemang:

1. Uppmätt hävning längs mätsektion Norr/Syd respektive Väst antas kunna beskrivas mha en potensfunktion, se Figur 12. Orsaken till att en potensfunktion väljs är att den liknar den beräknade respons som erhålls från de FE-analyser och som genomgående visar god överensstämmelse med uppmätt respons, se vidare Avsnitt 5.1.

2. Markytans hävning inom pålningsområdet antas vara konstant och uppgå till medelvärdet av hävningen i kanten på pålningsområdet enligt de två potensfunktionerna i Figur 12.
3. Potensfunktionen avseende mätsektion Norr/Syd antas beskriva hävningen vinkelrätt ut längs hela pålningsområdets kortsida medan potensfunktionen avseende mätsektion Väst antas beskriva hävningen vinkelrätt ut längs hela pålningsområdets långsida.
4. I området ”utanför” pålningsområdet hörn antas att medelvärdet av potensfunktionerna beskriver hur markhävningen varierar med avståndet från hörnet av pålningsområdet
5. Baserat på ovanstående antaganden kan den totala hävningen inom ett avstånd av två pållängder utanför pålningsområdet beräknas till 277 m^3 .
6. Ovanstående värde uppgår till 117 % av totalt installerad volym pålar vid mätfälle 3 (ca 236 m^3 , jfr Tabell 1).

Sammantaget förefaller det som att markhävningen ungefär motsvarar de installerade pålarnas volym. Eftersom leran är mycket lågpermeabel är detta som förväntat.

Norra, södra och västra mätlinjen



Figur 12. Uppmätt markhävning längs mätsektionerna N, S och V vid mätfälle 3 samt kurvanpassning mha potensfunktioner. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid mätfälle 3 samt läget för mätsektionerna.

4 Prognosmetoder

4.1 Inledning

Inför de teoretiska analyserna genomfördes en översiktlig litteraturgenomgång i syfte att få en uppfattning om tidigare publicerade erfarenheter i ämnet. Det kan konstateras att ämnet behandlas i relativt många publikationer.

Mer eller mindre omfattande fältmätningar redovisas bl.a. i Massarsch (1976), Dugan & Freed (1984), Wong & Chua (1999), Pestana et al (2002), Jonsson & Kristiansson (2004), Bradshaw & Baxter (2006) och Svensson (2008).

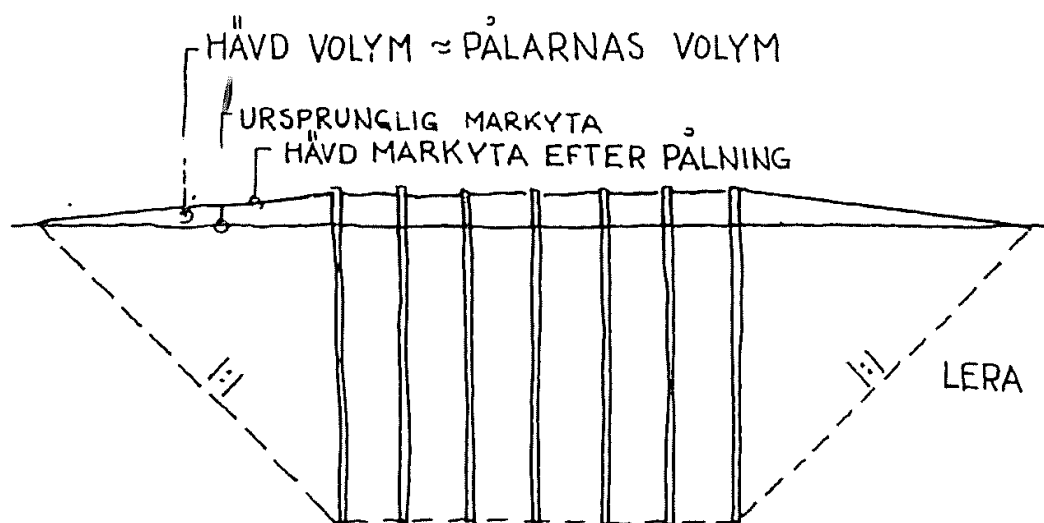
Tänkbara beräkningsmodeller och/eller analysmodeller redovisas exempelvis i Massarsch (1976), Hellman (1981), Sagaseta (1987) och Olsson & Holm (1993) och Pestana et al (2002).

Nedan redogörs för de två beräkningsmodeller (Hellman/Rehnman respektive Sagaseta) som bedöms vara av störst intresse för detta projekt. Båda dessa beräkningsmodeller nyttjades delvis inför fältförsöken, som en del i beslutsprocessen avseende placeringen av mätpunkterna relativt pålningsområdet.

Dessutom redogörs för de numeriska analyser (mha finita elementmetoden – FEM), som utförts i syfte att simulera massundanträngningen vid påslagningen.

4.1.1 Hellman/Rehnman

Denna beräkningsmetod, som är att betrakta som svensk praxis, föreslogs ursprungligen av Hellman (1981) och avsåg då bedömning av markytans hävning till följd av påslagning, se Figur 13. Som framgår (jfr även Figur 14) baseras metoden på att markytans hävning antas ha formen av en ”stympad kon” som sträcker sig motsvarande en pållängd utanför pålningsområdet. Konens volym antas utgöra en viss andel av de installerade pålarnas volym (i lera normalt 100 %).



Figur 13. Modell för bedömning av hävning till följd av påslagning enligt Hellman (1981).

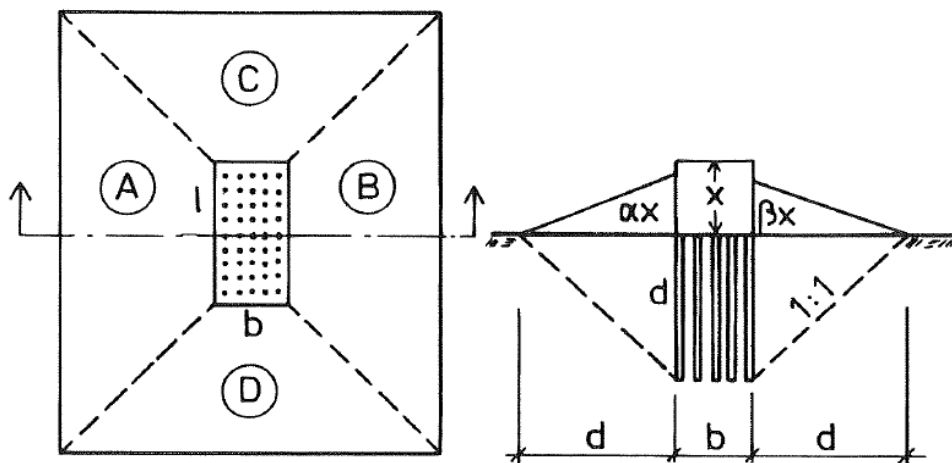
Metoden vidareutvecklades av S-E Rehnman, KTH, och publicerades i Olsson & Holm (1993). Vidareutvecklingen innefattar dels en metod för att beakta effekten av närliggande byggnader med olika relativ tyngd, se Figur 14, dels en metod för att bedöma storleken på sidorörelserna, se Figur 15, varvid sidorörelsen och hävningen antas vara lika stora i markytan. Hävningen kan beräknas enligt ekvation (1).

$$x = \frac{\eta(V_{p\ddot{a}lar} - V_{lerproppar})}{d \left[(\alpha + \beta) \left(\frac{l}{2} + \frac{d}{3} \right) + (\gamma + \delta) \left(\frac{b}{2} + \frac{d}{3} \right) + \frac{b \cdot l}{d} \right]} \quad (1)$$

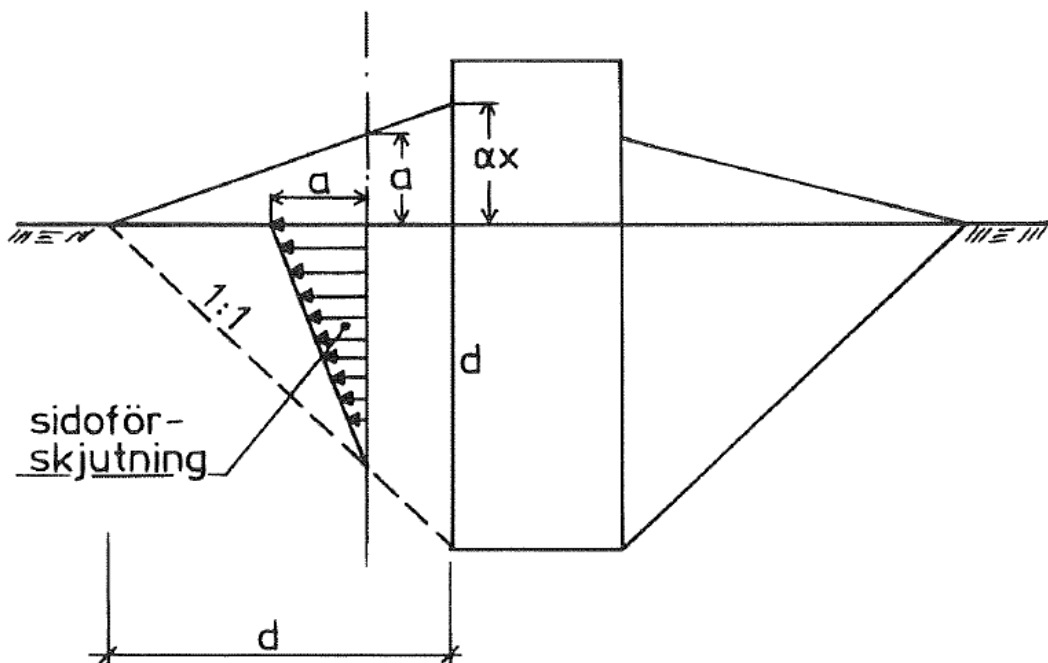
- x = hävningen inom pålningsområdet
- η = hävningsfaktor
- $V_{p\ddot{a}lar}$ = volymen av nedslagna pålar
- $V_{lerproppar}$ = volymen av proppdragen lera
- αx = hävningen närmast pålningsområdet med mothållande faktorer
- βx = hävningen närmast pålningsområdet med mothållande faktorer
- γx = hävningen närmast pålningsområdet med mothållande faktorer
- δx = hävningen närmast pålningsområdet med mothållande faktorer
- d = pållängden
- b = pålningsområdets bredd
- l = pålningsområdets längd

Förhållandena vid fältmätningarna innebär att man kan anta att $\alpha=\beta=\gamma=\delta=1$, $\eta=1$ samt $V_{\text{lerproppar}}=0$ varför ekvation (1) kan förenklas till ekvation (2).

$$x_V = \frac{V}{\frac{4 \cdot d^2}{3} + b \cdot l + b \cdot d + l \cdot d} \tag{2}$$



Figur 14. Modell för bedömning av hävning till följd av påslagning enligt Rehman (Olsson & Holm, 1993).



Figur 15. Modell för bedömning av sidorörelse till följd av påslagning enligt Rehman (Olsson & Holm, 1993).

Tillämpningen av ovan beskrivna modell medför flera oväntade och mindre realistiska effekter:

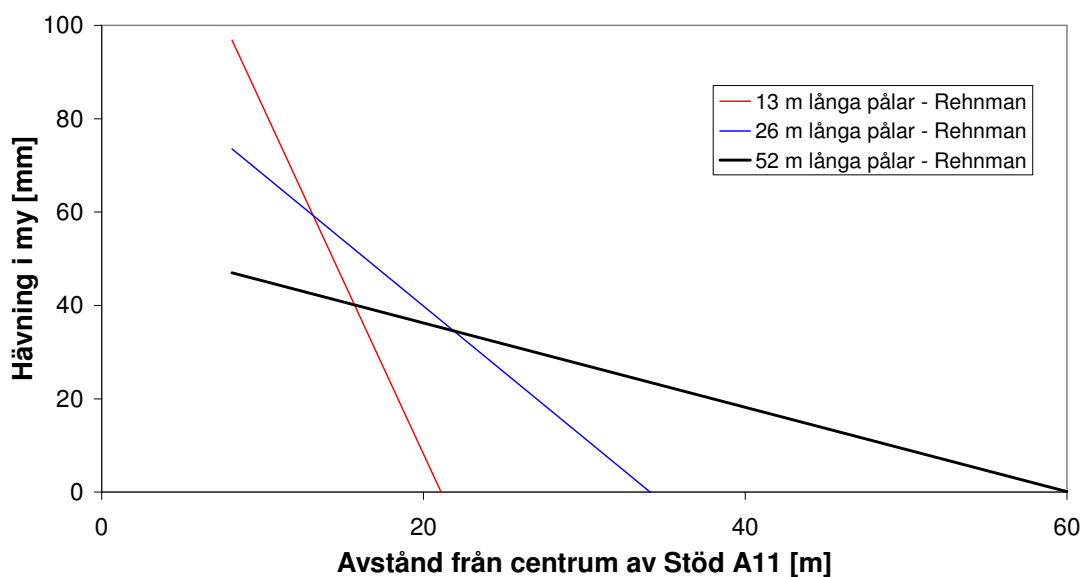
Beräknad hävning och sidorörelse i markytan avtar linjärt med avståndet, medan förväntad respons snarast torde vara en icke linjär minskning med avståndet. Störst förskjutningsgradient kan förväntas omedelbart utanför pålningsområdet och därefter successivt minskande förskjutningsgradient med ökande avstånd från pålningsområdet.

Om ett pålningsområde delas upp i flera delområden och beräkningsmodellen tillämpas för vart och ett av dessa blir den beräknade responsen annorlunda jämfört med om hela pålningsområdet betraktas som ett område. Således gäller ej superpositionering.

Den beräknade maximala hävningen, vilken utbildas i kanten av pålningsområdet, minskar med ökande pållängd. I Figur 16 framgår vad detta skulle innebära vid pålning för ett brostöd med planmått motsvarande det som studerats vid fältmätningarna.

Om beräkningsmodellen för bedömning av sidorörelser tillämpas kan man visa att kvoten mellan den beräknade undanträngda jordvolymen och pålarnas volym varierar med avståndet utanför pålningsområdet. Inom en jordvolym som begränsas av en vertikal begränsningsyta belägen omedelbart utanför pålningsområdet blir kvoten mellan den beräknade undanträngda jordvolymen och pålarnas normalt $\ll 1$ (för Stöd A11 ca 0,26). Denna kvot ökar dock med avståndet från pålningsområdet och blir exakt 1 vid ett avstånd motsvarande en pållängd. Således saknas geometrisk kompatibilitet.

Beräknade markrörelser i Stöd A11



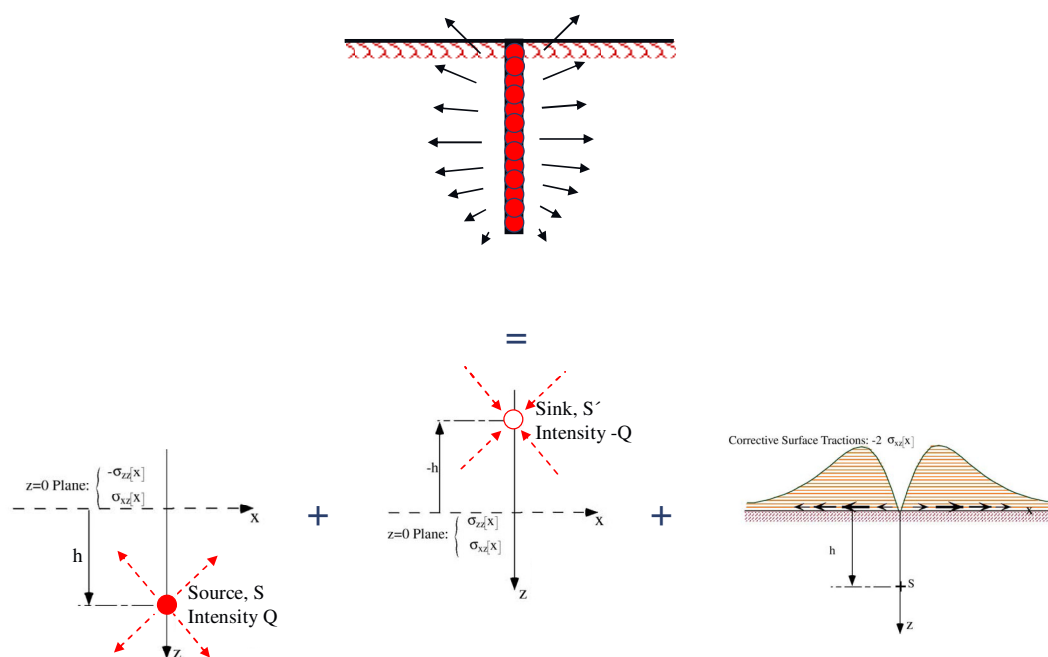
Figur 16. Beräknad hävning i markytan enligt Hellman/Rehman för olika antaganden avseende pållängden i Stöd A11 (verklig pållängd är 52 m).

4.1.2 Sagasetta et. al.

Sagasetta (1987) föreslog en beräkningsmodell som illustreras schematiskt i Figur 17. Enligt denna modell kan en påle som installeras från markytan ersättas av ett stort antal punktformiga källor i läget för pålen. Varje källa pumpar ut vätska som ger upphov till ett sfäriskt flödes- och förskjutningsfält, varvid jorden antas utgöras av ett icke-visköst och inkompressibelt medium med oändlig utbredning.

I syfte att beakta effekten av markytan införs punktformiga brunnar som är förlagda ovanför den tänkta markytan, men i övrigt är identiska med de punktformiga källorna. Den sammanlagda effekten av de punktformiga källorna och brunnarna är ett förskjutningsfält som har egenskapen att inga vertikaltöjningar (och således inga vertikalspänningar) uppkommer i nivå med den tänkta markytan. Däremot uppkommer skjuvtöjningar (och således skjuvspänningar) på denna nivå, vilket är en situation som ej motsvarar en obelastad markyta.

I syfte att uppfylla randvillkoret för en markyta (dvs varken normal- och skjuvspänningar) antas att jorden är linjärelastisk, varvid skjuvspänningarna i nivå med den tänkta markytan är direkt proportionella mot skjuvtöjningarna på denna nivå. Genom att påföra lika stora men motriktade skjuvspänningar i nivå med den tänkta markytan kan det eftersökta randvillkoret (dvs inga skjuvspänningar) uppfyllas. De motriktade skjuvspänningarna ger dock upphov till ytterligare ett förskjutningsfält vilket skall adderas till de tidigare nämnda förskjutningsfälten. För bestämning av det skjuvspänningsgenererade förskjutningsfältet nyttjas ekvationer som tagits fram av Cerruti då han analyserade effekten av en horisontalkraft verkande på ytan av ett halvoändligt linjärelastiskt medium (principen är snarlik den som Boussinesq nyttjade då han analyserade effekten av en vertikalkraft verkande på ytan av ett halvoändligt elastiskt medium).



Figur 17. Schematisk illustration av beräkningsmodell enligt Sagasetta (1987).

Det visar sig att det resulterande förskjutningsfältet är oberoende av storleken på elasticitetsmodulen, men de resulterande ekvationerna saknar en analytisk lösning för beräkning av rörelserna under markytan. Sagasetta et al (1997) redovisar dock ett beräkningsschema som kan nyttjas för numerisk lösning i detta fall. När det gäller rörelserna i markytan finns dock en analytisk lösning avseende den horisontella (radiella) respektive vertikala markrörelsen, δ_r respektive δ_v , till följd av installationen av en enskild påle:

$$\delta_r = \frac{R^2}{2} \cdot \frac{L}{r \cdot \sqrt{r^2 + L^2}} \quad (3)$$

$$\delta_v = -\frac{R^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + L^2}} \right) \quad (4)$$

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.

4.1.3 FE-analys

Finita element metoden (FEM) är en numerisk lösningsmetod som allt oftare används för analys av rörelser och påkänningar i diverse geotekniska sammanhang. Metoden har även nyttjats inom ramen för detta projekt, varvid fokus legat på att ta fram en metodik som möjliggör en praktiskt tillämpbar FE-analys som leder till nöjaktiga resultat.

En första förenkling är att anta att jorden uppför sig linjär-elastiskt, varvid storleken på elasticitetsmodulen ej är av betydelse för de utbildade rörelsernas storlek eftersom påslagningen motsvarar ett randvillkor av ”förskjutningstyp”. Schablonmässigt har dock elasticitetsmodulen tilldelats värdet 10 MPa. Vidare kan tvärkontraktionstalet 0,495 ansättas eftersom jorden är i det närmaste inkompressibel. Jämförande beräkningar har även visat att de enskilda pålarna kan ersättas med ett fåtal ”superpålar” som var och en ersätter ett stort antal verkliga pålar. En mer detaljerad beskrivning av detta analysförfarande ges i Avsnitt 4.2.3 och som framgår fungerar dessa förenklingar utmärkt så länge rörelserna en bit utanför pålningsområdet är av intresse.

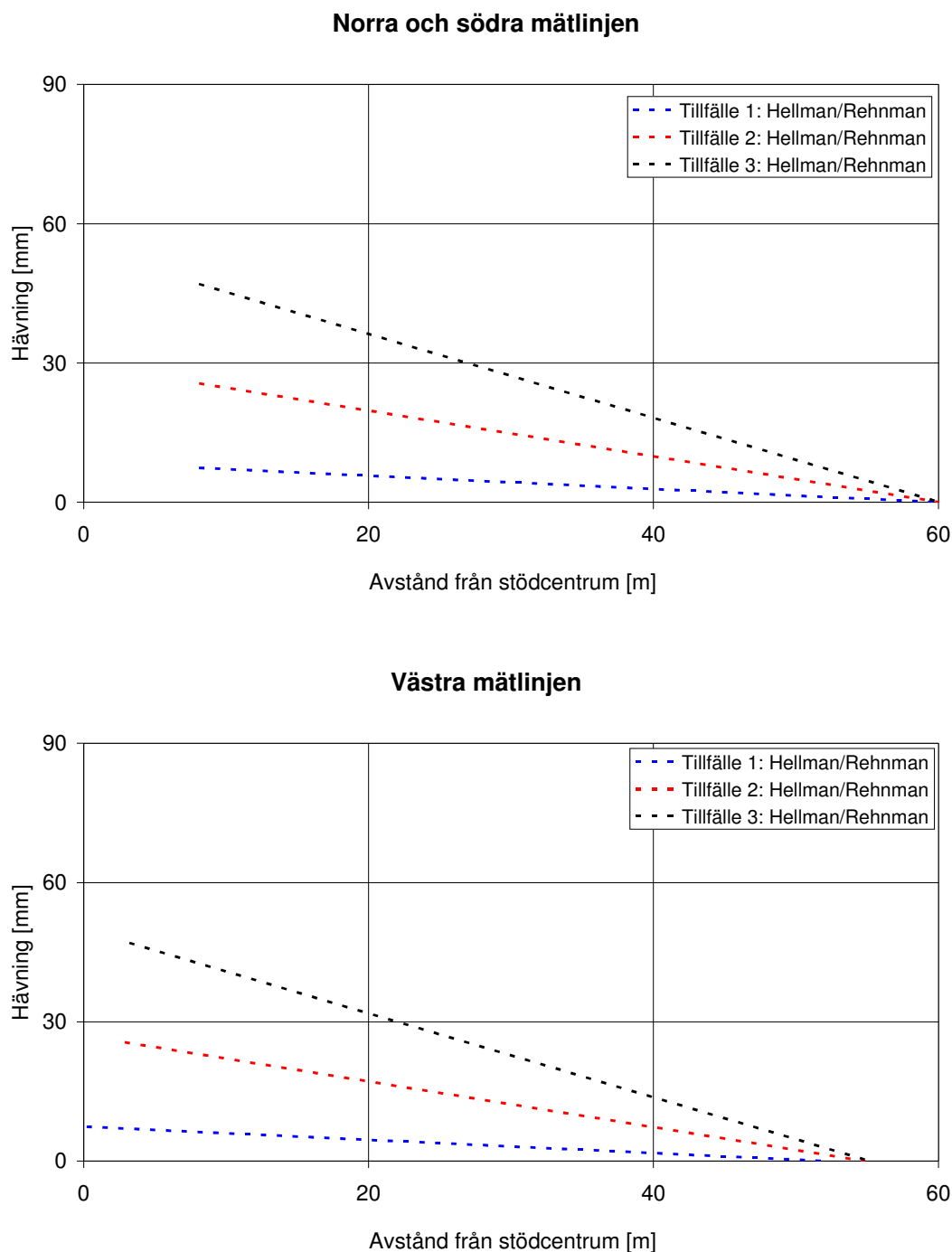
FEM kan tillämpas i syfte att simulera massundanträngning vid påslagning under mer generella förhållanden än de tidigare beskrivna Hellman/Rhenman- och Sagasetta-metoderna. Några sådana hypotetiska situationer har därför studerats, se Avsnitt 6.

Mjukvaran PLAXIS 3D Foundation, Version 2.0 och dess ”volumetric strain funktion” för simulering av påslagningen (Brinkgreve, 2007) har genomgående använts vid FE-analyserna.

4.2 Simulering av fältmätningarna

4.2.1 Hellman/Rehman

Rörelserna i markytan har beräknats enligt Avsnitt 4.1.1 för mättillfällena 1, 2 och 3. Vid alla tillfällena är pålningsområdets längd lika stor medan dess bredd successivt ökar. Beräknad hävning och sidorörelse längs mätsektionerna N, S och V framgår av Figur 18.



Figur 18. Beräknad hävning och sidorörelse längs mätsektion V vid mättillfällena 1, 2 och 3 enligt Hellman/Rehman-metoden. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid olika mättillfällena samt läget för mätsektionerna.

4.2.2 Sagasetta et. al.

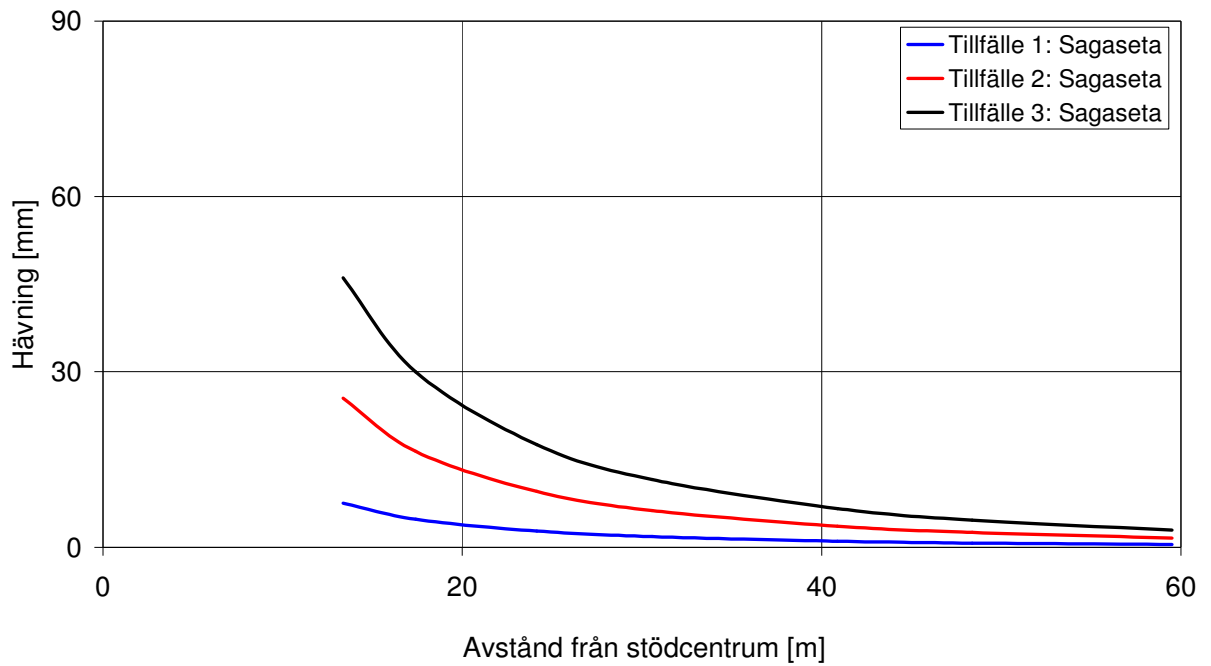
Rörelserna i markytan har beräknats enligt Avsnitt 4.1.2 för måttillfällena 1, 2 och 3. Beräknad hävning och sidorörelse längs mätsektionerna N, S och V framgår av Figur 19 respektive Figur 20.

Även rörelserna under markytan har beräknats enligt Avsnitt 4.1.2, varvid det tidigare nämnda beräkningsschemat nyttjats för numerisk lösning av de underliggande ekvationerna i läget för bäglanglarna och inklinometrarna, se Figur 21.

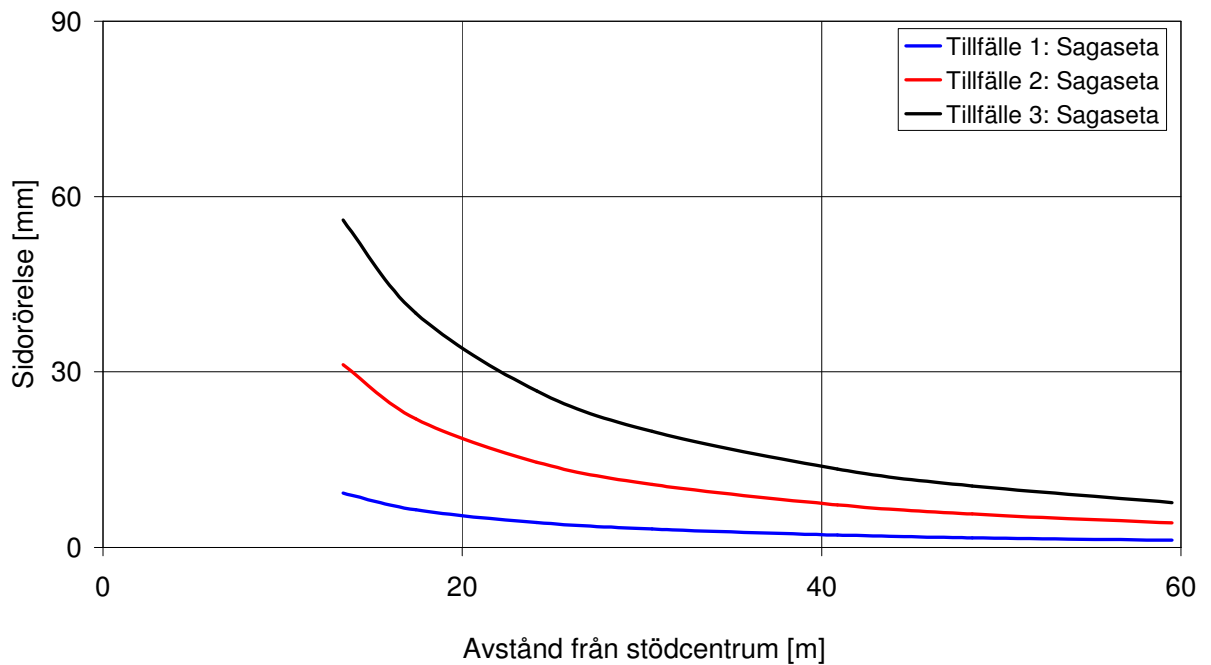
Möjligheten att förenkla tillämpningen av Sagasetta-metoden har studerats, varvid ett fåtal superpålar har fått representera pålningsområdet. Studien antyder att det, ur praktisk synvinkel, är möjligt att förenkla analysen till att endast omfatta 3 st ”superpålar”. Respektive superpåle placeras i centrum för den kvadratiske delpålggrupp som den ersätter, medan dess tvärsnittsarea uppgår till summan av tvärsnittsarean hos de pålar som ingår i delpålggruppen. Som framgår i Figur 22 är denna förenkling fullt acceptabel i aktuellt fall eftersom fokus ligger på hur markrörelserna utbildas en bit utanför pålningsområdet.

Som framgår av Avsnitt 3.3 slås flertalet pålar med lutning. Vid jämförelserna mellan uppmätt och beräknad respons, se Avsnitt 5, har dock förutsatts vertikala pålar med ett planläge motsvarande ök påle. I syfte att få en uppfattning om effekten av beräkningsmässigt beakta respektive inte beakta de lutande pålarna har kompletterande Sagasetta-analyser (superpålar) utförts, varvid pålarnas läge istället baseras på centrum för uk respektive påle. Som framgår i Figur 23 är skillnaden mellan de två betraktelsesätten relativt måttlig.

Norra och södra mätlinjen

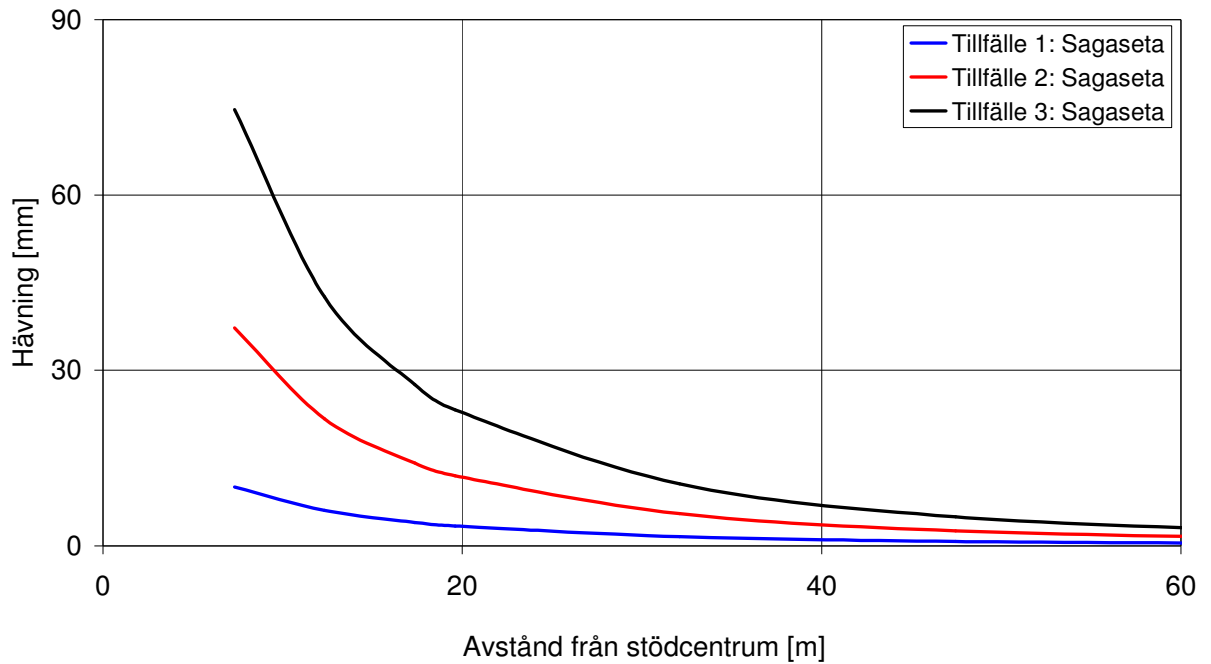


Norra och södra mätlinjen

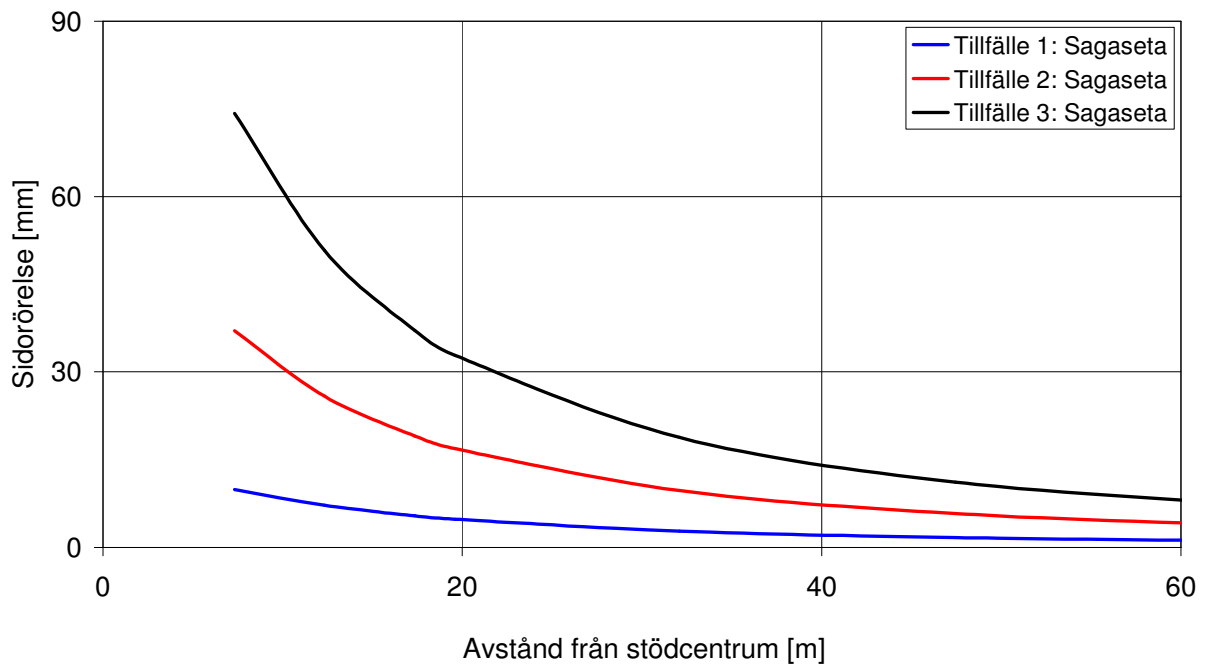


Figur 19. Beräknad hävning och sidorörelse längs mätsektionerna N och S vid mättillfällena 1, 2 och 3 enligt Sagasetta-metoden. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid olika mättillfällena samt läget för mätsektionerna.

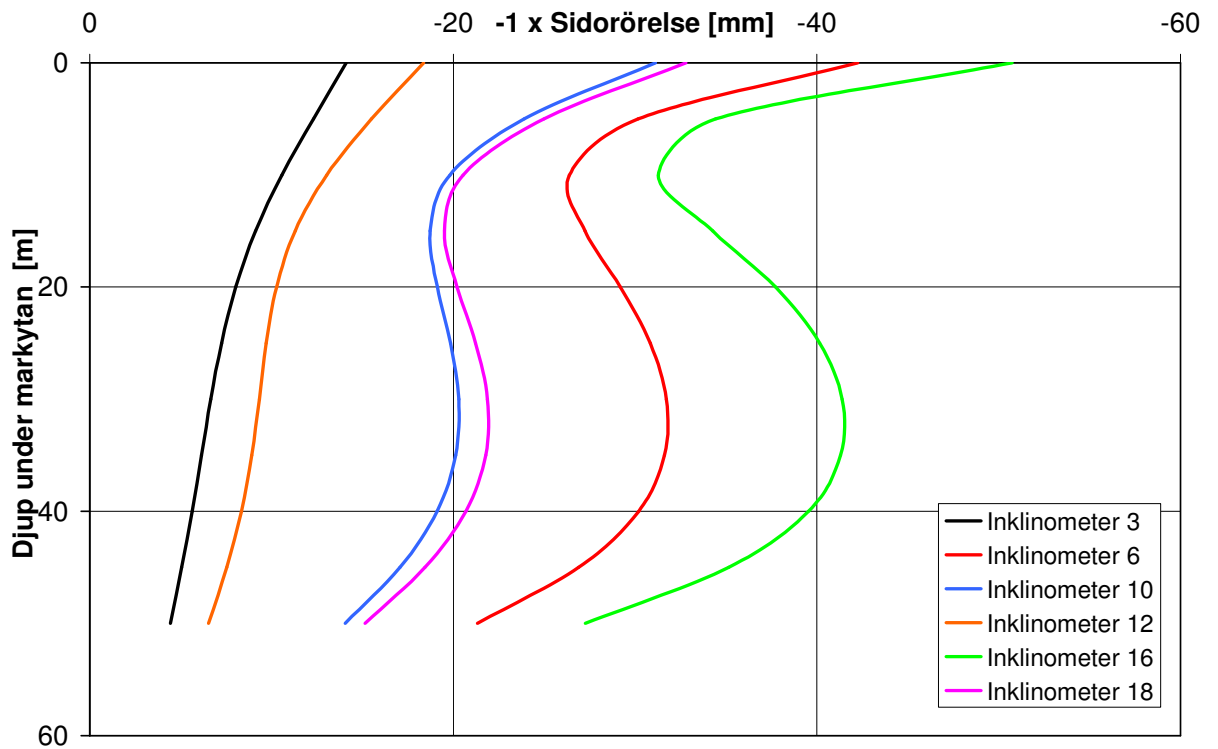
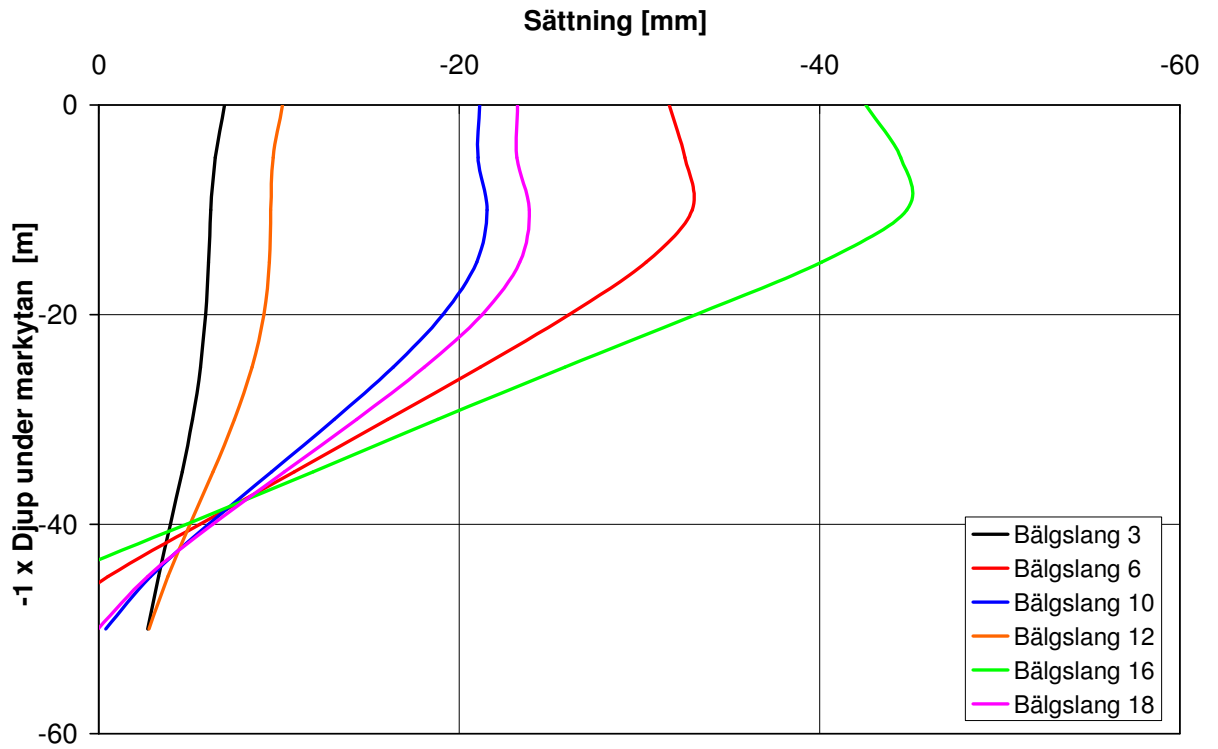
Västra mätlinjen



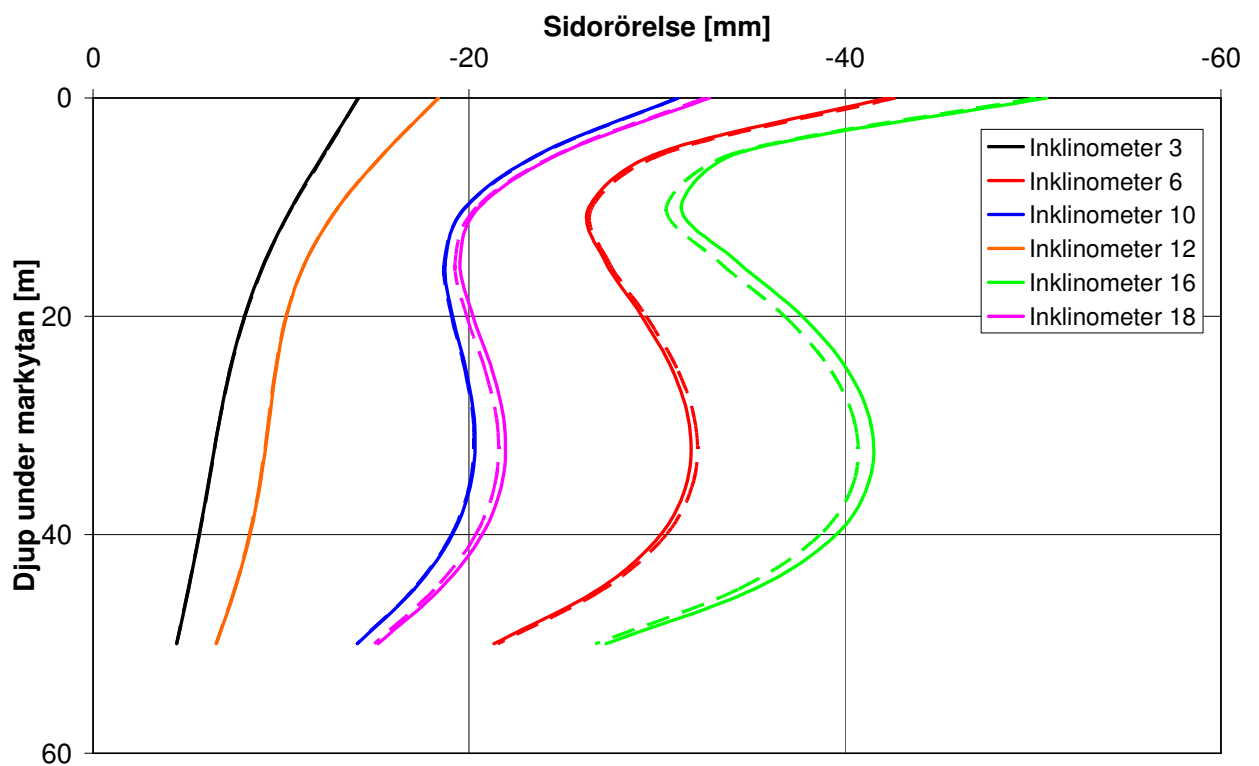
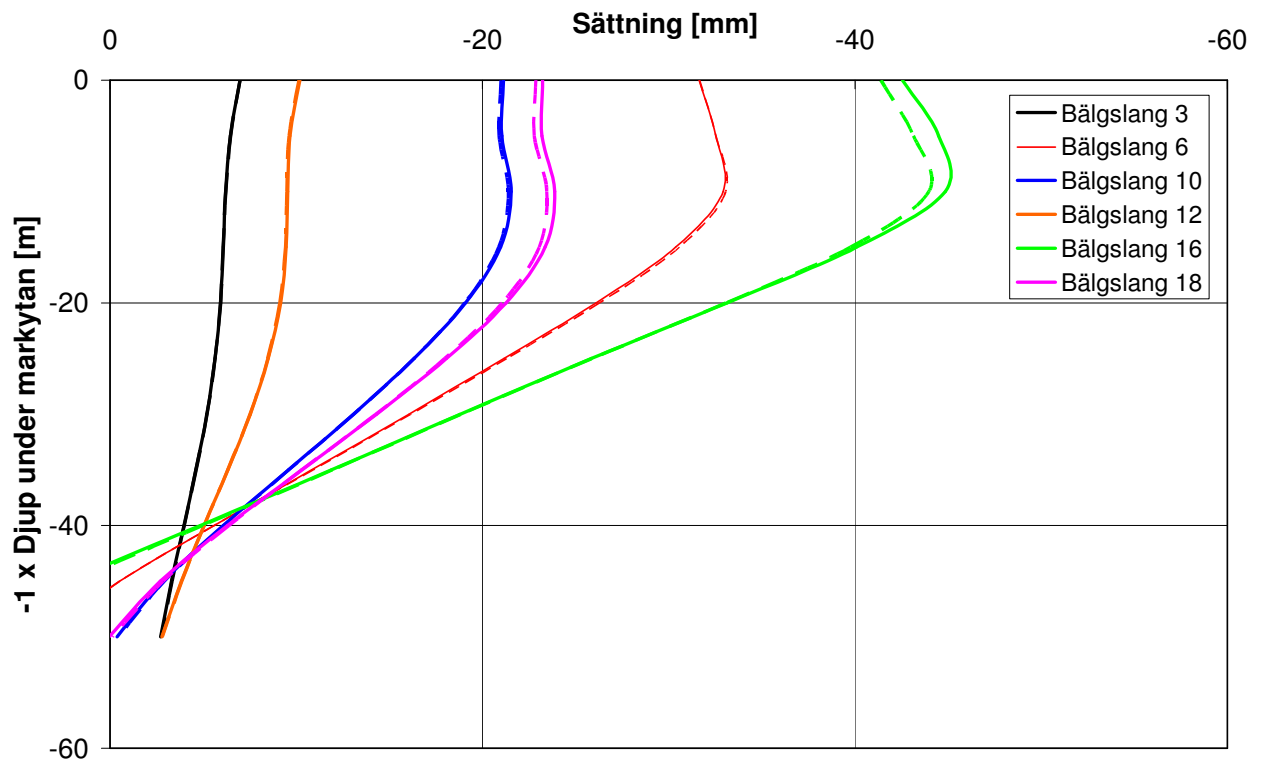
Västra mätlinjen



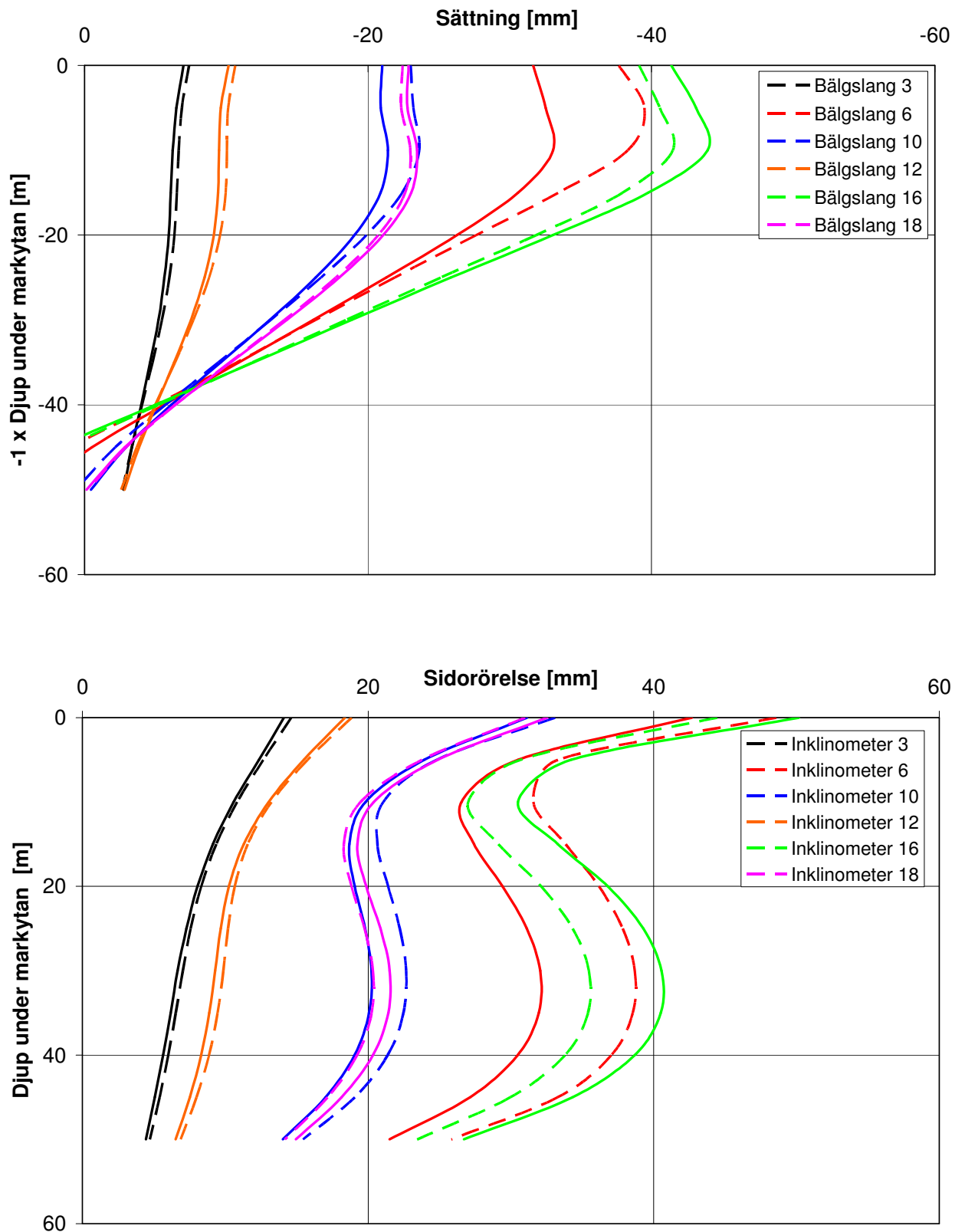
Figur 20. Beräknad hävning och sidorörelse parallellt med mätsektion V, enligt Sagaseta-metoden. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid de olika mättillfällena samt läget för mätsektionerna.



Figur 21. Beräknad hävning och sidorörelse i läget för bälgslangarna och inklinometerarna vid mättilfälle 3 enligt Sagaseta-metoden. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid mättilfälle 3 samt läget för mätsektionerna.



Figur 22. Beräknad hävning och sidorörelse i läget för bälgslangarna och inklinometerarna vid mättilfälle 3 enligt Sagaseta-metoden.
 Heldragna linjer = samtliga pålar simuleras.
 Streckade linjer = 3 st superpålar simuleras.

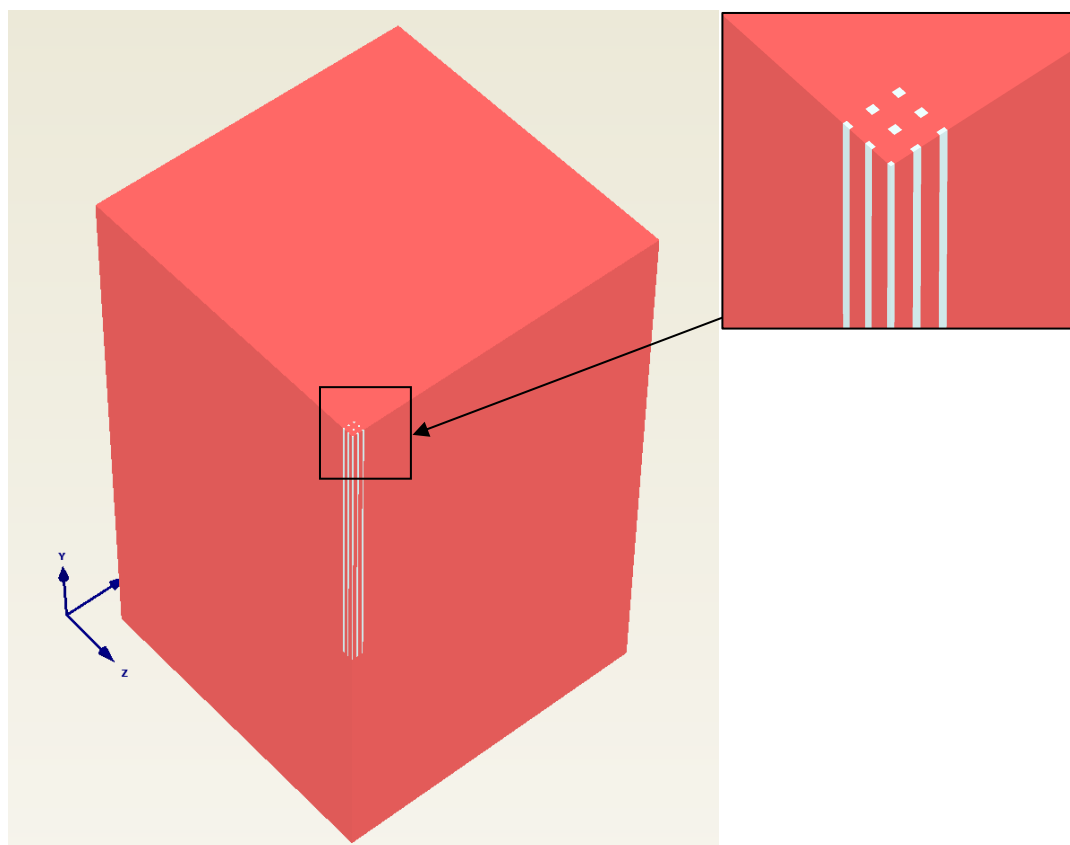


Figur 23. Beräknad hävning och sidorörelse i läget för bälgslangarna och inklinometerarna vid mättillfälle 3 enligt Sagaseto-metoden.
 Heldragna linjer = superpålar med centrum baserat på pålgruppens läge i ök påle.
 Streckade linjer = superpålar med centrum baserat på pålgruppens läge i uk påle.

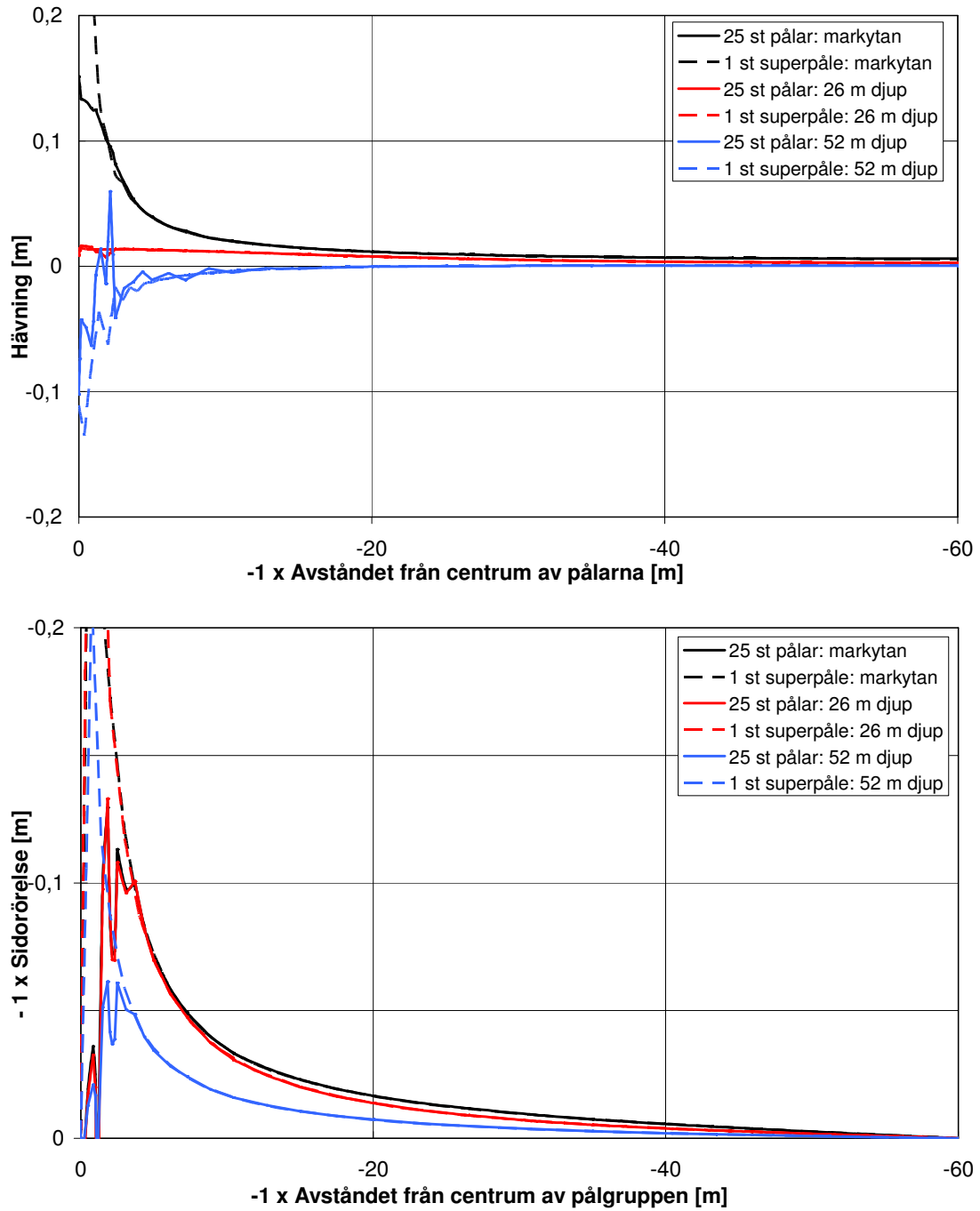
4.2.3 FE-analyser

Baserat på erfarenheter från tillämpningarna av Sagaseta-metoden har flera förenklande antaganden testats i syfte att åstadkomma ett praktiskt tillämpbart analysförfarande. Som framgår av Avsnitt 4.2.2 kan Sagaseta-metoden kombineras med ”superpålar” utan att de beräknade markrörelserna i lägena för mätpunkterna påverkas nämnvärt. Därför utfördes inledande FE-analyser i syfte att bedöma huruvida motsvarande förenkling är tillämpbar även vid de numeriska simuleringarna. Ett flertal scenarier studerades, bl.a. en FE-modell där 25 st pålar, med längden 52 m och tvärsnittet $0,275 \times 0,275 \text{ m}^2$, installerades i ett kvadratisk mönster c/c 1,5 m, se Figur 24. I en alternativ FE-modell ersattes de 25 st pålarna med en centralt placerad ”superpåle” enligt samma princip som i Sagaseta-metoden och som framgår i Figur 25 erhålls mycket likartade markrörelser, så länge fokus ligger på vad som händer en bit utanför pålningsområdet.

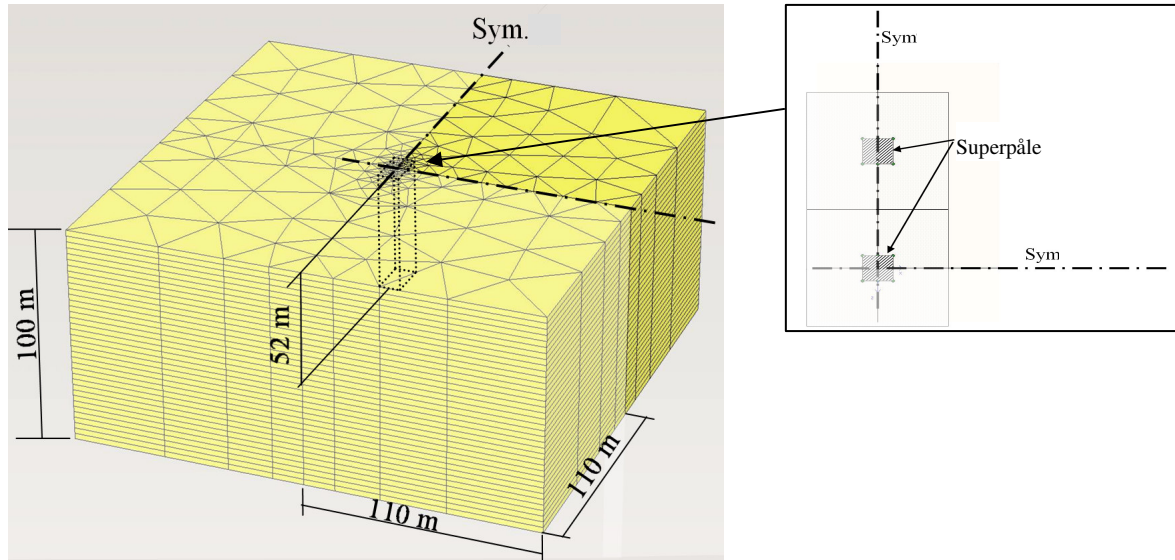
Den FE-modell som slutligen nyttjades redovisas i Figur 26. FE-simuleringarna omfattar endast situationen vid mättillfälle 3, jfr Tabell 1 och Figur 7. Storleken på de beräknade rörelserna i markytan framgår av Figur 27 medan storleken på de beräknade rörelserna i läget för bälgslangar och inklinometrar framgår av Figur 28



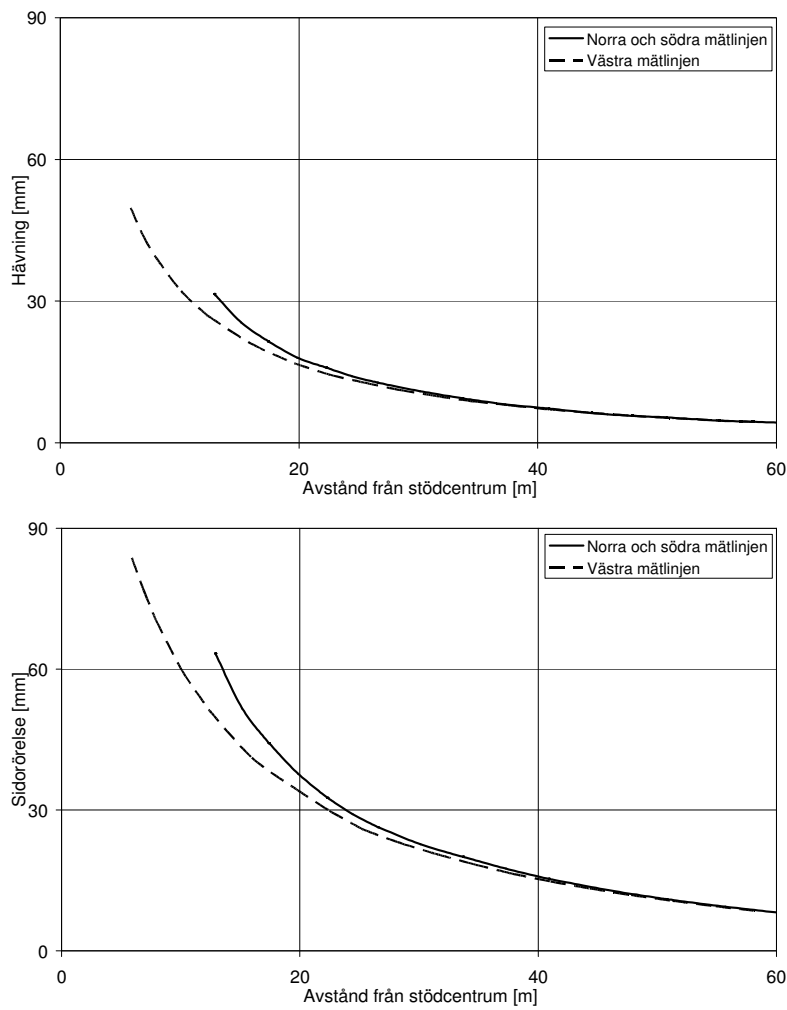
Figur 24. FE-modell inkluderande 25 st pålar (av symmetriskäl behöver endast en kvadrant av geometrin inkluderas i FE-modellen). Den vänstra bilden visar hela FE-modellen medan den högra bilden är en detalj av den centrala delen, där den del av geometrin som tilldelas en volymexpansion är grå medan omkringliggande lera är röd.



Figur 25. Markrörelser vid FE-simuleringar omfattande 25 st pålar respektive 1 st ”superpåle”.

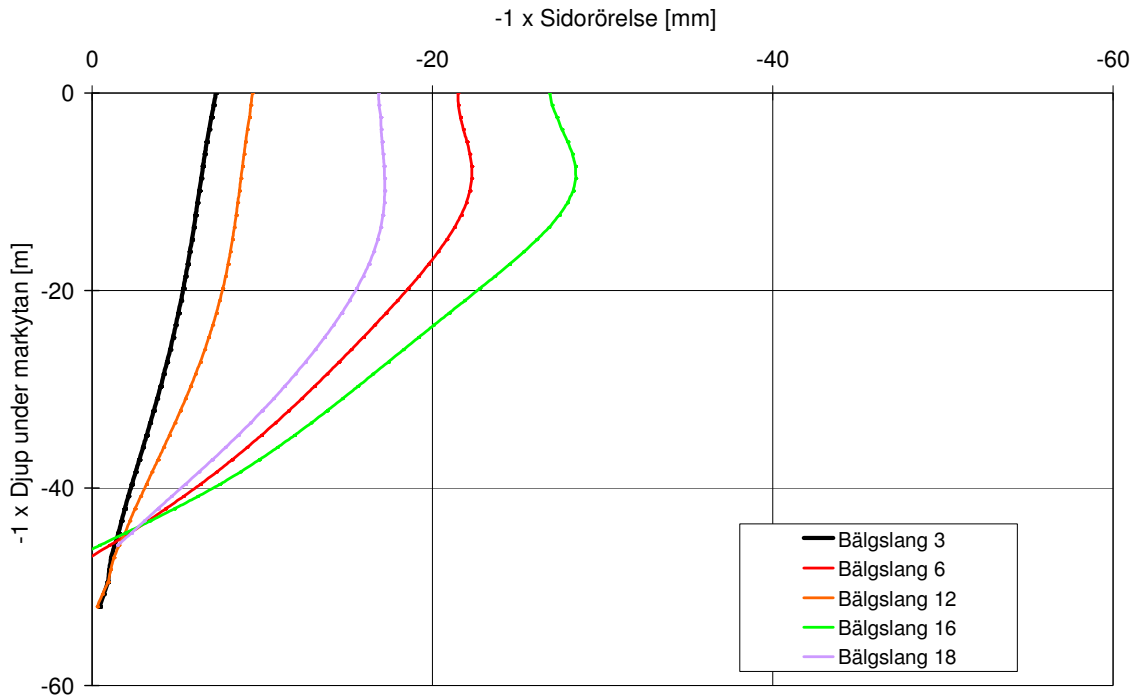


Figur 26. Nyttjad FE-modell, , innefattande 3 st "superpålar", för simulering av fältmätningarna.

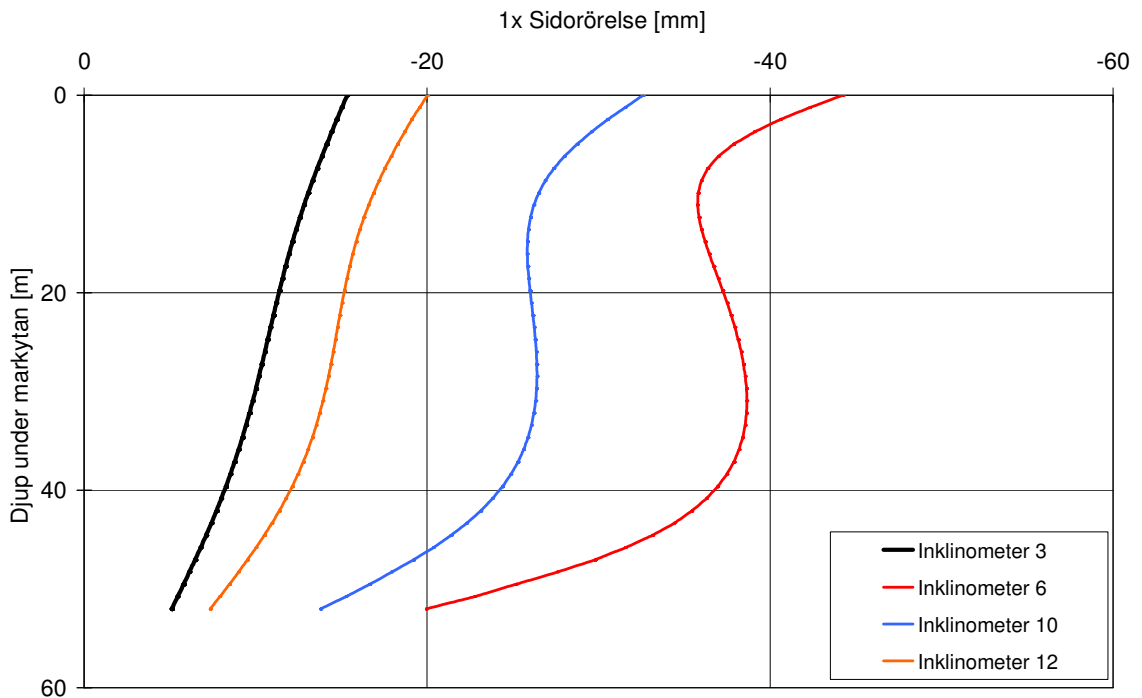


Figur 27. Beräknad hävning och sidorörelse i markytan längs mätsektionerna N, S och V vid mättilfälle 3 enligt FE-analyserna. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid mättilfälle 3 samt läget för mätsektionerna.

FE-beräknade markrörelser vid Mättilfälle 3



FE-beräknade markrörelser vid Mättilfälle 3



Figur 28. Beräknad hävning och sidorörelse i läget för bälgslangar och inklinometrar vid mättilfälle 3 enligt FE-analyserna. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid mättilfälle 3 samt läget för bälgslangarna och inklinometrarna.

5 Jämförelser mellan uppmätta och beräknade markrörelser

5.1 Rörelser i markytan

De uppmätta och beräknade rörelserna i markytan jämförs i Figur 29 och Figur 30. Som framgår resulterar Sagasetametoden och FE-analyserna i beräknade markrörelser som genomgående stämmer väl med de uppmätta rörelserna och hur dessa varierar med avståndet från pålningsområdet. Hellman/Rehnman-metoden resulterar i markrörelser som är av samma storleksordning som de uppmätta rörelserna, men överensstämelsen är betydligt sämre jämfört med de två förstnämnda beräkningsmetoderna. Exempelvis överskattas den Hellman/Rehnman-beräknade hävningen längs den norra och södra mätsektionen, medan sidorörelsen underskattas avsevärt längs den västra mätsektionen, åtminstone i närheten av det pålade området. Detta beror sannolikt på att Hellman/Rehnman-modellen dels ej beaktar att pålningsområdets längd är större än dess bredd, dels ej uppfyller geometrisk kompatibilitet vid beräkning av sidorörelserna.

5.2 Sidorörelser och deras variation med djupet

Den uppmätta och beräknade sidorörelserna i de punkter där tillförlitliga inklinometermätningar erhållits jämförs i Figur 31. Som framgår resulterar Sagasetametoden och FE-analyserna i beräknade sidorörelser som genomgående stämmer relativt väl med hur de uppmätta markrörelserna varierar med djupet. Hellman/Rehnman-metoden resulterar i markrörelser som stämmer relativt väl i markytan, men den beräknade variationen med djupet avviker betydligt från den uppmätta responsen.

5.3 Hävningar och deras variation med djupet

Den uppmätta och beräknade hävningen i de punkter där tillförlitliga bälgslangsmätningar erhållits jämförs i Figur 32. Som framgår resulterar FE-analyserna ånyo i beräknade markrörelser som stämmer väl med de uppmätta rörelserna. Sagasetametoden förefaller att överskatta rörelserna i närheten av pålningsområdet (bälgslangarna 6, 16 och 18), medan överensstämelsen är bättre längre bort från pålningsområdet (bälgslangarna 3 och 12). Motsvarande jämförelse med Hellman/Rehnman-metoden låter sig inte göras eftersom den beräkningsmodellen endast avser markytans hävning. Noterbart är att såväl FE-analyserna som Sagasetametoden antyder en viss kompression i de övre jordlagren i närheten av pålningsområdet. Således kan en viss del av den uppmätta kompressionen i detta område eventuellt avspegla en verklig kompression i jorden. Huvuddelen av den uppmätta kompressionen bedöms dock bero på att bälgslangen släppt från omkringliggande jord, jfr Avsnitt 3.4.3.

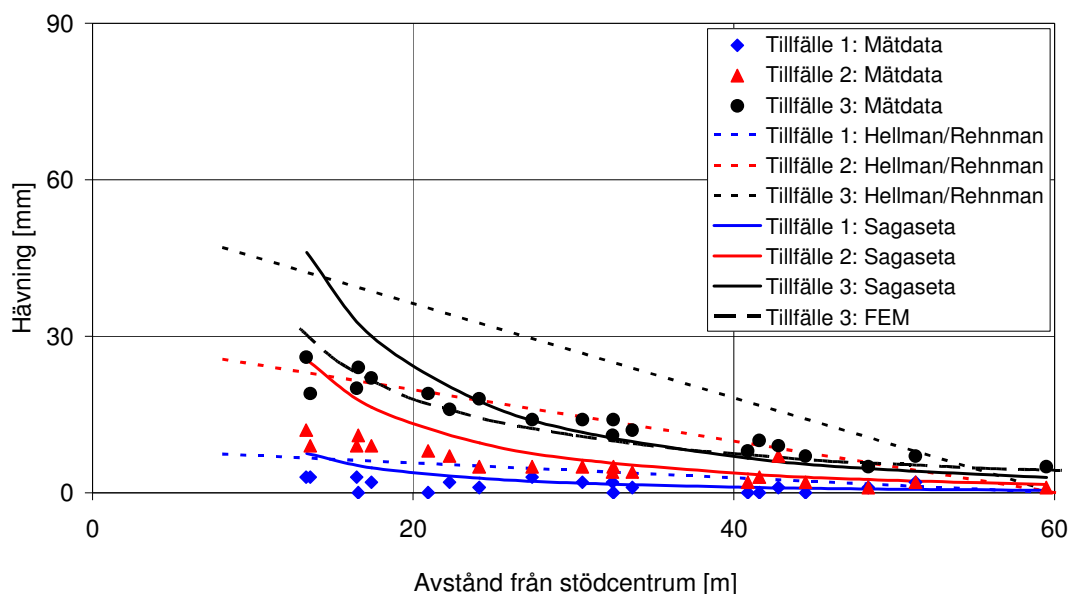
5.4 Rörelsemönster

De uppmätta och beräknade rörelserna kan även visualiseras i form av rörelsevektorer i de punkter där såväl de vertikala som horisontella rörelserna/komponenterna uppmätts. Vektorfältet längs den norra/södra mätsektionen då samtliga pålar installerats redovisas i Figur 33. Som framgår stämmer det FE-beräknade

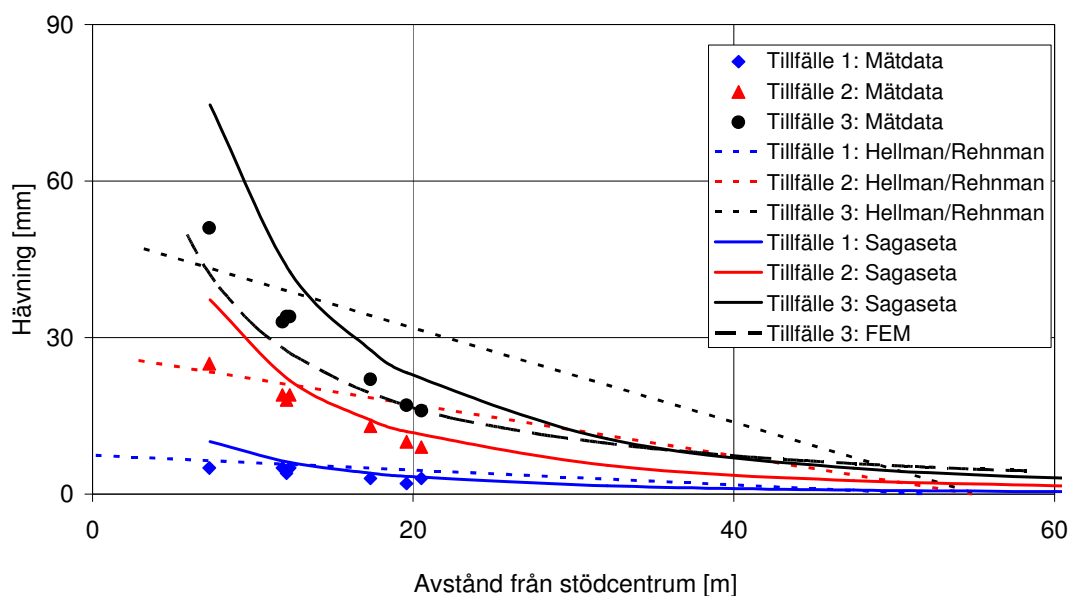
rörelsemönstret mycket väl med det uppmätta rörelsemönstret. Även det Sagaseta-beräknade rörelsemönstret stämmer relativt väl med det uppmätta rörelsemönstret, men hävningskomponenten överskattas i närheten av pålningsområdet, jfr även Figur 32.

Motsvarande redovisning är ej möjlig längs den västra mätsektionen eftersom tillförlitliga inklinometermätningar saknas där.

Norra och södra mätlinjen

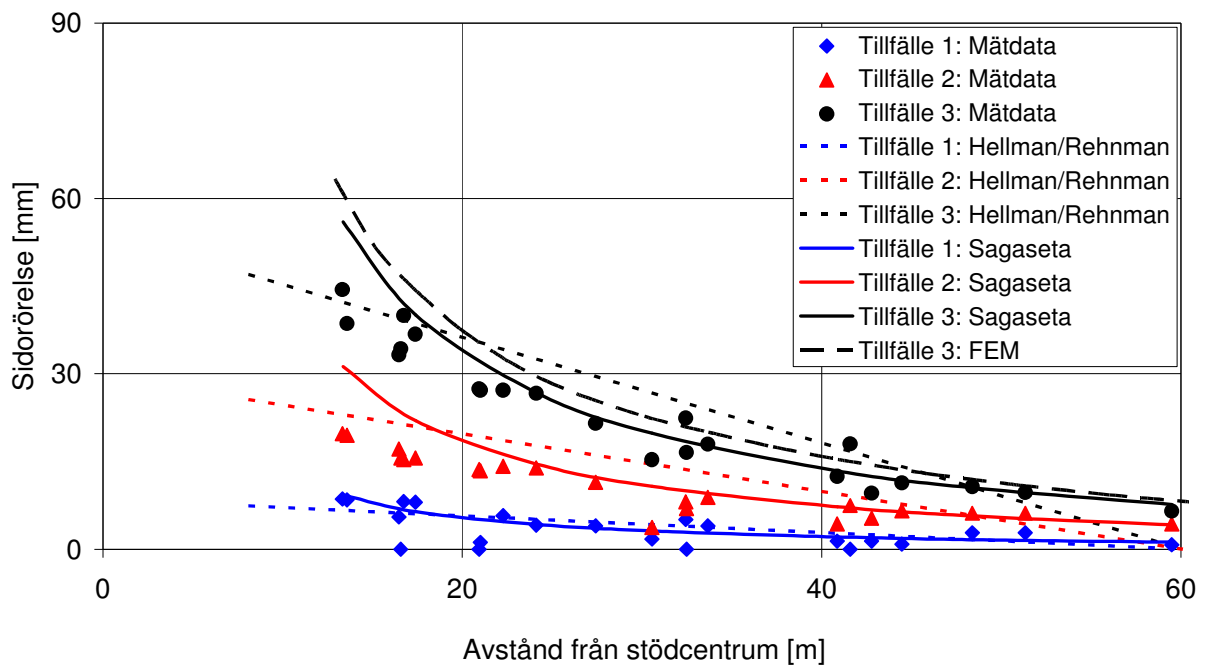


Västra mätlinjen

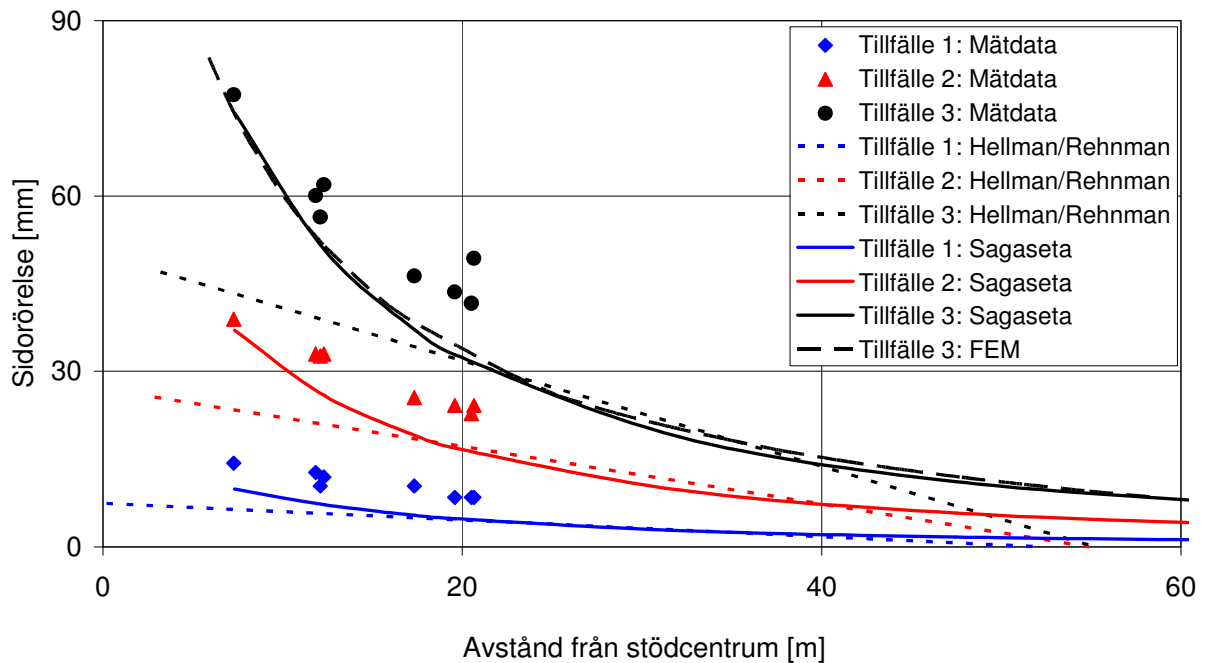


Figur 29. Uppmätt och beräknad hävning längs mätsektionerna N, S och V vid mättillfällena 1, 2 och 3. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid de olika mättillfällena samt läget för de olika mätsektionerna.

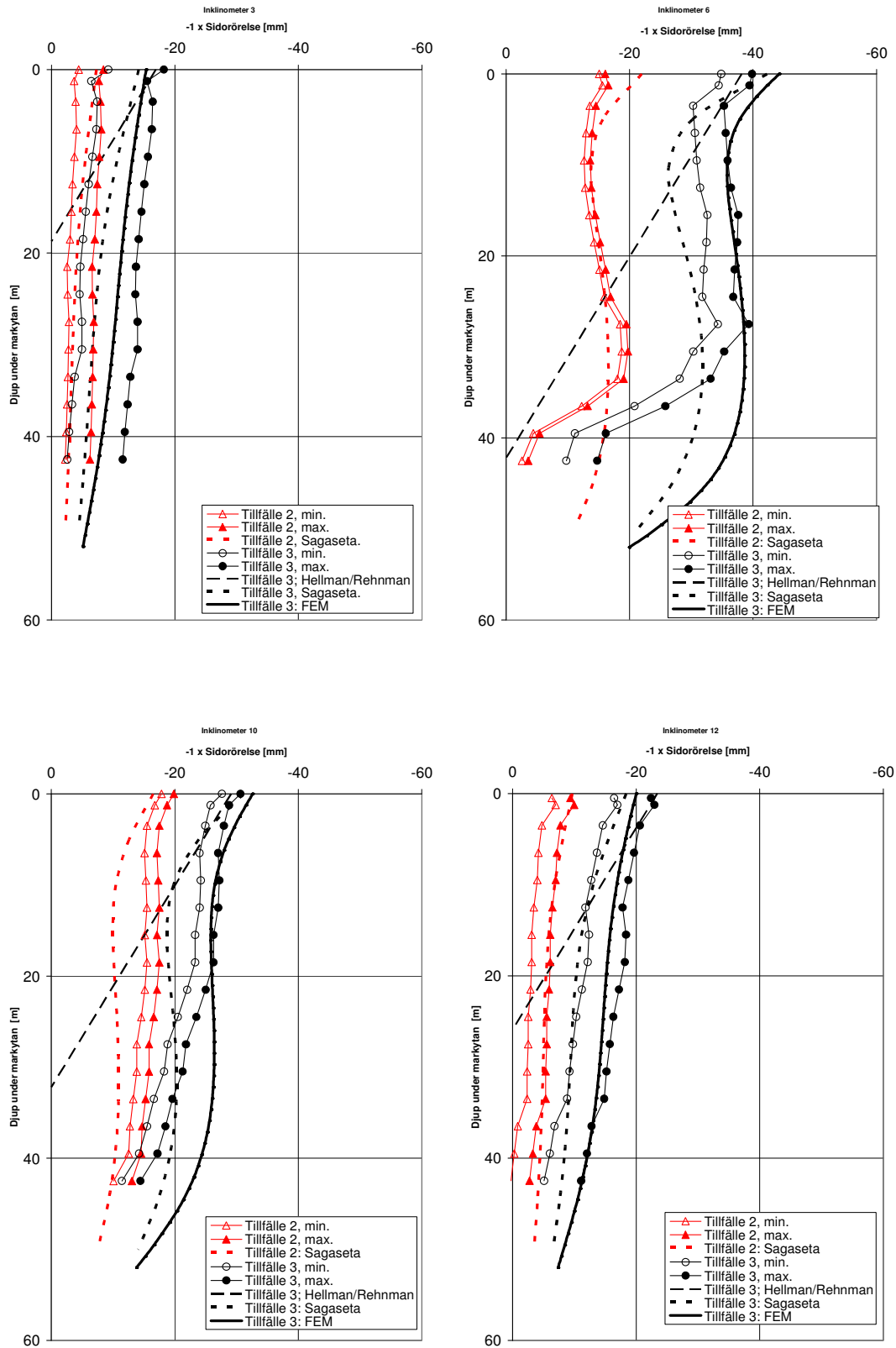
Norra och södra mätlinjen



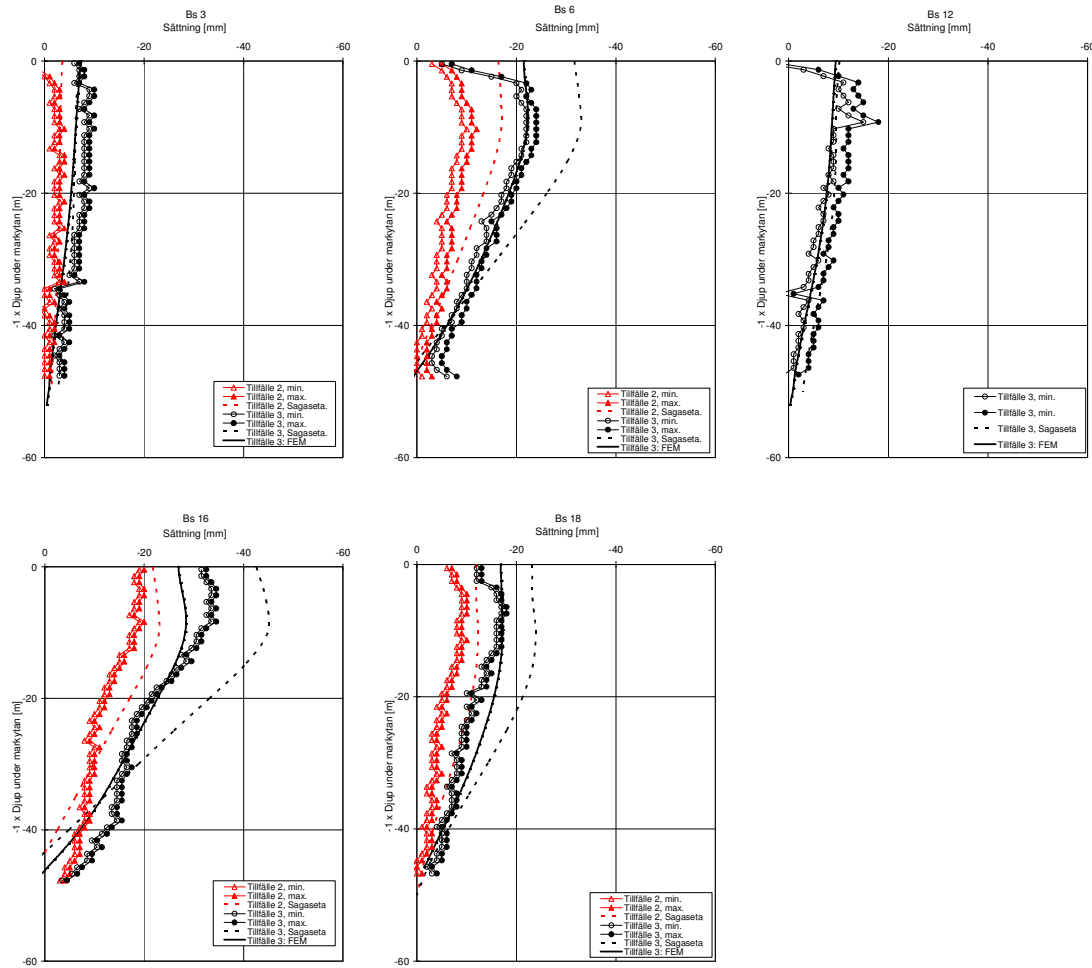
Västra mätlinjen



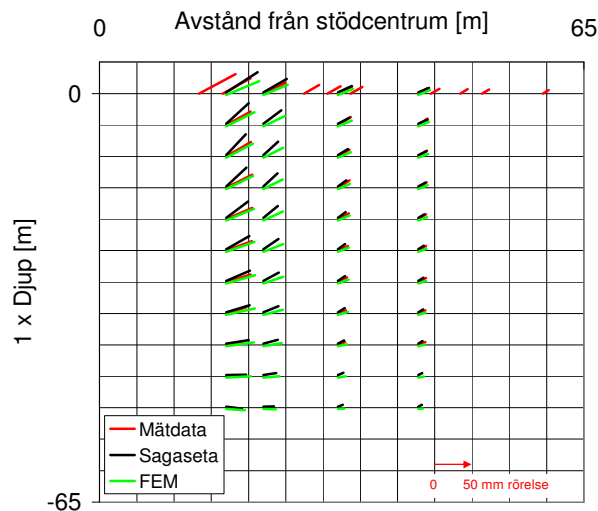
Figur 30. Uppmätt och beräknad sidorörelse längs mätsektionerna N, S och V vid mättillfällena 1, 2 och 3. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid de olika mättillfällena samt läget för de olika mätsektionerna.



Figur 31. Uppmätt och beräknad horisontalrörelse, i och under markytan, vid mättillfällena 2 och 3 i läget för inklinometrarna 3, 6, 10 och 12. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid de olika mättillfällena samt läget för respektive inklinometer.



Figur 32. Uppmätt och beräknad hävning, i och under markytan, vid mättillfällena 2 och 3 i läget för inklinometrarna 3, 6, 12, 16 och 18. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid de olika mättillfällena samt läget för respektive bälgslang.



Figur 33. Uppmätta och beräknade rörelsevektorer längs mätsektionerna N och S vid mättillfälle 3. Jfr Tabell 1, Figur 7 samt Figur 3 avseende situationen vid mättillfälle 3 samt läget för mätsektionerna.

6 FE-simulering av påslagning vid några hypotetiska situationer

6.1 Inledning

Som tidigare nämnts kan FE-simuleringar nyttjas i syfte att simulera massundanträngning vid påslagning under mer generella förhållanden än de tidigare beskrivna Hellman/Rhenman- och Sagasetta-metoderna. Därför har ett några FE-simuleringar genomförts i syfte att bedöma markrörelserna för några mer komplexa situationer. Som framgår i Avsnitt 5 leder relativt enkla antaganden såsom en linjär elastisk materialmodell och nyttjandet av "superpålar" till en god överensstämmelse mellan uppmätta och beräknade markrörelser såväl ovan som under markytan. Därför har denna modelleringsstrategi nyttjats även vid de FE-simuleringar som behandlas i detta Avsnitt.

6.2 Beräkningsmodell

Den beräkningsmodell som nyttjats vid FE-simuleringarna av fältförsöket, se Figur 26, har utökats med en konstruktion i närheten av pålningsområdet, se Figur 34. I ett första beräkningssteg "aktiveras" denna konstruktion i FE-modellen. Detta ger upphov till deformationer i jorden, men dessa "nollas" innan pålningen simuleras i det efterföljande beräkningssteget. Således är de redovisade rörelserna enbart en konsekvens av pålningen.

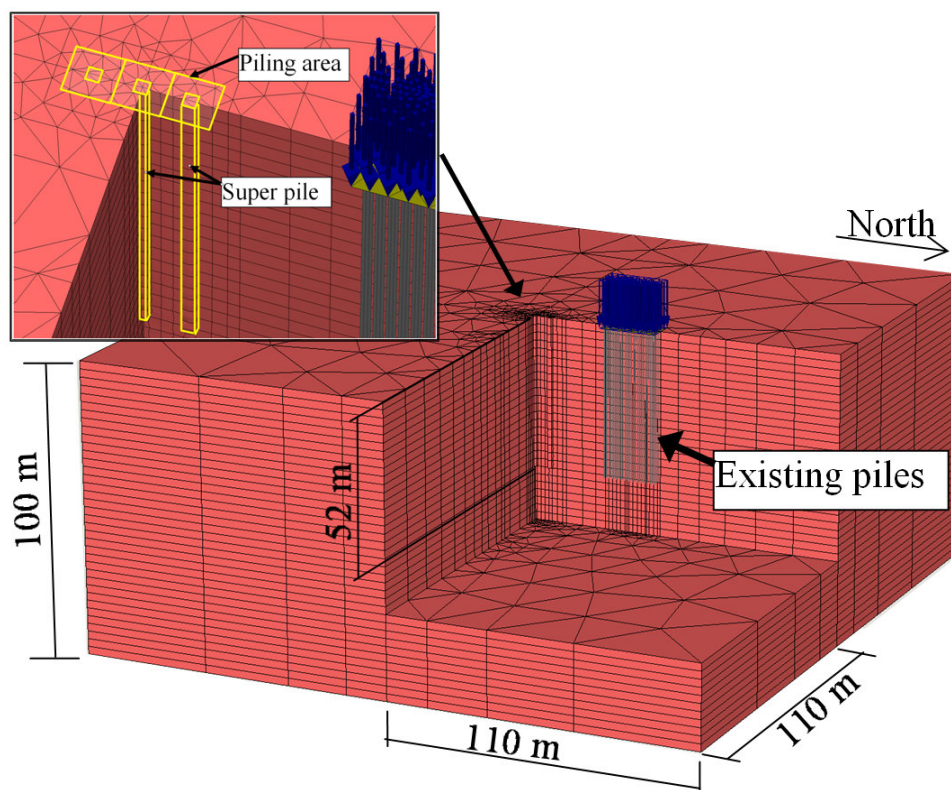
Den befintliga konstruktionen har planmått 10x20 m² och är placerad 36 m från mitten av pålningsområdet i ett läge som sammanfaller med mätsektion N vid fältmätningarna kring brostöd A11.

Tre situationer har studerats, varvid den hypotetiska befintliga konstruktionen omfattar kombinationer av följande "randvillkor":

- En ytlast med intensiteten 50 kPa
- En betongplatta med tjockleken 0,5 m
- 65 st kohesionspålar med längden 52 m och 1,5 m centrumavstånd

Betongplattan modelleras genom att nyttja "floor-funktionen" i PLAXIS medan pålarna modelleras genom att nyttja "embedded pile-funktionen", se Brinkgreve (2007). I båda fallen beaktas strukturelementens axial- och böjstyvhet.

I likhet med de tidigare FE-analyserna antas att jorden är linjär-elastisk med tvärkontraktionstalet 0,495 (inkompressibel jord) och elasticitetsmodulen 10 MPa. I de fall då effekten av betongplattan och/eller kohesionspålarna studeras påverkas beräkningsresultatet dock av styvhetsrelationen mellan dessa konstruktionselement och leran. Således ger beräkningarna endast en grov bild av hur de befintliga konstruktionerna påverkas av installationen av pålarna.



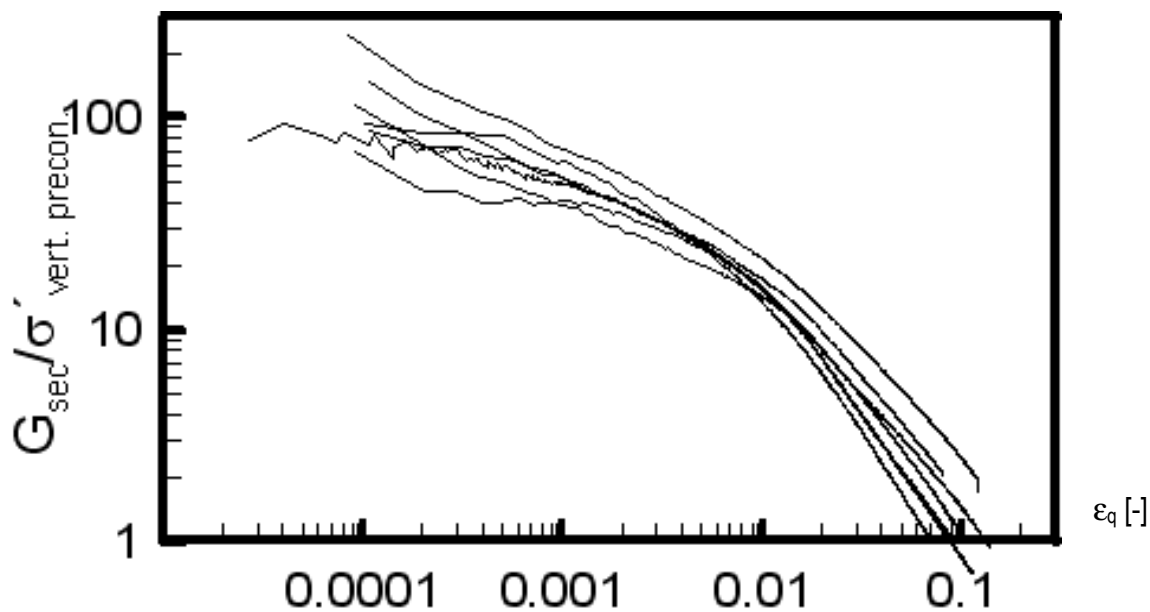
Figur 34. FE-modell vid simulering av pålningen vid brostöd A11 inklusive en hypotetisk befintlig konstruktion strax norr därom.

6.3 Beräkningsresultat

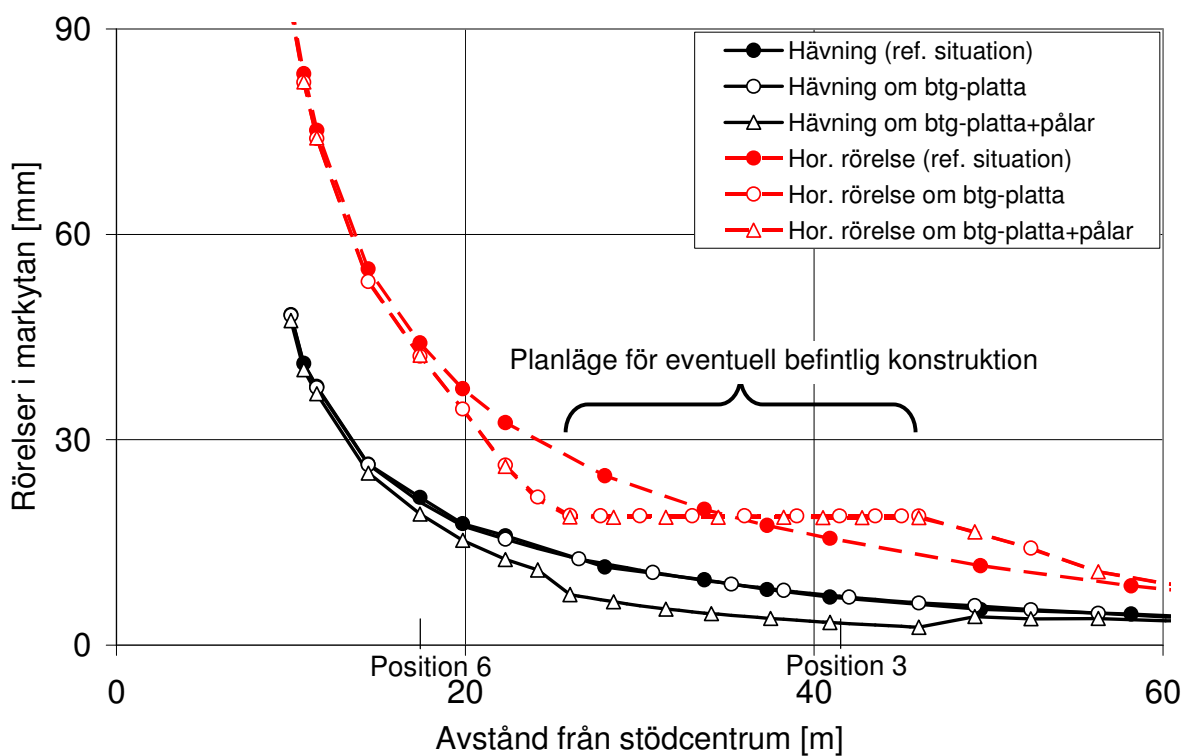
Införandet av ytlasten 50 kPa ändrar inte de pålningsinducerade rörelserna jämfört med situationen utan ytlast. Detta är en direkt konsekvens av att jorden antas vara linjär-elastisk. Storleken på den beräknade deviatorertöjningen, till följd av pålningen, uppgår dock till endast ca 0,001 i läget för ytlasten och vid så små skjuvtöjningsnivåer uppvisar Göteborgslera en relativt linjär-elastisk respons, se Figur 35. Således bedöms att den beräknade effekten av ytlasten skulle bli relativt begränsad även vid nyttjandet av en mer avancerad (olinjär) materialmodell.

Införandet av betongplattan har försumbar effekt på hävningen i och under markytan, se Figur 36 och Figur 37a. Däremot påverkas sidorörelserna påtagligt i markytan i läget för betongplattan, men denna effekt avtar med ökande horisontellt och vertikalt avstånd från betongplattan, se Figur 36 och Figur 37b. Den beräknade responsen beror på att betongplattans axialstyvhet är relativt hög samtidigt som dess böjstyvhet är relativt låg.

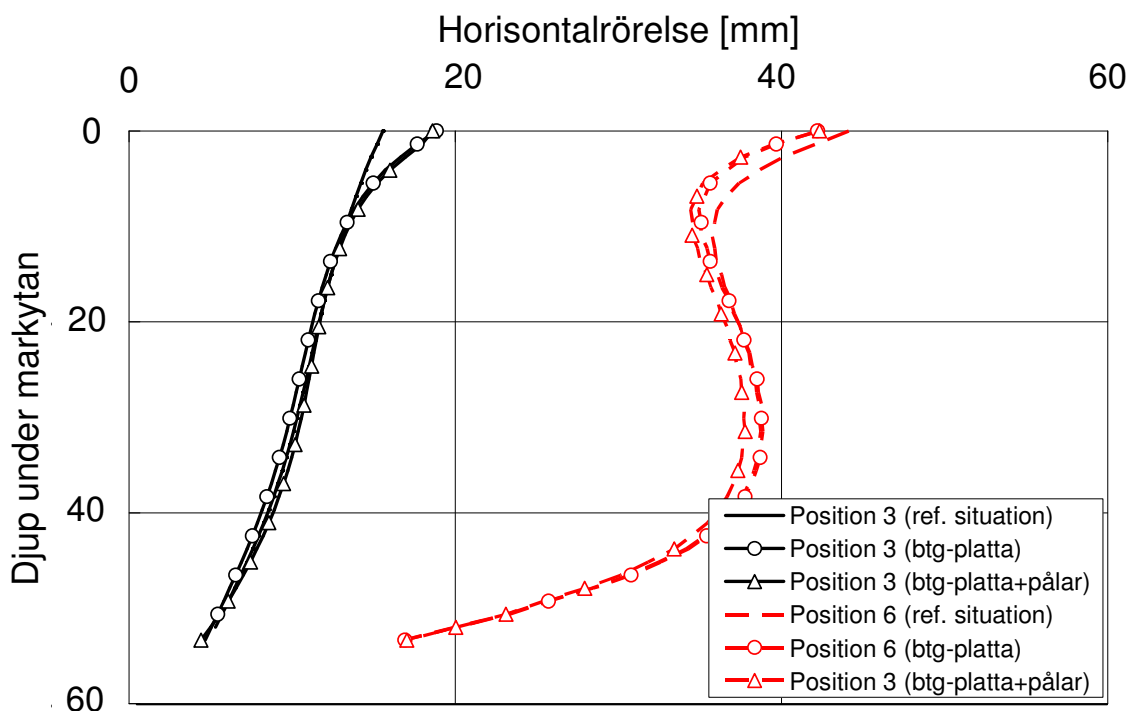
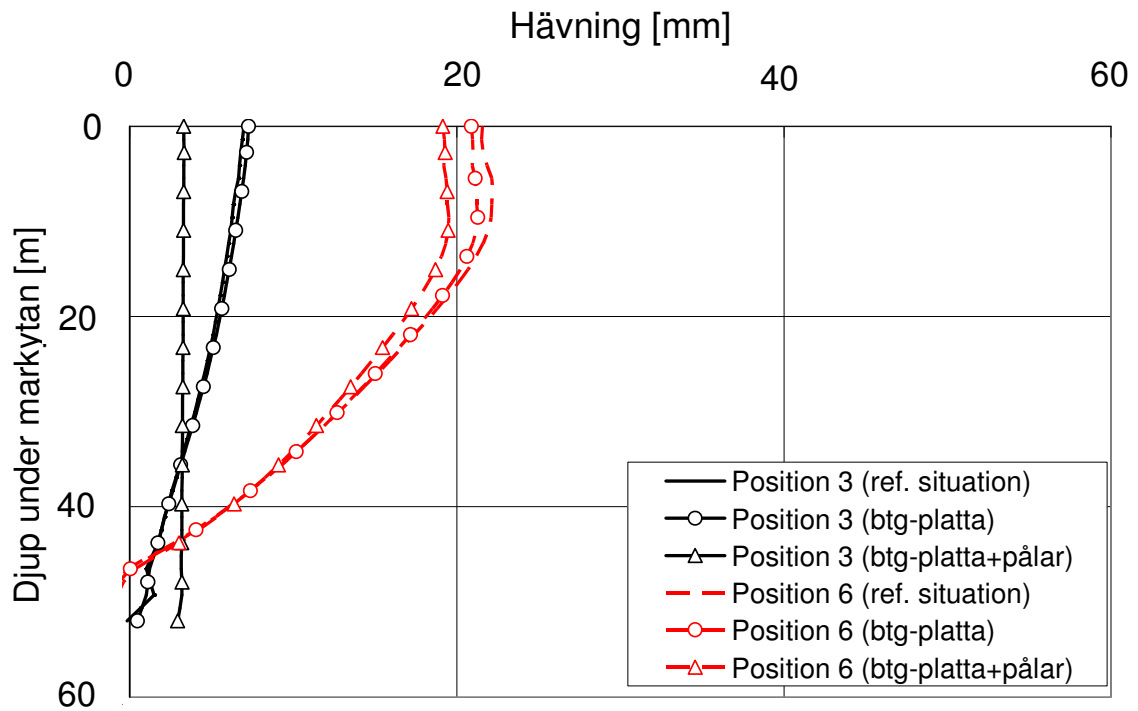
Om betongplattan antas vara grundlagd på kohesionspålar minskar hävningen i markytan påtagligt i läget för bottenplattan, se Figur 36. Minskningen avtar dock med djupet, se Figur 37a. Inom pålarnas undre del ökar dock hävningen. Denna respons beror på pålarnas relativt höga axialstyvhet, vilken leder till uppåtriktade dragkrafter i pålarnas överdel och balanserade nedåtriktade dragkrafter i pålens undre del. Däremot har pålarna försumbar effekt på horisontalrörelserna eftersom de har låg böjstyvhet, se Figur 36 och Figur 37b.



Figur 35. Uppmätt skjuvmodul, normaliserade mot förkonsolideringstrycket, som funktion av deviatorförändringen vid odränerade triaxialförsök på Göteborgslera (från Kullingsjö, 2007).



Figur 36. FE-beräknade rörelser i markytan längs mätsektion N för några hypotetiska situationer.



Figur 37. FE-beräknad hävning och sidorörelse i och under markytan i positionerna 3 och 6 längs mätsektion N för några hypetiska situationer.

7 Slutsatser och rekommendationer

De genomförda fältmätningarna har fungerat väl, även om en bättre mätnoggrannhet i vissa fall varit önskvärd när det gäller mätningen av rörelserna i markytan.

Genomgående visar mätningarna dock att sidorörelsen är större än hävningen. Vidare sträcker sig markrörelserna längre ut än en pållängd från pålningsområdets ytterkant. Såväl sidorörelsen som hävningen i markytan varierar inte linjärt med avståndet från pålningsområdet. Variationen kan snarare beskrivas mha exempelvis en potensfunktion. Dessutom är markrörelsen mitt för pålningsområdets långsida större än mitt för pålningsområdets kortsida, i mätpunkter belägna på samma avstånd från pålningsområdets ytterkant. Den undanträngda jordvolymen bedöms motsvara volymen hos de installerade pålarna.

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

Hellman/Rehman-metoden bör endast nyttjas för en grov uppskattning av storleksordningen på markrörelserna.

Sagaseta-metoden bör nyttjas om en bättre uppskattning av markrörelserna erfordras. Till skillnad från Hellman/Rehman-metoden baseras Sagaseta-metoden på kontinuumsmekanik, vilket leder till logiska resultat, exempelvis att markförskjutningarna varierar icke-linjärt med avståndet från pålningsområdet samt effekten av ändrad pållängd och indelning av en pålningsområdet i delområden (superpositionsprincipen). Vid nyttjande av Sagaseta-metoden för rörelserna i markytan kan analytiska uttryck nyttjas för beräkningen, vilket gör det enkelt att implementera metoden i exempelvis Excel. Dessutom kan metoden förenklas ytterligare genom att införa ”superpålar”. ”Superpålar” bör dock endast nyttjas om vid studier av markrörelserna en bit ifrån pålningsområdet.

FE-analyser bör nyttjas för att erhålla bästa möjliga uppskattning av markrörelserna. Härvid förefaller en linjärelastisk beskrivning av leran i kombination med ”superpålar” vara tillfyllest. Om de byggnadstekniska förhållandena är ”enkla” (horisontell markyta, homogen jord, etc) är det dock tveksamt om det merarbete som FE-analyser medför är motiverat jämfört med att använda Sagaseta-metoden. De hypotetiska situationer som analyserats visar dock att FE-analyser bör nyttjas om de byggnadstekniska förhållandena inte är ”enkla”. En linjärelastisk beskrivning av leran i kombination med ”superpålar” kan troligen användas även i sådana fall, så länge fokus ligger på rörelserna en bit ifrån pålningsområdet.

De fältmätningar och analyser som utförts inom ramen för detta projekt är huvudsakligen inriktad på ”enkla” byggnadstekniska förhållanden, dvs horisontell markyta, homogen jord, ingen förekomst av närliggande befintliga konstruktioner på och/eller under markytan som påverkar rörelsemönstret, etc. Således är det väsentligt att studera hur de ovan beskrivna beräkningsmetoderna fungerar när de byggnadstekniska förhållandena inte är ”enkla”. Som ett led i detta har SBUF-projektet ”Skäranbron – rörelser vid påslagning för den närliggande Partihallsbron” initierats, vilket preliminärt kommer att avrapporteras under hösten 2011.

8 Referenser

Bradshaw, A. S., Baxter, C. D. P. (2006). Design and construction of driven pile foundations – lessons learned on the Central Artery/Tunnel project. U.S Department of transportation, Federal Highway Administration. Report FHWA-HRT-05-159.

Brinkgreve, R. B. J. (ed.) 2007. PLAXIS 3D Foundation User's Manual.

Dugan, J.P. Jr, Freed, D.L. (1984). Ground heave due to pile driving. International conference on case histories in geotechnical engineering, St. Louis, May 1984. Vol. 1

Edstam, T., Hansson, A., Holmberg, G, Svan, P-O. (2010a). Partihallsbron - Ingen koloss på lerböter. Samhällsbyggaren, No. 1.

Edstam, T., Hansson, A., Holmberg, G, Svan, P-O. (2010b). Partihallsbron - Ingen koloss på lerböter. Grundläggningdagen 2010.

Edstam, T., Kullingsjö, A. (2010c). Ground displacements due to pile driving in Gothenburg clay. Proc. 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Trondheim, Norway.

Edstam, T., Hansson, A. (2010d). Utmaning påla för lång bro som vilar på lös lera. Husbyggaren, Vol. 52, No. 5.

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

Kullingsjö, A. 2007. Effects of deep excavations in soft clay on the immediate surroundings. Analysis of the possibility to predict deformations and reactions against the retaining systems. Diss. Chalmers University of Technology, Gothenburg.

Jonsson, J., Kristiansson, A. (2004). Massundantäringning i samband med pålning i lera. Chalmers tekniska högskola. Institutionen för Bygg- och miljöteknik. GEO. Geologi och geoteknik. Examensarbete 2004:18.

Massarsch, K. R. (1976). Soil movements caused by pile driving. Dr. avh. Kungliga tekniska högskolan, Stockholm. Jord- och Bergmekanik. Rapporter JoB nr 6 (även som Pålkommisionen. Rapport nr 51).

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

Pestana, J.M., Hunt, C.E., Bray, J.D. (2002). Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile. ASCE. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 1.

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

Sagaseta, C., Whittle, A. J. & Santagata, M. 1997. Deformation analysis of shallow penetration in clay. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 21, No. 10.

Svensson, L. (2008). Markhävning vid påslagning i centrala Göteborg. Bygg & Teknik, Vol. 100, No. 1.

Wong & Chua (1999). Ground movements due to pile driving in an excavation in soft soil. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36, No. 1.