

## HEIC - "High Energy Impact Compaction" - Utvärdering av packningsarbetena vid Norra Hamnen i Malmö



Torbjörn Edstam

Skanska Sverige AB  
Teknik

2014

## FÖRORD

Under perioden 2009-2011 utförde Skanska Sverige AB på uppdrag av Copenhagen Malmö Port AB en utbyggnad av Norra Hamnen i Malmö. Utbyggnaden omfattade en ny container- och godshanteringsterminal, inkluderande lastbils- och järnvägstransporterat containergods. Området inom Norra Hamnen har fyllts ut i havet under de senaste 50 åren. Vid utbyggnaden erfordrades därför packning inom stora områden av de mycket heterogena fyllnadsmassorna. Packningsarbetet utfördes genom HEIC (High-Energy Impact Compaction) i regi av LANDPAC Ground Engineering Ltd.

I föreliggande rapport sammanfattas erfarenheterna från det tillvägagångssätt som nyttjades för att säkerställa att en tillräckligt styv undergrund erhållits för överbyggnader inom olika delar av terminalområdet.

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

- Sven Liedberg (initiativtagare och "bollplank"), Skanska Sverige AB
- Jim Bengtsson, (platsgeotekniker) Skanska Sverige AB (numera PEAB AB)
- Magnus Palm (analys av data), Skanska Sverige AB (numera Tyréns AB)
- Dennis Sköld (fältgeotekniker), Skanska Sverige AB (numera ÅF AB)
- Andreas Stöllman (analys av data), Skanska Sverige AB (numera COWI Sverige AB)

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

- Bo Johansson, NCC AB
- Fredrik Lekarp, Svevia AB (numera Kungliga tekniska högskolan)
- Eva Petersson, Ramböll AB (numera egen verksamhet)
- Claes Alén, Chalmers tekniska högskola

Projektet har finansierats av SBUF och Skanska Sverige AB.

Ett stort tack riktas till samtliga ovannämnda personer och finansiärer. Dessutom riktas ett varmt tack till Skanskas "Hamnbyggare" för deras engagemang. Last, but not least, a special thanks to Dermot Kelly at LANDPAC Ground Engineering Ltd.

Göteborg i maj 2014

Torbjörn Edstam

## SAMMANFATTNING

Skanska Sverige AB har, åt Copenhagen Malmö Port AB, byggt nya RoRo- och Containerterminaler inom Norra Hamnen i Malmö.

De heterogena grundförhållandena inom området, i kombination med de objektsspecifika sättnings- och bärighetskraven, medförde att fyllningsmassorna behövde packas inom ett ca 23 hektar stort område, samtidigt som en tillförlitlig sättningsprognos erfordrades för att kunna bedöma huruvida fyllnadsmassorna var tillräckligt styva med hänsyn till överbyggnaderna inom olika delar av terminalområdet.

Förhoppningen är att de erfarenheter ifrån Norra Hamnen som redovisas i denna rapport kommer till nytta vid framtida byggande på heterogen undergrund.

Fyllnadsmassorna i Norra Hamnen är väldigt heterogena, vilket är naturligt med tanke på att massorna har varierande ursprung samt att uppfyllningen utförts under många år och med varierande grad av kontroll. Under sådana förhållanden bör projektering, byggande och kontroll utföras i nära samarbete mellan berörda parter, varvid ”observationsmetoden” sannolikt är den enda framkomliga vägen för att uppnå en tekniskt-ekonomiskt lämplig lösning.

De viktigaste slutsatserna från projektet är:

- Baserat på uppföljningarna av 4 st provbankar utvecklades en tillförlitlig objektsspecifik sättningsberäkningsmodell, vilken baseras på resultaten från CPT-sonderingar.
- HEIC-bearbetning, inklusive uppföljning i form av CIS och CIR, förefaller att vara ett bra verktyg för att komprimera packningsbara massor och samtidigt identifiera ”soft spots” där massorna består av relativt finkornig lermorän vilken ej är packningsbar.
- Uppmätta spetstryck vid CPT-sonderingar, utförda såväl före som efter HEIC-bearbetning, påvisar huvudsakligen ingen tydlig packningseffekt i de sonderade punkterna. Detta beror sannolikt på att de studerade punkterna huvudsakligen är belägna i delområden med lösa och finkorniga massor.
- CIR-mätningarna som erhöles vid HEIC-bearbetningen gav en någorlunda god bild av hur bärigheten på terrassen varierade inom området.
- Resultaten från ZLT-försöken antyder att undergrundens styvhet efter HEIC-bearbetning var minst lika hög som den styvhet som erhöles vid nyttjande av den sättningsberäkningsmodell som utvecklades på basis av provbankarna.
- I skrivande stund (knappt 3 år efter färdigställandet) understiger de utbildade sättningarna de objektsspecifika kraven inom den absoluta merparten av de HEIC-bearbetade områdena.

## INNEHÅLL

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b> .....	<b>4</b>
1.1	BAKGRUND .....	4
1.2	SYFTE .....	5
1.3	GENOMFÖRANDE .....	6
<b>2</b>	<b>GRUNDFÖRHÅLLANDEN VID NORRA HAMNEN</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>PACKNING MED HEIC</b> .....	<b>8</b>
3.1	ALLMÄNT .....	8
3.2	NORRA HAMNEN .....	10
<b>4</b>	<b>UNDERSÖKNINGAR VID NORRA HAMNEN OCH TOLKNING AV FÖRSÖKSRESULTATEN</b> .....	<b>11</b>
4.1	PROVBANKARNA .....	11
4.1.1	<i>Inledning</i> .....	11
4.1.2	<i>Mätresultat</i> .....	11
4.1.3	<i>Utvärdering</i> .....	15
4.2	UPPFÖLJNING AV HEIC I FORM AV CIS- OCH CIR-KARTOR .....	19
4.3	CPT-SONDERINGAR FÖRE OCH EFTER HEIC .....	25
4.4	ZLT .....	27
4.5	KOPPLING MELLAN UPPMÄTT RESPONS VID HEIC-BEARBETNINGEN OCH TERRASSYTANS BÄRIGHET .....	31
4.6	SÄTTNINGSUPPFÖLJNING VID PÅFÖRANDE AV FÖRSTÄRKNINGS- OCH BÄRLAGER OCH EFTER AVSLUTADE ENTREPRENADARBETEN .....	32
<b>5</b>	<b>SLUTSATSER</b> .....	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>REFERENSER</b> .....	<b>37</b>

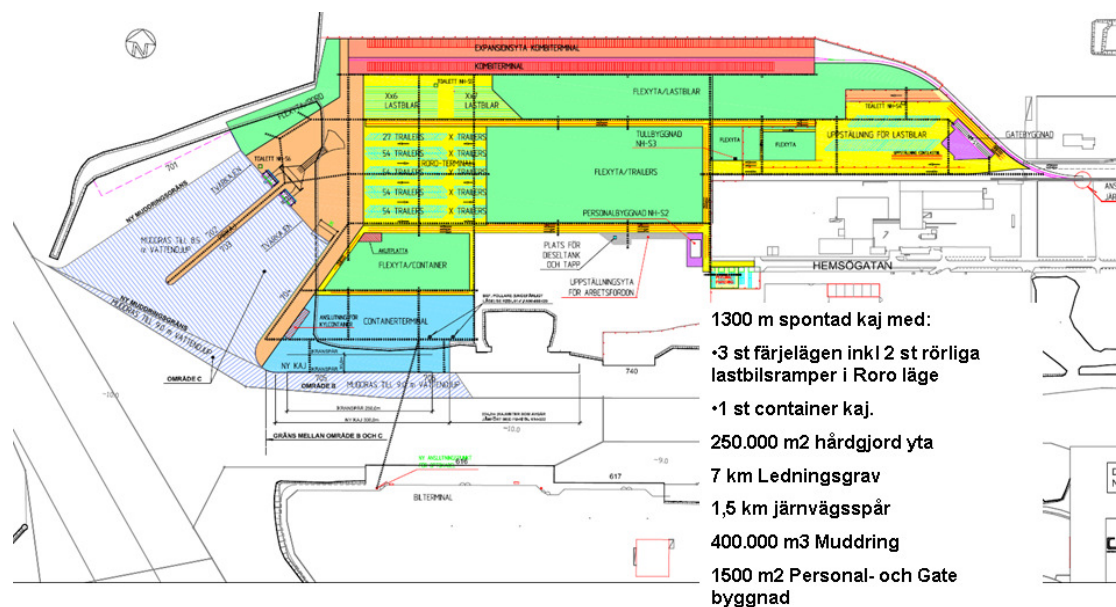
# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Under ca 2,5 års tid - från våren 2009 till hösten 2011- byggde Skanska Sverige AB nya RoRo- och Containerterminaler inom Norra Hamnen i Malmö åt Copenhagen Malmö Port AB. Arbetenas omfattning sammanfattas övergripande i Figur 1.

Marknivåerna (relativt Malmös lokala höjdsystem) i området före byggnationsarbetenas start varierade huvudsakligen från ca +2 till +3 med en medelnivå på ca +2,4. Vid anläggningsarbetena anpassades profilplanet på hårdgjorda ytor till nivån ca +3,0 till +3,1 vilket huvudsakligen medfört en höjning av markytan och därmed också en ökad belastning. Detta innebär att då fyllningsjordarna belastas med en högre last än vad de tidigare utsatts för så kommer sättningar att utbildas för markförlagda anläggningar så som t.ex. överbyggnader för vägar och containerytor.

De heterogena och osäkra grundförhållandena i kombination med de objektsspecifika sättnings- och bärlighetskraven medförde att fyllningsmassorna behövde packas inom ett ca 23 hektar stort område, samtidigt som en tillförlitlig sättningsprognos erfordrades för att kunna bedöma huruvida fyllnadsmassorna blivit tillräckligt styva med hänsyn till överbyggnaderna inom olika delar av terminalområdet.



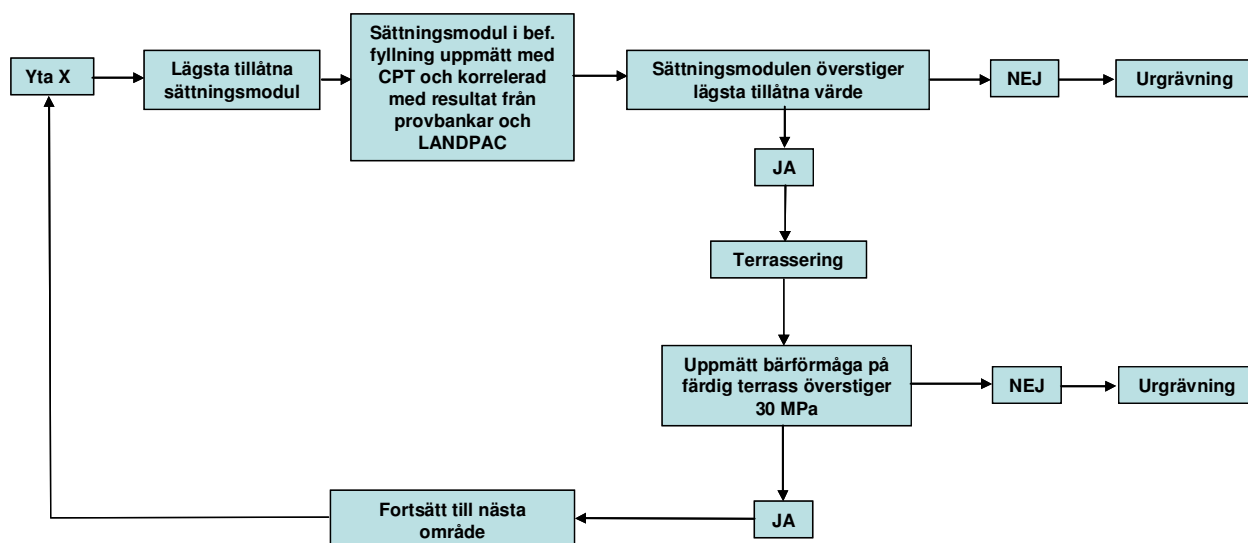
Figur 1. Övergripande redovisning av entreprenadarbetenas omfattning.

## 1.2 Syfte

På grund av de aktuella markförhållandena vid Norra Hamnen bedömdes att "observationsmetoden" var den enda framkomliga vägen för att uppnå en tekniskt-ekonomiskt rimlig lösning. Därför utfördes projektering, byggande och kontroll i nära samarbete mellan berörda parter, varvid flödesschemat i Figur 2 tillämpades.

Syftet med SBUF-projektet var att möjliggöra utökade undersökningar och analyser inom ramen för den tillämpning av "observationsmetoden" som användes vid byggnationen i Norra Hamnen. Förhoppningen är att de erfarenheter ifrån Norra Hamnen som redovisas i denna rapport kommer till nytta vid framtida byggande på heterogen undergrund.

Vid det inledande Referensgruppsmötet i september 2009 framkom att fokus lämpligen skulle läggas på sättningsaspekten eftersom den huvudsakliga packningseffekten vid HEIC-bearbetningen uppnås någon till några meter under rådande markytan. Samtidigt framfördes att HEIC-bearbetningen tenderar att "rugga upp" markytan, vilket medför behov av "efterbearbetning" med traditionell vältning av terrassytan för att den skall uppnå tillräcklig bärighet. Erfarenheterna rörande terrassytans bärighet berörs därför enbart kortfattat.



Figur 2. Övergripande flödesschema vid tillämpning av observationsmetoden vid HEIC-bearbetning.

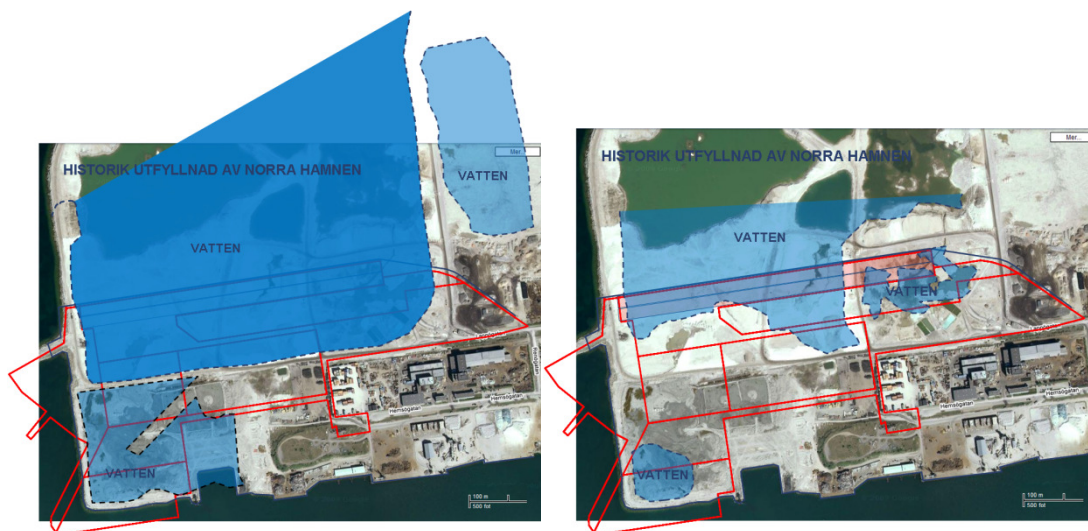
### 1.3 Genomförande

Inom ramen för SBUF-projektet har det varit möjligt att genomföra utökade insatser avseende bland annat följande (jfr flödesschemat i Figur 2):

- Uppföljning och analys av sättningsutvecklingen under provbankarna.
- Utveckling av en objektsspecifik sättningsberäkningsmodell (baserat på erfarenheterna ifrån provbankarna).
- Analys av CIR- och CIS-mätningarna vid HEIC-bearbetningen.
- Analys av CPT-sonderingar utförda före och efter HEIC-bearbetningen.
- Analys av ZLT.
- Analys av den sättningsutveckling som uppmätts i markpeglarna placerade i förstärkningslagret.
- Sammanfatta erfarenheterna ifrån ovannämnda aktiviteter i föreliggande rapport.

## 2 Grundförhållanden vid Norra Hamnen

Det aktuella området inom Norra Hamnen består av i havet utfylld mark. De första delarna av Norra Hamnen området som fylldes ut var de västligaste delarna av oljehamnen. Detta skedde under 1950-talet. Successivt fylldes området ut under 1960-och 1970- talen, men arbetet intensifierades under 1980-talet. Från 2005 – 2008 skedde utfyllnaden med massor från Citytunneln. Därav har fyllningsmassorna stor variation i ursprung och liggtid på platsen. Figur 3 visar foton från två olika tidpunkter, varur utfyllningsarbetenas fortskridande framgår.



Figur 3. Två skeden från utfyllningen av jordmassor inom aktuellt område av Norra Hamnen.

Efter utfyllnaden hade fyllningsmassorna stor heterogenitet och varierade kraftigt i fasthet, kornfördelning, hållfasthet och sättningsegenskaper. Fyllningsmassornas mäktighet varierade något inom området men kan grovt sägas ha varit i medeltal ca 7 meter, men med en variation mellan 5 och 10 meter. Massorna dominerades av lermorän med inslag av friktionsjordar så som sand och grus. Sten och block förekom också. I ytan förekom vanligen kalksten med mäktigheter från några decimeter till flera meter. Kalksten och andra friktionsjordar förekom även inbäddat i skikt i den utfyllda lermoränen. Även inslag av slaggprodukter förekom inom området.



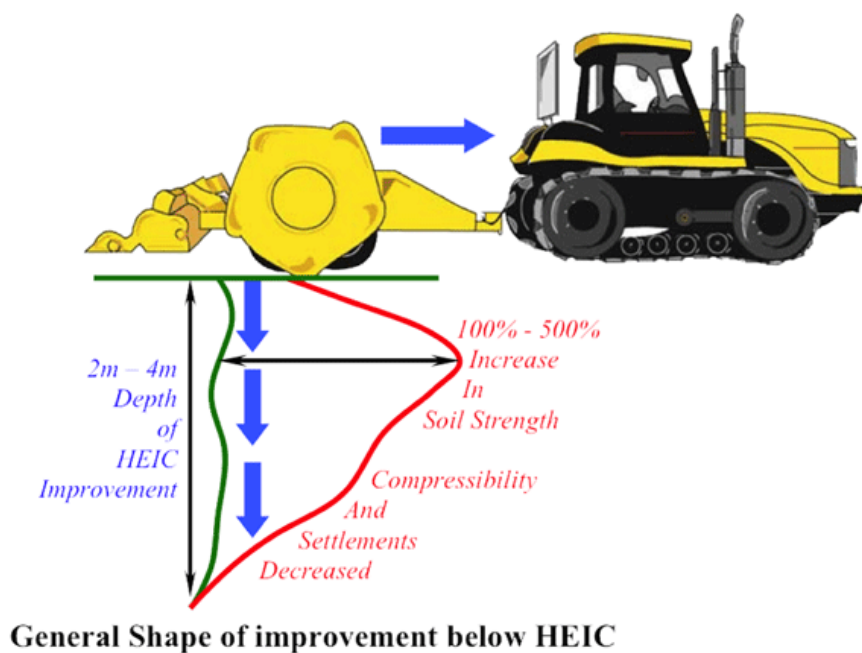
### 3 Packning med HEIC

#### 3.1 Allmänt

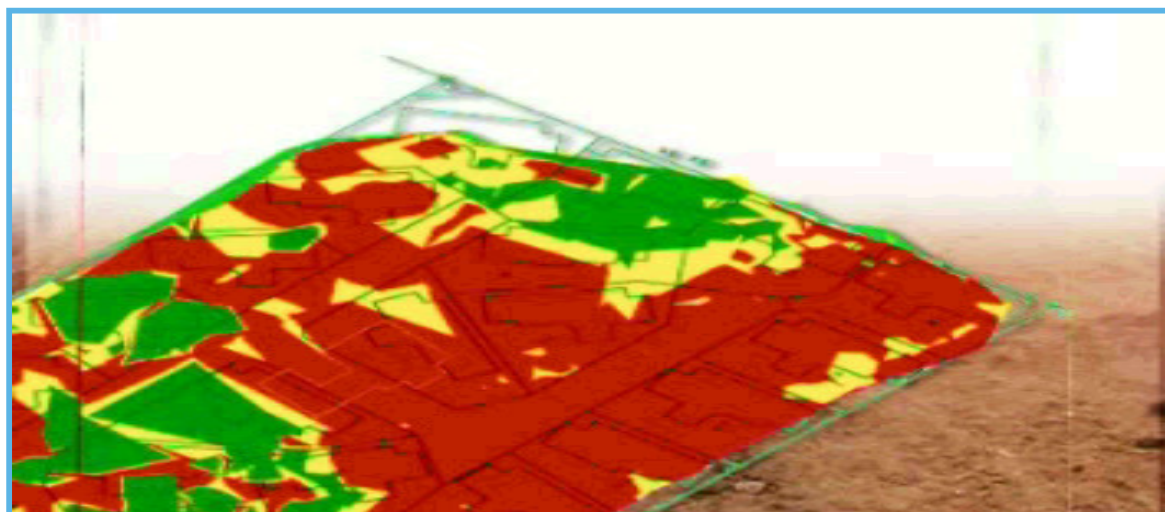
HEIC (High-Energy Impact Compaction) är en dynamisk ytpackningsmetod som grundas på en hög amplitud och låg frekvens. För att åstadkomma detta nyttjas en vält med icke-cirkulära hjul som släpas med relativt hög fart (ca 10 á 15 km/h) över den yta som skall packas varvid en packningseffekt kan erhållas ner till 2 á 4 meter beroende på jordart [2, 4]. Utrustningen och normal packningseffekt med djupet visas schematiskt i Figur 4.

Antalet erforderliga överfarter kan optimeras med stöd av ett avancerat GPS-styrt ytpackningskontrollsystem som benämns CIR (Continuous Impact Response) och CIS (Continuous Induced Settlement). Dessa båda system mäter vältens retardation respektive ackumulerad sättning vid varje överfart. Något förenklat gäller att en god packningseffekt erhålls om man erhåller en successivt minskad sättningsförändring (CIS) och en successivt ökad retardation (CIR) i takt med antalet överfarter. Systemet kan därmed även identifiera och redovisa ytor, se Figur 5, där packningsresultatet är begränsat eller dåligt, varvid andra åtgärder kan vidtas inom sådana områden.

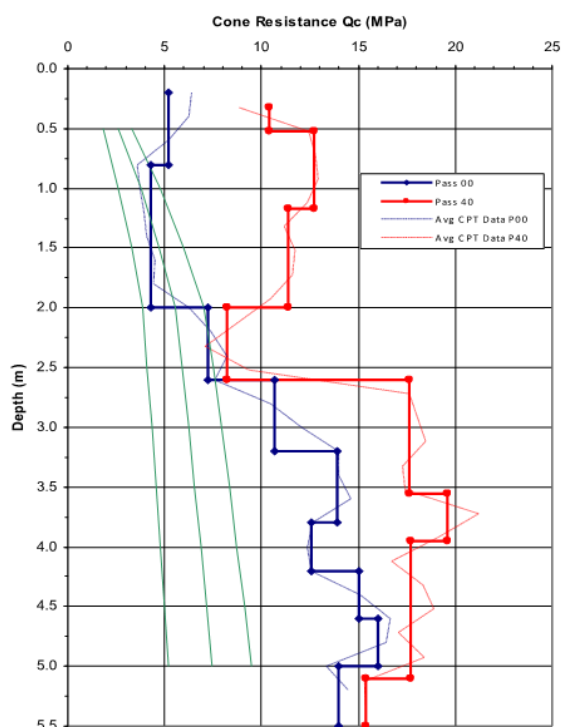
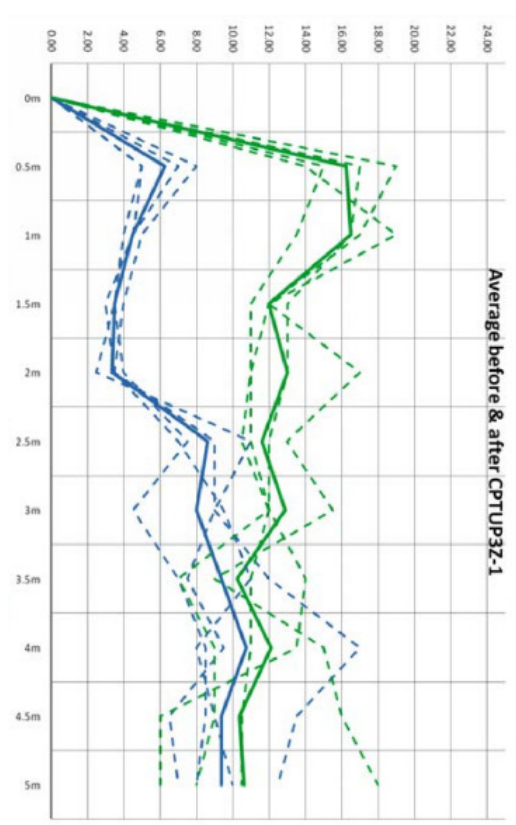
Som komplement till CIR och CIS utförs ofta traditionell sondering (CPT-sondering, hejarsondering, etc) såväl före som efter HEIC-bearbetningen, varvid packningseffekten kan kvantifieras i form av sonderingsmotståndet, se Figur 6. Liknande effekter har erhållits vid tester i Sverige [4].

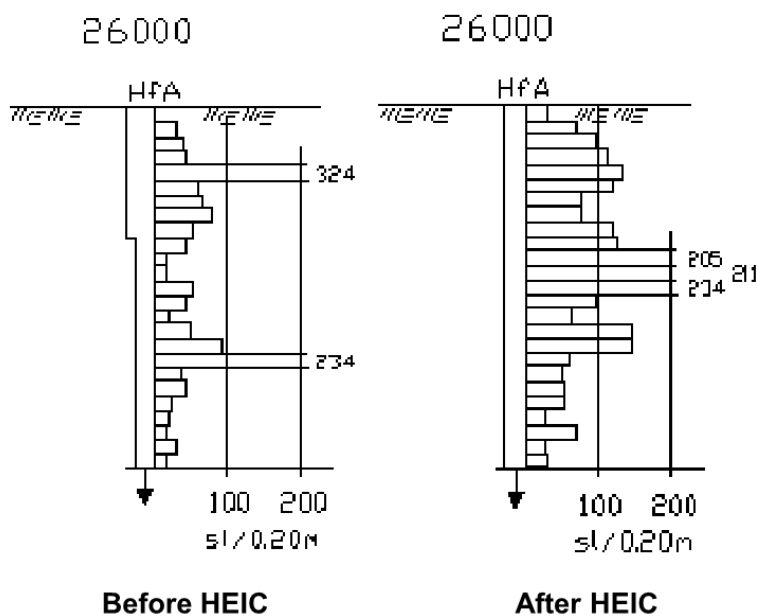


Figur 4. Principiell utformning av och effekt av HEIC.



Figur 5. Exempel på redovisning av CIR-mätningar i inledningen av HEIC-bearbetning [4].





Figur 6. Exempel på sonderingsmotstånd före och efter HEIC-bearbetning [2, 4].

### 3.2 Norra Hamnen

För packning av det ca 23 hektar stora området inom i Norra Hamnen användes en bandtraktordragen 5-kantig efterhängsvält från LANDPAC Ground Engineering Ltd, se Figur 7. Metoden har tidigare endast använts i några enstaka projekt i Sverige [4] och har, så vitt känt, tidigare aldrig använts för packning av i vatten utfylld lermorän. Lermoräna i utfyllningsmassorna innehöll såväl silt, sand och grus i varierande omfattning, varför packningseffekten i lermoräna förväntades variera kraftigt inom området.



Figur 7. Aktuell Landpac-vält under packningsarbetet i Norra Hamnen.

## 4 Undersökningar vid Norra Hamnen och tolkning av försöksresultaten

### 4.1 Provbankarna

#### 4.1.1 Inledning

Syftet med provbankarna var att utveckla en tillförlitlig och objektsspecifik sättningsberäkningsmodell, vilken skulle baseras på resultaten från CPT-sonderingar. Därför uppfördes provbankarna i inledningen av entreprenaden för att möjliggöra att resultaten skulle kunna utnyttjas inom entreprenadarbetena för Norra Hamnen.

Provbankarna placerades på platser som bedömdes vara relativt sättningsbenägna baserat på det tillgängliga geotekniska underlaget. Det ungefärliga läget för de fyra provbankarna framgår i Figur 8.

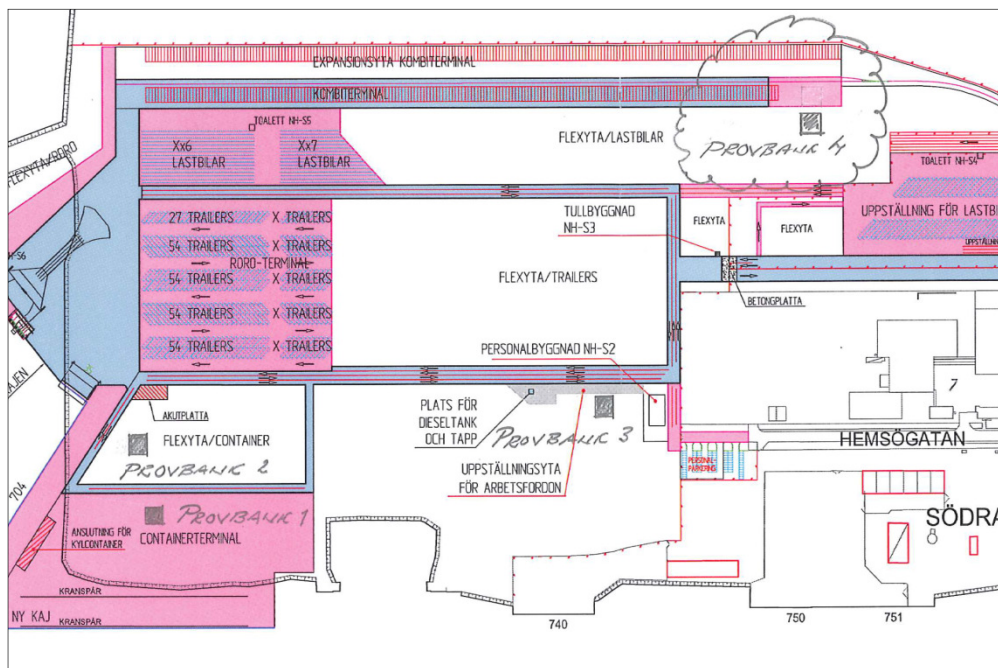
Provbankarnas hade planmått ca 15x15 m<sup>2</sup> i släntröner och ca 20x20 m<sup>2</sup> i släntfot, se Figur 9. Provbankarnas höjd varierade mellan som lägst ca 1,6 m (provbank 2) till som högst ca 3,5 m (provbank 4), vilket motsvarar ytlasten ca 28-64 kPa.

#### 4.1.2 Mätresultat

Sättningen i fyllnadsmassorna under provbankarna mättes med hjälp av markpeglar, se Figur 9, som placerades på den avjämnade markytan omedelbart innan respektive provbank uppfördes. Två peglar placerades i olika lägen under respektive provbank. Flera porttrycksmätare, typ BAT, installerades under en av provbankarna men de uppmätta resultaten var orealistiska (troligen på grund av gasutveckling) varför dessa ej berörs ytterligare i rapporten.

Innan provbankarna uppfördes hade ett antal CPT-sonderingar utförts i läget för respektive provbank, se Figur 10 och Figur 11.

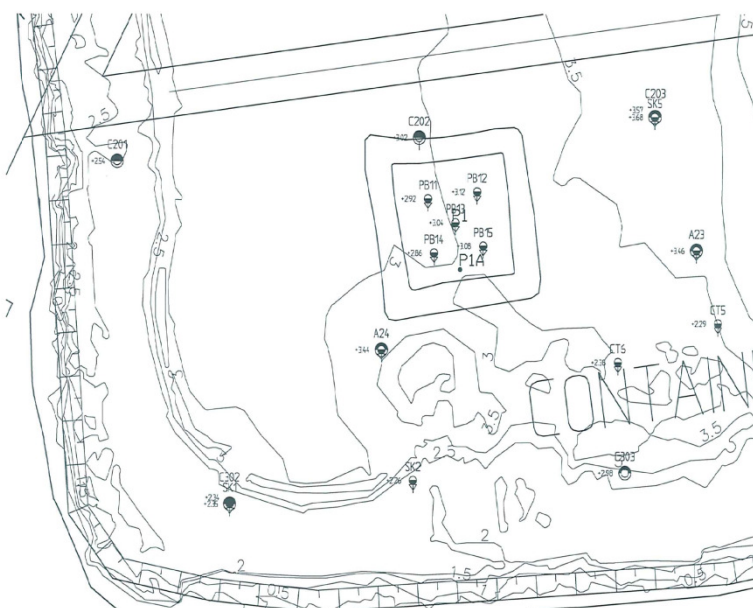
Uppföljningarna pågick under ca 100 dygn från det att provbankarna byggts och under den tiden mättes sättningsutvecklingen vid ett 20-tal tillfällen, se Figur 12. Därefter måste mätresultaten från provbankarna utvärderas och provbankarna rivas.



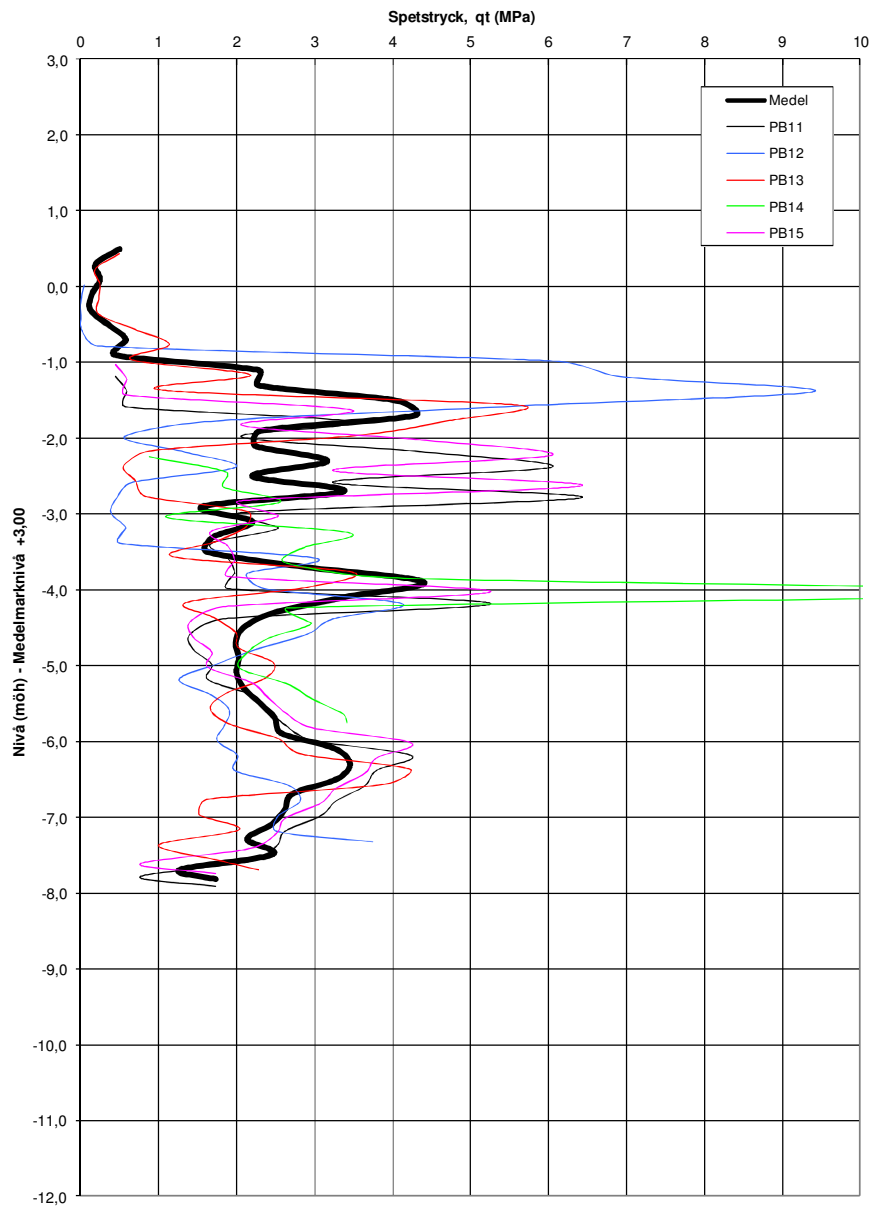
Figur 8. Ungefärligt planläge för provbankarna (provbankarna kan skönjas inom de röda ringarna i flygfotot).



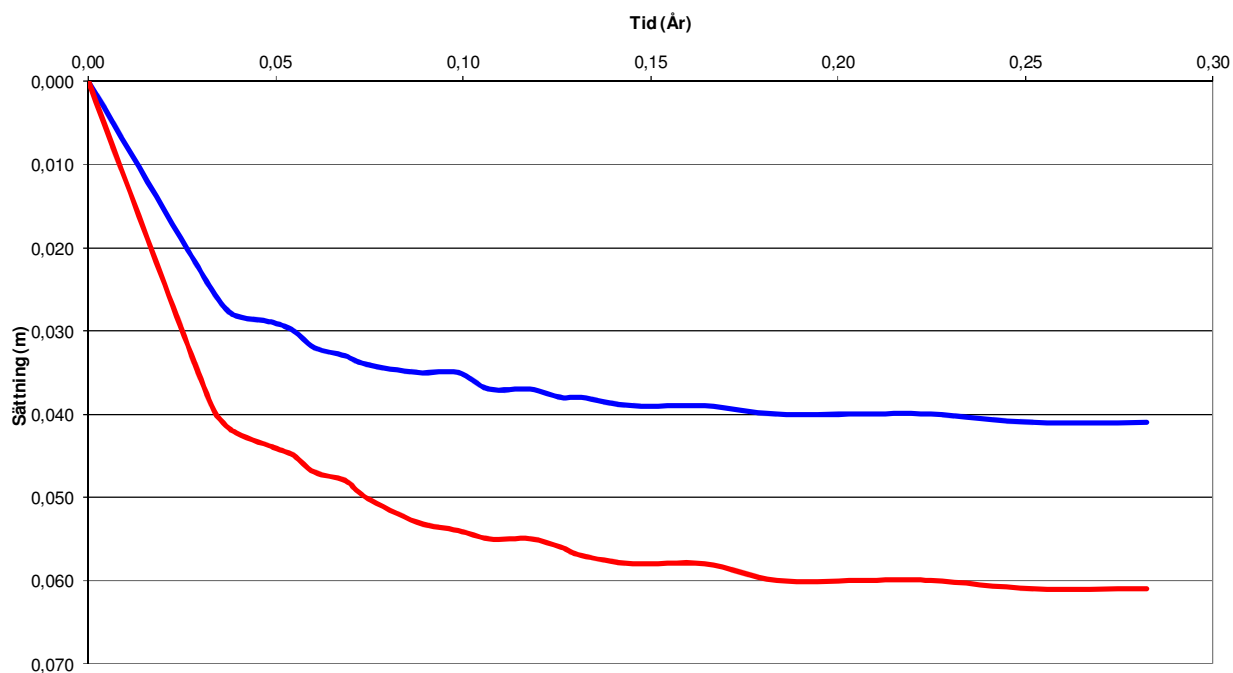
Figur 9. Foto visande en av provbankarna samt den övre delen av en av de markpegel som användes för sättningsuppföljningen.



Figur 10. Planritning visande en av provbankarna och de CPT-sonderingar som utfördes i läget för denna innan provbanken uppfördes. På planritningen framgår även delar av de sonderingar som tidigare utförts i närområdet.



Figur 11. Uppmätt spetstryck vid CPT-sonderingar i läget för en av provbankarna innan denna uppfördes.

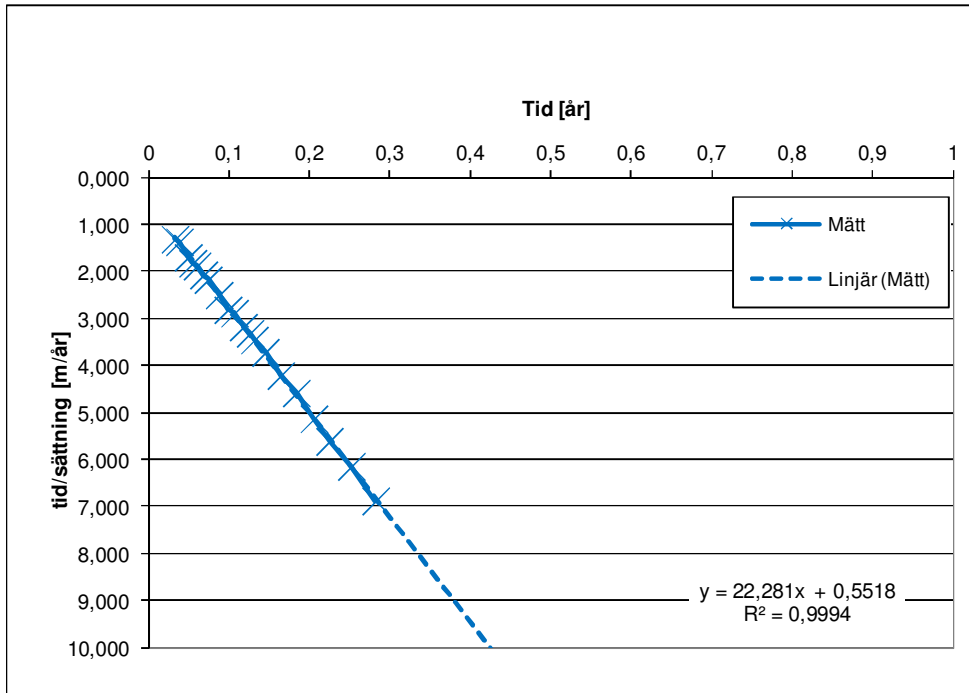


Figur 12. Exempel på uppmätt sättning i markpeglarna placerade under en av provbankarna.

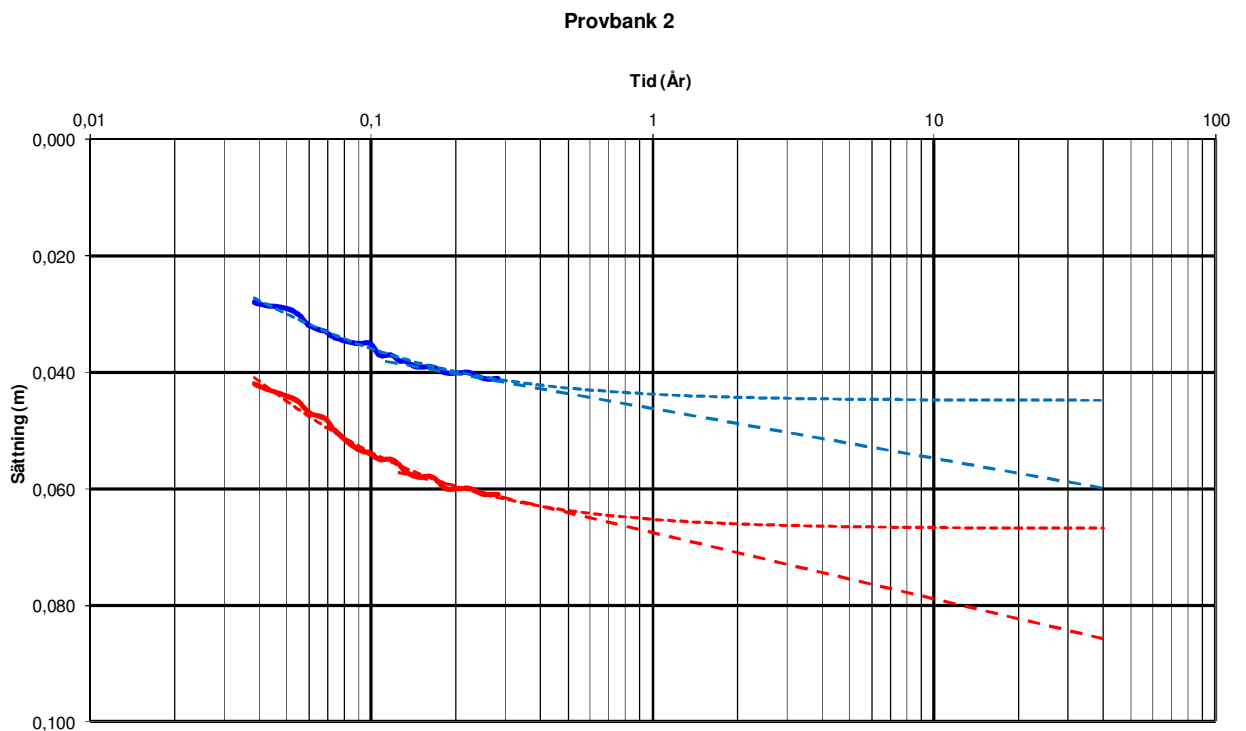
#### 4.1.3 Utvärdering

I och med att sättningstillväxten inte upphört helt under någon av provbankarna innan dessa revs erfordrades att tid-sättningskurvorna extrapolerades i tiden. Detta gjordes baserat på hypotesen att sättningen utvecklas med tiden enligt antingen ett hyperbelsamband, se [3], eller att den framtida sättningsutvecklingen sammanfaller med tangenten vid senaste mättillfället i ett log(tid)-sättning diagram. Det sistnämnda antagandet innebär att framtida sättningar enbart beror på krypkompressioner ( $\Delta$ sättning/ $\Delta$ log(tid) är konstant). Som framgår i Figur 13 är hyperbelanpassningen en mycket god approximation av de uppmätta värdena. Den resulterande extrapolerade sättningen efter 40 år (de aktuella konstruktionernas dimensionerande livslängd) framgår i Figur 14. Den valda sättningen efter 40 år motsvarar medelvärdet av hyperbel- och krypsättningsutvärderingen vid denna tidpunkt.





Figur 13. Exempel på uppmätt och hyperbelanpassad sättningsutveckling med tiden. Mättdatan är den samma som den blå kurvan i Figur 12, men redovisas här i transformerad form.



Figur 14. Exempel på uppmätt (heldragna linjer) och i tiden extrapolerad sättningsutveckling. Uppmätt sättning är den samma som i Figur 12.

Det övergripande syftet med provbankarna var att ta fram en lokal empiri som möjliggjorde omvandlandet av spetstrycket  $q_t$  [MPa] vid CPT-sonderingar till kompressionsmodulen  $M$  [MPa]. Enligt vedertagen praxis kan nedanstående principiella samband nyttjas vid bedömning av kompressionsmodulen i sand, se [5, 7]:

$$M = q_t \cdot \alpha \quad (1)$$

Motsvarande samband antogs kunna tillämpas för Norra Hamnen. Genom att analysera tidigare beskriven uppmätt och extrapolerad sättning samt CPT-sonderingarna kunde ett platsspecifikt värde på parametern  $\alpha$  [-] bestämmas enligt följande:

I enlighet med vedertagen praxis vid sättningsberäkningar antas att undergrundens sättning  $s$  [m] kan beräknas enligt:

$$s = \int_{z_0}^{z_1} \frac{d\sigma_v(z)}{M(z)} dz \quad (2)$$

där:

$d\sigma_v$  [MPa] = vertikal tillskottsspänning (antas kunna variera med djupet  $z$ )

$M$  [MPa] = kompressionsmodulen (antas kunna variera med djupet  $z$ )

$z_0$  [m] = djupet till överkant kompressibel undergrund

$z_1$  [m] = djupet till underkant kompressibel undergrund

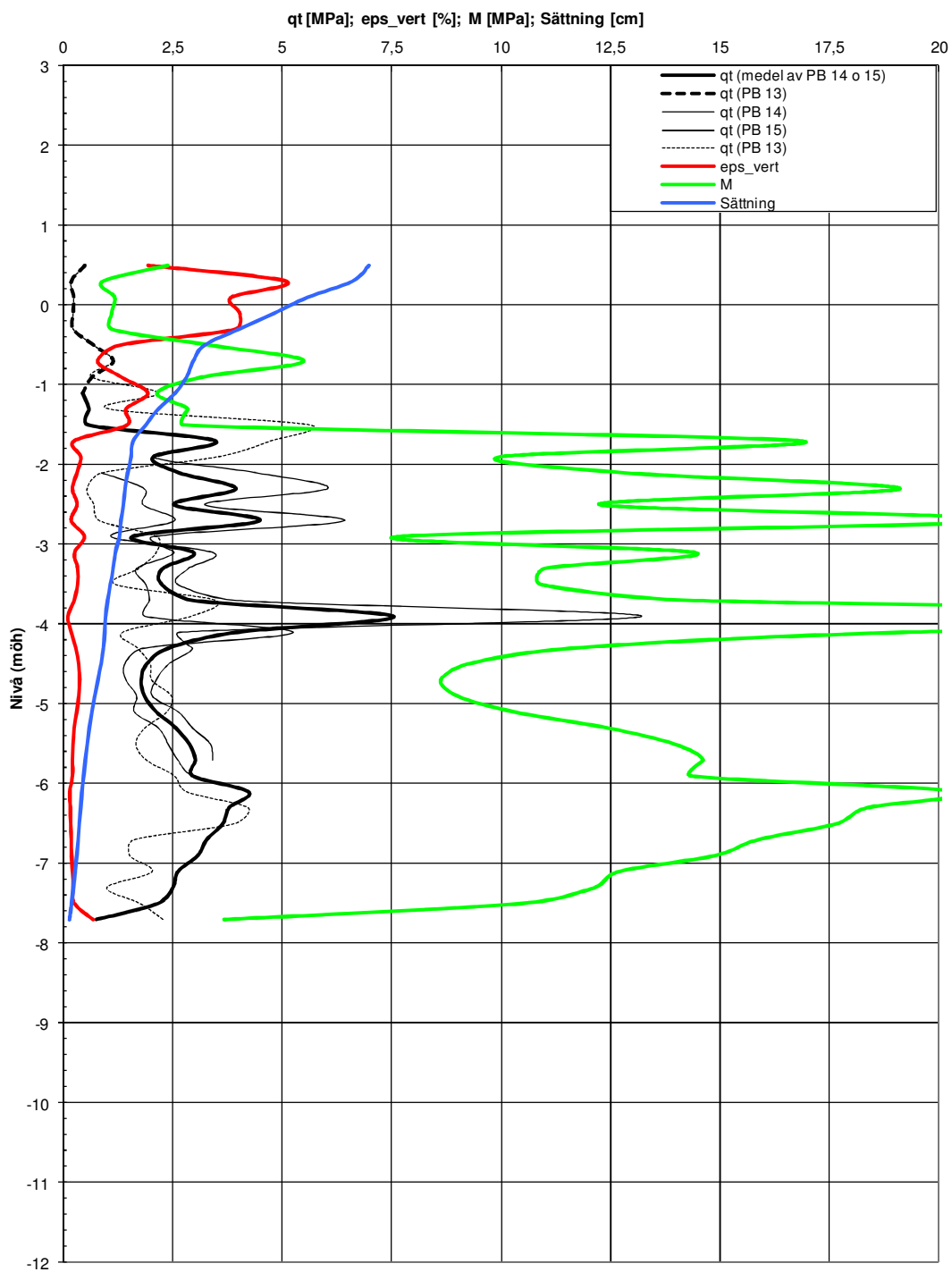
Som framgår i Figur 11 varierar spetstrycket  $q_t$  mycket kraftigt med djupet varför det även förutsätts att  $M$  varierar med djupet. Genom att kombinera (1) och (2) erhålls därmed:

$$s = \int_{z_0}^{z_1} \frac{d\sigma_v(z)}{q_t(z) \cdot \alpha} dz \quad (3)$$

Genom att kombinera Ekvation (1)-(3) erhöles en uppsättning värden på de eftersökta parametrarna, se Figur 15 och Tabell 1. Som framgår av Tabell 1 är det tveksamt om några resultat från Provbank 2 skall beaktas. Vidare är det tveksamt om resultaten från kantpeglarna skall beaktas. För att få en uppfattning om konsekvensen av att beakta en mindre eller större andel av resultaten har medelvärde och variationskoefficient av  $\alpha$  beräknats för tre fall:

- om centrumpeglarna i Provbank 1, 3 och 4 beaktas, dvs 3 värden
- om samtliga peglar i Provbank 1, 3 och 4 beaktas, dvs 6 värden
- om samtliga peglar beaktas och Scenario 3 gäller för Provbank 2, dvs 8 värden

Resultatet av beräkningen framgår i Tabell 2 och utifrån detta valdes  $\alpha_{40\text{år,medel}} = 4,7$  samt variationskoefficienten 0,25 vid framtagande av  $\alpha_{\text{karaktéristisk}}$  och  $\alpha_{\text{dimensionerande}}$ . Detta motsvarar ett försiktigt valt genomsnitt av fallen a) till c).



Figur 15. Exempel på hur mätdata från en av provbankarna nyttjades för utvärdering av parametern  $\alpha$ . I aktuellt fall erhöles  $\alpha = 4,85$ .

Tabell 1. Sammanställning av tolkade  $\alpha$ -värden från samtliga provbankar och peglar.

Provbank	$\alpha_{40}$ år [-/-] Centrum/Kantpegel	Kommentar
1	5,79/(4,85)	Osäkert värde från kantpegeln pga brist på sonderingsdata, speciellt inom de nivåer där kompressionen är störst.
2: Djupscenario 1	((2,35))/(((1,18)))	Genomgående osäkra värden pga brist på sonderingsdata på "stora djup". Extra osäkert värde från kantpegeln pga stor spridning mellan närliggande CPT-sonderingar
2: Djupscenario 2	(2,94)/((1,58))	
2: Djupscenario 3	(2,94)/((3,41))	
3	3,88/(4,02)	Osäkert värde från kantpegeln pga brist på sonderingsdata.
4	5,14/(6,38)	Osäkert värde från kantpegeln pga brist på sonderingsdata.

Tabell 2. Medelvärde och variationskoefficient för  $\alpha$  vid beaktande av olika stor andel av uppföljningarna.

Fall	Medelvärde [-]	Variationskoefficient [-]
a)	4,94	0,20
b)	5,01	0,20
c)	4,55	0,26

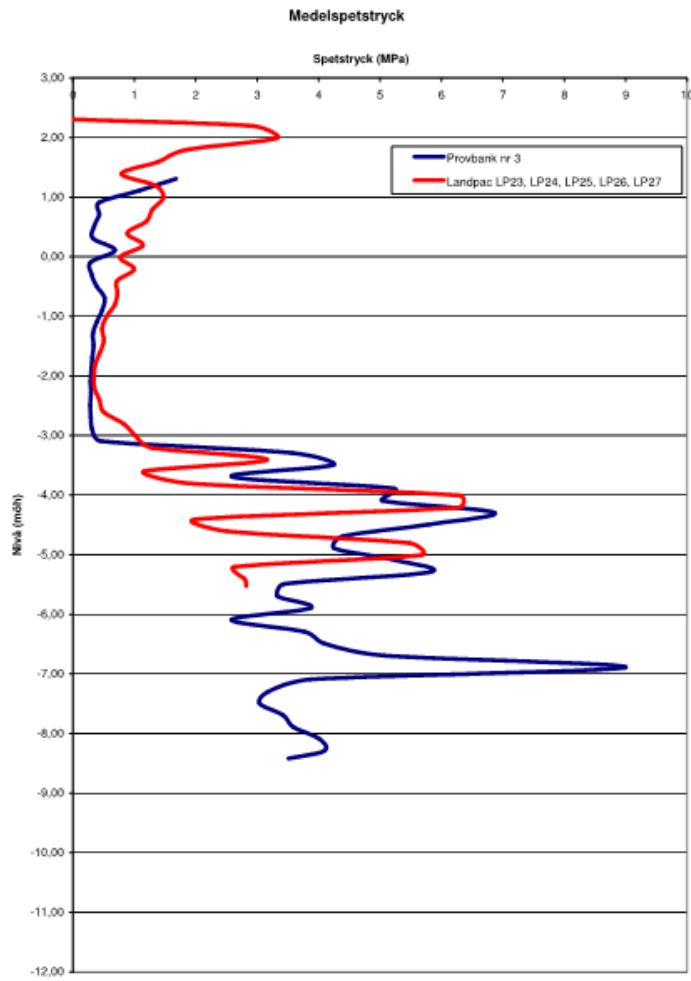
## 4.2 Uppföljning av HEIC i form av CIS- och CIR-kartor

Antalet HEIC-överfarter varierade inom området. Inom de delområden där undergrunden var som lösast utfördes enbart några enstaka överfarter innan man kunde konstatera att fyllnadsmassorna ej var packningsbara. Inom dessa delområden ("soft spots") grävdes provgropar och utfördes kompletterande sonderingar (primärt CPT-sonderingar) varvid det kunde konstateras att fyllnadsmassorna verkligen var finkorniga och vattensjuka. Genom att jämföra sonderingsresultaten mot vad som erhållits vid sondering i läget för provbankarna, se Figur 16, kunde förväntad framtida sättning bedömas för scenariot att inga åtgärder vidtogs. I flertalet fall där "soft spots" påträffades medförde sådana jämförelser att massutskiftning

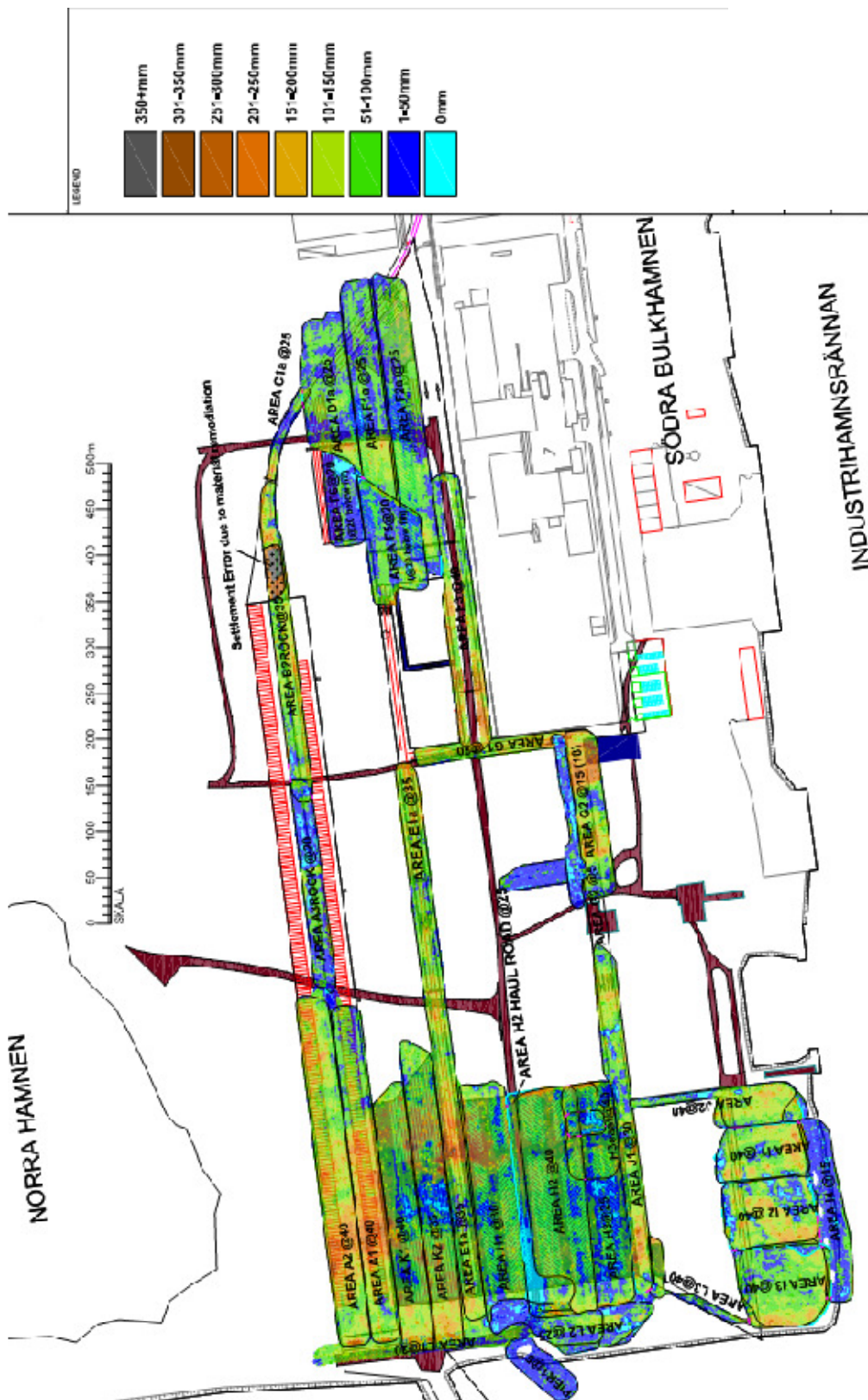
utfördes till någon eller några meters djup. Inom packningsbara delområden utfördes dock upp till 40 överfarter innan fyllningen bedömdes vara färdigbehandlad.

Akkumulerad sättning (CIS) efter avslutad HEIC-bearbetning framgår av Figur 17 medan undergrundens ”fjädring” (CIR) vid den sista överfarten framgår av Figur 18. I och med att antalet överfarter varierar påtagligt inom området går det inte att finna ett entydigt samband mellan de två figurerna. Där ”soft spots” påträffats (CIR) förefaller dock den ackumulerade sättningen (CIS) vara relativt liten. Detta kan förklaras av att massorna inom dessa områden är lågpermeabel, varvid undergrunden enbart komprimeras elastiskt vid HEIC-bearbetning. Den begränsade sättning som utbildas inom dessa områden avspeglar sannolikt enbart de skjuvdeformationer som utbildas på grund av ”lokalt bärighetsbrott” vid HEIC-passagen. Inom packningsbara delområden uppgår den ackumulerade packningsinducerade sättningen till i huvudsak ca 10-20 cm.

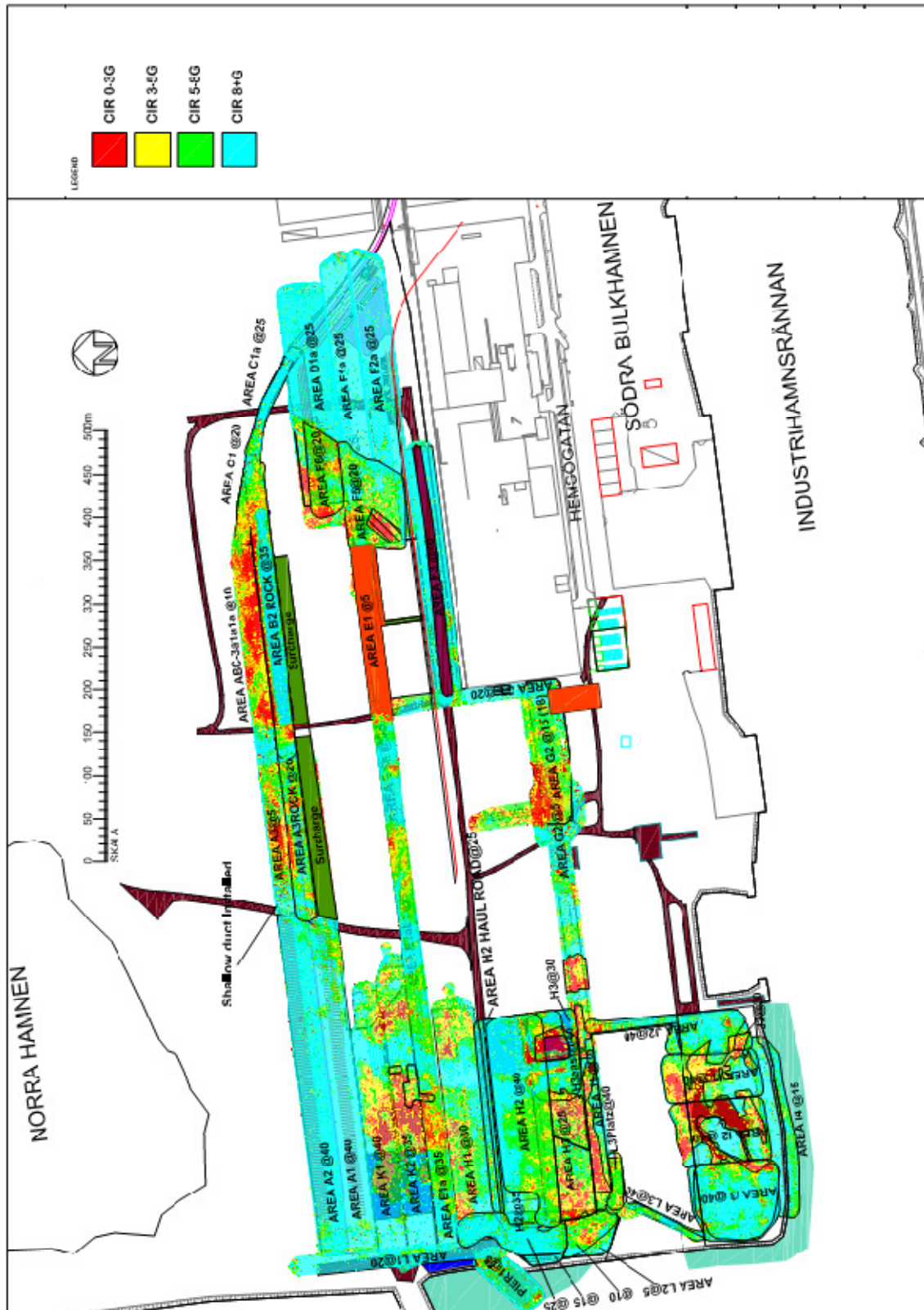
Ett illustrativt exempel på hur undergrundens ”fjädring” (CIR) förändrades inom ett delområde som till stor del utgjordes av ”soft spots” redovisas i Figur 19. Som framgår blir responsen successivt mjukare med antalet överfarter inom en stor del av det aktuella området. Detta beror sannolikt på att portrycket successivt ökade i de finkorniga massorna, varvid bärigheten och styvheten successivt sjönk i dessa. I vissa ”soft spots” sjönk bärigheten så mycket att HEIC-utrustningen körde fast efter ett fåtal överfarter, se Figur 20.



Figur 16. Exempel på hur resultaten ifrån provbankarna användes för korrelation med uppmät sonderingsmotstånd i en "soft spot".



Figur 17. CIS-karta efter avslutad HEIC-bearbetning. Antalet överfarer inom respektive delområden anges efter @. Inom ofärgade, mörkbruna och mörkblå områden utfördes ingen HEIC-bearbetning. Legenden visar ackumulerad sättning inom de olika delområdena efter den sista överfarten.



Figur 18. CIR-karta efter avslutad HEIC-bearbetning. Antalet överfarter inom respektive delområden anges efter @. Legenden visar CIR-responsen inom de olika delområdena vid den sista överfarten.





Figur 19 Exempel på successiv mjuknande respons i undergrunden inom delområde G2 i takt med ökat antal överfarter i form av en CIR-karta. Antalet överfarter anges efter @. Mellan första och sista överfarten förflöt ca 8 veckor.

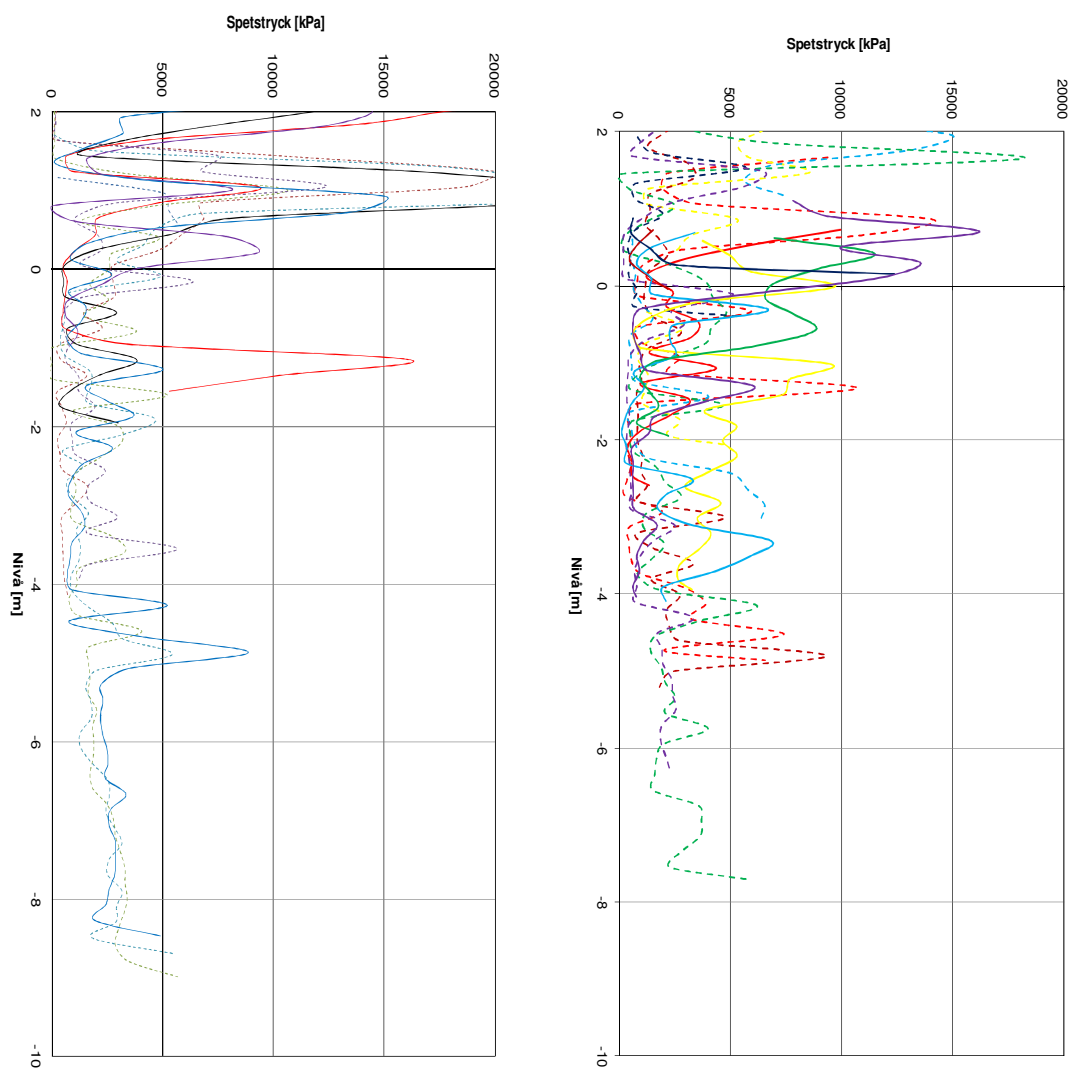


Figur 20 Exempel på tillfälle då HEIC-utrustningen körde fast.

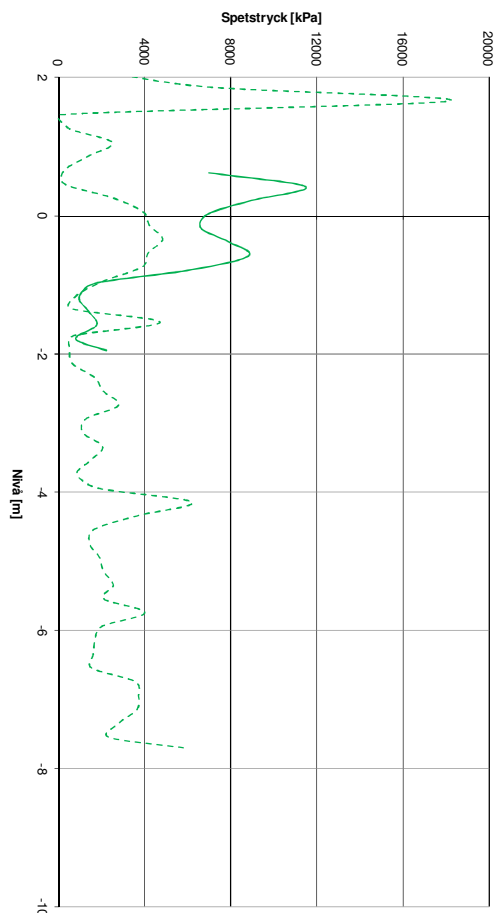
### 4.3 CPT-sonderingar före och efter HEIC

CPT-sonderingar utfördes såväl före som efter HEIC-bearbetningen i ca 20 punkter inom den västra delen av det HEIC-bearbetade området. Sonderingarna koncentrerades till fyra delområden med förhållandevis lös och finkorning undergrund (vid CPT-sonderingarna innan HEIC-bearbetningen registrerades relativt låga spetsmotstånd och relativt höga porövertryck inom dessa delområden).

I Figur 21 visas representativa resultat av registrerade spetsstryck före och efter HEIC-bearbetningen. Det går inte att urskilja någon tydlig och sammanhängande ökning av spetsmotstånden inom fyllningens övre del. Vid detaljerade jämförelser mellan enskilda sonderingskurvor kan dock en viss ökning av spetsmotståndet i vissa fall noteras, se Figur 22, och i dessa fall förefaller detta sammanfalla med fyllningsskikt där det genererade porövertrycket var lågt vid sonderingarna. Änå indikerar detta att de finkorningar fyllningsmassorna inte var packningsbara medan de grövre massorna kunde packas.



Figur 21. Exempel på spetsmotstånd före (streckade linjer) respektive efter (heldragna linjer) HEIC-bearbetning inom två delområden.



Figur 22 Exempel på spetsmotstånd före (streckade linjer) respektive efter (heldragna linjer) HEIC-bearbetning i ett enskilt borrhål.

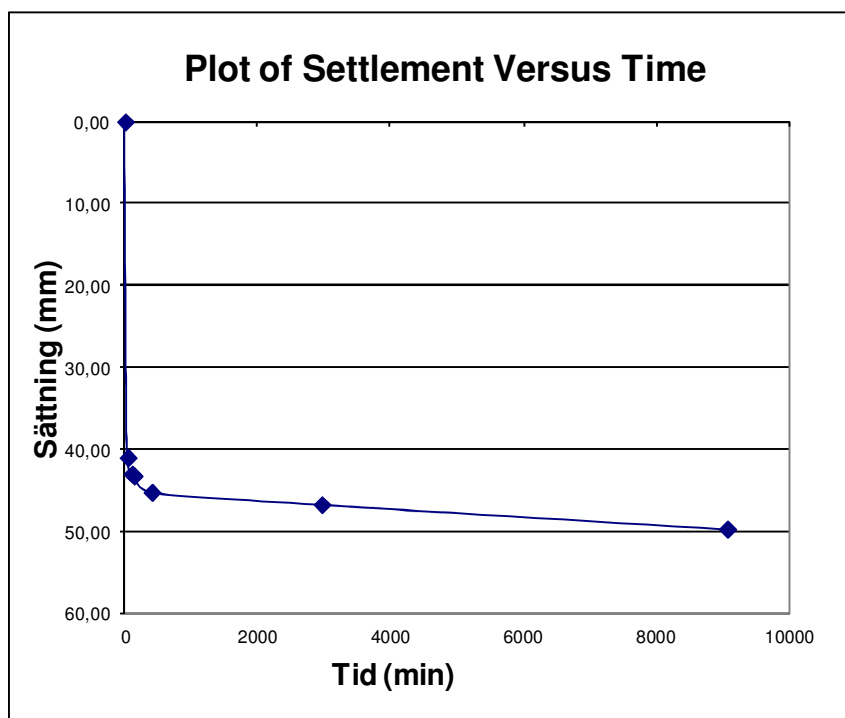
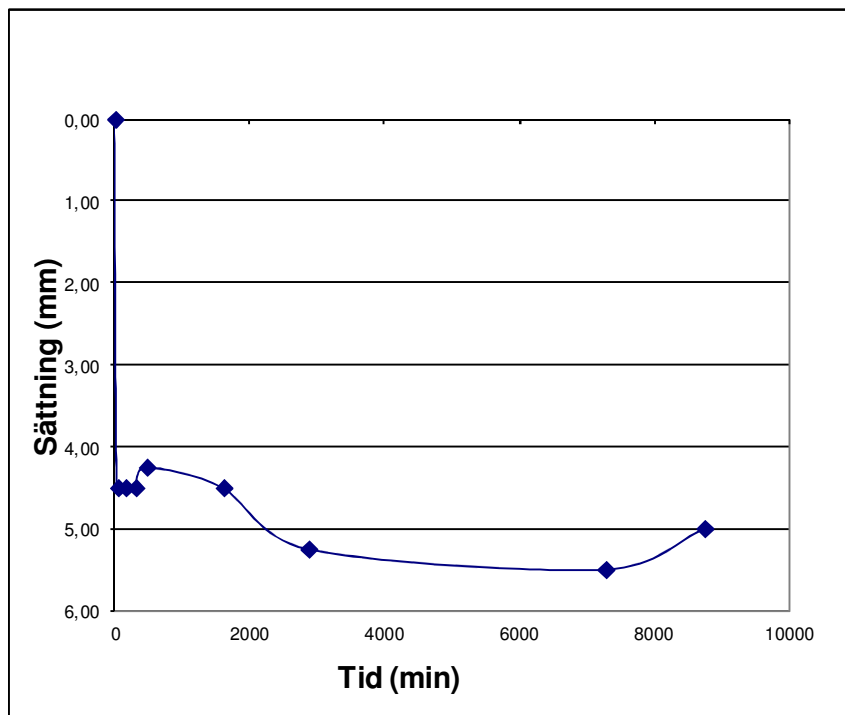
#### 4.4 ZLT

Kontrollmetoden ZLT (Zone Load Test), utgörs i princip av ett statiskt belastningsförsök som utförs på en yta av  $2 \times 2 \text{ m}^2$  med en total last på upp till  $200 \text{ kN}$  ( $50 \text{ kN/m}^2$ ), se Figur 23. Den begränsade lastytans storlek medför att ZLT-försöket primärt ger ett mått på fyllningens sättningsegenskaper ned till ca 3-4 m djup.

Totalt planerades för 9 st ZLT, men på grund av den forcerade produktionstidplanen kunde endast 7 st ZLT:s utföras och vid ett av dessa försök erhöles orimliga mätvärden. Respektive försök pågick i som mest ca 2 veckor, men i vissa fall måste försöken avbrytas innan sättningstillväxten avstannat. ZLT utfördes inom såväl ytor där CIR-mätningarna antytt styv respons som ytor där CIR-mätningarna antytt mjuk respons vid den sista HEIC-överfarten (ljusblå respektive röda områden i Figur 18). I två fall utfördes ZLT innan HEIC-bearbetningen och i dessa fall var avsikten att utföra kompletterande ZLT efter HEIC-bearbetningen, men dessa kunde, som tidigare nämnts, ej utföras. Några exempel på mätresultat från ZLT redovisas i Figur 24.



Figur 23. Utrustning tillhörande ZLT.



Figur 24. Exempel på mätresultat från ZLT Notera skillnaden i skala på den vertikala axeln i de två diagrammen.

För tolkning av uppmätt sättning ifrån ZLT antas förenklat att undergrunden utgörs av ett elastiskt och homogent material. Därmed kan dess elasticitetsmodul (styvhet) E beräknas enligt följande:

$$E = \frac{b \cdot m_{cp} \cdot q \cdot (1 - \nu^2)}{s} \quad (4)$$

där:

b = plattbredden [m]

$m_{cp}$  = formfaktor, vilken uppgår till 0,86 för en kvadratisk belastningsyta

q = påförd last [kPa]

$\nu$  = tvärkontraktionstalet, vilket antas uppgå till 0,2

s = uppmätt sättning [m]

Utgående från Ekvation (4) kunde storleken på E-modulen beräknas, varvid värdena i Tabell 3 erhålls.

Tabell 3. Utvärderad styvhet i undergrunden baserad på resultat från ZLT.

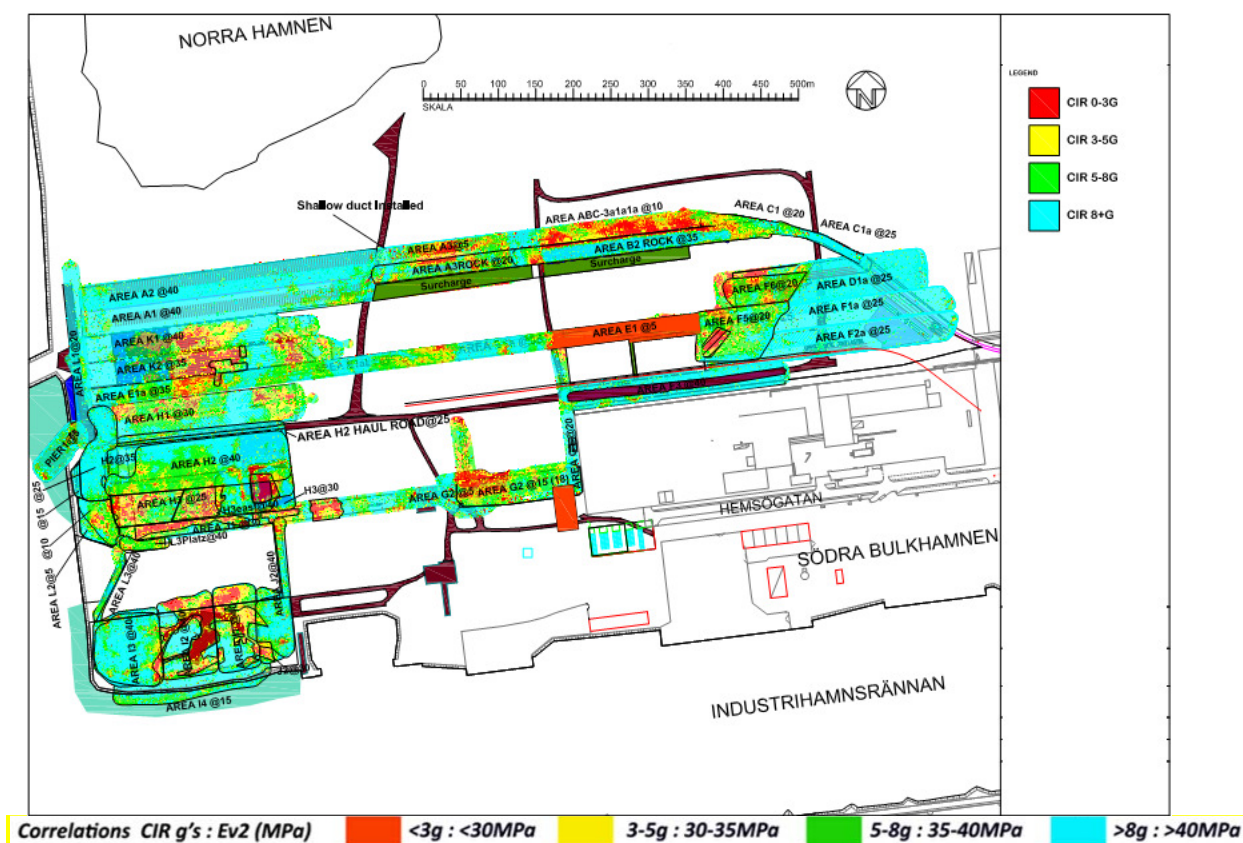
ZLT-nr	E-modul [MPa]	Kommentar
2	13	-
3	19	-
4	35	Svårtolkad eftersom den uppmätta sättningen ej avstannat.
5	31	Utförd innan HEIC-bearbetning. Svårtolkad eftersom den uppmätta sättningen ej avstannat.
6	74	Utförd innan HEIC-bearbetning. Svårtolkad eftersom den uppmätta sättningen är mycket liten.
7	2	Utförd inom en "soft spot" (röd färg enligt CIR)

Baserat på resultaten från CPT-sonderingar i närområdet till respektive ZLT kunde E-modulen beräknas baserat på de principer som redovisas i Avsnitt 4.1.3. Den på detta sätt beräknade E-modulen varierar mellan ca 1 och 20 MPa.

Det var delvis svårt att utföra CPT-sonderingar inom delområden med styv respons (ljusblå CIR i Figur 18 och tillika hög styvhet enligt i Tabell 3). Dessutom kunde uppföljningen av respektive ZLT ej pågå lika länge som uppföljningen av provbankarna. Vidare kan man förvänta att kvoten mellan CPT-spetsmotståndet och jordens styvhet ökar efter HEIC-berarbetningen, förutsatt att den haft någon effekt, [6, 7]. Sammantaget är det därför rimligt att styvheten från ZLT är högre än styvheten utvärderad från CPT-empirin.

## 4.5 Koppling mellan uppmätt respons vid HEIC-bearbetningen och terrassytans bärighet

Som tidigare nämnts uppnås den huvudsakliga packningseffekten vid HEIC-bearbetningen någon till några meter under rådande markytan samtidigt som aktuell markyta ”ruggas upp”. De undersökningar som huvudsakligen utförs för utvärdering av terrassens bärighet (dynamisk och statisk plattbelastning) har dock så liten geometrisk utbredning (0,3 m i diameter) att resultatet ifrån dessa i huvudsak endast avspeglar styvheten ned till ca 0,5 m under rådande markyta. Dessutom påverkas resultatet av bärighetsmätningen av rådande vattenkvot/portryck i och strax under terrassen vid försökstillfället. Därför kan man inte förvänta ett tydligt samband mellan uppmätt HEIC-respons (CIR) och bärighetsmätningen. I Norra Hamnen noterades dock en viss korrelation mellan låg CIR-respons och låg bärighet och vice versa. Denna korrelation, visualiserad i Figur 25, nyttjades delvis som underlag vid beslut om inom vilka delområden som utskiftning erfordrades.



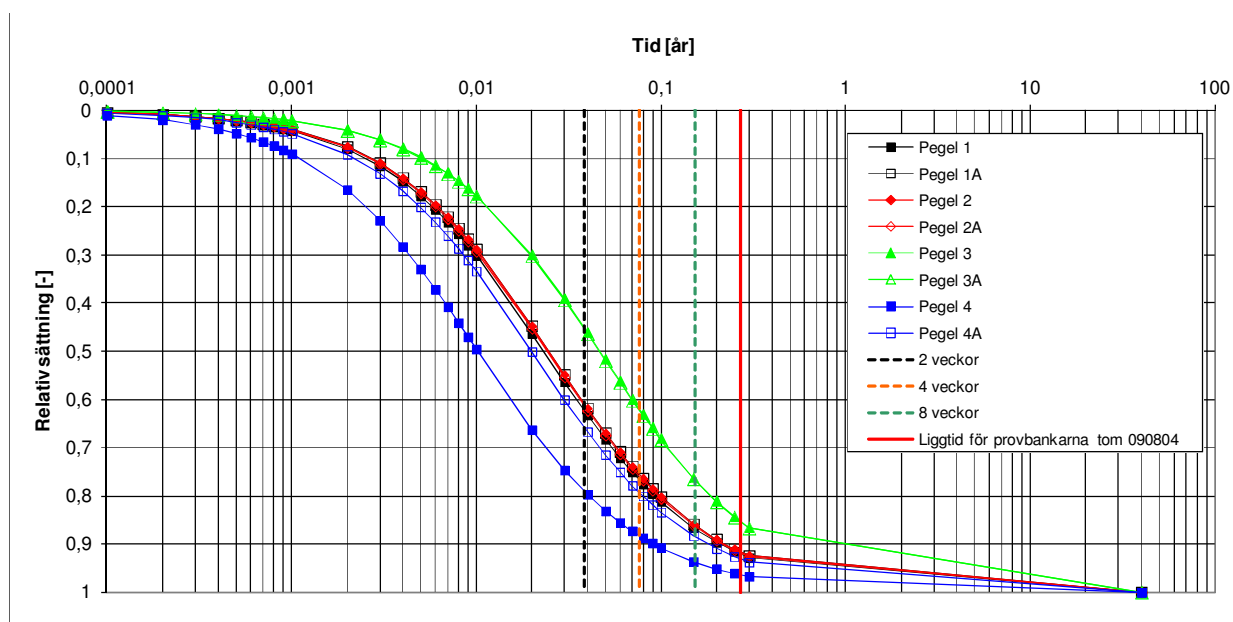
Figur 25. Översiktlig relation mellan CIR och terrassens bärighet [1, 2]. Notera att figuren avser situationen innan massutskiftning inom ”hot spots”.



## 4.6 Sättningsuppföljning vid påförande av förstärknings- och bärlager och efter avslutade entreprenadarbeten

Totalt placerades 22 st markpeglar ut inom det HEIC-bearbetade området. Avsikten var att placera peglarna där de största sättningarna förväntades, varvid dessa beräknats utgående från sonderingsresultaten och den princip som redovisas i 4.1.3. Vidare var avsikten att uppföljningsmätningarna skulle påbörjas strax innan förstärkningslagret påfördes. På grund av de produktionstekniska förutsättningarna måste peglarnas planläge dock anpassas i flertalet fall samtidigt som uppföljningsmätningarna i vissa fall inte påbörjades förrän efter att förstärkningslagret delvis fyllts upp. Dessutom blev ett flertal peglar påkörda, varav flera blev helt demolerade, under mätperioden. Peglarnas sättningsutveckling följdes från slutet av november 2009 till början av juli 2010. I samband med att överbygganden lades ut togs markpeglarna bort.

För värdering av uppföljningsmätningarna av markpeglarna utnyttjades ånyo erfarenheterna ifrån provbankarna. Som tidigare påvisats (Avsnitt 4.1.3) uppvisar provbankarnas tid-sättningskurvor ett hyperbelformat samband. Om samtliga sättningsmätningar förutsätts följa ett hyperbelformat samband och respektive mätning normaliseras mot sättningen efter 40 år tid (konstruktionernas dimensionerande livslängd) erhålls kurvscharan i Figur 26. Ur diagrammet framgår bl.a. att ca 45-80 % av 40-års sättningen utbildas efter ca 2 veckor och att ca 75-95 % av 40-års sättningen utbildas efter ca 8 veckor.



Figur 26. Normaliserad hyperbelanpassning av sättningsuppföljningarna vid provbankarna.

Om man antar att den relativa sättningshastigheten utvecklas med tiden på samma sätt i läget för pegelmätningarna kan storleken på 40-års sättningen i läget för peglarna skattas. Härvid konstrueras ett diagram med två uppsättningar hyperbelformade referenskurvor, vars 40-års sättning uppgår till 1 respektive 5 cm, varefter uppmätt sättning i läget för markpeglarna inkluderas i diagrammet, se Figur 27. Som framgår uppvisar de uppmätta sättningarna en stor spridning. Genom att jämföra den uppmätta "sättningshastigheten" ( $\Delta\text{sättning}/\Delta\log(\text{tid})$ ) med de hyperbelformade referenskurvornas "sättningshastighet" vid motsvarande tidpunkt bedöms dock att den förväntade 40-års sättningen inte överstiger 5 cm för aktuella belastningsnivåer.

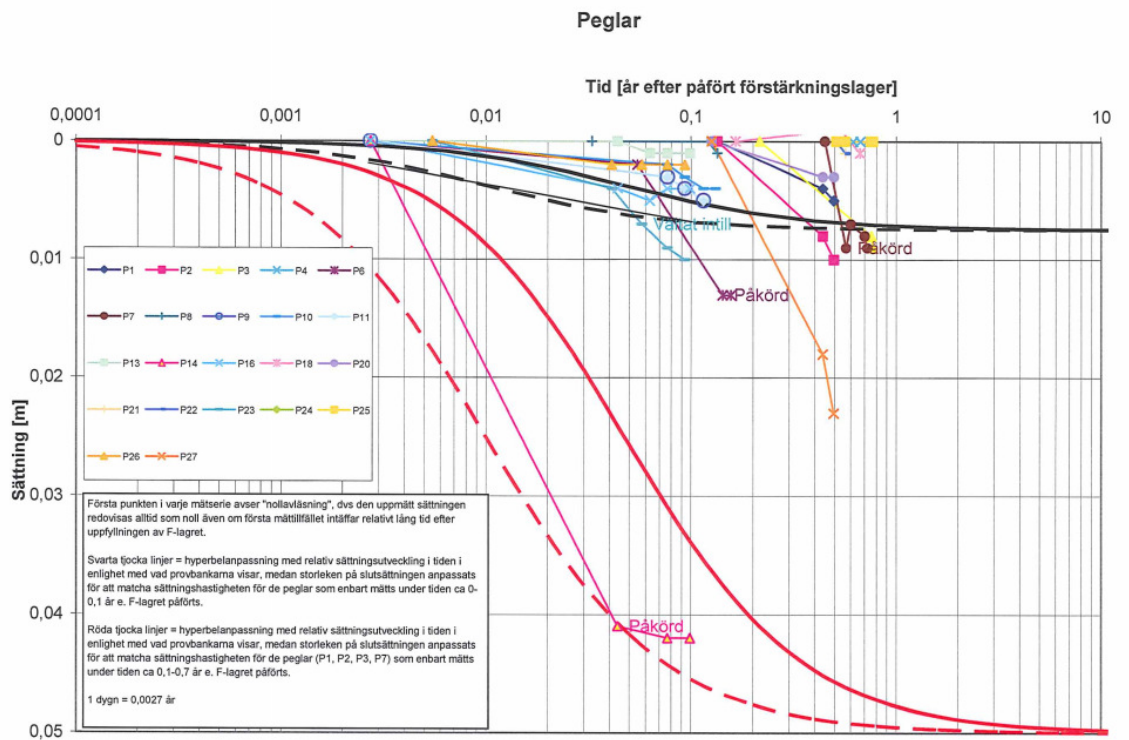
Den ovan bedömda storleken på 40-års sättningen i läget för markpeglarna avser situationen efter påförandet av förstärkningslagret. Därefter påfördes dock ca 80 mm bärlager och ca 150 mm asfalt under perioden april-juli 2010. Sättningsmätningar saknas dock för detta skede. En grov skattning av de tillkommande sättningarna till följd av bärlaget och asfalten kan dock göras enligt följande princip:

1. Den uppmätta sättningen i respektive pegelläge antas vara proportionell mot den tillskottslast som uppkommit då förstärkningslagret påförts.
2. Tillskottslasten i respektive pegelläge antas vara proportionell mot nivåskillnaden mellan ursprunglig markyta (innan Skanskas entreprenadarbeten inleddes) och överkant förstärkningslager.
3. Den tillkommande sättningen i respektive pegelläge, till följd av färdigställandet av konstruktionen, kan skattas genom att multiplicera den tidigare tolkade pegelsättningen (1 á 5 cm) med en "skalfaktor", vilken utgör kvoten mellan den tillkommande lasten vid påförandet av bärlager +asfalt och tillskottslasten då förstärkningslagret påförts.

Den enligt ovan uppskattade tillkommande sättningen uppgår till ca 1 á 5 cm.

Sammantaget uppgår således de uppmätta/uppskattade sättningarna till maximalt ca 10 cm. Som jämförelse uppgår de beräknade sättningarna (enligt principerna redovisade i Avsnitt 4.1.3) till ca 5-10 cm.

Eventuella sättningsuppföljningar efter entreprenadarbetenas färdigställande har ej gått att uppbringa. Visuella bedömningar vid platsbesök i Norra Hamnen i mitten av mars 2014 tyder dock på att de utbildade sättningarna är mindre än de objektsspecifika kraven inom den absoluta merparten av de HEIC-bearbetade områdena.



Figur 27 Uppmätt sättning i läget för markpeglarna i samband med påförande av förstärkningslagret samt hyperbelanpassade referenskurvor med 40-års sättningen 1 respektive 5 cm.

## 5 Slutsatser och rekommendationer

Fyllnadsmassorna i Norra Hamnen är mycket heterogena, vilket är naturligt med tanke på att massorna har varierande ursprung samt att uppfyllningen utförts under många år och med varierande grad av kontroll. Under sådana förhållanden bör projektering, byggande och kontroll utföras i nära samarbete mellan berörda parter, varvid ”observationsmetoden” sannolikt är den enda framkomliga vägen för att uppnå en tekniskt-ekonomiskt lämplig lösning. I aktuellt fall tillämpades flödesschemat i Figur 2, vilket visat sig vara framgångsrikt i detta fall. De viktigaste erfarenheterna från de ingående komponenterna i ”flödesschemat” sammanfattas nedan:

- Baserat på uppföljningarna av provbankarna utvecklades en tillförlitlig objektsspecifik sättningsberäkningsmodell, vilken baseras på resultaten från CPT-sonderingar. Denna modell nyttjades inom projektet för prognostisering av de framtida sättningarna inom området, varvid konstaterades att de förväntade sättningarna skulle understiga de objektsspecifika kraven inom huvuddelen av det aktuella området.
- HEIC, inklusive uppföljning i form av CIS och CIR, förefaller att vara ett bra verktyg för att komprimera packningsbara massor och samtidigt identifiera ”soft spots” där massorna består av relativt finkorning lermorän vilken ej är packningsbar – åtminstone inte med den metodik som använts vid Norra Hamnen. Således är metoden ett bra exempel på tillämpning av ”observationsmetoden”. Vid Norra Hamnen utfördes kompletterande sonderingar och/eller provgröpar i läget för samtliga ”soft spots”, varvid konstaterades att massornas sammansättning var sådan att de inte var packningsbara. Därför skiftades massorna ut i dessa delområden.
- Uppmätta spetstryck vid CPT-sonderingar, utförda såväl före som efter HEIC-bearbetning, påvisar huvudsakligen ingen tydlig packningseffekt i de sonderade punkterna. Detta beror sannolikt på att de studerade punkterna huvudsakligen är belägna i delområden med lösa och finkorniga massor.
- Resultaten från ZLT-försöken och peglarna i förstärkningslagret uppvisar stor spridning. Å ena sidan avspeglar detta troligen den heterogena undergrunden. Å andra sidan beror detta sannolikt på att mätningarna, såväl tidsmässigt som geografiskt kolliderat, med en tidskritisk fas i entreprenaden varvid mätkvalitén tyvärr blivit lidande. Resultaten från ZLT-försöken antyder dock att undergrundens styvhet var minst lika hög som den styvhet som erhöles vid nyttjande av den sättningsberäkningsmodell som utvecklades på basis av provbankarna.
- CIR-mätningarna som erhöles vid HEIC-bearbetningen gav en någorlunda god bild av hur bärigheten på terrassen varierade inom området.
- Den uppskattade 40-års sättningen (dimensionerande livslängd), baserat på resultatet från uppföljningsmätningar fram till strax innan färdigställandet av entreprenadarbetena, uppgår till maximalt ca 10 cm. Detta är i samma storleksordning som de beräknade

sättningarna. Därför har sättningsberäkningsmodellen på senare tid tillämpats inom flera andra projekt där undergrunden består av fyllnadsmassor.

- I skrivande stund (knappt 3 år efter färdigställandet) understiger de utbildade sättningsberäkningarna de objektsspecifika kraven inom den absoluta merparten av de HEIC-bearbetade områdena.

Sammantaget bedöms att HEIC-packning är en metodik som fungerar bra vid komprimering av utfyllda massor ned till några meters djup, förutsatt att massorna inte är för finkorniga. Finkorniga massor (exempelvis relativt finkornig lermorän) förefaller dock inte vara packningsbara med denna metodik. Tack vare den kontinuerliga ”produktionskontroll” som erhålls i form av CIR- och CIS-kartor förefaller det dock vara möjligt att identifiera packningsbara respektive icke packningsbara delområden.

HEIC-packningen får ingen nämnvärd packningseffekt i terrassytan. Därför bör efterföljande traditionell vältning av terrassytan utföras så att denna uppnår tillräcklig bärighet vid efterföljande uppbyggnad av förstärknings- och bärlager.

För att kunna bedöma kompressionsegenskaperna hos utfyllda massor, med varierande och svårbedömda egenskaper, bör någon form av provbelastning utföras, varvid resulterande marksättning och/eller kompression mäts. Provb belastningen bör utföras i form av relativt storskaliga provbankar., vilka uppförs så tidigt som möjligt (idealt innan upphandling av entreprenaden). Om de utfyllda massorna är heterogena bör flera provbankar uppföras, varvid dessa placeras i relativt lösa respektive fast delområden så att ”extremsituationerna” täcks in.

Genom att kombinera resultaten från provbankarna med sonderingsresultat (varav vissa utförts i läget för provbankarna) kan en lokal empiri skapas för bedömning av de utfyllda massornas kompressionsegenskaper inom hela det aktuella området. I aktuellt projekt nyttjades CPT-sonderingar för framtagande av sådan lokal empiri, men alternativa undersökningsmetoder med ”direkt mätning” av deformationsegenskaperna (exempelvis dilatometerförsök eller pressometerförsök) leder sannolikt till större precision om så erfordras. Sådana alternativa undersökningsmetoder är dessutom sannolikt bättre än ”grova sonderingsmetoder” (exempelvis CPT-sondering eller hejarsondering) för detektering effekten av HEIC-packningen i form av förändrade kompressionsegenskaper samt för bedömning av att massorna uppnått tillräcklig styvhet. Även ZLT bör kunna nyttjas för detta, men då erfordras god planering och koordinering med övrig produktion.

Vid efterföljande uppbyggnad av förstärknings- och bärlager bör sättningsuppföljningar utföras för verifiering av att sättningsberäkningarna inte blir större än vad som är acceptabelt. Om sådan uppföljning görs med markpegel erfordras god planering och koordinering med övrig produktion så att dessa får ”rätt placering” såväl ur ett geotekniskt som produktionstekniskt perspektiv.

## 6 Referenser

- [1] Kelly, D. (2014). Personlig kommunikation.
- [2] Kelly, D. Gil, J.(2012) Monitoring HEIC using Landpac CIR and CIS Technologies. Proceedings of the International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels 31 May & 1 June 2012. Brussels.
- [3] Hellgren, L.G. (1982). Hyperbelfunktion för beräkning av sättningar i lera. Väg- och Vattenbyggaren, Nr. 10, 1982.
- [4] Lekarp, F. (2010). Personlig kommunikation.
- [5] Larsson, R. (2007). CPT-sondering. Utrustning - utförande - utvärdering. En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord. SGI Information 15, Linköping.
- [6] Jendeby, L. (1993). Djuppackning. Byggforskningsrådet T21:1993. Stockholm.
- [7] Lunne, T, Robertson, PK, Powell, J. (1997). CPT and piezocone testing in geotechnical practice. Blackie Academic & Professional. London.