

Massundanträngning i samband med pålning i lera



Displacement due to pile driving in soft clay

Julia Jonsson

Anna Kristiansson

GEO
Institutionen för geologi och geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg

HANDLEDARNAS FÖRORD

Att massundanträngning sker i samband med pålning i lera och andra ”inkompressibla” jordar känner nog de flesta till. Däremot är det ganska sällan som några konkreta problem dyker upp i samband med sådan pålning, delvis kanske beroende på att man i många fall inte gör några speciella uppföljningsmätningar!

I samband med byggandet av Götatunneln i Göteborg har dock frågeställningen accentuerats. Skälen är flera, ett är naturligtvis att det handlar om ställvis ganska omfattande pålning, och dessutom i omedelbar närhet till befintliga konstruktioner.

Till följd av att man samtidigt utför stora och djupa schakter har också omfattande mätprogram genomförts.

Väsentliga rörelser har också konstaterats, och befintliga konstruktioner har flyttat på sig upp till drygt 100 mm, även om en del av dessa rörelser kan hänföras till schaktarbeten.

Dagens metoder att beräkna/bedöma rörelser till följd av pålning är dels mycket överslagsmässiga, dels kräver de delvis mycket subjektiva bedömningar som indata. Vidare är modellerna mycket sparsamt ”verifierade”, och i Sverige i princip inte alls.

Detta examensarbete initierades därför för att ta till vara den erfarenhet som skapats inom Götatunnel-projektet, men även inom de omfattande pålningsarbeten som utförs inom Göteborgs hamn. Syftet var dels att jämföra resultaten med dagens enkla modeller, dels att utreda möjligheterna att simulera massundanträngnings-problematiken med modern FEM-beräkning.

Projektet möjliggjordes genom att samtliga parter bidrog med mätdata och information. Därför riktas ett stort tack till Göteborgs hamn, NCC, LBT-konsortiet och Skanska.

Göteborg i December 2004

Leif Jendeby
Vägverket

Anders Kullingsjö
Chalmers

FÖRFATTARNAS FÖRORD

I detta examensarbete har massundanträngning som uppkommer i samband med pålning i lera studerats. Studier och mätningar har gjorts vid Götatunneln och Skandiahammen i Göteborg. Examensarbetet har utförts vid GEO-institutionen på Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg för Vägverket i samarbete med Göteborgs Hamn AB, Skanska Sverige AB, konsortiet Lilla Bommen Tunneln och NCC. Arbetet pågick mellan juni och november 2004.

Vi vill tacka alla som har hjälpt oss i vårt arbete. På GEO-institutionen Chalmers; handledare Anders Kullingsjö för stor hjälp med PLAXIS-simuleringarna samt värdefulla synpunkter under arbetets gång, Peter Hedborg för teknisk support, Ingemar Forsgren för installation av mätutrustning.

På Vägverket Region Väst; handledare Leif Jendeby för kritisk granskning och medverkan samt ovärderlig kunskap och stor erfarenhet.

På Göteborgs Hamn AB; Ingemar Moström och Richard Adestrom för information om pålningsarbetet i Skandiahammen.

På Skanska Grundläggning; Lars Bergström och Krister Skoglund för hjälp vid mätningar i Skandiahammen.

På Skanska Teknik; Jan Romell och Anders Johansson för information om pålningsarbetet vid J2, Götatunneln.

På NCC Teknik; Per Eriksson och Kajsa Rigardt för information om pålningsarbetet vid L3, Götatunneln.

På konsortiet Lilla Bommen Tunneln; Daniel Svärd, Nicklas Davidsson och Dirk Exner för information om pålningsarbetet vid L2, Götatunneln.

Göteborg november 2004

Julia Jonsson

Anna Kristiansson

SUMMARY

Due to soil conditions in parts of Sweden consisting of soft deep clay, piling has often been used in these areas as foundation reinforcement. Pile driving of soil-displacing piles in soft clay causes ground heave and lateral displacement. Saturated clay can, over a short time period, be assumed to be incompressible and therefore, piling forces clay to move up- and outwards.

The resulting soil displacement can damage adjacent constructions and it is therefore important to predict and control these movements.

This thesis aims to increase the understanding of displacement due to pile driving in soft clay by studying the effects caused by piling at different construction sites in Gothenburg; Skandiahammen and Götatunneln L3, L2, J2. Field studies have been carried out by measuring vertical and lateral movements in the four areas.

There are calculation models available to estimate ground heave and lateral movements but the results have not been accurately compared to field measurements taken in Sweden. A simple calculation model has been analysed in order to compare theoretical to measured values.

Comparison between the calculation model and field studies show that the calculation model is inaccurate, the field results indicating that lateral ground heave extends further than the length of pile as claimed by previous studies. A revaluation and new interpretation of data has been attempted due to the dissimilarities between model and field results.

Simulations in FE-program PLAXIS have been carried out to investigate the possibility of duplicating soil displacement. Attempts have been made with simulation of displacement due to both single and multiple piles. The results of the PLAXIS simulation have not given the expected movement, due, probably, to the governing ratio of model size to displacement size. These results have, however, shown certain tendencies of a movement pattern but no absolute value for deformation has been obtained. This has meant that the PLAXIS results have only been compared to the results of the calculation model.

Additional studies need to be made in order to give further understanding of displacement due to pile driving in soft clay. To verify the predictions more detailed field studies have to be carried out, preferably away from urban areas where no other activities can affect the results.

SAMMANFATTNING

Till följd av jordförhållandena i delar av Sverige med djup lös lera, har pålning ofta använts som grundläggningsmetod. När pålar slås ned i lera påverkas omgivningen. Vattenmättad lera kan i korttidsfallet antas vara näst intill inkompressibel och pålning tvingar därför leran att flytta på sig utåt och uppåt enligt ”minsta motståndets lag”.

Lera som trängs undan kan t ex ge skador på närliggande konstruktioner och redan slagna pålar och därför är det viktigt att kontrollera denna rörelse.

Examensarbetet syftar till att öka förståelsen för förloppet vid massundanträngning genom att bland annat studera effekterna av pålning på olika platser i Göteborg; Skandiahammen och entreprenaderna J2, L2 och L3 vid Götatunneln. Fältstudierna har utförts genom att vertikal- och horisontalrörelser har uppmätts i ett antal mätpunkter inom områdena.

Idag finns överslagsmetoder för att bedöma hävning och horisontella rörelser, dock är kalibreringen mot ”verkligheten” måttligt utförd, i vart fall i Sverige. En beräkningsmodell för massundanträngning har analyserats för att kontrollera i vilken utsträckning metoden stämmer mot värden uppmätta inom de undersökta platserna.

Jämförelser mellan beräkningsmodellen och fältstudierna visar att beräkningsmodellen är mycket osäker, bland annat indikerar resultaten att hävning sker även utanför en pållängds avstånd från pålningsområdet. På grund av den dåliga överrensstämelsen har försök gjorts att tolka resultaten annorlunda och även ta hänsyn till att pålningen påverkar mer än en pållängd från pålningsområdet.

Simulering i FE-programmet PLAXIS har utförts för att undersöka möjligheterna att efterlikna rörelserna vid massundanträngning. Försök har utförts för både en enskild påle och en hel pålrad. Det har visat sig vara svårt att erhålla rimliga värden från PLAXIS då rörelsernas utbredning styrs av de randvillkor som angivits. Därför har PLAXIS-resultaten bara jämförts med beräkningsmodellen.

Ytterligare studier behöver utföras för att ge förståelse för massundanträngning i samband med pålning i lera. För att kunna verifiera förutsägelseerna måste fler och utförligare fältstudier utföras, helst utanför tät bebyggelse där inga aktiviteter som kan påverka mätresultaten förutom själva pålningen pågår.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

HANDLEDARNAS FÖRORD	I
FÖRFATTARNAS FÖRORD	II
SUMMARY	III
SAMMANFATTNING	IV
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	V
BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER	VI
1 INTRODUKTION	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och metod.....	1
1.3 Mål	2
1.4 Avgränsningar	2
2 MASSUNDANTRÄNGNING	3
2.1 Massundanträngning av lera.....	3
2.2 Inverkan på och av intilliggande pålar	5
2.3 Förekomst av skikt av löst lagrat grövre material	7
2.4 Schakter i samband med pålning.....	9
2.5 Konsolidering	9
2.6 Åtgärder för minskad massundanträngning	10
2.6.1 Anpassning av pålningsordning	11
2.6.2 Proppdragning	11
3 FÄLTSTUDIER	13
3.1 Mätmetoder	13
3.2 Pålningsområden inom vilka mätningar utförts	15
3.2.1 Götatunneln	15
3.2.2 Skandiahamnen	38
4 BERÄKNINGAR	45
4.1 Beräkningsmodell enligt Rehnman	45
4.1.1 Götatunneln	47
4.1.2 Skandiahamnen	52
4.2 FE-beräkningar (PLAXIS)	53
4.2.1 Simulering	54
5 JÄMFÖRELSER	61
5.1 Fältstudier jämfört med beräkningsmodell enligt Rehnman	61
5.1.1 Götatunneln	61
5.1.2 Skandiahamnen	64
5.2 PLAXIS jämfört med beräkningsmodell enligt Rehnman	65
5.3 Inverkan av redan slagna pålrader i PLAXIS.....	66
6 ANALYS AV BERÄKNINGSMODELL ENLIGT REHNMAN	67
6.1 Inverkan av pållängd	67
6.2 Tolkning av hävning utanför pålningsområde	67
6.3 Hävning av enskilda pålar enligt superpositionsprincipen.....	68
6.4 Beräkningsmodell enligt Rehnman baserad på hävning på ett avstånd längre än en pållängd från pålningsområdet	71
7 SLUTSATSER	73
7.1 Fortsatta studier	74
REFERENSER	
FÖRTECKNING ÖVER BILAGOR	

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

Romerska bokstäver

b	[m]	pålningsområdets bredd
c_{ref}	[kPa]	lerans skjuvhållfasthet
c_u	[kPa]	lerans odränerade skjuvhållfasthet
E	[kPa]	elasticitetsmodul
g	[m/s ²]	gravitation
K	[kPa]	tryckmodul
K_0	[-]	vilojordtryckscoefficient
l	[m]	pålningsområdets längd
u	[kPa]	portryck
V	[m ³]	volym
x	[m]	hävning inom pålningsområdet
z_{kr}	[m]	kritiskt djup

Grekiska bokstäver

α	[-]	faktor som anger mothållande krafterns storlek i beräkningsmodellen
β	[-]	faktor som anger mothållande krafterns storlek i beräkningsmodellen
γ	[-]	faktor som anger mothållande krafterns storlek i beräkningsmodellen
δ	[-]	faktor som anger mothållande krafterns storlek i beräkningsmodellen
ε	[-]	töjning
φ	[°]	friktionsvinkel
γ	[kN/m ³]	tunghet
γ'	[kN/m ³]	effektiv tunghet
γ_w	[kN/m ³]	tunghet för vatten
η	[-]	hävningfaktor
σ	[kPa]	spänning
σ'	[kPa]	effektiv spänning
ν	[-]	tvärkontraktionstal
ψ	[°]	dilatationsvinkel

1 INTRODUKTION

1.1 Bakgrund

Till följd av jordförhållandena i delar av Sverige med djup lös lera, har pålning ofta använts som grundläggningsmetod. Redan i slutet av 1800-talet dokumenterades omfattande praktiska exempel från pålning i Göteborgsområdet och pålforskningen har sedan dess varit omfattande, men det är inte förrän på senare tid massundanträngning uppmärksammas som ett problem.

Vid pålning i lera med massundanträngande pålar rörs leran om närmast pålen och inom en större volym trängs den undan i vertikal- och horisontalled. Den största påverkan på omgivningen grundar sig i själva massundanträngningen och den dynamiska belastning som jorden utsätts för vid pålslagningen. Undanträngningen påverkar omgivningen, t.ex. angränsande byggnader, gator, utrustningar och markförlagda ledningar.

I samband med byggandet av Götatunneln i centrala Göteborg har t.ex. stora deformationer uppmätts i den omgivande leran.

Idag finns överslagsmetoder för att bedöma hävning och horisontella rörelser, dock är kalibreringen mot ”verkligheten” måttligt utförd, i vart fall i Sverige. Det har också visat sig att dagens beräkningsmodeller utgör mycket enkla modeller som har uppenbara brister.

1.2 Syfte och metod

Detta examensarbete syftar till att öka förståelsen för förloppet vid massundanträngning genom att bland annat studera effekterna av pålning på olika platser i Göteborg; Skandiahammen och entreprenaderna J2, L2 och L3 vid Götatunneln. Arbetet har utförts i samarbete mellan Chalmers, Vägverket, Göteborgs Hamn AB, Skanska Sverige AB, konsortiet Lilla Bommen Tunneln och NCC.

Vid Götatunneln behandlas endast mätningar utförda inom själva entreprenaderna, medan i Skandiahammen har extra mätningar vid pågående pålning utförts. Fältmätningarna i Skandiahammen finansieras förutom av Chalmers och Vägverket även av Göteborgs Hamn AB, Skanska Sverige AB, SBUF och SVR.

En beräkningsmodell för massundanträngning analyseras med syftet att kontrollera i vilken utsträckning metoden stämmer mot värden uppmätta inom de undersökta platserna.

Datorsimulering i FE-programmet PLAXIS syftar dels till att undersöka möjligheterna att simulera massundanträngning, dels till att verifiera/förkasta dagens enklare modeller. Fördelarna med att kunna simulera effekter från pålning i PLAXIS är att detta i så fall öppnar möjligheter för att även bedöma pålningens inverkan på befintliga konstruktioner och närstående pålar.

1.3 Mål

Målet med examensarbetet är att sammanställa och öka kunskapen om massundanträngning i lera vid pålningsarbeten.

En beräkningsmodell ska genom studier av olika verkliga fall utvärderas och dess begränsningar ska belysas.

Genom förståelse för massundanträngning ska ett försök göras att skapa en modell som simulerar förloppet vid pålning.

1.4 Avgränsningar

Examensarbetet behandlar inte analys av portryck i samband med pålning, utan tar endast hänsyn till lerans ”förflyttning”.

Då ett stort antal mätningar har utförts vid samtliga entreprenader har ett urval av mätpunkter gjorts. Till grund för urvalet ligger mätpunkternas placering och tidpunkterna för avläsning. De analyserade platserna är valda med hänsyn till att pålningen har skett så ”ostört” som möjligt, d.v.s. med få samtidigt pågående andra aktiviteter.

FE-programmet PLAXIS beskrivs här enbart översiktligt, för mer detaljerad information och tillämpningar hänvisas till Brinkgreve R.B.J (2002).

2 MASSUNDANTRÄNGNING

När pålar slås ned i lera påverkas omgivningen. Vattenmättad lera kan i korttidsfallet antas vara näst intill inkompressibel och pålning tvingar därför lera att flytta på sig utåt och uppåt enligt ”minsta motståndets lag”. Rörelserna ger upphov till stora spänningar som i sin tur ger ett ökat portryck. Spänningarna, och därmed porövertrycket, minskar med avståndet från pålningsområdet.

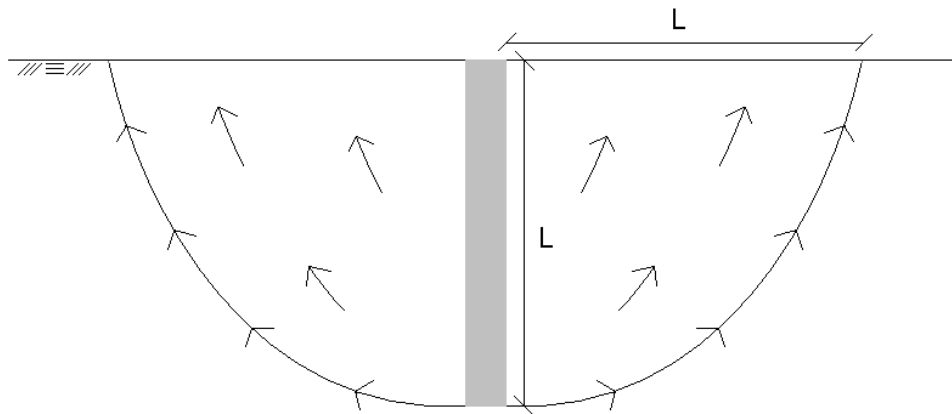
Porövertrycket jämnas med tiden ut och den lokala intensiteten minskar därigenom. Samtidigt ökar då effektivspänningarna eftersom lasten övergår ”från vattnet till kornskelettet” och konsolideringssättningar uppstår.

Lera som trängs undan kan t ex ge skador på närliggande konstruktioner och redan slagna pålar, därför är det viktigt att kontrollera denna rörelse. Nedan anges ett antal faktorer som påverkar massundanträngning vid pålning:

- In situ spänningar
- Jordlagerföljd
- Omgivande markbelastningar
- Schakter och sponter
- Pålarnas displacement
- Pålgruppens geometri
- Proppdragning

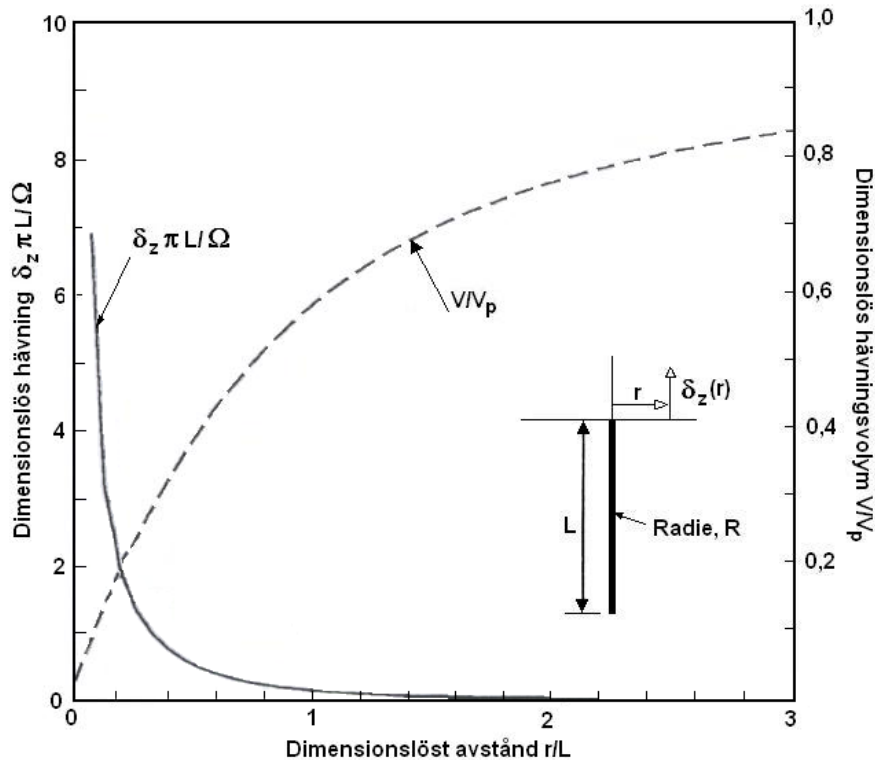
2.1 Massundanträngning av lera

Vid påslagning kommer lera att trängas undan enligt Figur 2.1. Vid vattenmättad lera och odränerade förhållanden kan antas att den lervolym som trängs undan motsvarar pålens volym. Den horisontella gränsen för hävningen utanför pålgruppen motsvaras grovt sett ofta av ett avstånd likvärdigt med pålarnas längd, se Figur 2.1 (Hagerty, Peck 1971).



Figur 2.1 Hävningens horisontella utbredning motsvarar ungefär en pållängd

En nyligen gjord studie av Sagaseta och Whittle påvisar att hävning vid markytan även sker utanför en pållängd vid slagning av en påle. Enligt studien kan hävning uppmätas en till två pållängder utanför pålningsområdet. Trots detta beräknas 30-40 % av hävningen ske bortanför en till två pållängder, men den är så liten att den är försumbar, för arean runt pålen på dessa avstånd är stor, se Figur 2.2. För ytterligare studier hänvisas till Sagaseta, Whittle (2001).



Figur 2.2 Markhävning som uppstår vid slagning av en påle (Ω är pålens area)
(Efter Sagaseta, Whittle 2001)

Faktorer som påverkar markhävnings storlek är enligt Dugan och Freed (1984):

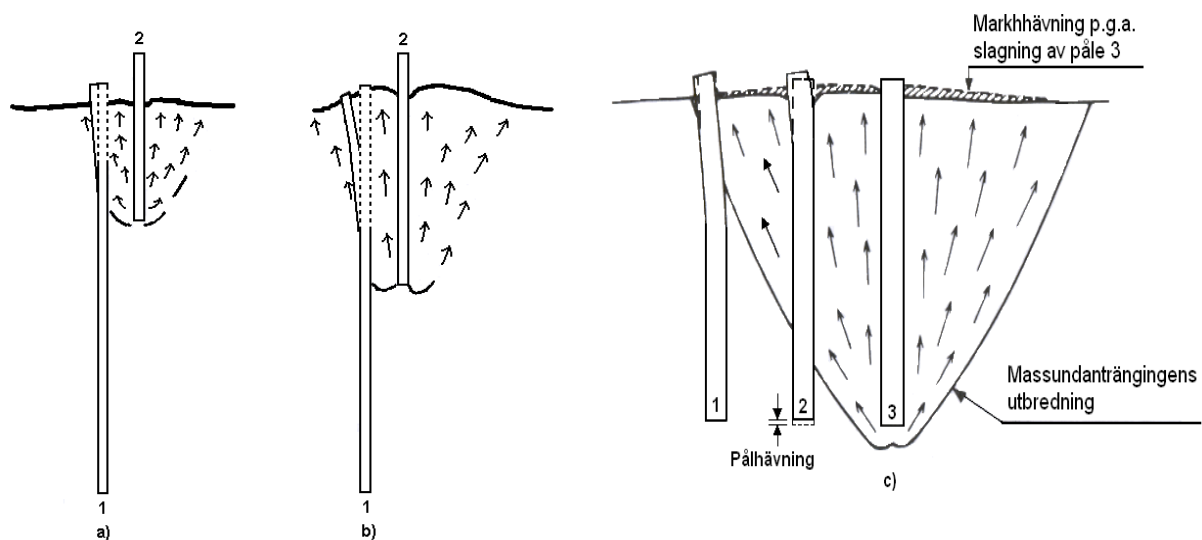
1. Volymen av undanträngd lera, eftersom den är proportionell mot storleken på hävningen.
2. Pålängden, då denna ungefär motsvarar det längsta avståndet från pålområdet där hävning kan uppmätas.
3. Proppdragning, vilken kan minska massundanträngningen väsentligt.
4. Vertikala spänningar i leran, omgivande belastningar ger t.ex. ökade spänningar som reducerar hävning.
5. Pålfrontens rörelse, eftersom markhävningen ökar i den riktning pålarna är drivna. De redan slagna pålarna verkar som "armering" av leran och undanträngningen sker där minst motstånd finns.
6. Lerans sensitivitet, större hävning fås i lågsensitiva leror. Vid pålning i sensitiva leror omrörs leran precis runt pålen i den grad att den kan tränga upp vid markytan.
7. Urschaktningsdjup inom pålningsområdet, med större urschaktningsdjup blir hävningen mindre utanför pålområdet, medan den blir större inom området. (Jämför punkt 4)
8. Grövre material, vid pålning i lera med skikt av lösare grövre material blir hävningen mindre jämfört med pålning i homogen lera då det grövre materialet kan komprimeras.

2.2 Inverkan på och av intilliggande pålar

Massundanträngningsförloppet, lerans horisontal- och vertikala rörelser, påverkas av tidigare slagna pålar. Vid slagning av nya pålar kommer tidigare slagna pålar att verka som armering och motverka lerans hävning. Detta gäller främst om de tidigare slagna pålarna har utvecklat full vidhäftning mot den omgivande leran. Hävningen runt de nya pålarna koncentreras lokalt och blir därmed större än om inga mothållande krafter hade funnits, se Figur 2.3.

Förstärkningen i horisontalled av tidigare slagna pålar är liten och påverkar inte undanträngningsförloppet påtagligt. Detta beror på att pålarna har låg böjstyvhet och ”följer med leran”, se Figur 2.3. Horisontella rörelser vid markytan kan vara svåra att upptäcka och försummas därför ofta, men kan upptäckas när pålhuvuden förflyttas horisontellt (Massarsch 1976).

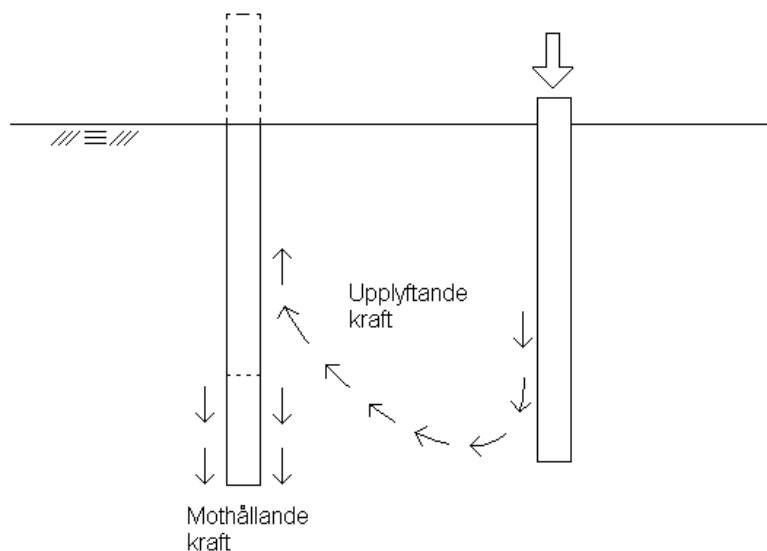
Pålslagning orsakar även hävning av tidigare slagna pålar. Figur 2.3 visar undanträngningsförloppet vid slagning av tre intilliggande pålar (i ordningen 1, 2 och 3). I en pålgrupp blir hävningen ofta störst för de pålar som har slagits först, enligt Figur 2.3 påverkas således den först slagna pålen (nr 1) mest.



Figur 2.3 Pål- och massförflyttning pga. slagning av närliggande pålar
(Efter Massarsch, Broms 1989)

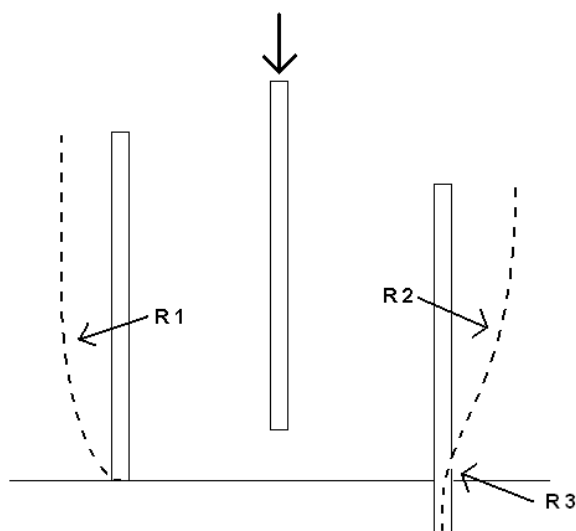
Hävningen i en pålgrupp minskar med djupet, d.v.s. jorden nära markytan kommer att häva sig mer än jorden nere vid pålens spets. När jordens upplyftande kraft längs en tidigare slagen påles övre del överstiger den mothållande kraften längs pålens nedre del förflyttar sig pålen uppåt, se Figur 2.4. Effekten blir särskilt stor vid stora pålgrupper eller pålgrupper med litet centrumavstånd mellan pålarna. Hur pålarna påverkas beror på hur stora de mothållande krafterna är. Om all lera runt en mantelburen påle häver sig förflyttas pålen uppåt, men om den är tillräckligt lång och endast leran runt pålens övre del häver sig kan de mothållande mantelkrafterna hålla kvar pålen. För pålar slagna ned i friktionsjord kan de mothållande krafterna vara avsevärda och om de upplyftande krafterna är tillräckligt stora kan detta då i värsta fall leda till brott i pålarna (Massarsch 1976).

Om en spetsburen påle lyfts och därmed kommer att ”stå på fel nivå” kommer bärförmågan att försämrans. För skarvade pålar är det viktigt att skarvarna håller för påfrestningarna, särskilt för pålar slagna ned till friktionsjord som ”sitter fast” i botten medan överdelen dras uppåt (Hintze 1997). Efterslagning av pålar är en vanlig åtgärd när pålarna lyfts och innebär att pålarna slås ned till önskad nivå. Efterslagning är speciellt viktigt för spetsburna pålar för att undvika försämrade bärförmågan.



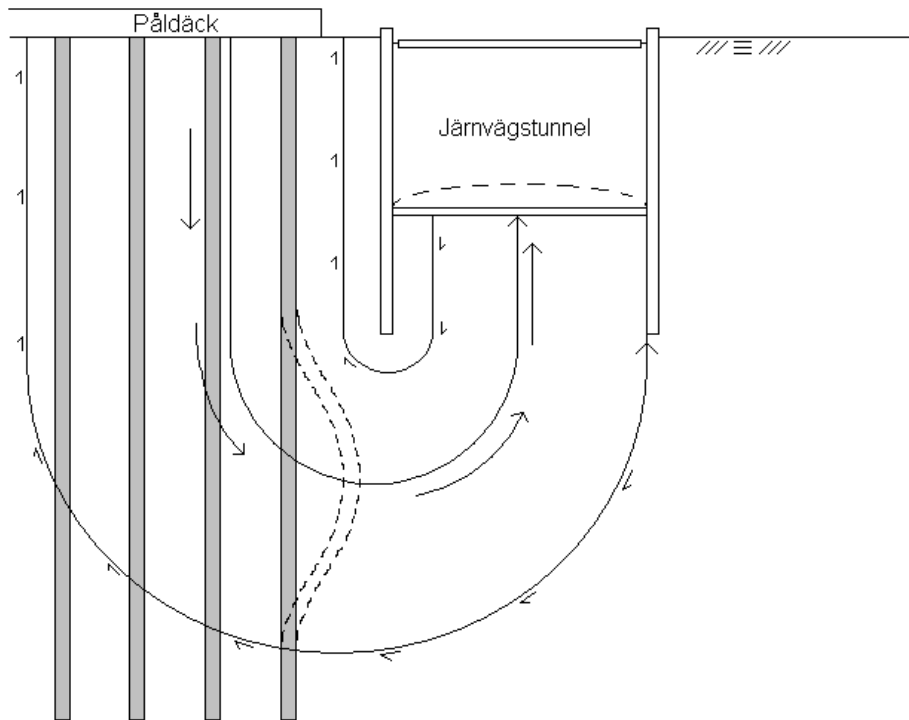
Figur 2.4 Upplyftande och mothållande krafter på närliggande mantelburna pålar

Vid pålning uppstår massundanträngning i stor utsträckning i horisontal. Eftersom pålar har lågt böjmotstånd kommer de i stor utsträckning bara att följa med den omgivande jorden när denna trängs undan. Detta kan dock åstadkomma stora böjmoment i närliggande pålar, speciellt då dessa är fast inspända i botten och när de sedan flyttas från sina ursprungliga positioner. Figur 2.5 visar utböjningen hos två pålar, varav den högra är fast inspänd, när en tredje påle slås. Krökningsradien R_3 som uppstår i den fast inspända pålen kan bli mycket mindre än R_2 och R_1 . Alltså blir den fast inspända pålen mer påverkad av utböjningen, vilket i värsta fall kan resultera i brott.



Figur 2.5 Deformation i redan slagna pålar, varav den högra är fast inspänd

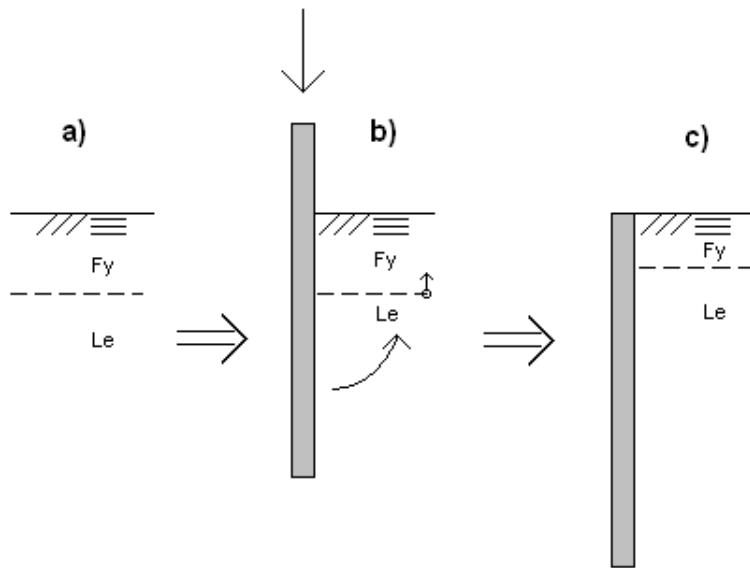
Sidoförskjutningar av pålar kan få allvarliga konsekvenser. Ett exempel på det är det brott som inträffade vid ett påldäck vid Lackarebäcksmotet i Mölndal. Under slutet av 1970-talet byggdes E6 om till motorväg och järnvägen var då tvungen att ledas in i en tunnel under vägen. 1988 upptäcktes sprickor och sättningar i en avfartsramp och påldäcket schaktades fram. Trolig orsak till brottet är att stora rörelser i samband med tunnelbygget medförde horisontaldeformationer av pålarna närmast tunneln, se Figur 2.6. Då dessa pålar har kunnat uppta mindre och mindre last har de övriga pålarna längre från tunneln fått betydligt större belastning och påhängslaster, vissa har t.o.m. krossats, se vidare Schälin, Sellgren (1989).



Figur 2.6 Bottenuppträckning orsakade horisontaldeformationer i pålarna bredvid järnvägstunneln, vilket ledde till krossade pålar och sättningar vid Lackarebäcksmotet i Mölndal

2.3 Förekomst av skikt av löst lagrat grövre material

En resulterande hävning på markytan kan bli betydligt mindre än pålvolymer då mäktiga skikt i vilka sättningar kan uppkomma finns inlagrade i leran. Sådana skikt kan bestå av löst lagrad friktionsjord eller torv. Lerans hävning kan i dessa fall helt eller delvis kompenseras av sättningar i ett sådant grövre material, dock krävs mäktiga friktionslager då kompressionen endast blir 5-10 % i löst lagrad friktionsjord enligt Leif Jendeby. Figur 2.7 visar i tre steg (a-c) hur det löst lagrade materialet komprimeras vid slagning av en påle. Friktionslager påverkar däremot inte lerans horisontella förflyttning i samma utsträckning.



Figur 2.7 Löst lagrat grövre material kan komprimeras vid massundanträngning och kompensera lerans hävning

För att belysa vilka storleksordningar det handlar om visas nedan ett exempel. Följande parametrar är valda:

- pållängd 20 m
- centrumavstånd 3 m
- pålarnas sidmått 0,270 m

Den undanträngda volymen blir då per kvadratmeter:

$$\text{Undanträngd volym} = \frac{0,270^2 \cdot 20}{3 \cdot 3} = 0,162 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \quad (2.1)$$

För att hela denna volym ska kompenseras av packning av ett friktionsjordslager krävs då ;

- ett 3,2 m tjockt lager om 5 % packning antas
- ett 1,6 m tjockt lager om 10 % packning antas

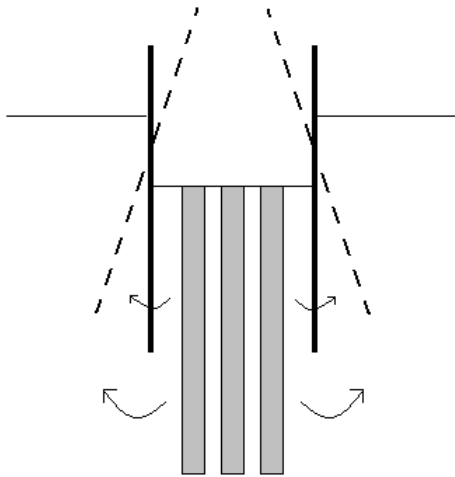
Det krävs således således relativt mäktiga lager av grövre material för att all hävning vid pålning i lera ska kompenseras av sättningar i grova material.

Vid förekomst av permeabla skikt i leran kan de porövertryck som uppstår vid påslagning transporteras bort snabbare. Dessa skikt innebär därmed att hävningen kan sjunka tillbaka fortare.

2.4 Schakter i samband med pålning

När pålning sker i samband med schakter samverkar två hävningsfenomen. En naturlig hävning sker inom schakten på grund av den avlastning leran utsätts för, samtidigt orsakar pålningen hävning. Effekten blir särskilt stor då schaktning utförs innan pålning. Hävningen, p.g.a. pålning, sker då enligt ”minsta motståndets lag” lättare inom schakten därför att den omgivande leran verkar som en mothållande kraft p.g.a. de högre marknivåerna. För att motverka den extra hävningen inom schakten kan ytterligare utgrävning mellan pålarna då bli nödvändig. Med ökande urschaktningsdjup inom pålningsområdet blir hävningen mindre utanför, medan den blir större inom pålningsområdet (Dugan, Freed 1984).

Vid schakter inom spont påverkar påslagning det horisontella trycket på sponternas nedre del. Figur 2.8 visar att massundanträngningen trycker ut spontens nederdel så att sponten roterar.



Figur 2.8 Vid pålning i schakt inom sponter kan sponterna påverkas, exempelvis genom att de roterar

2.5 Konsolidering

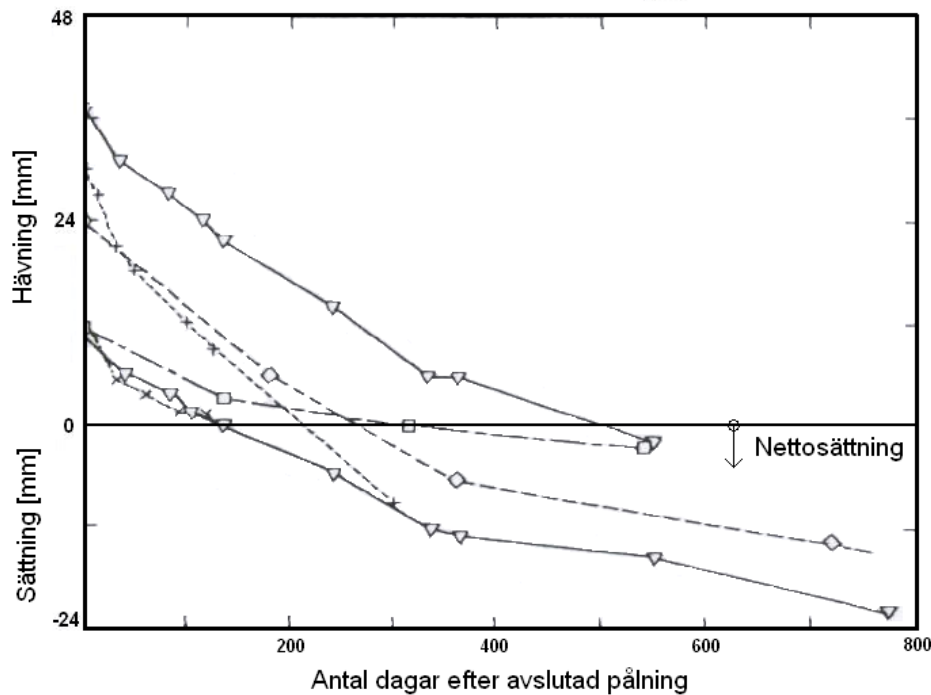
Påslagning innebär att leran måste ”flytta på sig” eftersom leran vid odränerade förhållanden anses vara inkompressibel, dvs. kompressionsmodulen (K) går mot oändligheten. Enligt ekvation (2.2), där D är styvhetsmatris, innebär en töjningsökning ($\Delta\varepsilon$) en ökad spänning ($\Delta\sigma$). Då förloppet antas vara odränerat resulterar den ökade spänningen i en motsvarande portrycksökning. Portrycksökningen jämnas ut med tiden, vilket enligt ekvation (2.3) innebär att effektivspänningen ($\Delta\sigma'$) ökar i motsvarande grad.

$$\Delta\sigma = D \cdot \Delta\varepsilon \quad (2.2)$$

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u \quad (2.3)$$

Med andra ord kan sägas att efter den i stort sett momentana hävningen som uppstår genom massundanträngningen konsolideras den påverkade jordvolymen, dvs. det genererade porövertrycket jämnas ut och konsolideringssättningar uppstår, främst i horisontalled, se vidare Johansson, Jendeby (1998).

Storleken och hastigheten på sättningarna beror på lerans egenskaper. Konsolideringssättningar kan pågå under flera år efter det att pålningen är slutförd. En sådan sättning har visat sig t.o.m. kunna överstiga den ursprungliga hävningen, d.v.s. en s.k. ”nettosättning” erhålles, se Figur 2.9. Dessa konsolideringssättningar som kan uppstå runt pålarna gör att pålarna kan utsättas för påhänglaster (Olsson, Holm 1993).



Figur 2.9 Konsolideringsförlopp med nettosättning efter påslagning (Efter Dugan, Freed 1984)

2.6 Åtgärder för minskad massundanträngning

Rörelser till följd av pålning kan orsaka skador på omgivningen. För att minska markhävning och horisontalrörelser behöver åtgärder genomföras. Exempel på sådana åtgärder kan vara:

- Dra lerproppar för att minska den undanträngda volymen
- Använda pålar med litet displacement

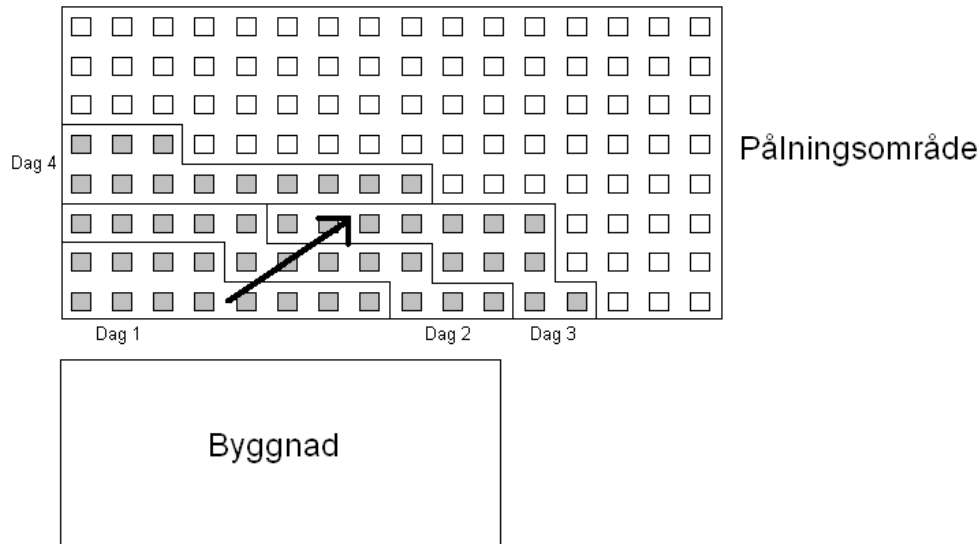
För att styra markhävning och horisontalrörelser kan följande åtgärder genomföras:

- Driva pålningsriktningen bort från områden vilka är känsliga för markrörelser
- Utföra schaktning inom pålningsområdet före påslagningen. Detta ger dock större hävningar inom schakten och kan även vara negativt ur stabilitetssynpunkt

Vissa av dessa åtgärder diskuteras vidare nedan.

2.6.1 Anpassning av pålningsordning

Det är möjligt att utföra ett pålningsarbete så att massundanträngningen till viss del kan styras åt ett visst håll. Detta kan göras genom att rikta pålfronten bort från känsliga områden såsom t.ex. bebyggda områden, se Figur 2.10. Metodiken bygger på att det genom erfarenhet funnits att rörelsen blir mindre inom ytor som redan är pålade, jämför kapitel 2.2.



Figur 2.10 Massundanträngning kan till viss del styras genom val av pålningsordning

2.6.2 Proppdragning

För att minska volymen lera som undanträngs vid pålning kan s.k. lerproppar dras. Detta innebär att ett hål i marken åstadkommes, antingen genom att ”ett rör” slås ned i marken för sedan dras upp, eller genom en stor ”jordskruv”. Proppdragning utförs vanligen i själva pålläget, men kan också utföras intill pålarna för att minska massundanträngningen åt ett visst håll. För att få en bra uppskattning av deformationerna bör propparnas läge och djup planeras noga. När proppdragning sker där mantelburna pålar sedan ska installeras är det viktigt att hålet inte görs större än påldiametern för att mantelbärförmågan inte ska reduceras (Dugan, Freed 1984).

För djup proppdragning leder till kollaps av hålet. Detta orsakas av att borrhålets väggar ”faller ihop”. Det kritiska djupet kan enligt Massarsch (1976) beräknas med ekvation (2.4) nedan:

$$z_{kr} = c_u \cdot \frac{1 + \ln \frac{E}{3 \cdot c_u}}{(6,5 \cdot K_0 + 10)} \quad (2.4)$$

där

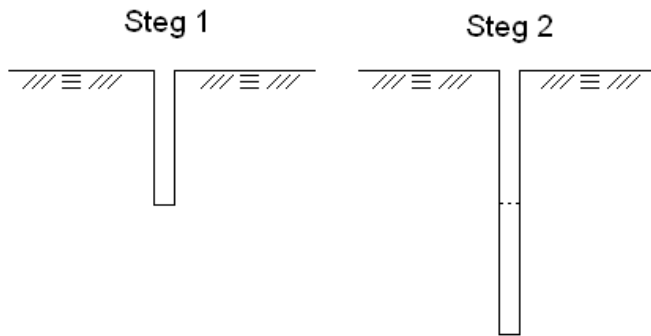
c_u = lerans odränerade skjuvhållfasthet [kPa]

E = lerans E-modul [kPa]

K_0 = vilojordtryckskoefficient [-]

z_{kr} = kritiskt djup för stabilt hål [m]

Att ett ”propphål” kan stå öppet är viktigt när proppar ska tas i flera steg, se Figur 2.11. I övriga fall spelar en kollaps av hålet normalt ingen praktisk roll eftersom lervolymen ändå är borta.



Figur 2.11 Proppdragning i två steg

3 FÄLTSTUDIER

Fältstudier har utförts inom fyra olika pålningsområden, tre områden vid Götatunneln (L3, L2 och J2) samt vid Skandiahamnen. Vertikal- och horisontalrörelser har uppmätts i ett antal mätpunkter inom områdena. Mätningarna har gjorts med hjälp av dubbar, inmätning av pålhuvuden, bälgställningsmätare och inklinometrar. Dessa mätmetoder beskrivs nedan.

3.1 Mätmetoder

Dubbar

Dubbar utgörs här av mätpunkter vilka installerats på marken och befintliga konstruktioner. Dubbarnas rörelser i vertikalled har registrerats med avvägningsinstrument mot en fixpunkt.

Inmätning av pålhuvuden

Inmätning av pålhuvuden har utförts för att se hur redan slagna pålar påverkas av omgivande aktiviteter. Inmätningen har skett i x-, y- och z-led.

Bälgställningsmätare

En bälgställningsmätare registrerar var i jordprofilen som sättningar utvecklas, d.v.s. sättningarnas fördelning med djupet. Mätaren antas följa med jorden i dess vertikallrörelser. Bälgställningsmätaren utgörs av en spiralarmerad slang, kallad bälgslang, som är skarvad på varje meter med specialhylsor, se Figur 3.1. I varje hylsa finns en stålring vars vertikala position registreras av en speciell mätutrustning. Genom att detektera ringarnas nivå vid olika tillfällen kan således sättningarna på olika nivåer beräknas.

Bälgslangen ger en mätnoggrannhet på $\pm 1-2$ mm.



Figur 3.1a) Bälgslang med specialhylsa, skuren i längsled



b) Närbild på bälgslang med spiralarmering

Bälgslangen installeras alltid med hjälp av ett foderrör. Då den spiralarmerade slangen placeras i foderröret trycks den ihop av egentyngheden och den spänns därför upp med hjälp av ett innerstål innan det mesta av foderröret avlägsnas. För att leran sedan ska ”greppa slangen” får innerstålet sitta kvar i 3-4 dagar. Efter att innerstålet är borttaget ska slangen sitta ytterligare 3-4 dagar innan nollmätning utförs så att den får en chans att krypa tillbaka. Avläsningen sker manuellt på varje meter med måttband enligt Figur 3.2.



Figur 3.2 Avläsning av bälgställningsmätare

Inklinometer

Inklinometrar används för att registrera horisontella rörelser i lera. Ett plaströr installeras i marken, helst så djupt att inga rörelser under rörets botten uppkommer. Röret antas följa med jorden i dess horisontalrörelser. Med hjälp av givare som vanligtvis sitter med 2 m mellanrum avläses rörets lutning i mm/m, se Figur 3.3. Lutningsförändringen fås genom mätning vid olika tidpunkter.

Inklinometern ger en mätnoggrannhet på $\pm 0,3$ mm/m.



Figur 3.3 Inklinometer, delvis nedfört i mättrör

Rörelserna beräknas under antagande antingen att botten ”sitter fast” eller att toppens rörelse mäts in. Toppen bör således helst mätas in med samma intervall som inklinometermätningarna.

Det finns både fasta och manuella inklinometrar. Med fasta menas att givarna sitter fast i röret hela tiden och med manuella inklinometrar menas att givarna placeras i röret vid själva avläsningen. Avläsning av manuella inklinometrar tar betydligt längre tid än avläsning av fasta eftersom givarna måste placeras i rätt läge varje gång.

När röret installerats görs vanligtvis en manuell nollmätning, oavsett vilken inklinometersort som används. Härvid mäts i vinkelräta riktningar på varje meter för att klarlägga rörets läge.

3.2 Pålningssområden inom vilka mätningar utförts

De olika mätningarna inom respektive pålningssområde redovisas nedan i Tabell 3.1. Alla mätningar har utförts av respektive entreprenör förutom inmätningen av provpål och bälgsättningsmätningen i Skandiahamnen som utförts i examensarbetets regi.

Tabell 3.1 Analyserade mätningar inom respektive pålningssområde

	L3	L2	J2	Skandiahamnen
Dubbar	X	X		
Inmätning av pålhuvuden			X	X
Bälgsättningsmätare			X	X
Inklinometer	X			X

3.2.1 Götatunneln

1998 slöts ett avtal mellan staten och Göteborgsregionens Kommunalförbund, Göteborgöverenskommelsen. Inom denna överenskommelse är Götaleden det största projektet. En översikt av Götaledens sträckning i centrala Göteborg kan ses i Figur 3.4 nedan.



Figur 3.4 Översikt över Götaleden
(www3.vv.se/gotaleden/bygget.asp, 2004-09-20)

Genom att få bort stadstrafiken mellan Lilla Bommen och Järntorget skapas en mer attraktiv miljö på Södra Älvstranden. Förbättringarna sker på en ca 3 km långsträcka, varav själva Götatunneln är 1,5 km. Merparten av tunneln, ca 1 km, byggs i berg medan ändarna består av betongtunnlar i lera, se Figur 3.5 nedan.



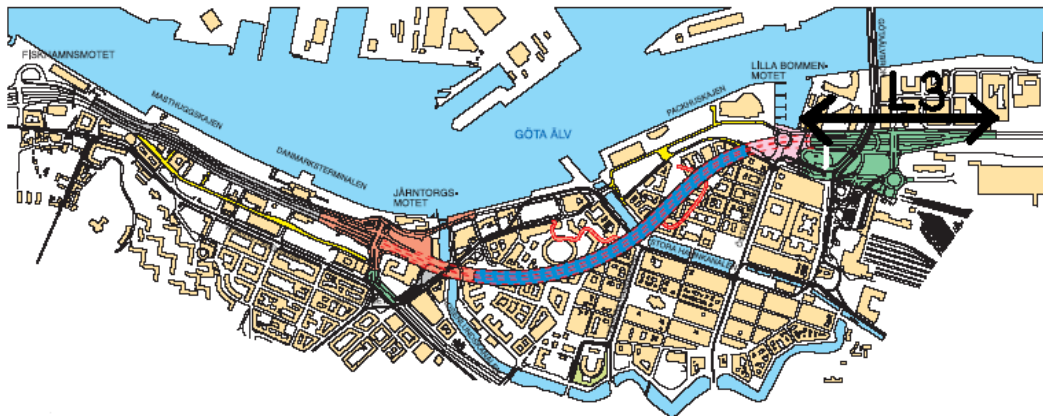
Figur 3.5 Götatunneln i profil
(www3.vv.se/gotaleden/bygget.asp, 2004-09-20)

Götaledsprojektet har delats upp i fem huvudentreprenader:

L3, Lilla Bommen, betongtråg, trafikplats	NCC
L2, Lilla Bommen, betongtunnel mm	LBT
B45, Bergtunnel inkl inredning	Vägverket Produktion
J2, Järntorget, trafikplats, betongtråg samt betongtunnel	SKANSKA
I1, Tunnelinstallationer	YIT

Entreprenad L3

Entreprenad L3 vid Lilla Bommen, se Figur 3.6, i anslutning till Göta Älvbron, omfattar vägbyggnad, anläggning av stödmurar, 2 betongbroar, trafikplats och avväxling av Göta Älvbron. Öster om Göta Älvbron byggs två nya broar, och leden skyddas här av stödmurar som efter bron övergår i ett 100 m långt tråg fram till entreprenad L2 i väster. Entreprenör är NCC. I denna rapport utförs analys av massundanträngning vid pålning för det tråg som visas i Figur 3.7.



Figur 3.6 Entreprenad L3
(www.vv.se, 2004-09-20)



Figur 3.7 Fotomontage över entreprenad L3. Pilen visar läget för det tråg som studeras inom detta examensarbete
G=Göta Älvbron
V="Vägverkshuset"
S="Selmerhuset"
(www.ncc.se, 2004-09-20)

Jordlagerföljd

Ovanpå leran finns ett fyllnadslager med mäktighet som varierar mellan 2,5 och 3,5 m. Fyllnadslagret består av friktionsjord blandat med lerfyllning och har i huvudsak torrskorpekaraktär. Provtagningar visar lera till mycket stora djup, minst 70 m.

Pålning

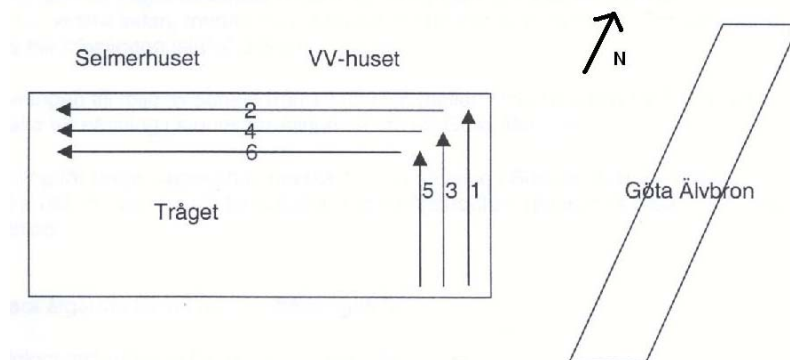
Pålningen i träget utfördes från november 2003 till och med april 2004. Pålområdet är 45 m brett och 100 m långt. Sammanlagt har 566 mantelburna pålar installerats med längder på 35 till 52 m. För att minska påverkan på omgivningen har i genomsnitt en propp per påle dragits. En sammanställning av påldata finns i Tabell 3.2 nedan.

Tabell 3.2 Påldata för L3

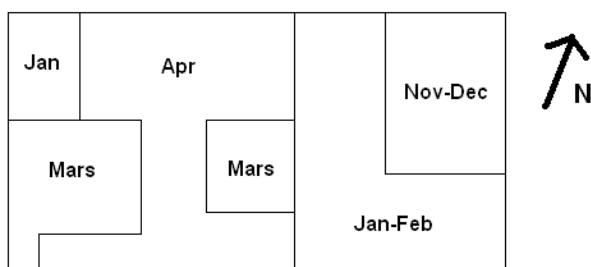
Pålningdatum	03/10/29-04/04/30
Pålområdets bredd	45 m
Pålområdets längd	100 m
Pållängd	35-52 m
Knektdjup	5,5 m
Pålarnas sidmått	0,27 m
Antal pålar	566 st
Antal proppar	ca 560 st
Propplängd	15 m

Pålningens ordning

I närheten av pålområdet finns framför allt tre byggnader som inverkar på och påverkas av pålningen: Selmerhuset, Vägverkets hus och Göta Älvbron, se Figur 3.7. För att skydda dessa byggnader valde NCC att pålfronten i huvudsak skulle riktas från de känsliga områdena, se Figur 3.8. En skiss över den genomförda pålningens ordning redovisas i Figur 3.9.



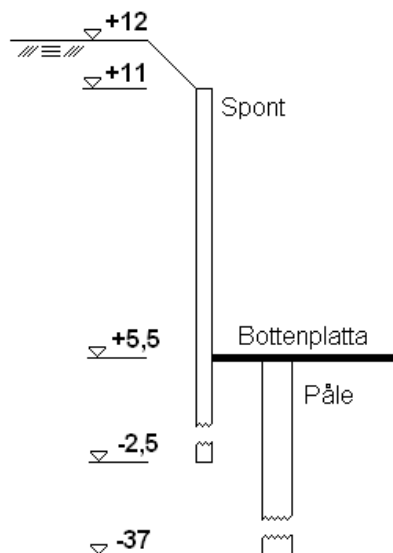
Figur 3.8 Tänk pålningens ordning för att minimera påverkan på intilliggande konstruktioner



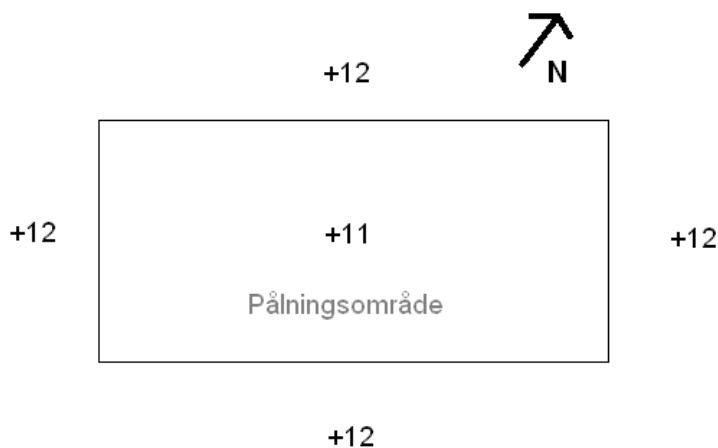
Figur 3.9 Genomförd pålningens ordning

Konstruktion

Tråget är grundlagt på mantelburna pålar och byggs inom en spontad konstruktion. Efter att sponten installerats på båda sidor av tråget har de 35-52 m långa pålarna knektats från nivån +11 m ner till trågets underkant på +5,5 m. Totalt har 566 pålar slagits inom området som är 45 m brett och 100 m långt. Därefter har schaktning från +11 till +5 utförts i etapper, och direkt efter detta har grovbetong gjutits mellan pålarna för att motverka bottenuppträckning. Därefter har bottenplattan för tråget färdigställts, se Figur 3.10. Figur 3.11 visar marknivåerna under pålningsarbetet.



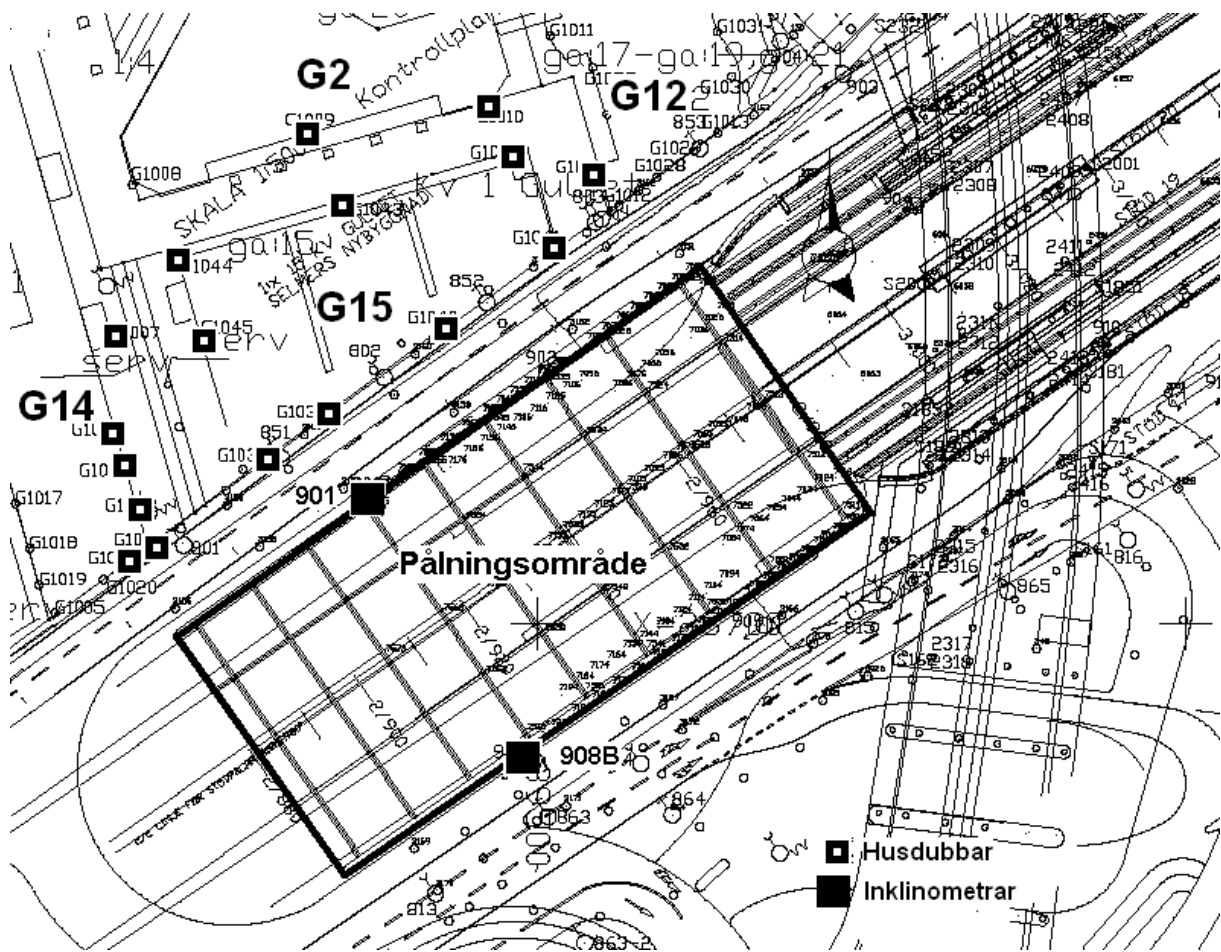
Figur 3.10 Skiss över konstruktion med spont, påle och bottenplatta



Figur 3.11 Planskiss med marknivåer, L3

Mätningar

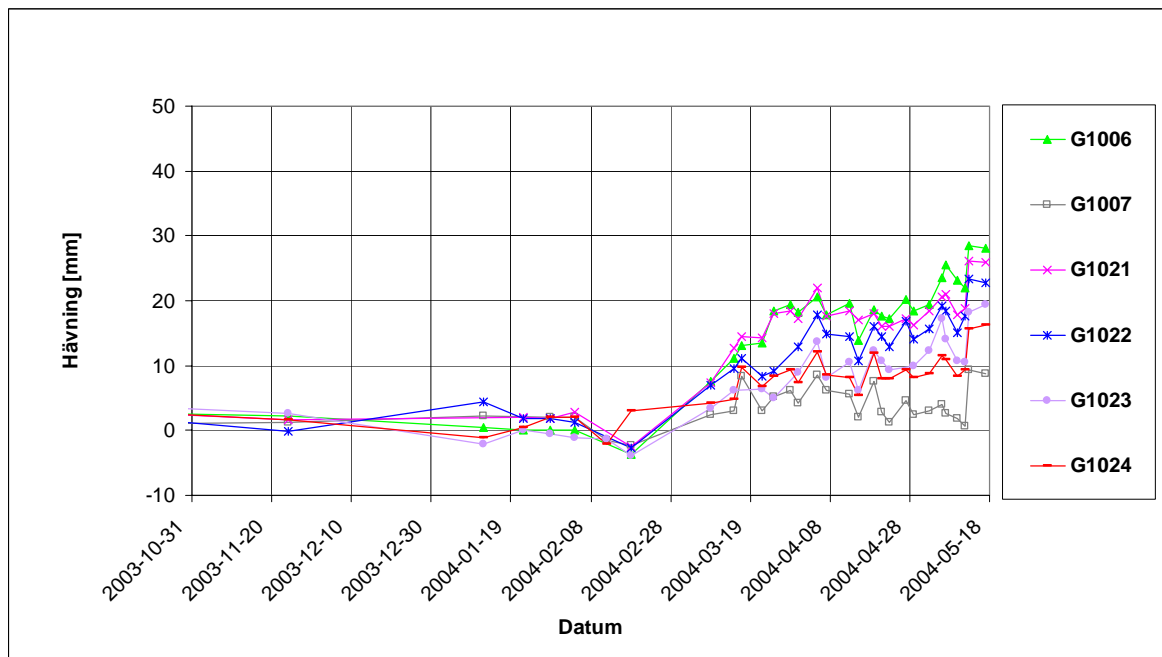
Under pålningsarbetet utfördes ett antal mätningar; hävning hos intilliggande hus samt horisontalrörelser i intilliggande jordprofiler. Mätpunkternas läge inom området redovisas i Figur 3.12. Mätpunkterna befinner sig på fyra byggnader (G2, G12, G14 och G15) norr om pålningsområdet, samtliga byggnader är grundlagda på kohesionspålar och antal våningar varierar mellan 4 och 8.



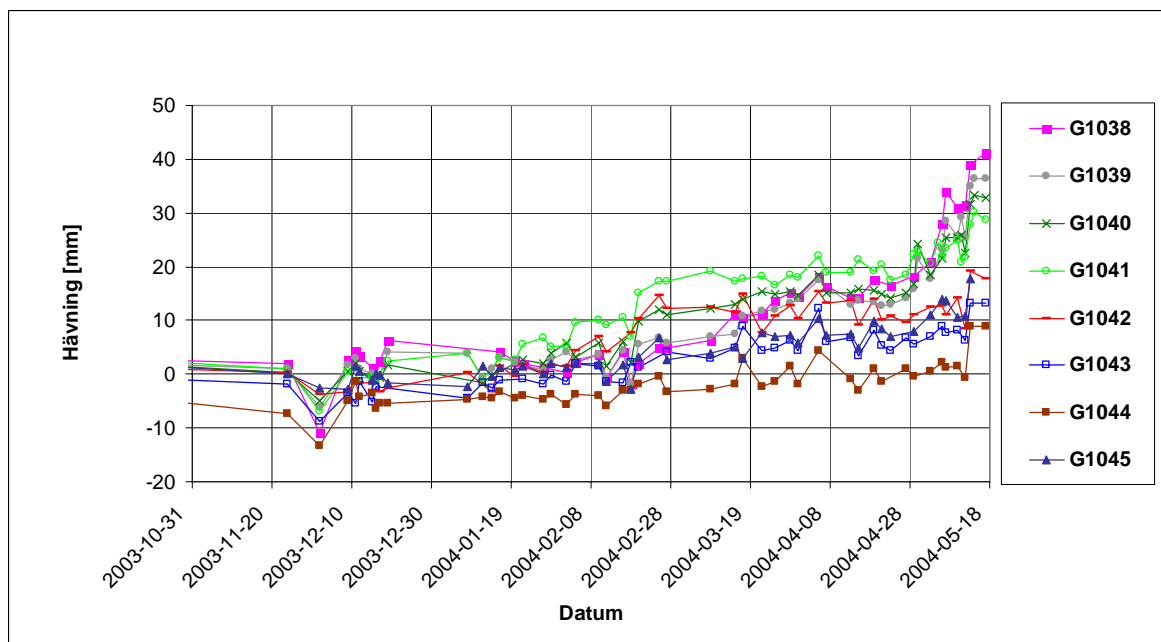
Figur 3.12 Översikt över husdubbar på byggnaderna G2, G12, G14 och G15 samt inklinometrar

Resultat – vertikalarörelser

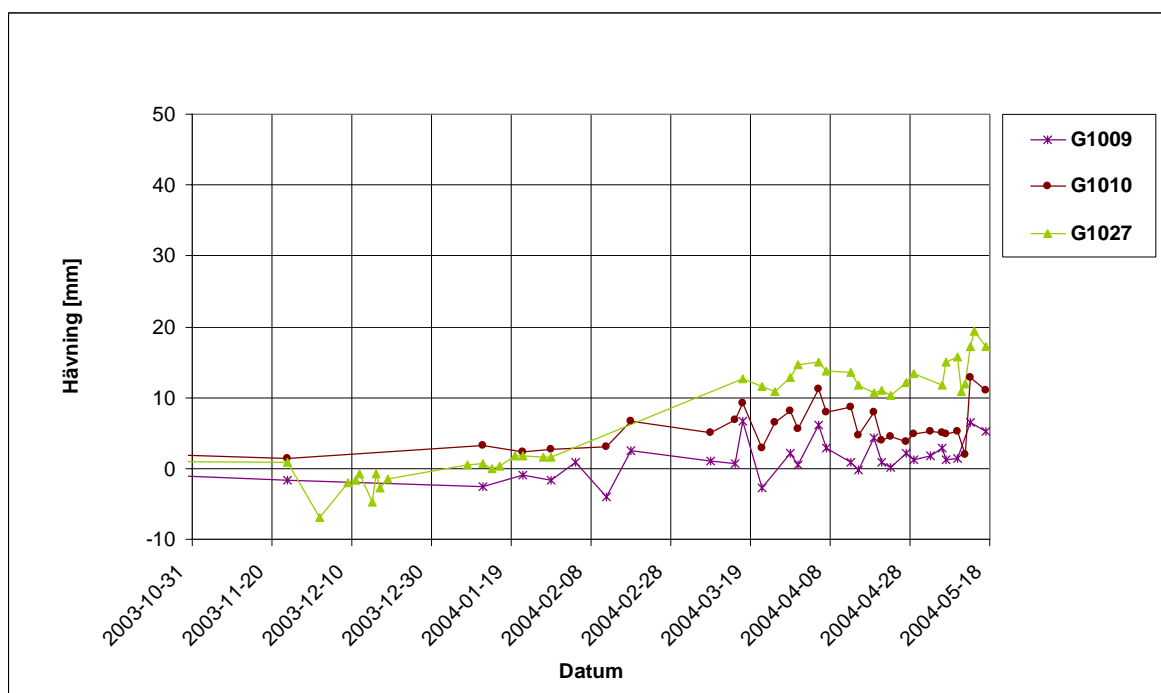
Hävningen i husdubbarna redovisas i Figur 3.13a-c.



Figur 3.13a Hävning hos husdubbar placerade på byggnad G14, 4 våningar

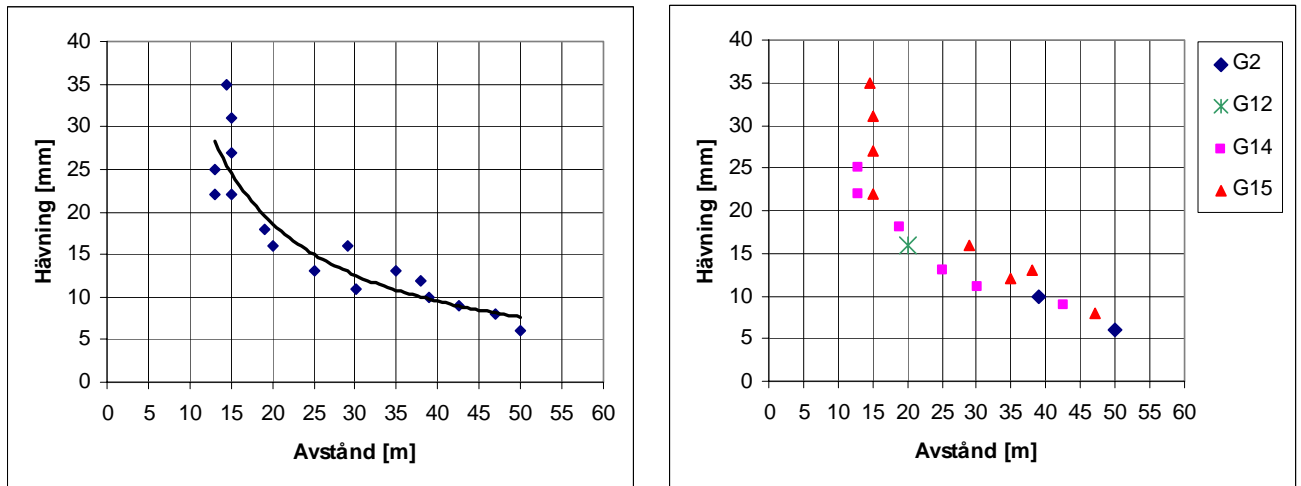


Figur 3.13b Hävning hos husdubbar placerade på byggnad G15, 8 våningar



Figur 3.13c Hävning hos husdubbar placerade på byggnad G2 och G12, 6 respektive 8 våningar

Pålningen för tråget utfördes från november 2003 till och med april 2004. Mätdata från hela april t.o.m. mitten av maj bortses från p.g.a. mätfel. Hävningen, orsakad av pålningen, redovisas i Figur 3.14. Hävningen förväntas avta med avståndet från pålningsområdet, vilket också framgår av Figur 3.14. I Figur 3.14b syns att de mätpunkter som finns placerade på byggnad G15 har hävt sig mest trots att denna byggnad har 8 våningar, vilket kan jämföras med byggnad G14 som endast har 4 våningar och lägre hävning.



Figur 3.14a) Hävningen hos husdubbar på olika avstånd från pålningsområdet med trendlinje
b) Hävningen redovisad för respektive byggnad

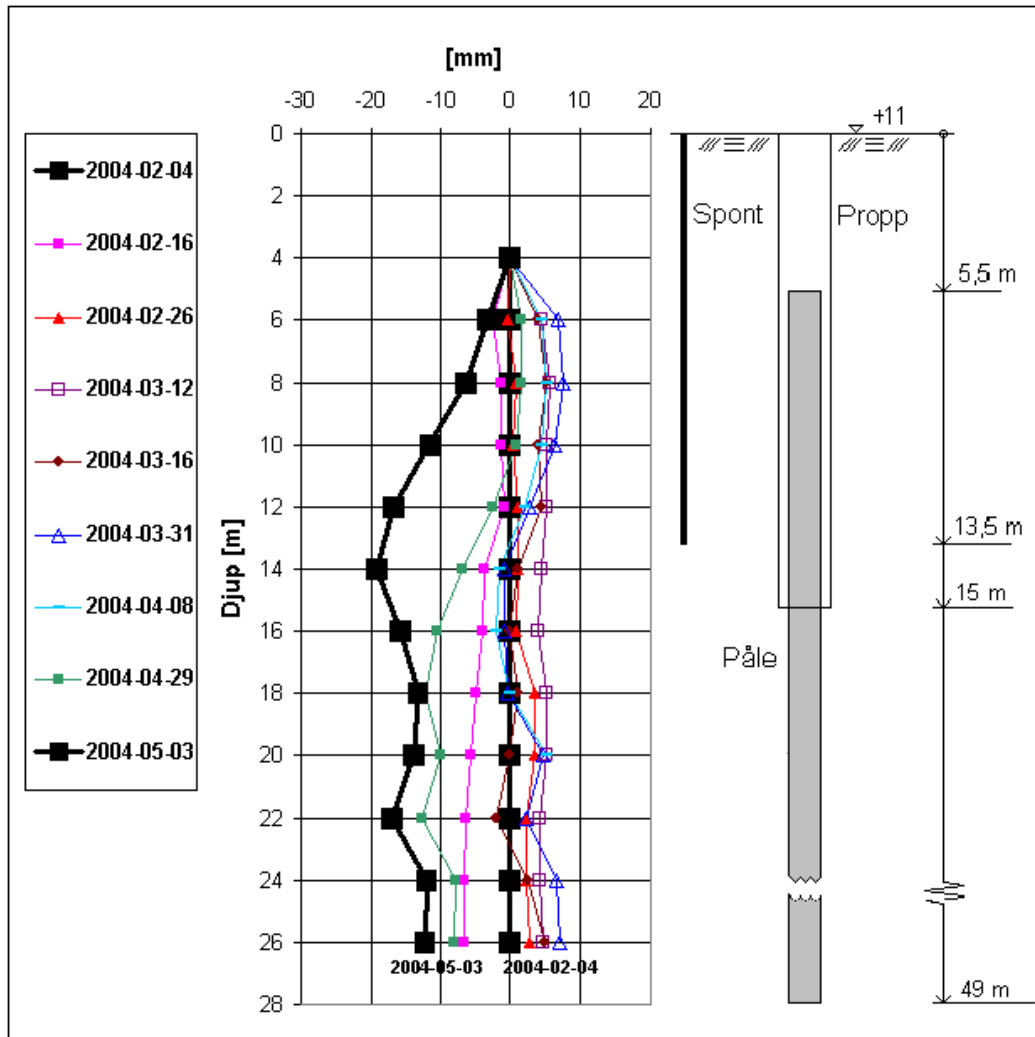
Resultat – horisontalrörelser

Inklinometrarna 901 och 908B finns placerade precis intill sponterna norr resp. söder om pålningsområdet, se Figur 3.12. De installerades i huvudsak för att kontrollera sponternas rörelse vid schaktningen och de är därför inte tillräckligt djupa för att registrera samtliga rörelser vid pålningsarbetet. NCC har redovisat inklinometrarna under antagande att dessa är fasta i botten, d.v.s. på 26 m djup. I Figur 3.15a,b och Figur 3.16a,b har inklinometerkurvorna modifierats så att rörelser tillåts i botten eftersom pålarna är längre än inklinometrarna och rörelser antas uppkomma under lägsta mätnivån. För att komma närmre verkligheten har inklinometrarna låsts i toppen, men eftersom toppen inte har mätts in regelbundet stämmer inte heller detta antagande helt med verkligheten. Negativ rörelse i figurerna är bort från pålningsområdet. Bredvid diagrammen i Figur 3.15a och Figur 3.16a finns en schematisk bild av hur djupt propparna har dragits och pålarna slagits ned i marken, dock får inte hela längden plats eftersom pålarna i genomsnitt är ca 42 m.

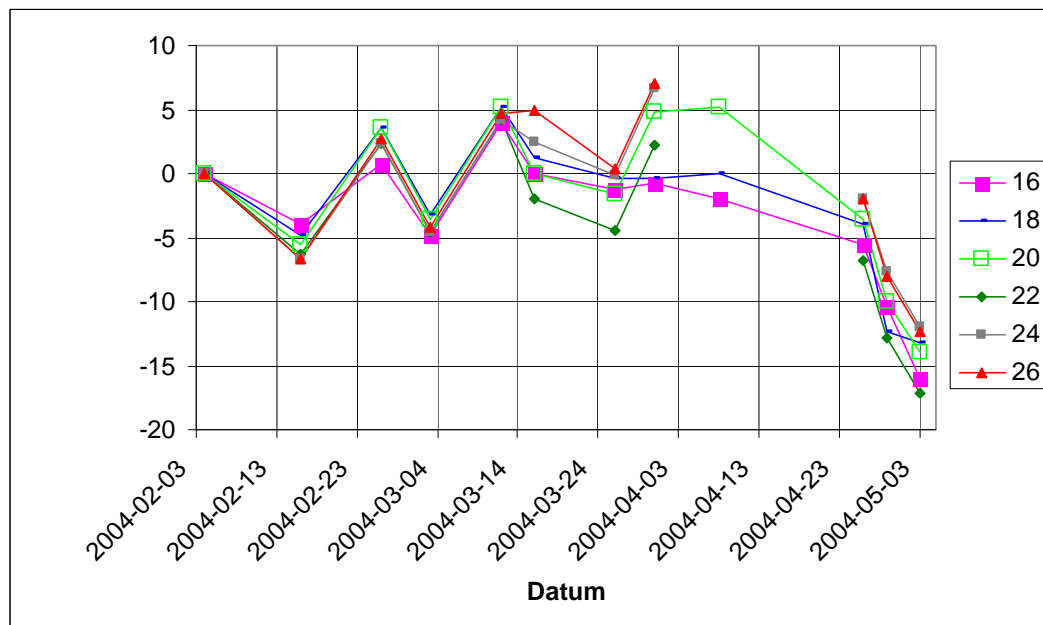
Figur 3.15a visar att inklinometer 901 antagligen har följt spontens rörelse eftersom denna sitter precis utanför sponten. Inklinometern har registrerat rörelser som tyder på att sponten har tryckts utåt i underkant p.g.a. massundanträngningen.

Figur 3.16a visar att inklinometer 908B inte är lika tydligt påverkad av spontens rörelse som 901. Det syns tydligt att proppdragningen har haft effekt på massundanträngningen då rörelserna på 16 m djup ökar markant.

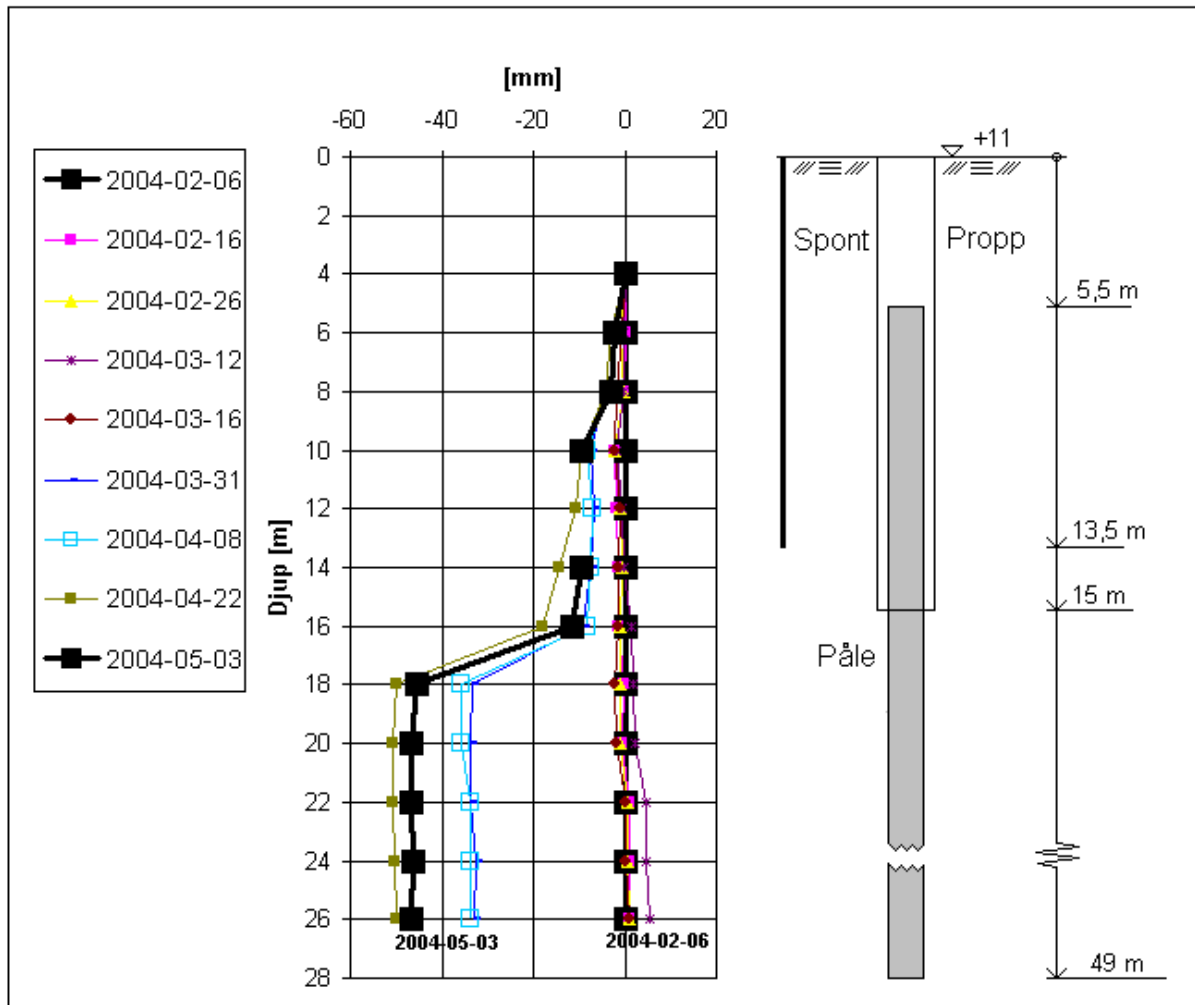
Inklinometrarna har inte mätts under hela pålningsarbetet, utan de började först mätas i början av februari. Då pålningen startade redan i november har en del av rörelserna inte registrerats. Detta påverkar främst inklinometer 901 eftersom en del av pålarna närmast denna redan var slagna när mätningarna påbörjades, se Figur 3.9 och Figur 3.12. Enligt Figur 3.15 och Figur 3.16 har en nästan dubbelt så stor hävning registrerats i inklinometer 908B än i 901, alltså har NCC lyckats driva massundanträngningen åt det hållet som önskades.



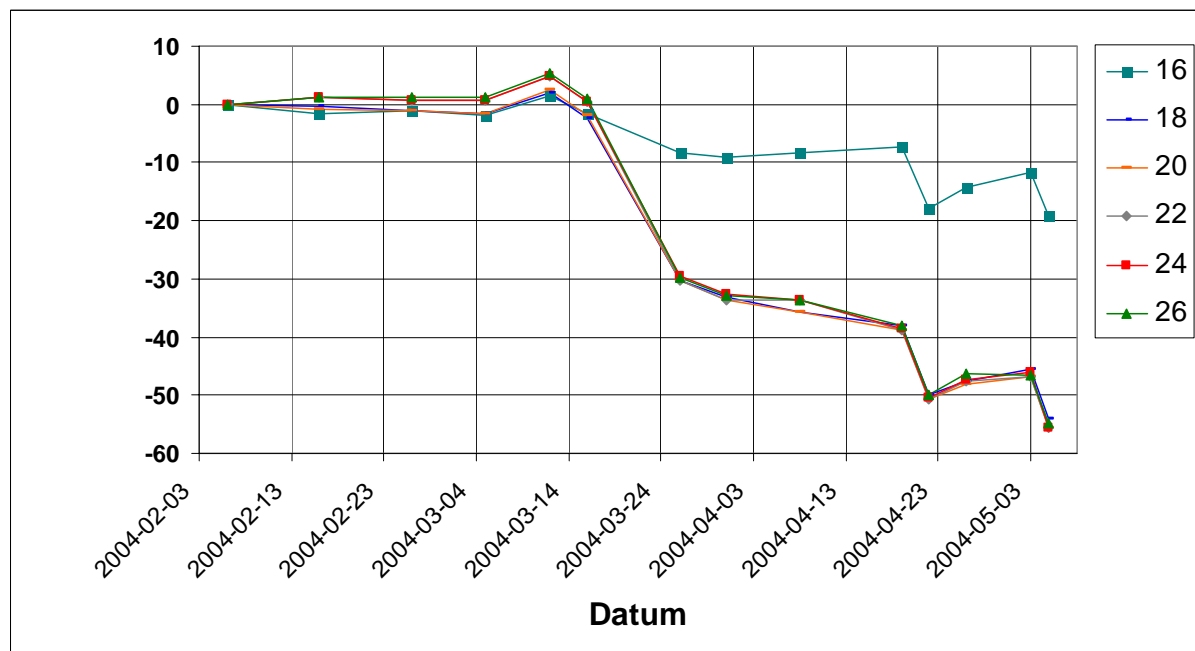
Figur 3.15a Inklinometer 901 norr om pålningsområdet, horisentrörelser under pålningsperioden



Figur 3.15b Inklinometer 901, horisentrörelser på olika djup under pålningsperioden



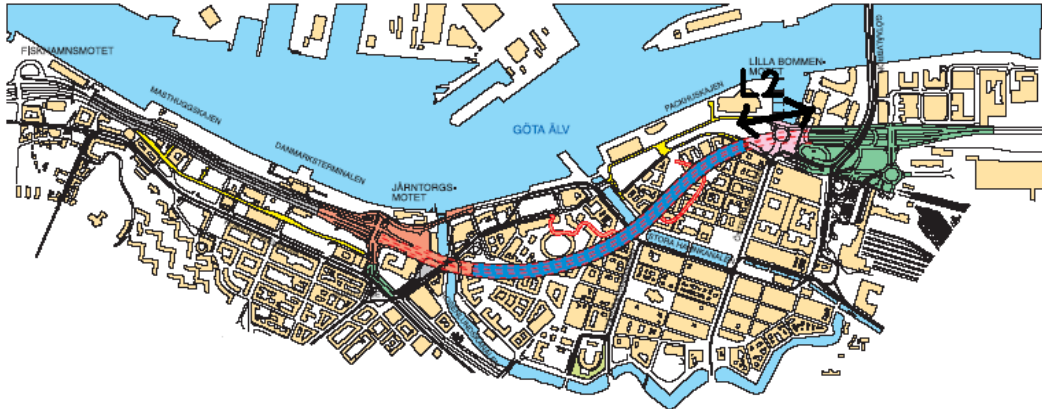
Figur 3.16a Inclinometer 908B söder om pålningsområdet, horisentrörelser under pålningsperioden



Figur 3.16b Inclinometer 908B, horisentrörelser på olika djup under pålningsperioden

Entreprenad L2

Entreprenad L2 vid Lilla Bommen utgörs av en 266 m lång tunnel. Huvuddelen är en jordtunnel, men ca 35 m går i berg. Entreprenör är ett konsortium, Lilla Bommen Tunneln (LBT), bestående av företag från Tyskland, Norge och Sverige.



Figur 3.17 Entreprenad L2
(www.vv.se, 2004-09-20)

Jordlagerföljd

Ovanpå leran finns ett fyllnadslager med varierande mäktighet, 3,5 m till 7 m. Fyllningen har skiftande sammansättning och egenskaper, den består överst av fyllning för olika överbyggnader och därunder främst av torrskorpefast lera med inslag av friktionsjord och rivningsrester m.m. Jorddjupet ökar från ca 50 m till ett bedömt djup av drygt 100 m vid områdets östra gräns. Närmast berg finns friktionsjord, i huvudsak sand och silt.

Pålning

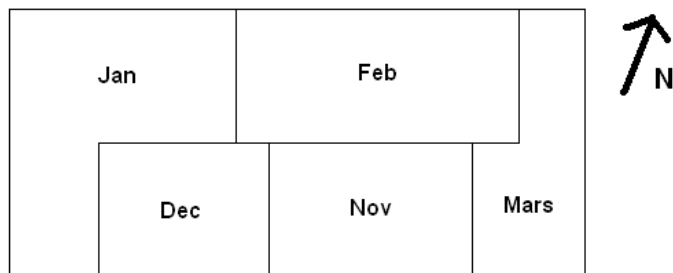
Pålningens arbetet i den östra delen av etappen pågick från början av november 2003 till slutet av mars 2004. Pålområdet är 40 m brett och 115 m långt. Sammanlagt har 438 mantelburna pålar installerats med längder på 36 till 46 m. Proppar, 15-16 m långa, har dragits över delar av området. En sammanställning av påldata finns i Tabell 3.3.

Tabell 3.3 Påldata för L2

Pålningdatum	03/11/06-04/03/24
Pålområdets bredd	40 m
Pålområdets längd	115 m
Pållängd	36-46 m
Knektdjup	ca 10 m
Pålarnas sidmått	0,275 m
Antal pålar	438 st
Antal proppar	305 st
Propplängd	15-16 m

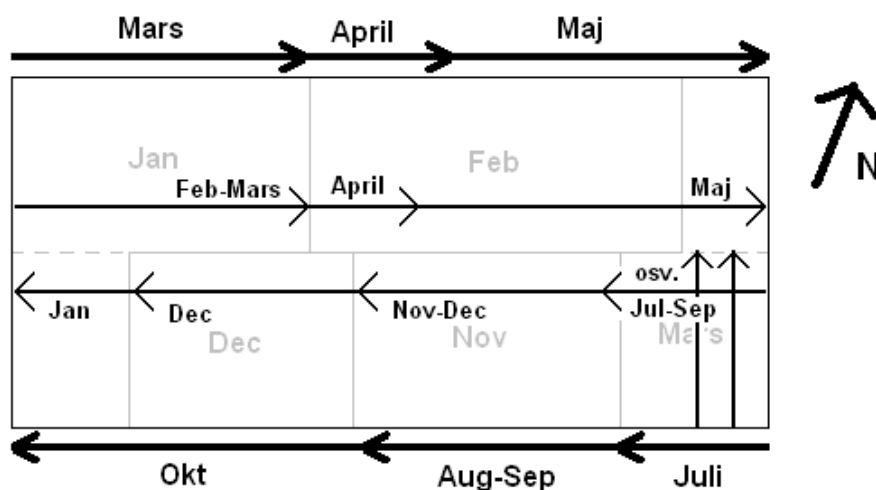
Pålningens ordning

Pålningen utfördes enligt mönstret i Figur 3.18 nedan.



Figur 3.18 Översikt över pålningsordning

För att stabilisera schakten där tunneln sedan ska finnas har slitsmurar installerats. De södra längsgående slitsmurarna installerades i juli-oktober 2003 och de norra i mars-maj 2004, de södra tvärgående slitsmurarna installerades i juli-januari 2003-2004 och de norra i februari-maj 2004, enligt Figur 3.19. Detta innebär i princip att längs den södra sidan har pålar och slitsmurar installerats samtidigt, medan i norr har pålningen legat ungefär en till två månader före slitsmursinstallationen.



Figur 3.19 Översikt över installationen av längsgående och tvärgående slitsmurar

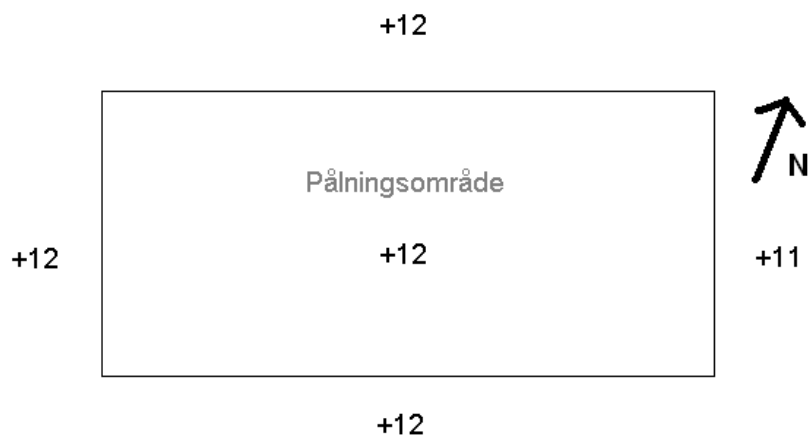
Svart tjock text avser längsgående slitsmurar

Svart tunnare text avser tvärgående slitsmurar

Grå text avser påslagning

Konstruktion

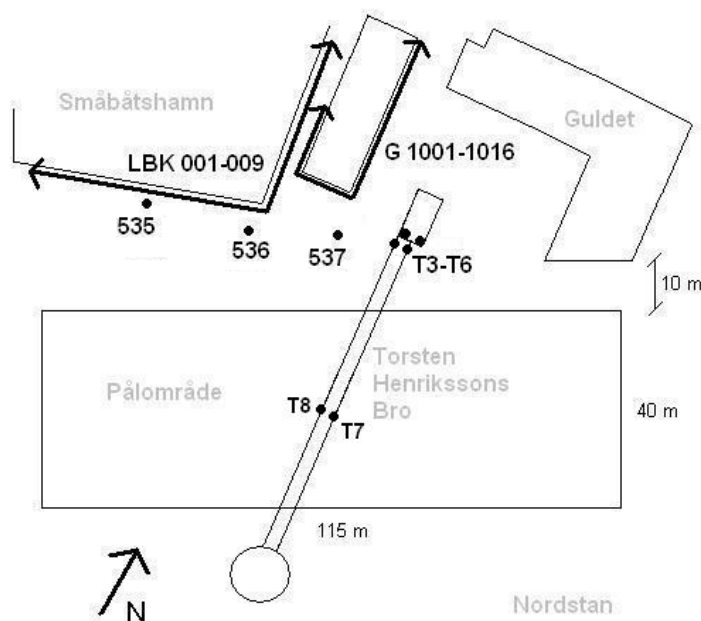
De mantelburna pålarna har slagits från markytan och knektats ned till underkant tunnel, dvs. 8 m vid den östra gaveln resp. 12 m i väster. De längsgående och tvärgående slitsmurarna är 1,2 m tjocka och 13-30 m djupa för att klara av att stabilisera schakten. Även under tunneln har slitsmurar installerats, dels för att förhindra bottenuppträckning, dels för att stabilisera de längsgående slitsmurarna. Figur 3.20 visar planskiss med marknivåer inom och utanför pålningsområdet.



Figur 3.20 Planskiss över marknivåer, L2

Mätningar

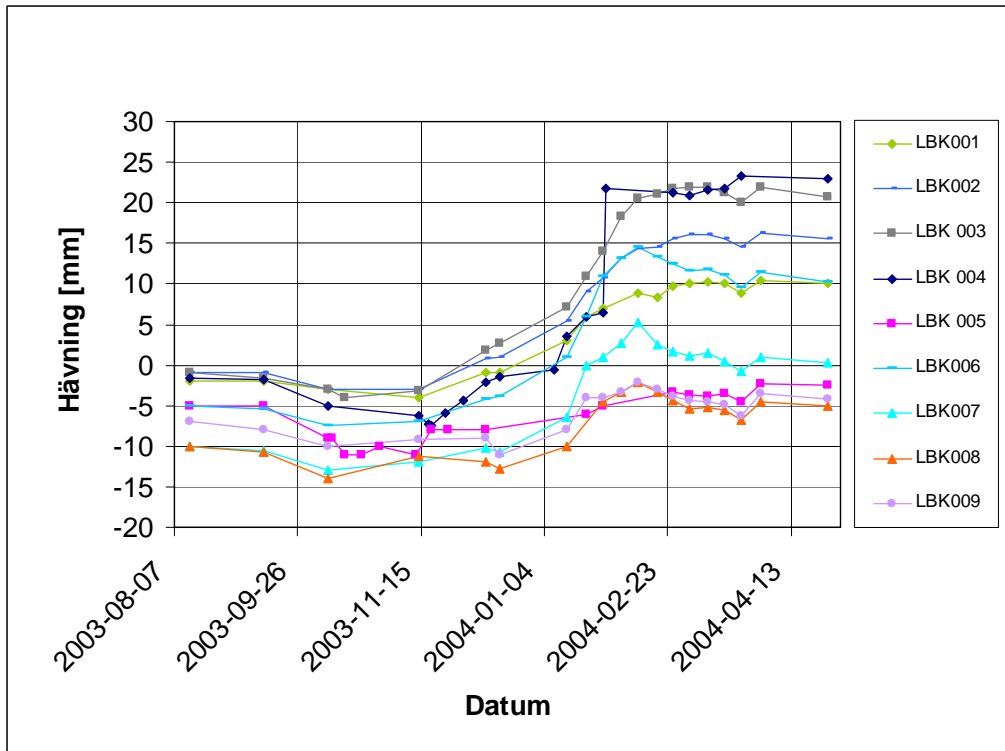
Hävningen har analyserats omkring pålningssområdet i de mätpunkter som visas i Figur 3.21.



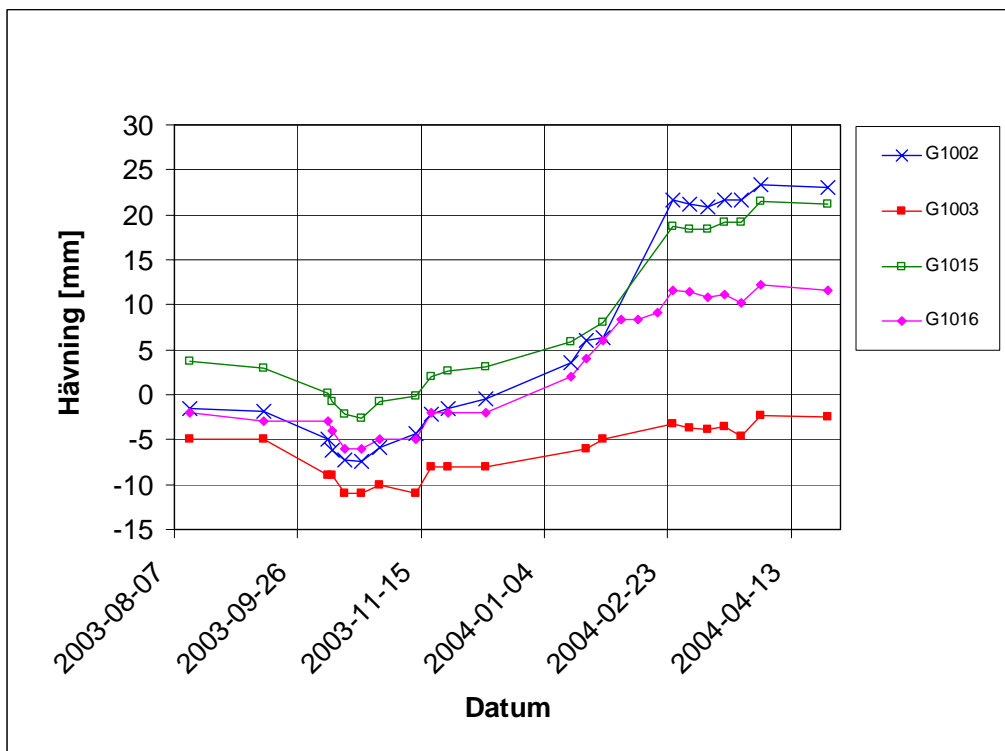
Figur 3.21 Översikt över mätpunkter
LBK-serien är dubbar på kaj
G-serien är dubbar på hamnskjul
535-537 är markdubbar
T3-T8 är dubbar på gångbro

Resultat - vertikallrörelser

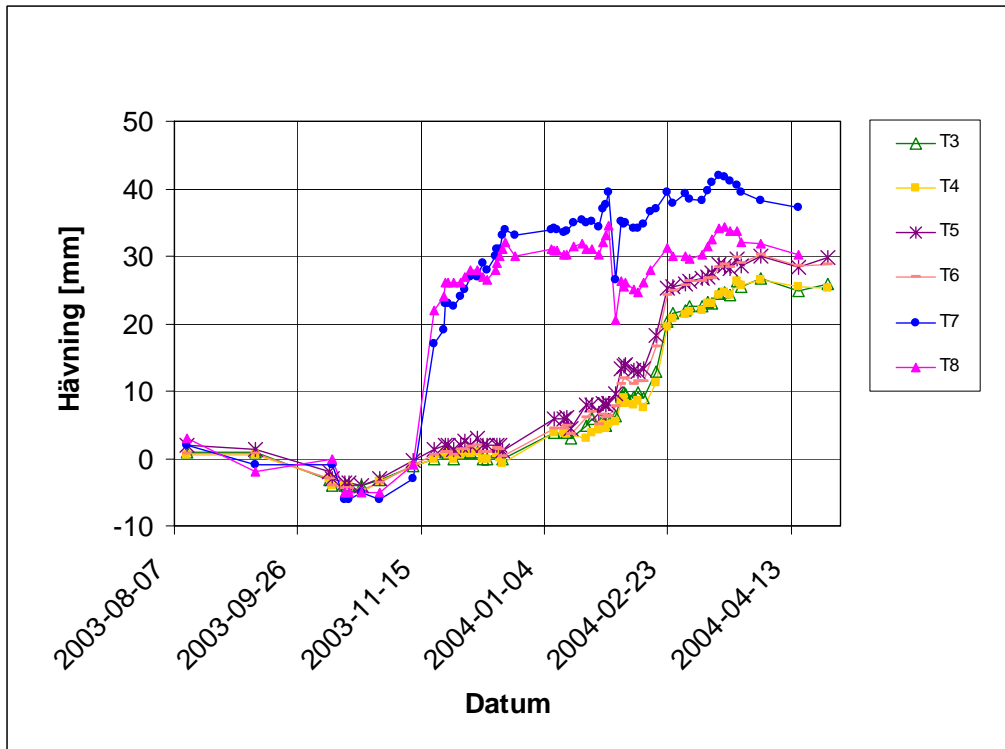
En sammanställning av hävningen för alla mätpunkter finns i Figur 3.22a-d nedan. T7 och T8 visar en mycket större hävning än övriga mätpunkter under slutet av november. Detta förklaras av att dessa punkter befinner sig mitt i pålningssområdet som pålades just vid denna tidpunkt, jämför Figur 3.18 och Figur 3.21.



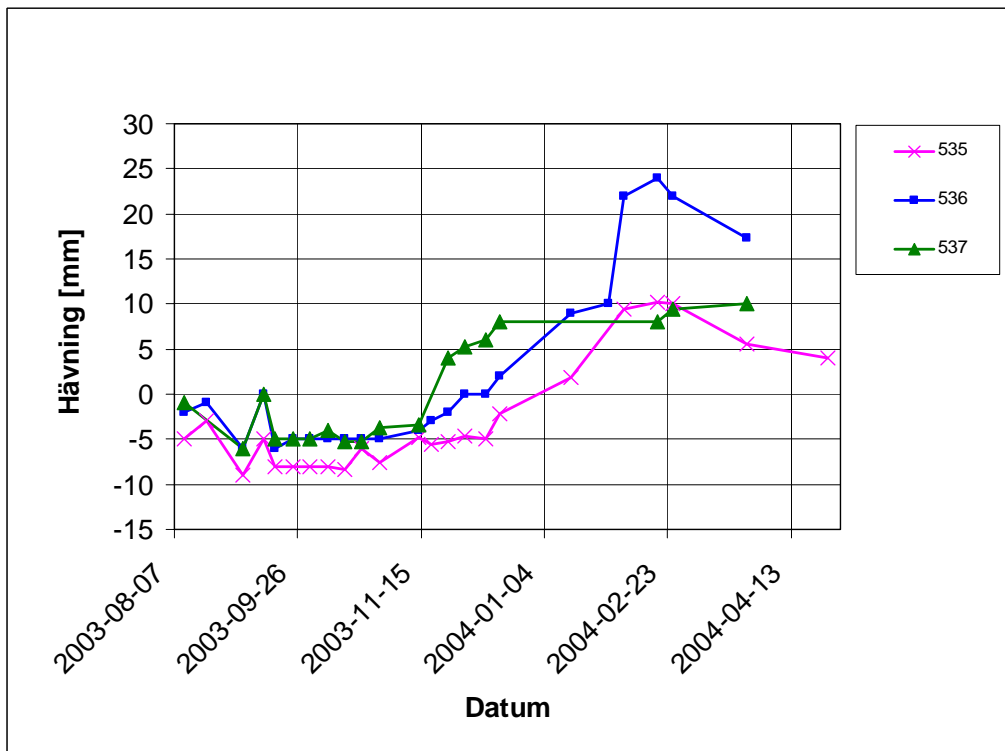
Figur 3.22a Hävning hos dubbar placerade på Lilla Bommen-kajen, grundlagd på pålar



Figur 3.22b Hävning hos dubbar placerade på hamnskjul, grundlagt på befintliga jordlager



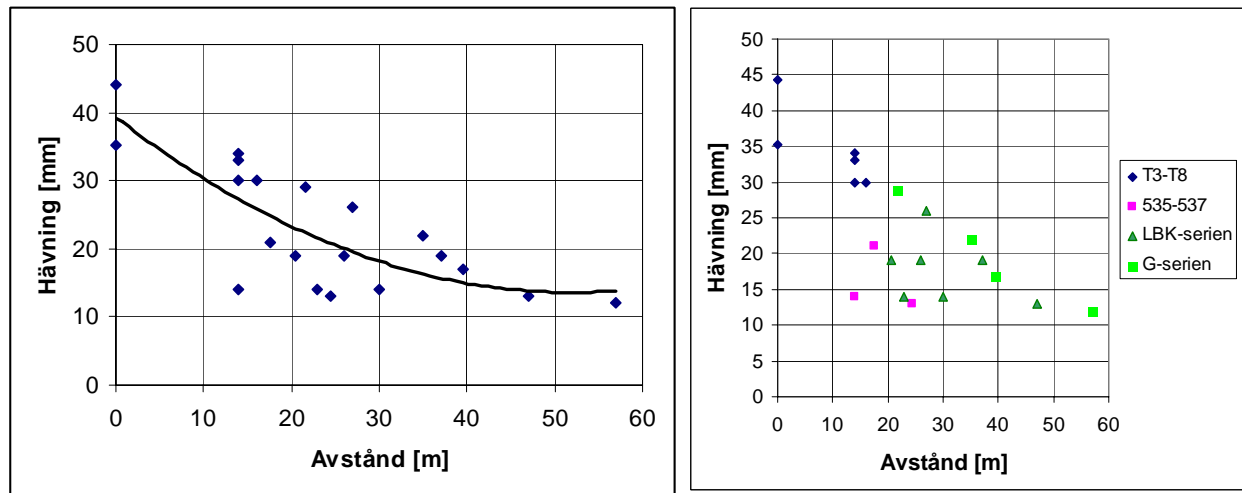
Figur 3.22c Hävning hos dubbar placerade på Torsten Henrikssons gångbro, grundlagd på kohesionspålar



Figur 3.22d Hävning hos markdubbar på pålat område

Mätpunkterna befinner sig inom pålningsområdet och på avstånd 14-57 m från pålningsområdet. Hävningen som har skett under pålningen mellan slutet av oktober och början av april redovisas i Figur 3.23.

Markdubbarna 535-537 borde hävas mycket eftersom de saknar den mothållande kraft som de konstruktioner ger som övriga dubbar är placerade på, dock är marken här grundlagd på pålar.

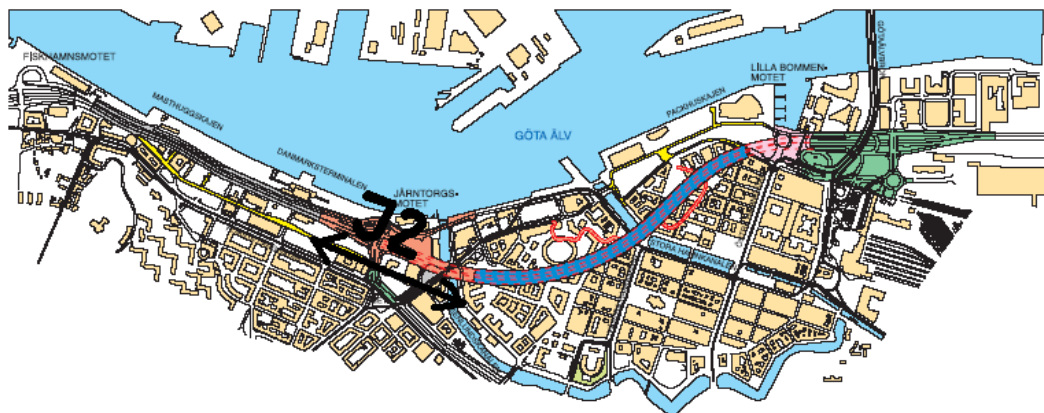


Figur 3.23a) Hävningen hos dubbar på olika avstånd från pålningsområdet med trendlinje
b) Hävningen redovisad för respektive konstruktion

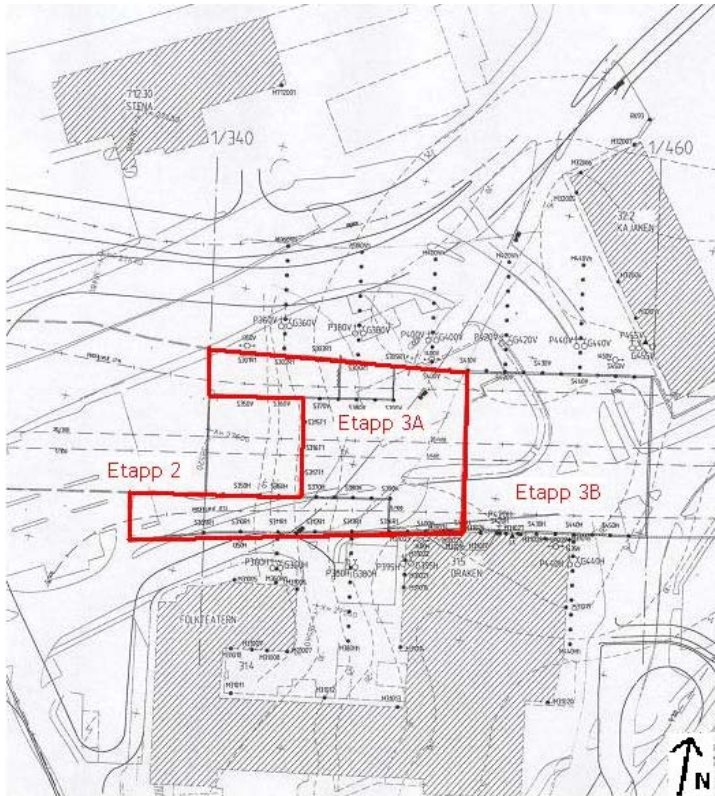
Entreprenad J2

Entreprenad J2, se Figur 3.24, vid Järntorget sträcker sig från Rosenlund i öster till Stenaterminalen i väster. Entreprenaden utgörs av en 510 m lång sträcka bestående av 20 m stödmurar, 144 m tråg, 310 m betongtunnel och 35 m bergtunnel. Entreprenaden innefattar avancerade avlastningar av närliggande byggnader och schaktdjup uppemot 18 meter för att kunna bygga tunneln. Entreprenör är Skanska.

Entreprenaden är indelad i olika etapper. Etappen som analyseras i detta arbete benämns 3A, se Figur 3.25. Etapperna 2 och 3B på ömse sidor om 3A har pålats ca två år tidigare med anledning av en trafikomläggning under byggtiden.



Figur 3.24 Entreprenad J2
(www.vv.se, 2004-09-20)



Figur 3.25 Översikt över etapp 3A

Jordlagerföljd

Ovanpå leran finns ett fyllningslager som bedöms vara ca 3,5 m mäktigt. Under befintliga vägfyllnadsmassor består fyllningen av friktionsjord blandad med lera, tegel, trärester m.m., detta lager är 1-1,5 m mäktigt. Därunder är fyllnadsmassorna mer leriga med inslag av friktionsjord och rivningsrester. Jorddjupet är bedömt till ca 50 m. Närmast berg finns ca 1-2 m friktionsjord, lokalt upp till 5 m.

Pålning

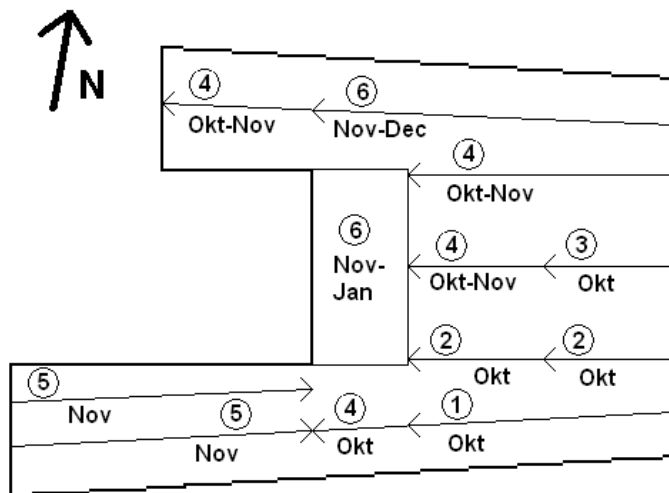
Pålningens arbetet utfördes från början av oktober 2003 till slutet av januari 2004. Sammanlagt har 438 mantel- och spetsburna pålar installerats med längder på 23 till 59 m. I genomsnitt har en propp per påle dragits över hela området, både propprör (11 m) och jordskruv (15 m) har använts. En sammanställning av påldata finns i Tabell 3.4.

Tabell 3.4 Påldata för J2

Pålningdatum	03/09/29-04/01/28
Pålområdets bredd	ca 40 m
Pålområdets längd	ca 65 m
Pållängd	23-59 m
Knektdjup	1-6 m
Pålarnas sidmått	0,275 m (69 st) 0,400 m (257 st)
Antal pålar	326 st
Antal proppar	314 st
Propplängd	11 och 15 m

Pålningens ordning

I Figur 3.26 nedan kan arbetsordningen ses, siffrorna anger i vilken ordning de olika raderna har slagits. Skanska kunde i stort sett följa den tänkta pålningens ordningen.



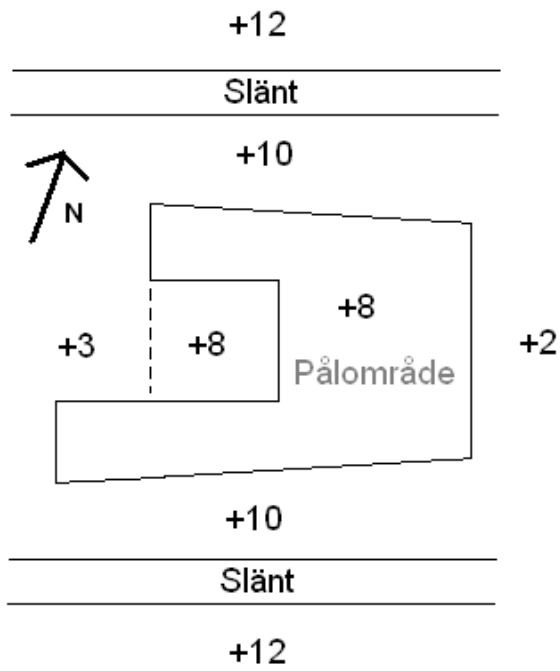
Figur 3.26 Pålningens ordning inom J2

Konstruktion

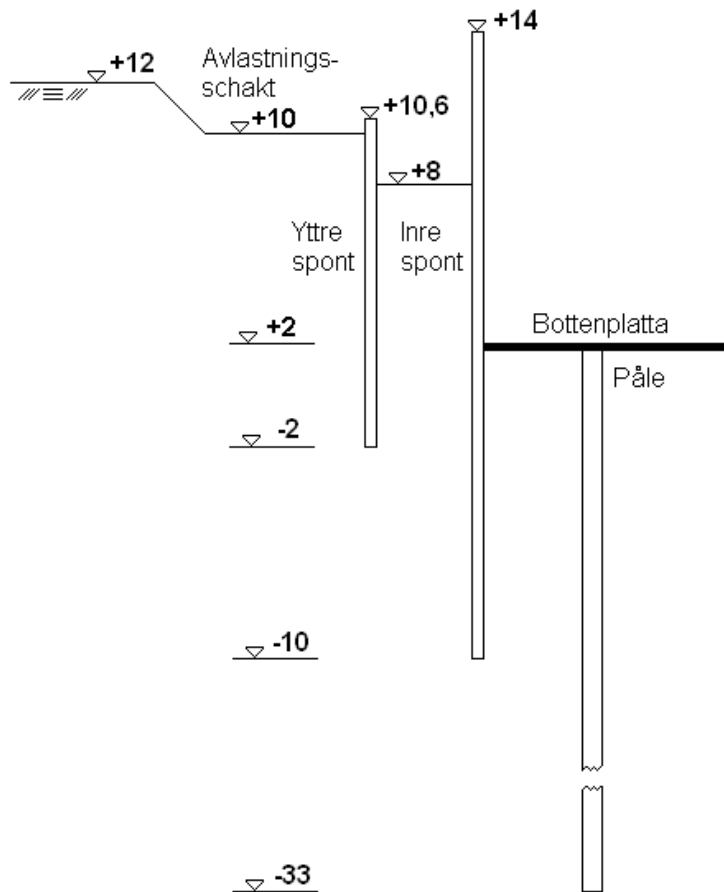
Etapp 3A består av en tunneldel och två ramper som ska leda trafiken till/från tunneln. En översikt över etapp 3A under byggskedet finns i Figur 3.27. Marknivåerna under pålningens arbetet redovisas i Figur 3.28. För att öka stabiliteten vid senare urschaktning utfördes först en 2 m djup avlastningsschakt vid sidan om etappen. Samtidigt schaktades pålningens område ned till nivån +8 där sedan sponter slogs. Från nivån +8 installerades sedan pålarna. Pålarna knektades ned till den blivande tunnelns bottenplatta på nivåer mellan +2 och +7. I mitten av februari påbörjades en successiv urschaktning som djupast ned till nivån +2, där sedan mothållsplattor gjöts. Figur 3.29 visar en tvärsnitt genom den djupaste delen av etappen.



Figur 3.27 Etapp 3A under byggtiden
(Efter A Kullingsjö)



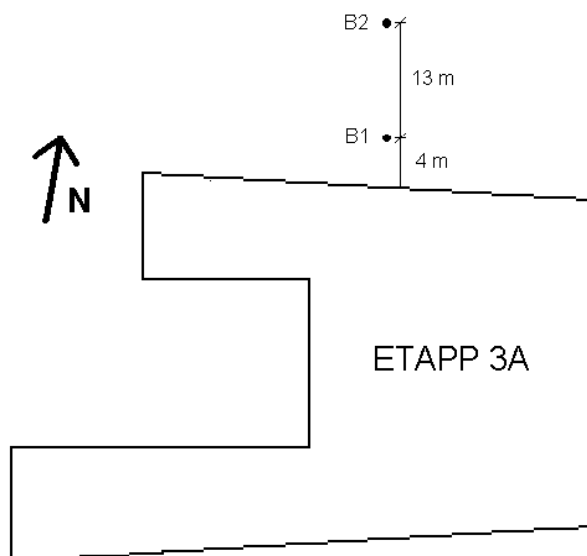
Figur 3.28 Planskiss med marknivåer, J2



Figur 3.29 Sektionsskiss över den djupaste delen av etapp 3A

Mätningar

Analyser har gjorts av två bälgställningsmätare som tillhör ett pågående forskningsprojekt. Dessa finns placerade 4 m (B1) resp. 17 m (B2) norr om pålningsområdet, se Figur 3.30.



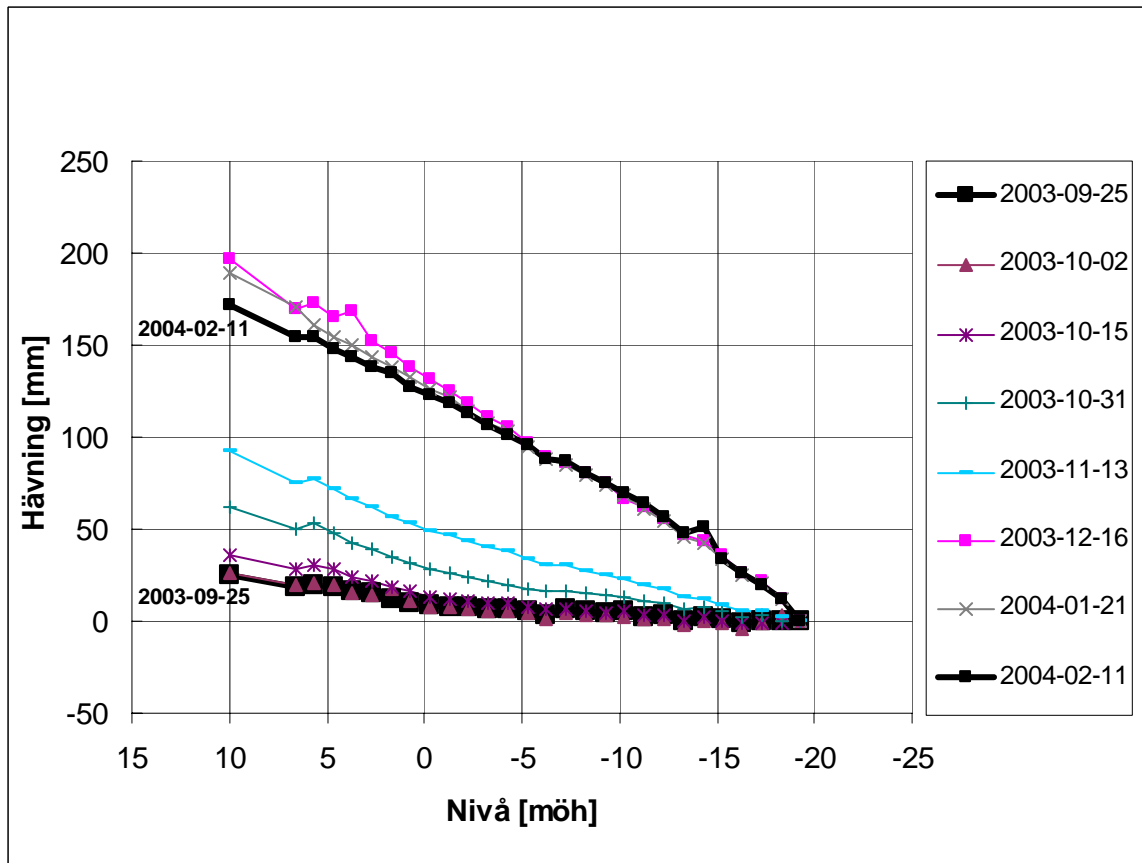
Figur 3.30 Bälgsställningsmätarnas placering vid etapp 3A

Alla pålar i området har mätts in efter avslutad pålning för att kontrollera deras förflyttning i xy-led.

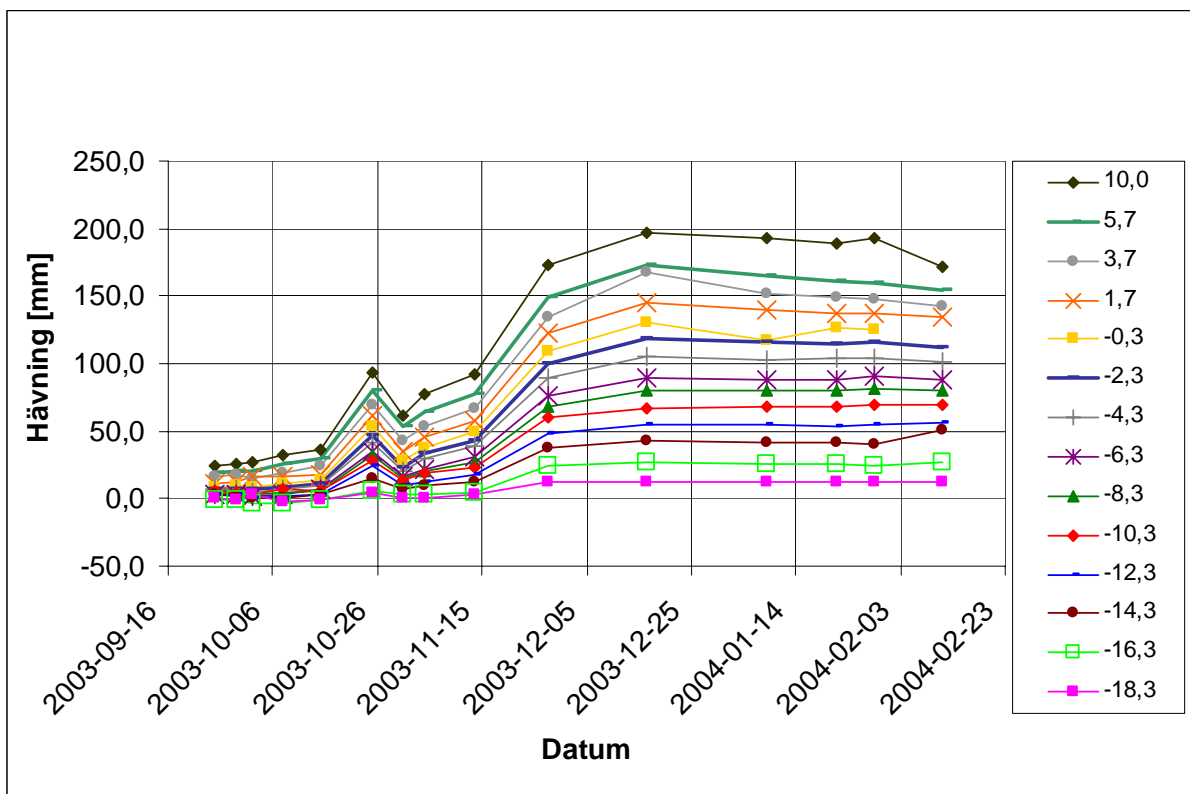
Resultat - vertikalarörelser

Hävningen i bälgställningsmätare B1, som sitter ca 4 m från pålningsområdet, visas i Figur 3.31a,b. Bälgsställningsmätaren antas vara fast i botten och sitter med ett foderrör de översta 3 m så där har inga pålitliga rörelser uppmätts. Därför är graferna modifierade för att kunna få den troliga hävningen på markytan, d.v.s. på nivån +10 efter avlastningsschakten. Modifieringen har gått till så att hävningen har förlängts i en tänkt linje ända upp till markytan. Det modifierade resultatet av mätningen i bälgställningsmätare B1 är en hävning på 168 mm 4 m utanför pålningsområdet.

Figur 3.31b visar en markant ökning av hävningen i slutet av november. Detta beror antagligen på att pålarna i norra delen av pålningsområdet, närmast bälgslangen, slogs under november-december enligt pålningsordningen, Figur 3.26. Den kraftiga ökningen av hävningen 2003-10-25 beror på mätfel.



Figur 3.31a) Bälgsättningsmätare B1, 4 m från pålningsområdet, hävningen mot djupet

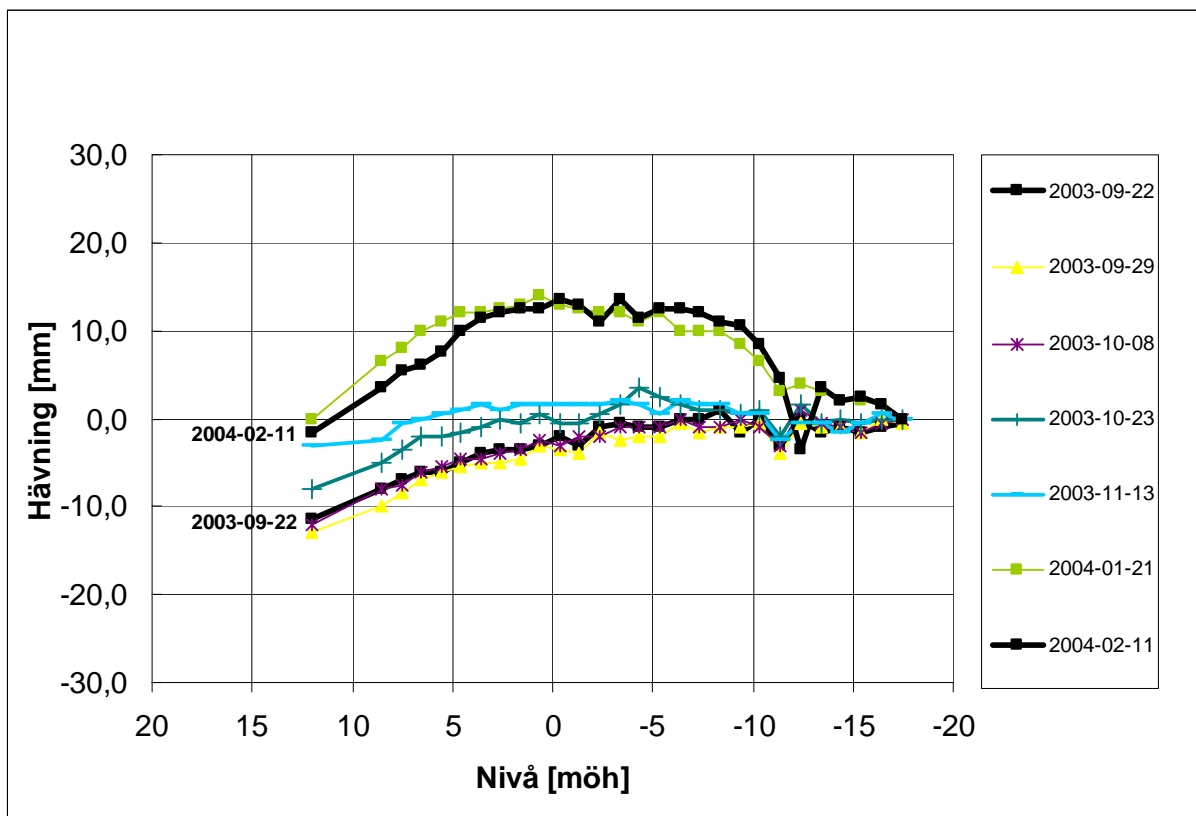


Figur 3.31b) Bälgsättningsmätare B1, hävningen på olika djup under pålningstiden

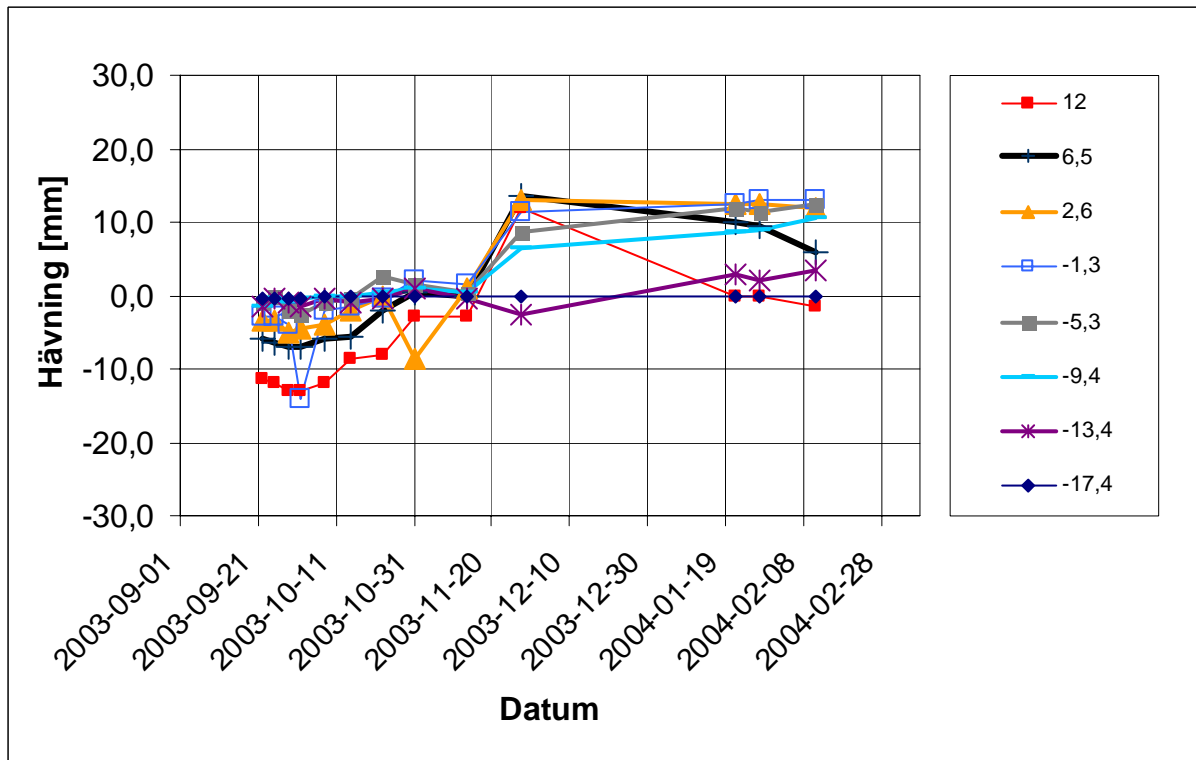
Hävningen i bälgställningsmätare B2, som sitter ca 17 m från pålningsområdet, visas i Figur 3.32a och b. De översta 3 m sitter i ett foderrör, därför har värden ovanför nivån +8,5 interpolerats fram. Det modifierade resultatet av mätningen i bälgställningsmätare B2 är en hävning på 10 mm 17 m utanför pålningsområdet

Bälgställningsmätaren sitter ca 2 m från slänkrönet till avlastningsschakten, därmed kan en del av den ökande sättningen mot markytan förklaras, se Figur 3.32a. Det beror antagligen på den lägre stabiliteten som uppstår vid slänten.

Figur 3.32b visar stor hävning i slutet av november, precis som B1. Tyvärr saknas mätvärden från december.



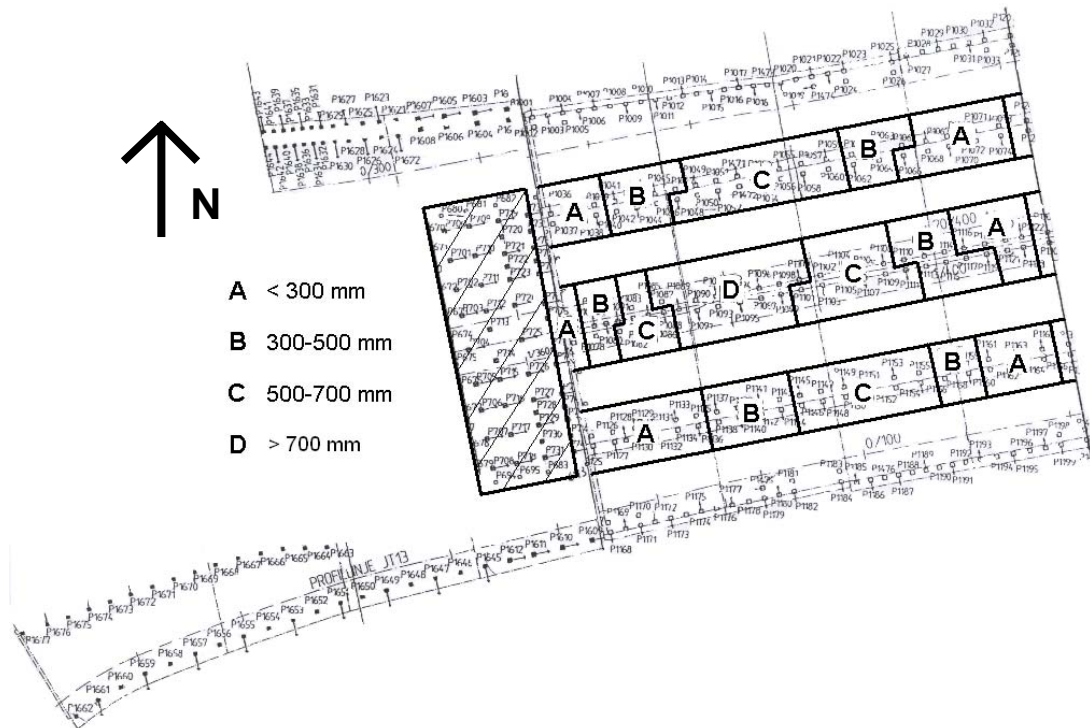
Figur 3.32a) Bälgställningsmätare B2, 17 m från pålningsområdet, hävningen mot djupet



Figur 3.32b) Bälgsättningsmätare B1, hävningen på olika djup under pålningstiden

Resultat - horisontalrörelser

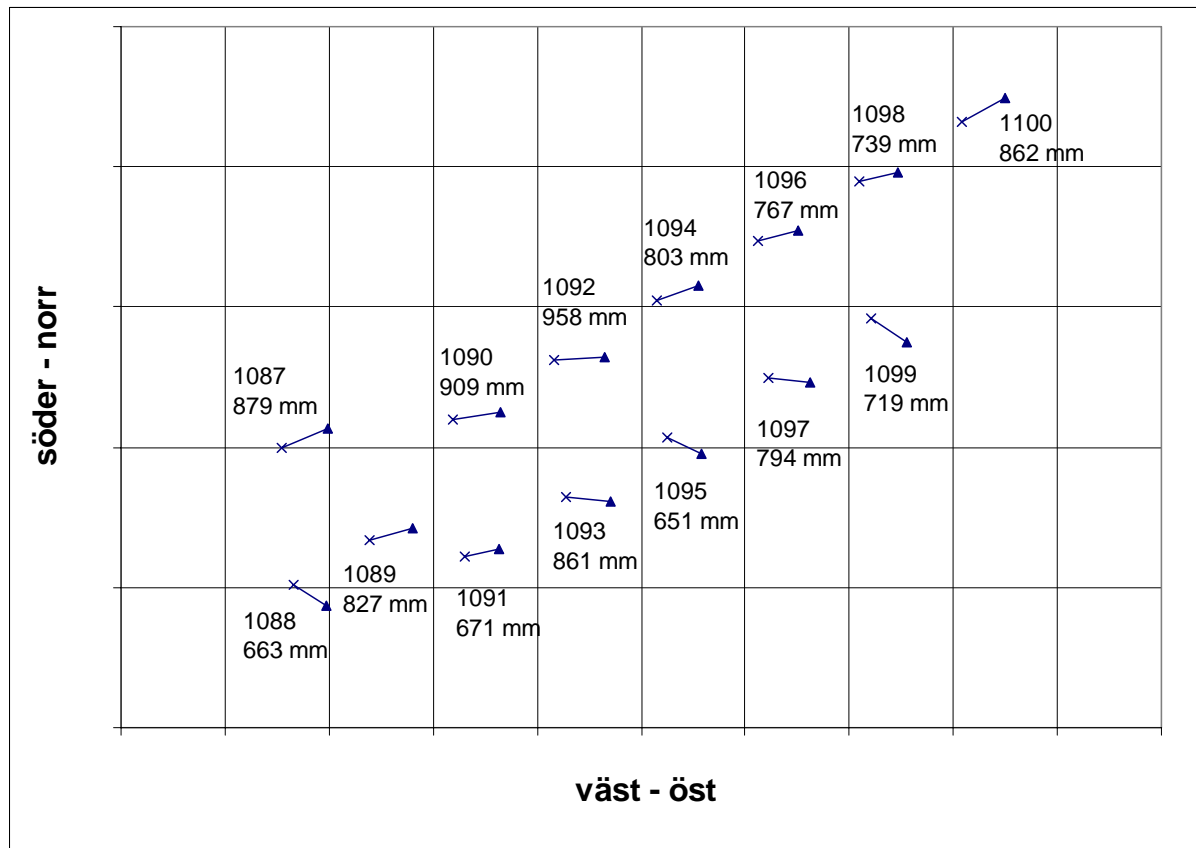
För en del av etapp 3A, ej ramperna och området i väst, har pålhuvuden mätts in vid slagningen samt efter avslutad pålning och avschaktning. I Figur 3.33 redovisas hur mycket dessa pålar har förflyttats i plan. Eftersom pålarna endast har mätts in efter helt avslutat pålningsarbete kan inte påverkan av slagning av närliggande pålar analyseras.



Figur 3.33 Pålplan med pålarnas sidoflyttning redovisad för de pålar som har mätts in

Då pålarna har förflyttats mycket i sidled, som mest uppemot 900 mm, är det intressant att se i vilken riktning pålarna har förskjutits. Figur 3.34 visar en förstoring av det område där störst förflyttning uppmätts, d.v.s. område D i Figur 3.33, även storleken på förflyttningarna redovisas.

Gemensamt för alla pålar i Figur 3.34 är att förflyttningen har skett mestadels österut. Detta beror sannolikt på att pålarna inom det streckade området slogs sist, se Figur 3.26 och att etapp 3B som ligger österut redan var urschaktad till nivån +2. Dessutom fanns en tvärgående spont precis väster om det streckade området som var stagad med linor ned till fast berg, detta antas ha påverkat rörelsernas riktning ytterligare.



Figur 3.34 Inmätning av pålarna 1087-1100 inom delområde D i etapp 3A, jämför Figur 3.33
 x anger inmätning vid slagning, rörelser mot öster
 ▲ anger inmätning efter urschaktning, rörelser mot öster

3.2.2 Skandiahamnen

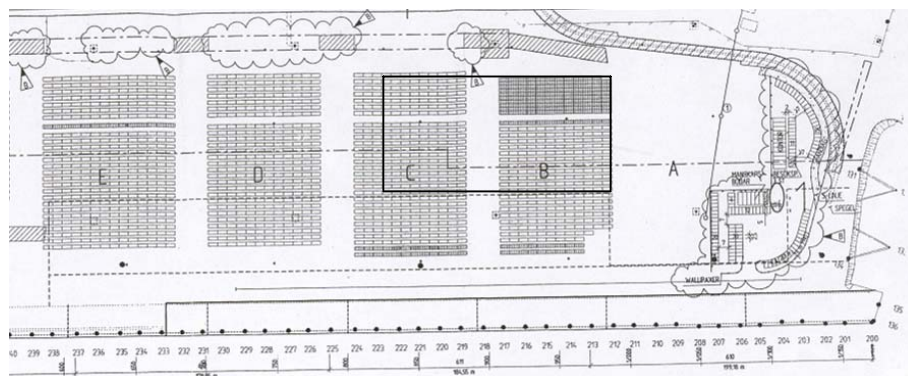
Göteborgs Hamn är nordens största hamn och drivs av det kommunala bolaget Göteborgs Hamn AB som årligen hanterar omkring 34 miljoner ton gods. För att kunna bibehålla och utveckla fartygstrafiken till Göteborg måste säkerheten i farlederna uppfyllas, detta genomförs med projektet ”Säkrare farleder”. Farlederna ska fördjupas genom muddring ända fram till containerterminalen i Skandiahamnen. De närmsta 100 m intill kajen kan dock inte muddras om inte en stabilisering av marken utförs först. Därför genomförs projektet ”CT 2005 – Förstärkning del av Södra kajen, Skandiahamnen”. Detta innebär att de översta metrarna schaktas av och att bankpålning utförs innan massorna återplaceras.

Jordlagerföljd

I området finns överst ett kraftigt fyllningslager med mäktighet runt 7 m. Fyllningsmassorna består överst av lera upp till stora block med inslag av byggavfall, detta vilar på sprängsten. Under fyllningen finns ett sandlager med varierande tjocklek och därunder lera. Jorddjupet varierar mellan 5-42 m med ökande djup mot väster inom det analyserade området. Närmast berg finns ca 0-5 m friktionsjord.

Pålning

Förstärkningen består av ett stort pålningsarbete som har delats in i olika områden, A-E, se Figur 3.35. Pålningen började i område E och har fortsatt österut.



Figur 3.35 Översikt över de olika etapperna i Skandiahamnen, inringat område visar etapp C-B

Delar av område C och B har pålats tillsammans som en etapp, se Figur 3.35, från augusti till oktober 2004. Etappens längd och bredd är 120 resp. 40 m. Norr om pålningsområdet finns ett stort område med containrar. Kajkanten befinner sig ca 40 m söder om pålningsområdet. Tabell 3.5 visar översiktlig information om pålarna som slagits. Pålarna har slagits ned till fast botten. Grundläggningsdjupet är som djupast i väster, ca 42 m, och grundast i öster, ca 5 m.

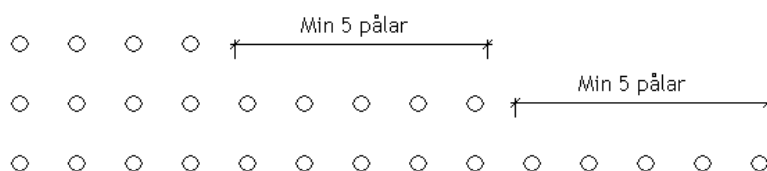
I Skandiahamnen har inga proppar tagits för att minska massundanträngningen p.g.a. att de översta metrarna består av fyllningsmaterial med varierande slag och fraktioner. I början av 60-talet fungerade Skandiahamnen i princip som tipplats för schakt- och rivningsmassor från olika delar av Göteborg.

Tabell 3.5 Påldata för etapp C-B

Pålningdatum	04/08/18-04/10/18
Pålområdets bredd	40 m
Pålområdets längd	120 m
Pållängd	5–42 m
Pålarnas sidmått	0,27 m
Antal pålar	485 st
Antal proppar	-
Propplängd	-

Pålningens ordning

I avsikt att driva jorden från kajen bestämdes att pålfronten i samtliga etapper skulle drivas mot nordost. Pålningen skulle utföras så att den sydligaste av två rader alltid låg minst fem pålar före intilliggande rad, se Figur 3.36.



Figur 3.36 Föreslagen arbetsordning för påslagning

Denna arbetsordning har dock inte följts under arbetets gång. Det beror bl.a. på att en länkplatta längst i norr var tvungen att pålas först. Dessutom var området längst i söder låst i början av projektet pga. att hamnens verksamhet var högst prioriterat, terminalytorna skulle bli färdiga så tidigt som möjligt. Den verkliga pålningsordningen visas i Figur 3.37 nedan.



Figur 3.37 Översikt över pålningsordning

Konstruktion

Pålningen har skett från en avschaktad nivå ca 3 m under marknivån, se Figur 3.38. Mitt genom pålningsområdet har en spont slagits ned för att undvika att vattnet från älven ska tränga in i området, ibland har dock översvämningar skett, se Figur 3.39. Nästan direkt efter påslagningen har pålarna kapats vid urschaktningsnivån och pålplattor av betong har gjutits, se Figur 3.39. Därefter har schakten fyllts igen och marken har asfalterats.



Göta Älv

Figur 3.38 Planskiss med marknivåer, Skandiahamnen

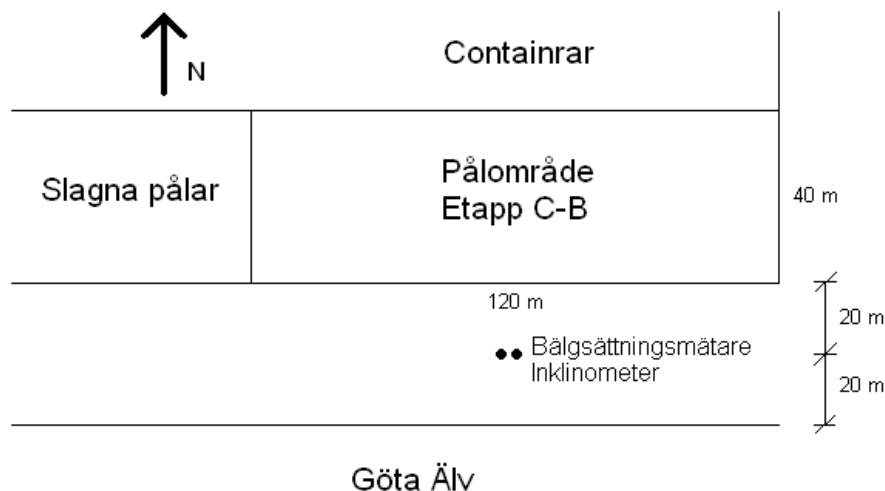


Figur 3.39 Slagna, ej ännu kapade, pålar och gjutna pålplattor vid översvämning från älven

Mätningar

För att kontrollera pålningens effekter i leran mättes i början portryck. Dessa steg långt över de tillåtna gränserna och pålningsarbetet stoppades därför. Portrycken sjönk inte, men arbetet återupptogs ändå. Efter detta mättes även horisontalrörelserna med inklinometrar.

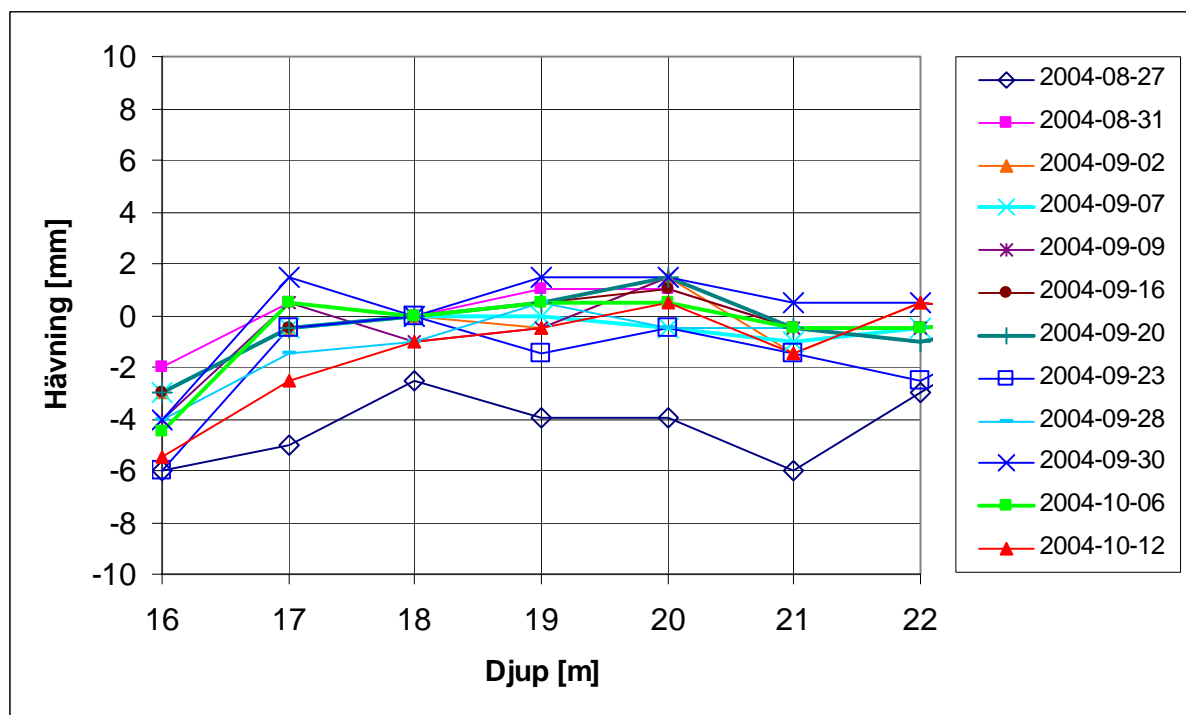
De mätningar som utförts i samband med detta examensarbete är vertikala rörelser med en bälgställningsmätare 20 m söder om etapp C-B. Tyvärr är inte bälgställningsmätaren optimalt placerad för ändamålet, utanför pålarnas influensradie, p.g.a. yttre omständigheter. Även fyra pålhuvuden på provpålar slagna i förväg i etapp C har mätts in en kortare tid medan pålfronten passerat förbi dem. Placeringen av bälgställningsmätaren och inklinometern finns i Figur 3.40.



Figur 3.40 Placering av mätpunkterna söder om pålningsområdet

Resultat – vertikalförändringar

Resultaten från bälgställningsmätningarna redovisas i Figur 3.41. Bälgställningsmätaren sitter inom ett foderrör ned till 13 m djup. Leran påverkas dock av foderröret ända ned till 16 m djup, så därför redovisas endast rörelserna under detta djup.

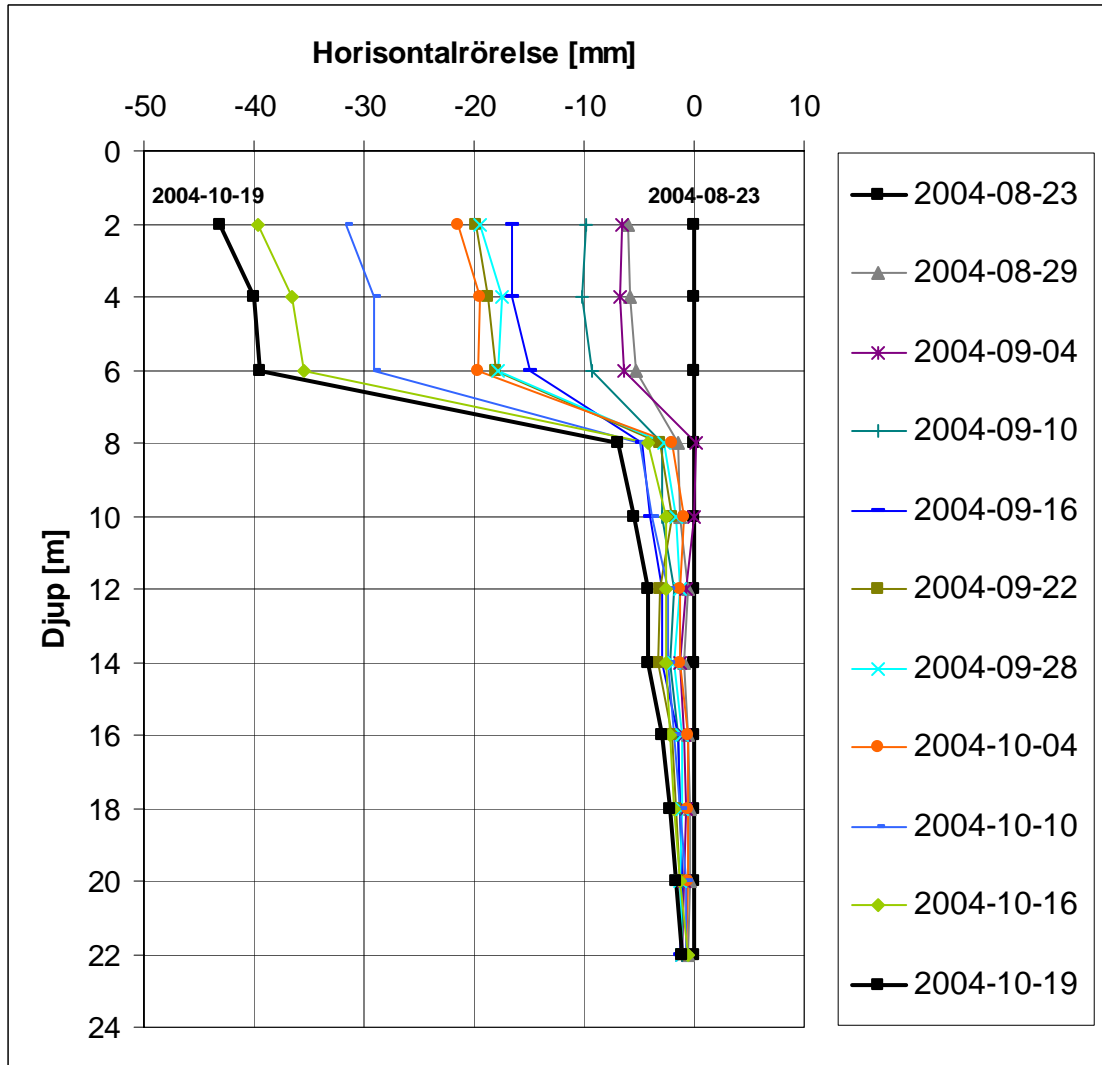


Figur 3.41 Vertikalförändringar mätt med bälgställningsmätare

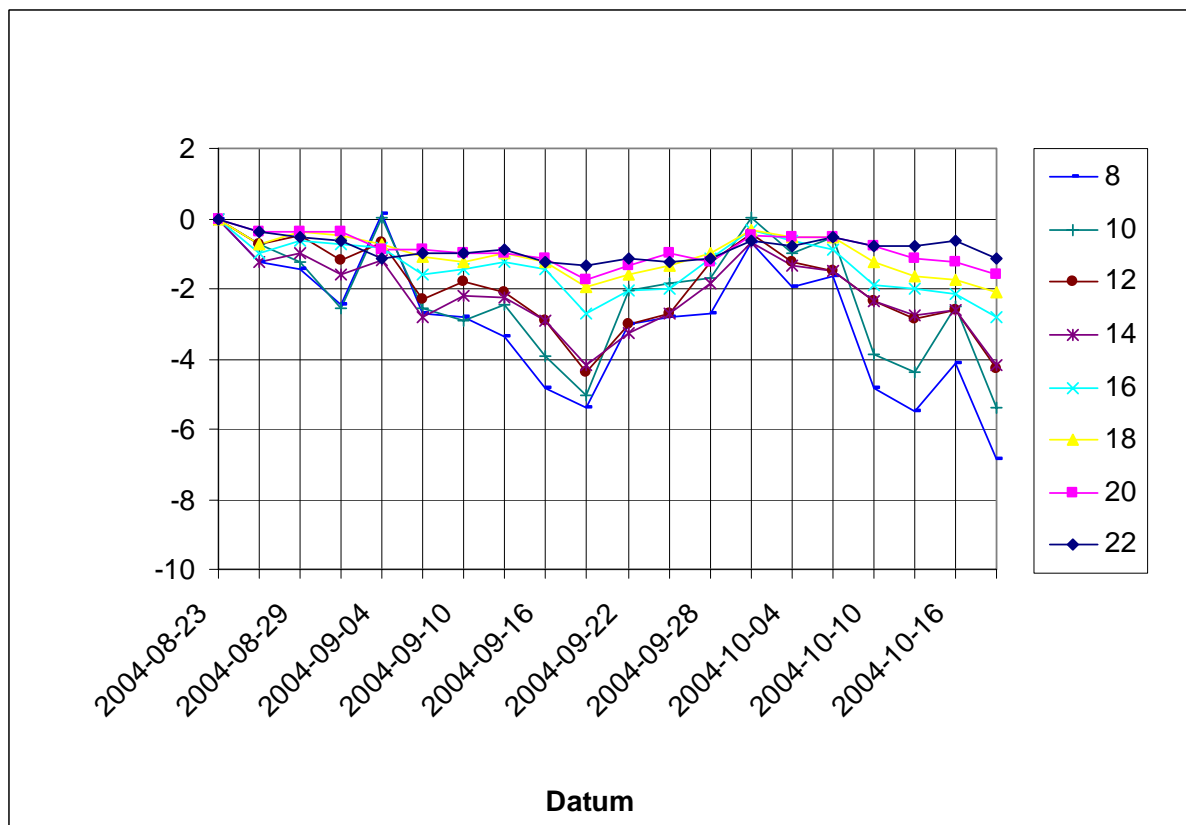
Figur 3.41 visar en sättning (2004-08-27) direkt efter nollmätningen, därefter sker en hävning tillbaka till ursprungsvärdet. En anledning till den initiella sättningen kan vara att nollmätningen utfördes för tidigt innan leran hade hunnit greppa slangen. Med denna justering har konstaterats att hävningen under 16 m djup är ca 0-5 mm, vilket innebär att hävningen i princip ligger inom felmarginalen.

Resultat – horisontalrörelser

Resultatet från mätningen av inklinometern redovisas i Figur 3.42a och Figur 3.42b. Inklinometern är de översta metrarna omgiven av foderrör, därför kan de i förhållandevis stora rörelserna de översta metrarna bortses från i båda graferna. Enligt de värden som kan analyseras är lerans maximala förflyttning ca 5 mm.



Figur 3.42a Horisontalrörelser under pålningsperioden, mätt med inklinometer

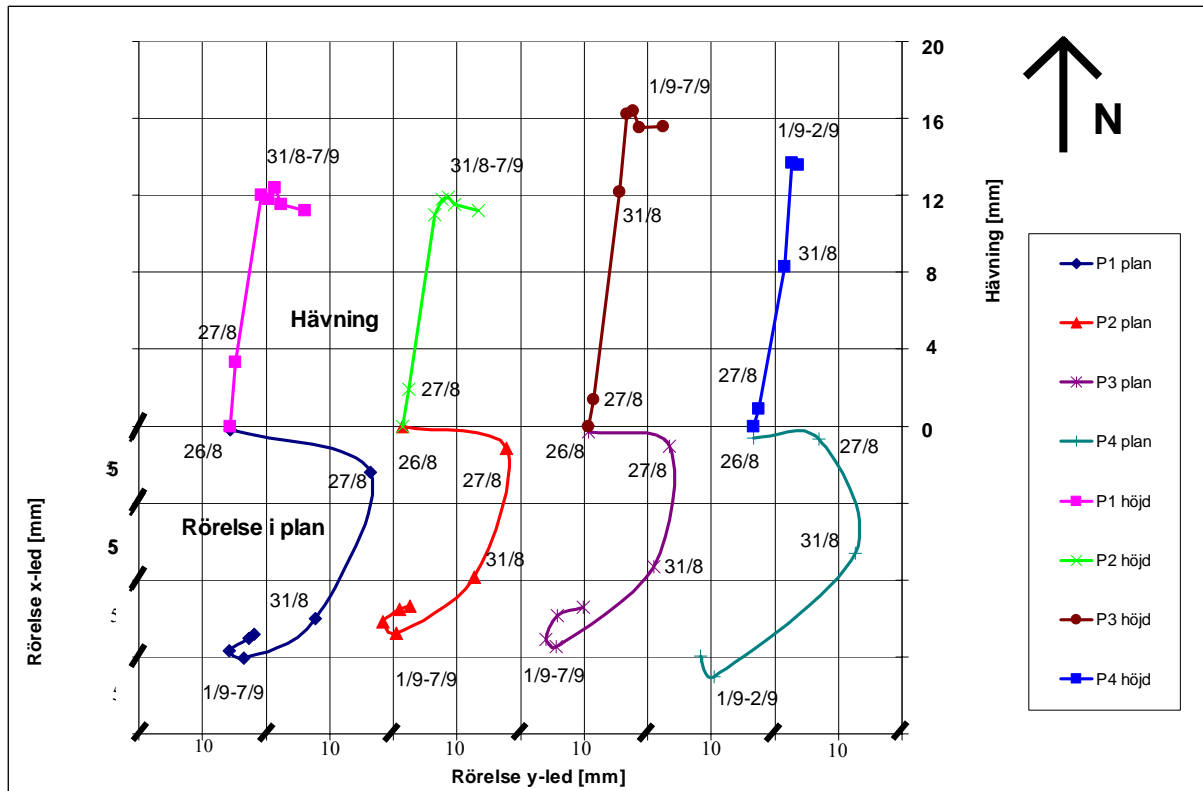


Figur 3.42b Horisontalrörelser på olika djup under pålningsperioden, mätt med inklinometer

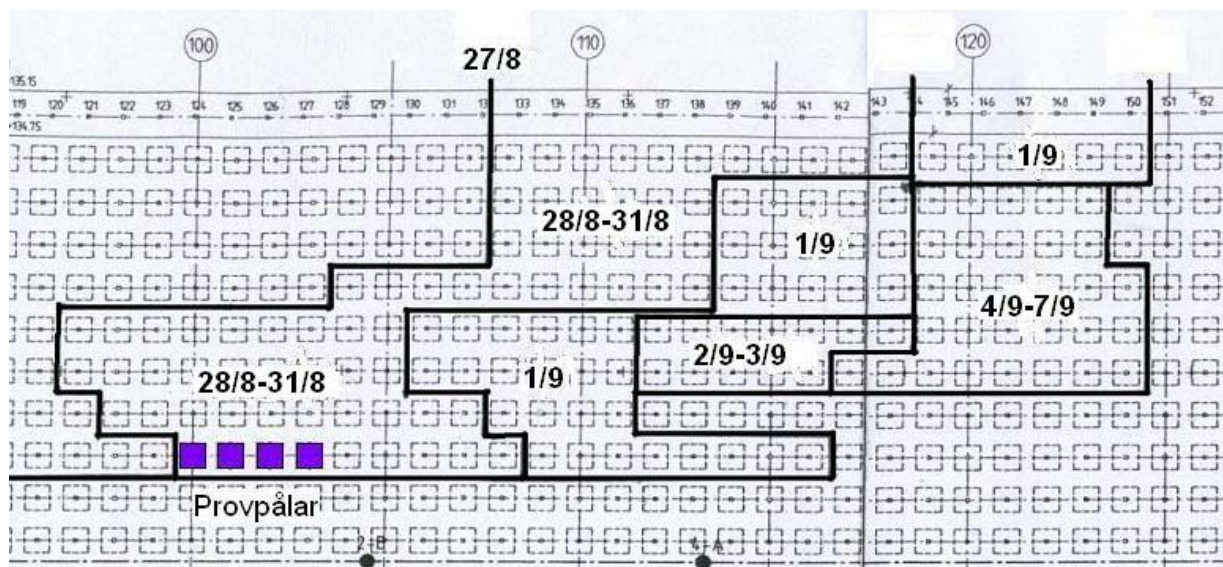
Resultat – inmätning av provpålar (vertikal- och horisontalrörelser)

Fyra pålar mitt i pålningsområdet slogs i förväg för att ta reda på vilka längder som skulle beställas hem under arbetet. När pålfronten sedan rörde sig förbi dessa provpålar mättes de in i xyz-led. Mätningarna skedde från 26 augusti till 7 september 2004, då pålarna kapades för att betongplattor skulle gjas på dem. Provpålarnas rörelse i plan och höjded kan ses i Figur 3.43. För att kunna jämföra de uppmätta rörelserna med påslagningen visar Figur 3.44 pålfrontens läge vid de aktuella tidpunkterna.

Analys av pålarnas rörelser visar att de stämmer bra överens med pålfrontens framskridande. Den kraftiga hävningen uppstår mellan 27 augusti och 31 augusti, precis då omfattande slagning förbi provpålarna skett. Efter den 31 augusti klingar rörelserna av och går t.o.m. tillbaka något.



Figur 3.43 Provpålarnas rörelse i plan och höjddel
 Övre delen visar provpålarnas hävning, storleken avläses i skalan till höger
 Nedre delen visar provpålarnas rörelse i plan



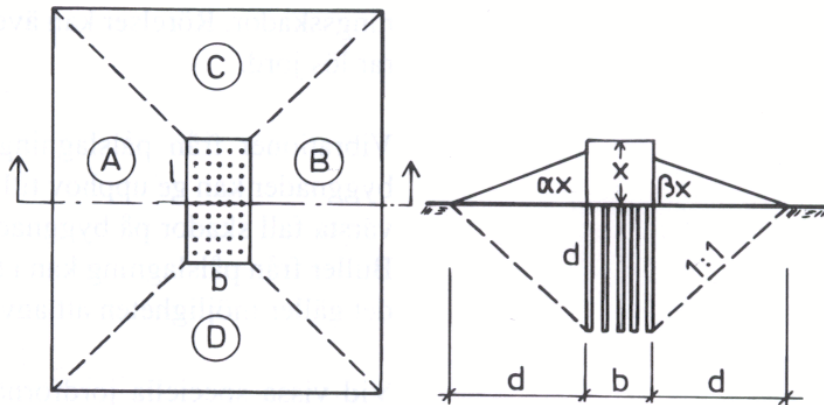
Figur 3.44 Pålfrontens rörelse förbi provpålarna, provpålarna är ifyllda

4 BERÄKNINGAR

Beräkningar har utförts för att försöka förutsäga storleken på undanträngningen av lera vid pålning. En enkel beräkningsmodell enligt Rehnman har använts för att förutsäga både horisontal- och vertikallrörelserna vid Götatunneln och Skandiahamnen. FE-simuleringar av undanträngningsförloppet i PLAXIS har utförts för både en påle och en pålrad.

4.1 Beräkningsmodell enligt Rehnman

Det mest använda sättet att förutse och bedöma storleken på hävning och horisontalrörelser vid pålning i lera är en beräkningsmodell som presenterades i "Pålgrundläggning" (Olsson, Holm 1993) av Sven-Erik Rehnman, se Figur 4.1. Bakgrunden till beräkningsmodellen är ett flertal studier av bl. a Dugan, Freed (1984) som påvisar att utbredningen av markhävning begränsas av pållängden.



Figur 4.1 Markhävning vid pålning i lera
(Efter Olsson, Holm 1993)

Markhävningen beräknas, enligt Rehnman, med följande samband:

$$x = \frac{\eta(V_{p\ddot{a}lar} - V_{lerproppar})}{d \left[(\alpha + \beta) \left(\frac{l}{2} + \frac{d}{3} \right) + (\gamma + \delta) \left(\frac{b}{2} + \frac{d}{3} \right) + \frac{b \cdot l}{d} \right]} \quad (4.1)$$

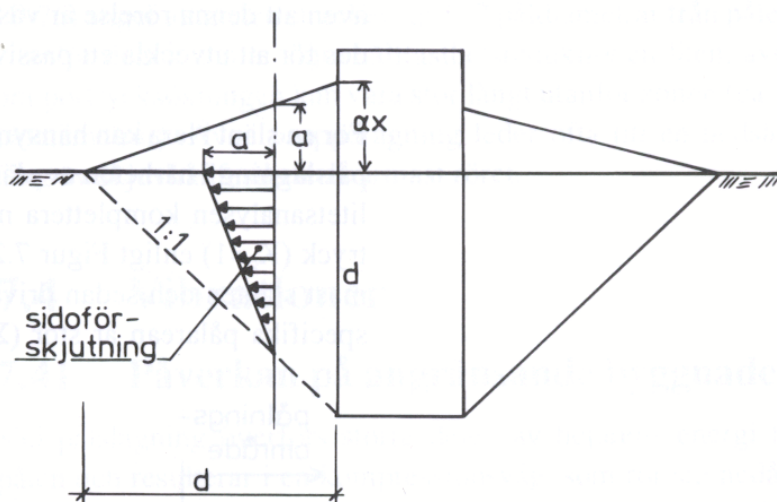
- x = hävningen inom pålningsområdet
- η = hävningsfaktor
- $V_{p\ddot{a}lar}$ = volymen av nedslagna pålar
- $V_{lerproppar}$ = volymen av proppdragen lera
- αx = hävningen närmast pålningsområdet med mothållande faktorer
- βx = hävningen närmast pålningsområdet med mothållande faktorer
- γx = hävningen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

Hävningens faktor η används för att all lera inte är helt inkompressibel, d.v.s. att markhävningen blir något mindre än volyundanträngningen, ($0,5 \leq \eta \leq 1$).

Göteborgsleran är i korttidsperspektivet att betrakta som inpermeabel, vilket innebär ett odränerat förlopp, som i sin tur ger ett näst intill inkompressibelt beteende med en hävningsfaktor nära 1. Vid påslagning i sensitiva leror kan ett lägre värde på hävningsfaktorn antas då hävningen och de horisontella deformationerna minskar p.g.a. en delvis inre kollaps av kornskelettet. Ett extremfall är kvicklera som kan bli helt omrörd och uppträda som en vätska närmast pålen och ”pressas” upp till markytan, i detta fall blir hävning och sidorörelser väsentligt mindre.

Faktorerna α , β , γ och δ anger hur mycket hävningen på respektive sida om pålningsområdet förhindras av mothållande krafter såsom marknivå, byggnader eller redan slagna pålar. Befinner sig t.ex. en byggnad precis i kanten av pålningsområdet är faktorn 0, befinner sig byggnaden på ett avstånd större än pållängden från pålningsområdet är faktorn 1. Däremellan interpoleras en faktor fram beroende hur stor area som byggnaden upptar av triangeln från pålningsområdet till en pållängd ifrån, se Figur 4.1. Om en byggnad exempelvis finns på avståndet en halv pållängd från pålningsområdet kan en faktor på ca 0,75 antas.

Ur samma modell kan, enligt Rehnman, även sidoförskjutningarna bedömas i den omgivande leran inom området som begränsas av linjerna med 45° lutning, se Figur 4.2.



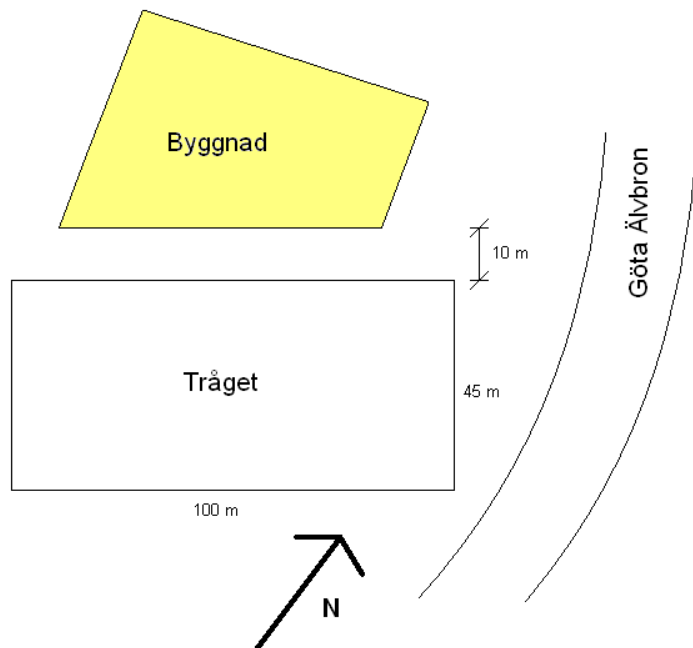
Figur 4.2 Sidoförskjutning vid pålning i lera
(Efter Olsson, Holm 1993)

På ett godtyckligt avstånd från pålningsområdet kan härigenom sidoförskjutningarna på olika djup bestämmas. I modellen antas att leran sidoförflyttas lika mycket vid markytan som den hävs. Genom att sedan dra en linje ned till den streckade 1:1-linjen enligt Figur 4.2 kan sidoförskjutningarna lätt åskådliggöras.

4.1.1 Götatunneln

Entreprenad L3

Beräkning har utförts för en del av NCC:s entreprenad. Figur 4.3 nedan visar förhållanden i området kring Lilla Bommen..



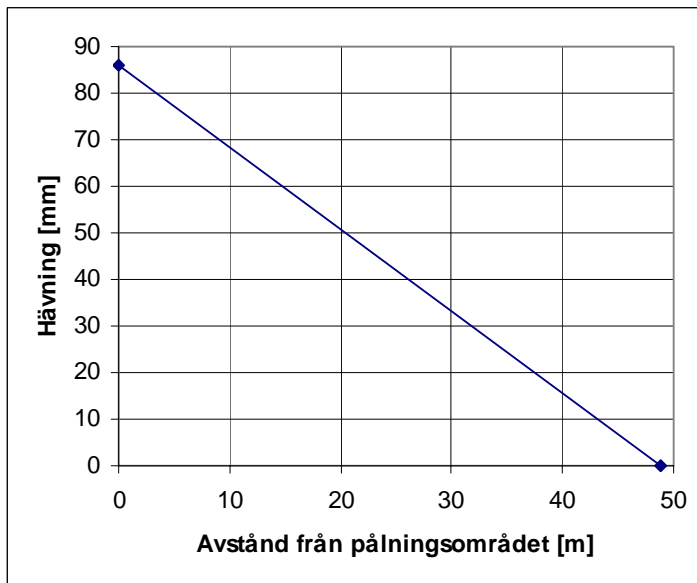
Figur 4.3 Översikt över entreprenad L3 där beräkningsmodellen tillämpats

Beräkningsmodellen tar endast hänsyn till konstruktioner på avstånd kortare än pållängden. I detta fall bortses dock byggnaden nordväst om tråget (pålningsområdet) för att det inte ger ökad belastning på marken. Byggnaden har två källarplan och urschaktningen för dem tar ut vikten av hela byggnaden. Skillnaden mellan nivån där pålningen utförts och marknivån runt omkring området är endast 1 m och anses därmed inte ha stor inverkan på hävningen, se Figur 3.11. Detta gör att faktorerna α , β , γ och δ sätts till 1,0. Övriga indata till beräkningsmodellen finns i Tabell 4.1 nedan.

Tabell 4.1 Indata till beräkningsmodellen för L3

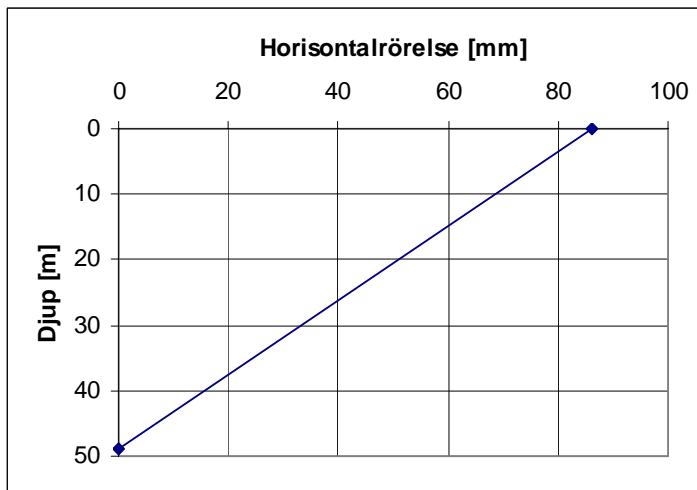
Pålområdets bredd	45 m
Pålområdets längd	100 m
Knektningsdjup	6,5 m
Pållängd (medel)	42,4 m
Pålarnas sidmått	0,27 m
Antal pålar	566 st
Antal proppar	560 st
Propplängd	15 m
Proppdiameter	0,27 m

Resultatet av beräkningen, som finns i bilaga 1, är en hävning på 86 mm inom pålningsområdet. Djupet 48,9 m som beräkningen är utförd med är pållängden + knektningsdjupet. I Figur 4.4 redovisas hävningen på olika avstånd från pålningsområdet.



Figur 4.4 Beräknad hävning på olika avstånd norr om pålningsområdet

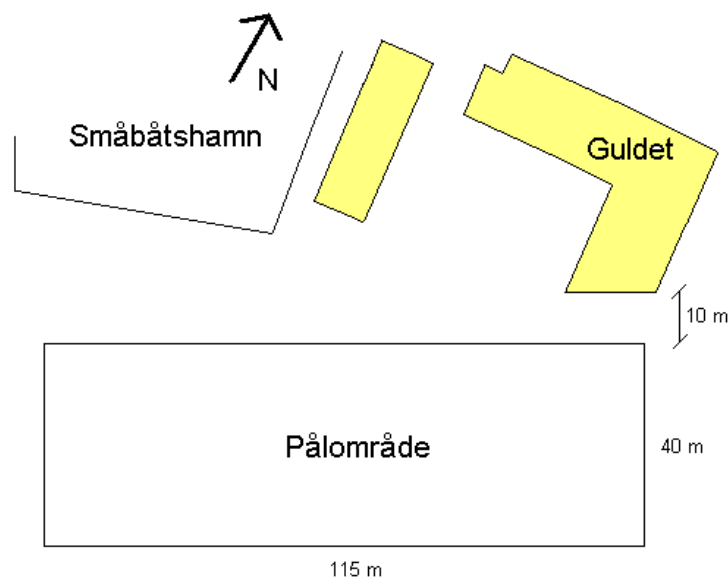
Även horisontalrörelserna har beräknats med beräkningsmodellen. Då inklinometer 901 och 908B sitter direkt intill norra resp. södra spanten har beräkningen utförts precis i pålningsområdets kant, se Figur 4.5. Samma beräkning går att tillämpa åt både norr och söder eftersom de mothållande krafterna runt hela pålningsområdet har antagits vara samma.



Figur 4.5 Beräknade horisontalrörelser precis i kanten av pålningsområdet

Entreprenad L2

Den del av LBT:s entreprenad som analyserats visas i Figur 4.6 nedan.



Nordstan

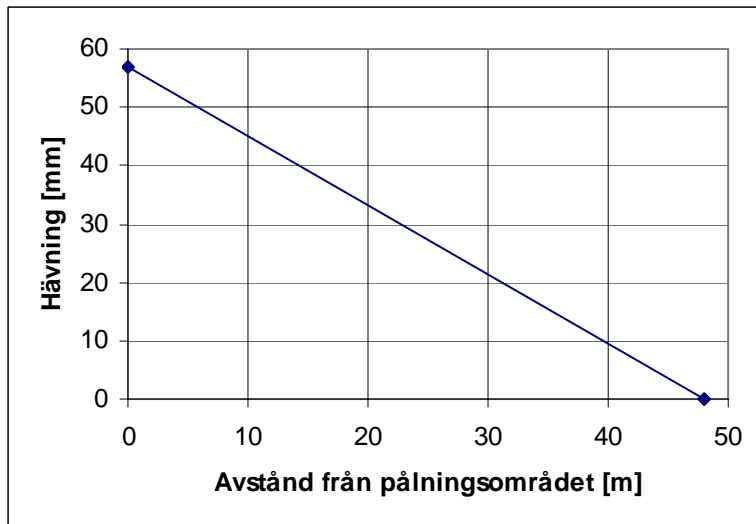
Figur 4.6 Översikt över entreprenad L2 där beräkningsmodellen tillämpats

De två byggnaderna norr om pålningsområdet anses inte inverka på hävningen, men marken mellan pålningsområdet och småbåtshamnen är pålad, därför sätts faktorn α till 0,8. Området väster om pålningsområdet består av en stödkonstruktion av betong, där sätts faktorn δ till 0,5. De två övriga faktorerna, β och γ , sätts till 1,0. Övriga indata till beräkningsmodellen finns i Tabell 4.2 nedan.

Tabell 4.2 Indata till beräkningsmodellen för L2

Pålområdets bredd	40 m
Pålområdets längd	115 m
Knektningsdjup	10 m
Pållängd (medel)	38 m
Pålarnas sidmått	0,275 m
Antal pålar	438 st
Antal proppar	305 st
Propplängd	15,5 m
Proppdiameter	0,29 m

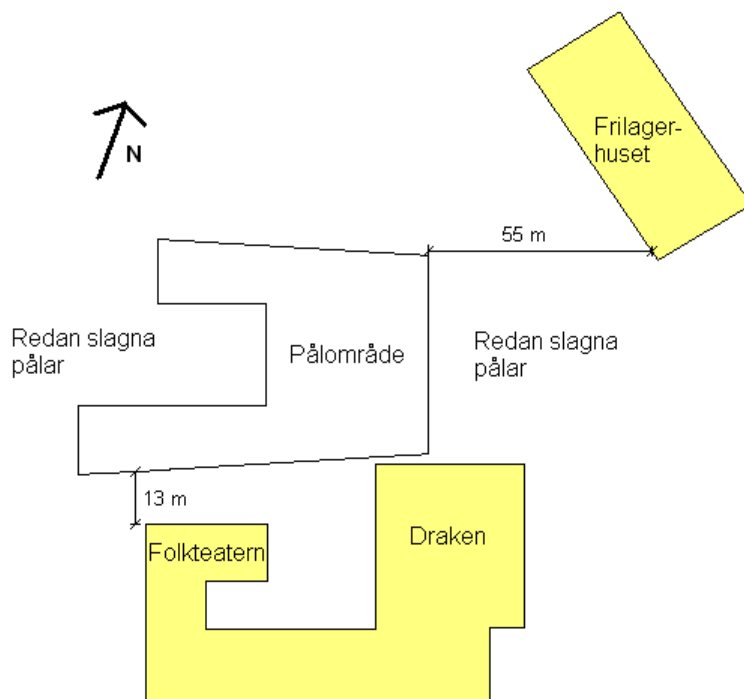
Resultatet av beräkningen, som finns i bilaga 2, är en hävning på 71 mm inom pålningsområdet. Djupet 48 m som beräkningen är utförd med är pållängden + knektningsdjupet. I Figur 4.7 redovisas hävningen på olika avstånd norr om pålningsområdet, med hävningen 57 mm precis i kanten av pålningsområdet (71 x hävningsfaktorn 0,8).



Figur 4.7 Beräknad hävning på olika avstånd norr om pålningsområdet

Entreprenad J2

Det område, etapp 3A, som beräkningsmodellen har utförts för ses i Figur 4.8 nedan.



Figur 4.8 Översikt över entreprenad J2 där beräkningsmodellen tillämpats

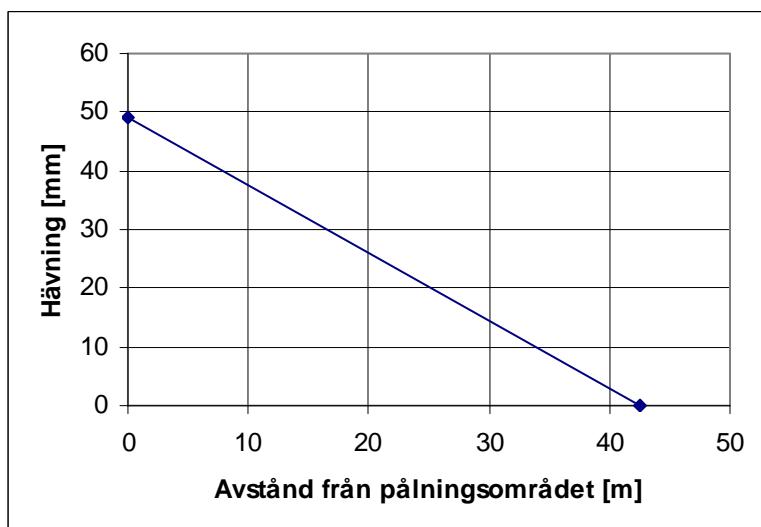
Då pålningsområdets area är något komplicerad har en förenkling gjorts för att möjliggöra beräkningen. I beräkningen antas arean vara en rektangel med sidorna 40 och 65 m.

Pålningssområdet befinner sig något lägre än omgivande markyta norr och söder om pålningssområdet, se Figur 3.28, dessutom antas byggnaden i söder påverka massundanträngningen. Detta gör att faktorerna α och β sätts till 0,3 resp. 0,2. Väster och öster om pålningssområdet finns områden som redan har pålats och avschaktats 5-6 m djupare än etapp 3A, vilket borde underlätta hävning i dessa riktningar, men i dessa områden har även mothållsplattor gjutits som kan motverka hävning. Detta medför att faktorerna γ och δ ansätts till 1,0. Övriga indata till beräkningsmodellen finns i Tabell 4.3 nedan.

Tabell 4.3 Indata till beräkningsmodellen för J2

Pålområdets bredd	40 m
Pålområdets längd	65 m
Knektningsdjup	7,5 m
Pållängd (medel)	35 m
Pålarnas sidmått	0,275 och 0,40 m
Antal pålar	326 st
Antal proppar	314 st
Propplängd	11 och 15 m
Proppdiameter	0,38 och 0,40 m

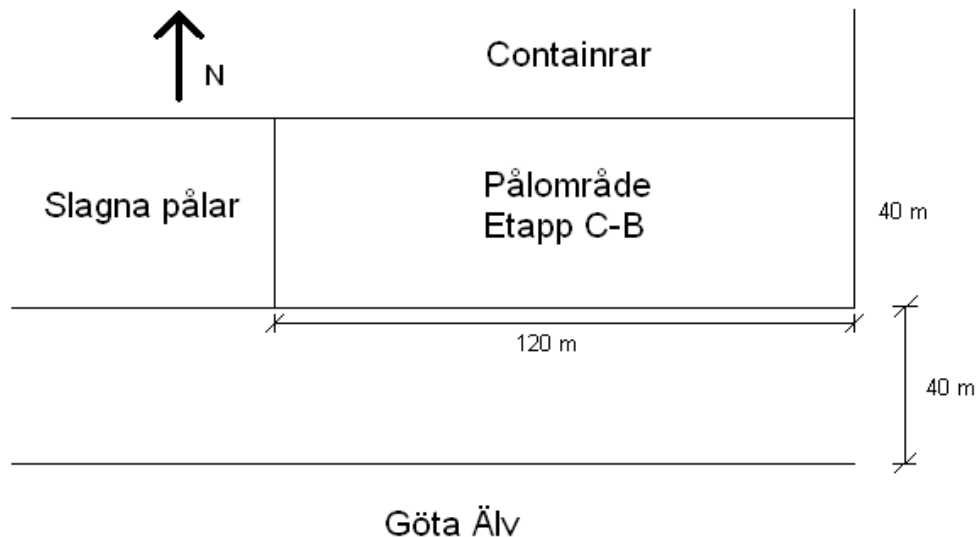
Resultatet av beräkningen, som finns i bilaga 3, är en hävning på 164 mm inom pålningssområdet. Djupet 42,5 m som beräkningen är utförd med är pållängden + knektningsdjupet. I Figur 4.9 redovisas hävningen på olika avstånd norr om pålningssområdet, med hävningen 49 mm precis i kanten av pålningssområdet (164 x hävningsfaktorn 0,3).



Figur 4.9 Beräknad hävning på olika avstånd norr om pålningssområdet

4.1.2 Skandiahamnen

I Figur 4.10 nedan visas geometrin för etapp C och B i Skandiahamnen.



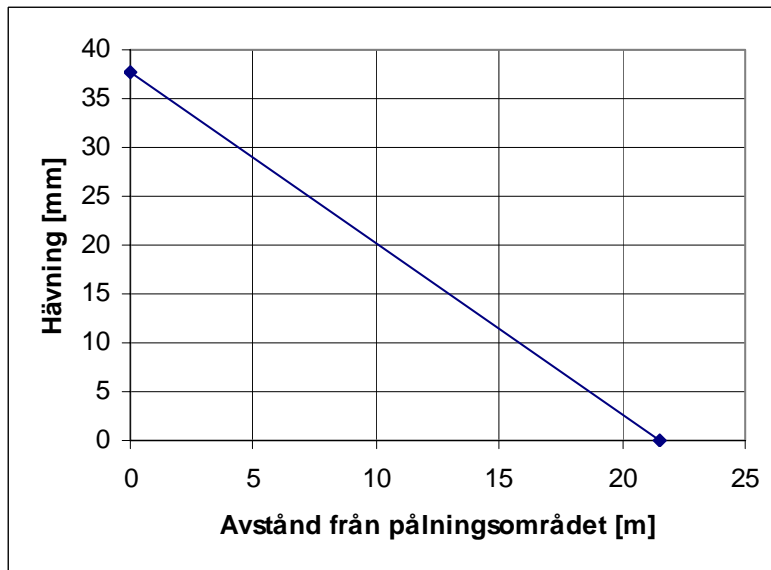
Figur 4.10 Översikt över Skandiahamnen där beräkningsmodellen tillämpats

Pålslagningen utförs i en 3 m djup schakt, detta innebär att det finns stora mothållande krafter runt hela pålningsområdet. Väster om etapp C-B finns dessutom område D som redan har pålats, detta gör att faktorn δ ansätts till 0. Även norr om etappen finns mothållande krafter i form av ett stort område fyllt med containrar, vilket tillsammans med slänten medför att faktorn α sätts till 0. Faktorerna β och γ sätts båda till 0,2 då de endast påverkas av slänten. Övriga indata till beräkningsmodellen finns i Tabell 4.4 nedan.

Tabell 4.4 Indata till beräkningsmodellen för Skandiahamnen

Pålområdets bredd	40 m
Pålområdets längd	120 m
Schaktdjup	3 m
Pållängd (medel)	18,5 m
Pålarnas sidmått	0,27
Antal pålar	485 st
Antal proppar	-
Propplängd	-
Proppdiameter	-

Beräkningen, som kan ses i bilaga 4, gav en resulterande hävning på 126 mm i pålningsområdet. Djupet 21,5 m som beräkningen är utförd med är pållängden + schaktdjupet. I Figur 4.11 redovisas hävningen på olika avstånd söder om pålningsområdet, med hävningen 38 mm precis i kanten av pålningsområdet (126 x hävningsfaktorn 0,2).



Figur 4.11 Beräknad hävning på olika avstånd söder om pålningsområdet

4.2 FE-beräkningar (PLAXIS)

Finita Element Metoden är en metod för att erhålla numeriska lösningar på differential-ekvationer inom ingenjörsarbete. Den grundläggande FE-tekniken delar upp strukturer i finita element, definierar elementegenskaper (materialdata), bestämmer randvillkor, anger laster och förskjutningar samt eventuellt tidssteg (Samuelsson, Wiberg 1998).

PLAXIS är ett finit element-program speciellt anpassat för geotekniska problem. I detta arbete används PLAXIS version 8. Nedan följer beskrivning av PLAXIS olika beräkningssteg.

Input

Här definieras geometrin och vilka krafter/laster som verkar på denna. Materialtyp anges för valda jordlager och dess parametrar väljs. Vidare anges randvillkor och modellen delas in i ett rutnät (mesh). Rutnätet består av trianglar med antingen sex eller femton nodpunkter. Nätet kan förfinas lokalt om så önskas. Slutligen anges grundvattenförhållanden och förhållandet mellan vertikala och horisontella spänningar (K_0).

Calculation

I beräkningsenheten utförs finita element-beräkningen. Det finns olika typer av beräkningar: elastoplastisk (deformationsanalys), konsolidering (tidsberoende) och ϕ/c -reduktion (genererar en beräknad säkerhetsfaktor).

Beräkningarna kan delas in i olika faser. I faserna aktiveras/avaktiveras aktuella laster och jordlager. Dessutom kan olika tidsintervall anges för att fördröja förloppet och efterlikna verkligheten så mycket som möjligt. Vidare finns möjlighet att studera valda utdata-parametrar utförligare så att beteendet kan detaljstuderas.

Output

Här visas resultaten från de olika beräkningsfaserna. Töjningar, spänningar, krafter och deformationer kan granskas.

Curves

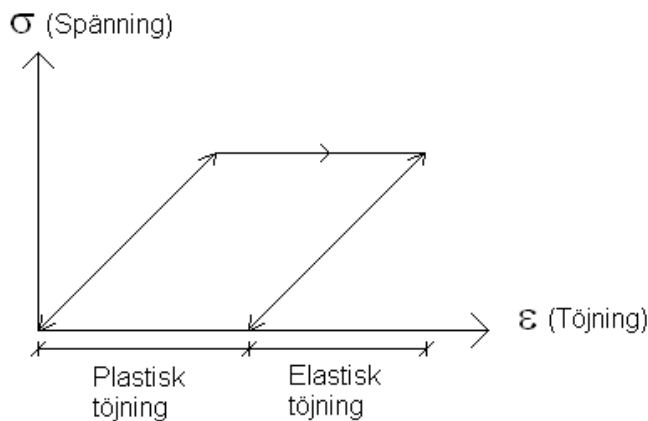
Här kan resultaten i de enskilda punkter som anges i beräkningsmodulen studeras i olika diagram, t.ex. rörelse-tid.

4.2.1 Simulering

I ett försök att visa rörelserna vid påslagning har simuleringar utförts för både en enskild påle (axisymmetrisk modell) och en hel pålrad ("plane strain"-modell). Den axisymmetriska modellen är tredimensionell och "plane strain" är tvådimensionell med den tredje dimensionen oändligt lång.

Två olika metoder har använts för att efterlikna lerans undanträngning vid påslagning, "prescribed displacement" och volymexpansion. Med "prescribed displacement" menas en pålagd förskjutning som förflyttar lervolymen åt ett bestämt håll, volymexpansion innebär att ett valt segment av leran expanderar en bestämd procentandel.

Simuleringen har utförts under antagande att Mohr Coulombs jordmodell gäller, se Figur 4.12. Enligt denna modell beter sig leran elastiskt, med återgående deformationer, fram tills det elastiska spänningsintervallet har överskridits och den plastiska fasen inleds med kvarstående deformationer. Vid avlastning kommer en del deformationer gå tillbaka motsvarande storleken på den elastiska töjningen.



Figur 4.12 Mohr Coulombs idealelastoplastiska modell med kvarstående och återgående töjningar

I simuleringarna nedan har pålar antagits ha sidmättet 0,270 m (för att efterlikna de flesta pålar som studerats i fält), pållängden har ansatts till 22 m och avståndet mellan pålarna i en pålrad antas vara 2,5 m.

Geometrin är en lervolym med höjden 30 m och varierande längd (50-200 m). Alla beräkningar sker med odränerat förlopp. Lerans egenskaper visas i Tabell 4.5 nedan.

γ anger lerans tunghet och har satts till 16 kN/m³. Elasticitetsmodulen (E) och tvärkontraktionstalet (ν) är parametrar som beskriver lerans elastiska beteende. Då beräkningarna utförs odränerat och vattnet är inkompressibelt är $\nu = 0,5$ önskvärt. Detta ger dock numeriska problem så istället har $\nu = 0,495$ använts.

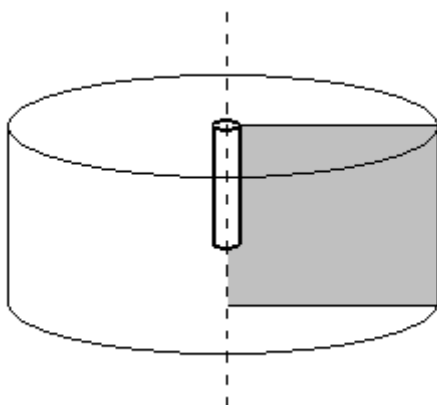
Skjuvhållfastheten (c_{ref} , $c_{increment}$) och friktionsvinkeln (φ) används för att bestämma vid vilken spänning som plasticering sker. Dilatationsvinkeln (ψ) beskriver lerans plastiska beteende. Skjuvhållfastheten har ansatts till 20 kN/m² vid markytan och ökar med 1 kN/m² per meter. Friktionsvinkeln och dilatationsvinkeln har båda satts till 0°.

Tabell 4.5 Lerans egenskaper

Valda parametrar	
γ_{unsat}	16 kN/m ³
γ_{sat}	16 kN/m ³
E_{ref}	10000 kN/m ²
c_{ref}	20 kN/m ²
$c_{increment}$	1 kN/m ² /m
φ	0 °
ψ	0 °

Simulering av en enskild påle

För att simulera en påle har en axisymmetrisk modell använts. I denna modell trycks leran utåt 360° runt hela pålen, se Figur 4.13. Både ”prescribed displacement” och volymexpansion har simulerats. Jordvolymens radie är satt till 100 m och den simulerade lervolymens diameter blir således 200m.



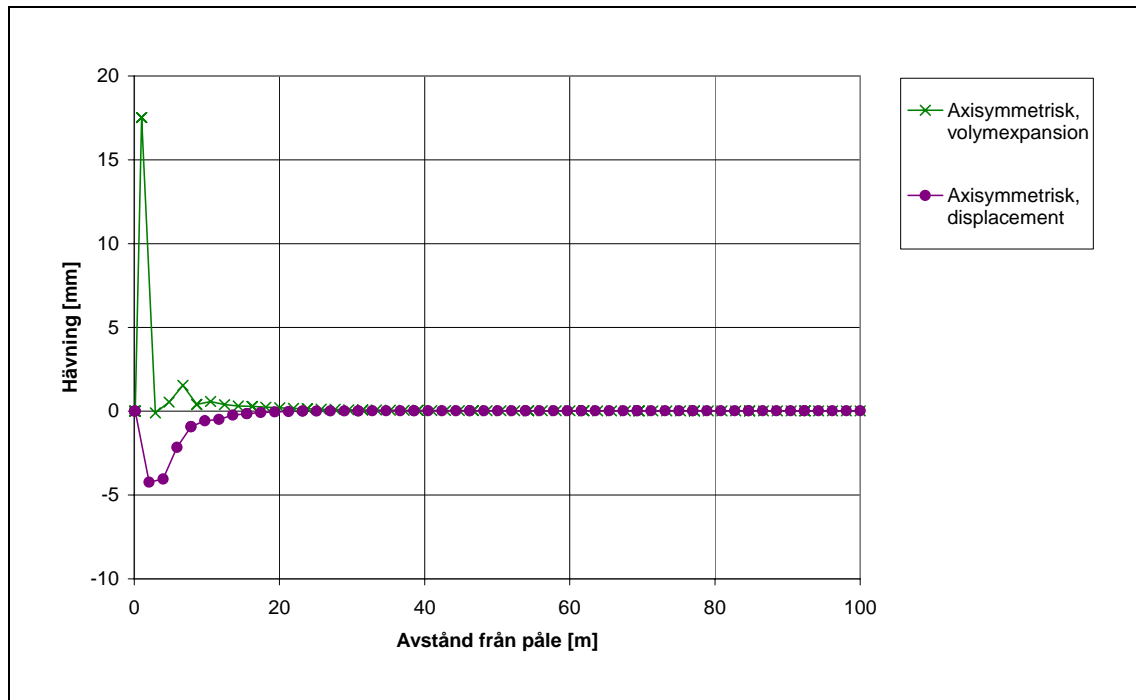
Figur 4.13 Axisymmetrisk modell

I den första simuleringen är storleken på ”prescribed displacement” 0,135 m, vilket motsvarar pålens halva sidmått. I andra simuleringen antas volymexpansion på 2,3 %, som beräknats med en cylinder, radie 1 m, utvidgad med en påle, sidan 0,27 m:

$$Expansionen = \frac{0,27^2 + \pi \cdot 1^2}{\pi \cdot 1^2} = 1,023 \quad (4.2)$$

Hävningen på markytan blir i båda fallen orimliga. Vid användning av ”prescribed displacement” sker nästan ingen förskjutning av leran alls, och vid volymexpansion trycks all volym upp precis ovanför den simulerade pålen. Detta indikerar att PLAXIS inte förmår simulera undanträngningsförloppet vid pålslagning korrekt med axisymmetrisk modell.

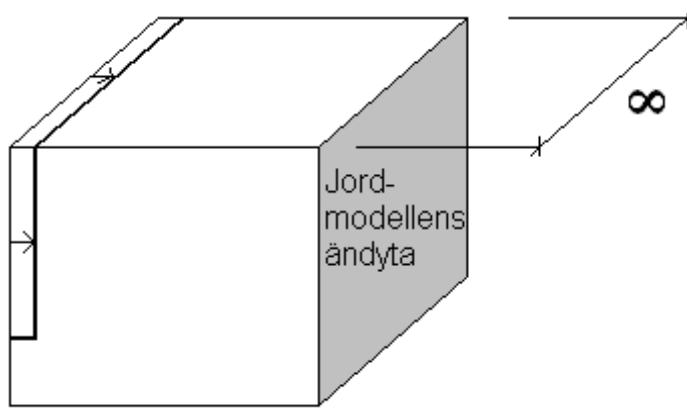
Resultaten av hävningen vid markytan redovisas i Figur 4.14. Som framgår är de beräknade rörelserna mycket osannolika, en sättning bör rimligen inte uppstå vid undantryckning av massor. Den mycket lokala och kraftiga hävningen som erhålles vid volymexpansionen stämmer inte heller med praktisk erfarenhet.



Figur 4.14 Resultande hävning av två axisymmetriska modeller

Simulering av pålrad

Modellen som valts för att simulera en pålrad benämns ”plane strain”. En ”prescribed displacement” trycker lervolymen åt höger och eftersom modellen är tvådimensionell med den tredje dimensionen oändligt lång så kan detta närmast antas motsvara en pålrad, se Figur 4.15

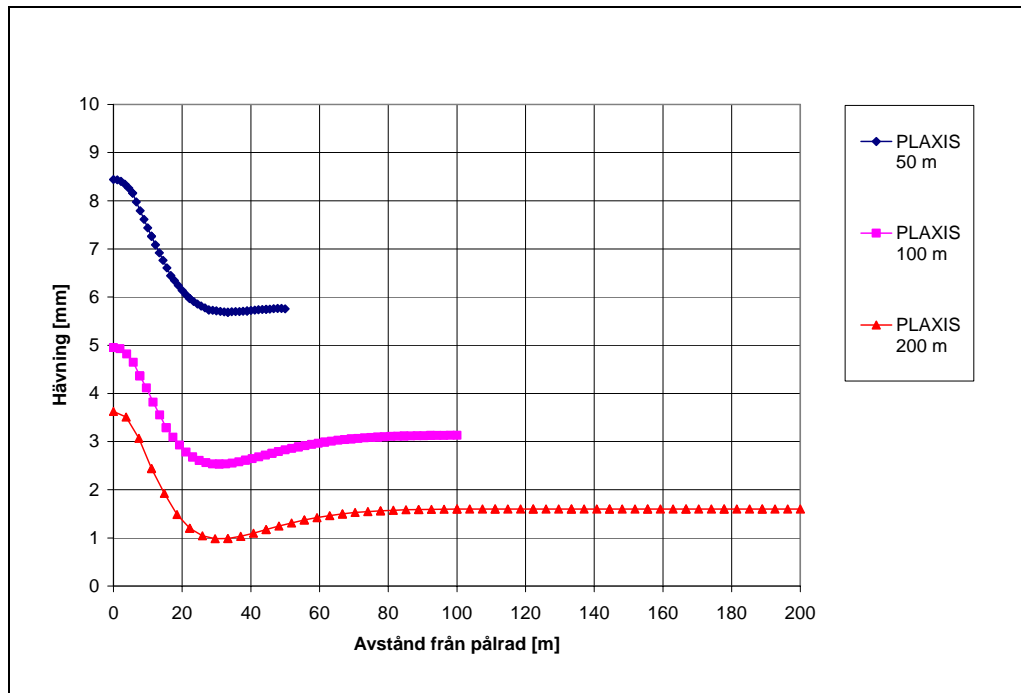


Figur 4.15 ”Plane strain”-modellen

Storleken på ”prescribed displacement” är 0,015 m och framtagen utifrån pålavståndet (c/c) 2,5 m och pålarnas sidmått (B) 270 mm, se ekvation (4.3). Jordvolymen påverkas ned till 22 m djup, d.v.s. motsvarande pållängden.

$$x = \frac{B/2 \cdot B}{c/c} = \frac{0,135 \cdot 0,270}{2,5} = 0,015 \quad (4.3)$$

Simuleringen har utförts för tre olika längder på jordvolymen, 50, 100 och 200 m. Den resulterande hävningen på markytan för de tre fallen redovisas i Figur 4.16. Genom att endast ändra längden på modellen ändras hävningens storlek, vilket är orimligt. Det förefaller dock som den beräknade totala hävningsvolymen är riktig i samtliga fall. Dessa har beräknats för de tre fallen och redovisas ihop med pålvolymen i Tabell 4.6.



Figur 4.16 Resultande hävning av tre "plane strain"-modeller

Tabell 4.6 Jämförelse av volymer

Volym	[m ³ / m]
Pålarna	0,33
Jordvolym, längd 50 m	0,32
Jordvolym, längd 100 m	0,31
Jordvolym, längd 200 m	0,32

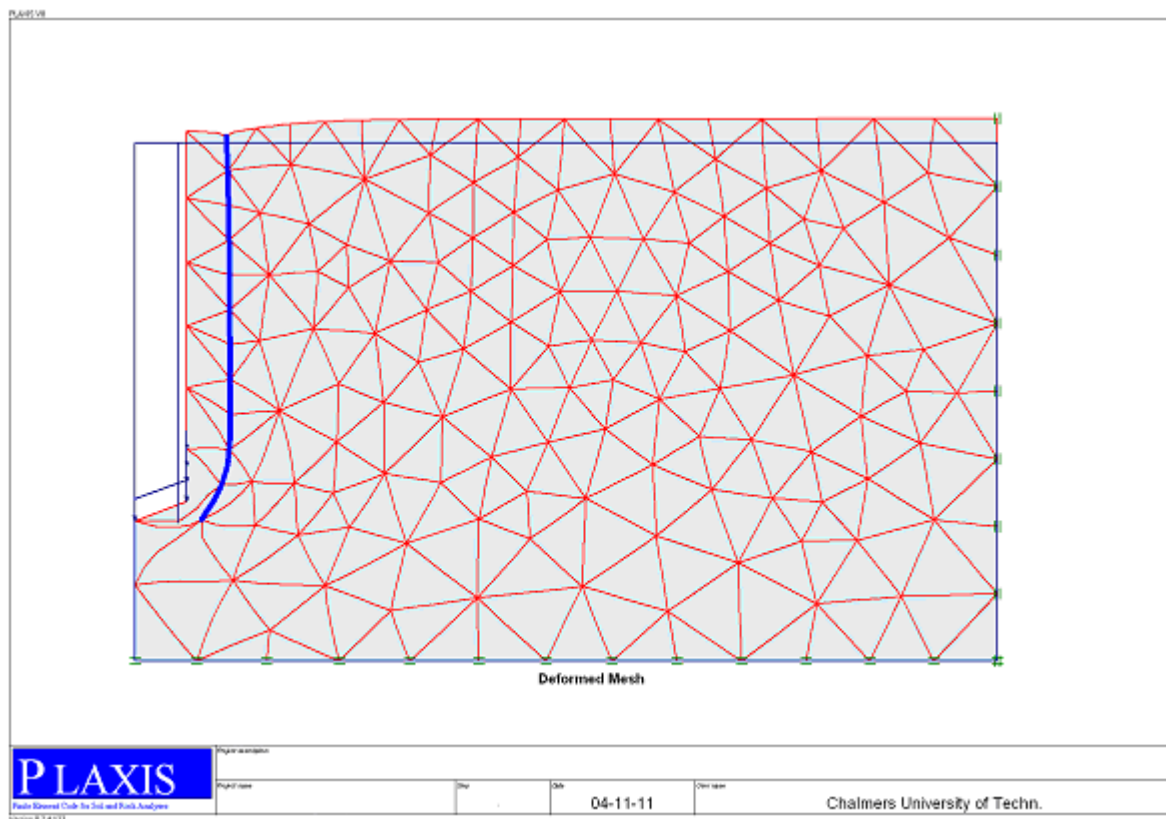
I alla tre simuleringarna blir volymerna ungefär lika med pålvolymen, vilket innebär att PLAXIS fördelar den undanträngda volymen över hela geometrin oavsett förhållandet pållängd/jordvolymens längd. Det är inte särskilt troligt att slagningen av en pålrad påverkar lervolymen oändligt långt bort och de beräknade hävningarna är således inte trovärdiga. Däremot visar alla tre fallen i Figur 4.16 en "knyck" ungefär vid 22 m meter från pålraden, vilket är den angivna pållängden. Enligt kapitel 2.1 påverkar pålningen ett område motsvarande ungefär en pållängd från pålningsområdet, vilket detta resultat till viss del bekräftar.

Simulering av en pålrad med inverkan av redan slagna intilliggande pålrader

Ytterligare simuleringar har utförts för att undersöka hur redan slagna pålrader påverkar lerans undanträngning och hur redan slagna pålrader förflyttas när en intilliggande pålrad slås. Detta har tillämpats för en redan slagen pålrad samt fyra redan slagna pålrader med centrumavstånd 2,5 m. Jordvolymens längd är 50 m. Som vid tidigare simuleringar av en pålrad har "plane strain"-modell och "prescribed displacement" använts med samma indata som innan förutom tillägget av extra pålrad/pålrader. Pålraders böjstyvhet har ansatts till ca $6 \text{ kNm}^2/\text{m}$.

En pålrad

Figur 4.17 redovisar lerans och den redan slagna pålradens förflyttning. Resultatet tyder på att den redan slagna pålraden förhindrar hävningen lokalt, vilket visas genom en minskande hävning fram till den redan slagna pålraden som sedan ökar fram till randvillkoret. I den redan slagna pålraden syns en tydlig påverkan, pålraden är böjd och förskjuten utåt och uppåt. Maximal horisontell rörelse som uppstår i pålraden är 15 mm. Pålradens böjmoment redovisas i Figur 4.18, störst moment, 16,3 kNm, uppkommer där pålraden är som mest böjd.



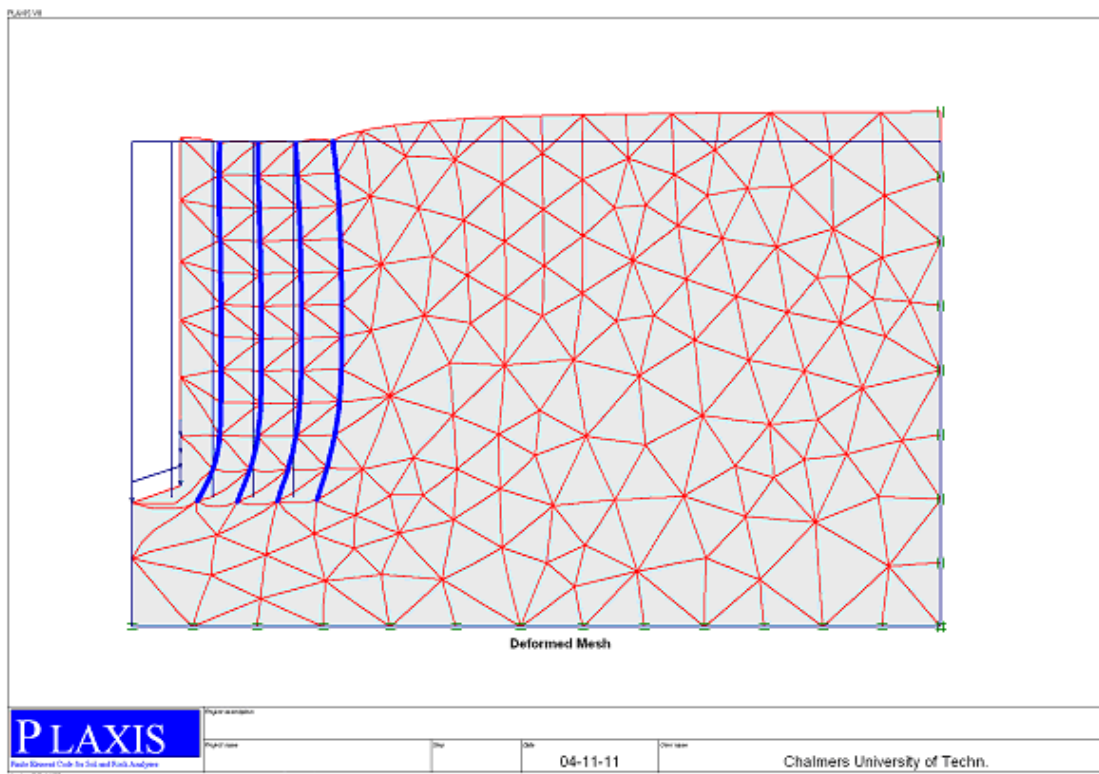
Figur 4.17 Resultat av simulering med en redan slagen pålrad, maximal pålrörelse 15 mm rörelserna uppförstorade 200 gånger



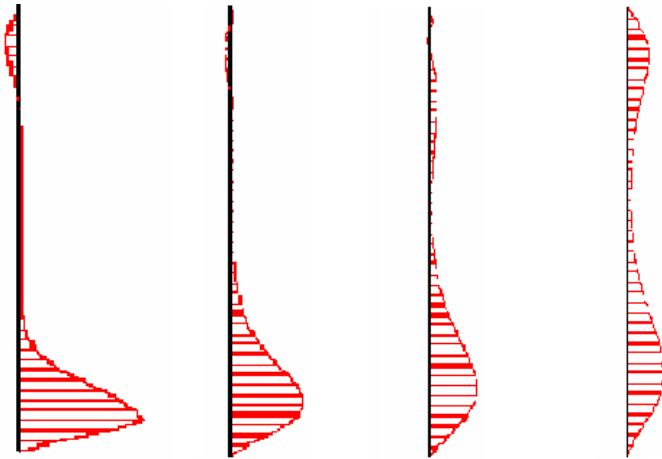
Figur 4.18 Momentdiagram för redan slagen pålrad
maximalt böjmoment 16,3 kNm

Flera pålrader

I Figur 4.19 redovisas lerans och de redan slagna pålradernas förflyttning. De redan slagna pålraderna hindrar att leran hävs lokalt och därmed fås också en ökande hävning från pålraden längst bort ut till randen. De redan slagna pålraderna förflyttas utåt och böjs, vilket innebär att de samtidigt dras något nedåt. Maximal horisontell rörelse som uppstår i samtliga pålrader är 15 mm, d.v.s. samma som den föreskrivna horisontaldeformationen. De olika pålraderna påverkas olika p.g.a. inverkan av varandra, se momentdiagrammen för pålraderna i Figur 4.20. Störst moment uppkommer i pålraden närmast den sist slagna pålraden, momentens storlek är ungefär 15; 7; 5 respektive 4 kNm.



Figur 4.19 Resultat av simulering med fyra redan slagna pålrader
maximal pålrörelse 15 mm för samtliga pålrader, rörelserna uppförstorade 200 gånger



Figur 4.20 Momentdiagram för de fyra redan slagna pålraderna i samma ordning som figuren ovan maximala böjmoment är 15; 7; 5 respektive 4 kNm

De maximala böjmomenten som uppstår i de redan slagna pålarna är väsentligt mindre än momentkapaciteten för en standardpåle, vilken är ca 55-100 kNm beroende på skarvar och axialkraft. I verkligheten utsätts pålar för större belastningar, då oftast mer än en pålrad slås.

Parameterstudie

För att se hur olika parametrar, vilka används för att beskriva leran, påverkar resultatet har en parameterstudie utförts. Olika fall har testats i modellen ”plane strain” med ”prescribed displacement” i samtliga fall utan inverkan av redan slagna pålar:

1. Lägre elasticitetsmodul, $E_{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$
2. Högre hållfasthet, $c_{ref} = 200 \text{ kN/m}^2$
3. Friktionsvinkel och minskad hållfasthet, $\varphi = 30^\circ$ och $c_{ref} = 5 \text{ kN/m}^2$
4. Dilatationsvinkel, friktionsvinkel och minskad hållfasthet, $\psi = 30^\circ$, $\varphi = 30^\circ$ och $c_{ref} = 5 \text{ kN/m}^2$

Beräkningarna med dessa parametrar ger samma resultat som de tidigare redovisade (enligt Tabell 4.5). Detta kan förklaras av ;

1. Förändringen av elasticitetsmodulen ger ingen skillnad i resultat p.g.a. att vattnets tryckmodul, K_w , dominerar i det odränerade fallet.
2. Den högre hållfastheten ger ingen förändring därför att redan i ursprungssimuleringen är deformationerna små och ingen plasticitet uppnås.
3. Den minskade hållfastheten ger ingen förändring av resultat p.g.a. de små deformationerna.
4. Ändring av dilatationsvinkeln ger inte heller någon skillnad i resultat då leran inte plasticeras.

Även dränerade simuleringar har utförts för att se hur förändring av tvärkontraktionstalet påverkar resultaten. Det visade sig att en sänkning av v från 0,495 till 0,2 inte påverkade hävningsmönstret utan bara storleken på hävningen. Den dränerade modellen och sänkningen av tvärkontraktionstalet tillåter vatten att avgå från leran och därigenom minskas den simulerade lervolymen.

5 JÄMFÖRELSER

Jämförelser har utförts mellan i fält uppmätta rörelser och beräknade rörelser. Detta har gjorts genom att resultat från mätpunkter vid de olika entreprenaderna har jämförts med deformationer erhållna från beräkningsmodell enligt Rehnman för de aktuella avstånden. Vertikalrörelser analyseras för samtliga fyra områden, horisontalrörelser dock bara för L3 och Skandiahammen, jämför Tabell 3.1.

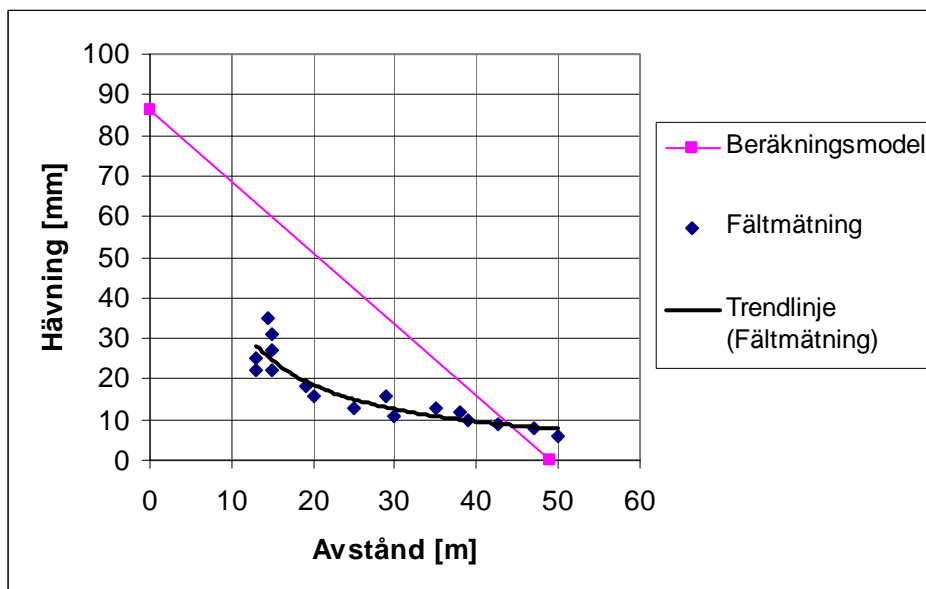
Till följd av svårigheterna att erhålla rimliga värden med PLAXIS har resultaten inte jämförts med fältstudierna, utan bara med resultat från beräkningsmodell enligt Rehnman. Vidare har endast vertikala rörelser behandlats i detta fall.

5.1 Fältstudier jämfört med beräkningsmodell enligt Rehnman

5.1.1 Götatunneln

L3

Resultat från mätningar och beräkningar avseende vertikalrörelser inom entreprenad L3 redovisas i Figur 5.1. Beräkningsmodellen ger betydligt större hävning, fast den avklingar fortare och har helt avstannat 48,9 m från pålningsområdet (medelpållängd + knektdjup) enligt modellens uppbyggnad och tolkning. Ett skäl till att fältmätningarna i jämförelsen visar lägre värden nära pålningsområdet kan vara att pålningen utförts inom schakt och att samtliga mätpunkter ligger utanför själva schakten. Enligt kap. 2.4 ska då hävningen inom schakten bli större och därmed hävningen utanför mindre.



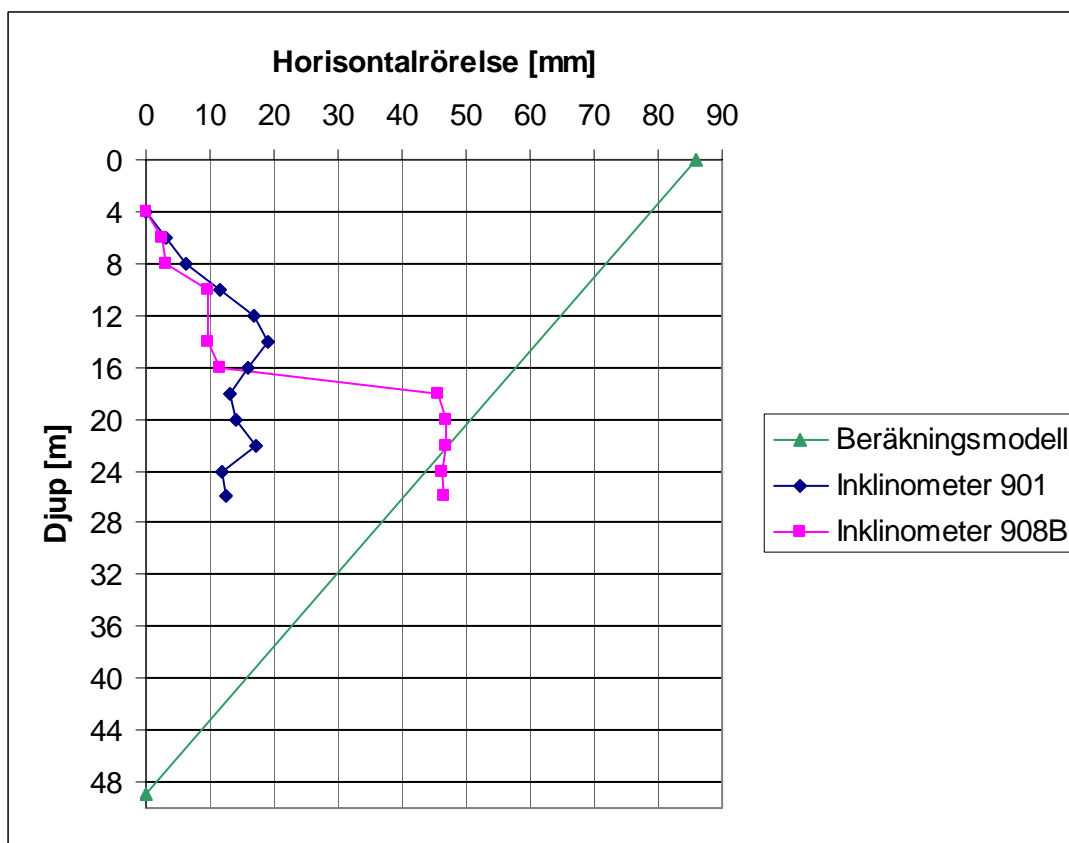
Figur 5.1 Sammanställning av vertikalrörelser för L3

Resultat från mätningar och beräkningar beträffande rörelser i horisontalled för entreprenad L3 redovisas i Figur 5.2. Inklinometrarna sitter precis intill pålningsområdet. Rörelserna mätt med inklinometer 901 och 908B är modifierade i enlighet med kap 3.2.1 Götatunneln-L3-Resultat horisontalrörelser. Det bör även beaktas att horisontalrörelserna började mätas i februari, d.v.s. mitt under pågående pålning. Pålningens arbetet startades redan i november och därmed har en stor del av rörelsen missats.

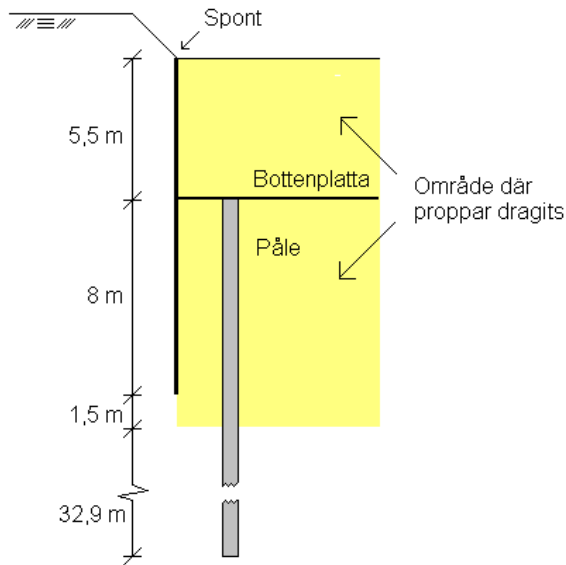
Enligt beräkningsmodellen ska rörelsen avklinga med djupet, men fältstudierna visar inte detta utan en nära nog konstant rörelse har uppmätts under 18 m djup. Mätningarna är emellertid ofullständiga i syftet att visa rörelser p.g.a. pålning eftersom inklinometrarna installerades för att mäta spontens rörelse, ner till 26 m djup.

Diagrammet i Figur 5.2 visar horisontalrörelserna i inklinometrarna 901 och 908B jämfört med beräkningsmodellen. Rörelser på grundare djup än 18 m analyseras inte p.g.a. att lerproppar tagits och att sponten delvis hindrar horisontalrörelser genom att ”smeta ut” dem jämnt ned till detta djup, jämför Figur 3.15, Figur 3.16 samt Figur 5.3.

En anledning till att rörelserna i inklinometer 901 är små i jämförelse med 908B och beräkningsmodellen kan vara att en del av pålarna närmast 901 redan var slagna när mätningarna påbörjades.



Figur 5.2 Sammanställning av horisontalrörelser för L3

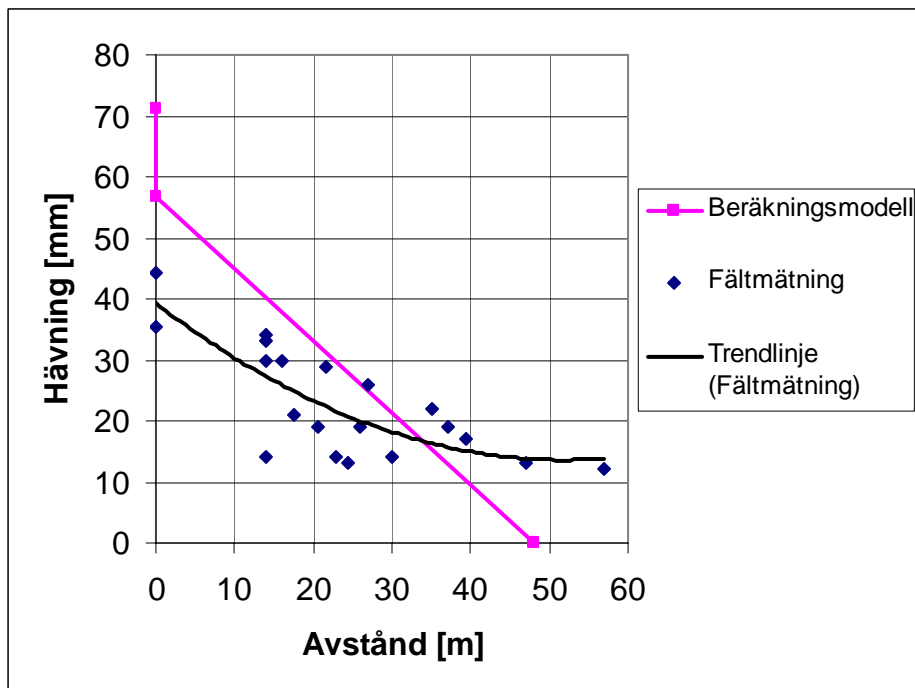


Figur 5.3 Schematisk skiss över påle, spontlängd och proppdragningsdjup

L2

Resultat från mätningar och beräkningar i vertikalled för entreprenad L2 redovisas i Figur 5.4. Fältmätningarna visar en mindre hävning nära pålningsområdet och klingar inte av lika fort som beräkningsmodellen, utan hävning kan avläsas även bortom ett avstånd motsvarande pållängden och schaktdjupet (48 m).

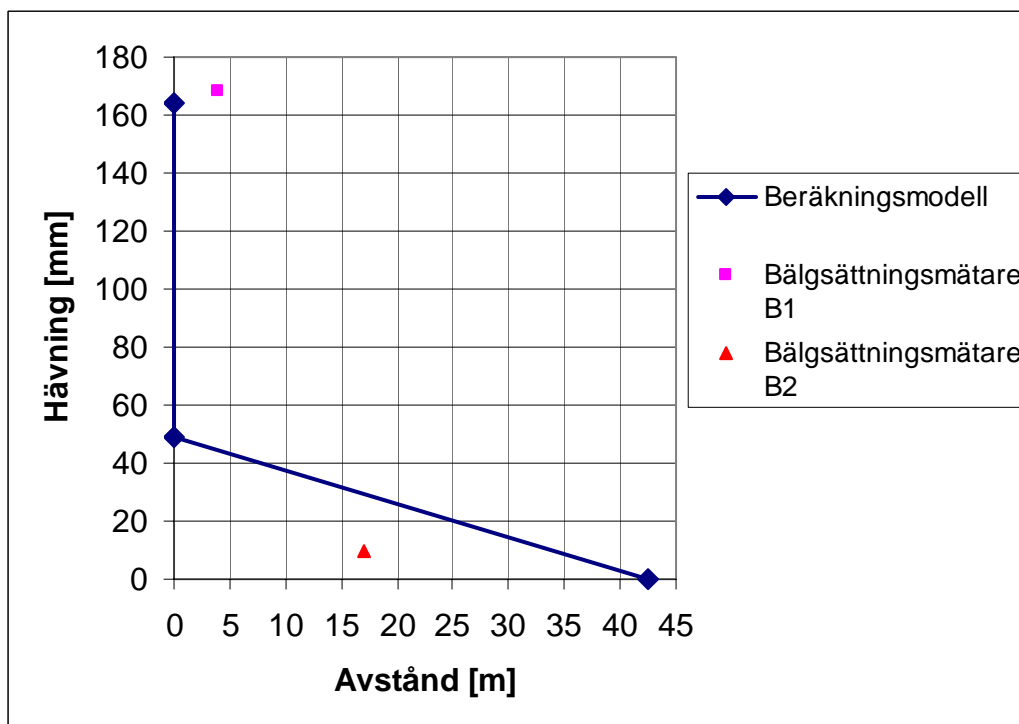
I området installerades pålar och slitsmurar vid ungefär samma tidpunkt, men eftersom den norra längsgående slitsmuren installerades två månader före pålningen antas hävningsresultaten endast bero av pålningsarbetet.



Figur 5.4 Sammanställning av vertikala rörelser för L2

J2

I Figur 5.5 redovisas en jämförelse mellan de beräknade hävningarna och resultaten från bälgsättningsmätare B1 och B2 (dessa resultat har extrapolerats upp till markytan). Resultatet från bälgsättningsmätare B2 är lägre än beräkningsmodellen troligtvis beroende på att mätpunkten ligger precis intill en slänt. Den lägre stabiliteten i slänten har orsakat en sättning som till viss del har kompenserat hävningen. Resultatet från bälgsättningsmätare B1, som finns endast 4 m från pålningsområdet, visar en betydligt större hävning som bättre stämmer överens med den hävning som uppkommer inom pålningsområdet enligt beräkningsmodellen (164 mm).

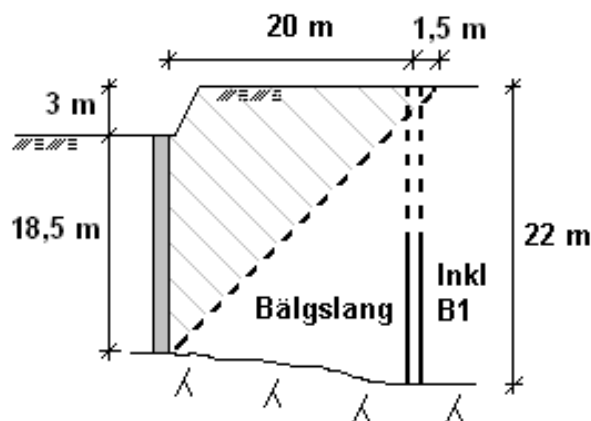


Figur 5.5 Sammanställning av beräknade och uppmätta vertikalförändringar inom J2

5.1.2 Skandiahamnen

Beräkningsmodellen ger rörelser inom ett avstånd motsvarande en pållängd från pålningsområdet medan däremot inklinometern sitter bortanför en pållängd. Därmed är de mycket små rörelserna inte orimliga, se Figur 3.42. Figur 5.6 visar en sektionsskiss med rörelseutbredningen enligt beräkningsmodellen i förhållande till inklinometerns placering.

Bälgslangsmätningen går inte att jämföra med beräkningsmodellen då mätningarna börjar på 12 m djup och hävningen med beräkningsmodellen är beräknad på markytan. Dock kan nämnas att bälgslangen ger mycket liten hävning, se Figur 3.41, vilket är troligt eftersom leran på det här avståndet inte påverkas enligt beräkningsmodellen, se Figur 5.6.

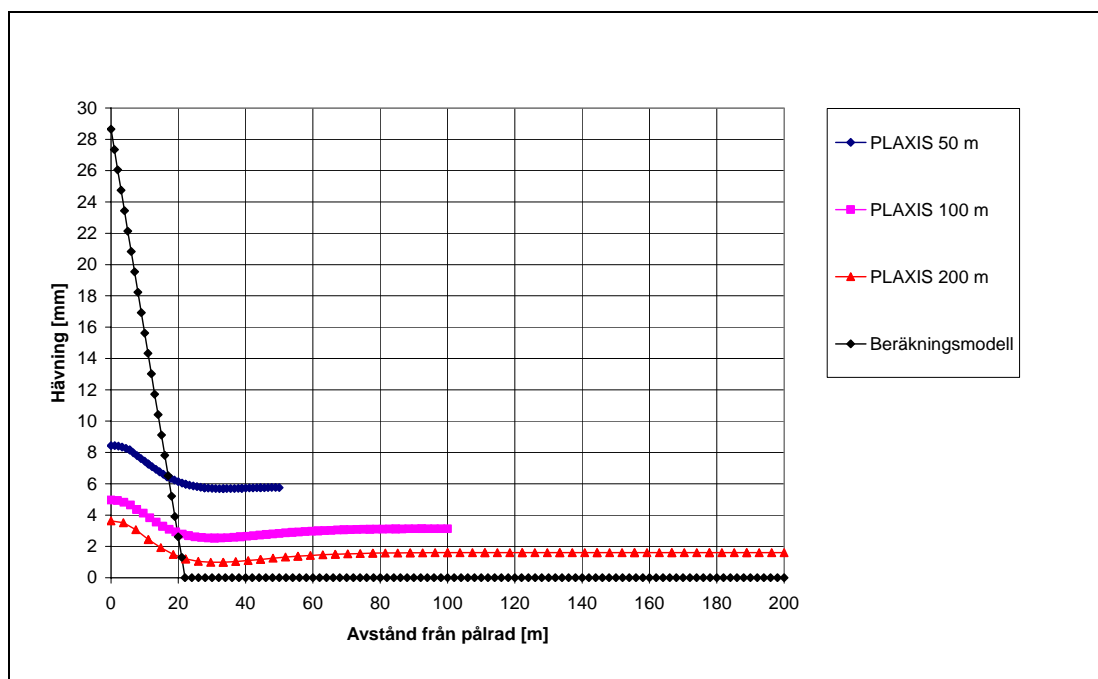


Figur 5.6 Enligt Rehnmans beräkningsmodell ska det inte finnas rörelser orsakade av pålningen utanför det streckade området, något som visade sig stämma med fältmätningarna

5.2 PLAXIS jämfört med beräkningsmodell enligt Rehnman

För att kunna jämföra resultat från PLAXIS-simuleringen av en pålrad med resultat från beräkningsmodell enligt Rehnman har identiska indata valts avseende pållängd, pålvolymer och geometri se bilaga 5. Figur 5.7 visar resultaten från PLAXIS (med olika längd på jordvolymer) och resultat från beräkningsmodellen. Beräkningarna enligt Rehnman visar en rörelse som successivt klingar av och helt avstannat en pållängd från pålraden. PLAXIS däremot visar en hävning som inte klingar av lika snabbt utan visar en hävning ”oändligt långt bort” från pålraden.

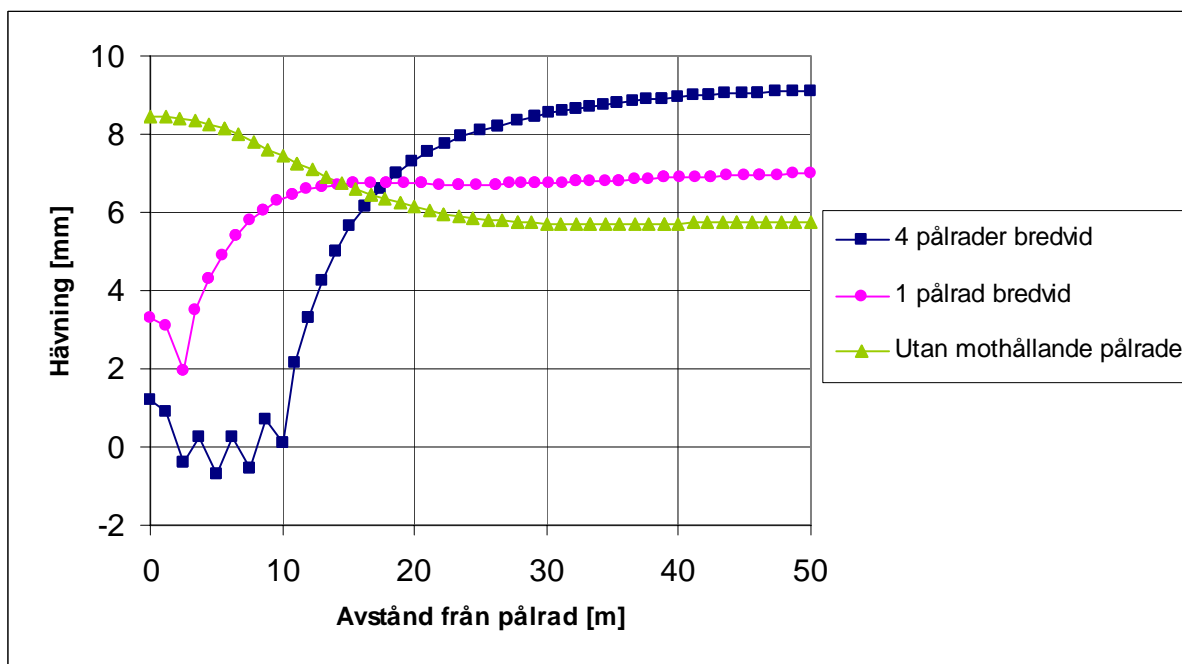
I PLAXIS orsakar all den undanträngda leran hävning över hela beräkningsvolymen. Areorna under samtliga fyra kurvor i Figur 5.7 är lika stora och motsvarar den aktuella pålvolymer. Storleken på hävningen närmast pållningsområdet kan dock inte jämföras eftersom den via PLAXIS erhållna hävningen enligt tidigare är helt beroende av hur lång modellen görs.



Figur 5.7 Jämförelse mellan hävning från PLAXIS och beräkningsmodell enligt Rehnman

5.3 Inverkan av redan slagna pålrader i PLAXIS

Redan slagna pålrader har stor inverkan på den hävning som beräknas med PLAXIS. Figur 5.8 visar jämförelsen mellan med och utan redan slagna pålrader i PLAXIS. Diagrammet visar att där pålraderna är slagna (2,5; 5; 7,5; 10 m) fås en kraftig reducering av hävningen. I fallet med fyra redan slagna pålrader fås t.o.m. en mycket liten sättning där pålraderna är slagna. Rörelserna blir helt annorlunda jämfört med beräkningen utan mothållande pålrader eftersom hävningen ökar från den yttersta pålraden ut till randen. Den ökande hävningen tyder på att resultatet inte är troligt.



Figur 5.8 Jämförelse mellan hävning från PLAXIS med och utan redan slagna pålrader pålraderna befinner sig på avstånden 2,5; 5; 7,5 och 10 m

6 ANALYS AV BERÄKNINGSMODELL ENLIGT REHNMAN

Beräkningsmodellen enligt Rehnman har visat bristande överrensstämmelse med fältstudierna och därför har försök gjorts att belysa bristerna, tolka resultatet annorlunda och modifiera beräkningarna. Nedan diskuteras detta.

6.1 Inverkan av pållängd

Hävningen som fås inom pålningsområdet är i beräkningsmodellen enligt Rehnman beroende av pållängden, ju längre pålar desto mindre hävning inom pålningsområdet trots att en större pålvolum trängs ned i marken. I Tabell 6.1 visas en jämförelse av hävning vid olika pållängder. Jämförelsen belyser en av beräkningsmodellens brister.

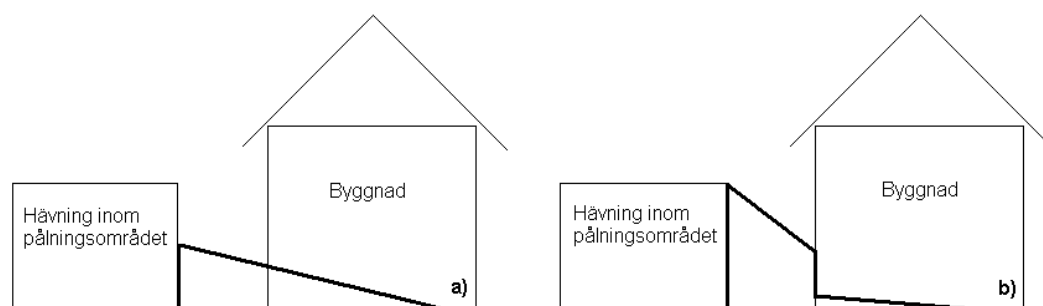
Tabell 6.1 Jämförelse av hävning vid olika pållängder

Pållängd [m]	Hävning inom pålningsområdet [mm]
13	73
26	57
39	46

6.2 Tolkning av hävning utanför pålningsområde

När någon ”mothållande kraft”, t ex en tung byggnad, befinner sig närmre än en pållängd från pålningsområdet tar beräkningsmodellen hänsyn till detta genom faktorerna α , β , γ och δ , se Figur 4.1. Dessa bestämmer således direkt hur stor del av hävningen som uppkommer på respektive sida då de ansätts till ett värde mellan 0 och 1. När dessa värden sedan multipliceras med storleken på hävningen inom pålningsområdet fås hävningar enligt Figur 6.1a. Mellan hävningen inom och utanför pålningsområdet erhålles ett glapp om faktorn sätts till ett värde mindre än 1. Ytterligare en svaghet med tolkningen är att hävningen inte minskar eller avstannar under byggnaden, se Figur 6.1a.

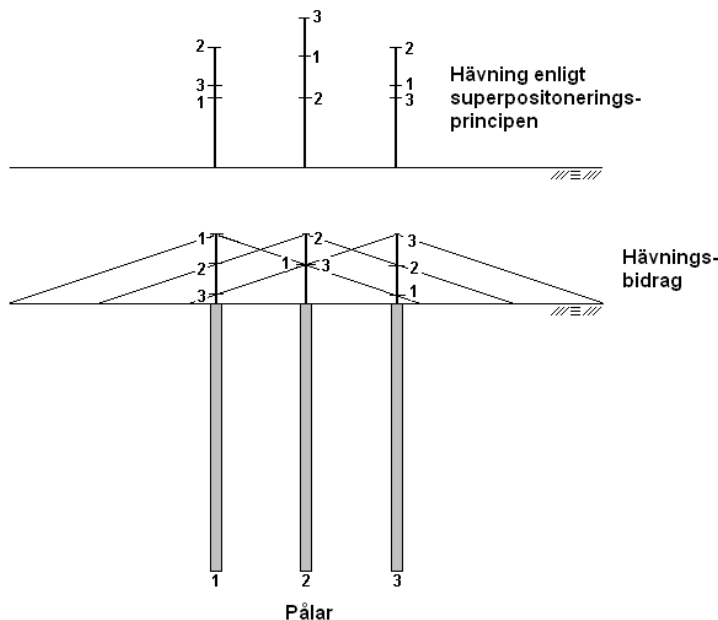
Utseendet enligt Figur 6.1a stämmer antagligen inte överens med verkligheten, utan Figur 6.1b visar ett mer troligt utseende. Här utgår hävningen utanför pålningsområdet från samma storlek som hävningen inom pålningsområdet och sjunker drastiskt i kanten av byggnaden, men en liten del av hävningen uppstår fortfarande under byggnaden. Det är fortfarande samma mängd lera som hävs, men hävningen nära pålningsområdet blir större och därmed erhålles ett glapp vid kanten av byggnaden istället för vid kanten av pålningsområdet.



Figur 6.1 a) Hävning som sker utanför pålningsområdet enligt beräkningsmodellen
b) Mer trolig tolkning av hävningen

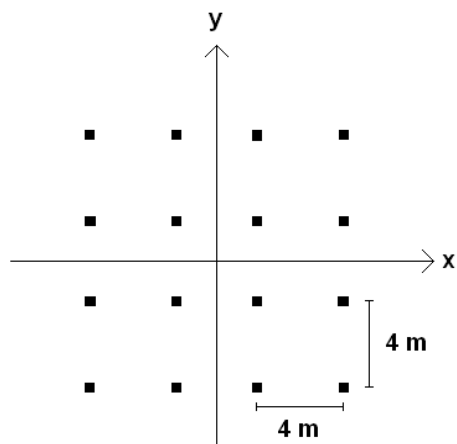
6.3 Hävning av enskilda pålar enligt superpositionsprincipen

Ett försök har utförts för att få fram ett mer realistiskt utseende på hävningskurvan än den kantiga form som fås genom beräkningsmodellen enligt Rehnman, se Figur 4.1. Hävningen kan beräknas för en enda påle och då sprids hävningen ut en pållängd från pålen enligt formen av en triangel i ett snitt. Sedan kan olika pålars bidrag till hävningen adderas enligt superpositionsprincipen, se Figur 6.2.



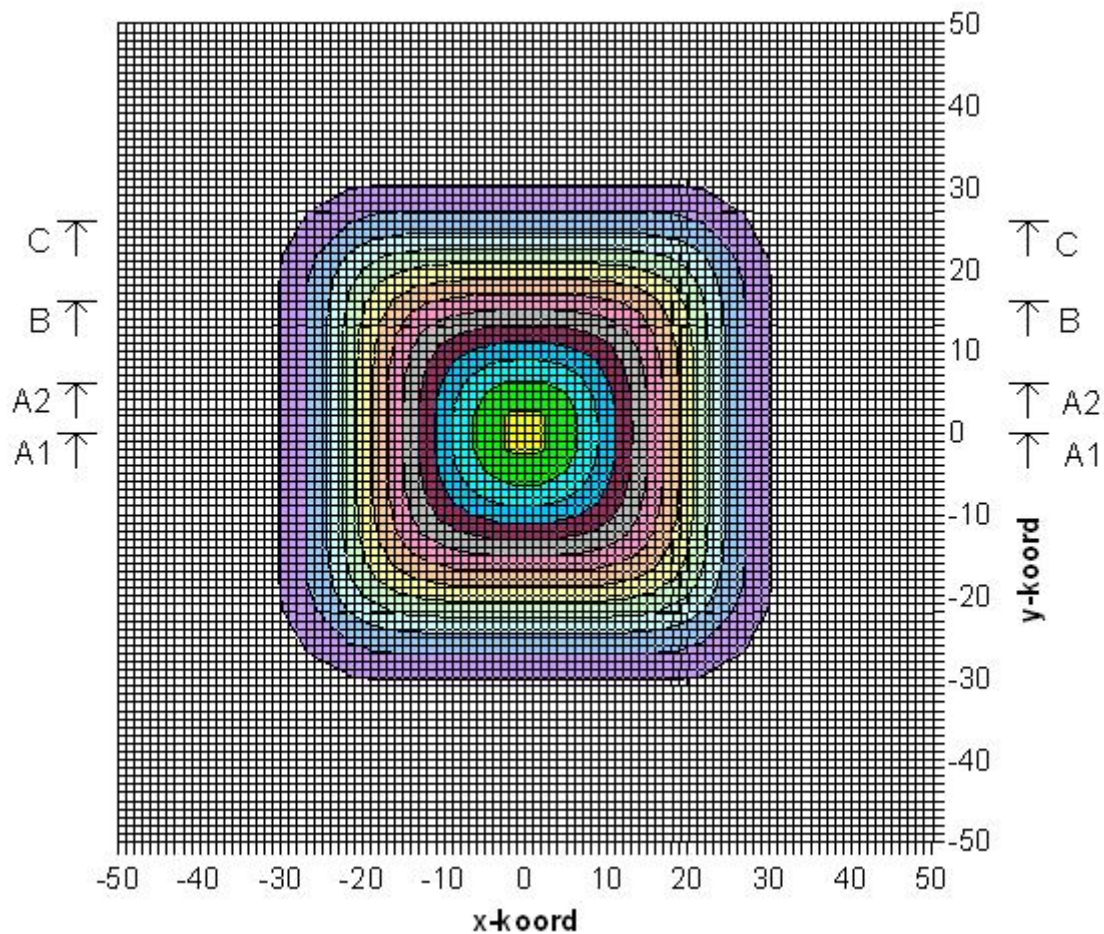
Figur 6.2 Addering av hävning från tre intilliggande pålar, översta delen visar summan av hävningsbidragen från påle 1, 2 och 3

Ett exempel som utförts är en beräkning av 16 pålar med sidmåtten 0,270 m och längden 30 m. De placeras med centrumavstånd 4 m i ett koordinatsystem enligt Figur 6.3 nedan. För beräkning av hävning med beräkningsmodellen för 1 respektive 16 pålar se bilaga 6 och bilaga 7.



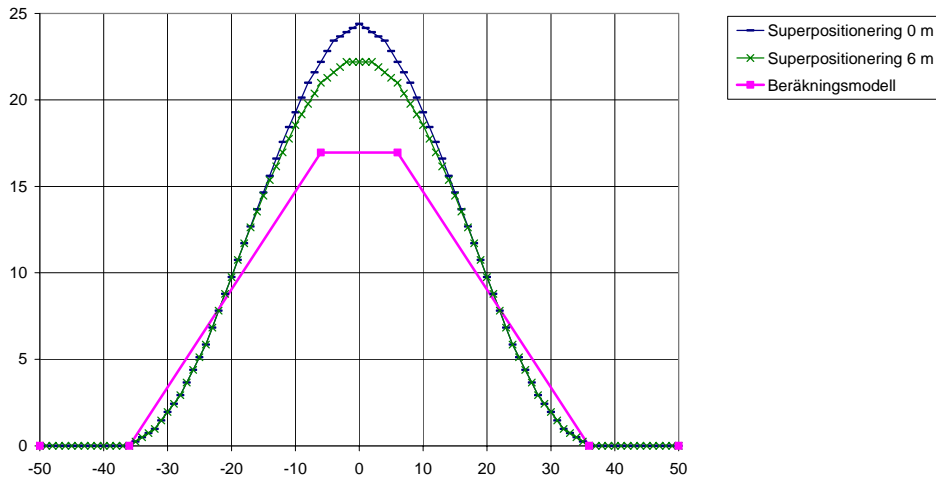
Figur 6.3 Redovisning av de 16 pålarnas läge i koordinatsystemet

Hävningens mönster för pålarna visas i Figur 6.4. Hävningen påverkar liksom beräkningsmodellen en pållängd från pålningsområdet, men kurvan blir lite mjukare i formen, se även Figur 6.5, Figur 6.6 och Figur 6.7.

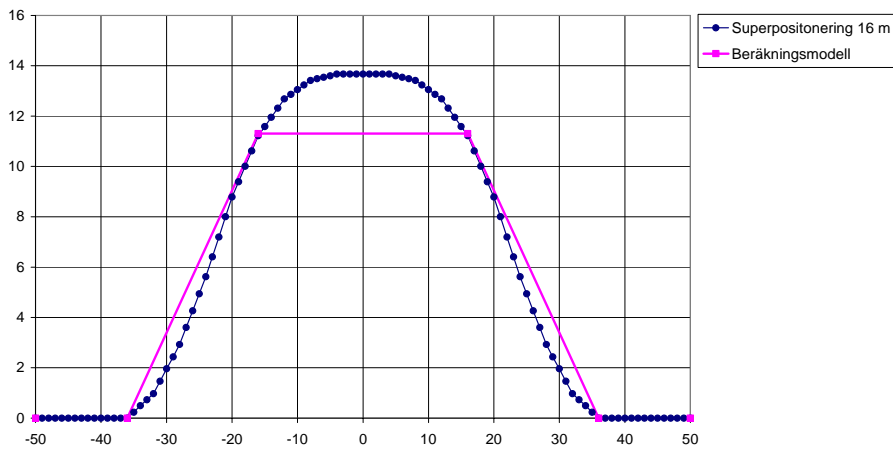


Figur 6.4 Hävningsmönstret i ett koordinatsystem för 16 pålar

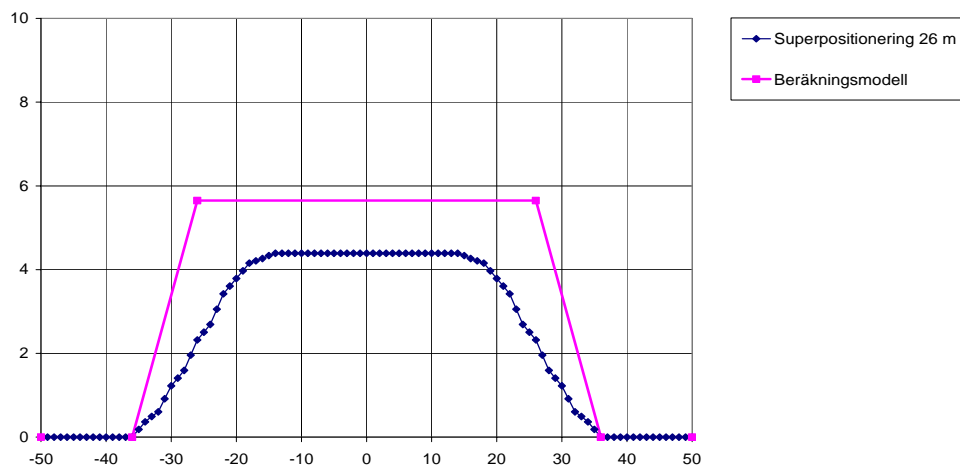
Volymen av hävningen enligt superpositioneringsprincipen är lika med volymen av hävningen enligt Rehnmans beräkningsmodell, d.v.s. pålvolymen. Hävningen fördelas dock olika med de olika metoderna, jämför sektionerna i Figur 6.5, Figur 6.6 och Figur 6.7. Superpositioneringskurvas utseende efterliknar troligen verkligheten bättre än beräkningsmodellen. Den största skillnaden uppstår inom pålningsområdet, där hävningen enligt denna modell blir differentierad.



Figur 6.5 Sektion A1-A1 och A2-A2, jämförelse mellan Rehmans beräkningsmodell och superpositionsprincipen med hävning vid y-axeln och $y = 6$ m (mitt i och i kanten av pålningsområdet)



Figur 6.6 Sektion B-B, jämförelse mellan Rehmans beräkningsmodell och superpositionsprincipen med hävning vid $y = 16$ m (10 m från pålningsområdet)



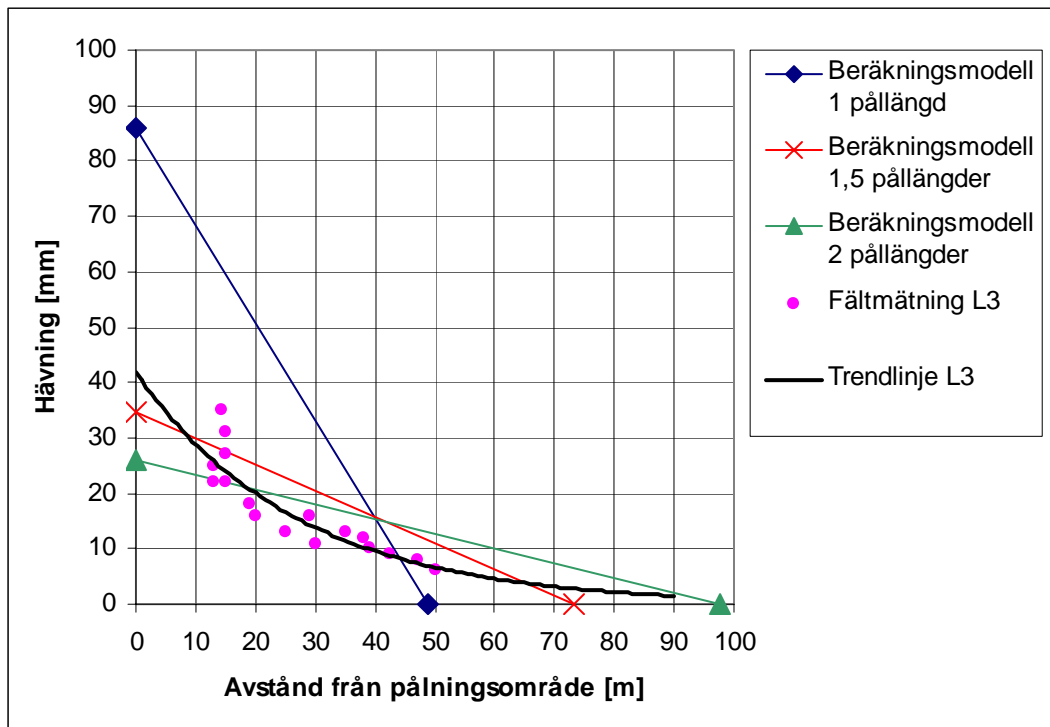
Figur 6.7 Sektion C-C, jämförelse mellan Rehmans beräkningsmodell och superpositionsprincipen med hävning vid $y = 26$ m (20 m från pålningsområdet)

6.4 Beräkningsmodell enligt Rehnman baserad på hävning på ett avstånd längre än en pållängd från pålningsområdet

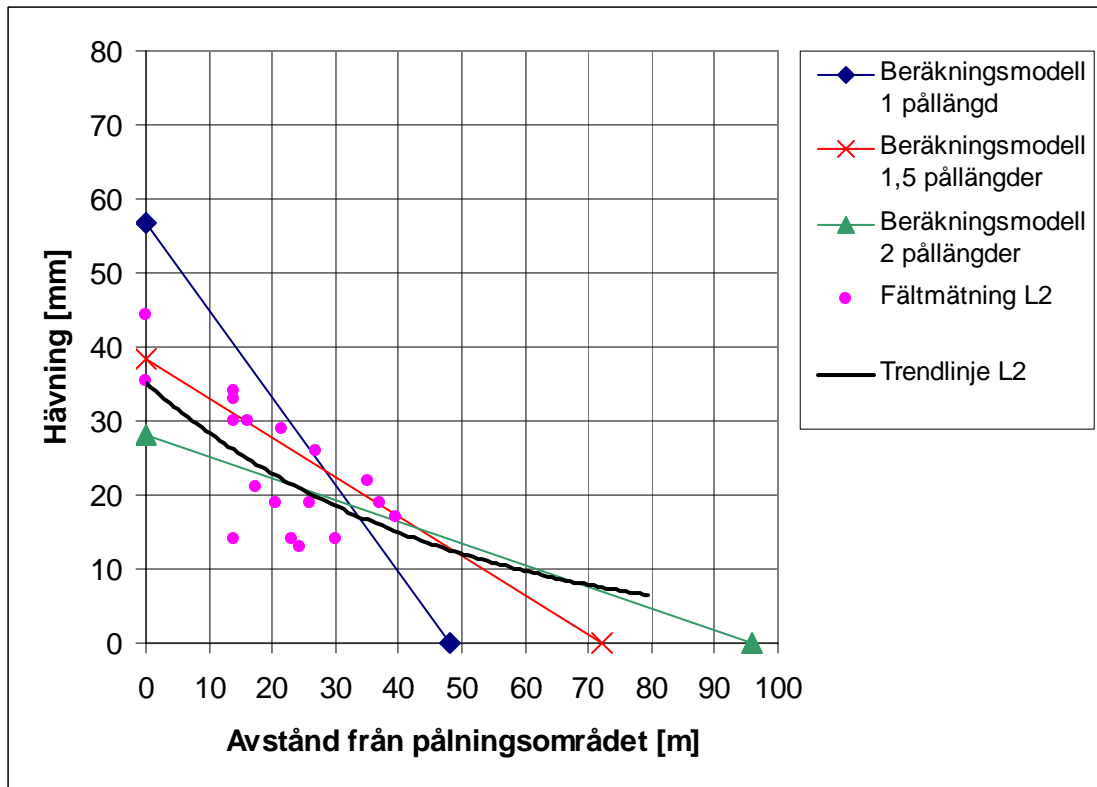
Då beräkningsmodellen inte stämmer riktigt överens med de uppmätta värdena från fältstudierna har en modifiering av modellen gjorts. Istället för att leran påverkas inom ett avstånd av en pållängd från pålningsområdet har beräkningsmetoden ändrats så att hävningen fördelas på ett större avstånd motsvarande 1,5 och 2 pållängder från pålningsområdet. Formeln har ändrats genom att en multiplikator, $A = 1; 1,5; 2$, har lagts till, se ekvation (6.1).

$$x = \frac{\eta(V_{p\ddot{a}lar} - V_{lerproppar})}{A \cdot d \left[(\alpha + \beta) \left(\frac{l}{2} + \frac{A \cdot d}{3} \right) + (\gamma + \delta) \left(\frac{b}{2} + \frac{A \cdot d}{3} \right) + \frac{b \cdot l}{A \cdot d} \right]} \quad (6.1)$$

I Figur 6.8 och Figur 6.9 nedan visas hävningen runt pålningsområdena i L3 resp. L2 tillsammans med resultaten från beräkningsmodellerna. Det kan konstateras att fältstudierna, både L3 och L2, påvisar hävning utanför ett avstånd motsvarande en pållängd från pålningsområdet. Det går dock inte att bedöma hur långt bort påslagningen påverkar eftersom mätdata saknas.



Figur 6.8 Jämförelse med modifierad beräkningsmodell och fältstudie (L3)



Figur 6.9 Jämförelse med modifierad beräkningsmodell och fältstudie (L2)

Modifieringarna av beräkningsmodellen avseende hävning på ett större avstånd stämmer bättre överens med de hävningar som uppmätts i de aktuella fältstudierna. Fältmätningarna indikerar en avtagande lutning med avståndet från pålningsområdet, vilket bättre överensstämmer med Sagasetas och Whittles studie, se kapitel 2.1, än med Rehnmans beräkningsmodell.

7 SLUTSATSER

Detta arbete behandlar jämförelse mellan fältstudier och beräkningar avseende hävning i samband med påslagning i lera. Uppmätta rörelser från ett antal pågående entreprenader och teoretiska beräkningar stämmer dock inte överens. Vid mätningarna i fält har fler faktorer än bara pålningen påverkat resultaten och områden endast påverkade av pålning har varit svåra att hitta. Även om mycket kontroll av rörelser har utförts inom entreprenaderna har inte rörelserna till följd av pålning mätts i den utsträckning som hade behövts för att kunna dra mer allmängiltiga slutsatser. Dessutom har inte lerans konsolideringsförlopp efter pålning kunnat studeras p.g.a. att entreprenörerna har påbörjat nya aktiviteter direkt efter avslutad pålning.

Resultaten från inmätning av pålar vid J2 och Skandiahammen visar att val av pålningsordning ger stora effekter och påverkar massundanträngningens riktning. Därför är det bra om en genomtänkt pålningsordning i möjligaste mån kan följas.

Rehnmans beräkningsmodell är en mycket överslagsmässig och delvis subjektiv metod där faktorerna α , β , γ och δ måste ansättas genom kvalificerade gissningar. Det är svårt att värdera de olika mothållande krafternas (tyngder, pålar, sponter m.m.) betydelse för rörelserna samtidigt som detta val är helt avgörande för resultatet. För att kunna använda beräkningsmodellen på ett mer tillförlitligt sätt borde tydligare riktlinjer arbetas fram för att ansätta de mothållande faktorerna. Hävningsfaktorn, d.v.s. förhållandet mellan total hävning och pålarnas undanträngda volym, har i detta arbete inte varit ett problem då Göteborgsleran i korttidsperspektivet kan anses vara inkompressibel, och därmed sattes denna till värdet 1. Hävningsfaktorn kan dock vara svårare att bedöma vid andra jordförhållanden.

Jämförelsen av hävningen på markytan mellan fältstudierna och beräkningsmodellen visar dålig överensstämmelse. I försök att få bättre överensstämmelse har beräkningsmodellen modifierats. Den bästa överensstämmelsen fås då hävningen även antas påverka leran på större avstånd än motsvarande en pållängd från pålningsområdet. För att kunna verifiera resultatet som ger hävning även bortanför en pållängd behövs fler omfattande studier genomföras.

Det har varit stora svårigheter att simulera massundanträngningsförloppet vid påslagning med hjälp av PLAXIS. Simuleringar av en enskild påle med axisymmetri ger oanvändbara resultat. Resultaten från simuleringar med en pårad ger inte fullt lika orimliga rörelsemönster för hävningen, men inte heller dessa är trovärdiga då hävningens utbredning i plan till mycket stor del styrs av randvillkoren (hur bred jordmodellen görs). Svårigheterna medför att resultaten varken kan verifiera eller förkasta beräkningsmodellen enligt Rehman eller simulera pålningens inverkan på befintliga konstruktioner och närstående pålar.

För att bekräfta resultatet från de odränerade simuleringarna i PLAXIS har en parameterstudie utförts genom förändring av elasticitetsmodul, skjuvhållfasthet, friktionsvinkel och dilatationsvinkel. Parameterstudien visar inga skillnader i resultat eftersom de parametrar som varierats inte har någon verkan då deformationerna är små och ingen plasticering sker. Dessutom har tvärkontraktionstalet ändrats i en dränerad analys, resultatet visar en mindre hävning men samma rörelsemönster.

Avslutningsvis kan nämnas att rörelserna vid massundanträngning är svåra att förutse med beräkningsmetoderna som beskrivits ovan. Eftersom dessa metoder inte ger tillförlitliga resultat behöver de utvecklas och verifieras med ytterligare fältstudier.

7.1 Fortsatta studier

Det finns inte mycket forskning och litteratur inom området massundanträngning i samband med pålning i lera. Fortsatta studier behövs för att ge ökad förståelse för fenomenet.

Då Rehnmans beräkningsmodell inte ger tillförlitliga resultat bör den förbättras med avseende på :

- klarare direktiv för val av parametrar som beskriver omgivande belastningar och konstruktioner
- klarare direktiv för val av hävningsfaktor
- tolkning av hävningen utanför pålningsområdet med mothållande krafter

Kanske är det helt enkelt så att rörelserna inte kan beräknas med en så pass enkel modell.

För att få bättre resultat behövs modeller som bättre kan tillämpas för simulering av massundanträngning. Forskning pågår för att kunna förutse markrörelser vid pålning, bl.a. har Sagaseta och Whittle studerat en teoretisk modell, shallow strain path method (SSPM). Denna metod tillhandahåller analytiska lösningar för rörelser och töjningar runt en påle, en pålrad och ett rör (Sagaseta, Whittle 2001).

För att kunna verifiera förutsägelseerna måste fler och utförligare fältstudier utföras, helst utanför tät bebyggelse där inga aktiviteter som kan påverka mätresultaten förutom pålningen pågår. Vid en sådan studie bör alla rörelser registreras, både vertikala och horisontella, med hjälp av omfattande instrumentering.

REFERENSER

Skriftliga referenser

Brinkgreve R.B.J. (2002): *Plaxis 2D – Version 8*, A.A Balkema Publishers

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 p 117-122

Hagerty D., Peck R (1971): *Heave and Lateral Movements Due to Pile Driving*, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE vol 97 SM11 p 1513-1531

Hintze S., Liedberg S. mfl (1997): *Omgivningspåverkan vid pål- och spontslagning*, Pålkommisssionen rapport nr 95

Johansson B., Jendeby L. (1998): *Portrycksökningar till följd av påslagning och dess betydelse för stabiliteten*, rapport B 1998:4, Institutionen för Geoteknik Chalmers

Massarsch K.R. (1976): *Soil movements caused by pile driving in clay*, Pålkommisssionen rapport nr 51

Massarsch K.R., Broms B.B. (1989): *Soil displacement caused by pile driving in clay*, International conference on piling and deep foundations, London Maj 1989 Proceedings vol 1 p 275-282

Olsson C., Holm G. (1993): *Pålgrundläggning*, Svensk Byggtjänst och Statens geotekniska institut

Sagaseta C., Whittle A.J. (2001): *Prediction of ground movements due to pile driving in clay*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE vol 127 no 1 p 55-66

Samuelsson A., Wiberg N-E. (1998): *Finite Element Method basics*, Studentlitteratur

Schälin J., Sellgren E. (1989): *E6 Mölndal. Lackarebäcksmotet. Påldäcksbrott*, Grundläggningsdag 89 Risker vid grundläggningsarbeten, Stockholm 14 mars 1989

Elektroniska referenser

Vägverkets hemsida: <http://www3.vv.se/gotaleden/bygget.asp> (2004-09-20)
<http://www.vv.se> (2004-09-20)

NCCs hemsida: <http://www.ncc.se> (2004-09-20)

FÖRTECKNING ÖVER BILAGOR

Beräkningsmodell enligt Rehnman

Bilaga 1	Hävning till följd av pålning, L3
Bilaga 2	Hävning till följd av pålning, L2
Bilaga 3	Hävning till följd av pålning, J2
Bilaga 4	Hävning till följd av pålning, Skandiahammen
Bilaga 5	Hävning till följd av pålning, en pårad
Bilaga 6	Hävning till följd av pålning, 1 påle
Bilaga 7	Hävning till följd av pålning, 16 pålar

Hävning till följd av pålning (L3)

Pålområdets bredd, b:	45 m
Pålområdets längd, l:	100 m
Pållängd + knektdjup:	48,9 m
Total pålvolyms:	1749 m ³
Total volym lerproppar:	480,95 m ³

Mothållande kraft A:	1,00	(0<x<1)
Mothållande kraft B:	1,00	(0<x<1)
Mothållande kraft C:	1,00	(0<x<1)
Mothållande kraft D:	1,00	(0<x<1)
0 = "tung byggnad"		

Pålvolyms

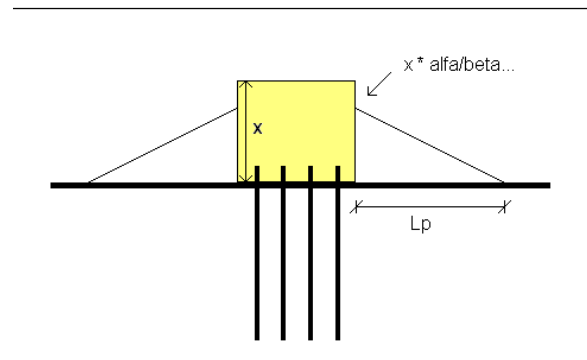
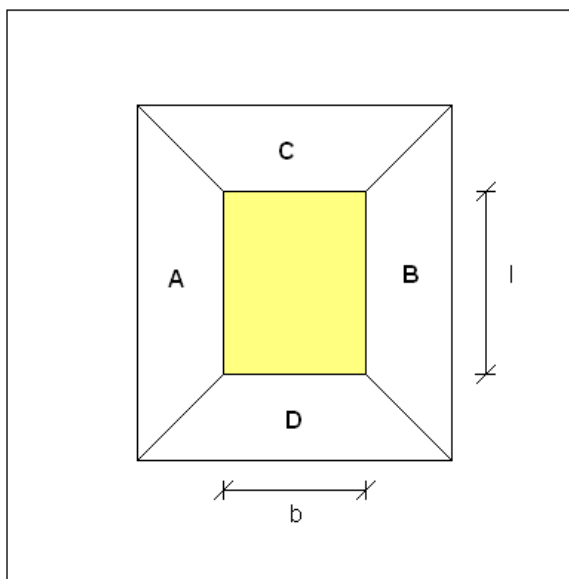
	Sidmått (m)	Diameter (m)	Längd (m)	Volym/påle (m ³)	Antal (st)	Total volym (m ³)
Påltyp 1	0,27		42,4	3,09	566	1749,48
Påltyp 2				0,00		0,00
Påltyp 3				0,00		0,00
Påltyp 4				0,00		0,00
Påltyp 5				0,00		0,00
SUMMA					566	1749,48

Volym lerproppar

	Diameter (m)	Längd (m)	Antal (st)	Volym/propp (m ³)	Total volym (m ³)
Propptyp 1	0,27	15	560	0,86	480,95
Propptyp 2				0,00	0,00
Propptyp 3				0,00	0,00
Propptyp 4				0,00	0,00
Propptyp 5				0,00	0,00
SUMMA					480,95

Hävningfaktor: 1,00 (0.5<x<1.0)

Hävning, x, = 86 mm



Hävning till följd av pålning (L2)

Pålområdets bredd, b:	40 m
Pålområdets längd, l:	115 m
Pållängd + knektdjup:	48 m
Total pålvolyms:	1272 m ³
Total volym lerproppar:	311,75 m ³

Mothållande kraft A:	0,80	(0<x<1)
Mothållande kraft B:	1,00	(0<x<1)
Mothållande kraft C:	1,00	(0<x<1)
Mothållande kraft D:	0,50	(0<x<1)
0 = "tung byggnad"		

Pålvolyms

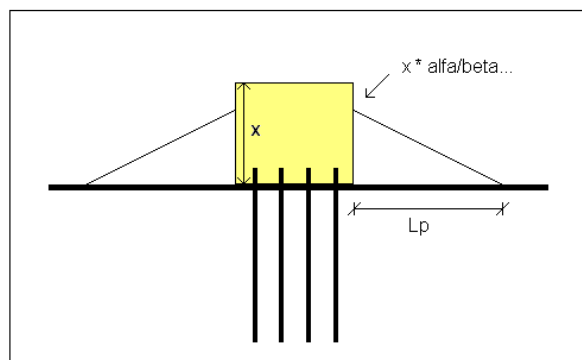
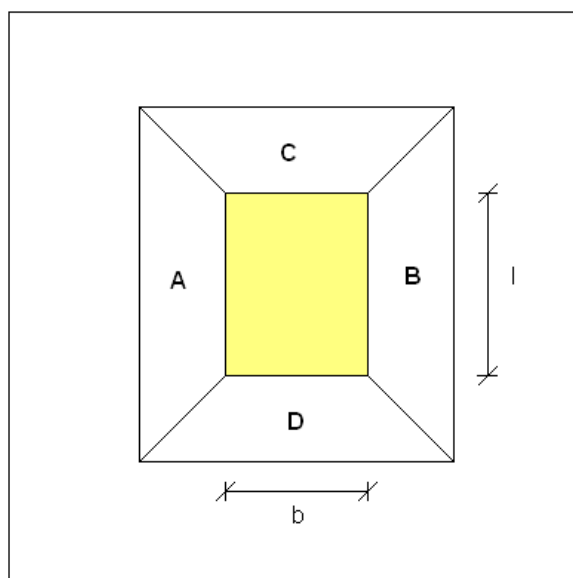
	Sidmått (m)	Diameter (m)	Längd (m)	Volym/påle (m ³)	Antal (st)	Total volym (m ³)
Påltyp 1	0,275		36,45	2,76	324	893,12
Påltyp 2	0,275		41,45	3,13	58	181,81
Påltyp 3	0,275		46,45	3,51	56	196,72
Påltyp 4				0,00		0,00
Påltyp 5				0,00		0,00
SUMMA					438	1271,64

Volym lerproppar

	Diameter (m)	Längd (m)	Antal (st)	Volym/propp (m ³)	Total volym (m ³)
Propptyp 1	0,29	15,5	304,5	1,02	311,75
Propptyp 2				0,00	0,00
Propptyp 3				0,00	0,00
Propptyp 4				0,00	0,00
Propptyp 5				0,00	0,00
SUMMA					311,75

Hävningfaktor: 1,00 (0.5<x<1.0)

Hävning, x, = 71 mm



Hävning till följd av pålning (J2)

Pålområdets bredd, b:	40 m
Pålområdets längd, l:	65 m
Pållängd + knektdjup:	42,5 m
Total pålvolyms:	1508 m ³
Total volym lerproppar:	444,57 m ³

Mothållande kraft A:	0,30	(0<x<1)
Mothållande kraft B:	0,20	(0<x<1)
Mothållande kraft C:	1,00	(0<x<1)
Mothållande kraft D:	1,00	(0<x<1)
0 = "tung byggnad"		

Pålvolyms

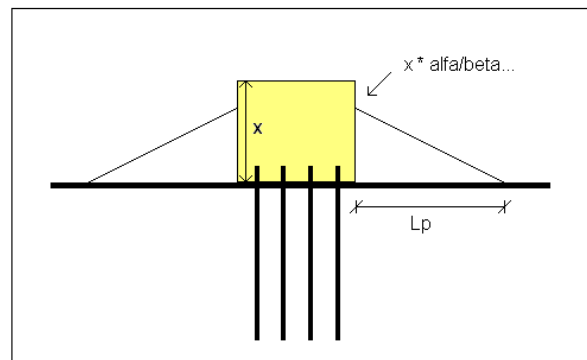
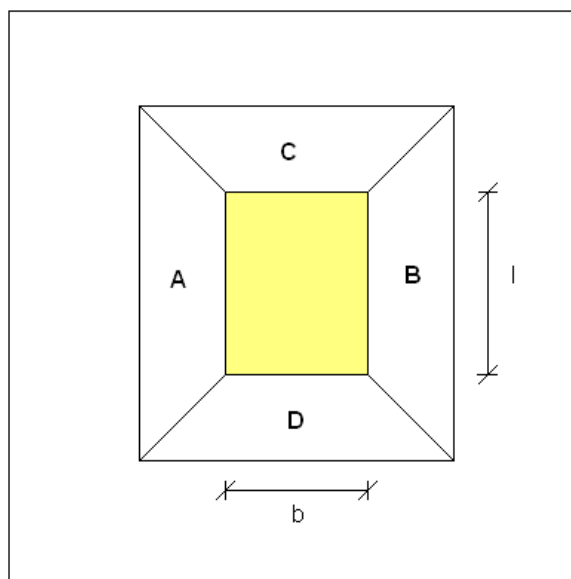
	Sidmått (m)	Diameter (m)	Längd (m)	Volym/påle (m ³)	Antal (st)	Total volym (m ³)
Påltyp 1	0,275		50,71	3,09	69	264,61
Påltyp 2	0,4		30,25	0,00	257	1243,88
Påltyp 3				0,00		0,00
Påltyp 4				0,00		0,00
Påltyp 5				0,00		0,00
SUMMA					326	1508,49

Volym lerproppar

	Diameter (m)	Längd (m)	Antal (st)	Volym/propp (m ³)	Total volym (m ³)
Propptyp 1	0,38	15	33	1,70	56,14
Propptyp 2	0,4	11	281	1,38	388,43
Propptyp 3				0,00	0,00
Propptyp 4				0,00	0,00
Propptyp 5				0,00	0,00
SUMMA					444,57

Hävningfaktor: **1,00** (0.5<x<1.0)

Hävning, x, = **164 mm**



Hävning till följd av pålning (Skandiahamnen)

Pålområdets bredd, b:	40 m	Mothållande kraft A:	0,00	($0 < x < 1$)
Pålområdets längd, l:	120 m	Mothållande kraft B:	0,20	($0 < x < 1$)
Pållängd + schaktdjup:	21,5 m	Mothållande kraft C:	0,20	($0 < x < 1$)
Total pålvolyms:	655 m ³	Mothållande kraft D:	0,00	($0 < x < 1$)
Total volym lerproppar:	0 m ³		0 = "tung byggnad"	

Pålvolyms

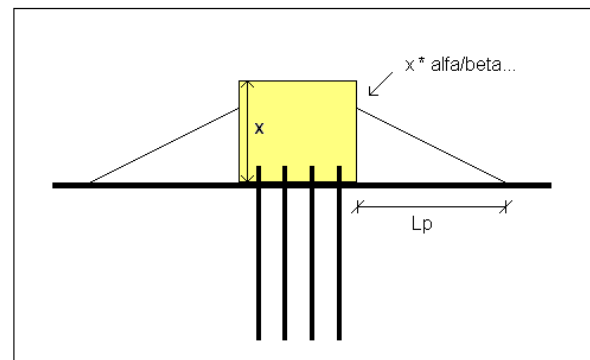
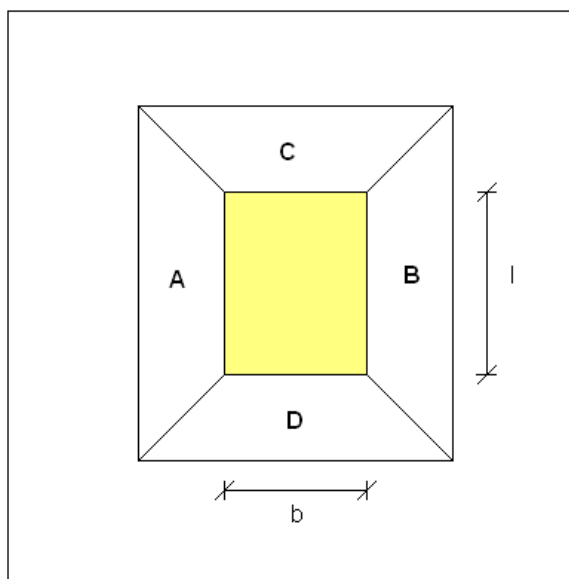
	Sidmått (m)	Diameter (m)	Längd (m)	Volym/påle (m ³)	Antal (st)	Total volym (m ³)
Påltyp 1	0,27		18,52	1,35	485	654,80
Påltyp 2				0,00		0,00
Påltyp 3				0,00		0,00
Påltyp 4				0,00		0,00
Påltyp 5				0,00		0,00
SUMMA					485	654,80

Volym lerproppar

	Diameter (m)	Längd (m)	Antal (st)	Volym/propp (m ³)	Total volym (m ³)
Propptyp 1				0,00	0,00
Propptyp 2				0,00	0,00
Propptyp 3				0,00	0,00
Propptyp 4				0,00	0,00
Propptyp 5				0,00	0,00
SUMMA					0,00

Hävningfaktor: 1,00 ($0.5 < x < 1.0$)

Hävning, x, = 126 mm



Hävning till följd av pålning (en pålrad)

Pålområdets bredd, b:	0,191 m	Mothållande kraft A:	1,00	($0 < x < 1$)
Pålområdets längd, l:	10000 m	Mothållande kraft B:	0,00	($0 < x < 1$)
Pållängd, L _p :	22 m	Mothållande kraft C:	0,00	($0 < x < 1$)
Total pålvolyms:	3210,33 m ³	Mothållande kraft D:	0,00	($0 < x < 1$)
Total volym lerproppar:	0 m ³	0 = "tung byggnad"		

Pålvolyms

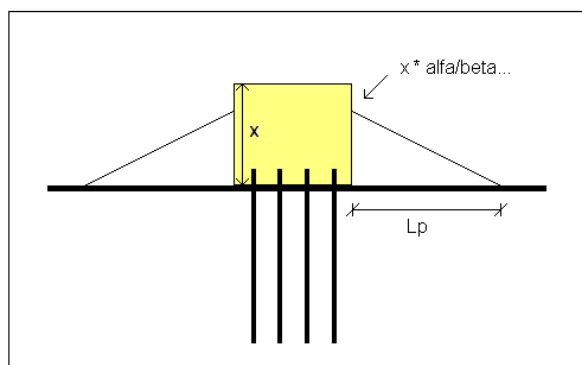
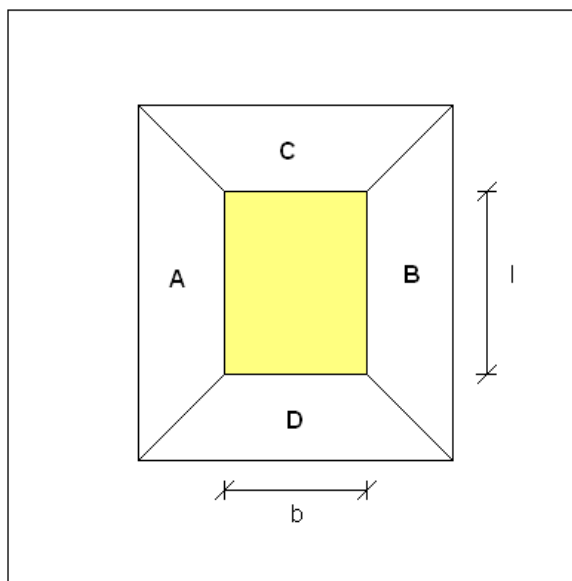
	Sidmått (m)	Diameter (m)	Längd (m)	Volym/påle (m ³)	Antal (st)	Total volym (m ³)
Påltyp 1	0,191		22	0,80	4000	3210,33
Påltyp 2				0,00		0,00
Påltyp 3				0,00		0,00
Påltyp 4				0,00		0,00
Påltyp 5				0,00		0,00
SUMMA						3210,33

Volym lerproppar

	Diameter (m)	Längd (m)	Antal (st)	Volym/propp (m ³)	Total volym (m ³)
Propptyp 1				0,00	0,00
Propptyp 2				0,00	0,00
Propptyp 3				0,00	0,00
Propptyp 4				0,00	0,00
Propptyp 5				0,00	0,00
SUMMA					0,00

Hävningfaktor: 1,00 ($0.5 < x < 1.0$)

Hävning, x, = 28,65 mm



Hävning till följd av pålning (1 påle)

Pålområdets bredd, b:	0 m	Mothållande kraft A:	1,00	($0 < x < 1$)
Pålområdets längd, l:	0 m	Mothållande kraft B:	1,00	($0 < x < 1$)
Pållängd, L _p :	30 m	Mothållande kraft C:	1,00	($0 < x < 1$)
Total pålvolyms:	2,19 m ³	Mothållande kraft D:	1,00	($0 < x < 1$)
Total volym lerproppar:	0 m ³			0 = "tung byggnad"

Pålvolyms

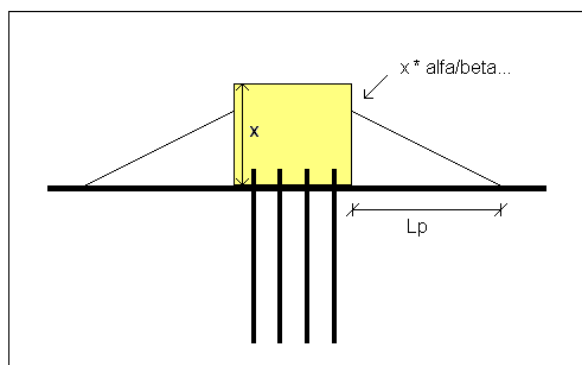
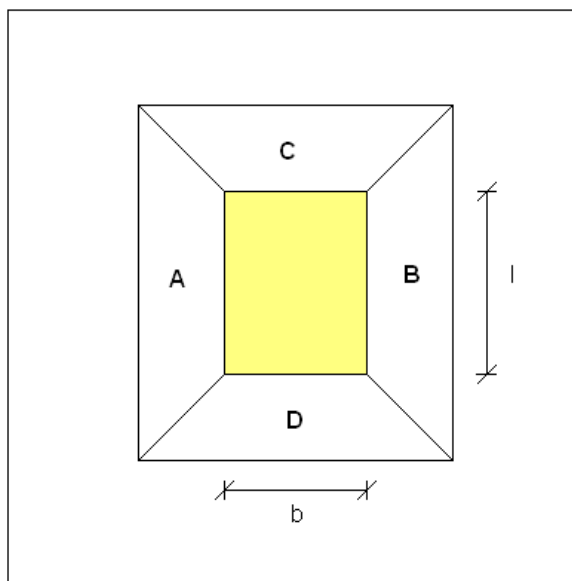
	Sidmått (m)	Diameter (m)	Längd (m)	Volym/påle (m ³)	Antal (st)	Total volym (m ³)
Påltyp 1	0,27		30	2,19	1	2,19
Påltyp 2				0,00		0,00
Påltyp 3				0,00		0,00
Påltyp 4				0,00		0,00
Påltyp 5				0,00		0,00
SUMMA					1	2,19

Volym lerproppar

	Diameter (m)	Längd (m)	Antal (st)	Volym/propp (m ³)	Total volym (m ³)
Propptyp 1				0,00	0,00
Propptyp 2				0,00	0,00
Propptyp 3				0,00	0,00
Propptyp 4				0,00	0,00
Propptyp 5				0,00	0,00
SUMMA					0,00

Hävningfaktor: 1,00 (0.5 < x < 1.0)

Hävning, x, = 1,83 mm



Hävning till följd av pålning (16 pålar)

Pålområdets bredd, b:	12 m	Mothållande kraft A:	1,00	($0 < x < 1$)
Pålområdets längd, l:	12 m	Mothållande kraft B:	1,00	($0 < x < 1$)
Pållängd, L _p :	30 m	Mothållande kraft C:	1,00	($0 < x < 1$)
Total pålvolyms:	34,99 m ³	Mothållande kraft D:	1,00	($0 < x < 1$)
Total volym lerproppar:	0 m ³	0 = "tung byggnad"		

Pålvolyms

	Sidmått (m)	Diameter (m)	Längd (m)	Volym/påle (m ³)	Antal (st)	Total volym (m ³)
Påltyp 1	0,27		30	2,19	16	34,99
Påltyp 2				0,00		0,00
Påltyp 3				0,00		0,00
Påltyp 4				0,00		0,00
Påltyp 5				0,00		0,00
SUMMA					16	34,99

Volym lerproppar

	Diameter (m)	Längd (m)	Antal (st)	Volym/propp (m ³)	Total volym (m ³)
Propptyp 1				0,00	0,00
Propptyp 2				0,00	0,00
Propptyp 3				0,00	0,00
Propptyp 4				0,00	0,00
Propptyp 5				0,00	0,00
SUMMA					0,00

Hävningfaktor: 1,00 (0.5 < x < 1.0)

Hävning, x, = 16,95 mm

