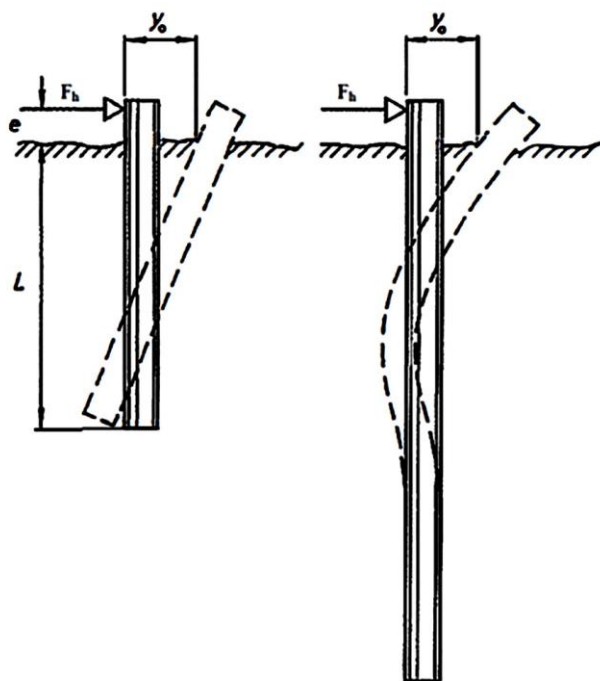


TRANSVERSALBELASTNING AV PÅLAR I POSTGLACIAL LERA

Fullskaleförsök



Anders Jonefjäll, Michael Sabattini

2022-12-15

FÖRORD

Rapporten behandlar utfört fullskaleförsök med transversalbelastning av stålrörspålar och analysering av uppmätt förskjutning. Projektet har utförts under perioden november 2020 till december 2022.

Denna rapport är utförd av Peab Anläggning AB med delfinansiering från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF och Trafikverket.

Projektgruppen vill uttrycka tack till projektets finansiärer. Tack till referensgruppen och Per-Evert Bengtsson för värdefulla kommentarer och diskussioner. Tack till Peab Grundläggning för hjälp med material, maskiner och lokaler. Tack till projektet Olskroken Planskildhet för nyttjande av provområde.

Projektets arbetsgrupp:

- Projektledare: Anders Jonefjäll, Peab Anläggning AB
- Biträdande projektledare: Michael Sabattini, Peab Anläggning AB
- Jimmie Andersson, Peab Anläggning AB

Projektets referensgrupp har bestått av följande personer utöver projektgruppen:

- Gunnar Holmberg (Skanska Teknik)
- Jonas Axelsson (Trafikverket)
- Leif Jendeby (COWI)
- Peter Alheid (Hercules Grundläggning)

Göteborg

December 2022

SAMMANFATTNING

I denna redovisning ges en kortare sammanfattning av resultat från Anders Jonefjälls examensarbete inom transversalbelastning av stålrörspålar i postglacial lera utöver detta kompletteras sammanfattning med fortsatta beräkningar. Examensarbetet behandlar teorin kring transversalbelastning, bäddmodul och gruppeffekt av pålar i lerjord. Examensarbetet innehåller även fältförsök av transversalbelastning av stålrörspålar i Göteborg. Fältförsöket har utförts med en varmvalsad kvadratisk stålrörspåle samt två cirkulära, längsgående svetsade stålrörspålar som provbelastats. Den kvadratiske och en av de cirkulära stålrörspålarna instrumenterades med trådtöjningsgivare längs utsidan av pålen. Alla tre pålar instrumenterades med inklinometererrör i översta 6m av pålarna. Pålarna installerades med hjälp av grävmaskin utrustad med högfrekvent vibrator. Som mothåll installerades tre spontplankor med längd på 10m och en total bredd på cirka 2 meter. Efter installation tilläts leran rekonsolidera i cirka fyra månader. Samtliga pålar belastades i laststeg där magnituden av belastning mättes med hjälp av en lastcell. Mätningarna av påltoppens förskjutning gjordes med hjälp av mätklocka som fästes på en referensbalk bakom pålarnas förskjutningsriktning. Rörelser mot djupet mättes med inklinometer före och efter varje laststeg. Referensbalken och mothållets förskjutning mättes in med hjälp av mätprismor före och efter belastning av respektive påle. Flertalet problem uppstod under fältförsöket där pålar behövts kapas, töjningsgivare skadats och inklinometererrör lossnat. Vilket resulterade i att inga töjningsgivare kunde mätas på någon av pålarna. Inklinometermätningar var möjlig de översta 4m i båda cirkulära pålar och 6m i den kvadratiske pålen.

Denna redovisning återger utförliga analytiska beräkningar, en FE-analys och en jämförelse mellan uppmätt och beräknade förskjutningarna. De analytiska beräkningarna består av spänning-, tvärkraft- och momentfördelning samt lutningsvinkel och förskjutning mot djupet för respektive tvärsnitt. De analytiska beräkningarna i examensarbetet är gjorda med fyra olika bäddmoduler. Denna sammanställning återger två av dessa, den nuvarande svenska praxisen ($200.c_u/d$) och den tidigare svenska praxisen ($80.c_u/d$).

För denna sammanställning har en FE-analys utförts, leran har modellerats med jordmodellen Soft Soil Creep. Den kvadratiske pålen är modellerad som ett volyemelement.

Resultatet visade att beräkningarna överskattar styvheten i leran för framförallt stora laster. Förskjutningarna som uppmättes vid fältförsök var avsevärt större än de som beräknats för större laster. Förskjutningen vid fältförsöket var plastiska redan vid små laster. Påltoppsrörelserna beräknade i FE-analysen och analytiska beräkningar stämmer relativt väl med de uppmätta påltoppsrörelserna för den kvadratiske pålen vid små belastningar. Den uppmätta påltoppsrörelsen för de båda cirkulära överskrider samtliga beräknade påltoppsrörelser. Uppmätt rotationsdjup stämmer bättre överrens med det beräknade för större laster. Vid parallellförskjutning av uppmätt rörelse mot djupet med inklinometer för den kvadratiske pålen efterliknas den beräknade rörelsen mot djupet för små laster. Den parallellförskjutna rörelsen efterliknar den beräknade rörelsen med FE-analys och $80 \cdot c_u/d$.

Ett finskt samband, där responsen ses som bilinjärt ideal-plastiskt har använts vid kompletterande beräkningar i denna redovisning. Detta finska samband stämmer bättre överrens med uppmätta förskjutningar men överskattar rotationsdjupet något.

INNEHÅLL

1. INTRODUKTION	1
2. FÄLTFÖRSÖK	2
2.1. RESULTAT FÄLTFÖRSÖK.....	5
3. ANALYTISKA BERÄKNINGAR	10
3.1. RESULTAT ANALYTISKA BERÄKNINGAR.....	13
4. BERÄKNING FE-MODELL	18
5. MÄTNING EFTER UPPDRAGNING	21
6. DISKUSSION	23
6.1. RESULTAT FÄLTFÖRSÖK.....	23
6.2. JÄMFÖRELSE UPPMÄTT OCH BERÄKNAD FÖRSKJUTNING	23
7. SLUTSATS	25

1. INTRODUKTION

Peab Anläggning AB har genom Anders Jonefjälls examensarbete utförts ett fältförsök av transversalbelastning på stålrörspålar. Föreliggande rapport innefattar en sammanfattning av examensarbetet och kompletterande beräkningar.

Fältförsöket är utfört på tre 12 meter långa stålrörspålar, två cirkulära (KCKR)-pålar och en kvadratisk (VKR)-påle. Samtliga pålar är installerade i Trafikverkets projekt Olskroken Planskildhet, Göteborg, se Figur 1-1. Utförlig förklaring om teorin kring transversalbelastade pålar i normalkonsoliderad lera kan finnas i Jonefjälls examensarbete, se Bilaga 2. Bilaga 2 innehåller även förberedande arbete, metod, komplikationer med mera. Samtliga pålar som behandlats i denna rapport ses som långa pålar, där en flytled kan bildas. Påltoppen ses som fri och ingen inspänningsfaktor har beaktats.



Figur 1-1: Redovisning av Västlänken-projektet och position för fältförsök (Göteborg Stad, 2022)

2. FÄLTFÖRSÖK

Fältförsöket utfördes på tre pålar bestående av två påltyper, två cirkulära, KCKR-pålar och en kvadratisk VKR-påle. En av KCKR-pålarna och VKR-pålen instrumenterades med limmade trådtöjningsgivare på utsidan av pålen. Samtliga pålar instrumenterades med inklinometerrör i de översta 6m.

Pålarna installerades i Olskroken Planskildhet, vid korsningen mellan Malmsjögatan och Von Utfallsgatan, se Figur 2-1.



Figur 2-1: Överblick av området för installerade pålar

En yta, med flertalet utförda undersökningspunkter, hade identifierats i god tid före installation. Någon dag före installationsarbetet skulle påbörjas tvingades försöket flytta till annan yta pga. produktionsmässiga anledningar. Den nya ytan hade inga geotekniska undersökningar före installation av pålarna. En schakt gjordes ner tills ren lera nåtts på cirka 2m djup. Området antogs bestå av ren lera med ett jorddjup på cirka 15m. Installationsarbetet utfördes 20 april 2021, arbetet utfördes med grävmaskin utrustad med MOVAX.

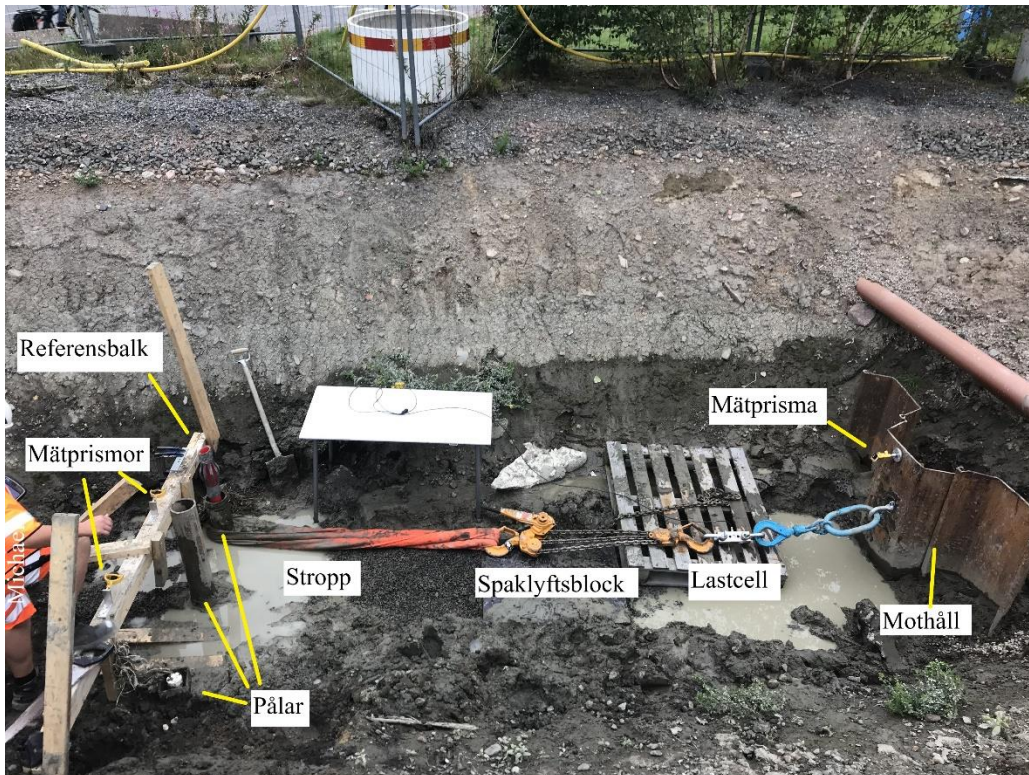
Antagandet om ren lera visade sig inkorrekt, jordlagerföljden bestod av två skikt med sand samt morän vid cirka 11–11,5m djup. Detta orsakade komplikationer vid installationsprocessen vilken även skadade flertalet mätinstrument på och i pålarna. Som mothåll för belastning installerades tre 10m PU-12 spontplank.

En geoteknisk undersökning utfördes i en borrhpunkt den 18 augusti 2021. Borrhpunkten utfördes på släntkrönet för schakten. De utförda undersökningarna i borrhpunkten innefattar CPT, vingförsök och ostörda jordprover (kolv). Kolvarna togs vid 3, 4 och 6m djup under markytan. Bilaga 1 innefattar plan- och sektionsritning för schakt och borrhpunkt.

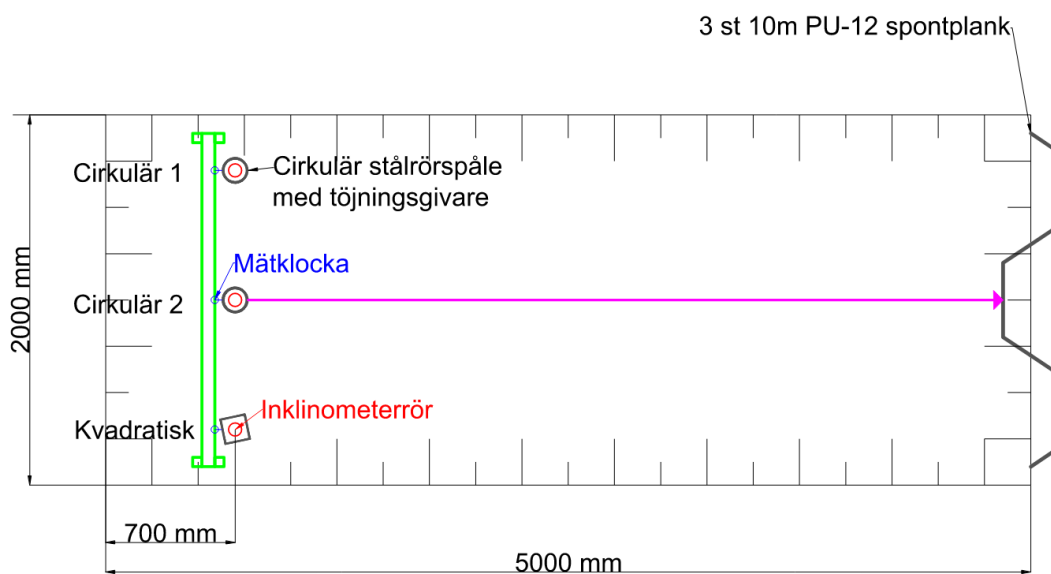
Belastning utfördes 25 augusti 2021. Belastningen utfördes med spaklyftsblock som fästes i spontplankorna. För att mäta påförd last och påltoppsförskjutning användes en lastcell och mätklocka. Rörelserna mot djupet mättes med hjälp av inklinometer. Sammanställning av materialparametrarna för pålar och lera redovisas i Tabell 2-1. Testuppställningen redovisas i Figur 2-2. En schematisk skiss över testuppställningen redovisas i Figur 2-3. Belastning utfördes enligt belastningsschemat som redovisas i Tabell 2-2.

Tabell 2-1: Sammanställning av materialegenskaper

Allmänt	Beteckning	Enhet	Magnitud
Konstruktion			
Längd påle	L_p	m	11,5
Diameter KCKR-påle	d	mm	139,7
Godtjocklek KCKR-påle	t_c	mm	10
Kantlängd VKR-påle	b_p	mm	140
Godtjocklek VKR-påle	t_v	mm	6,3
Styvhet KCKR-påle	$(EI)_c$	kNm ²	1 810
Styvhet VKR-påle	$(EI)_v$	kNm ²	2 066,4
Geoteknik			
Vald odränerad skjuvhållfasthet	c_u	kPa	16
Elasticitetsmodul Lera	E_{50}	kPa	8 621
Justerad Elasticitetsmodul Lera	E_{50_j}	kPa	5 747



Figur 2-2: Testuppställning för transversalbelastning



Figur 2-3: Schematisk skiss över testuppställningen

Tabell 2-2: Belastningsschema som används vid fältförsök

Belastning [kN]	Tid [min]
0	0
6	10
0	5
12	10
0	5
19	10
0	5
25	10
0	5
30	10
35	10
40	10
45	10
Max	10
0	5
Tot	115

2.1. Resultat fältförsök

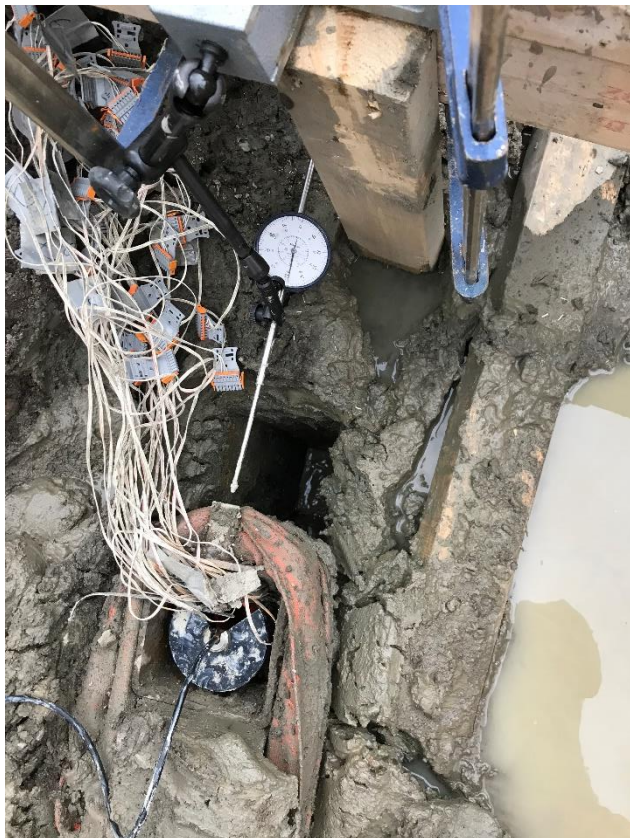
För att underlätta benämns pålarna Cirkulär 1, Cirkulär 2 och Kvadratisk påle. Cirkulär 1 ses överst i Figur 2-3, Cirkulär 2 ses som mittersta pålen i samma figur. Cirkulär 1 och Kvadratisk påle var utrustade med töjningsgivare. Alla pålar var instrumenterade med inklinometer i inuti pålen. Vid belastningsförsöket uppmärksammades att lera trängt in i pålarna vilket komplicerade inklinometermätningen. Inklinometermätning var möjlig till 3,5m djup i Cirkulär 1, 3m djup i Cirkulär 2 och 5,5m i Kvadratisk påle. Ingen av töjningsgivarna fungerade vid belastningstillfället. Belastning utfördes först på Cirkulär 1 därefter Cirkulär 2 och sist Kvadratisk påle. Figur 2-4, Figur 2-5 och Figur 2-6 redovisar påltoppsrörelsen vid maximal belastning för respektive påle. Den uppmätta påltoppsförskjutningen vid verkande last ritas i p-y-kurvor (Last-deformations-kurvor). Detta syns för samtliga pålar i Figur 2-7 och för Cirkulär 1 och 2 i Figur 2-8. Figur 2-9, Figur 2-10 och Figur 2-11 redovisar inklinometermätningar för Cirkulär 1, Cirkulär 2 respektive Kvadratisk påle.



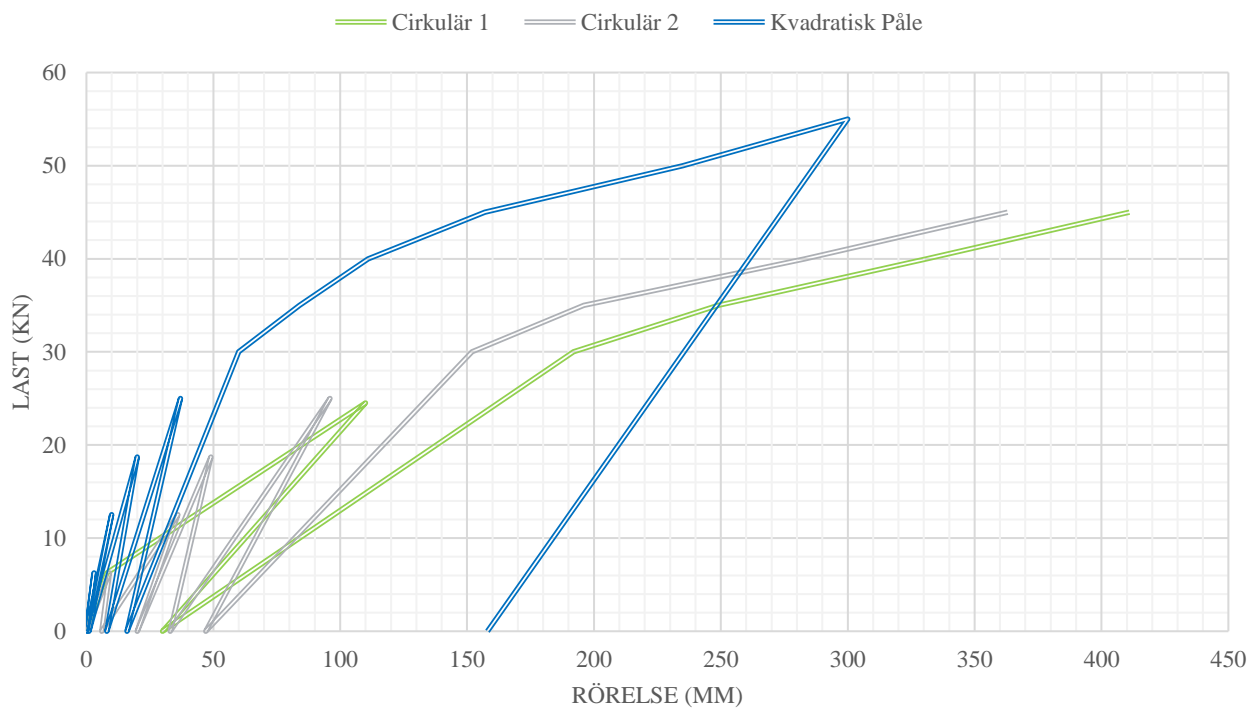
*Figur 2-4: Påltoppsrörelse vid maximal belastning,
Cirkulär 1*



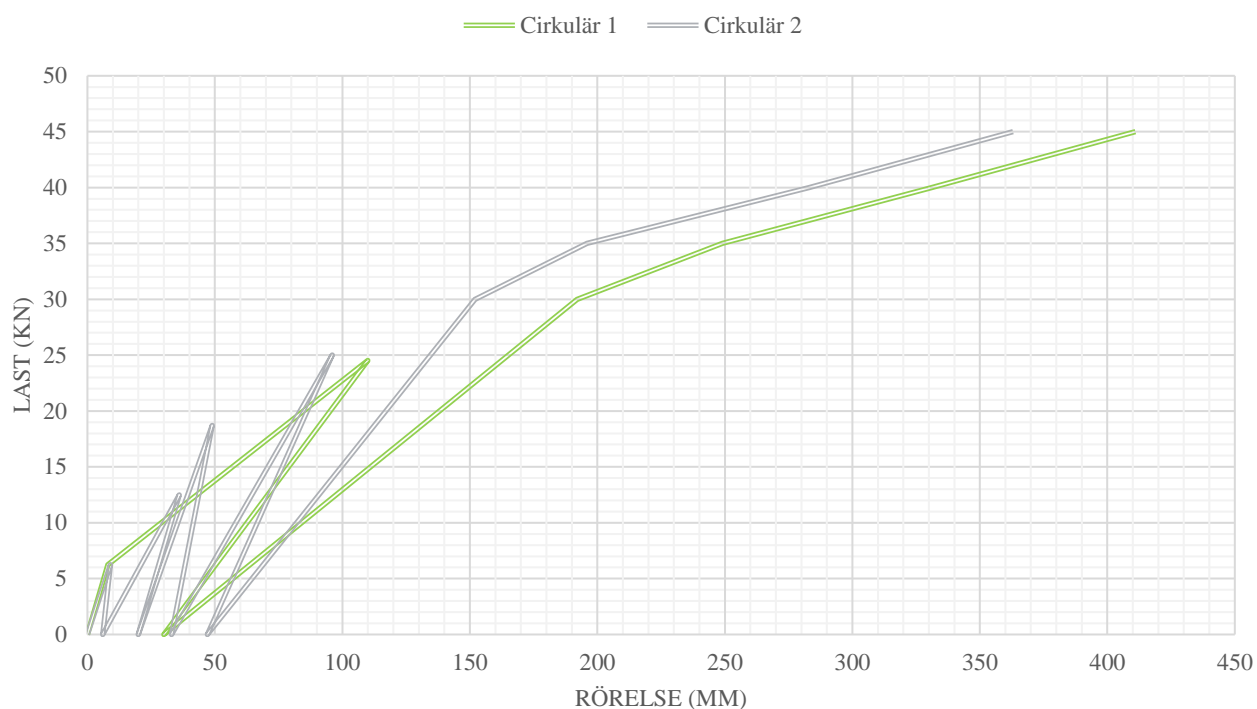
*Figur 2-5: Påltoppsrörelse vid maximal belastning,
Cirkulär 2*



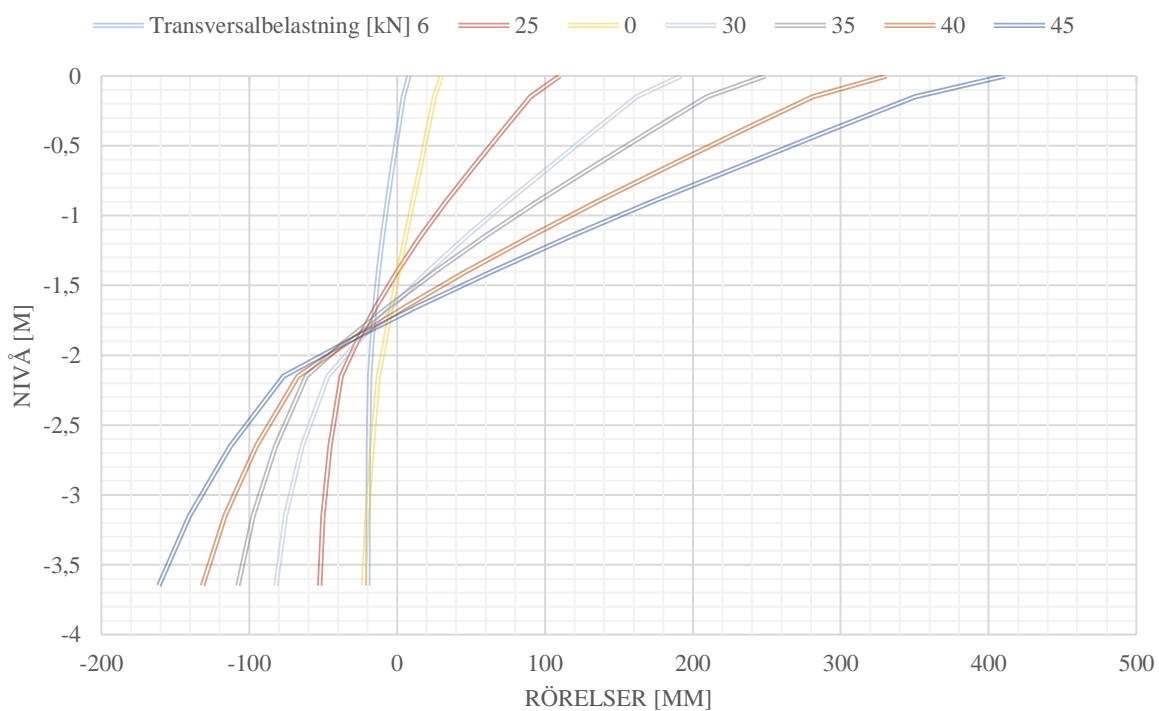
Figur 2-6: Påltoppsrörelse vid maximal belastning Kvadratisk påle



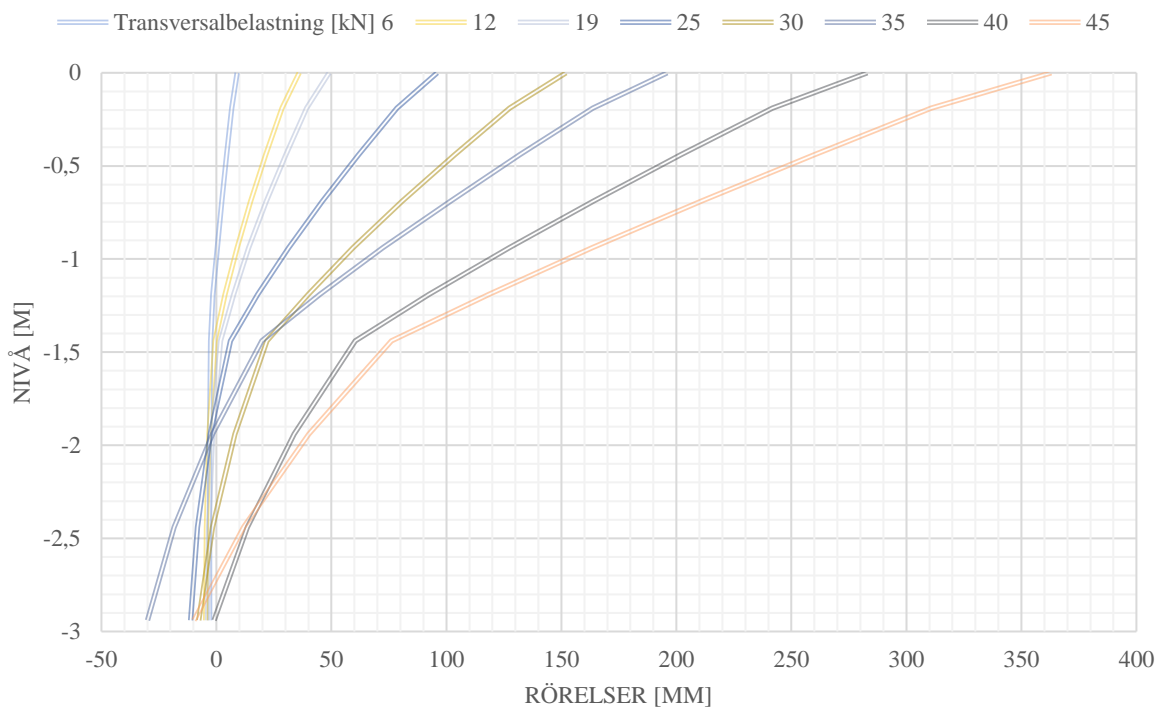
Figur 2-7: Påltoppsrörelse-Last diagram



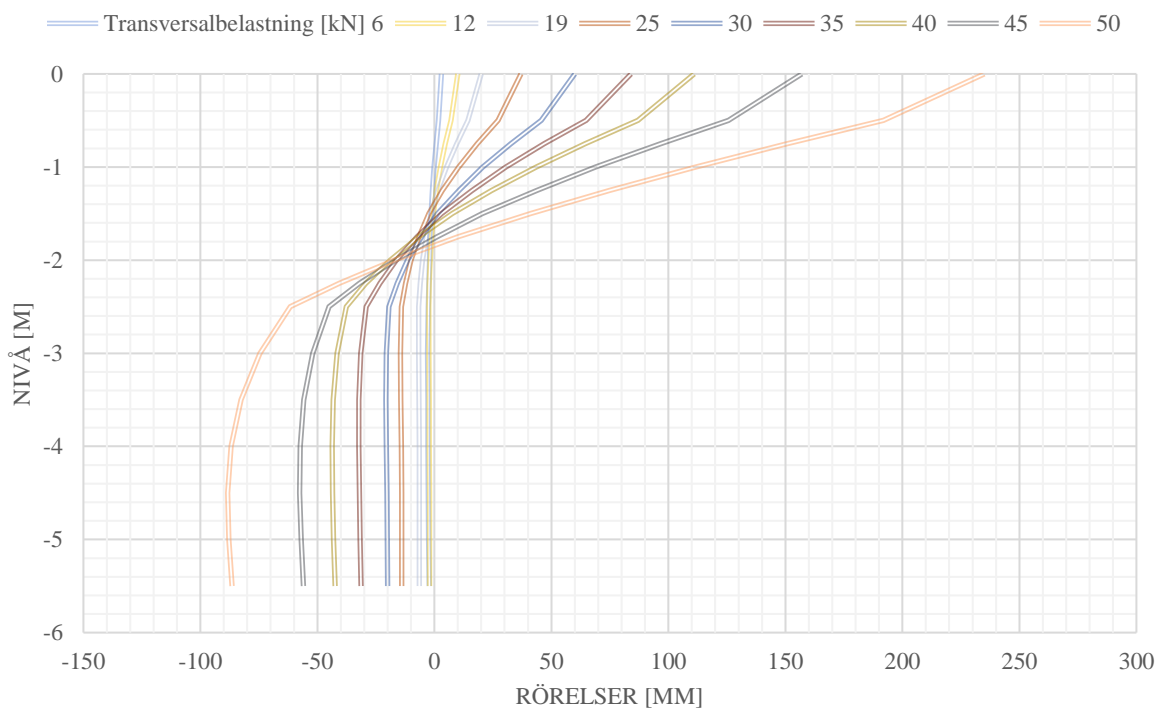
Figur 2-8: Påltoppsrörelse-Last diagram, cirkulära pålar



Figur 2-9: Inclinometermätningar Cirkulär påle 1



Figur 2-10: Inklinometermätningar Cirkulär påle 2



Figur 2-11: Inklinometermätningar Kvadratisk påle

3. ANALYTISKA BERÄKNINGAR

Analytiska beräkningar har utförts baserade på teori från Bengt Broms (1964). Teorin baseras på att pålelementet ses som ett balkelement upplagd på en Winklerbädd. Interaktionen mellan påle och jord bestäms av "parametern" bäddmodul. Bäddmodulen för en kohesionsjord kan antas beroende av jorden odränerade skjuvhållfasthet. För en normalkonsoliderad lera kan den odränerade skjuvhållfastheten antas öka linjärt med djupet. Detta beaktas ej vid beräkning av transversalbelastning, istället ses bäddmodulen som konstant. Fyra bäddmoduler har använts vid de analytiska beräkningarna i Jonefjälls examensarbete, dessa återges i ekvation (21), (24), (25) och (26) i Bilaga 2. De fyra bäddmodulerna har benämnts som k_1 , k_2 , k_3 och k_4 respektive, följt av beteckningen c eller v för cirkulär eller kvadratisk tvärsnitt. Bäddmodul 1 återfås av Broms (1965), bäddmodul 2 från Wu et al. (1998), bäddmodul 3 är den nuvarande svenska praxisen Råd Brobyggande (2019) och bäddmodul 4 den tidigare svenska praxisen från Handboken Bygg Geoteknik av Stål et al. (1984). Enligt svensk praxis återges bäddmodul för en lerjord som $k=200 \cdot c_u/d$, av denna anledning återges samtliga bäddmoduler enligt denna praxis

$$k_1 = \frac{192 \cdot c_u}{d \text{ eller } b_p} \quad 3-1$$

$$k_{2c} = \frac{178 \cdot c_u}{d} \quad 3-2$$

$$k_{2v} = \frac{176 \cdot c_u}{b_p} \quad 3-3$$

$$k_3 = \frac{200 \cdot c_u}{d \text{ eller } b_p} \quad 3-4$$

$$k_4 = \frac{80 \cdot c_u}{d \text{ eller } b_p} \quad 3-5$$

Bäddmodulerna 1–3 återger liknande magnitud på bäddmodulen. Av denna anledning jämförs endast beräkningar från den nuvarande svenska praxis ($200 \cdot c_u/d$) och den tidigare svenska praxisen ($80 \cdot c_u/d$). Kapaciteten för en transversalbelastad lerjord, P_u , kan skrivas som

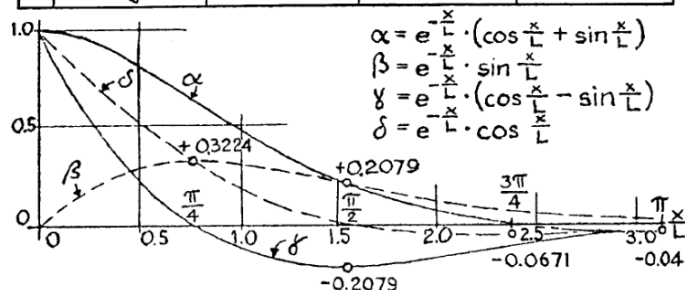
$$P_u = N_p \cdot c_u \cdot d \quad 3-6$$

där c_u är den odränerade skjuvhållfastheten på lerjorden, d diametern eller kantlängden på pålen och N_p är en bärighetsfaktor. N_p kan variera med djupet, vid ytan är bärighetsfaktorn normalt lägre än mot djupet. Elasticitetsmodulen av lerjorden som används vid analytiska beräkningar har analyserats från aktiva triaxialförsök. Elasticitetsmodulen justeras, med hänvisning till kapitel 4.5.1 SGI Information 3 (2007), till

$$E_{50-j} = E_{50} \cdot \frac{0,22}{0,33} \quad 3-7$$

för att beakta skillnaden mellan direkt och aktiv skjuvning. Spänningsfördelningen, $\sigma(z)$, som alstras till följd av transversalbelastning har beräknats enligt Handboken Bygg Geoteknik av Stål et al. (1984), se ekvation (60) i Bilaga 2. Genom Schwedlers teori och elastiska linjens differentialekvation kan tvärkraft-, $V(z)$, och momentfördelningen, $M(z)$, samt lutningsvinkeln, $y'(z)$, och utböjningen, $y(z)$, beräknas enligt ekvation (61), (62), (63) och (64). Beräknade värden kontrolleras därefter mot Figur 4.3a. i Pålkommisionens rapport 96 (1998), se Figur 3-1.

	$\downarrow P$	$\rightarrow M$	$\downarrow P$	$\rightarrow M$
Y	$\frac{P}{2cbL} \cdot \alpha$ $-\frac{PL^3}{8EJ} \cdot \alpha$	$\frac{M}{cbL^2} \cdot \beta$ $=\frac{ML^2}{4EJ} \cdot \beta$	$\frac{2P}{cbL} \cdot \delta$ $=\frac{PL^3}{2EJ} \cdot \delta$	$-\frac{2M}{cbL^2} \cdot \gamma$ $=-\frac{ML^2}{2EJ} \cdot \gamma$
Y'	$-\frac{P}{cbL^2} \cdot \beta$ $=-\frac{PL^2}{4EJ} \cdot \beta$	$\frac{M}{cbL^3} \cdot \gamma$ $=\frac{ML}{4EJ} \cdot \gamma$	$-\frac{2P}{cbL^2} \cdot \alpha$ $=-\frac{PL^2}{2EJ} \cdot \alpha$	$\frac{4M}{cbL^3} \cdot \delta$ $=\frac{ML}{EJ} \cdot \delta$
M	$\frac{PL}{4} \cdot \gamma$	$-\frac{M}{2} \cdot \delta$	$-PL \cdot \beta$	$M \cdot \alpha$
R_x	$-\frac{P}{2} \cdot \delta$	$-\frac{M}{2L} \cdot \alpha$	$-P \cdot \gamma$	$-\frac{2M}{L} \cdot \beta$
Y				
Y'				
M				
R_x				



Balk på fjädrande underlag.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{cb}}$$

Figur 3-1: Elementarfall för balk på fjädrande underlag belastad med punktlast och moment (Pålkommissionen, 1998)

 För att bestämma magnituden av brottlasten F_h används Figur 5.72:4 från Olsson & Holm (1993). För de testade pålarna återges dessa i Figur 3-2, x-axeln är

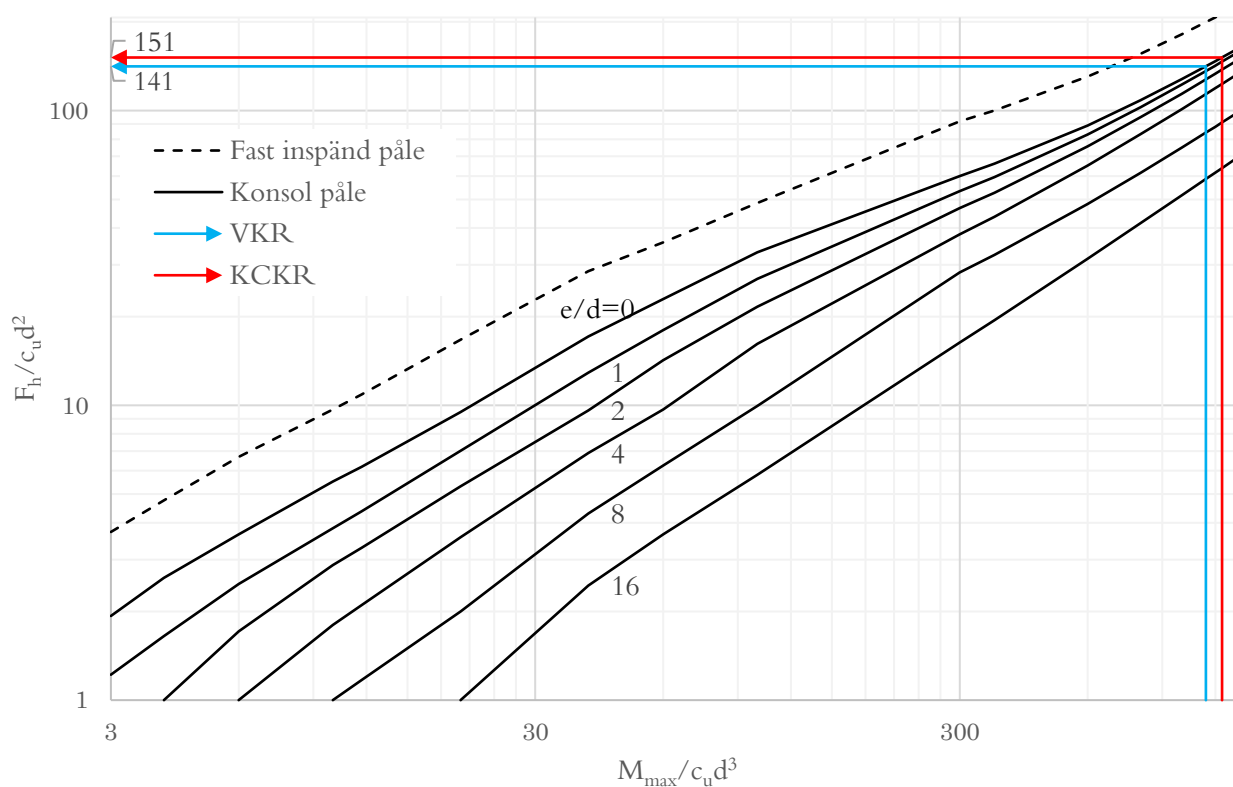
$$\frac{M_{Rd}}{c_u \cdot d^3} \quad 3-8$$

och y-axeln

$$\frac{F_h}{c_u \cdot d^2} \quad 3-9$$

 där e är vertikala distansen från belastningspunkten till markytan och d kantlängden eller diametern på pålen.

 Transversallasten antas verka vid markytan, d.v.s. $e/d=0$. Linjärextrapolering görs för att erhålla aktuella värden, se Figur 3-2. Genom följande arbetsgång har beräkningar gjorts för KCKR- och VKR-pålen. Den uppmätta förskjutningen från fältförsöket har därefter jämförts med den analytiskt beräknade förskjutningen vid korresponderande horisontallast.



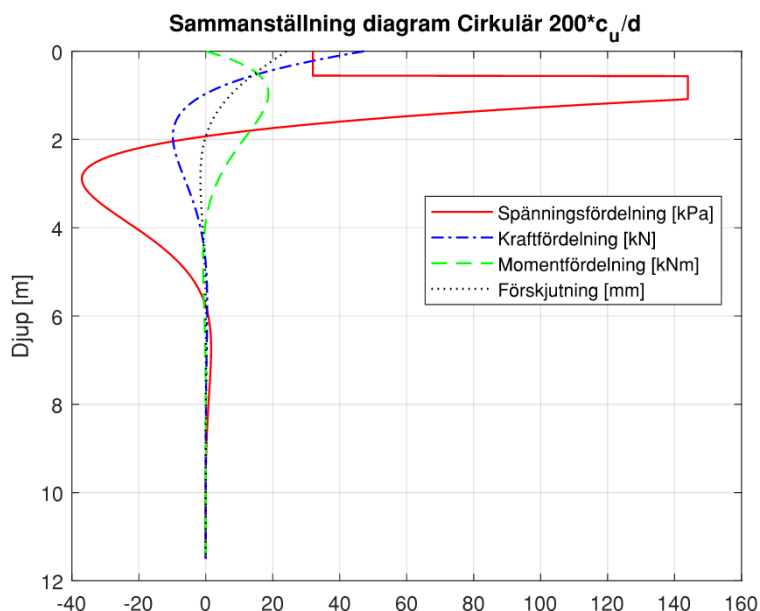
Figur 3-2: Bärförmåga för långa pålar i lera, figuren har linjärextrapolerats baserat på Figur 5.72:4 från Olsson & Holm (1993)

3.1. Resultat analytiska beräkningar

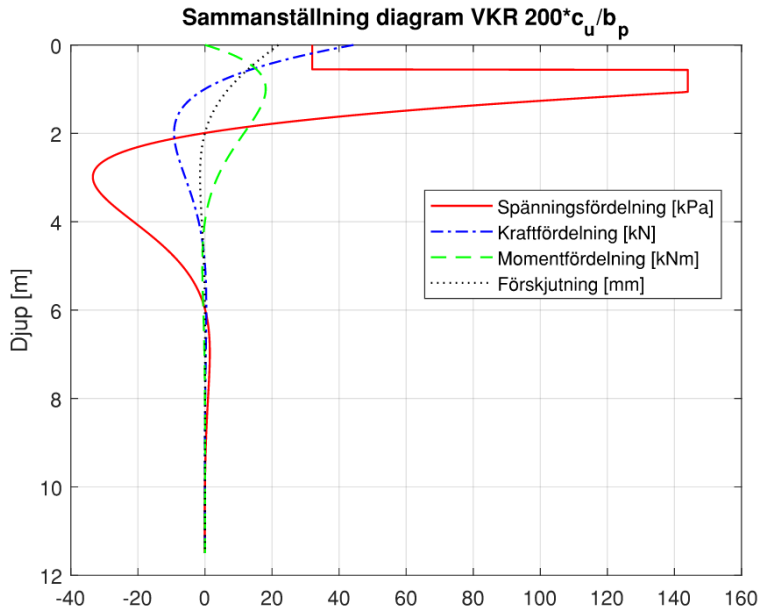
De analytiska beräkningarna är utförda i beräkningsverktyget Matlab. Materialparametrarna som använts vid beräkning vid brottlast F_h återges i Tabell 3-1. Bärighetsfaktorn N_p antas till 2 en distans 4 gånger diametern eller kantlängden från markytan. Därefter antas bärighetsfaktorn öka till 9. En sammanställning av de analytiska beräkningarna ses i Figur 3-3 och Figur 3-4 för $200.c_u/d$ och Figur 3-5 och Figur 3-6 för $80.c_u/d$. De analytiskt beräknade förskjutningarna jämförs med de uppmätta förskjutningarna vid 6, 12, 19, 25kN och maximal belastning för respektive tvärsnitt i Figur 3-7, Figur 3-8, Figur 3-9, Figur 3-10, Figur 3-11 och Figur 3-12.

Tabell 3-1: Materialegenskaper som använts för beräkning

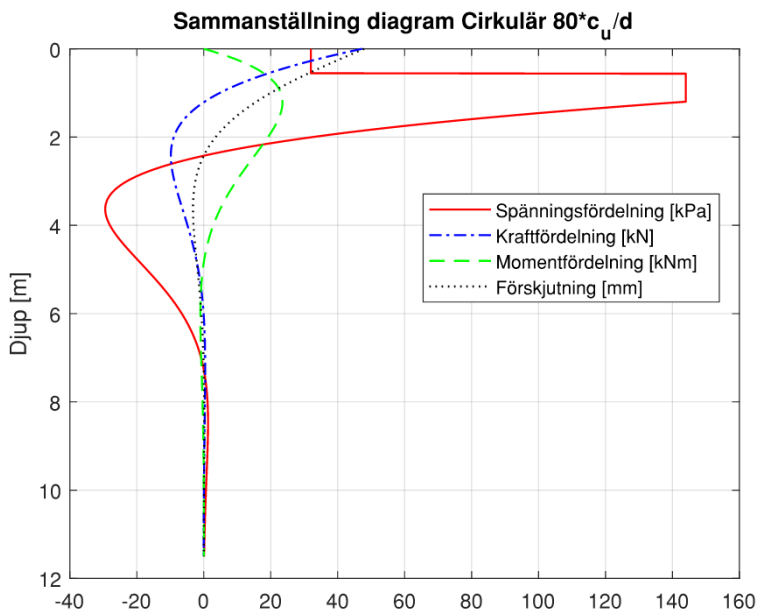
Allmänt	Beteckning	Enhet	Magnitud
Brottlast			
Brottlast KCKR-påle	F_{hc}	kN	47,3
Brottlast VKR-påle	F_{hv}	kN	44,3
Transversalbelastning			
Bärighetsfaktor vid ytan	$N_{p,y}$	-	2
Bärighetsfaktor mot djupet	$N_{p,d}$	-	9
Bäddmodul $200*c_u/d$ för KCKR-påle	k_{3c}	kPa/m	22 906
Bäddmodul $80*c_u/d$ KCKR-påle	k_{4c}	kPa/m	9 163
Bäddmodul $200*c_u/b_p$ för VKR-påle	k_{3v}	kPa/m	22 857
Bäddmodul $80*c_u/b_p$ för VKR-påle	k_{4v}	kPa/m	9 143



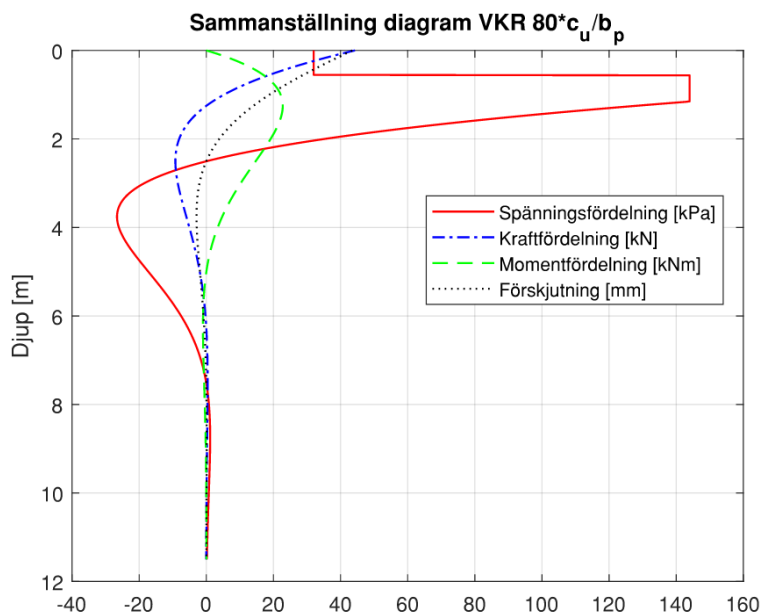
Figur 3-3: Sammanställning analytiska beräkningar vid brottlast för KCKR-påle med $200.c_u/d$



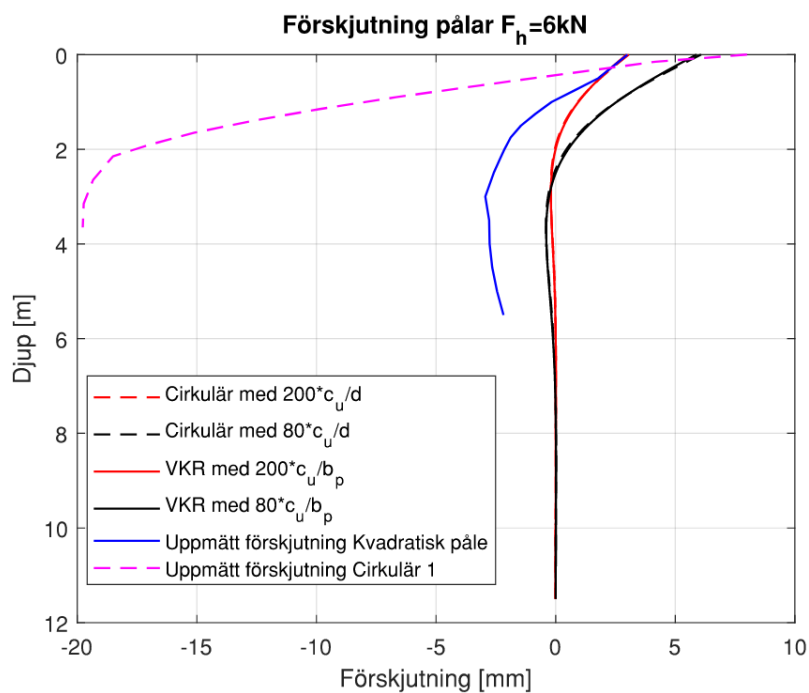
Figur 3-4: Sammanställning analytiska beräkningar vid brottlast för VKR-påle med 200.c_u/d



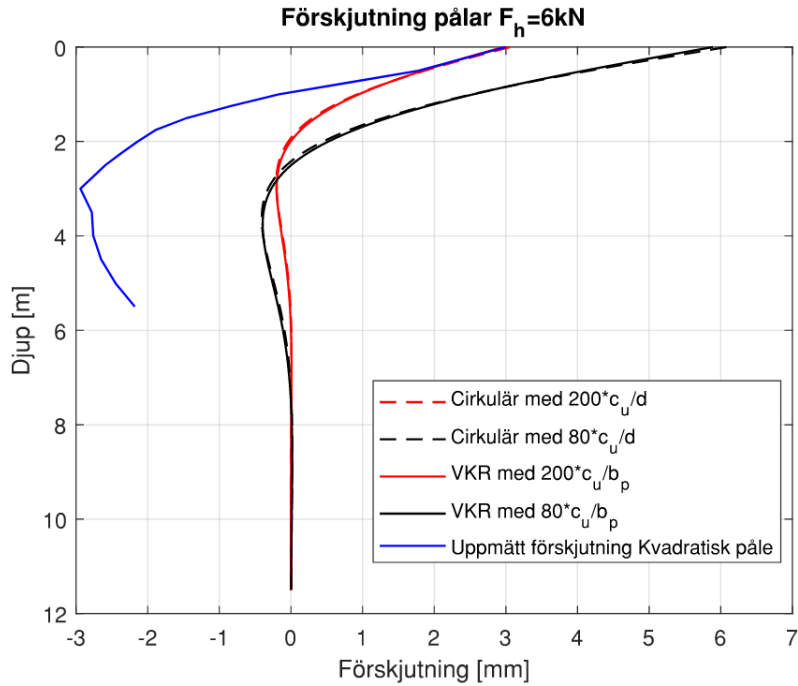
Figur 3-5: Sammanställning analytiska beräkningar vid brottlast för KCKR-påle med 80.c_u/d



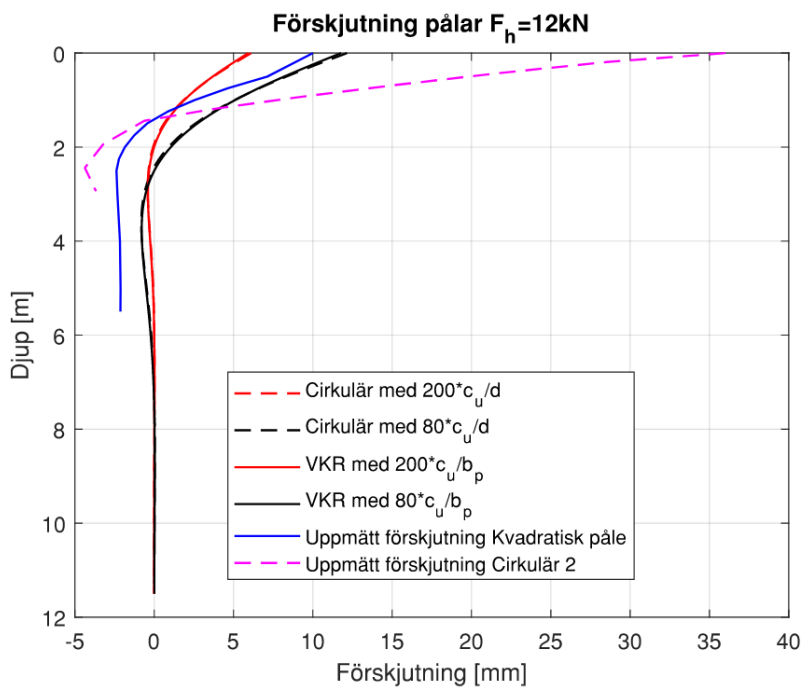
Figur 3-6: Sammanställning analytiska beräkningar vid brottlast för VKR-påle med $80 \cdot c_u / d$



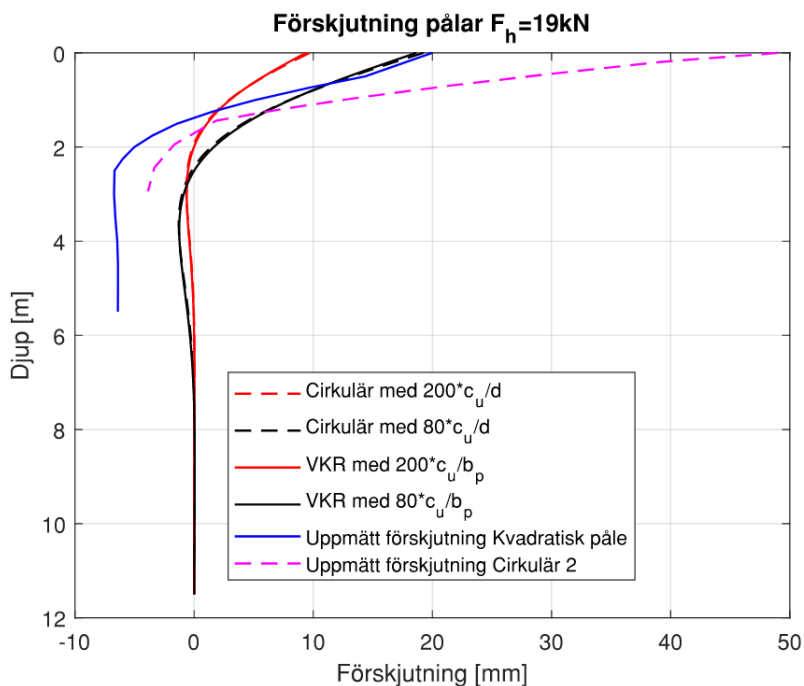
Figur 3-7: Jämförelse beräknad och uppmätt förskjutning vid $F_h=6kN$, endast uppmätt förskjutning från Kvadratisk påle och Cirkulär 1



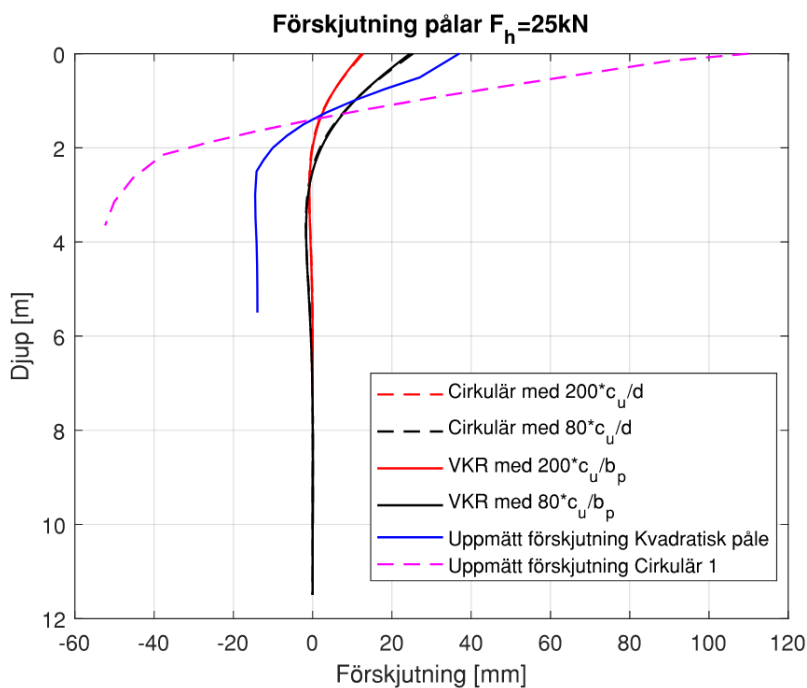
Figur 3-8: Jämförelse beräknad och uppmätt förskjutning vid $F_h=6kN$, endast uppmätt förskjutning från Kvadratisk påle



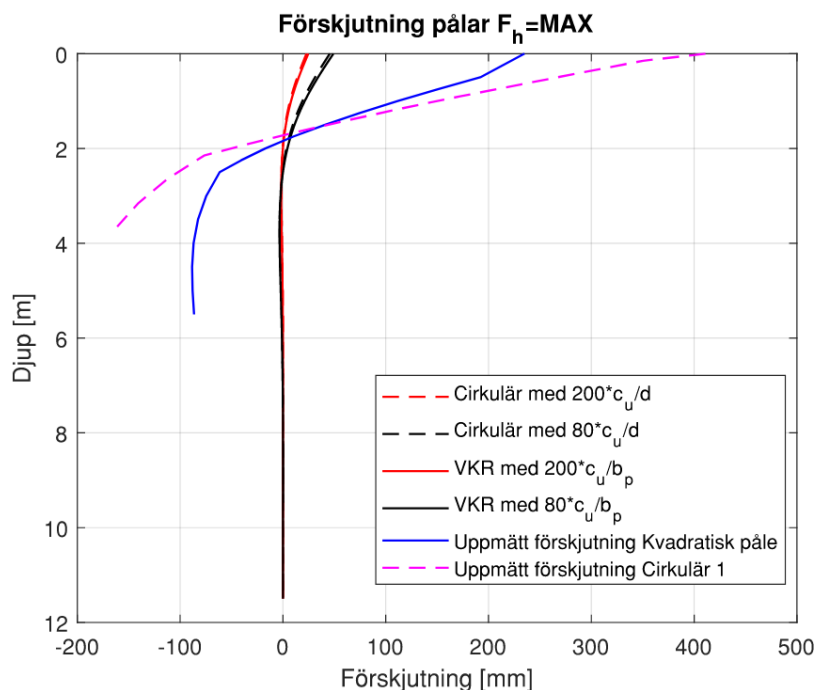
Figur 3-9: Jämförelse beräknad och uppmätt förskjutning vid $F_h=12kN$, endast uppmätt förskjutning från Kvadratisk påle och Cirkulär 2



Figur 3-10: Jämförelse beräknad och uppmätt förskjutning vid $F_h=19kN$, endast uppmätt förskjutning från Kvadratisk påle och Cirkulär 2



Figur 3-11: Jämförelse beräknad och uppmätt förskjutning vid $F_h=25kN$, endast uppmätt förskjutning från Kvadratisk påle och Cirkulär 1



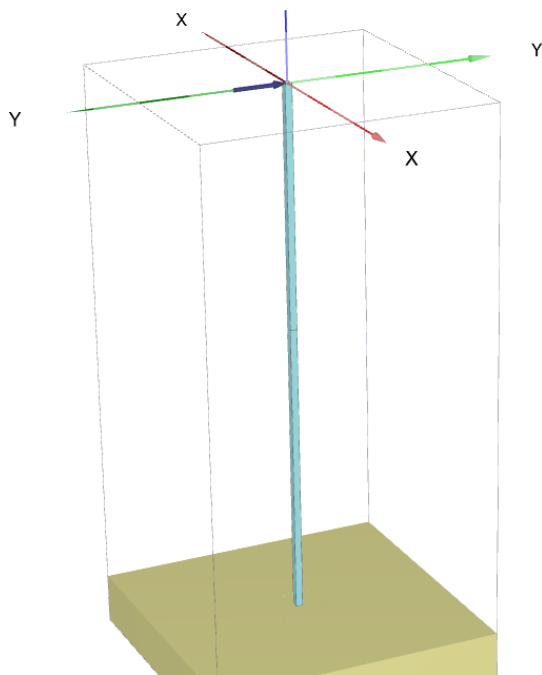
Figur 3-12: Jämförelse beräknad och uppmätt förskjutning vid maximal belastning endast uppmätt förskjutning från Kvadratisk påle och Cirkulär 1

4. BERÄKNING FE-MODELL

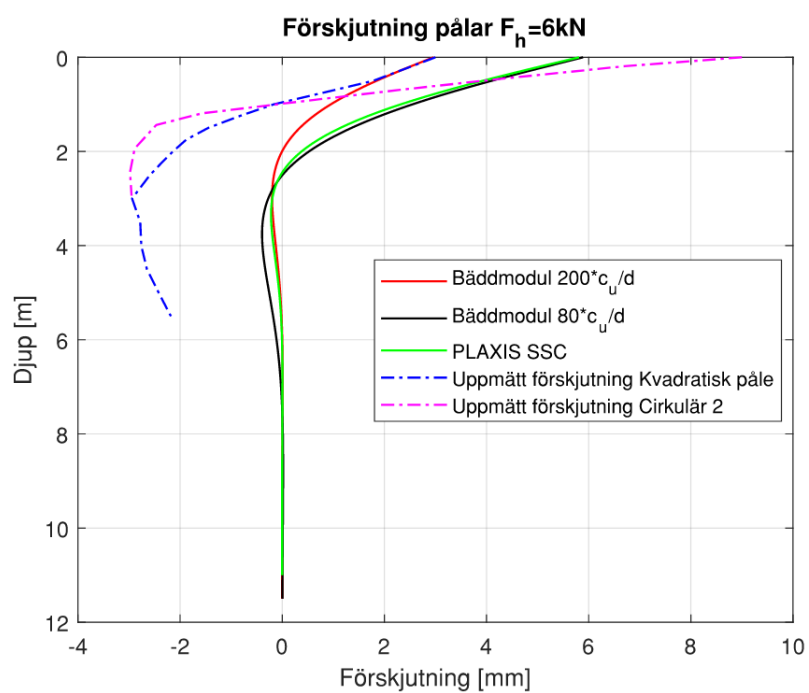
En FE-analys är utförd med beräkningsverktyget PLAXIS 3D. En beräkning är utförd där VKR-pålen är modellerad som en volympåle. Jorden är modellerad med Soft Soil Creep, SSC (Bentley Systems, 2022). Använda materialparametrar kan ses i Tabell 4-1. En $3 \times 3 \text{ m}^2$ area är modellerad, se Figur 4-1. Påsens last-deformationskurva jämförs med den uppmätta och den analytiskt beräknade förskjutningen. Beräkningar är utförd för 6, 12 och 19 kN, se Figur 4-2, Figur 4-3, Figur 4-4 respektive.

Tabell 4-1: Materialparametrar för modellering med SSC

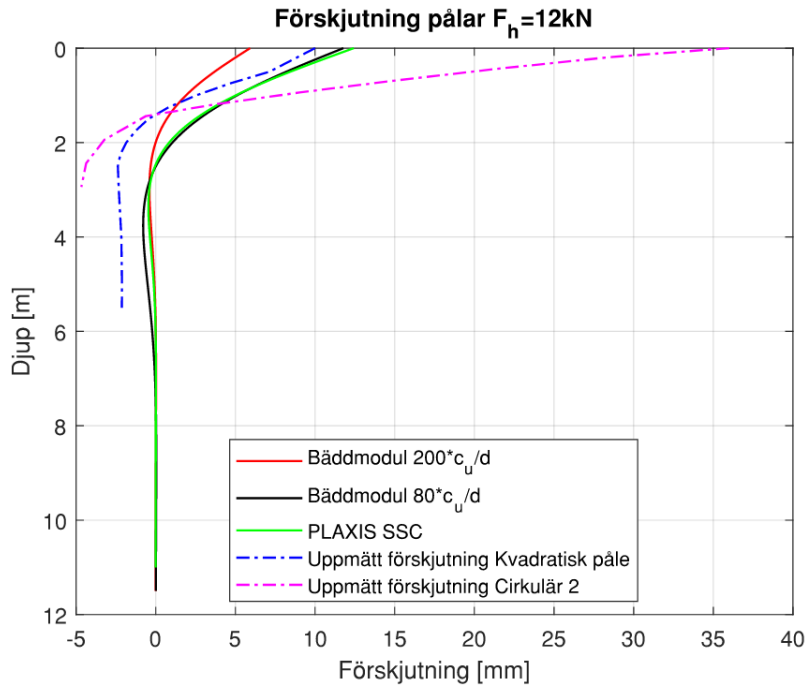
Allmänt	Beteckning	Magnitud
Plastisk styvhet	λ^*	0,2
Elastisk styvhet	κ^*	0,009
Modifierad kryptindex	μ^*	0,00460
Viljordtryckskoefficient	K_0	0,530
Viljordtryckskoefficient för normalkonsoliderat förhållande	K_0^{nc}	0,5
Av/pålastning kontraktionstal	ν_{ur}	0,2
Förkonsolideringstryck / Överkonsolideringskvot	POP/OCR	1,12
Effektiv kohesion	c' [kPa]	2
Inre friktionsvinkel	φ'	30
Initial portal	e_{init}	1,90



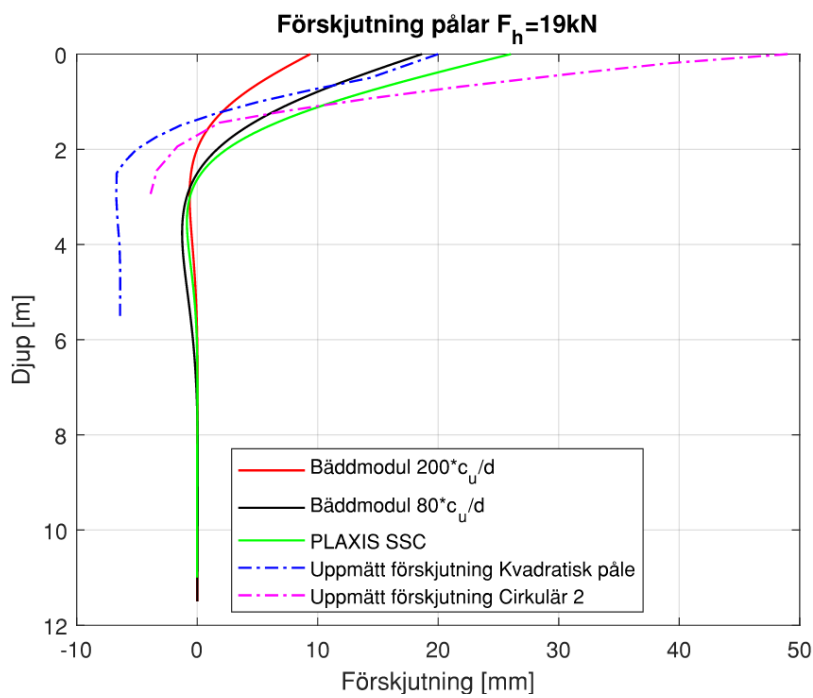
Figur 4-1: Urklipp från PLAXIS 3D



Figur 4-2: Jämförelse av PLAXIS, analytiska och uppmätta förskjutningar vid $F_h=6kN$



Figur 4-3: Jämförelse av PLAXIS, analytiska och uppmätta försjutningar vid $F_h=12kN$



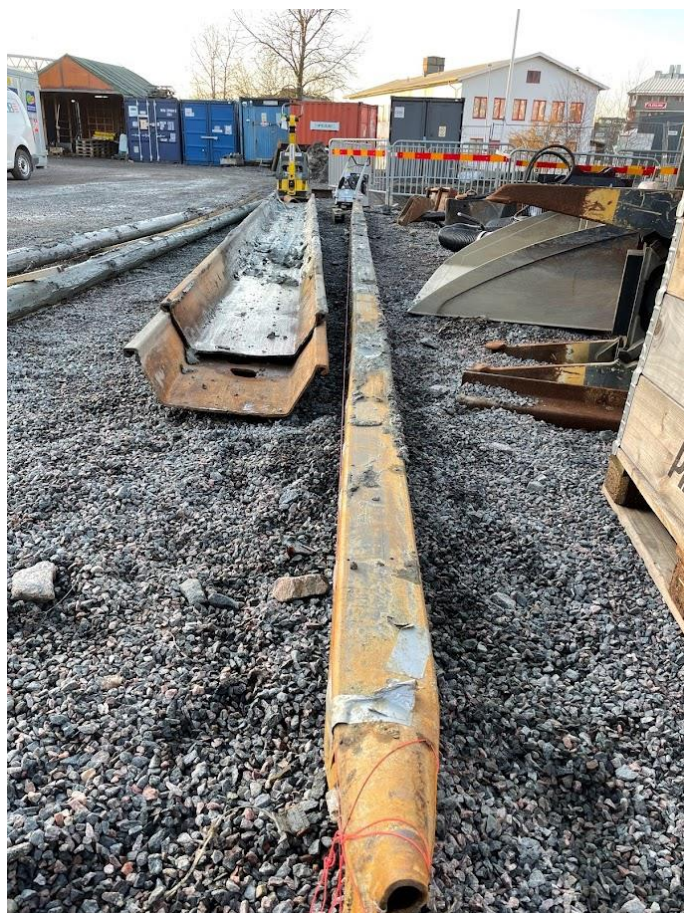
Figur 4-4: Jämförelse av PLAXIS, analytiska och uppmätta försjutningar vid $F_h=19kN$

5. MÄTNING EFTER UPDRAGNING

Då belastningsförsöket var utfört drogs pålar och spont med grävmaskin utrustad med MOVAX. Som referens kontrollerades krökningen av pålarna med murarsnöre som fästes i påltopp och vid pålskon, se Figur 5-1 och Figur 5-2. Den plastiska deformationen i påltopp mättes därefter med hjälp av totalstation och prisma som sattes längst med respektive påle. Mätpunkter med cc ca 0,5m användes. Uppmätt deformation redovisas i Tabell 5-1. Figur 5-3 visar illustrativt hur den plastiska deformationen är beräknad. Det skall observeras att pålarna skadades vid uppdragning, se Figur 5-1.

Tabell 5-1: Uppmätt deformation i påltopp efter uppdragning

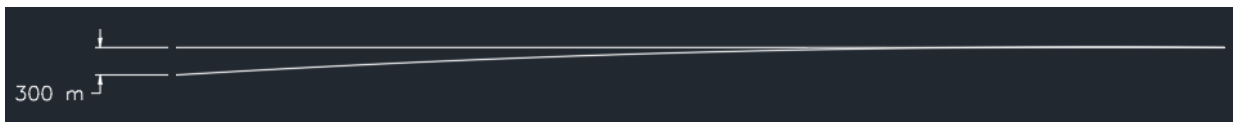
Påle	Deformation [mm]
Cirkulär 1	178.9
Cirkulär 2	23.8
Kvadratisk	15.5



Figur 5-1: Uppdragen kvadratisk påle med murarsnöre



Figur 5-2: Uppdragna cirkulära pålar med murarsnöre



Figur 5-3: Schematiskt skiss av redovisad plastisk påltoppsdeformation på pålar

6. DISKUSSION

Nedan följer en kortare diskussion gällande det resultat som erhållits från fältförsök samt den jämförelse som gjorts mellan uppmätt och beräknad förskjutning.

6.1. Resultat fältförsök

Rotationsdjupet för Cirkulär 1 verkar ligga vid 1,7m djup vid 45kN last. För Cirkulär 2 verkar rotationsdjupet ligga vid 2,8m djup vid 45kN last. För Kvadratisk påle verkar rotationsdjupet ligga vid 1,9m djup vid 50kN last. Varför rotationsdjupet i Cirkulär 2 skiljer sig med cirka 1 meter jämfört med de andra pålarna kan bero på att Cirkulär 1 störde Cirkulär 2 då den provdrogs. Ifall jorden redan är influerad och störd kan plasticering redan ha påbörjats och sidomotståndet minskat. Något som styrker detta är sprickan som uppstod mellan Cirkulär 1 och 2, se Figur 2-5. Varför detta inte skedde då Kvadratisk påle provdrogs är okänt. Eventuellt är influenzonen större för en kvadratisk påle jämfört med de cirkulära. Detta kan anses rimligt då sidorna på det kvadratiske tvärsnittet kan nyttjas.

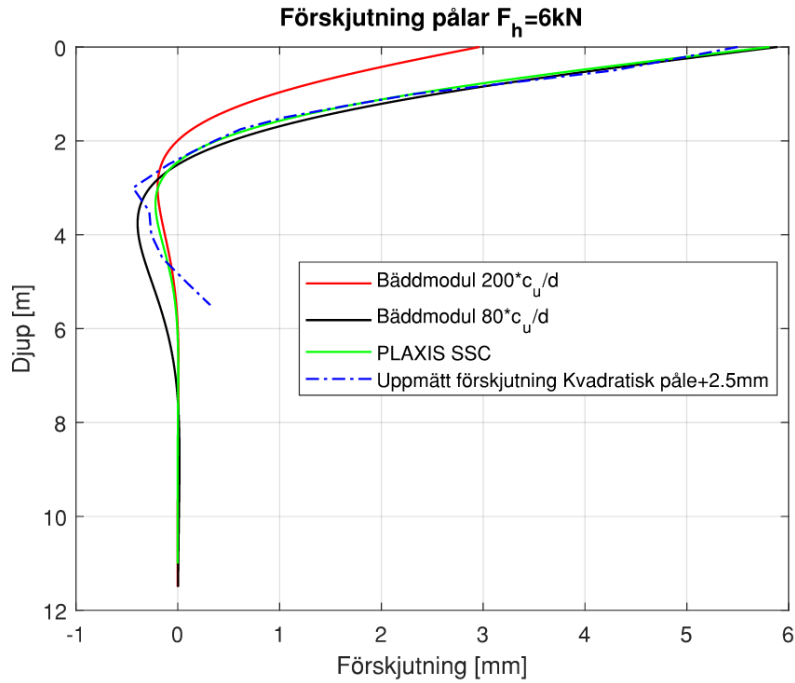
Den kvadratiske pålen påvisar betydligt mindre förskjutning jämfört med Cirkulär 1 och 2. Påltoppsförskjutningen för den kvadratiske pålen är hälften så stor som för Cirkulär 1 och 2.

Den uppmätta deformationen i påltopp som redovisas i avsnitt 5 redovisar att samtliga pålar utsatts för plastiska deformationen. En del av den plastiska deformationen kan vara orsakad vid uppdragning, särskilt deformationer vid grepppunkter för MOVAX. Det bör dock ej förkastas att plastiska deformationer i pålelementet troligen har uppstått vid belastningsförsöket. Varför den plastiskt uppmätta deformationen på Cirkulär 1 är avsevärt större än övriga kan dels bero på handhavande fel vid inmätning. Det observerades dock att deformationen på Cirkulär 1 var större jämfört med övriga. Det kan ha orsakats av oförsiktig dragning som orsakat större skador på pålen. Det kan även bero på att pålen uppmätt störst rörelser vid belastning, vilket kan ha orsakat mer plastiska deformationer.

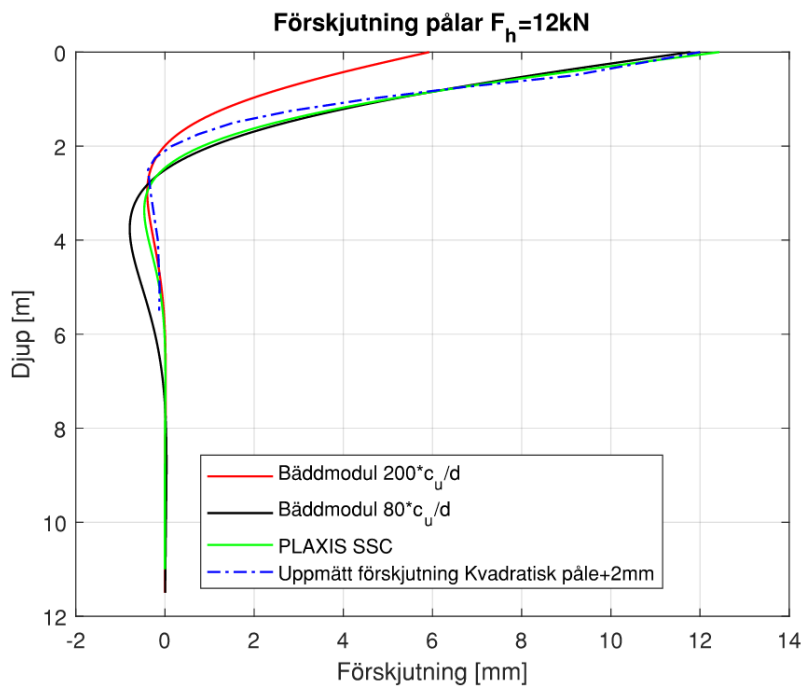
6.2. Jämförelse uppmätt och beräknad förskjutning

Det uppmätta rotationsdjupet verkar närmare markytan jämfört med den beräknade för samtliga lastfall. Analytiska beräkningar med bäddmodul $80 \cdot c_u/d$ påvisar liknande rörelsemönster som det uppmätta. Påltoppsförskjutningen 6, 12 och 19 kN stämmer relativt väl för den kvadratiske pålen jämfört med $80 \cdot c_u/d$. Påltoppsförskjutningen för Cirkulär 1 och Cirkulär 2 är betydligt större än samtliga beräkningar. Rotationsdjupet för Cirkulär 1, Cirkulär 2 och kvadratiske pålen är högre belägen jämfört med de analytiska beräkningarna för låga laster. Vid högre laster stämmer rotationsdjupet bättre överrens. ”Rekylen”, negativa förskjutningar i Figur 3-7 till Figur 3-12, är betydligt större för de uppmätta förskjutningarna jämfört med de analytiska beräkningarna.

En parallellförskjutning av de uppmätta värdena har utförts vid 6 respektive 12kN för de uppmätta förskjutningarna för den kvadratiske pålen. De uppmätta värdena är parallellförskjutna med 2.5mm vid 6kN belastning, se Figur 6-1, och 2.0mm vid 12kN belastning, se Figur 6-2.



Figur 6-1: Parallellförskjutning av uppmätt förskjutning med 2.5mm



Figur 6-2: Parallellförskjutning av uppmätt förskjutning med 2mm

7. SLUTSATS

Jordens respons för den kvadratiske pålen är betydligt styvare jämfört med de två cirkulära, Cirkulär 1 och 2. Vid belastning av den kvadratiske pålen erhöles ungefär hälften så stora förskjutningar jämfört med Cirkulär 1 och 2. Den elastiska responsen vid belastning kan antas stämma för högre laster för ett kvadratisk tvärsnitt jämfört med de cirkulära. En möjlighet kan vara att det kvadratiske tvärsnittet mobiliserar större area och därmed ökar sidomotståndet. En annan kan vara att jorden har enklare att röra sig runt den cirkulära pålen jämfört med den kvadratiske. Böjstyvheten för VKR-pålen är ungefär 14 % högre jämfört med de cirkulära pålarna, se Tabell 3-1. För långa pålar, vilket detta klassas som, beror förskjutningen dels på lerans och pålens styvhet. Det faktum att VKR-pålen är 14 % styvare än de cirkulära pålarna inverkar förskjutningen som erhållits. Vid jämförelse mellan inklinometermätningarna och de analytiskt beräknade värdena ses stora skillnader mellan de tre tvärsnitten vid höga laster. Den stora skillnaden mellan det kvadratiske och cirkulära tvärsnittet existerar inte i de analytiska beräkningarna. Detta kan bero på att majoriteten av experiment utförts med cirkulära pålar och kunskapen om kvadratiske pålar är begränsade.

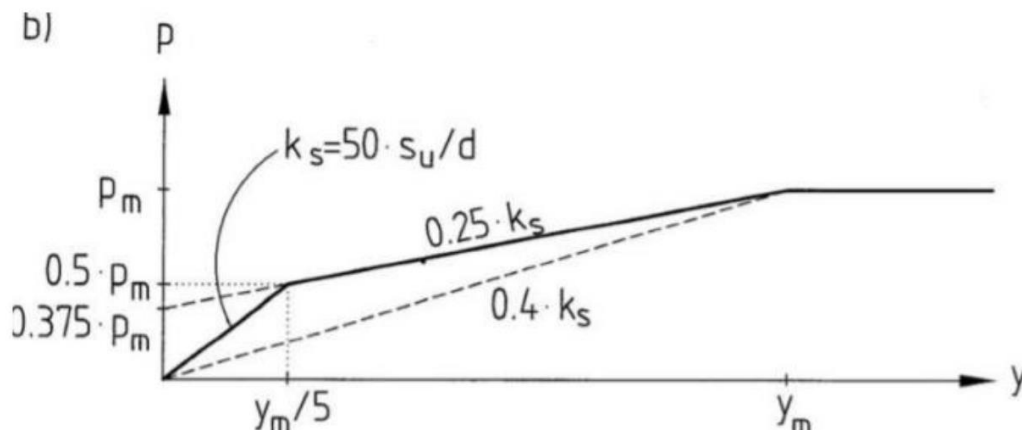
De utförda beräkningarna är gjorda baserat på att jordlagerföljden består av ren lera. Detta är inte fallet vilket är en viktig faktor att ha med sig vid analysering av resultatet. För beräkningar där sandlagren beaktas behövs vidare studier.

Efter resultatet från testbelastningen utförts har vi varit i kontakt med Per-Evert Bengtsson för diskussion och bättre förståelse av testresultat. Per-Evert antar att den stora förskjutningen och det låga sidomotståndet kan bero på en eventuell torrskorpa vid och under schaktbotten. Torrskorpan har väldigt lågt sidomotstånd ($N_p \approx 0$) och bidrar till stora förskjutningar. När väl leran belastas verkar ett tillskottsmoment då påltoppen är redan utböjd. Per-Evert nämner även att kontaktarean kan influera sidomotståndet av pålen. VKR-pålen har cirka 24 % större kontaktarea jämfört med de cirkulära pålarna. Det skall observeras att detta ej beaktas med genom de analytiska beräkningarna som beror strikt på kantlängden/diametern på pålen. Detta tillsammans med skillnaden i styvhet kan bidra till den skillnad i resultat som erhållits.

De analytiska beräkningarna med bäddmodul $80.c_u/d$ eller b_p , uppskattar förskjutningen bäst jämfört med den uppmätta förskjutningen även vid små belastningar. De analytiska beräknade förskjutningarna verkar stämma bättre överens vid låga belastningar och överskattar styvheten i leran vid höga laster. De analytiskt beräknade rörelserna stämmer bättre överens med de uppmätta rörelserna i den kvadratiske pålen. Alltså verkar beräkningarna stämma bättre överens med ett kvadratisk tvärsnitt. Värt att poängtera är att förskjutningarna som fås vid högre laststegen troligen överskrider acceptabel förskjutning för bruksgränstillstånd.

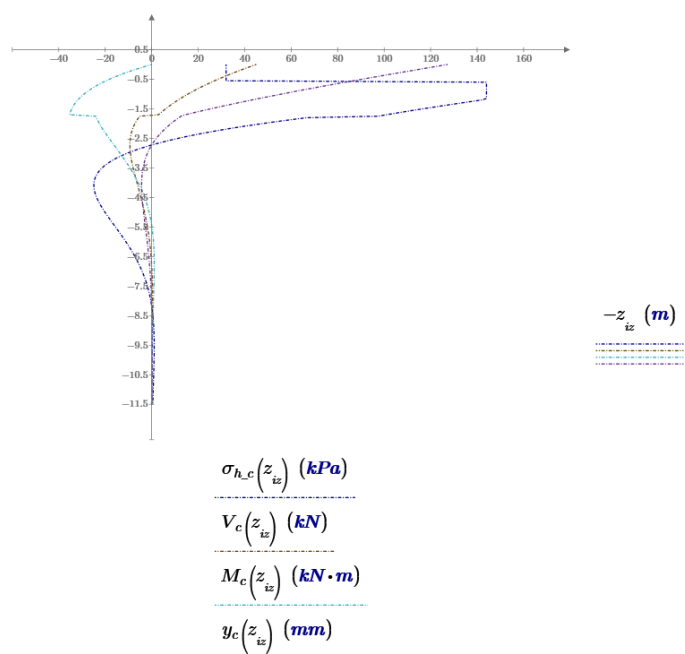
Då förskjutningarna från FE-modell jämförs med de uppmätta och de analytiska följer förskjutningarna $80.c_u/d$ till rotationsdjupet och därefter $200.c_u/d$ för låga belastningar. FE-modellen verkar reducera styvheten i leran baserat på avstånd från markytan, likt variationen i N_p mot djupet.

För beräkning av knäckning utav pålar i Finland antas en bilinjär idealplastiskt respons av jorden för korttidsbelastning, se Figur 7-1 (Pålkommissionen, 2018), detta används för att beräkna jordprofilens sidomotstånd. Det kan vara av intresse att beräkna transversalbelastning genom liknande bilinjäritet då elastisk-idealplastisk analys överskattar styvheten.

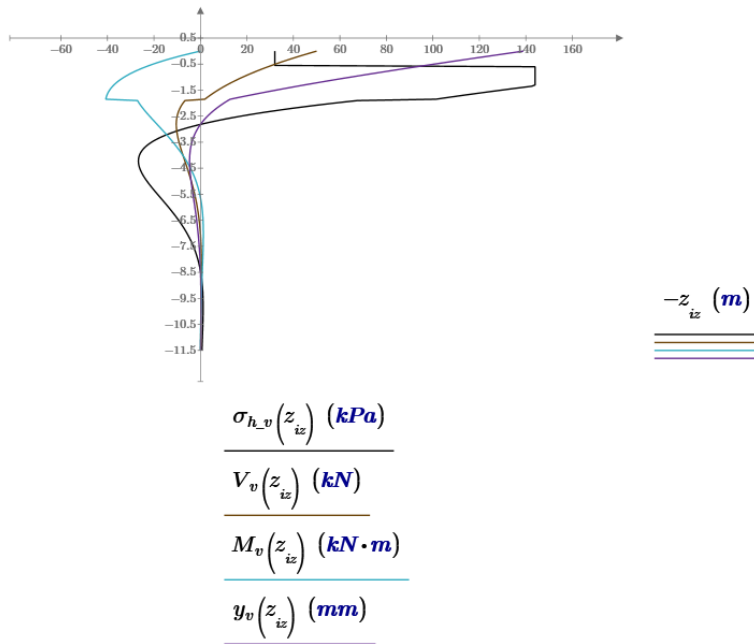


Figur 7-1: Kapacitet för beräkning av knäckning utav pålar i Finland (Pålkommissionen, 2018)

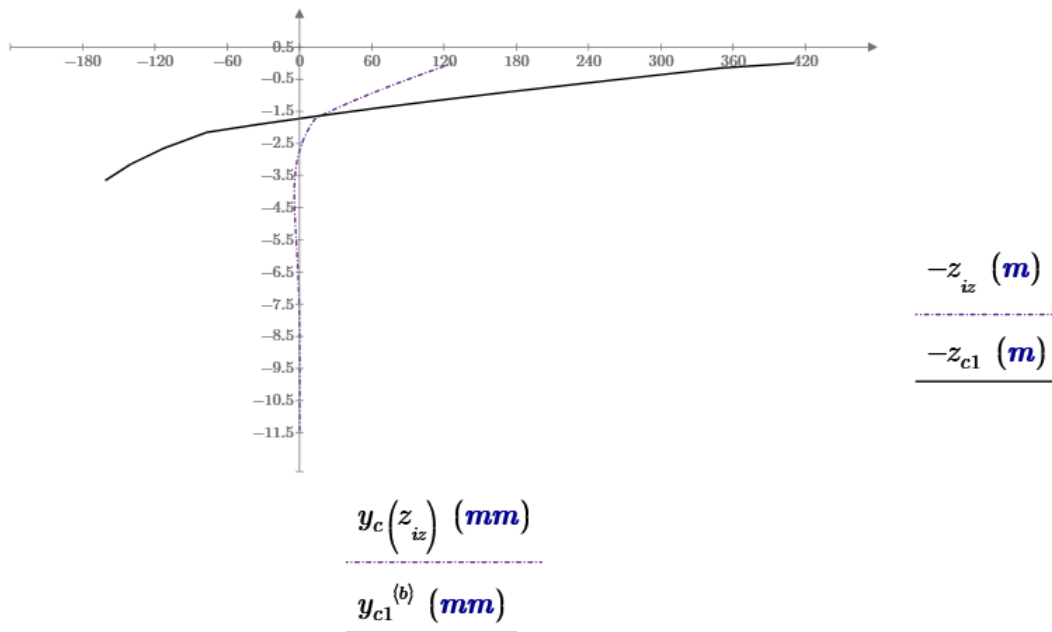
Beräkningar med detta bilinjära samband har gjorts i dataverktyget MathCad. Beräkningar för KCKR-påle med maximal belastning enligt fältförsöket har gjorts likt tidigare analytiska beräkningar, se Figur 7-2. För VKR-påle se Figur 7-3. Den platå som ses vid för spänning-, tvärkraft-, och momentfördelningen beror på ett ”hopp” från beräkningar med bäddmodul $50 \cdot c_u / d$ till beräkning med $0,25 \cdot (50 \cdot c_u / d)$ när $0,5 \cdot p_u$ är nådd. Extrapolering för lutningsvinkel och förskjutning är utförd, ty liknande ”hopp” är orimligt. Dessa kan jämföras mot uppmätta förskjutningar från fältförsök, för Cirkulär 1 vid maximal last se Figur 7-4, för Cirkulär 2 vid maximal last se Figur 7-5 och för Kvadratisk påle vid maximal last se Figur 7-6. För Cirkulär 1 vid 6kN se Figur 7-7, för Cirkulär 2 vid 6kN se Figur 7-8 och för Kvadratisk påle se Figur 7-9. För Cirkulär 2 vid 12kN se Figur 7-10 och för Kvadratisk påle vid 12kN se Figur 7-11. Den uppmätta förskjutningen i Figur 7-6 och Figur 7-9 har parallellförflyttats.



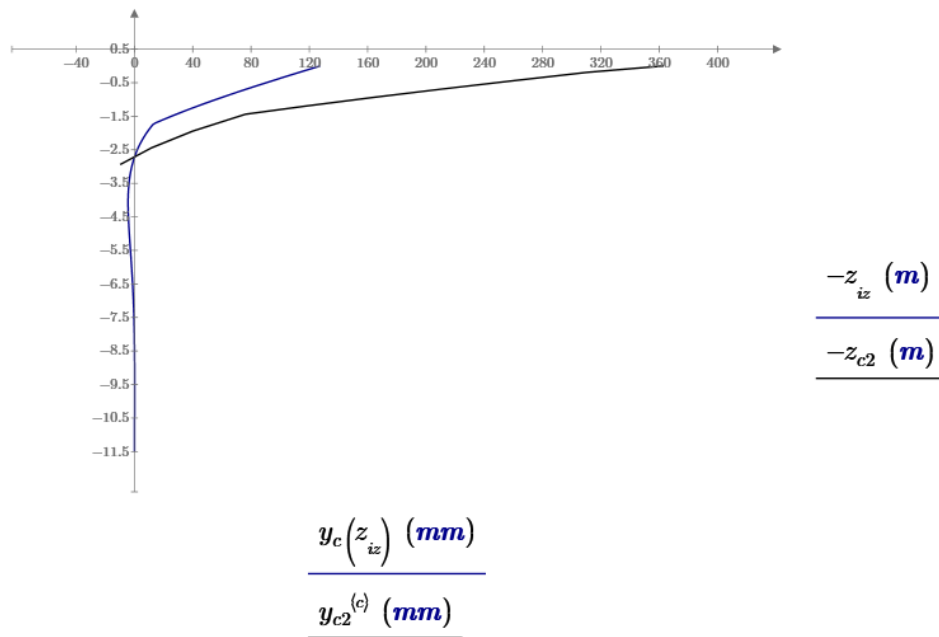
Figur 7-2: Sammanställning diagram för cirkulärt tvärsnitt, beräknade med finska bäddmodulen vid maximal last



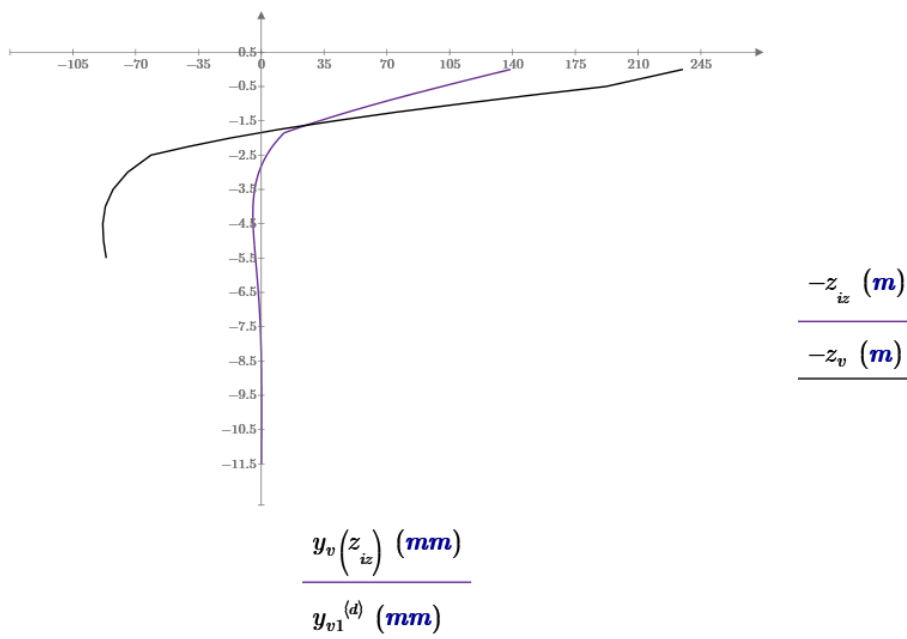
Figur 7-3: Sammanställning diagram för kvadratisk tvärsnitt, beräknade med finska bäddmodulen vid maximal last



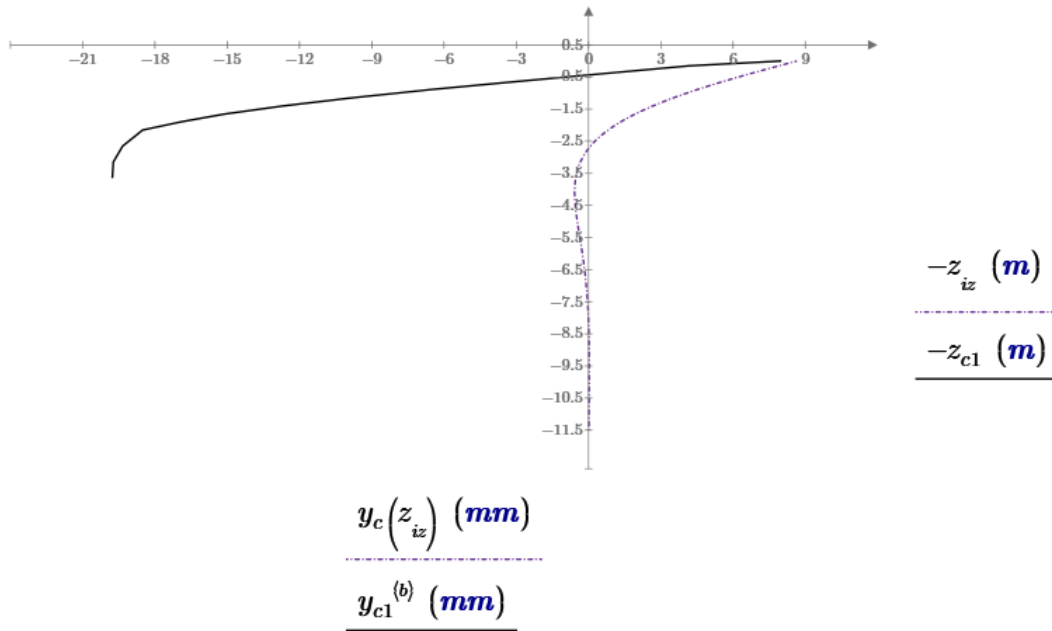
Figur 7-4: Jämförelse uppmätt förskjutning Cirkulär 1 och beräknad förskjutning med finska bäddmodulen vid maximal last



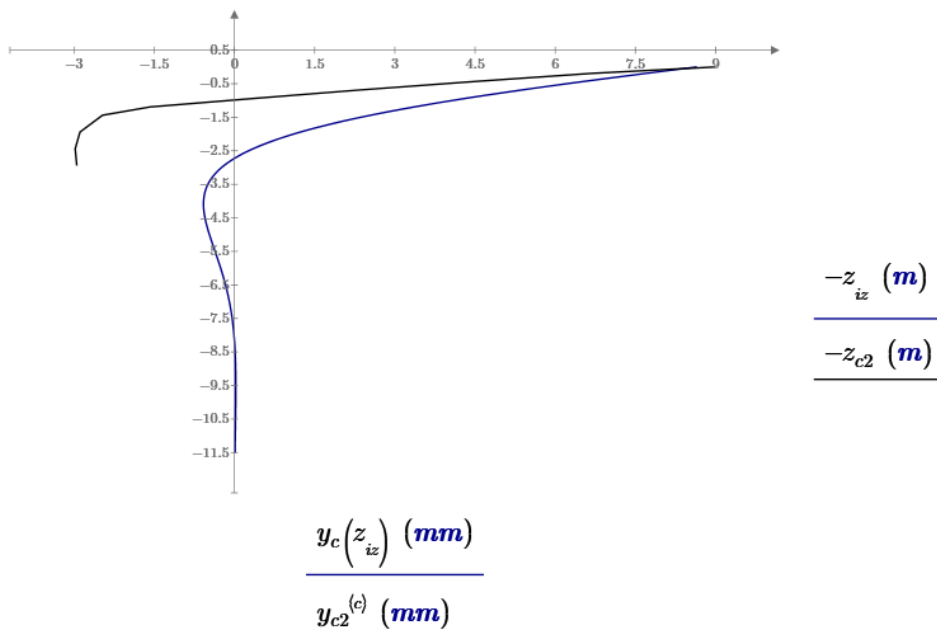
Figur 7-5: Jämförelse uppmätt förskjutning Cirkulär 2 och beräknad förskjutning med finska bäddmodulen vid maximal last



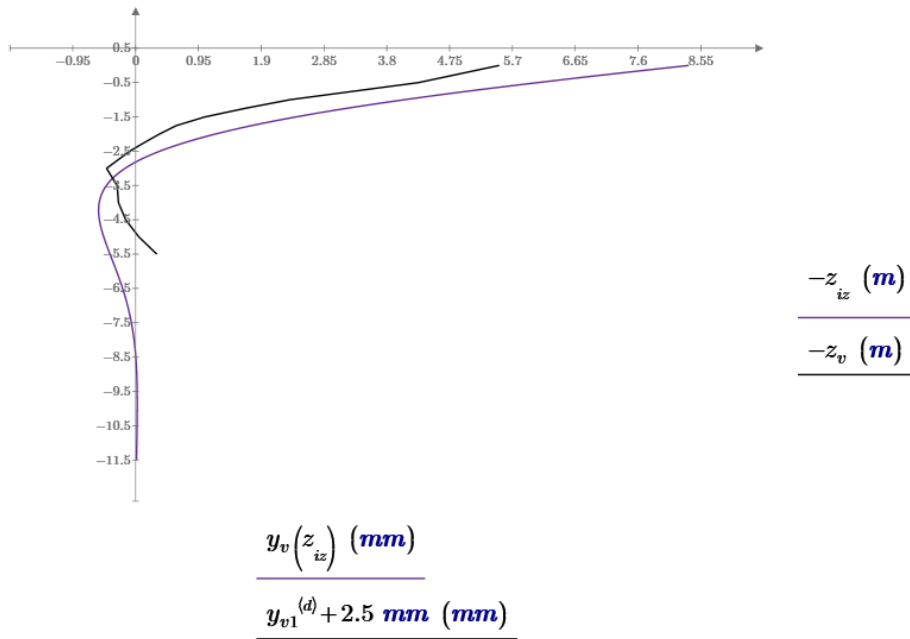
Figur 7-6: Jämförelse uppmätt förskjutning Kvadratisk påle och beräknad förskjutning med finska bäddmodulen vid maximal last



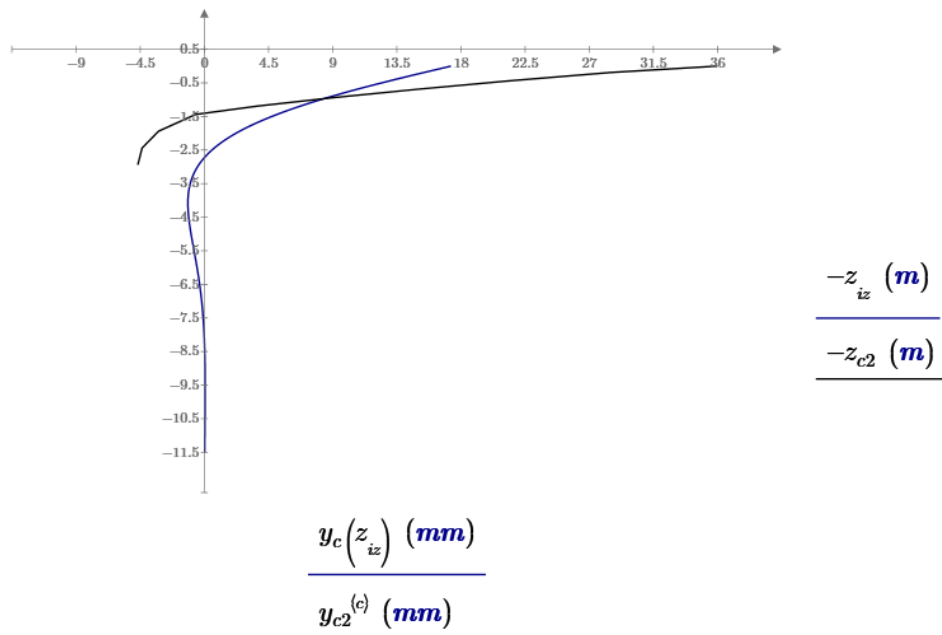
Figur 7-7: Jämförelse uppmätt förskjutning Cirkulär 1 och beräknad förskjutning med finska bäddmodulen vid $F_h=6kN$.



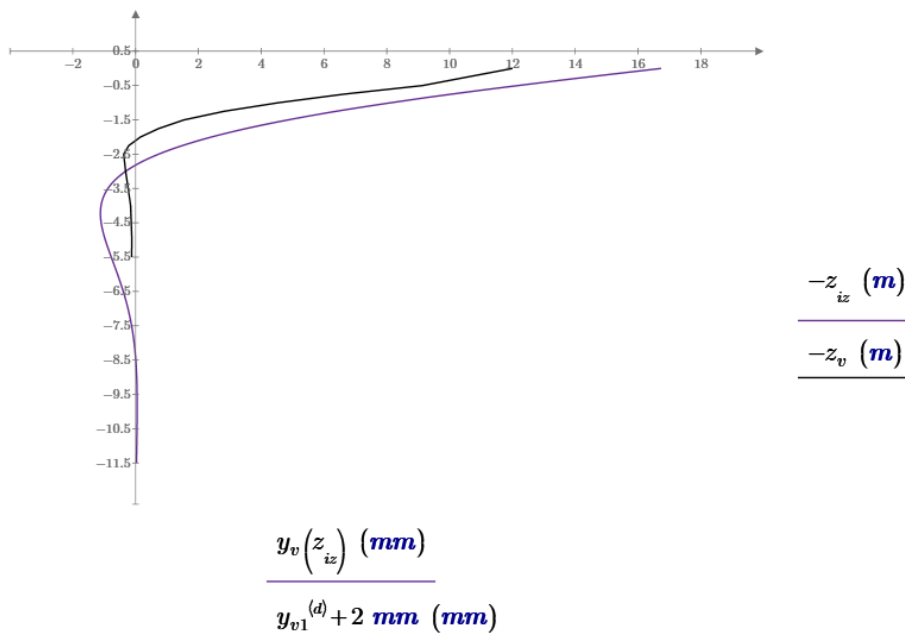
Figur 7-8: Jämförelse uppmätt förskjutning Cirkulär 2 och beräknad förskjutning med finska bäddmodulen vid $F_h=6kN$.



Figur 7-9: Jämförelse uppmätt förskjutning Kvadratisk påle och beräknad förskjutning med finska bäddmodulen vid $F_h=6\text{kN}$. Uppmätt förskjutning parallellförflyttad 2.5mm



Figur 7-10: Jämförelse uppmätt förskjutning Cirkulär 2 och beräknad förskjutning med finska bäddmodulen vid $F_h=12\text{ kN}$.



Figur 7-11: Jämförelse uppmätt förskjutning Kvadratisk påle och beräknad förskjutning med finska bäddmodulen vid $F_h=12\text{kN}$. Uppmätt förskjutning parallellförflyttad 2mm

Vi vill passa på att styrka att beräkningar enligt Pålkommisionens rapport 101 (2006) ej är utförda i denna rapport. Pålkommisionen återger en komplicerad och tidkrävande metod. Vi hänvisar till beräkning utförda av Nordlöf & Holmboe (2021). Författarna påpekar även bristen på svensk litteratur, något som även uppmärksammats i detta projekt. Det är även av intresse att kontrollera förskjutning då belastning sker längst diagonalen på ett kvadratisk tvärsnitt. Detta då influensarean kan antas mindre jämfört med belastning parallellt mot tvärsnittet. Därav rekommenderas vidare studier inom ämnet för bättre förståelse.

REFERENSER

Broms, B. (1964). *Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 90(2), 27-63. 10.1061/JSFEAQ.0000611

Broms, B. (1965). *Beräkning av pålar vid olika belastningsförhållanden; Analysis of piles in different loading conditions*. Stockholm.

Bentley Systems. (2022). *PLAXIS CONNECT Edition V22.02, Material Models Manual*.

Göteborg Stad. (den 22 juni 2022). *Västlänken*. Hämtat från Stadsutveckling Göteborg: <https://stadsutveckling.goteborg.se/projekt/vastlanken/>

Nordlöf, A., & Holmboe, D. (2021). *Pile subjected to lateral load: Analytical hand calculation implemented by programming (Dissertation)*.

Olsson, C., & Holm, G. (1993). *Pålgrundläggning*. Statens geotekniska institut.

Pålkommisionen. (1998). *Pålkommisionen rapport 96:1, Dimensioneringsprinciper för pålar - Lastkapacitet*. Linköping: Pålkommisionen.

Pålkommisionen. (2006). *Pålkommisionen rapport 101, Transversalbelastade pålar - statiskt verkningssätt och dimensioneringsanvisningar*. Linköping: Pålkommisionen.

Pålkommisionen. (2018). *Pålkommisionen Teknisk PM 1:2018, Structural pile capacity of axially loaded piles in the Nordic countries – recommendations for the revision of Eurocode 7*. Stockholm. Pålkommisionen

Stål, T., Wedel, P. O., & Avén, S. (1984). *Handboken Bygg G Geoteknik*. LiberFörlag; LiberTryck.

Trafikverket. (2019). *Råd Brobyggande TDOK 2016:0203*. Trafikverket.

Wu, D., Broms, B. B., & Choa, V. (1998). *Design of Laterally Loaded Piles in Cohesive Soils Using p-y Curves*. Soils and Foundations, 38(2), 17-26.

BILAGOR

Bilaga 1 – Plan- och sektionsritning över borrhypunkt samt resultat från geoteknisk undersökning

Bilaga 2 – Anders Jonefjälls Exjobb