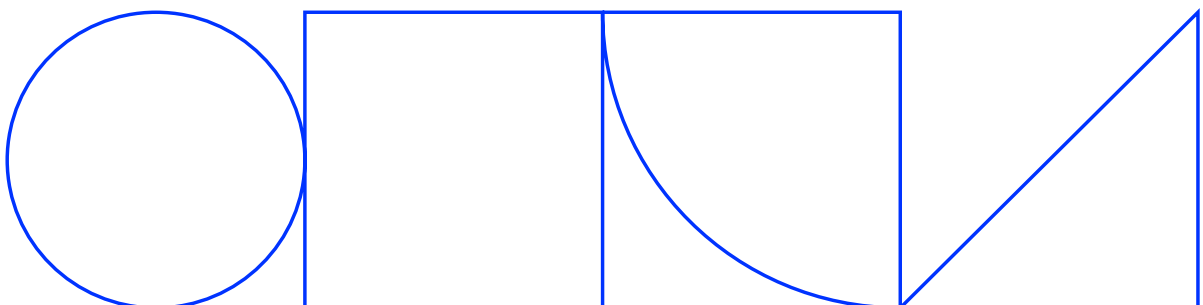
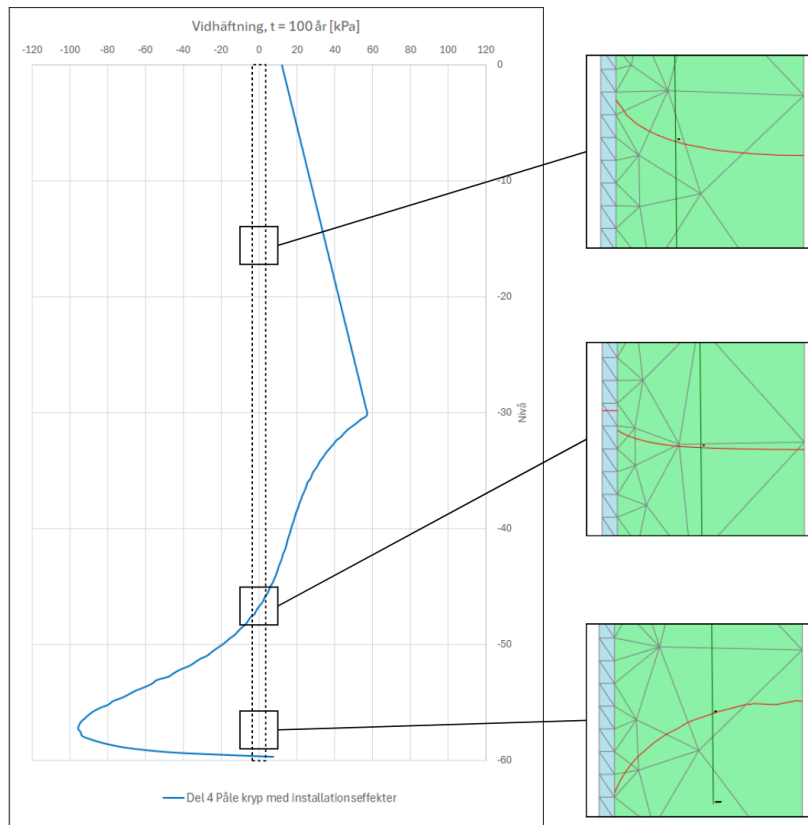


PROJEKTNR. 14338

Dimensionering av betongpålar med hänsyn till påhängslaster

Anna Björklund, David Ekstrand, Per Kettil
SKANSKA

2025-10-17



Förord

Denna studie har utförts under hösten 2024 och våren 2025. Studien har finansierats av SBUF och egeninsatser av medverkande företag. Följande personer har medverkat:

Projektledare och utförare:

Anna Björklund, Skanska

David Ekstrand, Skanska

Per Kettil, Skanska

Referensgrupp:

Peter Alheid, Hercules

Fredrik Larsson, Ramböll

Johnny Wallgren, GEOS (Geotechnical Engineers of Sweden AB)

Michael Sabattini, Peab

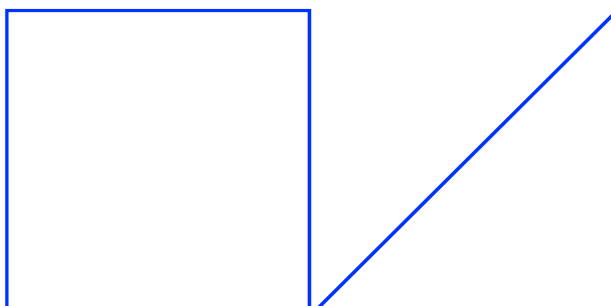
Gunnar Holmberg, Skanska

Peter Claesson, Skanska

Vi vill speciellt tacka finansiärerna som möjliggjort projektet, samt referensgruppen och kollegor för synpunkter och diskussioner som förbättrat rapporten.

Göteborg, 2025-10-17

Anna Björklund, David Ekstrand, Per Kettil



Sammanfattning

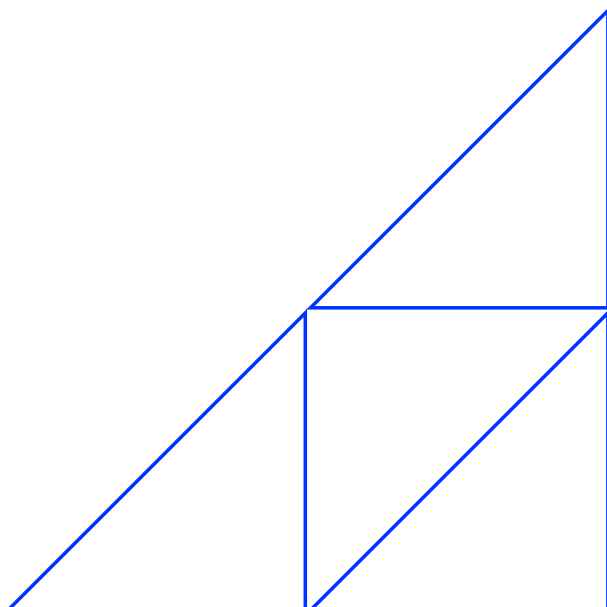
En integrerad beräkningsmodell som inkluderar både lerans och betongens tidsberoende effekter och beaktar svensk empiri har implementerats och verifierats. Modellen har använts för att studera processen för påhängslaster och hur olika parametrar inverkar på påhängslasternas storlek. Följande ger minskade påhängslaster relativt dimensioneringsfilosofin i PKR100:

- Interaktion påle – jord: När jorden hänger sig på pålarna, medför detta att jorden avlastas, vilket minskar sättningarna i jorden och därmed påhängslasterna.
- Deformationer i pålen, speciellt krypdeformationer vid höga belastningsnivåer, och vid pålspetsen.
- Korttidsbelastning på påltoppen.

Följande ger ökade påhängslaster jämfört rekommendationerna i PKR100:

- Installationseffekt

Ovanstående bör beaktas för att erhålla en korrekt och ekonomisk dimensionering.



Innehåll

Innehåll	3
1. Inledning	5
1.1. Bakgrund	5
1.2. Syfte	5
1.3. Metodik	5
1.4. Avgränsningar	6
2. Kunskapsinventering	7
2.1. Påhängslaster på pålar	7
2.2. Beräkningsmodeller	7
3. Beräkningsmodell	8
3.1. Geometri och element	9
3.2. Kopplingar och randvillkor	9
3.3. Material	9
3.3.1. Betong	9
3.3.2. Lera	9
3.3.3. Gränssnitt lera – betongpåle	9
3.4. Laster	9
3.5. Analyssteg	9
4. Verifiering	10
4.1. Betong	10
4.1.1. Enaxligt tryckförsök	10
4.1.2. Krypförsök	12
4.2. Lera	14
4.2.1. CRS-försök	14
4.2.2. Jordlager	15
4.3. Betongpåle i lera	15
4.3.1. Installationseffekter	16
4.3.2. Gränssnitt lera - betongpåle	16
4.3.3. Resultat och verifiering	18
4.3.4. Kommentarer till beräkningsresultat	25
5. Parameterstudie	26
5.1. Korttidsbelastning på påltopp	27
5.2. Reduktion av installationseffekter med augerskruv	28

5.3.	Ökad relativrörelse mellan påle och jord för full påhängslast	29
5.4.	Fjädrande respons vid pålspetsen	30
5.5.	Ökad last på pålen till nära pålens normalkraftskapacitet	31
6.	Slutsatser	34
	Litteraturförteckning	35

1. Inledning

1.1. Bakgrund

I områden med dåliga markförhållanden förekommer ofta pågående marksättningar orsakade t ex av tidigare utfyllnader, grundvattensänkningar mm. Vid pålgrundläggning uppkommer då påhängslaster på pålarna, som adderas till övriga laster på pålarna [1]-[4].

Pålgrundläggningen utförs vanligen med slagna betongpålar, då detta är mest ekonomiskt, och med klimatförbättrad betong även bra värden avseende klimatpåverkan. Men den ökade lasten, från eventuella påhängslasterna, medför ökade pålmängder, större kostnader och ökad klimatpåverkan. Dessa effekter blir speciellt stora i områden med mäktiga lerlager.

Marksättningarna och därmed påhängslasterna utvecklas succesivt över lång tid och kan ske i delar av eller hela jordprofilen. Marksättningarnas variation med djupet och dess tidsförlopp, respektive betongpålarnas tidsberoende deformationsegenskaper (krypning), samt interaktionen mellan påle och jord, är väsentliga för att korrekt bestämma storleken på spänningarna i betongen och den totala lasten i pålen på olika nivåer [4]-[7].

1.2. Syfte

Huvudsyftet med detta projekt är att förbättra analys och dimensionering av betongpålar påverkade av påhängslaster. Vi förväntar oss att detta kommer att minska pålmängderna, vilket i sin tur kan leda till kostnadsbesparingar och en minskad klimatpåverkan.

1.3. Metodik

Genom att använda en integrerad beräkningsmodell som inkluderar både lerans och betongens tidsberoende effekter, beaktat svensk empiri, kan vi erhålla fördjupad förståelse för hur processen verkar. Genom denna ökade förståelse kan vi formulera råd och rekommendationer för analys och dimensionering betongpålar påverkade av påhängslaster. Arbetet och rapporten har delats upp i följande delsteg (kapitel):

1. Kunskapsinventering genom litteraturstudie (kapitel 2)
2. Formulering och implementering av en integrerad beräkningsmodell med tidsberoenden (kapitel 3), för:
 - a. Betong
 - b. Lera
 - c. Gränssnitt betongpåle – lera
 - d. Laster och analyssteg
3. Verifiering av beräkningsmodellen (kapitel 4)

4. Paramameterstudie (kapitel 5)
5. Utvärdering, slutsatser och rekommendationer (kapitel 6)

1.4. Avgränsningar

Studien begränsas till ett renodlat typfall med en regelbunden pålgrupp av vertikala, spetsbärande betongpålar i ett djupt, homogent lerlager, och påltoppen belastas med en given brukslast. Detta för att erhålla resultat som är tydliga och begripliga med avseende på storleken på påhängslasten längs med pålen och med tiden.

I samråd med referensgruppen byttes fallstudie till parameterstudie (kapitel 5).

2. Kunskapsinventering

2.1. Påhängslaster på pålar

Påhängslaster på pålar av marksättningar finns beskrivet i rapporter från 1970-talet [1], [2], och behandlas i Pålkommissionens Rapport (PKR) 100 "Kohesionspålar" [3].

I ett tidigare SBUF-projekt 11034 "Höghus Lilla Bommen, Göteborg - uppföljning av kohesionspålning i mäktiga lerlager" [4] konstaterades genom uppföljande mätningar att påkänningarna som tillkommer på grund av påhängslaster orsakade av marksättningar kan vara stora.

Marksättningar och interaktionen mellan jord och påle har bl a studerats i ett tidigare SBUF-projekt 11938 "Kohesionspålar med påhängskrafter - uppföljning av verkningssätt och validering av beräkningsmodell" [5].

Betongens krypning vid höga belastningsnivåer har studerats i ett tidigare SBUF-projekt 12526 "Långtidsstudie av krypdeformationer i betongpålar med höga påkänningar" [7].

2.2. Beräkningsmodeller

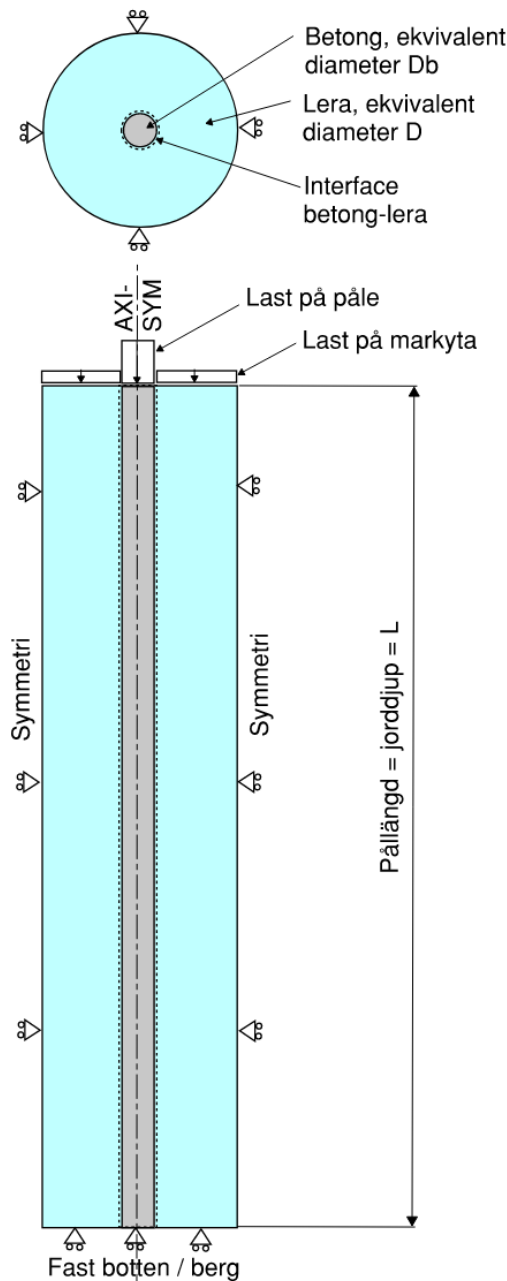
Dimensionering av betongpålar med hänsyn till påhängslaster utförs idag vanligen med en förenklad handberäkningsmodell baserad på Pålkommissionens rapport (PKR) 100 [3], där jord respektive påle i huvudsak behandlas var för sig. Utifrån en bestämning av pågående/framtida marksättningar i jorden, görs en bedömning om till vilket djup som jorden rör sig nedåt relativt pålen. Påhängslasten beräknas som summan av mantelkohesionen ned till detta djup.

Beräkningsmodellen enligt PKR 100 har även implementerats i FE-baserade beräkningsprogram, för att kunna behandla både jord och hela pålgrupper på ett integrerat sätt, inklusive även interaktion med ovanliggande konstruktion, se till exempel [8]. PKR och beräkningsprogrammen hanterar dock tidsberoendet mycket förenklat.

På marknaden finns beräkningsprogram som modellerar leran på ett mer realistiskt sätt, till exempel [9].

3. Beräkningsmodell

Beräkningsmodellen begränsas till att avse en enskild påle av betong (armering försummas) med en omgivande jordpelare av lera, se Figur 3-1. Konceptuellt kan modellen anses representera en påle i mittdelen av en stor pålgrupp, där pålarna står på ett jämnt c/c och har lika belastning. Vidare förenklas pålen och jordpelaren med cirkulära tvärsnitt, för att beräkningarna skall kunna utföras i 2D med axisymmetri.



Figur 3-1. Beräkningsmodell

Beräkningarna utförs i programmet Plaxis 2D [9].

3.1. Geometri och element

Modellens geometri se Figur 3-1. Diametrarna för betongpålen (D_p) och jordpelaren (D) väljs så att tvärsnittssareorna i modellen blir lika de verkliga tvärsnittssareorna. Jorddjup och pållängd förutsätts vara lika, och betecknas med L . Både jorden och pålarna modelleras med 2D-axisymmetriska solidelement [9].

3.2. Kopplingar och randvillkor

Kopplingar och randvillkor se Figur 3-1. Gränssnittet mellan betong och lera beskrivs med interface-element [9], för att överföra last mellan jord och påle m h t en viss relativdeformation. Undre randen fixeras i z-led, motsvarande fast botten/berg. Sidoytorna fixeras i horisontalled, motsvarande symmetri.

3.3. Material

3.3.1. Betong

För betongen tillämpas materialmodellen "The Concrete model [ADV]" [9]. Modellen beskriver de mest väsentliga mekaniska egenskaperna hos betong: olika tryck- och draghållfasthet, tidsberoende hållfasthet och styvhet, töjningshårdnande och mjuknande, kryp och krympning. För en fullständig beskrivning se Plaxis manual [9].

3.3.2. Lera

Leran modelleras med hjälp av jordmodellen "Soft Soil Creep (SSC)" [9] för att kunna modellera krypsättningar.

3.3.3. Gränssnitt lera – betongpåle

Interfacet tilldelas materialmodellen Mohr-Coulomb (MC) undrained B [9].

3.4. Laster

Pågående marksättningar i leran drivs av en yttre last på markytan. Pålen belastas av en last på påltoppen.

3.5. Analyssteg

Analyserna utförs i ett antal tidsberoende analyssteg, där olinjär respons behandlas med NR-iteration till konvergens uppnås [9].

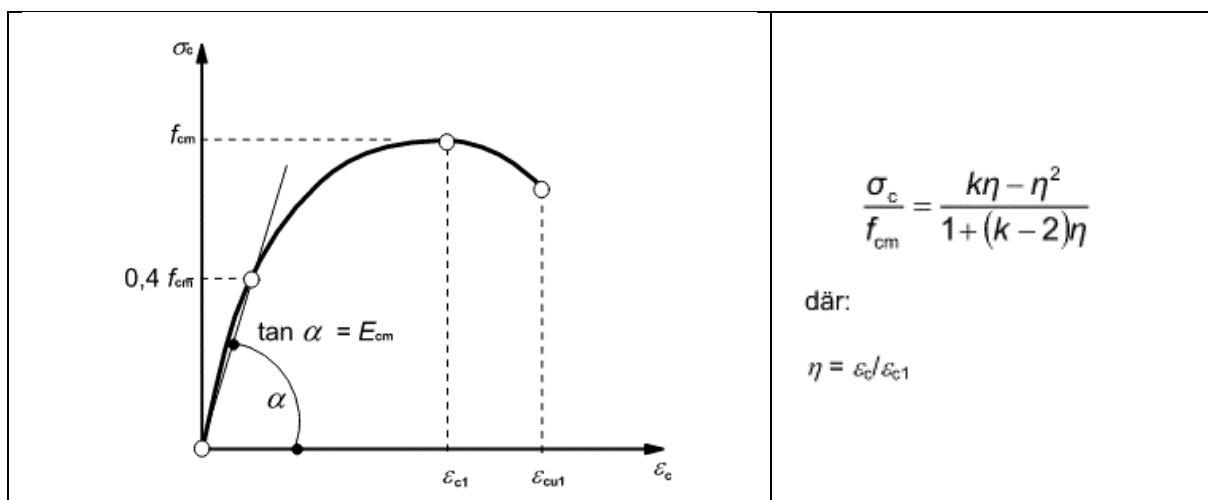
4. Verifiering

Modellen testas och verifieras genom rimlighetsbedömning eller jämförelse mot analytiska data och erfarenhetsvärden. Först testas de enskilda materialmodellerna. Därefter testas den sammansatta beräkningsmodellen.

4.1. Betong

4.1.1. Enaxligt tryckförsök

Arbetskurva för tryckbelastning av betong enligt Eurokod 2 (SS-EN 1992-1-1) [9], se Figur 4-1.

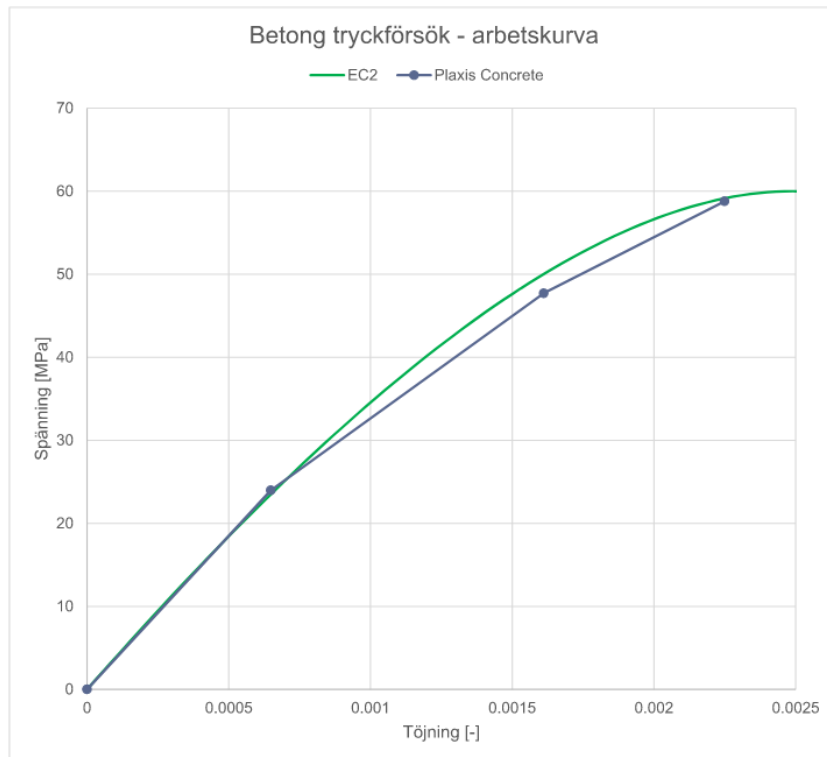


Figur 4-1. Arbetskurva för betong i tryck enligt Eurokod 2

Den använda materialmodellen har testats genom ett enaxligt tryckförsök med följande indata:

Parameter	Värde	Enhet
γ_{unsat}	23	kN/m ³
e_{init}	0.50	-
n_{init}	0.33	-
E	37	GPa
f_c	60	MPa
f_{c0n}	0.45	-
f_{cfn}	0.10	-
f_{cun}	0.10	-
G_c	90	kN/m
ϕ_{max}	40	°
ψ	5	°
γ_{fc}	1.0	-
f_t	4.1	MPa
f_{tun}	1e-3	-
G_t	0.1	kN/m
γ_{ft}	1.0	-
ϵ_{pcp}	-0.87e-3	-
α_{duct}	20	-

Resultaten jämförs mot arbetskurvan enligt Eurokod 2, se Figur 4-2. Jämförelsen visar på rimligt god överensstämmelse.



Figur 4-2. Resultat från enaxligt tryckförsök, jämförelse beräkningsmodell Plaxis "Concrete" (blå linje) mot arbetskurva enligt Eurokod 2 (grön linje).

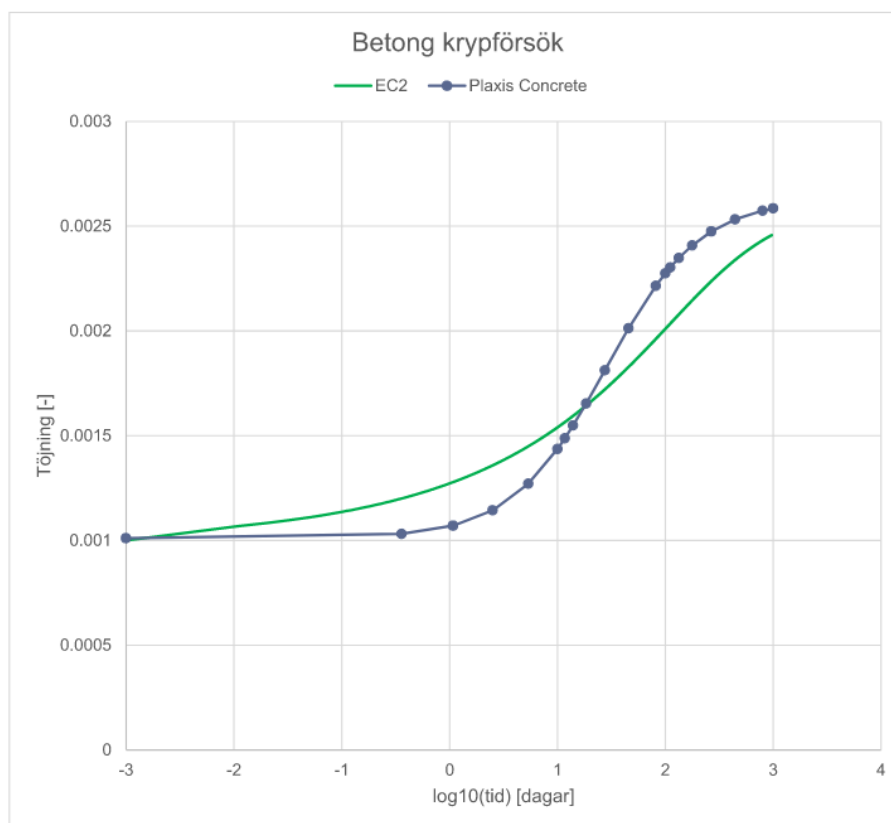
4.1.2. Kryp försök

Den använda materialmodellen har testats m a p krypning genom ett enaxligt tryckförsök med följande indata:

Parameter	Värde	Enhet
γ_{unsat}	23	kN/m ³
e_{init}	0.50	-
n_{init}	0.33	-
E	37	GPa
f_c	60	MPa
f_{c0n}	0.20	-
f_{cfn}	0.10	-
f_{cun}	0.10	-
G _c	90	kN/m
φ_{max}	40	°
ψ	5	°
γ_{fc}	1.0	-
f_t	4.1	MPa
f_{tun}	1e-3	-
G _t	0.1	kN/m
γ_{ft}	1.0	-
ϵ_{pcp}	-0.87e-3	-
a_{duct}	20	-
φ_{cr}	1.6	-
$t_{\sigma 50}$	28	dagar

Resultaten jämförs mot krypkurva enligt Eurokod 2, se Figur 4-3. Jämförelsen visar på vissa skillnader i tidsförloppet, men anses för den aktuella tillämpningen ge tillräckligt god överensstämmelse m a p slutresultatet.

Jämförelse mot försöksdata i [7] var svårt p g a olikheter i formulering av krypmodell och parametrar och kunde inte fullföljas inom detta projekt, och får återupptas i framtida arbete. Viss insikt i vad som sker vid höga belastningsnivåer erhålls av parameterstudien i avsnitt 5.5.



Figur 4-3. Resultat från enaxligt tryckförsök map krypning, jämförelse beräkningsmodell Plaxis "Concrete" (blå kurva) mot arbetskurva enligt Eurokod 2 (grön linje).

4.2. Lera

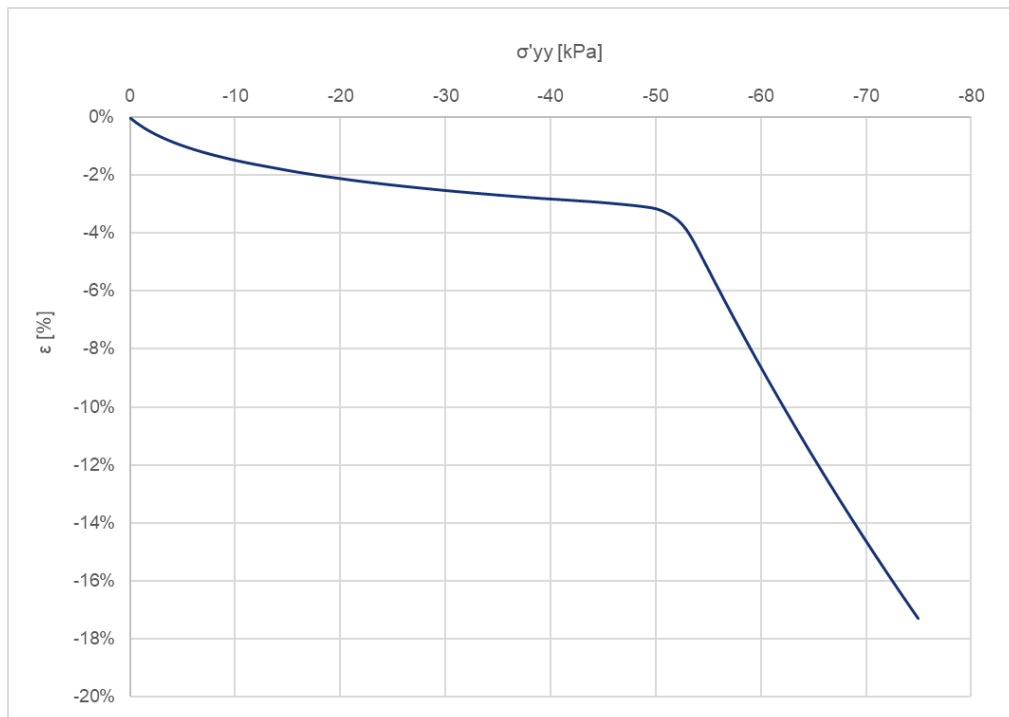
Jordmodellen och sättningens storlek är i sig självt inte i fokus inom ramen för modelleringen utan målsättningen har varit att skapa en grundförutsättning motsvarande förhållanden som är vanligt förekommande i centrala Göteborg. Att inte modellera jorden mer specifikt medför begränsningar där exempelvis relativ styvhet mellan påelement och jord inte modelleras så realistiskt som vore önskvärt.

Målbilden har varit att pågående sättning i beräkningsmodellen ska motsvara ca 5 mm/år i lerans överkant och därefter gradvis minska mot djupet. Jordlagret har modellerats som ett skikt (SSC) med egenskaper enligt nedan:

- $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$
- $\text{OCR} = 1,25$
- $\text{POP} = 0$
- $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$
- $K_0 = 0,61$
- $c' = 1 \text{ kPa}$
- $\varphi' = 30^\circ$
- $\lambda^* = 0,4$
- $\kappa^* = 0,01$
- $\mu^* = 0,005$

4.2.1. CRS-försök

Ett "CRS-försök" har utförts med modulen SoilTest för vald materialmodell vid ett förkonsolideringstryck på 50 kPa. Resultatet, se Figur 4-4, bedöms som rimligt.



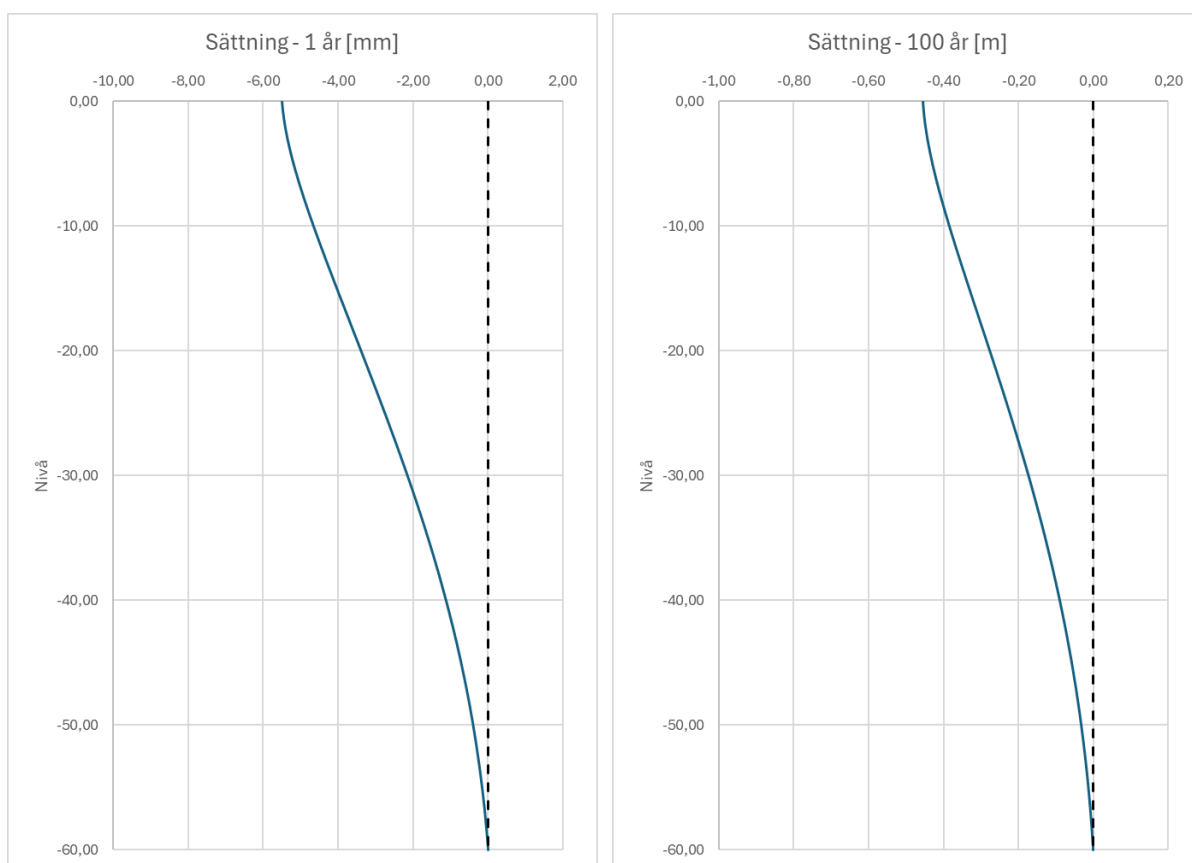
Figur 4-4. Resultat från CRS-försök.

4.2.2. Jordlager

Ett lager med lera med djup $L = 60$ m har analyserats för en påförd last på markytan 60 kPa (motsvarande till exempel en utförd uppfyllnad), för att generera önskad sättningshastighet. Analysen har utförts i följande steg:

0. Hela modellen består av jord. Initiera initialt spänningstillstånd i jorden.
1. Påförande av yttre last på markytan (motsvarande till exempel en utfyllnad)
2. Konsolidering ca 200 år
3. Konsolidering 1 år (för att utvärdera pågående sättningshastighet)
4. Konsolidering 100 år

Resultatet, se Figur 4-5, anses motsvara önskat beteende.



Figur 4-5. Resultat från analys av 60 m djupt lerlager. Till vänster sättningshastighet mot djupet under 1 år (efter 200 års förkonsolidering) och till höger sättning mot djupet under 100 år (efter 205 års förkonsolidering).

4.3. Betongpåle i lera

Den fullständiga sammansatta modellen enligt Figur 3-1 har testats. Diametrarna för betongpålen och jordpelaren har satts till $D_p = 0.3$ m respektive $D = 4.0$ m, motsvarande betongpålar 270x270 mm placerade i ett rutmönster 3.5x3.5 m. Jorddjup (och pållängd) har satts till $L = 60$ m, och last på markytan till 60 kPa lika

jordlagertestet i avsnitt 4.2.2. Betongpålens materialegenskaper har satts lika betongtestet enligt tabellen i avsnitt 4.1.2. Last på påltopp har satts till 1200 kN permanent last.

4.3.1. Installationseffekter

Pålens massundandrängning i samband med installation har modellerats genom volymexpansion i den jordvolym som sedan ersätts av pålen när pålen ska vara aktiv i modellen. Volymexpansionen antas vara 100 % av pålens volym och har antagits enbart verka i x-riktningen.

I modelleringen har installationen av pålen utförts i flera tidssteg innan pålen är fullt aktiv. Förlopp enligt nedan.

Sammantaget utförs analyserna i följande steg:

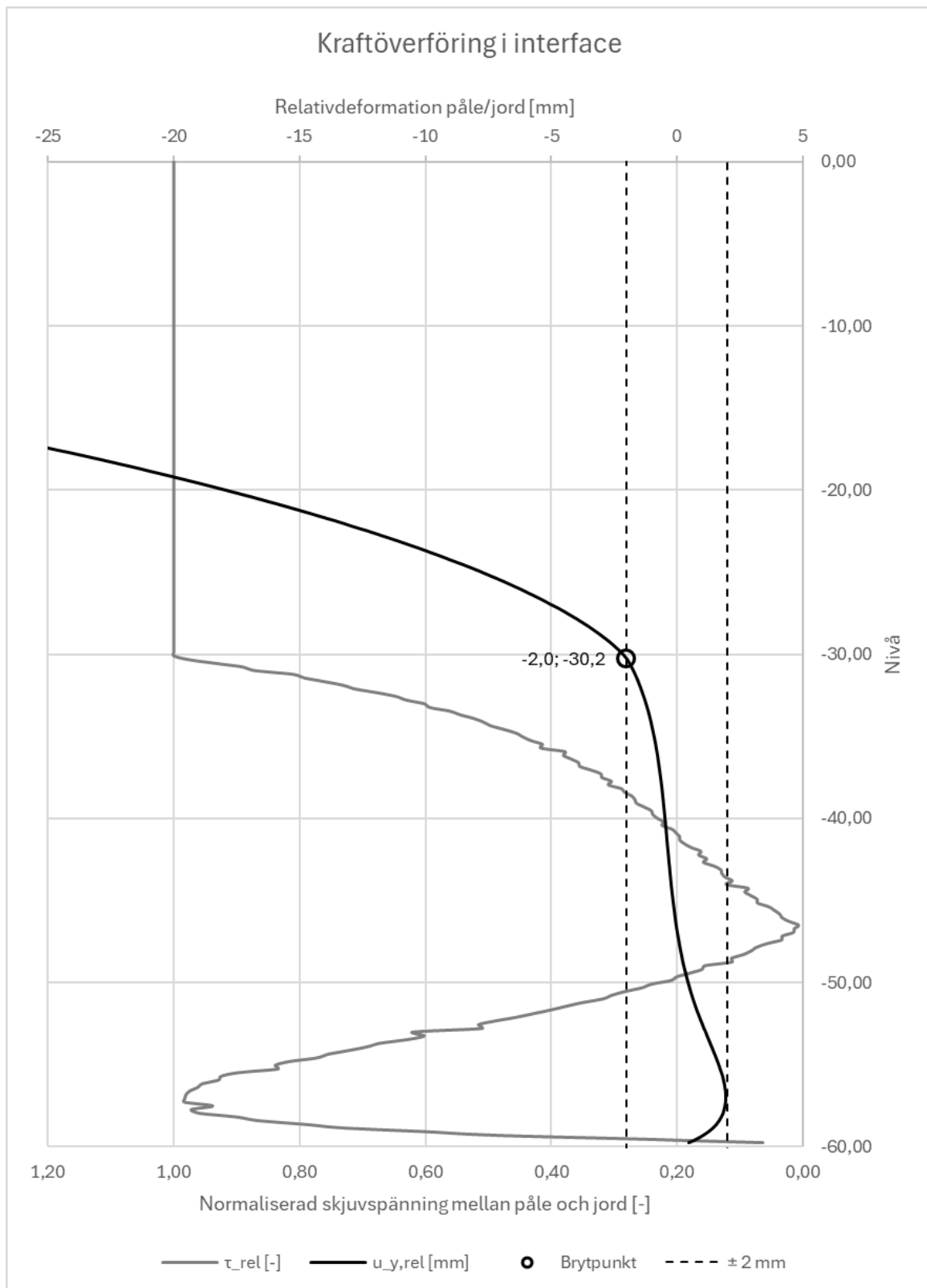
0. Hela modellen består av jord. Initiera initialt spänningstillstånd i jorden.
1. Påförande av yttre last på markytan (motsvarande t ex en utfyllnad)
2. Konsolidering ca 200 år
3. Konsolidering 1 år (för att utvärdera pågående sättningshastighet)
4. Pålinstallation
 - a. Massundandrängning (1 dag)
 - b. Pålen växer fast (14 dagar)
 - c. Pålen blir verksam (1 dag), pålmaterial och interface aktiveras
5. Pålastning på påle (180 dagar)
6. Konsolidering under pålens verksam livslängd (100 år)

För beräkningar som ej avser modellera pålens massundandrängning i samband med installation utgår steg 4a och 4b ovan.

4.3.2. Gränssnitt lera - betongpåle

Påhängslastens storlek styrs av lerans odränerad skjuvhållfasthet c_{uk} som ansatts till 12 kPa i lerans överkant med en tillväxt på 1,5 kPa/m. För att full påhängslast ska uppstå vid 2 mm relativdeformation mellan påle och jord har egenskaperna för interfacet mellan påle och jord anpassats mot just detta. Anpassning görs genom att styvheten i jordmaterialet för interfacet kalibreras mot interfacets virtuella tjocklek. Jordmaterialet tillhörande interfacet är alltså inte valt utifrån försök utan är ett modellspecifikt material för att uppnå önskad respons mellan påle och jord.

Figur 4-6 nedan visar ett exempel på resultat för kraftöverföring i interface-elementen. Av resultatet framgår att full påhängslast $\tau_{rel} = \tau/c_{uk} = 1$ erhålls som önskat vid 2 mm relativrörelse mellan påle och jord.

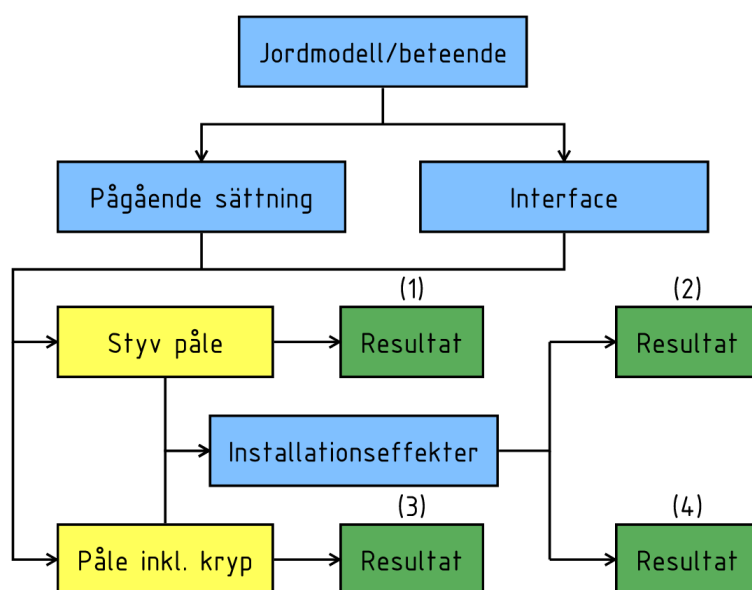


Figur 4-6. Normaliserad skjuvspänning $\tau_{rel} = \tau/cuk$ i interface-elementen mellan lera och påle.

4.3.3. Resultat och verifiering

Beräkningar för att verifiera modellens beteende och pålens interaktion med jorden har utförts för varierande antaganden med mål att nyanserat kunna identifiera skillnader mellan olika sätt att modellera. Beräkningar är utförda enligt modellflöde beskrivet i Figur 4-7.

Inledningsvis modelleras pålen utan hänsyn till krypning i betongen med och utan installationseffekter. Därefter har pålens egenskaper justerats för att beakta krypning och samma analyser har utförts på nytt.



Figur 4-7. Modellflöde

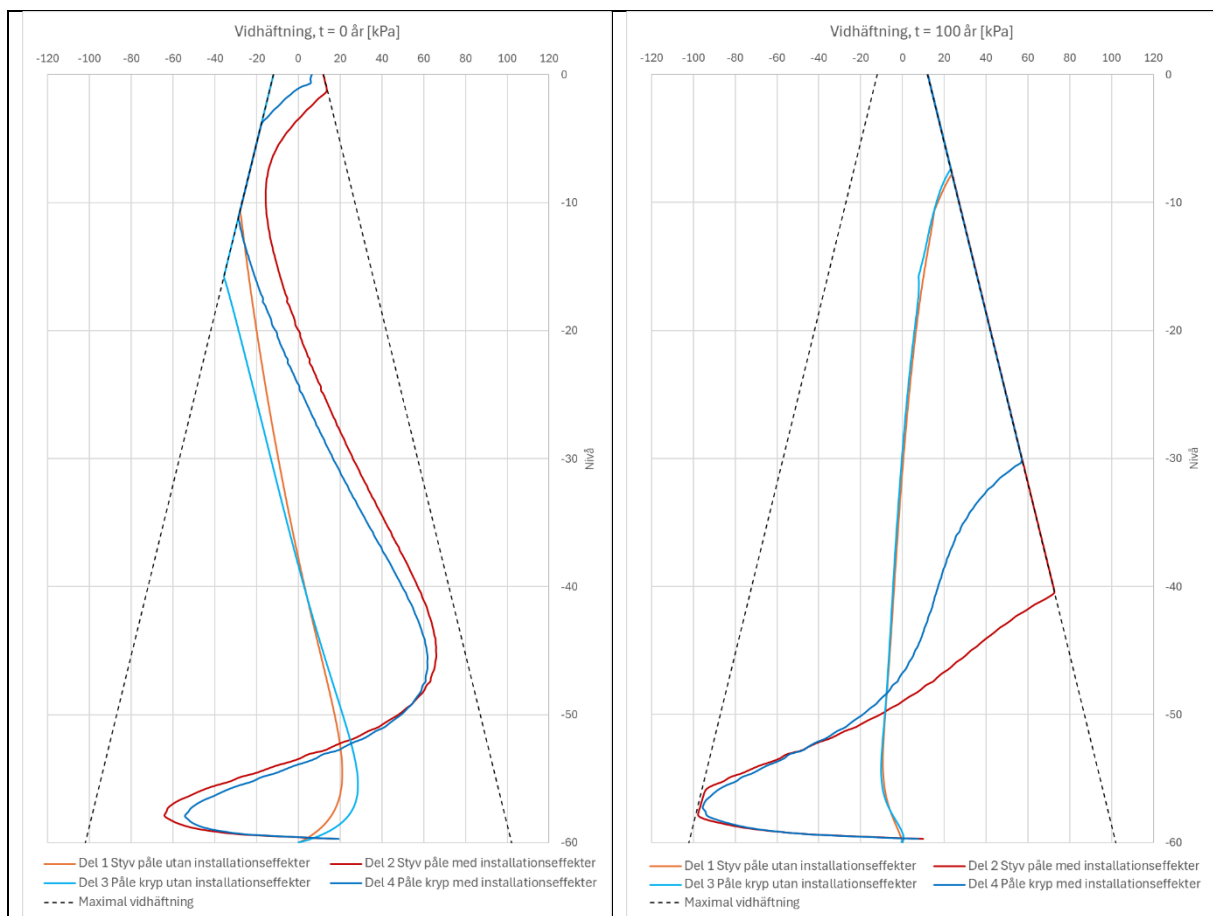
I det följande presenteras beräkningsresultat för utförda kontroller, numrerade del 1 – 4 enligt modellflödet ovan.

Figur 4-8 visar påhängslast vid tiden 0 år, alltså då pålen bär full last, och tiden 100 år för respektive analys.

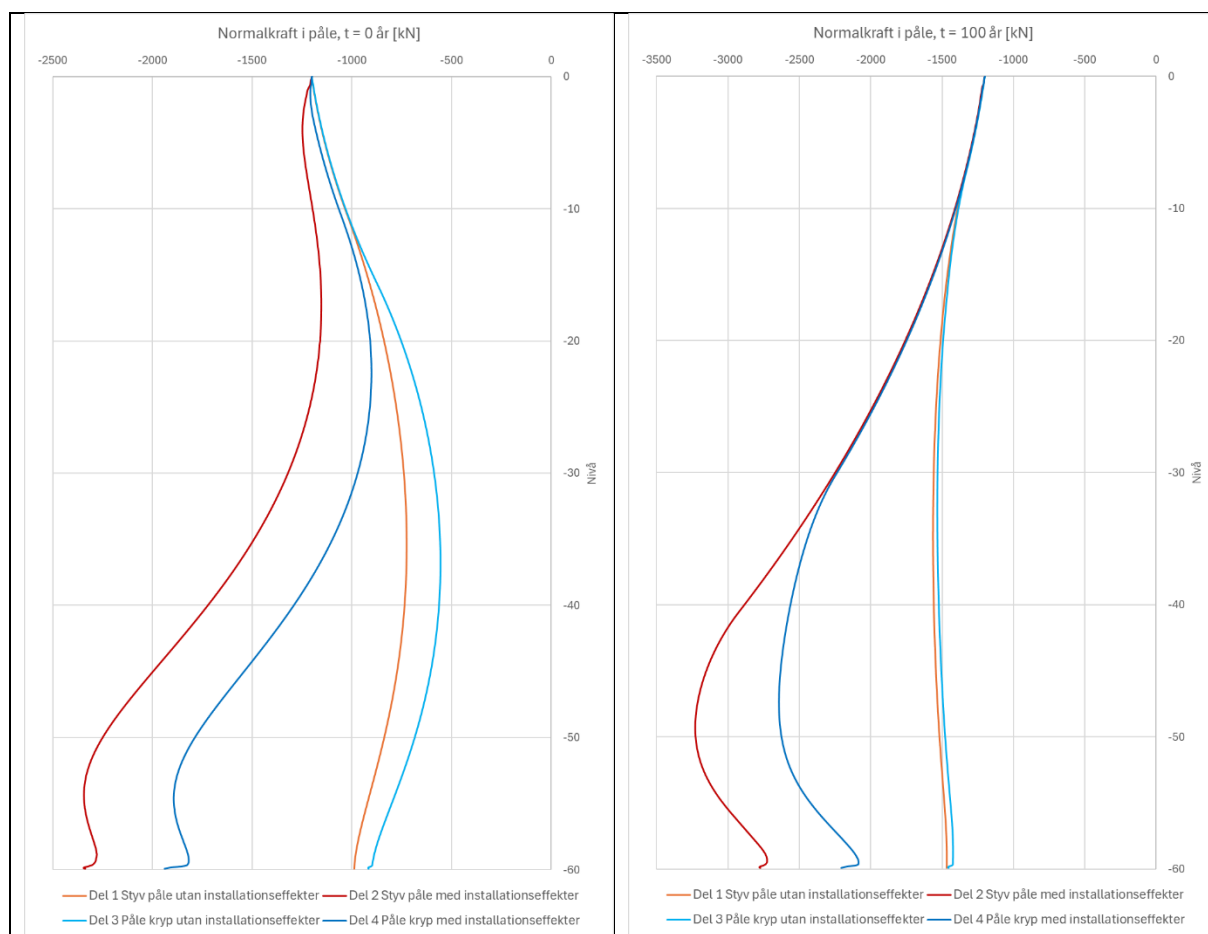
Figur 4-9 visar normalkraft i pålen vid tiden 0 år och tiden 100 år för respektive analys.

Figur 4-10 till Figur 4-13 visar deformation vertikalt i pålen och i jorden vid tiden 0 år och tiden 100 år för respektive analys.

Figur 4-14 till Figur 4-16 visar normalkraft i pålen och porövertryck i jorden för del 4 vid tiden 0, 5, 10, 20 och 100 år.

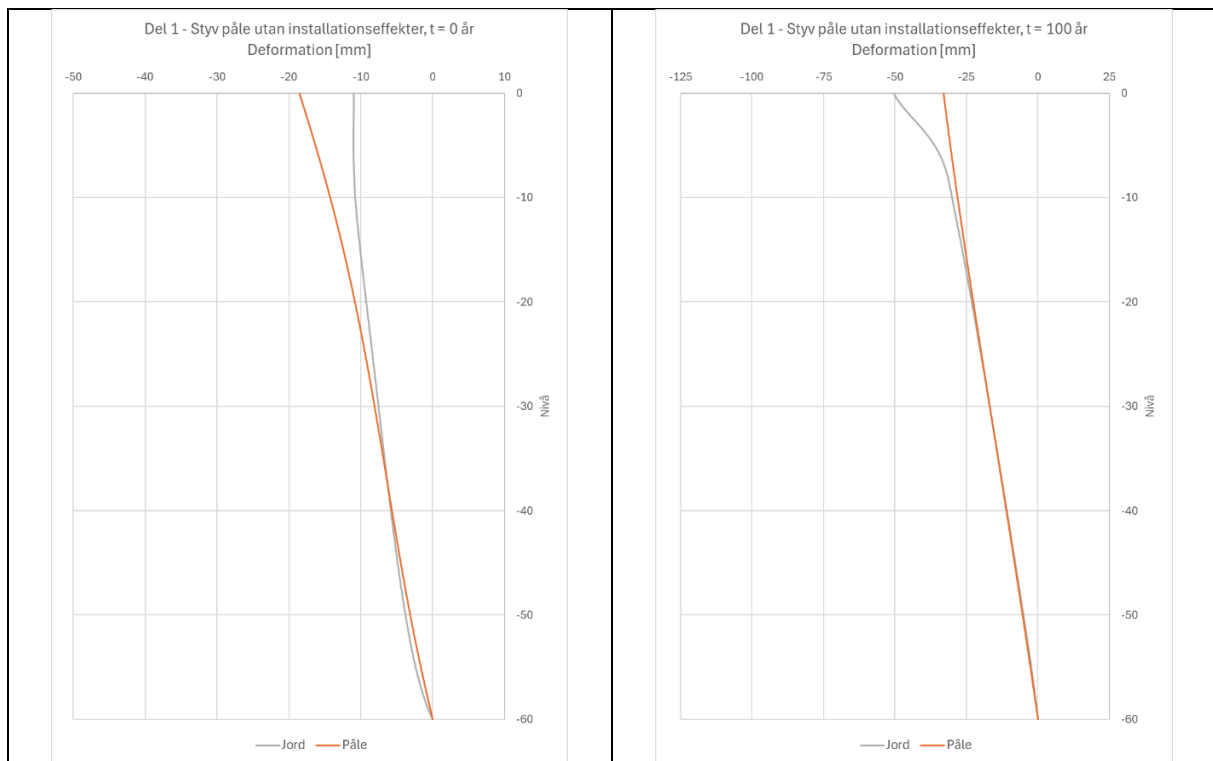


Figur 4-8. Resultat del 1-4, påhängslast.
 Vänster: Pålastning, $t = 0$ år. Höger: Konsolidering, $t = 100$ år

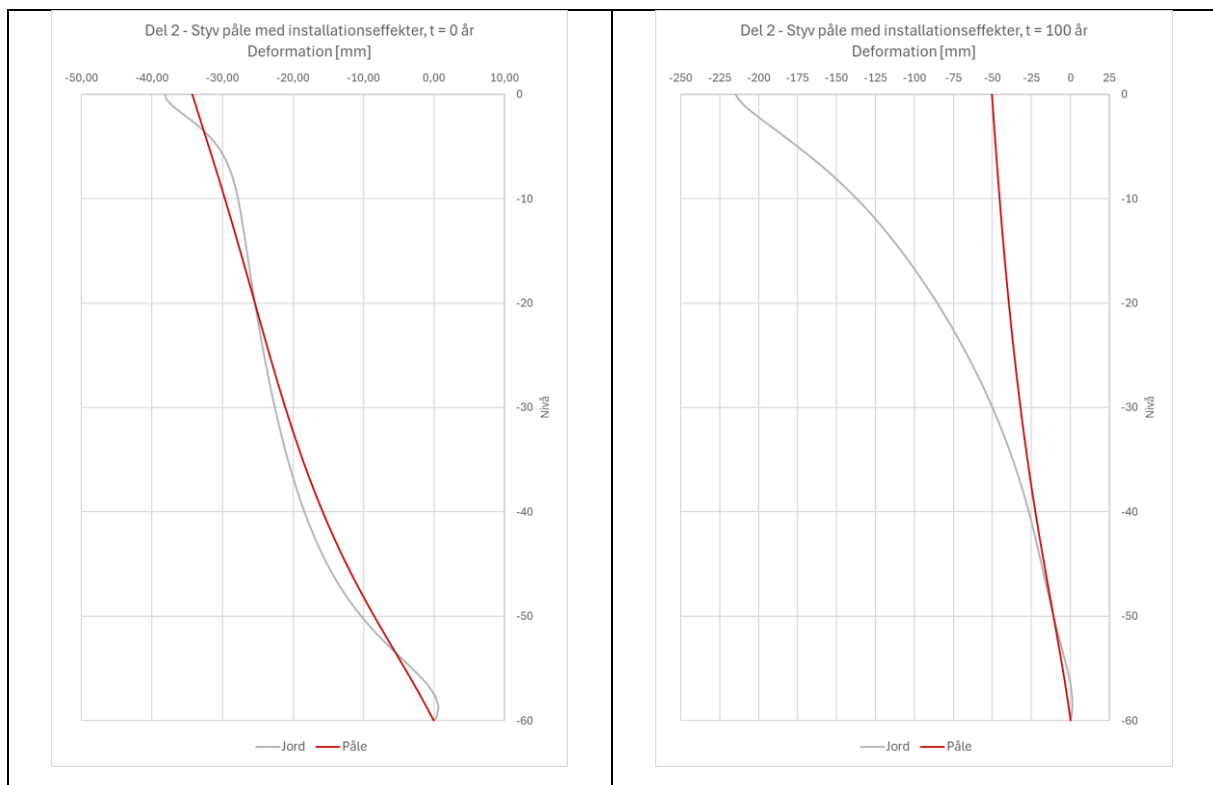


Figur 4-9. Resultat del 1-4, normalkraft i påle.

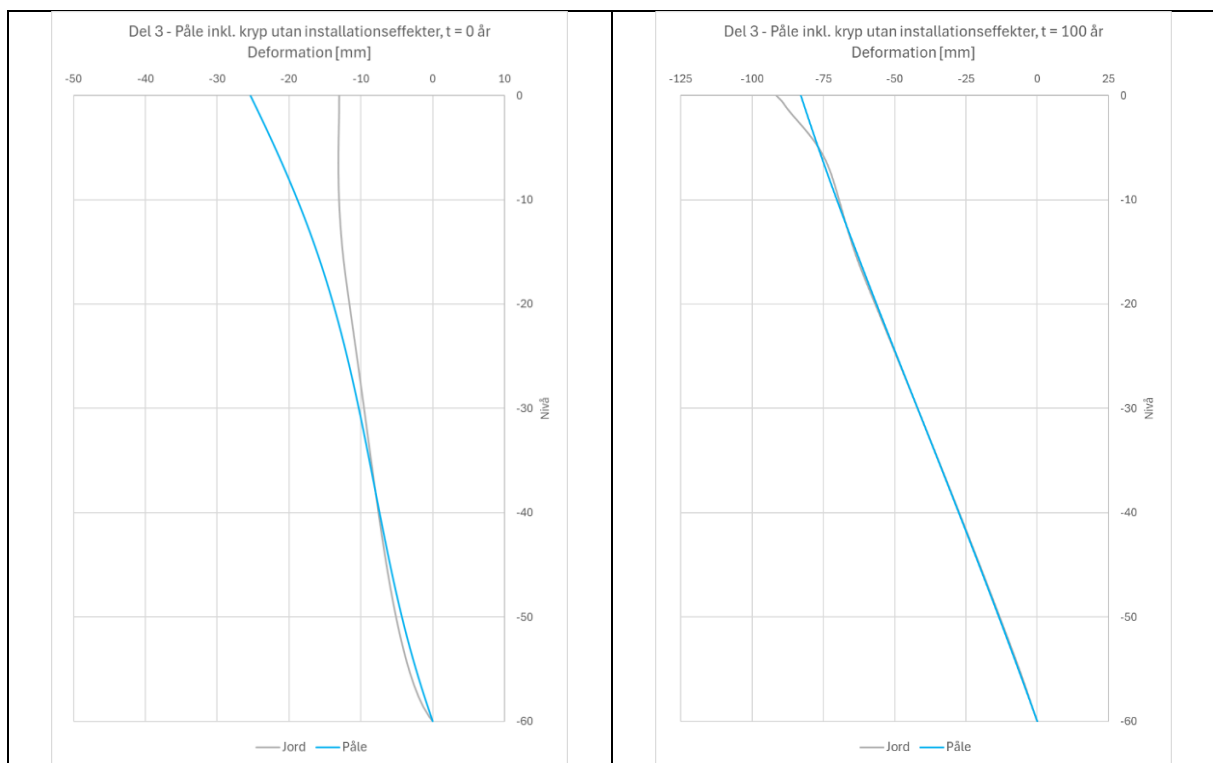
Vänster: Pålastning, $t = 0$ år. Höger: Konsolidering, $t = 100$ år



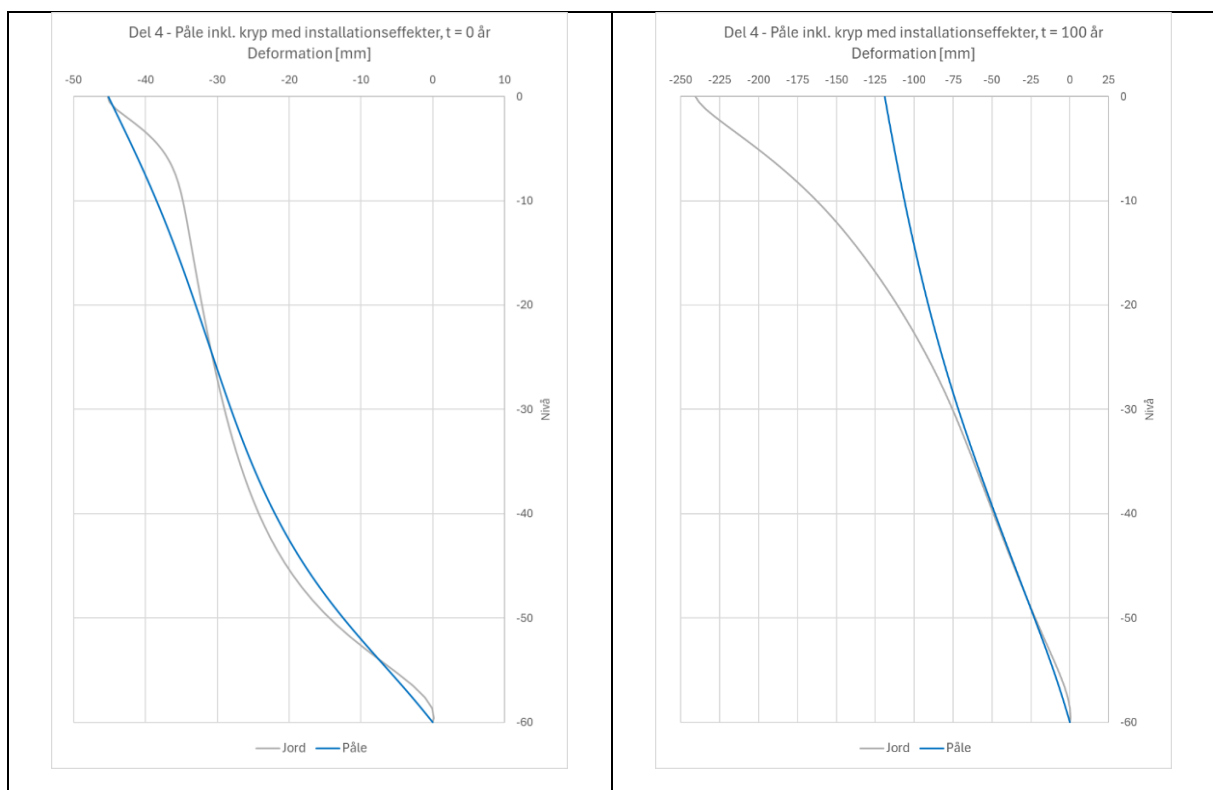
*Figur 4-10. Resultat del 1, deformation i påle/jord.
 Vänster: Pålastning, $t = 0$ år. Höger: Konsolidering, $t = 100$ år
 Observera att skalan i figurerna varierar*



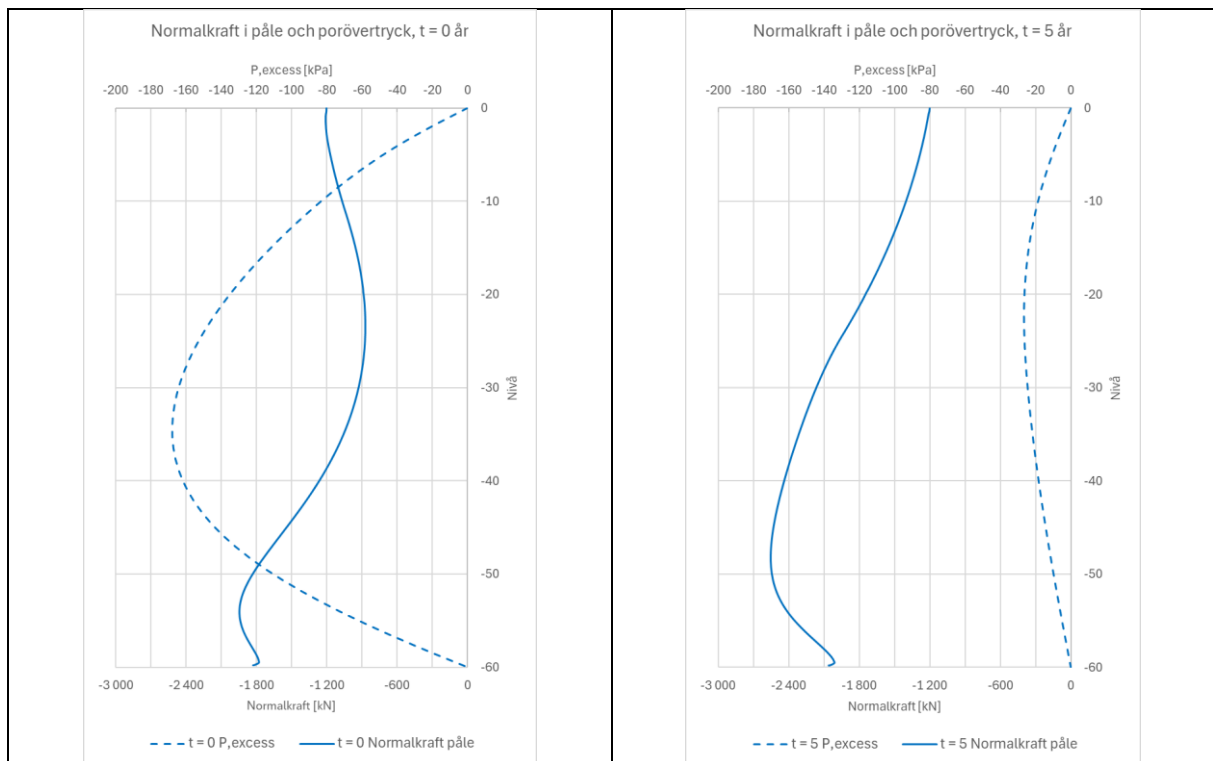
*Figur 4-11. Resultat del 2, deformation i påle/jord.
 Vänster: Pålastning, $t = 0$ år. Höger: Konsolidering, $t = 100$ år
 Observera att skalan i figurerna varierar*



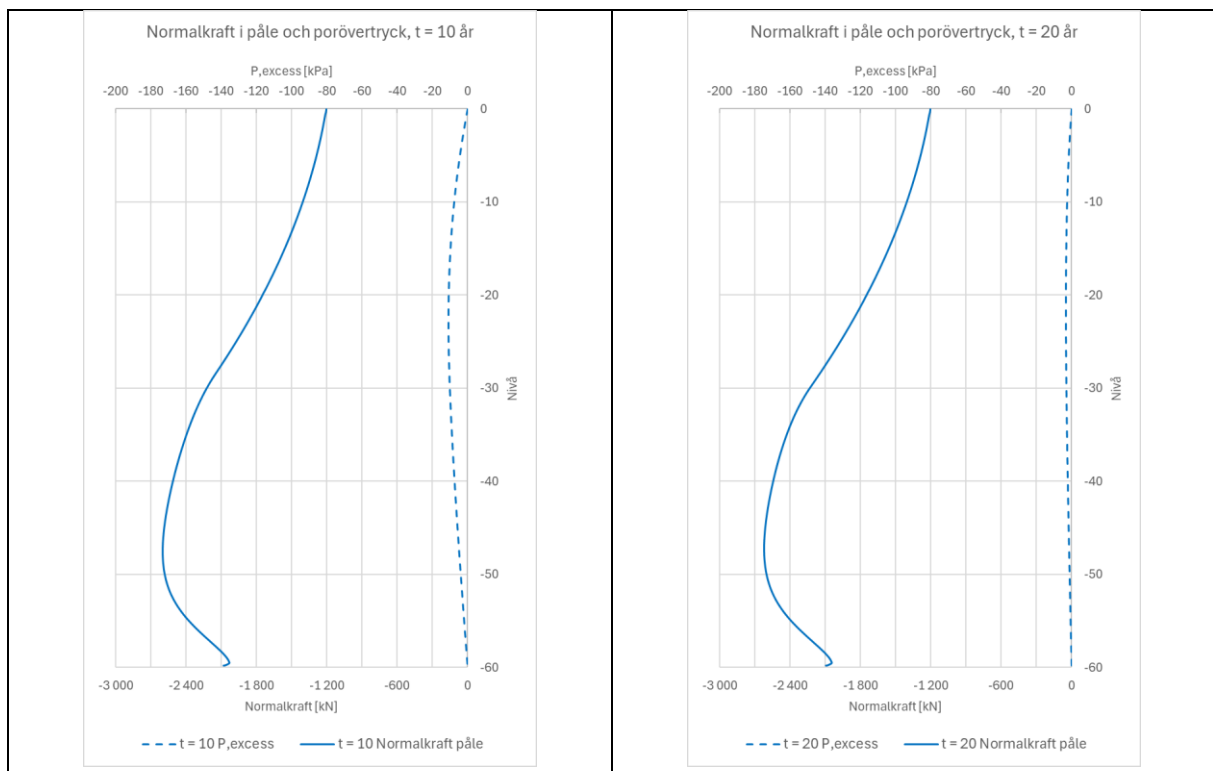
Figur 4-12 Resultat del 3, deformation i påle/jord
 Vänster: Pålastning, $t = 0$ år. Höger: Konsolidering, $t = 100$ år
 Observera att skalan i figurerna varierar



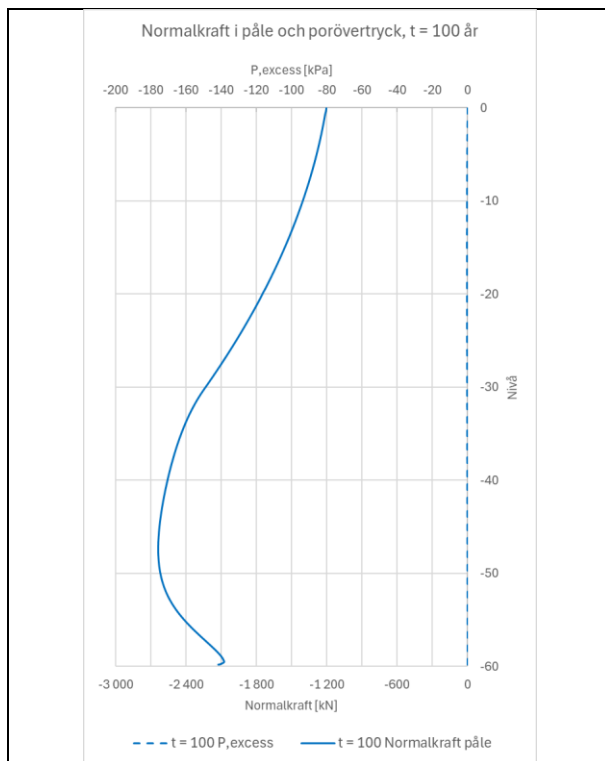
Figur 4-13 Resultat del 4, deformation i påle/jord
 Vänster: Pålastning, $t = 0$ år. Höger: Konsolidering, $t = 100$ år
 Observera att skalan i figurerna varierar



Figur 4-14 Resultat del 4, normalkraft och poröverttryck
 Vänster: Pålastning, $t = 0$ år. Höger: Konsolidering, $t = 5$ år



Figur 4-15 Resultat del 4, normalkraft och poröverttryck
 Vänster: Konsolidering, $t = 10$ år. Höger: Konsolidering, $t = 20$ år



Figur 4-16 Resultat del 4, normalkraft och porövertryck, Konsolidering 100 år

Total påhängslast längs beräknas enligt Pålkommissionens rapport 100.

$$R_{mk} = \int \alpha c_u \, dz$$

För antagande om påhängslast längs hela pålen erhålls:

$$z = [0:-1:-60]$$

$$om = \pi \cdot 0.3$$

$$cuk = \text{interp1}([0, -60], [12, 12 + 1.5 \cdot 60], z, 'linear', 'extrap'); \% \text{ OKORR}$$

$$wt = \text{ones}(1, \text{length}(z)); wt([1, \text{end}]) = 0.5$$

$$\alpha = 1.0 \% \text{ (not: vanligen 0.7, men här i beräkningsmodellen satt lika 1.0)}$$

$$R_{mk} = \text{sum}(om \cdot dz \cdot wt \cdot cuk \cdot \alpha) = 3220 \text{ kN}$$

$$\text{Pållast} + R_{mk} = 1200 + 3220 = 4420 \text{ kN}$$

För påhängslast ned till nivå -40 i enlighet med Figur 4-8 erhålls:

$$z = [0:-1:-40]$$

$$om = \pi \cdot 0.3$$

$$cuk = \text{interp1}([0, -60], [12, 12 + 1.5 \cdot 60], z, 'linear', 'extrap'); \% \text{ OKORR}$$

$$wt = \text{ones}(1, \text{length}(z)); wt([1, \text{end}]) = 0.5$$

$\alpha = 1.0 \%$ (not: vanligen 0.7, men här beräkningsmodellen satt lika 1.0)

$Rmk = \sum(om.*dz.*wt.*cuk.*\alpha) = 1580 \text{ kN}$

$Pållast + Rmk = 1200 + 1580 = 2780 \text{ kN}$

Detta kan jämföras mot ca 2700 kN enligt Figur 4-16.

Resultaten i Figur 4-8 till Figur 4-16 och därmed modellens beteende bedöms som rimliga.

4.3.4. Kommentarer till beräkningsresultat

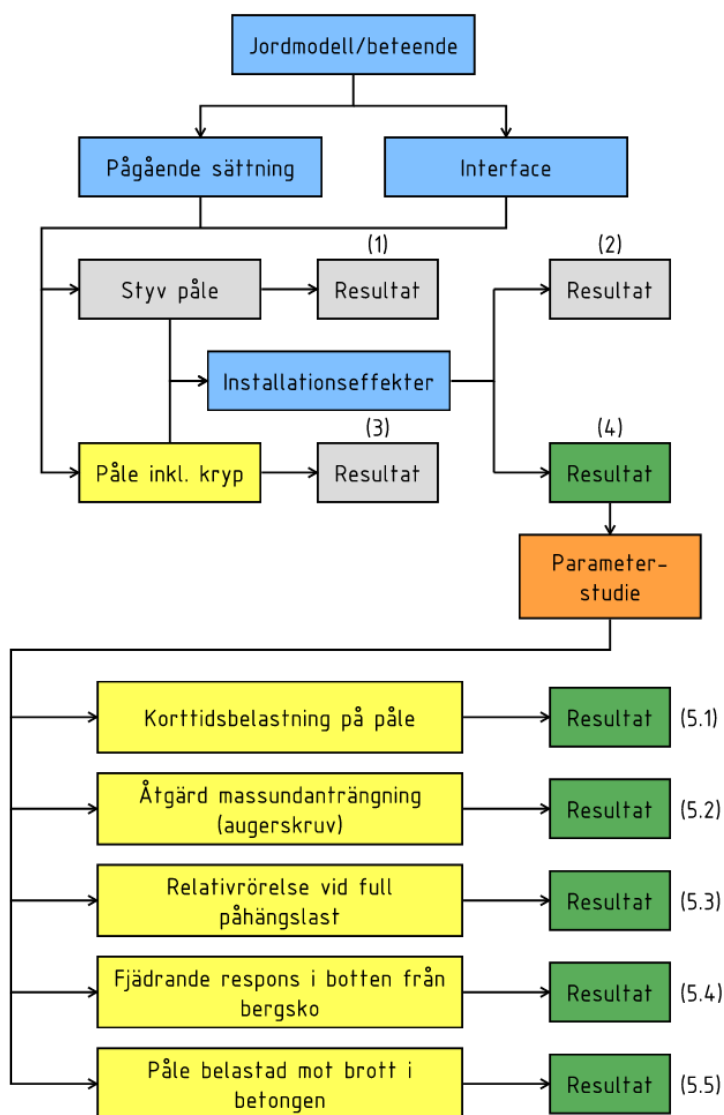
Beräkningsresultat redovisade i Figur 4-10 och Figur 4-12 visar på en större deformation i påtoppen än i jorden vid $t=0$. I normalfallet finns en platta gjuten ovan påltopp. Plattan skulle i dessa fall utsättas för ett kontakttryck från jorden och rörelsen i påltoppen bör rimligen vara lika stor som i jorden initialt.

Utförda beräkningar med avseende på installationseffekten (del 2 och 4) redovisar inte deformationer till följd av hävning vid installationen. Sättningen i jorden som redovisas i figur Figur 4-11 och Figur 4-13 avser deformation efter hävning och totalsättningen kan antas överskattas till viss del.

I samband med konsolideringen utjämnas porövertrycken från massundanträngningen under kort tid vilket inte riktigt stämmer överens med mätningar för projekt i liknande förhållanden. Troligen beror det på att jordmodellen SSC är isotrop och belastningar i samband med massundanträngningen inte överstiger det horisontella förkonsolideringstrycket. Spänningsökningen sker då elastiskt och portrycksutjämnningen går betydligt fortare. För att studera portryck och dess utjämnning närmare rekommenderas en mer avancerad beräkningsmodell.

5. Parameterstudie

Parameterstudien utförs genom att valda indata justeras för att studera respons i jämförelse med tidigare resultat. Som referens till parameterstudien används resultat från del 4) från verifieringsberäkningarna, det vill säga den mest realistiska modellen som beaktar både krypning i påle och installationseffekter. Analyserna och resultaten från parameterstudien benämns del 5.1 – 5.5 enligt Figur 5-1 nedan, och redovisas i följande avsnitt 5.1 till 5.5.

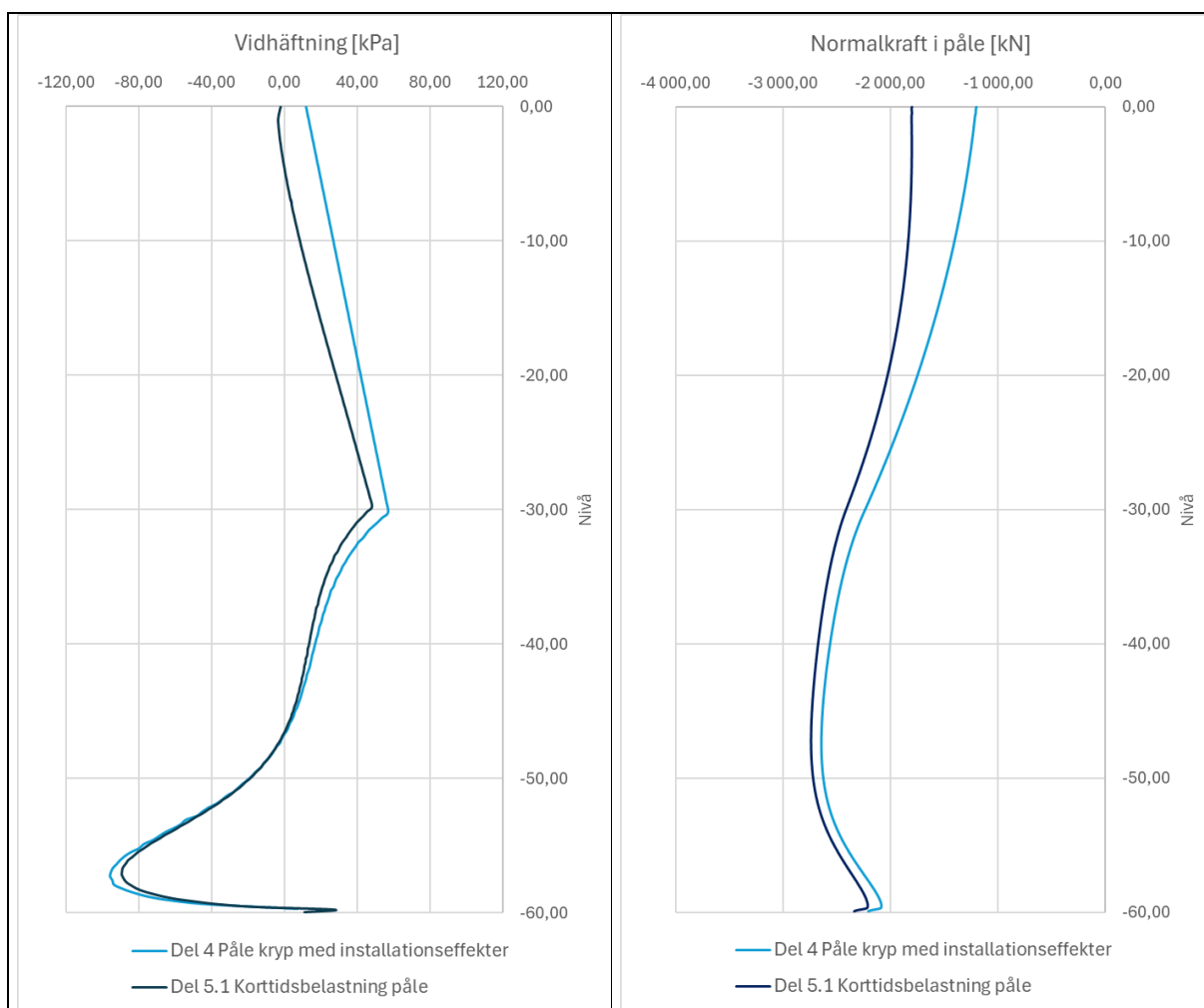


Figur 5-1 Parameterstudie, analyser 5.1-5.5

5.1. Korttidsbelastning på påltopp

Lasten på påltoppen ökas med +50 %, från 1200 kN till 1800 kN, med varaktighet över en dag. Resultat se Figur 5-2. Resultatet visar att påhängslasten minskar på grund av att pålen deformeras, och att max normalkraft i pålen ökar endast marginellt.

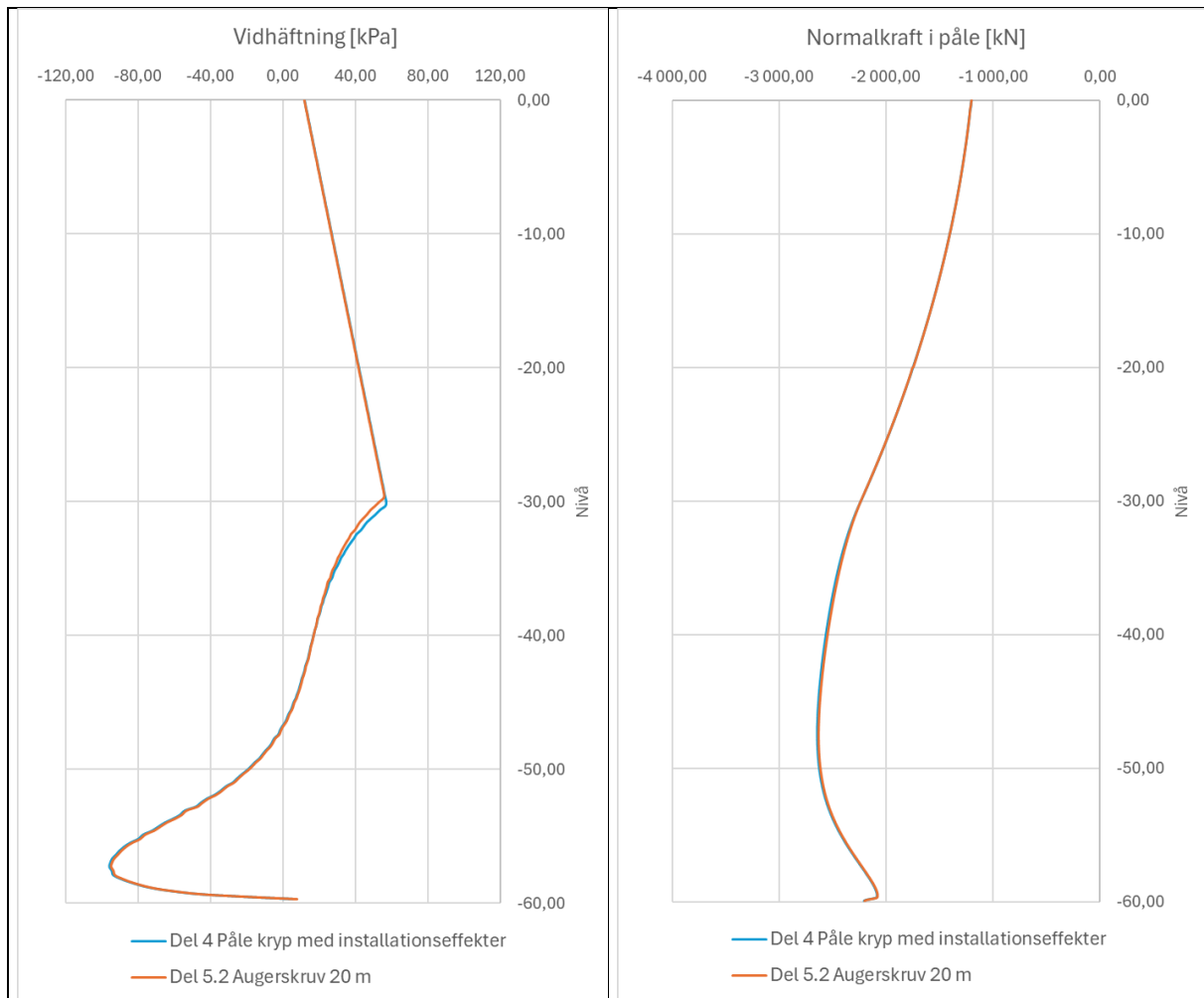
Resultatet bekräftar uppgiften i Pålkommissionens rapport 100 avsnitt 2.1.6, om att påhängslast inte behöver kombineras med variabla laster.



Figur 5-2 Resultat för del 5.1 – korttidsbelastning på påltopp

5.2. Reduktion av installationseffekter med augerskruv

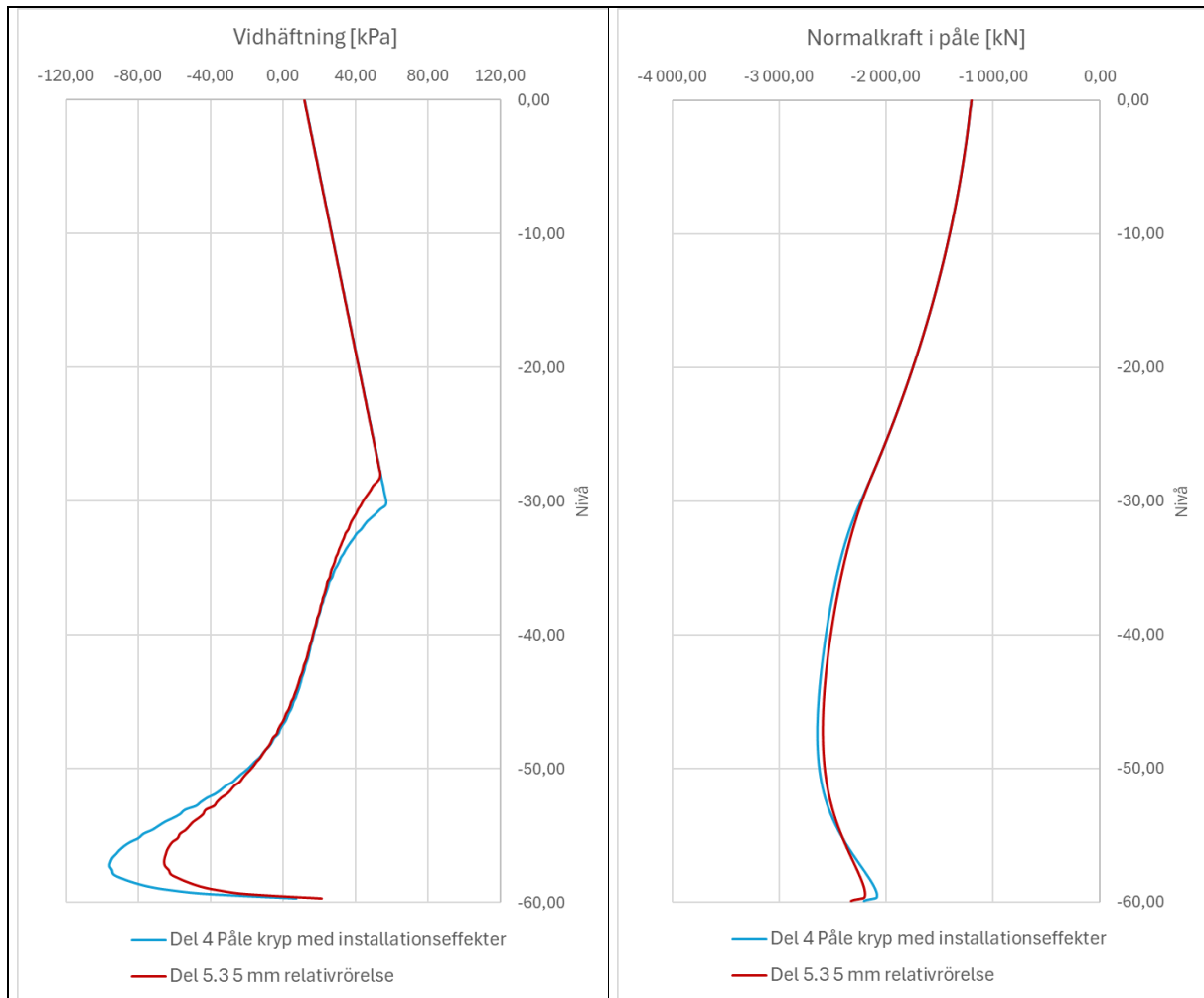
Förborrning med augerskruv till 20 m djup modelleras genom att reducera pålens installationseffekt med 70 % i modellens översta 20 m. Resultatet, se Figur 5-3, visar att förborrningen har helt marginell inverkan på påhänglasten och normalkraften i pålen.



Figur 5-3 Resultat för del 5.2 – Reduktion av installationseffekter med augerskruv

5.3. Ökad relativrörelse mellan påle och jord för full påhängslast

Antagen relativförskjutning 2 mm för full vidhäftningsspänning ökas till 5 mm. Resultatet, se Figur 5-4, visar att förändringen har viss betydelse för påhängslasten längs pålen, men liten betydelse för storleken på max normalkraft i pålen.

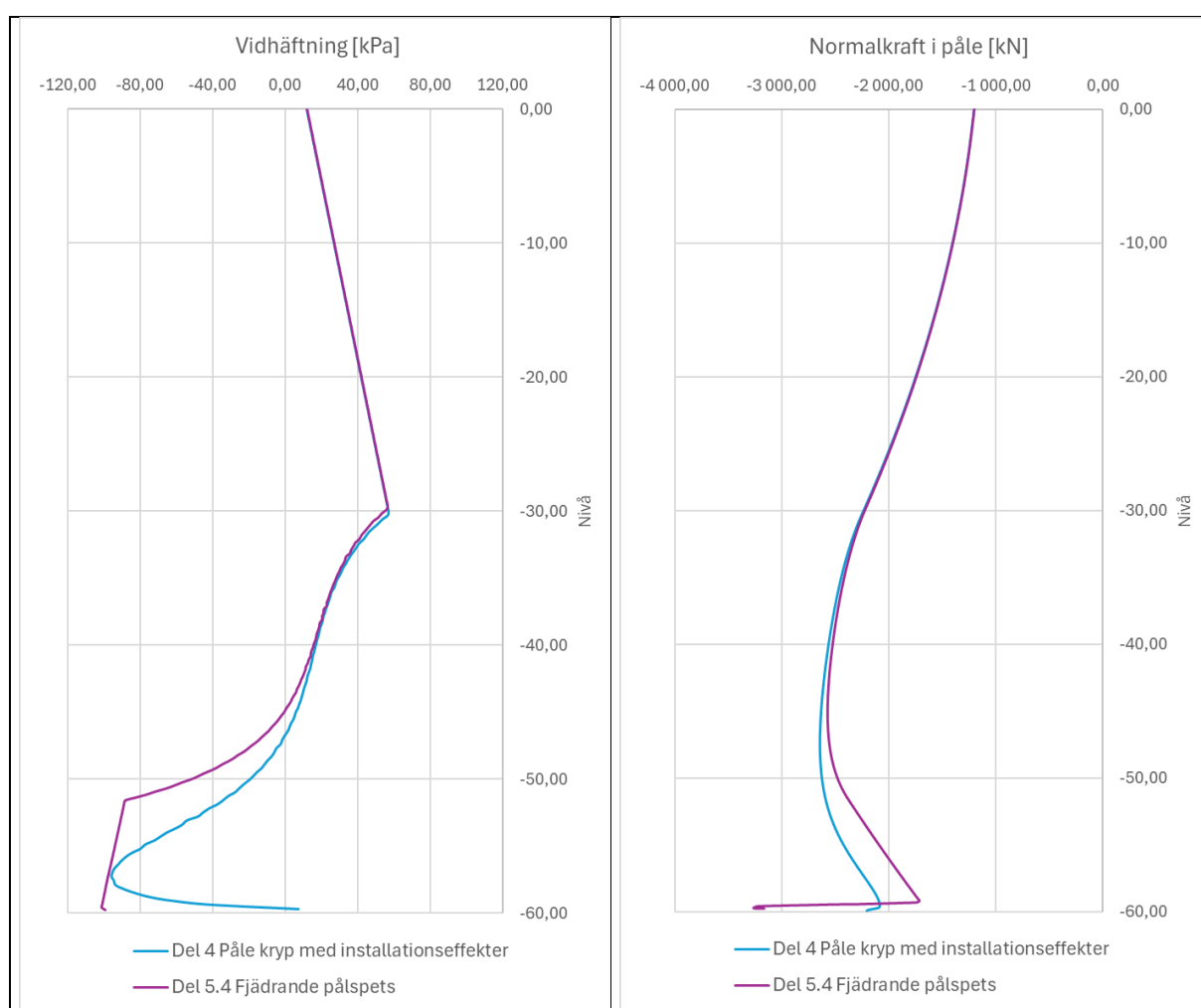


Figur 5-4 Resultat för del 5.3. Ökad relativrörelse mellan påle och jord för full påhängslast

5.4. Fjädrande respons vid pålspetsen

För att modellera fjädrande respons vid pålspetsen, används i modellen ett tunt linjärelastiskt material som tilldelas en styvhet motsvarande 5 mm deformation vid en belastning på 1200 kN. Resultatet, se Figur 5-5 visar att förändringen har viss betydelse för påhänglasten längs pålen, men liten betydelse för storleken på max normalkraft i pålen. Däremot reduceras normalkraften på pålspetsen markant, vilket har betydelse för bergskon.

Den ökande normalkraften närmast botten är inte realistisk och beror på så kallat "numersikt brus" till följd av bland annat begränsad nodtäthet för det elastiska materialet vid pålspetsen.



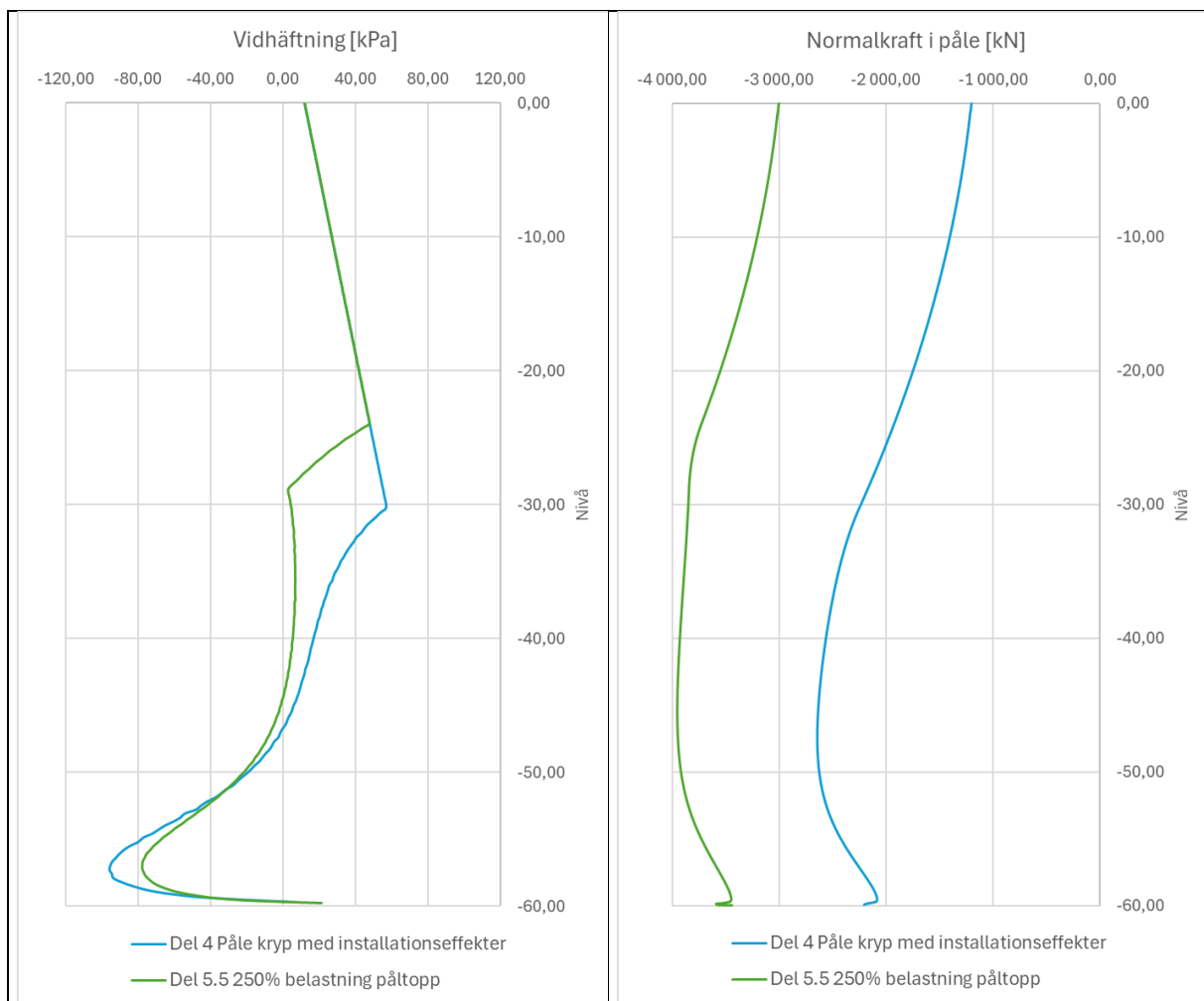
Figur 5-5 Resultat för del 5.4. Fjädrande respons vid pålspetsen

5.5. Ökad last på pålen till nära pålens normalkraftskapacitet

För att studera pålens interaktion med jorden då lasten på pålen ligger nära pålens normalkraftskapacitet, har lastvärdet i påltoppen höjts med +1800 kN, från 1200 kN till 3000 kN.

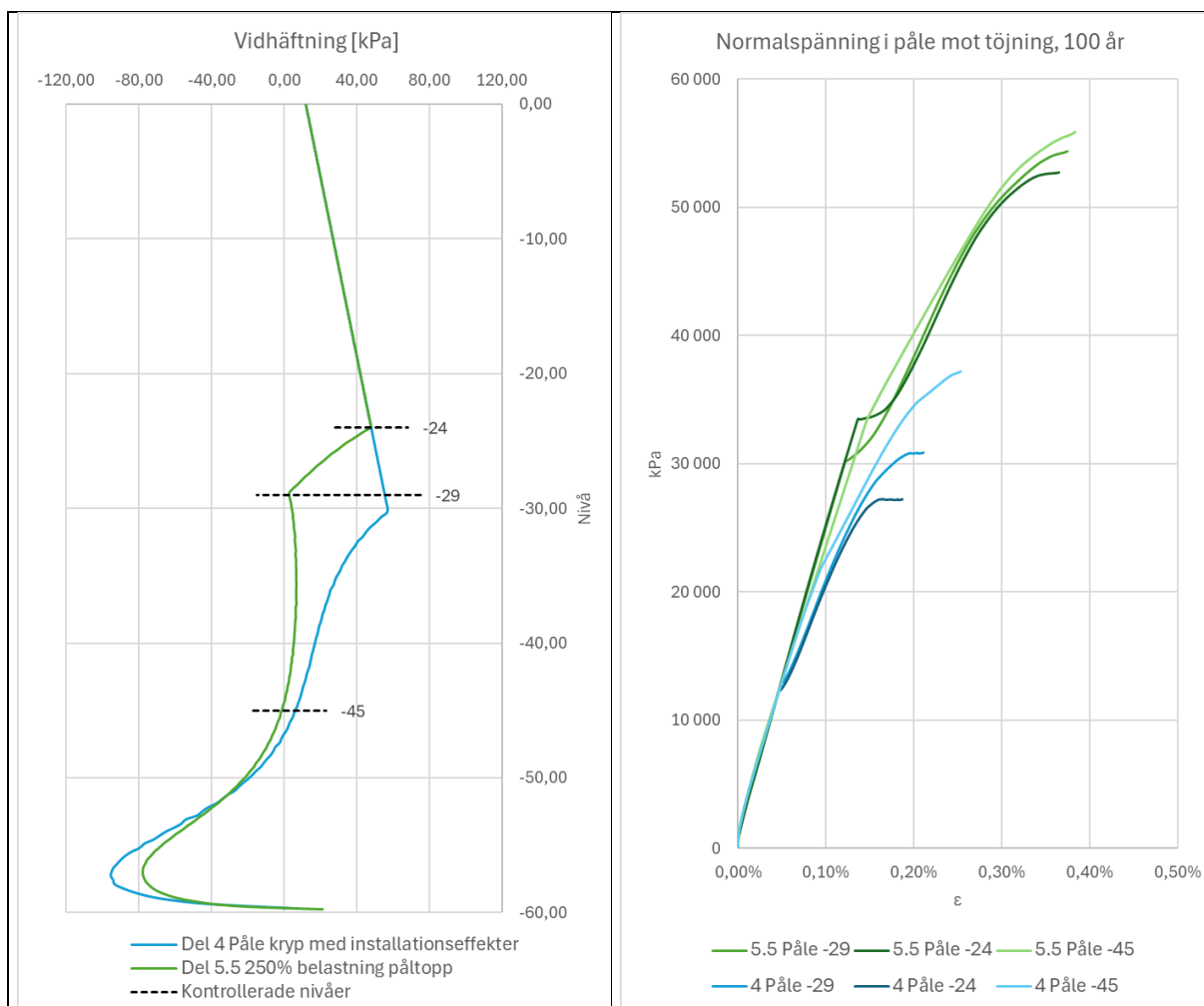
Figur 5-6 höger, visar att max normalkraft i pålen ökar från ca 2700 kN till 4000 kN, som motsvarar en belastningsnivå på 95% av tryckkraftskapaciteten för betongpålen som är $\pi \cdot 0,15^2 \cdot 60 \text{e}3 = 4240 \text{ kN}$. Ökningen i max normalkraft är $4000 - 2700 = +1300 \text{ kN}$, vilket är 500 kN mindre än ökningen av lasten på påltoppen +1800 kN. Den ökade belastningen ger ökad deformation i pålen som medför mindre påhängslast.

Figur 5-6 vänster, visar speciellt att påhängslasten sjunker till nära noll på en längre sträcka längs pålen, från nivå -30 till -45. På hela denna sträcka är alltså vertikallrörelsen i pålen i stort sett lika vertikallrörelsen i jorden. Det vill säga pålen deformeras lika omgivande jord, se Figur 5-8.

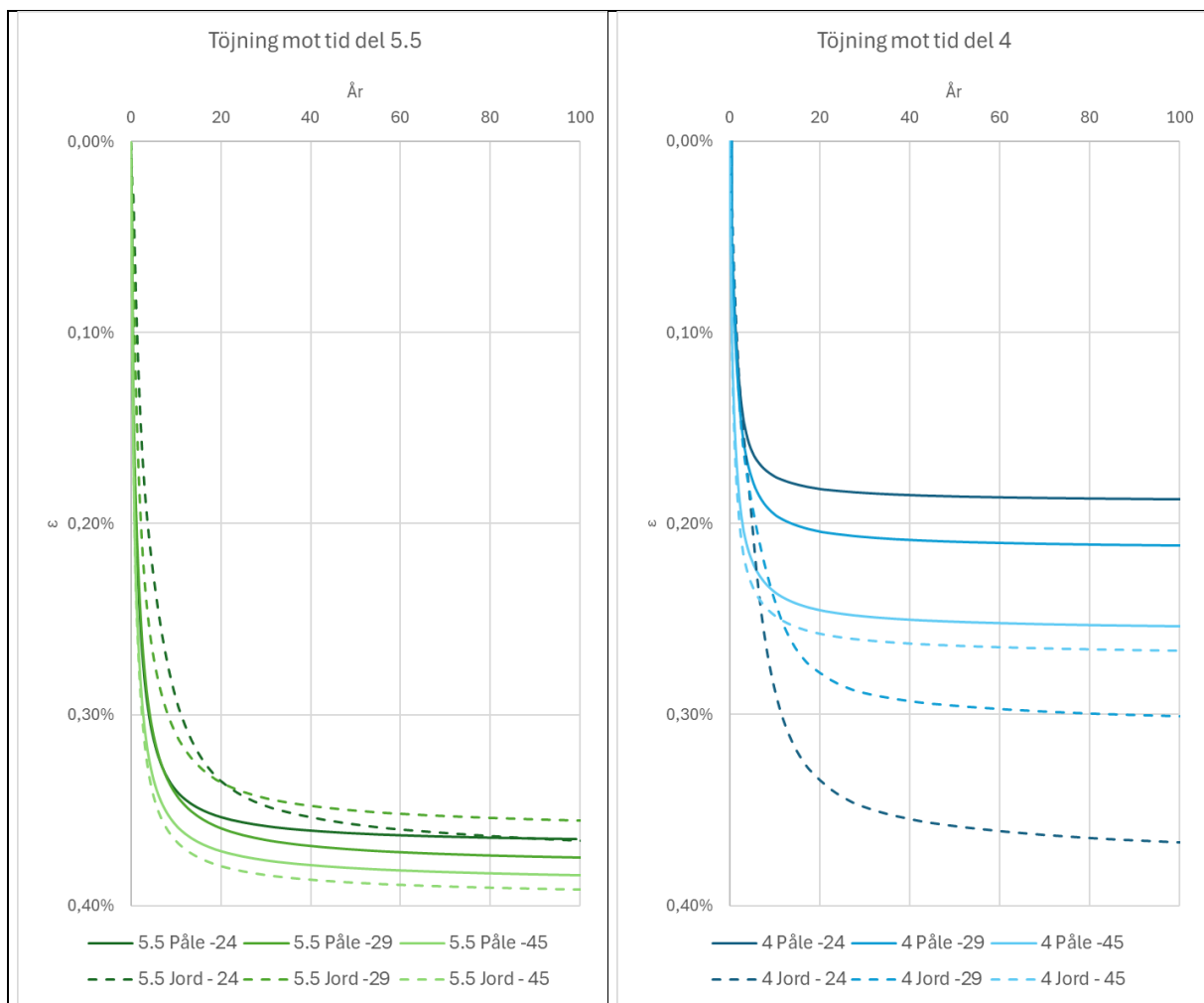


Figur 5-6 Resultat för del 5.5. Ökad last på pålen till nära pålens normalkraftskapacitet

Figur 5-7 nedan visar töjning i pålen för tre valda intressanta nivåer, 24, 29 respektive 45 m under påltoppen. I den övre punkten är påhängslasten lika stor för beräkning 4 och beräkning 5.5. I den mellersta punkten är påhängslasten nära noll i beräkning 5.5 och töjningen i pålen respektive jorden är lika stor, vilket ses till vänster i figur Figur 5-8. I den undre punkten är summan av påhängslasten som störst i både beräkning 4 och beräkning 5.6 vilket även gäller normalspänningen i pålen, se Figur 5-6.



Figur 5-7 Normalspänning mot töjning i påle för tre valda punkter, 24, 29 respektive 45 m under påltoppen



Figur 5-8 Töjning i pålen och jorden mot tid för punkter enligt Figur 5-7

6. Slutsatser

En integrerad beräkningsmodell som inkluderar både lerans och betongens tidsberoende effekter och beaktar svensk empiri har implementerats och verifierats.

Beräkningsmodellen bedöms ge realistiska resultat, men för vissa aspekter, speciellt installationseffekten, skulle jämförelse mot mätdata behöva göras för att säkerställa de exakta värdena.

Modellen har använts för att studera processen för påhängslaster och hur olika parametrar inverkar på påhängslasternas storlek. Följande ger minskade påhängslaster:

- Interaktion påle – jord: När jorden hänger sig på pålarna, medför detta att jorden avlastas, vilket minskar sättningarna i jorden och därmed påhängslasterna.
- Deformationer i pålen, speciellt krypdeformationer vid höga belastningsnivåer, och vid pålspetsen.
- Korttidsbelastning på påltoppen.

Följande ger ökade påhängslaster:

- Installationseffekt

Ovanstående bör beaktas för att erhålla en korrekt och ekonomisk dimensionering.

Det kvarstår att verifiera modellen mot mätdata, speciellt installationseffekten i jorden respektive krypning vid höga belastningsnivåer i pålen, samt även att studera knäckningseffekter i pålen vid höga belastningsnivåer på stora djup med styv lera.

Litteraturförteckning

- [1] Bjerin, L. (1977) Påhängskrafter på långa betongpålar. Report No 2, Statens geotekniska institut, Linköping.
- [2] Broms, B. (1979). Negativ mantelfriktion längs pålar, Rapport 60, Pålkommisionen, Stockholm.
- [3] Eriksson, P., Jendeby, L., Olsson, T. & Svensson, T. (2004). Kohesionspålar, Rapport 100, Pålkommisionen, Linköping.
- [4] Claesson, P., Holmberg, G., Romell, J. (2007). Höghus Lilla Bommen, Göteborg. Uppföljning av kohesionspålning i mäktiga lerlager. SBUF projekt 11034.
- [5] Svahn, P.-O., Claesson, P., Isik, D. (2017). Kohesionspålar med påhängskrafter - uppföljning av verkningssätt och validering av beräkningsmodell. SBUF projekt 11938.
- [6] Claesson P. (2003). Long term settlements in soft clays, Doktorsavhandling, Institutionen för geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- [7] Hedlund H., Blanksvärd T., Jonasson, J.-E. (2018). Långtidsstudie av krypdeformationer i betongpålar med höga påkänningar. SBUF projekt 12526.
- [8] Kettil P. (2021). Programbeskrivning Fem3dyn v 1.0.6, egenutvecklat program för strukturanalys.
- [9] PLAXIS 2D, version 2023.2
- [10] SS-EN 1992-1-1: Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader