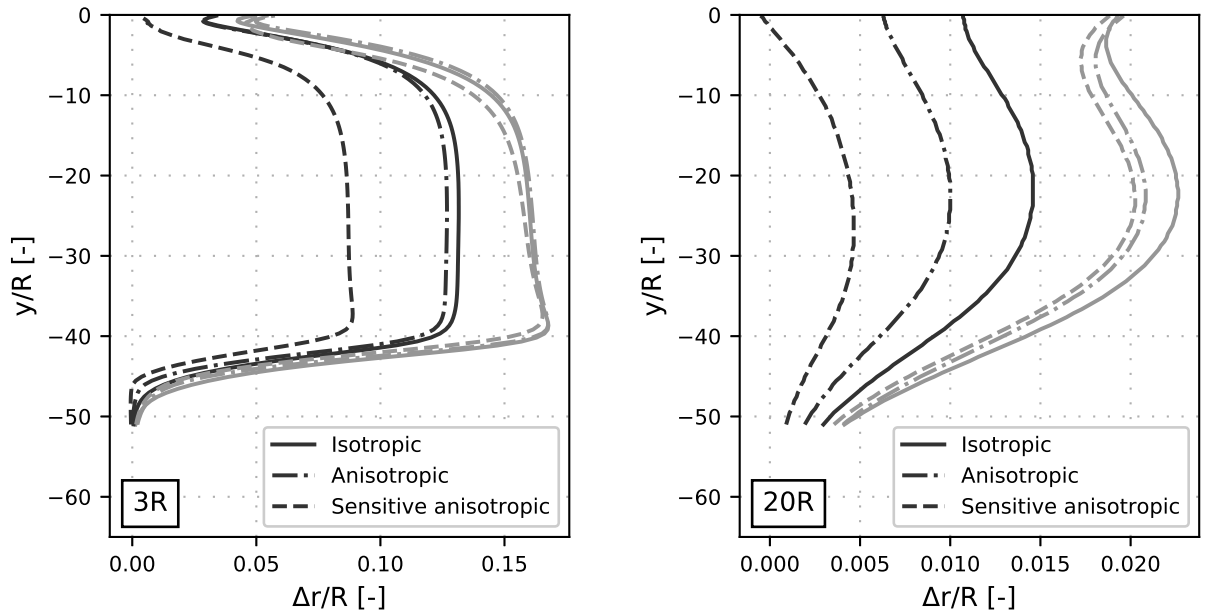
Inom BIG projektet *Disturbing issues with piles* (A2019-19) som finansierats av Trafikverket och SBUF projektet *Prognos av massförskjutning på grund av pålinstallation i lösa jordar* (13614) har Jonatan Isaksson (NCC) undersökt inverkan av installationen av massförträngande pålar i lera. Arbetet har resulterat i en halvtidsrapport (Isaksson 2022) inom ramen för hans doktorandstudier på Chalmers Tekniska Högskola. Detta dokument utgör en sammanfattning av det genomförda arbetet.

Sammanfattning: Disturbing issues with piles

Befolkningstillväxt och ökad urbanisering driver städer världen över till ett mer effektivt utnyttjande av stadens tillgängliga ytor. Samhällsbyggare utmanas att möta dessa krav genom att bygga högre, bygga under mark och att uppföra bostäder och affärslokaler på mark med sämre tekniska egenskaper som exempelvis lös sensitiv lera. Detta leder till ett omfattande behov av djup pålgrundläggning för många nya samhällsbyggnadsprojekt. Prefabricerade massförträngande betongpålar är den vanligaste påltypen som används i Sverige (Pålkommisionen 2022) där installationen leder till en påverkan på omgivningen genom spänningsförändringar och rörelser i jorden vilket kan leda till problem för befintliga byggnader och anläggningar. Studierna inom detta projekt har syftat till att undersöka de viktigaste faktorerna i jorden som påverkar förskjutning och deformation till följd av installation av en enskild massförträngande påle i lös lera. Inledningsvis fokuserade arbetet på framtagandet av ett numeriskt ramverk för stora deformationer som kombinerats med en kopplad formulering av deformationssambandet mellan jord- och porvatten och en avancerad effektivspänningsbaserad konstitutivmodell för lös lera (SCLAY1S). Det numeriska ramverket möjliggjorde simuleringar av pålinstallation genom en vertikal penetration där inverkan av bland annat lerans anisotropi, sensitivitet, styvhet och förkonsolideringstryck på den resulterande rörelsen i jorden undersöktes. Utöver rörelsen direkt efter pålinstallation har även efterföljande rörelser till följd av konsolidering av porvattenövertryck skapade av pålinstallationen studerats. En jämförelse mellan beräknad horisontell rörelse till följd av pålinstallation och efterföljande konsolidering i tre leror med olika karakteristiska egenskaper (en isotropisk, en anisotropisk samt en sensitiv anisotropisk) visas i Figur 1. De vertikala rörelserna längs med markytan på ett djup av en pålradie (R) under markytan för de tre lerorna presenteras i Figur 2. Vidare undersöktes hur enskilda egenskaper hos leran påverkar massförskjutning till följd av pålinstallation genom en Global Sensitivitets Analys (GSA). Egenskaperna hos leran varierades i GSA:n genom en förändring av parametrar i den konstitutiva modellen SCLAY1S. Inverkan på massförskjutningen av olika parametrar undersöktes direkt efter pålinstallation och efterföljande konsolidering. Responsen för systemet har kvantifierats genom att den totala förskjutna jordvolymen genom olika tvärsnitt beräknats där *mean response* är medelvärdet av den förskjutna jordvolymen från samtliga analyser normaliserad mot den installerade pålvolymen. Figur 3 visar känsligheten på förskjuten jordvolym för två tvärsnitt belägna tio pålradier ($10R$) respektive $40R$ från den installerade pålen. Den totala känsligheten (*Total effect*), det vill säga förändring i systemets respons (förskjuten jordvolym) till följd av samma variation av parametrar, är 5 respektive 10 gånger större efter konsolidering i jämförelse med direkt efter pålinstallation. Inflytandet av jordens mekaniska egenskaper, genom modellparametrar som kontrollerar dessa, ökar således markant till följd av effektivspänningsförändring efter konsolidering. En *Negative effect* indikerar att mindre jordvolym förskjuts till följd av en 10% ökning av aktuell modellparameter och en *Positive effect* indikerar en ökning.

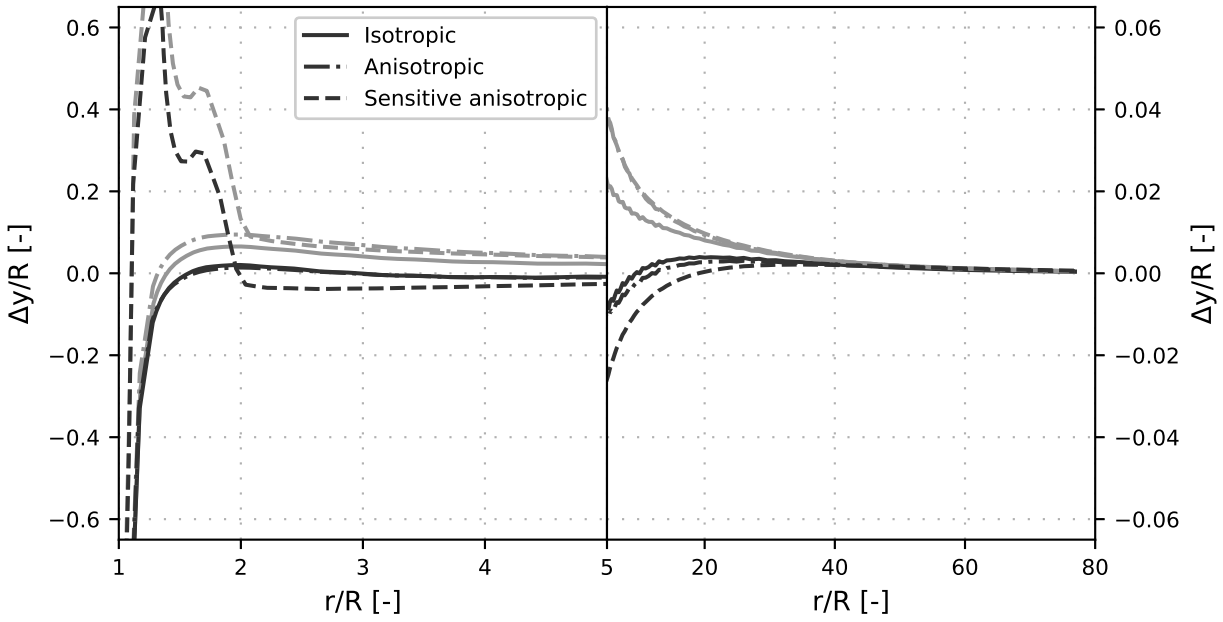
De mest inflytelserika parametrarna för förskjutningen, indikeras av storleken på staplarna, direkt efter installation är den elastiska- (κ) och plastiska styvheten (λ_i) tillsammans med lutningen på brottvillkoret (critical state line, M) och överkonsolideringsgraden (OCR). Efter konsolidering dominerar lutningen på brottvillkoret (critical state line, M) och överkonsolideringsgraden (OCR) storleken på den förskjutna jordvolymen. Parametern ω som styr hastigheten på utvecklingen av anisotropi samt a och b som styr hur snabbt leran går mot ett stört tillstånd visades vara mindre inflytelserika för variation



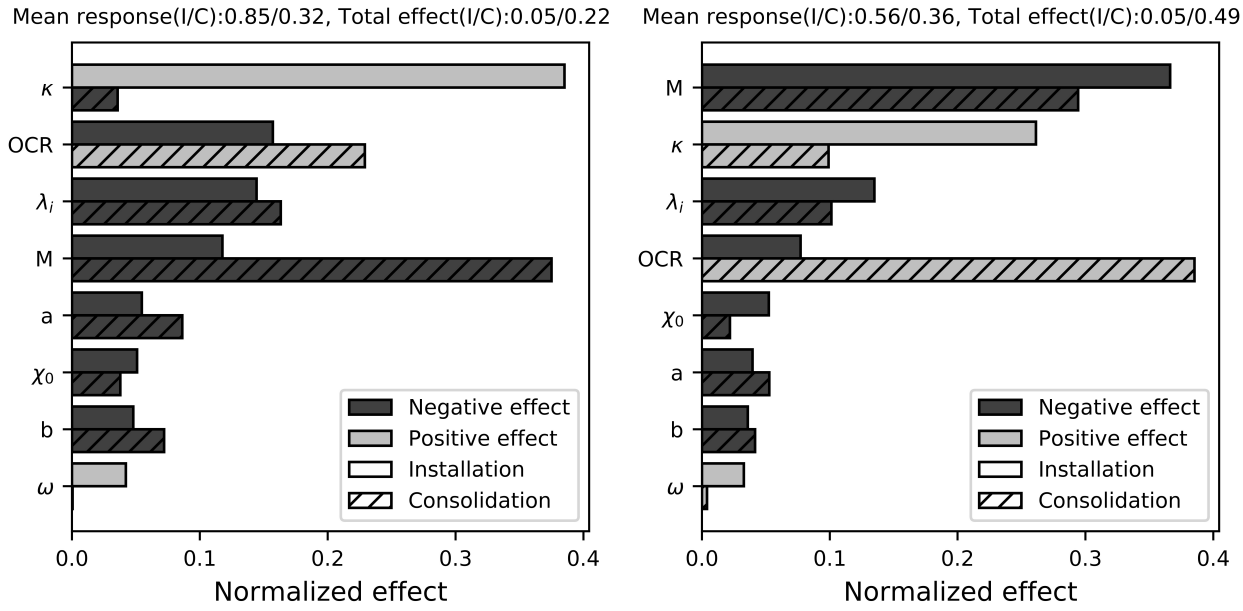
(a) Horisontell rörelse, $r = 3R$

(b) Horisontell rörelse, $r = 20R$

Figur 1: Radiell rörelse (Δr) till följd av pålinstallation (grå) och efterföljande konsolidering (svart) nära pålen ($3R$) och på avstånd från pålen ($20R$)



Figur 2: Vertikal rörelse (Δy) nära markyta (1R under markyta) till följd av pålinstallation (grå) och efterföljande konsolidering (svart)



(a) $10R$

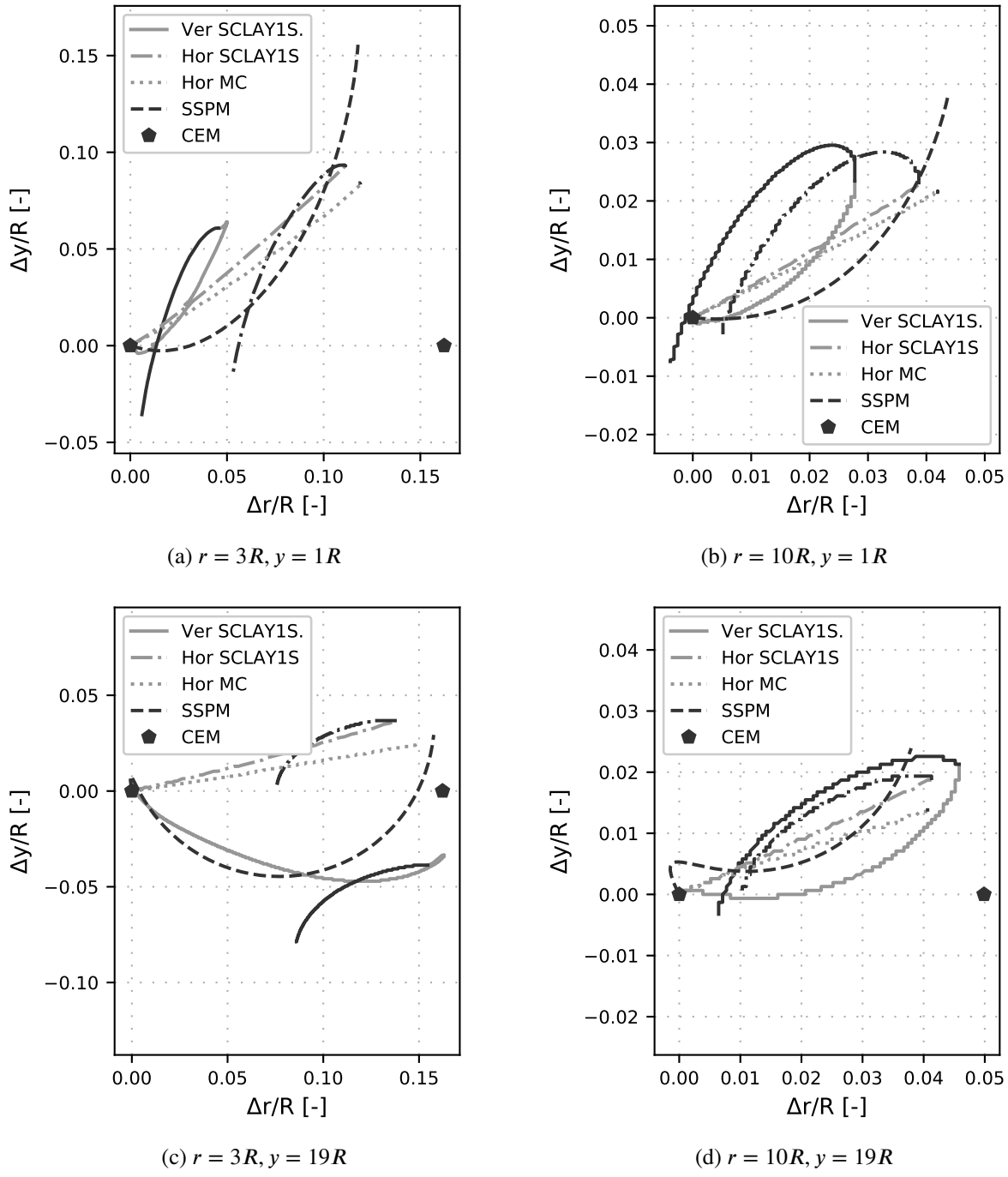
(b) $40R$

Figur 3: Resultat från två Globala Sensitivietets Analyser. Analyserna är utförda på den totala förskjutna jordvolymen som passerar två vertikala tvärsnitt belägna $10R$ respektive $40R$ från den installerade pålen. Figuren visar resultat både direkt efter installation (I) och konsolidering (C).

inom intervallet +-10%. Samma variation av parametern χ_0, som styr den initiala skillnaden mellan ostört och omrört tillstånd, har begränsad effekt. Det är här viktigt att påminna sig om tidigare resultat som visat att inkludera sensitivitet har en betydande inverkan och resultaten här kan tolkas som att exakt värde på sensitiviteten har mindre betydelse så länge den inkluderas i analysen. I detalj kan förändringen i den förskjutna jordvolymen till följd av en ökning av en parameter från ett lågt värde (-10%) till ett högt värde (+10%) beräknas genom att avläsa den normaliserade effekten och multiplicera denna med den totala effekten. Exempelvis kan förändring av förskjuten jordvolym som härleds till en förändring i (κ), dvs. en lägre elastisk styvhet, genom tvärsnittet på $10R$ från pålen avläsas till (response (0.4) * total effect (0.05) = 0.02) vilket innebär en ökning av den förskjutna jordvolymen motsvarande 2% av den totala installerade pålvolymen.

En jämförelse mellan några tillgängliga metoder för att prognosticera rörelsen till följd av pålinstallation har också genomförts. Utöver metoden med vertikala installation i en kopplad effektivspänningsbaserad modell (Ver SCLAY1S) har ytterligare en metod för att installera pålen i FE-beräkningar använts. Denna metod beskriver pålinstallationen genom en horisontell expansion, motsvarande pålens volym, av en långsmal geometri eller kavitet (lika med pålens slutliga längd). Den horisontella expansionen är en förenklad metod som kan används tillsammans med vanligen använda FE-formuleringar. Den horisontella expansionen i FE har använts i kombination med en kopplad SCLAY1S modell (Hor SCLAY1S) och en totalspänningsbaserad linjärelastisk perfektplastisk respons kombinerat med ett Mohr Couloumb (MC) brottvillkor(Hor MC). Utöver de utförda FE-beräkningarna har även de analytiska modellerna Shallow Strain Path Method (SSPM) (Sagaseta m. fl. 1997) och expansionen av en oändlig cylindrisk kavitet (CEM) (Randolph m. fl. 1979) inkluderats i jämförelsen. Både SSPM och CEM baseras på ett antagande om att jorden har en konstant volym. SSPM simulerar en gradvis penetration av pålen från en markyta och ger vertikala och radiella rörelser, medan CEM endast ger radiella rörelser. Figur 4 visar utveckling av jordrörelsen till följd av pålinstallation både nära pålen ($3R$) och längre bort från pålen ($10R$) samt nära markytan ($1R$) och djupare ($19R$) ned i jorden. Jämförelsen

mellan de olika metoderna visar på deformationer i samma storleksordning. CEM framträder som ett övre gränsvärde för de radiella rörelserna som kan väntas uppkomma till följd av pålinstallationen. På större avstånd, Figur 4(b) och (d), från pålen visar de tre FE metoderna samt SSPM liknande vertikala och horisontella rörelser direkt efter pålinstallation. Nära pålen, Figur 4(a) och (c), är resultaten från metoderna mer olika. Rörelsen till följd av konsolidering från de två FE-metoderna är liknande med en vertikal nedåtrörelse och en radiell rörelse mot pålen. Ingen konsolideringsrörelse kan fångas med CEM, SSPM eller en totalspänningsbaserad FE-beräkning till följd av modellernas formulering.



(a) $r = 3R, y = 1R$

(b) $r = 10R, y = 1R$

(c) $r = 3R, y = 19R$

(d) $r = 10R, y = 19R$

Figur 4: Rörelse till följd av simulerad pålinstallation från fem olika prognoser. Rörelsen visas för två punkter nära pålen ($r = 3R$) och två punkter längre bort från pålen ($r = 10R$) belägna på två olika djup ($1R$ och $19R$) från markytan

Slutsatser

- Simuleringen av pålinstallation visar att den initiala responsen från pålinstallation är odränerad i en typisk svensk lera, vilket leder till en uppbyggnad av porövertryck och en förskjutning av jorden bort från pålen utan någon volymförändring. Den efterföljande utjämningen av porövertryck ger en volymetrisk kompression av leran som i sin tur leder till nedåtgående rörelser och horisontella rörelser in mot pålen.

- Massundanträngningen i en isotropisk, en anisotropisk samt en sensitiv anisotropisk lera har jämförts. De initiala vertikala förskjutningarna nära pålen ökade till följd av både anisotropi och sensitivitet hos leran vilket innebär att en större andel av jorden försköts till en position nära pålen. Storleken på jordrörelserna till följd av utjämningen av porövertryck visades vara starkt beroende av jordens egenskaper såsom anisotropi och sensitivitet.

- Två olika numeriska metoder för att simulera pålinstallation jämfördes för en anisotropisk sensitiv lera med en kopplad numerisk formulering. Den första metoden modellerade pålinstallationen som vertikal penetration medan den andra, förenklade, metoden modellerade pålinststallationen som en horisontellt expanderad kavitet. Nära pålen, inom ett avstånd av ungefär 10 pålradier, visade de två numeriska installationsmetoderna olika förskjutningsfält. På avstånd från pålen visade däremot de två metoderna likartade förskjutningar vilket indikerar att den förenklade metoden är nöjaktig för att prognostisera förskjutningar på avstånd från en installerad påle. Rörelsen till följd av utjämning av porövertryck visades vara likartad för de två olika metoderna på samtliga undersökta avstånd från pålen.

- Den FE baserade numeriska kavitetsexpansionen användes också tillsammans med en linjärelastisk och en linjärelastisk idealplastisk jordrespons i en totalspänningsformulering. Den linjärelastisk idealplastiska modellen gav liknande förskjutningar som den mer avancerade effektivspänningsbaserade modellen, som dessutom beaktade både anisotropi och sensitivitet. Däremot prognostiserade den linjärelastiska modellen något större horisontella och något mindre vertikala förskjutningar jämfört med de effektispänningsbaserade FE simuleringarna. Ingen konsolideringsrörelse kan fångas med en totalspänningsbaserad jordmodell.

- Resultaten från de FE-baserade simuleringarna har även jämförts med den analytiska modellen Shallow Strain Path Method (SSPM) och Cavity Expansion Method (CEM). Samtliga jämförda beräkningsmetoder visar en liknande reduktion av rörelser med ökat avstånd som förenklat kan beskrivas med att ett fördubblat avstånd från pålen ger en halverad rörelse. Sammanfattningsvis visar SSPM på god sammstämmighet med resultaten från simuleringar där jorden modellerats i ett odränerat tillstånd och CEM bildar ett övre gränsvärde för radiella deformationer för samtliga beaktade metoder.

Diskussion

Metoderna som används i detta arbete möjliggör inblick i processerna som styr rörelsen till följd av pålinstallation i lera. En större förståelse för vad som händer i jorden vid pålinstallation utökar möjligheten att förutse problem relaterade till pålinducerade rörelser tidigt och flytta hanteringen av dessa rörelser till ett proaktivt skede snarare än ett reaktivt skede av ett faktiskt projekt. Vidare visar jämförelsen av den beräknade rörelsen till följd av installationen av en påle av vanliga prognosmetoder och den inom projektet framtagna modellen på en relativt god sammstämmighet. Detta gäller för en odränerad situation och på ett något större avstånd från den installerade pålen och styrker rimligheten i

de metoder som vanligen används i branschen. Utöver detta ger arbetet även en insikt i återgång av rörelser till följd av konsolidering efter avslutad installation av en påle. Denna konsolideringsrörelse fångas även väl i en effektivspänningsbaserad modell med en förenklad installationsmekanism som kan utföras i konventionella FE-program. Den signifikant numeriska konsolideringsrörelsen behöver verifieras med ytterligare fältdata för att användas som generell slutsats.

Avslutningsvis är det värt att betona att användandet av massförträngande betongpålar i lera är associerat med förskjutningen av en jordvolym i samma storlek som den installerade pålvolymen. Rörelserna kommer vara som störst nära pålen och avta med ett ökat avstånd från pålen. Hur en icke ideal jordgeometri som exempelvis en lutande markyta eller schakt påverkar jordrörelsen återstår att undersöka i detalj tillsammans med inverkan på/av befintlig grundläggning och konstruktioner. Den inom projektet framtagna numeriska ramverket möjliggör vidare undersökningar av detta och är tillsammans med rörelse till följd av installation av en pålgrupp inom ramen för del 2 av Jonatan Isakssons doktorandstudier

Referenser

Isaksson, J. (2022). ”A numerical study on massdisplacements from piling in natural clay”. I: *Technical report for mid-term seminar. Chalmers University of Technology.* URL: https://www.sbuf.se/Projektsida?project=f3dad4d5-565e-4a27-9904-d08b5e918204.

Pålkommisionen (2022). *Pålstatistik för Sverige 2021*. http://www.palkommissionen.org/. Accessed: 2022-06-27.

Randolph, M., Steenfelt, J. S. och P., W. C. (1979). ”The effect of pile type on design parameters for driven piles”. I: *Proceedings VII ECSMFE 1979, Brighton,* 2, s. 107–114.

Sagaseta, C., Whittle, A. och Santagata, M. (1997). ”Deformation analysis of shallow penetration in clay”. I: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 21.10, s. 687–719. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9853(199710)21:10<687::AID-NAG897>3.0.CO;2-3.