

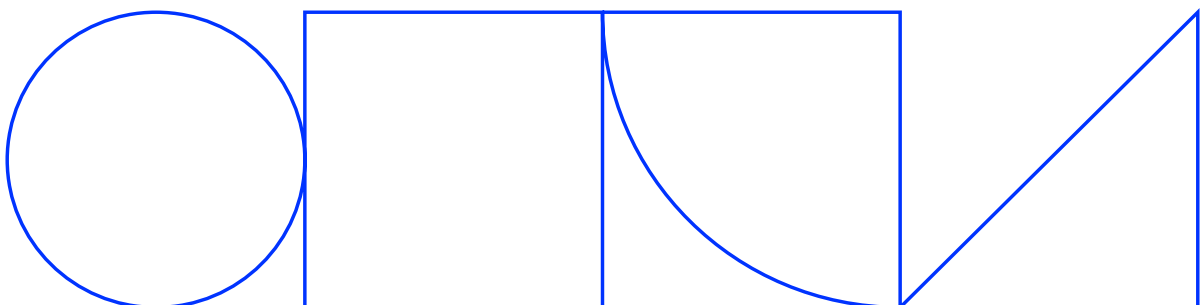
Prognos av massförskjutning på grund av pålinstallation i lösa jordar

Jonatan Isaksson
NCC AB

2025-11-18



CHALMERS



Förord

Detta dokument utgör en populärvetenskaplig sammanfattning av forskningsprojektet Prognos av massförskjutning på grund av pålinstallation i lösa jordar (SBUF 14168). Projektet har utförts som ett industridoktorandprojekt där undertecknad varit doktorand vid avdelningen för Geologi och Geoteknik, Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnad, Chalmers Tekniska högskola och samtidigt anställd på NCC AB. Den fullständiga rapporteringen av projektet finns i doktorsavhandlingen.

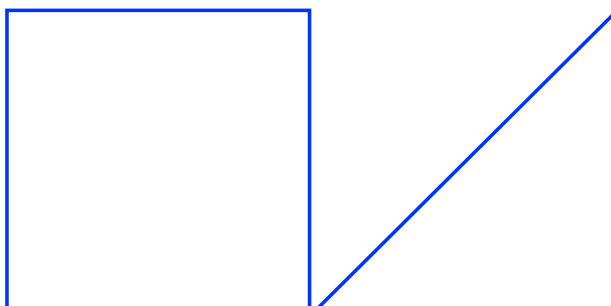
Isaksson, J. (2025) *On quantifying the installation effects of displacement piles in natural clays* [Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology].

Doktorandprojektet har finansierats genom SBUF projekt 13614 & 14168, av Trafikverket genom forskningsprogrammet BiG (Branschsamverkan i grunden) projekt A2019-19 & B2019-19 och av NCC AB. Jag är mycket tacksam till finansiärerna för att jag har fått möjligheten att genomföra mina doktorandstudier.

Jag vill rikta ett stort tack till min huvudhandledare Professor Jelke Dijkstra, handledare universitetslektor Mats Karlsson, examinator Professor Minna Karstunen och universitetslektor Ayman Abed för er stöttning under projektets gång och för er vilja att dela med er av er kunskap. Tack också till mina industrihandledare Jorge Yannie och Lars Hall för ert stöd.

Projektet har haft en referensgrupp bestående av: Kristy Heng (Trafikverket), Pia Johansson (Trafikverket), Michael Sabbatini (Peab), Jonny Wallgren (GEOS), Torbjörn Edstam (Skanska), Gunnar Holmberg (Skanska), Lars Hall (NCC), Peter Alheid (Hercules), Leif Jendeby (COWI), Tara Wood (Ramboll), Anders Beijer Lundberg (ELU) Jorge Yannie (GEN-monitoring). Tack för era synpunkter, delade tankar och för visat intresse.

Göteborg, oktober 2025
Jonatan Isaksson
jonatan.isaksson@ncc.se



Sammanfattning

Vid förtätning av städer krävs en mer effektiv användning av stadens tillgängliga utrymme. Historiskt sett är städer ofta belägna nära vatten där djupa avlagringar av naturlig lera är vanligt förekommande. Kombinationen leder till att allt större byggnader uppförs på mindre stabil mark, vilket kräver pågrundläggning. Prefabricerade solida betongpålar är en av de mest kostnadseffektiva grundläggningslösningarna. Installationen av dessa pålar leder dock till massförskjutningar och tillståndsförändringar i leran som omger de nya och befintliga konstruktionerna i det geotekniska systemet. Numera används avancerad numerisk analys rutinmässigt av praktiserande geotekniska ingenjörer för att kvantifiera jord-strukturinteraktioner. Att inkludera pålningsinstallationsfasen i analyser på systemnivå är dock komplicerat och försummas därför ofta. I praktiken förlitar sig konstruktörerna på empiriska relationer för att ta hänsyn till installationens inverkan på pålens respons, och inverkan av massförskjutning undersöks som ett separat konstruktionsfall där lerans tillståndsförändring ej beaktas.

Denna avhandling undersöker möjligheten att direkt inkludera pålning i den numeriska analysen av det urbana geotekniska systemet. Fokus låg på att numeriskt modellera markens förändringar i rum och tid under (delar av) pålcykeln. Numeriska modeller med olika komplexitetsnivå jämfördes med avseende på uppkomna rörelser i leran till följd av pålinstallation. De enklare modellerna visar liknande resultat avseende momentana rörelser i leran på ett avstånd >5 pålradier som de mer avancerade modellerna. Detta styrker antagandet om att kortsiktiga massförskjutningar sker under odränerade förhållanden och styrs av geometrin på den installerade pålen. Vidare visar forskningen att det är möjligt att numeriskt fånga varje steg av pålcykeln genom att använda ett numeriskt ramverk för stora deformationer och en konstitutiv modell som fångar de komplexa deformationsegenskaperna hos naturliga leror. Simuleringarna visar att geotekniska ingenjörer bör undvika att använda avancerade konstitutiva modeller samtidigt som man bortser från pålnings inverkan på leran. Rörelsen till följd av pålinstallation visades påverkas av styva gränser, befintliga fundament samt horisontella och vertikala styvhetsgradienter. Avslutningsvis kan de metoder som presenteras i detta arbete utgöra en grund för ytterligare numeriska studier av inflytandet av pålinstallation på urbana geotekniska system.

1. Inledning

Föreliggande dokument är en sammanfattning av forskningsprojektet "Prognos av massförskjutning på grund av pålinstallation i lösa jordar" med SBUF projektnummer 14186. Projektet redovisas i sin helhet i en doktorsavhandling med titeln "On quantifying the installation effects of displacement piles in natural clays" (Isaksson 2025).

2. Bakgrund

Genom historien har många städer grundats i närheten av sjöar och floder, ofta på djupa leravlagringar. Idag driver urbaniseringen en förtätning av dessa städer vilket leder till ökade krav på en effektiv användning av den tillgängliga ytan. Detta möts genom uppförandet av höga hus på lera i urbana miljöer vilket leder till omfattande pålgrundläggning. Utöver att säkra bärförmågan för den nya konstruktionen, har det blivit allt viktigare att kunna förutsäga nybyggnationens påverkan på angränsande konstruktioner. I Sverige utgör slagna prefabricerade solida betongpålar ca. 50–60% av den årligen installerade pålvolymen.

Pålcykeln separerar den systematiska studien av pålning i fyra sammanlänkade steg: *In-situ*, *installation*, *utjämning/konsolidering* och *belastning*. *In-situ* steget innefattar studien av det geotekniska systemets nuvarande tillstånd, inklusive existerande konstruktioner. Under *installation* förflyttar den solida pålen leran i dess läge. Detta sker genom en kombination av translation & rotation och deformation (töjning). Translationen & rotationen ger en massförskjutning, dvs. stora volymer jord som flyttas för att göra plats för de installerade pålarna. Töjningen leder i sin tur till en förändring av lerans tillstånd, dvs. spänning och struktur, i närheten av de installerade pålarna. Under *utjämning/konsolidering* strävar leran mot ett nytt jämviktstillstånd, vilket huvudsakligen drivs av utjämning av höga portryck nära den installerade pålen. Vid *belastning* studeras last-deformationssambandet hos pålen.

För att analysera effekten av pålinstallation i en urban miljö krävs ett systemperspektiv vilket innefattar interaktionen mellan nyligen installerade pålar, befintliga konstruktioner och den omkringliggande leran, över alla steg i *pålcykeln*. Numerisk modellering blir allt vanligare för att analysera tidsberoende geotekniska problem i stadsmiljö. Att inkludera effekterna av pålning i geotekniska systemanalyser är dock komplext till följd av de stora deformationer som uppstår i närheten av pålens spets vilket utesluter standardformuleringar för finita element (FE).

I dagens praxis inkluderas effekten av pålinstallationen på pålens last-deformationssamband i naturlig lera vanligtvis indirekt. Ofta används empiriska samband mellan pålbelastningstester och in situ-förhållanden före installationen, exempelvis: odränerad skjuvhållfasthet, vertikal effektivspänning eller CPT resultat, för dimensionering av bärförmågan hos enskilda pålar. Inverkan av markens tillståndsförändring efter pålningen på det större geotekniska systemet förbises dock ofta. Massförskjutningen beräknas vanligen separat, utan hänsyn tagen till inverkan från befintliga konstruktioner eller avvikande geometrier i så kallade

grönfältsförhållanden, med exempelvis SSPM eller förenklade FE-metoder. Förskjutning påförs därefter de befintliga konstruktionerna som ett separat designscenario.

Det finns en mängd olika numeriska ramverk för att hantera den komplexitet som är förknippad med modellering av pålinstallation i lera. Numeriska studier som omfattar hela pålcykeln, inklusive installationen, utjämning och belastning, med avancerade konstitutiva modeller i ett kopplat hydromekaniskt ramverk, är fortfarande sällsynta. De flesta studier är begränsade till installation av en enda påle i en axialsymmetrisk domän utan intilliggande konstruktioner. Följaktligen är numeriska studier av påverkan från pålning på ett geotekniskt system en utmaning på grund av den numeriska komplexiteten. Modellering av naturliga sensitiva leror, som är vanligt förekommande i Norden, kräver dessutom konstitutiva modeller som är mer avancerade än de som vanligtvis används för modellering av pålinstallation.

Det aktuella projektet initierades för att undersöka potentiella metoder för att inkludera effekterna, över tid, från installation av förskjutningspålar i geotekniska systemanalyser. Installationseffekterna studeras under hela pålcykeln, med fokus på möjliga sätt att öka noggrannheten i numeriska förutsägelser för det urbana geotekniska systemet. Göteborg är ett typexempel på en stad som bildar ett sådant geotekniskt system. Staden ligger på en djup leravlagring, dvs. upp till 80 m av naturlig lera där det pågår en förtätning av de centrala delarna, vilket kräver omfattande pålningsarbeten i en redan trång stadsmiljö.

Olika modelleringsmetoder är förknippade med varierande komplexitetsnivåer, vilket gäller både den ansträngning som krävs från ingenjören för att använda metoden och noggrannheten i de numeriska resultat som erhålls. Forskningen syftar till att ge vägledning om lämpligt metodval med avvägningen mellan modellens komplexitet och de erhållna resultatens tillförlitlighet.

2.1 Syfte & Mål

Projektet syftar till att, genom numerisk modellering, kvantifiera installationseffekten från förskjutningspålar i naturlig lera på ett befintligt geotekniskt system. Det geotekniska systemet som beaktas här, innehåller den naturliga leran och dess utbredning till styva gränser, samt befintliga geotekniska konstruktioner

Det geotekniska systemets spatiotemporala respons, dvs. det föränderliga samspelet mellan befintliga och nya konstruktioner och jorden över tid, kommer att kvantifieras numeriskt med avseende på installation av förskjutningspålar i lera. Olika metoder med varierande grad av komplexitet studeras för olika aspekter av pålningsproblemet, t.ex. massförskjutningar, markens tillståndsförändring och inverkan av massförskjutning på befintliga konstruktioner. Huvudmålen är att undersöka:

- (i) Inverkan av modellkomplexitet, dvs. inflytandet av numeriskt ramverk och konstitutiv modell, på storleken hos de förutspådda massförskjutningarna från pålinstallation i en naturlig lera, i både en korttid och långtidssituation.
- (ii) Det med tiden föränderliga tillståndet i pål-jordsystemet över pålcykeln.
- (iii) Interaktionen mellan existerande konstruktioner och massförskjutning till följd av pålinstallation i lera.

3. Metodik

Syfte & Mål låg till grund för projektets genomförande vilket innebar att:

- (i) Undersöka inflytandet av modellkomplexitet på den prognosticerade rörelsen till följd av installationen av en massförträngande påle i lera. Komplexiteten varieras med avseende på installationsförfarande, spänningsformulering och materialmodell. Den mest avancerade modellen utvecklades inom projektet och kombinerar en Eulerian FE-formulering för att kunna fånga de stora deformationerna nära pålens spets i kombination med en kopplad effektivspänningsformulering där lerans beteende fångas med avancerade materialmodeller tillhörande SCLAY1 familjen.
- (ii) Studera det föränderliga tillståndet till följd av installation av en massförträngande påle i lera. Den avancerade numeriska modellen användes i detta skede till att simulera hela pålcykeln, med syfte att öka förståelsen för samspelet hos de olika hydro-mekaniska processerna som i slutändan leder det observerade last-deformationssambandet hos en befintlig påle.
- (iii) Kvantifiera interaktionen, i ett korttidsscenario mellan existerande geokonstruktioner och massförskjutningen till följd av pålinstallation i lera. Här används en förenklad metod för modellering av pålinstallation, jordbeteende och respons hos befintliga konstruktioner för att beräkningseffektivt kunna studera jord-strukturinteraktionen. Modellen används för en parameterstudie där effekten av; relativa avstånd mellan installerad påle och befintlig konstruktion, relativ pållängd samt avstånd till styva gränser generaliseras. Utöver detta kvantifieras inverkan av den relativa styvheten mellan existerande konstruktionselement och den omgivande leran.

4. Resultat & Slutsatser

Resultatet och slutsatserna delas upp i tre delar i likhet med metodiken.

(i) Inflytandet av modellkomplexitet på prognosticerad massförskjutning

Massförskjutningen till följd av pålinstallation prognosticerad med tre huvudsakliga beräkningmodeller: Shallow Strain Path Method (SSPM), en förenklad horisontell installation av pålen med kavitetsexpansion i en konventionell FE-formulering samt en vertikal installation av påle i en avancerad FE-formulering. Utöver detta jämfördes inflytandet av olika antaganden avseende lerans beteende i FE beräkningarna över hela pålcykeln såsom: totalspänningsanalys med konstant volym hos leran, en kopplad effektivspänningsbaserad analys där lerans volymetriska respons bestäms av permeabilitet, styvhet och belastningshastighet. Även inflytandet av egenskaper i naturlig lera såsom, anisotropi, sensitivitet, hastighetsberoende och töjningsberoende styvhet kontrollerades.

Jämförelsen avseende de prognosticerade förskjutningarna till följd av *installation* visade att inom ett avstånd om $5 < \text{pålradier}$ från den installerade pålen spelar den modellerade installationsmekanismen stor roll. Inom detta avstånd bör en vertikal installationsmekanism användas för att fånga rörelsen. Vid större avstånd försvann de stora skillnaderna och samtliga metoder prognosticerade likartade förskjutningar. Detta förklaras av att, i kortidsfallet, förskjuter alla beräkningsmodeller leran under konstant volym, antingen på grund av antaganden i metoden eller på grund av den kopplade responsen från jord-pålsystemet. Således är skillnaderna mellan metoderna små på större avstånd där rörelsen styrs av en massförskjutning snarare än den mer komplexa kinematiken kring den framdrivna påltoppen. Inverkan av modellerade egenskaper hos den naturliga leran hade ett mindre inflytande under installationen

Under *utjämningen/konsolidering* minskar styvheten i leran genom att porövertrycket från installationsfasen försvinner och leder till en effektivspänningsökning i den kompressibla leran. Denna uppmjukning kan endast fångas upp av effektivspänningsbaserade konstitutiva modeller i kombination med konsolideringsanalys. Egenskaperna hos den mjuka naturliga leran (som simuleras med modellfamiljen SCLAY1S) har under utjämningen stor inverkan på storleken på förskjutningarna i jorden. Den tid som krävs för att konsolideringsrörelsen ska utvecklas fullt ut varierar avsevärt med det radiella avståndet från pålen. En ökning av avståndet från pålen leder till en ökande konsolideringstid. Resultaten av en parametrisk studie belyste också betydelsen av styvhet och dess gradient i systemet för de fördelningen av den förskjutna leran.

(ii) Tillståndsförändring till följd av pålinstallation

Tillståndsförändringen i lera till följd av pålinstallation studerades i detalj genom modellering av ett väldokumenterat pålningstest utfört i Bothkennar, Storbritannien. Detta utfördes som ett första steg mot att inkludera den spatiotemporala responsen från pålinstallation i geoteknisk FE-analys. Denna del inkluderade modellkalibrering mot laboratoriedata, simulering av CPT samt simulering av installationsprocessen och efterföljande påbelastningstest.

Resultaten visar att metoden kan användas till att kvantifiera det föränderliga tillståndet över pålcykeln i en naturlig lera. De numeriska resultaten belyser samspelet mellan lerans sensitivitet och hastighetsberoende. Installationen av pålen leder till nedbrytning av leran nära pålen. Detta resulterar i signifikant förändrade egenskaper och således en förändrad lastförskjutningsrespons hos pålen vid belastning jämfört med en påle där installationen ej inkluderats, en så kallad önskad på-plats-påle. Detta är en stark indikation på att om mer komplexa jordegenskaper inkluderas i analys på systemnivå, bör logiken bakom antagandet om önskad-på-plats-pålar ses över.

(iii) Interaktion mellan existerande geokonstruktioner och massförskjutning

Interaktionen mellan existerande geokonstruktioner och massförskjutningen från pålinstallation studerades under *installation* med en förenklad 3D FE-modell där en horisontell kavitetsexpansion användes i kombination med en linjärelastisk inkompressibel jord. Med ledning av insikterna från (i) sågs detta som en godtagbar förenkling. En pålgrundlagd platta modellerades för att undersöka inflytandet av/på en existerande grundläggning. Utöver detta undersöktes även inflytandet av styva modellgränser.

Parameterstudien som utfördes visade att den generella responsen hos en existerande grundläggning till följd av massundanträngning från pålinstallation kan förstås genom det relativa förhållandet mellan längden hos befintliga pålar, längd av installerad påle samt avståndet mellan den installerade och existerande pålen. Resultaten visar att befintliga geokonstruktioner avsevärt omfördelar rörelse i sin styva riktning, dvs. horisontellt för en platta på markytan och vertikalt för befintliga pålfundamentet. Däremot visade existerande konstruktionselement endast en marginell inverkan på rörelsen i deras veka riktning. Förändringen i avstånd till styva modellgränser visade sig ha en stor inverkan på de beräknade förskjutningarna. Det senare belyser vikten av problemdomänens geometri inom vilken pålarna installeras. Detta bör beaktas i fält, numerisk analys eller fysiska modelltester. Resultat av parameterstudien har sammanfattats i en serie med responsdiagram som kan användas av praktiserande ingenjörer vid utvärdering av inverkan av massförskjutning till följd av pålinstallation på existerande konstruktioner.

Sammanfattande slutsats

Samtliga faktorer som påverkar storleken på och fördelningen av massförskjutningar i naturlig lera till följd av installation av massförträngande pålar kan hänföras till grundläggande principer för jordmekanik. På kort sikt styrs systemets styvhet huvudsakligen av de rådande odränerade förhållandena, och på lång sikt av lerans kompressionsegenskaper och markens föränderliga tillstånd under pålcykeln. Dessutom påverkas styvheten i systemet påtagligt av befintliga fundament naturliga randvillkor och styvhetsgradienter vilka påverkar fördelningen av massförskjutningen.

5. Rekommendationer

I sin helhet kan detta arbete användas för att vägleda praktiserande ingenjörer i metodval för prognostisering och kvantifiering av effekten från pålinstallation i naturliga lera. Forskningen har lett fram till följande rekommendationer för modellering av pålning i naturliga lera:

- (i) I avsaknad av komplexa platsförhållanden är SSPM ett värdefullt verktyg för att uppskatta momentana odränerade massförskjutning från pålning i naturliga leror. I kritiska situationer exempelvis vid pålning nära befintliga byggnader, sluttningar, schakt och vid ickelinjära styvhetsprofiler bör en förenklad 3D-analys med finita element som tar hänsyn till styvhetsfördelningen i systemet användas.
- (ii) De normaliserade responsdiagram som utvecklats i projektet kan direkt användas som en första uppskattning av den potentiella rörelsen och skadan på en befintlig konstruktion till följd av pålinstallation i lera.
- (iii) Komplexiteten i den konstitutiva modell som används till geoteknisk systemanalys bör balanseras av komplexiteten i modelleringen av pålinstallationsprocessen. Avancerade modeller, såsom Creep-SCLAY1S, bör inte kombineras med önskad-på-plats påle i den numeriska modellen.
- (iv) Med tiden blir markförskjutningarna från pålningen delvis omvända, och den odränerade situationen kan därmed anses kritisk för befintliga konstruktioner. Nya konstruktioner som byggs efter att pålarna, men innan den omvända rörelsen har avslutats, kommer däremot att påverkas. I en stadsmiljö, som Göteborg, med flera pågående och avslutade byggaktiviteter under det senaste decenniet påverkar tidigare pålningsaktiviteterna fortfarande de pågående rörelserna och tillståndsförändringen i det geotekniska systemet.

Följande rekommendationer bör beaktas för framtida forskning:

- (i) Den tidsberoende tillbakagången av rörelse till följd av installation av flera pålar bör studeras ytterligare och kopplas till graden av konsolidering inom en pålgrupp.
- (ii) Denna studie fokuserade på att modellera effekterna av massförskjutningar från pålinstallation i naturliga leror. Vanliga begränsningsåtgärder för att minska massförskjutningen, t.ex., förbörning och dikning, påverkar också tillståndet i det geotekniska systemet med tiden. De metoder som använts i detta arbete kan också användas för att undersöka effekten av dessa begränsningsåtgärder.
- (iii) Vidare studera inverkan av geometriska begränsningar, såsom begränsat jorddjup till berg, sluttande bergytter & markytter och pålning från schaktbotten, på den resulterande massundranträngningen.