

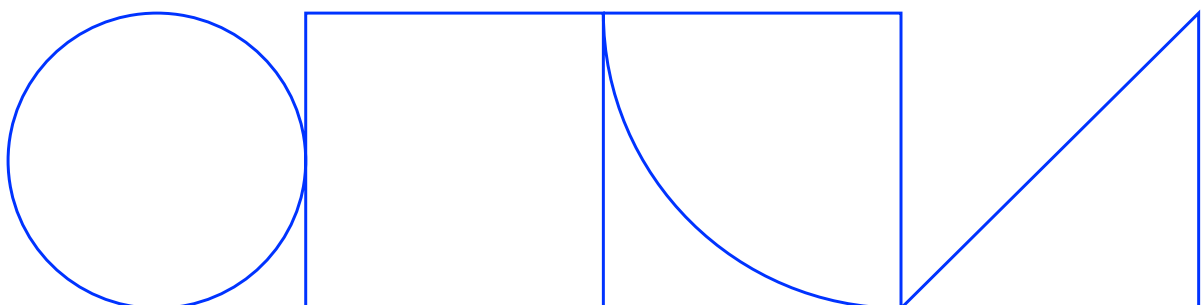
PROJEKTNR. 14030

Jord-strukturinverkan vid vibrationer i byggnader med påfundament

Freddie Theland

Kungliga Tekniska Högskolan, KTH

2025-03-02



Förord

Projektet genomfördes under perioden september 2018 – januari 2025 av doktoranden Freddie Theland vid avdelningen för Bro- och stålbyggnad vid KTH. Projektets resultat redovisas i sin helhet i doktorsavhandlingen med titel:

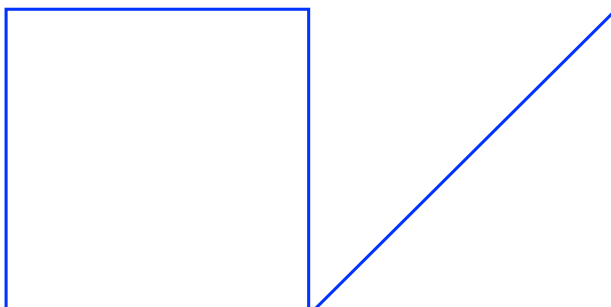
Ground-borne vibration in end-bearing pile foundations: numerical analyses and full-scale field tests

Huvudhandledare för doktorandprojektet var Professor Jean-Marc Battini. Professor Geert Lombaert (KU Leuven, Belgien), Dr Abbas Zageneh (ELU konsult, KTH) och Dr Fanny Deckner (GeoMind) var biträdande handledare. Dr Peter Blom och Professor Costin Pacoste (ELU konsult, KTH) var biträdande handledare under första delen av projektet, fram till licentiatexamen. Professor Stijn François (KU Leuven, Belgien) deltog också aktivt i handledningen.

Doktorandprojektet finansierades av SBUF. De omfattande fältexperimenten finansierades av Vinnova, Trafikverket och Richertska stiftelsen.

Freddie Theland

Östersund, mars 2025

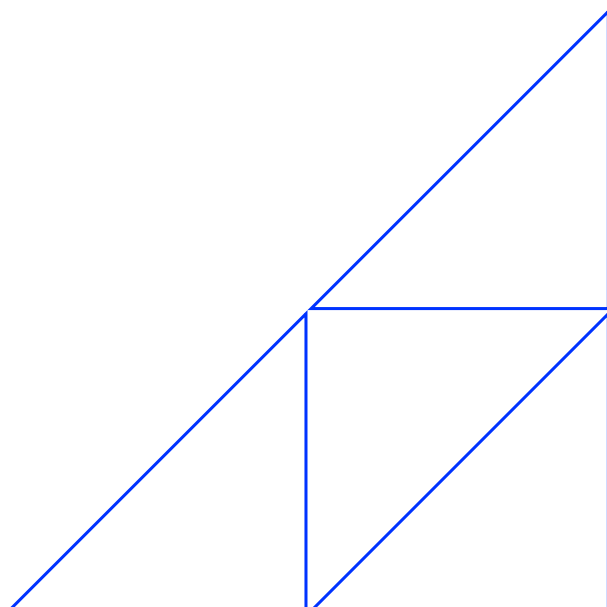


Sammanfattning

Omgivningsvibrationer från tåg och biltrafik är ett växande problem vid dimensionering av byggnader i stadsmiljö. I lösa kohesionsjordar, som är särskilt känsliga för sådana vibrationer, används ofta pålar vid grundläggning. Vid jordförhållanden med relativt grunda formationer av lös jord på morän och berg, vilket är vanligt förekommande i tätbefolkade områden i Sverige, används ofta spetsburna pålar. Transmissionen av vibrationer från jorden till en byggnad beror på interaktionen mellan jorden och byggnadens grundläggning. Det är därför viktigt att ta hänsyn till den dynamiska interaktionen mellan jord och grundläggning då man avser förutsäga vibrationer i en byggnad i dimensioneringssyfte.

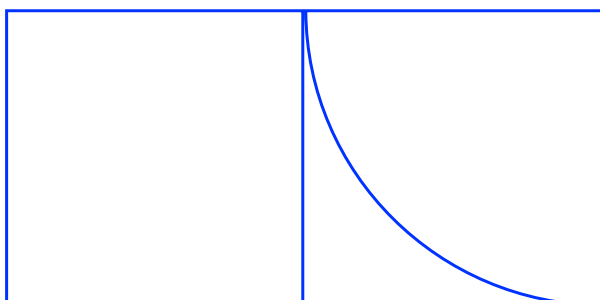
Syftet med denna avhandling är att öka kunskapen kring transmissionen av markburna vibrationer till spetsburna pålfundament samt att undersöka hur hänsyn kan tas till dess inverkan i vibrationsutredningar. Frågeställningen adresseras genom både experiment för att validera numeriska modeller och numeriska analyser för att studera inverkan av jordens egenskaper och grundläggningens utformning på transmissionen av vibrationer.

Resultaten visar att överföringen av vertikala vibrationer från jorden till pålarna påverkas av förhållandet mellan jordens styvhet och pålens axialstyvhet. Resultaten visar även att interaktioner mellan pålar i en grupp påverkar den vertikala responsen orsakad av en dynamisk last på markytan. Fältförsöken visar att om jordens dynamiska egenskaper kan bestämmas med noggrannhet, ger prediktioner från numeriska modeller representativa resultat. Detta ökar tillförlitligheten till resultat erhållna från sådana numeriska modeller vilket motiverar deras användning vid vibrationsutredningar.



Innehåll

Bakgrund	4
Syfte	4
Experiment	5
Testplats	7
Dynamiska jordegenskaper vid små skjuvtöjningar	7
Numerisk modellering	8
Numeriska analyser	9
Slutsatser	9
Referenser	10



Bakgrund

Mänsklig verksamhet i urbana miljöer så som väg- och järnvägstrafik, byggnation eller maskindrift inom industri kan ge upphov till vibrationer som sprider sig i närområdet via marken. Sådana vibrationer är i de flesta fall inte av betydelse för konstruktionens integritet, men kan ge upphov till kännbara vibrationer i närliggande byggnader och utgöra ett komfortproblem för människor som vistas i byggnaden eller orsaka störningar för vibrationskänslig utrustning. Detta är ett växande problem i Sverige då förtätningen av städer medför att byggnader i allt större utsträckning planeras i närheten av större vägar och järnvägsspår. För sådana projekt är det därför viktigt att på ett tillförlitligt sätt kunna uppskatta vibrationer i byggnaden redan vid dimensionering.

Modellering av markvibrationer innefattar flertalet komponenter: vibrationskällan, vågutbredning i jorden samt dynamisk interaktion mellan byggnaden och jorden. Detta innebär att modellering och prediktion av vibrationer i byggnader medför betydande osäkerheter relaterade till varje komponent. Vid numerisk modellering av problemet introduceras osäkerheter i form av både idealiseringar och val av parametrar. Vid fallet då vibrationskällan existerar på platsen kan markvibrationer mätas på den fria markytan där byggnaden ska uppföras. Dessa kan användas för att uppskatta vibrationer i den planerade byggnaden, vilket indirekt tar hänsyn både till vibrationskällan och överföringen genom jorden till platsen där byggnaden ska uppföras. Detta kräver dock att överföringen till byggnaden kan uppskattas på ett tillförlitligt sätt, vilket är svårt att tillse med empiriska förhållanden som finns tillgängliga i litteraturen, då de varken tar hänsyn till jordförhållanden eller grundläggningstyp, vilka båda har en betydande inverkan på vibrationsöverföringen mellan mark och byggnad.

Lösa lerjordar av olika mäktighet på morän och berg är vanligt förekommande jordförhållanden i tätbefolkade områden i Sverige. Vid sådana jordförhållanden där djupet till berg är begränsat används ofta spetsburna pålar vid grundläggning, vilket medför ett betydande bidrag till den vertikala styvheten. För markburna vibrationer i byggnader är det oftast främst den vertikala komponenten som är av störst intresse. Det är därför viktigt att förstå hur dessa vibrationer överförs till spetsburna pålfundament, hur det kan tas hänsyn till vid vibrationsutredningar samt hur utformningen av grundläggningen påverkar vibrationsöverföringen.

Syfte

Syftet med projektet var att bättre förstå vibrationsöverföringen mellan mark och spetsburna pålfundament för att vidare undersöka hur dess inverkan kan tas hänsyn till vid vibrationsutredningar.

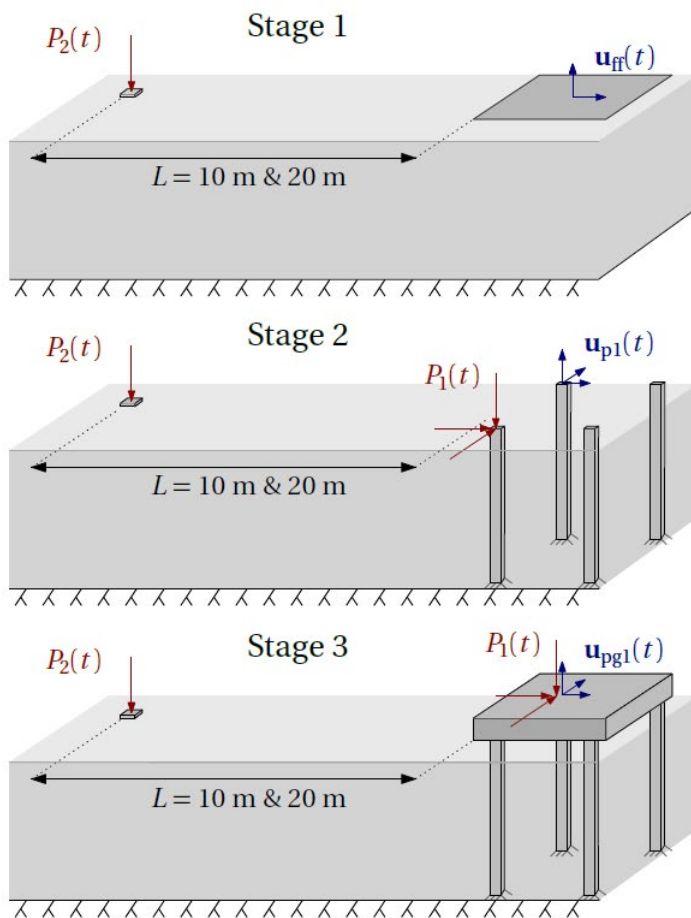
Omfattningen av projektet avser:

- Fullskaleförsök för att validera prediktionsmodeller för att beräkna vibrationer på markytan samt i ett pålfundament med spetsburna pålar i lerjord på morän och berg.
- Numerisk modellering för att identifiera vilka parametrar som är avgörande för vibrationsöverföring mellan mark och spetsburna pålfundament.
- Utveckla förenklade metoder för att ta hänsyn till interaktionen mellan jord och pålar för användning i vibrationsutredningar.

Experiment

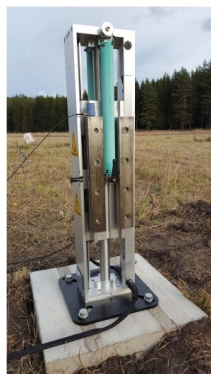
För att validera användningen av numeriska modeller för syftet att förutsäga överföringen av markburna vibrationer till pålfundament utfördes fullskaleförsök. Ett enskilt pålfundament bestående av fyra prefabricerade betongpålar med sidomått 235 x 235 mm stoppslagna i jord bestående av fem meter lera och ca 2,4 meter morän på berg installerades på en testplats där inga andra byggnadsaktiviteter utfördes under tiden för testerna.

En serie olika tester utfördes, vilka schematiskt visas i Figur 1. I steg 1 mättes vibrationer på den fria markytan, vilka motsvarar referensvärdet som används för förutsägelser av vibrationer i byggnader. I steg 2 mättes vibrationerna av de enskilda pålarna för två olika typer av lastfall: (1) då grundläggningselementen utsattes för extern last ovanför markytan och (2) då vertikal last applicerades på markytan från 10 och 20 meters avstånd. I steg 3 upprepades testerna utförda i steg 2 då pålarna sammanfogats i ett betongfundament.



Figur 1: Schematisk överblick över experiment utförda i tre olika steg och motsvarande instrumentering med accelerometrar.

Dynamisk last påfördes kontrollerat genom användning av instrumenten i Figur 2. En instrumenterad slägga användes då lasten applicerades lokalt på pålarna och på fundamentet (P_1) och den elektrodynamiska shakern användes för lastfallen där lasten applicerades vid markytan (P_2).



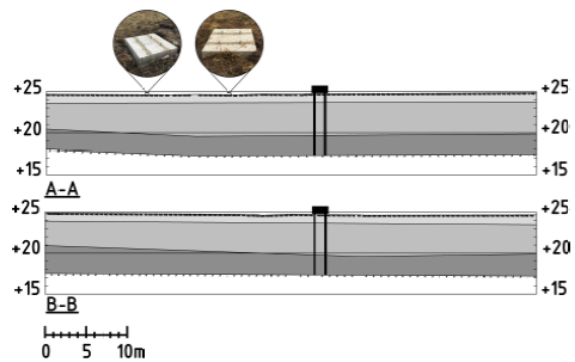
Figur 2: Elektrodynamisk shaker och slägga med en lastcell.

Testplats

Testerna utfördes i Brottby ca 40 km norr om Stockholm på ett avlägset fält. Platsen valdes för dess gradvisa variation av jorddjup som överensstämmer med antagandet om en horisontell jordlagerföljd över den studerade ytan samt för dess representativa jordförhållanden. Figur 3 ger en översikt av platsen där testerna utförts med positioner utpekade för pålfundamentet och excitationpunkterna där last applicerats vid markytan på två plastgjutna betongfundament, samt två sektioner med tolkade jordlagerföljder.



(a)

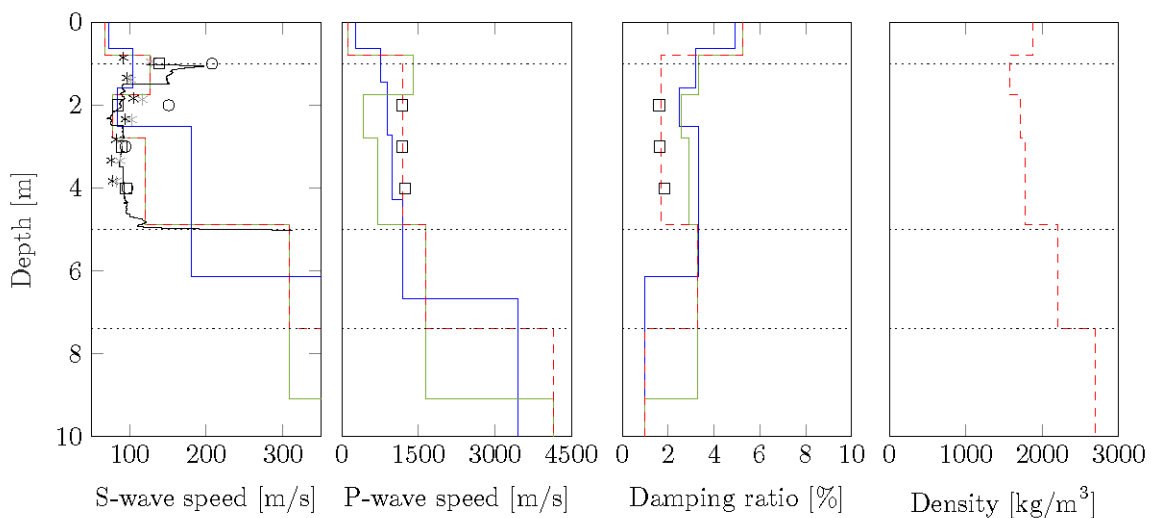


(b)

Figur 3: Översikt över testplatsen med två tolkade sektioner med jordlagerföljden: torrskorpelera (ljusgrå), mjuklera (mellangrå) och morän (mörkgrå) på berg.

Dynamiska jordegenskaper vid små skjuvtöjningar

Modellering av vågutbredning i jorden kräver identifiering av jordens mekaniska egenskaper vid små skjuvtöjningar. Olika metoder för att uppskatta dessa parametrar sammanställdes, jämfördes och sammanvägdes för att skapa en dynamisk modell av jorden. En jämförelse av jordens egenskaper vid små töjningar erhållna från olika undersökningsmetoder presenteras i Figur 4.



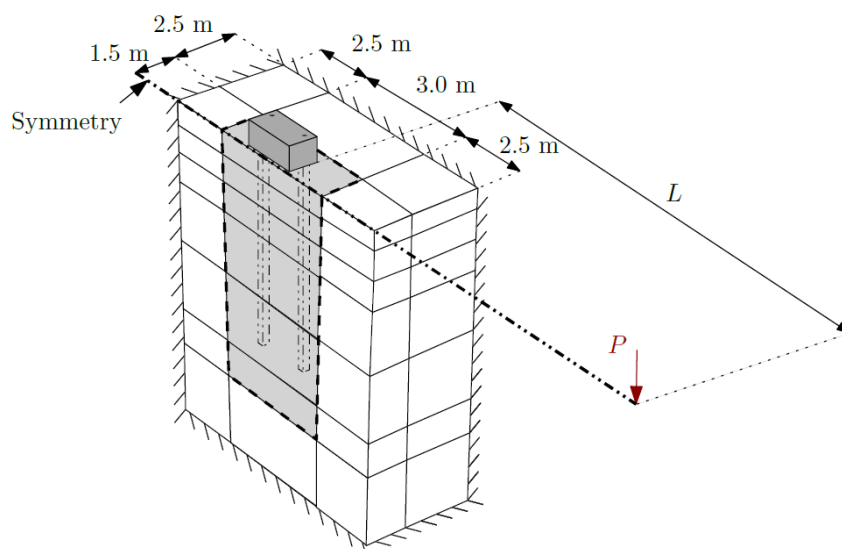
Figur 4: Dynamiska jordegenskaper uppskattade från bender element tester ($\square$), två SCPT (*), två SASW (gröna och blå linjer) och empiriska korrelationer med CPT (svart linje) och odränerad skjuvhållfasthet (o). Vald dynamisk jordmodell (röd streckad linje) erhållen genom sammanvägning av resultaten och hänsyn tagen till observerade jordlager (streckade linjer) identifierade från skruvprover och jord- och bergsondering.

Informationen från dessa tester kombinerades för att etablera en representativ jordmodell för att beräkna vibrationer i jorden. Modellen validerades genom jämförelse med vibrationsmätningar vid markytan som utförts på platsen.

Numerisk modellering

Numerisk modellering utfördes genom att kombinera finita element-modeller med en semi-analytisk modell av en horisontell jordprofil. Kombinationer av dessa två modelltyper användes för att studera olika delar av problemet.

Vid jämförelser med experimenten användes tredimensionella solidelement för att modellera både jorden och pålfundamentet. Både jord och fundament antogs av linjärelastiskt material. Specialelement i form av "Perfectly Matched Layers" (PML) användes för att dämpa utgående vågor och undvika reflektioner vid modellens yttre fixerade rand. För att undvika en utökning av modellstorleken vid beaktande av laster på markytan vid olika avstånd från fundamentet användes den semi-analytiska modellen för att beräkna förskjutningar och spänningar i jorden till följd av en vertikal punktlast vid markytan i en linjärelastisk horisontell jordlagerföljd [1]. Denna modell användes för att beräkna ett spänningsfält över gränssnittet mellan PML-elementen och jorden i modellen som simulerar de inkommande vågorna orsakade av punktlasten. Fördelen med att använda denna modell är att beräkningstiden för spänningsfältet i princip är oberoende av avståndet mellan vibrationskällan och pålgruppen. Detta innebär att beräkningstiden reduceras drastiskt då stora avstånd beaktas. Figur 5 illustrerar modellens geometri och förhållande till den applicerade lasten.



Figur 5: Modellgeometri FE-PML modellen kombinerad med en semi-analytisk modell för beräkning av den inkommande vågfronten från en vertikal punktlast applicerad utanför modelldomänen som ett spänningsfält över gränssnittet (streckad linje) mellan PML-elementen och beräkningsdomänen.

Numeriska analyser

Resultaten från modellvalideringen genom fullskaleförsöken styrker användningen av numeriska modeller för att analysera problemet med vibrationsrespons av spetsburna pålar. Inverkan av parametrar för både jord och pålar och relationen däremellan studerades mer ingående med hjälp av numeriska modeller. Den största skillnaden mellan vibrationsresponsen för spetsburna pålar och mantelburna pålar är den vertikala komponenten. Denna är även generellt av störst intresse för att förutsäga vertikala vibrationer i byggnader, vilka i sin tur ofta är av primärt intresse för utvärdering av komfortstörande vibrationer. Genom att studera det idealiserade problemet **Error! Reference source not found.** med vertikala pålar i ett homogent, isotropiskt jordlager på berg där en vertikal impulslast appliceras vid markytan kunde ett dimensionslöst system av parametrar etableras. Detta system användes för att studera inverkan av relationen mellan pålarnas och jordens parametrar på den vertikala vibrationsresponsen. Även inverkan av interaktionen mellan pålarna genom jorden för detta fall kunde studeras mer generellt genom denna idealisering.

Slutsatser

Doktorsavhandlingen presenterar resultaten från tre experimentella studier och två numeriska parameterstudier [2]. De experimentella studierna syftade till att validera prediktioner från linjärelastiska numeriska modeller av markvibrationer, dynamisk styvhet och dämpning av spetsburna pålar och pålfundament samt vibrationsresponsen av dessa till följd av vertikala laster applicerade vid markytan. De numeriska studierna undersökte inverkan av förhållanden mellan parametrar beträffande jorden och pålarna med avseende

på vibrationsresponsen av spetsburna pålar och pålfundament. Dessa studier har publicerats i fem vetenskapliga artiklar i internationella tidskrifter [3, 4, 5, 6, 7]. De huvudsakliga slutsatserna från dessa studier är följande:

- Vibrationsresponsen av spetsburna pålar och pålfundament kan förutsägas med acceptabel noggrannhet med hjälp av linjärelastiska numeriska modeller baserade på dynamiska jordparametrar erhållna från geotekniska och geofysiska undersökningsmetoder. Resultat i vertikalriktningen visade särskilt god överensstämmelse med modellen, både då lasten applicerades på markytan vid olika avstånd och lokalt på fundamentet ovan markytan.
- Vibrationer av pålfundamentet skattade från mätningar på de fria påltopparna och en modell av pålfundamentet visade god överensstämmelse med mätningar. Denna metod kräver varken karakterisering av vibrationskällans typ eller identifiering av dynamiska jordparametrar och kan potentiellt användas i verkliga projekt för verifiering av design med avseende på vibrationer.
- Resultat från både mätningar och simuleringar visade att i vattenmättade jordar på morän och berg kan reflekterade och kritiskt refrakterade P-vågor ha en betydande inverkan på vibrationer vid markytan, särskilt vid stora avstånd från källan.
- Den vertikala responsen av spetsburna pålar på grund av en vertikal last vid markytan påverkas starkt av pålarnas relativa styvhet med avseende på jordens styvhet och slankheten av pålarna.
- En reduktionsfaktor för att approximera responsen av spetsburna från mätningar av vibrationer vid markytan baserat endast på pålarnas relativa styvhet och slankhet samt villkor för dess giltighet föreslås.
- Interaktion mellan pålar genom jorden hade en betydande inverkan på vibrationsresponsen av spetsburna pålar för fallet där vertikal last applicerades vid markytan. Detta står i kontrast till mantelburna pålar i homogen jord, för vilken denna effekt kan försummas.

Referenser

- [1] M. Schevenels, S. François och G. Degrande, "EDT: an ElastoDynamics toolbox for MATLAB," *Computers & Geosciences*, vol. 35, nr 8, pp. 1752-1754, 2009.
- [2] F. Theland, Ground-borne vibration in end-bearing pile foundations: numerical analyses and full-scale field tests, KTH Royal Institute of Technology, 2025.
- [3] F. Theland, G. Lombaert, S. François, C. Pacoste, F. Deckner och J.-M. Battini, "Assessment of small-strain characteristics for vibration predictions in a Swedish clay deposit," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 150, 2021.

- [4] F. Theland, G. Lombaert, S. François, C. Pacoste, F. Deckner, P. Blom och J.-M. Battini, "Dynamic response of driven end-bearing piles and a pile group in soft clay: an experimental validation study," *Engineering Structures*, vol. 267, 2022.
- [5] F. Theland, G. Lombaert, S. François, A. Zangeneh, F. Deckner och J.-M. Battini, "Design procedure for estimating the vertical response of end-bearing piles from free field vibrations produced by a nearby surface load," *Structures*, vol. 71, p. 108063, 2025.
- [6] F. Theland, G. Lombaert, S. François, A. Zangeneh, F. Deckner och J.-M. Battini, "Measurements and predictions of vibration response of end-bearing pile group in soft clay due to vertical ground surface load," *Engineering Structures*, vol. 331, 2025.
- [7] F. Theland, G. Lombaert, S. François, A. Zangeneh, F. Deckner och J.-M. Battini, "The influence of pile-soil-pile interaction on the vertical response of end-bearing pile groups in soil on bedrock subjected to a vertical load at the soil's surface," *Transportation Geotechnics*, 2025.