

JORD-STRUKTURINVERKAN VID VIBRATIONER I BYGGNADER

*Experimentella och numeriska studier av ett
spetsbärande pålfundament*



Freddie Theland

2021-04-15

FÖRORD

Projektet genomfördes under perioden september 2018 – mars 2021 av doktoranden Freddie Theland vid avdelningen Stål- och Brobyggnad på KTH. Projektet redovisas i sin helhet i Freddie Thelands licentiatavhandling med titel

“Prediction and experimental validation of dynamic soil-structure interaction of an end-bearing pile foundation in soft clay”

Huvudhandledare för doktorandprojektet var Professor Jean-Marc Battini. Professor Costin Pacoste (Elu Konsult, KTH), Professor Geert Lombaert (KU Leuven, Belgien) och Dr Peter Blom (ACAD) var biträdande handledare. Dr Fanny Deckner (Geomind) och Professor Stjin François (KU Leuven, Belgien) deltog också aktivt i handledningen.

Doktorandprojektet finansierades av SBUF. De omfattande experimentella testerna finansierades av Vinnova, Trafikverket och Richterska Stiftelsen.

Huvudförfattarna för denna rapport är Freddie Theland och Jean-Marc Battini

Stockholm, april 2021

SAMMANFATTNING

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. Dessa vibrationer kan ge upphov till kännbara vibrationer eller påverka vibrationskänslig utrustning i byggnader. I Sverige förekommer ofta mjuka lerjordar ovanpå berg, och inte sällan i tätbebyggda områden. Under sådana jordförhållanden används ofta spetsbärande pålar för grundläggning av byggnader. Det dynamiska verkningssättet för byggnader är beroende av interaktionen mellan jorden och byggnadens grund. Det är därför viktigt att modeller som används för vibrationsanalys i byggnader kan beskriva denna interaktion mellan jord och byggnadsfundament.

Syftet med denna avhandling är att experimentellt och via numeriska modeller studera dynamisk jord-struktur-interaktion av ett spetsbärande pålfundament i lera. Jordens mekaniska egenskaper vid små töjningar utvärderas för en lerjord som är avsatt på morän och berg genom både fältförsök och laboratorieanalyser av prover. Informationen kombineras för att konstruera en jordmodell av platsen för att beräkna vibrationerna i jorden till följd av en punktlast applicerad vid jordytan. Modellen valideras med vibrationsmätningar som utförts på platsen. Studien visar att detaljerad information angående lerans materialdämpning och de mekaniska egenskaperna av jordens översta lager har en stor inverkan på förutsägelser av jordens dynamiska respons vid ytan, speciellt vid stora avstånd från vibrationskällan.

Experimentella tester utförs för att mäta dynamiska impedanser av fyra slagna spetsbärande betongpålar. Interaktionen mellan pålarna utvärderas genom att utföra mätningar av de omgivande pålarnas respons till följd av excitering av en påle. Pålgruppen sammanfogas därefter i ett betongfundament och impedanserna samt accelerationer inuti pålarna uppmäts. En numerisk modell baserad på de identifierade mekaniska egenskaperna av jorden upprättas och valideras genom mätningarna. De numeriska resultaten är i god överensstämmelse med de uppmätta vilket styrker användningen av numeriska modeller för att förutsäga interaktionen mellan jord och spetsbärande pålar under de studerade jordförhållandena.

INNEHÅLL

BAKGRUND	4
SYFTE	4
GENOMFÖRANDE	4
TESTPLATSEN	4
GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR	5
DYNAMISK RESPONS AV PÅLAR OCH PÅLFUNDAMENT.....	5
SLUTSATSER	8
REFERENSER	9

BAKGRUND

När tunga fordon färdas på spår eller väg generas vibrationer i marken som i sin tur ger upphov till vibrationer i närliggande byggnader. Dessa vibrationer är ofta inte farliga för konstruktionen men de kan utgöra stora komfortproblem för människorna som vistas i byggnaden. Detta är ett växande problem i Sverige eftersom man vill bygga alltmer i närheten av järnvägsspår.

I Sverige förekommer ofta mjuka lerjordar ovanpå berg, och inte sällan i tätbebyggda områden. Under sådana jordförhållanden används ofta spetsbärande pålar för grundläggning av byggnader. Det dynamiska verknings sättet för byggnader är beroende av interaktionen mellan jorden och byggnadens grund. Det är därför viktigt att modeller som används för att förutse vibrationerna i byggnader kan beskriva denna interaktion mellan jord och byggnadsfundament.

SYFTE

Syftet med projektet var att genom en kombination av fältmätningar och numeriska analyser bättre förstå den dynamiska interaktionen mellan byggnadens fundament och marken. Ett spetsbärande pålfundament i lera betraktades.

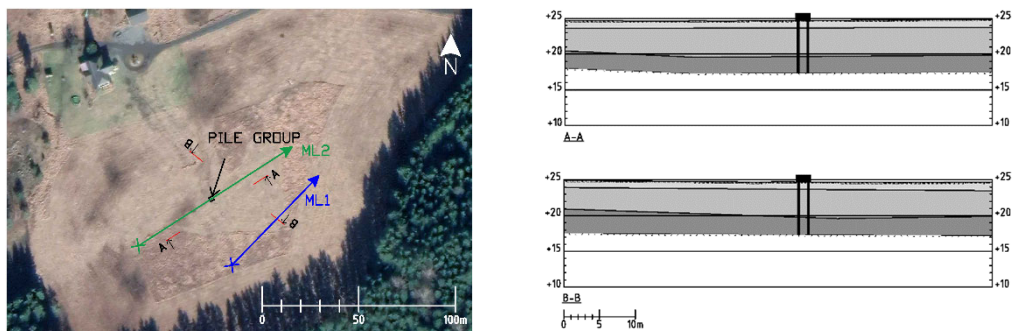
De två specifika målen med projektet var att

- utvärdera både fältförsök och laboratorieanalyser för att erhålla jordens mekaniska egenskaper vid små töjningar för en lerjord som är avsatt på morän och berg.
- utföra mätningar för att validera användningen av numeriska modeller för att förutse de dynamiska egenskaperna av spetsbärande pålar och pålfundament.

GENOMFÖRANDE

Testplatsen

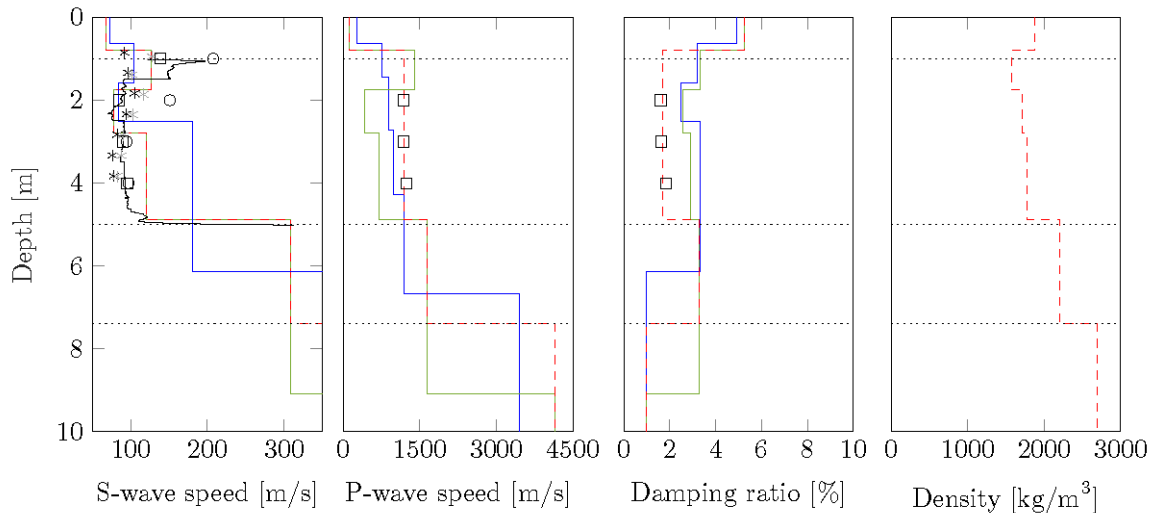
Testplatsen ligger i Brottbys 50 km norr om Stockholm och utgörs av ett avlägset fält. Platsen valdes för dess små variationer av jordlager och djup till berg över en större yta samt för de specifika jordförhållandena med torr skorpa, vattenmättad mjuk lera och morän på toppen av en styv berggrund. Figur 1 visar en översikt över testplatsen, läget för linjerna längs vilka dynamiska mätningar utfördes och två sektioner.



Figur 1: Testplatsöversikt och två sektioner med stratifiering från geotekniska undersökningar: torrskorpslera (ljusgrå), mättad mjuk lera (mellangrå) och morän (mörkgrå).

Geotekniska undersökningar

Jordens mekaniska egenskaper vid små töjningar uppskattades genom både fältförsök och laboratorieanalyser av prover. Bland annat genomfördes SCPT tester och två SASW tester. Resultaten jämfördes med andra resultat erhållna från empiriska korrelationer med CPT tester. Figur 2 visar en jämförelse av egenskaperna uppskattade från de olika metoderna.



Figur 2: Dynamiska jordegenskaper uppskattade från bender element tests (\square), två SCPT (*), två SASW (gröna och blå linjer) och empiriska korrelationer med CPT (svart linje) och odränerad skjuvhållfasthet (o). Numerisk jordmodell (röd streckad linje) erhållen genom att ta hänsyn till jordlagerdjup (streckade linjer) identifierade från jord och bergsondering.

Informationen kombinerades för att konstruera en jordmodell av platsen för att beräkna jordens dynamiska respons till följd av en punktlast. Modellen validerades med vibrationsmätningar som utfördes på platsen. Studien visade att detaljerad information angående lerans materialdämpning och de mekaniska egenskaperna av jordens översta lager har en stor inverkan på förutsägelser av jordens dynamiska respons vid ytan, speciellt vid stora avstånd från vibrationskällan.

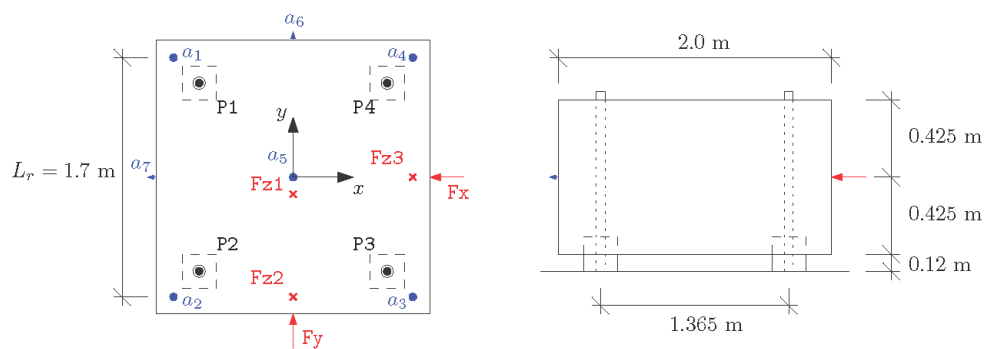
Dynamisk respons av pålar och pålfundament

En pålgrupp med fyra spetsbärande betongpålar med ett tvärsnitt 235×235 mm installerades vid den plats där jordproverna samlades in och SCPT utfördes. Mätningarna utfördes i två steg. Det första steget genomfördes när endast pålarna var på plats. En impuls kraft applicerades med en hammare på varje påltopp. Både kraften och accelerationerna i tre riktningar vid alla påltoppar registrerades, se Figur 3. Med dessa mätdata blev det möjligt att erhålla de experimentella vertikala och horisontella impedanserna för alla enskilda pålar och att studera interaktionen mellan pålarna och jorden.



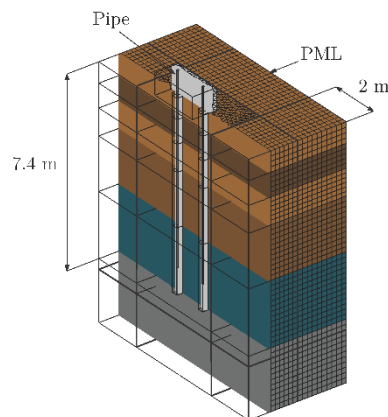
Figur 3: Setup för testerna på de fria påltopparna.

Det andra steget genomfördes efter att pålgruppen sammanfogades i ett betongfundament (se Figur 4) med dimensioner $2 \times 2 \times 0.85$ m. De experimentella horisontella och vertikala impedanserna för betongfundamentet uppmättes genom att applicera impuls krafter och mäta accelerationerna på fundamentet.



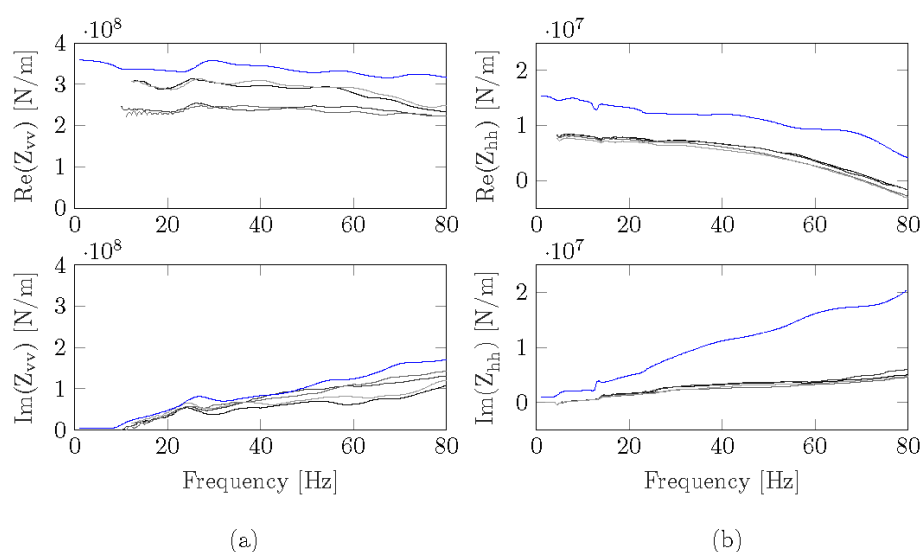
Figur 4: setup och dimensioner för betongfundamentet.

En numerisk FE modell baserad på de identifierade mekaniska egenskaperna av jorden upprättades, se Figur 5. Jorden och betongfundamentet modellerades med tredimensionella element. Full interaktion mellan jorden och betongpålarna antogs. "Perfectly matched layers" (PML) användes för att dämpa utgående vågor för att modellera jordens oändliga utbredning.

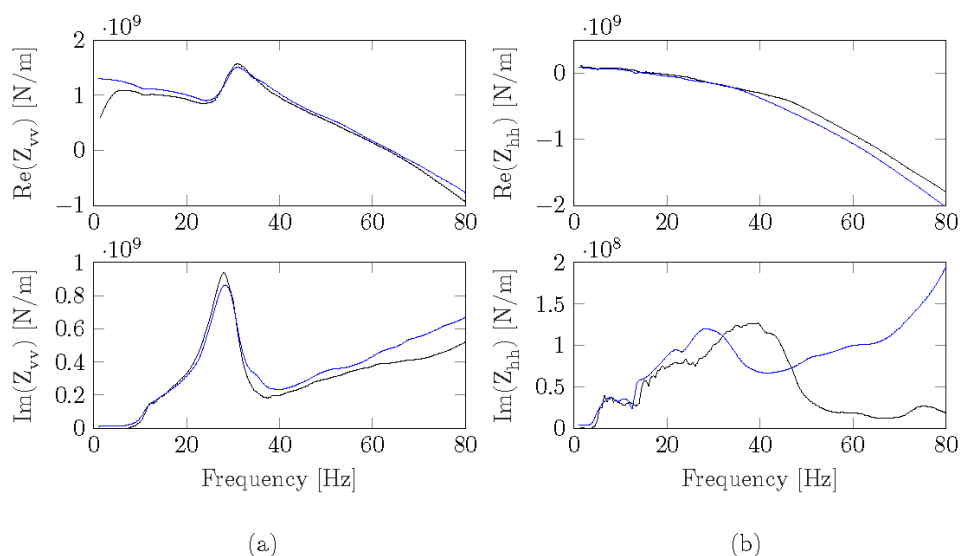


Figur 5: FE modell.

De experimentella och numeriska impedanserna visas i Figur 6 för de fyra pålarna och i Figur 7 för betongfundamentet. Man kan notera att de numeriska real- och imaginärdelarna är överskattade för de fyra pålarna men stämmer väl överens med de experimentella resultaten för betongfundamentet. Detta beror på en jämnare fördelning av förskjutningar i marken för gruppen av pålar, medan de enskilda pålarna som är fria vid ytan är mer känsliga för förhållandena nära ytan. Interaktionen mellan pålarna och jorden för hela fundamentet ger upphov till en topp i de vertikala impedanserna för fundamentet vid 30 Hz. Denna topp orsakas av den destruktiva interferensen mellan pålarnas deformation till följd av den applicerade kraften och vågutbredningen i jorden mellan pålarna. Det skall också noteras att de numeriska resultaten är enbart baserade på de identifierade mekaniska egenskaperna av jorden. Ingen kalibrering av dessa parametrar i syfte att få bättre överensstämmelse med experimentella resultat genomfördes.



Figur 6: Uppmätta impedanser för pålarna P1 till P4 (svart till ljusgrå) jämfört med de numeriska impedanserna (blå linje) i (a) vertikal och (b) horisontell riktning.



Figur 7: Uppmätta (svart linje) och numeriska (blå linje) impedanser för fundamentet i (a) vertikal och (b) horisontell riktning.

SLUTSATSER

Licentiatavhandlingen [1] presenterar resultaten från två experimentella undersökningar som för en mjuk lerjord ovanpå berg syftar till att bedöma förmågan hos numeriska modeller att förutsäga

- jordens dynamiska respons till följd av en punktlast
- impedanserna av ett spetsbärande pålfundament i en mjuk lerjord ovanpå berg.

Var och en av dessa studier redovisas i en tidskriftsartikel [2,3]. Slutsatserna för dessa två studier är följande.

Jordens dynamiska respons

Olika undersökningsmetoder användes för att erhålla jordens mekaniska egenskaper vid små töjningar. En bra överensstämmelse för den initiala skjuvmodulen i leran erhöles från flera tester (SCPT, Bender element, SASW) samt från empiriska korrelationer med CPT tester.

Dämpningen för jorden uppskattades från SASW tester och från Bender element P-våg tester av laboratorieprover. Dämpnings koefficienter från laboratorietesterna var lägre än de från ytvågmetoderna (SASW) och gav en närmare överensstämmelse mellan mät- och numeriska resultat.

Endast ytvågmetoderna gav information om egenskaperna hos det översta jordskiktet, men resultaten var inkonsekventa mellan de mätningar som utfördes under olika årstider. Egenskaperna hos detta jordskikt i kombination med ett måttligt djup till berggrunden visade sig i hög grad påverka den dynamiska responsen vid vissa frekvenser orsakad av resonans i jorden och kritiskt refrakterade P-vågor i den elastiska berggrunden. Variationen av den uppmätta responsen i det relaterade frekvensområdet antyder emellertid att egenskaperna hos marken nära ytan varierar med tiden.

Impedanserna av ett spetsbärande pålfundament

Impedanserna av ett spetsbärande pålfundament kunde förutsägas väl med hjälp av en numerisk FE modell baserad på jordens mekaniska egenskaper vid små töjningar. Simuleringarna fångar pålgruppens beteende även på djupet i pålarna. Jordskiktsresonanser manifesteras tydligt i både beräknade och uppmätta frekvenssvar, särskilt för rörelse i horisontell riktning.

Pål-jord-pål-interaktion har ett stort inflytande på den vertikala impedansen hos pålgruppen. Detta inflytande är starkt frekvensberoende och fångas väl i beräkningarna. Interaktionsfrekvensen kunde identifieras experimentellt utifrån responsen från de fria påltopparna. Denna frekvens kännetecknas av en fasskillnad på 180 grader mellan rörelserna hos den exciterade och de övriga pålarna.

De numeriska impedanserna för betongfundamentet stämmer väl med de experimentella resultaten medan en sämre överensstämmelse observerades för impedanserna för de fria pålarna. De vertikala impedanserna för de fria pålarna påverkas av pålarnas längd på grund av skillnaden i penetrationsdjup i moränen. Däremot påverkas inte de horisontella impedanserna för de fria pålarna av skillnaderna i pål-längd, eftersom de horisontella pål-förskjutningarna är begränsade i

jorden nära ytan. De horisontella impedanserna för de fria pålarna överskattas av den numeriska modellen, vilket förklaras av känsligheten för förhållandena närmast ytan.

Den nära överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta impedanser för pålfundamentet skapar förtroende för linjära elastiska modellers förmåga att förutsäga grundimpedanser under de betraktade markförhållandena.

REFERENSER

[1] Prediction and experimental validation of dynamic soil-structure interaction of an end-bearing pile foundation in soft clay. Licentiate thesis, Freddie Theland, KTH, 2021

[2] Assessment of small-strain characteristics for vibration predictions in a Swedish clay deposit Theland, F., Lombaert, G., François, S., Pacoste, C., Deckner, F., Battini, JM. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, in Review

[3] Dynamic response of driven end-bearing piles and a pile group in soft clay: an experimental validation study. Theland, F., Lombaert, G., François, S., Pacoste, C., Deckner, F., Blom, P., Battini, J-M. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, in Review.