



Pålgrundläggnings inverkan på vibrationer i byggnader testfundament för experimentell validering



BBT

Freddie Theland

KTH Byggvetenskap, Brobyggnad



Projektgrupp

Freddie Theland, Doktorand KTH

Prof. Jean-Marc Battini, KTH

Dr. Fanny Deckner, GeoMind KB

Dr. Abbas Zangeneh, ELU konsult & KTH

Prof. Geert Lombaert, KU Leuven, Belgien

Prof. Stijn François, KU Leuven, Belgien



Finansiering

SBUF ®

VINNOVA 

 **TRAFIKVERKET**

Richertska stiftelsen



Innehåll

Bakgrund och problemformulering

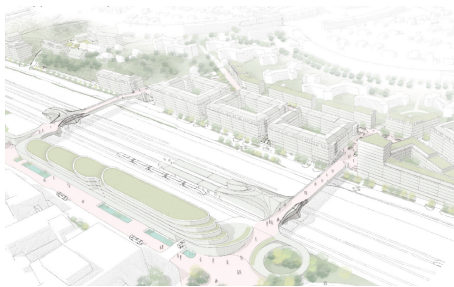
Mål och syfte

Metod

Resultat

Sammanfattning och slutsatser

- Förtätning av urbana miljöer
 - Exploatering av tidigare oanvänd mark
 - Utbyggnad av infrastruktur
- Vibrationer i byggnader
 - Komfortstörande för människor
 - Vibrationskänslig utrustning
- Lösa lerjordar på berg
 - Höga nivåer av markvibrationer
 - Spetsburna pålar vid grundläggning

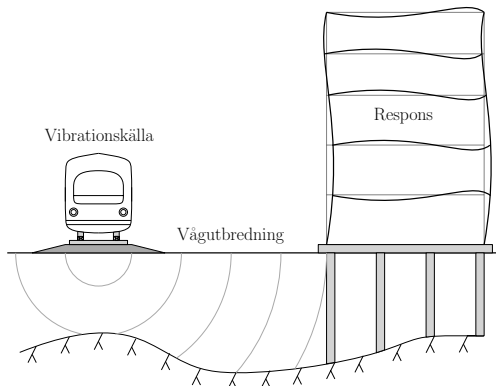


Visionsbild Väsby stationsområde (Upplands Väsby kommun, 2021,
Illustration: Urban Minds, Betty Laurincova)

Vibrationer i den byggda miljön

Vibrationer i den byggda miljön kan delas in i tre delproblem:

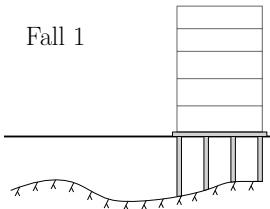
1. Vibrationskällan som ger dynamisk belastning av jorden
2. Spridning till omgivningen via jorden i form av vågutbredning
3. Respons av byggnaden till följd av vågutbredning



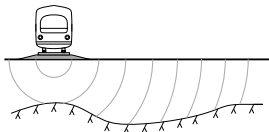
Tre olika fall kan betraktas.

1. Vibrationsgenererande infrastruktur anläggs i närhet av existerande byggnader
2. **Byggnad uppförs i närheten av existerande infrastruktur**
3. Ett område där både nya byggnader och infrastruktur planeras

Fall 1



Fall 2



Fall 3



Förutsäga vibrationsnivåer i byggnader

Numeriska modeller

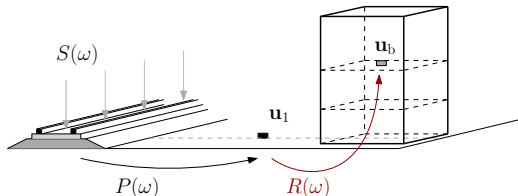
- + Flexibilitet
- + Koppling till fysikaliska principer
- Betydande modellosäkerheter
- Komplicerade och tidskrävande

Empiriska modeller

- + Användning av mätdata tar hänsyn till plats specifika förhållanden
- + Enkla att använda
- Prediktion via tumregler
- Ej kopplade till jordegenskaper

Hybrida modeller – drar nytta av fördelar med båda modelltyperna

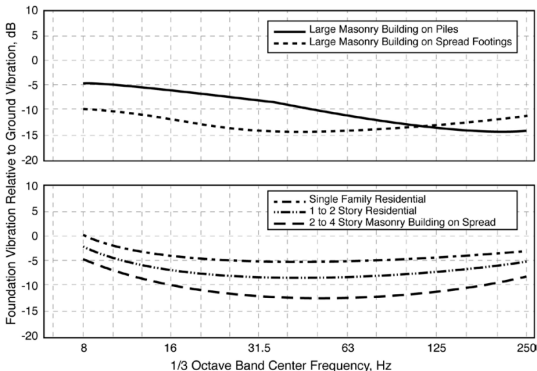
$$A^{\text{hyb}}(\omega) = S^{\text{exp}}(\omega) P^{\text{exp}}(\omega) R^{\text{num}}(\omega)$$



Överföring av vibrationer från mark till byggnad

Empiriska värden för kinematisk interaktion tar ej hänsyn till

- Jordegenskaper
- Specifik utformning av grundläggning

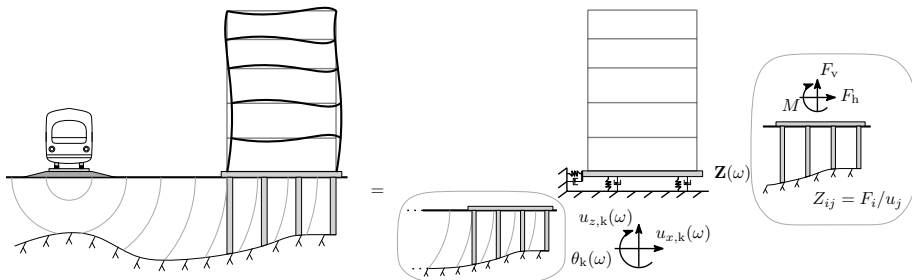


Från FRA guidelines [Hanson et al., 2012]

Överföring av vibrationer från mark till byggnad

Jordens mekaniska egenskaper påverkar:

1. De dynamiska påkänningarna vid byggnadens fundament (Kinematisk interaktion)
2. Byggnadens dynamiska verkningssätt (Masströghets-interaktion)





Innehåll

Bakgrund och problemformulering

Mål och syfte

Metod

Resultat

Sammanfattning och slutsatser

Syftet med projektet är att

- Öka förståelsen för överföringen av markvibrationer till pålade fundament för svenska lerjordar på berg
- Identifiera parametrar som påverkar transmissionen av vibrationer mellan jord och pålar
- Utvärdera numeriska modellers förmåga att beskriva det dynamiska verkningssättet för spetsburna pålar
- Belysa viktiga aspekter som kan ligga till grund för praktiska rekommendationer

Detta uppnås genom

- Teoretiska studier med numeriska modeller
- Validering av teoretiska beräkningsmodeller genom utförliga fältstudier av slagna spetsburna betongpålar

Syfte och omfattning

Projektet utförs med följande avgränsningar:

- Vertikala spetsburna slagna betongpålar i lerjord
- Frekvensomfång 1–80 Hz motsvarande kännbara vibrationer [ISO 2631-2:2003, 2003]
- Små töjningsnivåer i jorden
 - Linjärelastiska materialmodeller
 - Små kraftamplituder i experiment



Innehåll

Bakgrund och problemformulering

Mål och syfte

Metod

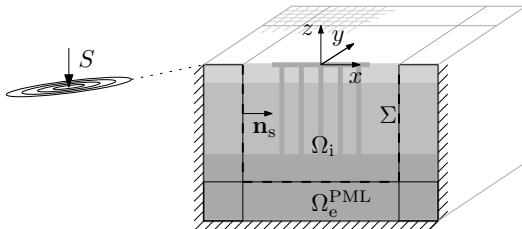
Resultat

Sammanfattning och slutsatser

- 3D FE modell i frekvensdomän med perfectly matched layers (PML)
- Lösa jordar kräver fin diskretisering vid höga frekvenser

Stora avstånd till vibrationskällan → diskretisering av jord kräver många element

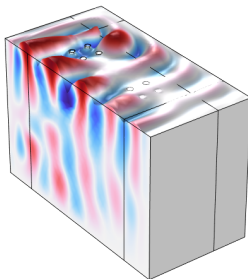
- Semi-analytisk vågutbredningsmodell för horisontella jordlagerföljder [Schevenels et al., 2009]
- Kombineras med FE-PML modell för att beräkna evkivalent spänningsfält [Papadopoulos et al., 2018]



- 3D FE modell i frekvensdomän med perfectly matched layers (PML)
- Lösa jordar kräver fin diskretisering vid höga frekvenser

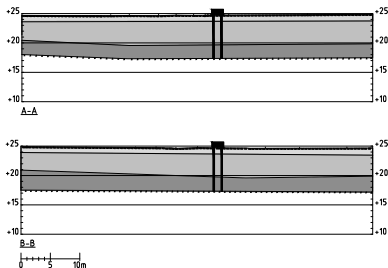
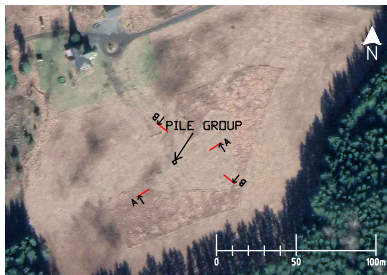
Stora avstånd till vibrationskällan → diskretisering av jord kräver många element

- Semi-analytisk vågutbredningsmodell för horisontella jordlagerföljder
[Schevenels et al., 2009]
- Kombineras med FE-PML modell för att beräkna evkivalent spänningsfält
[Papadopoulos et al., 2018]



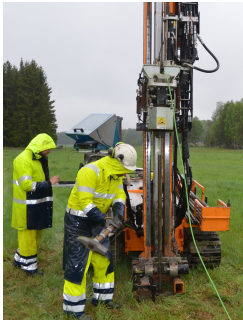
Etablering av test-site: Brottbby

- Identifiering och validering av jordmodell [Theland et al., 2021]
 - Jordlagerföljd: Torrskorpelera, Lera, Morän, Berg



Etablering av test-site: Brottby

- Identifiering och validering av jordmodell [Theland et al., 2021]
 - Jordlagerföljd: Torrskorpelera, Lera, Morän, Berg
 - Bender element ($\square$), SCPT (*), **Empirisk CPT**, **SASW** } → **Modell**



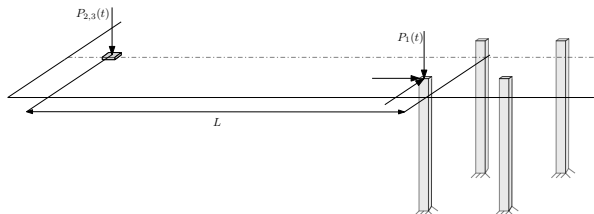
Experimentella studier

Steg 1



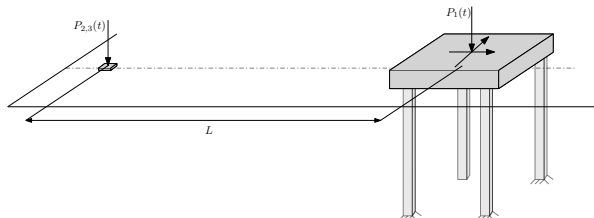
$u_{ff}(\omega)$

Steg 2



$u_{pj}(\omega)$

Steg 3

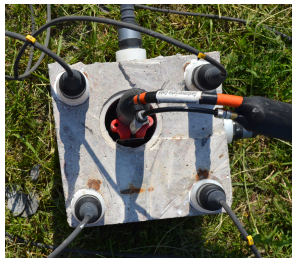


$u_{pg}(\omega)$

Experimentella studier

Dynamisk respons av spetsburna pålar

- Installation och instrumentering av en pålgrupp med spetsburna betongpålar
- SP1 med kantmått 235 mm



Experimentella studier

Dynamisk respons av spetsburna pålar

- Installation och instrumentering av en pålgrupp med spetsburna betongpålar
- SP1 med kantmått 235 mm
- Accelerometrar i pålar



Experimentella studier

Dynamisk respons av spetsburna pålar

- Installation och instrumentering av en pålgrupp med spetsburna betongpålar
- SP1 med kantmått 235 mm
- Accelerometrar i pålar
- Dynamisk excitering med hammare och shaker





Innehåll

Bakgrund och problemformulering

Mål och syfte

Metod

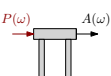
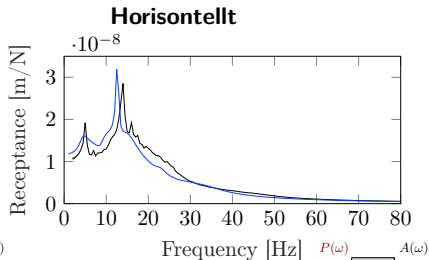
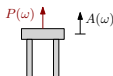
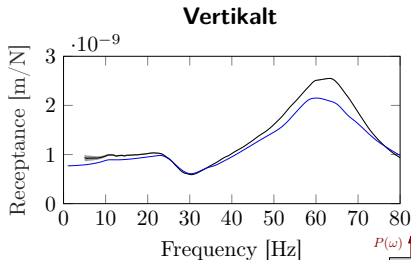
Resultat

Sammanfattning och slutsatser

Experimentella och numeriska resultat

Pålgrupp

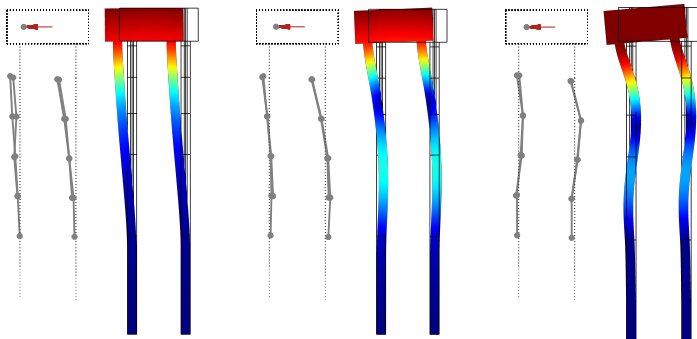
- Experimentell och **numerisk** receptans $R(\omega) = (i\omega)^{-2} A(\omega) / P(\omega)$



Experimentella och numeriska resultat

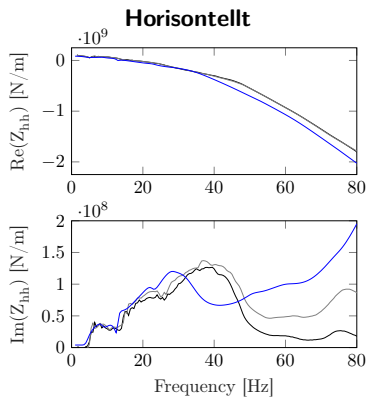
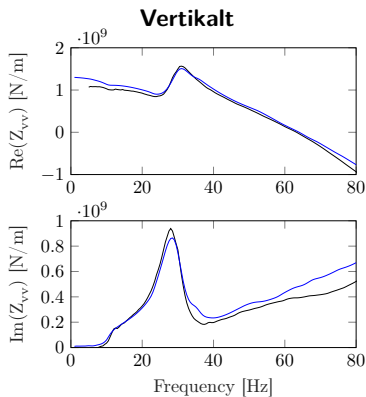
Pålgrupp

- Experimentell och **numerisk** receptans $R(\omega) = (i\omega)^{-2} A(\omega) / P(\omega)$
- Global respons vid jordens horisontella egenfrekvenser $H = \frac{1}{4} \lambda_s (2n - 1)$



- Experimentell och **numerisk** impedans [Theland et al., 2022]

$$Z_{ij}(\omega) = 1/R_{ij}(\omega) = k_{ij}(\omega) + i\omega c_{ij}(\omega)$$



Kinematisk respons av pålar

Teoretisk studie

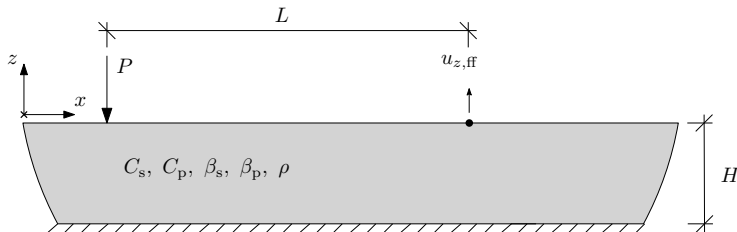
Respons vid L/H kan för homogen jord uttryckas som dimensionslös hastighet:

$$\tilde{v} = i\omega u C_s \rho H L$$

som funktion av $H/\lambda_s = fH/C_s$.

Interaktionen påverkas av jordens och pålarnas egenskaper:

- E_p/E_s Styvhets-ratio mellan påle och jord
- H/d Slankhetstal



Kinematisk respons av pålar

Teoretisk studie

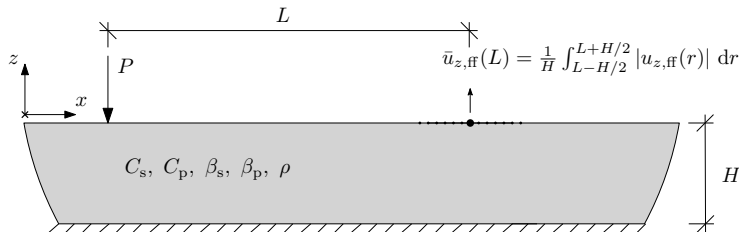
Respons vid L/H kan för homogen jord uttryckas som dimensionslös hastighet:

$$\tilde{v} = i\omega u C_s \rho H L$$

som funktion av $H/\lambda_s = fH/C_s$.

Interaktionen påverkas av jordens och pålarnas egenskaper:

- E_p/E_s Styvhets-ratio mellan påle och jord
- H/d Slankhetstal



Kinematisk respons av pålar

Teoretisk studie

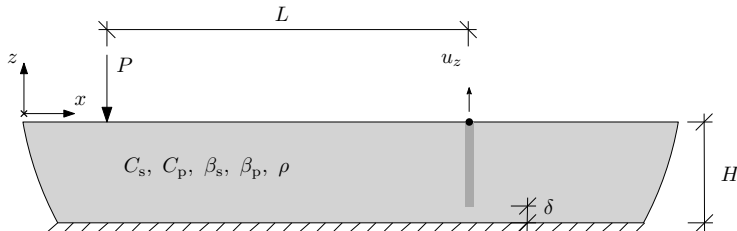
Respons vid L/H kan för homogen jord uttryckas som dimensionslös hastighet:

$$\tilde{v} = i\omega u C_s \rho H L$$

som funktion av $H/\lambda_s = fH/C_s$.

Interaktionen påverkas av jordens och pålarnas egenskaper:

- E_p/E_s Styvhets-ratio mellan påle och jord
- H/d Slankhetstal



Kinematisk respons av pålar

Teoretisk studie

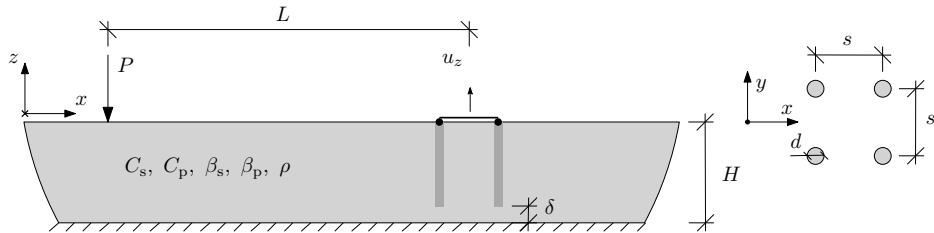
Respons vid L/H kan för homogen jord uttryckas som dimensionslös hastighet:

$$\tilde{v} = i\omega u C_s \rho H L$$

som funktion av $H/\lambda_s = fH/C_s$.

Interaktionen påverkas av jordens och pålarnas egenskaper:

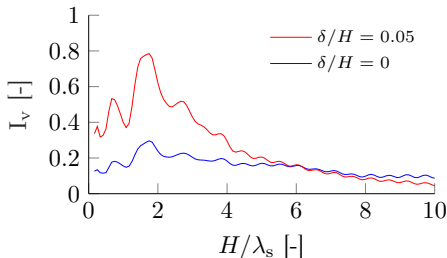
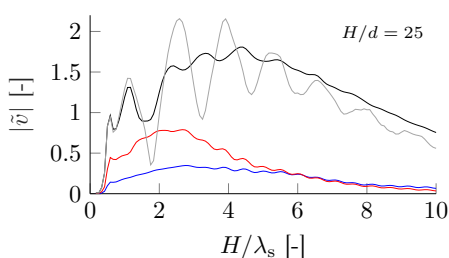
- E_p/E_s Styvhets-ratio mellan p le och jord
- H/d Slankhetstal



Kinematisk respons av pålar

Vertikal respons vid $L/H = 2$

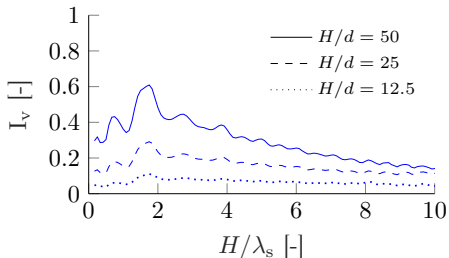
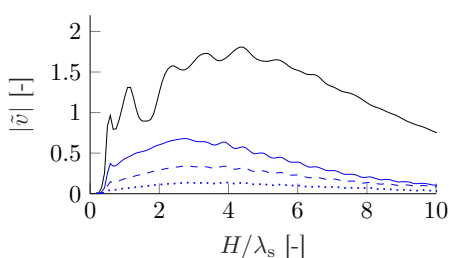
- Vertikalkomponent av störst intresse för kännbara vibrationer
- Responsamplitud relativt jordens $I_v = |u_z|/\bar{u}_{z,\text{ff}}$
- **Mantelburna** och **spetsburna** pålar för $E_p/E_s = 1000$



Kinematisk respons av pålar

Vertikal respons vid $L/H = 2$

- Vertikalkomponent av störst intresse för kännbara vibrationer
- Responsamplitud relativt jordens $I_v = |u_z|/\bar{u}_{z,\text{ff}}$

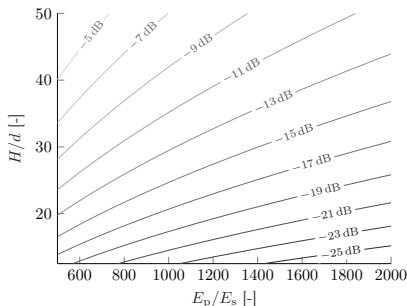
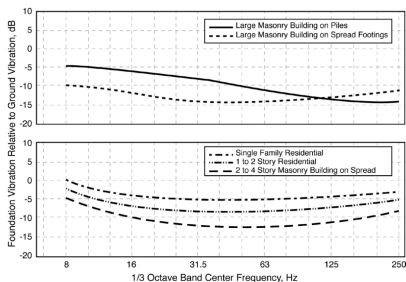


Kinematisk respons av spetsburna pålar

Approximation

- Respons av pålgrupper begränsas av responsen av den enskilda p len
- I_v kan f r en enskild påle approximeras som konstant genom

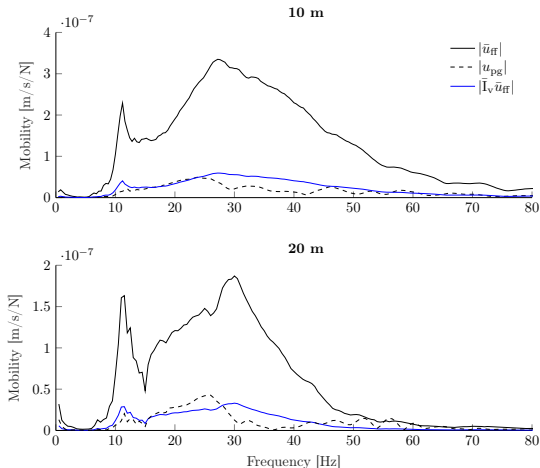
$$\bar{I}_v = 0.49 \left(\frac{H}{d} \right)^{1.3} \left(\frac{E_p}{E_s} \right)^{-0.75}$$



Experimentell respons pålgrupp

Preliminära resultat

- Approximation baserad på pålningsdjup och lerans medelstyvhet $\bar{I}_v \approx -15$ dB





Innehåll

Bakgrund och problemformulering

Mål och syfte

Metod

Resultat

Sammanfattning och slutsatser

- Experiment för att karakterisera dynamisk respons av spetsburna betong pålar i lera har utförts i flera steg
- Test-site etablerad i Brottby norr om Stockholm
- Resultaten indikerar att impedanser av spetsburna pålfundament i lera kan modelleras med relativt god noggrannhet
- Vertikal respons av spetsburna pålar påverkas starkt av pålarnas axiella styvhet och jordens styvhet
- Approximation baserad på slankhetstal och relativ styvhet relaterar jordens vertikala respons till responsen av en spetsburen påle
- Preliminära experimentella resultat verifierar slutsaterna från teoretisk studie



Hanson, C. E., Ross, J. C., and Towers, D. A. (2012).
High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment.
Technical report, Federal Railroad Administration.



ISO 2631-2:2003 (2003).
Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2:
Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).
Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH.



Papadopoulos, M., François, S., Degrande, G., and Lombaert, G. (2018).
The influence of uncertain local subsoil conditions on the response of buildings to ground vibration.
Journal of Sound and Vibration, 418:200–220.



Schevenels, M., François, S., and Degrande, G. (2009).
EDT: An ElastoDynamics Toolbox for MATLAB.
Computers & Geosciences, 35(8):1752 – 1754.



Theland, F., Lombaert, G., François, S., Pacoste, C., Deckner, F., and Battini, J.-M. (2021).
Assessment of small-strain characteristics for vibration predictions in a Swedish clay deposit.
Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 150:106804.



Theland, F., Lombaert, G., François, S., Pacoste, C., Deckner, F., Blom, P., and Battini, J.-M. (2022).
Dynamic response of driven end-bearing piles and a pile group in soft clay: an experimental validation study.
Engineering Structures, 267:114629.



Theland, F., Battini, J.-M., Pacoste, C., Lombaert, G., François, S., Blom, P., and Deckner, F. (2020). Soil-structure interaction of an end-bearing pile foundation: Design of an experimental case study. *XI International Conference on Structural Dynamics, Athens, Greece, 23–26 November 2020*, page 2846 – 2856.



Theland, F., Lombaert, G., François, S., Pacoste, C., Deckner, F., and Battini, J.-M. (2021). Assessment of small-strain characteristics for vibration predictions in a Swedish clay deposit. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150:106804.



Theland, F., Lombaert, G., François, S., Pacoste, C., Deckner, F., Blom, P., and Battini, J.-M. (2022). Dynamic response of driven end-bearing piles and a pile group in soft clay: an experimental validation study. *Engineering Structures*, 267:114629.



Theland, F., Lombaert, G., François, S., Zangeneh, A., Deckner, F., and Battini, J.-M. Identification of parameters governing the response of pile foundations in soil on bedrock due to a nearby vertical harmonic load. *Under granskning i internationell tidsskrift*.



Theland, F., Pacoste, C., Battini, J.-M., Lombaert, G., François, S., and Deckner, F. (2023). The influence of near-surface soil layer resonance on vibrations in pile foundations. *Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems - Proceedings of the 8th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, 2022*, page 84 – 89.