

# Numerisk simulering av installasjonen av en monopel i mettet sand ved bruk av vibro- og fallodd

Halvard Eiesland  
Multiconsult Norge AS

Yngres dag, NGF  
09.11.2022

# Forfattere



Halvard Eiesland  
M.Sc.  
Multiconsult Norge AS



Gudmund R. Eiksund  
Professor  
Norwegian University of  
Science and Technology  
(NTNU)



Steven M. Bayton  
Ph.D.  
Norwegian Geotechnical  
Institute (NGI)



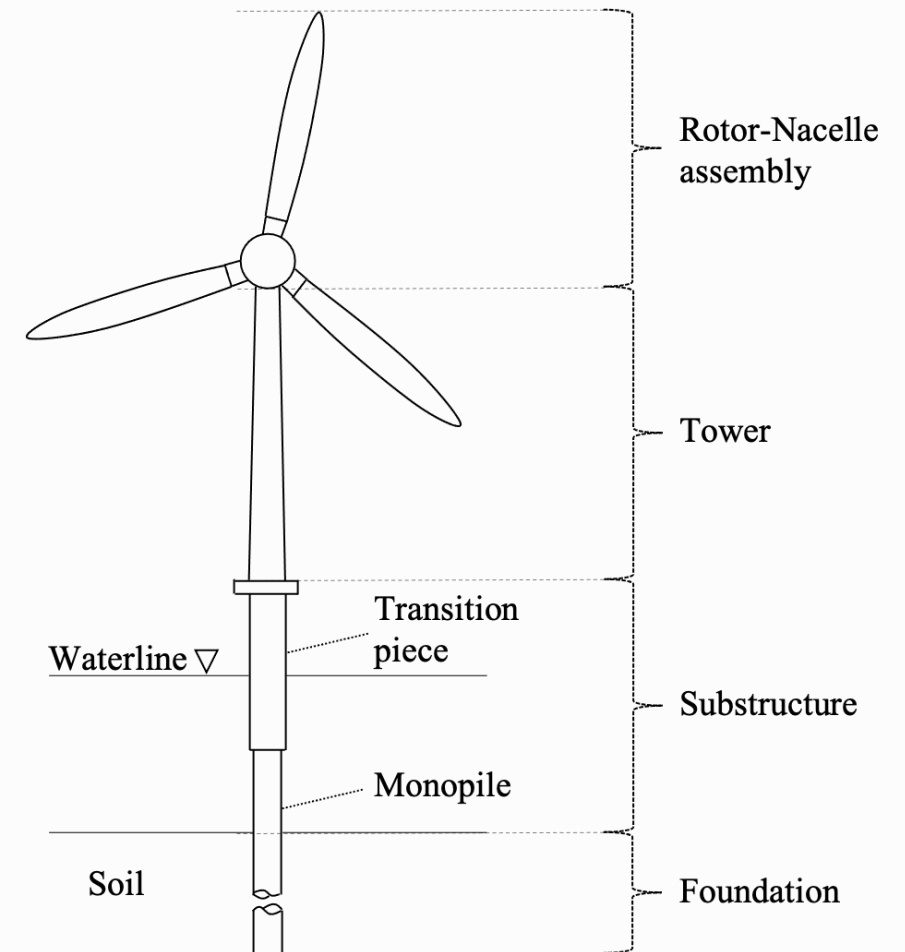
Jörgen Johansson  
Ph.D.  
Norwegian Geotechnical  
Institute (NGI)

# Innhold

- Bakgrunn og motivasjon
- Hammer med fallodd
- Hammer med vibrolodd
- Formål og metode
- PLAXIS 2D modell
- Resultater
  - Jordens respons under ramming og etter konsolidering (vibro- vs. fallodd og ulike frekvenser for vibrolodd)
- Konklusjon
- Begrensninger
- Forslag til videre arbeid

# Bakgrunn og motivasjon

- Kapasiteten for offshore vindenergi i Europa er anslått å øke fra 12 GW til 300 GW innen 2050 (EC, 2020)
- Monopelfundamenter for offshore vindturbiner er vanligvis installert ved bruk av fallodd
  - Undervannsstøy, skadelig for blant annet flere marine pattedyr
- Installasjon ved bruk av vibrolodd er foreslått å ha flere fordeler sammenlignet med fallodd
  - Mindre undervannsstøy
  - Raskere installasjon
  - Tilnærmet ingen begrensning av peldimensjoner
  - Men stor usikkerhet knyttet til prediksjon av pelens bæreevne etter installasjon



Offshore vindturbin fundamentert med monopel. Figur hentet fra Ko (2020), med modifikasjoner.

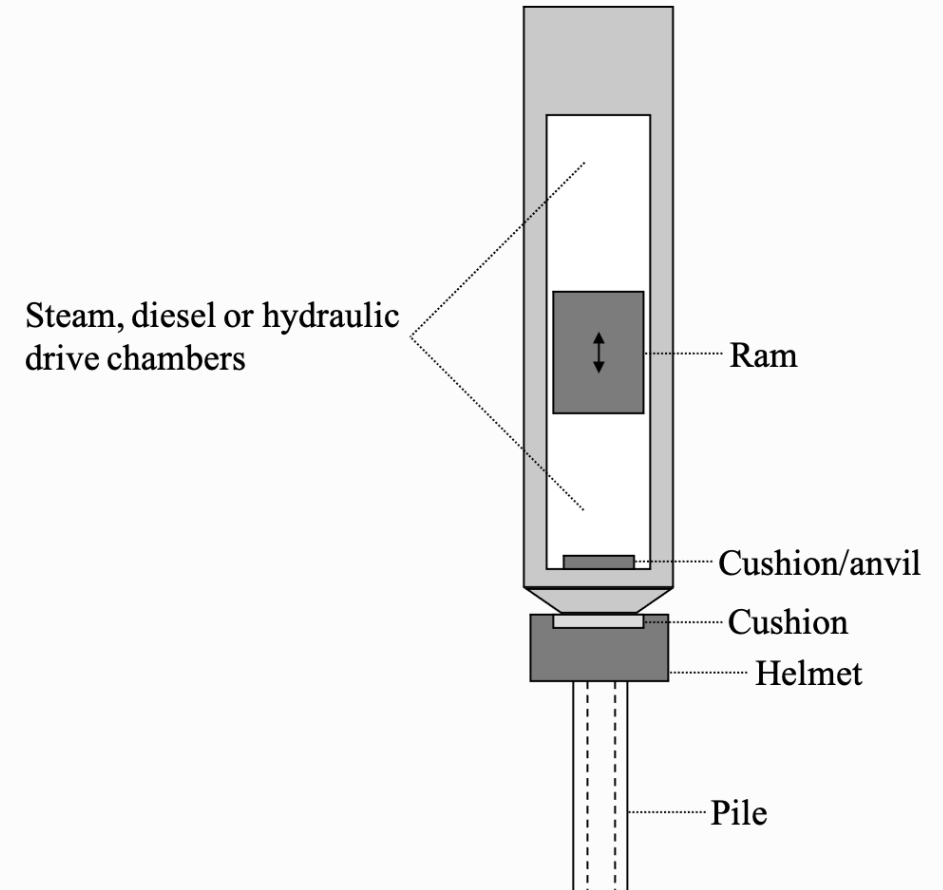
# Hammer med fallodd

- Ofte rundt 40 slag per minutt
- Høy lastamplitude
- Diskontinuerlig lastoverføring fra hammer til pel
- Pel ikke fast innspent i hammer

$$E_{p,lodd} = m_{lodd} \cdot g \cdot H_{lodd}$$

$$E_{k,lodd} = \frac{1}{2} \cdot m_{lodd} \cdot v_{lodd}^2$$

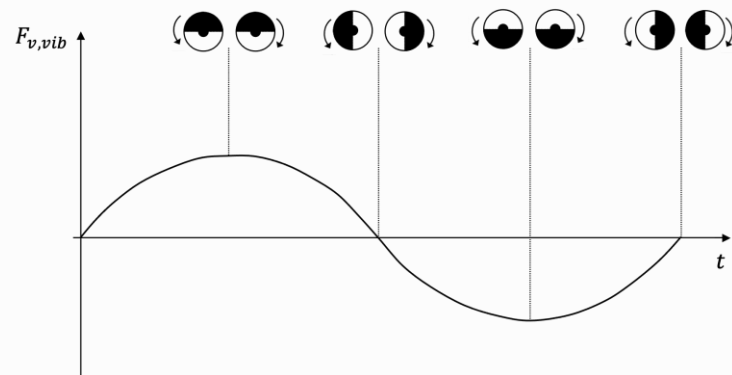
Energitap kan gjøre at kinetisk energi ved støt ikke tilsvarer maksimal potensiell energi. En kilde til tap av energi kan være friksjon mellom lodd og kammer



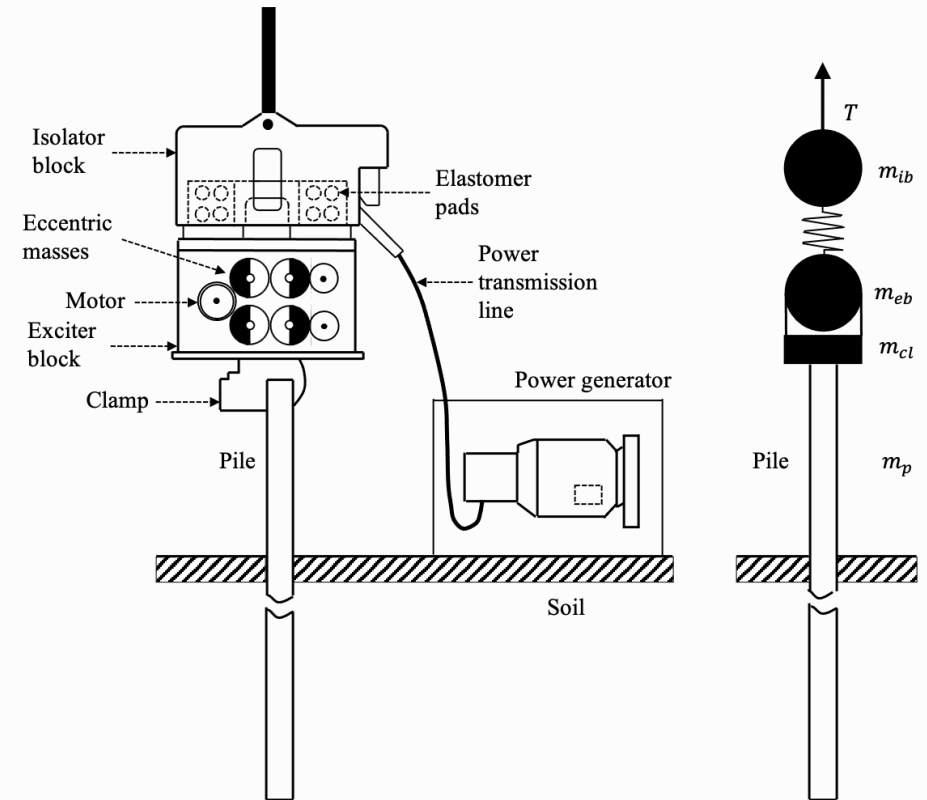
Prinsipp tegning av en hammer med fallodd. Figur hentet fra Chung et al. (2013), med modifikasjoner.

# Hammer med vibrolodd

- Høyere lastfrekvens enn fallodd, omtales ofte i Hz (lastsykler per sekund)
- Lavere lastamplitude
- Produserer en kontinuerlig vertikal last (sinusfunksjon)
- Pel fast innspent i hammer



Prinsipptegning av hvordan ett par roterende, eksentriske masser kan generere kun vertikal dynamisk last. Figur hentet fra Jonker (1987) og Jonker og Middendorp (1988), med modifikasjoner.



Prinsipptegning av en hammer med vibrolodd (t.v.) og figur som viser mekanismen til en vibrohammer (t.h.). Figurene er hentet fra Holeyman (2002), med modifikasjoner.

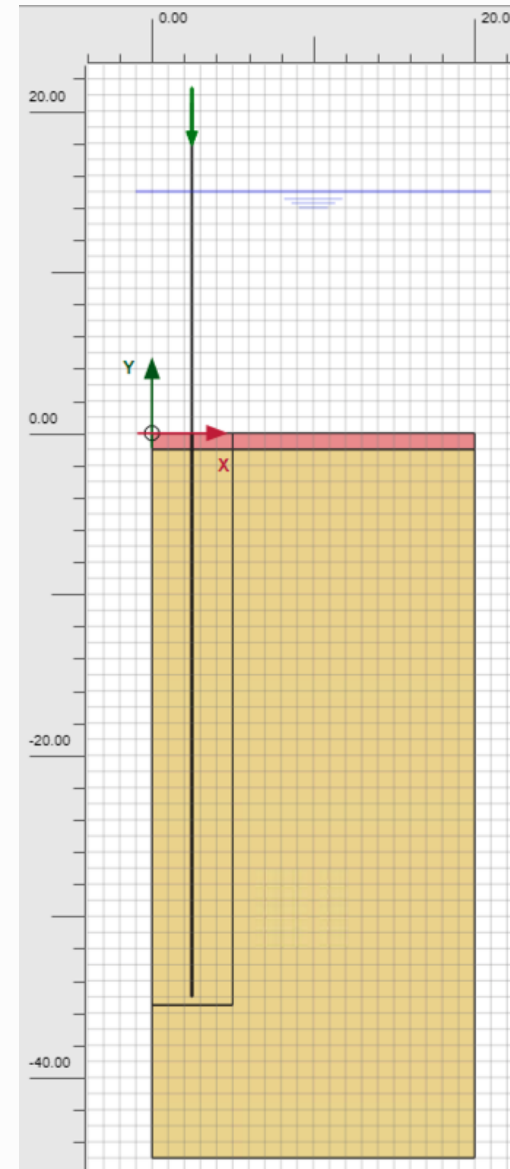
$$F_{v,vib}(t) = M_{ecc, sum} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

# Formål og metode

- Formål
  - Undersøke hvorvidt numeriske simuleringer vil gi indikasjoner på ulik respons av jorden under installasjon av monopel ved vibrolodd sammenlignet med fallodd
    - Samt om det er indikasjoner på ulik tilstand av jorden etter konsolidering
  - Undersøke hvordan den simulerte responsen av jorden påvirkes av ulike parametre for vibrolodd (lastfrekvens og lastamplitude)
- Metode
  - En liten del av pelerammingen av monopelen simuleres i PLAXIS 2D

# PLAXIS 2D modell

- Hul monopel av stål
  - «Wished-in-place» ved endelig dybde (35 m)
- Aksesymmetrisk modell
- Mettet sand, modellert ved:
  - Simple Anisotropic Sand (SANISAND) constitutive model (Dafalias og Manzari, 2004)
    - «Cone hardening» med «kinematic hardening», men ikke «cap hardening»
  - Mohr-Coulomb, øverste 1 m av jorden, med kohesjon større enn null for numerisk stabilitet



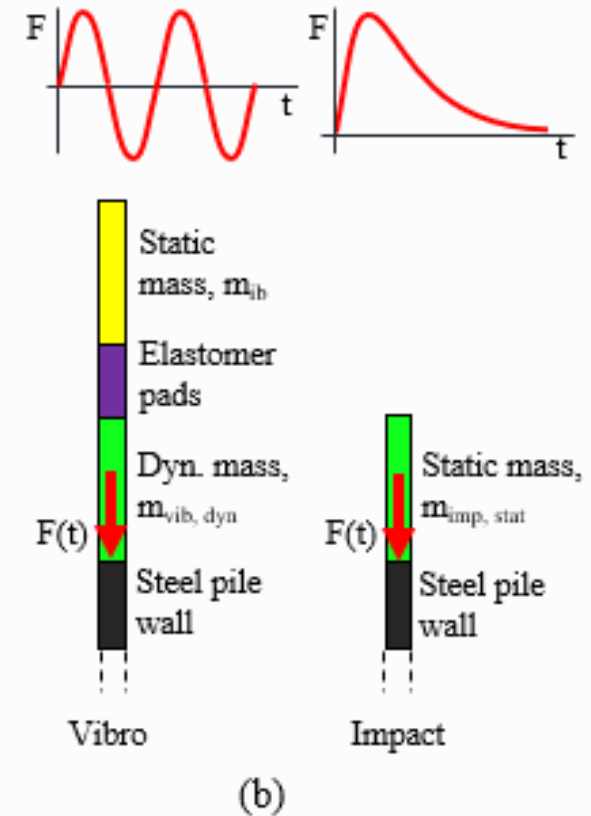
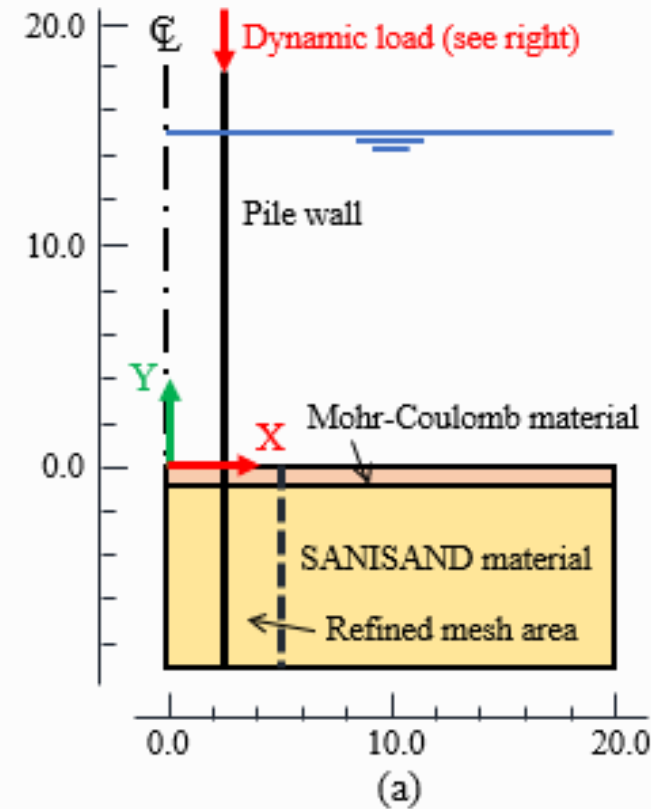
Modellen i PLAXIS 2D, lastfase. Grønn, nedadrettet pil indikerer last påført toppen av pel.

Parameter	Verdi	Enhet
Ytre peldiameter	5.0	m
Godstykkelse	56.4	mm
Total pelelengde	53.0	m
Pelelengde i jord	35.0	m



# PLAXIS 2D modell

- En dynamisk, vertikal last simulerer pelerammingen fra vibro- og fallodd
- Resultater fra fem ulike simuleringer blir her presentert, hvorav
  - Fire med vibrolodd
    - Ulik lastfrekvens og lastamplitude
  - Én med fallodd



(a): Prinsipptegning av øvre del av modellen i PLAXIS 2D;

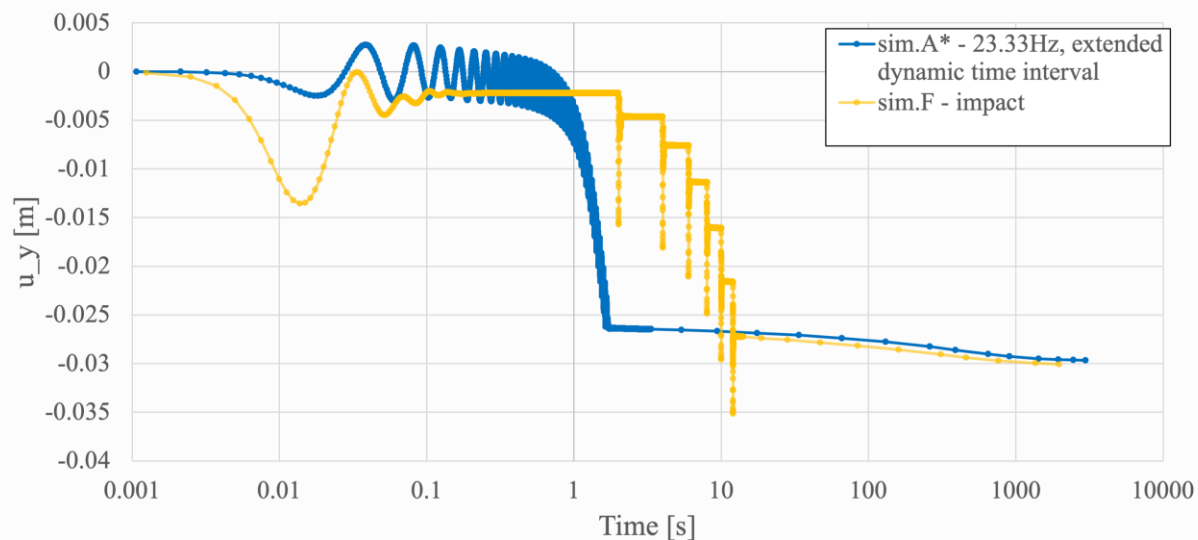
(b): Prinsipptegning av elementene og lastene som simulerer driverne.

# Resultater – vibro- vs. fallodd

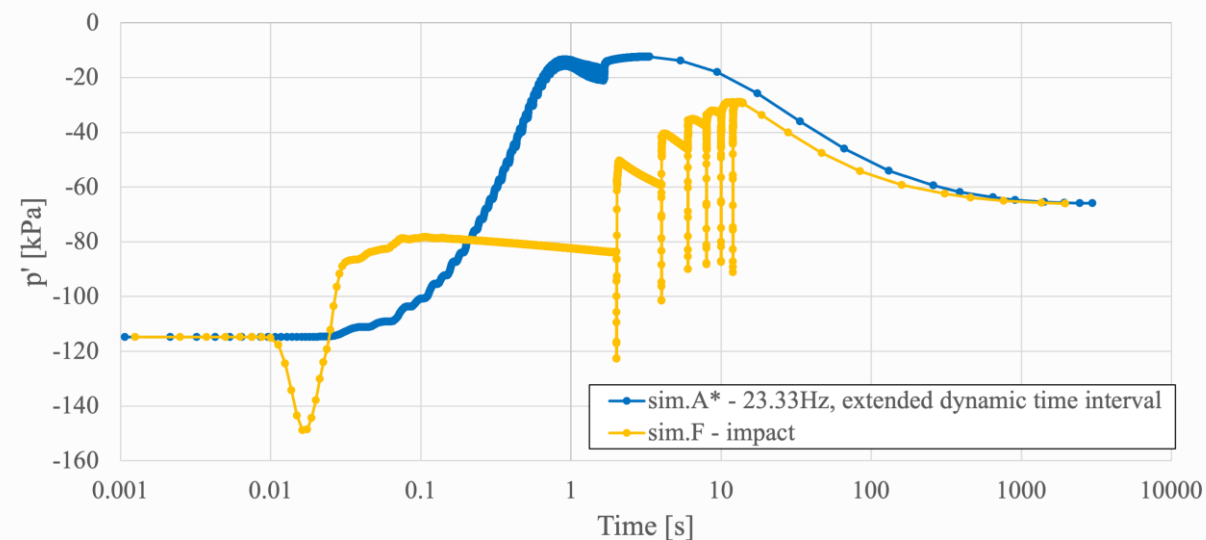
- Vibrolodd, sim.A\* (blå)
- Fallodd, sim.F (gul)

Negativ spenning indikerer spenning i trykk

Beskrivelse	Vibrolodd	Fallodd
Referanse	sim.A*	sim.F
Lastfrekvens [Hz]	23.33	-
Lastrate [slag/min.]	-	30
Total tid, lastpåføring [s]	1.67	12.00
Antall lastsyklus [-]	38.9	7.0
Spenningsamplitude [kN/m <sup>2</sup> ]	10 609	101 315
Initielt porettall av sanden [-]	0.734	0.734



Vertikal forskyvning av topp av pel under peleramming og påfølgende konsolidering

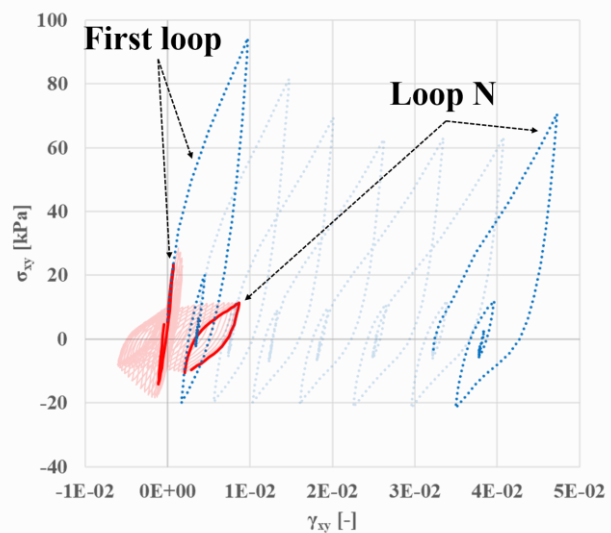


Effektiv middelspenning under peleramming og påfølgende konsolidering, ved 17.5 m dybde og 0.02 m fra utside pelevegg.

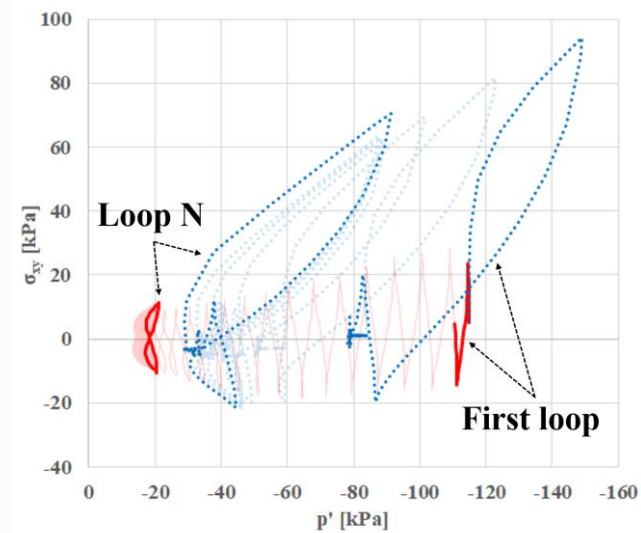
# Resultater – vibro- vs. fallodd

- Vibrolodd, sim.A\* (rød)
- Fallodd, sim.F (blå)
- $\sigma_{xy}$ - $p'$  spenningssti
  - “Phase transformation: kontraksjon -> dilatasjon (økning i  $p'$  i trykk)
  - Bruddlinje nådd allerede etter første lastsykel for fallodd

Beskrivelse	Vibrolodd	Fallodd
Referanse	sim.A*	sim.F
Lastfrekvens [Hz]	23.33	-
Lastrate [slag/min.]	-	30
Total tid, lastpåføring [s]	1.67	12.00
Antall lastsykler [-]	38.9	7.0
Spenningsamplitude [kN/m <sup>2</sup> ]	10 609	101 315
Initielt porettall av sanden [-]	0.734	0.734



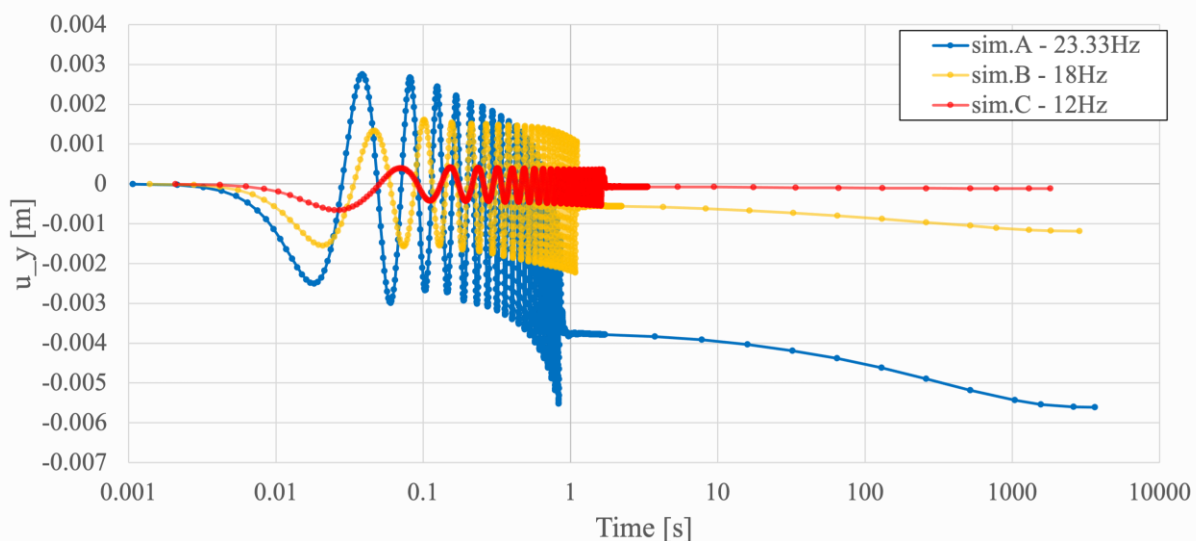
Skjærspenning og -tøyning hysteresekurver under peleramming, ved 17.5 m dybde og 0.02 m fra utside pelevegg.



Spenningssti i  $\sigma_{xy}$ - $p'$  rommet under peleramming, ved 17.5 m dybde og 0.02 m fra utside pelevegg.

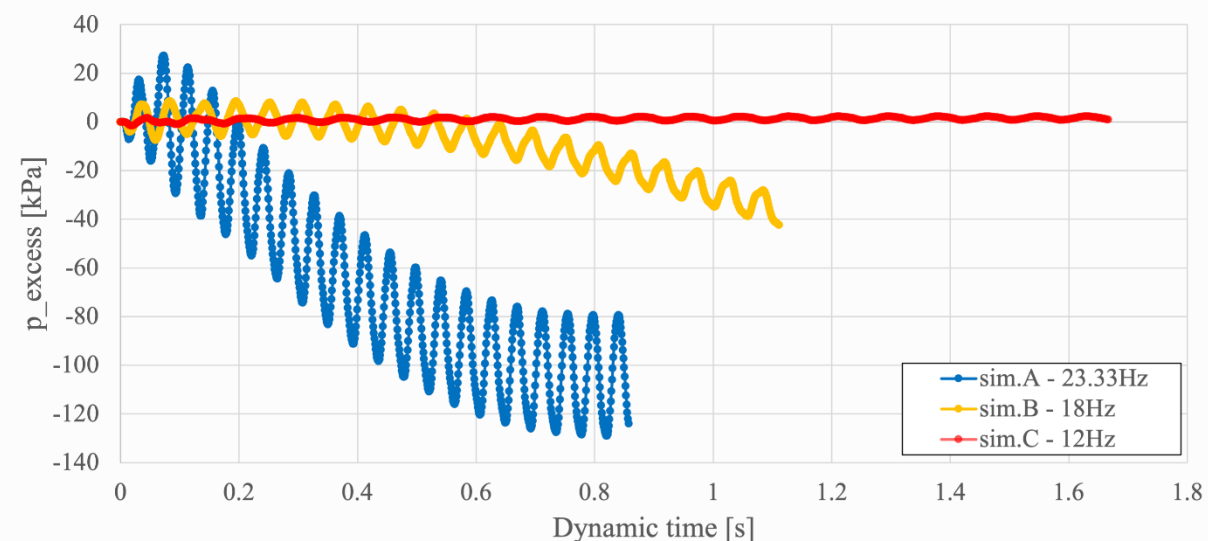
# Resultater – ramming med vibrolodd ved ulike lastfrekvens og lastamplitude

- Ramming med vibrolodd ved
  - 23.3 Hz, sim.A (blå)
  - 18 Hz, sim.B (gul)
  - 12 Hz, sim.C (rød)



Vertikal forskyvning av topp av pel under peleramming og påfølgende konsolidering

Beskrivelse	Vibrolodd		
Referanse	sim.A	sim.B	sim.C
Lastfrekvens [Hz]	23.33	18.00	12.00
Total tid, lastpåføring [s]	0.857	1.110	1.670
Antall lastsyklus [-]	20	20	20
Spenningsamplitude [kN/m <sup>2</sup> ]	10 609	6 315	2 807
Initielt porettall av sanden [-]	0.734	0.734	0.734



Poreovertrykk under peleramming, ved 17.5 m dybde og 0.02 m fra utside pelevegg.

# Konklusjon

- PLAXIS simulerer en tydelig forskjell i jordens respons under peleramming ved vibrolodd sammenlignet med fallodd
- Vibrolodd vs. fallodd
  - Vesentlig større spenninger påført jorden under ramming ved fallodd
    - Antydning til dilatans i jorden -> større rammemotstand
    - Fravær av «cap hardening» i jordmodellen påvirker kanskje simulering av fallodd i større grad
  - Raskere oppbygging av poreovertrykk under ramming med vibrolodd, samt raskere peleramming til samme dybde
  - Derimot tilnærmet lik effektiv middelspenning etter konsolidering i evaluert punkt
- Vibrolodd ved ulike lastfrekvenser
  - Indikasjon på en grenseverdi for lastfrekvens som ikke gir permanente, vertikale setninger og ikke gir oppbygging av poreovertrykk

# Begrensninger

- Kun noen få punkter i sanden evaluert
- Relativt liten del av pelerammingen er simulert
  - ca. 0.9-1.7s for vibrolodd og 12s for fallodd
- Pel er «wished-in-place» ved endelig dybde
  - Effekter på jordens respons fra å drive pelen fra sjøbunn til endelig dybde ikke hensyntatt
- Utmatting av pelemateriale ikke vurdert
- Konseptuelt studie

## Forslag til videre arbeid

- Sammenligne modellen og resultatene mot utførte installasjoner med vibrolodd
- Inkludere en større del av installasjonen i simuleringen
- Vurdere resultater fra flere punkter i jorden
- Evaluere jordmodellen brukt i simuleringene (SANISAND 2004 mangler «cap-hardening» – effekt?)

# Referanser

- Det henvises generelt til masteroppgaven og konferanseartikkelen hvilket denne presentasjonen er basert på:
- Eiesland, H. (2021). "Numerical Simulation of Monopile Vibratory and Impact Installation in Saturated Sand", Master's thesis at Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- Eiesland, H., Eiksund, G. R., Bayton, S. M. and Johansson, J. (2022) "Numerical simulation of the vibratory and impact installation of monopiles in saturated sand". *The 11th International Conference on Stress Wave Theory and Design and Testing Methods for Deep Foundations (SW2022)*, Rotterdam, The Netherlands, 20-23 September 2022. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7146713>.
  
- Referanser henvist til i presentasjonen:
- Chung, J., Wallerand, R. and H´elias-Brault, M. (2013). "Pile Fatigue Assessment During Driving". *Procedia Engineering. Fatigue Design 2013, International Conference Proceedings 66*, pp. 451–463.
- Dafalias, Y. F. and Manzari, M. T. (2004). "Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects", *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6), American Society of Civil Engineers, pp. 622-634.
- EC (2020). "Boosting Offshore Renewable Energy for a Climate Neutral Europe". European Commission. URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_20\\_2096](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_20_2096) (visited on 16th April 2021).
- Holeyman, A. E. (2002). "Soil Behavior under Vibratory Driving". *International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction*. TRANSVIB2002. Belgium: Lisse.
- Jonker, G. (1987). "Vibratory Pile Driving Hammers for Pile Installations and Soil Improvement Projects". *Offshore Technology Conference*. OnePetro.
- Jonker, G. and Middendorp, P. (1988). "Subsea Installations Using Vibratory Piling Hammers". *OTC 88 PROC., TWENTIETH ANNUAL OFFSHORE TECHNOL. CONF.*, (HOUSTON, U.S.A.: MAY 2-5, 1988) 3.
- Ko, Y.-Y. (2020). "A simplified structural model for monopile-supported offshore wind turbines with tapered towers". *Renewable Energy* 156, pp. 777-790.