NGI Teknisk notat

Til:	NGI
v/	
Dato:	2017-12-21
Rev.nr. / Rev.dato:	0
Dokumentnr.:	20170115-01-TN
Prosjekt:	GBV 2017 - Database og verktøy for prediksjon av anleggsvibrasjoner
Prosjektleder:	Finn Løvholt
Utarbeidet av:	Karin Norén-Cosgriff, Birgitte Misund Dahl
Kontrollert av:	Finn Løvholt

Database og verktøy for prediksjon av anleggsvibrasjoner

Innhold

1 Innledning 2
2 Database 2
3 Oversikt over måledata i databasen 4
4 Typiske spektra 8
5 Avstandsdempning 14
5.1 FE analyser 14
5.2 Droppvektsmåling ved Vikingtidsmuseet 15
5.3 Måledata sammenlignet med FE analyser 19
6 Referanser 29

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

Formålet med GBV prosjektet "Database og verktøy for prediksjon av anleggsvibrasjoner" har vært å samle NGIs måledata for anleggsvibrasjoner, og med støtte fra måledata utvikle empiriske verktøy for beregning av anleggsvibrasjoner.

I dette notatet beskrives databasen over måledata og dynamiske FE analyser som er utført for å få en bedre forståelse av hvordan vibrasjonsverdiene fra anleggsvirksomhet avtar med avstand.

2 Database

Databasen er plassert i mappen P:\Intern\Fagansvarlig\FA fra 2015\Vibrasjoner og Jordskjelv\Technical\Vibration from construction work. Data fra følgende prosjekter og anleggskilder er inkludert i databasen, se Tabell 2-1.

Tabell 2-1 Oversikt over måledata i databasen

Prosjekt	Kilde	Målested	Antall tidsserier i databasen
Tømmeråsen	Avlasting av terreng med bulldozer	Grunnmur	9
Klett	KS-stabilisering av grunnen	Bakken	11
Gardermoen	Vibrokomprimering av grunnen	Grunnmur	4
Huitfeltsgate	JetStabilisering	Grunnmur	4
Regjeringskvartalet	Pigging	Grunnmur	6
Follobanen	Anleggstrafikk	Bakken	16
Follobanen	Boring av Pel	Bakken	20
Nasjonalmuseet	Pigging	I berget i ulike avstander	201[1)] (603[2)])
Gaustadbekkdalen	Peling	På bakken i ulike avstander	33
Bekkelaget	Boring av pel	Grunnmur	21
Spunting KTH	Spunting	I bakken i ulike dybder	53[1)] (162[2)])

1) Utvalgte data
2) Komplette data

Grunnet størrelsen på datamengden er data lagret i flere mat-filer

- Constr.mat inneholder måledata fra flere ulike prosjekter og kilder. Kun måledata for høyeste måleretning i hvert målepunkt er inkludert. Måledata fra

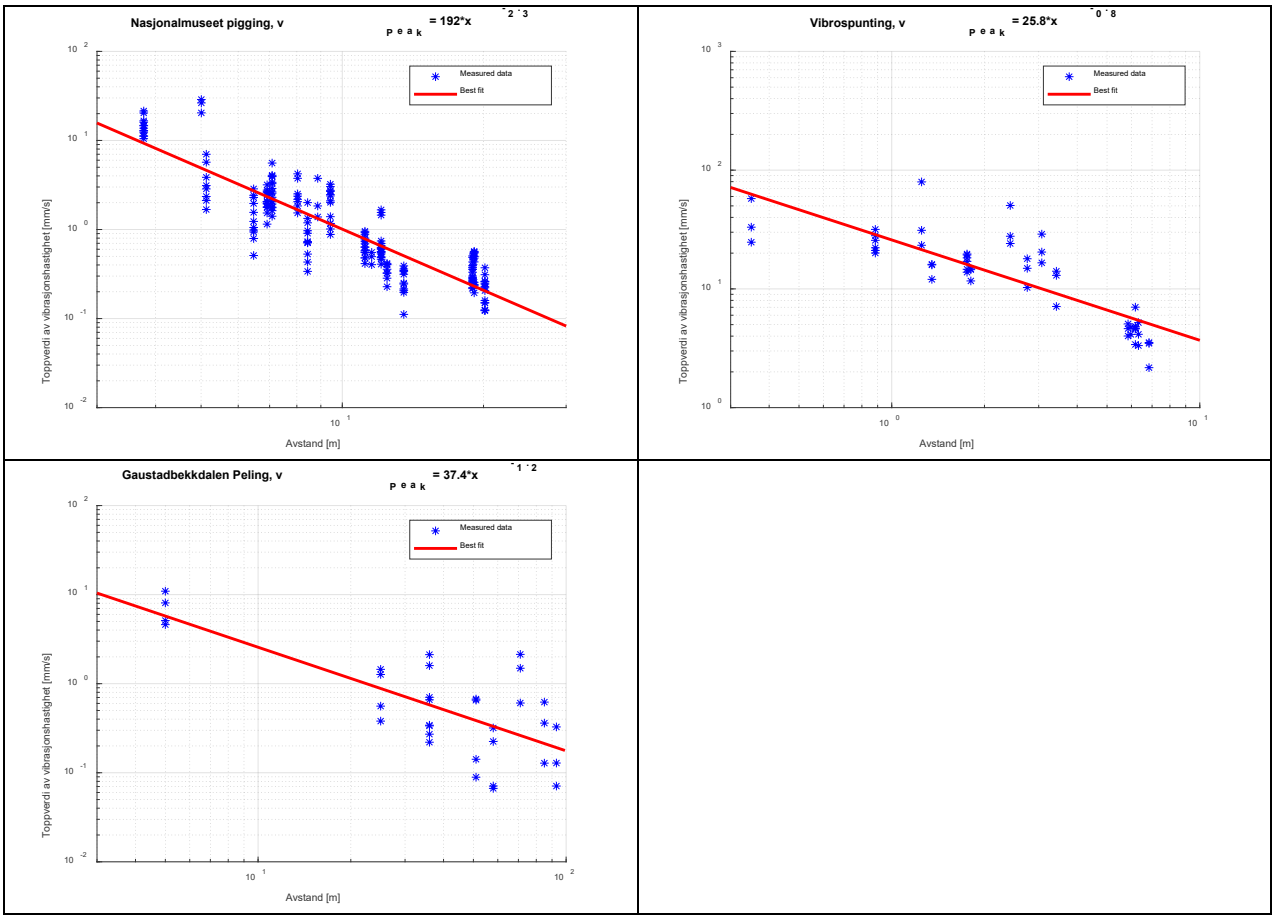
KTHs spuntforsøk og fra piggingsforsøkene ved Nasjonalmuseet er inkludert men kun i form av høyeste måleretning i hvert målepunkt. Databasen har 373 entries.

- Spunt.mat inneholder måledata fra KTHs spuntforsøk. Måledata fra alle måleretninger er lagret. Databasen har 162 entries. Måledata er resamplet til 1000 Hz for å redusere datamengden. Målepunkter på spunten er ikke inkludert, men finnes lagret i grunnlaget i mappen Grunnlagsmateriale.
- Pigg.mat inneholder måledata fra piggingsforsøkene ved nasjonalmuseet. Måledata fra alle måleretninger er lagret. Databasen har 603 entries.

Data er organisert i en Struct array, Values, med følgende felter:

Proj: navn på prosjektet
Loc: Navn på målepunkt og måleretning
DateTime: Dato og tidspunkt på numerisk format
fs: Samplingsfrekvens
Unit: Måleenhet
Dist: avstand fra kilde til målepunkt
OC3: 1/3 oktavbånd verdier RMS 1s
foc3: Midtfrekvenser i 1/3 oktavbånd
Com: Eventuelle kommentarer til måledata
MValues: Måledata som tidsserier

Til databasen er det knyttet et MatLab program ReadData.m for å lese ut og behandle data fra ulike prosjekter. I de tilfeller måledata finnes i ulike avstander gir programmet også mulighet for linear regresjon, log(vibrasjonsverdi) som funksjon av log(avstand). Eksempler på dette vises i Figur 2.1.



Figur 2.1 Lineær regresjon på måledata. Øverst til venstre: Piggingsforsøk ved Nasjonalmuseet. Øverst til høyre: KTHs spuntforsøk. Nederst til venstre: Pelingsforsøk i Gaustadbekkdalen

3 Oversikt over måledata i databasen

I Tabell 3-1 vises en oversikt med typiske vibrasjonsverdier og frekvenser, samt informasjon om målested og grunnforhold for måledata i databasen.

Tabell 3-1 Vibrasjoner fra anleggsvirksomhet

Kilde	Vibrasjons-hastighet. Peak (mm/s)	Frekvens (Hz)	Avstand (m)	Prosjekt	Spektra nr	Kommentar
Pigging av berg	0.6 3 13	100 -	19 9 4	Nasjonalmuseet	1	Målt inne i berget.
	10	200	< 10	Regeringskvartalet	2	Målt på grunnmur på inntilliggende bygning
Ramming av peler	2.1 1)	10	36	Gaustadbekkdalen	3	Målt på marken. Ramming av betongpeler P345MA. Steinfylling over leire. Avsluttet i berg, 5 tonn hammer, 0.35 m fallhøyde, redusert til ca 0.2 m under avsluttende innmeisling i berg.
Vibrospunting	5	31.5	6	Spunting KTH, [2]	4	14 m L603 spunt til 11 m dybde gjennom fyllmateriale over leire og morene. LRB 125 XL Piling and drilling rig, 1100H vibrator.
Vibrokom-primering	1	21	70-100	Gardermoen	5	Sand og grus i grunnen.
Anleggstrafikk på ikke asfaltert anleggsvei	5-6	25	2	Follobanen	6	Anleggstrafikk på ikke asfaltert anleggsvei. Målt på bakken foran spuntvegg. Peakverdiene redusert med faktor 2 for å kompensere for refleksjonsbidrag fra spuntveggen.
KS-stabilisering	0.9	8-12.5	< 5	Klett	7	Målt på bakken ved siden av stabiliseringsområdet
Jetinjisering	2	16-25	1-2	Huitfeldtsgate	8	Målt på grunnmur på inntilliggende bygning
Boring av stålkjernepel i faste løsmasser	0.3	8-16	0.6	Bekkelaget	9	Målt på grunnmur. Bygningen er fundamentert på 270x270 betongpeler ned på faste løsmasser, ev helt ned til berg
Flytting av borerigg	0.4	25-31.5				
Riggen dunker i fasade	10	20-31.5				
Boring av peler i leire	0.3 0.6	6.3-8 20-25	7	Follobanen	10	Målt på bakken foran spuntvegg. Peakverdiene redusert med faktor 2 for å kompensere for refleksjonsbidrag fra spuntveggen.

1) De målte verdiene er plottet sammen med rapporterte erfaringsverdier i litteraturen, se Figur 3.1. NGIs målinger er utført ved meget bløte grunnforhold.

I Tabell 3-2 og Tabell 3-3 vises erfaringsdata for vibrasjoner fra anleggsvirksomhet der vi savner måledata i form av tidsserier. Disse data er derfor ikke inkludert i databasen, men den litteratur og målerapporter som data er hentet fra er lagret i mappen Grunnlag.

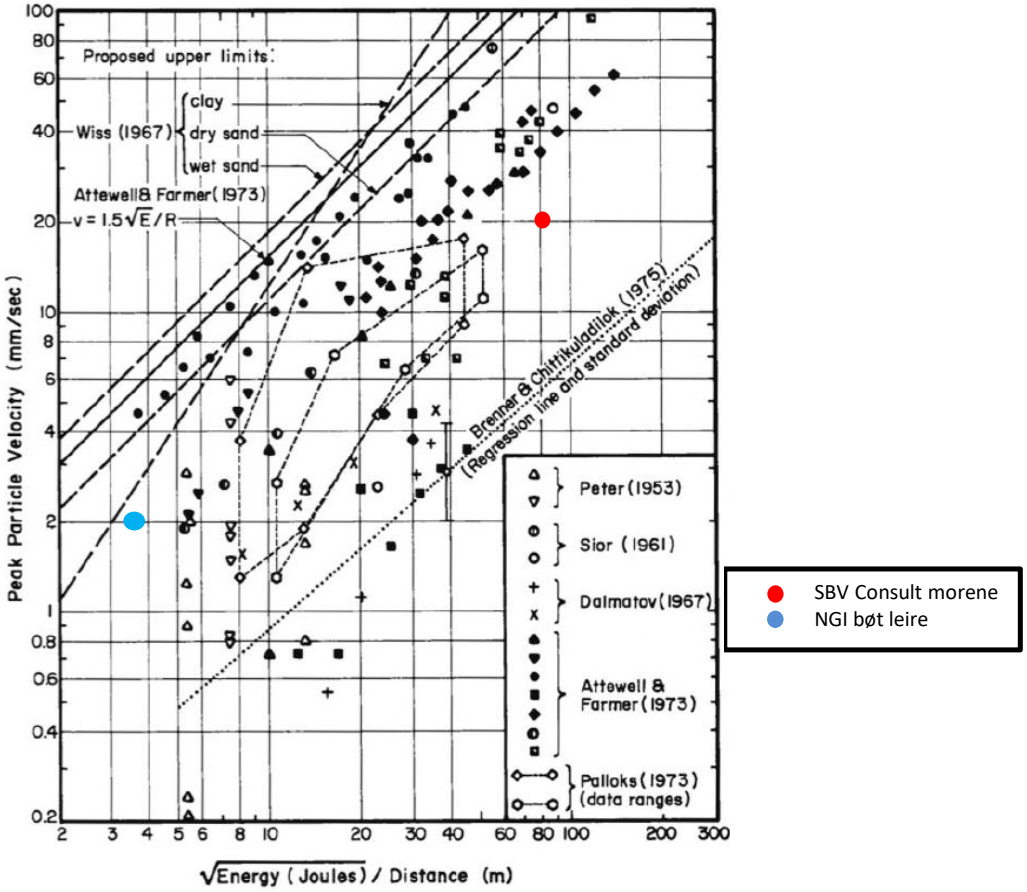
Tabell 3-2 Vibrasjoner fra anleggsvirksomhet

Kilde	Vibrasjons-hastighet. Peak (mm/s)	Frekvens (Hz)	Avstand (m)	Referanse	Spektra nr	Kommentar
Pigging i løsmasser	1 - 2	20	5	Målt av SBV consult	-	Pigging av betongrør i løsmasser. Målt på grunnmur på inntilliggende bygning
Ramming av peler	10-30 1)	20	5	Larvik Målt av SBV consult	-	Målt på marken. Ramming av stålrørspeler, Ø 0.914 m, 20 mm godstykkelse med spiss, slaglodd 12 tonn fallhøyde 0.1-1.4 m. Veifylling på varierende masser over hard morene. Avsluttet i morene.
Vibrospunting	2	30	15	Målt av KTH, [1]	11	12 m PU12 spunt til 11 m dybde i sand over leire. Diesko 2316VM vibrator, Diesko PVE480 hydraulic power pack.
	5	30	8			
	3 - 9	40	32	Støtvik Målt av SBV consult	12	A2 25 og Wx1200 Morene, med siltige masser og en god del større stein.
	1 - 2	30-40	20	Odernesveien Målt av SVV, [5]	-	U-LX16 U-LX25 Z-2N Z-3NA spunt til 15 m dybde i sand-silt med innslag av grus og stein. Målt på grunnmur. ICE 625B vibrolodd.
Spunting med fallodd	2 - 5	10-15	20	Odernesveien Målt av SVV, [5]	-	U-LX16 U-LX25 Z-2N Z-3NA spunt til 15 m dybde i sand-silt med innslag av grus og stein. Spunting avsluttet i løsmasser. 4 tonn lodd, fallhøyde 40-60 cm. Målt på grunnmur
Spunting med silent piler	0.5		20	Odernesveien Målt av SVV	-	Z-piler ZP150. AZ18 AZ26 spunt til 15 m dybde i sand-silt med innslag av grus og stein. Målt på grunnmur
Vibrokompri-mering	3	20-50	15	Data fra Statens vegvesen, [4]	-	Vibrasjonsvals Dynapac CC40 Ampl 5, 10t vibrerende tandemvals, på leire
	3	39	5	[8]		Loose sandy gravel with a thickness of 0.5 m to be compacted. The subgrade consisted of a dense and highly compacted mix of sandy gravels.
Dynamisk dypkompri-mering, DDC	10-20	10-20	15	Stavanger Målt av SBV consult	-	Komprimering av havneområde utfylt med sprengstein. Fallenergi 4000 kN
Anleggstrafikk i terreng, tipping og utlegging av masser	3	10	15	Bekkeveien Målt av SBV consult	-	Innkjøring av masser (sprengstein og grus) på lastbil ca 26 tonn, tipping og utlegging av masser med gravmaskin. Målt på grunnmur. Bløt leire i grunnen

Tabell 3-3 Vibrasjoner fra anleggsvirksomhet forts

Kilde	Vibrasjons-hastighet. Peak (mm/s)	Frekvens (Hz)	Avstand (m)	Referanse	Spektra nr	Kommentar
Boring av peler i leire	-	12.5-16	25	Målt av Brekke & Strand	13	Målt på betongsåle i byggegrop
Boring for forankring av spuntvegg i leire	-	6.3	25	Målt av Brekke & Strand	14	Boring for forankring av spunktvegg i leire, kjøring av gravemaskin på 3 m fylling på leire. Målt på 0,5-1 m sand på leire.
Kjøring av gravemaskin		8			15	
Graving	2	16-25	14	[7]		Måle data fra Las Vegas. Grunnforhold, variably deep, and at times thick, layer of caliche, a calcium-rich cemented soil.

2) De målte verdiene er plottet sammen med rapporterte erfaringsverdier i litteraturen, se Figur 3.1.

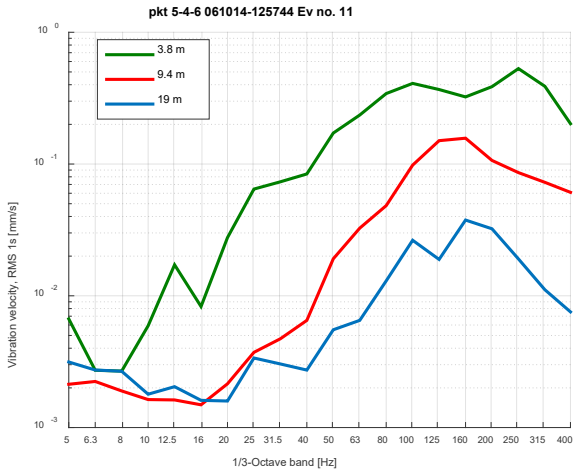
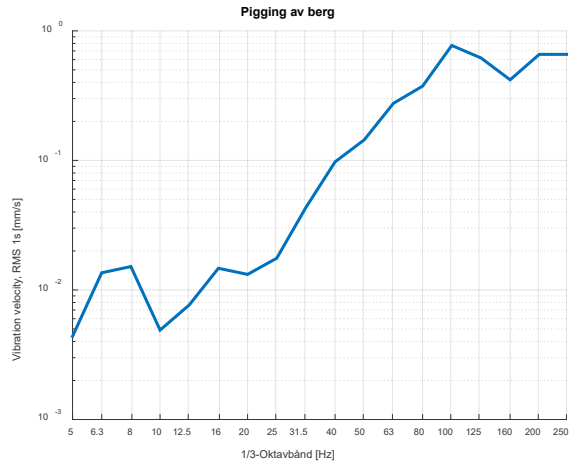


Figur 3.1 Vibrasjoner fra peling. Figur fra [6] med inntegnet målepunkter fra NGIs og SBVs målinger

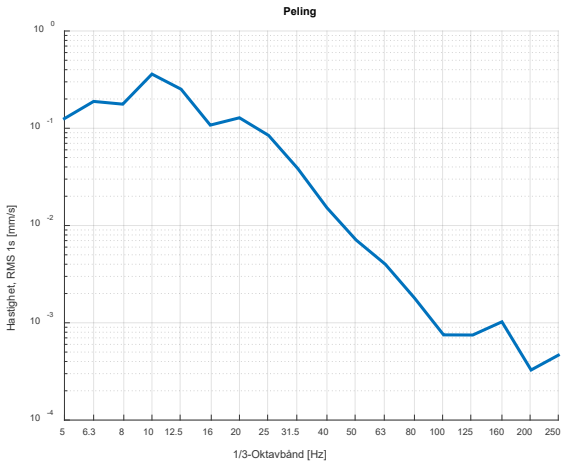
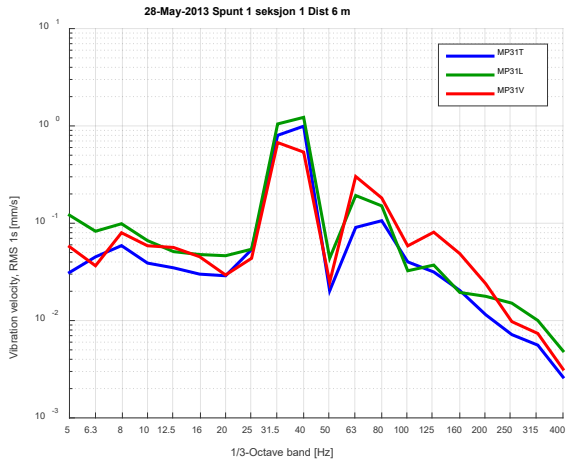
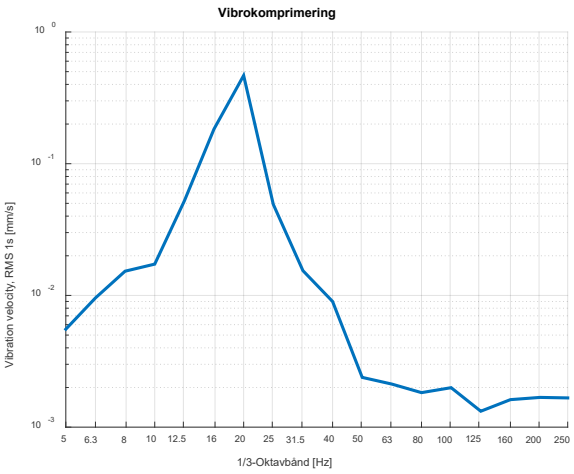
4 Typiske spektra

I Tabell 4-1 - Tabell 4-6 vises typiske 1/3 oktavspektra for vibrasjoner fra anleggs-virksomhet.

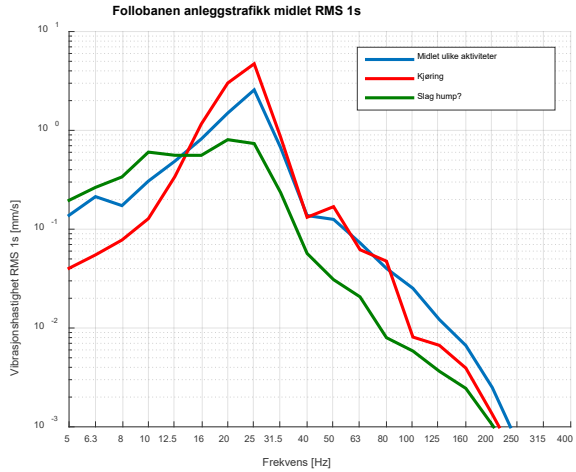
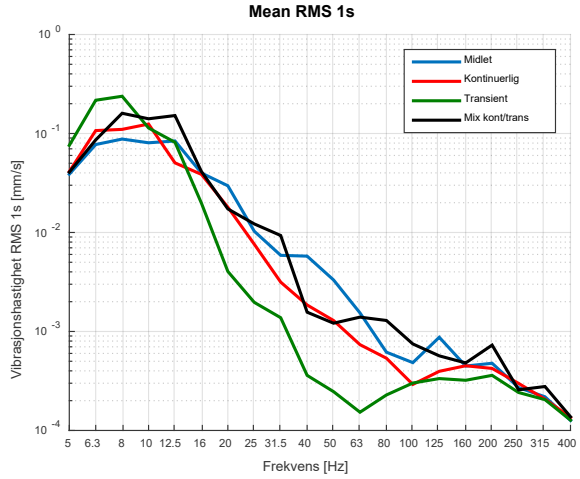
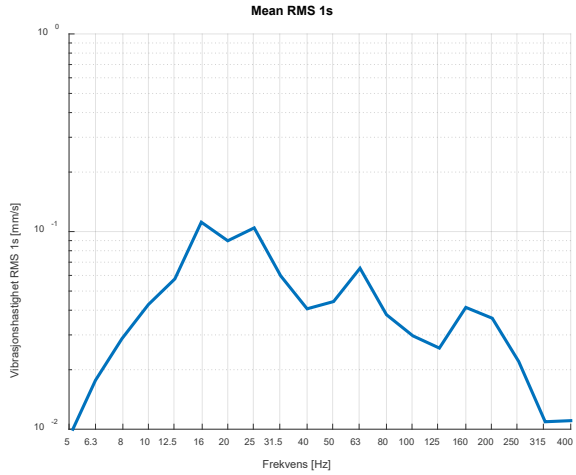
Tabell 4-1 Typiske 1/3 oktavspektra for vibrasjoner fra anleggsvirksomhet

Spektra nr	Kilde	Peak (mm/s)	Avstand (m)	Spektra
1	Pigging av berg	0.6 3.0 13	19 9 4	
2	Pigging av berg	10	< 10	

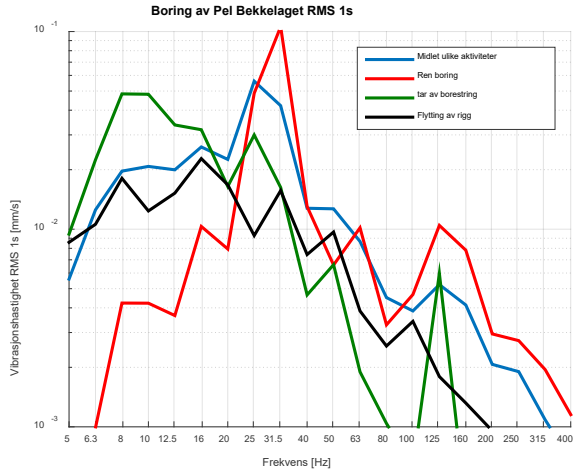
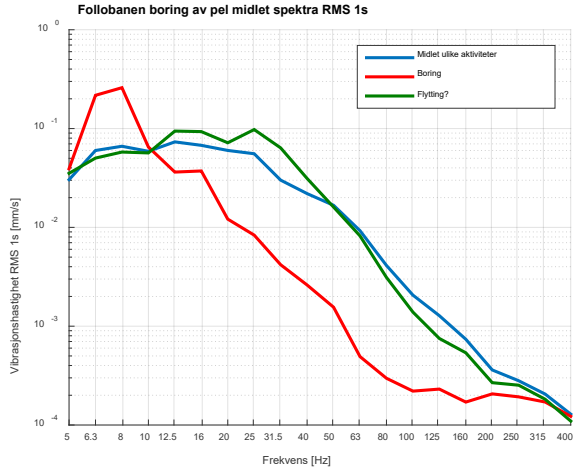
Tabell 4-2 Typiske 1/3 oktavspektra for vibrasjoner fra anleggsvirksomhet

Spektra nr	Kilde	Peak (mm/s)	Avstand (m)	Spektra
3	Ramming av betongpeler	2.1	36	
4	Vibrospunting	5 mm/s	6	
5	Vibrokompri-mering	1 mm/s	70-100	

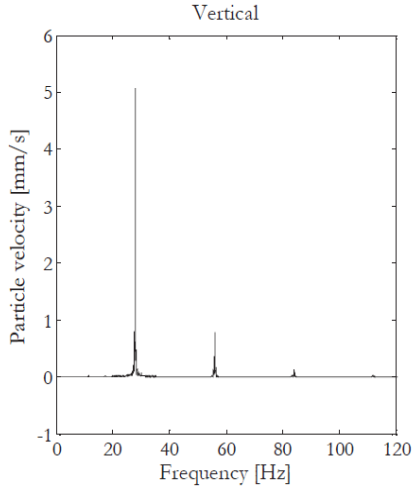
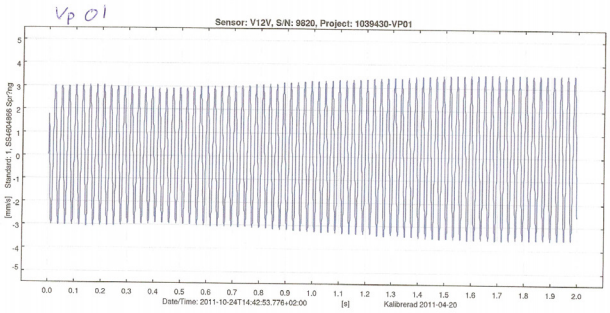
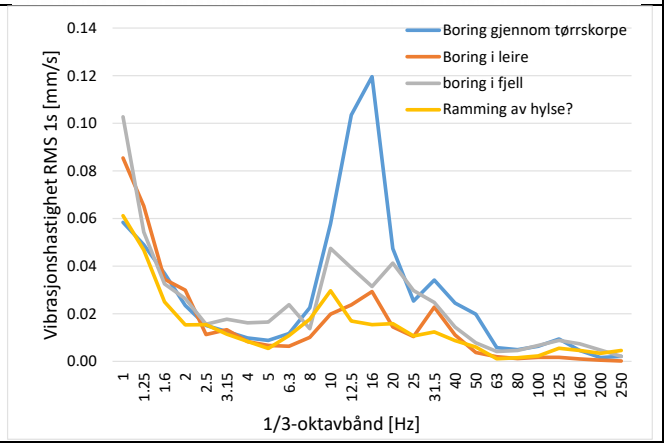
Tabell 4-3 Typiske 1/3 oktavspektra for vibrasjoner fra anleggsvirksomhet

Spektra nr	Kilde	Peak (mm/s)	Avstand (m)	Spektra
6	Anleggstrafikk på ikke asfaltert vei	5-6 mm/s (Peak verdier korrigert med faktor 2, spektra er ikke korrigert)	2	
7	KS-stabilisering	0.9	< 5	
8	Jetinjisering	2	1-2 m	

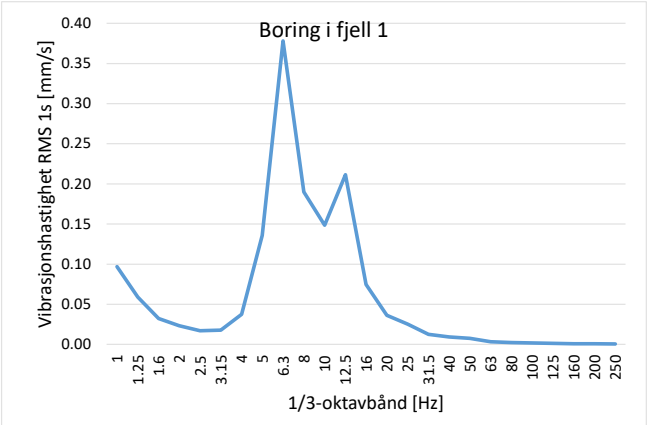
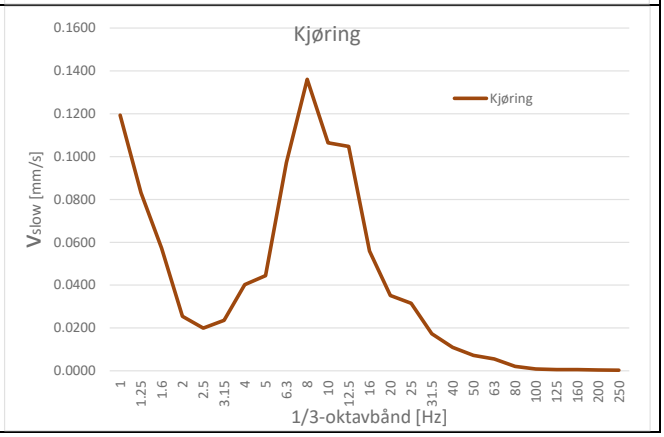
Tabell 4-4 Typiske 1/3 oktavspektra for vibrasjoner fra anleggsvirksomhet

Spektra nr	Kilde	Peak (mm/s)	Avstand (m)	Spektra
9	Boring av stålkjernepel i faste løsmasser i kort avstand Flytting av borerigg på faste løsmasser i kort avstand	0.3 0.4	0.6	
10	Boring av peler i leire	0.3 0.6 (Peak verdier korrigert med faktor 2, spektra er ikke korrigert)	7	

Tabell 4-5 Typiske 1/3 oktavspektra for vibrasjoner fra anleggsvirksomhet

Spektra nr	Kilde	Peak (mm/s)	Avstand (m)	Spektra
11	Vibrospunting	2 mm/s	15	Rentonig. Figuren viser vibrasjonshastighet i smalbånd på 7.9 m avstand ved spunting i sand 
12	Vibrospunting	3 - 9 mm/s	32	Kurveforløpet viser rentonig svingning 
13	Boring av peler i leire		25	

Tabell 4-6 Typiske 1/3 oktavspektra for vibrasjoner fra anleggsvirksomhet

Spektra nr	Kilde	Peak (mm/s)	Avstand (m)	Spektra
14	Boring for forankring av spuntvegg i leire. Boring i berg		25	Målt på sand på leire 
15	Kjøring med gravemaskin på 3 m fylling på leire	-	25	

5 Avstandsdempning

Det er ønskelig å få en bedre forståelse av hvordan dempningsegenskaper til jord er. For å oppnå dette har det blitt utført dynamiske analyser i FEM programmet Comsol Multiphysics, og videre er resultater fra analysene sammenlignet med måledata fra felt.

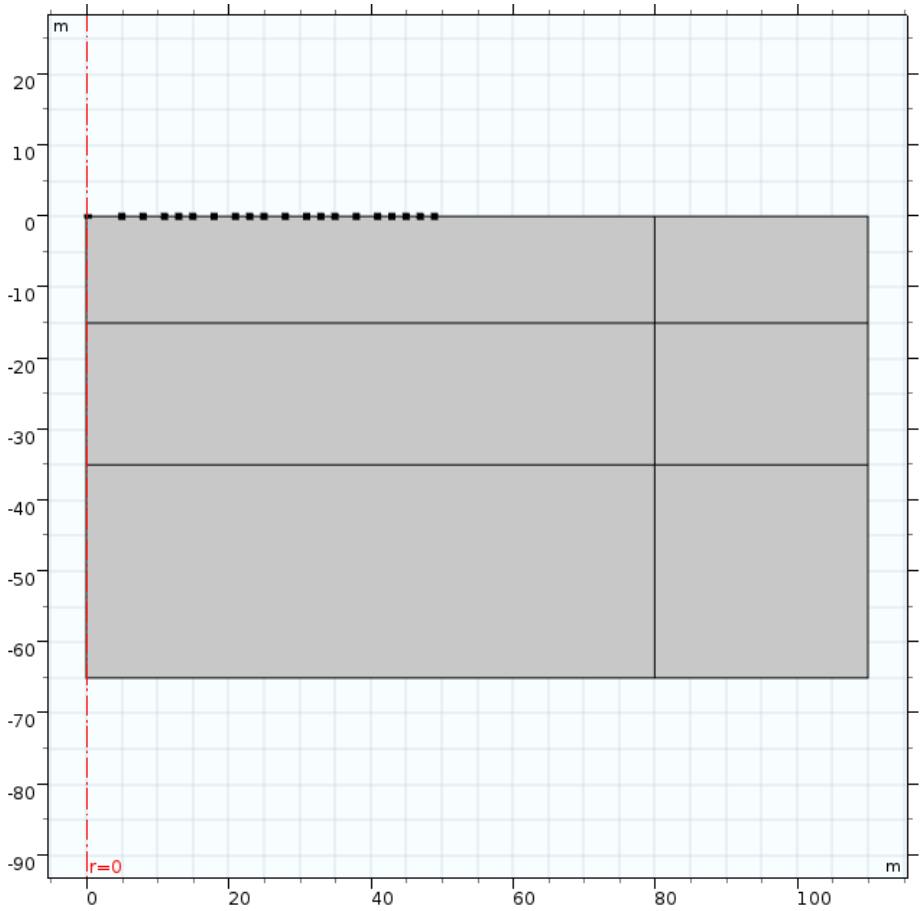
5.1 FE analyser

Simuleringer av en droppvektstest er utført ved en 2D aksesymmetrisk modell i Comsol Multiphysics. Modellen er sentrert rundt x-koordinat lik 0, og har en bredde på 110 m. Modellen inkluderer "transmitting boundaries" som absorberer vibrasjonsenergien, slik det ikke oppstår refleksjoner fra grenseflatene. Jordprofilet består av ett lag leire over berg. Dybden på leirlaget varierer mellom 5-25 m for ulike analyser, og berg har en konstant tykkelse på 20 m. I tillegg er det lagt absorberende render under og på siden av berget. Geometrien for et 15 m dypt leirlag er vist i Figur 5.1. Modellen har et mesh bestående av kvadratiske elementer, med en maksimal elementstørrelse på 0.75 m.

En vertikal dynamisk kraft er påført på et 50 cm linjestykke ved x=0, og modellen er eksitert med frekvenser fra 1 til 128 Hz. Vertikale vibrasjonshastigheter er hentet ut på overflaten ved forskjellige avstander fra kilden, og videre prosessert i MATLAB. 1/3-oktavbånd er beregnet og plottet.

Både leir- og berg-laget har en skjær og primærbølgehastighet som øker lineært med dybde. Berg har en densitet på 2600 kg/m^3 og en dempingsfaktor på 0.01. Densiteten til leira er satt til 1800 kg/m^3.

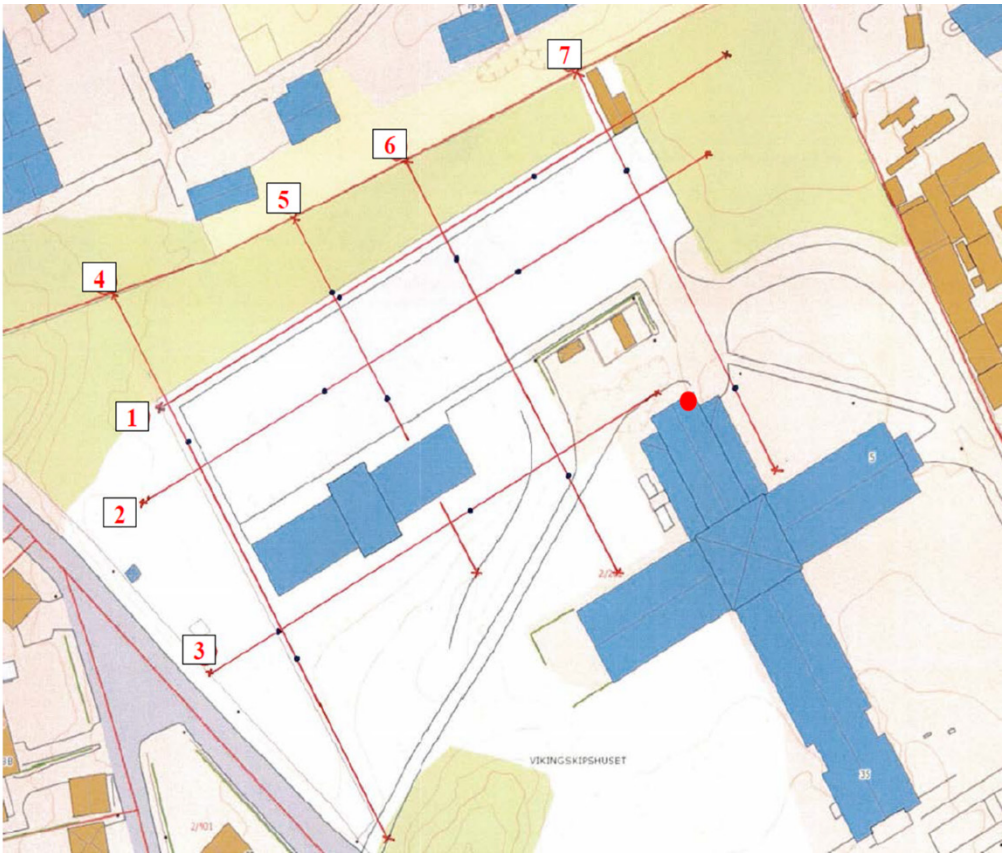
For å se på avstandsdempningen i leira er det utført et parameterstudie med ulike dempingsfaktorer. Analysene er kjørt med følgende tapsfaktorer, η=
0.01, 0.03, 0.05, 0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2, 0.22 og 0.3.



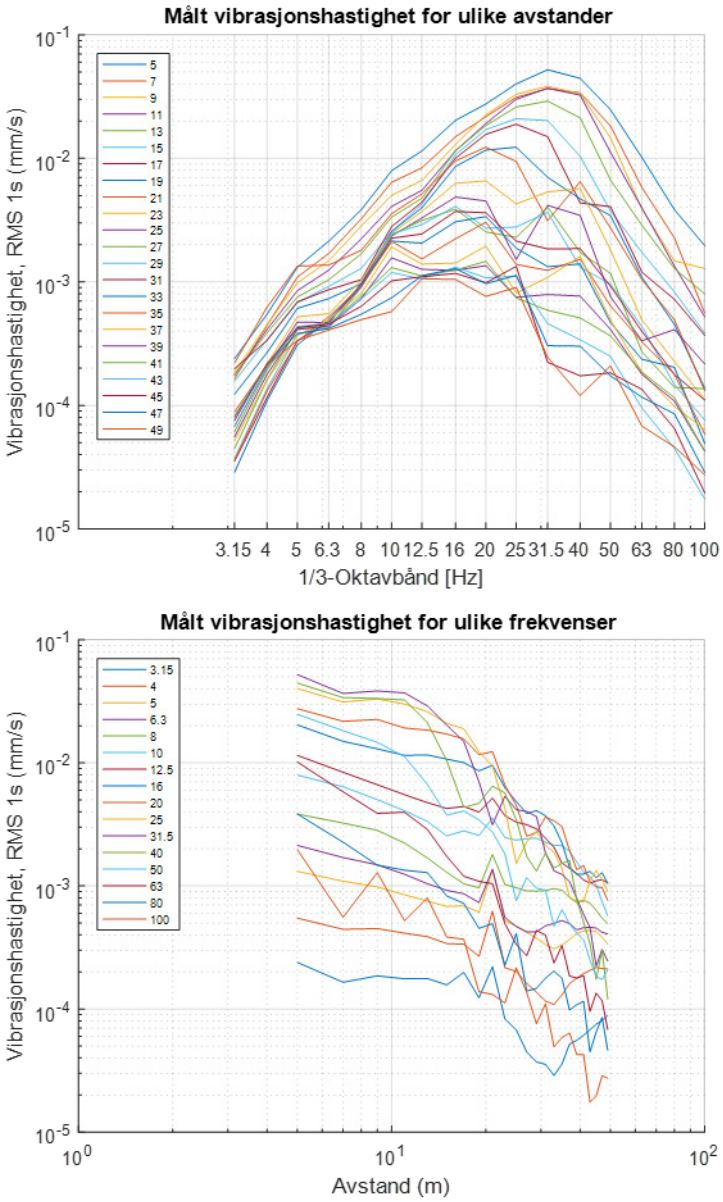
Figur 5.1 Geometrien bruk til FE beregninger. Det øverste laget representerer leira. De to nederste lagene representerer berg. Feltene nederst og til høyre representerer absorberende lag (Perfectly Matched Layers).

5.2 Droppvektsmåling ved Vikingtidsmuseet

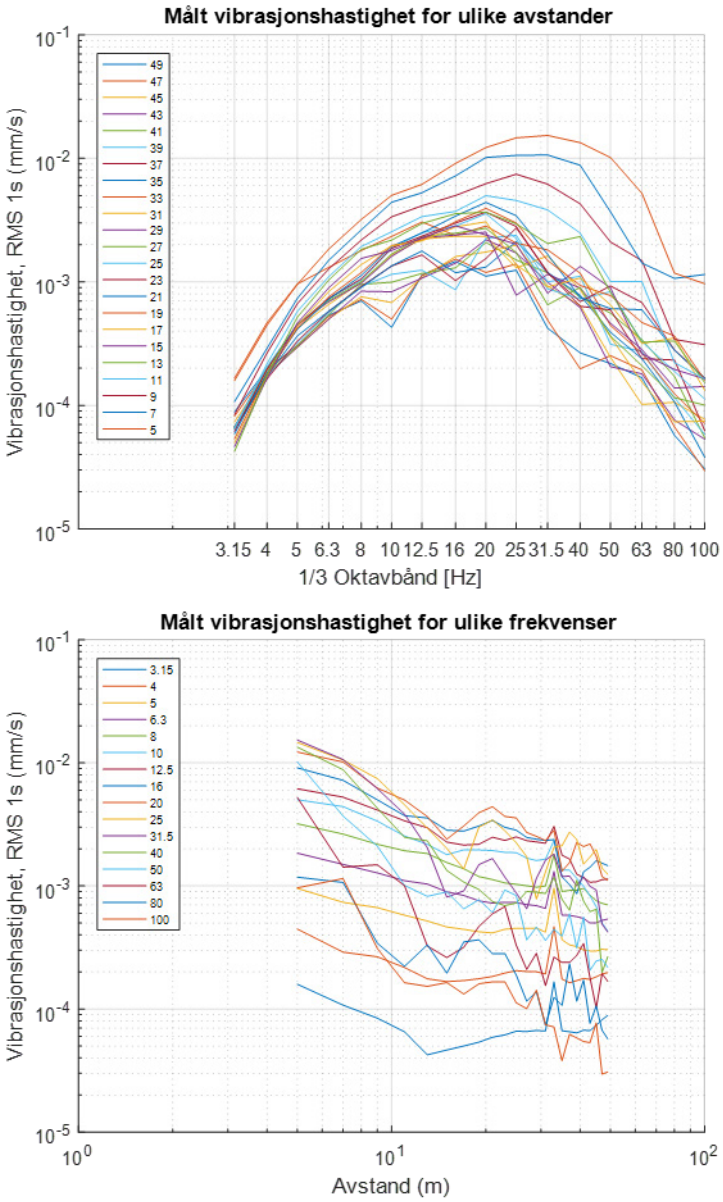
Resultater fra FE analyser er sammenlignet med måledata fra droppvektsmålinger gjennomført i forbindelse med et tidligere prosjekt ved Vikingtidsmuseet. Figur 5.2 viser hvor målingene er gjennomført. Dataene som er benyttet er målt langs profil 1, hvor geofoner var plassert ved de markerte punktene. Målinger fra to ulike dropposisjoner er betraktet. Den første dropposisjonen er 5 m før første geofon i kjeden og den andre er 5 m etter siste geofon i kjeden. Ved målepunktene består jorda i hovedsak av leire, med en forholdsvis konstant dybde ned til berg på 15-20 m. Figur 5.3 og Figur 5.4 viser vibrasjonshastighet i 1/3 oktavbånd, RMS 1s fra måledata for de to ulike plasseringene.



Figur 5.2 Vibrasjoner er målt med geofoner langs måleprofil 1, markert med blå punkter. Dropposisjonen er 5 m før første geofon i kjeden og 5 m etter siste geofon i kjeden.



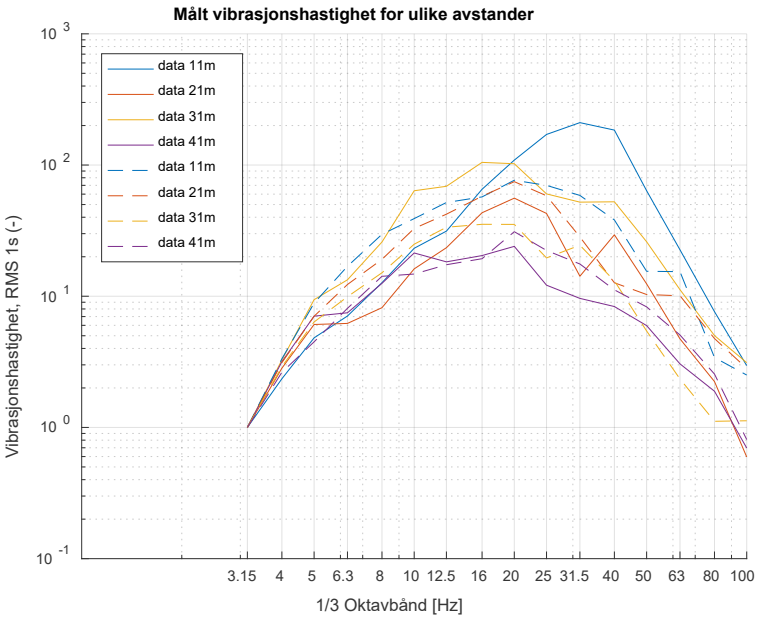
Figur 5.3 Måledata fra 1. dropposisjon. Øverste figur viser vibrasjonshastighet mot frekvens for ulike avstander, og figur til nederste figur viser vibrasjonshastighet mot avstand for ulike frekvenser.



Figur 5.4 Måledata fra 2. dropposisjon. Øverste figur viser vibrasjonshastighet mot frekvens for ulike avstander, og nederste figur viser vibrasjonshastighet mot avstand for ulike frekvenser.

Figur 5.5 viser en sammenligning av frekvensspekter til målingene ved de to droppsposisjonene, hvor 4 avstander fra kilden er valgt. 1. plassering er vist som heltrukne linjer, og 2. plassering er vist som stiplede linjer. Måledataene er normalisert på vibrasjonshastigheten i det første 1/3-oktavbåndet.

Frekvensspektrene har størst avvik ved 11 m avstand. 1. plassering har størst vibrasjonshastighet rundt 32 Hz, og 2. plassering ved noe lavere frekvens for nærmeste punkt.



Figur 5.5 Sammenligning av frekvensspektra for to ulike dropposisjoner. Heltrukne linjer er data fra 1. posisjon, stiplede linjer er data fra 2. posisjon.

Måledata fra 1. plassering er i hovedsak brukt i sammenligning med FE analyser.

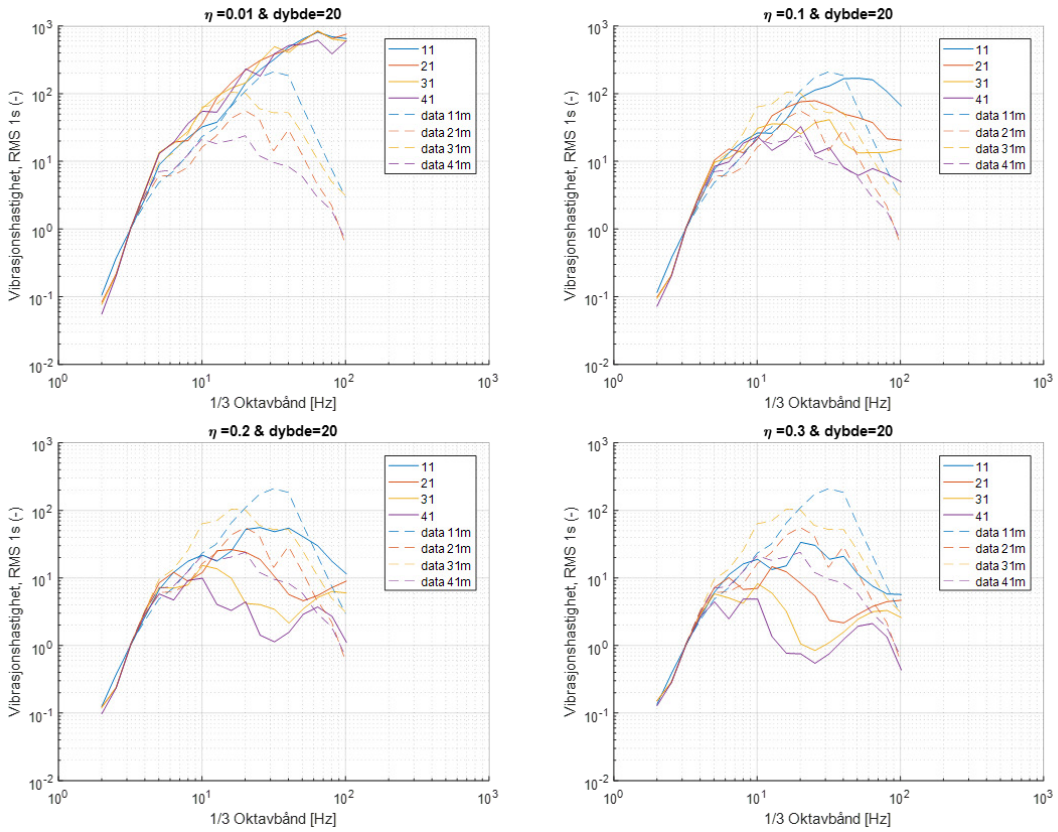
5.3 Måledata sammenlignet med FE analyser

Det er utført et parameterstudie i Comsol hvor hensikten er å se på effekten av avstandsdempning. 13 ulike tapsfaktorer, η, er benyttet i kombinasjon med 6 ulike dybder ned til berg.

5.3.1 Vibrasjonshastighet-spekter

5.3.1.1 Vibrasjonshastighet-spekter for forskjellige η-verdier

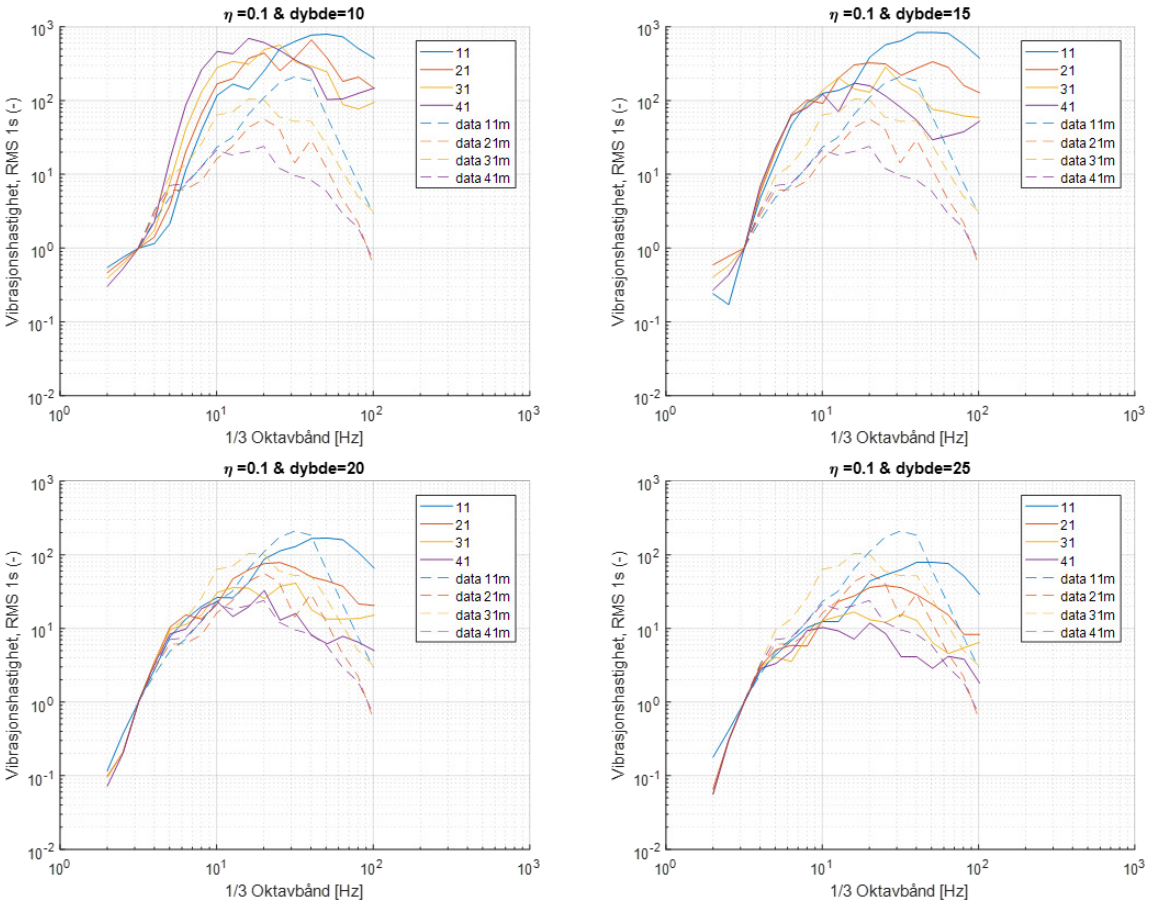
Figur 5.6 viser en sammenligning av vibrasjonshastighet-spekter fra FE analyser (heltrukket linjer) og måledata (stiplet linjer). FE analyser med 4 ulike tapsfaktor, 0.01, 0.1, 0.2 og 0.3, og konstant dybde ned til berg på 20 m er plottet og sammenlignet med en måling (130-11) fra vikingtidsmuseet. Vibrasjonshastigheter er normalisert på vibrasjonshastigheten ved første 1/3-oktavbånd. Figurene viser at en tapsfaktor rundt 0.1 gir mest samsvar mellom FE analyser og måledata.



Figur 5.6 1/3 oktav spektra for ulike avstander og beregnede tapsfaktorer. Stiplede linjer viser målte spektra, heltrukne linjer viser beregnede spektra.

5.3.1.2 Vibrasjonshastighet-spekter for forskjellige dybder

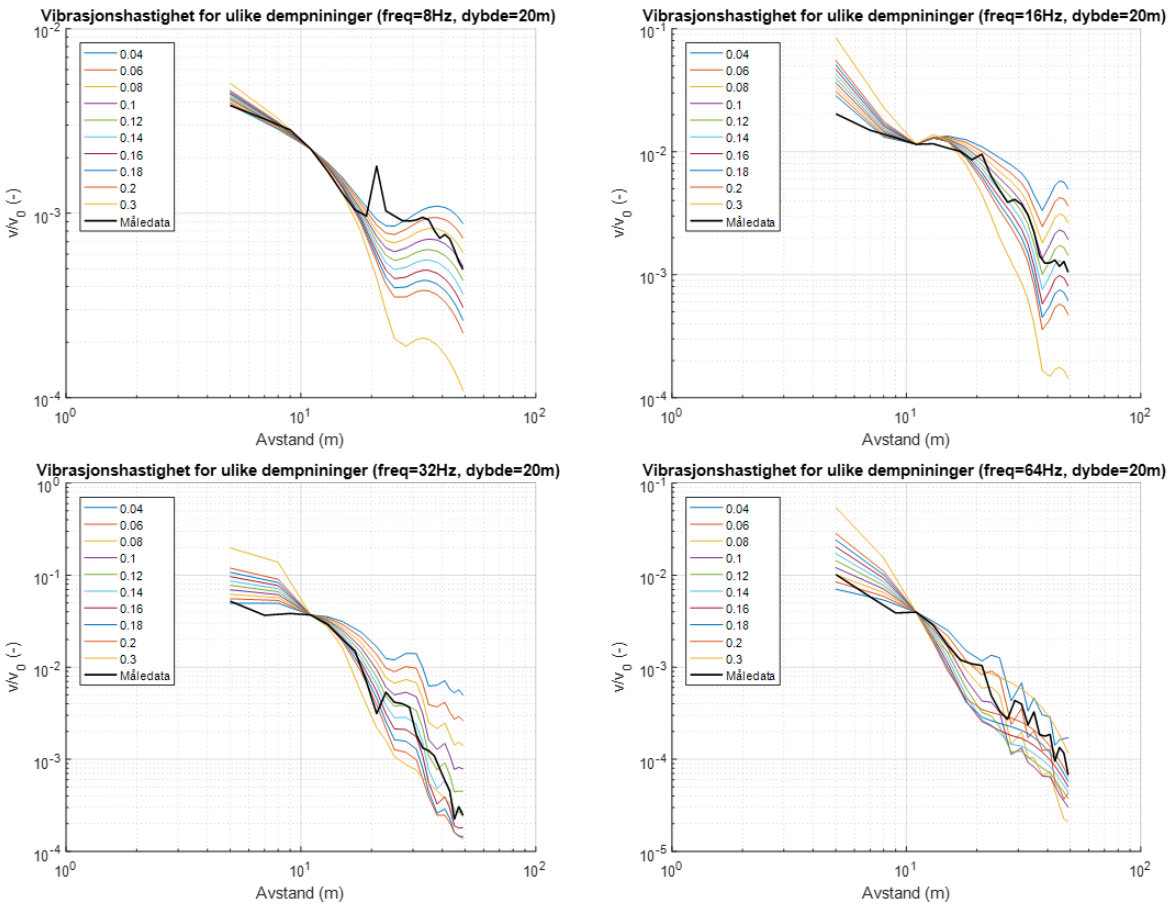
Figur 5.7 viser vibrasjonshastighet-spektra beregnet for 4 dybder: 10, 15, 20 og 25 m. Alle analysene har en tapsfaktor lik 0.1. Resultatene fra FE analysene er plottet sammen med måleresultatene, og resultatene fra Comsol viser at vibrasjonsspekteret er sensitiv mot dybde ned til berg, men at det beste samsvaret mellom målte og beregnede spektra oppnås for en dybde på 20 m. Dette samsvarer også dybden anslått fra geofysiske feltmålinger.



Figur 5.7 1/3 oktav spektra for 4 ulike dybder ned til berg. For hver dybde vises 4 ulike avstander fra kilden. Stiplede linjer viser målte spektra, heltrukne linjer viser beregnede spektra med en tapsfaktor på 0.1.

5.3.2 Avstandsdempning

Figur 5.8 viser hvordan vibrasjonshastigheten avtar med avstand fra kilden for 4 ulike 1/3 oktav-frekvenser. Figuren inkluderer måledata i tillegg til flere FE analyser med ulike η-verdiene. Måledataene er vist i svart. Alle vibrasjonshastigheter er normalisert på vibrasjonshastigheten ved 11 m avstand, og resultater fra Comsol er hentet ut fra 19 avstander fra lasten. I de fleste gir en eller flere av beregningene overordnet samsvar med den målte reduksjonen av normalisert vibrasjonshastighet som funksjon av avstand. De ulike grafene gir derfor en indikasjon på hvilke effektive tapsfaktorer som gir samsvar med målingene for de ulike frekvensene.

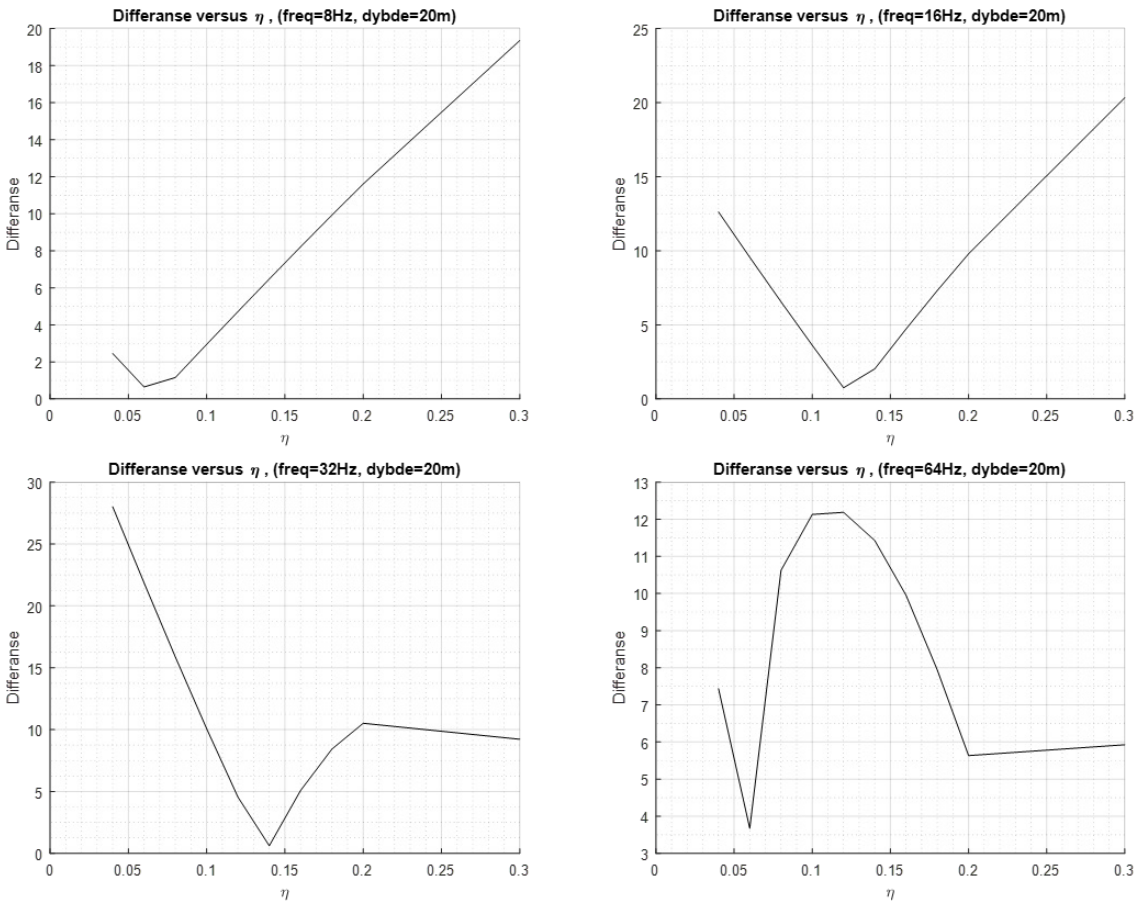


Figur 5.8 Normalisert vibrasjonshastighet mot avstand for måledata (svart) og FE analyser med ulik tapsfaktor for 4 ulike 1/3 oktav-frekvenser

Differansen mellom FE resultater og måledata er beregnet for alle dempingsfaktorer som følger

$$Diff = \sqrt{\sum \left(log(v_{målt}) - log\left(v_{FE\ analyser}\right)\right)^2}$$

Differansen er videre plottet som funksjon av tapsfaktoren som er benyttet i beregningene, og fra dette får vi en indikasjon på hvilke dempingsfaktor som samsvarer best med måledata. Figur 5.9 viser differansen mot dempning for de 4 frekvensene som er plottet i Figur 5.8.



Figur 5.9 Differanse mellom måledata og FE analyser som funksjon av tapsfaktoren for ulike frekvenser

Figuren indikerer en dempingsfaktoren på 0.06 for 8 Hz, 0.12 for 16 Hz, 0.14 for 32 Hz, og 0.06 for 64 Hz.

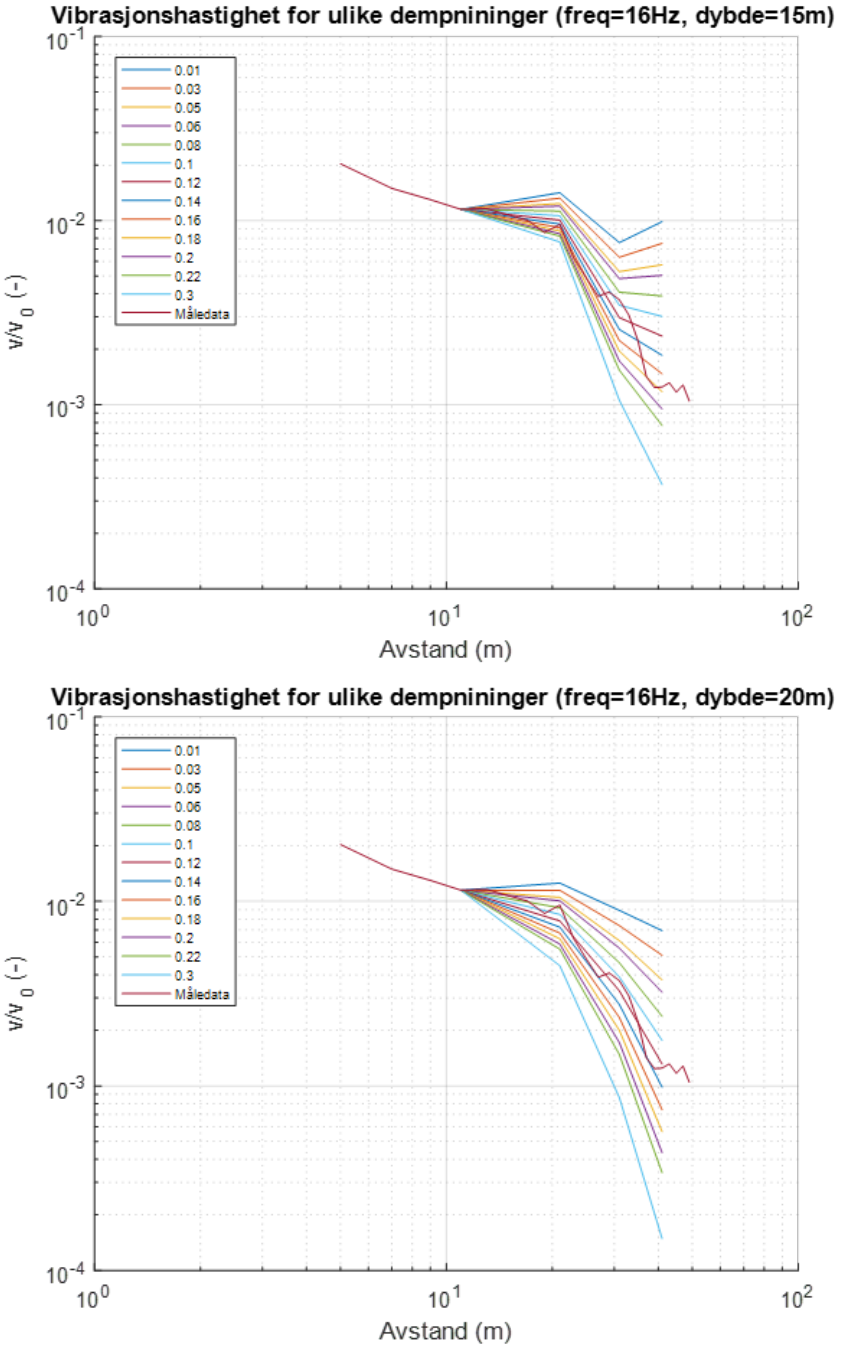
Tabell 5-1 oppsummerer hvilke tapsfaktorer som samsvarer mest med måledata for flere frekvensbånd. Dempingsfaktoren er representerer bunnpunktet fra tilsvarende kurver som vist i Figur 5.9. For 4 Hz er det ikke mulig å finne en passende dempingsfaktor ettersom måledataene har stor variasjon. Årsaken til dette er sannsynligvis at nærfelteffekter, refleksjoner osv påvirker vibrasjonsutbredelsen mer siden bølgelengden er svært lav.

Tabell 5-1 Dempingsfaktorer som gir lik respons sammenlignet med måledata

Frekvens [Hz]	η	D
6.35	0.06	0.03
8	0.06	0.03
10	0.06	0.03
12.5	0.10	0.05
16	0.12	0.06
20	0.10	0.05
25	0.12	0.06
32	0.14	0.07
40	0.10	0.05
64	0.06	0.03

5.3.2.1 Avstandsdemping– dybde ned til berg

Figur 5.10 viser hvordan dybde ned til berg kan påvirke resultater i FE analyser. I denne figuren er det kun resultater fra 4 avstander. Øverste plott viser resultater for 15 m dybde til berg, og nederste plott viser resultater for 20 m dybde til berg. Begge plottene er resultater fra 16 Hz og måledata for 16 Hz er inkludert i begge figurene. Figurene indikerer at dempingsfaktoren endrer seg med dybde til berg, både i størrelsesorden og som funksjon av avstand.



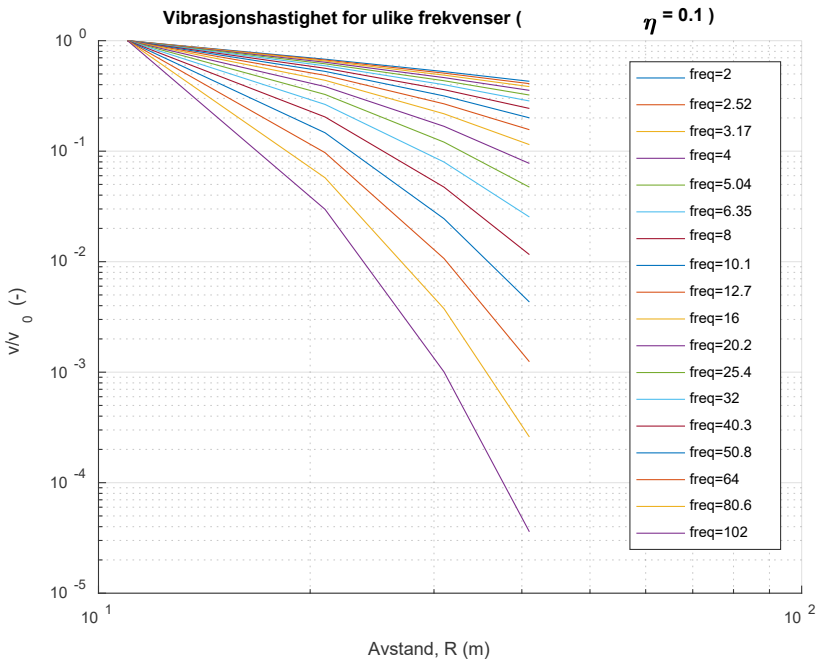
Figur 5.10 Vibrasjonshastighet mot avstand for to ulik dybder til berg. Øverste figur viser resultater fra 15 m dybde, nederste figur viser resultater for 20 m dybde.

5.3.2.2 Sammenlikning analytisk løsning

FE analyser og måledata er sammenlignet med en analytisk løsning. Den analytiske løsningen er hentet fra [9] hvor den totale avstandsdempningen (både geometrisk og materialdempning) er uttrykket som følger

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-0.5} e^{\frac{-2\pi D f}{C_R}(R-R_0)}$$

Hvor v = vibrasjonshastighet, f = frekvens, D = avstandsdempingsfaktor og tilnærmet lik $\eta/2$, C_R = overflatebølgehastighet, og $R-R_0$ er distansen bølgen har forplantet seg. R_0 er satt til 11m og C_R=100m/s. Figur 5.11 viser hvordan vibrasjonshastighet avtar som funksjon av avstand for frekvenser fra 2 til 102 Hz og η=0.1 ved bruk av denne formelen.

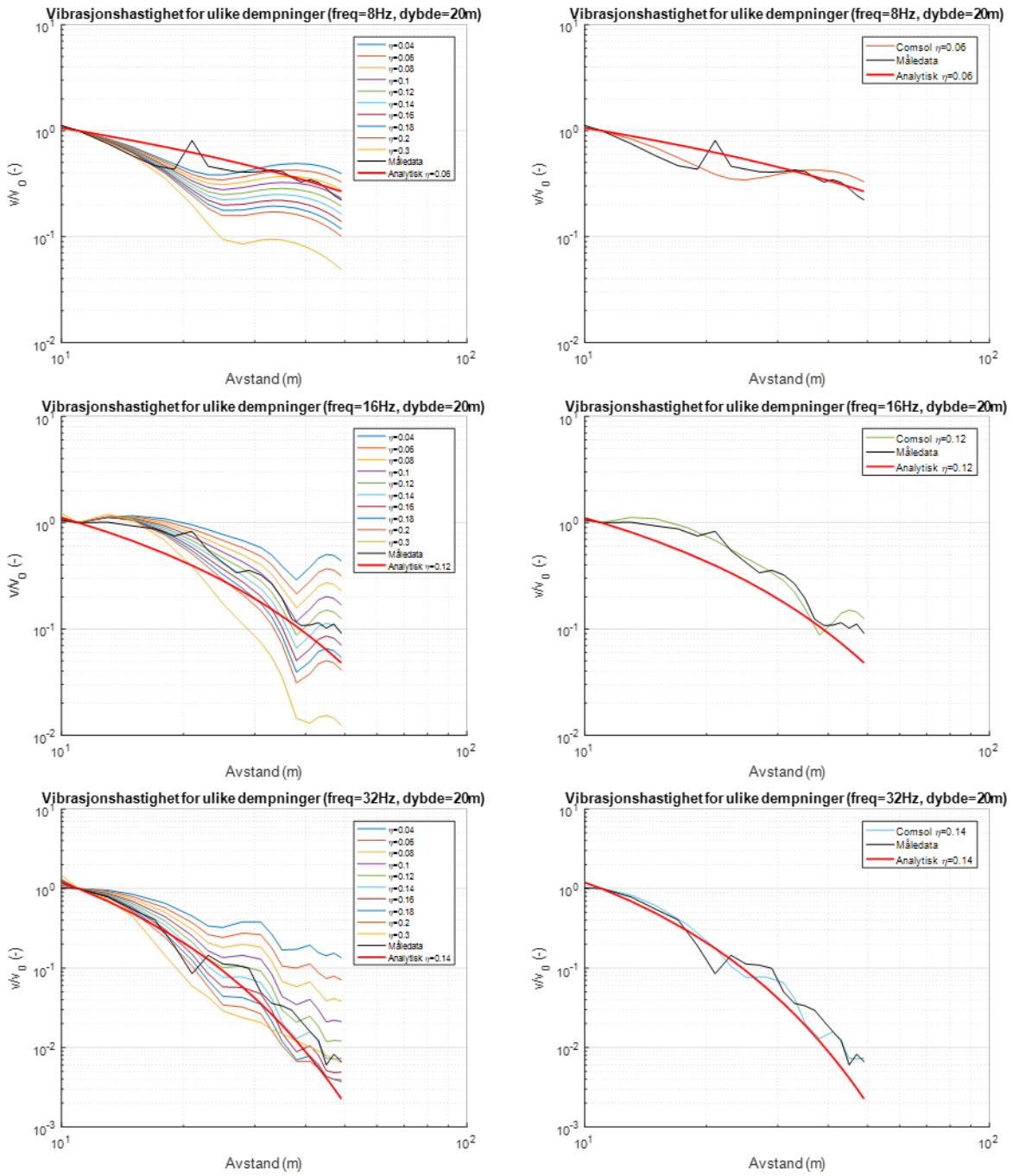


Figur 5.11 Vibrasjonshastighet mot avstand for ulike frekvenser for analytisk løsning

Figur 5.12 viser resultater fra den analytiske løsningen, sammen med måledata og FE analyser for 3 ulike frekvenser. Den dempingsfaktoren som ga mest samsvarende resultat mellom måledata og FE analyser er valgt som input i den analytiske løsningen. Figurer til venstre viser resultater fra alle FE analyser med forskjellige dempingsfaktorer, og figurer til høyre viser kun den løsningen som ga mest samsvar mellom måledata og FE resultat.

Fra figurene ser vi at den analytiske løsningen beskriver hvordan vibrasjonshastigheten avtar med avstand rimelig bra til tross for at den ikke tar høyde for ulik lagdeling eller inhomogenitet i jorda. Vi bemerket at R_0, som er et mål på avstanden nærfeltet til

vibrasjonene opptrer i, er satt konstant. R_0 vil være betydelig mindre for de høyeste frekvensene enn for det laveste, noe som sannsynligvis påvirker resultatene. Videre kan resonanser i jordlaget også påvirke resultatene. Det er derfor viktig å påpeke at den tilpassede dempningen som gir et riktig bilde av avstandsdempningen i Comsol beregningene, ikke nødvendigvis kan benyttes direkte i analytiske uttrykk som vist over, uten av tilhørende faktorer som v_0 og R_0 er etablert på tilsvarende måte.



Figur 5.12 Analytisk løsning sammenlignet med måledata og FE resultater. Resultater fra 8 Hz er presentert øverst, 16 Hz i midten og 32 Hz nederst.

6 Referanser

[1] M. Lidén. Pile – Ground Vibrations due to Vibratory Sheet Pile Driving - a Case Study. MSc Thesis 12/06, Division of Soil and Rock Mechanics Department of Civil and Architectural Engineering. Royal Institute of Technology Stockholm. 2012

[2] C. Guillemet. Pile – Soil Interaction during Vibratory Sheet Pile Driving a Full scale Study. MSc Thesis 13/05, Division of Soil and Rock Mechanics Department of Civil and Architectural Engineering. Royal Institute of Technology Stockholm. 2013

[3] K. Rainer Massarach & Bengt H. Fellenius. Vibrationer vid slagning av pålar og spont. Bygg & teknik 1/14.

[4] Håndbok 220 – Geoteknikk i vegbygging, kap 17 Rystelser og mulige skader – Fig 17.18.

[5] E18 Kristiansand Oddernesveien løsmassetunnel Prøvespunting. Oppdrag K-121B rapport nr 4. Statens vegvesen 15. januar 1999.

[6] Brenner R.P. and Viranuvut. S. (1977), Measurement and Prediction of Vibrations generated by Drop Hammer Piling in Bangkok Subsoils, Proc. Fifth Southeast Asian Conf. on Soil Engineering, pp. 105-119, Bangkok.

[7] Charles H. Dowding and Mickey L. Snider, Response of cracks to construction vibrations and environmental effects. Preprint of article published in Geotechnical Engineering for Transportation Projects, Special Geotechnical Publication #126, ASCE, pgs 1767-1776, July 2004

[8] J. Pistrol, F. Kopf, D. Adam, S. Villwock and W. Völkel. Ambient vibration of oscillating and vibrating rollers. Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013)

[9] ISO/TS 14837-32 - Mechanical vibration – Groundborne noise and vibration arising from rail systems, Part 32: Measurement of dynamic properties of the ground (2015).

Kontroll- og referanseside/ Review and reference page

Dokumentinformasjon/*Document information*		
Dokumenttittel/*Document title* Typiske vibrasjonsverdier og frekvenser for anleggsvirksomhet		**Dokumentnr./*Document no.*** 20170115-01-TN
Dokumenttype/*Type of document* Teknisk notat / Technical note	**Oppdragsgiver/*Client*** NGI	**Dato/*Date*** 2017-12-21
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/*Proprietary rights to the document according to contract* NGI		**Rev.nr. & dato/*Rev.no. & date*** 0
Distribusjon/*Distribution* FRI: Kan distribueres av Dokumentsenteret ved henvendelser / FREE: Can be distributed by the Document Centre on request		
Emneord/*Keywords* Vibrasjoner, rystelser, anleggsvirksomhet		

Stedfesting/*Geographical information*	
Land, fylke/*Country* Norge, Oslo	**Havområde/*Offshore area***
Kommune/*Municipality* Oslo	**Feltnavn/*Field name***
Sted/*Location*	**Sted/*Location***
Kartblad/*Map*	**Felt, blokknr./*Field, Block No.***
UTM-koordinater/*UTM-coordinates* **Sone: Øst: Nord:**	**Koordinater/*Coordinates*** **Projeksjon, datum: Øst: Nord:**

Dokumentkontroll/*Document control*
Kvalitetssikring i henhold til/*Quality assurance according to NS-EN ISO9001*

Rev/ Rev.	***Revisjonsgrunnlag/Reason for revision***	**Egenkontroll av/ *Self review by:***	**Sidemanns-kontroll av/ *Colleague review by:***	**Uavhengig kontroll av/ Independent review by:**	**Tverrfaglig kontroll av/ *Inter-disciplinary review by:***
0	Originaldokument	2017-12-21 Karin Norén-Cosgriff	2017-12-21 Finn Løvholt		

Dokument godkjent for utsendelse/ *Document approved for release*	**Dato/*Date***	**Prosjektleder/*Project Manager***
	21. desember 2017	Finn Løvholt

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: Offshore energi – Bygg, anlegg og samferdsel – Naturfare – Miljøteknologi.

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskap i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Offshore energy – Building, Construction and Transportation – Natural Hazards – Environmental Engineering.

NGI is a private foundation with office and laboratory in Oslo, branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.

NGI

OSLO
TRONDHEIM
HOUSTON
PERTH

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT
NGI.NO

Hovedkontor Oslo
PB. 3930 Ullevål Stadion
0806 Oslo

Avd. Trondheim
PB. 5687 Sluppen
7485 Trondheim

T 22 02 30 00
F 22 23 04 48
NGI@ngi.no

BANK
KONTO 5096 05 01281
ORG.NR 958 254 318MVA

ISO 9001/14001
CERTIFIED BY BSI
FS 32989/EMS 612006