



Ulospuhalluslaitteen materiaalivahvuuksien vaikutus rakenteelliseen värähtelyyn

Mikko Kujanpää

OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2019

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Älykkäät koneet

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Älykkäät koneet

KUJANPÄÄ, MIKKO:

Ulospuhalluslaitteen materiaalivahvuuksien vaikutus rakenteelliseen värähtelyyn

Opinnäytetyö 68 sivua, joista liitteitä 15 sivua
Marraskuu 2019

Opinnäytetyössä tutkittiin ilmanvaihtolalla toimivan FläktGroup Finland Oy:n EYMA-2-ulospuhalluslaitetta ja sen ohennettua versiota yrityksen Akaan toimipisteessä. Tavoitteena oli testata ja selvittää, voidaanko ohutlevytuotteen ohuempi rakenne ottaa käyttöön alentaen samalla tuotantokustannuksia.

Tarkoituksena oli testata ulospuhalluslaitteen materiaalivahvuuksien vaikutusta laitteessa esiintyviin värähtelyihin oikeassa käyttöympäristössä laitteen koko käyttöalueella. Alkuperäiselle ja ohennetulle laitteelle toteutettiin värähtelymittaukset, ja tulokset analysoitiin keskittyen kahden laitteen tulosten vertailuun.

Värähtelytestien analysoinnissa sovellettiin putkistovärähtelyä koskevaa standardia PSK 5712, jonka perusteella mittaussuureeksi valittiin värähtelyn nopeuden huippuarvo (v_p) ja sen turvallisen värähtelyn raja-arvoksi 60 mm/s arvioitaessa ulospuhalluslaitteelle syntyviä rasituksia. Alkuperäisen ulospuhalluslaitteen ja sen ohennetun version kokonaisvärähtelytasot ylittivät turvallisen putkistovärähtelyn raja-arvon suurimmassa osassa mittauksia. Ylitykset ohennetussa rakenteessa olivat suurempia kuin alkuperäisessä laitteessa.

Ehdottomia värähtelyn kasvuun perustuvia rajoitteita materiaalin ohennuksen toteuttamiselle ei ole, vaikka molemmat tuotteet ylittivät käytetyn standardin mukaisen raja-arvon. Alkuperäinen tuote on todettu käytössä toimivaksi, ja värähtelyn kasvu ohennetussa laitteessa oli odotettua mutta kohtuullista. Mahdollisesti jatkotoimenpiteiksi ohennetulle laitteelle esitetään pidempiaikaista käyttötestiä tai ohennetun rakenteen jäykistämistä, kunhan ohennuksen tuomia hyötyjä ei menetetä. Kehitysehdotuksena esitetään myös muunneltu rakenne, jossa vain tietyt rakenteen osat on ohennettu.

Asiasanat: värähtelymittaus, värähtely, ilmanvaihto

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Intelligent Machines

KUJANPÄÄ MIKKO:

The Effect of Material Strengths on Structural Vibration in an Outdoor Exhaust Air Diffuser

Bachelor's thesis 68 pages, appendices 15 pages
November 2019

The outdoor exhaust air diffuser EYMA-2 manufactured by the indoor air technology company FläktGroup Finland Oy was examined in this thesis. The objective of the study was to test and determine if a thinner and lighter version of the sheet metal used in EYMA-2 could be employed, thus reducing the manufacturing expenses.

The purpose was to test the effect of material strength on structural vibration in the product in a real operating environment throughout the range of use in air flow. The vibrations in both versions of the device were measured and analysed, and the focus was on the comparison of the results.

The Finnish standard PSK 5712 dealing with piping vibration was adapted for the analysis of the results. According to the standard, the safe limit of the overall level in the peak value of the vibration velocity (v_p) was exceeded with both versions of the device. However, the value was exceeded more with the lightweight structure.

Absolute constraints for the reduction of the material were not met based on vibration increase, although both products exceeded the safe limit value of the standard applied in the study. The original product has been proven to be functional in practice, and the vibration increase on the lighter version was expected, but moderate. Further actions for the lightweight product may include a long-term operating test or stiffening the structure, as long as the benefits of the material reduction remain. A modified structure with fewer lightweight parts is also suggested in the study.

Key words: vibration measurement, vibration severity, ventilation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	VÄRÄHTELY	9
2.1	Värähtelyn peruskäsitteitä	9
2.2	Värähtelysuureet: siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys	10
2.3	Värähtelyyn liittyvät parametrit	11
2.4	Taajuusspektri eli värähtelyn esittäminen taajuustasossa	13
2.5	Värähtelysuureen valinta ja suureiden keskinäiset yhteydet	14
2.6	Resonanssi	16
2.7	Värähtelyn tason alentaminen	17
2.8	Putkistovärähtely	18
2.8.1	Putkistovärähtelyn standardi PSK 5712	18
2.8.2	Putkistovärähtelyn herätteet	18
2.8.3	Putken reagointi herätteisiin	19
2.8.4	Värähtelyn mittaaminen ja raja-arvot	20
2.8.5	Alimman ominaistajuuden määrittäminen laskemalla	21
3	ULOSPUHALLUSLAITTEEN ESITTELY	23
3.1	Yritysesittely	23
3.2	Ulospuhalluslaite EYMA-2	24
4	ULOSPUHALLUSLAITTEEN VÄRÄHTELYMITTAUKSET	27
4.1	Testijärjestely värähtelyn mittaukseen	27
4.1.1	Testiteline laitteelle	27
4.1.2	Kanaviston suunnittelu ja rakentaminen	29
4.1.3	Ulospuhalluslaitteiden rakenteiden eroavuudet	31
4.1.4	Mittalaitteet	33
4.2	Testin suunnittelu ja valmistelut	34
4.3	Värähtelymittaukset	35
4.3.1	Ulospuhalluslaitteen mittaukset	35
4.3.2	Alkuperäisen ulospuhalluslaitteen mittaukset	37
4.3.3	Ohennetun ulospuhalluslaitteen mittaukset	37
5	VÄRÄHTELYMITTAUKSEN TULOKSET	39
5.1	Tulosten analysoinnin perusta	39
5.2	Värähtelynopeuden kokonaistason absoluuttiset huippuarvot (v_p)	39
5.3	Värähtelynopeuden huippuarvon (v_p) suhteellinen kasvu	41
5.4	Värähtelynopeuden tehollisarvon (v_{rms}) suhteellinen kasvu	43
5.5	Värähtelynopeuden huippuarvon (v_p) taajuusspektri	44
5.6	Alimman ominaistajuuden laskeminen	48

5.7 Muut testitulokset	48
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	50
LÄHTEET	52
LIITTEET	54
Liite 1. Testitelineen piirustukset	1 (2) .. 54
Liite 2. Testiasetelman piirustukset.....	56
Liite 3. Mittauspöytäkirja 1: EYMA-2, kokonaisvärähtelytaso	1 (4) .. 57
Liite 4. Mittauspöytäkirja 2: Ohennettu, kokonaisvärähtelytaso	1 (5) .. 61
Liite 5. Ohennetun laitteen v_p -taajuusspektrit, $Q = 4000$ l/s	1 (3) .. 66

LYHENTEET JA TERMIT

$\int dt$	integraali ajan suhteen
$\iint dt^2$	toinen integraali ajan suhteen
A	amplitudi, huippuarvo
a	kiihtyvyys
a_p	kiihtyvyyden huippuarvo (peak)
a_{rms}	kiihtyvyyden tehollisarvo (rms)
D	esteen halkaisija virtauksessa
d/dt	differentiaalinen muutos eli derivaatta ajan suhteen
d^2/dt^2	toinen derivaatta ajan suhteen
E	kimmomoduuli
f	taajuus
f_1	alin ominaistaajuus
FFT-muunnos	nopea Fourier'n muunnos (Fast Fourier Transform), jolla aikataason signaalista muodostetaan taajuusspektri
MMF	Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.
Peak	huippuarvo
Q	virtaama, m^3/s
R_m	putken keskisäde
RMS	tehollisarvo, neliöllinen keskiarvo (Root Mean Square)
S	Strouhalin luku, likimääräinen arvo 0,2
s	putken seinämän paksuus
T	jakso, värähtelyn jaksonaika
t	aika
V	virtausnopeus
v	nopeus
v_p	nopeuden huippuarvo
v_{rms}	nopeuden tehollisarvo
x	siirtymä
x_p	siirtymän huippuarvo
\emptyset	halkaisija
θ	kulma
ρ	putken materiaalin tiheys

ν	materiaalin Poissonin luku (teräkselle 0,3)
ϕ	vaihekulma
ω	kulmanopeus

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä tutkittiin FläktGroup Finland Oy:n toimeksiannosta EYMA-2-ulospuhalluslaitetta. Tavoitteena oli testata ja selvittää, voidaanko ulospuhalluslaitteen kevyempi ja tuotantokustannuksiltaan halvempi rakenne ottaa käyttöön ilman rakenteellisia lisämuutoksia.

Tarkoituksena oli testata ulospuhalluslaitteen materiaalivahvuuksien vaikutusta laitteessa esiintyviin värähtelyihin oikeassa käyttöympäristössä ilman virratessa laitteen läpi koko sen käyttöalueen mukaisilla ilmavirtaamilla. Testeissä tutkittiin värähtelymittauksin käytössä olevaa ulospuhalluslaitetta ja sen tuotemodifikaatiota, jossa on käytetty ohuempia materiaalivahvuuksia.

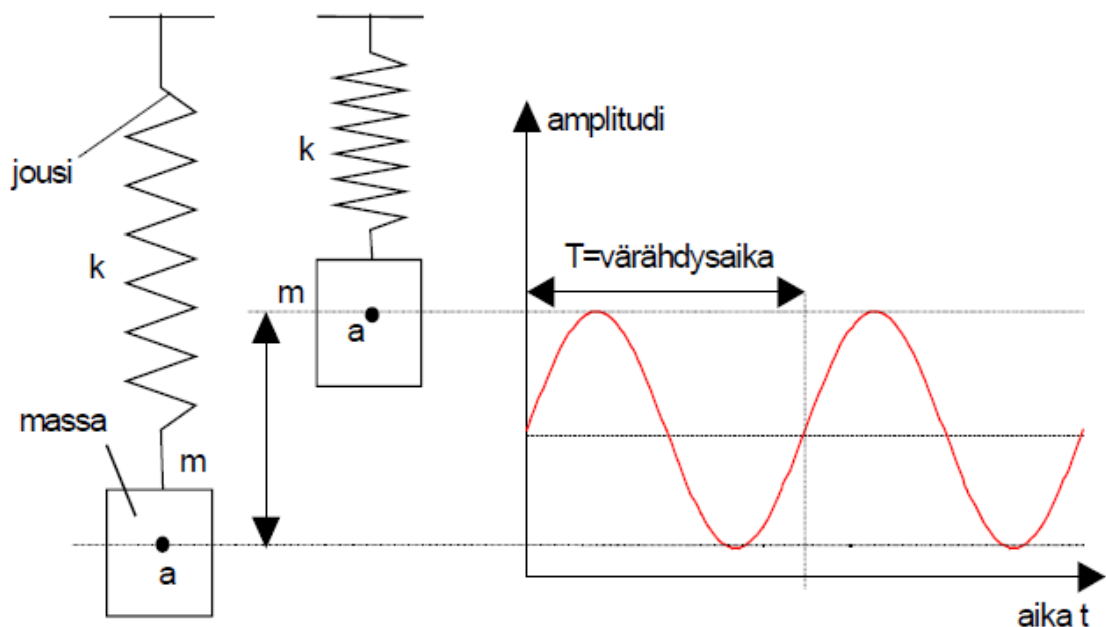
Työssä keskityttiin värähtelymittausten toteuttamiseen kahdelle yllä mainitulle ulospuhalluslaitteen rakenneversiolle sekä mittaustulosten analysointiin ja vertailuun rakenneversioiden välillä. Tuloksia tulkittiin myös saatavilla olevien standardien arvojen avulla.

Yleistä ominaistajuusmittausta ei tehty, mutta alimpia ominaistajuuksia selvitettiin värähtelyn taajuusspektristä ja laskennallisesti. Lopuksi arvioitiin työn onnistumista ja tulosten perusteella esitettiin johtopäätös tutkimuskysymykseen sekä mahdollisia jatkotutkimusaiheita ja kehitysehdotuksia.

2 VÄRÄHTELY

2.1 Värähtelyn peruskäsitteitä

Yksikään laite ei ole täysin jäykkä, vaan jokainen värähtelevä laite voidaan pelkistää jousi-massasysteemiksi (kuvio 1). Kun massa m poikkeutetaan tasapainoasemastaan, se liikkuu edestakaisin tasapainoasemansa molemmin puolin käyden maksimietäisyydellä sekä positiivisella että negatiivisella puolella kerran värähtelyjakson T aikana. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 7)



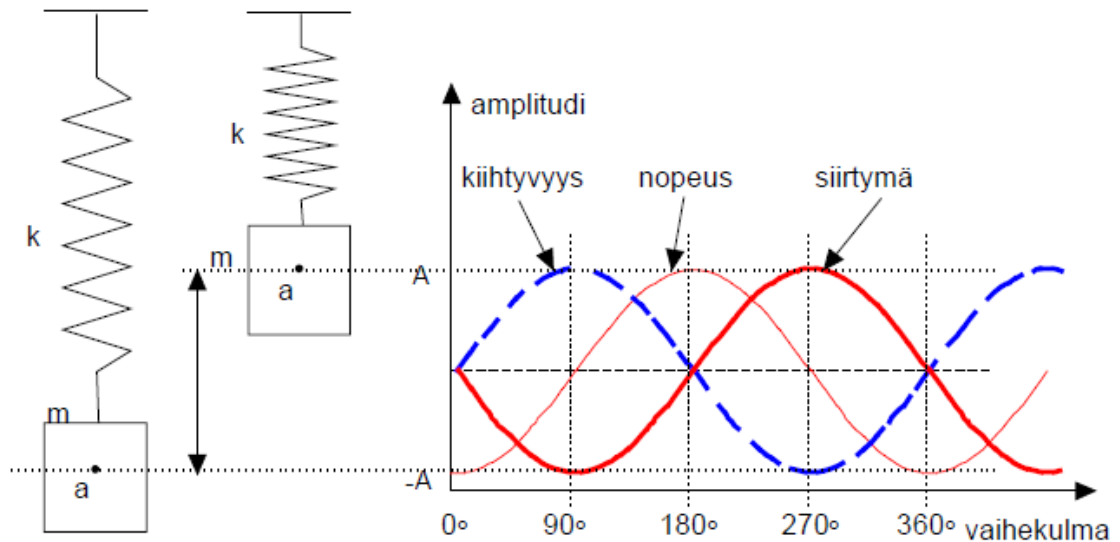
KUVIO 1. Jousi-massasysteemin pisteen a värähtely aikatasossa (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 7)

Jousivoima kasvaa ja vähenee lineaarisesti suhteessa värähtelyn amplitudiin. Jousi on siis harmoninen värähtelijä, jolloin pisteen a piirtämä käyrä on sinifunktion muotoinen. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 7)

Jakson T jälkeen värähtelijä palaa aina samaan vaiheeseen. Yhtä jaksoa vastaava vaihekulma on 360° tai 2π radiaania. Kuvion 1 vaaka-akselilla on aika ja pystyakselilla pisteen a siirtymä eli värähtelyn amplitudi. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 7)

2.2 Värähtelysuureet: siirtymä, nopeus ja kiihtyvyys

Tärinäsuureina käytetään siirtymän lisäksi nopeutta ja kiihtyvyyttä. Kiihtyvyys on 90° vaihekulman verran nopeutta edellä, kun taas nopeus on 90° siirtymää edellä (kuvio 2). (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 8)



KUVIO 2. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 8)

Nopeus v määritellään siirtymän x derivaattana ajan t suhteen:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

Kiihtyvyys a puolestaan määritellään nopeuden v derivaattana ajan t suhteen. Kiihtyvyys on siis siirtymän toinen derivaatta:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2)$$

Derivoimalla käänteisellä operaatiolla, integroinnilla ajan t suhteen, voidaan nopeus v määrittää kiihtyvyyden a avulla:

$$v = \int a \, dt \quad (3)$$

Siirtymä x puolestaan saadaan laskettua integroimalla nopeus v tai integroimalla kiihtyvyys a kaksi kertaa ajan t suhteen:

$$x = \int v \, dt = \iint a \, dt^2 \quad (4)$$

(Mansfield & O'Sullivan 1999, 18–25)

Värähtelysuureisiin kuuluvat myös taajuus f , jaksonaika T ja vaihekulma ϕ . Taulukkoon 1 on koottu mekaanisissa värähtelymittauksissa käytettävät suureet ja mittayksiköt.

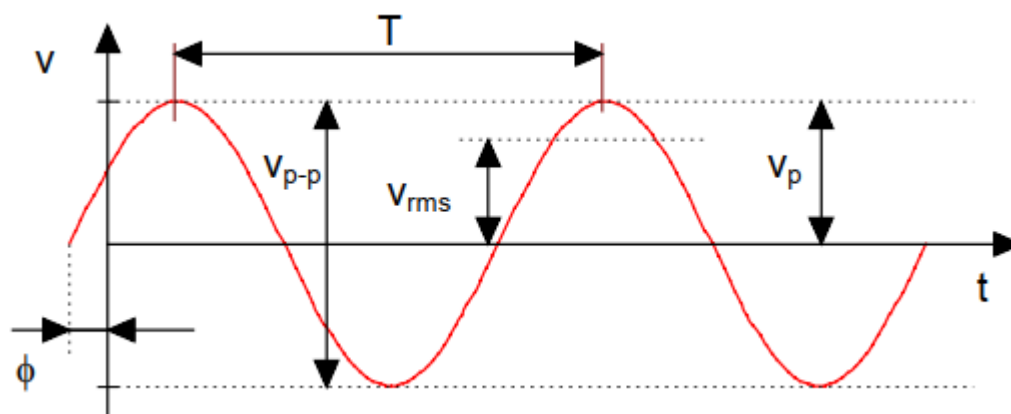
TAULUKKO 1. Värähtelymittauksissa käytettävät suureet ja mittayksiköt (PSK 5701, 15, muokattu)

Suure	Mittayksikkö	SI-mittayksikkö
Siirtymä x	μm	m
Nopeus v	mm/s	m/s
Kiihtyvyys a	m/s ² , g (9,81 m/s ²)	m/s ²
Taajuus f	Hz	Hz
Vaihekulma ϕ	° (aste)	rad
Jakso T	ms	s

2.3 Värähtelyyn liittyvät parametrit

Yleisimmät värähtelysuureisiin liittyvät parametrit on esitetty kuviossa 3 nopeus-signaalin avulla. Myös siirtymälle ja kiihtyvyydelle voidaan käyttää samoja parametreja. Parametrit ovat

- T , värähdysaika eli jakso
- v_p , nopeuden huippuarvo (peak)
- v_{rms} , nopeuden tehollisarvo eli neliöllinen keskiarvo (root mean square)
- v_{p-p} , nopeuden huipusta huippuun -arvo
- ϕ , vaihekulma. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 8)



KUVIO 3. Yleisimmät värähtelysuureisiin liittyvät parametrit nopeussignaalin avulla esitettynä (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 8)

Huippuarvo v_p on aikatasosignaalin itseisarvoltaan suurin arvo. Huipusta huippuun -arvo v_{p-p} muodostuu suurimman ja pienimmän arvon erotuksesta ja se on yleensä noin kaksinkertainen huippuarvoon verrattuna. Tehollisarvo kertoo tärinän sisältämästä tehosta ja kuvaa hyvin tärinän vaarallisuutta. Se on yleisimmin käytössä Euroopassa. Siniaallolla tehollisarvo v_{rms} eli neliöllinen keskiarvo lasketaan huippuarvon v_p avulla käyttämällä kaavaa

$$v_{rms} = \frac{v_p}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot v_p \quad (5)$$

(Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 9)

Kun signaalin muoto poikkeaa siniaallosta, ei suhdeluku eli huippukerroinkaan ole enää sama. Vaihekulma ϕ kertoo jakson kohdan, johon värähtely on edennyt vertailukohdasta. Täyttä jaksoa T vastaava vaihekulma ϕ on 360° tai 2π radiaania, jonka jälkeen värähtely palaa samaan vaiheeseen. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 7, 9)

Yleisimmin tärinäsuureena on käytössä tehollisarvon mittausta. Nopeuden sallittuja tehollisarvoja käsittelee kotimainen standardi PSK 5704. Mittaustuloksia verrattaessa on aina muistettava varmistaa, että mittaukset on tehty samoilla asetuksilla, etenkin jos tulokset poikkeavat oletetusta huomattavasti. Tämän opinnäytetyön värähtelymittauksissa on sovellettu putkistovärähtelyn standardia

PSK 5712, jossa mittaussuurena käytetään nopeuden huippuarvoa v_p . (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 9)

2.4 Taajuusspektri eli värähtelyn esittäminen taajuustasossa

Värähtelyn taajuus f kertoo värähdysliikkeiden määrän sekunnissa. Taajuuden yksikkö on hertsi (Hz) eli 1/s. Taajuuden selvittämiseksi aikatasosignaalista tarvitaan yhtälöä

$$f = \frac{1}{T}, \quad (6)$$

jossa f on taajuus ja T on jaksonaika sekä yhtälöä

$$f = \frac{n}{t}, \quad (7)$$

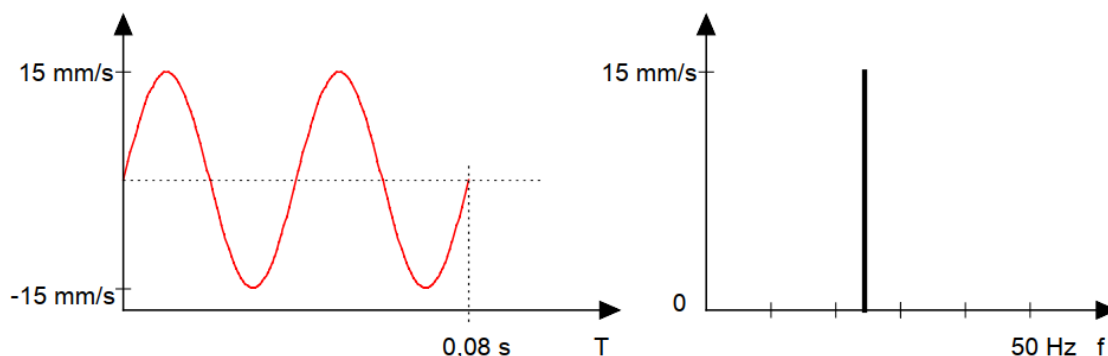
jossa f on taajuus, n on värähdysten lukumäärä ja t on aika. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 9)

Aikatason käyttäminen käytännön värähtelymittauksissa on harvinaista, ja pääosa analyyseistä tehdään taajuusspektreihin perustuen eli taajuustasossa. Koneen värähdellessä mittauspisteeseen tulee värähtelyä useista eri koneenosista. Aikatasosignaalista on vaikea erottaa yksittäisiä taajuuskomponentteja, mutta taajuustasossa se onnistuu. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 9)

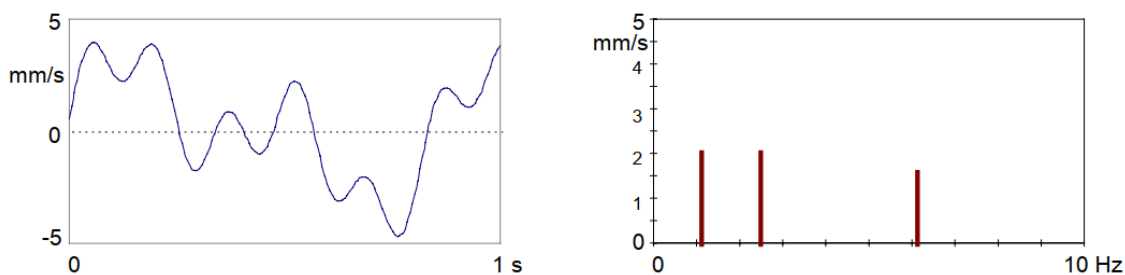
Taajuustasoesitystä nimitetään taajuusspektriksi. Aikatasosignaali muutetaan taajuusspektriksi yleensä FFT- eli nopealla Fourier'n muunnoksella (Fast Fourier Transform), joka on tehokas algoritmi diskreetin Fourier'n muunnoksen laske-
miseksi. Värähtelyanalyysointorit tekevät FFT-laskennan yleensä automaattisesti. (Heideman, Johnson & Burrus, 1984, 14; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 9)

Taajuusspektrissä siniaallon amplitudia A kuvaa pylvään korkeus ja sen paikka vaak akselilla taajuutta f (kuvio 4, oikealla). Laitteesta mitattava ääni sisältää yleensä eri taajuuksia, jotka on vaikea havaita aikatasossa, mutta helppo erottaa

taajuusspektrissä (kuvio 5). Kuviossa 5 on esitetty kolmesta siniaallosta koostuva signaali aika- ja taajuustasossa. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 10)



KUVIO 4. Yksittäinen siniaalto aikatasossa (vasemmalla) ja taajuustasossa (oikealla) (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 10)

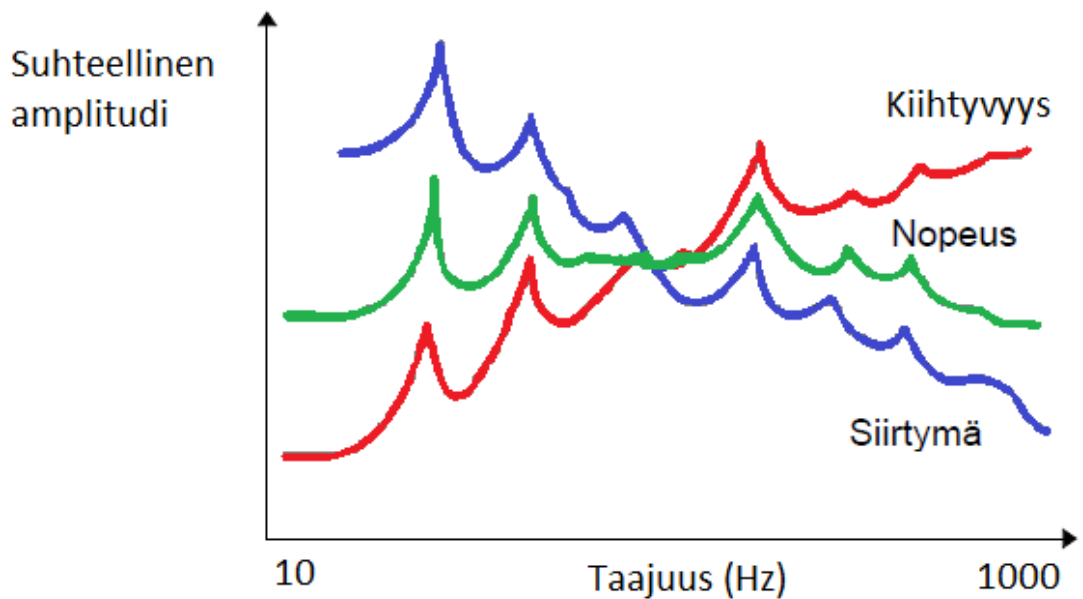


KUVIO 5. Kolmesta siniaallosta muodostuva värähtelysignaali aikatasossa (vasemmalla) ja taajuustasossa (oikealla) (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 10)

On muistettava, että joskus aikatasosignaalista selviää sellaista tietoa, joka ei näy taajuusspektrissä. Kunnonvalvonnassa amplitudit esitetään yleensä nopeuden tehollisarvona v_{rms} , jolloin puhutaan tehospektristä. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 10)

2.5 Värähtelysuureen valinta ja suureiden keskinäiset yhteydet

Tärinämittaussuureena käytetään yleensä nopeutta, sillä nopeus on vertailukelpoinen laajalla taajuusalueella toisin kuin kiihtyvyyden tai siirtymä (kuvio 6). Nopeuden käyttöä puoltaa myös se, että värähtelyn sisältämä energiamäärä on lähes verrannollinen värähtelyn nopeuteen. Värähtelyn nopeuden arvoja käytetään monissa standardeissa kuvaamaan sallittuja värähtelyarvoja. (Nohynek & Lumme 2004, 50)



KUVIO 6. Siirtymän, nopeuden ja kiihtyvyyden suhteelliset amplitudit taajuuden suhteen (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 10, muokattu)

Kuvion 6 taajuusspektrien mukaan siirtymä korostaa matalia taajuuksia ja kiihtyvyys korkeita. Korkeita taajuuksia tarkasteltaessa kannattaa siis käyttää värähtelysuurena kiihtyvyyttä ja matalia taajuuksia tarkasteltaessa siirtymää. (Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, 10–11)

Kun mitataan värähtelyn arvoa nopeutena, käytetään yleensä pietsosähköistä kiihtyvyyssanturia sisäänrakennetulla integrointipiirillä (Teknisiä tietoja ja taulukoita, 12). Anturin mittaama kiihtyvyys integroidaan nopeuden arvoksi. Siniimuotoisella värähtelyllä nopeuden huippuarvo v_p voidaan laskea kiihtyvyyden huippuarvosta a_p kullakin taajuudella f käyttämällä kaavaa

$$v_p = \frac{a_p}{2\pi f} \quad (8)$$

(Vibration Meter VM25 2012, 6). Kaavan (8) todistus on esitetty seuraavassa.

Harmonisessa liikkeessä siirtymä x määritellään ajan t suhteen kaavalla

$$x(t) = x_p \cdot \cos(2\pi f t + \phi) = A \cdot \cos(\omega t + \phi), \quad (9)$$

missä x_p on siirtymän huippuarvo eli amplitudi A , ω on kulmanopeus ja ϕ on vaihekulma (Mansfield & O'Sullivan 1999, 49). Nopeus v ajan t suhteen saadaan derivoimalla siirtymä x kaavan (1) mukaisesti:

$$v(t) = \frac{d}{dt}(A \cdot \cos(\omega t + \phi)) = -A\omega \cdot \sin(\omega t + \phi). \quad (10)$$

Sinifunktion arvo millä tahansa kulmalla θ on enintään yksi, joten sinitermi häviää lausekkeesta (10), kun halutaan määrittää nopeuden huippuarvo v_p :

$$-1 \leq \sin\theta \leq 1 \Rightarrow v_p = A\omega. \quad (11)$$

Kiihtyvyys a ajan t suhteen puolestaan saadaan derivoimalla nopeus v kaavan (2) mukaisesti:

$$a(t) = \frac{d}{dt}(-A\omega \cdot \sin(\omega t + \phi)) = -A\omega^2 \cdot \cos(\omega t + \phi). \quad (12)$$

Kosinifunktion arvo millä tahansa kulmalla θ on enintään yksi, joten kosinitermi häviää lausekkeesta (12), kun halutaan määrittää kiihtyvyyden huippuarvo a_p :

$$-1 \leq \cos\theta \leq 1 \Rightarrow a_p = A\omega^2. \quad (13)$$

Nyt

$$v_p = A\omega = A\omega \cdot \frac{\omega}{\omega} = \frac{A\omega^2}{\omega} = \frac{a_p}{\omega} = \frac{a_p}{2\pi f}. \blacksquare \quad (14)$$

2.6 Resonanssi

Koneen tai sen osan voimakas värähtely voi aiheutua laitteen suuresta liikkuvuudesta jollakin herätetaajuudella, vaikka voimat olisivat pieniä. Suuren liikkuvuuden syynä saattaa olla, että laitteen osa tai sen tukirakenne on liian joustava tai pääsee liikkumaan. Usein kyseessä on resonanssi-ilmiö, joka johtuu herätetaajuuden ja laitteen tai osan ominaistajuuden läheisyydestä. Ominaisajuudet näkyvät huippuina taajuusspektrissä. (PSK 5708 2018, 3)

Resonanssi vahvistaa värähtelyjä konekonstruktiossa tyypillisesti 5–50-kertaisesti. Rakenteen sisäisen vaimennuksen ollessa pieni syntyy korkea ja kapea resonanssihuippu. Kun vaimennusta on enemmän, resonanssihuipun kohdalla oleva vahvistus pienenee, mutta vahvistus vaikuttaa laajemmalla taajuusalueella. Herätetaajuus osuu harvoin juuri resonanssihuipun kohdalle. Värähtelyn voimakkuus vaihtelee tällöin herkästi, jos pyörimisnopeus muuttuu tai resonanssi siirtyy esimerkiksi lämpötilan muuttuessa. (PSK 5708 2018, 3)

Mikään pyörivien koneiden resonanssitaajuuksista ei saa sijaita lähellä käytettäviä pyörimisnopeuksia. Pyörimistaajuuden ja resonanssitaajuuden välinen ero tulee yleensä olla vähintään 20 %. Lähellä herätetaajuutta oleva resonanssitaajuus voidaan sallia vain, jos resonanssi on merkityksetön eli paikallinen tai niin hyvin vaimennettu, että värähtelyn taso jää alhaiseksi. (PSK 5708 2018, 3)

2.7 Värähtelyn tason alentaminen

Värähtelyn tason vähentäminen vaatii joko rakennetta herättävien voimien tai niiden aiheuttaman rakenteen vasteen pienentämistä (Lahti 2002, 2/8). Jos resonanssitaajuus on lähellä herätetaajuutta, voidaan ominaistaajuutta pyrkiä siirtämään.

Ominaistaajuuden siirtäminen pois herätetaajuuden alueelta pienentää vastetta. Usein alimpia ominaistaajuuksia halutaan nimenomaan nostaa. Tehokkaimmin ominaistaajuuden siirtäminen käy muuttamalla joustavimpien kohtien jäykkyyttä tai liikkuvimpien osien massaa. Toisiinsa nähden laajasti liikkuvien kohtien väliin kannattaa lisätä vaimennusta.

2.8 Putkistovärähtely

2.8.1 Putkistovärähtelyn standardi PSK 5712

PSK Standardisointi on julkaissut standardin PSK 5712 (2013, 1) otsikolla ”Kunnonvalvonta. Putkistovärähtelyn hallinta ja mittaus”, jossa käsitellään putkistovärähtelyn syitä ja seurauksia sekä annetaan ohjeita vaarallisen putkistovärähtelyn välttämiseksi. Standardissa myös määritellään turvallisen värähtelyn raja-arvo (PSK 5712 2013, 1). Tätä standardia sovelletaan tämän opinnäytetyön tulosten arvioinnissa.

Standardin mukaan putkistossa esiintyvä värähtely on otettava huomioon sitä suunnitellessa, sillä putki saattaa murtua värähtelyn aiheuttamien jännityksien seurauksena. Vaikka putki kestäisikin värähtelyt, voivat kannakkeet, venttiilien toimilaitteet tai putkivarusteet vaurioitua voimakkaan värähtelyn takia. (PSK 5712 2013, 1)

2.8.2 Putkistovärähtelyn herätteet

Tässä opinnäytetyössä käsitellään ilmastoinnin kanavaosaa, joten putkistovärähtelyn osalta keskitytään sisäisen painepulsaation eli väliaineena toimivan ilmavirran painevaihteluiden synnyttämään värähtelyyn. Värähtelyn herätteenä voi myös olla esimerkiksi kompressorin, pumpun tai moottorin aiheuttama mekaaninen värähtely pyörimistaajuudella tai sen monikerroilla (PSK 5712 2013, 2–3).

Painepulsaatio eli väliaineen painenvaihtelu nopeasti on putkistovärähtelyn yleisin syy. Vaihtelu voi olla harmonista, satunnaista tai iskumaista, ja se voi aiheutua pumppaavasta koneesta, virtauksen turbulenssista, pyörteilystä, kavitaatiosta tai venttiilin avaamisesta ja sulkemisesta. (PSK 5712 2013, 2)

Painepulsaation vahvistuminen putken sisällä jopa 300-kertaiseksi on mahdollista väliaineen resonanssitaajuuksilla. Putken mitat sekä virtaavan aineen

jousto- ja massaominaisuudet määräävät väliaineen resonanssitaajuudet. Paine-
pulsatiosta aiheutuvat reaktivoimat putkessa, käyrissä ja epäjatkuvuuskoh-
dissa synnyttävät herätevoimia putkistoon. (PSK 5712 2013, 2)

Taulukossa 2 on esitetty tyypilliset värähtelyä aiheuttavat virtausilmiöt ja kaavat
niiden aiheuttamien herätetaajuuksien laskemiseksi (PSK 5712 2013, 3):

TAULUKKO 2. Virtauksen aiheuttamia herätetaajuuksia (PSK 5712 2013, 3)

Aiheuttaja	Herätetaajuudet	
virtaus esteen ohi	$f = S \frac{V}{D}$	(15)
virtauksen pyörteily	$f = 0 - 30 \text{ Hz}$	(16)
kavitaatio	laajalla taajuusalueella	

Taulukon kaavoissa suureet ovat

- S = Strouhalin luku, likimääräinen arvo 0,2 (riippuu Reynoldsin luvusta)
- V = virtausnopeus
- D = esteen halkaisija. (PSK 5712 2013, 3)

2.8.3 Putken reagointi herätteisiin

Putken värähtely on yleisimmin taivutusvärähtelyä. Matalilla taajuuksilla voi esiin-
tyä myös jäykän kappaleen liikettä kannakkeiden jousaessa. Jos herätetaajuus
osuu lähelle putkiston tai sen osan ominaistaajuutta, värähtely voimistuu reso-
nanssin vaikutuksesta. Putki tai kanavaosa voi vaurioitua muodonmuutoksen
seurauksena, jolloin vauriomekanismina on yleensä väsyminen. (PSK 5712
2013, 3)

Putkistovärähtelyille ominaisia haittavaikutuksia ovat

- ympäristömelu ja -tärinä
- kannakkeiden murtuminen
- putkeen liittyvien laitteiden ja varusteiden vaurioituminen
- vuoto
- putken katkeaminen tai repeäminen

- kosketus muihin rakenteisiin (PSK 5712 2013, 3).

Putkistovärähtelyn haittavaikutuksista keskitytään tässä opinnäytetyössä putkeen liitetyn ulospuhalluslaitteen mahdollisen vaurioitumisen tutkimiseen.

2.8.4 Värähtelyn mittaaminen ja raja-arvot

Standardissa PSK 5712 esitetään suuntaa antava mittaustulosten luokitus, jonka perustana on värähtelynopeuden mittaaminen. Putkistovärähtely on mitattava riittävän monesta pisteestä, jotta suurin värähtelytaso löydetään. Tätä verrataan raja-arvoon. (PSK 5712 2013, 4)

Värähtelynopeuden huippuarvoa v_p käytetään ensisijaisena mittaussuureena. Kunnanvalvonnassa kultakin putkiosuudelta valitaan voimakkaimmin värähtelevä piste. (PSK 5712 2013, 4)

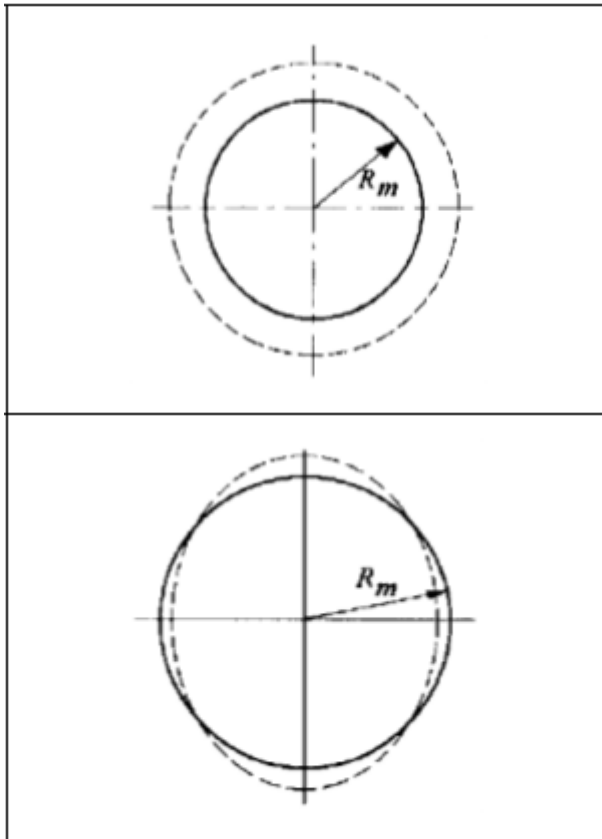
Putkiston tuennan kannalta kriittiset pisteet voidaan määrittää putkiston ominaisuuksien ja -muotojen mittausten avulla. Yleensä laskenta alimmilla ominaisuuksilla on riittävä. Taajuusanalyysiä voidaan käyttää mekaanisten herätteiden selvittämiseksi. Jotta virtauksen aiheuttamat herätteet selviävät, voidaan mitata ja analysoida painepulsaatioita. (PSK 5712 2013, 4)

Standardin PSK 5712 mukaan värähtelystä johtuvat jännitykset ovat yleensä vaarattomia, kun värähtelynopeuden todellinen huippuarvo $v_p < 12$ mm/s. Kuitenkin, jos putken sisältö mittayksikköä kohti on kevyempää kuin putken materiaali, vaarattoman värähtelyn raja-arvo voi olla jopa viisinkertainen: $5 \cdot 12$ mm/s = 60 mm/s. (PSK 5712 2013, 4)

On myös otettava huomioon putkeen liitettyjen lisälaitteiden tärinänsieto. Lisäselvityksiä edellytetään, mikäli raja-arvo ylitetään. Raja-arvoa voidaan kuitenkin nostaa, mikäli värähtelystä ei ole vaaraa. (PSK 5712 2013, 5)

2.8.5 Alimman ominaistajuuden määrittäminen laskemalla

Putken värähtelyllä voi olla useita ominaismuotoja, joiden määräytymiseen vaikuttaa muun muassa tuenta. Putken säteen suunnassa tapahtuva värähtely voi olla säteittäistä tai soikeaa (kuva 1).



KUVA 1. Säteen suuntainen värähtely: yllä säteittäinen, alla soikea ominaismuoto (PSK 5712 2013, 8, muokattu)

Ominaismuodoltaan säteittäisen värähtelyn (kuva 1, ylempi kuva) alin ominaistajuus f_1 lasketaan kaavalla

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_m} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}}, \quad (17)$$

missä suureet alimman ominaistajuuden f_1 lisäksi ovat

- R_m , putken keskisäde
- E , kimmomoduuli
- ρ , putken materiaalin tiheys ja

- ν , materiaalin Poissonin luku (teräkselle 0,3). (PSK 5712 2013, 8)

Soikean ominaismuodon värähtelyn (kuva 1, alempi kuva) alin ominaistaajuus f_1 lasketaan kaavalla

$$f_1 = \frac{1,34}{\pi} \frac{s}{R_m^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}, \quad (18)$$

missä s on putken seinämän paksuus kaavan (17) suureiden lisäksi. (PSK 5712 2013, 8)

3 ULOSPUHALLUSLAITTEEN ESITTELY

3.1 Yritysesittely

FläktGroup Finland Oy kuuluu kansainväliseen FläktGroupiin, joka toimii 65 maassa, työllistää 3600 työntekijää, ja jonka liikevaihto oli 630 miljoonaa euroa vuonna 2018 (Portfolio – FläktGroup 2019). FläktGroup Finland Oy:n päätoimiala on Muuhun kuin kotitalouskäyttöön tarkoitettujen jäähdytys- ja tuuletuslaitteiden valmistus (Yrityshaku – YTJ 2019).

FläktGroup syntyi vuonna 2016, kun DencoHappel ja Fläkt Woods yhdistyivät. FläktGroup on älykkäiden ja tehokkaiden sisäilmaratkaisujen eurooppalainen markkinajohtaja. FläktGroup tarjoaa asiakkailleen korkeimmat laatuvaatimukset täyttäviä ratkaisuja laadukkaaseen sisäilmaan ja hyvinvointiin. (Tietoa meistä – FläktGroup Finland 2019)

FläktGroup Finland valmistaa ilmastointipuhaltimia ja ilmastointikanavia Turussa sekä ilmastoinnin päätelaitteita Akaassa. Yhtiöllä on myyntikonttori Turun ja Akaan lisäksi Espoossa, Kuopiossa, Oulussa ja Vaasassa. FläktGroupin tuoteperheet ovat

- ilmanvaihtopuhaltimet
- ilmentäsettelykoneet
- jäähdytyspalkit, puhallinkonvektorit, ilmaverhot ja ilmanlämmittimet
- ilmanvaihtokanavat
- ilmentsuodatus
- ilmenthallinta ja huonelaitteet. (Tietoa meistä – Fläkt Woods Oy 2018; Tuotteet 2019)

Yrityksen sisäilma- ja paloturvallisuusratkaisuja hyödynnetään muun muassa toimistoissa, liikehuoneistoissa, julkisissa rakennuksissa, sairaaloissa, autopaikotustiloissa ja tunneleissa. FläktGroup toimii neljällä markkinasegmentillä, jotka ovat

- muut kuin asuinrakennukset
- asuinrakennukset

- erityiset rakennukset, laivanrakennus, öljy & kaasu
- teollisuus, tunnelit & metrot. (Tietoa meistä – Fläkt Woods Oy 2018)

FläktGroup Finland Oy:n keskeiset talouden tunnusluvut on esitetty taulukossa 3. Yritys toimi huhtikuuhun 2018 asti nimellä Fläkt Woods Oy (Yrityshaku – Virretietopalvelu 2019).

TAULUKKO 3. FläktGroup Finland Oy:n talouden keskeisiä tunnuslukuja (Talous tiedot 2019)

	12 / 2014	12 / 2015	12 / 2016	12 / 2017	12 / 2018
Liikevaihto (1000 €)	98 303	102 868	104 785	110 289	107 978
Liikevaihdon muutos %	-9,5 %	4,6 %	1,9 %	5,3 %	-2,1 %
Liiketoiminnan tulos (1000 €)	-154	640	-1 489	-1 811	-1 428
Liikevoitto %	-0,2 %	0,6 %	-1,4 %	-1,6 %	-1,3 %
Henkilöstö	393	384	344	334	357

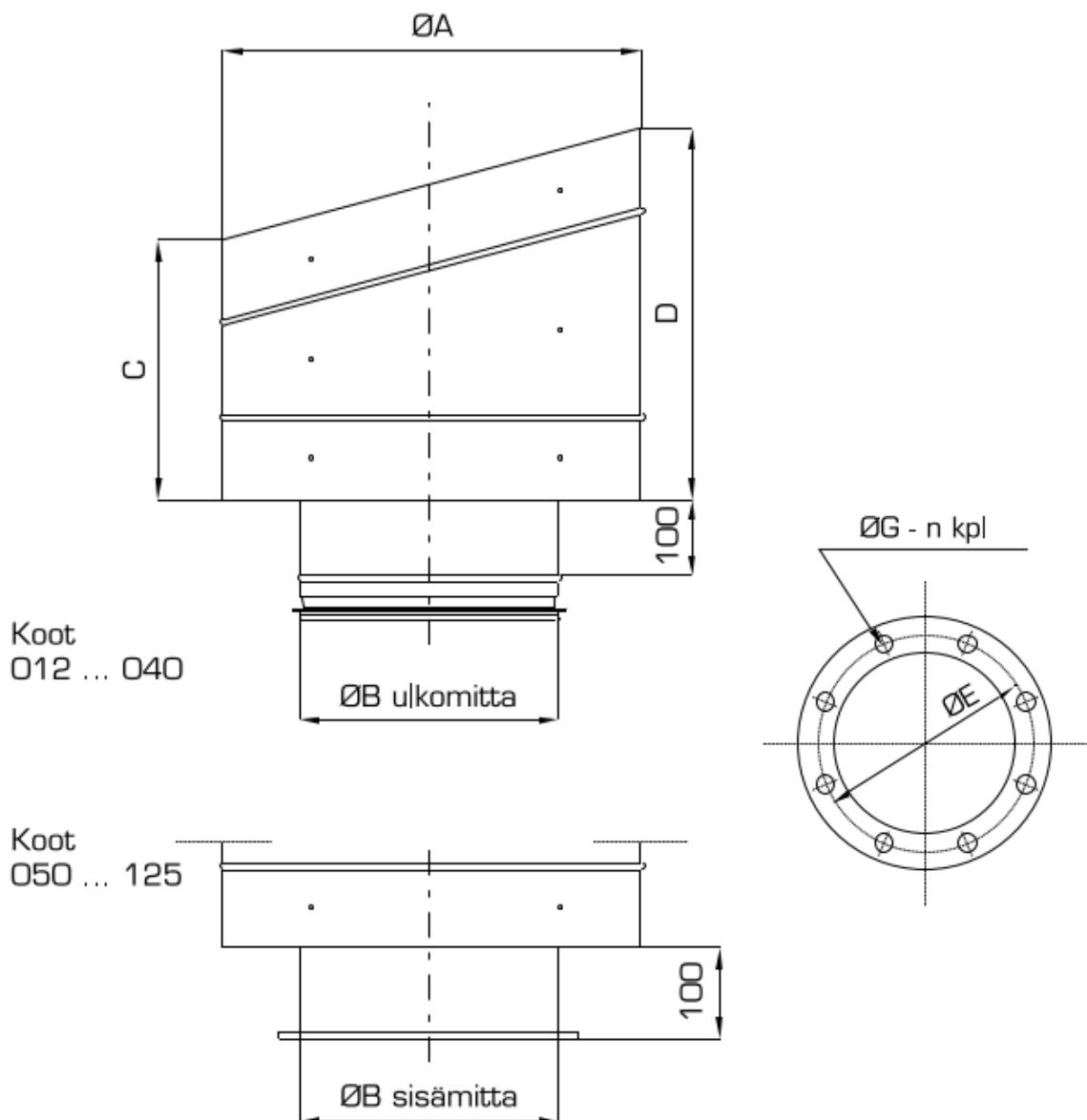
3.2 Ulospuhalluslaite EYMA-2

Käytettyä ilmaa poistavaa ulospuhallushajotinta tarvitaan rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmässä raikasta ilmaa sisään ottavan ilmanottolaitteen ohella. Ulospuhalluslaite EYMA-2 on suunniteltu sijoitettavaksi nykyaikaisten rakennusten katolle ja sopii muotoilultaan paraatipaikalle tämän päivän arkkitehtuuriin. Teollinen muotoilija Eero Rislakki on suunnitellut laitteen ulkomuodon. (Ulospuhallushajotin EYMA-2... 2016, 2)

EYMA-2-ulospuhallushajotimen tehtävänä on johtaa jäteilma suurella nopeudella ylös. Tällöin hajut ja epäpuhtaudet eivät laskeudu lähelle puhalluskohtaa eikä hajotinta ympäröivältä katolta sula lumi talvella lämpimän ilman vaikutuksesta. (Ulospuhallushajotin EYMA-2... 2016, 2)

Ulospuhallushajotin on valmistettu teräslevystä, joka on päällystetty alumiinin ja sinkin seoksella. Poistuva ilma osuu sisäkartiioon, joka levittää ilmavirran kohti laitteen reunoja. Ilma poistuu keskuslieriön ja ulkovaipan välistä. Laitteen sisäkartiion muotoilu estää sadeveden pääsyn ilmanvaihtojärjestelmään, vaikka poistopuhallus on välillä pois toiminnasta. Sadevesi poistuu suojalevyn ja ulkovaipan välisestä tilasta katolle vapaasti. (Ulospuhallushajotin EYMA-2... 2016, 2)

Kuvassa 2 on esitelty EYMA-2-ulospuhalluslaitteen ja laipan päämitat kirjaintunnuksin. Mittojen lukuarvot kullekin kanavakoolle 120–1250 mm ovat taulukossa 4. Kokoihin 120–400 mm käytetään Veloduct-liitosta ja kokoihin 500–1250 mm laippa-vastalaippaliitosta (Ulospuhallushajotin EYMA-2... 2016, 6).

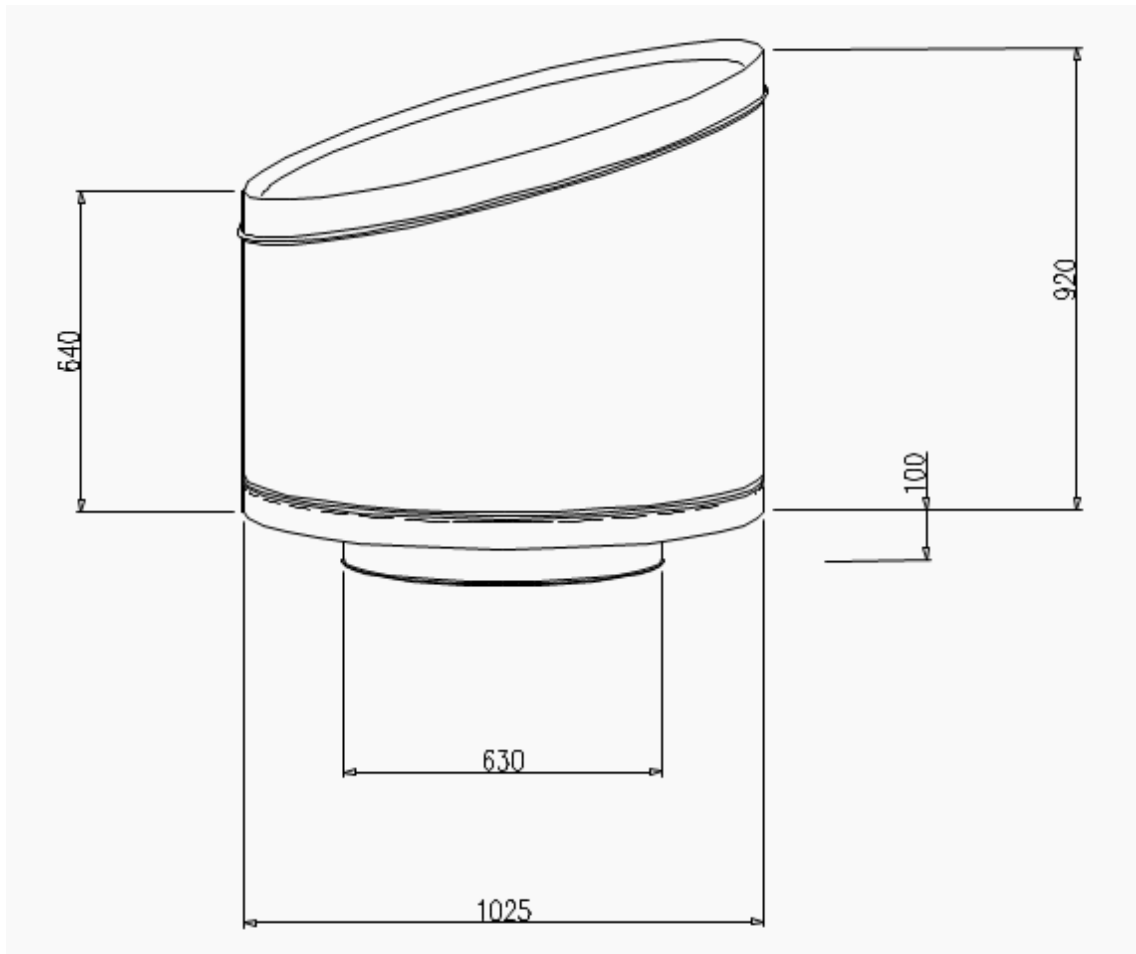


KUVA 2. EYMA-2-ulospuhalluslaitteen ja laipan mitat, kanavakoot 120–1250 mm (Ulospuhallushajotin EYMA-2... 2016, 3, muokattu)

TAULUKKO 4. EYMA-2-ulospuhallushajottimen mitat ja painot sekä laipan mitat (Ulospuhallushajotin EYMA-2... 2016, 3, muokattu)

Koko	ØA	ØB	C	D	Paino [kg]		Laippa	
					EYMA-2	ØE [mm]	ØG [mm]	n
012	205	125	135	190	2.3	-	-	-
016	210	160	170	240	3.4	-	-	-
020	325	200	210	300	4.7	-	-	-
025	405	250	260	370	7.1	-	-	-
031	510	315	330	470	10.7	-	-	-
040	650	400	410	590	16.5	-	-	-
050	810	500	515	730	31.0	560	12	12
063	1025	630	640	920	50.0	690	12	12
080	1300	800	1000	1210	83.0	860	12	16
100	1620	1000	1190	1540	145	1070	15	16
125	2030	1250	1400	1900	248	1320	15	20

Kuvassa 3 on yksilöity opinnäytetyön mittausosiossa käytetyn 630 mm kanavakoon ulospuhalluslaitteen mitat. Testeissä käytetyssä alkuperäisessä laitteessa oli laippaliitos mutta ohennetussa versiossa huulitiivisteinen Veloduct-liitos.



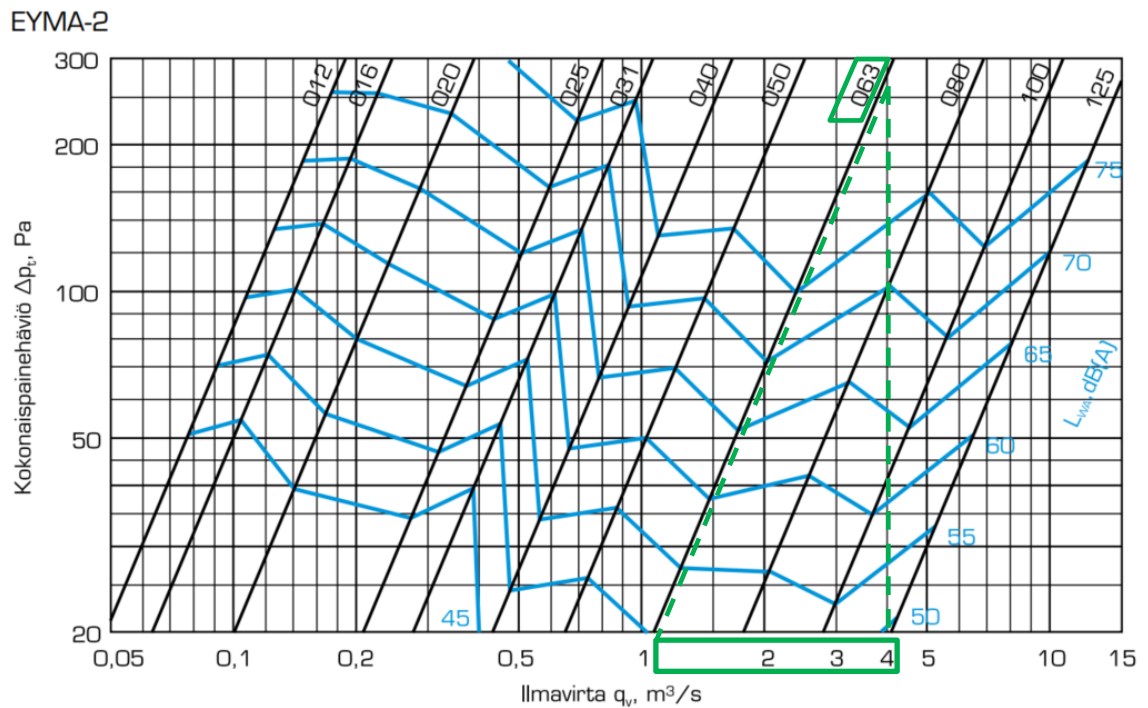
KUVA 3. EYMA-2-ulospuhalluslaitteen mitat testatussa kanavakoossa 630 mm (EYMA ulospuhallushajottaja 2019)

4 ULOSPUHALLUSLAITTEEN VÄRÄHTELYMITTAUKSET

4.1 Testijärjestely värähtelyn mittaukseen

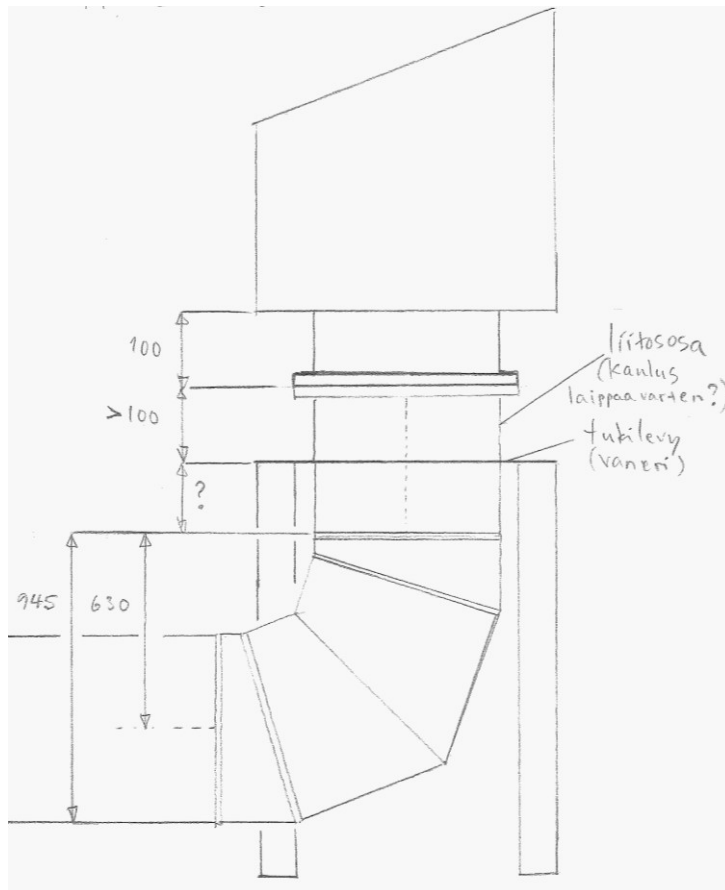
4.1.1 Testiteline laitteelle

Tavoitteena oli testata nykyistä ja ohennettua ulospuhalluslaitetta koko käyttöalueellaan, mikä tarkoitti kanavakoossa 630 mm virtaamia 1500–4000 l/s (kuvio 7). Testin toteuttaminen ei ollut mahdollista sisätiloissa suuren virtaaman vuoksi, joten testiasetelma suunniteltiin ulos.



KUVIO 7. Painehäviö- ja äänitietojen kuvaajasta selviävät käyttöalueen virtaamat (Ulospuhallushajotin EYMA-2... 2016, 4, muokattu)

Ulospuhalluslaitteelle tarvittiin teline, johon se kiinnitetään ja josta sen voi helposti myös irrottaa. Kuvassa 4 on ensimmäinen hahmotelma testilaitteesta telineessä, asennusmittojen arvot ovat peräisin ulospuhalluslaitteen asennusohjeesta (Ulospuhallushajotin EYMA. Ilmanotto-laite DYMA 2009, 3, 6).



KUVA 4. Testitelineen hahmotelma mallin pohjaksi

Teline suunniteltiin ja 3D-mallinnettiin Autodesk Inventor -suunnitteluohjelmistolla (Autodesk Inventor 2019) sekä teetettiin puumateriaalista tilaustyönä (kuva 5). Telineen piirustukset ovat liitteessä 1.



KUVA 5. Teline ulospuhalluslaitteen testaamiseen teetettiin puusepällä.

4.1.2 Kanaviston suunnittelu ja rakentaminen

Sisätilojen etäisyydet puhaltimen liitännältä ulko-ovelle kartoitettiin käyttämällä laseretäisyysmittaria ja mittanauhaa. Kanavaa (\varnothing 630 mm) tilattiin sen mukaisesti kolmen metrin pituisina kappaleina yhteensä 27 m, lisäksi tarvittiin kaksi 90° mutkaosaa sekä liitinosat putkien väleihin. Testikanavisto koottiin asettamalla kanavaosien päät sisäkkäin liitinosien kanssa ja liittämällä osat toisiinsa ruuveilla. Liitospinnat tiivistettiin kauttaaltaan ilmastointiteipillä.

Ulospuhalluslaite EYMA-2 kiinnitettiin testitelineeseen vastalaipalla (kuva 6) ja liitettiin testikanavaan (kuva 7). Testiasetelman piirustukset ovat liitteessä 2.



KUVA 6. Testiteline ja vastalaippa valmiina EYMA-2:n kiinnitykseen



KUVA 7. Testiasetelma koottuna ulkoilmaan

4.1.3 Ulospuhalluslaitteiden rakenteiden eroavuudet

Eroavuudet testatuissa ulospuhalluslaitteissa on koottu taulukkoon 5. Viiden osan materiaalivahvuutta on pienennetty ja kiinnitys tulokanavaan on toteutettu laipan ja vastalaipan sijaan tavallisella huulitiivisteisellä kanavaliitoksella. Kuvassa 8 erottuu, että ohennetun laitteen keskuslieriö (oikealla) on kiinnitetty tukiin peltiruuveilla alkuperäisen laitteen (vasemmalla) pultin ja niittimutterin sijaan. Ohennetun testilaitteen keskuslieriö on koottu kahdesta levyosasta, kun alkuperäisen laitteen keskuslieriö on yhtä levyä (kuva 8).

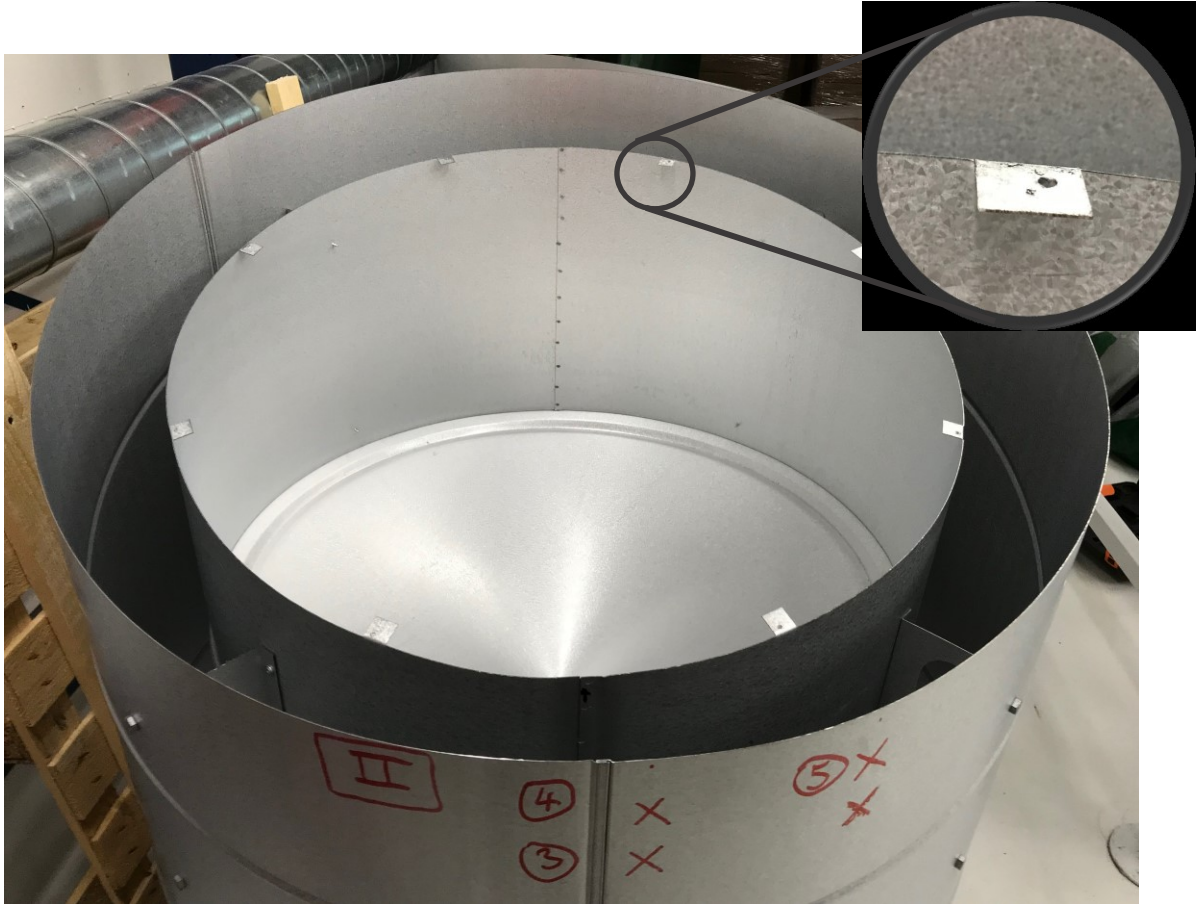
TAULUKKO 5. Testikappaleiden eroavuudet

Ominaisuus	EYMA-2-063	EYMA-2-063, ohennettu
Katon paksuus	0,9 mm	0,7 mm
Suojan paksuus	0,9 mm	0,7 mm
Keskuslieriön paksuus	0,9 mm	0,7 mm
Kartion paksuus	0,9 mm	0,7 mm
Vaipan paksuus	0,9 mm	0,7 mm
Keskuslieriön kiinnitys tukiin	8 kpl pultti M8x15 ja niittimutteri	8 kpl peltiruuvi 4x13 mm
Kiinnitys tulokanavaan	Laippa ja vastalaippa	Huulitiiviste
Keskuslieriön rakenne	Yksi levyosa	Koottu kahdesta levyosasta



KUVA 8. Testattujen laitteiden keskuslieriöt ilman kattoa, oikealla ohennettu laite

Laitteet purettiin osiin materiaalivahvuuden mittaamista varten. Kun ohennetun version kattoa ruuvattiin takaisin kiinni, kuusiokantaiset kattoruuvit (4x13 mm) alkoivat keskuslieriön kiinnityskohdissaan herkästi pyöriä tyhjää menettäen kiinnitysmomenttinsa. Keskuslieriön ohentaminen pienensi myös kiinnityspintaa taitoksissa, joihin katon kiinnitysruuvit kiertyvät (kuva 9).



KUVA 9. Ohennetun EYMA-2:n keskuslieriön kiinnitystaitokset katon ruuveille

Kalle Kurkela (2011, 73) on esittänyt optimoidut arvot EYMAN materiaalivahvuuksille (taulukko 6) opinnäytetyössään "Ulospuhallushajottimen valmistettavuuden parantaminen". Nyt testatun kanavakoon 630 mm osien paksuudet on korostettu taulukossa. Kurkelan esittämät materiaalivahvuudet täsmäsivät pääosin testattujen laitteiden mitattuihin paksuuksiin. Ainoastaan vaipan tukien paksuudeksi mitattiin molemmissa laiteversioissa 0,9 mm taulukossa 6 esitetyn 1,25 mm sijaan.

TAULUKKO 6. Materiaalivahvuksien optimointi (Kurkela 2011, 73, muokattu)

Nykyiset materiaalivahvuudet											
	012	016	020	025	031	040	050	063	080	100	125
Katon paksuus	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Suoja	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Keskuslieriön paksuus	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Keskusputken paksuus	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,25	1,25
Kartion paksuus	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Tuen paksuus	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	1,25	1,25	1,25	1,5
Vaipan paksuus	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Tukien määrä	4	4	4	4	4	4	4	4	6	8	8

Uudet materiaalivahvuudet											
Katon paksuus	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9
Suoja	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Keskuslieriön paksuus	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9
Keskusputken paksuus	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	1,25	1,25
Kartion paksuus	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9
Tuen paksuus	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,25	1,25	1,25	1,25	1,5
Vaipan paksuus	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9
Tukien määrä	3	3	3	3	3	3	3	4	5	6	8

4.1.4 Mittalaitteet

Mittaussuureeksi valittiin luvuissa 2.3, 2.5 ja 2.8.4 värähtelyn nopeus, erityisesti sen huippuarvo v_p . Mittalaitteeksi (kuva 10) valikoitui kiihtyvyyssanturin käyttöön perustuva MMF:n VM25-tärinämittari (Vibration Meter VM25 2012). Siinä on sisäinen integraattori, joka muuntaa kiihtyvyyssarvot nopeusarvoiksi.



KUVA 10. MMF:n VM25-tärinämittarilla mitattiin värähtelyä laitteen ulkovaipasta

4.2 Testin suunnittelu ja valmistelut

EYMA-2-ulospuhalluslaitteen testejä edelsi rakennusvaihe, jossa kanavisto koottiin ja ulospuhalluslaite kiinnitettiin testaustelineeseen. Testeissä tutkittiin laitteen värähtelyä sen toiminta-alueella. Tutkimushypoteesina oli, että värähtely lisääntyy rakenteen keventyessä.

Tavoitteena oli selvittää, ovatko ohennetun rakenteen värähtelyt hyväksyttäviä verrattuna alkuperäiseen paksumpaan rakenneversioon. Lisäksi ulospuhalluslaitteen absoluuttisia värähtelyarvoja haluttiin verrata soveltuvien standardien raja-arvoihin.

4.3 Värähtelymittaukset

4.3.1 Ulospuhalluslaitteen mittaukset

Molempien laitteiden ulkovaipasta valittiin viisi mittauspistettä yhtenevistä kohdista, joissa värähtelyn arvioitiin olevan suurinta (kuva 11), luvussa 2.8.1 esitetyn standardin PSK 5712 mukaisesti. Ohennetun laitteen sivulta värähtelyä mitattiin myös kuudennesta mittauspisteestä (kuva 12), jota ei ole alkuperäisessä laitteessa.



KUVA 11. Mittauspisteet 1–5 ohennetussa ulospuhalluslaitteessa



KUVA 12. Lisämittauspiste ohennetun laitteen vaipan sivulla

Molemmista laitteista mitattiin kokonaisvärähtelytaso kaikilla VM25-värähtelymittarin tarjoamilla parametreilla (taulukko 7). Jokaisesta mittauspisteestä tehtiin kaikki kuusi mittausta kullakin virtaamalla Q: 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 ja 4000 l/s. Mittauspöytäkirjat ovat liitteissä 3 ja 4. Lisäksi mitattiin taajuusspektriä (luku 5.5, liite 5).

TAULUKKO 7. Alkuperäisen laitteen mittaussuureet ja huippuarvot, Q = 4000 l/s

Virtaama	Suodatin (Hz)	Q = 4000 l/s	Suure	Yksikkö	Mittaustyyppi	Mittauspisteen tunnistus					
						1	2	3	4	5	
10	–	1 000	Hz	v	mm/s	1	67,1	92,8	87,7	123,1	122,6
2	–	1 000	Hz	v	mm/s	2	88,2	99,5	136,1	170,8	136,8
0,2	–	10 000	Hz	a	m/s ²	3	19,4	21,5	28,1	29	33,5
3	–	1 000	Hz	a	m/s ²	4	21,7	21,5	24,2	26,7	25,3
1 000	–	10 000	Hz	a	m/s ²	5	2,2	2	2,4	2,1	1,9
5	–	200	Hz	x	mm	6	0,96	1,26	1,4	1,48	1,41

Tulosten tulkinnassa käytettiin lopulta vain värähtelynopeutta v eli kahta ensimmäistä mittausta, koska värähtelynopeuden todettiin olevan käyttökelpoisin tärinäsuure, kuten luvussa 2.5 todettiin. Värähtelymittausten lisäksi ulospuhalluslaitteen (kuva 13) värähtelyä arvioitiin kuuntelemalla, visuaalisesti ja sitä videoitiin.



KUVA 13. EYMA-2-063:n värähtelyä arvioitiin aistihavainnoin ja mittalaitteella.

4.3.2 Alkuperäisen ulospuhalluslaitteen mittaukset

Vahvemmassa materiaalista valmistetusta alkuperäisestä EYMA-2:sta mitattiin taajuusspektri alueella 2–11 Hz (luku 5.5: kuviot 14 ja 15) ja kokonaisvärähtelyn taso mittarin eri suodattimilla viidestä eri mittauspisteestä kuudella eri virtaamalla. Mittari tallensi automaattisesti sekä tehollisarvon v_{rms} , että huippuarvon v_p . Mittauspisteet siirrettiin VM25-mittarista valmistajan tekemällä makrolla taulukkolaskentaohjelmaan, jossa ne muokattiin mittauspöytäkirjan muotoon (taulukko 7, liite 3).

Äänenpainetaso mitattiin 1 m etäisyydeltä. Mittausympäristö oli ulkoilmassa ja liikenteen äänet kuuluivat läheltä, joten äänenpainetasoa ei lopulta hyödynnetty tulosten analysoinnissa. Ulospuhalluslaitteesta otettiin lisäksi kuvia, ja sen värähtelyä videoitiin.

4.3.3 Ohennetun ulospuhalluslaitteen mittaukset

Ohennetusta EYMA-2:sta mitattiin taajuusspektrit (luku 5.5) alueilla 2–22 Hz ja 2–90 Hz, suurimmilla virtaamilla vieläkin laajemmalla taajuusalueella (liite 5). Värähtelyspektri ja kokonaisvärähtelyn arvot mitattiin samoista viidestä mittauspisteestä kuin paksummastakin laitteesta. Lisäksi ohennetun laitteen arvot mitattiin ylimääräisestä, kuudennesta mittauspisteestä (kuva 12).

Äänenpainetaso mitattiin 1 m etäisyydeltä ja laitteesta otettiin valokuvia. Videota värähtelystä kuvattiin lähietäisyydeltä ylhäältä päin kameratuen varassa. Kuva-kaappauksessa videolta vaipan värähtely erottuu reunan epäterävyytenä (kuva 14).



KUVA 14. Vaipan värähtely erottui parhaiten ylhäältä päin (mittauspisteet 1 ja 2)

5 VÄRÄHTELYMITTAUKSEN TULOKSET

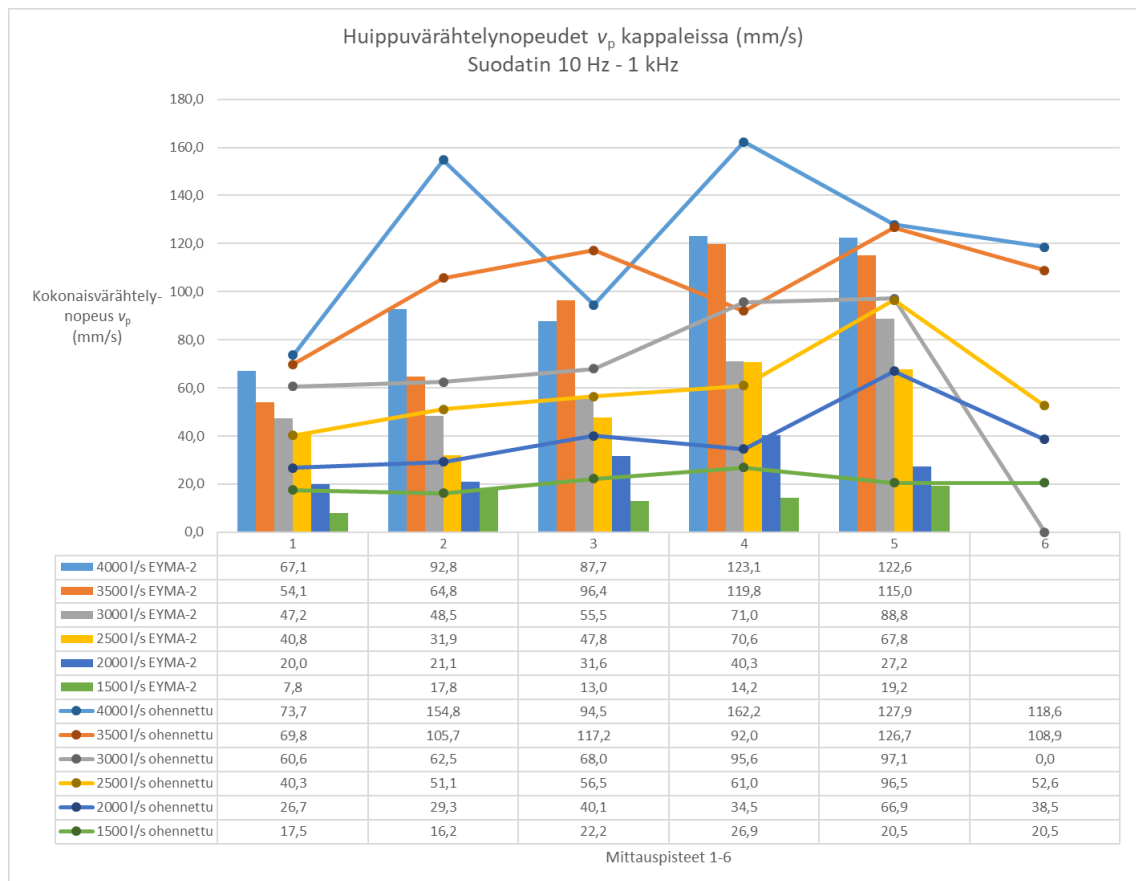
5.1 Tulosten analysoinnin perusta

Tässä opinnäytetyössä on sovellettu putkistovärähtelyä käsittelevää standardia PSK 5712, joka on esitelty luvussa 2.8.1. Standardin mukaisesti ensisijaisena mittaussuureena on käytetty värähtelyn nopeuden huippuarvoa (v_p), jolle turvallisen värähtelyn raja-arvona on käytetty värähtelyn nopeutta 60 mm/s (v_p) arvioitaessa ulospuhalluslaitteelle syntyviä rasituksia.

Standardia PSK 5712 seuraten mittaustulosten analysoinnissa on käytetty ainoastaan värähtelyn nopeutta koskevia mittauksia. Kiihtyvyyden ja siirtymän mittaustulokset esitetään ilman analyysiä, ne löytyvät mittauspöytäkirjoista (liitteet 3 ja 4).

5.2 Värähtelyn nopeuden kokonaistason absoluuttiset huippuarvot (v_p)

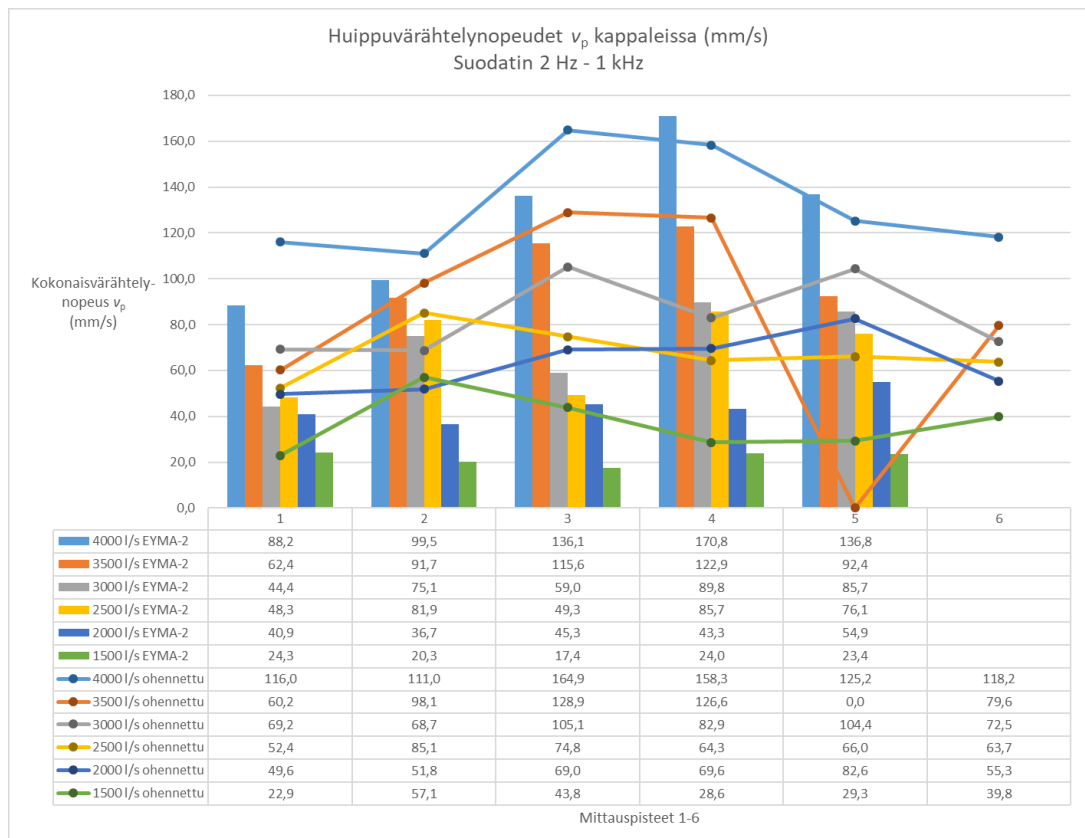
Kuviossa 8 on esitetty kokonaisvärähtelyn nopeuksien peak- eli huippuarvot v_p alkuperäisessä EYMA-2-ulospuhalluslaitteessa (pylväät) ja sen ohennetussa rakenneversiossa (pisteviiva) taajuusalueella 10 Hz – 1 kHz. Toisiaan vastaavia mittauspisteitä oli viisi, lisäksi ohennetussa laitteessa oli kuudes mittauspiste.



KUVIO 8. EYMA-2:n ja ohennetun version kokonaisvärähtelynopeuksien huippuarvot (v_p) ylittivät raja-arvon 60 mm/s monin paikoin (suodatin 10–1000 Hz).

Huomataan, että värähtelynopeuden huippuarvot ylittävät raja-arvon 60 mm/s molemmilla materiaalivahvuuksilla, kun virtaama $Q \geq 2500$ l/s. Lisäksi ohennettu laite ylittää 60 mm/s raja-arvon myös virtaamalla 2000 l/s mittauspisteessä 5.

Kuviossa 9 on esitetty kokonaisvärähtelynopeuksien huippuarvot v_p vastaavasti kuin kuviossa 8, ainoastaan laajemmalla taajuusalueella 2 Hz – 1 kHz. Huomataan, että tulokset ovat samansuuntaiset. Nyt raja-arvo 60 mm/s ylittyy ohennetussa laitteessa virtaamalla $Q = 2000$ l/s myös mittauspisteissä 3 ja 4.



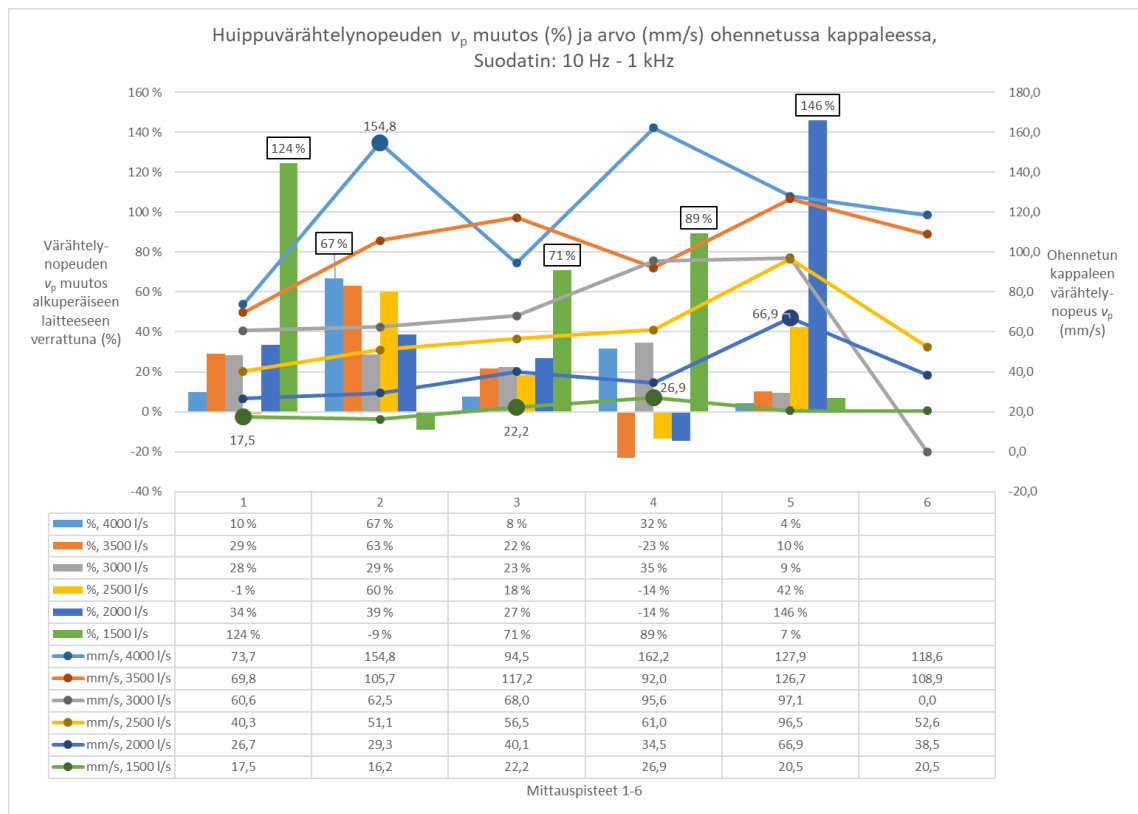
KUVIO 9. EYMA-2:n ja ohennetun version kokonaisvärähtelynnopeuksien huippuarvot (v_p) ylittivät raja-arvon 60 mm/s monin paikoin (suodatin 2–1000 Hz).

Yhteenvedona voidaan todeta, että ohennettu laite ylitti raja-arvon 60 mm/s suuressa osassa käyttöaluetta. Raja-arvon tosin ylitti myös alkuperäinen EYMA-2 melkein yhtä monessa kohdassa.

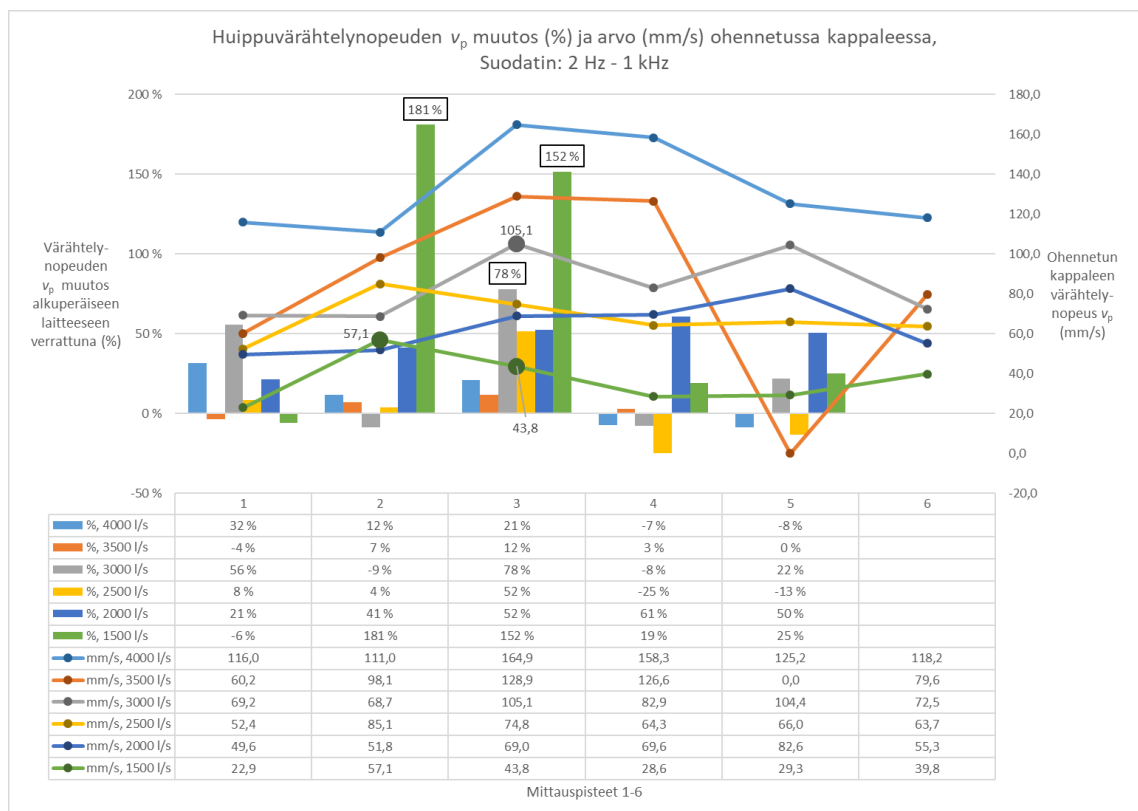
On kuitenkin selkeästi havaittavissa, että ohennetun laitteen värähtelynnopeuden arvot olivat korkeammalla kuin paksummasta materiaalista valmistetun EYMA-2:n arvot. Seuraavaksi tarkasteltiin, kuinka merkittävää värähtelynnopeuden arvojen kasvu ohennetussa laitteessa oli verrattuna alkuperäiseen laitteeseen.

5.3 Värähtelynnopeuden huippuarvon (v_p) suhteellinen kasvu

Kuvioissa 10 ja 11 on esitetty värähtelynnopeuden kokonaistason huippuarvojen v_p suhteellinen kasvu ohennetussa laitteessa verrattuna alkuperäiseen paksumpaan laitteeseen (pylväät ja vasemman laidan asteikko) sekä ohennetun laitteen värähtelynnopeuden v_p absoluuttiset arvot (pisteiviiva ja oikean laidan asteikko). Kuvion 10 taajuusalue on 10 Hz – 1 kHz ja kuvion 11 laajempi 2 Hz – 1 kHz.



KUVIO 10. Nopeuden huippuarvo (v_p) ohennetussa laitteessa ja muutos suhteessa alkuperäiseen laitteeseen (suodatin 10–1000 Hz)



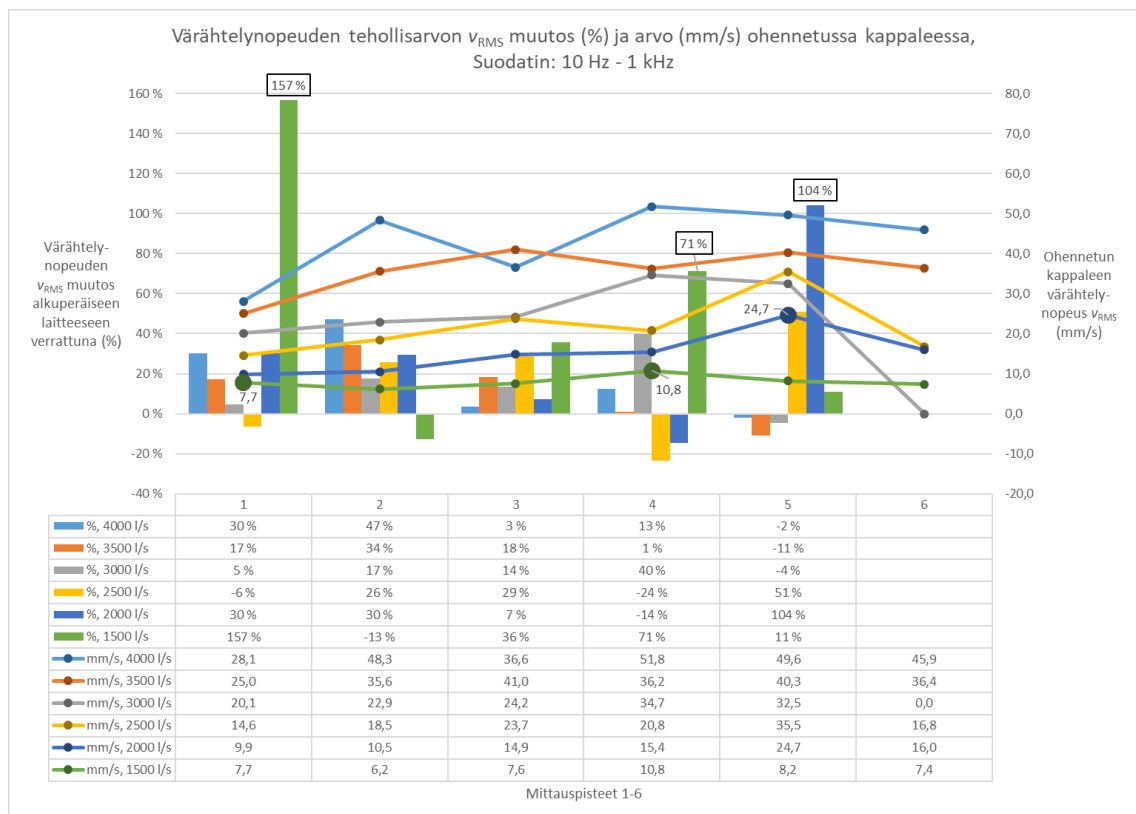
KUVIO 11. Nopeuden huippuarvo (v_p) ohennetussa laitteessa ja muutos suhteessa alkuperäiseen laitteeseen (suodatin 2–1000 Hz)

Suhteellisesti värähtelynopeuden huippuarvo kasvoi enimmillään 181 % (kuvio 11). Tätä vastaava absoluuttinen arvo oli kuitenkin 57,1 mm/s (v_p), mikä jäi alle raja-arvon 60 mm/s.

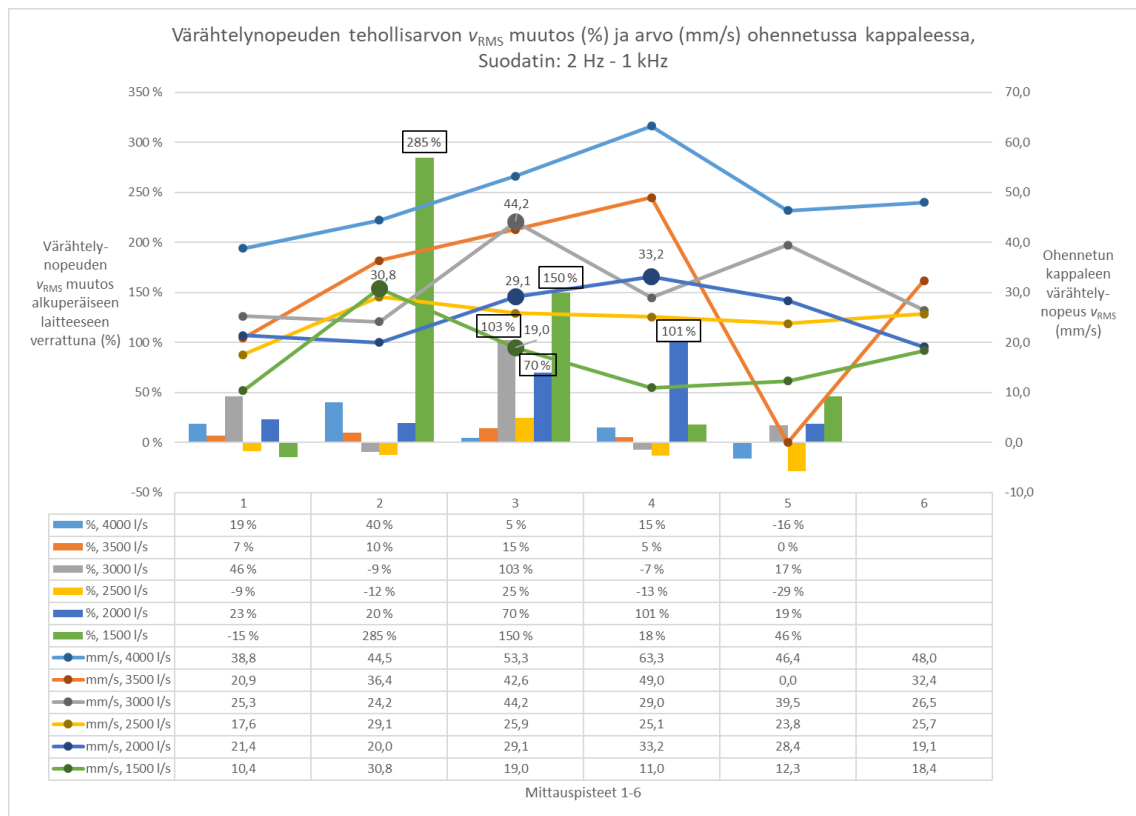
Siellä, missä huippuarvot ylsivät jopa 160 mm/s värähtelynopeuteen (kuviot 10 ja 11), oli suhteellinen kasvu enimmillään 67 % (kuvio 10). Tämän 67 % kasvaneen arvon 154,8 mm/s vertailuarvona alkuperäisessä laitteessa oli 92,8 mm/s (kuvio 8). Tämä tarkoittaa, että myös paksummasta materiaalista valmistetun EYMA-2:n värähtelynopeus ylitti raja-arvon 60 mm/s, kuten myös luvussa 5.2 on todettu.

5.4 Värähtelynopeuden tehollisarvon (v_{rms}) suhteellinen kasvu

Kuvioissa 12 ja 13 on esitetty kokonaisvärähtelytason tehollisarvojen v_{rms} suhteellinen kasvu ohennetussa kappaleessa verrattuna paksumpaan kappaleeseen sekä ohennetun kappaleen värähtelynopeuden absoluuttiset tehollisarvot v_{rms} . Kuvion 12 taajisuusalue on 10 Hz – 1 kHz ja kuvion 13 laajempi 2 Hz – 1 kHz.



KUVIO 12. Nopeuden tehollisarvo (v_{rms}) ohennetussa laitteessa ja muutos suhteessa alkuperäiseen laitteeseen (suodatin 10–1000 Hz)



KUVIO 13. Nopeuden tehollisarvo (v_{RMS}) ohennetussa laitteessa ja muutos suhteessa alkuperäiseen laitteeseen (suodatin 2–1000 Hz)

Suhteellisesti värähtelyn nopeuden tehollisarvon v_{RMS} kasvu oli paikoin huomattavaa: se kasvoi jopa 285 % (kuvio 13). Tämä 285 % kasvanut absoluuttinen tehollisarvo v_{RMS} oli kuitenkin vain 30,8 mm/s.

5.5 Värähtelyn nopeuden huippuarvon (v_p) taajuusspektri

Kuvioissa 14 ja 15 esitetään värähtelyn nopeuden huippuarvojen v_p taajuusspektrit alimmilla resonanssitaajuuksilla alueella 2–11,5 Hz käyttöalueen eri virtaamilla. Kuvioissa vasemmalla on alkuperäisen EYMA-2:n ja oikealla ohennetun version taajuusspektri vastaavalla virtaamalla.

Värähtelyn nopeuden v_p arvot on laskettu mittalaitteen rekisteröimästä alkuperäisestä kiihtyvyysspektristä kaavalla (8) seuraavasti:

$$v_p = \frac{a_p}{2\pi f} = \frac{0,8 \text{ m/s}^2}{2\pi \cdot 6,48 \text{ Hz}} = 0,0196 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 19,6 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

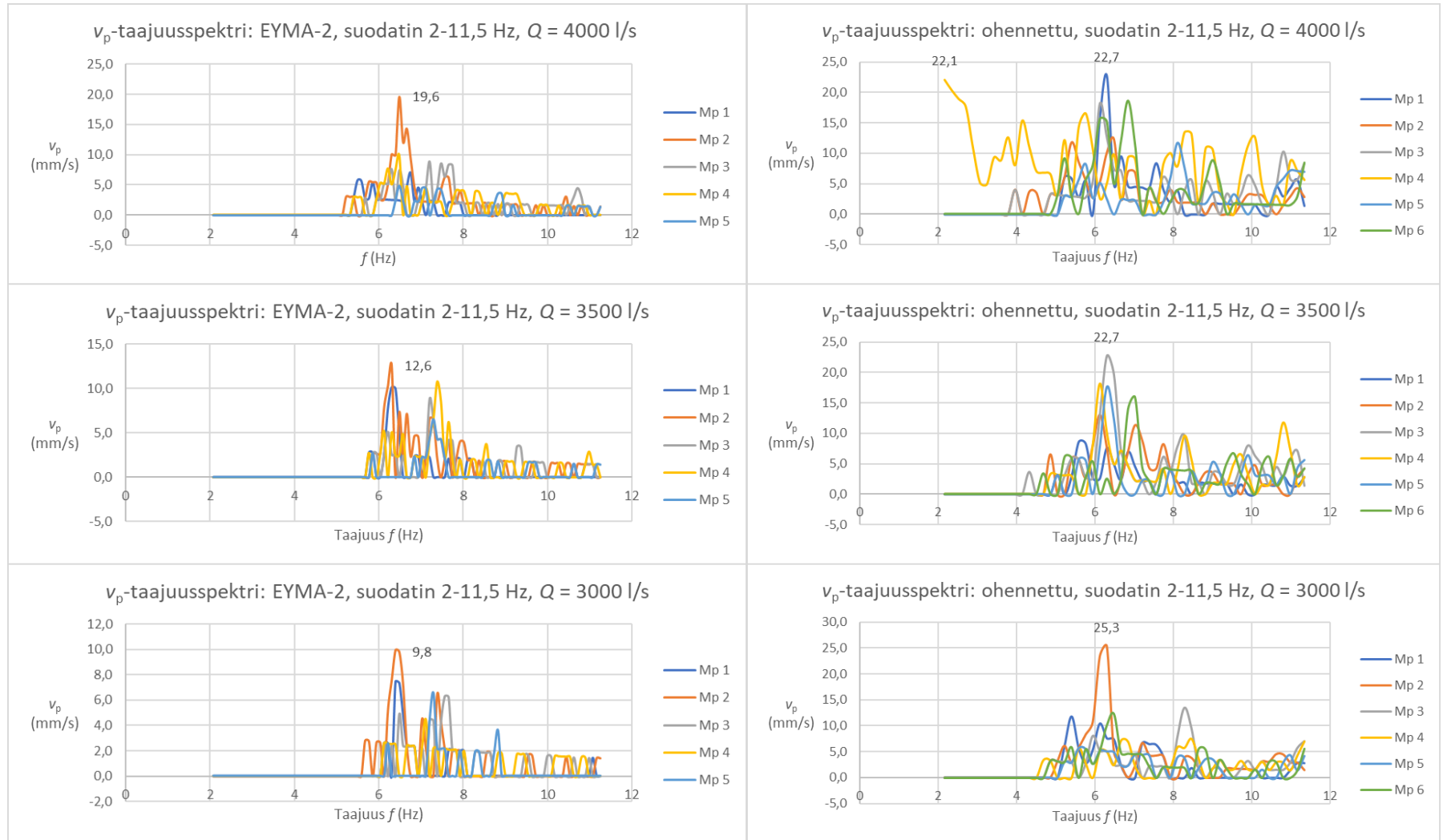
joka arvo vastaa kuvion 14 vasemman yläkuvaajan huippuarvoa (alkuperäinen EYMA-2, $Q = 4000$ l/s). Mittalaitteen tallentaman taajuusspektrin jokainen kiihtyvyyden a_p arvo on siis jaettu sinimuotoisen värähtelyn kulmanopeutta ω vastavalla termillä $2\pi f$, jossa f on taajuus kunkin näytteen kohdalla. Näin on saatu arvio nopeuden v_p arvosta kullakin taajuudella f ja muodostettu nopeuden v_p taajuusspektri.

Kuvioiden 14 ja 15 kuvaajista havaitaan, että ohennetun laitteen resonanssitaajuuksien huippuarvot ovat kasvaneet alkuperäiseen laitteeseen verrattuna. Alimmat resonanssitaajuudet olivat molemmissa laiteversioissa reilun 6 Hz kohdalla.

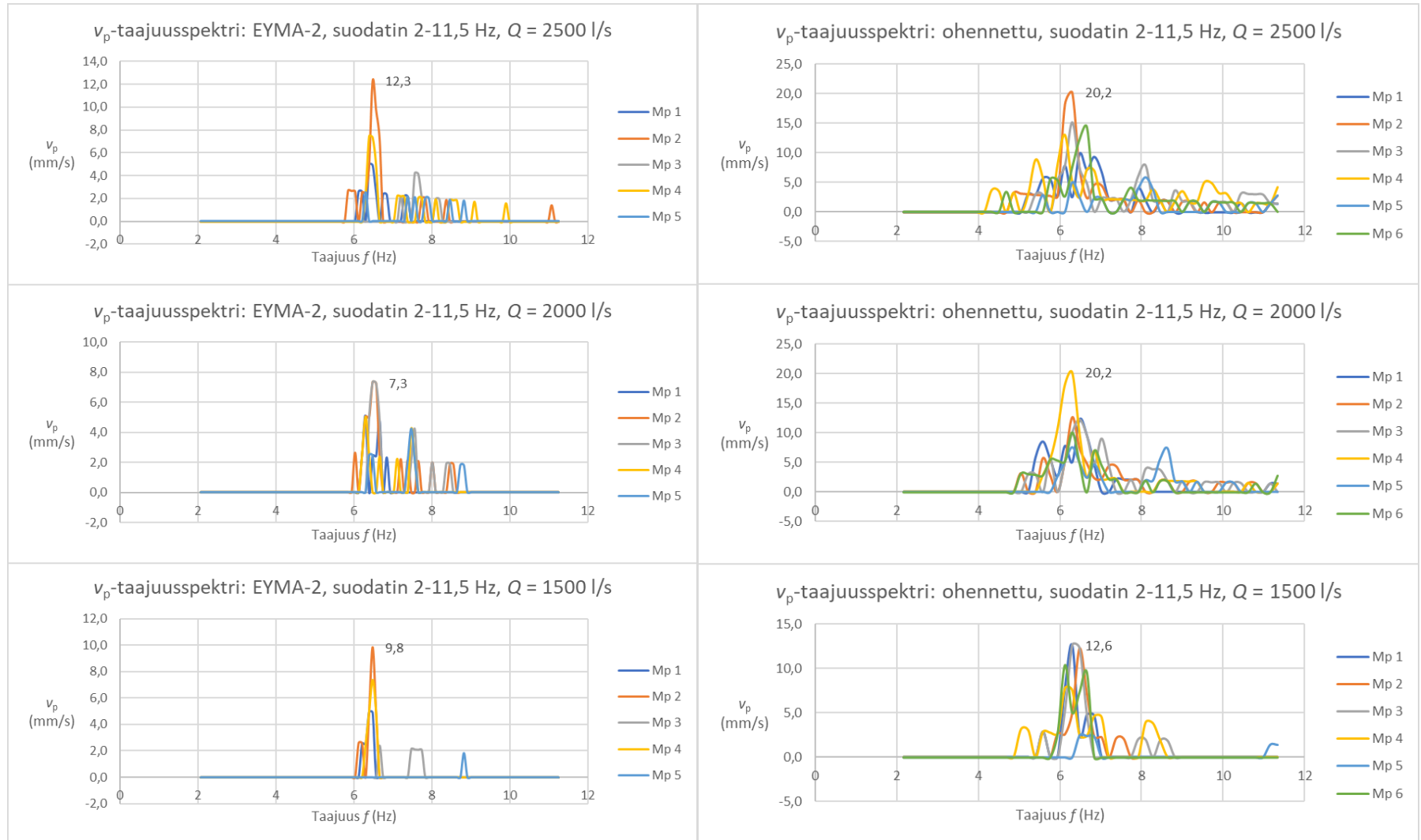
Ohennetussa laitteessa ilmeni heikkoa resonanssia jo 4–6 Hz alueella, suurimmalla virtaamalla $Q = 4000$ l/s jopa 2–4 Hz alueella. Alle kahden hertsin alue on rajattu pois alimmilla taajuuksilla esiintyvän epälineaarisuuden vuoksi (Mikkonen 2009, 220).

Hälyttäviä värähtelyn nopeuden huippuarvoja ei kuitenkaan havaittu, kun vertailukohtana pidettiin raja-arvoa $v_p = 60$ mm/s. On huomattava, että värähtelyn nopeuden huippuarvon v_p kokonaistaso (luvut 5.2 – 5.3) oli korkeampi kuin taajuusspektrissä esiintyneet arvot, koska kokonaisvärähtelyssä on summattu yhteen värähtelykomponentteja eri taajuuksilta.

Liitteessä 5 on esitetty ohennetun laitteen taajuusspektrejä laajemmilla, 2–11,5 Hz korkeammilla taajuusalueilla aina 1500 Hz asti virtaaman ollessa suurimmillaan, eli kun $Q = 4000$ l/s. Taajuusalueella 2–90 Hz tallennetusta spektristä erottui huippuarvo $v_p = 73,5$ mm/s, kun taajuus $f = 15,8$ Hz. Taajuusalueella 9–360 Hz erottuivat huiput $v_p = 82,3$ mm/s, kun $f = 8,7$ Hz sekä $v_p = 75,7$ mm/s, kun $f = 14,5$ Hz. Näitä lukuun ottamatta yksittäisillä taajuuksilla ei esiintynyt yli raja-arvon $v_p = 60$ mm/s olevia värähtelyn nopeuksia.



KUVIO 14. Värähtelynopeuden v_p taajuusspektrit virtaamalla 4000–3000 l/s: vasemmalla alkuperäinen, oikealla ohennettu laite.



KUVIO 15. Värähtelynopeuden v_p taajuusspektrit virtaamalla 2500–1500 l/s: vasemmalla alkuperäinen, oikealla ohennettu laite.

5.6 Alimman ominaistajuuden laskeminen

Mittauskohteena olleessa vaipassa oli havaittavissa ainakin säteen suunnassa tapahtuvaa, ominaisuudoltaan soikeaa värähtelyä. Mittausten lisäksi alin ominaistajuus tällaiselle värähtelylle määritettiin laskennallisesti kaavalla (18) niin kanavaputkelle, alkuperäiselle ulospuhalluslaitteelle kuin ohennetulle laitteelle:

$$f_{1_kanavaputki} = \frac{1,34}{\pi} \cdot \frac{0,0007 \text{ m}}{(0,315 \text{ m})^2} \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \text{ Pa}}{12 \cdot 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (1 - 0,3^2)}} = 4,7 \text{ Hz},$$

$$f_{1_EYMA2} = 2,3 \text{ Hz ja}$$

$$f_{1_ohennettu_laite} = 1,8 \text{ Hz.}$$

Muuttujien arvot materiaaliiltaan terästä olevalle laitteelle olivat

- putken seinämän paksuus
 - $S_{kanavaputki} = 0,7 \text{ mm}$
 - $S_{EYMA2} = 0,9 \text{ mm ja}$
 - $S_{ohennettu_laite} = 0,7 \text{ mm}$
- putken keskisäde
 - $R_{m_kanavaputki} = 0,315 \text{ m}$
 - $R_{m_EYMA2} = 0,5125 \text{ m ja}$
 - $R_{m_ohennettu_laite} = 0,5125 \text{ m}$
- kimmomoduuli $E = 210 \text{ GPa}$
- tiheys $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Poissonin luku teräkselle $\nu = 0,3$.

5.7 Muut testitulokset

Aistihavainnoin tarkasteltuna ohennetun ulospuhalluslaitteen värähtely ei juuri-kaan poikennut alkuperäisestä, vaan molemmat värähtelivät silminnähden etenkin suurimmilla virtaamilla. Kun ohennetun laitteen vaippaa poikkeutettiin käsin lepotilasta, se tuntui löysemmältä ja herkkäliikkeisemmältä kuin alkuperäinen.

Testeissä ei kuulunut helinää tai hankausääntä, jonka olisi aiheuttanut rakenteen tuottama värinä. Ainoastaan ilmavirran humina kuului. Päältä kuvatuissa videoissa (kuva 14) ääni särkyi ilmavirran puhaltaessa suoraan kameran mikrofoniin.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

EYMA-2-ulospuhalluslaitteen ohennetun version kokonaisvärähtelytaso ylitti suurimmassa osassa mittaustuloksia standardin PSK 5712 putkistovärähtelylle asetetun turvallisen värähtelyn raja-arvon $v_p = 60$ mm/s. Kuitenkin myös alkuperäinen paksummasta materiaalista tehty tuote ylitti tämän raja-arvon. Alkuperäinen tuote on käytännössä toimiva, mikä osoittaa, ettei putkistovärähtelyille standardissa annettuja arvoja voida suoraan pitää raja-arvoina tuotteelle. Keskinäinen vertailu oli kuitenkin mahdollista.

Ohennetun version värähtelytasot olivat selvästi korkeammalla kuin alkuperäisen paksumman version, asetetun hypoteesin mukaisesti. Värähtelynopeuksien suhteellinen kasvu ei kuitenkaan ollut silmiinpistävää raja-arvon ylittäneillä värähtelynopeuksilla. Molempien rakenneversioiden alimmat ominaistajuudet olivat spektrimittauksissa 6 Hz kohdalla, kun ne laskennallisesti asettuivat 2 Hz molemmiin puolin. Eroa selittää ainakin tuenta, jota laskentakaava ei huomioi. Kanava-putken laskennallinen ominaistajuus 4,7 Hz olikin lähempänä ulospuhalluslaitteista mitattua 6 Hz alinta ominaistajuutta.

Standardin PSK 5712 mukaan "Raja-arvon ylittäminen edellyttää lisäselvityksiä. Mikäli värähtelystä ei ole vaaraa, voidaan raja-arvoa nostaa" (2013, 5). Mikäli standardin mukaiset lisäselvitykset tehdään, ne tulisi loogisesti tehdä myös alkuperäiselle tuotteelle, koska raja-arvo ylittyi. Toisaalta alkuperäinen tuote on todettu vuosikymmenien kenttätestissä toimivaksi. Mittaustulosten arvioinnin perusteella siis todetaan, että ehdottomia värähtelyn kasvuun perustuvia rajoitteita materiaalin ohennuksen toteuttamiselle testatun tuotemodifikaation mukaisesti ei ole.

Opinnäytetyöhön sisältyi monipuolisia työvaiheita testijärjestelyn ja -telineen suunnittelusta mittausdatan muuntamiseen havainnolliseksi tiedoksi ja sen analysoimiseen. Testien valmisteluun ja testijärjestelyn rakentamiseen olisi voinut varata vieläkin enemmän aikaa, jolloin itse testit olisivat sujuneet jouhevammin. Työn luotettavuutta arvioitaessa on otettava huomioon kiihtyvyyssanturin mag-

neettikiinnitteisen mittapään massa, joka on koko värähtelevään massaan nähden pieni, mutta ei aivan mitätön. Vaikeutta osaltaan vertailuun toi lähimmän ole-massa olevan standardin soveltumattomuus, mikä havaittiin yhtenä tuloksena työssä.

Työ oli siinä mielessä onnistunut, että ulospuhalluslaitteet testattiin ja värähtelyn mittaustulokset analysoitiin. Tulokset eivät anna suoraa vastausta ohennetun laitteen käyttökelpoisuuteen sellaisenaan. Väsymiskestävyyden varmistamiseksi pitkällä aikavälillä esitetään mahdollisiksi jatkotoimenpiteiksi pidempiaikaista värähtelyrasitustestiä tai ohennetun rakenteen jäykistämistä, kunhan materiaalin ohennuksen tuomaa hyötyä ei menetetä.

Kehitysehdotuksena esitetään rakenne, jossa vaippa ja tuet ovat alkuperäisen vahvuiset, mutta sisärakenteet ohennetut. Vaippa on rakenteen eniten värähtelevä osa, joten sen ja tukien merkitys värähtelyn hillitsemisessä on olennainen. Jatkotutkimuksen arvoista on selvittää sisärakenteen kartion paikan merkitys korkeussuunnassa vaippaan nähden kuin myös kartion muodon ja ilman tulokulman merkitys sekä näiden vaikutukset edelleen värähtelyjen amplitudeihin.

LÄHTEET

- Autodesk Inventor. 2019. Mekaniikkasuunnittelu- ja 3D-CAD-ohjelmisto. Autodesk. Luettu 25.9.2019. <https://www.autodesk.fi/products/inventor/overview>
- EYMA ulospuhallushajottaja. 2019. BIM / Tuotetietomallit. FläktGroup. Luettu 15.10.2019. <https://www.flaktgroup.com/fi/products/air-management--atds/external-louvres--cowls/cowls/eyma-exhaust-air-roof-cowl/>
- Heideman, M. T., Johnson, D. H., Burrus, C. S. 1984. Gauss and the History of the Fast Fourier Transform. IEEE ASSP Magazine 1 (4), 14–21. Saatavissa myös: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1162257>
- Kurkela, K. 2011. Ulospuhallushajottimen valmistettavuuden parantaminen. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Turun ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Lahti, T. 2002. Värähtelyn ja melun vaimennuskeinot kulkuvälineissä ja liikkuvissa työkoneissa. Laskentaperiaatteita ja käyttöesimerkkejä. VTT Tiedotteita, n:o 2160. Liite 2: Kuljetusvälineiden vaimennusratkaisut – State-of-the-art-kirjallisuusselvitys. Espoo: Otamedia Oy. Saatavissa myös: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2160.pdf>
- Mansfield, M. & O’Sullivan, C. 1999. Understanding Physics. Reprinted with corrections. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Mikkonen, H. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Käsikirja. 1. painos. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 13. Helsinki: KP-Media Oy.
- Nohynek, P. & Lumme, V. 2004. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 2. täydennetty painos. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 11. Rajamäki: KP-Media Oy.
- Portfolio – FläktGroup. 2019. Triton. Luettu 14.10.2019. <https://www.triton-partners.com/portfolio/flaktgroup/>
- PSK 5701. 2017. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Käsitteet ja määritelmät. Käytettävät suureet ja mittayksiköt. 8. painos. PSK Standardisointi. Luettu 27.5.2019. <https://www.psk-standardisointi.fi/Standard/Ryhma57/PSK5701-8p.pdf>
- PSK 5708. 2018. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Rakenteelliset värähtelyominaisuudet. 3. painos. PSK Standardisointi. Luettu 21.5.2019. https://www.psk-standardisointi.fi/Standard/Ryhma57/PSK5708_3p.pdf
- PSK 5712. 2013. Kunnonvalvonta. Putkistovärähtelyn hallinta ja mittaus. 2. painos. PSK Standardisointi. Luettu 21.5.2019. <https://www.psk-standardisointi.fi/Standard/Ryhma57/PSK%205712-2p.pdf>

Taloustiedot. 2019. Suomen Asiakastieto Oy. Luettu 14.10.2019.

<https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/flaktgroup-finland-oy/24958758/taloustiedot>

Teknisiä tietoja ja taulukoita. 2000. Käsikirja. 10. painos. Suomalaiset ABB-yhtiöt. Vaasa: Ykkös-Offset Oy. Saatavissa myös:

<https://docplayer.fi/3514693-23-kunnonvalvonta-ja-huolto.html>

Tietoa meistä – FläktGroup Finland. 2019. FläktGroup Finland Oy. Luettu 14.10.2019. <https://www.flaktgroup.com/fi/tietoa-meista/>

Tietoa meistä – Fläkt Woods Oy. 2018. Fläkt Woods Oy. Luettu 14.10.2019. <https://web.archive.org/web/20180411214446/http://www.flaktwoods.fi/tietoa-meista/>

Tuotteet. 2019. FläktGroup Finland Oy. Luettu 14.10.2019.

<https://www.flaktgroup.com/fi/tuotteet/>

Ulospuhallushajotin EYMA-2 ja ilmanottoalaite DYMA-1. 2016. Tekninen esite. FläktGroup Finland Oy. Luettu 1.8.2019.

<https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/2ff43893-6015-4a30-8574-af65c403f2e0>

Ulospuhallushajotin EYMA. Ilmanottoalaite DYMA. 2009. Asennusohje. FläktGroup Finland Oy. Luettu 9.1.2019.

<https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/689ccc19-bbd7-46ee-8f1d-b47e6cd80a92>

Vibration Meter VM25. 2012. Käyttöohje. Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K. Luettu 5.3.2019. <https://www.mmf.de/manual/vm25mane.pdf>

Yrityshaku – Virre-tietopalvelu. 2019. Patentti- ja rekisterihallitus. Luettu 15.10.2019. <https://virre.prh.fi/novus/companySearch>

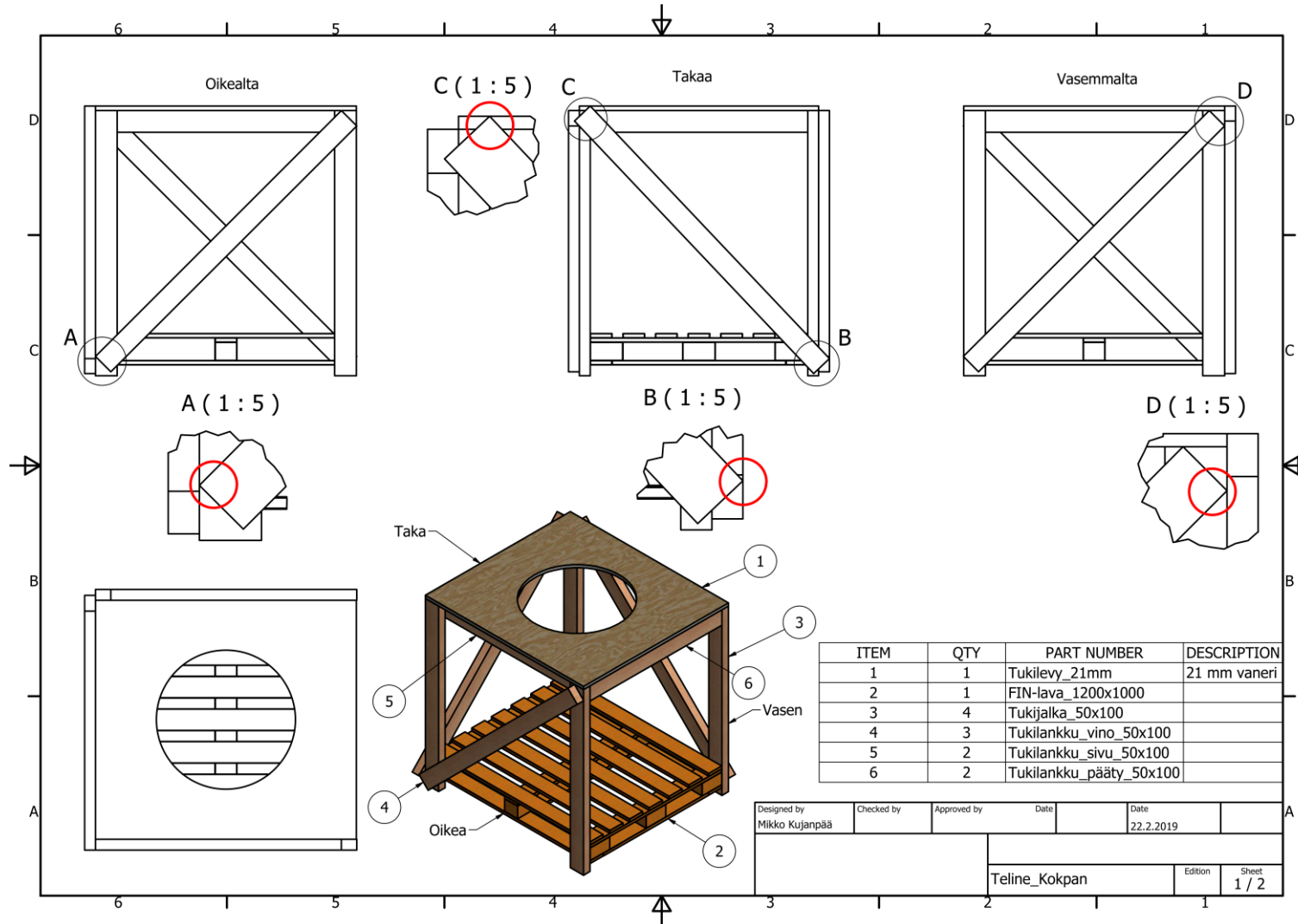
Yrityshaku – YTJ. 2019. Yritys- ja yhteisötietojärjestelmä YTJ. Luettu 14.10.2019.

<https://tietopalvelu.ytj.fi/yritystiedot.aspx?yavain=2407039&tarkiste=EB1B6195AE26D5BE51066357D8640633FA8A55BB>

LIITTEET

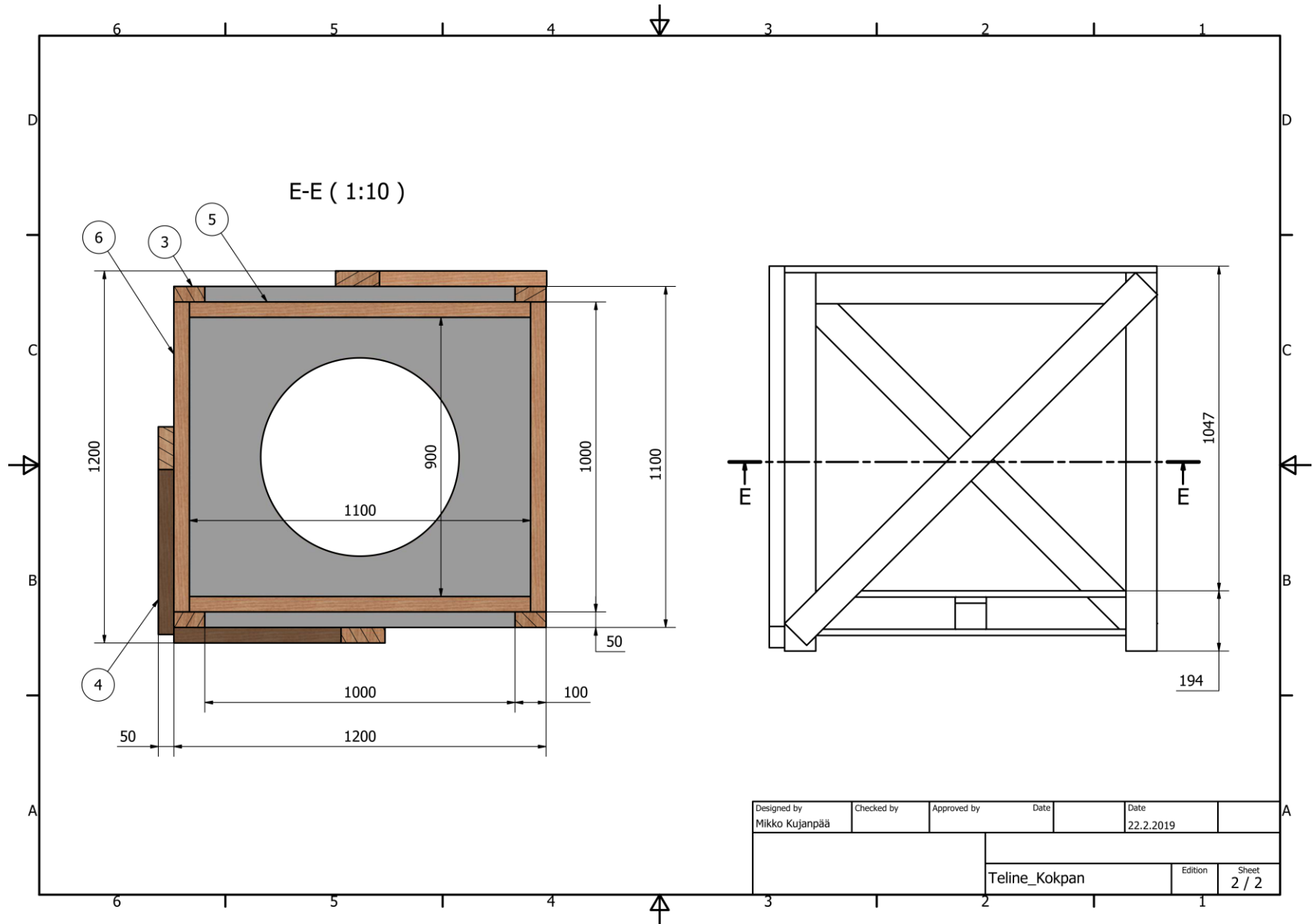
Liite 1. Testitelineen piirustukset

1 (2)



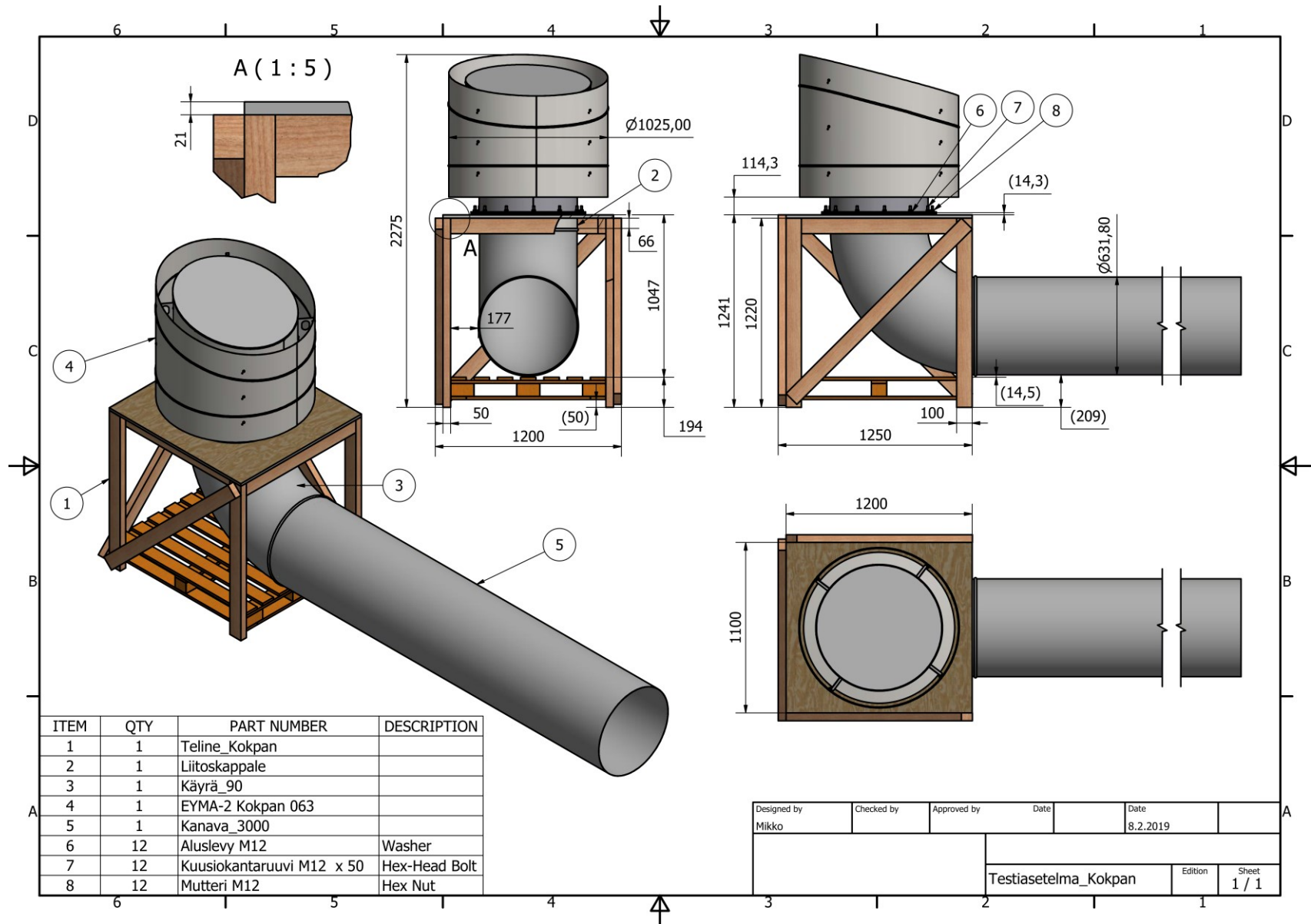
(jatkuu)

Testitelineen piirustukset



Designed by Mikko Kujanpää	Checked by	Approved by	Date	Date 22.2.2019	
			Teline_Kokpan		Edition Sheet 2 / 2

Liite 2. Testiasetelman piirustukset



Liite 3. Mittauspöytäkirja 1: EYMA-2, kokonaisvärähtelytaso

1 (4)

Tallenne	Q (l/s)	Mp	Suure	RMS	Peak	Unit	Filter	Date	Time
1	4000	1	v	21,6	67,1	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:11
2	4000	1	v	32,7	88,2	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:11
3	4000	1	a	5,3	19,4	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	15:12
4	4000	1	a	6,2	21,7	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:12
5	4000	1	a	0,5	2,2	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	15:12
6	4000	1	x	0,36	0,96	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	15:12
7	4000	2	v	32,8	92,8	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:13
8	4000	2	v	31,8	99,5	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:13
9	4000	2	a	5,8	21,5	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	15:14
10	4000	2	a	5,8	21,5	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:14
11	4000	2	a	0,5	2	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	15:14
12	4000	2	x	0,48	1,26	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	15:14
13	4000	3	v	35,4	87,7	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:15
14	4000	3	v	50,9	136,1	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:15
15	4000	3	a	7,6	28,1	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	15:15
16	4000	3	a	7,1	24,2	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:16
17	4000	3	a	0,5	2,4	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	15:16
18	4000	3	x	0,54	1,4	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	15:16
19	4000	4	v	46	123,1	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:17
20	4000	4	v	54,9	170,8	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:17
21	4000	4	a	8,1	29	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	15:17
22	4000	4	a	7,1	26,7	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:17
23	4000	4	a	0,5	2,1	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	15:18
24	4000	4	x	0,52	1,48	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	15:18
25	4000	5	v	50,6	122,6	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:19
26	4000	5	v	55	136,8	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:19
27	4000	5	a	9,3	33,5	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	15:19
28	4000	5	a	8,4	25,3	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:20
29	4000	5	a	0,5	1,9	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	15:20
30	4000	5	x	0,51	1,41	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	15:20
31	3500	1	v	21,3	54,1	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:49
32	3500	1	v	19,5	62,4	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:49
33	3500	1	a	3,9	15,4	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	15:49
34	3500	1	a	3,6	12,1	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:49
35	3500	1	a	0,3	1,4	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	15:50
36	3500	1	x	0,39	1,05	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	15:50
37	3500	2	v	26,5	64,8	mm/s	10Hz- 1kHz	25.3.19	15:50
38	3500	2	v	33,1	91,7	mm/s	2Hz- 1kHz	25.3.19	15:51
39	3500	2	a	4,4	15,5	m/s ²	0.2Hz- 10kHz	25.3.19	15:51
40	3500	2	a	4,5	14,7	m/s ²	3Hz- 1kHz	25.3.19	15:51
41	3500	2	a	0,3	1,2	m/s ²	1kHz- 10kHz	25.3.19	15:51
42	3500	2	x	0,4	1,06	mm	5Hz- 200Hz	25.3.19	15:52
43	3500	3	v	34,6	96,4	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:52
44	3500	3	v	37,2	115,6	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:52

(jatkuu)

Mittauspöytäkirja 1: EYMA-2, kokonaisvärähtelytaso

2 (4)

Tallenne	Q (l/s)	Mp	Suure	RMS	Peak	Unit	Filter	Date	Time
45	3500	3	a	OVER	OVER	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	15:53
46	3500	3	a	5,5	16,1	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:53
47	3500	3	a	0,3	1,3	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	15:53
48	3500	3	x	0,54	1,52	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	15:54
49	3500	4	v	35,9	119,8	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:54
50	3500	4	v	46,5	122,9	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:54
51	3500	4	a	6,1	20,6	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	15:54
52	3500	4	a	8,4	22,3	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:55
53	3500	4	a	0,3	1,3	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	15:55
54	3500	4	x	0,47	1,11	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	15:55
55	3500	5	v	45,2	115	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:56
56	3500	5	v	35,8	92,4	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:56
57	3500	5	a	6,1	22,6	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	15:56
58	3500	5	a	5,8	18,3	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	15:56
59	3500	5	a	0,3	1,3	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	15:57
60	3500	5	x	0,45	1,2	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	15:57
61	3000	1	v	19,2	47,2	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:10
62	3000	1	v	17,3	44,4	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:10
63	3000	1	a	4,6	55,4	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:10
64	3000	1	a	2,63	8,71	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:10
65	3000	1	a	0,22	0,87	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:10
66	3000	1	x	0,28	0,881	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:11
67	3000	2	v	19,5	48,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:11
68	3000	2	v	26,7	75,1	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:11
69	3000	2	a	3,1	11,7	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:12
70	3000	2	a	2,8	9,6	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:12
71	3000	2	a	0,2	0,8	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:12
72	3000	2	x	0,49	1,34	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:12
73	3000	3	v	21,3	55,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:13
74	3000	3	v	21,8	59	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:13
75	3000	3	a	4	14	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:13
76	3000	3	a	4,7	12,9	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:13
77	3000	3	a	0,2	0,8	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:13
78	3000	3	x	0,4	1,17	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:14
79	3000	4	v	24,8	71	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:14
80	3000	4	v	31,1	89,8	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:14
81	3000	4	a	4,7	16,6	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:14
82	3000	4	a	3,9	12,8	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:15
83	3000	4	a	0,2	0,9	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:15
84	3000	4	x	0,41	1,17	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:15
85	3000	5	v	34	88,8	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:15
86	3000	5	v	33,7	85,7	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:15
87	3000	5	a	4,5	16,3	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:16
88	3000	5	a	5,7	16,7	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:16
89	3000	5	a	0,2	0,8	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:16
90	3000	5	x	0,39	0,96	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:16

Mittauspöytäkirja 1: EYMA-2, kokonaisvärähtelytaso

3 (4)

Tallenne	Q (l/s)	Mp	Suure	RMS	Peak	Unit	Filter	Date	Time
91	2500	1	v	15,6	40,8	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:25
92	2500	1	v	19,3	48,3	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:25
93	2500	1	a	1,54	5,58	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:26
94	2500	1	a	1,38	4,84	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:26
95	2500	1	a	0,12	0,49	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:26
96	2500	1	x	0,307	0,742	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:26
97	2500	2	v	14,7	31,9	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:27
98	2500	2	v	33,1	81,9	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:27
99	2500	2	a	1,93	7,97	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:27
100	2500	2	a	2,29	6,39	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:28
101	2500	2	a	0,12	0,49	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:28
102	2500	2	x	0,306	0,749	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:28
103	2500	3	v	18,4	47,8	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:30
104	2500	3	v	20,8	49,3	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:31
105	2500	3	a	5,4	73,8	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:31
106	2500	3	a	2,19	6,49	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:31
107	2500	3	a	0,12	0,44	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:31
108	2500	3	x	0,398	1,014	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:31
109	2500	4	v	27,2	70,6	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:32
110	2500	4	v	28,9	85,7	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:32
111	2500	4	a	4,4	55	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:32
112	2500	4	a	2,89	8,53	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:32
113	2500	4	a	0,12	0,46	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:32
114	2500	4	x	0,383	0,922	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:33
115	2500	5	v	23,5	67,8	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:33
116	2500	5	v	33,3	76,1	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:33
117	2500	5	a	5,6	63,2	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:33
118	2500	5	a	2,57	7,84	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:33
119	2500	5	a	0,12	0,48	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:34
120	2500	5	x	0,321	0,936	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:34
121	2000	1	v	7,6	20	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:49
122	2000	1	v	17,4	40,9	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:49
123	2000	1	a	0,91	3,54	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:50
124	2000	1	a	1,01	2,85	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:50
125	2000	1	a	0,06	0,24	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:50
126	2000	1	x	0,214	0,532	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:50
127	2000	2	v	8,1	21,1	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:50
128	2000	2	v	16,7	36,7	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:50
129	2000	2	a	1,39	5,1	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:51
130	2000	2	a	1,28	3,91	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:51
131	2000	2	a	0,06	0,24	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:51
132	2000	2	x	0,312	0,943	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:51
133	2000	3	v	13,9	31,6	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:52
134	2000	3	v	17,1	45,3	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:52
135	2000	3	a	1,32	4,92	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:52
136	2000	3	a	1,49	4,37	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:52

Mittauspöytäkirja 1: EYMA-2, kokonaisvärähtelytaso

4 (4)

Tallenne	Q (l/s)	Mp	Suure	RMS	Peak	Unit	Filter	Date	Time
137	2000	3	a	0,06	0,23	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:52
138	2000	3	x	0,202	0,539	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:53
139	2000	4	v	18	40,3	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:53
140	2000	4	v	16,5	43,3	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:53
141	2000	4	a	1,57	5,59	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:54
142	2000	4	a	1,43	4,15	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:54
143	2000	4	a	0,06	0,25	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:54
144	2000	4	x	0,235	0,537	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:54
145	2000	5	v	12,1	27,2	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:55
146	2000	5	v	23,9	54,9	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:55
147	2000	5	a	2,35	7,72	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	16:55
148	2000	5	a	2,27	5,61	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	16:55
149	2000	5	a	0,06	0,22	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	16:56
150	2000	5	x	0,228	0,613	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	16:56
151	1500	1	v	3	7,8	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:06
152	1500	1	v	12,2	24,3	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:07
153	1500	1	a	0,57	2,08	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	17:07
154	1500	1	a	0,36	1,11	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:07
155	1500	1	a	0,02	0,1	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	17:08
156	1500	1	x	0,121	0,3	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	17:08
157	1500	2	v	7,1	17,8	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:08
158	1500	2	v	8	20,3	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:08
159	1500	2	a	0,61	2,01	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	17:08
160	1500	2	a	0,78	2,29	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:09
161	1500	2	a	0,02	0,1	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	17:09
162	1500	2	x	0,24	0,517	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	17:09
163	1500	3	v	5,6	13	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:09
164	1500	3	v	7,6	17,4	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:09
165	1500	3	a	0,77	2,73	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	17:10
166	1500	3	a	0,93	2,53	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:10
167	1500	3	a	0,02	0,11	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	17:10
168	1500	3	x	0,122	0,332	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	17:10
169	1500	4	v	6,3	14,2	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:11
170	1500	4	v	9,3	24	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:11
171	1500	4	a	0,88	2,91	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	17:11
172	1500	4	a	0,81	2,33	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:11
173	1500	4	a	0,02	0,1	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	17:11
174	1500	4	x	0,184	0,446	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	17:12
175	1500	5	v	7,4	19,2	mm/s	10 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:12
176	1500	5	v	8,4	23,4	mm/s	2 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:12
177	1500	5	a	0,78	2,98	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	25.3.19	17:12
178	1500	5	a	0,79	2,67	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	25.3.19	17:13
179	1500	5	a	0,02	0,14	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	25.3.19	17:13
180	1500	5	x	0,107	0,285	mm	5 Hz – 200 Hz	25.3.19	17:13
181			t	000000	000012	°C		25.3.19	17:13

Liite 4. Mittauspöytäkirja 2: Ohennettu, kokonaisvärähtelytaso

1 (5)

Tallenne	Q (l/s)	Mp	Suure	RMS	Peak	Unit	Filter	Date	Time
1	1500	1	v	7,7	17,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:09
2	1500	1	v	10,4	22,9	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:09
3	1500	1	a	0,78	2,24	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:10
4	1500	1	a	0,66	2,16	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:10
5	1500	1	a	0,02	0,1	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:10
6	1500	1	x	0,159	0,386	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:10
7	1500	2	v	6,2	16,2	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:13
8	1500	2	v	30,8	57,1	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:13
9	1500	2	a	0,83	2,94	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:13
10	1500	2	a	0,87	2,16	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:13
11	1500	2	a	0,02	0,1	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:13
12	1500	2	x	0,303	0,789	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:14
13	1500	3	v	7,6	22,2	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:19
14	1500	3	v	19	43,8	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:19
15	1500	3	a	0,88	2,6	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:19
16	1500	3	a	1,27	3,43	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:19
17	1500	3	a	0,01	0,07	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:19
18	1500	3	x	0,246	0,567	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:20
19	1500	4	v	10,8	26,9	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:20
20	1500	4	v	11	28,6	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:20
21	1500	4	a	0,95	3,04	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:20
22	1500	4	a	1,01	3,32	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:20
23	1500	4	a	0,01	0,09	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:21
24	1500	4	x	0,306	2,951	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:21
25	1500	5	v	8,2	20,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:21
26	1500	5	v	12,3	29,3	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:21
27	1500	5	a	1,11	3,93	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:22
28	1500	5	a	1,18	3,16	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:22
29	1500	5	a	0,01	0,07	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:22
30	1500	5	x	0,23	2,186	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:22
31	1500	6	v	7,4	20,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:23
32	1500	6	v	18,4	39,8	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:23
33	1500	6	a	0,97	3,37	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:23
34	1500	6	a	0,74	2,26	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:23
35	1500	6	a	0,02	0,09	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:23
36	1500	6	x	0,171	0,488	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:24
37	2000	1	v	9,9	26,7	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:35
38	2000	1	v	21,4	49,6	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:35
39	2000	1	a	1,35	4,9	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:36
40	2000	1	a	1,24	3,63	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:36
41	2000	1	a	0,04	0,16	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:36
42	2000	1	x	0,247	0,657	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:36

(jatkuu)

Mittauspöytäkirja 2: Ohennettu, kokonaisvärähtelytaso

2 (5)

Tallenne	Q (l/s)	Mp	Suure	RMS	Peak	Unit	Filter	Date	Time
43	2000	2	v	10,5	29,3	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:37
44	2000	2	v	20	51,8	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:37
45	2000	2	a	1,68	5,63	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:37
46	2000	2	a	1,51	4,78	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:37
47	2000	2	a	0,04	0,17	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:38
48	2000	2	x	0,363	1,067	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:38
49	2000	3	v	14,9	40,1	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:38
50	2000	3	v	29,1	69	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:38
51	2000	3	a	1,83	6,28	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:38
52	2000	3	a	1,93	5,19	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:39
53	2000	3	a	0,04	0,17	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:39
54	2000	3	x	0,457	3,05	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:39
55	2000	4	v	15,4	34,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:39
56	2000	4	v	33,2	69,6	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:39
57	2000	4	a	2,05	7,71	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:40
58	2000	4	a	1,65	4,85	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:40
59	2000	4	a	OVER	OVER	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:40
60	2000	4	x	0,481	3,158	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:40
61	2000	5	v	24,7	66,9	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:40
62	2000	5	v	28,4	82,6	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:40
63	2000	5	a	2,22	7,17	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:41
64	2000	5	a	2,05	5,88	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:41
65	2000	5	a	0,04	0,17	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:41
66	2000	5	x	0,396	3,621	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:41
67	2000	6	v	16	38,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:42
68	2000	6	v	19,1	55,3	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:42
69	2000	6	a	1,83	6,05	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:42
70	2000	6	a	1,76	5,57	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:42
71	2000	6	a	0,04	0,18	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:42
72	2000	6	x	0,477	3,623	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:42
73	2500	1	v	14,6	40,3	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:57
74	2500	1	v	17,6	52,4	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:57
75	2500	1	a	1,81	6,11	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:58
76	2500	1	a	1,55	5,34	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:58
77	2500	1	a	0,08	0,33	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:58
78	2500	1	x	0,369	1,298	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:58
79	2500	2	v	18,5	51,1	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:58
80	2500	2	v	29,1	85,1	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:58
81	2500	2	a	5,6	62,1	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	10:59
82	2500	2	a	3	9,6	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:59
83	2500	2	a	0,08	0,33	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	10:59
84	2500	2	x	0,436	3,352	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	10:59
85	2500	3	v	23,7	56,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	10:59
86	2500	3	v	25,9	74,8	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:00
87	2500	3	a	5	63,2	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:00

Mittauspöytäkirja 2: Ohennettu, kokonaisvärähtelytaso

3 (5)

Tallenne	Q (l/s)	Mp	Suure	RMS	Peak	Unit	Filter	Date	Time
88	2500	3	a	22	70	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:00
89	2500	3	a	0,08	0,32	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:00
90	2500	3	x	0,572	2,781	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:00
91	2500	4	v	20,8	61	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:01
92	2500	4	v	25,1	64,3	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:01
93	2500	4	a	5,7	125,8	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:01
94	2500	4	a	3,1	10,5	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:01
95	2500	4	a	0	0,3	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:01
96	2500	4	x	0,41	1,12	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:01
97	2500	5	v	35,5	96,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:02
98	2500	5	v	23,8	66	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:02
99	2500	5	a	5,8	78,7	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:02
100	2500	5	a	3	8,8	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:02
101	2500	5	a	0	0,2	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:02
102	2500	5	x	0,39	1,12	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:02
103	2500	6	v	16,8	52,6	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:11
104	2500	6	v	25,7	63,7	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:11
105	2500	6	a	5,2	56,9	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:11
106	2500	6	a	3,5	10	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:11
107	2500	6	a	0,08	0,32	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:11
108	2500	6	x	0,318	0,859	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:12
109	3000	1	v	20,1	60,6	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:24
110	3000	1	v	25,3	69,2	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:24
111	3000	1	a	4,1	54,9	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:24
112	3000	1	a	2,9	9,9	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:25
113	3000	1	a	0,1	0,6	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:25
114	3000	1	x	0,46	7,29	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:25
115	3000	2	v	22,9	62,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:25
116	3000	2	v	24,2	68,7	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:25
117	3000	2	a	7,4	84,5	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:25
118	3000	2	a	3,4	10,5	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:26
119	3000	2	a	0,1	0,5	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:26
120	3000	2	x	0,56	1,36	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:26
121	3000	3	v	24,2	68	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:26
122	3000	3	v	44,2	105,1	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:26
123	3000	3	a	7,1	101,3	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:27
124	3000	3	a	6,1	19,9	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:27
125	3000	3	a	0,1	0,5	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:27
126	3000	3	x	0,56	1,61	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:27
127	3000	4	v	34,7	95,6	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:27
128	3000	4	v	29	82,9	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:27
129	3000	4	a	7,4	105,9	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:28
130	3000	4	a	4,1	11,9	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:28
131	3000	4	a	0,1	0,5	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:28
132	3000	4	x	0,54	1,39	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:28

Mittauspöytäkirja 2: Ohennettu, kokonaisvärähtelytaso

4 (5)

Tallenne	Q (l/s)	Mp	Suure	RMS	Peak	Unit	Filter	Date	Time
133	3000	5	v	32,5	97,1	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:28
134	3000	5	v	39,5	104,4	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:28
135	3000	5	a	9	95,6	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:29
136	3000	5	a	6	17,9	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:29
137	3000	5	a	0,1	0,6	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:29
138	3000	5	x	0,4	1,14	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:29
139	3000	6	v	OVER	OVER	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:29
140	3000	6	v	26,5	72,5	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:30
141	3000	6	a	5,6	59,2	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:30
142	3000	6	a	4,2	11,8	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:30
143	3000	6	a	0,1	0,5	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:30
144	3000	6	x	0,94	17,04	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:30
145	3500	1	v	25	69,8	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:43
146	3500	1	v	20,9	60,2	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:43
147	3500	1	a	5,7	62,7	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:43
148	3500	1	a	3,9	13,5	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:43
149	3500	1	a	0,2	0,9	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:43
150	3500	1	x	0,43	1,14	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:44
151	3500	2	v	35,6	105,7	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:44
152	3500	2	v	36,4	98,1	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:44
153	3500	2	a	10,3	113,2	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:44
154	3500	2	a	5,7	16,9	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:44
155	3500	2	a	0,2	1	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:44
156	3500	2	x	0,82	2,11	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:45
157	3500	3	v	41	117,2	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:45
158	3500	3	v	42,6	128,9	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:45
159	3500	3	a	8,8	126,1	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:45
160	3500	3	a	6,3	20,1	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:45
161	3500	3	a	0,2	0,9	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:46
162	3500	3	x	0,61	1,7	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:46
163	3500	4	v	36,2	92	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:46
164	3500	4	v	49	126,6	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:46
165	3500	4	a	8,5	118,2	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:47
166	3500	4	a	6,1	19,9	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:47
167	3500	4	a	0,2	0,9	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:47
168	3500	4	x	0,56	1,53	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:47
169	3500	5	v	40,3	126,7	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:47
170	3500	5	v	OVER	OVER	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:48
171	3500	5	a	10,5	151	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:48
172	3500	5	a	6,6	20,3	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:48
173	3500	5	a	0,2	0,8	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:48
174	3500	5	x	0,48	1,24	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:48

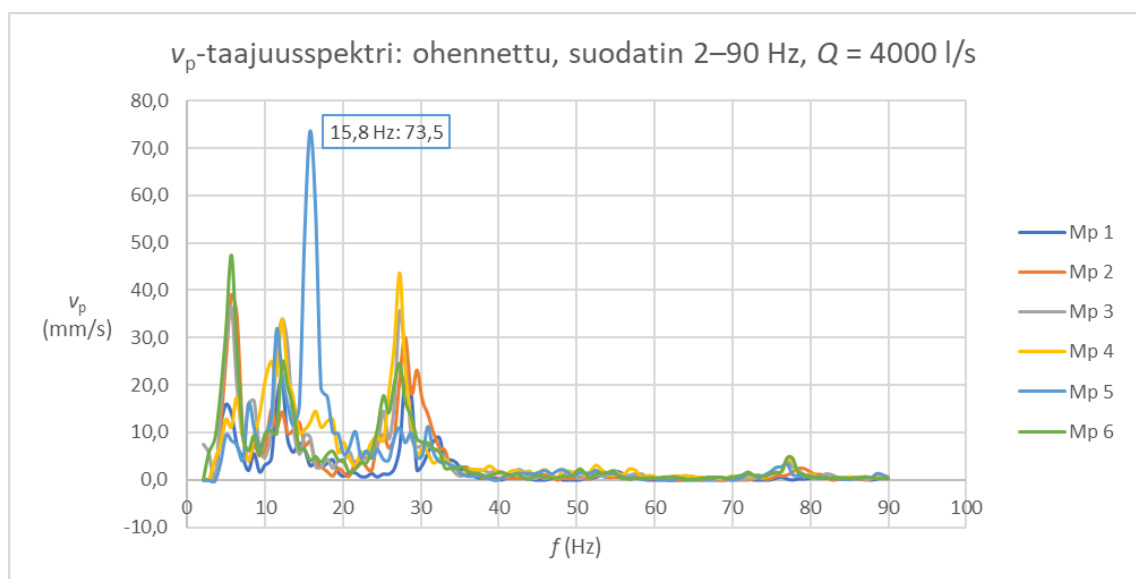
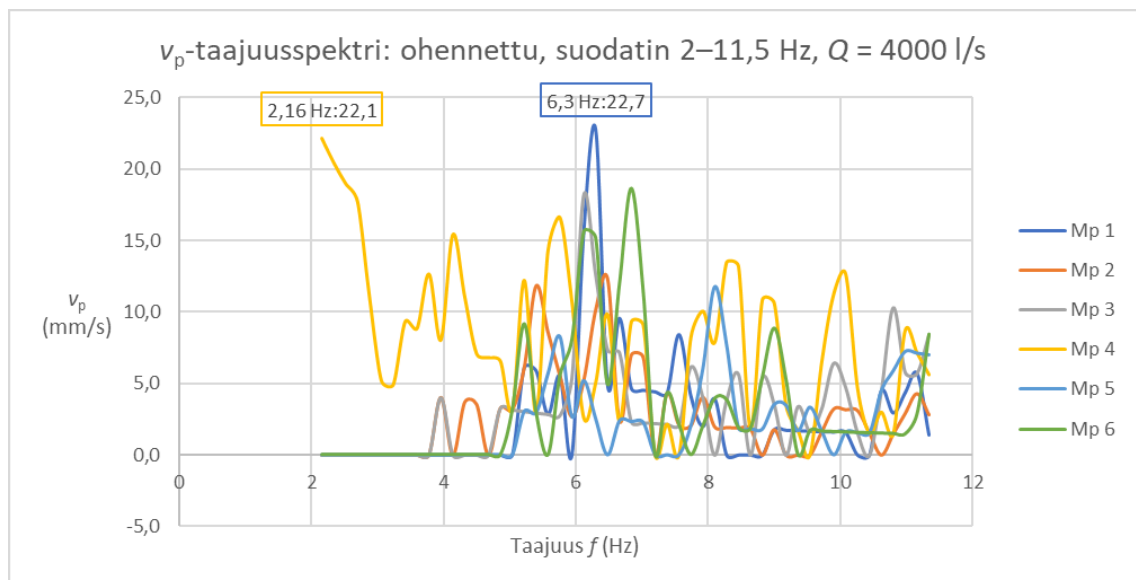
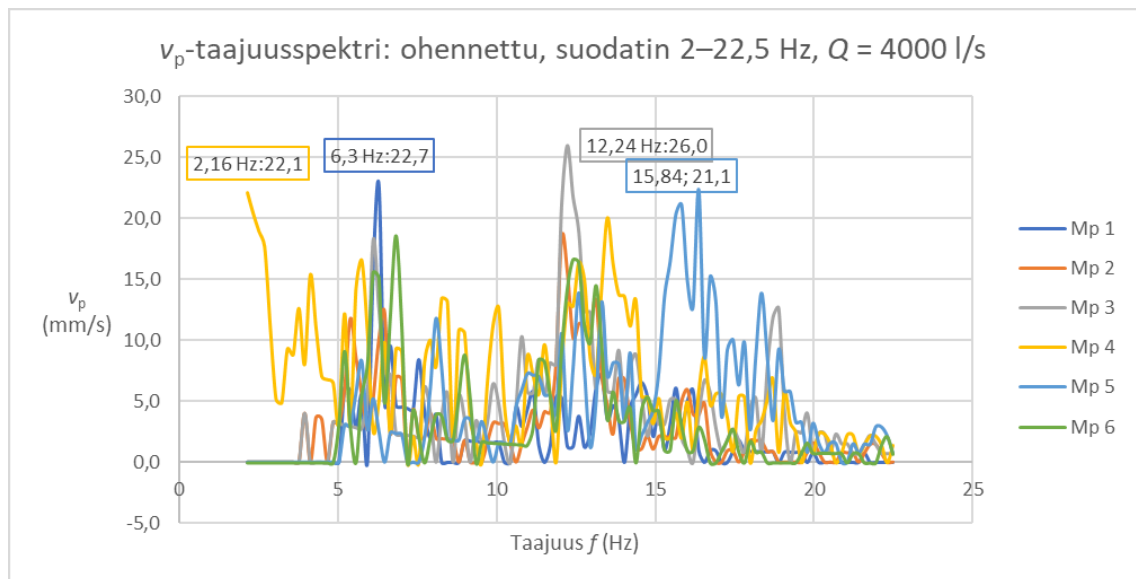
Mittauspöytäkirja 2: Ohennettu, kokonaisvärähtelytaso

5 (5)

Tallenne	Q (l/s)	Mp	Suure	RMS	Peak	Unit	Filter	Date	Time
175	3500	6	v	36,4	108,9	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:49
176	3500	6	v	32,4	79,6	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:49
177	3500	6	a	11	153,9	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	11:49
178	3500	6	a	5,3	16,4	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	11:49
179	3500	6	a	0,2	0,9	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	11:49
180	3500	6	x	0,63	1,59	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	11:50
181	4000	1	v	28,1	73,7	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:04
182	4000	1	v	38,8	116	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:04
183	4000	1	a	7,6	96,3	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	12:04
184	4000	1	a	5,7	20	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:04
185	4000	1	a	0,3	1,5	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	12:04
186	4000	1	x	0,58	1,57	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	12:05
187	4000	2	v	48,3	154,8	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:05
188	4000	2	v	44,5	111	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:05
189	4000	2	a	10,3	114,7	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	12:05
190	4000	2	a	7,2	22	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:06
191	4000	2	a	0,4	1,5	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	12:06
192	4000	2	x	0,9	2,26	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	12:06
193	4000	3	v	36,6	94,5	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:07
194	4000	3	v	53,3	164,9	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:07
195	4000	3	a	15,3	170,8	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	12:07
196	4000	3	a	6,6	20,7	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:07
197	4000	3	a	0,3	1,4	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	12:08
198	4000	3	x	0,65	2,05	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	12:08
199	4000	4	v	51,8	162,2	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:08
200	4000	4	v	63,3	158,3	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:08
201	4000	4	a	OVER	OVER	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	12:08
202	4000	4	a	7,1	20,9	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:09
203	4000	4	a	0,3	1,4	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	12:09
204	4000	4	x	0,83	2,02	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	12:09
205	4000	5	v	49,6	127,9	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:09
206	4000	5	v	46,4	125,2	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:09
207	4000	5	a	12,6	148,4	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	12:10
208	4000	5	a	8,2	27,2	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:10
209	4000	5	a	0,3	1,4	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	12:10
210	4000	5	x	0,68	1,95	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	12:10
211	4000	6	v	45,9	118,6	mm/s	10 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:11
212	4000	6	v	48	118,2	mm/s	2 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:11
213	4000	6	a	12	193,8	m/s ²	0.2 Hz – 10 kHz	27.3.19	12:11
214	4000	6	a	6,5	21,1	m/s ²	3 Hz – 1 kHz	27.3.19	12:11
215	4000	6	a	0,3	1,5	m/s ²	1 kHz – 10 kHz	27.3.19	12:11
216	4000	6	x	0,71	2,04	mm	5 Hz – 200 Hz	27.3.19	12:11
217			t	000000	000007	°C		27.3.19	12:12

Liite 5. Ohennetun laitteen v_p -taajuusspektrit, $Q = 4000$ l/s

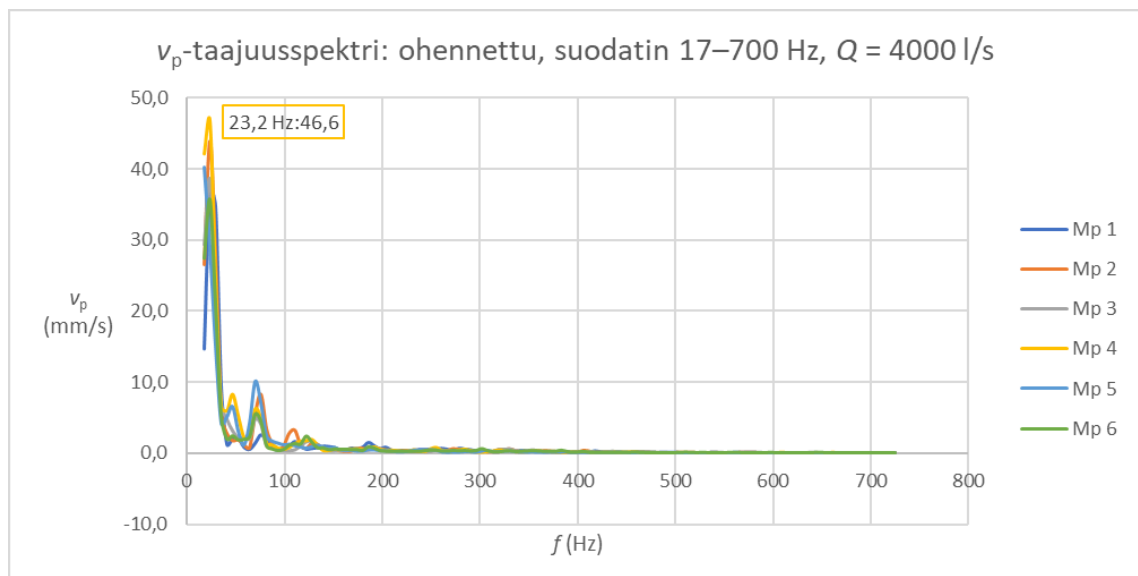
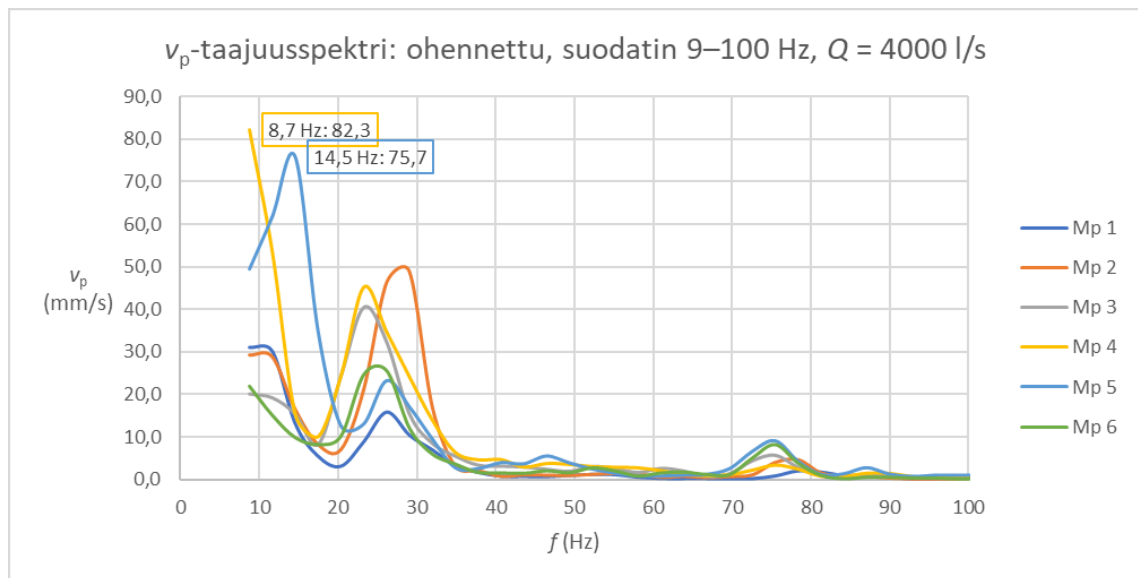
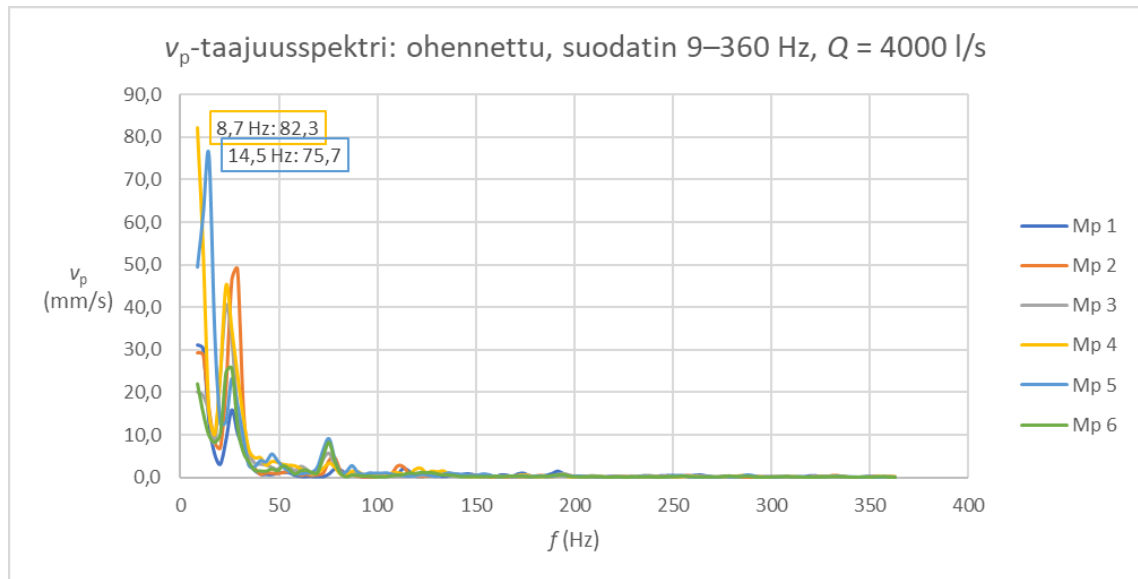
1 (3)



(jatkuu)

Ohennetun laitteen v_p -taajuusspektrit, $Q = 4000$ l/s

2 (3)



Ohennetun laitteen v_p -taajuusspektrit, $Q = 4000$ l/s

3 (3)

