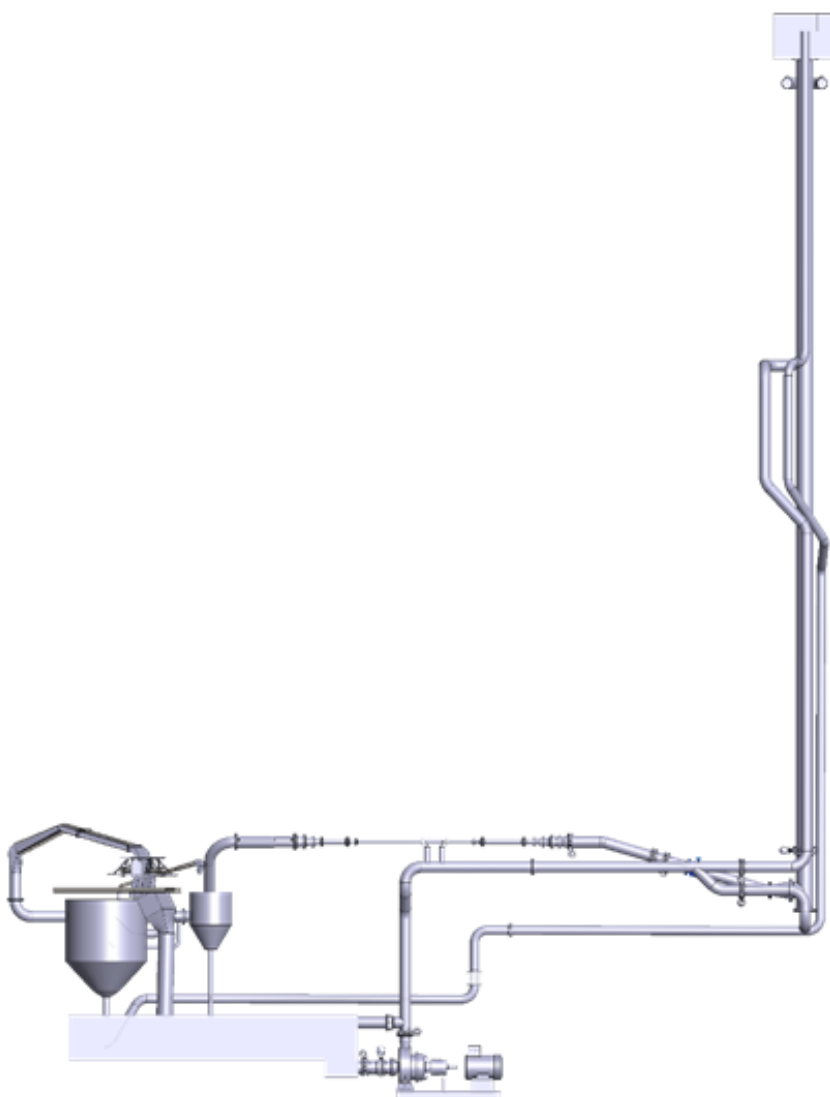


Niko Kyllönen

## Värähtelyn vaikutus

### nestevirtauskalibrointilaitteelle



Insinööri (AMK)  
Tieto- ja viestintätekniikka  
Syksy 2021



**KAMK • University  
of Applied Sciences**

## Tiivistelmä

**Tekijä(t):** Kyllönen Niko

**Työn nimi:** Värähtelyn vaikutus nestevirtauskalibrointilaitteelle

**Tutkintonimike:** Insinööri (AMK), tieto- ja viestintätekniikka

**Asiasanat:** Värähtelymittaukset, putkistovärähtely, nestevirtauskalibrointi

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutkia värähtelyn vaikutusta nestevirtausmittareiden kalibrointimitauksiin. Työn toimeksiantajan toimi Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ja työ suoritettiin VTT MIKES Kajaanin toimipisteellä. Tutkittava D200 gravimetrinen nestevirtauskalibrointilaitte sijaitsee VTT MIKES Kajaanin toimipisteellä.

Työssä suunniteltiin ja toteutettiin värähtelymittaukset D200 gravimetriselle nestevirtauskalibrointilaitteelle. Mittauksissa käytettiin National Instrumentsin cDAQ-telakkaa sekä siihen liitettäviä moduuleja. Mittaustulokset luettiin LabVIEW-ohjelmistolla ja analysointiin käytettiin MATLAB-ohjelmistoa.

Työn lopputuloksena annettiin arvio värähtelyn vaikutuksesta referenssinä toimivaan vaakaan.

Työ toteutettiin osana Kajaanin Ammattikorkeakoulun TÄRY-hanketta (Teollisuuden Älykkäät Ratkaisut Yritysyhteistyö). TÄRY-hankkeessa kehitetään kunnossapidon koulutusta ja tuodaan kunnonvalvonnan perustietämystä (mm. värähtelymittauksista sekä öljyanalyseistä) soveltavin osin koulutukseen.

## **Abstract**

**Author(s):** Kyllönen Niko

**Title of the Publication:** Effect of Vibration on Water Flow Meter Calibration Device

**Degree Title:** Bachelor of Engineering, Information and Communication Technologies

**Keywords:** Vibration measurements, piping vibration, fluid flow calibration

The aim of this thesis was to investigate the effect of vibration on the calibration measurements of flow meters. The work was commissioned by the VTT Technical Research Centre of Finland Ltd and performed at VTT MIKES Metrology Kajaani. The D200 gravimetric water flow meter calibration rig under investigation is located at VTT MIKES Kajaani.

In this thesis, vibration measurements were designed and implemented to the D200 gravimetric water flow meter calibration rig. Vibration measurements were conducted using National Instruments cDAQ dock and some modules connected to it. Measurements were controlled and read using custom LABVIEW program and the analysis was done with MATLAB software. The result of the thesis was an estimate of the effect of vibration on the device's reference scale.

The work was carried out as part of the Kajaani University of Applied Sciences' TÄRY project (Industrial Intelligent Solutions Business Cooperation). The TÄRY project develops maintenance training and introduces basic knowledge of condition monitoring, as applicable, e.g. vibration measurements and oil analyses.

## **Alkusanat**

Haluan kiittää VTT Oy:tä sekä VTT MIKES Kajaania mielenkiintoisesta ja haastavasta insinöörityöstä. Erityinen kiitos VTT MIKES Kajaanin henkilöstölle ohjeista ja avusta opinnäytetyöni tekemiseen. Lisäksi haluan kiittää opettaja Jussi Ala-Hiiroa, joka toimi työni ohjaajana Kajaanin Ammattikorkeakoulussa ja on tukenut ja ohjeistanut minua työn eri vaiheissa.

Kajaanissa, 4.11.2021

Niko Kyllönen

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Mekaaninen värähtely.....	2
2.1	Värähtelymittaussuureet .....	2
2.2	Herätteet .....	4
2.2.1	Epätasapaino .....	4
2.2.2	Linjausvirhe .....	5
2.2.3	Laakerivauriot.....	6
2.2.4	Mekaaninen väljyys .....	7
2.2.5	Koneen viallinen kiinnitys.....	8
3	Putkistovärähtely .....	9
3.1	Herätteet .....	9
3.1.1	Kavitaatio .....	10
3.1.2	Turbulenttinen virtaus .....	11
3.1.3	Painepulsaatio .....	11
3.1.4	Mekaaninen liike .....	12
3.2	Ominaistaajuudet.....	12
4	Värähtelymittaukset.....	15
4.1	Värähtelymittauslaitteet.....	15
4.2	Värähtelymittausanturit .....	18
4.2.1	Kiihtyvyyssanturi .....	18
4.2.2	Nopeusanturi.....	19
4.2.3	Siirtymäanturi.....	20
4.3	Värähtelymittausanturin kiinnityspaikat ja -tavat.....	21
4.3.1	Anturien kiinnityspaikan valinta .....	21
4.3.2	Anturien kiinnitystavat.....	23
4.4	Signaalinkäsittely.....	26
5	D200 Gravimetrisen nestevirtauskalibrointilaite .....	28
6	Työn toteutus.....	30
6.1	Värähtelymittaustoiminnan suunnittelu .....	30
6.1.1	Mittauskohteet ja menetelmät .....	31
6.2	Mittausvälit .....	35

6.3	Värähtelymittausjärjestelmä .....	36
6.3.1	LabVIEW-ohjelmisto.....	37
6.4	Värähtelymittaustulosten käsittely .....	37
7	Työn tulokset .....	39
7.1	Värähtelyn tehollisarvot .....	39
7.2	Värähtelyn aikatasosignaalit ja spektrit.....	42
8	Johtopäätökset .....	52
9	Yhteenveto.....	53
	Lähteet .....	54
	Liitteet .....	55

## 1 Johdanto

Värähtelymittaukset ovat tulleet yhdeksi tärkeäksi osaksi teollisuuden laitteiden kunnossapitoa. Värähtelymittauksilla saadaan selvitettyä laitteiden kuntoa ja mahdollisia vikoja. Kunnonvalvonnan värähtelymittausten tarkoitus on ennaltaehkäistä suurempien laitevahinkojen syntyä.

VTT MIKES Kajaanin virtauslaboratoriossa kalibroidaan nestevirtausmittareita kolmella kalibrointilaitteella. D200-nestevirtauskalibrointilaitte on kansallinen mittanormaali nestevirtaukselle, jonka kalibrointimenetelmä on gravimetrinen, jolloin referenssinä toimivat kuuden tonnin ja 800 kg vaa'at. Kalibroinnin alkaessa virtauksen jakaja, eli divertteri ohjaa kalibroitavan mittarin lävitse menevän vesivirtauksen vaa'alle ja kalibroinnin loputtua sen ohi. Kalibroinnissa verrataan mittarin näyttämää vaa'an näyttämään. Kalibroimalla selvitetään mittauslaitteen virhe, eli kalibrointi kertoo, kuinka paljon laite näyttää väärin. Kaksi muuta kalibrointilaitetta, D100 ja D500, perustuvat referenssimittareihin.

Kajaanin virtauslaboratoriossa on havaittu voimakasta värähtelyä D200-kalibrointilaitetta käytettäessä. Värähtelyt havaitaan parhaiten laboratorion metallisissa tukirakenteissa. Esiintyvän värähtelyn on epäilty vaikuttavan kalibrointimittausten tuloksiin.

Insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa värähtelymittaukset D200-kalibrointilaitteelle sekä tutkia kalibrointilaitteen aiheuttamaa värähtelyä ja sen vaikutusta laitteessa olevaan vaakaan.

Työ toteutettiin osana Kajaanin Ammattikorkeakoulun TÄRY-hanketta (Teollisuuden Älykkäät Ratkaisut Yritysyhteistyö). TÄRY-hankkeessa kehitetään kunnossapidon koulutusta ja tuodaan kunnonvalvonnan perustietämystä (mm. värähtelymittauksista sekä öljyanalyyseistä) soveltavin osin koulutukseen.

## 2 Mekaaninen värähtely

Mekaaninen värähtely on liikettä tietyn tasapainoaseman ympärillä rakenteessa, koneessa tai ko-  
neenosassa. Värähtely on jatkuvasti suuruuttaan tai suuntaansa muuttavaa voimaa, johon voivat  
tai eivät voi vaikuttaa ulkoiset voimat. Värähtelyä, johon eivät vaikuta ulkoiset voimat, kutsutaan  
vapaaksi värähtelyksi, joka vaimenee ajan kuluessa ja lopulta katoaa. Värähtelyä, jolla on ulkoinen  
ylläpitävä voima, kutsutaan pakkovärähtelyksi. [1, s. 48–53.]

### 2.1 Värähtelymittausuureet

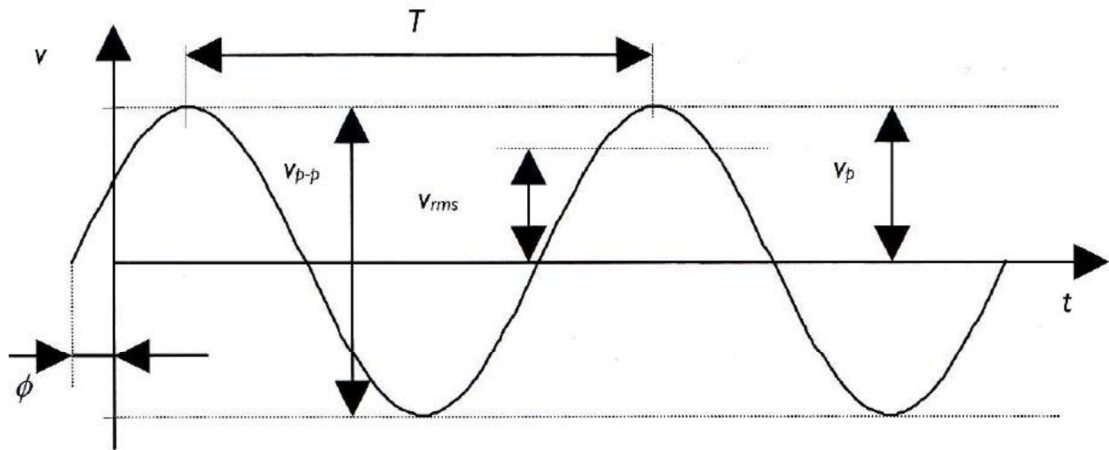
Värähtelymittauksissa voidaan käyttää kolmea eri mittaussuuretta: nopeutta, kiihtyvyyttä ja siir-  
tymää. Nopeutena mitattu värähtely ilmaisee kappaleen kulkeman siirtymän tietyn ajanhetken  
kuluessa. Kiihtyvyytenä mitattu värähtely ilmaisee kappaleen nopeuden muutoksen tietyn ajan-  
hetken kuluessa. Siirtymänä mitattu värähtely ilmaisee kohteen sijainnin suhteessa vertailupis-  
teeseen. [1, s. 54.] Värähtelymittauksissa käytettyjä suureita ja mittayksiköitä on esitelty taulu-  
kossa 1.

Taulukko 1. Värähtelymittauksien suureet ja mittayksiköt. [2, s. 230.] [3, s. 21.]

Suure	Lyhenne	Käytännön mittayksikkö	SI-mittayksikkö
Siirtymä	s	µm	m
Nopeus	v	mm/s	m/s
Kiihtyvyys	a	m/s <sup>2</sup> , g	m/s <sup>2</sup>
Taajuus	f	Hz	Hz
Pyörimisnopeus	n	1/min, rpm, 1/s	1/s
Vaihekulma	φ	° (Aste)	rad
Jakso	T	ms	s



Värähtelymittaussignaalista tulee myös osata eri perusparametreja. Kuvassa 1 on esitetty nopeutena mitatun värähtelysignaalin perusparametreja. Samat parametrit ovat myös käytössä kiihtyvyydelle ja siirtymälle.



$T$  on värähdysaika eli jakso  
 $v_{p-p}$  on nopeuden huipusta-huippuun arvo  
 $v_p$  on nopeuden huippuarvo  
 $v_{rms}$  on nopeuden tehollisarvo  
 $\phi$  on vaihekulma

Kuva 1. Värähtelysignaalin perusparametreja. [2, s. 231.]

Värähdysaika eli jakso  $T$  on aikaväli, jonka jälkeen signaali alkaa toistaa itseään. Huippuarvo ilmaisee suurimman itseisarvon verrattuna nollassa. Huipusta-huippuun arvo on suurimman ja pienimmän arvon erotus ja likimain kaksinkertainen huippuarvoon verrattuna. Tehollisarvo eli RMS (Root Mean Square) ilmaisee värähtelysignaalin suuruutta ja on yhteydessä värähtelyn sisältämään energiasisältöön. Vaihekulma ilmaisee jakson kohdan, mihin värähtely on edennyt vertailukohtasta. [1, s. 61–62.] [2, s. 231.]

Värähtelyn taajuus ilmaisee värähdysliikkeiden lukumäärän tietyssä ajassa eli aikayksikössä. Värähtelyn taajuus esitetään taajuustasossa, jossa vaaka-akselilla on taajuus ja pystyakselilla amplitudi. Taajuustasoesitystä kutsutaan myös taajuusspektri. [2, s. 232.]

Käyttökelpoinen, ja eniten käytetty, mittaussuure on värähtelynopeus. Värähtelynopeutta suositetaan mittasuureena, kun värähtelyn taajuus alue on 10–1000 Hz välillä. Tätä pienemillä taajuusalueilla siirtymä on käyttökelpoinen mittasuure ja vastaavasti suuremmilla kiihtyvyys. [2, s. 228.]

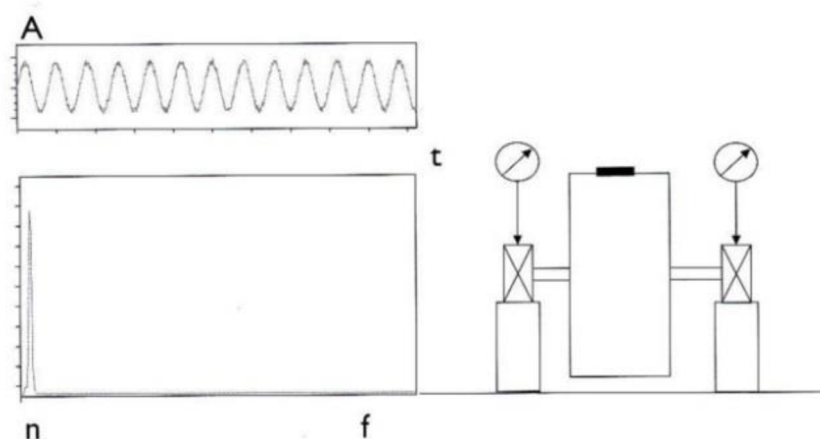
## 2.2 Herätteet

Herätteet ovat dynaamisia voimia, jotka saavat rakenteet värähtelemään. Herätteitä voi aiheutua laitteen normaalista toiminnasta, erilaisista asennuksen tai valmistuksen epätarkkuuksista tai viikaantumista. Liikkeessä olevat koneenosat, kuten roottori, mäntä tai akseli aiheuttavat herätteitä. Värähtelymittausten avulla tehty vianmääritys perustuu herätteiden muutosten tutkimiseen. [2, s. 224.]

### 2.2.1 Epätasapaino

Yleisin syy pyörivien koneiden ei-toivottuun värähtelyyn on epätasapaino. Epätasapainosta johtuvaa värähtelyä aiheutuu, kun pyörivän kappaleen painopiste ei ole yhtenevä sen pyörimispisteen kanssa. Epätasapaino voi johtua mm. huonosta valusta, materiaalin tiheyden vaihtelusta, valmistustoleransseista, ylimääräisestä tai puuttuvasta materiaalista, työstöstä tai irtonaisesta materiaalista. [2, s. 297.]

Epätasapainon aiheuttama värähtely ilmenee koneen pyörimistaajuudella. Epätasapainon aiheuttaman värähtelyn suuruus on verrannollinen painopisteen etäisyyteen pyörimisakselin keskipisteestä, epätasapainon määrään ja pyörimistaajuuden toiseen potenssiin, koska sen aiheuttaja on keskipakovoima. Yleisimpiä syitä liialliseen epätasapainoon ovat: epätasainen likaantuminen, kiinnittyneen massan irtoaminen, epätasainen kuluminen, irronneet tasapainotusmassat, siiven katkeaminen, jännityksen laukeaminen sekä riittämätön tasapainotus. Näiden syiden takia epätasapainon vaikutus voi vaihdella. [2, s. 297–298.] Kuvassa 2 on esitetty epätasapaino ja sen ilmeminen spektrissä. Värähtelyn amplitudi on kuvassa merkitty A-kirjaimella ja koneen pyörimistaajuus on kuvan spektrissä merkittynä n-kirjaimella.

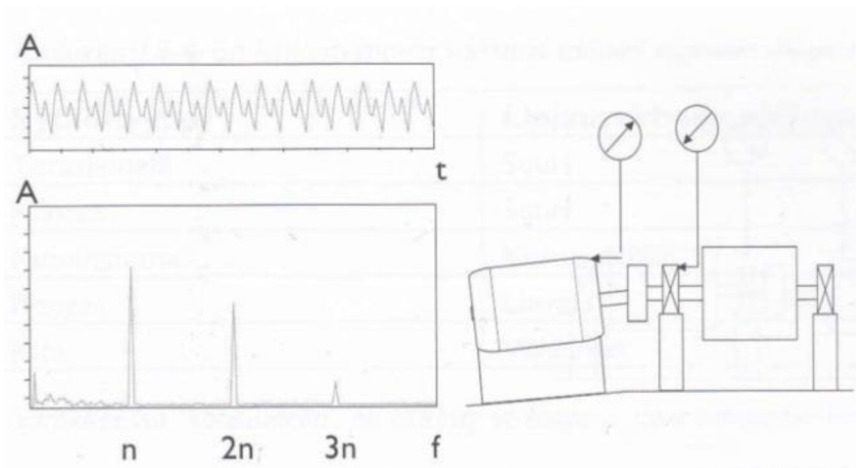


Kuva 2. Epätasapaino [2, s. 299.]

### 2.2.2 Linjausvirhe

Toiseksi yleisin syy pyörivän koneen värähtelyyn on linjausvirhe. Linjausvirheet johtuvat asennusvirheestä tai lämpöliikkeestä. Linjausvirheitä voi esiintyä useissa kohdissa, kuten koneen akselissa tai komponentissa, kuten hammas- tai hihnapyörässä. Yleisimmin linjausvirheitä on silloin, kun koneita liitetään yhteen kytkimien, hihnojen tai ketjujen avulla. [2, s. 303–304.]

Linjausvirhe ilmenee värähtelyn spektrissä pyörimistaajuuden monikertoina. Kerrannaisten ja amplitudin määrä riippuvat kytkimentyypistä ja linjausvirheestä sekä kytkimen kuormitustilasta. Linjausvirheestä aiheutuu mm. melua, kytkimen kulumista, tiivistevaurioita, laakereiden eliniän lyhenemistä sekä lisääntynyttä energian kulutusta [2, s. 304]. Kuvassa 3 on esitetty kulmalinjausvirhe ja sen ilmeneminen spektrissä.

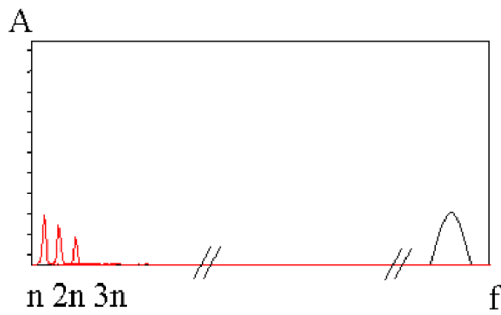


Kuva 3. Linjaisuusvirhe [2, s. 305.]

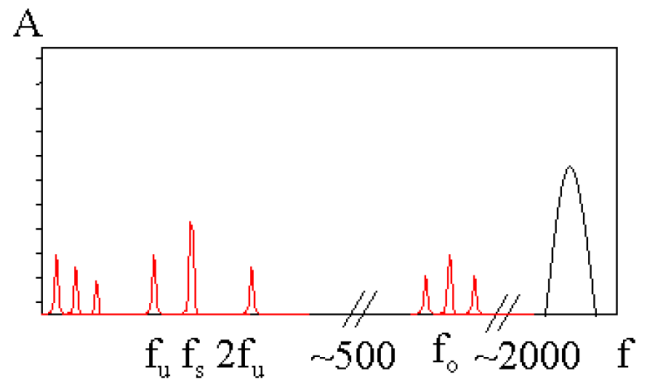
### 2.2.3 Laakerivauriot

Laakerivaurioiden suurimpia syitä ovat: lika, kosteus, ylikuormitus, voitelun puute ja valmistusprosessin jälkeiset vauriot. Laakerivaurion kehittyessä vika voi johtaa vierintälaakerin tai jopa akselin vaurioitumiseen. Vierintälaakerissa metallikosketus voi aiheuttaa korkeataajuisia värähtelyä. Metallikosketus voi johtua riittämättömästä voitelusta, liiallisesta kuormituksesta tai asennusvirheestä. Laakerin voiteluaineen likaantuessa, esiintyy spektrissä ominaistajuuksien alueella piikkejä, jotka saattavat olla seurausta laakerin liiallisesta kuormituksesta tai virheellisestä asennuksesta. [2, s. 311–312.] [3, s. 90–91.] Kuvassa 4 on esitetty spektriin muodostuneet herätteet vierintälaakerin metallikosketuksessa ja liiallisessa kuormituksessa tai virheellisessä asennuksessa.

## 1) Metallikosketus



## 2) Liiallinen kuormitus tai virheellinen asennus

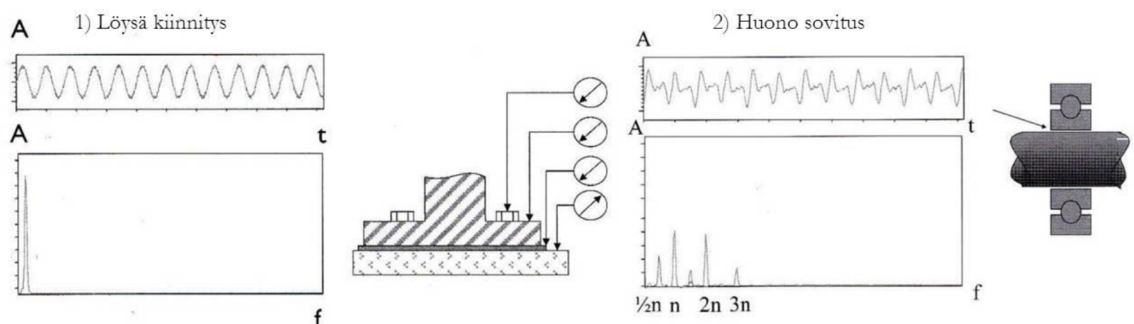


Kuva 4. Vierintälaakerin 1) Metallikosketus tai 2) Liiallinen kuormitus tai virheellinen asennus. [Kuva muokattu lähteestä 3, s. 90–91.]

Liukulaakereiden viat ovat tyypillisesti kulumis- ja väljyongelmia, jotka aiheuttavat kehittyessään pyörimistäajuuden monikertoja ja aliharmonisten komponenttien kasvua. Viat voivat aiheutua puutteellisesta voitelusta ja epäpuhtauksista. Värähtelyspektrissä näkyy yleensä kohonnut kohinataso. [2, s. 316.] [3, s. 93.]

## 2.2.4 Mekaaninen väljyys

Koneen osien huono sovitus, liialliset väljykset laakereissa ja juoksupyörän löysät kiinnitykset voivat aiheuttaa kuvan 5 mukaista värähtelyä. Väljien osien värähtely on epälineaarista suhteessa dynaamisiin voimiin. Väljyydestä aiheutuu usein aliharmonisia komponentteja ja niiden monikerroja värähtelyspektriin. Amplitudi ja vaihekulma ovat usein epävakaita ja saattavat muuttua eri käynnistyksillä. [2, s. 309–310.] [3, s. 84.]

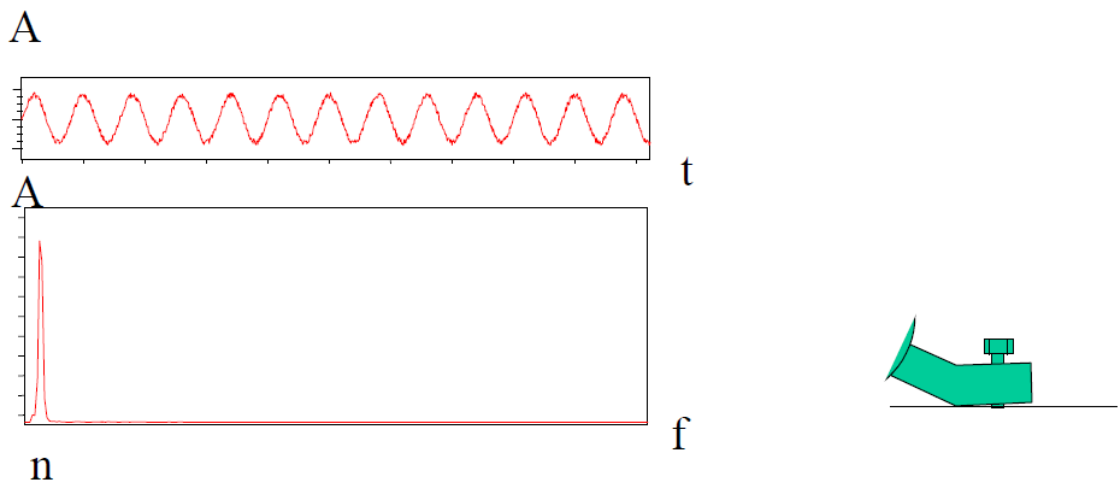


Kuva 5. Mekaanista väljyyttä aiheuttavat tekijät 1) Löysä kiinnitys 2) huono sovitus. [2, s. 309–310.]

### 2.2.5 Koneen viallinen kiinnitys

Koneen viallinen kiinnitys on asennusvirhe, jossa kone ei asetu alustalleen tukevasti kaikkien jalkojen varaan. Kiinnitysvirheen voi havaita esimerkiksi, kun kiinnityspulttia löysättäessä koneen jalka tai runko siirtyy voimakkaasti. Tämä voi johtua alustan tai koneen valmistusepätarkkuuksista. Jos virhe vaikuttaa akselin linjaukseen, ominaistaajuuteen tai moottorin ilmaväliin, voi koneen värähtelytaso muuttua. [2, s. 310.] [3, s. 89.]

Väkisin alustaan kiinni väännetty kiinnityspultti voi aiheuttaa rungon vääntymisen, minkä seurauksena värähtely kasvaa. Kiristyspultin kireys voi muuttaa koneen jalan tai rungon ominaistaajuutta. Taajuuden amplitudi voi muuttua moninkertaiseksi resonanssitapauksessa. Viallinen kiinnitys näkyy yleensä värähtelyn kasvuna pyörimistaajuudella, mutta saattaa näkyä myös pyörimistaajuuden monikerroilla, kaksi kertaa verkkotaajuudella, ryntötaajuudella, lapataajuudella tai muilla herätetaajuuksilla. [2, s. 310–311.] [3, s. 89.] Kuvassa 6 on esitetty viallinen kiinnitys sekä sen ilmeneminen spektrissä.



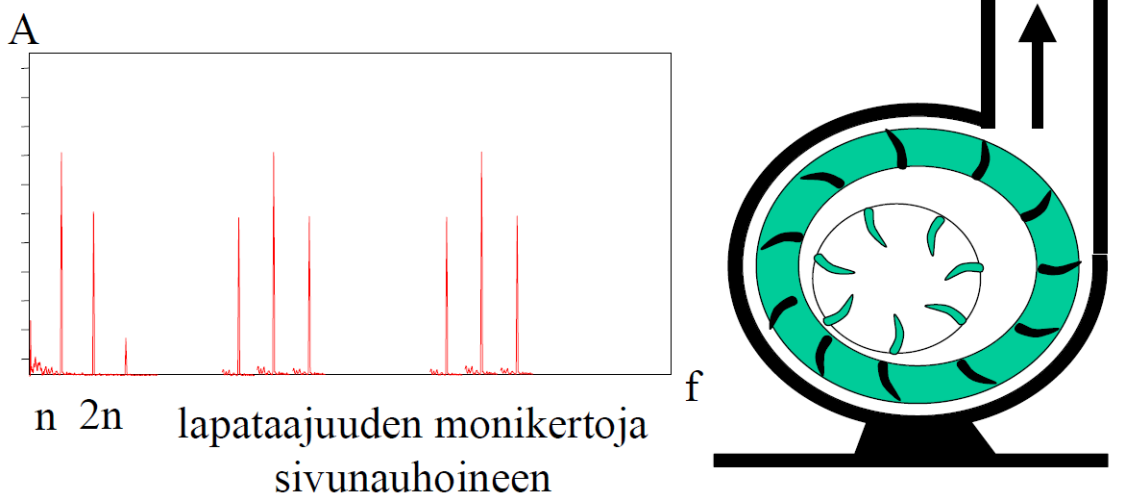
Kuva 6. Koneen viallinen kiinnitys [3, s. 90.]

### 3 Putkistovärähtely

Putkistovärähtely aiheuttaa jännityksiä, joiden seurauksena putki voi murtua. Voimakas värähtely voi myös aiheuttaa putken kannakkeiden, venttiilien toimilaitteiden tai putkivarusteiden vaurioita. [3, s. 144.]

#### 3.1 Herätteet

Värähtelyn esiintyminen pumpeissa, puhaltimissa ja kompressoreissa niiden lapataajuudella ei yleensä merkitse vikaa. Voimistunut värähtely lapataajuudella ja sen monikerroilla voi johtua seuraavista vioista: Juoksusiipien ja kammioiden välinen välys ei ole tasainen, lapataajuus ja sen monikerrat ovat lähellä rakenteen ominaistajuuksia, kulumisrenkas on tarttunut akseliin, kammiossa on rakennevaurioita, putkissa on virtausta haittaavia tekijöitä tai roottori on epäkeskeinen pesästä. Viat aiheuttavat yleensä laitteen ja siihen liitettyjen putkien sisäosien kulumista. Oireiden kehityksen seuranta antaa käsityksen vian kehityksestä. [2, s. 320.] [3, s. 97.] Kuvassa 7 on esitetty keskipakopumpun värähtelyspektri.



Kuva 7. Hydrauliset ja aerodynaamiset herätteet [3, s. 98.]

Taulukossa 2 on esitetty tyypillisiä pumppaavan koneen käynnistä johtuvia herätetaajuuksia.

Taulukko 2. Koneen käynnin aiheuttamia herätetaajuuksia. [3, s. 145.]

Aiheuttaja	Herätetaajuudet
mäntäkompressori	$f = Nn$
mäntäpumppu	$f = NPn$
keskipakokompressori, ruuvikompressori, keskipakopumppu	$f = Nn$ $f = NBn$ $f = Nvn$

Kaavoissa:

$N = 1, 2, 3, \dots$

$P =$  mäntien lukumäärä

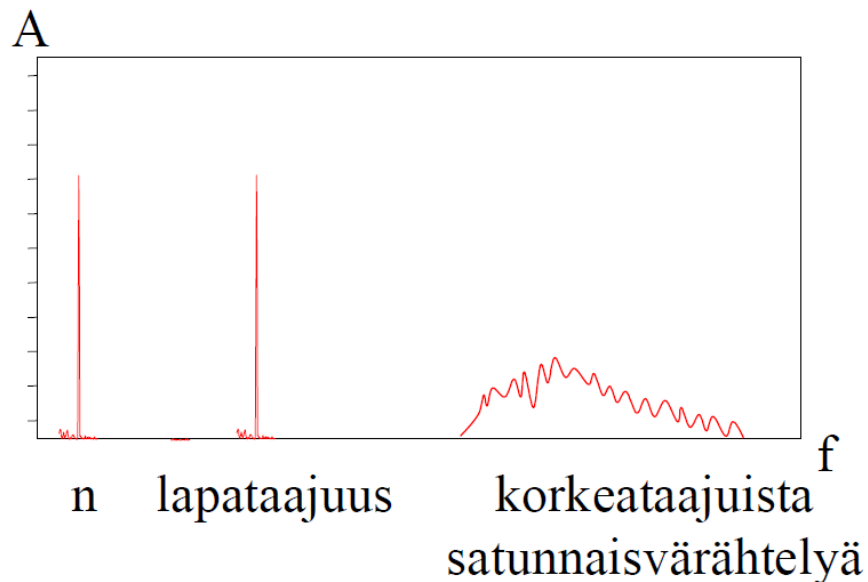
$B =$  juoksupyörän siipien tai ruuvin kierteiden lukumäärä

$v =$  pumpun vaiheiden lukumäärä

$n =$  pyörimistaajuus

### 3.1.1 Kavitaatio

Normaalisti kavitaatio on korkeataajuisia ja laajakaistaista satunnaisvärähtelyä, joka on esitetty kuvassa 8. Tämän lisäksi värähtelyä esiintyy lapataajuuksilla ja sen monikerroilla. Normaalisti kavitaatio on merkki liian pienestä imupaineesta. Kavitaatio voi aiheuttaa äänen, joka muistuttaa soran kulkeutumista laitteen läpi. [2, s. 321.] [3, s. 99.]

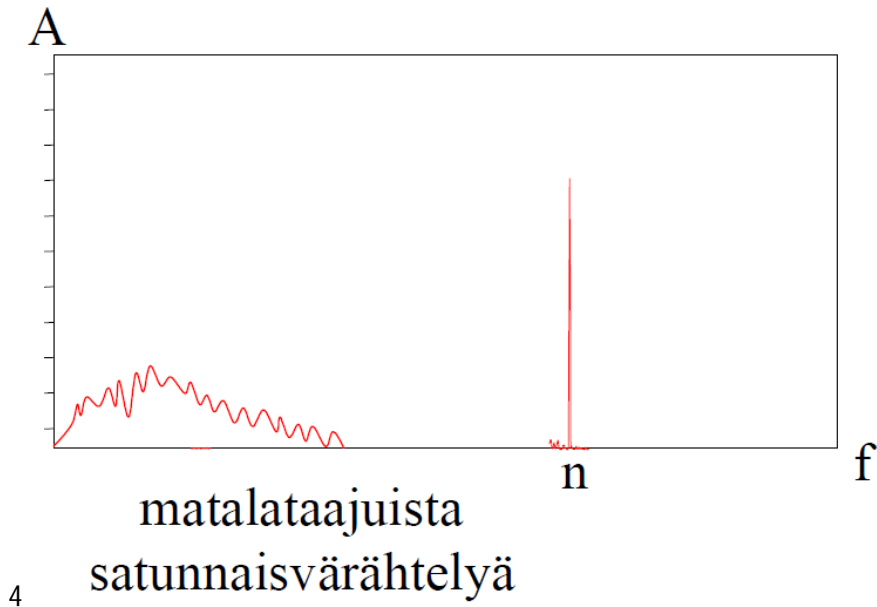


Kuva 8. Kavitaatio [3, s. 99.]



### 3.1.2 Turbulenttinen virtaus

Turbulenttinen virtaus aiheuttaa satunnaista, yleensä alle 50 Hz, matalataajuisia värähtelyä, joka on esitetty kuvassa 9. Turbulenssi ilmenee väliaineen paineen tai nopeuden muutoksena. Korkeapaineisissa järjestelmissä virtauksen kuristaminen voi aiheuttaa laajakaistaista korkeataajuisia satunnaisvärähtelyä. [2, s. 320.] [3, s. 98.]



Kuva 9. Turbulenttinen virtaus [3, s. 98.]

### 3.1.3 Painepulsaatio

Painepulsaatio on yleisin syy putkistovärähtelyyn. Painepulsaatio ilmenee, kun väliaineen paine vaihtelee nopeasti. Vaihtelu voi olla harmonista, satunnaista tai iskumaista. Pumppaavan kone, virtauksen turbulenssi, väliaineen pyörteily, kavitaatio ja venttiilien avaaminen ja sulkeminen voivat aiheuttaa pulsaatiota. Pulsaatio voi vahvistua jopa 300-kertaiseksi väliaineen resonanssitaajuuksilla, jotka määräytyvät putken mittojen sekä virtaavan aineen jousto- ja massaominaisuuksien mukaan. Painepulsaatiosta syntyy putkistoon herätevoimia, jotka ilmenevät putkessa, käyrrissä ja epäjatkuvuuskohtissa kuten supistuksissa, haaroituksissa ja venttiileissä. [3, s. 145.]

### 3.1.4 Mekaaninen liike

Putkistoon liitetty kone voi aiheuttaa mekaanista liikettä putkistoon, joka ilmenee värähtelyssä koneen pyörimistaajuudella. Pumppu voi myös aiheuttaa mekaanista liikettä putkistossa, joka ilmenee värähtelyssä pumpun lapataajuudella. [3, s. 146.]

Koneista ja pumpuista lähtevän mekaanisen liikkeen värähtely voi myös ilmetä pyörimistaajuuden ja lapataajuuden monikerroilla. [3, s. 146.]

### 3.2 Ominaistaajuudet

Putkiston ominaistaajuudet voidaan laskea analysointiohjelmistolla tai käyttäen taulukoita. Alin ominaistaajuus voidaan laskea kaavalla:

$$f_1 = \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m_L}}, \quad (1)$$

missä:

$f_1$  = alin ominaistaajuus

$E$  = kimmomoduuli tarkastelulämpötilassa

$I$  = poikki pinnan neliömomentti

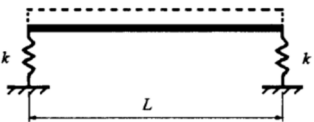
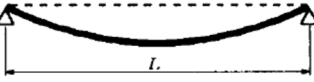
$m_L$  = massa/pituusyksikkö

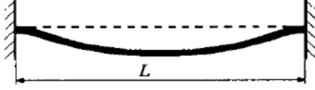
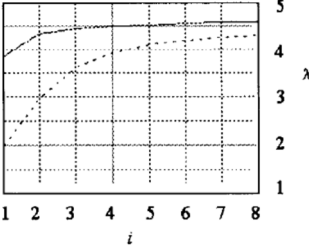
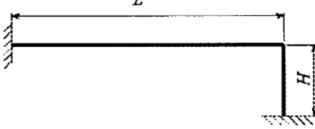
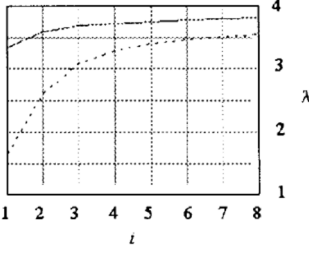
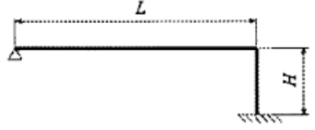
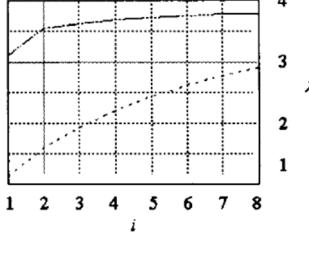
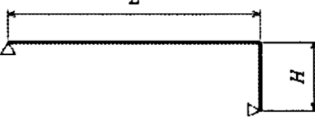
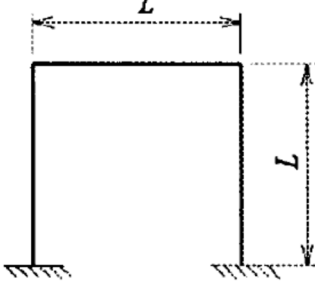
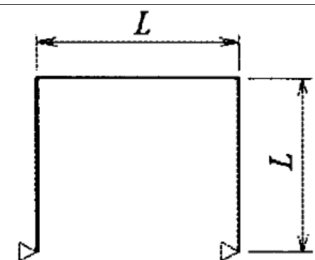
$L$  = pituus

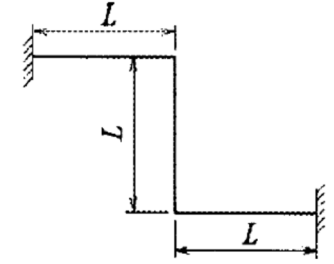
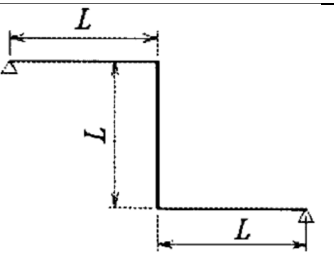
$\lambda$  = kiinnityksestä ja geometriasta johtuva kerroin

Taulukossa 3 on esitetty joidenkin tapauksen  $\lambda$ -arvoja.

Taulukko 3.  $\lambda$ -arvoja [3, s. 149–150.]

Tapaus	$\lambda$	Rakenne
jäykän kappaleen liike	$\left(\frac{2kL^3}{EI}\right)^{1/4}$	 <p>Jousivakio</p>
päistä niveltuettu	$\pi$	

<p>päistä jäykästi tuettu</p>	<p>4,73</p>	
<p><math>\lambda_{1i}</math> = kuvan tasossa <math>\lambda_{2i}</math> = kohtisuorassa kuvan tasoa vastaan (alempi)</p>		 <p><math>i = L/H</math></p>
<p><math>\lambda_{1i}</math> = kuvan tasossa <math>\lambda_{2i}</math> = kohtisuorassa kuvan tasoa vastaan (alempi)</p>		 <p><math>i = L/H</math></p>
<p><math>\lambda_{1i}</math> = kuvan tasossa <math>\lambda_{2i}</math> = kohtisuorassa kuvan tasoa vastaan (alempi)</p>		 <p><math>i = L/H</math></p>
<p><math>\lambda_{1i}</math> = kuvan tasossa <math>\lambda_{2i}</math> = kohtisuorassa kuvan tasoa vastaan</p>	<p><math>\lambda_{1i} = 1,773</math> <math>\lambda_{2i} = 1,404</math></p>	
<p><math>\lambda_{1i}</math> = kuvan tasossa</p>	<p><math>\lambda_{1i} = 1,202</math></p>	

$\lambda_{1_i}$ = kuvan tasossa $\lambda_{2_i}$ = kohtisuorassa kuvan tasoa vastaan	$\lambda_{1_i} = 1,645$ $\lambda_{2_i} = 1,610$	
$\lambda_{1_i}$ = kuvan tasossa $\lambda_{2_i}$ = kohtisuorassa kuvan tasoa vastaan	$\lambda_{1_i} = 1,072$ $\lambda_{2_i} = 1,032$	

## 4 Värähtelymittaukset

### 4.1 Värähtelymittauslaitteet

Värähtelymittauslaitteet voidaan jakaa viiteen eri tyyppiin niiden ominaisuuksien perusteella. Nämä tyypit ovat: Käsimittarit ja värähtelykynät, kannettavat tiedonkeruulaitteet ja analysointilaitteet, kiinteästi asennettavat tiedonkeruu- ja analysointilaitteet, monikanavaiset FFT-analysointilaitteet sekä PC-pohjaiset mittalaitteet. Laitteet voidaan myös jakaa niiden asennustavan mukaan. Asennustapoja ovat: kiinteä järjestelmä, puolikiinteä järjestelmä sekä kannettava mittauslaite. [2, s. 259–263.]

Värähtelykynät ja käsimittarit ovat yksinkertaisia yhtä lukuarvoa näyttäviä laitteita. Tavallisin mitattava tunnusluku on värähtelyrasitus eli värähtelynopeuden kokonaistasoarvo kiinteästi asetulla taajuusalueella. Muita tunnuslukuja voivat olla esimerkiksi kiinteällä taajuuskaistalla mitattavat verhoikäyräarvot, akustisen emission taajuuksilla mitattavat tunnusluvut sekä iskusysäysmittaus. Käsimittareilla arvioidaan laitteen yleiskuntoa ja ne on tehty yksinkertaiseen laakerien kunnonvalvontaan. Käsimittareilla voidaan lähinnä todeta värähtelyn voimakkuus. [2, s. 259.]



Kuva 10. Fluke 805 -värähtelymittari

Kannettavat tiedonkeruulaitteet ovat monipuolisempia kuin käsimittarit. Kannettavissa tiedonkeruulaitteissa on mahdollisuus spektrianalyysiin ja muihin analysointitapoihin, jotka mahdollistavat vianmäärityksen. Niitä voidaan käyttää joko itsenäisesti tai tietokoneella olevien mittausreitien mukaan. Mittaustuloksia voidaan analysoida suoraan mittalaitteen näytöltä tai tietokoneelta erityistä analysointiohjelmaa käyttäen. Yleisesti näitä mittalaitteita käytetään värähtelyongelmien selvityksissä. [2, s. 260.]



Kuva 11. SKF:n kannettava tiedonkeruulaite

Monikanavaisia FFT-analysointilaitteita ja PC-pohjaisia mittalaitteita käytetään, kun värähtelyongelmat ovat vaikeita. Kanavia näissä laitteissa on yleensä 8–64 ja niiden mittausnopeus ja analyysi- ja signaalinkäsittelytoiminnot ovat monipuoliset. Nämä laitteet vaativat ammattitaitoa ja teoriaosaamista. [2, s. 261.]

Kiinteästi asennettavia tiedonkeruu- ja analysointilaitteita käytetään, kun mittaustiheyden tarve on suuri ja jatkuva. Järjestelmä tekee mittaukset mittausjakson mukaisesti sekä generoi hälytyksen riittävän suurista mittaussuureiden muutoksista. Mittalaitetta voidaan myös käyttää myös reaaliaikaiseen mittaukseen, jos mitattavan laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa vaaratilanteen tai huomattavia kustannuksia. Järjestelmissä on yleensä monipuoliset signaalien esitys- ja analysointiyökalut. [2, s. 261–262.]

Taulukko 4. Yhteenveto mittauslaitteista

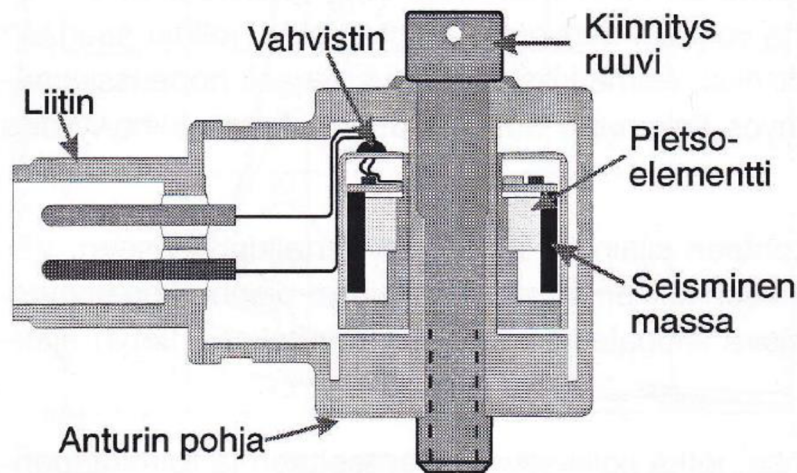
Laite	Käyttö	Asennustapa	Ominaisuudet
Käsimittarit	Hyvin helppoa/ rutiini seurantaan	Kannettava mittalaite	Erittäin rajoittuneet, mittalaittekohtaisia ominaisuuksia
Kannettavat tiedonkeruulaitteet ja analysaattorit	Rutiinikäyttö helppoa, asetusten teko ja analyysit vaativat asiantuntemusta	Kannettava mittalaite tai puolikiinteä järjestelmä	Riittävä suurimpaan osaan normaalien laitteiden mittauksista. Ominaisuuksia kasvatettavissa lisälaitteiden avulla
Monikanavaiset FFT-analysaattorit	Vaatii asiantuntemusta	Kiinteä järjestelmä	Mahdollisuuksia hyvin paljon riippuen laitteesta
Kiinteästi asennettavat tiedonkeruu- ja analysointilaitteet	Rutiinikäyttö helppoa, asetusten tekeminen ja analyysit vaativat asiantuntemusta	Kiinteä järjestelmä	Ominaisuudet yleensä sovitettu erilaisten teollisuuden koneiden mittauksiin
PC-pohjaiset mittalaitteet	Vaatii asiantuntemusta	Kiinteä järjestelmä	Mahdollisuuksia paljon riippuen laitteistosta ja ohjelmistosta. Myös virhemahdollisuuksia

## 4.2 Värähtelymittausanturit

Värähtelyn kolmelle perus mittaussuureelle; kiihtyvyydelle, nopeudelle ja siirtymälle, on kullekin omat anturinsa, jotka eroavat rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan toisistaan.

### 4.2.1 Kiihtyvyyssanturi

Kiihtyvyyssanturi on ylivoimaisesti eniten käytetty anturi värähtelymittauksissa. Kiihtyvyyssanturit ovat yleisesti pienikokoisia pietsosähköisiä antureita, joissa ei ole liikkuvia tai kuluvia osia. Anturin keskeinen komponentti on pietsosähköinen kide, jonka kiinnityselementit kiinnittävät anturikuoreen ja jonka päälle tai sivuille on asennettu massa. Massa puristaa pietsosähköistä kidettä anturin vasten runkorakennetta, jonka pinnoille muodostuu sähköinen varaus, joka on verrannollinen kiihtyvyyteen. Tämä varaus vahvistetaan joko anturinsisäisellä tai ulkoisella varausvahvistimella, jossa se muunnetaan jännitteeksi. [1, s. 54–55.] [2, s. 237–241.] [4, s. 34–36.]



Kuva 12. Kiihtyvyyssanturin rakenne [1, s. 54.]

Kiihtyvyyssanturit kiinnitetään mitattavaan kohteeseen yleisemmin magneetilla, ruuvilla, käsin painamalla, mehiläisvahalla tai liimalla. Anturin kiinnitystavalla on huomattava vaikutus anturilla mitattavan värähtelyn ylä- ja alarajataajuuksiin. Tyypillinen kiihtyvyyssanturin taajuusalue on 2–5000 Hz ja parhaimmillaan 0,5–10000 Hz. Jos anturi kiinnitetään mitattavaan kohteeseen painamalla käsin, mittauksen ylärajataajuus putoaa noin 600 Hz. Magneettikiinnityksellä ylin käytettävä taajuus on 800 Hz ja 4000 Hz välillä riippuen pinnan tasaisuudesta ja magneetin voimakkuudesta. [1, s. 54–55.] [2, s. 237–241.] [4, s. 34–36.]



Pietsosähköisillä kiihtyvyyssantureilla on asettumisaika, joka voi kestää 1–600 sekuntia. Asettumisaika riippuu kahdesta häiriöstä. Ensimmäinen häiriö tulee, kun anturi siirretään mittauspaikkaan. Anturiin kohdistuva isku lamauttaa pietsosähköisen kiteen tietyn ajaksi ja sen palautumisaika riippuu siitä, kuinka herkkä anturi on ja kuinka kovaa anturi isketään mittauskohtaan. Toinen häiriö johtuu anturiin kytketystä jännitteestä ja sen kestoon vaikuttaa anturin vahvistimen rakenne ja mittausalueen alarajataajuus. Mitä matalampi alin mittava taajuus on, sitä kauemmin kestää anturin asettuminen. [1, s. 54–55.] [2, s. 237–241.] [4, s. 34–36.]

Tärkeimpiä parametrejä pietsosähköisille kiihtyvyyssantureille on niiden herkkyys ja mittausalue, jotka ovat sidoksissa toisiinsa. Pienimmillään mittausalue voi olla putoamiskiihtyvyyden (g) arvo kymmenkertaisena, jolloin anturin herkkyys voi olla luokkaa 100 mV/g. Suurimmillaan mittausalue voi olla satatuhatkertainen g:n arvo, jolloin herkkyys on luokkaa  $\mu\text{V/g}$ . [4, s. 36.]

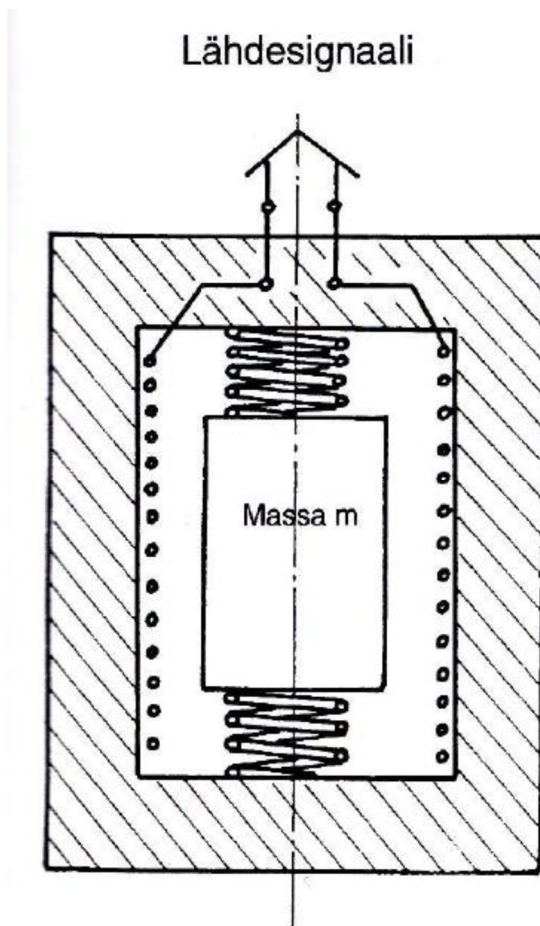


Kuva 13. Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi [4, s. 36.]

#### 4.2.2 Nopeusanturi

Nopeusanturit ovat tyypillisesti kooltaan isompia kuin kiihtyvyyssanturit. Nopeusanturin sisällä on jousilla kiinnitetty magneettinen massa, joka seuraa viiveellä anturikuoren värähtelyä. Magneettinen massa aiheuttaa anturin käämiin anturin nopeuteen verrannollisen jännitteen. Nopeusanturit ovat häiriöalttiimpia kuin kiihtyvyyssanturit liikkuvien osien takia. Häiriöitä voivat myös aiheuttaa sähkömagneettiset kentät ja lämpötilan vaihtelut. [1, s. 56–57.] [2, s. 236–237.]

Nopeusanturit kiinnitetään yleensä ruuveilla tai magneeteilla. Anturin kiinnitystapa vaikuttaa anturin mittaamaan taajuusalueeseen. Parhaimmillaan nopeusanturin taajuusalue on noin 5–2000 Hz. Alarajataajuuteen vaikuttaa anturin sisäinen resonanssi, joka riippuu magneetin massasta ja jousen jäykkyydestä. Resonanssi voi olla välillä 3–12 Hz ja alarajataajuuden tulee olla tämän taajuuden yläpuolella. Ylärajataajuutta nopeusantureissa ei saada nostettua yli 2000 Hz. [1, s. 56–57.] [2, s. 236–237.]



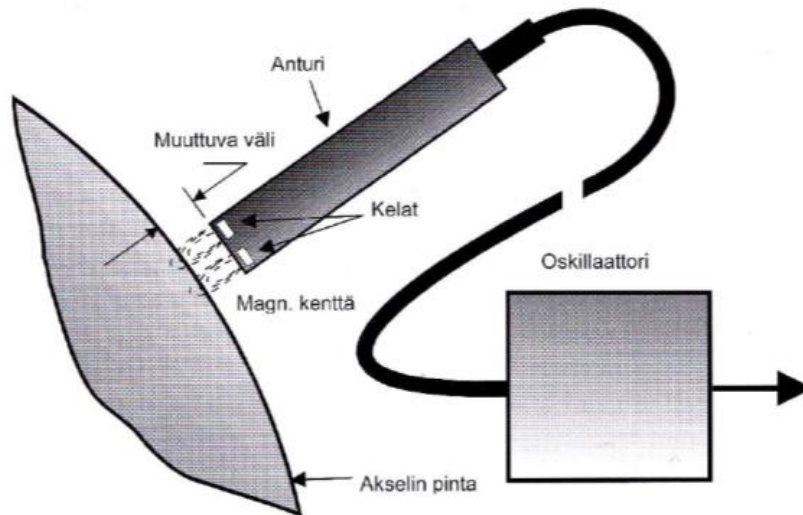
Kuva 14. Nopeusanturin rakenne [1, s. 57.]

#### 4.2.3 Siirtymäanturi

Siirtymäanturit mittaavat mitattavan kohteen keskinäistä suhteellista liikettä anturin paikkaan verrattuna. Tavallisesti siirtymäantureita käytetään liukulaakereiden kunnonvalvonnassa. Yleisimmän siirtymäanturin, eli ns. pyörrevirta-anturin, toiminta perustuu sen päässä olevan kelan luomaan magneettikenttään, joka indusoi pyörrevirtoja ferromagneettiseen pintaan. Pyörrevirrat

aiheuttavat muutoksen anturin kelan jännitteeseen, kun pinnan ja anturin välimatka muuttuu. Muuttunut jännite voidaan suhteuttaa muuttuneeseen etäisyyteen. [1, s. 57–58.] [2, s. 235.]

Pyörrevirta-anturin suurimman ja pienimmän mitattavan signaalin suhde on tyypillisesti luokkaa 100:1. Teoreettinen taajuus alue anturissa on yleensä 0 Hz ja 10 kHz välillä, mutta käytännössä se rajoittuu yläpäästä noin 200 Hz:iin. Anturin dynamiikka estää suurien taajuuksien mittaamisen. [2, s. 235.]



Kuva 15. Pyörrevirta-anturin toimintaperiaate [2, s. 235.]

#### 4.3 Värähtelymittausanturin kiinnityspaikat ja -tavat

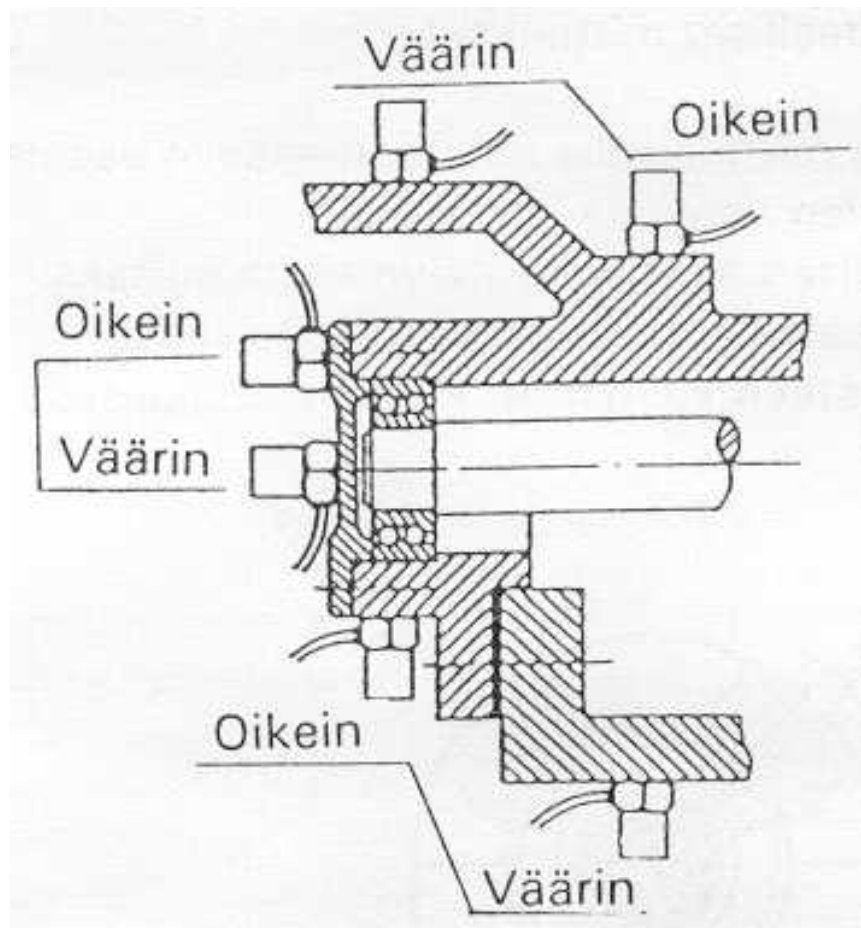
Värähtelyantureilla mitattuun värähtelyyn vaikuttaa ratkaisevasti niiden kiinnityspaikka ja -tapa. Valinta vaikuttaa myös mittauksen toistettavuuteen. [1, s. 62.] [2, s. 244.]

##### 4.3.1 Anturien kiinnityspaikan valinta

Kiinnityspaikan valinta vaikuttaa siihen, voidaanko mittauksilla saada riittävästi tietoa kohteen kunnosta. Mitattavasta kohteesta tulisi valita niin monta mittauspistettä, että mikään mahdollinen vika ei jää havaitsematta. Minimimäärä mittauspisteitä on yksi kunkin laakerin kohdalla ja jokaisessa mittauspisteessä pitäisi pystyä tekemään mittaukset kolmeen keskenään kohtisuoraan

suuntaan eli vaakaan, pystyyn ja akselin suuntaan. Jos värähtelymittaus suoritetaan pumppaavalle koneelle, niin voi olla tarpeellista laittaa yksi mittauspiste pumpun painepuolen putkeen. Pumput voivat tietyillä paine- ja virtausmäärillä kavitoida, joka aiheuttaa tärinää koneelle. [1, s. 62–64.]

Anturin kiinnityspaikka valitaan mahdollisimman läheltä värähtelylähdettä. Anturin ja värähtelylähteen välillä tulisi olla mahdollisimman vähän rajapintoja, koska korkeataajuinen värähtely menettää osan energiastaan rajapinnoissa [3, s. 21.]. Anturia ei aina päästä laittamaan haluttuun paikkaan esim. ahtauden tai työturvallisuuden takia, mutta on myös mahdollista saada tarpeeksi tarkka mittaustulos vähemmällä määrällä antureita [1, s. 63.]. Kuvassa 16 on esitetty anturin kiinnityspaikkoja pyörivän akselin ympäriltä. Väärissä paikoissa on liikaa rajapintoja.



Kuva 16. Anturin oikeita ja väriä kiinnityskohtia [1, s. 63.] [3, s. 22.]

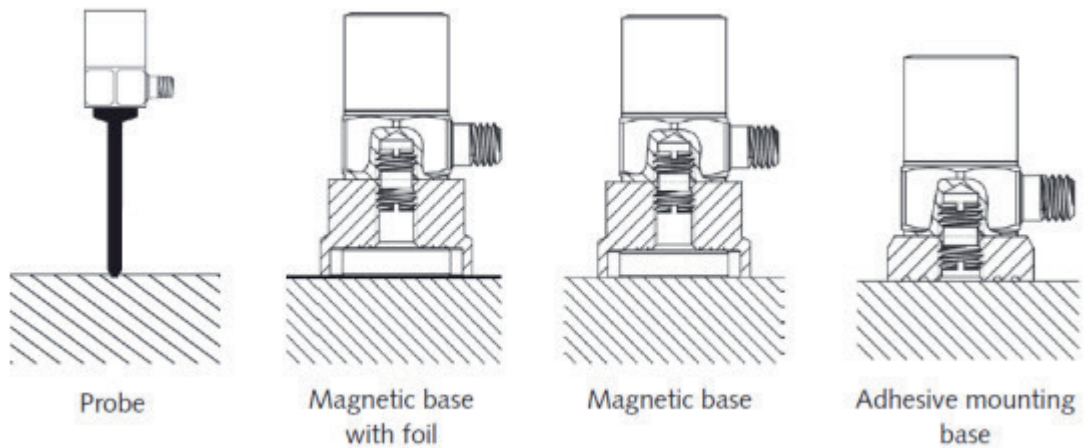
Värähtelymittauspaikat tulisi aina merkitä, jotta mittaukset saadaan tehtyä samasta paikasta ja samalla tavalla. Mittauspaikat voi merkitä esimerkiksi: Anturin ruuvikiinnikkeellä, anturin nipa-

kiinnikkeellä, ferromagneettisella levyllä, hiomalla mittauspinta, maalilla tai piirtokynällä. Mittauspaikoista on hyvä luoda tuotantolaitoksen sisäinen käytäntö niiden sijainnista. Tällöin mitaaja osaa tehdä mittauksen samasta paikasta. [1, s. 64–65.]

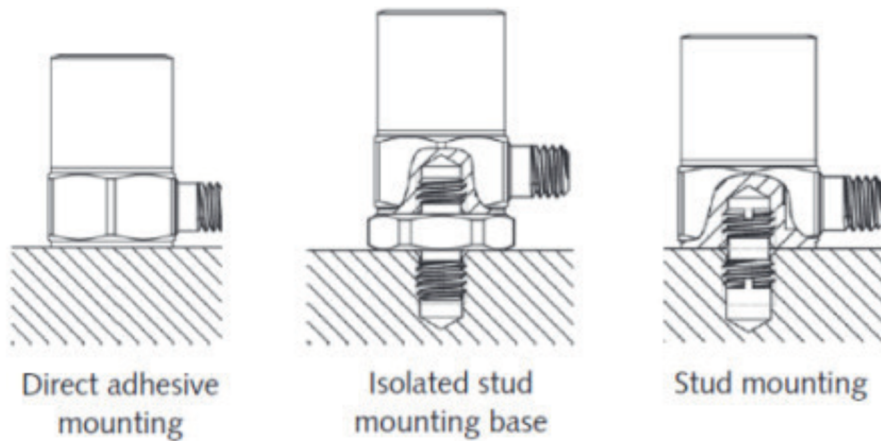
#### 4.3.2 Anturien kiinnitystavat

Anturin kiinnitystapa vaikuttaa värähtelymittaustuloksiin. Riittämätön kiinnitys voi vaikuttaa anturin taajuus- ja amplitudialueeseen. Anturin massa voi myös aiheuttaa ei haluttuja värähtelyominaisuuksia, jos kiinnitys ei ole riittävän hyvä [2, s. 244.]. Hyvänä sääntönä onkin käyttää mahdollisimman kestävä ja kevyttä kiinnitystapaa. [5, s. 2.]

Kuvissa 17 ja 18 on esitetty erilaisia anturin kiinnitystapoja. Mittauksen kannalta paras kiinnitystapa on ruuvikiinnitys, joka mahdollistaa tarkimman taajuusvasteen anturille. Ruuvikiinnitys on myös kestävin kiinnitystapa, mutta se on yleensä hankala toteuttaa mitattavalle laitteelle. Liima tai vahakiinnitys on helpoin toteuttaa, mutta se rajoittaa mittauksen lämpötila-alueita ja anturin irrottamiseen voi joutua käyttämään liuotinta tai lämpöä. Magneettikiinnitys toimii kaikilla ferromagneettisilla pinoilla. Magneetin paino ja vetovoima voi rajoittaa anturin amplitudialuetta. [5, s. 2.]



Kuva 17. Anturin kiinnitystapoja 1/2 [5, s. 2.]



Kuva 18. Anturin kiinnitystapoja 2/2 [5, s. 2.]

Kiinnitystapaa ei pitäisi valita pelkästään asennuksen helppouden takia, vaan huomioon tulisi myös ottaa anturin taajuusvaste kyseisellä kiinnitystavalla. Jokainen kiinnitystapa toimii jousena, ja mitä joustavampi kiinnitystapa, sitä matalammat taajuudet pitää tuottaa, jotta resonanssi-ilmiö toteutuu. [5, s. 12.] Kiinnityksen luonnollisen taajuuden voi laskea kaavalla:

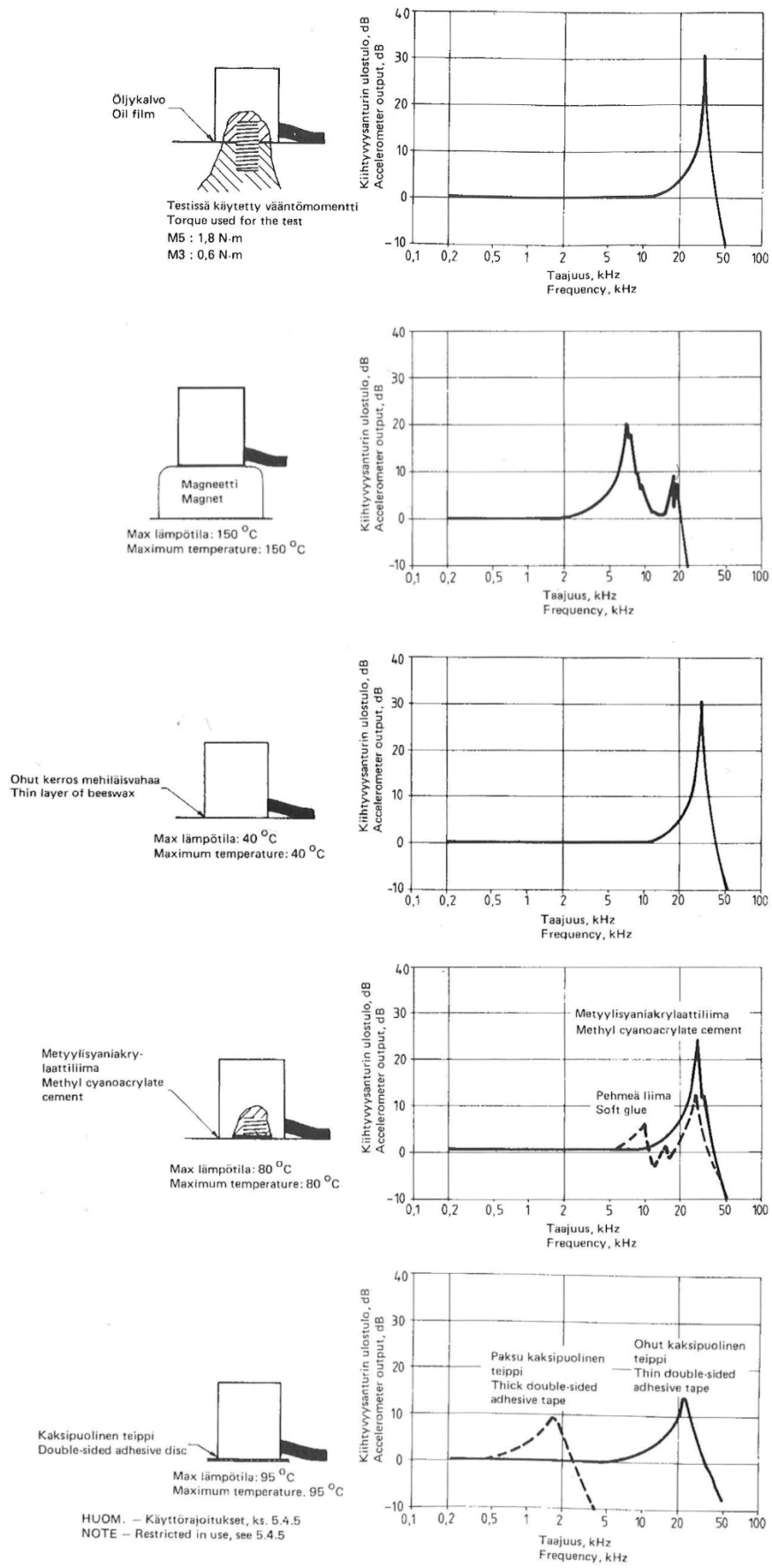
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2)$$

missä:

$k$  = jousivakio

$m$  = anturin massa

Kuvassa 19 on esitetty eri kiinnitystapoja ja niiden taajuusvasteita. Spektreistä huomataan kuinka anturin ulostulo kasvaa korkeilla taajuuksilla.



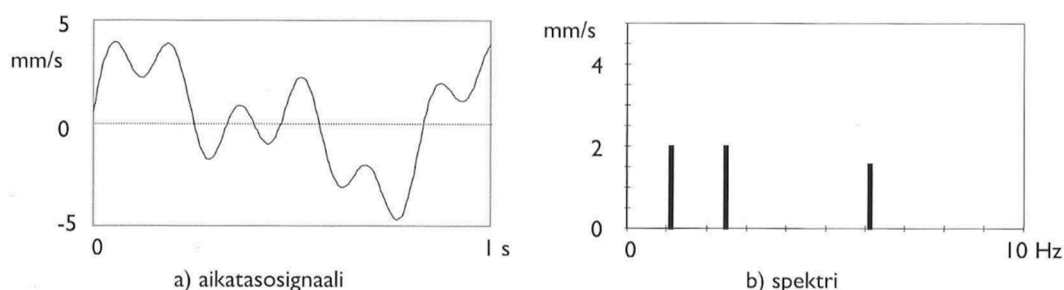
Kuva 19. Eri kiinnitystapoja ja niiden taajuusvasteet [Kuva muokattu lähteestä 1, s. 68–71.]

#### 4.4 Signaalinkäsittely

Mittausjärjestelmissä on useita signaalinkäsittelyasetuksia, jotka mahdollistavat anturin signaalin lukemisen ja muuntamisen eri muotoihin. Signaalinkäsittelyn tavoite on saada muutettua anturin signaali sellaiseen muotoon, josta sitä on helppo analysoida. [1, s. 72.] Nykyiset värähtelymittausjärjestelmät pystyvät suorittamaan signaalinkäsittelyn suoraan, mutta on myös mahdollista käyttää ulkopuolista signaalinkäsittelyohjelmaa.

Mittalaitteet, jotka mittaavat värähtelyn kokonaistasoa, käsittelevät anturin signaalia siten, että mittalaite ilmoittaa värähtelyn suuruuden yhdellä tunnusluvulla. Mittaussuureesta riippuen mitaussignaali voidaan käsitellä seuraavalla tavalla: Kiihtyvyydeltä saatu signaali voidaan integroida nopeussignaalksi ja vastaavasti nopeussignaali voidaan muuttaa siirtymäksi; signaalista suodatetaan haluttu taajuusalue, josta kokonaistasoa tarkastellaan; kokonaistason suuruus ilmoitetaan yleensä joko tehollisarvona, huippuarvona tai huipusta huippuun arvona; mittalaite voi myös laskea tärinärasituksen, joka on standardisoitu tärinän kokonaistason laskentatapa. [1, s. 73–74.]

Signaalianalysointilaitteissa on lukuisia mitaussignaalin käsittelyyn liittyviä asetuksia sekä mahdollisuus useaan mitaussignaalin esitystapaan. Tärkeimpiä asetuksia signaalin esikäsittelyyn ovat: laskostuksenestosuodatin, integrointi, näytepituus, A/D-muunnos ja limititys. Signaalin esikäsittelyn jälkeen värähtelynäytettä voidaan alkaa muokkaamaan haluttuun esitysmuotoon, kuten aikatasoon, spektriin tai kokonaistasoon. [1, s. 74–76.] Kuvassa 20 on esitetty aikatasosignaali ja sen spektri.



Kuva 20. Aikatasosignaali ja sitä vastaava spektri [2, s. 191.]

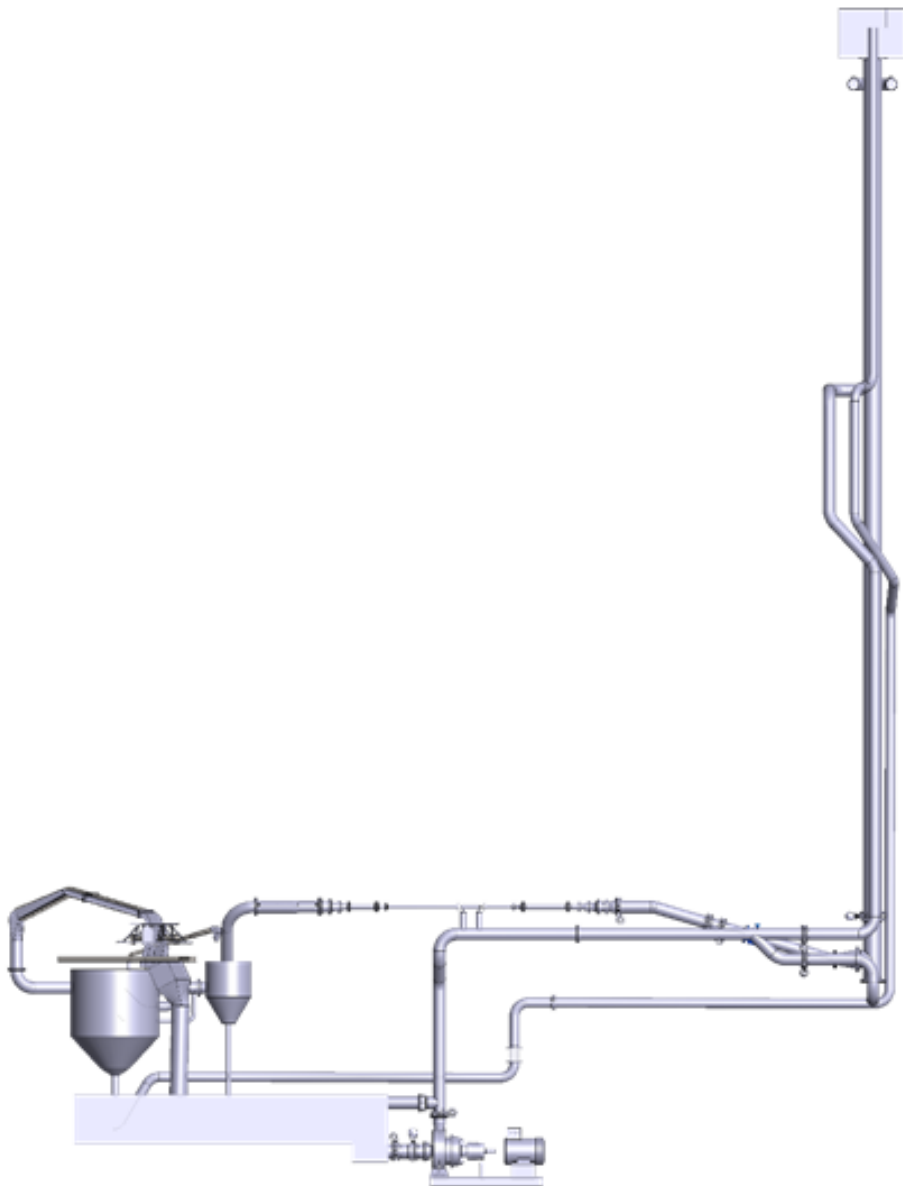
Esitysmuotoja voidaan vielä jatkokäsitellä. Aikatasoon esitykseen voidaan määrittää liipaisu, jolloin mittaus alkaa. Liipaisu voi olla sisäinen tai ulkoinen. Aikataso voidaan myös tahdistaa, jolloin



yksittäisen pisteen kohdalla lasketaan eri näytteiden vastaavan pisteen arvo yhteen. Spektri muodostuu matemaattisten Fourier-sarjojen avulla. Fourier-sarjoilla voidaan osoittaa minkä tahansa signaalin olevan eri amplitudien ja taajuuksien sinimuotoisten harmonisten signaalien summa. Spektrin käsittelyyn on paljon erilaisia asetuksia, kuten: Spektrin taajuuserottelukyvyn määrittäminen, keskiarvostuksen tapa, spektri-ikkunan painotus ja spektrimittauksen liipaisu. [1, s. 76–83.]

## 5 D200 Gravimetrinen nestevirtauskalibrointilaite

D200 gravimetrinen nestevirtauskalibrointilaite toimii vesivirtauksen standardina Suomessa. [6] [7, s. 9.] D200 nimi tulee kalibrointilaitteeseen liitettävän virtausmittarinputken maksimikoosta, joka on ISO (International Standards Organization) standardin mukainen putkikoko DN200 ("Diametre nominal").



Kuva 21. D200 Gravimetrinen nestevirtauskalibrointilaite. [7, s. 9.]

Nestevirtauskalibrointilaitte koostuu ruostumattomasta teräksestä tehdystä putkistosta, kahdesta vesisäiliöstä, kahdesta pumpusta, virtausmittarin testiradasta, virtausta ohjaavasta divertteristä sekä kahdesta referenssinä toimivasta vaa'asta. Laitteen alavesisäiliö on tilavuudeltaan 14 kuutiometriä. Toinen vesisäiliö on tilavuudeltaan yhden kuution kokoinen ja sijaitsee yli 20 metrin korkeudessa. Suuremman pumpun moottorin teho on 160 kW ja se pystyy pumppaamaan vettä 200 l/s. Pienemmän pumpunmoottorin teho on 45 kW. Testiradalla on käytössä hydraulinen teleskoopisylinteri, joka helpottaa virtausmittarin vaihtoa. Divertteri ohjaa virtauksen vaa'alle tai takaisin alavesisäiliöön. Divertterissä on myös säädettävä suutin, joka säätää divertteriltä tulevan virtauksen. Suuttimen säätötarkkuus on 0,1 mm. [7, s. 9, 10, 16.]

Gravimetrisen nestevirtauskalibrointilaitteen toiminta perustuu veden pudottamiseen 20 metrin korkeudesta, mikä luo putkistoon pysyvän kahden baarin paineen. Laitteen alemmasta säiliöstä pumpataan vettä ylempään säiliöön, josta vesi putoaa painovoiman vaikutuksesta alas testiradalle. Vettä on myös mahdollista ajaa suoraan testiradalle pumppujen avulla. Virtausmittarin testiradalta vesi jatkaa matkaa divertterille, jossa se ohjataan joko vaa'alle tai sen ohi takaisin alempaan vesisäiliöön.

Testiradalla olevan kalibroitavan virtausmittarin tulosta verrataan referenssinä toimivan vaa'an näyttämään. Laitteiston mittausepävarmuus on 0,05 %, kun kattavuuskerroin on 2. Nestevirtauskalibrointilaitte mittaa massaa, aikaa, painetta, lämpötilaa, veden tiheyttä, ilmanpainetta ja ilman kosteutta. Mittaukset suoritetaan MIKES-standardien mukaisesti ja ne ovat jäljitettävissä SI-suureisiin. [6] [7, s. 9, 11.]

Mittausten ja anturidatan keräykseen käytetään National Instrumentsin CompactRIO-moduulijärjestelmää sekä LabVIEW-ohjelmaa. Kaikki anturi data kerätään ja tallennetaan 35 mikrosekunnin välein. [6] [7, s. 18.]

## 6 Työn toteutus

### 6.1 Värähtelymittaustoiminnan suunnittelu

Värähtelymittaustoiminnan suunnittelu aloitetaan kartoittamalla laitteet ja kohteet, joille mitaustoiminta on teknisesti mahdollista toteuttaa ja joille sen toteuttaminen on kannattavaa. Valituille laitteille ja kohteille laaditaan mittaussuunnitelma, jonka tulisi määrittää käytettävät mittausten menetelmät ja menetelmäkohtaiset raja-arvot, mittaussvälit, mittaussjärjestelmät, käytännön järjestelyt ja mittausten dokumentoinnin. [3, s. 48.]

Valvottavat kohteet ja laitteet tulee arvioida, jotta voidaan varmistua laitteiden sopivuudesta värähtelyn valvontaan. Jokaisesta kohteesta tulee arvioida mahdollisuus kunnonvalvonnan toteuttamiseen tarkoituksenmukaisilla värähtelymittausmenetelmillä sekä onnistuuko mittauspisteiden sekä mittausslaitetyyppien valinta standardien mukaisesti. [3, s. 49.]

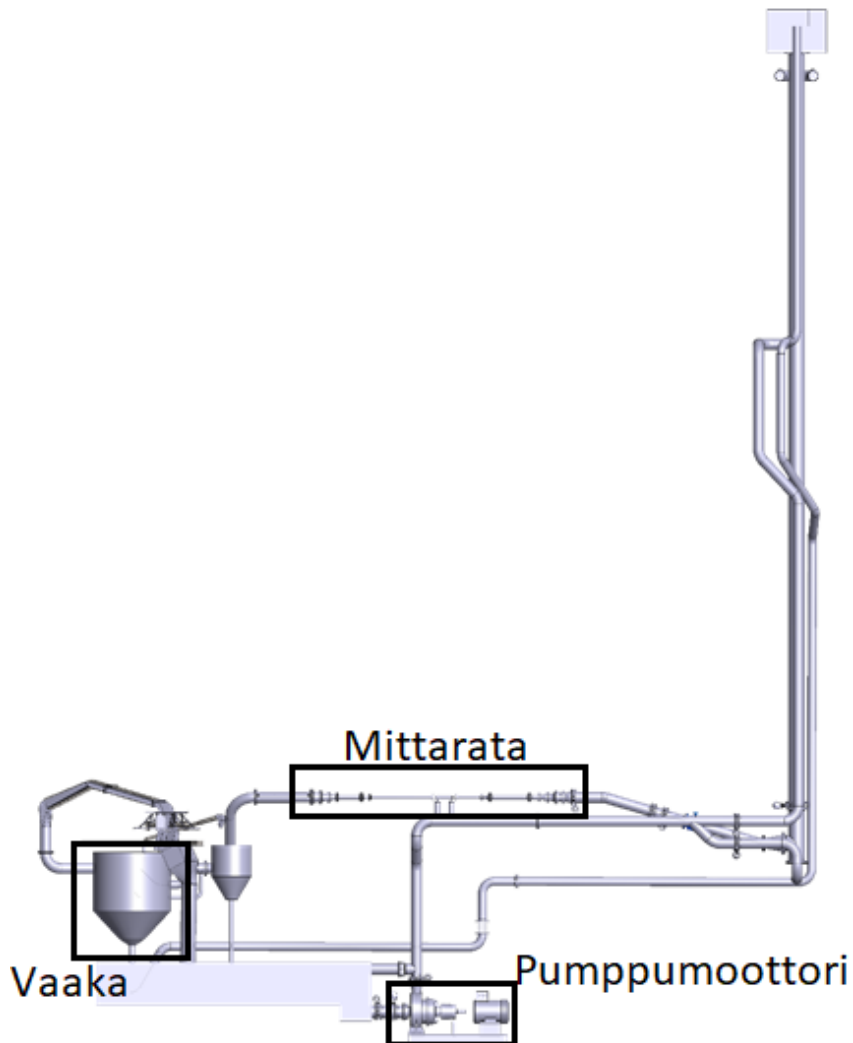
Kohteista ja laitteista mitatut mittaustulokset tulee säilyttää vähintään kolmen vuoden ajan. Värähtelyyn liittyvät perusarvot säilytetään laitteen koko eliniän ajan. Mahdolliset vikaa kuvaavat mittaustulokset ja muut vikadokumentit, kuten johtopäätökset, korjausraportit, laskelmat ja valokuvat, tulee vian selvityksen yhteydessä tallentaa. [3, s. 57.]

Värähtelymittaukset suoritetaan aina huollon tai korjauksen jälkeen. Näin varmistetaan huollon onnistuminen sekä saadaan uudet vertailuarvot laitteen valvontaa varten. Jos valvottavissa kohteissa huomataan merkittäviä muutoksia värähtelyn suureissa, tulee mittaustoimintaa tehostaa. Mittaustoimintaa voidaan tehostaa lyhentämällä mittaussvälejä tai ottamalla käyttöön täydentävä mittaussmenetelmä. Täydentäviä menetelmiä on esimerkiksi lämpökuvauks tai voiteluanalyysi. Lisäksi voidaan käyttää toista mittaussjärjestelmää tukemaan olemassa olevaa järjestelmää. Täydentäviä menetelmiä voidaan myös käyttää vianmäärityksen ja johtopäätösten varmentamiseen. [3, s. 50, 54.]

Mittaustoiminnan sujuvuuden kannalta organisaatiolla tulee olla mittaustoimintaa koulutettua henkilöstöä, joilla on suoritusvastuu mittaustoiminnasta sekä ylläpitovastuu mittaussohjelmistosta. Selkeät mittausskäytännöt tulee laatia sekä mittaustulosten tulkintaa varten tulee järjestää mittaustoiminnan parissa työskenteleville koulutusta, jotta mittausten tekeminen olisi hyödyllistä ja tuloksia osattaisiin tulkita oikein. Mittaustulosten tarkastelu välittömästi mittausten jälkeen tulee olla mahdollista. [3, s. 56.]

### 6.1.1 Mittauskohteet ja menetelmät

D200 gravimetrisessä nestevirtauskalibrointilaitteessa mitauskohteiksi valittiin kolme nestevirtauskalibrointilaitteen aluetta. Kuvassa 22 on esitetty laitteen alueet, jotka ovat pumppumoottorin alue, mittaradan alue sekä vaa'an alue.

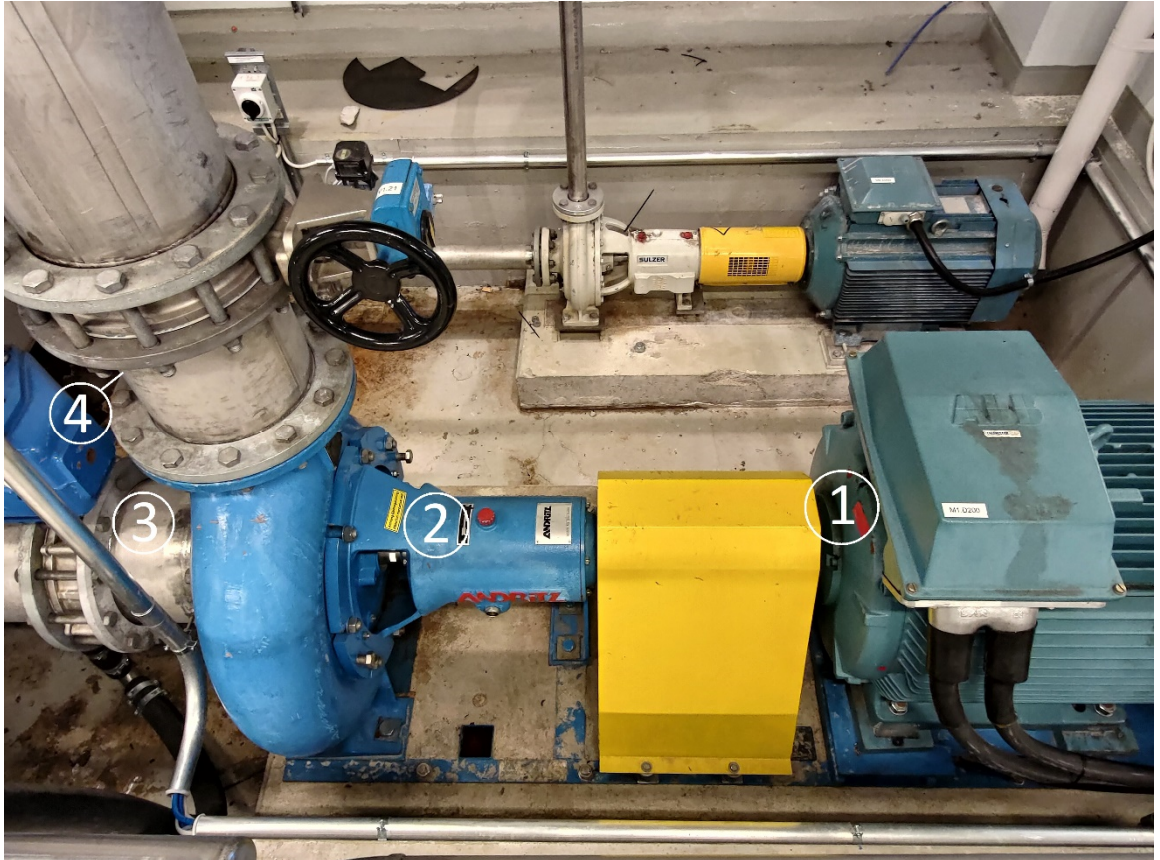


Kuva 22. Mittauskohteet

Jokaiselta alueelta tarkasteltiin värähtelyä kolmeen akselisuuntaan eri mittauspisteistä. Pumppumoottorin alueelta valittiin neljä mittauspistettä, mittaradalta viisi mittauspistettä ja vaa'alta kuusi mittauspistettä.

Pumppumoottorin alueella on neljä kiihtyvyyssanturia moottorin akselin suuntaisesti. Ensimmäinen anturi on moottorissa. Toinen anturi on pumpun akselin päällä. Kolmas anturi on pumpun

vedentulopään putkessa. Neljäs anturi on pumpun vedenlähtöpään putkessa. Käytetyt anturit ovat malliltaan Kistler 8766A50 -kiihtyvyyssantureita, jotka mittaavat kiihtyvyyttä kolmeen suuntaan. Antureiden Y-akseli on moottorin akselinsuunnassa, X-akseli on vaakasuunnassa ja Z-akseli on pystysuunnassa. Kuvassa 23 on esitetty pumppumoottorin mittauspisteet.



Kuva 23. Pumppumoottorin mittauspisteet

Mittaradan alueella on viisi kiihtyvyyssanturia. Ensimmäinen anturi on mittaradan alkupäässä, jossa putki on tuettu rakenteisiin ja missä mittaradan venttiili sijaitsee. Anturi tulee venttiin jälkeen putken päälle. Toinen anturi on mittaradan ensimmäisen putken kannattaminen juuressa. Kolmas anturi on mittaradan putken päällä lähellä kalibroitavaa laitetta. Neljäs anturi on asetettu samalla tavalla kuin toinen anturi, mutta kalibroitavan laitteen jälkeiselle puolelle. Viides anturi on mittaradan loppupäässä, rakenteisiin tuetussa kohdassa, putken päällä. Anturit asetetaan niin, että niiden Y-akseli on putken suunnassa, X-akseli vaakasuunnassa ja Z-akseli pystysuunnassa. Kuvissa 24 ja 25 on esitetty mittaradan mittauspisteet.



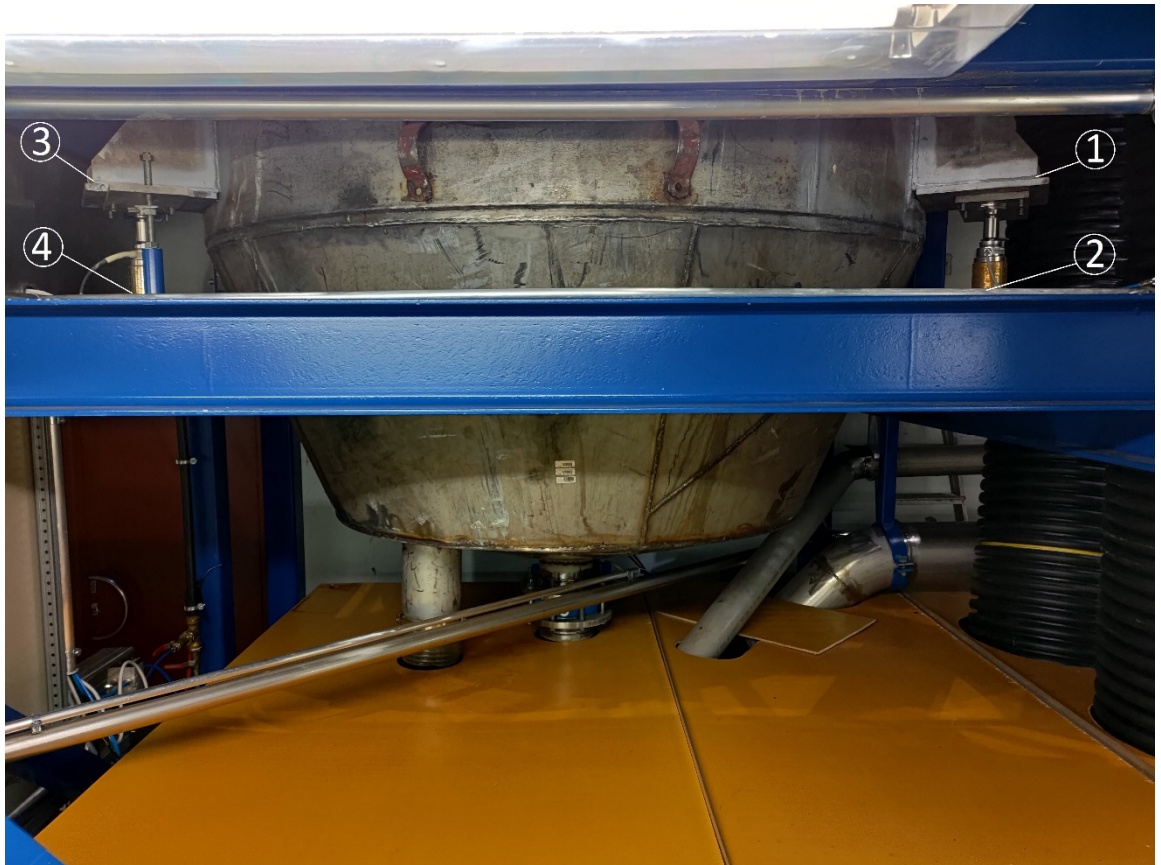
Kuva 24. Mittaradan mittauspisteet 1–4



Kuva 25. Mittaradan mittauspisteet 2–5

Vaa'an alueella on kuusi kiihtyvyyssanturia. Anturit on sijoitettu niin, että kolme anturia on kiinni vaakasäiliön tukipisteissä ja kolme tukipisteiden alapuolella rakenteessa. Anturit asetetaan niin, että niiden X-akseli vaakasuunnassa, Z-akseli on pystysuunnassa ja Y-akseli on samassa suunnassa kuin mittaradan ja pumppumoottorin Y-akseli. Kuvassa 26 on esitetty vaa'an mittauspisteet.





Kuva 26. Vaa'an mittauspisteet 1–4

## 6.2 Mittausvälit

Mittauskohteista otetaan värähtelynäytteitä. Näytteiden näytteenottotaajuus on 8000 hertsiä ja näytteen kesto on 20 sekuntia. Värähtelynäytteet otetaan neljässä eri laitteen käyttötilassa, jotka ovat esitetty taulukossa 5. Jokaisesta tilasta otetaan kolme mittaustoistoa.

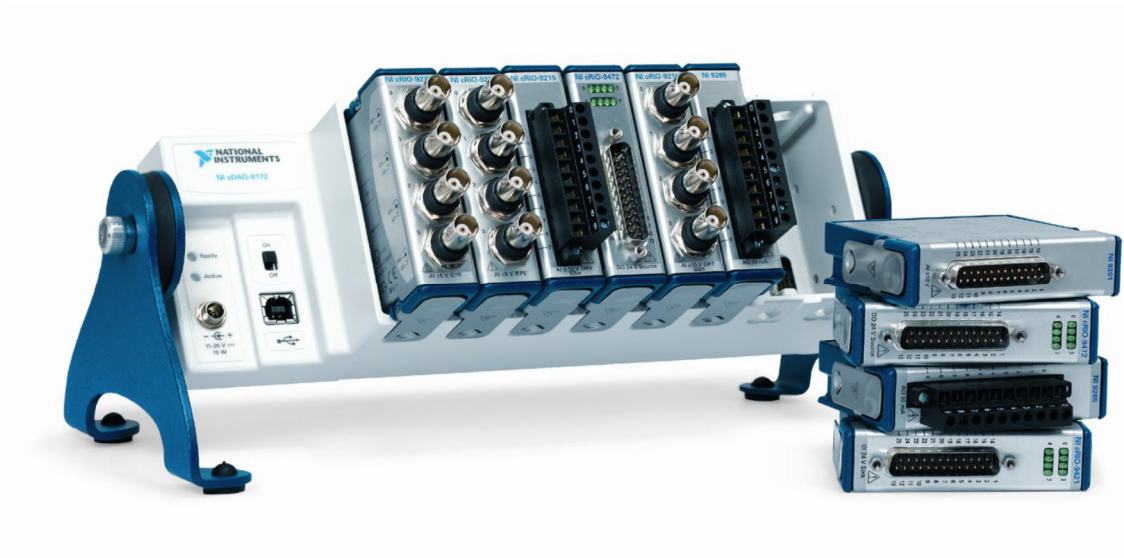
Taulukko 5. Mittauskohteet ja käyttötilat

Alue	Tila			
Pumppu- moottori	Moottorin teho 60 %	Moottorin teho 60 % Kalibrointimit- taus käynnissä	Moottorin teho 70 %	Moottorin teho 71 % Kalibrointimit- taus käynnissä

Mittarata	Virtausnopeus 40 l/s	Virtausnopeus 40 l/s Kalibrointimitaus käynnissä	Virtausnopeus 160 l/s	Virtausnopeus 160 l/s Kalibrointimitaus käynnissä
Vaaka	Virtausnopeus 40 l/s	Virtausnopeus 40 l/s Kalibrointimitaus käynnissä	Virtausnopeus 160 l/s	Virtausnopeus 160 l/s Kalibrointimitaus käynnissä

### 6.3 Värähtelymittausjärjestelmä

Mittausjärjestelmänä käytetään puolikiinteästi asennettavaa järjestelmää. Järjestelmä sisältää seuraavat anturit ja laitteet: kuusi kappaletta kolmeen suuntaan mittaavaa kiihtyvyyssanturia, viisi kappaletta National Instrumentsin 24-bittistä, nelikanavaista, NI9233 AD-muunnin -moduulia, yksi National Instrumentsin 32-kanavainen jännitetulomoduuli sekä National Instrumentsin cDAQ-9172 USB-telakka National Instrumentsin moduuleille.

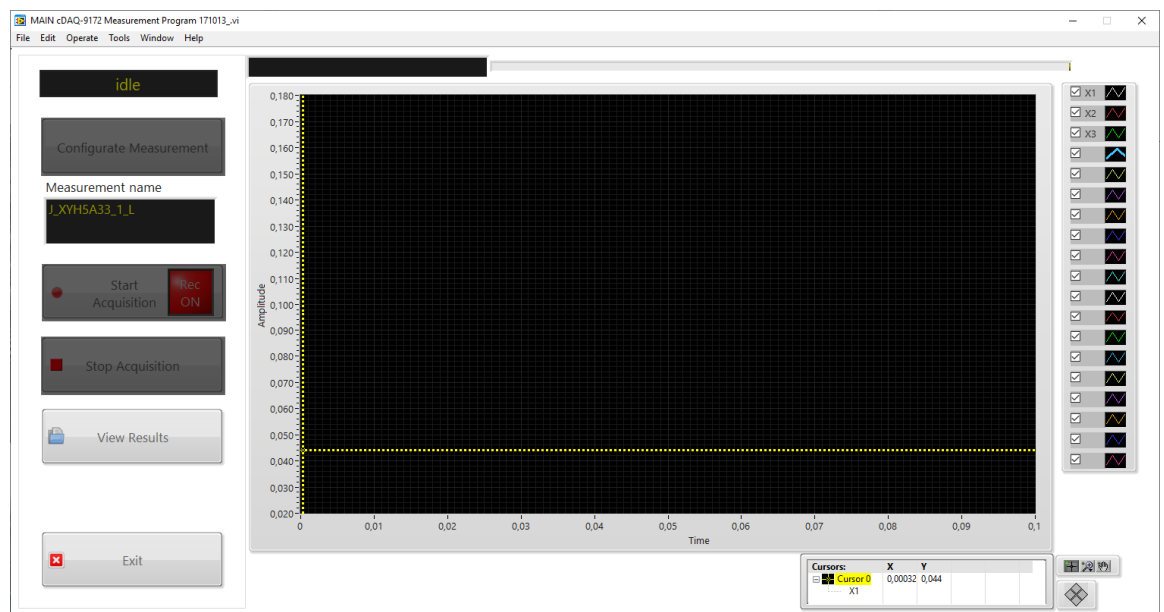


Kuva 27. National Instruments cDAQ-9172 telakka sekä erilaisia moduuleja.

National Instrumentsin laitteet muodostavat mittauslaitteen ja kiihtyvyyssantureita käytetään värähtelyn mittaamiseen.

### 6.3.1 LabVIEW-ohjelmisto

Mittausjärjestelmän ohjaamiseen, mittausten lukemiseen ja tallentamiseen käytetään LabVIEW-ohjelmistoa. Kuvassa 28 on esitetty LabVIEW-ohjelman päänäkymä. Ohjelma lukee cDAQ-telakan moduulit, joilta anturien mittaustieto tulee. Anturien mittaustieto näytetään päänäkymässä ja tallennetaan TDMS (Technical Data Management Streaming) -muotoon. TDMS on National Instrumentsin tiedostomuoto, joka on optimoitu mittaustietojen tallentamiseen. [8]



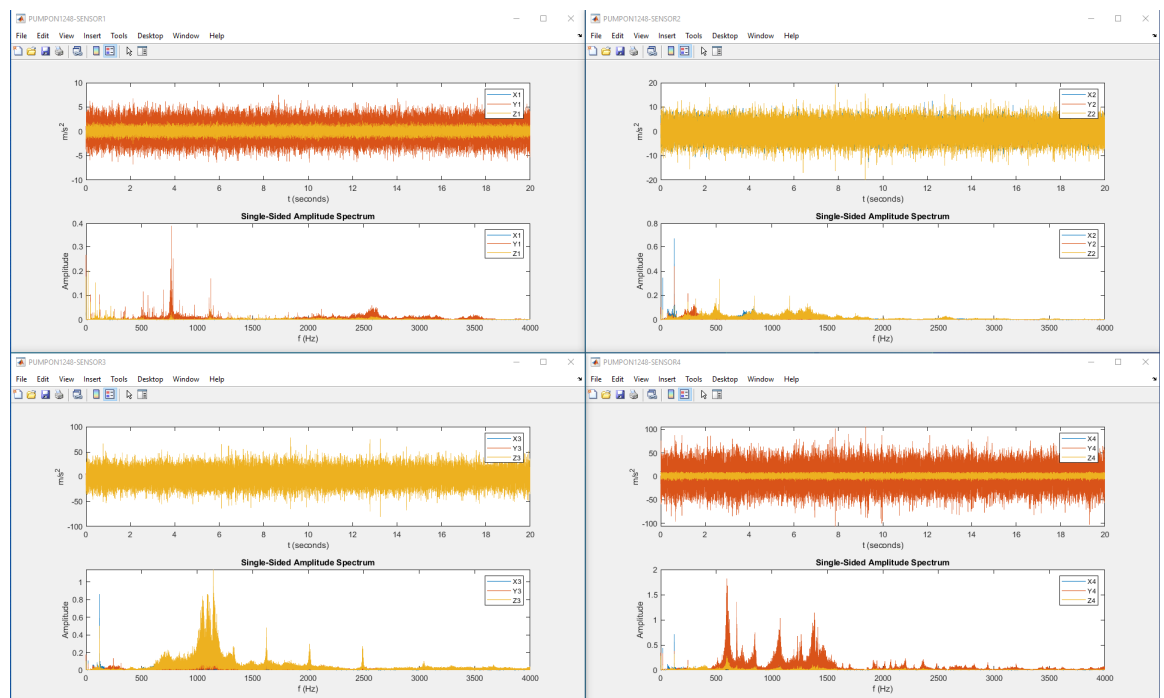
Kuva 28. LabVIEW-ohjelman päänäkymä

### 6.4 Värähtelymittaustulosten käsittely

Värähtelymittaustulokset tallentuvat LabVIEW-ohjelmalla TDMS-tiedostomuotoon. Jokaisen kiihtyvyyssanturin x-, y- ja z-kanavan tulokset ovat TDMS-taulukossa lukuarvoina. Tulosten lukemiseen käytetään MATLAB-ohjelmistoa.

MATLAB on sekä ohjelmointiympäristö että numeerinen laskenta-ympäristö, jota miljoonat insinöörit ja tutkijat käyttävät tietojen analysointiin, algoritmien kehittämiseen ja mallien luomiseen. MATLAB yhdistää iteratiivisia analyysejä ja suunnitteluprosesseja varten viritetyn työpöytäympäristön ohjelmointikieleen, joka laskee suoraan matriisimatematiikkaa. [9]

Mittaustulosten käsittelyä varten luotiin MATLAB-ohjelma, joka lukee taulukosta anturien mitaustiedot. Ohjelma laskee mittaustiedoista värähtelyyn liittyviä perusparametrejä kuten: keskiarvon, keskihajonnan, tehollisarvon, suurimman ja pienimmän arvon, huipusta huippuun arvon ja signaalin-kohina -suhteen. Ohjelma luo myös mittaustiedosta aikataason signaalin kuvaajan sekä sen spektrin. Kuvassa 29 on MATLAB-ohjelman kuvaajat värähtely signaaleista sekä niiden spektri. Ohjelma tallentaa lasketut perusparametrit taulukkoon sekä tallentaa kuvaajat PNG-kuvina ja MATLAB-kuvaajina. Työssä käytetyn MATLAB-ohjelmisto koodi on esitetty liitteessä 1.



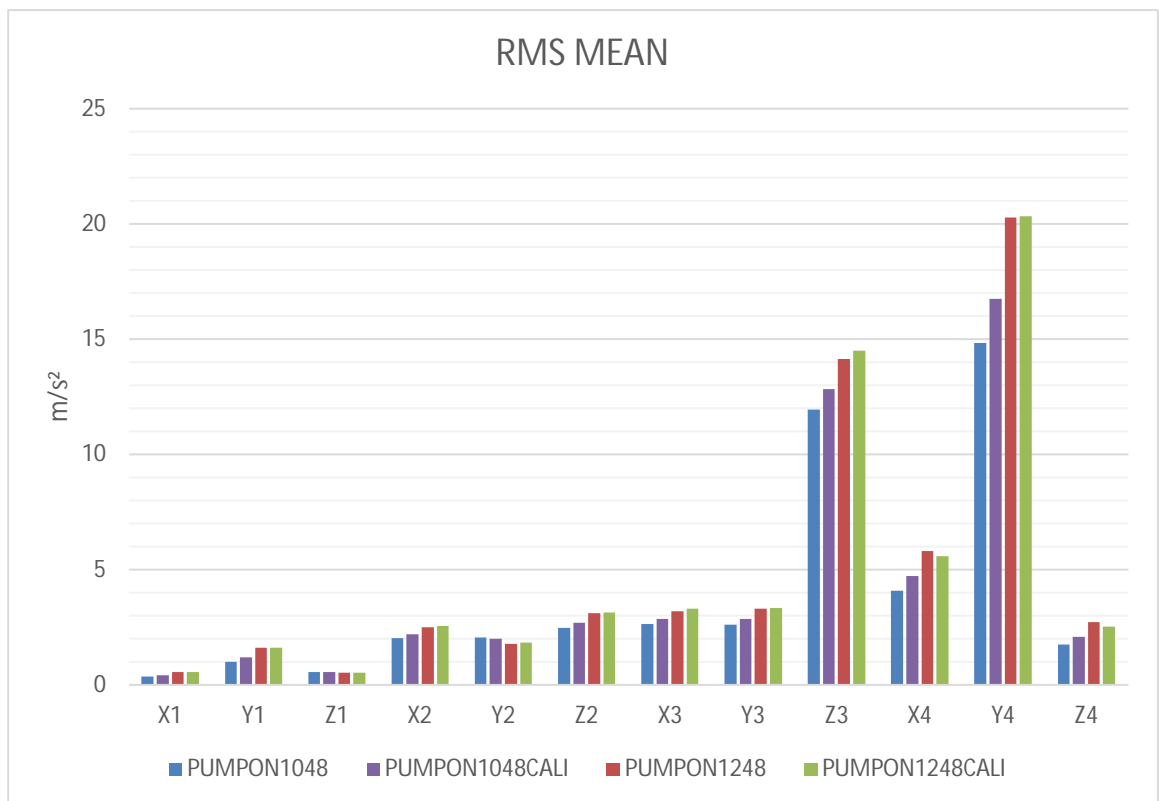
Kuva 29. MATLAB-kuvaajat värähtelysignaalista.

## 7 Työn tulokset

### 7.1 Värähtelyn tehollisarvot

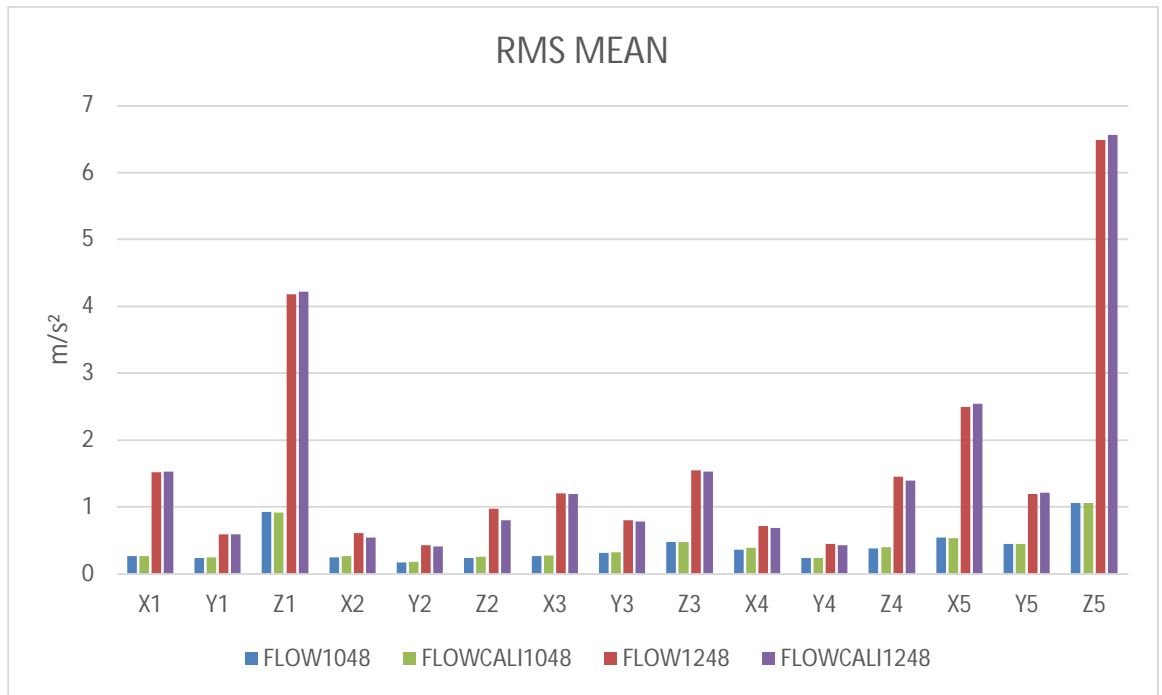
D200 gravimetrisen nestevirtauskalibrointilaitteen värähtelystä tutkittiin värähtelyn kokonaistaso. Värähtelyn kokonaistaso selviää parhaiten värähtelyn tehollisarvosta. Tehollisarvon keskiarvokaaviot esittävät, kuinka paljon värähtelyä on ollut kuhunkin suuntaan tietyllä anturilla.

Kuvassa 30 on esitetty pumppumoottorin alueen tehollisarvon kaavio, josta voidaan havaita värähtelyn kasvu siirryttäessä lähemmäksi pumppua. Kaaviosta nähdään myös tilojen vaikutus värähtelyn tehollisarvoon. Moottorin kierrosluvun kasvattamisella on suuri vaikutus.



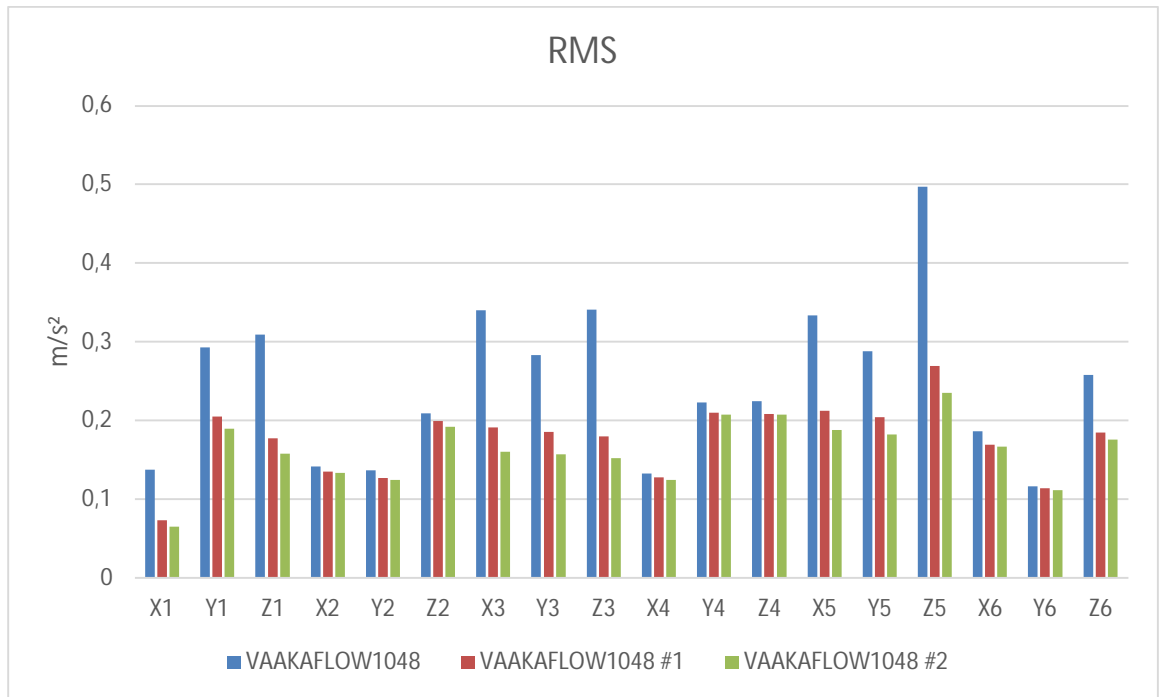
Kuva 30. Pumppumoottorin alueen värähtelyn tehollisarvon kaavio.

Kuvassa 31 esitetyistä mittaradan alueen tehollisarvon kaaviosta havaitaan, että värähtely kasvaa, kun moottorin kierroslukua kasvatetaan. Kalibrointimittauksen aikana värähtelyn tehollisarvossa ei ole juurikaan muutosta. Kaaviosta havaitaan myös, että värähtelyä esiintyy eniten mittaradan alku- ja loppupäässä Z-akselilla, joka on pystysuunnassa.



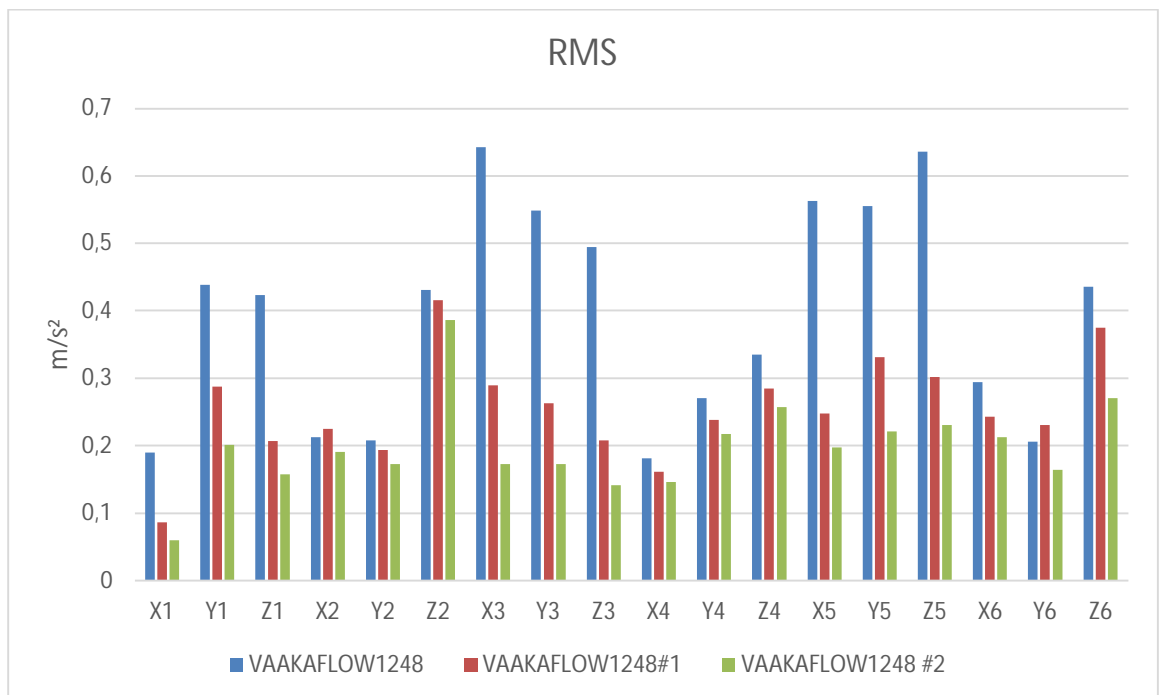
Kuva 31. Mittaradan alueen tehollisarvon kaavio.

Vaa'alta tehdyistä värähtelymittaustoistoista ei voida ottaa keskiarvoa, ajettaessa vettä vaa'alle, koska jokaisen mittauksen jälkeen vaa'an aloituspaino muuttui. Vaa'alla olevalla veden määrällä on vaimentava vaikutus värähtelyn kokonaistasoon. Kuvassa 32 pumppumoottorin kierrokset olivat 1048 kierrosta per minuutti ja vettä lisääntyi mittausten välissä noin 401,5 kilogrammaa. Ensimmäisessä mittauksessa vaaka oli tyhjä.



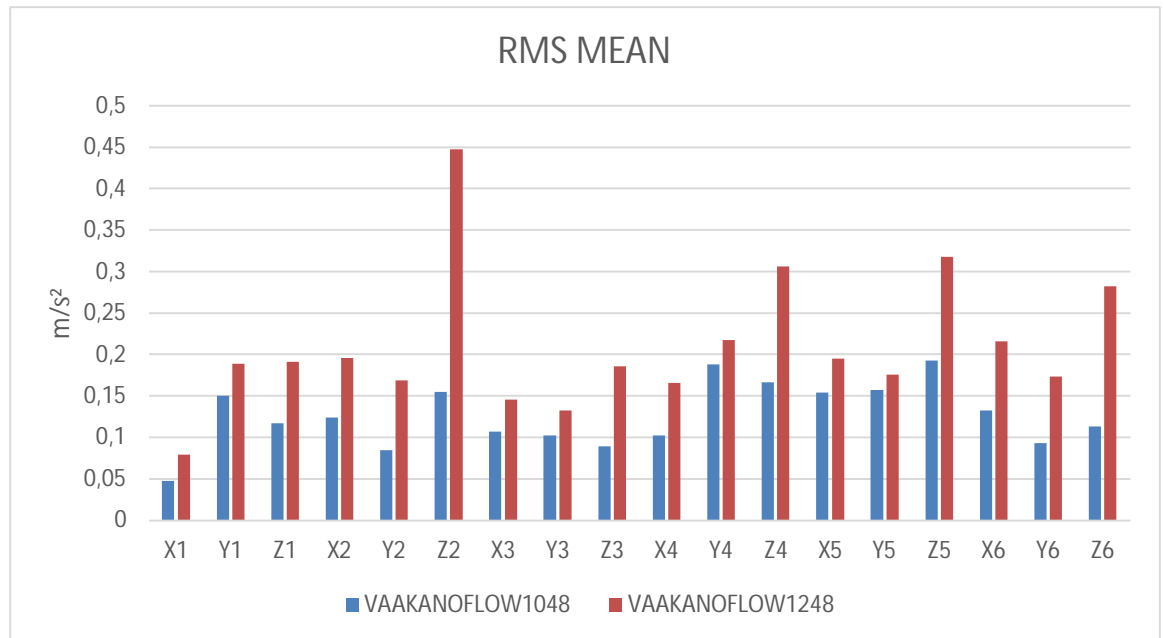
Kuva 32. Vaa'an värähtelyn tehollisarvon kaavio, kun virtausnopeus oli 40 l/s.

Kuvassa 33 pumppumoottorin kierrokset olivat 1248 kierrosta per minuutti ja vettä lisääntyi mitausten välissä noin 1653 kilogrammaa. Ensimmäisessä mittauksessa vaaka oli tyhjä. Värähtelyn kokonaistaso vaa'alla olevissa antureissa kasvoi, koska virtausnopeus oli suurempi. Molemmilla kierrosnopeuksilla värähtelyä esiintyi eniten antureilla, jotka olivat kiinnitettynä vaakaan.



Kuva 33. Vaa'an värähtelyn tehollisarvon kaavio, kun virtausnopeus oli 160 l/s.

Värähtelymittausten toistoista pystyttiin ottamaan keskiarvo, kun vettä ei ajettu vaa'alle. Divertteri ohjaisi veden tällöin ohi vaa'asta takaisin pääsäiliöön. Värähtelyä esiintyi enemmän vaa'an tukirakenteissa kuin itse vaa'assa.



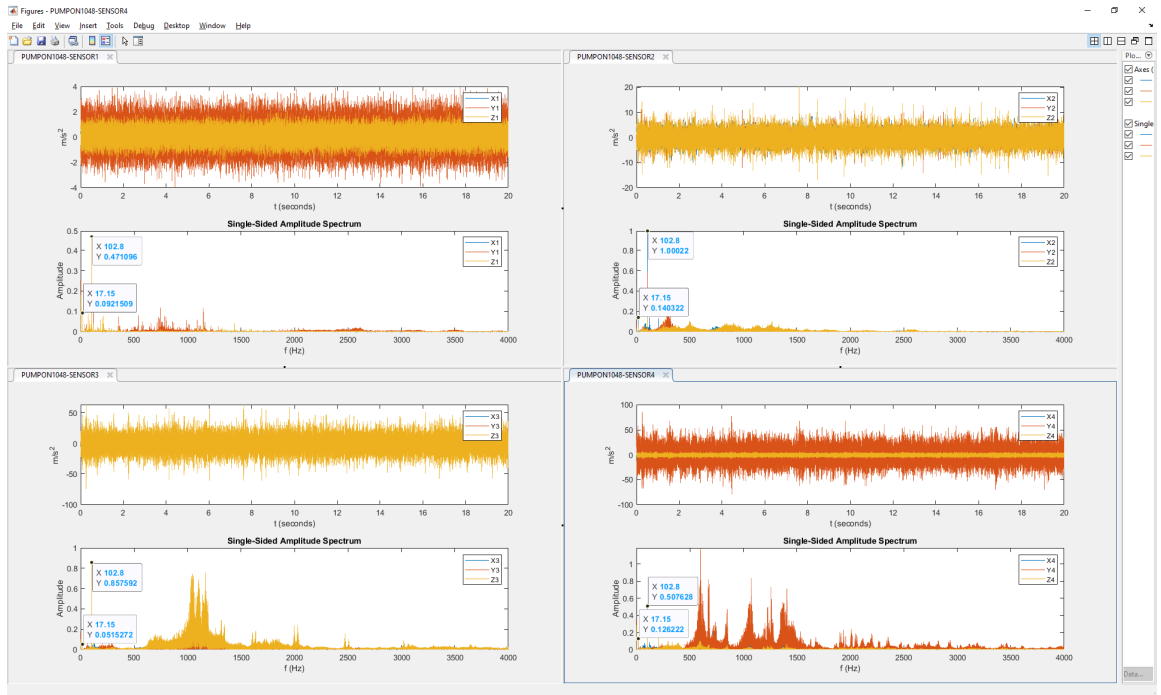
Kuva 34. Vaa'an värähtelyn tehollisarvon kaavio, kun vettä ei ajettu vaa'alle.

## 7.2 Värähtelyn aikatasosignaalit ja spektrit

Tehollisarvojen lisäksi tarkasteltiin värähtelyä aikatasossa sekä värähtelyn spektriä. Aikatasosta voidaan havaita värähtelyn hetkelliset piikit sekä värähtelyn jaksoisuus. Spektristä voidaan huomata värähtelyyn liittyviä taajuuskomponentteja, kuten moottorin pyörimistaajuus sekä pumpun lapataajuus.

Kuvissa 35 ja 36 on pumppumoottorin alueen värähtelymittaustulokset esitettyinä aikatasossa ja taajuusspektrissä. Aikatason signaalista nähdään, että värähtelyä oli usealla anturilla yhteen suuntaan enemmän kuin muihin suuntiin. Spektriin on merkattu moottorin pyörimistaajuus sekä ensimmäinen pumpun pyörimisestä aiheutuva herätetaajuus.





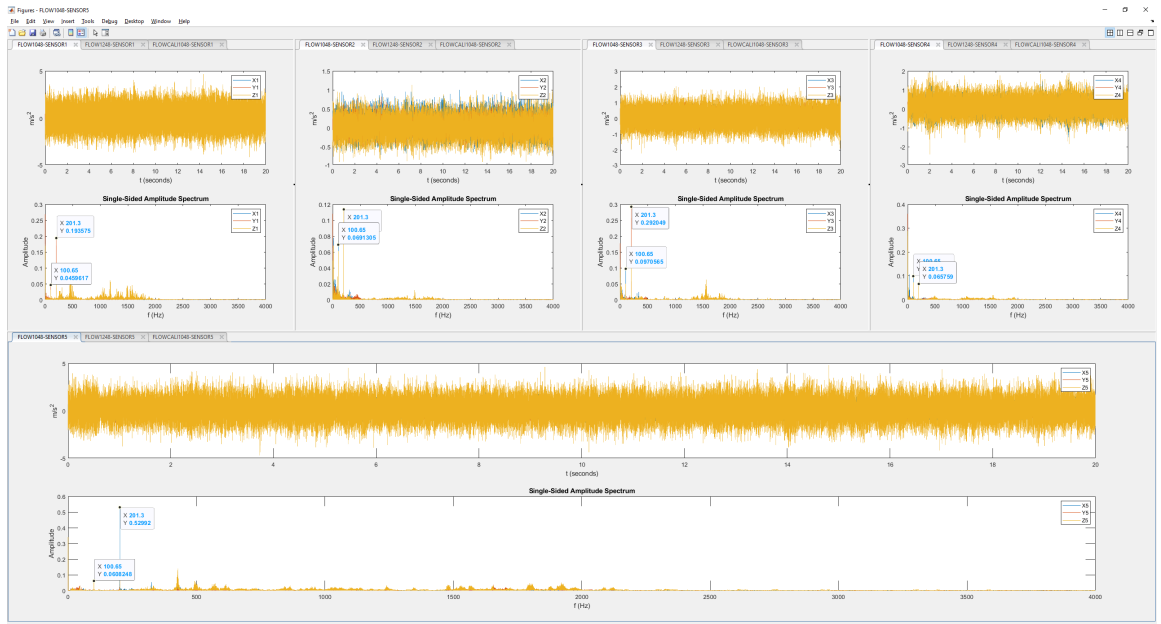
Kuva 35. Pumppumoottorin alueen värähtelysignaalit ja -spektrit, kun moottorin kierrokset olivat 1048 kierrosta per minuutti.



Kuva 36. Pumppumoottorin alueen värähtelysignaalit ja -spektrit, kun moottorin kierrokset olivat 1248 kierrosta per minuutti.

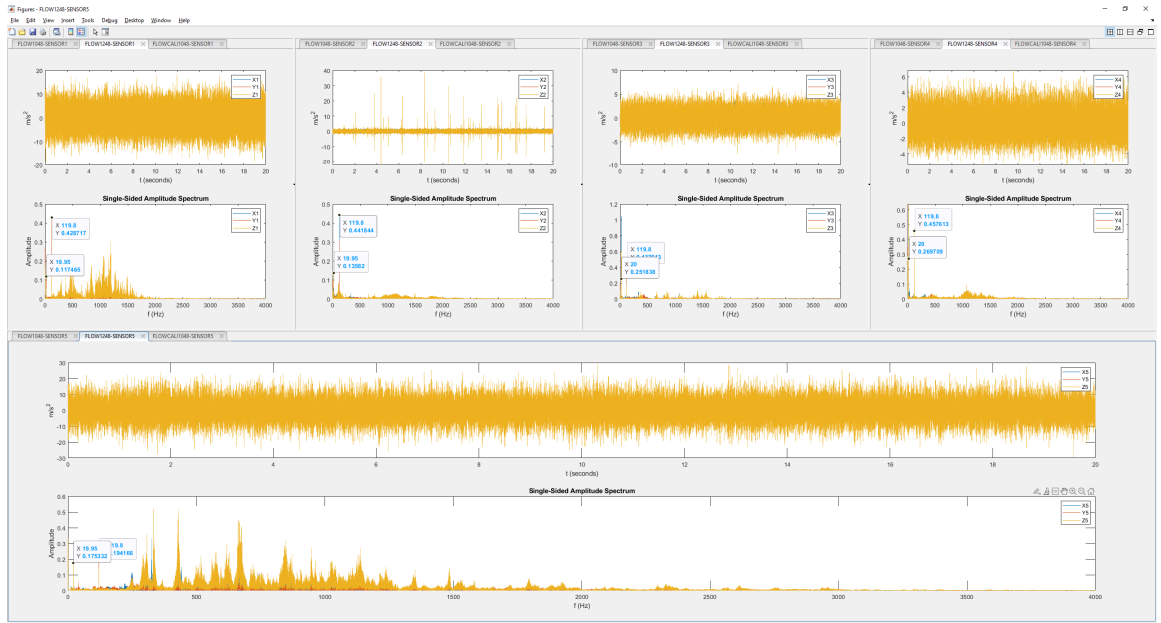
Kymmenen sekunnin kalibrointimittauksen aikana pumpumoottorin alueen värähtelyssä ei tapahtunut merkittävää muutosta.

Kuvissa 37–40 esitettyjen mittaradan alueen mitatuista värähtelistä havaitaan, että värähtely oli suurinta ensimmäisen ja viimeisen anturin Z-akselilla. Värähtelyn spektristä myös huomataan joko kaisella anturilla toistuvat amplitudi piikit 100 Hz ja 201 Hz kohdalla, kun moottorin kierrokset olivat 1048 kierrosta per minuutti.



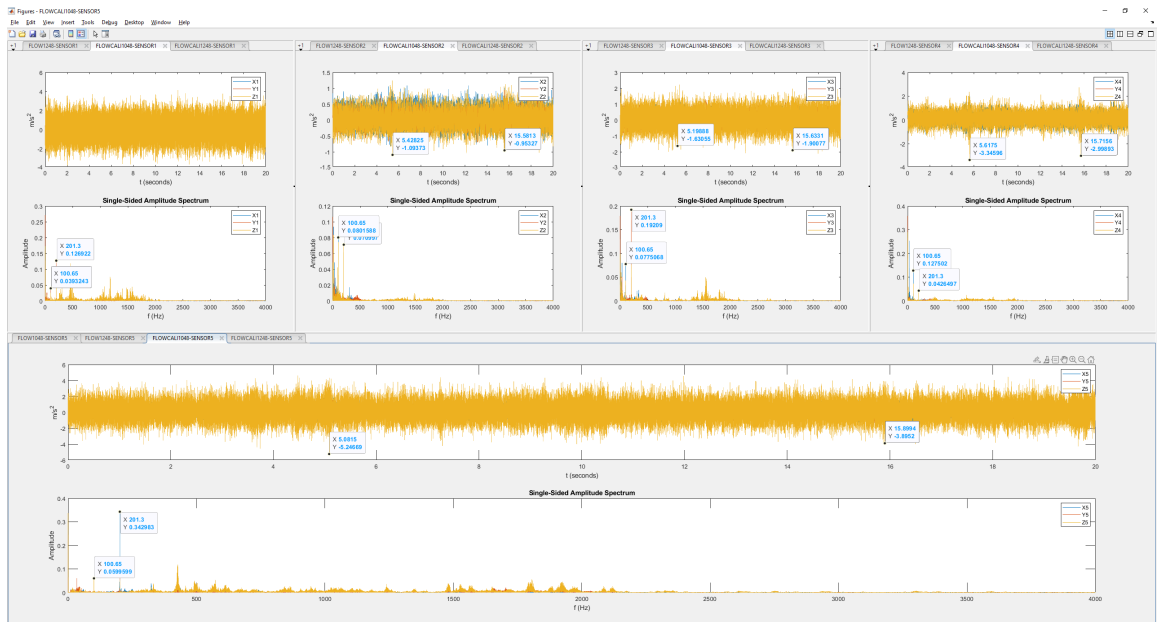
Kuva 37. Mittaradan värähtelysignaalit, kun moottorin kierrokset olivat 1048 kierrosta per minuutti.

Kun kierrokset kasvatettiin 1248 kierrokseen per minuutti, kasvoivat värähtely signaalin tasot moninkertaisiksi. Lisäksi toinen sensori havaitsi nopeita värähtely piikkejä Z-akselilla. Spektrissä toistuvat piikit siirtyivät 20 Hz ja 120 Hz kohdalle.



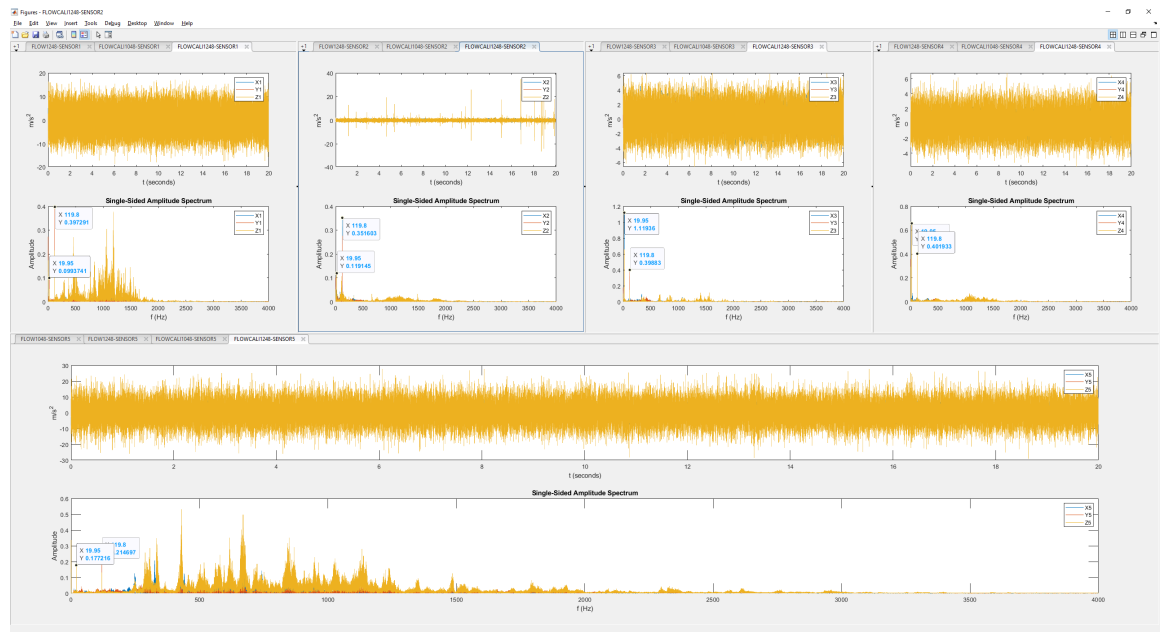
Kuva 38. Mittaradan värähtelysignaalit, kun moottorin kierrokset olivat 1248 kierrosta per minuutti.

Kun kierrokset olivat 1048 kierrosta per minuutti ja kymmenen sekunnin kalibrointimittaus oli päällä, värähtelysignaalista havaitaan diverterin liikkumisesta aiheutuva värähtelypiikki. Ainoastaan ensimmäinen kiihtyvyyssanturi ei tätä liikettä havaitse.



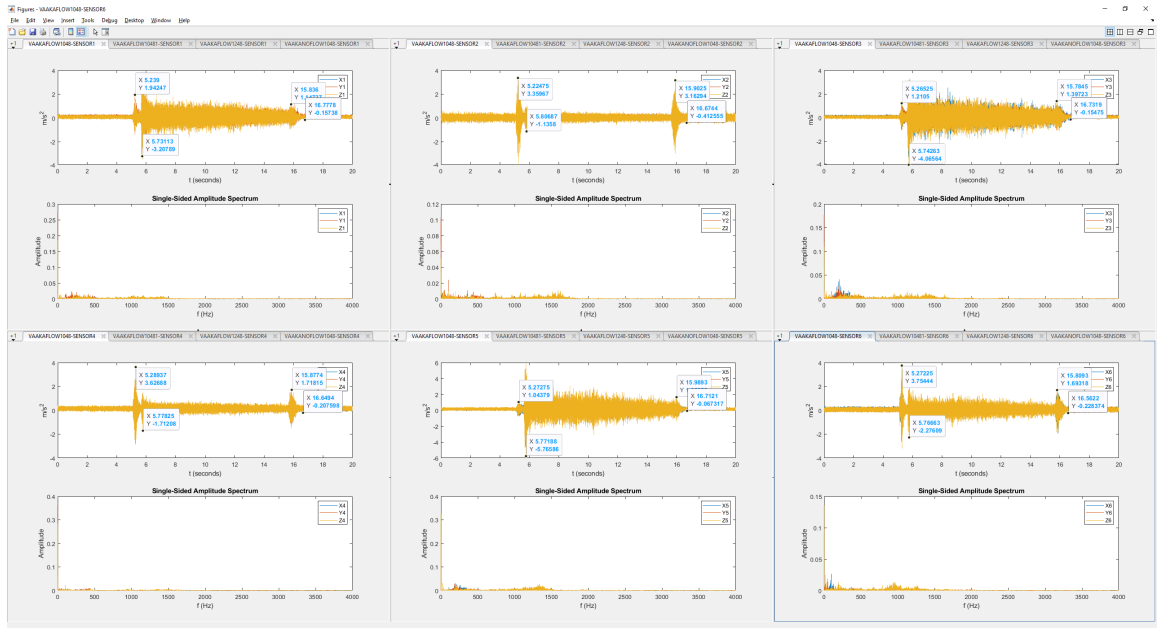
Kuva 39. Mittaradan värähtelysignaalit, kun moottorin kierrokset olivat 1048 kierrosta per minuutti ja kymmenen sekunnin kalibrointimittaus oli päällä.

Kun kierrokset kasvatettiin 1248 kierrokseen per minuutti, värähtelysignaalista ei enää erottanut kalibroitimittauksen diverterin liikettä.



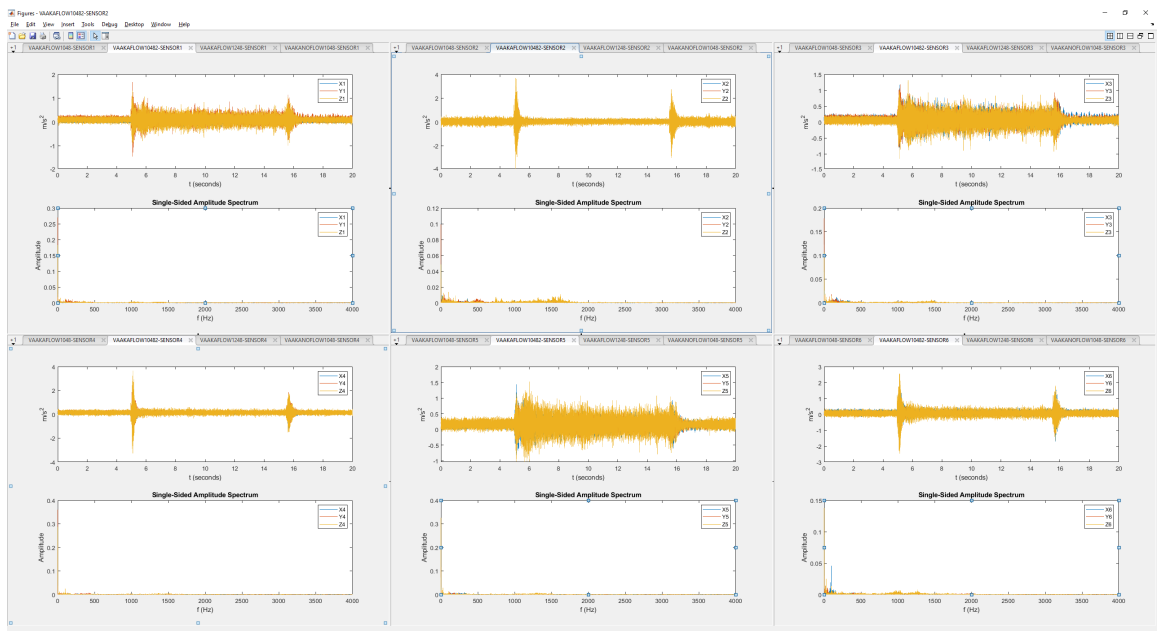
Kuva 40. Mittaradan värähtelysignaalit, kun moottorin kierrokset olivat 1248 kierrosta per minuutti ja kymmenen sekunnin kalibroitimittaus oli päällä.

Vaa'an alueelta mitatuista värähtelyistä voidaan havaita nesteen määrän vaikutus vaa'an värähtelyyn. Kuvassa 41 on vaa'an värähtely, kun nestettä ajettiin vaa'alle kymmenen sekunnin ajan. Aikatason signaalista huomataan selkeät piikit, kun diverterti kääntyy sekä kun nestettä alkaa virrata vaa'alle.



Kuva 41. Vaa'an värähtely, kun moottorin kierrokset olivat 1048.

Mittausten välissä vaa'an aloituspaino muuttui. Kuvan 41 mittauksissa vaa'an aloituspaino oli nolla. Kuvassa 42 aloituspaino oli noin 803 kg ja siitä huomataan, että aloituspainon muutoksella oli selkeä vaikutus värähtelyn kokonaistason.



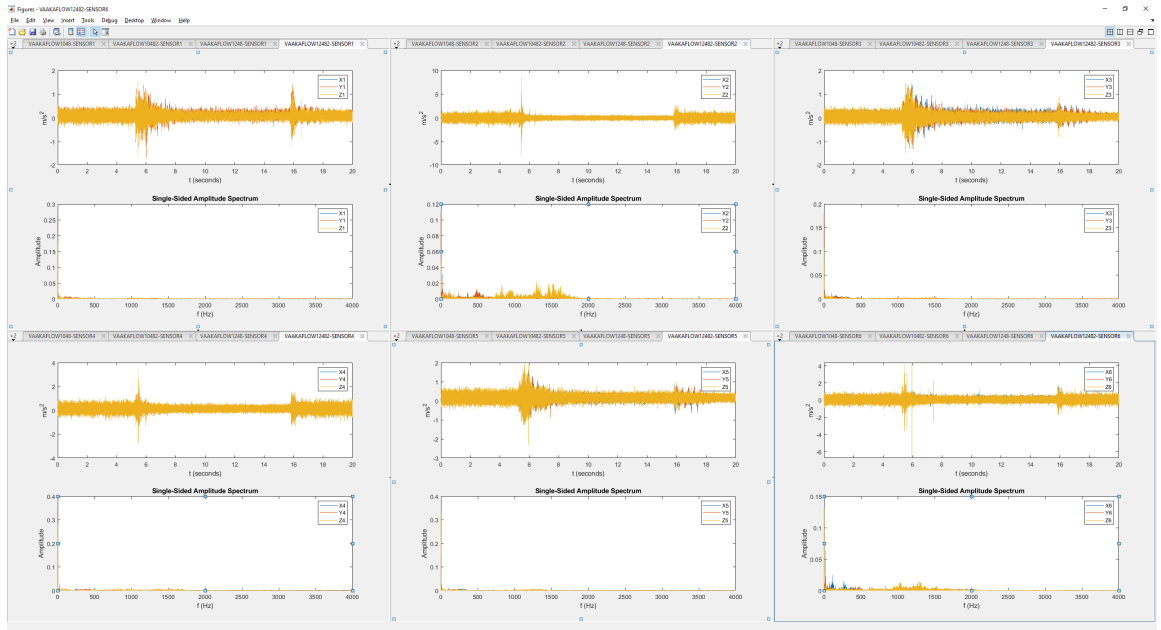
Kuva 42. Vaa'an värähtely kolmannessa mittaustoistossa, kun moottorin kierrokset olivat 1048.

Kun moottorin kierrokset kasvatettiin 1248 kierrokseen per minuutti lisääntyi myös värähtelyn kokonaistaso vaa'alla. Pumpun tehon muuttaminen vaikuttaa virtausnopeuteen, joka näkyy liisäntyneenä värähtelyinä. Kuvassa 43 virtausnopeus vaa'alle oli 160 l/s ja vaa'an aloituspaino oli nolla.



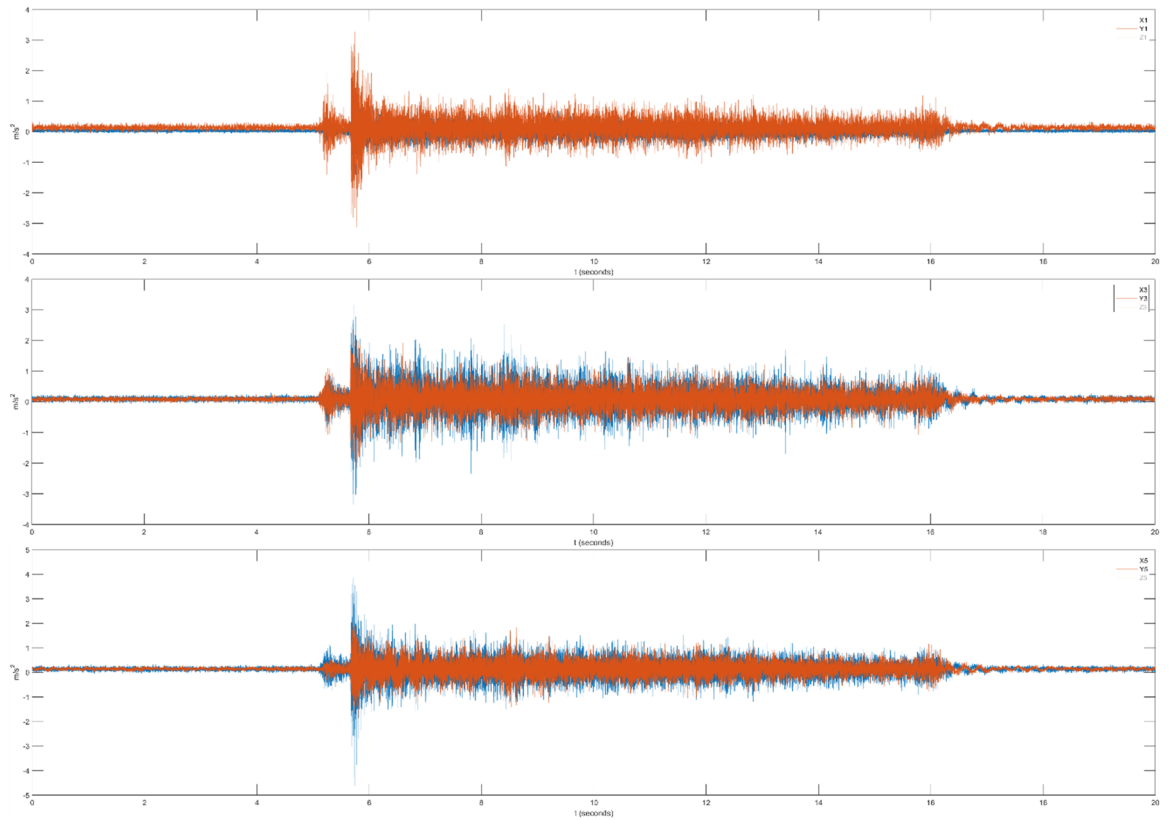
Kuva 43. Vaa'an värähtely, kun moottorin kierrokset olivat 1248.

Suuremmalla virtausnopeudella oli suurempi vaikutus värähtelyntason muuttumiseen mittaus-toistoilla. Kuvassa 44 vaa'an aloituspaino oli noin 3302 kg ja värähtelyn taso oli laskenut noin viidenneksen.



Kuva 44. Vaa'an värähtely kolmannessa mittaustoistossa, kun moottorin kierrokset olivat 1248.

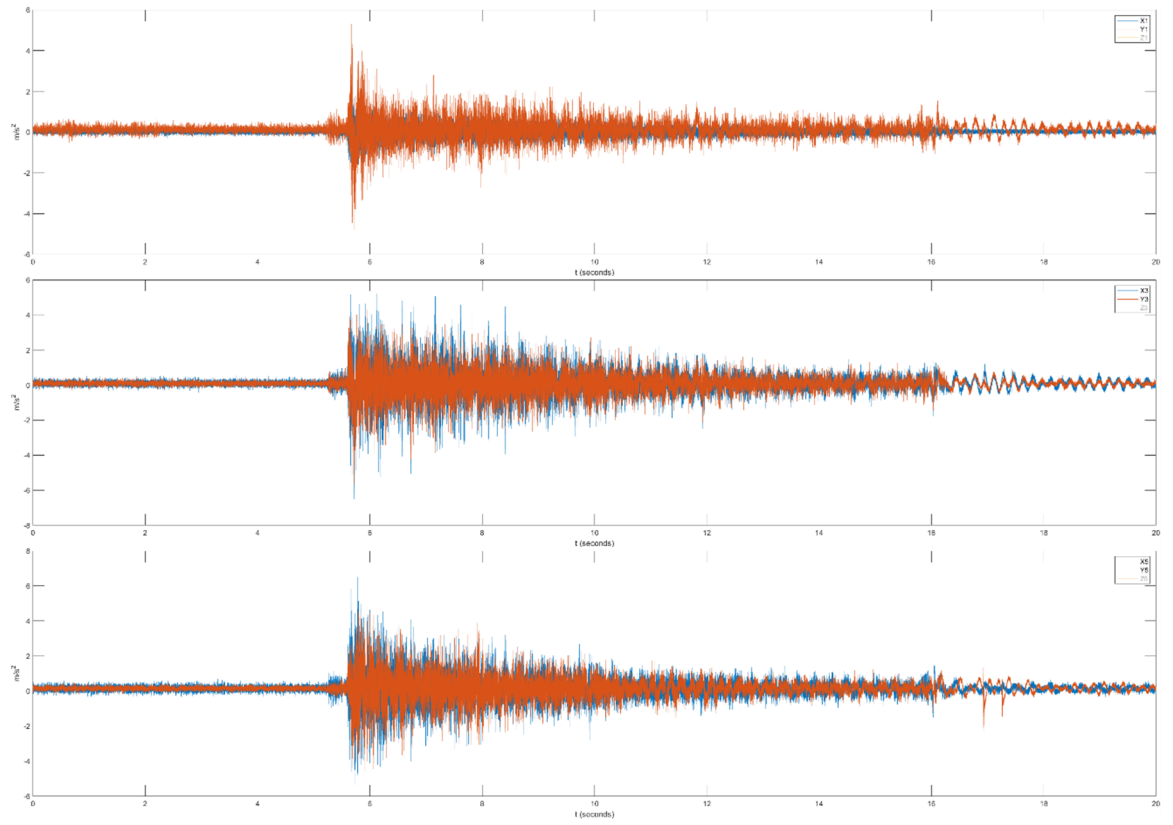
Vaa'alla olevista antureista havaittiin, että diverterin kääntymisen jälkeen vaaka jää liikkumaan X- ja Y-suunnissa. Liikkumista kestää noin 1–2 sekuntia, minkä jälkeen vaaka asettuu samaan tilaan kuin ennen kalibrointimittauksen aloitusta. Kuvassa 45 on esitetty antureiden 1, 3 ja 5 X- ja Y-suuntien värähtely.



Kuva 45. Vaa'an X- ja Y-suunnat

Kun virtausnopeus vaa'alle oli suurempi, kasvoi myös divertterin käynnön jälkeen tapahtuva liikkuminen. Myös liikkumisen kesto lisääntyi. Voimakkainta liikkuminen oli käynnön jälkeen ensimmäisen kahden sekunnin aikana. Tämän jälkeen värähtely vaimenee, mutta ei saavuta samaa tilaa kuin alussa. Kuvassa 46 on esitetty antureiden 1, 3 ja 5 X- ja Y-suuntien värähtely.





Kuva 46. Vaa'an X- ja Y-suunnat

## 8 Johtopäätökset

Tässä insinööriyössä tutkittiin laajalti gravimetrisen nestevirtauskalibrointilaitteen värähtelyä. Värähtelyä tutkittiin laitteen kolmelta alueelta, jotka ovat keskeisessä osassa laitteenkalibrointi mittaauksia.

Laitteen värähtelyn lähde on pumppumoottori. Moottori aiheuttaa värähtelyä laitteiston putkistoon sekä ympäröivään tilaan ja tukirakenteisiin. Pumppu aiheuttaa värähtelyä putkistoon pumpun lapataajuuksilla. Pumpun tulo- ja lähtöpään putkissa oli poikkeuksellisen paljon värähtelyä, mikä viittaa riittämättömään kiinnitykseen, tuentaan tai vialliseen pumppuun.

Laitteiston mittaradalla, jossa kalibroitava virtausmittari sijaitsee, havaittiin värähtelyä pumpun lapataajuuksilla ja sen monikerroilla sekä taajuusalueella, joka vastaa kavitaation aiheuttamaa värähtelyä. Mittaradalla värähtely oli voimakkainta putkessa. Mittaradan tukirakenteet värähtelivät eniten radan alku- ja loppupäässä, joista putki on tuettu teräspalkeilla kattoon ja seinään. Putken alapuolella olevat tukipisteet eivät värähdelleet yhtä voimakkaasti, kunnes moottorin kierrosnopeus kasvatettiin 1248 kierrokseen per minuutti alkoi yhden tukipisteen anturissa näkyä satunnaisia värähtelypiikkejä, jotka voivat viitata vialliseen tukirakenteeseen.

Vaa'an alueelta mitatussa värähtelyssä havaittiin vaa'an veden määrällä olevan vaikutus värähtelyn kokonaistasoon vaa'an alueella. Vaa'an ja sen tukirakenteiden värähtely vaimeni huomattavasti, kun vaa'an paino lisääntyi. Vaa'an värähtelystä havaittiin myös, että vaaka jää kalibrointimittauksen jälkeen heilumaan X- ja Y-suunnassa noin kahden sekunnin ajaksi. Heilunta on voimakkaampaa, kun virtaus vaa'alle on suurempi. Vaa'an heilunnalla voi olla vaikutus vaa'an näytämiin painolukemiin, vaikka heiluntaa ei tapahdu vaa'an pystyakselilla.

## 9 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia D200 gravimetrinen nestevirtauskalibrointilaitteen värähtelyä ja sen vaikutusta laitteen referenssinä toimivaan vakaan. Tutkimuksissa käytettiin Kajaanin Ammattikorkea koulun TÄRY-hankkeen kautta saatua mittausjärjestelmää, joka käyttää kiihtyvyyssantureita värähtelyn mittaamiseen.

Mittausjärjestelmä oli helppokäyttöinen kokonaisuus, jossa kiihtyvyyssantureiden signaalit muutettiin AD-muunnin-moduulien avulla digitaalisiksi signaaleiksi, jotka luettiin tietokoneen avulla. Järjestelmän ohjaamista ja mittausten lukemista ja tallentamista varten oli valmis LabVIEW-ohjelma. Ohjelmaan tehtiin pieniä muutoksia, jotka helpottivat työn suoritusta.

Mittaustuloksien käsittelyä varten luotiin MATLAB-ohjelmakoodi, joka muuntaa tallennetun kiihtyvyyssanturidatan aikatasosignaaliksi sekä laskee signaalin spektrin ja muita tärkeitä signaalin arvoja.

Värähtelymittaukset ovat tärkeä osa laitteiden ja koneiden kunnonvalvontaa. Värähtelymittausten avulla saadaan tietoa laitteiden kunnosta sekä pystytään ennalta ehkäisemään laitteiden vikaantumista. Värähtelymittauksilla voidaan myös parantaa laitteen toimintaa ja näin eliminoida ylimääräistä värähtelyä, josta voi olla haittaa laitteen toiminnalle.

Värähtelymittaukset ovat pitkäjänteistä työtä ja niitä tulee tehdä säännöllisesti, jotta mahdolliset poikkeukset ja värähtelyn kasvut havaitaan. Tämän työn tulokset antavat hyvän pohjan värähtelymittauksille nestevirtauskalibrointilaitteella.

## Lähteet

- (1) Nohynek P, Lumme V, Kunnossapitoyhdistys. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Rajamäki: KP-tieto; 1996.
- (2) Mikkonen H, Miettinen J, Leinonen P, Jantunen E, Kokko V, Riutta E, et al. Kuntoon perustuva kunnossapito. Helsinki: KP-Media; 2009.
- (3) PSK Standardisointiyhdistys ry. PSK-käsikirja 3, Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. 2019.
- (4) Romppainen P. Yleisimpien antureiden rakenne, toimintaperiaate ja ominaisuuksia.
- (5) Dumont M, Cook A, Kinsley N. Acceleration Measurement Optimization: Mounting Considerations and Sensor Mass Effect. Topics in Modal Analysis & Testing, Volume 10 Cham: Springer International Publishing; 2016. p. 61-71.
- (6) Huovinen M, Koponen P. Water flow meter calibration in NMI Laboratory of Finland. 2016. Poster session presented at 17th International Flow Measurement Conference, FLOMEKO 2016, Sydney, Australia.
- (7) Huovinen M, Koponen P. New gravimetric national standard for water flow measurements in Finland. 2016. Paper presented at 17th International Flow Measurement Conference, FLOMEKO 2016, Sydney, Australia.
- (8) The NI TDMS File Format. 2021; Available at: <https://www.ni.com/fi-fi/support/documentation/supplemental/06/the-ni-tdms-file-format.html>
- (9) MATLAB. Available at: <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>

Liitteet

Liite 1, MATLAB ohjelma koodi

```

function signalProcessor(dataTable,noiseTable)
close all;
clc;
saveName = inputname(1);
path = sprintf('figures/PUMP020721/%s',saveName);
mkdir(sprintf('%s',path));

Fs = 8000;      % Sampling frequency
T = 1/Fs;      % Sampling period
L = height(dataTable); % Length of signal
t = (0:L-1)*T;

NAME = dataTable.Properties.VariableNames';
MEAN = mean(dataTable.Variables)';
STDEV = std(dataTable.Variables)';
RMS = rms(dataTable.Variables)';
MAX = max(dataTable.Variables)';
MIN = min(dataTable.Variables)';
PEAK2PEAK = peak2peak(dataTable.Variables)';
SNR = snrM(dataTable.Variables,noiseTable.Variables)';
INFO = table(MEAN,STDEV,RMS,MAX,MIN,PEAK2PEAK,SNR,'RowNames',NAME);
INFO.Properties.DimensionNames{1} = 'SIGNAL';
disp(INFO);
%writetable(INFO,sprintf('%s/%s.xlsx',path,saveName),'WriteRowNames',true);

for index = 0:width(dataTable)/3-1
    figureName = sprintf('%s-SENSOR%d',saveName,index+1);
    fig = figure('Name',figureName,'NumberTitle','off');
    fig.Position = [0 280 1920 1080];
    tiledlayout(2,1);

    ax1 = nexttile;
    plot(ax1,t,table2array(dataTable(:,index*3+1:index*3+3)));
    legend(ax1,dataTable.Properties.VariableNames(index*3+1:index*3+3));
    xlabel(ax1,'t (seconds)');
    ylabel(ax1,'m/s^2');

    Y = fft(table2array(dataTable(:,index*3+1:index*3+3)));
    P2 = abs(Y/L);
    P1 = P2(1:L/2+1,:);
    P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
    f = Fs*(0:(L/2))/L;

    ax2 = nexttile;
    plot(ax2,f,P1);
    title(ax2,'Single-Sided Amplitude Spectrum')
    legend(ax2,dataTable.Properties.VariableNames(index*3+1:index*3+3));
    xlabel(ax2,'f (Hz)')
    ylabel(ax2,'Amplitude')

```

```
    %saveas(fig,sprintf('%s/%s.fig',path,figureName));  
    %saveas(fig,sprintf('%s/%s.png',path,figureName));  
end  
end
```

```
function retVal = snrM(signal, noise)  
retVal = zeros(1,width(signal));  
i = 0;  
for valArray = signal  
    i = i+1;  
    noiseArray = noise(1:end,i);  
    retVal(i) = snr(valArray,noiseArray);  
end  
end
```