

# Rahtilaivan merivesipumppujen kunnonvalvonta

Salla Kaustell

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2022

Konetekniikka  
Koneautomaatio

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikka  
Koneautomaatio

KAUSTELL, SALLA:  
Rahtilaivan merivesipumppujen kunnonvalvonta

Opinnäytetyö 77 sivua, joista liitteitä 14 sivua  
Toukokuu 2022

---

Opinnäytetyössä selvitettiin, miten rahtilaivojen savukaasupesureissa käytettävien merivesipumppujen mekaanista kuntoa voidaan seurata tavalla, joka mahdollistaa huoltotoimenpiteiden kohdentamisen vaurioiden välttämiseksi. Toiseksi selvitettiin, soveltuuko Valmet DNA-kunnonvalvontaratkaisu tähän tarkoitukseen, ja koostettiin työn tilaajalle tietoa rahtilaiva -asiakkaille soveltuvan kunnonvalvontakonseptin suunnittelua varten.

Työn lähtökohtana oli rahtilaivayhtiön tarve saada lisää tietoa savukaasupesureiden merivesipumppujen kunnosta, jotta välttyttäisiin kalliilta ja aikaa vieviltä korjauksilta. Opinnäytetyön tilaajan näkökulmasta rahtilaivayhtiöt ovat erittäin potentiaalinen asiakassegmentti kunnonvalvontatuotteille.

Työssä esitellään teoreettisena viitekehyksenä mekaanisen värähtelyn perusteet, keskipakopumppujen tyypilliset värähtelyn lähteet sekä keskeisimmät värähtelyn lähteet laivaympäristössä. Näiden lisäksi esitellään pumppujen värähtelyn mittaamiseen liittyvät käytännöt ja standardit sekä värähtelymittauksiin perustuvan kunnonvalvontajärjestelmän suunnittelussa huomioitavat asiat.

Työn kokeellinen osuus suoritettiin tekemällä yhden rahtilaivan savukaasupesurin merivesipumpuilla testimittauksia langattomilla värähtelyantureilla värähtelytasojen selvittämiseksi kunnonvalvontajärjestelmän suunnittelua varten. Kerätyn aineiston perusteella tehtiin havaintoja pumpuilla esiintyvistä värähtelystä ja analysoitiin pumpun laakereiden kunto.

Tutkimuksen perusteella pitkäaikainen, värähtelyn mittaamiseen perustuva kunnonvalvonta on keskeinen keino saada tietoa laitteiden kunnosta ja siinä tapahtuvista muutoksista. Valmet DNA-kunnonvalvontaratkaisu soveltuu käytettäväksi rahtilaivojen merivesipumppujen kunnonvalvonnassa, kun huomioidaan laivaympäristön tekniset rajoitteet.

---

Asiasanat: kunnonvalvonta, pumppu, rahtilaiva, värähtely

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
Machine Automation

KAUSTELL, SALLA:  
Condition Monitoring of Sea Water Pumps on Cargo Ships

Bachelor's thesis 77 pages, appendices 14 pages  
May 2022

---

The purpose of this thesis was to find out how the mechanical condition of seawater pumps used in cargo ships could be monitored to enable targeted maintenance measures, and whether the Valmet DNA condition monitoring solution is suitable for this purpose.

Cargo shipping companies are eager to obtain information about the condition of the seawater pumps to avoid costly repairs. From Valmet's perspective, cargo shipping companies are a potential customer segment for condition monitoring products.

The typical sources of vibration on centrifugal pumps and the main sources of vibration in the marine environment are presented as a theoretical frame of reference. In addition, the practices and standards for measuring of pump vibrations are presented.

Test measurements on the seawater pumps of one cargo ship was performed with wireless vibration sensors to determine the vibration levels for the design of condition monitoring system.

In conclusion, long-term condition monitoring based on vibration measurements is a key means of obtaining information about the condition of equipment and changes in it. The Valmet DNA condition monitoring system is suitable for use in the condition monitoring of seawater pumps on cargo ships, considering the technical constraints of the marine environment.

---

Key words: condition monitoring, cargo ship, pump, vibration

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	MEKAANINEN VÄRÄHTELY .....	8
	2.1. Värähtelyn teoria .....	8
	2.2. Värähtely keskipakopumpuissa .....	10
	2.3. Värähtely laivaympäristössä .....	14
3	VÄRÄHTELYYN PERUSTUVA KUNNONVALVONTA .....	18
	3.1. Kunnonvalvontajärjestelmän suunnittelu .....	21
	3.1.1 Värähtelyn mittaaminen .....	22
	3.1.2 Värähtelymittauksen määrittelyt .....	23
	3.1.3 Virhelähteet ja datan verifiointi .....	25
	3.1.4 Värähtelyanalyysi .....	26
	3.2. Pumppujen kunnonvalvontaan liittyvät standardit .....	32
4	TUTKIMUSJÄRJESTELYT .....	36
5	ANALYYSI .....	43
6	TULOKSET .....	46
	6.1. Värähtelytasot eri ajotilanteissa .....	46
	6.2. Värähtelytasojen erot pumpuilla ja moottoreilla .....	48
	6.3. Värähtelytasojen vertailu referensseihin .....	50
	6.4. Laakereiden kunnon arviointi .....	51
	6.5. Matalat ja korkeat taajuudet .....	52
	6.6. Aksiaalisuuntaiset värähtelyt .....	54
	6.7. Muut havainnot .....	54
7	POHDINTA .....	56
	LÄHTEET .....	62
	LIITTEET .....	64
	Liite 1. Esimerkki - laakereiden vaihdon kustannukset .....	64
	Liite 2. WVS-100 -värähtelyanturin tekniset tiedot .....	65
	Liite 3. WMM-100 -mittausyksikön tekniset tiedot .....	66
	Liite 4. RVT-105 -värähtelyanturin tekniset tiedot .....	67
	Liite 5. RVT-120 -värähtelyanturin tekniset tiedot .....	68
	Liite 6. Pumppujen 1-4 teho testijakson aikana .....	69
	Liite 7. Pumpun 1 teho testijakson aikana .....	70
	Liite 8. Pumpun 3 teho testijakson aikana .....	71
	Liite 9. Pumpun 4 teho testijakson aikana .....	72
	Liite 10. Pumpun 4 värähtelytrendit nopeuden RMS -arvona .....	73
	Liite 11. Pumpun 3 värähtelytrendit nopeuden RMS -arvona .....	74

Liite 12. Pumpun 4 värähtelytrendit kiihtyvyyden RMS -arvona .....	75
Liite 13. Pumpun 3 värähtelytrendit kiihtyvyyden RMS -arvona .....	76
Liite 14. Pumppujen 1 ja 2 värähtely testijakson aikana.....	77

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten rahtilaivojen savukaasupesureissa käytettävien merivesipumppujen mekaanista kuntoa voitaisiin seurata tavalla, joka mahdollistaisi huoltotoimenpiteiden kohdentamisen ja ajoittamisen vaurioiden välttämiseksi. Toiseksi selvitettiin, soveltuuko Valmet DNA -kunnonvalvontaratkaisu tähän tarkoitukseen. Kolmanneksi tarkoituksena oli tuottaa tietoa rahtilaiva -asiakkaille soveltuvan kunnonvalvontakonseptin suunnittelua varten.

Työn lähtökohtana oli rahtilaivayhtiön tarve saada lisää tietoa savukaasupesureiden merivesipumppujen sekä niiden sähkömoottoreiden ja etenkin niiden laakereiden kunnosta, jotta huoltotoimenpiteet voitaisiin ajoittaa oikein vaurioiden ehkäisemiseksi ja kustannusten minimoimiseksi. Tarve perustuu havaintoon, että laakerivaurioita, jotka voivat johtaa myös laajempiin pumpun ja sähkömoottorin vaurioihin, syntyy joissain tapauksissa jo selvästi ennen huoltoaikataulun mukaista laakereiden vaihtoväliä. Toisaalta joissain tapauksissa huoltoväliä voidaan pidentää jopa moninkertaiseksi. Vaurion päästessä pitkälle on edessä kallis ja aikaavievä korjaus, joka voitaisiin välttää, jos käyttäjällä olisi etukäteen tietoa siitä, millä laitteilla, milloin ja millaista huoltoa tarvitaan. Lisäksi laakereiden vaihtoväliä pidentämällä voitaisiin saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä etenkin suuremmilla laivoilla. Tällä hetkellä tutkimuksen kohteena olevilla savukaasupesureiden merivesipumpuilla käytössä olevat värähtelymittaukset eivät kykene antamaan tarkkaa kuvaa laakereiden kunnosta.

Opinnäytetyön tilaajan näkökulmasta rahtilaivayhtiöt ovat erittäin potentiaalinen asiakassegmentti kunnonvalvontatuotteille. Myyntipotentiaalia olisi mahdollista edelleen laajentaa koskemaan myös muiden laivoilla olevien laitteiden kunnonvalvontaa, joka olisi liitettävissä samaan järjestelmään. Opinnäytetyössä on pyritty keräämään tietoa laivaympäristöön liittyvistä erityispiirteistä kunnonvalvontajärjestelmän määrittelyä varten.

Työssä selvitetään teoreettisena viitekehyksenä mekaanisen värähtelyn perusteet, keskipakopumppujen tyypilliset värähtelyn lähteet sekä keskeisimmät värähtelyn lähteet laivaympäristössä. Näiden lisäksi esitellään värähtelyn mittaamiseen liittyvät käytännöt ja standardit sekä laakereiden värähtelymittauksiin perustuvan kunnonvalvontajärjestelmän suunnittelussa huomioitavat asiat.

Opinnäytetyö on rajattu koskemaan pystyasenteisia keskipakopumppuja. Laakerityypeistä tarkastelu on rajattu vierintälaakereihin erotuksena esimerkiksi liukulaakereille ominaisten värähtelyjen tutkimisesta. Pumppujen kriittisiä nopeuksia ei ole opinnäytetyössä käsitelty, koska tutkittavat pumput operoivat kriittistä nopeutta matalammalla nopeudella. Värähtelytyypeistä keskitytään ei-pyörivien osien värähtelyyn ja kokonaan työn ulkopuolelle on rajattu vääntövärähtelyt.

Työn kokeellinen osuus suoritettiin tekemällä yhden rahtilaivan savukaasupesurin merivesipumppuilla testimittauksia langattomilla värähtelyantureilla ja kannettavilla analyysilaitteilla. Testimittausten tarkoituksena oli saada tietoa laivoille asennettujen pumppujen värähtelytasoista pysyvän kunnonvalvontajärjestelmän suunnittelua varten. Saatu data analysoitiin ja tuloksia hyödynnetään tuotekonseptin määrittelyssä.

Kunnonvalvonnan yhteydessä puhutaan tyypillisesti koneista, mutta tässä opinnäytetyössä päätettiin käyttää yksinkertaisuuden vuoksi sekä koneista että laitteista termiä laite, koska tähän käsitteeseen sisältyvät luontevammin molemmat käsitteet.

Opinnäytetyön tilaajana toimi Valmet Automation Oy, joka toimittaa automaatoratkaisuja sellu-, paperi-, energia- ja meriteollisuuden tarpeisiin. Kunnonvalvonta voidaan liittää Valmet DNA -automaatiojärjestelmään Valmet DNA -kunnonvalvontaratkaisun avulla.

## 2 MEKAANINEN VÄRÄHTELY

Mekaanista värähtelyä esitellään seuraavissa kappaleissa ensin yleisesti fysikaalisena ilmiönä, minkä jälkeen käsitellään värähtelyn esiintymistä keskipakopumpuilla ja laivaympäristössä.

### 2.1. Värähtelyn teoria

Mekaaninen värähtely on kappaleen potentiaalisen ja kineettisen energian (varastoituneen energian ja liike-energian) jaksoittaista vaihtelua, joka saa kappaleen liikkumaan tasapainoasemansa ympärillä. Kaikilla värähtelevillä kappaleilla on massa sekä ominainen jäykkyys ja vaimennus, jotka vaikuttavat kappaleen värähtelyominaisuuksiin. Värähtely muuttaa energiaa määräajoin edestakaisin kineettisen ja potentiaalisen energian välillä, kunnes kaikki energia on muuttunut vaimennuksen kautta muuhun muotoon, tyypillisesti lämmöksi. (Schmitz & Smith 2012, 1)

Mekaaninen värähtely luokitellaan yleisesti kolmeen tyyppiin, jotka ovat vapaa värähtely, pakotettu värähtely ja itseherätevärähtely. Vapaan värähtelyn tapauksessa kappale reagoi hetkelliseen herätteeseen, eli tasapainotilan häiriöön värähtelemällä ominaistaajuudellaan, kunnes vaimennus palauttaa kappaleen tasapainotilaan. Esimerkki vapaasta värähtelystä on iskun aikaansaama värähtely kappaleessa. (Schmitz & Smith 2012, 2)

Pakotettu värähtely aiheutuu kappaleeseen vaikuttavasta jatkuvasta jaksollisesta ulkoisesta voimasta, joka saa kappaleen värähtelemään siihen kohdistetun voiman taajuudella voiman vaikutuksen ajan. Esimerkki pakotetusta värähtelystä on auton renkaan epätasapainoisen massan pyörimisestä aiheutuva värähtely auton rungossa. (Schmitz & Smith 2012, 3)

Itseherätevärähtelyä tapahtuu, kun tasainen ulkopuolinen voima moduloituu kappaleessa lähellä sen ominaisvärähtelytaajuutta havaittavaksi värähtelyksi. Itseherätevärähtely eroaa vapaasta ja pakotetusta värähtelystä siksi, että toisin kuin vapaassa värähtelyssä, itseherätevärähtelyssä läsnä on pitkäaikainen



ulkoinen voima. Toisaalta erona pakotettuun värähtelyyn itseherätevärähtelyssä heräte on tasainen eikä jaksollinen ja värähtely tapahtuu lähellä kappaleen luonnollista värähtelytaajuutta. Esimerkki itseherätevärähtelystä on tasaisen ilmavirran aikaansaama värähtely, esimerkiksi vihellys. (Schmitz & Smith 2012, 4).

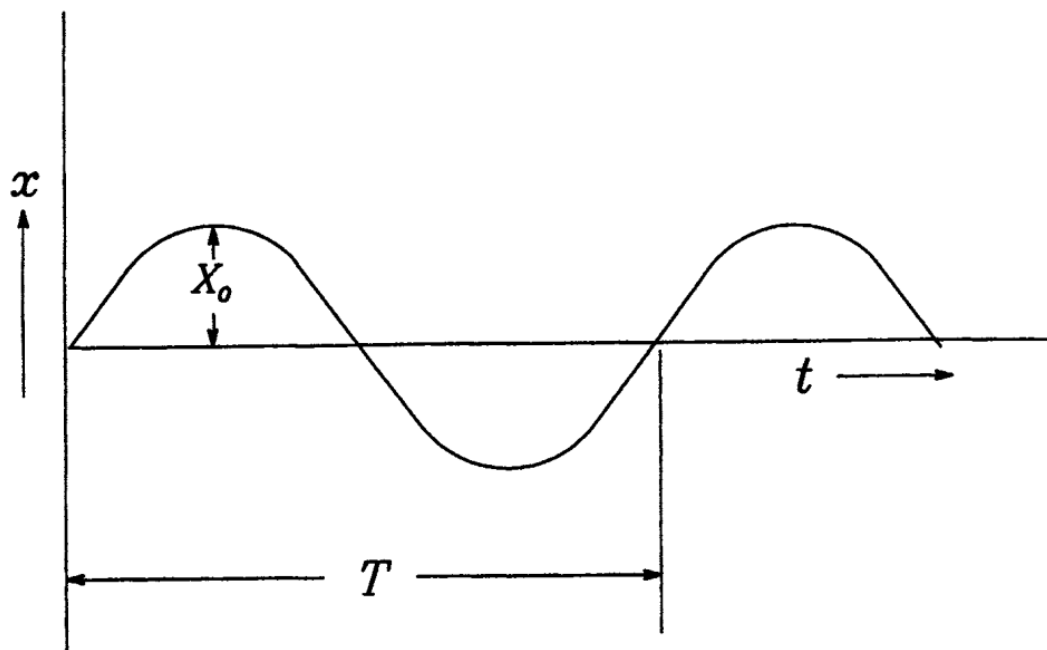
Värähtelyä voidaan kuvata siirtymän, nopeuden tai kiihtyvyyden avulla. Yksinkertainen värähtelyfunktio on esitetty kuviossa 1, missä

$x$  = Värähtelyn siirtymä millimetreinä (mm)

$X_0$  = Maksimisiirtymä tai värähtelyn amplitudi millimetreinä (mm)

$t$  = aika sekunteina (s)

$T$  = värähtelyn ajanjakso, sykli



KUVIO 1. Harmoninen värähtelyfunktio (Mobley 1999, 7)

Värähtelyn ajanjakson käänteislukua  $\frac{1}{T}$  kutsutaan värähtelyn taajuudeksi ja se ilmaistaan sykleinä sekuntia kohti eli hertseinä (Hz). (Mobley 1999, 6)

Yksinkertaisimmillaan jaksottaista liikettä tai värähtelyä kutsutaan harmoniseksi. Harmoniset liikkeet toistuvat joka kerralla, kun esimerkiksi pyörivä elementti on

kiertänyt yhden täyden kierroksen. Vaikka kaikki harmoniset liikkeet ovat jaksollisia, kaikki jaksolliset liikkeet eivät ole harmonisia. (Mobley 1999, 17)

Värähtelyn tutkiminen pohjautuu Newtonin ensimmäiseen lakiin, jonka mukaan kappale pysyy levossa tai jatkaa tasaista liikettä, jos siihen ei vaikuta ulkoisia voimia. (Wu ym. 2013, 27)

Värähtely on yksi keskeisistä laitteiden ja rakenteiden kuntoon vaikuttavista tekijöistä teollisessa ympäristössä. Mekaaninen värähtely vaikuttaa tyypillisesti negatiivisesti laitteiden toimintaan, elinikään, luotettavuuteen sekä käyttäjäystävällisyyteen. Se on useimmiten ei-toivottu ilmiö, koska se lisäksi hukkaa energiaa sekä aiheuttaa kulumista ja ääntä. Värähtelyn vähentäminen laitteissa on Karnovskyn & Lebedin (2016, 5) mukaan yksi tärkeimmistä modernin suunnittelun haasteista. (Wu ym. 2013, 28)

## **2.2. Värähtely keskipakopumpuissa**

Vesipumpuksi kutsutaan laitetta, joka imee itseensä vettä imuyhteestä ja työntää veden ulos paineyhteestä. Pumppu muuttaa pyörimisen liike-energian nesteen hydrodynaamiseksi voimaksi. Liike-energian pumppu saa esimerkiksi siihen kytketyltä sähkömoottorilta. Pumppuja käytetään teollisuudessa tyypillisesti nesteen siirtämiseen ja nostamiseen putkia ja letkuja pitkin. Tavallisia vesipumpputyyppejä ovat muun muassa mäntä- ja kiertovesipumput. (Wu ym. 2013, 7-8)

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan pystyasenteisissa, kiertovesipumppuihin lukeutuvissa keskipakopumpuissa esiintyviä värähtelyjä. Keskipakopumpuissa neste siirtyy roottorin pyörimisestä aiheutuvan keskipakovoiman vaikutuksesta eteenpäin kierukkakotelossa pyörivän juoksupyörän välityksellä (Wu ym. 2013, 8).

Kuvassa 1 on pystyasenteinen keskipakopumppu, jossa alimmaisena on pumpun kierukkakotelo ja liitântäyhteet, keskiosassa pumpun akseli ja laakerointi kotelossaan ja päällimmäisenä sähkömoottori, josta pumppu saa käyttövoimansa.



KUVA 1. Pystyasenteinen keskipakopumppu (KSB Finland. n.d.)

Valmistaja määrittelee kullekin pumpputyypille ominaisen sallitun ja suositellun käyttöalueen, sekä optimaalisen ajopisteen, jossa pumpun suorituskyky on parhaimmillaan ja pumpulle aiheutuva kuluminen mahdollisimman vähäistä. Optimaalisessa ajopisteessä pumpun käymisestä aiheutuva värähtely on mahdollisimman vähäistä. Värähtelyn amplitudi on sitä suurempi, mitä kauempana pumpun parhaan tehokkuuden virtausnopeudesta ollaan. (SFS-ISO 10816-7:2017, 11)

Värähtelyä aiheutuu pumpun käydessä monesta tekijästä. Herätteen voiman suuruus sekä rakenteellinen vaste määrittelevät syntyvät värähtelyt. Värähtelyä lisäävät häiriövoimat voivat olla mekaanisia, hydraulisia tai sähköisiä. (Wu ym. 2013, 16)

Pumppujen käyttäminen korkeilla nopeuksilla ja suurella energiatihedellä tyypillisesti vaikeuttavat nesteen ja rakenteen vuorovaikutukseen liittyviä ongelmia, jotka voivat johtaa lisääntyneeseen laitteen osien kulumiseen tai jopa laitteen rakenteelliseen hajoamiseen. (Wu ym. 2013, 207)

Esimerkiksi mekaaniset tiivisteet, laakerit, kulutusrenkaat, holkit ja juoksupyörät ovat osia, joille suunniteltua korkeampi värähtelytaso pumpulla aiheuttaa tyypillisesti kulumista. (Wu ym. 2013, 24)

Alla on lueteltu tavallisimpia keskipakopumppujen värähtelyä aiheuttavia tekijöitä eli värähtelyn herätteitä.

### 1. Mekaaniset herätteet

- a. Keskipakovoimat johtuen pyörivän elementin (esimerkiksi juoksupyörän tai akselin) epätasapainosta
- b. Akselin linjausvirheet
- c. Kitkavoimat (esimerkiksi hankaus)

### 2. Hydrauliset herätteet

- a. Hydraulinen epätasapaino johtuen epätasaisista nopeusjakaumista nestekanaavissa
- b. Kavitaatio
- c. Hydroelastinen värinä, jonka aiheuttavat väärin muotoillut poistopuolen osat, kuten juoksupyörän siivet
- d. Pumpun mekaanisten osien (esimerkiksi tiivisteet) liikkumisesta aiheutuva vaikutus ympäröivään tai läpi menevään virtaukseen
- e. Paineen vaihtelu

### 3. Sähköiset herätteet

- a. Staattorin ja roottorin väliset magneettiset voimat
- b. Staattorin ja roottorin välisen ilmaraon epätasaisuudesta johtuvat voimat
- c. Voimat, jotka syntyvät roottorin napakäämin osittaisesta tai täydellisestä oikosulusta

(Wu ym. 2013, 16)

Kavitaatiolla tarkoitetaan tilannetta, jossa nesteeseen kohdistuva höyrystymispainetta matalampi paine muodostaa nesteeseen kaasukuplia, jotka kuluttavat laitteen osia ja aiheuttavat värähtelyä (Shengcai 2000, 10, 359). Resonanssiksi kutsutaan suuren amplitudin värähtelyä, jonka aiheuttavat pienet

jaksottaiset herätteet, joiden taajuus on sama tai lähes sama kuin järjestelmän luonnollinen taajuus. (Mobley 1999, 141–150)

Tyypillisesti edellä lueteltujen herätteiden aiheuttamaa värähtelyä havaitaan pumpun pyörimisnopeuden taajuudella ja sen harmonisilla taajuuksilla, kuten juoksupyörän siipien ohitustaajuudella. (SFS-ISO 10816-5 2000, 16)

Pumppuihin ja moottoreihin sisältyy pyöriä elementtejä, joita kutsutaan roottoreiksi. Roottorin ympärillä olevaa ei-pyörivää rakennetta kutsutaan staattoriksi. Roottoridynamiikka käsittelee akselin ja siihen laakeroinnilla kytkettyjen pyöriä osien dynamiikka. (Wu ym. 2013, 10).

Tyypillinen vesipumpun laakerointi sisältää pumpun akselilla ohjauslaakerin ja painelaakerin. Painelaakeri kantaa roottoriyksikön painon ja veden juoksupyörään kohdistaman voiman aiheuttaman aksiaalisen kuorman, joka laakerilta siirtyy laakeripesään. Ohjauslaakeri puolestaan ottaa vastaan säteittäiset voimat. (Wu ym. 2013, 137)

Pumpun värähtelyn analysointi on luonteeltaan haastavaa, koska värähtelyn herätevoimat muuttuvat käyttöolosuhteiden, esimerkiksi kuormituksen mukaan ja siten nesteen ja rakenteen välinen vuorovaikutus ja rakenteellinen vaste, sekä roottorin (juoksupyörä-akseli-laakeri -kokoontulo) dynamiikkaan liittyvät värähtelyt myös vaihtelevat. (Wu ym. 2013, 17)

Koska osa pumpun osista, esimerkiksi juoksupyörä, on pumpun käynnin aikana upotettuna veteen pumpun kotelossa, on mekaanisten osien lisäksi myös jäykän kammion sisällä liikkuvan nesteen vaikutus värähtelyyn otettava värähtelyanalyysissä huomioon. (Wu ym. 2013, 15)

Hydrauliset voimat aiheuttavat värähtelyä pumpun akselille, mistä värähtely johtuu myös pumpun laakereille ja muihin osiin. Kunkin laitteen pääasialliset hydrauliset voimat on arvioitava, jotta voidaan määrittellä niistä seuraavat värähtelyt. (Wu ym. 2013, 17)

Pyörivillä laitteilla esiintyy turbulenttisista tai epätasaisista virtauksista johtuvaa epätasapainoa. Kaasun tai nesteen dynaamiset voimat pyritään ottamaan laitteiden tasapainotuksessa huomioon, mutta pumpun ulkopolisten tekijöiden, kuten imuputkien liian tiukkojen mutkien tai imu- tai paineputkessa olevien esteiden aiheuttamaa värähtelyä laitteille on vaikea arvioida. Dynaamiset voimat ja roottori-laakeri -systeemin jäykkyys määrittelevät pumpun värähtelytason, koska rakenteiden jäykkyys vastustaa virtauksen epätasaisuudesta johtuvaa vaihtelua roottorielementin linjauksessa. (Mobley 1999, 14; Wu ym. 2013, 216)

Pumpuilla havaittava värähtelyt voivat siis olla peräisin useista lähteistä pumpun mekaanisissa osissa tai hydraulisissa ominaisuuksissa, mutta pumpuille voi joissain tapauksissa johtua myös pumpun ulkopuolisia värähtelyitä. (Wu ym. 2013, 24)

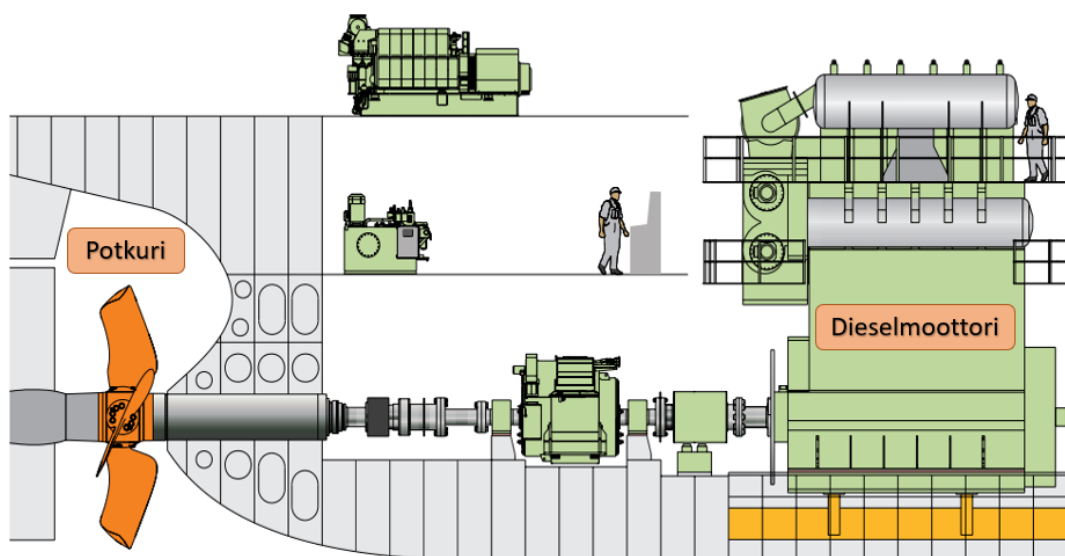
### **2.3. Värähtely laivaympäristössä**

Laivojen ja etenkin suurten valtamerialusten, voidaan monessa mielessä katsoa vastaavan maalla sijaitsevia teollisuuslaitoksia. Laivoissa suuri osa mitattavista värähtelystä aiheutuu laivan propulsiojärjestelmästä, merenkäynnistä tai näiden yhdistelmästä, mistä syystä ympäristöstä johtuvat värähtelyt ovat laivojen laitteilta tehdyissä värähtelymittauksissa maalaitoksilla tehtyjä värähtelymittauksia merkittävämmässä asemassa. (ABS 2021, 62)

Laivojen koon ja nopeuden kasvaessa laivarungon värähtelyistä aiheutuu yhä suurempia haasteita laivan suunnitteluun ja rakentamiseen. Korkeaa värähtelytasoa laivoilla tulisi välttää niin miehistön ja matkustajien mukavuuden kuin runkorakenteiden väsymisen ja laivalla olevien laitteiden vikaantumisienkin takia. (ABS 2021, 8)

Luokituslaitokset antavat ohjeita laivojen suunnitteluun ja värähtelyn mittaamiseen merikokeilla ja hyväksyntätesteissä, ohjeita korkeiden värähtelyjen välttämiseksi sekä raja-arvoja, joita värähtelytasojen eri laivan osissa ei tulisi ylittää. (ABS 2021, 8)

Luokituslaitos ABS (American Bureau of Shipping) mainitsee ohjeistuksessaan pääasialliseksi värähtelylähteeksi laivaympäristössä laivan propulsiojärjestelmän, jonka keskeisimpinä komponentteina ovat matalanopeuksiset dieselmoottorit ja potkurit (KUVA 2). Propulsiojärjestelmän akselilta dynaamiset voimat siirtyvät laivan runkoon akselin laakereiden kautta. Moottorin värähtelyt välittyvät laivan runkoon myös moottorin alustan ja tuentojen kautta. Moottorin tuottama pakkovoima aiheuttaa joko paikallisen tai laajemman värähtelyvasteen laivan rungossa. (ABS 2021, 39)



KUVA 2. Esimerkki laivan propulsiojärjestelmästä (MAN 2021, 5 mukailten)

Erityisesti propulsiojärjestelmän aiheuttamista värähtelyistä mainitaan potkurista johtuva pitkittäissuuntainen värähtely sekä dieselmoottoreiden (jatkossa pääkoneet) käynnistä johtuva pystysuuntainen värähtely laivan rungossa, etenkin laivan perässä ja keulassa. Lisäksi moottoreiden sivuttaissuuntainen värähtely voi synnyttää suuriakin paikallisia värähtelyjä konehuoneen pohjarakenteissa riippuen moottorin rungon jäykkyydestä ja asennustavasta. (ABS 2021, 11–15)

Laivan värähtelyn lähteitä tutkittaessa on tärkeää määritellä herätteiden taajuudet ja tutkia niiden suhdetta pääkoneen tai -koneiden pyörintänopeuden mukaiseen taajuuteen. Dieselmoottoreiden värähtelyherätteet koostuvat jaksottaisista voiman ja momentin komponenteista, jotka vaikuttavat moottorin alustaan. Moottoreiden ja laivojen suunnitteluvaiheessa pyritään ottamaan huomioon

syntyvät voimat ja tasapainottamaan niitä. Kaikkea värähtelyä ei kuitenkaan pystytä poistamaan. Moottorivalmistajat ilmoittavat kullekin moottorityypille ominaiset värähtelytasot. (ABS 2021, 14, 39)

Potkurista johtuvat värähtelyt liittyvät sekä laivan rungon muodosta johtuviin epätasaisten virtauksien potkurille aiheuttamiin värähtelyherätteisiin että potkurin aikaansaamien painenvaihteluiden aiheuttamiin herätteisiin laivan rungossa (hull wake) (ABS 2021, 15, 39). Potkurilta värähtelyt välittyvät akselin laakerien kautta laivan runkorakenteisiin. Etenkin painelaakerin tuennalla on merkittävä vaikutus konehuoneeseen ja pohjarakenteisiin välittyviin värähtelyihin. (ABS 2021, 24)

Laivaympäristön värähtelyjen voimakkuus on edellä mainittujen tekijöiden lisäksi kytköksissä myös laivan nopeuteen ja kulkusuuntaan sekä syvyykseen, joka vaihtelee kuorman ja painolastiveden määrään mukaan (ABS 2021, 59). Myös laivan pohjan iskeytyminen veteen kovassa aallokossa (slamming) aiheuttaa värähtelyä laivan rakenteisiin ja laitteille. (ABS 2021, 85).

Laivan rungon värähtely saa ympäröivän veden liikkeeseen, joka puolestaan kohdistaa vastavoiman takaisin laivan runkoon (Zong & Lam 1999, 363). Ympäröivän veden värähtelystä aiheutuva vaikutus laivaan riippuu muun muassa veden syvyydestä, laivan vedenalaisesta muodosta ja laivan luonnollisesta värähtelyvasteesta. Laivan rungolla on erilaiset värähtelyominaisuudet ilmassa, äärettömän syvässä vedessä ja määritellyn syvyydessä vedessä. Esimerkiksi Zong & Lam'n (1999, 363) mukaan laivanrungon ensimmäisen ja toisen asteen taajuudet syvässä vedessä ovat noin 1,4–3 kertaa korkeammat kuin matalassa vedessä. (Zong & Lam 1999, 364)

Laivan rungon pystysuuntaiset luonnolliset värähtelytaajuudet ovat ABS:n mukaan 0,4 ja 1,6 hertsin välillä ja ne ovat matalimpia suurilla konttialuksilla (ABS 2021, 27). Zong & Lamin (1999, 368) mukaan toisaalta matalimmat tyypilliset laivojen luonnolliset taajuudet ovat välillä 5–10 hertsiä.

Paikallisten resonanssivärähtelyiden katsotaan olevan suhteellisen tavallisia laivaympäristössä. Paikallisen värähtelyn määritelmä ABS:n mukaan on



rakenneosan, kannen, laipion tai laitteiston dynaaminen vaste, joka on huomattavasti suurempi kuin rungon palkin vastaava vaste kyseisessä paikassa (ABS 2021, 57). Pääasiassa paikalliset rakenteelliset värähtelyongelmat ovat seurausta voimakkaasta ympäröivän rakenteen värähtelystä, jota paikallisen rakenteen resonanssivaikutus vahvistaa, tai ne johtuvat paikalliseen rakenteeseen kiinnitetyn mekaanisen komponentin synnyttämistä värähtelyvoimista. (ABS 2021, 40)

Aluksen rungon kokonaisvärähtelyyn liittyvää vaimennusta pidetään yleensä runkovaimennuksen, lastin aiheuttaman vaimennuksen, veden kitkan, paine- ja pinta-aaltojen muodostumisen yhdistelmänä. Yleisesti ottaen rakenteissa käytettävällä teräksellä ei ole suurta vaimennusta, mikä edesauttaa värähtelyn kulkeutumista rakenteissa. (ABS 2021, 55–56; Hentinen ym. 2002, 31)

### 3 VÄRÄHTELYYN PERUSTUVA KUNNONVALVONTA

Kunnonvalvonta on tärkeä osa laitteen kuntoon perustuvaa huoltoa, jota on alettu useilla aloilla pitää tehokkaimpana strategiana toteuttaa huoltotoimenpiteitä. Perinteisesti laitteita on käytetty, kunnes ne ovat hajonneet ja huoltotoimenpiteitä on tehty vasta vaurion synnyttyä. Tällöin on saavutettu laitteen maksimi operointiaika ennen seisokkia. Laitteelle aiheutuneet vauriot voivat tällaisessa tapauksessa olla suuret, mistä voi olla vakavia seurauksia laitteen käyttöturvallisuuteen, tuotantotappioihin ja korjauskustannuksiin liittyen. (Randall, 2010, 1)

Vaihtoehtona laitteen rikkoutumiseen asti ajamiselle on alettu tehdä ennakoivaa huoltoa, joka perustuu kullekin laitteelle tai sen yksittäiselle huollettavalle komponentille määriteltyyn huoltoväliin, jolla todennäköisyys kyseisen laitteen tai laitteen osan vaurioitumisesta huoltojen välillä on pieni. Tämän huoltostrategian haittapuolena on suuri varaosien kulutus ja suurempi määrä huoltotyötä, kuin olisi laitteen kunnossa pysymisen kannalta välttämätöntä. Ennakoiva huolto sopii koneille ja komponenteille, joiden elinikä noudattaa tunnettua kaavaa. Laitteet ja komponentit, joilla on suuri tilastollinen hajonta keskimääräisen eliniän ympärillä hyötyvät kunnonvalvontaan perustuvasta huollosta. (Randall, 2010, 1)

Kunnonvalvonnalla voidaan tukea laitteiden turvallista käyttöä pidempään ennen huoltotoimenpiteiden suorittamista, mistä voi koitua merkittäviä säästöjä laitteiden kunnossapitokustannuksissa. Mikäli esimerkiksi pystytään pidentämään laakereiden käyttöikä kaksinkertaiseksi, kun laakereita ei vaihdeta valmistajan suositteleman konservatiivisen aikataulun, vaan laakerin todellisen kunnan perusteella, vaihtokustannukset puolittuvat. Mitä suurempi määrä laitteita saadaan ajettua pidemmällä huoltovälillä ilman vaurioita, sitä suurempia säästöjä saavutetaan. Liitteessä 1 on esitelty esimerkkilaskelma kustannussäästöistä, jotka voidaan saavuttaa rahtilaivan merivesipumppujen laakereiden käyttöiän pidentämisen myötä kymmenen vuoden käytön aikana.

Huoltovälin pidentyessä laitteen vaurioitumisen riski kasvaa. Riskiä voidaan kuitenkin laskea seuraamalla jatkuvasti laitteen kuntoa. Verrattuna merkittävän

laitevaurion aiheuttamiin kustannuksiin kunnonvalvontajärjestelmän hankintakustannus ei tyypillisesti etenkään kriittisten laitteiden kohdalla nouse merkittäväksi. Esimerkiksi yhden merivesipumpun laajemman vaurion korjauksen hinnalla voidaan hankkia kunnonvalvontalaitteisto neljälle pumpulle.

Kunnonvalvontaan perustuva huolto perustuu laitteen tilasta kertovien signaalien ja niiden muutosten seurantaan, jonka tavoitteena on ennustaa huoltotoimenpiteiden optimaalinen ajankohta. Laitteen kunnonvalvonta vaatii, että käytössä on keino saada tietoa laitteen kunnosta, kun se on käynnissä. (Randall, 2010, 2)

Kaksi pääasiallista tapaa saada tietoa laitteen kunnosta käynnin aikana ovat värähtelyanalyysi ja voiteluaineanalyysi. (Randall, 2010, 2) Näiden lisäksi Randall'n (2010, 5) ja Mobleyn (1999, 2) mukaan voidaan kunnonvalvonnassa hyödyntää prosessiarvojen muutoksiin perustuvaa performanssianalyysiä, lämpötilan muutoksiin perustuvaa termografiaa, ultraäänitutkimuksia, tribologiaa, visuaalisia tarkastuksia ja sähköistä kunnonvalvontaa. Edellä mainituista värähtelyanalyysi on hallitseva ennakoivan huollon menetelmä. Se on erityisen tehokas menetelmä pyörivien laitteiden piilevien vaurioiden löytämisessä ennen niiden laajenemista vakaviksi. Joissain tapauksissa vian synty voidaan kunnonvalvonnan avulla jopa estää, jos esimerkiksi analyysin perusteella tiedetään lisätä voiteluainetta laakerille ennen kuin puutteellinen voitelu aiheuttaa laakerivian. (Moblely 1999, 2)

Värähtelyanalyysi perustuu siihen, että normaalissa kunnossa olevalla laitteella on omanlaisensa värähtelyprofiili (vibration signature), eli värähtelyn spektri määritellyssä käyttötilanteessa. Vian syntyminen laitteessa aiheuttaa muutoksen värähtelyprofiilissa siten, että muutos voidaan yhdistää vikaan. (Randall, 2010, 2)

Laitteet tuottavat värähtelyä, vaikka ne olisivat hyvässä kunnossa, johtuen jaksollisista tapahtumista, kuten pyörivien laitteiden akseleiden tai hammaspyörien pyörimisestä. Taajuus, jolla värähtelyä esiintyy, kertoo usein värähtelyn lähteestä. Osa värähtelyistä johtuu tapahtumista, joiden taajuus ei ole kytköksissä akselin pyörimiseen, mikä auttaa niiden erottamisessa täysin

jaksollisista värähtelyistä. Osa värähtelyistä liittyy nesteen virtaamiseen, millä on omanlaisensa tyypilliset piirteet. (Randall 2010, 3–4)

Värähtelyanalyysi on Randall'n (2010, 6) mukaan selkeästi laajimmin käytössä oleva laitteiden kunnonvalvonnan metodi, koska sillä on monia etuja muihin metodeihin verrattuna:

1. Värähtely seuraa välittömästi tapahtunutta muutosta laitteessa, joten sitä voidaan käyttää sekä jatkuvassa että ajoittaisessa seurannassa
2. Värähtelyanalyysi osoittaa esimerkiksi voiteluaineanalyysia tarkemmin viallisen komponentin
3. Signaalinkäsittelyllä voidaan saada esille heikotkin vikasignaalit, mikä edesauttaa ennakoivan huollon toteuttamisesta

Kriittiset laitteet varustetaan usein pysyvillä värähtelyantureilla ja niiden värähtelytasoa seurataan jatkuvasti, jotta laite voidaan pysäyttää ja huoltaa ennen vakavaa vikaantumista. Tyypillisiä värähtelyanalyysillä seurattavia laitteita ovat muun muassa pumpput, kompressorit, puhaltimet, moottorit, vaihteet, sekoittimet, turbiinit ja sylinterit. (Moblely 1999, 3; Randall 2010, 6)

Wu ym. (2013, 24) toteavat, että tavanomaiset värähtelyn kokonaistason mittaukset eivät pysty riittävällä tarkkuudella mittaamaan pumpun värähtelyä, ja usein mittausten havaitessa värähtelyä vaurioita on jo alkanut syntyä. Lisäksi laitteiden ulkopuolelta tulevat värähtelyt sekoittuvat kokonaistason arvoissa itse laitteen käytössä syntyviin värähtelyihin.

Kunnonvalvonnassa käytettävät värähtelymittaukset mahdollistavat värähtelyn kokonais- ja huippuarvojen seurannan lisäksi värähtelyn koko spektrin analyysin ja siihen perustuvan diagnostiikan. Wu ym. (2013, 22) kutsuvat värähtelyspektriä laitteen mekaaniseksi allekirjoitukseksi (mechanical signature). Hyväkuntoisen laitteen värähtelyspektrin tunteminen, jatkuva värähtelyn mittaaminen ja värähtelyspektrin seuranta mahdollistavat jatkuvan kunnonvalvonnan, jonka puitteissa muutoksista värähtelyspektrissä voidaan tehdä johtopäätöksiä laitteen ja sen yksittäisten osien kunnosta jo paljon ennen, kun varsinainen toimenpiteitä vaativa vaurio syntyy. (Wu ym. 2013, 22–24)

### 3.1. Kunnonvalvontajärjestelmän suunnittelu

Kunnonvalvontajärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon muun muassa laitteen ja prosessin erittely, analyysin parametrit, datan suodattimet ja hälytysrajat. (Moblely 1999, 97)

Laite-erittelyssä kerrotaan laitteen tyyppi, käyttötapa ja kuvataan laitteen värähtelyprofiilin kannalta oleelliset komponentit. Käyttötapa viittaa parhaiten laitteen normaalia toimintaa edustavaan kuvaukseen, esimerkiksi vakio- tai vaihtuva nopeus, tyypillinen kuorma tai kuorman vaihteluväli. Vaihtuvanopeuksisilla pumpuilla tulisi esittää laitteen minimi- ja maksiminopeudet. Mobleyn (1999, 98) mukaan kymmenen prosentin muutos pumpun kuormassa voi nostaa tai laskea värähtelyenergian määrää jopa neljäkymmenellä prosentilla. Käytettäessä värähtelydataa diagnostiikkatyökaluna on aina sopeutettava kerätty data todelliseen kuormaan datankeruuhetkellä. (Moblely 1999, 97–98)

Komponenttilistauksen tulisi sisältää tietoa kaikista laitteen värähtelyprofiiliin liittyvistä komponenteista, mutta vähintään yksityiskohtaiset tiedot laakereista, ohitustaajuuksista ja laitteen tyyppikilven ilmoittamat tiedot. Prosessikuvauksen tulisi sisältää kaikki prosessin muuttujat, jotka vaikuttavat pumpun dynamiikkaan ja värähtelyprofiiliin. (Moblely 1999, 99)

Analyysissä käytettävien parametrien kuvauksessa tulee mainita esimerkiksi käytettävät suodattimet (kaistanleveydet, keskiarvotus ja painotus), hälytysrajat ja datankeruureitit. Datan suodatusta tarvitaan, koska kaiken aineiston kerääminen käytettävissä olevalta kaistanleveydeltä ja sen analysoiminen kuormittaa prosessointia ja muistia. Suodattimia käytetään sekä datan määrän että tarkkuuden rajoittamisessa. (Moblely 1999, 101)

Mobleyn (1999, 107) mukaan kunnonvalvontajärjestelmään tulisi sisällyttää ainakin kolmen tasoisia hälytyksiä: alarajahälytys, suurin muutosnopeus ja selkeä vikatila. Hälytysten ei tulisi aktivoitua silloin, kun laitetta käytetään tavallisen kuormituksen ulkopuolella eikä muuttuvissa käyntiolosuhteissa, esimerkiksi laitteen käynnistyessä ja sammussa. (SFS-ISO 10816-5 2000, 13).

### 3.1.1 Värähtelyn mittaaminen

Tietoa laitteiden värähtelystä saadaan kiinnittämällä laitteeseen anturi ja yhdistämällä anturi värähtelyn monitorointi- ja analysointilaitteeseen värähtelydatan tulkitsemista varten. Anturit kiinnitetään tyypillisesti laitteen runkoon ja laakeripesiin ja ne voidaan kytkeä joko suoraan jatkuvasti mittaavaan järjestelmään, tai mittauksia voidaan tehdä kerätä kannettavalla laitteella. (Mobley 1999, 12)

Värähtelymittauksissa käytetään kolmen tyyppisiä antureita: siirtymäanturi, nopeusanturi ja kiihtyvyyssanturi, joilla kullakin on omat parhaiten soveltuvat käyttökohteensa. (Mobley 1999, 50)

Siirtymäanturit mittaavat akselin liikettä suhteessa siihen pisteeseen, johon anturi on kiinnitetty. Mittausarvot ovat tyypillisesti millimetreinä ilmoitettuja värähtelyn amplitudin ”huipusta huippuun” -arvoja ja edustavat maksimisiirtymää. Siirtymäantureita käytetään taajuusalueella 0–1000 hertsiä. Suuremmilla taajuuksilla anturit eivät enää pysty luotettavasti mittaamaan siirtymää. (Mobley 1999, 51)

Nopeusanturit ovat sähkömekaanisia antureita, joilla mitataan värähtelyä laitteen rungosta. Nopeusanturit mittaavat nimensä mukaisesti liikkeen nopeutta. Mittayksikkönä nopeusantureilla käytetään millimetriä per sekunti, mikä kuvastaa laitteen värähtelyn sisältämää energiaa. Nopeusantureita käytetään tyypillisesti taajuusalueella 10–1000 hertsiä. (Mobley 1999, 51; Randall 2010, 13)

Kiihtyvyyssanturit ovat yleisimmin käytössä olevia värähtelyantureita, jotka muuttavat pietsosähköisen kiteen avulla mekaanisen energian sähköiseksi signaaleiksi. Mitattava suure on suhteellinen kiihtyvyys, jonka yksikkönä käytetään metriä per sekunti toiseen potenssiin. Kiihtyvyyssantureita käytetään tyypillisesti taajuusalueella 1–10 000 hertsiä. Yleisesti ottaen yli 1000 hertsin taajuudella esiintyvät värähtelyt tulisi mitata kiihtyvyyssanturilla. Kiihtyvyyssantureiden käytössä tulee huomioida anturin asettumisaika jännitteen kytkemisen jälkeen, jotta mittaustuloksiin ei tule vääristymiä. (Mobley 1999, 52–58)

Yleisesti ottaen kiinteästi asennetuilla antureilla päästään luotettavampiin mittaustuloksiin kuin kannettavilla antureilla. Kunnonvalvonnassa myös pitkän ajan datankeruun kannalta kiinteät mittauspisteet ja suora kytkentä analyysitietokoneelle mahdollistavat tasalaatuisen seurannan ja mittauslogiikan hyödyntämisen datan suodatuksessa. (Mobley 1999, 55–57)

Pumppujen, kuten monien muidenkin laitteiden värähtelyn mittaamiseen perustuva kunnonvalvonta keskittyy laitteen laakereilta mitattaviin värähtelyihin (ISO-10816-1:1995, 2). Laakereihin vaikuttavat pumpun staattiset ja dynaamiset voimat, mistä syystä ne ovat tyypillinen kuluva ja epäsuotuisissa olosuhteissa suhteellisen helposti vaurioituva mekaaninen komponentti. Laakerivauriot voivat käyttäjältä huomaamatta jäädessään aiheuttaa laajempaakin vauriota laitteissa ja siksi niiden kunnon valvominen ja oikea-aikaiset huoltotoimenpiteet ovat laitteiden luotettavan käytön kannalta tärkeitä.

Pääasiallisen mittauspisteen tulee sijaita pumpussa siten, että laitteen dynaamiset voimat ovat havaittavissa mittaussuunnassa (ISO 10816-7:2017, 8). Käytännössä mittauksen tulisi sijaita samassa tasossa poistoyhteen kanssa ja vastakkaiseen suuntaan kuin virtaus, jotta voitaisiin mitata esimerkiksi epätasaisen virtauksen tai poistupuolen vastapaineen akselille aiheuttamat värähtelyt. Mahdollisen toisen mittauspisteen tulisi sijaita 90 asteen kulmassa roottorin pyörimissuuntaan ensimmäiseen mittauspisteeseen nähden. Kaikkien antureiden tulisi olla 90 asteen kulmassa akselin keskilinjaan nähden. (Mobley 1999, 120; SFS-ISO 10816-5 2000, 8)

### **3.1.2 Värähtelymittauksen määrittelyt**

Värähtelymittauksen maksimitaajuuden tulisi olla määriteltä niin korkealle, että suurin kiinnostava taajuus tulee mitatuksi. Maksimitaajuuden pitäisi sisältää yleisesti vähintään laitteen pyörintänopeuden kolminkertainen harmoninen taajuus, mutta käytännössä usein mitataan myös tätä korkeampia taajuuksia. Alarajana taajuuskaistalle voidaan käyttää nolaa, mikäli ei ole erityisesti tarpeen suodattaa matalataajuisia värähtelykomponentteja pois. (Mobley 1999, 102–103)

Anturit, signaalinkäsittelylaitteet ja tallennuslaitteet tulisi valita siten, että niillä voidaan mitata ja käsitellä taajuuksia, joita mitattavassa kohteessa esiintyy. Taajuudet, joiden tiedetään ilmenevän laitteella, mutta joiden tarkastelusta ei saada oleellista tietoa laitteen kunnosta tulisi suodattaa pois. (ABS 2021, 62)

Tapauksissa, joissa värähtelyt syntyvät laitteessa itsessään ja amplitudit pysyvät suhteellisen tasaisina voidaan värähtelyanalyysissä käyttää lyhytaikaisiakin otoksia taajuustason värähtelyspektristä. Kun kysymyksessä ovat laivalla tehtävät värähtelymittaukset on otettava huomioon, että suuri osa mitattavista värähtelyistä aiheutuu laivan propulsiojärjestelmästä, merenkäynnistä tai näiden yhdistelmistä ja niihin liittyy satunnaisuutta, mistä syystä näytteiden on oltava riittävän kattavia satunnaisuuden karsimiseksi. Esimerkiksi luokituslaitos ABS toteaa, että juoksupyörän siipien ohitustaajuuden ja sen harmonisten taajuuksien tallentamiseksi olisi tehtävä kolmen minuutin näytteenotto. (ABS 2021, 62)

Värähtely on dynaamista, minkä takia mitatut amplitudit muuttuvat jatkuvasti. Kunnonvalvonnan luotettavuuden parantamiseksi suositellaan yleensä mittausdatan keskiarvottamista. Tyypillisesti suositellaan keskiarvon muodostamista kolmesta - kahdestatoista näytteestä ja yhdistetyn värähtelyprofiilin muodostamista keskiarvosta. Näin tekemällä päästään eroon liiasta vaihtelusta tietyn taajuuskomponentin värähtelyn amplitudissa. Toisaalta samalla voidaan myös kadottaa lisätietoa antavia värähtelykomponentteja. (Mobley 1999, 69)

Mittauksen resoluutio tulee määritellä siten, että värähtelyn eri komponentit erottuvat spektristä riittävällä tarkkuudella. Resoluutiolla tarkoitetaan värähtelyspektrin erottelukykä, joka määritellään maksimitaajuuden suhteenä käytettävissä olevaan kuvaajan viivojen määrään. Esimerkiksi 50 000 viivan spektrissä maksimitaajuudella 10 000 hertsiä resoluutio on 0,2 hertsiä, mikä on spektrissä näkyvissä olevien viivojen välinen taajuusero. (Mobley 1999, 103–104)

Värähtelyprofiili, joka sisältää yksiselitteisesti laitteen koko värähtelyspektrin tietyissä käyttöolosuhteissa tietyinä aikana on tärkeä analyysityökalu, mutta sen sisältämän suuren tietomäärän takia ei yleensä ole käytännöllistä kerätä koko



spektridataa rutiininomaisesti, tai ainakaan yhtä tiheästi kuin erilaisia tunnuslukuja. Spektridata voidaan kerätä analysaattorin tietokantaan harvennetulla tallennusvälillä tai esimerkiksi vain silloin, kun määritelty raja-arvo ylittyy ja halutaan tehdä tarkempaa analyysiä. Näin saavutetaan tilanne, jossa värähtelyyn perustuva kunnonvalvonta mahdollistaa trendien ja juurisyyanalyysin tekemisen mahdollisimman pienillä datan käsittely- ja tallennustilavaatimuksilla. (Mobley 1999, 63–64)

### 3.1.3 Virhelähteet ja datan verifiointi

Ennakoivan huollon kannalta on oleellista, että värähtelyanalyysi tehdään riittävän tarkan, paikkansapitävän ja toistettavan datan perusteella. Värähtelyanturin laadun ja tyyppin lisäksi oleellisia asioita mittauksissa ovat mittauspisteen oikea sijainti ja mittaussuunta, sekä anturin asennustapa. Tärkeää on myös dokumentoida mittauspisteet ja mittaussuunnat sekä se, millä perusteella ne on valittu. Mittausten asemat tulee pitää samana koko mittauksen elinkaaren ajan, jotta kerätty data on vertailukelpoista. (Mobley 1999, 49)

Kunnonvalvontajärjestelmää suunniteltaessa on huomioitava käyttöympäristön olosuhteet, kuten lämpötila, nopeasti muuttuvat kuormat tai pyörintänopeudet, sekä antureiden ja analysaattoreiden ominaisuudet ja soveltuvuus mitattavaan kohteeseen. Antureiden kaapeleissa on huomioitava käyttöympäristö, koska esimerkiksi erityisen matalataajuiset värähtelyt tai voimakkaat sähkömagneettiset kentät voivat häiritä todellista värähtelysignaalia. (Mobley 1999, 53)

Osa värähtelyanalysoijista ei kykene tallentamaan tarkkaa dataa matalanopeuksisilta laitteilta, jotka tuottavat alle 10 hertsin värähtelyä. Pääasialliset syyt, jotka rajoittavat matalataajuuksisen värähtelyn mittaamista ovat sähköinen häiriö (noise) ja antureiden vasteominaisuudet, jotka aiheuttavat varsinaisen värähtelykomponenttien jäämisen hälyn alle havaitsemattomiin. Matalataajuuksista värähtelyä mitattaessa on valittava signaalin suodatus, tiedonkeruuteknikka ja anturityyppi siten, että niiden avulla pystytään erottamaan värähtelytaajuuudet sähköisestä häiriöstä. (Mobley 1999, 70)

Antureiden asettumisaika pitää huomioida jo mittauksen määrittelyissä, jotta vältetään anturin virran päälle kytkemisen aikaansaaman virtapiikin aiheuttamalta vääristymältä mittaustuloksissa. Virheellinen mittaustulos vältetään käyttämällä mittauksessa viivettä, joka voi sisältyä anturiin tai voidaan ohjelmoida värähtelyanalysointiin. Myös kannettavan anturin asentaminen paikalleen aiheuttaa hetkellisen virtapiikin. (Mobley 1999, 57)

Muita virhelähteitä mittauksissa voivat olla vikaantuneet kaapelit, anturit ja virtalähteet. Jotta voitaisiin välttyä laitteiston vaurioiden aiheuttamilta virheiltilta mittaustuloksiin, tulisi mitattuja arvoja verifioida mittausprosessin aikana. Esimerkiksi värähtelyanalysointit voivat sisältää häilytyksen, jos mitatut värähtelytasot putoavat alle määritellyn rajan. Jotkin laiteviat voidaan havaita myös muuttuneesta värähtelyspektristä. (Mobley 1999, 58)

Valmet DNA-kunnonvalvontajärjestelmässä käytetään niin sanottua bias - tarkastelua laitteiden ja kaapeleiden kunnon analysointiin. Bias -tarkastelu perustuu IO-riviliittimen ja anturin välisen virran ja anturin jännitehäviön mittaamiseen. (Valmet 2021, 16)

Antureiden antaman datan oikeellisuutta voidaan arvioida vertaamalla mittausten arvoja kannettavilla mittalaitteilla saataviin tuloksiin tai vastaavanlaisen laitteen antureilta saatavaan dataan.

### **3.1.4 Värähtelyanalyysi**

Oleellista värähtelyyn perustuvassa kunnonvalvonnassa ja diagnosoinnissa on pystyä erottamaan normaali ja epänormaali värähtelyprofiili. Värähtelyprofiilin tutkimista ja siinä esiintyvien komponenttien määrittelyä kutsutaan värähtelyanalyysiksi.

Suuri osa spektreissä esiintyvistä värähtelyistä on liikkuville tai pyöriville laitteelle normaaleja, kuten esimerkiksi akselin pyörimisestä johtuvat normaalit vaihtelut värähtelyssä juoksupyörän siipien ohitustaaajuudella. Tietyt ongelmat laitteessa sen sijaan saavat aikaan epänormaaleja, mutta tunnistettavissa olevia värähtelytaajuuksia. Tyypillisiä esimerkkejä epänormaalia värähtelyä

aiheuttavista syistä ovat löystyneet pultit, akseleiden väärät linjaukset, laakereiden kuluminen ja vuodot. (Mobley 1999, 11)

Värähtelyanalyysiin perustuva kunnonvalvonta pohjautuu seuraaviin väittämiin, jotka muodostavat perustan vaurioiden havaitsemiselle ja tunnistamiselle:

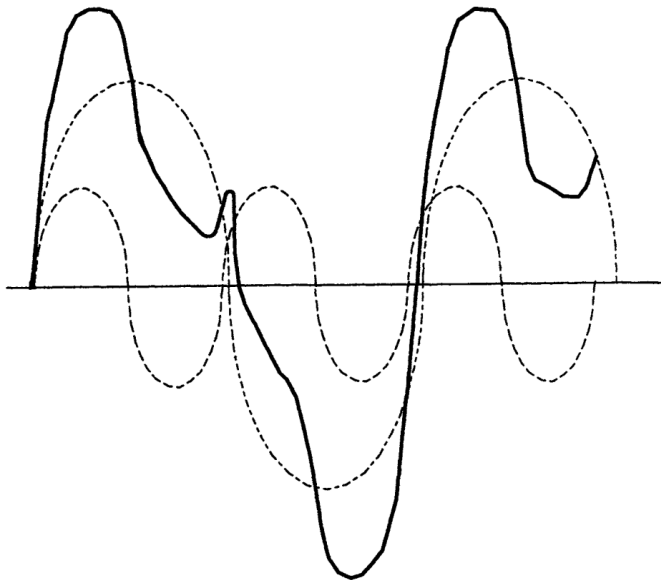
1. Kaikilla tyypillisillä laitteisiin liittyvillä ongelmilla ja vikatiloilla on ominaisia värähtelytaajuuden komponentteja, jotka voidaan eristää ja tunnistaa taajuusspektristä.
2. Spektrin jokaiselle värähtelykomponentille löytyy aiheuttaja.
3. Kun saman laitteen värähtelyspektrejä verrataan toisiinsa eri ajan hetkinä, värähtelyn kuvaaja toistuu samanlaisena, kunnes laitteessa tapahtuu jokin muutos.

(Mobley 1999, 11)

Huomioitava on kuitenkin, että vaikka tyypillisesti muutos värähtelyn amplitudissa tarkoittaa muutosta laitteessa, näin ei kuitenkaan aina ole. Muutokset esimerkiksi kuormassa ja laitteen käyttötavassa voivat aiheuttaa muutoksia amplitudiin. Lisäksi on huomioitava, että matalampi amplitudi ei välttämättä merkitse parannusta laitteen tilassa. Siksi analyysiä tehtäessä on tärkeää ymmärtää kaikki amplitudin muutoksiin johtaneet syyt. (Mobley 1999, 11)

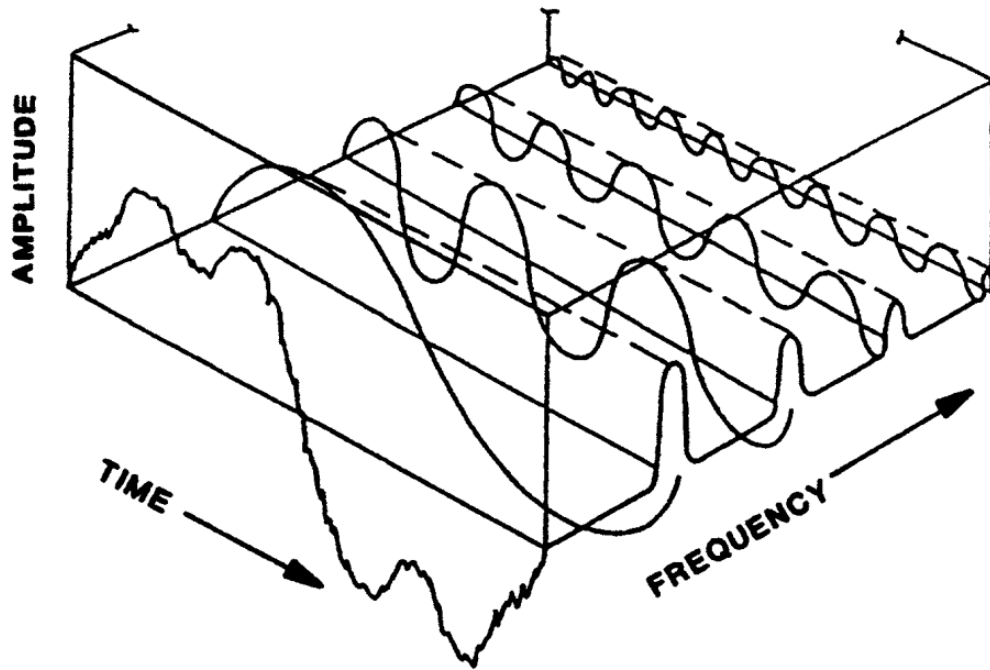
Värähtelyanalyysin tekeminen vaatii laajan tietomäärän keräämistä laitteelta sekä aineiston tulkintaa. Teoreettisiin värähtelyn spektrikuviin verrattuna todellinen värähtelyn spektri on monimutkaisempi ja vaikeammin tulkittava, koska värähtelyn lähteitä on tyypillisesti useita. (Mobley 1999, 8)

Värähtelyanalyysissa voidaan käyttää apuna niin sanottua Fourierin muunnosta, joka perustuu havaintoon, että epäharmoniset funktiot, kuten värähtelysignaali, ovat yksinkertaisten harmonisten funktioiden matemaattisia summia (KUVIO 2). (Mobley 1999, 8)



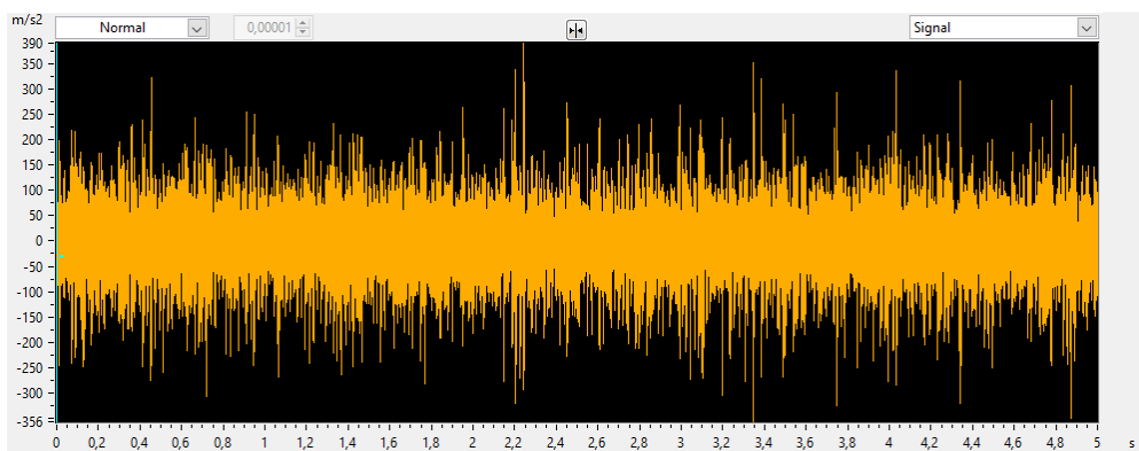
KUVIO 2. Harmonisia ja epäharmonisia värähtelyn funktioita (Mobley 1999, 8)

Fourierin muunnoksen avulla aikatasossa oleva data saadaan esitettyä taajuustasossa. Näin saadaan jokainen värähtelyn komponentti eroteltua anturin signaalista oman taajuutensa mukaiseksi värähtelyspektrin "piikiksi". Aikatasossa värähtelyn amplitudi esitetään kuvaajan y-akselilla joko nopeutena, tai kiihtyvyytenä, ja x-akselilla aika sekunteina. Taajuustasossa värähtelyn amplitudi esitetään kuvaajan y-akselilla joko nopeutena, tai kiihtyvyytenä, ja x-akselilla taajuus hertseinä. Aikatason ja taajuustason kuvaajien välinen suhde on esitetty kuviossa 3. (Mobley 1999, 10)

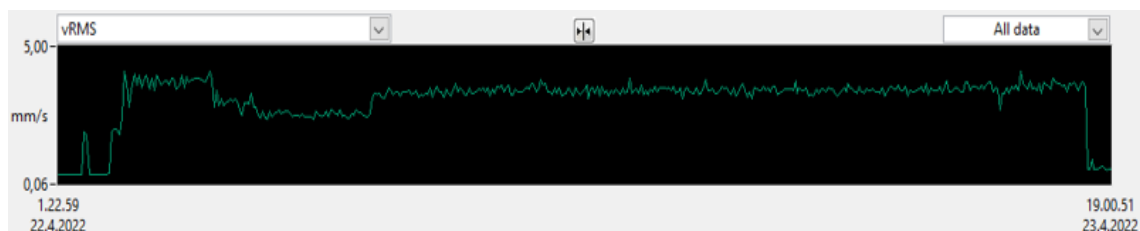


KUVIO 3. Aikatason ja taajuustason kuvaajien välinen suhde (Mobley 1999, 46)

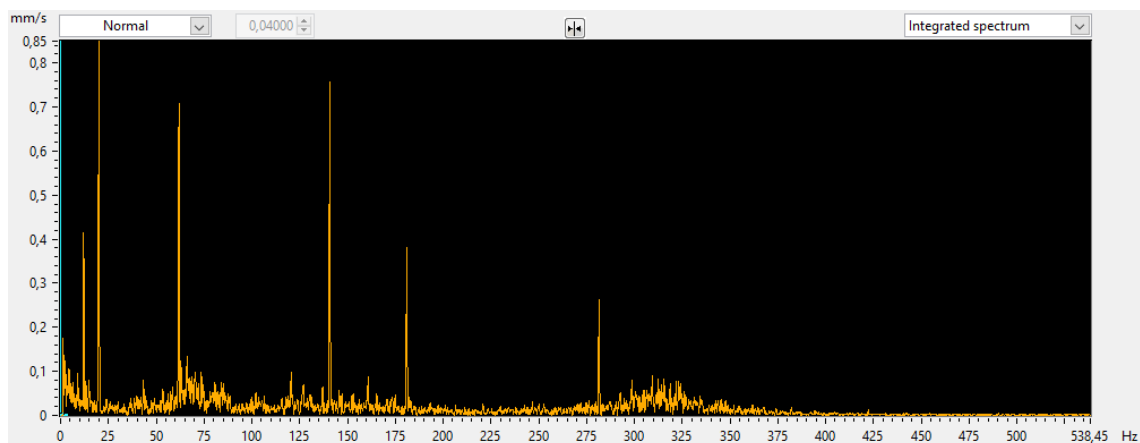
Jokaisella värähtelyn lähteellä on oma värähtelytaajuutensa, joka näkyy kootussa taajuustason värähtelyspektrissä. Anturit muuttavat laitteiden mekaanisen värähtelyn sähköisiksi signaaleiksi (KUVA 3), joista muodostetaan analyysitietokoneilla värähtelyn tunnusluvut, värähtelyn kokonaisarvoa tietyllä ajan hetkellä kuvaava trendi (KUVA 4) ja taajuustason värähtelyspektrit, joka voidaan esittää nopeuden (KUVA 5) tai kiihtyvyyden (KUVA 6) amplitudeina eli nopeus- ja kiihtyvyysspektreinä. (Mobley 1999, 8; Randall 2010, 4)



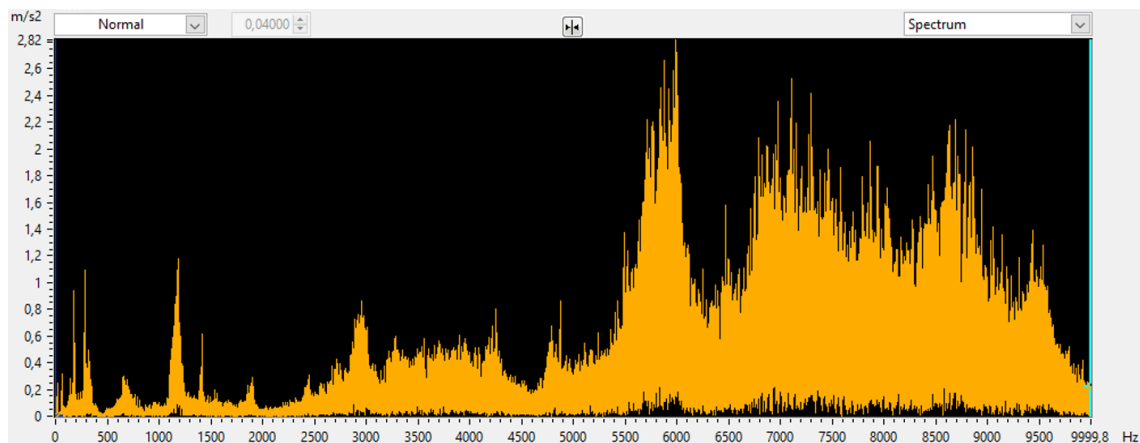
KUVA 3. Värähtelysignaali (Valmet Analysis Workbench 3.0.7.4)



KUVA 4. Värähtelyn kokonaisarvon trendi (Valmet Analysis Workbench 3.0.7.4)



KUVA 5. Taajuustason värähtelyspektri nopeuden amplitudeina (Valmet Analysis Workbench 3.0.7.4)



KUVA 6. Taajuustason värähtelyspektri kiihtyvyyden amplitudeina (Valmet Analysis Workbench 3.0.7.4)

Värähtelydatan analysoinnissa voidaan käyttää useita eri menetelmiä, joita ovat muun muassa signaalin silmämääräinen tarkastelu, trendianalyysi, taajuusspektrin analyysi sekä edellä mainittujen perusteella tehtävä vertaileva analyysi. (Mobley 1999, 60)

Värähtelyn signaalista voidaan tutkia silmämääräisesti esimerkiksi, onko signaalissa havaittavissa iskumaisuutta, joka viittaisi pyörievien elementtien vikoihin. (Ilonen 29.4.2022)

Trendianalyysi perustuu värähtelyn kokonaisamplitudin historialliseen arvon ja sen muutokseen tarkkailuun. Tyypillisesti käytetään nopeuden RMS-arvoja, joihin myös useimmat värähtelyn vakavuutta kuvaavat kaaviot perustuvat. Trendianalyysiä voidaan käyttää muuttumattomina pysyvissä käyttöolosuhteissa, mutta toisistaan poikkeavissa kuorma- ja käyntiolosuhteissa tallennetun trendidatan perusteella tehty vertailu ei ole luotettava. Trendien avulla voidaan kuitenkin saada yleiskuva laitteen kunnosta. (Mobley 1999, 23, 60 ja 136)

Taajuusspektrin analyysiä käytetään, kun halutaan selvittää värähtelyn kokonaistason lisäksi, mistä eri taajuisista komponenteista värähtely koostuu ja mistä värähtely on peräisin. Valtaosassa pyörievien laitteiden nopeusspektrejä suurin värähtelyn amplitudi sijaitsee pyörimisnopeuden taajuudella (Mobley 1999, 45). Lisäksi spektrissä on tyypillisesti näkyvissä yksi tai useampia pyörimisnopeuden kanssa harmonisia värähtelytaajuuksia, esimerkiksi kaksi tai kolme kertaa pyörimisnopeutta vastaavat taajuudet. (Mobley 1999, 21)

Vertaileva analyysi perustuu kahden tai useamman datasetin vertailuun, jotta saataisiin tietoa muutoksista laitteen kunnossa. Käytännössä vertaillaan keskenään joko trendin kokonaisarvoja tai taajuustason spektrejä eri ajan hetkinä tai eri laitteilla. Vertailudatana tutkittavan laitteen rinnalla käytetään tyypillisesti uuden tai äskettäin huolletun vastaavan laitteen värähtelyprofiilia tai teollisuuden viitetietoja. (Mobley 1999, 61)

Jotta vertailua eri laitteiden tai ajanhetkien välillä voitaisiin tehdä, on määriteltävä selkeästi kaikki analyysiin valittuja värähtelyprofiileja määrittelevät tiedot, kuten kuorma tai muut prosessin muuttujat, joiden tulisi vertailukohteissa olla samat vertailevan analyysin mahdollistamiseksi. (Mobley 1999, 62)

Käytettäessä tunnettua laitteen tilaa vertailutietona kunnonvalvonta -analyysissä, voidaan esimerkiksi vertailla tunnetusti vioittuneen laitteen värähtelyprofiilia tutkittavan laitteen profiiliin, kun molempien käyttöolosuhteet tunnetaan.

Samanlaiset profiilit viittaavat samanlaisiin ongelmiin molemmissa laitteissa. (Mobley 1999, 62)

Vertailevaa tutkimusta voidaan tehdä myös tutkittavan laitteen värähtelydatan ja teollisuuden standardien tai viitearvojen välillä. Viitearvot ovat päteviä tietyillä taajuusalueilla ja kierrosnopeusalueilla ja ne on lisäksi luokiteltu erilaisten konetyyppien ja joissakin tapauksessa laitteen iän tai oletetun kunnan mukaan (Mobley 1999, 62).

Värähtelyn vakavuudesta esitetään yleisesti erilaisia kaavioita ja taulukkoarvoja liittyen siihen, minkä suuruiset värähtelyt kullekin laitteelle ovat hyväksyttäviä ja mitä erilaiset värähtelyn mittausarvot kertovat laitteen tai esimerkiksi laakereiden kunnosta. Värähtelyn voimakkuuden taulukkoarvoista puhuttaessa tarkoitetaan yleensä mitatun suureen (nopeus, kiihtyvyys tai siirtymä) neliöllistä keskiarvoa (RMS - Root, Mean, Square) tasaisen värähtelyjakson aikana, joka edustaa laitteen normaalia käyttilää. (ABS 2021, 57)

Neliöllinen keskiarvo (RMS) tarkoittaa laitteen, tuottaman energian määrän tilastollista keskiarvoa. Neliöllinen keskiarvo on neliöjuuri signaalin kaikkien pisteiden neliöiden summasta (ABS 2021, 57). Se on arvoltaan 0,707 kertaa yksittäisen taajuuden amplitudin suuruinen. Neliöllistä keskiarvoa käytetään tavallisesti suhteellisen, kiihtyvyyksianturilla mitatun värähtelydatan tai kiihtyvyyksinä ilmaistun värähtelyn yhteydessä. Muita tyypillisiä värähtelykuvaajien tulkinnassa käytettäviä arvoja ovat huipusta huippuun arvo (peak-to-peak) ja nollasta huippuun arvo (zero-to-peak). (Mobley 1999, 23 ja 25; ABS 2021, 57)

### **3.2. Pumppujen kunnonvalvontaan liittyvät standardit**

Värähtelyn analysointi ja mittaukset jaetaan ISO-standardien mukaisesti koneen kiinteän osan absoluuttisen värähtelyn, pyörivän osan värähtelyn ja vääntövärähtelyn mittauksiin. ISO 10816 -standardi antaa ohjeita laitteiden värähtelyjen arviointiin ei-pyörivien osien mittauksiin ja ISO 7919 ja ISO 2954 pyörivien akseleiden mittauksiin perustuen. Näiden lisäksi ISO-13373 antaa



yleisemmin ohjeita värähtelymittauksiin perustuvaan koneiden kunnonvalvontaan ja diagnostiikkaan.

Keskeisimmät ISO 10816-7 (2017, 7–11) -standardissa esitetyt määrittelyt ja suositukset värähtelymittauksiin perustuvalla pumpun kunnonvalvonnalle ovat:

- Mittaus suoritetaan laakeripesästä
- Mitattava suure on neliöllinen keskiarvo värähtelyn nopeudesta (mm/s)
- Taajuusalue on laajakaista, vähintään 10–1000 hertsiä
- Jatkuva mittaus on jaksottaista mittausta luotettavampi
- Mittauksien sijainnit ja suunnat on valittava niin että ne edustavat pumpulla havaittavia dynaamisia voimia, yleensä kaksi säteen suuntaista mittausta laakereiden keskilinjalta
- Mittaukset on tehtävä tilanteessa, jossa roottori ja laakerit ovat saavuttaneet normaalin käyttölämpötilansa ja pumppua ajetaan suositellulla operointialueella
- Tärkeimmät värähtelyn arvioinnin kriteerit ovat värähtelyn voimakkuus ja muutokset värähtelyn voimakkuudessa muuttumattomissa olosuhteissa
- Jos värähtelytaso pumpun ollessa pois päältä ylittää 25 % pumpun käynninaikaisesta värähtelytasosta, tarvitaan korjaavia toimenpiteitä

(SFS-ISO 10816-7 2017, 7–11)

ISO 10816 -standardi ei ota kantaa värähtelyn taajuuskomponentteihin tai vaiheeseen, joiden analysointia tarvitaan pitkäaikaiseen kunnonvalvontaan ja värähtelydiagnostiikkaan (SFS-ISO 10816-7 2017, 12). Koneiden värähtelyn mittaamiseen perustuvan kunnonvalvonnan ja diagnostiikan käytännöt, kuten värähtelydatan käsittely, analysointi ja esittäminen on määritelty tarkemmin SFS-ISO 13373 -standardissa, joka sisältää ohjeet myös sähkömoottoreiden diagnosointiin. Edellä lueteltujen pumpun värähtelyyn liittyvien määrittelyjen lisäksi ISO 13373-3 -standardin mukaan laitteen operoinnin aikaiset parametrit, kuten pyörimisnopeus, kuorma, paine ja lämpötila tulee kerätä värähtelydatan ohella diagnoosia varten. (SFS-ISO 13373-3, 2015, 6)

ISO 10816 -standardin osassa 7 esitellyn tutkimuksen mukaan pumppujen jäykällä tai joustavalla tuennalla tai asennussuunnalla (vaaka- tai pystytaso) ei havaittu olevan merkitystä värähtelytasoihin. Sen sijaan pumpun

virrankulutuksen ja värähtelyarvojen välillä havaittiin yhteys, mistä syystä standardissa on omat kategoriansa teholtaan alle ja yli 200 kilowatin pumpuille. (SFS-ISO 10816-7 2017, 5)

ISO 10816-7 -standardi jaottelee mitattavat laitteet niiden kunnan mukaan neljään alueeseen (zone) ja sen lisäksi kahteen eri kategoriaan pumpun toiminnan kriittisyyden perusteella, ja nämä luokat vielä kummatkin kahteen eri teholuokkaan (TAULUKKO 1).

TAULUKKO 1. Värähtelyn viitearvoja (SFS-ISO 10816-7:2017, 16)

Zone	Description (see 5.2 for details of zone definitions)	Vibration velocity limit r.m.s. value mm/s			
		Category <sup>a</sup> I		Category <sup>a</sup> II	
		≤ 200 kW	> 200 kW	≤ 200 kW	> 200 kW
A	Newly commissioned machines in preferred operating range	2,5	3,5	3,2	4,2
B	Unrestricted long-term operation in allowable operating range	4,0	5,0	5,1	6,1
C	Limited operation	6,6	7,6	8,5	9,5
D	Risk of damage	> 6,6	> 7,6	> 8,5	> 9,5
Maximum ALARM limit (≈ 1,25 times the upper limit of zone B) <sup>b</sup>		5,0	6,3	6,4	7,6
Maximum TRIP limit (≈ 1,25 times the upper limit of zone C) <sup>b</sup>		8,3	9,5	10,6	11,9
In situ acceptance test	Preferred operating range	2,5	3,5	3,2	4,2
	Allowable operating range	3,4	4,4	4,2	5,2
Factory acceptance test	Preferred operating range	3,3	4,3	4,2	5,2
	Allowable operating range	4,0	5,0	5,1	6,1

ISO 10816 -standardissa tehdyt määrittelyt ja kriteerit koskevat vain pumpun itsensä tuottamaa värähtelyä, eivätkä värähtelyä, joka johtuu pumppuun ulkoisista lähteistä (SFS-ISO 10816-1 1995, 1).

Laivaympäristöön sijoittuvien värähtelymittausten osalta ISO 20283 antaa ohjeet värähtelyn mittaamiseen, arviointiin ja raportointiin asumiskelpoisuuden kannalta matkustaja- ja kauppa-aluksilla, mutta standardiin eivät sisälly konetilat, joissa laivan merivesipumput sijaitsevat. Viitearvona mainitaan, että valvomon korkein hyväksyttävä ohjeellinen värähtelyn arvo on 5,0 mm/s RMS. (SFS-ISO 20283-5 2017, 11)

Standardien lisäksi luokituslaitokset voivat asettaa omat määritelmänsä ja raja-arvonsa laivaympäristössä esiintyvälle värähtelyille. Eri luokituslaitosten määritelmät poikkeavat toisistaan, eivätkä kaikki anna raja-arvoja konetiloissa hyväksyttävälle värähtelyille, joita laivakäyttöön hyväksytyjen laitteiden tulisi kestää.

Viitteellisenä ohjeena voidaan pitää ABS:n (2021, 70) antamia värähtelyn raja-arvoja paikallisille rakenteille laivoissa väsymishalkeilun riskin pienentämiseksi:

1. Taajuusalueella 1–5 hertsiä värähtelyn huippuarvojen tulisi siirtymänä mitattuna olla alle 1,0 mm ja vauriot ovat todennäköisiä yli 2,0 mm arvoilla
2. Taajuusalueella viidestä hertsistä ylöspäin värähtelyn huippuarvojen tulisi nopeutena mitattuna olla alle 30 mm / s ja vauriot ovat todennäköisiä yli 60 mm/s arvoilla

Raja-arvot perustuvat arvoihin, joita korkeammat värähtelyt todennäköisesti aiheuttavat vaurioita rakenteissa, ja joita matalampien värähtelyjen katsotaan olevan turvallisella tasolla. On huomioitava, että rakenteita koskevat raja-arvot eivät välttämättä ole päteviä laitteita koskevia värähtelyjä tarkasteltaessa.

## 4 TUTKIMUSJÄRJESTELYT

Laivan seilauksen ja merivesipumppujen käynnissä olon aikaisen värähtelydatan keräämiseksi kunnonvalvontajärjestelmän suunnittelua varten järjestettiin yhdellä rahtilaivalla testimittaus käyttäen tablettitietokoneisiin kytkettyjä langattomia värähtelyantureita. Testin tarkoituksena oli kerätä tietoa rahtilaivan merivesipumppuilla esiintyvistä värähtelyistä varsinaisen rikkipesureiden automaatiojärjestelmään kytkettävän kunnonvalvontajärjestelmän suunnittelun tueksi sekä tutkia, saadaanko kunnonvalvonnassa käytettävillä antureilla ja analyysiohjelmalla tarkempi kuva pumppujen ja niiden sähkömoottoreiden laakereiden kunnosta, kuin alkuperäisillä kokonaisvärähtelyä mittaavilla antureilla.

Testiin valittiin laiva, johon Valmet on toimittanut savukaasupesurit, mistä syystä pumppujen käyttöön liittyvä prosessi ja automaatiojärjestelmä olivat tuttuja ja pumppujen tiedot olivat käytettävissä testin suunnittelua ja tulosten analysointia varten. Laivan ja savukaasupesurin merivesipumppujen keskeisimmät tekniset tiedot testiympäristön ja laitteiston hahmottamiseksi on koottu taulukkoon 2.

TAULUKKO 2. Tutkimuskohteen teknisiä tietoja

<b>Laiva</b>	
Laivan mitat	Pituus 400m - leveys 59m – korkeus 73 m
Propulsiojärjestelmä	Kaksi pääkonetta ja kaksi potkuriä
Pääkoneet	22 MW, 7 sylinteriä
Potkuri	Halkaisija 9.8 m, 4 siipeä
Nopeus	Maksimi 43 km/h, tyypillinen 22 km/h
Syväys	12,5–15 m
<b>Pumppu</b>	
Nimellispyörimisnopeus	1459 rpm
Pyörimisnopeus	1000 / 1370 / 1200 rpm (minimi / maksimi / tyypillinen)
Tyypillinen kuorma	60-95%
Nimellisvirtaus	1340 m <sup>3</sup> /h
Nimellisoskorkeus	78 m
Juoksupyörä	Ø 520 mm, 7 siipeä
Laakerityyppi	2 x 6413
Anturointi	1 x värähtelymittaus kiihtyvyyssanturilla ylälaakerilta
<b>Sähkömoottori</b>	
Nimellispyörimisnopeus	1785 rpm
Moottorin teho	415 kW
Jännite	440 V
Taajuus	Maksimi 47 Hz, taajuusmuuttajaohjattu
Laakerityyppi	2 x 6322
<b>Pumppuyksikkö</b>	
Mitat	Korkeus 2,6 m / leveys 1,3 m
Massa	3558 kg

### Savukaasupesurin prosessikuvaus

Laivan pääkoneiden tuottama savukaasu puhdistetaan savukaasupesureissa, joita on kullekin kahdelle moottorille omansa. Savukaasu johdetaan moottoreilta pesuritorneihin, joissa savukaasun sekaan suihkutetaan merivettä, joka neutraloi kaasussa olevat rikin oksidit. Pestyn savukaasun sekä pesussa käytetyn veden pitoisuuksia mitataan jatkuvilla mittauksilla, jotka säätävät tarvittavan pesutehon automaattisesti suhteuttamalla pesuriin syötetyn meriveden määrän sopivaksi määritellyn pesutuloksen saavuttamiseksi.

Neljä keskenään samanlaista pystyasenteista keskipakomerivesipumppua pumppaa vettä yhteisten imu- ja painepuolen jakotukkien kautta kahdelle savukaasupesurille. Pumppujen imupuolella on kullekin pumpulle normaalisti auki olevat käsiventtiilit ja painepuolella takaiskuventtiilit väärän suuntaisen virtauksen estämiseksi. Pumput on tuettu laivan runkorakenteisiin pohjastaan pulteilla sekä pumppujen hoitotasoihin pumpun ja moottorin laipasta teräsputkilla.

Pumpattavan veden määrää säädellään pumppujen nopeutta ja pesureiden vesisuihkutasojen suuttimille haluttua painetta säätämällä. Prosessia voidaan ajaa automaattilla päästömittausten perusteella tai manuaalisesti säätämällä pumppujen nopeus ja suutinpaine, ja sitä kautta pesureille toimitettavan veden määrä halutulle tasolle. Tarvittavan veden määrä riippuu myös pesurissa auki olevien pesutasojen määrästä. Normaalissa ajossa käytössä on aina yhtä aikaa vähintään kaksi merivesipumppua. Käynnissä olevilla pumpuilla kuorma jakautuu tasan pumppujen kesken.

Pumput saavat käyttövoimansa niihin joustavan kytkimen avulla kytketyiltä sähkömoottoreilta, joita ohjataan taajuusmuuttajien avulla. Taajuusmuuttajille on määritelty pumppujen käynnistyksen ja pysäytyksen yhteyteen rampitus nopeiden muutosten aiheuttamisen paineiskujen välttämiseksi.

### **Testijakso ja antureiden asennus**

Kenttätestiin valitun laivan kahteen savukaasupesurin merivesipumppuun asennettiin yhteensä seitsemän langatonta värähtelyanturia Tanskassa Århusin satamassa 21.4.2022.

Mittauspisteiden valinnassa noudatettiin seuraavia periaatteita:

1. Dataa kerätään vähintään kahdelta eri pumpulta
2. Testiin valitaan saatavilla olevan pumpun laakereiden lämpötila- ja värähtelydatan perusteella heikoimmassa kunnossa olevat tai eniten ulkopuolisten värähtelyjen vaikutuksen alaiset pumput
3. Dataa kerätään sekä pumpun että sähkömoottorin laakereilta
4. Dataa kerätään pääasiassa laakerin säteen suunnassa, yksi suunta laakeria kohti

5. Dataa kerätään myös pumpun aksiaalisuunnassa yhdestä mittauspisteestä

Käytettävissä oli testiä varten viisi Valmetin langatonta värähtelyanturia (WVS-100) sekä kaksi erillisiin värähtelyantureihin kytkettävää lähetintä (WMM-100). Kaikki käytetyt anturit olivat pietsosähköisiä kiihtyvyyssantureita. WMM-100 -tyypin lähettämiin kytkettiin pumpulla 4 RVT-120 -mallin ja pumpulla 3 RVT-105 -mallin anturi. Antureiden ja lähettimien tarkemmat tekniset tiedot ovat nähtävissä liitteissä 2–5. Anturit kytkettiin pumpuille taulukon 3 mukaisesti.

TAULUKKO 3. Antureiden kytkentä

Mittauksen numero	Pumpun numero	Mittauksen sijainti	Anturin kytkentä	Anturi
1	4	Pumppu – alempi laakeri	Ruuvattu olemassa olevaan mittausyhteeseen	WVS
2	4	Pumppu – ylempi laakeri	Ruuvattu olemassa olevaan mittausyhteeseen	WMM
3	4	Moottori – ylempi laakeri	Magneetilla moottorin runkoon	WVS
4	4	Moottori – laippa – aksiaalisuunta	Magneetilla moottorin runkoon	WVS
5	3	Pumppu – alempi laakeri	Ruuvattu olemassa olevaan mittausyhteeseen	WVS
6	3	Pumppu – ylempi laakeri	Ruuvattu olemassa olevaan mittausyhteeseen	WMM
7	3	Moottori – ylempi laakeri	Ruuvattu moottorin tuulettimen kannen kiinnitysyhteeseen	WVS

Kaikki pumppujen laakereiden mittauspisteet sijaitsivat pumpuissa valmistajan määrittelemissä värähtelymittausten yhteissä pumpun tuloyhteeseen nähden ja olivat samansuuntaiset keskenään (KUVA 7). Pumppujen moottoreiden mittauspisteet sijaitsivat keskenään samassa suunnassa pumpun tuloyhteeseen nähden. Aksiaalinen mittaus tehtiin pumpun ja moottorin kiinnityslaiPASSA pumpun tuloyhteeseen nähden samassa kohdassa, kuin muut moottoreiden laakereiden mittaukset. Käytännössä mittaukset kohdistuivat siten ympäristössään kolmeen eri suuntaan.



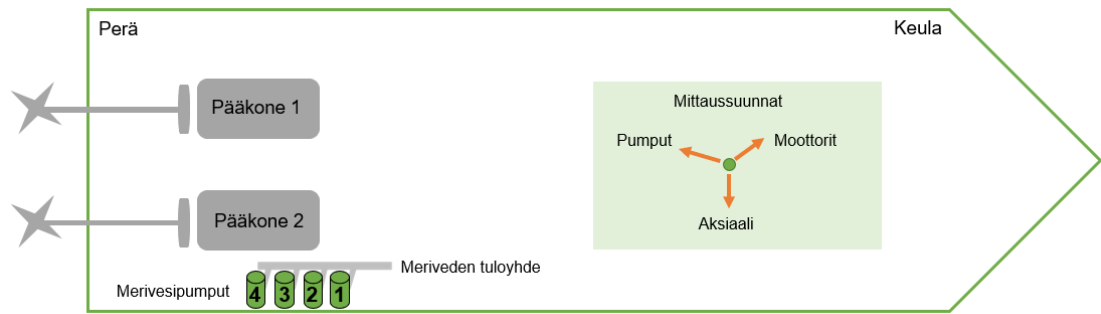
KUVA 7. Pumpun alemmalle laakerille asennettu WVS-100 värähtelyanturi

Antureiden sijoitteluun vaikuttivat olemassa olevien mittausyhteiden sijainti, jota haluttiin hyödyntää siksi, että se oli pumppuvalmistajan määrittämä mittauspiste pumpun värähtelyille, kierreyhteellä saatiin tehtyä standardin mukainen tukeva asennus eikä pumppuun tarvinnut porata ylimääräisiä reikiä. Moottoreiden mittauspisteet valittiin neljästä vaihtoehtoisesta suorasta pinnasta moottorin rungossa valmiiden mittausyhteiden puuttuessa. Suunnista valittiin lähimpänä pumpun tuloyhteen suuntaa oleva pinta. Aksiaalinen mittaus tehtiin moottorin ja pumpun välisestä moottorin rungon laipasta kyseisen kohdan ollessa ainoa jäykkä aksiaalinen kohta pumpulla, johon anturi voitiin reikiä tekemättä kiinnittää.

Pumppujen ylempien laakereiden mittauksissa käytettiin erillisiä, kaapeleilla lähettimeen kytkettyjä kiihtyvyyssantureita, koska kokonaan langattomien antureiden asentaminen pumpun sisälle ei ollut tilan puitteissa mahdollista. Antureiden johdot kiinnitettiin tukevasti pumppuun, etteivät ne päässeet ajon aikana vaikuttamaan antureiden dynaamiseen kuormaan tai muuten heilumaan.

Rikkipesureiden merivesipumppujen sijainti sekä mittauksen suunnat suhteessa konehuoneeseen ja laivan propulsiojärjestelmään on esitelty suunta-antavasti kuviossa 4.





KUVIO 4. Mittaussuunnat suhteessa pumppujen ympäristöön

Mittaukselle tehtiin taulukon 4 mukaiset määrittelyt.

TAULUKKO 4. Mittauksen määrittelyt

Parametri	Asetettu arvo
Mitattavan värähtelyn taajuus	1–10 000 Hz
Mittaustapahtumien määrä	1300 kappaletta
Yhden mittauksen kesto	5 sekuntia
Mittausten välinen aika	300 sekuntia
Viive anturin käynnistymisestä mittauksen alkuun	6 sekuntia
Nopeuden RMS-arvon taajuuskaista	5–1000 Hz
Kiihtyvyyden RMS-arvon taajuuskaista	1000–10000 Hz
Näytteenottotaajuus	20 000 Hz
Näytteiden määrä	100 000 kpl

Dataa kerättiin taajuuskaistalla 1–10 000 hertsiä, jotta saataisiin mahdollisimman kattavasti tietoa eri taajuuksilla esiintyvistä värähtelyistä. Ajallisesti riittävän pitkän otoksen saamiseksi yksittäisten mittaustapahtumien väliksi määriteltiin 300 sekuntia (5 minuuttia). Yhden mittaustapahtuman kestoksi määriteltiin viisi sekuntia. Mittauksen alkamisen viiveeksi anturin käynnistymisestä mittauksen alkuun määriteltiin kuusi sekuntia, jotta anturin käynnistymisen aiheuttama virtapiikki ei vaikuttaisi mittaustulokseen. Mittausten määräksi valittiin 1300 mittausta, minkä arvioitiin etukäteen riittävän mittauksen käynnistymisestä laivan saapumiseen seuraavaan satamaan myös siinä tapauksessa, että laivan lähtö tai saapuminen viivästyisivät joitakin tunteja tai vuorokausia.

Antureilta data siirtyi mittauksen aikana jatkuvasti pumppujen lähelle automaation kenttäkaappiin sijoitetuille tablettitietokoneille. Mittaus päättyi automaattisesti, kun määritellyt mittaukset oli suoritettu.

Mittaukset käynnistettiin 21.4.2022 noin kello 13:20 paikallista aikaa Tanskassa. Jokainen mittaus käynnistettiin yksitellen, mistä johtuen eri antureiden mittaustapahtumat eivät ole täysin samanaikaiset.

Asennuksen jälkeen laiva seilasi Århusista Kattegatin ja Skagerrakin merialueiden kautta Pohjanmerelle Bremerhavenin satamaan Pohjois-Saksassa. Laiva seilasi pääasiallisen matkan Århusin satamasta syvän veden ankkurointipaikkaan Bremerhavenin ulkopuolelle 22.–23.4. välisenä aikana noin 40 tunnin aikana, minkä jälkeen rikkipesureiden merivesipumppuja ei enää käytetty. Anturit keräsivät dataa 21.4.–26.4. väliseltä ajalta, kukin anturi 1300 mittauksen verran. Tarkemmin testijaksoksi määriteltiin aikaväli 22.4.2022 kello 1:30 – 26.4.2022 kello 9:00.

Laivan saavuttua Bremerhaveniin 27.4.2022 tarkastettiin, että anturointi oli samassa tilassa kuin asennuksen jälkeen ja varmistettiin, että kaikki data oli siirtynyt antureilta tablettitietokoneille. Testilaitteisto purettiin pumpuilta ja alkuperäiset värähtelyanturit asennettiin takaisin alkuperäisille paikoilleen. Savukaasupesureiden automaatiojärjestelmästä ladattiin pesureiden ajon aikana automaattisesti tallentuva data testiä edeltävien kuukausien ja testijakson ajalta värähtelyanalyysin tueksi.

## 5 ANALYYSI

Laiva lähti Århusin satamasta kohti Bremerhavenin satamaa Saksassa perjantaina 22.4.2022. Pääkone 1 on käynnistetty noin kello 1:30 ja pääkone 2 noin kello 2:20. Merivesipumppu 3 on lähtenyt käyntiin noin klo 1:15, pumppu 4 noin kello 2:35 ja pumppu 1 noin kello 6:15.

Kaikkien pumppujen käyntitieto laivan seilauksen ajalta Århusista Bremerhaveniin löytyy liitteestä 6 ja erikseen pumppujen 1,3 ja 4 liitteistä 7–9. Pumpua 2 ei käytetty testijakson aikana.

Merivesipumppujen ajotunnit testijakson aikana ja kokonaisajotunnit testin jälkeen on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Merivesipumppujen ajotunnit

Pumpun numero	Testin aikana ajatut tunnit	Ajotunnit testin jälkeen
1	31	5585
2	0	5559
3	39	5584
4	13	5563

Laiva on saapunut Bremerhavenin ulkopuolelle ankkuriin 23.4.2022. Pääkoneet on sammutettu noin kello 17:00 ja samaan aikaan on sammutettu merivesipumput 3 ja 4. Tämän jälkeen mikään merivesipumpuista ei ole ollut käynnissä värähtelymittauslaitteiston purkamiseen 27.4. mennessä.

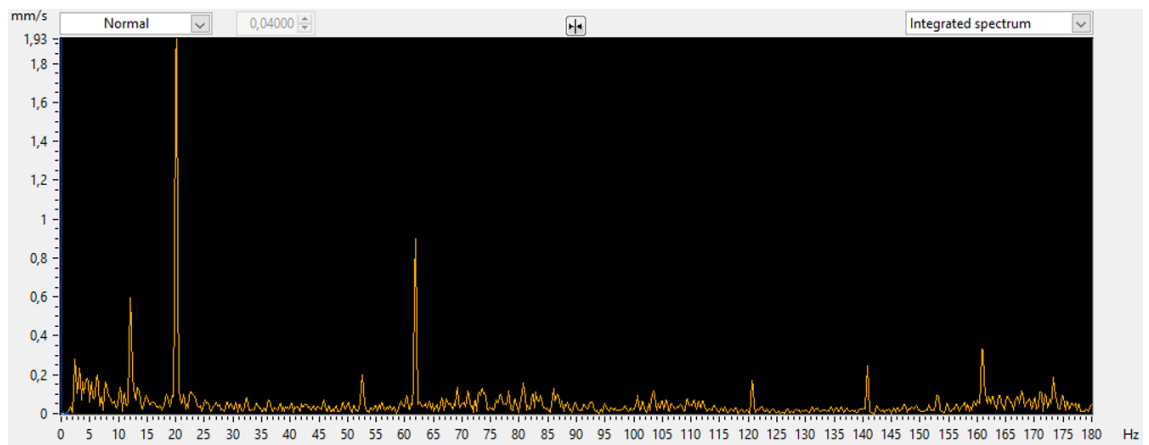
Kerättyä värähtelydataa tutkittiin aluksi Valmetin Maintenance Pad -analyysiohjelmalla yleiskuvan saamiseksi. Esikatselun perusteella määriteltiin yhdessä Valmetin kunnonvalvonta-asiantuntijan kanssa mittauksille tehtävät analyysit, jotka on esitetty taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Mittauksille suoritettavat analyysit

Analyyisin kohde	Tutkittava spektri/trendi	Arvo	Lisätieto
Matalin värähtelytaso (1)	Trendi (nopeuden RMS)	Silmämääräinen keskiarvo trendistä	Pumppu ei käynnissä
Toiseksi matalin värähtelytaso (2)		Silmämääräinen keskiarvo trendistä	Pumppu ei käynnissä
Toiseksi korkein värähtelytaso (3)		Silmämääräinen keskiarvo trendistä	Pumppu käynnissä
Korkein värähtelytaso (4)	Trendi (nopeuden RMS) Nopeusspektri	Silmämääräinen keskiarvo trendistä ja nopeuden arvo pumpun käyntinopeuden taajuudelta	Pumppu käynnissä
Korkeat taajuudet	Kiihtyvyysspektri	Kolmesta mittauksesta värähtelytasolta 4	Arvot yli 1000 Hz
Matalat taajuudet	Nopeusspektri	Kolmesta mittauksesta värähtelytasolta 4	Arvot alle 20 Hz
Juoksupyörän ohitustaajuus	Nopeusspektri	Kolmen mittauksen keskiarvo, värähtelytasolta 4	Arvot 7 x pumpun pyörimisnopeuden taajuudella (~140 Hz)
Laakereiden vikataajuudet	Signaali Verhokäyräspektri Nopeusspektri	Kolmesta mittauksesta värähtelytasolta 4	Iskumaisuus signaalissa, vikataajuudet spektrissä

Mittaukset nimettiin Valmetin Analysis Workbench -ohjelmassa ja ohjelmaan määriteltiin kullekin mittaukselle laakerityyppi, joka vastaa mittauskohtaa lähimpänä sijainnutta laakeria. Pumppujen laakereiksi määriteltiin SKF 6413 ja moottoreiden laakereiksi SKF 6322 perustuen valmistajien antamiin laakerityyppitietoihin. Todellisuudessa pumpun laakerit olivat NSK:n saman tyyppiset laakerit, mutta NSK:n laakerin puuttuessa analyysiohjelmasta valittiin SKF:n vastaava laakeri.

Pumpun pyörimisnopeus kussakin mittaustilanteessa määriteltiin analyysiohjelmassa lähellä pumpun tyypillistä pyörimisnopeutta olevan selkeästi erottuvan värähtelytaajuuden perusteella (KUVA 8), koska todellinen tieto pyörimisnopeudesta mittaushetkellä ei ollut tarkemmin muusta saatavilla olevasta datasta määriteltävissä.



KUVA 8. Pumpun pyörimistaajuuden määrittäminen nopeusspektrin perusteella

Analyysissä käytettiin pääasiassa trendistä saatua nopeuden RMS -arvoa ja nopeusspektrin arvoja, joiden lisäksi tarkasteltiin korkeataajuisia värähtelyä kiihtyvyysspektristä ja laakerivikataajuuksia signaalista ja verhoikärspektristä (envelope spectrum).

## 6 TULOKSET

Analyysin tulokset on esitetty talukon 6 esittämien tutkimusten mukaisesti seuraavissa kappaleissa.

### 6.1. Värähtelytasot eri ajotilanteissa

Kaikissa mittauspisteissä testijakson aikana tallennetun datan perusteella värähtelyt pumpuilla ja moottoreilla olivat välillä 0,0–7,9 millimetriä per sekunti nopeuden RMS-arvona. Mittauspistekohtaiset värähtelyn trendit nopeuden RMS-arvona on esitetty liitteissä 10 ja 11 ja kiihtyvyyden RMS-arvona liitteissä 12 ja 13.

Trendien perusteella päätettiin analysoida neljää pääasiallista värähtelytasoa (KUVA 9 ja TAULUKKO 7), jotka esiintyivät pumpun 3 moottorin ylälaakerin mittausta lukuunottamatta hyvin selkeästi kaikissa mittauspisteissä.



KUVA 9. Analyysissä käytetyt värähtelytasot, esimerkki

TAULUKKO 7. Värähtelytasot

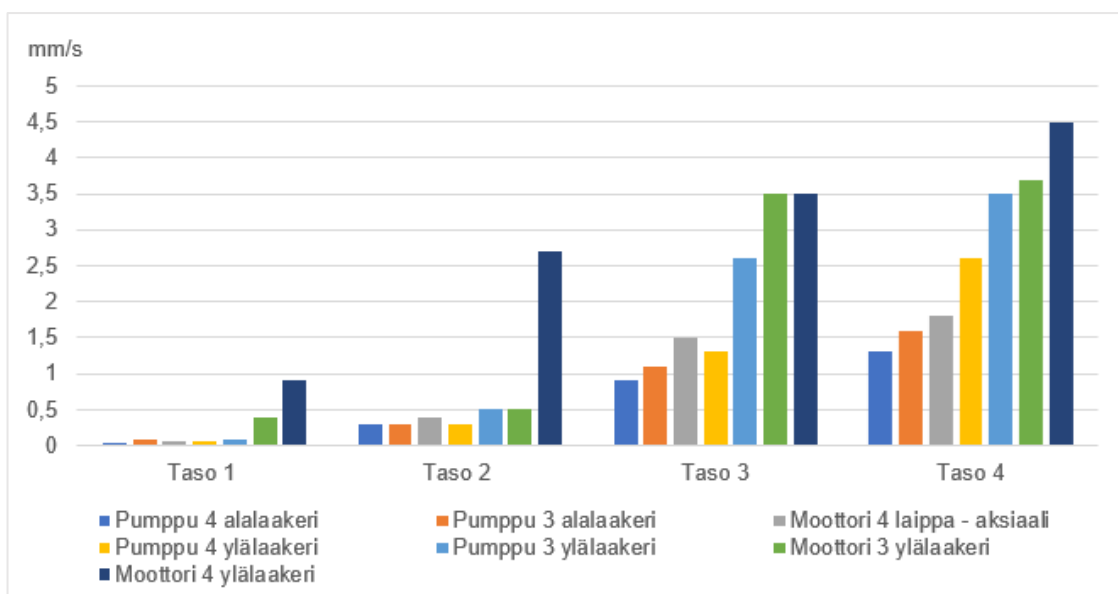
Taso 1	Matalin värähtelytaso	Pumput ja pääkoneet pois päältä
Taso 2	Toiseksi matalin värähtelytaso	Pumput ja pääkoneet pois päältä, muita laitteita päällä
Taso 3	Toiseksi korkein värähtelytaso	Pumppu ja pääkoneet käynnissä
Taso 4	Korkein värähtelytaso	Pumppu ja pääkoneet käynnissä

Taso 3 ajoittui pumpulla 3 tilanteeseen, jossa pumput 1, 3 ja 4 ovat yhtä aikaa käynnissä ja pumpulla 4 tilanteeseen, jossa pumput 1, 3 ja 4 ovat käynnissä yhtä aikaa tai pumput 1 ja 3 ovat käynnissä, mutta pumppu 4 ei ollut käynnissä.

Korkein taso 4 ajoittui pumpulla 3 tilanteeseen, jossa pumput 3 ja 4 tai 1 ja 3 ovat käynnissä ja pumpulla 4 tilanteeseen, jossa pumput 3 ja 4 ovat käynnissä.

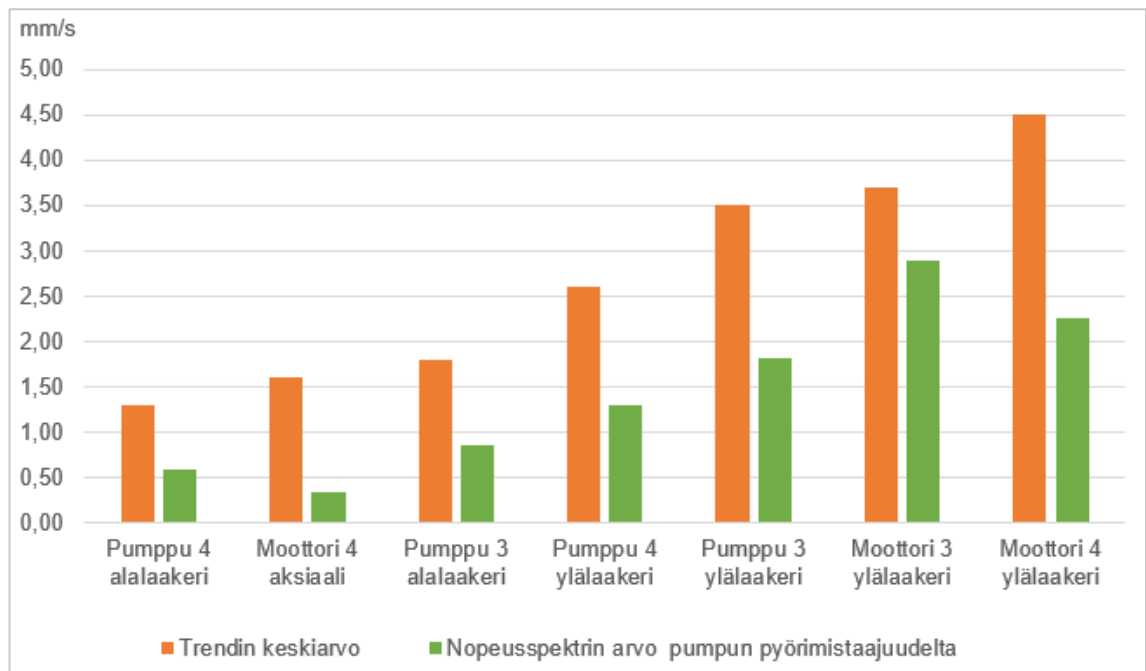
Kaikista mittauspisteistä arvioitiin silmämääräisesti kunkin värähtelytason trendiarvojen keskiarvo, joka merkittiin kyseisen mittauspisteen tason arvoksi.

Kaikkien mittauspisteiden edellä mainitulla tavalla määritetyt keskiarvot kullekin värähtelytasolle on esitetty kuviossa 4. Mittausarvoista valittiin silmämääräisesti värähtelytrendin ja pumpun käyntitiedon perusteella arvot, jotka sijoituivat pumpun tasaisen ajon ajalle ja jätettiin tarkastelun ulkopuolelle pumppujen käynnistymisen ja alasajon aikaiset värähtelyt SFS-ISO 10816-5 (2000, 10) -standardissa esitetyn ohjeen mukaisesti.



KUVIO 4. Värähtelyn arvot kaikilta mittauksilta eri värähtelytasojen keskiarvoina

Edellä mainittujen tasojen keskiarvojen lisäksi tutkittiin, eroavatko tason 4 trendin keskiarvot merkittävästi pumpun pyörimisnopeuden taajuudella havaituista nopeusspektrin arvosta. Molemmat arvot on esitetty kuviossa 5. Trendin keskiarvot nousivat 0,7–2,3 mm/s pyörimisnopeuden taajuudelta mitattuja arvoja korkeammiksi.

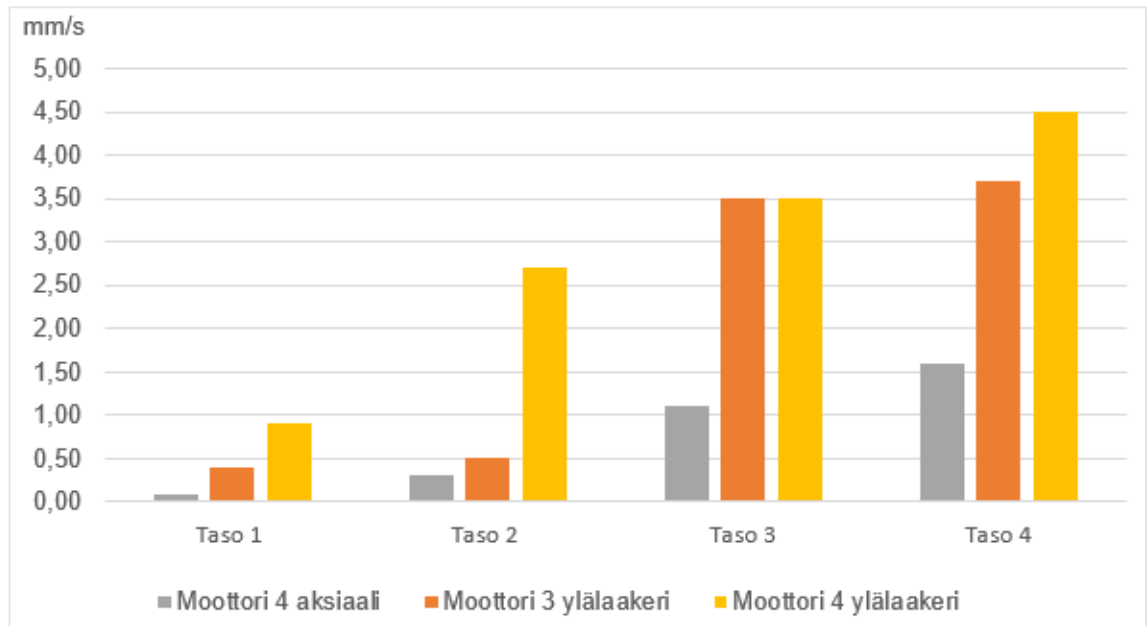


KUVIO 5. Trendin keskiarvot ja pumpun pyörimistaajuuden amplitudit nopeusspektristä

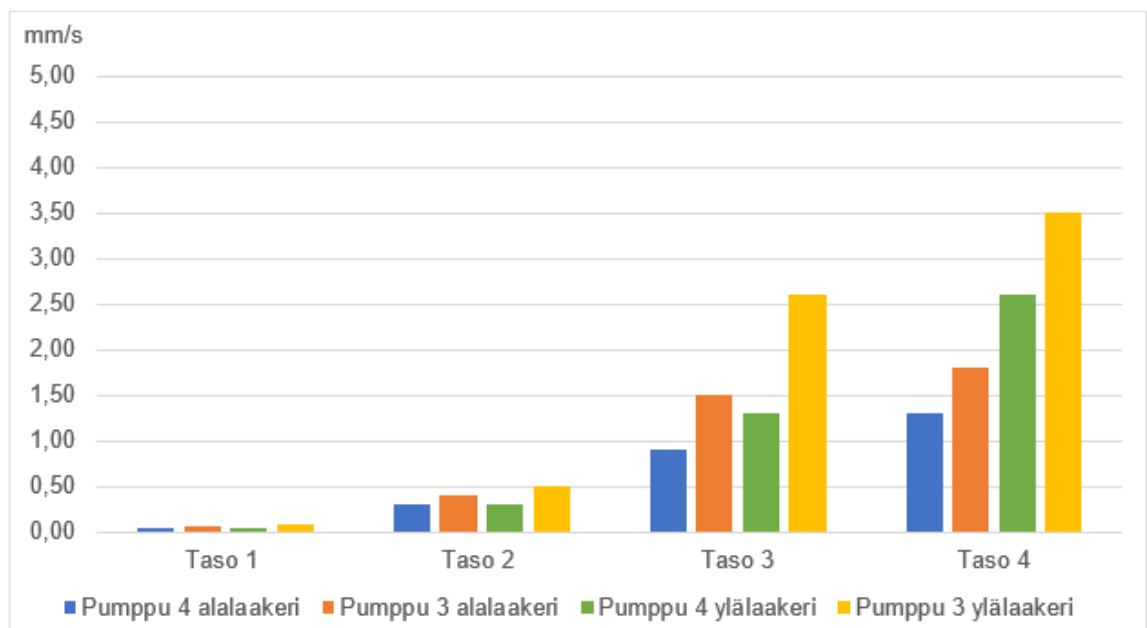
## 6.2. Värähtelytasojen erot pumpuilla ja moottoreilla

Mitatut värähtelytasot olivat odotetusti hiukan korkeammat pumppujen moottoreilta kuin pumppujen laakereilta mitattuna (KUVIOT 6 ja 7). Pumpuilta mitatut värähtelyt olivat tasolla 4 välillä 1,3–3,5 mm/s RMS ja moottoreilla 1,5–4,5 mm/s RMS. Pumpun 4 värähtelyt olivat sekä pumpun että moottorin laakereilta mitattuna pumpun 3 vastaavien laakereiden arvoja korkeammat.





KUVIO 6. Värähtelyarvot moottoreilla eri värähtelytasoilla



KUVIO 7. Värähtelyarvot pumpuilla eri värähtelytasoilla

Värähtelytasoilla 1 ja 2 pumpun 4 moottorilta mitatut värähtelyt olivat suuremmat kuin pumpun 3 moottorilta mitatut, mutta tasoilla 3 ja 4 pumppujen ollessa käynnissä erot tasaantuivat. Aksiaalinen mittaus pumpun 4 moottorin alalaakerin kohdalta antoi selkeästi matalampia arvoja kuin molempien pumppujen moottoreiden ylälaakereiden mittaukset.

### 6.3. Värähtelytasojen vertailu referensseihin

Testiä varten pumpuille 3 ja 4 asennetuilta langattomilta värähtelyantureilta saatuja värähtelyarvoja verrattiin pumppujen 1 ja 2 rikkipesureiden automaatiojärjestelmään kytkettyjen olemassa olevien värähtelyantureiden mittaamiin arvoihin, pumppujen 3 ja 4 testijaksoa edeltäneisiin värähtelyarvoihin sekä ISO 10816-7 (2017, 16) -standardissa määriteltyihin värähtelyn raja-arvoihin.

Pumppujen 1 ja 2 värähtelyarvot olivat testin aikana välillä 0,1–1,3 mm/s (LIITE 14). Huomionarvoista mitatuissa arvoissa on, että pumppu 2 ei ollut testin aikana lainkaan käynnissä ja pumppu 1 oli suurimman osan ajasta käynnissä, mutta molemmilla pumpuilla on hyvin samansuuntaiset värähtelyt. Pumpulla 2 havaittiin jopa pumppua 1 korkeammat värähtelyarvot tilanteissa, joissa pumppu 1 oli pois käynnistä ja pumput 3 ja 4 käynnissä. Mitatut arvot viittaavat siihen, että merkittävä osa pumpuilla esiintyvistä värähtelyistä on peräisin pumpun ulkopuolelta.

Pumpuille 3 ja 4 asennetuilta langattomilta värähtelyantureilta saatuja trendiarvoja verrattiin myös samojen pumppujen savukaasupesureiden automaatiojärjestelmään kytkettyjen, normaalisti käytössä olevien värähtelyantureiden mittaamiin arvoihin ajanjaksolla, jolloin laiva seilasi saman satamien välin (Bremerhaven – Århus) kuin testin aikana, mutta toiseen suuntaan ja normaalit anturit kytkettyinä välillä 15.-20.4.2022. Värähtelyn arvot pumpuilla 3 ja 4 olivat mainitulla ajanjaksolla välillä 0,1–1,8 mm/s, eli selvästi testijakson aikana langattomilla antureilla mitattuja värähtelyarvoja matalammat.

Testijakson aikana langattomilta antureilta pumpuista 3 ja 4 saatuja värähtelyn trendin nopeuden RMS-arvoja verrattiin myös laakereiden kunnon määrittelyssä käytettävien ISO-standardien ilmoittamiin arvoihin.

ISO 10816-7 (2017) -standardissa määriteltyihin värähtelyn raja-arvoihin (TAULUKKO 1) verrattuna testijakson aikana mitatut arvot jäivät yksittäisiä, moottoreiden ylälaakereilta mitattuja hetkellisesti korkeampia arvoja lukuun ottamatta selvästi alle kyseiselle pumpputyypille (kategoria II, teho yli 200 kW)

määriteltyjen maksimi raja-arvojen, jotka ovat uudelle laitteelle 4,2 mm/s ja pitkäaikaiseen ajoon sallitulla operointialueella 6,1 mm/s. Voidaan kuitenkin todeta, että standardin esittämä värähtelyarvo 25 prosenttia pumpun käynnin aikaisesta arvosta pumpun ollessa pois päältä ylittyy kaikissa mittauspisteissä tasolla 4.

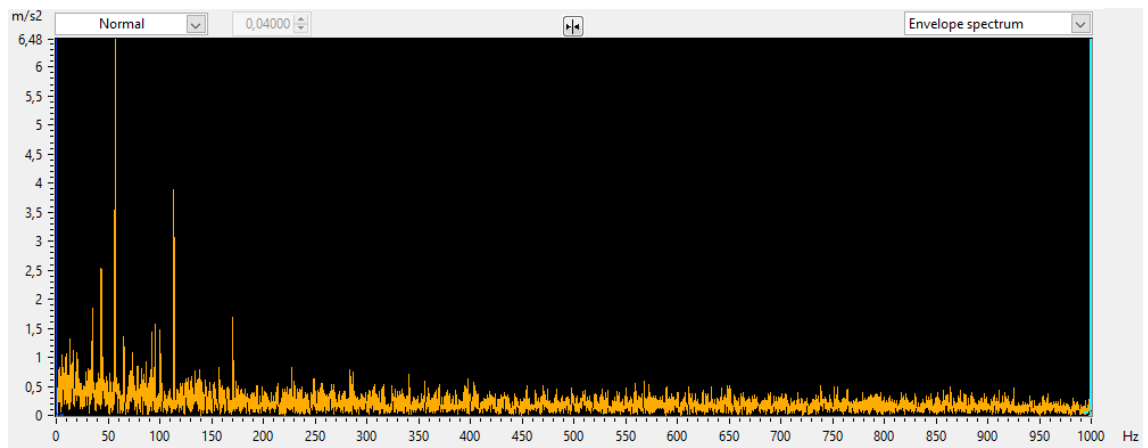
#### **6.4. Laakereiden kunnan arviointi**

Pumppujen 3 ja 4 pumpun ja moottoreiden laakereiden kunnosta tehtiin arvio perustuen tunnettujen laakereiden vikataajuuksien esiintymiseen verhoikärspektrissä. Laakerityyppikohtaiset vikataajuudet saatiin Valmet Analysis Workbench -ohjelman tietokannasta, missä oma vikataajuus on määritelty kaikille laakerin osille: ulko- ja sisäkehälle, vierintäelimille ja pitimelle.

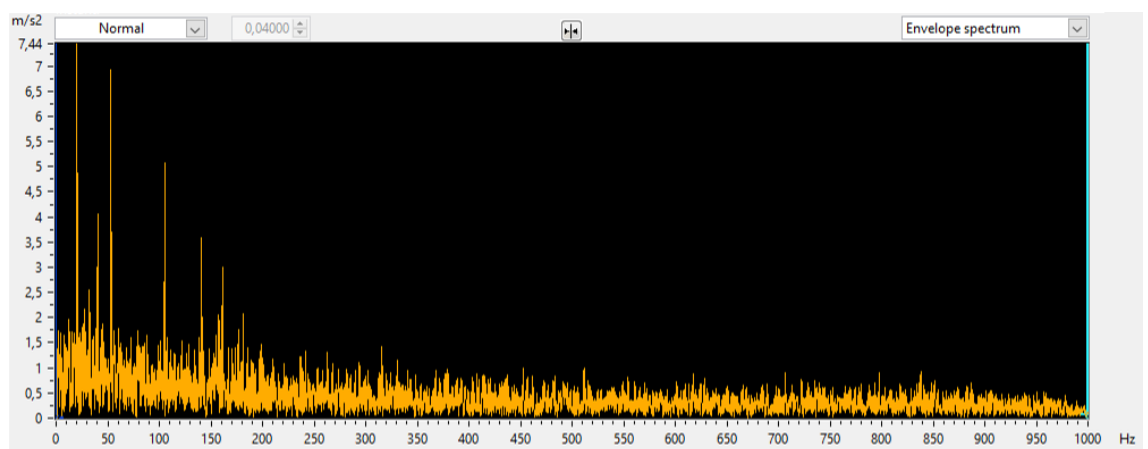
Ensiksi tutkittiin kunkin mittauksen osalta kolmesta mittaustapahtumasta korkeimman värähtelytason nopeusspektristä, löytyikö yli 500 hertsin taajuudella vikataajuuksille osuvia värähtelypiikkejä. Toiseksi tarkasteltiin kolmen mittauksen verhoikärspektristä, löytyikö vikataajuuksille osuvia värähtelypiikkejä.

Nopeusspektreistä tehdyn tarkastelun perusteella selkeitä laakerivikoja ei havaittu. Verhoikärspektristä sen sijaan löytyi laakerin ulkokehän vikataajuuksilta molempien pumppujen ylälaakereilta värähtelypiikkejä, jotka voivat viitata alkaviin laakerivaurioihin (Ilonen 29.4.2022).

Pumpun 4 ylälaakerilta ulkokehävikataajuuden arvojen kolmen arvon keskiarvo oli 6,6 m/s<sup>2</sup> (KUVA 10) ja pumpun 3 ylälaakerilta ulkokehävikataajuuden arvojen kolmen arvon keskiarvo oli 7,1 m/s<sup>2</sup> (KUVA 11).



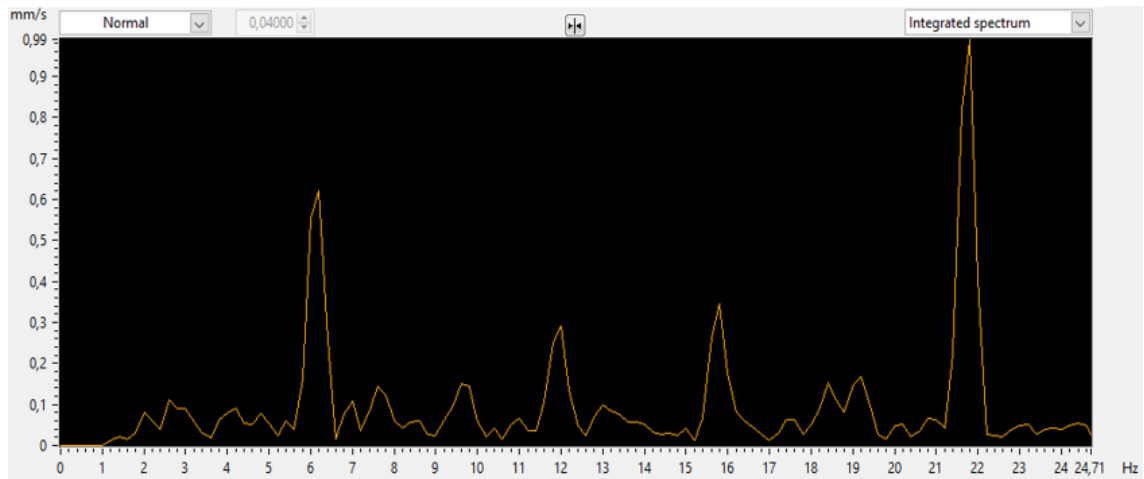
KUVA 10. Pumpun 4 ylälaakerin verhokäyräspektri



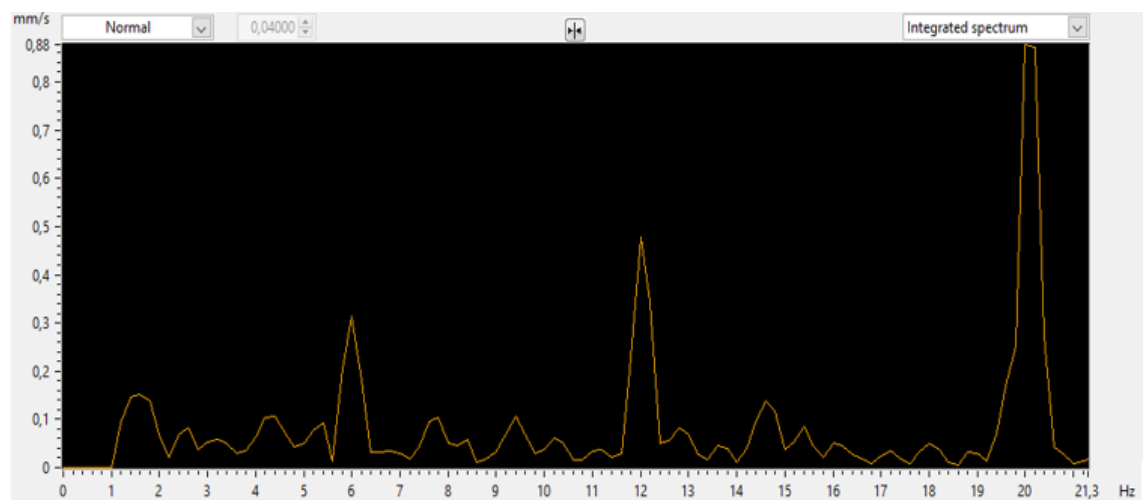
KUVA 11. Pumpun 3 ylälaakerin verhokäyräspektri

### 6.5. Matalat ja korkeat taajuudet

Jokaisessa mittauspisteessä oli havaittavissa toistuvia värähtelypiikkejä matalilla, alle pumpun pyörimisnopeuden taajuuksille (KUVAT 12 ja 13). Tyypillisesti värähtelypiikit osuivat 2, 6 ja 12 hertsin taajuuksille ja olivat arvoltaan kaikilta pumpun laakereilta mitattuna alle 1 mm/s ja moottoreilta mitattuna välillä 0,2–4 mm/s. Piikkien taajuus ja amplitudi kuitenkin vaihtelivat aineistossa huomattavan paljon.

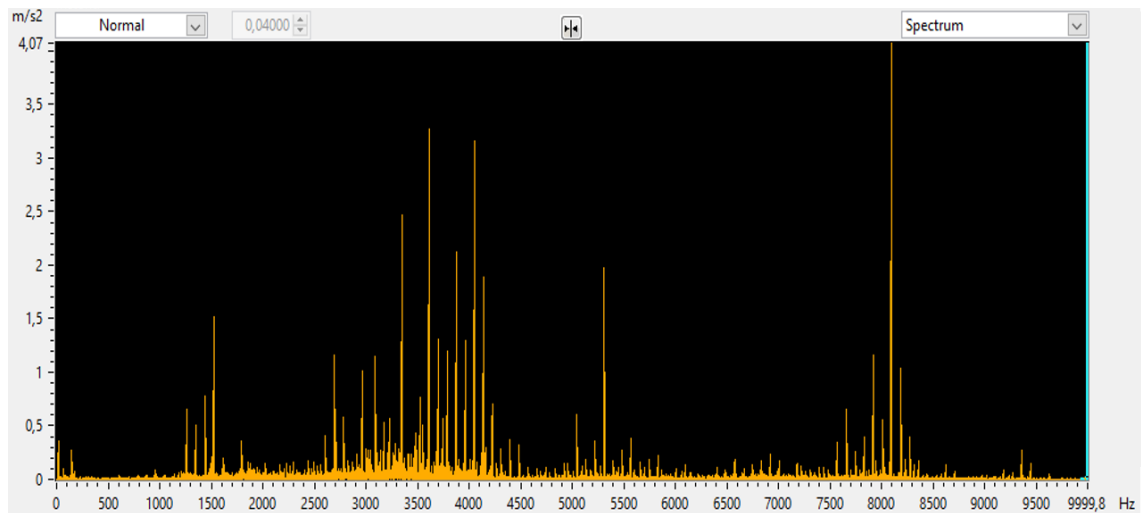


KUVA 12. Pumpun 4 ylälaakerilta mitattuja värähtelypiikkejä matalilla taajuuksilla



KUVA 13. Pumpun 3 alalaakerilta mitattuja värähtelypiikkejä matalilla taajuuksilla

Värähtelyjen esiintymistä korkeilla taajuuksilla tutkittiin selvittämällä, esiintyykö selkeitä tai toistuvia värähtelypiikkejä yli 1000 hertsin taajuusalueella. Yhdessäkään mittauskohteessa ei esiintynyt amplitudiltaan suuria värähtelypiikkejä korkeilla taajuuksilla, mutta pumpun 3 moottorin ylälaakerilta mitattiin selkeästi muilta mittapisteistä suurempia, säännöllisesti noin 80 hertsin välein toistuvia värähtelyn kiihtyvyyssarvoja taajuusalueilla 1500, 3000–4000 ja 8100 hertsiä (KUVA 14). Tämän värähtelyn arvioitiin todennäköisesti olevan peräsin taajuusmuuttajalta.



KUVA 14. Pumpun 3 moottorin ylälaakerilta mitattuja korkeita taajuuksia

## 6.6. Aksiaalisuuntaiset värähtelyt

Pumpulla 4 moottorin laipassa moottorin alemman laakerin kohdalla sijainneen aksiaalisen mittauksen värähtelytasot seurasivat samalta pumpulta muista kohdista mitattuja värähtelyarvoja. Nopeusspektrissä näkyivät samat värähtelytasojen muutokset ja mitatun värähtelyn maksimiarvo oli 2,41 mm/s RMS. Aksiaalisessa mittauksessa pumpun käyntinopeudella esiintyvät värähtelyt eivät olleet yhtä korkealla tasolla kuin pumpun laakereiden säteen suuntaisissa mittauksissa, mutta sama havainto tehtiin myös muilta pumppujen moottoreilta tehdyillä mittauksilla. Näin ollen aksiaalinen mittaus ei tuonut merkittävää lisätietoa värähtelyistä pumpuilla.

## 6.7. Muut havainnot

Määriteltyjen analyysien ohella havaittiin värähtelydatasta, että mitatut kiihtyvyydet olivat osassa mittauspisteistä huomattavasti oletettua korkeampia. Testiin valittujen antureiden herkkyys soveltui vielä mittausalueelle, mutta mitattujen arvojen perustella epäherkempi kiihtyvyyssanturi voisi soveltua rahtilaivan merivesipumppujen kiihtyvyyksien mittaamiseen paremmin, jotta mittauksen luotettavuus pysyy hyvänä myös kiihtyvyyssarvojen edelleen kasvaessa.

Mitä tulee varsinaisen pysyvän kunnonvalvontajärjestelmän suunnitteluun, testitulosten perusteella olisi tärkeää huomioida laitteiston valinnassa laivaympäristön värähtelyn vaikutus järjestelmän fyysisiin komponentteihin, esimerkiksi varmistamalla komponenttien, kuten prosessiasemien ja IO-korttien värähtelynkestävyys ja lisäämällä vaimennusta automaatiokaapin tuentaan.

## 7 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten rahtilaivojen savukaasupesureissa käytettävien merivesipumppujen mekaanista kuntoa pystyttäisiin seuraamaan tavalla, joka mahdollistaisi huoltotoimenpiteiden kohdentamisen ja ajoittamisen vaurioiden välttämiseksi. Toiseksi selvitettiin, soveltuuko Valmet DNA -kunnonvalvontaratkaisu tähän tarkoitukseen. Kolmanneksi tarkoituksena oli tuottaa tietoa rahtilaiva -asiakkaille soveltuvan kunnonvalvontakonseptin suunnittelua varten.

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen vastattiin opinnäytetyössä sekä teoreettisen kirjallisuuskatsauksen että kenttätestissä saatujen tulosten perusteella. Tutkimuksen mukaan värähtelyyn perustuva kunnonvalvonta on yleisesti käytetty menetelmä hankkia, käsitellä ja tulkita monien laitteiden, kuten pumppujen, värähtelydataa ja tehdä sen perusteella päätelmiä laitteiden mekaanisesta kunnosta. Kunnonvalvontajärjestelmän avulla on mahdollista havaita muutokset laitteiden tilassa sekä analysoida syitä muutoksille. Saavutetun tiedon perusteella voidaan määritellä oikea-aikaiset huoltotoimenpiteet, ja jatkuvilla mittauksilla edelleen havainnoida toimenpiteiden vaikutuksia laitteissa. Tutkimuksen aikana esiin nousseita erityispiirteitä rahtilaivan merivesipumpuille sovellettavan kunnonvalvontajärjestelmän suunnittelua varten on esitetty tuloksia käsittelevässä kappaleessa.

Toiseen tutkimuskysymykseen vastattiin opinnäytetyössä tehdyn kenttätestin sekä Valmet DNA -kunnonvalvontajärjestelmään perehtymisen perusteella. Voitiin todeta, että Valmet DNA -kunnonvalvontaratkaisun avulla on mahdollista kerätä ja analysoida riittävän tarkasti värähtelydataa, jotta voidaan tehdä päätelmiä merivesipumppujen ja etenkin niiden laakereiden kunnosta. Aineiston käsittelyn Valmetin analyysiohjelmalla ja mitattujen nopeuden RMS-arvojen vertaamisen standardeissa esitettyihin ohjearvoihin todettiin olevan suhteellisen helposti tehtävissä, mutta aineiston tarkempi analysointi ja vikojen luotettava diagnosointi vaativat jonkin verran kokemusta. Tästä johtuen todettiin, että Valmet DNA -kunnonvalvontaratkaisu soveltuu rahtilaivan merivesipumppujen



kunnonvalvontaan, kun ratkaisuun sisällytetään asiantuntijapalvelua niille asiakkaille, joilla ei tarvittavaa osaamista ole.

Kenttätestin rajoituksessa yhteen ajallisesti lyhyeen jaksoon ja ollessa irrallinen laivan ja savukaasupesurin automaatiojärjestelmistä ja siten ajon aikaisista parametreista, on tulosten tulkinnassa huomioitava, että yksittäisestä mittauksesta ei saada tietoa muutoksesta laitteen mekaanisessa kunnossa vertailuaineiston puuttuessa.

Jatkuvasti mittaavalla, automaatiojärjestelmään kytketyllä kunnonvalvontajärjestelmällä kerätty aineisto mahdollistaisi kunnonvalvonnassa keskeisen tärkeän samassa ajotilanteessa tehtyjen mittausten vertailun kunnossa tapahtuvien muutosten havaitsemiseksi.

Tutkimuksen validiutta, eli sitä, mittaako tutkimus sitä, mitä oli tarkoituskin mitata, tarkasteltaessa on huomioitava joitakin testimittauksia koskevia teknisiä rajoitteita. Ensinnäkin mittaukset tehtiin yhdellä anturilla mitattavaa laakeria kohti ilman ennakkoselvitystä siitä, mikä mittaussuunta antaisi korkeimmat värähtelyn amplitudit. Tästä syystä ei voida olla varmoja, että valitussa mittaussuunnassa on saatu talteen värähtelyn maksimitaso. Toisaalta tutkimuksessa hyödynnettiin pumppuvalmistajan määrittelemää värähtelyn mittauspistettä, eivätkä aksiaalisuuntaisen mittauksen tulokset merkittävästi poikenneet valittujen säteen suuntaisten mittausten arvoista, minkä perusteella voidaan arvioida tehtyjen mittausten edustavan riittävällä tarkkuudella mittaushetkillä esiintyviä maksimivärähtelyjä.

Toiseksi, riittävän pitkän otoksen saamiseksi akkukäyttöisillä värähtelyantureilla yksittäisen mittaustapahtuman kestoksi määriteltiin 5 sekuntia ja yksittäisten mittaustapahtumien väliksi 300 sekuntia. Lyhyt näytteenottoaika ei vastaa ABS-luokituslaitoksen antamaa suositusta näytteenottoajasta, joka poikkeaa kuitenkin merkittävästi kunnonvalvonnassa tavallisesti sovellettavista näytteenottoajoista. Useiden minuuttien väli mittauksissa saattaa lisäksi aiheuttaa hetkellisten värähtelyhuippujen jäämisen näkymättömiin, mistä syystä värähtelyn maksimitasot erityisesti muuttuvissa ajotilanteissa rajattiin tarkemman tarkastelun ulkopuolelle. Pumpun kunnonvalvontaa ajatellen hetkellisten

maksimiarvojen tallentaminen ei sinänsä ole merkityksellistä, koska kunnonvalvonta tähtää pitkän ajan värähtelytrendien seurantaan, mutta perusteellista esitystä laivalla havaittavista värähtelyn maksimiarvoista ei voida tehdyn mittauksen perusteella antaa.

Tutkimuksen reliabiliudella tarkoitetaan mittaustulosten toistettavuutta, eli mittauksen kykyä antaa ei-sattumanvaraisia tuloksia (Hirsjärvi, Remes & Sajavaara 1997, 231). Arvioitaessa tehdyn tutkimuksen toistettavuutta, voidaan todeta, että tutkimuksessa käytettyjen antureiden mittaamien arvojen pohjalta voidaan havaita niiden olevan linjassa aikaisemmin tavallisesti käytössä olevilla antureilla samoilta pumpuilta ja yhtä aikaa rinnakkaisilta pumpuilta mitattuihin arvoihin. Tällä perusteella itse mittaukseen ei sisälly merkittäviä virheitä. Moottoreilta tehtyjen mittausten osalta vertailu rinnakkaiseen tietoon ei ole tiedon puuttuessa mahdollista.

Mitä tulee tutkimuksen toistettavuuteen, on huomioitava testijakson rajallisuus suhteessa tutkittujen pumppujen kaikkiin mahdollisiin käyttöolosuhteisiin ja tilanteisiin. Lyhyen testijakson aikana laivan lastin määrä, syväys ja siitä johtuva paine pumpuilla, meriveden lämpötila, sääolosuhteet ja konekuormat pysyivät suhteellisen samanlaisena, ottaen huomioon, että laivan normaaliin operointiin kuuluvat jatkuvat muutokset kaikissa edellä mainituissa tekijöissä laivan seilattaessa eri maanosien välillä. Jotta voitaisiin varmistua, että kerätty aineisto edustaa pumpuilla esiintyviä värähtelyjä, olisi mittaus toistettava erilaisissa olosuhteissa ja tehtävä havainnot tulosten vastaavuudesta.

Tutkimuksen ja suoritettujen värähtelyanalyysien tuloksista voidaan sanoa, että varsinaiset värähtelyn nopeuden RMS-arvot olivat odotetulla tasolla ja odotetusti sitä suuremmat, mitä kauempana pumpun tuennasta mittauspiste sijaitsi. Laakereiden vikataajuuksien tarkastelusta saadun tiedon perusteella etenkin pumppujen ylälaakereiden kuntoa seurata jatkossa.

Pumpun ulkopuolelta pumpulle ja moottorille välittyvien värähtelyjen havaittiin olevan mitattavissa kaikista valituista mittauspisteistä. Pumppujen värähtelytason ollessa yleisesti ISO-standardin raja-arvoihin nähden matalalla, pumppujen ulkopuolelta välittyvä värähtely nousee niin mittauksissa kuin

pumppujen mekaanisen kulumisen syynäkin keskeiseen rooliin. Yleisesti ottaen on kyseenalaista, onko standardin ohjearvon (25 prosenttia käynnin aikaisesta värähtelytasosta pumpun ollessa pois käynnistä) alittaminen realistista laivaympäristössä.

Laivalta mitatun värähtelyn lähteitä tutkittaessa on tärkeää määritellä herätteiden taajuudet ja tutkia niiden suhdetta pääkoneen tai -koneiden pyörintänopeuden mukaiseen taajuuteen. Pääkoneiden pyörintänopeustieto kuitenkin puuttui tutkimusta varten savukaasupesurin automaatiojärjestelmästä ladatusta datasta, eikä sitä toisaalta olisi voitu suoraan yhdistää testimittauksiin, koska värähtelymittaus ei ollut suoraan kytkettynä savukaasupesurin automaatiojärjestelmään. Kaikissa mittauspisteissä havaittujen, pumpun pyörintänopeutta matalampien taajuuksien esiintymisestä sekä lähdekirjallisuuden perusteella pääteltiin, että laivan suurikokoisilta moottoreilta välittyvät värähtelyt ovat todennäköisesti merkittävässä osassa merivesipumpun mekaanisten osien kunnossa tapahtuvissa muutoksissa. Tarkempi ulkopuolisten värähtelyn lähteiden tutkinta olisi tärkeä jatkotutkimuksen aihe.

Toinen mahdollinen jatkotutkimuksen aihe olisi selvittää, pystytäänkö vastaavien mittausten tai jatkuvasti mittaavan kunnonvalvontajärjestelmän avulla saamaan luotettavaa tietoa pumpun ja moottorin laakereiden voitelun tilasta. Laakereiden voiteluominaisuuksien muuttuminen voi johtaa hyvin nopeasti muutoksiin laitteen värähtelyspektrissä, ja siksi voiteluun viittaavien vikataajuuksien seurannalla voitaisiin tukea oikea-aikaisia huoltotoimenpiteitä. Ilman seuranta laakereiden vaihto tai uudelleenvoitelu olla vaikeaa ajoittaa oikein, koska voiteluominaisuuksien heikkenemiseen odotettua nopeammin vaikuttavat esimerkiksi lämpötila ja muut ympäristötekijät. Toisaalta myös liiallinen voitelu voi aiheuttaa ylikuumenemisongelmia.

Ylipäätään tehdyn tutkimuksen perusteella on selvää, että pitkäaikainen kunnonvalvonta on keskeisin keino saada tietoa laitteiden kunnosta ja siinä tapahtuvista muutoksista niin, että käyttäjällä on mahdollisuus suunnitella huoltotoimenpiteet hyvissä ajoin etukäteen ja pystyä estämään äkilliset vauriot. Vaikka monissa tapauksissa värähtelyn kokonaistason tarkastelu antaa riittävästi tietoa laitteen yleisestä kunnosta tietyllä hetkellä, on mahdollisten vikojen

diagnosointi ja siihen perustuva tarvittavien huoltotoimenpiteiden suunnittelu tällaisten tarkastelujen perusteella mahdotonta. Laitteen käyntiin liittyvien parametrien muuttuessa eri ajanhetkillä tehtyjen mittausten vertailu ei ole mielekästä, jolloin luotettavaa tietoa muutoksista laitteen mekaanisessa kunnossa ei aikatazon mittausdatasta saada.

Kunnonvalvontajärjestelmä on laitteen tai laitoksen omistajalta sijoitus luotettavaan operointiin. Järjestelmän hankinnan ja käytön kustannusten tulee olla matalammat kuin mahdollisista laiterikoista aiheutuneet kustannukset, mistä syystä ensisijaisesti operoinnin kannalta kriittiset laitteet sekä laitteet, joiden huoltaminen on kallista, hankalaa tai kestävä kauan on perusteltua sisällyttää kunnonvalvontajärjestelmään. Lisäksi järjestelmän käyttöönottoa puoltavat ja kustannuksia tasapainottavat pidemmistä huoltoväleistä aiheutuvat säästöt. Laivoilla ja laitoksissa, missä Valmet DNA -kunnonvalvontajärjestelmä on osana olemassa olevaa automaatiojärjestelmää perustelut järjestelmän käyttöönotolle ovat sekä teknisesti että taloudellisesti vahvat.

Opinnäytetyöprosessi oli kokonaisuutena onnistunut, vaikka haasteitakin tuli vastaan. Alkuperäisen suunnitelman mukaan opinnäytetyön puitteissa oli tarkoitus yhdessä DNA-kunnonvalvontaratkaisun tuotetiimin kanssa suunnitella ja asentaa yhdelle rahtilaivalle automaatiojärjestelmään kytketty, pysyvä kunnonvalvontajärjestelmä neljälle merivesipumpulle ja analysoida järjestelmästä lyhyen testijakson aikana saatua värähtelydataa sisarlaivoille myytävän kunnonvalvontaratkaisun tarkemman määrittelyn tueksi.

Myyntiprosessin ja osatilausten viivästyessä opinnäytetyön suunnitelmaa muutettiin, jotta työ oli mahdollista tehdä suunnitellussa aikataulussa. Yhteistyössä tilaajan kanssa päätettiin hankkia tietoa laivaympäristössä sijaitsevien merivesipumppujen värähtelyistä Valmet Maintenance Pad kannettavalla värähtelymittalaitteella ja siihen kuuluvilla langattomilla antureilla, koska tällä tavalla tuloksia oli mahdollista saada nopeammin ja käytettävät anturityypit ja analysointityökalut olivat käytännössä samat kuin pysyvän järjestelmän tapauksessa. Alkuperäisestä suunnitelmasta johtuen opinnäytetyön teoriaosuus keskittyy suurelta osin pysyvän kunnonvalvontajärjestelmän

suunnittelussa huomioitaviin asioihin, jotka ovat kuitenkin pääpiirteiltään samat kuin kannettavilla laitteilla toteutetussa testissä.

Alkuperäiseen suunnitelmaan sisältyi lisäksi järjestelmän loppukäyttäjän värähtelyanalyysin tekemistä koskevien valmiuksien kartoitus, joka kuitenkin rajattiin pois lopullisesta työstä työn laajuuden pitämiseksi opinnäytetyöhön soveltuvana ja käytännössä myös siksi, että loppukäyttäjän kokemuksia järjestelmän käytöstä ei toteutetun kenttätestin puitteissa saatu.

Opinnäytetyön tekijälle työn tärkeä tavoite oli tutustua värähtelyyn perustuvaan kunnonvalvontaan ja kunnonvalvontajärjestelmän käytännön ratkaisuihin sekä mittauskohteessa että datan analysoinnissa kokonaiskuvan saamiseksi. Tämä tavoite toteutui työssä hyvin, koska työtä varten tutustuttiin laajasti kunnonvalvontaa käsittelevään kirjallisuuteen, kenttätesti päästiin haasteista huolimatta toteuttamaan ja lisäksi mittausten ja analyysin suunnitteluvaiheessa sekä työn lopullisen muotoilun yhteydessä käytiin useita oppimista tukevia keskusteluja alan asiantuntijoiden kanssa. Opinnäytetyöprosessia voidaan pitää hyvin onnistuneena.

## LÄHTEET

ABS - American Bureau of Shipping. 2021. Guidance notes on ship vibration. Viitattu 15.3.2022. [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/conventional\\_ocean\\_service/147\\_Ship\\_Vibration\\_2021/ship-vibration-gn-may21.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/conventional_ocean_service/147_Ship_Vibration_2021/ship-vibration-gn-may21.pdf)

Hirsjärvi S., Remes, P. & Sajavaara, P. 1997 Tutki ja kirjoita. 15. uud. painos. Hämeenlinna. Kirjayhtymä Oy.

Ilonen J. 2022. Tuotepäällikkö. Haastattelu 29.4.2022. Valmet Automation Oy.

Karnovsky, I. A. & Lebed, E. 2016. Theory of Vibration Protection. E-kirja. 1. painos. Sveitsi. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28020-2>

KSB Finland. n.d. Pumppuja laivojen pakokaasujen puhdistusjärjestelmiin. Verkkosivu. Viitattu 12.5.2022. <https://www.ksb.com/fi-fi/yritys/uutiset/pumppuja-laivojen-pakokaasujen-puhdistusjaerjestelmiin>

Mobley, R. K. 1999. Vibration Fundamentals. E-kirja. 1. painos. Iso-Britannia. Elsevier Science & Technology. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7150-7.X5035-6>

Náprstek, J., Horáček, J., Okrouhlík, M., Marvalová, B., Verhulst, F., Sawicki, J.T. (Toim.), Vibration Problems ICOVP 2011. Alankomaat. Springer Proceedings in Physics, 643–648. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2069-5>

Pennacchi, P., Borghesani, P., Chatterton, S., Ricci, R. 2011. Bearing fault diagnostics using the spectral pattern recognition. 1. painos. Teoksessa Náprstek, J., Horáček, J., Okrouhlík, M., Marvalová, B., Verhulst, F., Sawicki, J.T. (Toim.). Vibration problems ICOVP 2011. Alankomaat. Springer Proceedings in Physics, 643–648. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2069-5\\_86](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2069-5_86)

Randall, R. B. 2010. Vibration-based condition monitoring: Industrial, aerospace, and automotive applications. E-kirja. 1. painos. Iso-Britannia. Wiley. Vaatii käyttöoikeuden. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=645002>

Schmitz, T. L. & Smith, K. S. 2012. Mechanical Vibrations - Modeling and Measurement. Springer International Publishing. Vaatii käyttöoikeuden. <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/978-1-4614-0460-6>

SFS-ISO 10816-1. 1995. Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 1: general guidelines. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.

SFS-ISO 10816-5. 2000. Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 5: machine sets in hydraulic power generating and pumping plants. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.

SFS-ISO 10816-7. 2017. Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 7: Rotodynamic pumps for industrial applications, including measurements on rotating shafts. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.

SFS-ISO 13373-3. 2015. Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration condition monitoring. Part 3: Guidelines for vibration diagnosis. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.

SFS-ISO 20283-5. 2017. Mechanical vibration. Measurement of vibration on ships. Part 5: Guidelines for measurement, evaluation and reporting of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.

Shengcai L. 2000. Cavitation Of Hydraulic Machinery. Lontoo. Imperial College Press. Vaatii käyttöoikeuden. <https://search-ebSCOhost-com.libproxy.tuni.fi/login.aspx?direct=true&AuthType=cookie,ip,uid&db=e000xw&AN=516699&site=ehost-live&scope=site>

Valmet 2021. Valmet DNA Machine Monitoring DMM - Kunnonvalvonnan perusteet. Koulutusmateriaali.

Wu, Y., Li, S., Liu, S., Dou, H.-S., Qian, Z., 2013. Vibration-Based Condition Monitoring, in: Wu, Y., Li, S., Liu, S., Dou, H.-S., Qian, Z. (Toim.), Vibration of Hydraulic Machinery, Mechanisms and Machine Science. Springer. Netherlands, Dordrecht. 431–477. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6422-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6422-4_11)

Zong, Z., Lam, K.Y., 2000. Hydrodynamic influence on ship-hull vibration close to water bottom. 12. Journal of Engineering Mathematics 37. 363–374. Kluwer Academic Publishers. <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1023/A:1004601227471>

## LIITTEET

Liite 1. Esimerkki - laakereiden vaihdon kustannukset

Vaihtoväli	Vuosi 1	Vuosi 2	Vuosi 3	Vuosi 4	Vuosi 5	Vuosi 6	Vuosi 7	Vuosi 8	Vuosi 9	Vuosi 10	Summa / pumppu	Summa / laiiva	Summa / 20 laiivaa	Säästö vuositaitseen vaihtoon verrattuna
1 vuosi	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	50 000	200 000	4 000 000	-
2 vuotta		5000		5000		5000		5000		5000	25 000	100 000	2 000 000	50 %
3 vuotta			5000			5000			5000		15 000	60 000	1 200 000	70 %
4-5 vuotta				5000				5000			10 000	40 000	800 000	80 %
6-10 vuotta						5000					5 000	20 000	400 000	90 %



## Liite 2. WVS-100 -värähtelyanturin tekniset tiedot

## WVS-100 sensor specifications

<b>Dynamic, piezoelectric sensing element</b>	Sensing element design	Piezo-Ceramic
	Acceleration range	±20 g peak
	Amplitude nonlinearity	≤1 %
	Frequency range (±3 dB)	0.5 ... 10 000 Hz
	Overload limit (shock)	5000 g
<b>Dynamic, triaxial sensing element</b>	Sensing element design	MEMS
	Acceleration range	±16 g peak
	Frequency response	DC...-3 dB at sampling rate / 2
	Cross axis sensitivity, max.	±1 %
	Sensitivity change due to temperature	± 0.01 %/ °C
<b>Signal sampling</b>	Shock limit	10 000 g
	Sampling rate, piezosensor	max. 80 000 Hz
	Sampling rate, triaxial MEMS	max. 3200 Hz for each axis
	Signal length	max. 1 000 000 samples
	AD conversion accuracy, piezosensor	24 bits
	AD conversion accuracy, MEMS sensor	12 bits, 4 mg/LSB
<b>Radio communication</b>	Internal buffer memory	512 MB
	Communication protocol	IEEE 802.11 b/g/n
	Communication rate	max. 72.2 Mbps
<b>Electrical</b>	Security	WiFi security (802.11i) WEP, WPA/WPA2 (AES-CCMP and TKIP)
	Internal battery	rechargeable 3.6 VDC, 3100 mAh (Lithium-ion)
	Power consumption at continuous use	1 W
<b>Environmental</b>	Grounding	mounting base grounded
	Temperature range	-20...+60 °C
<b>Physical</b>	Protection class	IP66
	Weight	350 g (including battery)
	Case material	AISI 316 and PET-C
	Mounting	¼-28 UNF mounting thread

Lähde: Valmet Corporation, BR81586\_EN\_01, 3/2016

## Liite 3. WMM-100 -mittausyksikön tekniset tiedot

## WMM-100 sensor specifications

<b>IEPE sensor interface</b>	Constant current for IEPE sensor	2 mA
	Input voltage range	0...20 V
<b>Signal sampling</b>	Sampling rate, IEPE sensor	max. 80 000 Hz
	Signal length	max. 1 000 000 samples
	Internal buffer memory	512 MB
	AD conversion accuracy, IEPE sensor	24 bits
<b>Radio communication</b>	Communication protocol	IEEE 802.11 b/g/n
	Communication rate	max. 72.2 Mbps
	Security	WiFi security (802.11i) WEP, WPA/WPA2 (AES-CCMP and TKIP)
<b>Electrical</b>	Internal battery	rechargeable 3.6 VDC, 3100 mAh (Lithium-ion)
	Power consumption at continuous use	1 W
	Grounding	mounting base grounded
<b>Environmental</b>	Temperature range	-20...+60 °C
	Protection class	IP66
<b>Physical</b>	Weight	350 g (including battery)
	Case material	AISI 316 and PET-C
	Connector	Phoenix Contact M12 SPEEDCON (4-pin)

Lähde: Valmet Corporation, BR81588\_EN\_01, 3/2016

## Liite 4. RVT-105 -värähtelyanturin tekniset tiedot

**RVT-105 specifications**

<b>Dynamic</b>	Sensitivity, $\pm 10\%$ , 25 °C	100 mV/g
	Acceleration range	80 g peak
	Amplitude nonlinearity	1%
	Frequency response	
	$\pm 10\%$	1...5 000 Hz
	$\pm 3$ dB	0.7...10 000 Hz
	Resonance frequency, mounted, min.	22 kHz
	Transverse sensitivity, max.	5% of axial
Temperature response	$\pm 5\%$	
<b>Electrical</b>	Power requirement	
	Voltage source	18...30 VDC
	Bias current	2...10 mA
	Output impedance, max.	100 $\Omega$
	Bias output voltage	8...14 VDC
	Grounding	Case isolated, internally shielded
<b>Environmental</b>	Temperature range	-50...+120 °C
	Vibration limit	500 g
	Shock limit, min.	5 000 g
	Sealing	Hermetic
<b>Physical</b>	Sensing element design	PZT ceramic, shear
	Weight	145 g
	Case material	316L stainless steel
	Mounting	M6 captive screw
	Output connector	2 pin, MIL-C-5015 style
	Pin A	Signal/power
Pin B	Common	

Lähde: Valmet Corporation, BR81079\_EN\_01 04/2015

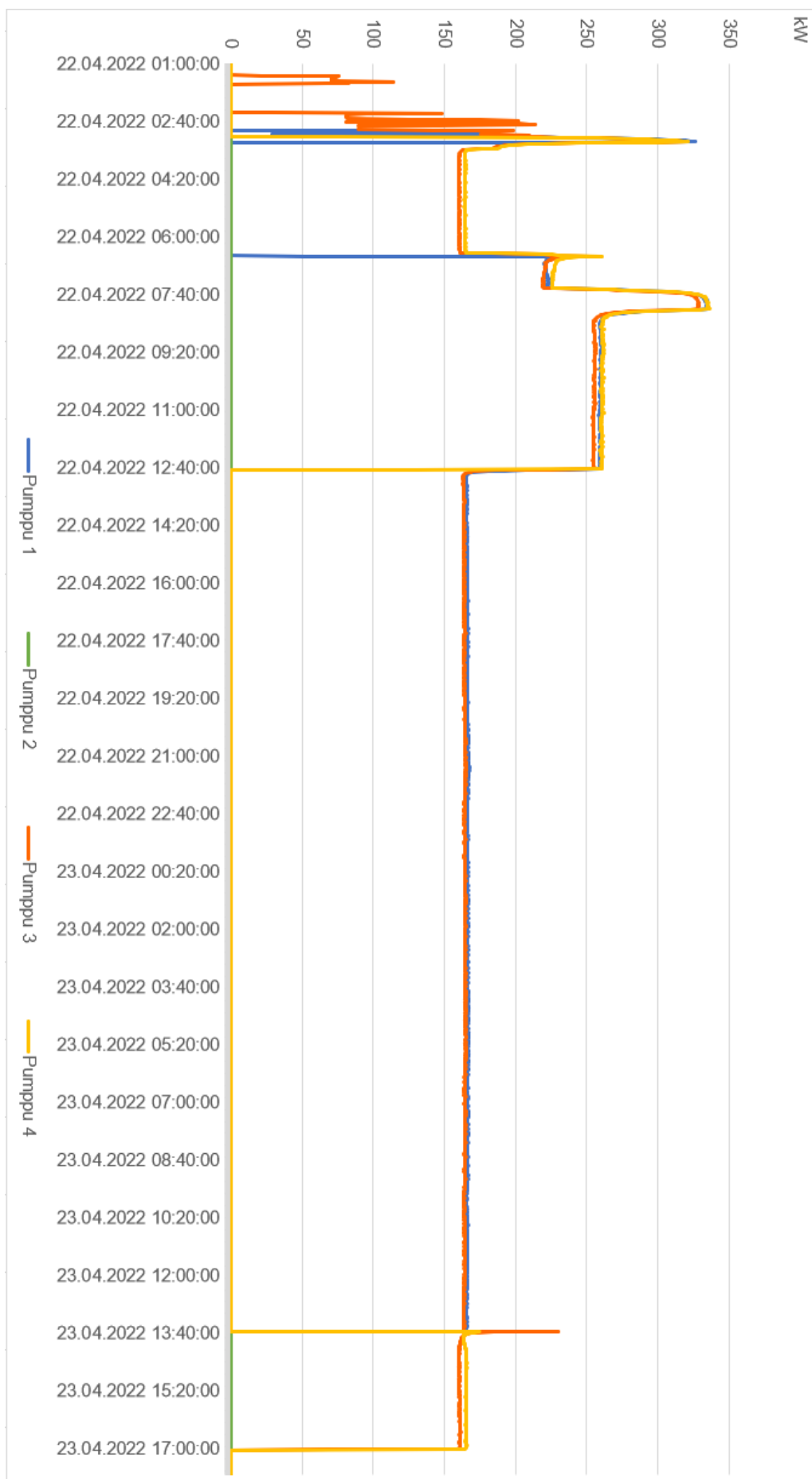
## Liite 5. RVT-120 -värähtelyanturin tekniset tiedot

**RVT-120/RVT-120M6 specifications**

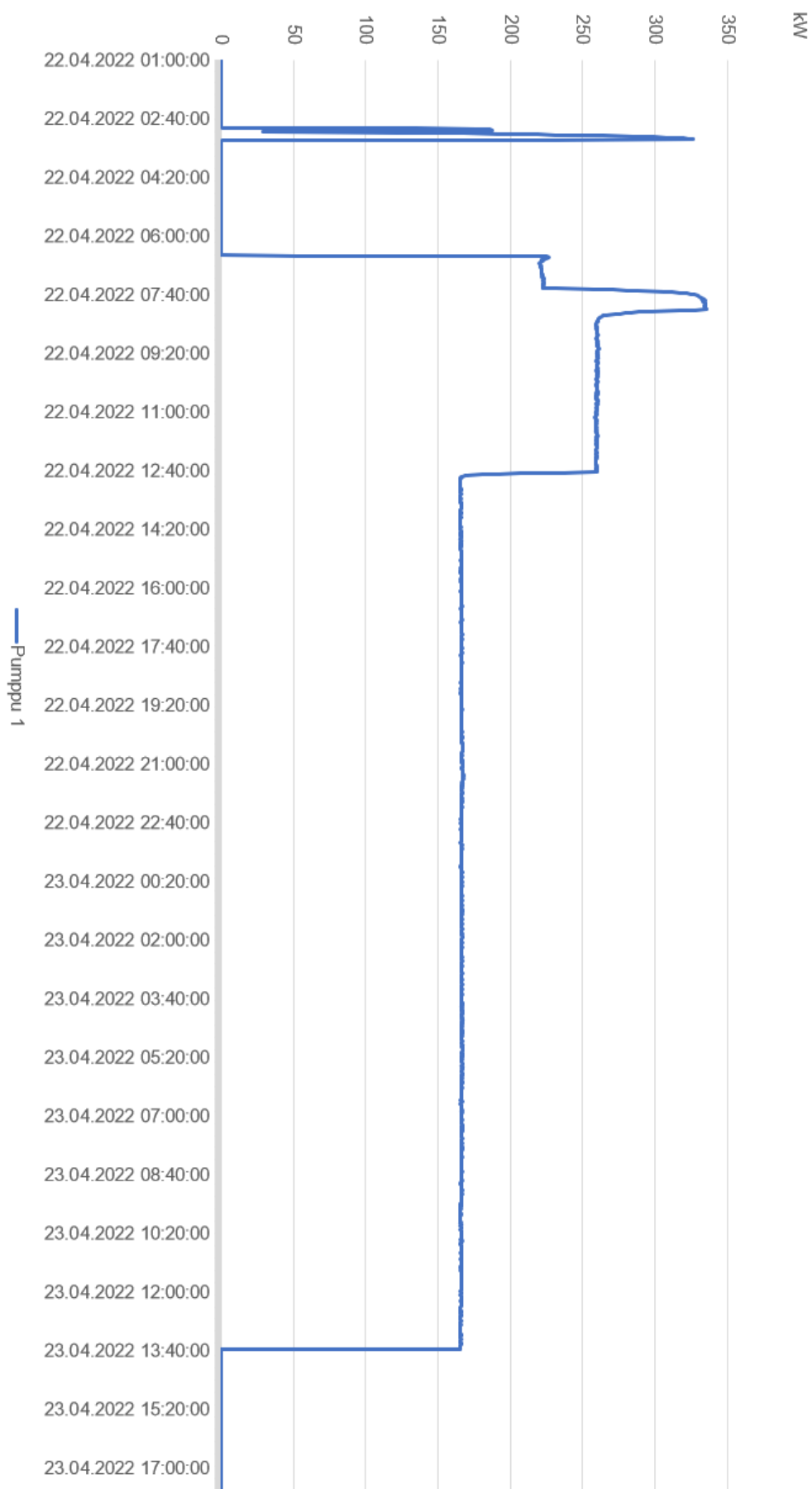
<b>Dynamic</b>	Sensitivity, $\pm 5\%$ , 25 °C	100 mV/g
	Acceleration range	80 g peak
	Amplitude nonlinearity	1%
	Frequency response	1...9 000 Hz
	$\pm 10\%$	0.5...14 000 Hz
	$\pm 3$ dB	
	Resonance frequency, mounted, nominal	30 kHz
	Transverse sensitivity, max.	5% of axial
Temperature response	$\pm 5\%$	
<b>Electrical</b>	Power requirement	
	Voltage source	18...30 VDC
	Bias current	2...10 mA
	Output impedance, max.	100 $\Omega$
	Bias output voltage	8...14 VDC
	Grounding	Case isolated, internally shielded
<b>Environmental</b>	Temperature range	-50...+120 °C
	Vibration limit	500 g
	Shock limit, min.	5 000 g peak
	Sealing	Hermetic
<b>Physical</b>	Sensing element design	PZT ceramic, shear
	Weight	90 g
	Case material	316L stainless steel
	Mounting	
	RVT-120	M8 integral stud (6 Nm max. torque)
	RVT-120M6	M6 integral stud (3.3 Nm max. torque)
	Output connector	2 pin, MIL-C-5015 style
Pin A	Signal/power	
Pin B	Common	

Lähde: Valmet Corporation, BR81080\_EN\_03, 08/2019

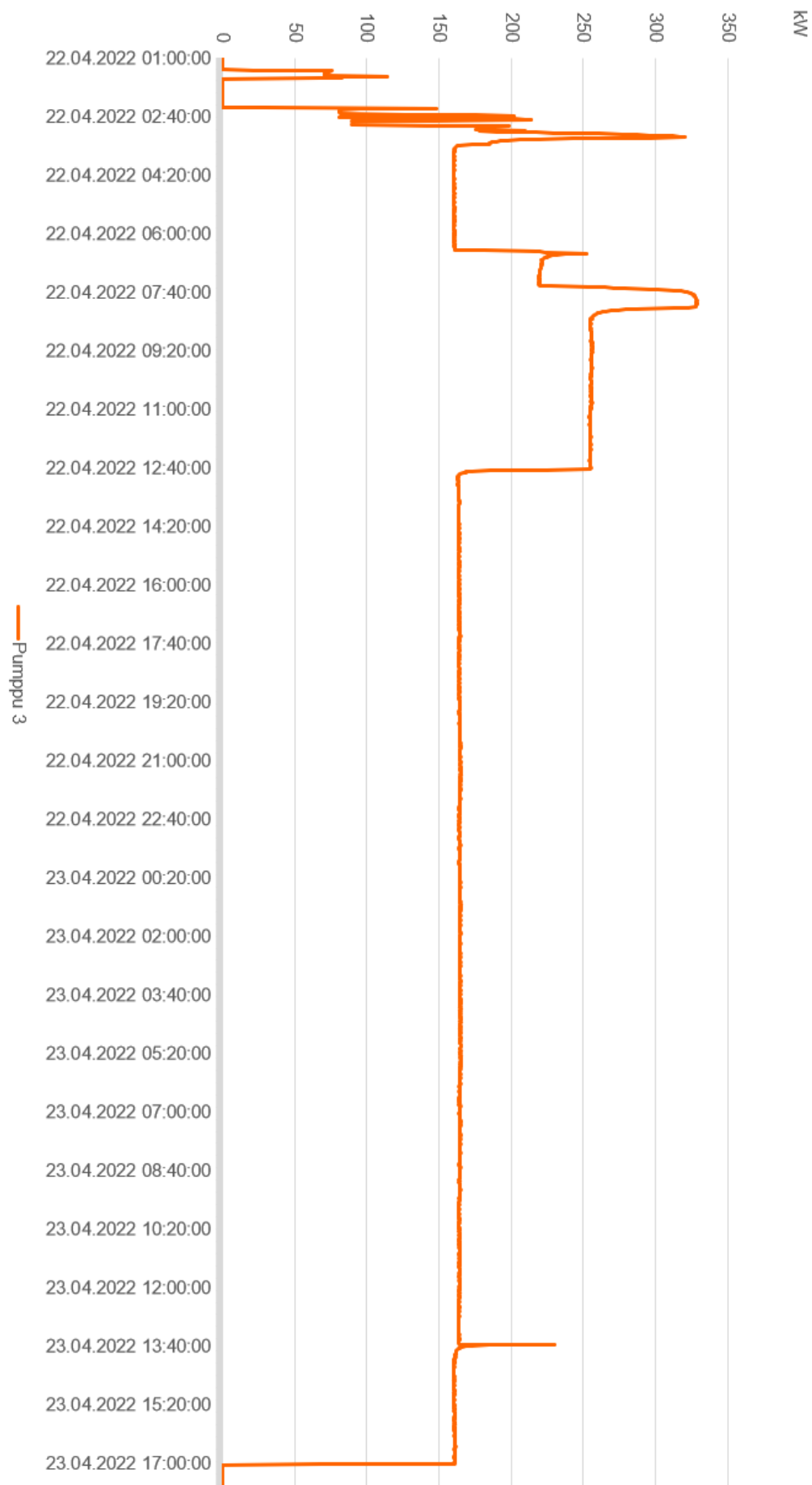
Liite 6. Pumppujen 1-4 teho testijakson aikana



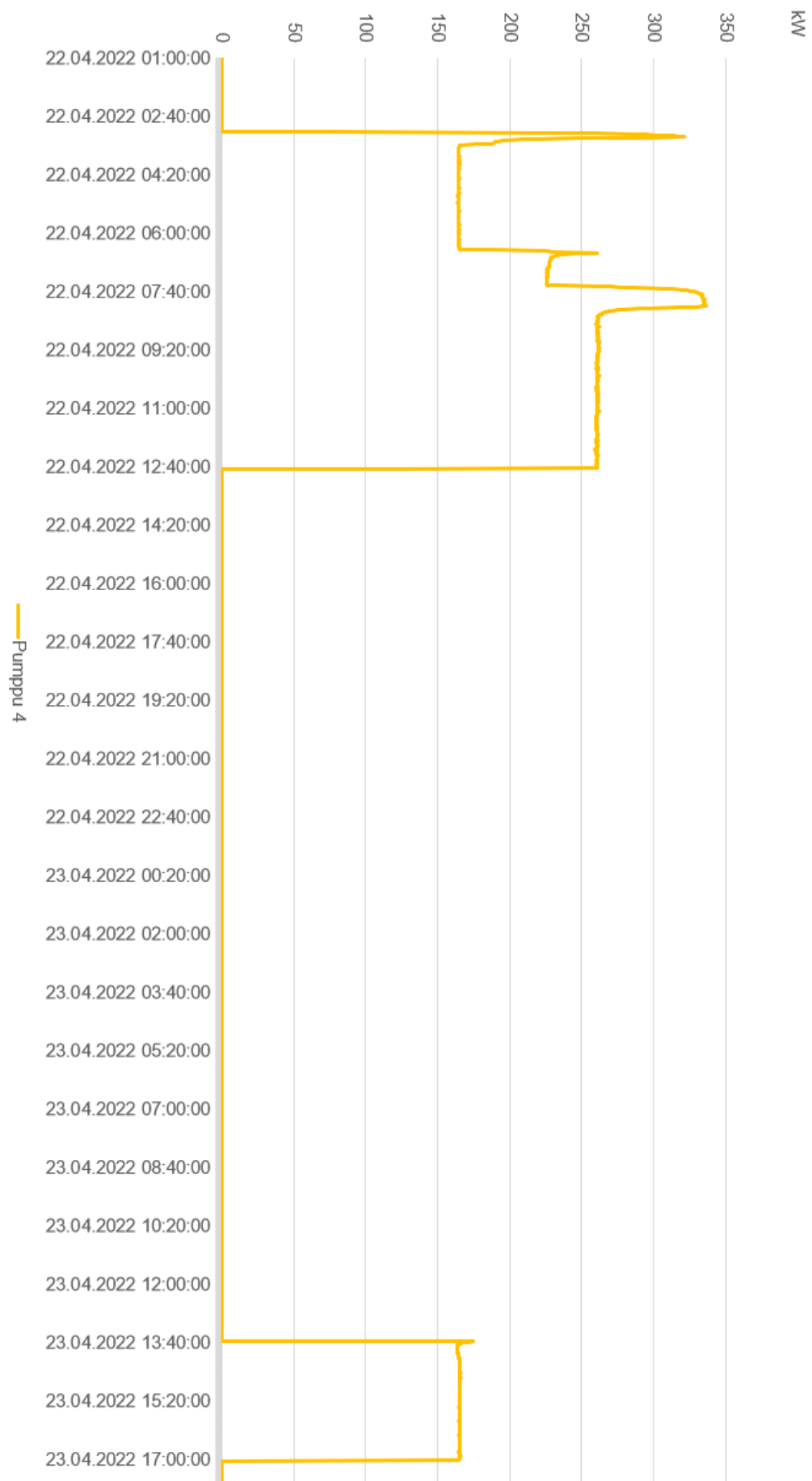
Liite 7. Pumpun 1 teho testijakson aikana



Liite 8. Pumpun 3 teho testijakson aikana

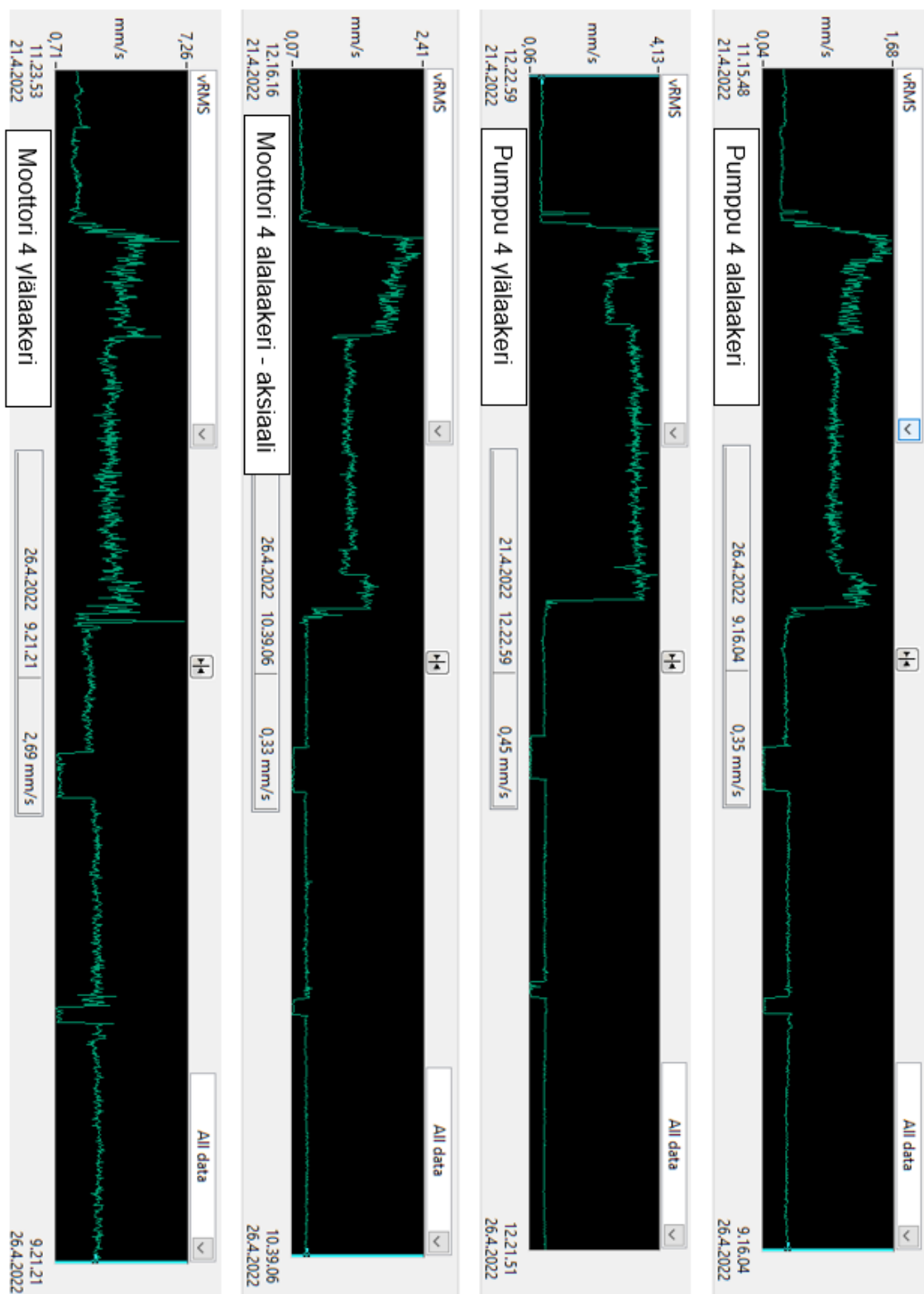


## Liite 9. Pumpun 4 teho testijakson aikana

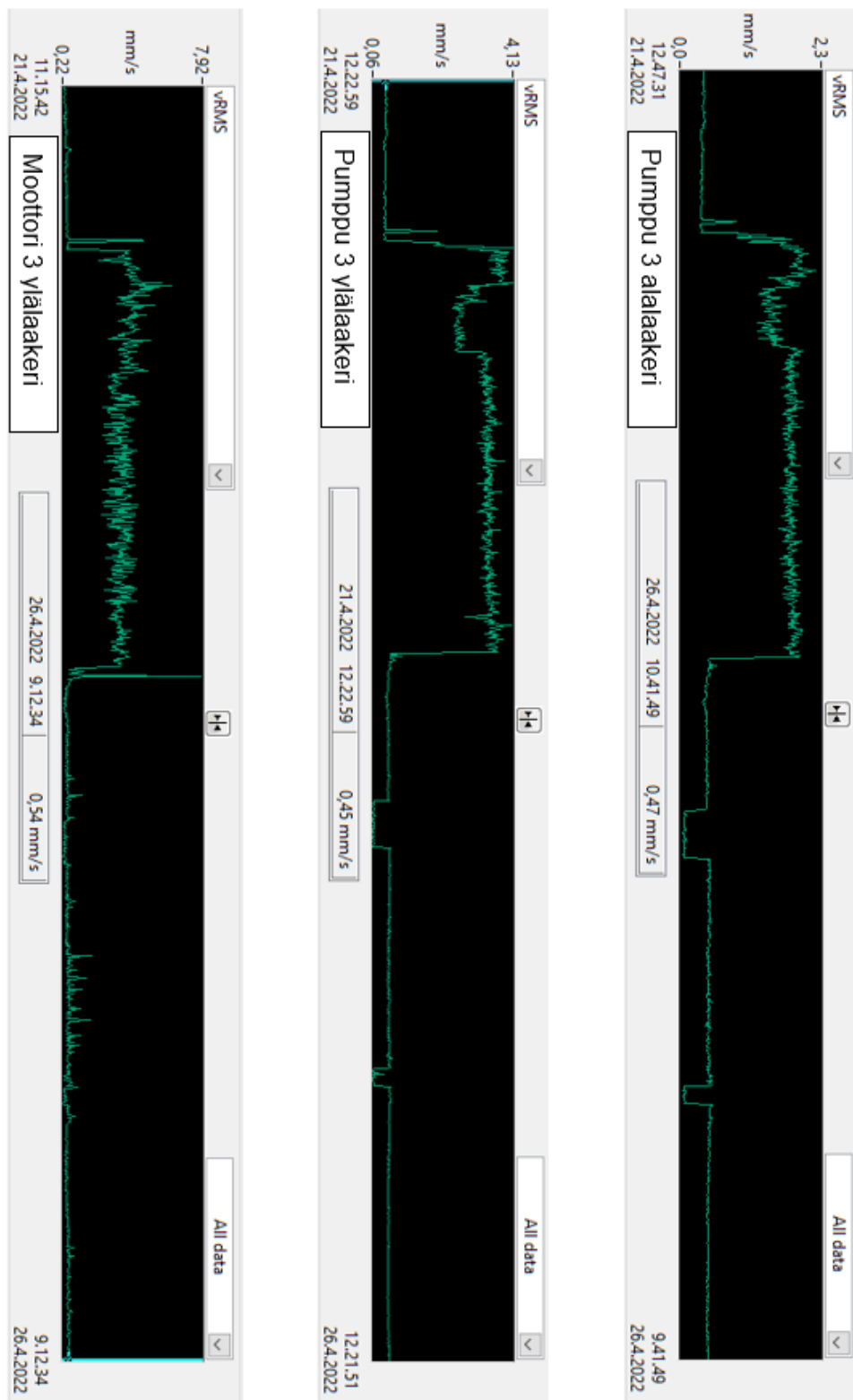




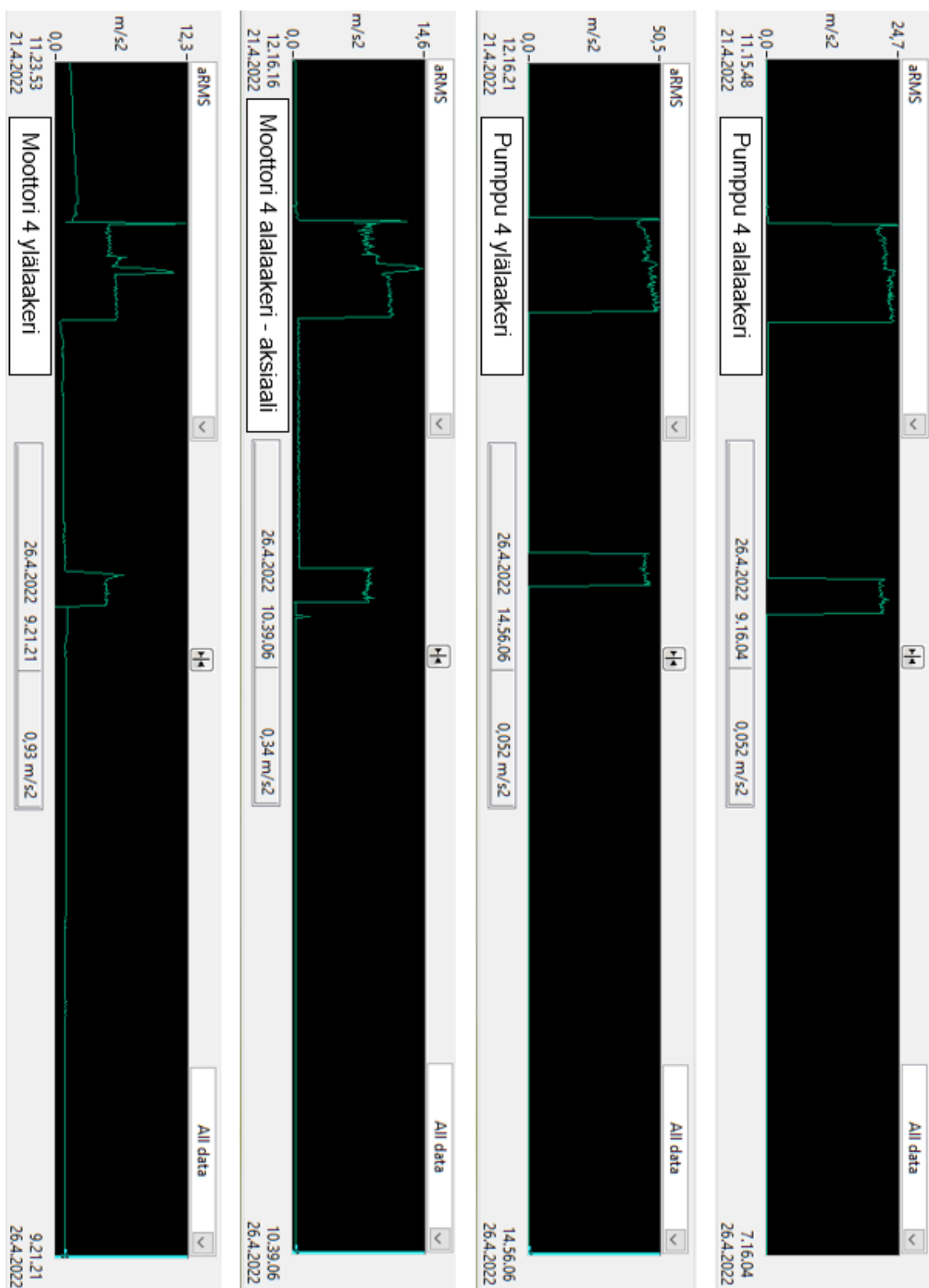
Liite 10. Pumpun 4 värähtelytrendit nopeuden RMS -arvona



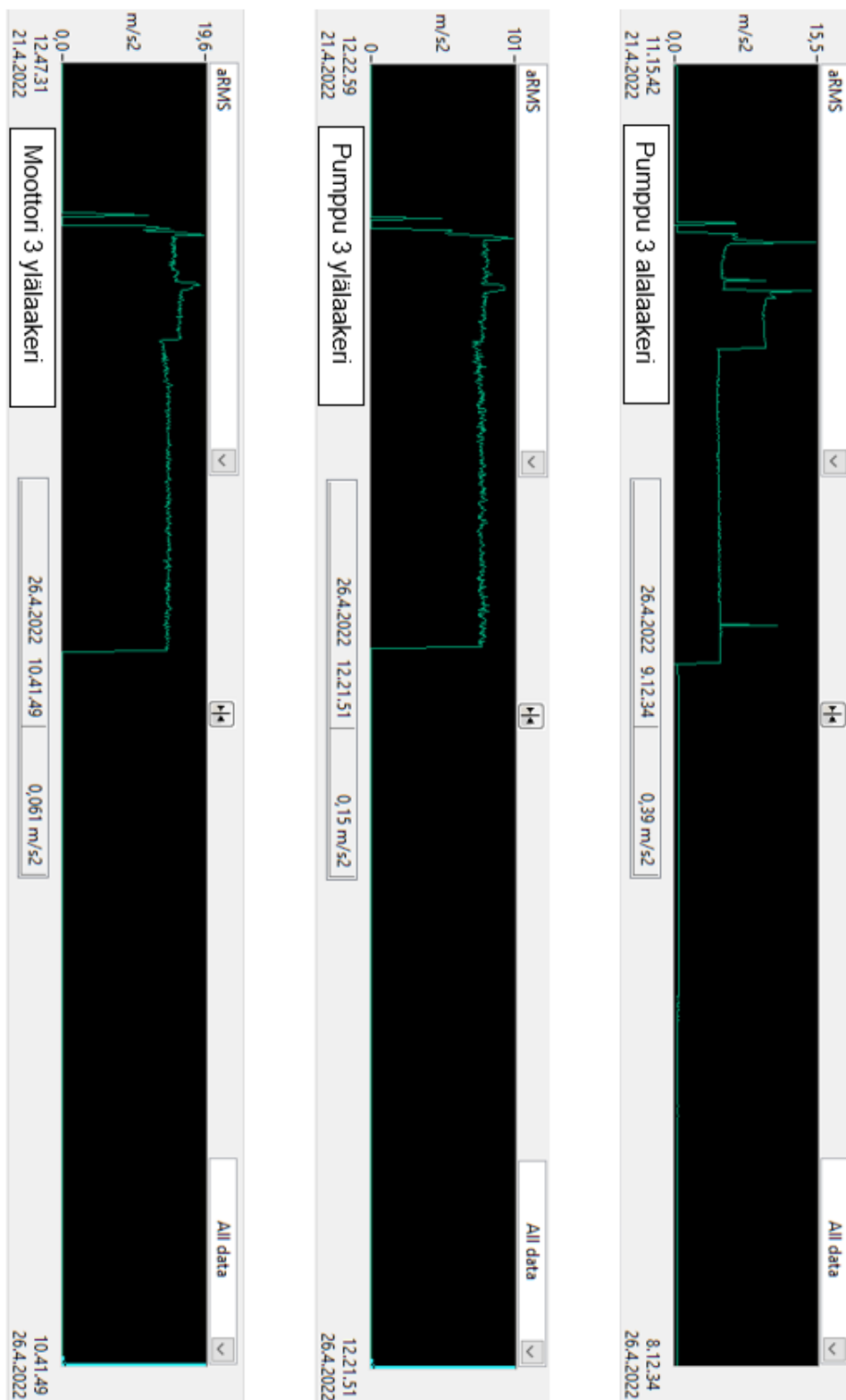
Liite 11. Pumpun 3 värähtelytrendit nopeuden RMS -arvona



Liite 12. Pumpun 4 värähtelytrendit kiihtyvyyden RMS -arvona



Liite 13. Pumpun 3 värähtelytrendit kiihtyvyyden RMS -arvona



Liite 14. Pumppujen 1 ja 2 värähtely testijakson aikana

