



# Kunnonvalvontajärjestelmien kustannustehokkuuden vertaileminen

Riku Kurkisuo

Opinnäytetyö, AMK  
Toukokuu 2024  
Energia- ja ympäristötekniikka

**Kurkisuo, Riku**

## **Kunnonvalvontajärjestelmien kustannustehokkuuden vertaileminen**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. **Toukokuu 2024**, 33 sivua

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### **Tiivistelmä**

Kunnonvalvonnan värähtelymittausten suorittamiseen on tarjolla monia eri järjestelmiä. Järjestelmien kustannustehokkuutta vertailemalla voidaan selvittää mitkä järjestelmistä ovat kustannustehokkaimpia, kalteimpia ja tehokkaimpia kunnonvalvonnan toteuttamiseen.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Stora Enso Oyj ja kunnonvalvontajärjestelmien vertailu kohdistui Imatran Tehtailla käytössä oleviin järjestelmiin. Tärkeimpinä tavoitteina oli muodostaa mahdollisimman luotettavat kokonaiskustannukset kunnonvalvontajärjestelmille sekä selvittää kuinka paljon yhden vian löytämisestä syntyy kustannuksia.

Järjestelmien kustannukset selvitettiin tarkastelemalla sopimuksia, keräämällä dataa sisäisistä tietojärjestelmistä ja arvioimalla sellaisia kustannuksia, joiden määrittäminen olisi vaikea. Järjestelmillä löydetyt viat kerättiin erillisestä raportista. Tietojen keräämisen jälkeen laskettiin järjestelmien kustannustehokkuutta kuvaavia tunnuslukuja ja vertailtiin niitä keskenään.

Työn tuloksena saatiin tietoa kunnonvalvontajärjestelmien kokonaiskustannuksista ja järjestelmien kustannustehokkuudesta. Tulosten avulla pystytään arviomaan paremmin kunnonvalvonnan resurssien käyttöä ja saadaan tietoa tulevaisuuden investointien tueksi sekä toiminnan kehittämiseksi.

### **Avainsanat (asiasanat)**

Kunnonvalvonta, värähtelymittaus, kustannustehokkuus

### **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

-

**Kurkisuo, Riku**

### **Comparing the cost-effectiveness of condition monitoring systems**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, **May 2024**, 33 pages

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

There are many different systems available for performing vibration measurements for condition monitoring. By comparing the cost-effectiveness of these systems, it is possible to determine which ones are the most cost-effective, expensive, and efficient for implementing condition monitoring.

The thesis was commissioned by Stora Enso Oyj, and the comparison of condition monitoring systems focused on those systems that are used at the Imatra Mills. The main objectives were to create the most reliable total costs for the condition monitoring systems and to determine the cost for identifying a single fault.

The costs of the systems were determined by examining contracts, collecting data from internal information systems, and estimating costs that would be difficult to determine. Faults detected by the systems were compiled in a separate report. After gathering the data, key performance indicators describing the cost-effectiveness of the systems were calculated and compared.

The results of the study provided information on the total costs of the condition monitoring systems and their cost-effectiveness. This information allows for a better assessment of the utilization of condition monitoring resources and provides insights for future investments and operational improvements.

### **Keywords/tags (subjects)**

Condition monitoring, vibration measurement, cost-effectiveness

### **Miscellaneous (Confidential information)**

-

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Kunnossapito.....</b>	<b>3</b>
2.1	Kunnossapidon kustannukset .....	5
<b>3</b>	<b>Kunnonvalvonta .....</b>	<b>5</b>
3.1	Kunnonvalvonnan suunnitteleminen .....	6
3.2	Kunnonvalvonnan kustannustehokkuus .....	6
3.3	Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset .....	7
3.3.1	Valvontatekniikat .....	8
3.3.2	Mittalaitteet.....	10
3.3.3	Värähtelymittauksissa käytettävät anturit .....	12
3.3.4	Värähtelymittauksella löydettävät poikkeamat .....	13
<b>4</b>	<b>Tutkimustyön menetelmät ja tavoitteet.....</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Tutkimustyön eettisyys.....</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Tutkimustyön aineisto .....</b>	<b>16</b>
6.1	Aineiston luotettavuus .....	17
<b>7</b>	<b>Käytössä olevat kunnonvalvontajärjestelmät .....</b>	<b>17</b>
7.1	Online-kunnonvalvontajärjestelmät .....	18
7.2	Kannettavilla mittalaitteilla suoritettava kunnonvalvonta .....	19
<b>8</b>	<b>Kunnonvalvontajärjestelmien kustannustehokkuus .....</b>	<b>21</b>
8.1	Valvontakustannusten vertailu .....	22
8.2	Järjestelmillä löydetyt viat .....	23
8.3	Vuosittaisten kustannusten vertailu .....	26
8.4	Kokonaiskustannusten vertailu .....	28
<b>9</b>	<b>Pohdinta ja tulosten luotettavuuden arviointi.....</b>	<b>30</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>32</b>

## Kuviot

Kuvio 1	Kunnossapitolajit (PSK 2010, 32) .....	4
Kuvio 2	Ennakoivan kunnossapidon kustannukset verrattuna kokonaiskustannuksiin (Kunnossapidon käsitteet ja määritelmät, N.d.) .....	7
Kuvio 3	Kokonaistason trendikuvaaja .....	9
Kuvio 4	Aikatasokuvaaja .....	9
Kuvio 5	Nopeusmittauksen spektri .....	10

Kuvio 6 Verhokäyräkuvaajan esitys vesiputouskuvaajana.....	10
Kuvio 7 Esimerkki online- kunnonvalvonta järjestelmän rakenteesta (Sulzer Sense kunnonvalvonta ratkaisu. N.d.).....	11
Kuvio 8 Kiinteän anturin kiinnitystavat (PSK 2018, muokattu).....	13
Kuvio 9 Anturin oikea kiinnitys mitattavaan kohteeseen (PSK 2007, 2).....	13
Kuvio 10 Vianmääritys prosessin kulku (PSK 2019, 4) .....	14
Kuvio 11 Laakerin ulkokehävika värähtelymittauksessa.....	15
Kuvio 12 Värähtelyn vakavuusasteikko (ISO 10806-6 1995, 6).....	15
Kuvio 13 Mittapistemäärät järjestelmittäin.....	18
Kuvio 14 Järjestelmän 2 värähtelymittauksiin käytettäviä Microlog-tiedonkeruulaitteita (The SKF Microlog series catalogue 2018.).....	19
Kuvio 15 Esimerkki kartonkitehtaan mittausreitistä.....	20
Kuvio 16 Järjestelmän 6 mittauksissa käytettävä mittalaite (QuickCollect sensor. N.d.) .....	20
Kuvio 17 Valvontaan käytetyt tunnit järjestelmittäin.....	22
Kuvio 18 Valvontakustannukset mittapistettä kohden .....	23
Kuvio 19 Löydetty viat järjestelmittäin .....	24
Kuvio 20 Vikaantuneet komponentit .....	25
Kuvio 21 Valvontakustannukset löydettyä vikaa kohden .....	26
Kuvio 22 Vuosittaiset kustannukset mittapistemäärää kohden.....	27
Kuvio 23 Vuosittaiset kustannukset vikaa kohden .....	28
Kuvio 24 Kokonaiskustannukset löydettyä vikaa kohden.....	29

## Taulukot

Taulukko 1 Värähtelymittaukseen liittyvät suureet (PSK 5701 2022, muokattu) .....	7
---	---

## 1 Johdanto

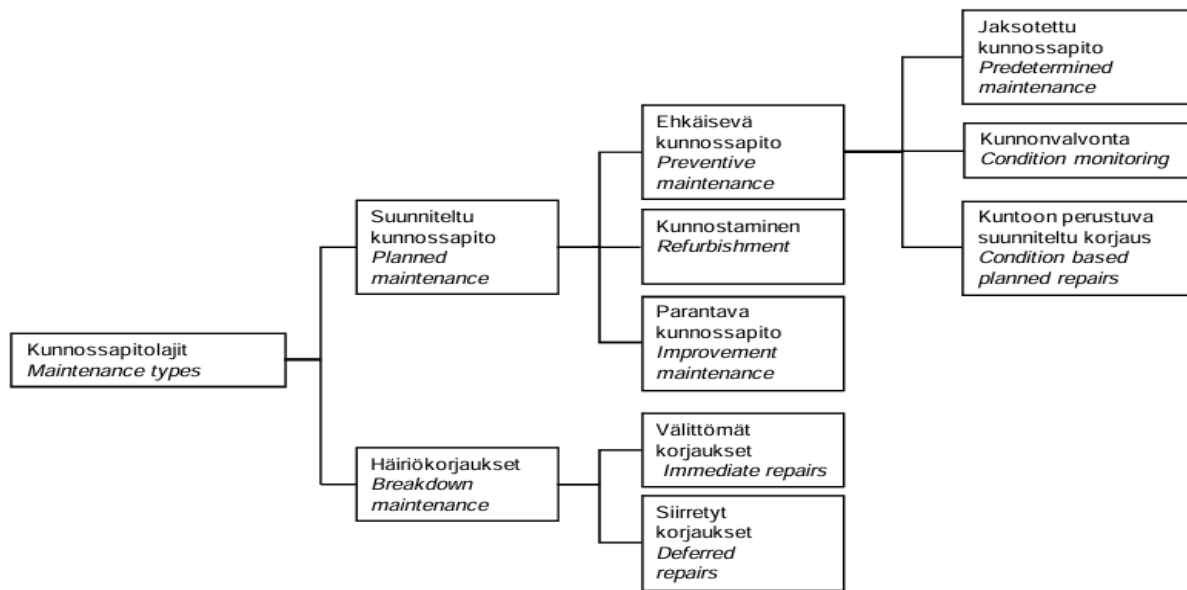
Kunnonvalvonnan avulla tarkkaillaan laitteiden kuntoa mittaamalla niiden ominaisuuksia ja arvoja. Kunnonvalvontaa voidaan toteuttaa monilla eri menetelmillä, tämä opinnäytetyö käsittelee kunnonvalvonnan värähtelymittausta ja värähtelymittausjärjestelmiä, joita käytetään pyörivien laitteiden kunnonvalvonnassa. Kunnonvalvonnan tavoitteena, on parantaa käyttövarmuutta ja pystyä ennakoimaan laitteiden vikaantumisia.

Stora Enson Imatran tehtailla on käytössä useita eri värähtelymittausjärjestelmiä. Järjestelmien runsas määrä kuluttaa runsaasti resursseja, tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kartoittaa näiden järjestelmien kustannustehokkuutta ja vertailla järjestelmiä keskenään. Työn tuloksena saatiin tietoa kunkin kunnonvalvontajärjestelmän kustannusten muodostumisesta ja kuinka paljon resursseja järjestelmät kuluttavat kokonaisuudessa. Kustannustehokkuutta tarkasteltiin valvontaan käytettyä aikaa ja syntyviä kustannuksia mittapisteisiin ja löydettyihin vikoihin nähden. Näiden tunnuslukujen avulla pystytään mahdollisesti parantamaan kunnonvalvonnan kustannustehokkuutta, arvioimaan paremmin kunnonvalvontajärjestelmien kannattavuutta ja suunnittelemaan kunnonvalvonnan toimintaa tulevaisuudessa. Vertailussa pyrittiin myös ymmärtämään mitkä ovat syyt lukujen takana ja mitkä tekijät vaikuttavat saatuihin tuloksiin.

## 2 Kunnossapito

Kunnossapidolla tarkoitetaan johonkin laitteeseen tehtyjä toimenpiteitä, joiden avulla pystytään ylläpitämään tai palauttamaan laitteen toimintakyky (SFS-EN 13306:2017, 5). Konkreettisten toimenpiteiden lisäksi kunnossapitoon luokitellaan siihen liittyvät hallinnolliset ja johtamisen toimenpiteet (Mikkonen 2009, 26). PSK- standardin mukaan kunnossapito voidaan jakaa eri alalajeihin,

jotka on esitetty kuviossa 1.



Kuvio 1 Kunnossapitolajit (PSK 2010, 32)

PSK-Standardin mukaan kunnossapito jaetaan siis sen perusteella, onko laite jo vikaantunut vai ei. Myös SFS-EN 13306 standardi määrittelee kunnossapitolajit hyvin samankaltaisesti laitteen toimintakunnon mukaan, jaotellen ehkäisevän kunnossapidon hieman eri tavalla (SFS-EN 13306:2017, 22). Häiriökorjauksen tavoitteena on palauttaa kohteen toimintakyky, joko välittömällä korjauksella tai siirretyllä korjauksella. Välittömät korjaukset suoritetaan heti vikaantumisen jälkeen, jotta mahdolliset haittavaikutukset pystytään minimoimaan. Tapauksissa, joissa haittavaikutuksia ei synny laitteen vioittumisesta, voidaan korjauksia siirtää. (SFS-EN 13306:2017, 14–15.) Suunnitellun kunnossapidon alle jäävät toiminnot ovat sellaisia, joita tehdään, kun kone on vielä toimintakunnossa. Ehkäisevä kunnossapito on kunnossapitoa, jonka tavoitteena on pyrkiä ehkäisemään laitteen vikaantumista ja vikaantumisen todennäköisyyttä (SFS-EN 13306:2017, 13.) Ehkäisevää kunnossapitoa ovat jaksotettu kunnossapito, kunnonvalvonta ja kuntoon perustuva suunniteltu korjaus.

## 2.1 Kunnossapidon kustannukset

Kunnossapitokustannuksilla tarkoitetaan kaikkia laitteiden ylläpitämisestä muodostuvia kustannuksia, ja ne koostuvat oman työn kustannuksista, materiaalikustannuksista ja ulkopuolisten palveluiden kustannuksista. Lisäksi voidaan määritellä yleiskustannuksia, joita kunnossapidosta voi aiheutua. Tällaisia kustannuksia ovat:

- kunnossapidon johdon ja suunnittelun kustannukset
- hallinnollinen työ (kirjanpito, ostot, hallinto)
- koulutuskustannukset
- tietojärjestelmien ja dokumentaation kustannukset
- tilavuokrat
- pääomakustannukset
- muut jakautumattomat kustannukset

Kunnossapidon kustannuksia voidaan kohdentaa mm. kunnossapitolajeille, kustannuspaikalle, kustannustyyppille, työlajille tai työtilaukselle. Kohdentamisen avulla saadaan seurattua kunnossapidon toimintaa, kustannusten muodostumista ja suunniteltua kunnossapidon toimintaa paremmin. (PSK 6201 2022, 36–38.)

## 3 Kunnonvalvonta

Kunnonvalvonta on ”*määrätyin välein manuaalisesti tai automaattisesti tehtävä toimenpide, jolla mitataan kohteen fyysisen tilan ominaisuuksia tai arvoja*” (SFS-EN 13306:2017, 16). Kunnonvalvontaa voidaan toteuttaa monella eri menetelmällä, joita ovat värähtelymittaukset, aistinvarainen havainnointi, voiteluanalyysit, NDT-menetelmät, lämpötilan mittaukset, äänimittaukset ja mahdolliset muut kunnonvalvonnan määritelmään soveltuvat menetelmät (Mikkonen 2009, 417). Laitteen kunnonvalvonnassa voidaan yhdistää eri kunnonvalvontamenetelmiä ja tämä onkin edellytys kattavan kunnonvalvonta toiminnan saavuttamiseksi. Laitteen kunnonvalvonnan tarve määritellään tapauskohtaisesti ottaen huomioon tekninen- ja taloudellinen näkökulma. (Mikkonen 2009, 162–163). Kunnonvalvontaa voidaan suorittaa jatkuvasti, aikaan perustuvasti tai koneen käyttötuntien mukaan (SFS-EN 13306:2017, 16). Kunnonvalvonnan tavoitteena on estää suunnittelemtomia seisokkeja ja parantaa laitteiden käyntiastetta, joka johtaa parempaan luotettavuuteen, energiatehokkuuden parantumiseen, sekä työturvallisuuden parantumiseen (Koistinen 2022, 5).

### 3.1 Kunnonvalvonnan suunnittelu

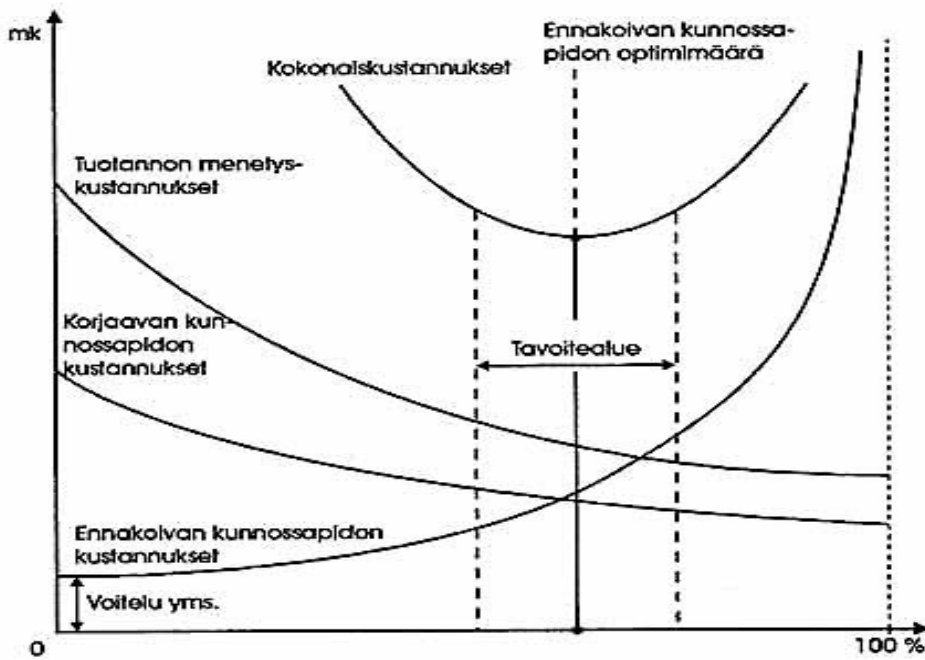
Laitteen kunnonvalvonnan suunnittelussa tulee ottaa huomioon monia eri tekijöitä. Laitteen kunnonvalvonnan suunnitteluun vaikuttavat turvallisuus- ja ympäristöasiat, tuotannon menetyksen kustannustekijät sekä kunnossapidon kustannustekijät (PSK 2024, 3). Kriittisten laitteiden kohdalla noudatetaan RCM-prosessia (Mikkonen 2009, 147). RCM prosessissa määritellään laitteen:

- tuotanto-ominaisuudet
- toiminnalliset viat
- vikaantumismallit
- vikojen vaikutukset
- vikojen seuraukset
- ennakoivat- ja korjaavat toimenpiteet

Kun on määritelty laitteen kunnonvalvonnan tarve, voidaan luoda kunnonvalvontamittaussuunnitelma. kunnonvalvontamittaussuunnitelma määrittelee käytettävät kunnonvalvontamenetelmät, mittausaikavälit, käytettävät mittausjärjestelmät, mittauksen käytännön järjestelyt sekä mittausten dokumentoinnin. (Mikkonen 2009, 76.)

### 3.2 Kunnonvalvonnan kustannustehokkuus

Kunnonvalvonnan avulla pyritään parantamaan tuotannon tehokkuutta. Kustannustehokkuutta pystytään seuraamaan vertaamalla kunnonvalvonnan avulla saavutettuja hyötyjä siitä seuraaviin kustannuksiin. Kunnonvalvonnan kustannukset ovat suhteellisen helppo laskea, mutta tuottojen laskeminen voi olla vaikeaa. Tuottoja voi olla vaikeaa määrittää, koska osa tiedoista perustuu arviointiin, kuten mitä olisi voinut tapahtua jonkin laitteen rikkoutuessa. Kunnonvalvonnalla voidaan saavuttaa muitakin hyötyjä, kuten työturvallisuuden parantamista tai työntekijöiden motivaation parantamista, jotka voivat vaikuttaa välillisesti tuotannon tehokkuuteen ja yrityksen imagoon. (Mikkonen 2009, 497.) Ennakoivan kunnossapidon taloudellinen optimisointi on kuvattu kuviossa 2.



Kuvio 2 Ennakoivan kunnossapidon kustannukset verrattuna kokonaiskustannuksiin (Kunnossapidon käsitteet ja määritelmät, N.d.)

### 3.3 Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset

Kunnonvalvonnan värähtelymittaus soveltuu pyörivien laitteiden kunnonvalvonnan toteuttamiseen niiden ominaisuuksien takia. Pyörivät laitteet luovat värähtelyä käydessään, joten tarkkailemalla värähtelyä ja siinä tapahtuvia muutoksia pystytään määrittelemään laitteen kunnossa tapahtuvia muutoksia ja havaitsemaan viat jo aikaisessa vaiheessa. Värähtelyvalvonnan perustana on tuntemus värähtelyyn liittyvistä suureista, valvottavien laitteiden toimintaperiaatteiden ymmärtäminen, vikaantumismekanismien tunteminen sekä prosessin ymmärtäminen, jossa laitteet toimivat (Mikkonen 2009, 223). Värähtelyvalvonnassa käytettävät suureet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1 Värähtelymittaukseen liittyvät suureet (PSK 5701 2022, muokattu)

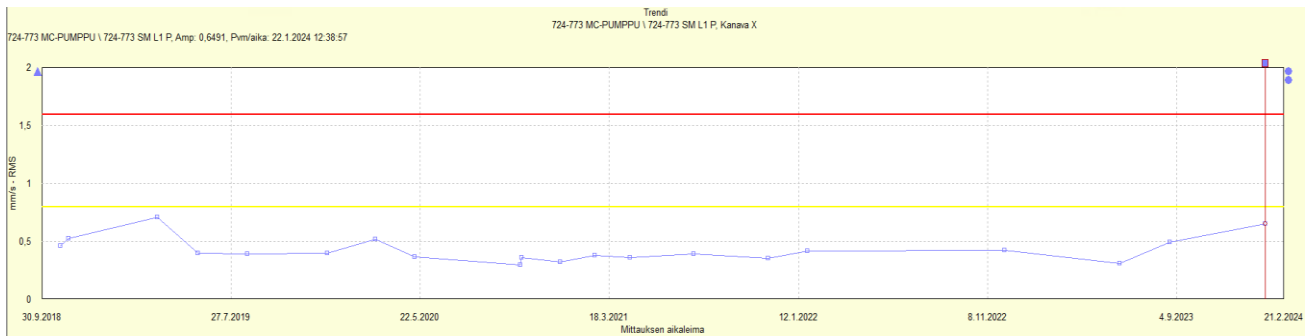
Suure	Käytännön mittayksikkö	SI-mittayksikkö	Käyttöesimerkkejä

Siirtymä, s	$\mu\text{m}$	m	Akselivärähtely
Nopeus, v	mm/s	m/s	Laakerivärähtely, Tä- rinärasitus
Kiihtyvyys, a	$\text{m/s}^2$ , g	$\text{m/s}^2$	Laakerin kunto
Taajuus, f	Hz	Hz	Taajuusanalyysi
Pyörimisnopeus, n	1/min, rpm, 1/s	1/s	
Vaihekulma, $\phi$	° (Aste)	rad	Vektorivalvonta, ta- sapainotus
Jakso, T	ms	s	Aikatasoanalyysi

Mitattavat ja valvottavat suureet valikoidaan valvottavan koneen rakenteen, tyypillisten vikaantumistyyppien ja käytetyn mittaustekniikan mukaan (PSK 2015, 2.)

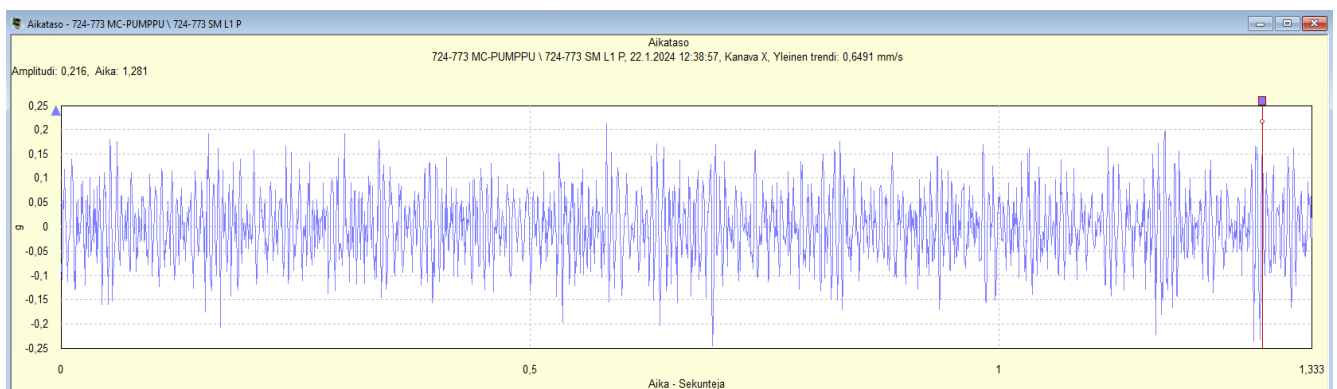
### 3.3.1 Valvontatekniikat

Värähtelymittauksen mitattavien suureiden avulla voidaan suorittaa haluttua valvontatekniikkaa. Valvontatekniikoita on useita erilaisia, joista monikäyttöisimpiä ovat kokonaistasovalvonta, tunnuslukuvalvonta, aikatasovalvonta, spektrivalvonta ja verhoikäyrävalvonta. Kokonaistasovalvonnassa seurataan värähtelyn voimakkuuden kokonaistasoa ja verrataan sitä edellisiin mittauksiin sekä ennalta laitteelle määriteltyyn hälytysrajaan.



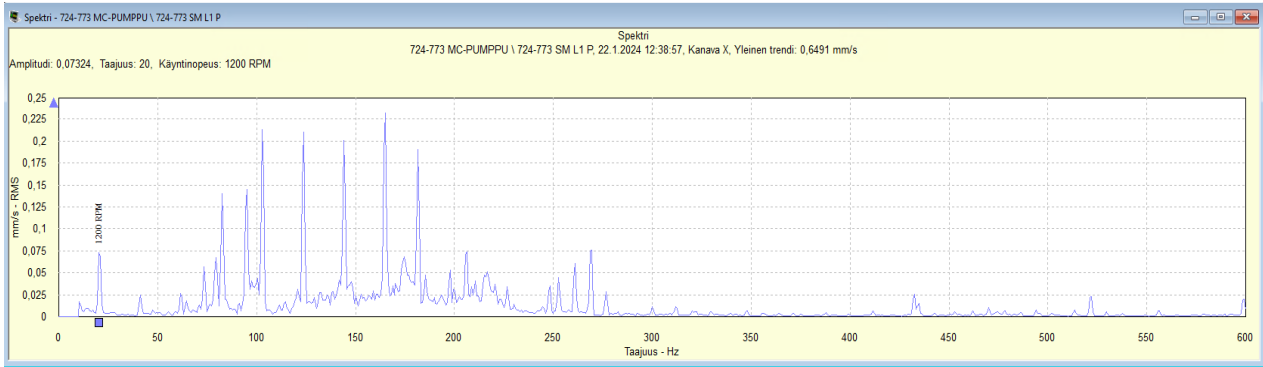
Kuvio 3 Kokonaistason trendikuvaaja

Tunnuslukuvalvonnassa tarkastellaan taajuustasosta laskettavia tunnuslukuja, joita ovat esimerkiksi pyörimistaajuudella ja sen monikerroilla tapahtuvan värähtelyn voimakkuus sekä muilla laitteen komponenttien, kuten laakerien, juoksupyörän, hammastuksen tai rakenteiden ominaistajuuksilla tapahtuvan värähtelyn voimakkuus. Myös harmonisilla, ei harmonisilla ja aliharmonisilla taajuuksilla tapahtuvan värähtelyn voimakkuutta on hyvä tarkkailla. Aikatasovalvonnassa tarkastellaan mittaussignaalia ajan funktiona. Kuviossa 4 on esitetty aikatasokuvaaja sähkömoottorista mitatusta värähtelystä.



Kuvio 4 Aikatasokuvaaja

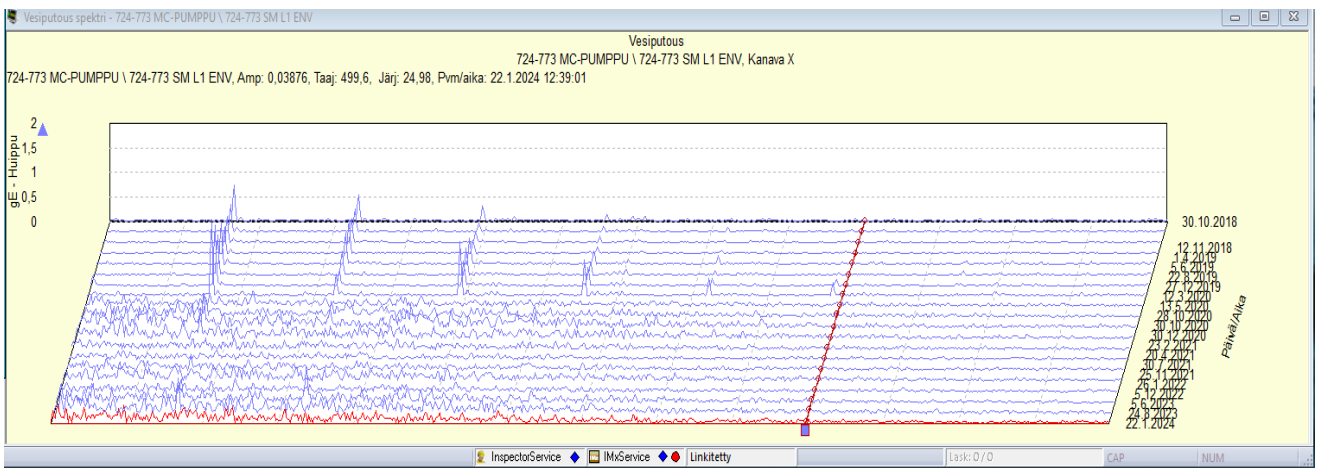
Spektrivalvonnassa verrataan mittauksen spektriä aikaisempien mittauksien spektreihin ja tarkastellaan niissä tapahtuvia muutoksia. Kuviossa 5 on esitetty kuvaaja sähkömoottorista mitatusta nopeusmittauksen spektristä.



Kuvio 5 Nopeusmittauksen spektri

Verhokäyrävalvonnassa korkeataajuinen värähtelysignaali muunnetaan matalataajuiseksi signaaliksi amplitudimodulaation avulla. Tällä menetelmällä pystytään havaitsemaan esimerkiksi laakerivikojen aiheuttamia iskumaisia herätteitä vikaantumisen aikaisessa vaiheessa. (PSK 2015, 2–4.) Lisäksi spektrejä voidaan verrata edellisiin mittauksiin vesiputouskuvaajan avulla.

Vesiputouskuvaajassa aikaisemmat mittaukset kasataan päällekkäin, jolloin pystytään vertaamaan kuvaajien yhtenäisyyksiä ja eroja. Kuviossa 6 on esitetty verhokäyräspektrin vesiputouskuvaaja.

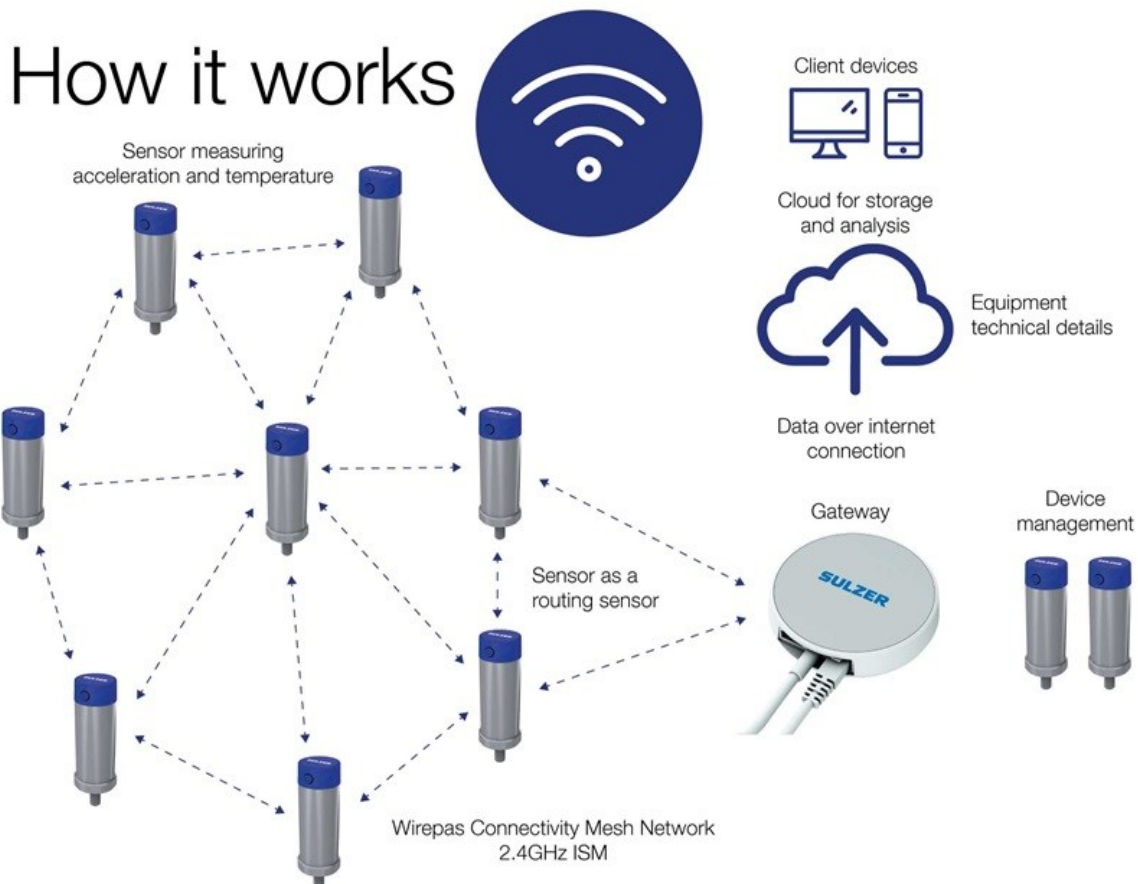


Kuvio 6 Verhokäyräkuvaajan esitys vesiputouskuvaajana

### 3.3.2 Mittalaitteet

Kunnonvalvonnan värähtelyvalvonnassa käytettävät mittalaitteet voidaan jakaa ominaisuuksiensa mukaan seuraavasti: Käsimitarit, kannettavat tiedonkeruulaitteet, monikanavaiset analysaattorit,

kiinteästi asennettavat online- tiedonkeruulaitteet ja PC-pohjaiset mittalaitteet. Mittausjärjestelmät voidaan myös jaotella asennustavan mukaan kolmeen eri tyyppiin, joita ovat kannettava mitalaite, puolikiinteä- ja kiinteä järjestelmä. Kiinteää järjestelmää käytetään laitteissa, joissa vikojen kehittyminen on hyvin nopeaa, häiriön herkkyys on suuri tai laitteen kuormitus on epätasaista, jonka takia mittausväli kannattaa pitää lyhyenä. (Mikkonen 2009, 263.) Esimerkki kiinteän järjestelmän toimintaperiaatteesta on esitetty kuviossa 3.



Kuvio 7 Esimerkki online- kunnonvalvonta järjestelmän rakenteesta (Sulzer Sense kunnonvalvonta ratkaisu. N.d.)

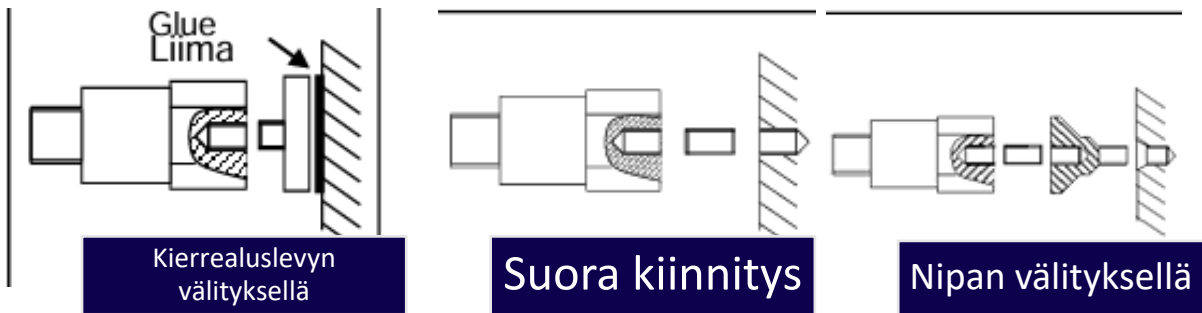
Puolikiinteää järjestelmää käytetään sellaisissa laitteissa, joiden luokse on vaikeaa päästä tai kannettavan mittalaitteen käyttö ei takaa luotettavaa mittaustulosta. Puolikiinteässä järjestelmässä kiinteä anturi on kiinnitetty mitattavaan laitteeseen, josta se on johdotettu paikkaan, josta se pysytään mittaamaan kannettavalla mittalaitteella. Kannettavaa mittalaitetta, jossa on siirrettävä anturi, käytetään kohteissa, joihin on fyysisesti helppo päästä ja vikaantumisen on suhteellisen hidas mittaussväliin verrattuna. (Mikkonen 2009, 263.) Kannettavalla mittauslaitteella voidaan

myös suorittaa mittauksia kiinteällä järjestelmällä tehtyjen mittausten tueksi, jotta saadaan luotettavampaa tietoa, kun mitataan kohde hieman eri suodatusasetuksilla.

### 3.3.3 Värähtelymittauksissa käytettävät anturit

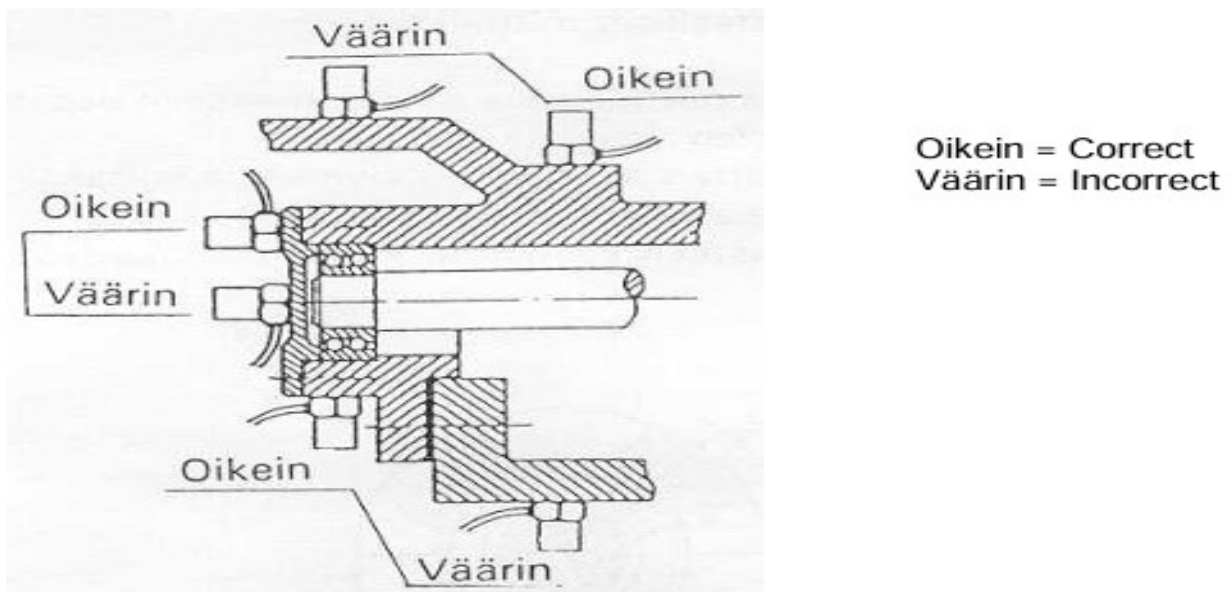
Värähtelymittauksien toteuttamiseen voidaan käyttää monenlaisia antureita mitattavien laitteiden ominaisuuksista ja olosuhteista riippuen. Anturi muuttaa mitatun värähtelyn analogiseksi signaaliksi, jota voidaan tarkastella ja analysoida. Anturityypin valintaan vaikuttavat mitattavan laitteen todennäköisimmät viat, värähtelyn taajuusalue sekä laitteen rakenne. Yleisimpiä antureita ovat kiihtyvyyssanturit, joita käytetään absoluuttisen värähtelyn mittaukseen muuntamalla mittaussuuntaan kohdistuva kiihtyvyys sähköiseksi ulostuloksi. Kiihtyvyyssanturin valinnassa on otettava huomioon anturin herkkyys, mitattava taajuusalue sekä ympäristön olosuhteet. Anturin herkkyys eli amplitudialue kuvaa sitä kuinka voimakasta värähtelyä sillä voidaan mitata, ja anturin taajuusalue kuvaa taajuuksia, joita sillä voidaan mitata. Ympäristön olosuhteista anturin valintaan vaikuttavat lämpötila, likaisuus, kosteus, sähkömagneettiset häiriöt ja tilaan liittyvät haasteet, kuten esimerkiksi ahdas mittausta paikka. Muita anturityyppejä ovat siirtymäanturit ja iskusysäysanturit. Siirtymäanturi mittaa kohteen asemaa ja muuntaa sen sähköiseksi ulostuloksi. Siirtymäanturia voidaan käyttää esimerkiksi liukulaakerien kunnonvalvonnassa. Iskusysäysanturilla mitataan mekaanisia herätteitä, sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi vierintälaakereiden kunnonvalvonnassa. (PSK 2018, 2.)

Kiihtyvyyssanturi voidaan kiinnittää mitattavaan laitteeseen suoraan, nipan tai kierrealuslevyn välityksellä. Siirrettävässä kiihtyvyyssanturissa voidaan käyttää magneettikiinnitystä, kun taas kiinteissä antureissa käytetään aina ruuvikiinnitystä (PSK 2018, 4.) Kuviossa 4 on esitetty kiinteiden anturien kiinnitysmenetelmiä.



Kuvio 8 Kiinteän anturin kiinnitystavat (PSK 2018, muokattu)

Anturin kiinnitystavan lisäksi on anturi asettava mitattavaan laitteeseen oikein, jotta saavutetaan luotettava mittaustulos ja vältetään ylimääräisten herätteiden mittaaminen. Periaatteet anturin kiinnityspisteen valinnasta on esitetty kuviossa 9.

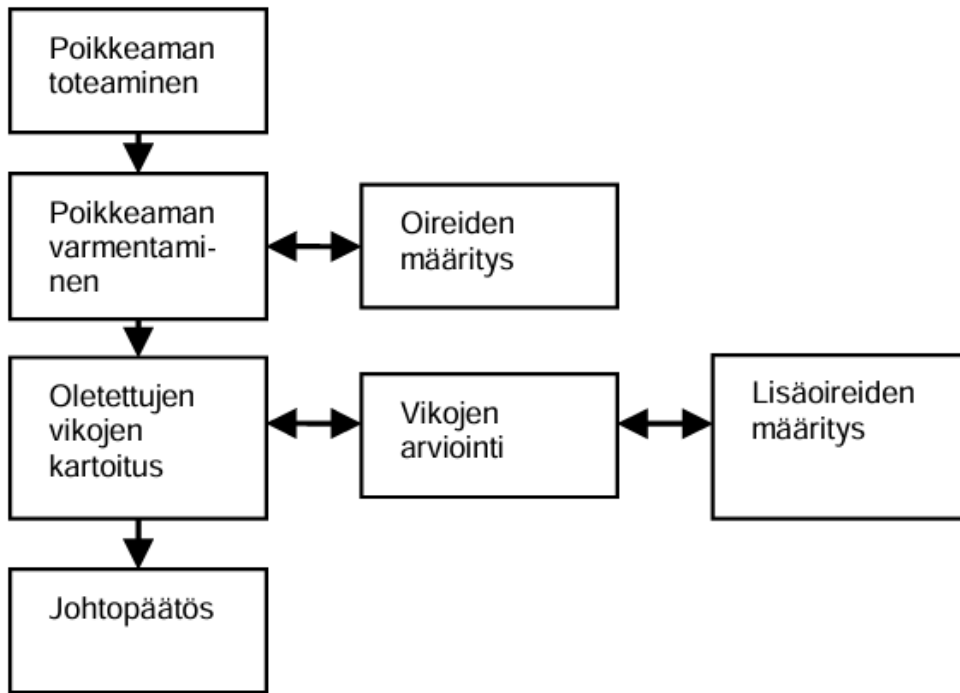


Kuvio 9 Anturin oikea kiinnitys mitattavaan kohteeseen (PSK 2007, 2)

### 3.3.4 Värähtelymittauksella löydettävät poikkeamat

Värähtelymittauksen avulla voidaan havaita monia erilaisia laitteen toiminnassa tapahtuvia muutoksia. Vianmääritys ei aina kuitenkaan ole helppoa, sillä monet viat aiheuttavat samanlaisia oireita ja alkuperäinen vian aiheuttaja voi olla vaikeaa paikantaa, jos kone on rakenteeltaan monimutkainen. Huomioon on myös otettava ympäristötekijät, kuten muutokset prosessissa tai

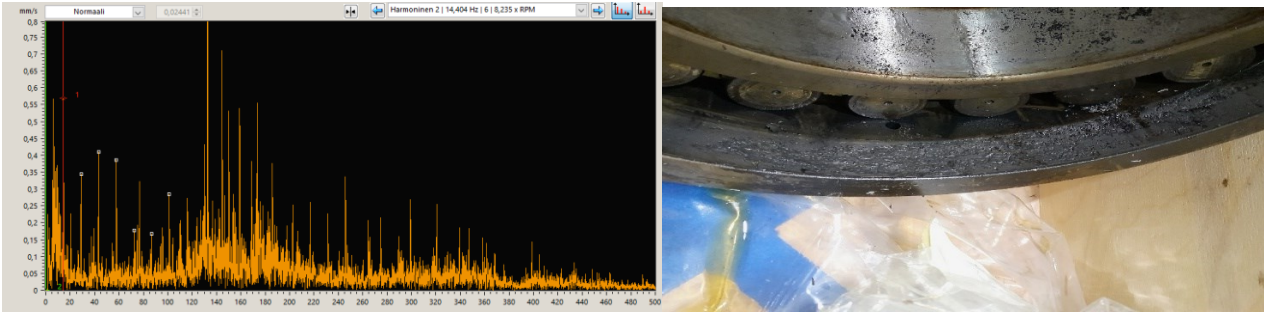
käyttöolosuhteissa. (Nohynek & Lumme 2004, 16 & Mikkonen 2009, 170.) Vian tunnistaminen ei välttämättä onnistu ainoastaan yhden mittauksen perusteella, vaan mittauksen tueksi voidaan joutua tekemään uusintamittauksia erilaisilla mittausasetuksilla, tarkastamaan koneen osien visuaalista kuntoa esim. kytkinkumien tai hihnojen kuntoa tai kuuntelemaan stetoskoopilla laitteen käynnistä syntyvää ääntä. Näin pystytään muodostamaan tarkempi kuva laitteen kunnosta ja tekemään paremmat johtopäätökset jatkotoimenpiteistä. Vian määrittymisen kulku on esitetty kuviossa



10.

Kuvio 10 Vianmäärittämisen prosessin kulku (PSK 2019, 4)

Eri viat aiheuttavat eri taajuisia värähtelyä kohteessa ja muodostavat erilaisia spektrejä ja aikatasokuvaajia värähtelymittauksissa. Tietyillä taajuuksilla tapahtuvan värähtelyn avulla pystytään määrittelemään ja tunnistamaan vikoja. Esimerkiksi laakerikomponenttien viat aiheuttavat laakerin ominaistaajuisia värähtelyä ja pyörivän komponentin löystyminen puolestaan aiheuttaa värähtelyä laitteen akselin pyörimistaajuudelle ja sen monikerroilla (Vibration training quick reference 2011). Kuviossa 11 on esitetty esimerkkitapaus laakerin vikaantumisen ja miten se ilmeni värähtelymittauksessa.



Kuvio 11 Laakerin ulkokehävika värähtelymittauksessa

Tietyn taajuisen värähtelyn ja värähtelyspektrien lisäksi vikojen arvioinnissa on tärkeää seurata värähtelyn voimakkuutta. Värähtelyn voimakkuuden viitearvot on esitetty kuviossa 12.

Vibration severity grade	Maximum values of overall vibration measured on the machine structure			Machine vibration classification number						
	Displacement $\mu\text{m}$ (r.m.s.)	Velocity $\text{mm/s}$ (r.m.s.)	Acceleration $\text{m/s}^2$ (r.m.s.)	1	2	3	4	5	6	7
				Evaluation zones						
1,1	17,8	1,12	1,76	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B
1,8										
2,8										
4,5										
7,1	71,0	4,46	7,01	C	C	C	C	C	C	
11										
18										
28										
45	710	44,6	70,1	D	D	D	D	D	D	
71										
112										
180										
112	1125	70,7	111	D	D	D	D	D	C	
180									D	

Key to zones

A: The vibration of newly commissioned machines would normally fall within this zone.

B: Machines with vibration within this zone are normally considered acceptable for long-term operation.

C: Machines with vibration within this zone are normally considered unsatisfactory for long-term continuous operation. Generally, the machine may be operated for a limited period in this condition until a suitable opportunity arises for remedial action.

D: Vibration values within this zone are normally considered to be of sufficient severity to cause damage to the machine.

NOTE — Vibration values for reciprocating machines may tend to be more constant over the life of the machine than for rotating machines. Therefore zones A and B are combined in this table. In future, when more experience is accumulated, guide values to differentiate between zones A and B may be provided.

Kuvio 12 Värähtelyn vakavuusasteikko (ISO 10806-6 1995, 6)

## 4 Tutkimustyön menetelmät ja tavoitteet

Työn toteutuksessa kartoitettiin nykytilanne hakemalla tietoa tehtaan sisäisistä järjestelmistä, josta saatiin koottua tämänhetkinen kustannusrakenne, mittapistemäärät sekä järjestelmillä tehdyt löydöt. Opinnäytetyön aineisto sisältää paljon lukuja, ja niiden pohjalta muodostamaan tunnuslukuja, kuten vuosittaiset kustannukset tai kustannukset löydettyä poikkeamaa kohti, joka on tyyppillistä määrälliselle eli kvantitatiiviselle tutkimukselle. Määrällisessä eli kvantitatiivisessa aineiston analysointi menetelmässä analysoidaan aineistoa numeroiden ja tilastojen avulla, joka toimi hyvin tämän opinnäytetyön tavoitteiden saavuttamisessa. (Kananen 2015, 38.)

Keskeisenä tavoitteena oli muodostaa ja laskea mahdollisimman luotettavat kokonaiskustannukset jokaiselle tutkimuksen kohteena olleelle kunnonvalvontajärjestelmälle, jolloin saatiin kattava kuva tämänhetkisestä kustannusrakenteesta, jonka avulla pystyttiin luomaan tunnuslukuja kustannustehokkuuden vertailuun. Tavoitteena oli myös vertailun avulla saada tunnistettua kannattavimmat kunnonvalvontajärjestelmät, joka tarjoaa pohjaa kunnonvalvonnan kehittämiseksi ja tulevaisuuden investoinneille. Yhtenä keskeisimpänä tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon yhden poikkeaman löytäminen maksaa järjestelmittäin.

## 5 Tutkimustyön eettisyys

Opinnäytetyötä tehdessä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä. Sen mukaan tutkimusta tehdessä tulee noudattaa tiedeyhteisön toimintatapoja kuten rehellisyyttä, yleistä huolellisuutta ja tarkkuutta työn eri vaiheissa. Tutkimuksessa tulee käyttää luotettavia ja eettisiä lähteitä ja tehdä asianmukaiset lähdeviittaukset. (TENK, 2023.) Tutkimustyö ei kohdistu henkilöihin, jolloin eettiset kysymykset eivät ole niin konkreettisia, vaan tässä työssä eettisyys kohdistui hyvän tieteellisen käytännön noudattamiseen.

## 6 Tutkimustyön aineisto

Tutkimustyön aineisto löytyi tehtaan sisäisistä tietojärjestelmistä ja dokumenteista, etenkin SAP-järjestelmä oli merkittävä lähde kustannustiedoille, vikojen löytymisen seurannalle sekä erilaisen kunnossapitotilausten seurantaan. Kunnonvalvonnan tekemät löydökset oli kohdennettu SAP-

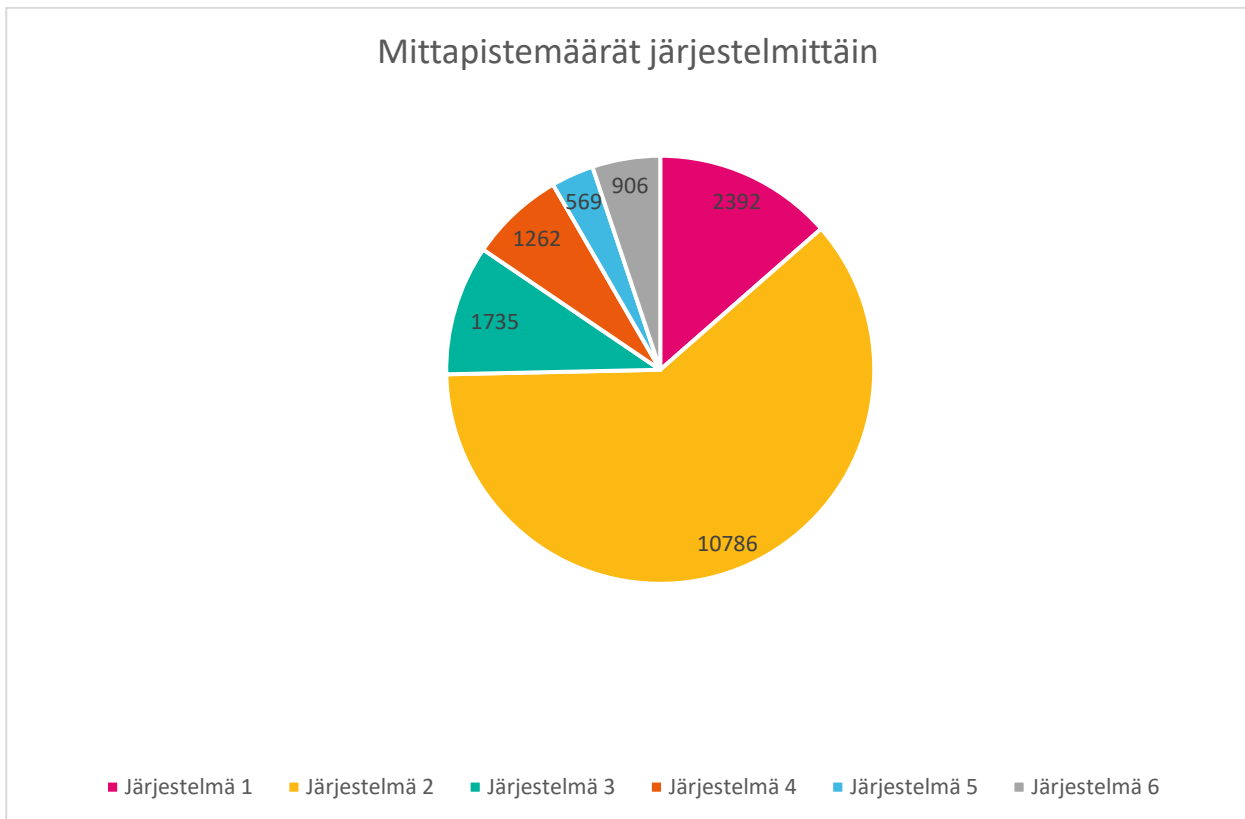
ilmoitusten perusteella oikealle kunnonvalvontajärjestelmälle, joista oli koostettu erillinen raportti, jonka pohjalta pystyttiin arvioimaan järjestelmien tehokkuutta. Vikojen kohdentaminen valvontajärjestelmää kohden aloitettiin vuonna 2023, joten aineisto oli kerätty 12 kuukauden ajanjaksolta 1.3.2023-1.3.2024, jotta tehokkuutta ja kustannuksia pystyttäisiin arvioimaan ja vertailemaan mahdollisimman luotettavasti. Kunnonvalvontajärjestelmistä aiheutuvat kustannukset selvitettiin laskuista, sopimuksista ja raporteista. Kustannuksia koottaessa käytettiin Microsoft Exceliä, johon koottiin kerätty data, tehtiin laskelmat ja luotiin havainnollistavat graafit.

## **6.1 Aineiston luotettavuus**

Tässä luvussa käsitellään aineiston luotettavuuteen liittyviä tekijöitä. Kunnonvalvontamittaajilla oli keskeinen rooli vikojen ja valvontaan käytettyjen tuntien kirjaamisessa. Nykyisessä toimintamallissa kunnonvalvontamittaajat kirjaavat tehdessään poikkeamasta kunnossapitoilmoituksen SAP-järjestelmään, millä mittalaitteella poikkeama on löydetty ja varsinkin toimintamallin alkuaikana kirjauksia oli jäänyt tekemättä. Järjestelmäkohtaiset valvontaan käytetyt kustannukset oli määritetty työtilauksista löytyvillä tuntikirjauksilla. Tuntikirjaukset eivät välttämättä ole tarkkoja, sillä kunnonvalvontamittaajat kirjaavat valvontaan käyttämänsä tunnit itse ja toimintatavoissa voi olla mittaajakohtaisia eroavaisuuksia. Tästä muodostuva virhe oli kuitenkin painoarvoltaan pieni, sillä työn päätavoitteena oli vertailla kunnonvalvontamenetelmiä keskenään ja puutteellisia kirjauksia oli tullut jokaiselle järjestelmälle. Myös konelinjojen eri käyttöasteet, päällekkäiset kunnonvalvontamittaus järjestelmät, kunnonvalvontamittaajien mieltymykset, järjestelmien vikaantuneet mitta-pisteet ja tarkasteluajanjaksolla tapahtuneet muut muutokset järjestelmissä vaikuttivat omalta osaltaan datan luotettavuuteen ja vertailukelpoisuuteen.

## **7 Käytössä olevat kunnonvalvontajärjestelmät**

Imatran tehtailla värähtelyvalvontaa suoritetaan pääosin kuudella eri järjestelmällä. Käytössä olevat järjestelmät on nimetty tässä opinnäytetyössä numeroilla 1-6 toimeksiantajan yksityisyyden varmistamiseksi. Kunnonvalvontajärjestelmien mittapistemäärät on esitetty kuviossa 13.



Kuvio 13 Mittapistemäärät järjestelmittäin

## 7.1 Online-kunnonvalvontajärjestelmät

Käytössä olevista kunnonvalvontajärjestelmistä järjestelmät 1, 3, 4 sekä 5 ovat online-kunnonvalvontajärjestelmiä. Järjestelmät 3, 4 ja 5 ovat kiinteitä online-järjestelmiä ja ne ovat toimintaperiaatteeltaan samanlaisia. Valvottaviin kohteisiin on kiinnitetty kiihtyvyyssanturit, jotka on johdotettu jakokoteloon, josta mittaukset siirtyvät palvelimelle. Mittauksia tarkastellaan kunkin järjestelmän omalla käyttöliittymällä tietokoneelta. Järjestelmien 3,4 ja 5 valvonnan piiriin kuuluu pääosin kartonki-, päällystys- ja kuivauskonelinjojen laitteita, kuten teloja ja niiden käyttöjä. Järjestelmä 3 on käytössä myös muilla osastoilla, mutta pienempinä kokonaisuuksina ja näillä osastoilla valvottavat laitteet vaihtelevat osastokohtaisesti. Järjestelmä 5 on käytössä ainoastaan yhdellä kartonkikonelinjalla ja se on online-järjestelmistä vanhin, mutta toimintaperiaate ja valvonta ovat samanlaisia uudempiin järjestelmiin verrattuna. Järjestelmä 1 on toimintaperiaatteeltaan hieman erityyppinen järjestelmä, verrattuna muihin käytössä oleviin online-järjestelmiin, ja se toimii kuviossa 7 esitetyn toimintaperiaatteen mukaan. Järjestelmän 1 valvonnan piiriin kuuluu monia erityyppisiä laitteita, joista yleisimpiä ovat sähkömoottorit, erilaiset pumput, vaihdelaatikot, sekoittimet ja puhaltimet.

## 7.2 Kannettavilla mittalaitteilla suoritettava kunnonvalvonta

Suurinta mittapistemäärää valvotaan kannettavien mittalaitteiden avulla. Järjestelmillä 2 ja 6 suoritettava valvonta toteutetaan käyttämällä kannettavaa mittalaitetta ja erillistä analysointi ohjelmaa. Järjestelmän 2 mittaukset suoritetaan kunnonvalvontamittaajien toimesta käyttäen Microlog-tiedonkeruulaitetta.



Kuvio 14 Järjestelmän 2 värähtelymittauksiin käytettäviä Microlog-tiedonkeruulaitteita (The SKP Microlog series catalogue 2018.)

Valvottavat laitteet on jaettu mittausreitteihin, jotka käydään mittaamassa tietyin väliajoin. Mittausvälit voivat vaihdella käytännöistä ja suunnittelusta riippuen, mutta tyyppillinen mittausväli on 60 päivää. Mittausten suorittamisen jälkeen kunnonvalvontamittaaja analysoi mittausten tulokset ja raportoi mahdolliset poikkeamat ja havainnot SAP-järjestelmään. Kuviossa 15 on esitetty esimerkki mittausreitien laitteista.

Reitti - KA2 Imupumput

Nimi	Kuvaus	Hälytykset	Sijainti
KA2 IMUPUMPUT	KA2 IMUPUMPPUKIERTO	Hälytys	1

KA2 IMUPUMPUT  
 538-626 PUMPPU  
 538-617 IMUPUMPPU  
 538-619 IMUPUMPPU  
 538-616 IMUPUMPPU  
 538-615 IMUPUMPPU  
 538-614 IMUPUMPPU  
 538-613 IMUPUMPPU  
 538-612 IMUPUMPPU  
 538-627 PUMPPU  
 538-628 PUMPPU  
 538-621 PUMPPU  
 538-623 PUMPPU  
 538-622 PUMPPU  
 568-504 PUMPPU  
 568-501 SEKOITIN  
 568-503 PUMPPU  
 568-502 SEKOITIN  
 538-625 PUMPPU  
 SM1  
 SM1 E3  
 SM2  
 SM2 E3  
 538-625 PU1 P  
 538-625 PU1 P E  
 538-625 PU2 P  
 538-625 PU2 P E

Kuvio 15 Esimerkki kartonkitehtaan mittausreitistä

Reittien laitteille on määritetty mittapisteet, joista mittaukset suoritetaan ja on tärkeää suorittaa mittaukset samoista pisteistä jokaisella mittauskierroksella vertailukelpoisten tulosten saamiseksi. Kuvio 15 nähdään myös esimerkki siitä, mitä mittauksia voidaan suorittaa. Pumpusta 538–625 mitataan neljästä eri kohdasta jokaisesta nopeusmittaus sekä verhoikäymittaus, näistä kohdista 2 on itse pumpussa ja kaksi sähkömoottorissa.

Järjestelmän 6 mittaukset suoritetaan konelinjojen operaattorien toimesta käyttäen Quick collect-mittauslaitetta, joka on yhdistetty Bluetooth-yhteydellä mobiililaitteeseen.



Kuvio 16 Järjestelmän 6 mittauksissa käytettävä mittalaite (QuickCollect sensor. N.d.)

Valvottavat kohteet on jaettu kierroksiin analysointiohjelmassa, ja kierrokset sisältävät värähtelymittausten lisäksi paljon aistinvaraista havainnointia. Järjestelmän 6 mittauskierroksilla tehdyt havainnot raportoidaan SAP-järjestelmään ja havaintojen perusteella kunnonvalvontamittaajat tekevät tarkastusmittauksia valvottuihin laitteisiin. Molempien kunnonvalvontamenetelmien valvonnan piirissä on erilaisia prosessiteollisuuden laitteita, kuten sähkömoottoreita, pumppuja, vaihdelaatikoita, sekoittimia ja puhaltimia.

## **8 Kunnonvalvontajärjestelmien kustannustehokkuus**

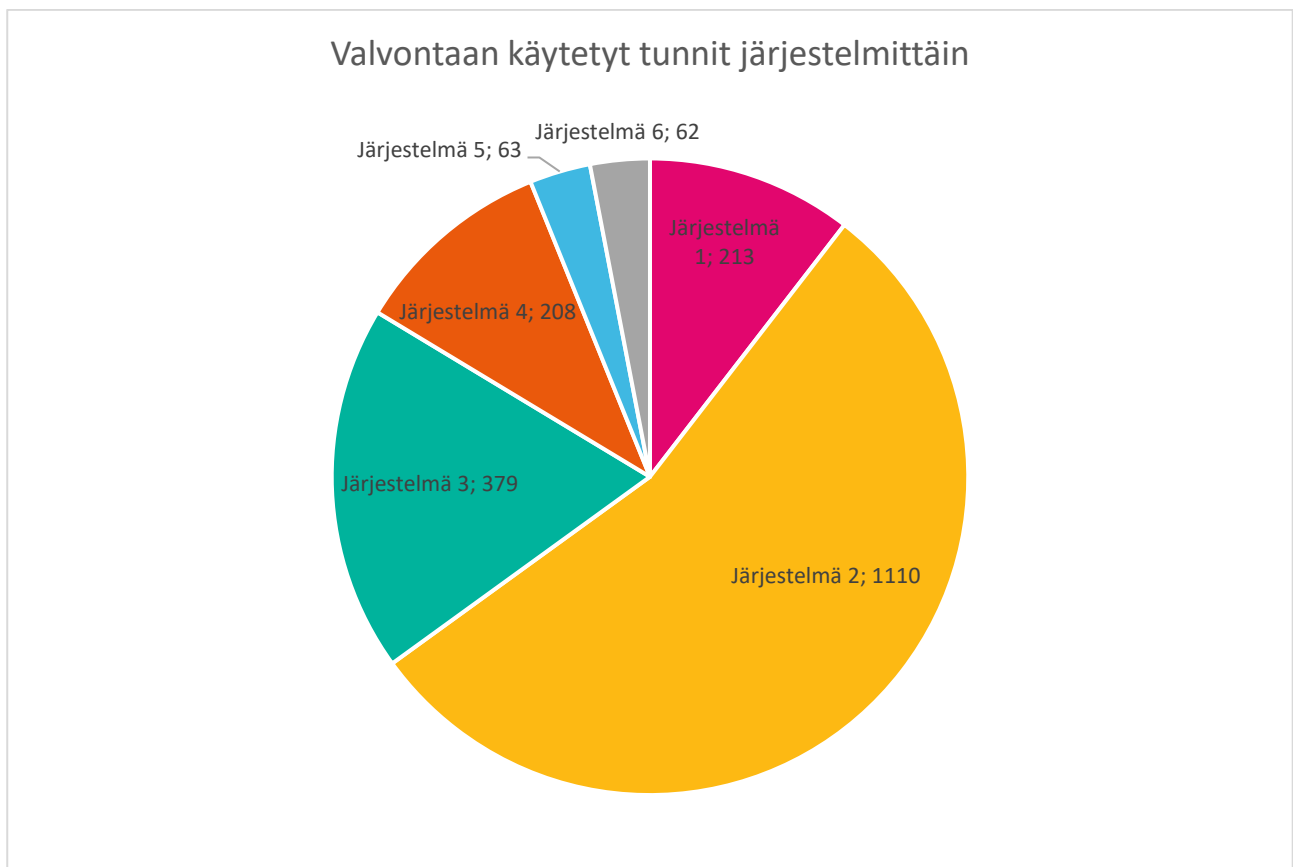
Kunnonvalvontajärjestelmien kustannuksia ja kustannustehokkuutta tarkasteltiin ajanjaksolta 1.3.2023-1.3.2024, koska tällä ajanjaksolla on noudatettu ohjeistusta, jonka mukaan kunnossapitoilmoitukseen kirjataan, millä mittausjärjestelmällä löydetty vika on ensimmäisenä havaittu. Järjestelmän 6 tarkastelu on rajattu koskemaan pienempää aluetta tehtaalla, koska se toimii siellä suunnitellulla tavalla. Järjestelmä 6 on käytössä myös muilla osastoilla, mutta sen toimivuudessa on ollut puutteellisuuksia, jonka takia ei voida tarkastella sen toimintaa koko tehtaan laajuisesti. Tästä syystä, jotkin Järjestelmälle 6 kohdistetut kustannukset eivät ole täysin verrannollisia muihin järjestelmiin, esimerkiksi laitteiden leasingista ja ylläpidosta koituu kustannuksia koko tehtaan laajuisesti, vaikka vain pientä osaa laitteistosta hyödynnetään täysin.

Järjestelmillä suoritettavaan kunnonvalvontaan käytettävät tunnit määritettiin ennakkohuoltotilausten tuntikirjausten perusteella. Järjestelmän 6 valvontaan käytettyihin tunteihin on sisällytetty ainoastaan kunnonvalvonnan tarkastusmittauksiin käytetyt tunnit, sillä ainoastaan niiden perusteella löydetty viat ovat mukana vikojen löytymisen seurannassa. Todellisuudessa Järjestelmän 6 toiminnasta aiheutuu myös kuormitusta ja työtunteja tuotannolle, mutta ne on jätetty tässä vaiheessa tarkastelun ulkopuolelle. Kaikille kustannuksille ja valvontaan käytetyille tunneille on suoritettu muunnos käyttämällä samaa kerrointa, jotta pystytään noudattamaan salassapito veloitetta. Opinnäytetyössä esitettävät kustannustiedot eivät ole todellisia kustannuksista, mutta sillä

ei ole merkitystä työn lopputuloksen kannalta, koska tarkoituksena on vertailla järjestelmiä keskenään.

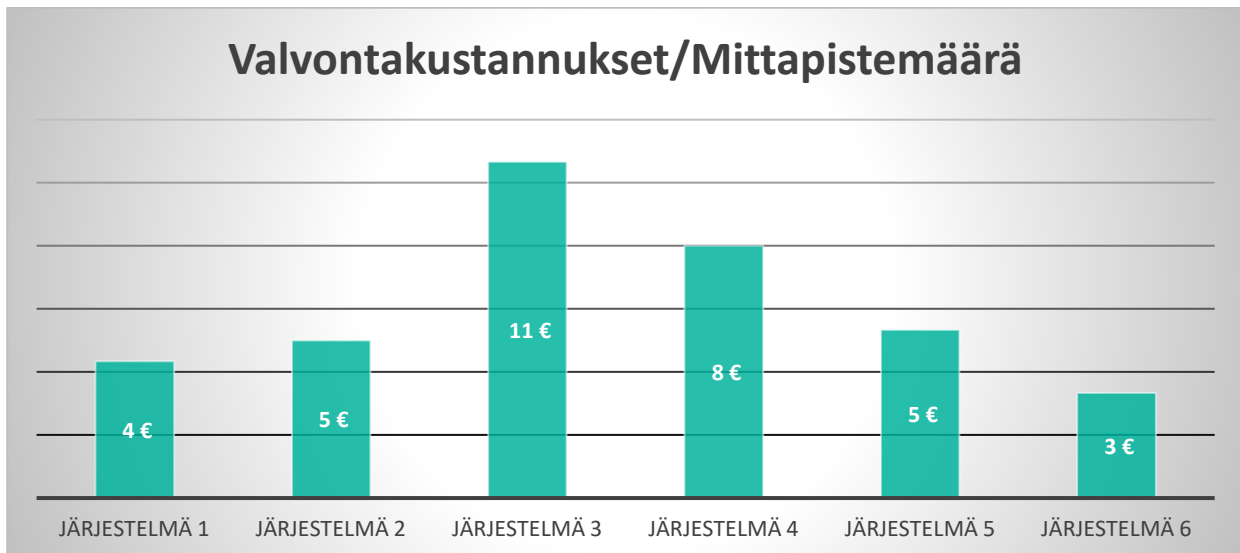
## 8.1 Valvontakustannusten vertailu

Järjestelmillä suoritetaan valvontaa tarpeen mukaan tai ennakkohuoltotilausten perusteella. Valvontaan käytetyt tunnit järjestelmittäin on esitetty kuviossa 17.



Kuvio 17 Valvontaan käytetyt tunnit järjestelmittäin

Valvontakustannukset suhteutettuna mittapistemäärään kertoo, kuinka tehokasta valvonta on ollut ajallisesti katsottuna. Kuviossa 18 on laskettu, kuinka paljon valvonnasta syntyy kustannuksia mittapistettä kohden.



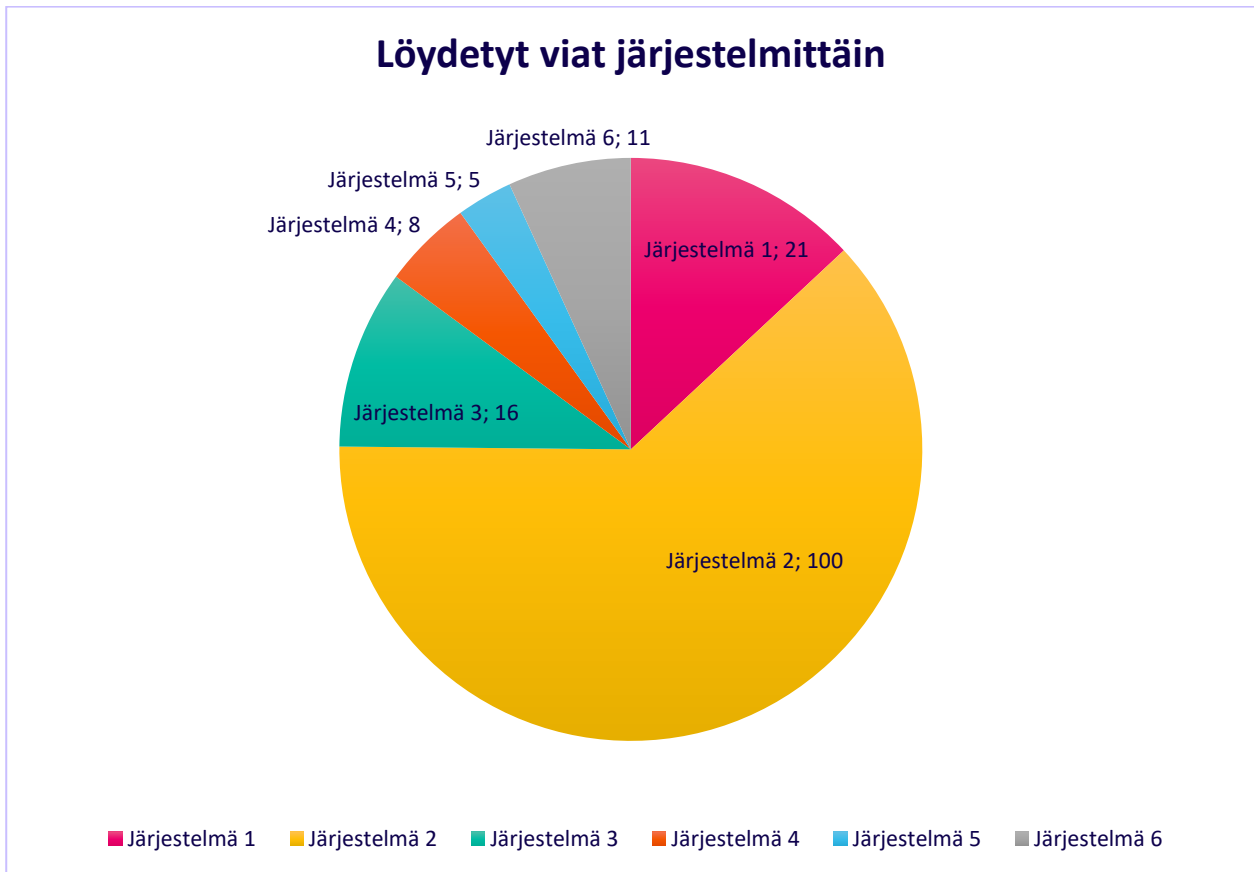
Kuvio 18 Valvontakustannukset mittapistettä kohden

Kuviosta 18 havaitaan, että eniten aikaa suhteessa mittapistemäärään on käytetty järjestelmillä 3 ja 4 suoritettavaan valvontaan. Tämä johtuu siitä, että online-kunnonvalvonnan työnumeroille tehdään usein kirjauksia, kun tehdään muita töitä samalla alueella, jolle tilaus on kohdistettu. Online-järjestelmien hälytysten tarkasteleminen on suhteellisen nopeaa, mutta tuntikirjauksissa tätä ei välttämättä oteta huomioon ja näin ollen syntyy vääristynyt kuva todellisesta valvontaan käytetystä ajasta. Järjestelmissä 3, 4 ja 5 tarkastellaan mittauksia trendejä syvemmillä verrattuna järjestelmään 1, josta syntyy eroa näiden järjestelmien välille. Huonosti kohdistettuja tuntikirjauksia esiintyy muillekin kunnonvalvontajärjestelmille, mutta ne korostuvat järjestelmässä 3, koska järjestelmää on tehtaalla pienempinä kokonaisuuksina useilla eri konelinjoilla. Alhaisimmat valvontakustannukset ovat järjestelmässä 6, koska valvontakustannuksissa on huomioitu ainoastaan kunnonvalvonnan osuus kokonaiskustannuksista. Jos mukaan laskettaisiin tuotannon kierrokseen käyttämä aika samalla tuntikohtaisella kustannuksella, arvio mittapistekohtaisista valvontakustannuksista olisi noin. 12 €, joka nostaisi järjestelmän 6 kalleimmaksi vertailussa.

## 8.2 Järjestelmillä löydetty viat

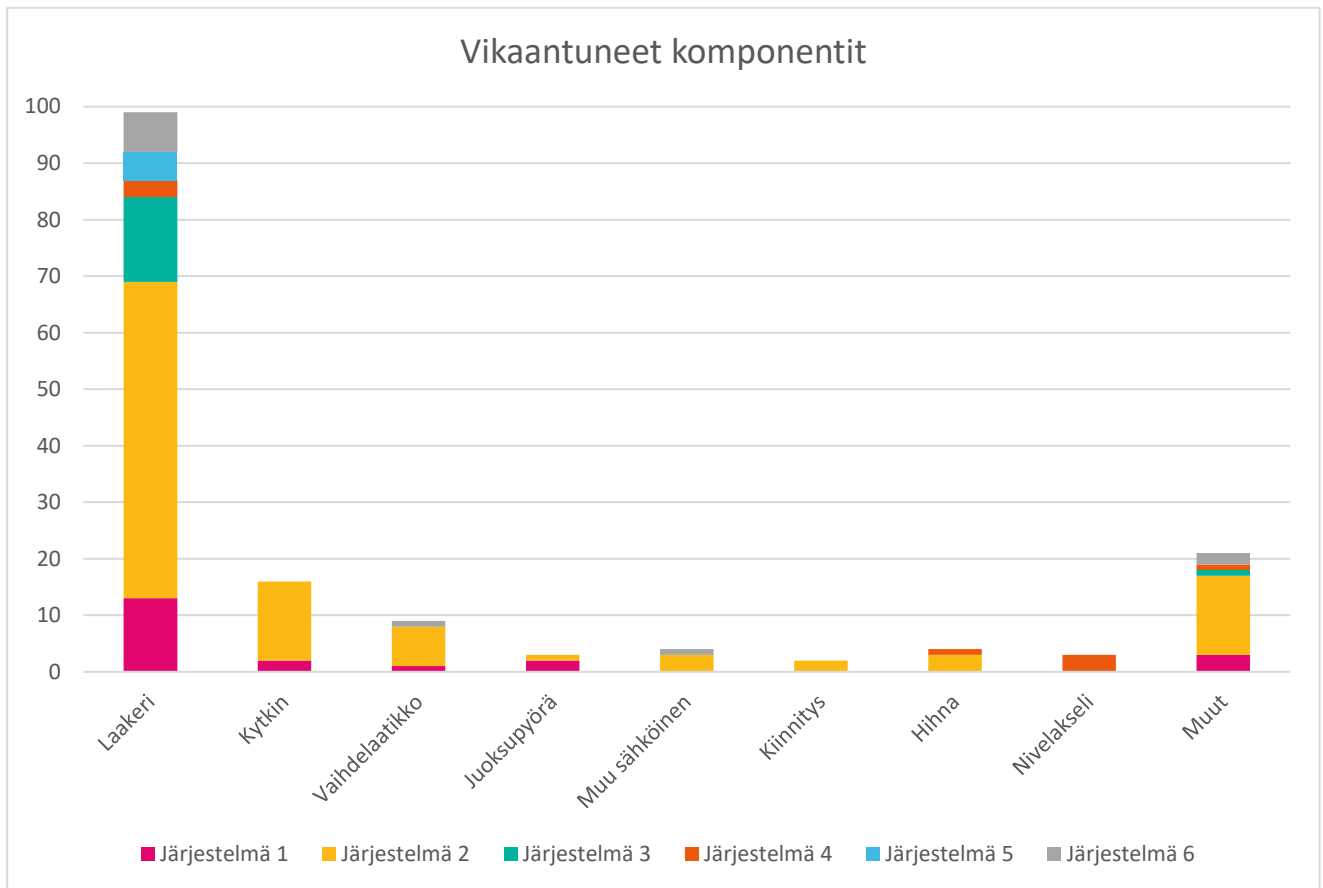
Värähtelymittauksilla pyritään löytämään mahdollisia vikoja ja muita poikkeamia valvottavista laitteista. Tarkkailemalla löytyneiden vikojen määrää voidaan vertailla ja määrittää, kuinka paljon ai-

kaa käytetään vikojen löytämiseen, kuinka paljon vikoja löytyy mittapisteisiin nähden ja kuinka paljon yhden vian löytäminen maksaa keskimäärin. Löytyneiden vikojen määrä järjestelmittäin on esitetty kuviossa 19.



Kuvio 19 Löydetyt viat järjestemittäin

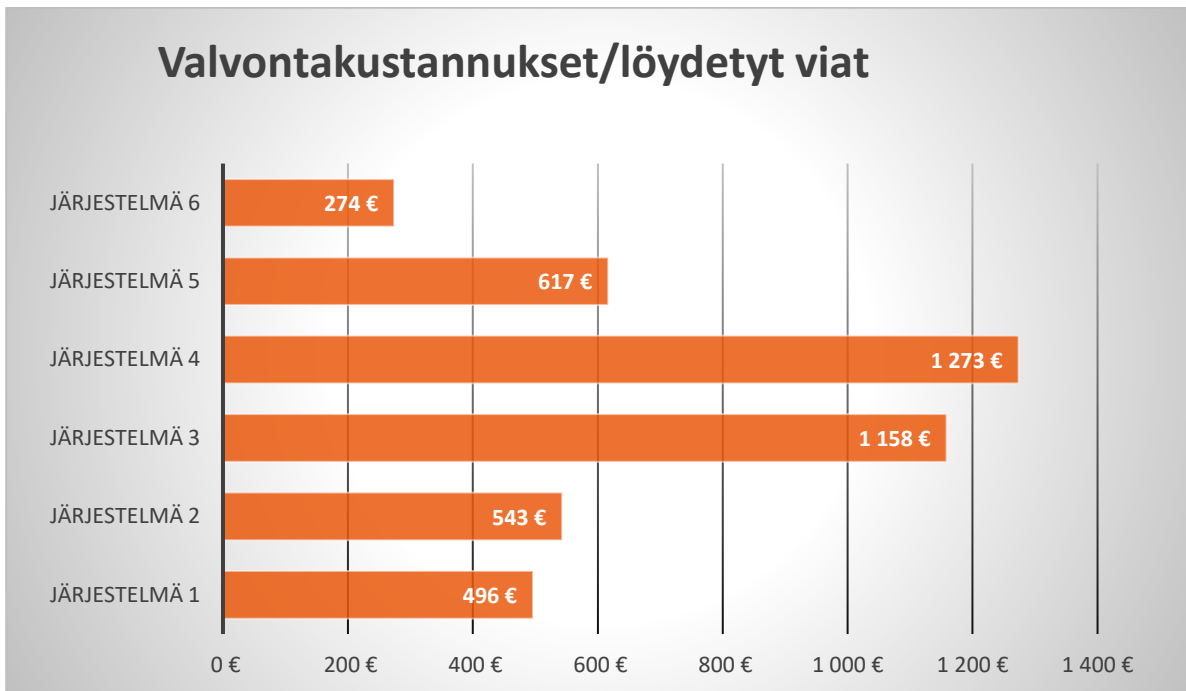
Verrattaessa löydettyjä vikoja ja valvottavien pisteiden määrää, voidaan havaita, että ne muodostavat samankaltaiset graafit eli mitä enemmän mittapisteitä on, sitä enemmän vikoja löydetään, joka vastaa ennako-oletusta. Kaikki viat mukaan laskettuna tarkasteluajanjaksolta oli kirjattu 161 löydettyä vikaa. Löydettyjä vikoja oli monia erilaisia, joista suurin yksittäinen ryhmä oli laakeriviat, joita löytyi tarkasteluajanjakson aikana 100 kappaletta. Löydetyt viat vikaantuneen komponentin mukaan on esitetty kuviossa 20.



Kuvio 20 Vikaantuneet komponentit

Tarkasteltaessa valvontakustannuksia löydettyä vikaa kohden voidaan huomata yhtenäisyys verrattaessa mittapistemäärään.

Valvontakustannukset vikaa kohden kertovat kuinka tehokasta valvonta on työvoimakustannuksiin nähden eli kuinka paljon aikaa kuluu kullakin järjestelmällä yhden vian löytämiseen. Kuviossa 21 on esitetty valvontakustannukset löydettyä vikaa kohden.

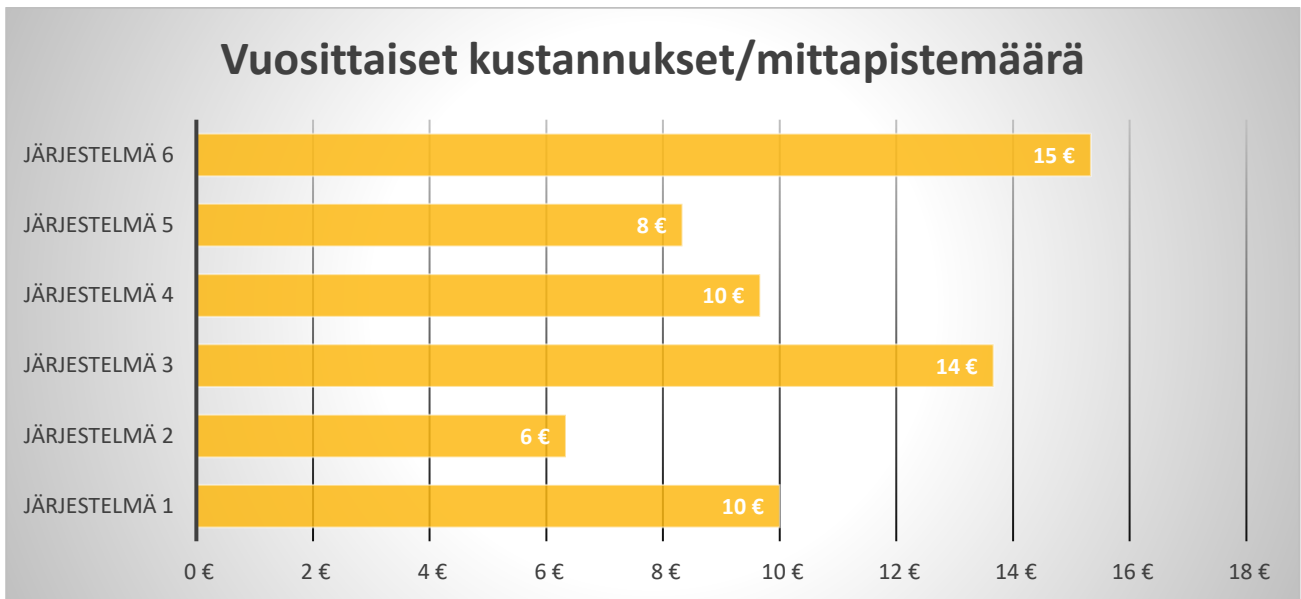


Kuvio 21 Valvontakustannukset löydettyä vikaa kohden

Kuviosta 21 havaitaan, että järjestelmän 6 mittauskierroksilta tulevien ilmoitusten tarkastamiseen kannattaa käyttää aikaa, sillä niiden avulla vikojen löytäminen oli ajallisesti tehokkainta. Myös järjestelmän 1 avulla löydettiin valvontakustannuksiin nähden tehokkaasti vikoja, joka johtuu siitä, että valvonta toteutetaan pitkälti hälytyksiä seuraamalla eikä mittauksia tarkastella yksi kerrallaan. Järjestelmillä 3 ja 4 suoritettavaan valvontaan käytetään eniten aikaa valvontaan löydettyä vikaa kohden, joka johtuu valvontaan käytetyn ajan epätarkkuudesta ja siitä, että mittausdataa tulee analysoitavaksi runsaasti, koska mittauksia tehdään muita järjestelmiä tiheämmin. Järjestelmä 5 asettuu keskivaiheille tässä vertailussa, koska se on käytössä vain yhdellä konelinjalla, joka vähentää tuntikirjauksista aiheutuvaa virhettä.

### 8.3 Vuosittaisten kustannusten vertailu

Seuraavaksi laajennetaan kustannusten tarkastelua valvontakustannuksia laajemmaksi. Vuosittaiset kustannukset muodostuvat valvontakustannuksista, lisenssimaksuista, ylläpitokustannuksista, laitteiden leasingkustannuksista ja huoltokustannuksista. Kun verrataan vuosittaisia kustannuksia mittapistemäärään, voidaan selvittää, millä järjestelmällä tietyn mittapistemäärän valvonta on halvin kustannusmielessä. Vuosittaiset kustannukset mittapistettä kohti on esitetty kuviossa 22.



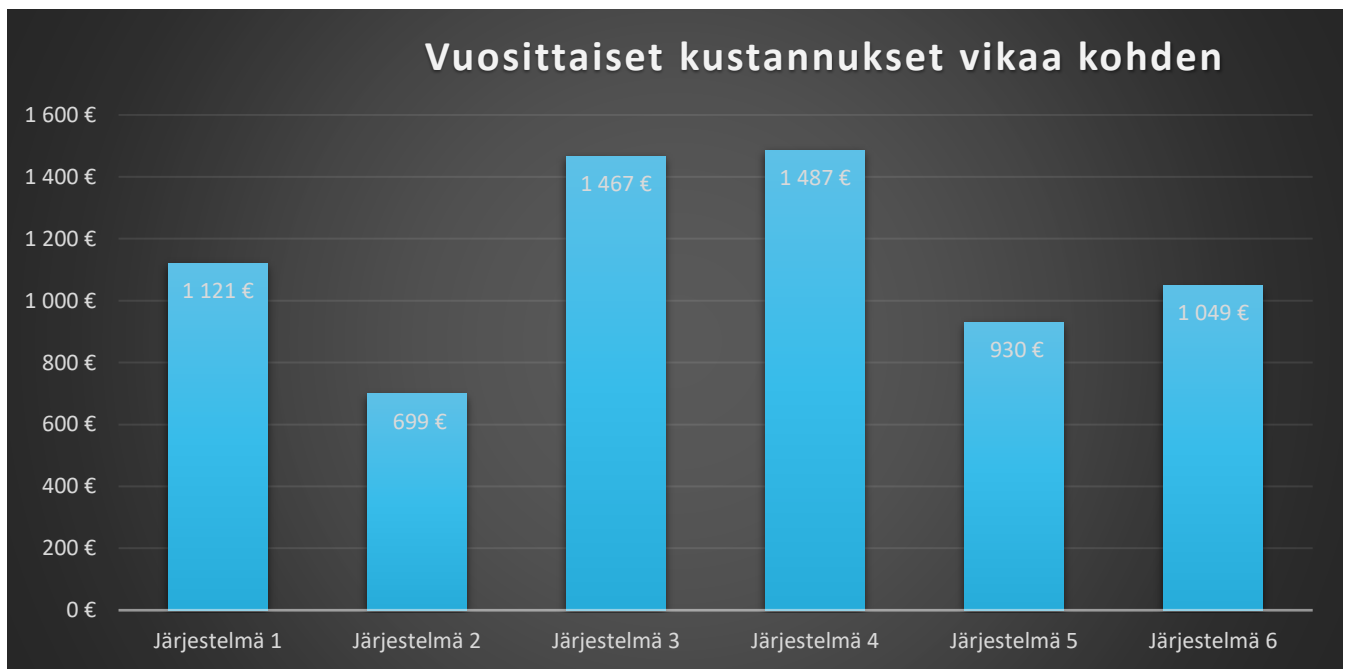
Kuvio 22 Vuosittaiset kustannukset mittapistemäärää kohden

Järjestelmä 6 nousee vertailussa kalleimmaksi järjestelmäksi, joka johtuu siitä, että ylläpitokustannukset kattavat koko tehtaan kaikki Järjestelmän 6 mittalaitteet, vaikka mittapistemäärä on rajattu pienemmäksi. Jos järjestelmä 6 saataisiin hyödynnettyä koko tehtaan laajuisesti, laskisi mittapistemäärään suhteutetut kustannuksia merkittävästi ja järjestelmä 6 olisi yksi halvimmista järjestelmistä. Järjestelmän 2 vuosittaiset kustannukset koostuvat valvontakustannusten lisäksi analysointiohjelman ylläpitokustannuksista, laitteiden leasing- ja ylläpitokustannuksista. Lisäksi laskelmassa on käytetty kaikkien laitteiden kohdalla leasing-hintoja, vaikka osa vanhemmista käytössä olevista laitteista on yrityksen omia. Tämä johtuu siitä, että nykytrendin mukaan uusien laitteiden hankkiminen on epätodennäköistä.

Online-järjestelmien vertailussa järjestelmä 5 suoriutuu parhaiten, koska se on niin vanha järjestelmä, että sillä ei ole laisinkaan ylläpitokustannuksia. Vuosittaiset kustannukset syntyvät valvontakustannuksista ja anturikorjauksista, joita on enemmän verrattuna muihin online-järjestelmiin, koska laitteisto ja komponentit ovat muita järjestelmiä vanhempaa. Tämä on huomioitu huoltokustannusten arvioinnissa ja niiden on arvioitu olevan uudempiin järjestelmiin verrattuna suuremmat. Muiden online-järjestelmien vuosittaiset kustannukset sisältävät valvontakustannukset, ylläpitokustannukset, anturikorjaukset ja asennukset sekä lisenssimaksut. Korkeiden valvontakustannusten lisäksi, online-järjestelmien ylläpitäminen on kohtuullisen kallista verrattuna

kannettavien mittalaitteiden ylläpitoon. Järjestelmällä 2 suoritettava valvonta on mittapistemäärään nähden halvin kunnonvalvontamenetelmä, ja sillä valvotaankin suurinta mittapistemäärää Imatran tehtailla.

Kunnonvalvontajärjestelmien kustannustehokkuutta voidaan määrittellä laskemalla kuinka paljon vian löytäminen maksaa keskimäärin kullakin järjestelmällä. Vuosittaiset kustannukset löydettyä vikaa kohden on esitetty kuviossa 23.



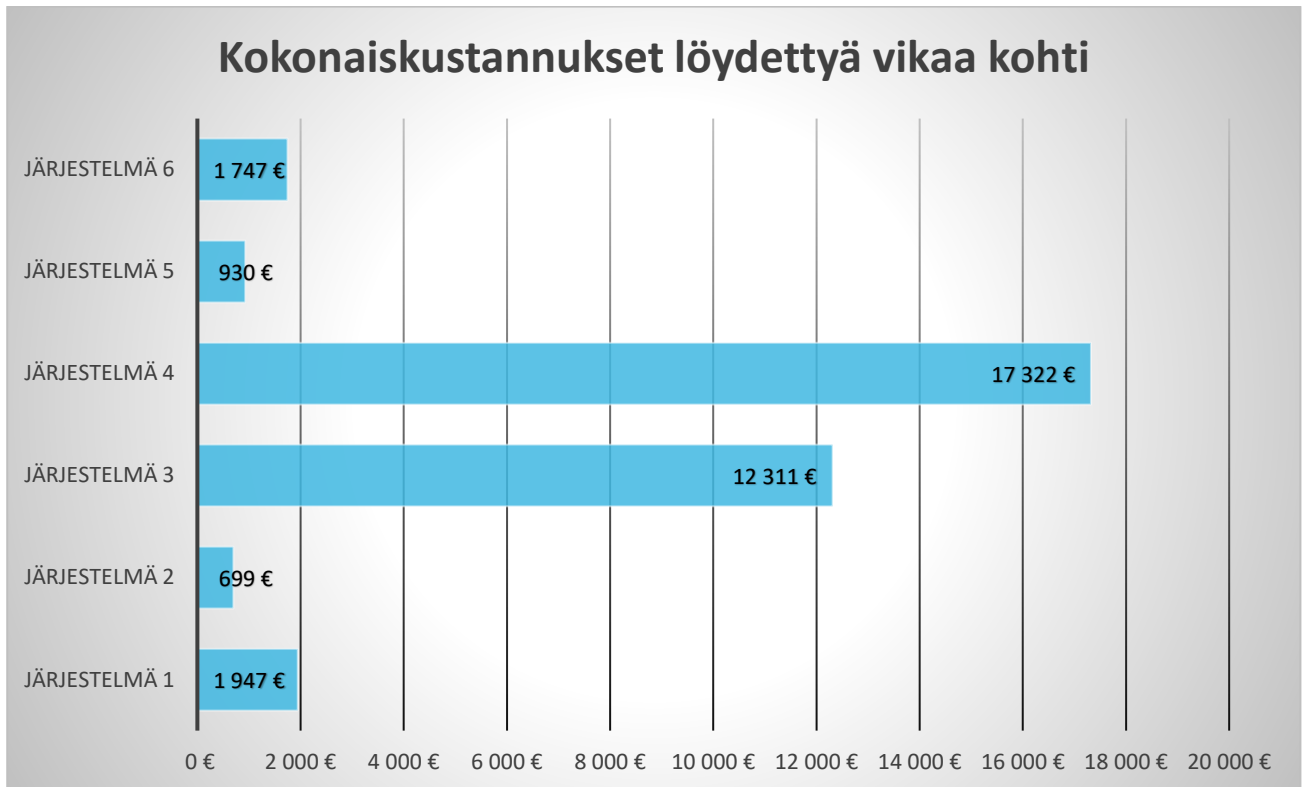
Kuvio 23 Vuosittaiset kustannukset vikaa kohden

Vuosittaiset kustannukset vikaa kohden ja vuosittaiset kustannukset mittapistemäärä kohden ovat toisiinsa nähden samankaltaiset. Ainut merkittävää muutos on järjestelmän 6 tehokkaampi vikojen löytämissuhde mittapisteesiin nähden. Myös järjestelmien 3 ja 4 väliset erot tasaantuvat, mutta muuten tulokset noudattavat samaa kaavaa kuviossa 21 esitettyjen tulosten kanssa.

#### 8.4 Kokonaiskustannusten vertailu

Kun tarkastellaan kustannuksia vielä laajemmin ja otetaan huomioon uudempien kunnonvalvontajärjestelmien investointikustannusten poistot sekä järjestelmällä 6 suoritettavaan valvontaan tuo-

tannon henkilöstön mittauskierrosten kustannukset, saadaan hieman laajempi kuva kunnonvalvontaan käytettävistä resursseista. Kuviossa 24 on esitetty kokonaiskustannukset suhteessa löydettyihin vikoihin.



Kuvio 24 Kokonaiskustannukset löydettyä vikaa kohden

Kun tarkastellaan järjestelmien kokonaiskustannuksia, havaitaan että verrattuna muihin kustannuksiin investointikustannuksista syntyvät poistot ovat suuruudeltaan moninkertaisia verrattuna muihin kustannuksiin. Tarkasteltaessa kokonaiskustannuksia syntyy järjestelmien välille suuria eroja. Online-järjestelmissä investointikustannusten poistot muodostavat suuren osan kustannuksista ja etenkin järjestelmät 3 ja 4 ovat vertailun perusteella muihin järjestelmiin verrattuina kalliita. Järjestelmän 5 kokonaiskustannukset jäävät alhaisiksi, koska sen kustannukset eivät sisällä investointikustannuksia, sillä järjestelmä on hankittu tehtaalle niin kauan aikaa sitten. Jos investoitaisiin uudempaan järjestelmään, kustannukset nousisivat samalle tasolle järjestelmien 3 ja 4 kanssa. Järjestelmän 1 investointikustannukset ovat suhteellisen pienet verrattuna järjestelmiin 3 ja 4, mutta muodostavat kuitenkin merkittävän kuluerän, joka kasvattaa kokonaiskustannusten määrää ja heikentää kustannustehokkuutta. Järjestelmän 6 mittauskierrosten kustannustehokkuutta hei-

kontrollia tuotannon käyttämät valvontaresurssit. Voidaan kuitenkin todeta, että järjestelmän 6 mittauskierroksen frekvenssit ovat keskiarvon mukaan noin 1.kierros päivää kohden, näin ollen voidaan arvioida, että se ei kuluta liikaa resursseja tuotannon työntekijöiltä. Järjestelmän 2 kokonaiskustannukset eivät eroa vuosittaisista kustannuksista, koska mittalaitteiden kustannuslaskenta on toteutettu niin, että kaikki käytössä olevat laitteet ovat leasing-laitteita. Toimivalla kunnonvalvonta kokonaisuudella voidaan välttyä mahdollisilta tuotannon menetyksiltä ja turvallisuushaitoilta, joten vaikka kokonaiskustannukset nousevat korkeiksi on kunnonvalvontaan panostaminen kannattavaa, jos sen avulla pystytään välttämään konelinjojen suunnittelemattomia seisokkeja ja ennakoimaan laitteiden vikaantumisia.

## 9 Pohdinta ja tulosten luotettavuuden arviointi

Tässä opinnäytetyössä luotettavuuden kannalta suurimmat ongelmat olivat lyhyt tarkasteluajanjakso ja kustannusten vertailukelpoisuus. Vuoden mittainen ajanjakso on liian lyhyt esimerkiksi löydettyjen vikojen seurantaan, joka voidaan havaita esimerkiksi järjestelmien 3 ja 4 välisissä eroissa, vaikka järjestelmät ovat lähes identtiset. Opinnäytetyötä tehdessä ei kuitenkaan ollut mahdollisuutta tarkastella löydettyjä vikoja pidemmältä ajanjaksolta, koska löydetyistä vioista ei ollut dataa pidemmältä ajanjaksolta. Vikojen määrä ei myöskään välttämättä suoranaisesti kerro kunnonvalvonnan tehokkuudesta, sillä vikoja on paljon erilaisia ja niiden aiheuttamat mahdolliset seuraukset eivät välttämättä ole verrattavissa kaikissa tapauksissa, ja niitä voi olla vaikeaa arvioida. Teollisessa ympäristössä laitteiden elinkaaret ovat kohtuullisen pitkiä ja laitteiden kestoikänsä verrattuna lyhyellä tarkasteluvälillä pelkästään vikojen määrä ei välttämättä ole paras mittari tehokkuudelle. Kustannuksia muodostettaessa jouduttiin tekemään paljon arviointia ja oletuksia, jotka omalta osaltaan muodostavat virhettä todellisuuteen verrattuna, mutta tämän voidaan arvioida olevan kohtuullisen vähäistä, sillä kaikille järjestelmille on käytetty samoja arviointimenetelmiä. Tarkasteluajanjaksolla oli normaalia enemmän seisokkeja, joiden aikana ei voitu löytää valvottavista laitteista vikoja. Tämän takia konelinjojen ja näin ollen kunnonvalvontajärjestelmien käyttöasteille tuli eroja, joka vaikuttaa lopputuloksiin. Vikaantuneet anturit luovat omalta osaltaan virhettä online-kunnonvalvonnan tehokkuuteen. Järjestelmissä 3,4 ja 5 oli anturivikoja suhteellisen vähän ja niillä ei ole merkittävää vaikutusta vertailussa. Järjestelmän 1 paristokäyttöisissä antureissa oli enemmän ongelmia loppuun kuluneiden paristojen takia, joka heikensi järjestelmän vikojen löytö mahdollisuuksia merkittävästi.

Vertailun pohjaksi luotujen tunnuslukujen perusteella voidaan todeta, että kokonaisuudessaan järjestelmä 2 ovat kustannustehokkain vaihtoehto värähtelyvalvonnan toteuttamiseen. On kuitenkin tärkeää huomioida, että valvottavat kohteet ovat erityyppisiä ja järjestelmällä 2 on mahdotonta valvoa kaikkia kohteita, joten kokonaisvaltaisen värähtelyvalvonnan toteuttamiseen on hyödynnettävä myös muita järjestelmiä. Vertailussa käy myös ilmi järjestelmän 6 potentiaali. Järjestelmän 6 toimintaa kehittämällä ja laajentamalla voitaisiin saada sen kustannustehokkuus entistä paremmaksi. Järjestelmä 6 on todellisuudessa löydetty enemmänkin vikoja työssä käytettyyn aineistoon verrattuna, koska osa kierroksilla tehdyistä havainnoista on ilmoitettu suoraan eteenpäin, jolloin kunnonvalvonnan mittalaitteelle kohdennettu kirjaus puuttuu. Näin ollen tieto löydetyistä viasta ei päädy samaan mittariin muiden vikojen kanssa. Tämä nostaa järjestelmän 6 kokonaisyhyötyä ja tehokkuutta merkittävästi verrattuna muihin järjestelmiin. Järjestelmän 6 kustannustehokkuutta voitaisiin parantaa pienentämällä kunnonvalvontamittaajille tulevien turhien ilmoitusten määrää. Tällä hetkellä turhia ilmoituksia tulee runsaasti, joka kuluttaa resursseja turhaan. Tätä voitaisiin kehittää järjestämällä järjestelmän 6 mittauskierrosten suorittamiseen koulutusta ja muuttamalla mittausten hälytysrajoja. Vaikka online-kunnonvalvontajärjestelmien kustannustehokkuus ei ole parhaimmalla tasolla, tulee ottaa huomioon niiden käyttökohteet. Kiinteät anturit voidaan kiinnittää kohteisiin, joihin ei päästä käsimittalaitteella mittaamaan sijainnin tai olosuhteiden takia, joten kiinteät anturit parantavat myös kunnonvalvontamittaajien työturvallisuutta. Online-järjestelmillä saadaan mittaustietoja tiheään tahtiin, joka mahdollistaa nopeasti kehittyvien vikojen havaitsemisen aikaisessa vaiheessa ja tarjoaa jatkuvan valvonnan ja seurannan mahdollisuuden, joka on käytövarmuuden kannalta erittäin hyödyllistä. Online-järjestelmillä valvotaan myös kriittisiä kohteita, joiden vikaantumiset voisivat aiheuttaa laajoja ja merkittäviä haittoja, kuten tuotannon keskeytymisen tai turvallisuus riskin. Näiden tekijöiden ansiosta online-kunnonvalvontajärjestelmät ovat suhteellisesti korkeammista kustannuksista huolimatta olennaisia ja välttämättömiä optimaalisen kunnonvalvonnan toteutuksen kannalta.

Työn tärkeimpänä tavoitteena ja tehtävänä oli laskea, kuinka paljon yhden vian löytäminen maksaa kullakin järjestelmällä, joka saatiin toteutettua suunnitellulla tavalla. Muita tavoitteita oli muodostaa kunnonvalvontajärjestelmien kokonaiskustannukset ja tunnuslukuja kannattavuuden vertailuun, jotka saatiin myös toteutettua suunnitelman mukaisesti.

## Lähteet

ISO-10816-6. 1995. Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW. International organization for Standardization.

Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas: Miten kirjoitan kehittämistutkimuksen vaihe vaiheelta. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 20.1.2024

Koistinen, J 2022. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. PSK-Käsikirja 3. Copy-set Helsinki. 20. Painos

Kunnossapidon käsitteet ja määritelmät, N.d. Verkkomateriaali Opetushallituksen verkkosivuilla. Viitattu 4.2.2024 [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet\\_2-1\\_kunnossapidon\\_kasitteet\\_ja\\_maaritelmat.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_2-1_kunnossapidon_kasitteet_ja_maaritelmat.html)

Mikkonen, H. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Kunnossapidon julkaisusarja - n:o 13. KP-media Helsinki.

Nohynek, P. & Lumme, V E. 2004. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Kunnossapidon julkaisusarja - n:o 11. 2 täydennetty painos. KP-Media Rajamäki.

PSK 6201. 2022. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. PSK Standardisointiyhdistys. 4. Painos.

PSK 5701. 2022. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. käsitteet ja määritelmät. Käytettävät suureet ja mittayksiköt. PSK Standardisointiyhdistys. 9. Painos.

PSK 5702. 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. PSK Standardisointiyhdistys. 3. Painos.

PSK 5703. 2018. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus. PSK Standardisointiyhdistys. 5. Painos.

PSK 5706. 2015. Kunnonvalvonnanvärähtelymittaus. Valvontamenetelmät. PSK Standardisointiyhdistys. 4. Painos.

PSK 5707. 2019. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmäärittäminen. PSK Standardisointiyhdistys. 6. Painos.

PSK 5722. 2024. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaus toiminnan suunnittelu. PSK Standardisointiyhdistys. 6. painos.

PSK 7502. 2010. Prosessiteollisuuden kunnossapidon tunnusluvut. PSK Standardisointiyhdistys. 2. Painos.

QuickCollect sensor. N.d. Sähköinen tuote-esite SKF:n www-sivuilla. Viitattu 29.3.2024

<https://www.skf.com/my/products/condition-monitoring-systems/basic-condition-monitoring-products/vibration-measurement/quickcollect-sensor>

SFS-EN 13306. 2017. Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia. Suomen standardoimisliitto. 3.painos.

Sulzer Sense kunnonvalvonta ratkaisu. N.d. Tuote esite Sulzerin www-sivuilla. Viitattu 3.2.2024

<https://www.sulzer.com/fi-fi/finland/shared/products/sulzer-sense-condition-monitoring>

The SKF Microlog series catalogue. 2018. Sähköinen tuote-esite. Viitattu 29.3.2024

[09462ea5c79b245d\\_pdf\\_preview\\_medium.pdf \(skf.com\)](https://www.skf.com/09462ea5c79b245d_pdf_preview_medium.pdf)

Tutkimusetiikan neuvottelukunta (TENK). 2023. Hyvä tieteellinen käytäntö (HTK). Verkkojulkaisu

TENK:n verkkosivuilla. Viitattu 24.1.2024 <https://tenk.fi/fi/hyva-tieteellinen-kaytanta-htk>

Vibration training quick reference. 2011. Mobius instituutin oppikirja.

