

Ville Lahti

# HAMMASPYÖRIEN KOELAITTEEN KÄYNNINVALVONNAN KEHITTÄMINEN

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Diplomityö  
Tammikuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Ville Lahti: Hammaspyörien koelaitteen käynninvalvonnan kehittäminen  
Diplomityö, 59 sivua  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan diplomi-insinööri tutkinto-ohjelma  
Tammikuu 2020

---

Hammaspyörien väsytykestävyydestit ovat oleellinen osa tehonsiirtolaitteiden kehitystä. Hammaspintojen väsyminen aiheuttaa hammaskylkien kuoppautumista, josta seuraavat hammasprofiilien muutokset ja lopulta hammaspyörien vaurioituminen käyttökelvottomaksi. Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia ja kehittää hammaspyörien koelaitteen käynninvalvontalaitteiden ja -menetelmien toimivuutta ja luotettavuutta erityyppisissä koeolosuhteissa. Tutkimuksessa hyödynnettiin jo koelaitteeseen asennettuja öljyn jatkuvatoimista partikkelilaskentaa ja värähtelymitauksia.

Hammaspyörien väsytykestävyydestit suoritettiin FZG-koelaitteella, jossa testipyöriä ajettiin standardin mukaisella kuoppautumistestillä vakio kuormituksella. Väsytystestejä tehtiin kolmella eri materiaalityypillä. FZG-koelaitteen öljyn puhtautta seurattiin kolmella jatkuvatoimisella partikkelilaskurilla. Testipyörille menevän öljyn hiukkaspitoisuutta mitattiin laser partikkelilaskurilla ja testipyöriltä tulevan öljyn vastaavasti induktiivisella ja optisella partikkelilaskurilla. Kulumispartikkelien määrää mittaavan induktiivisen partikkelilaskurin toimintaa ja yleisesti kulumispartikkelien käyttäytymistä tutkittiin viidellä eri tyyppisellä kiertovoiteluratkaisulla. Värähtelyä mitattiin kiihtyvyysanturilla testivaihteen kotelon kulmasta.

Kokeissa saatujen tulosten perusteella partikkelit kumuloituvat herkästi esimerkiksi järjestelmässä olevien putkien kierteisiin ja poikkileikkausmuutoksiin. Näytteenotolla huomattiin testien aikana olevan suuri merkitys partikkelien kulkeutumiseen partikkelilaskurille. Induktiivinen partikkelilaskuri pystyi loogisella tavalla havaitsemaan eri kokoluokan partikkeleita. Öljyn puhtauden seurantaan kehitettiin koodi, jolla pystytään seuraamaan ja vertailemaan koelaitteeseen tulevaa ja palaavaa öljyä ISO 4406 luokituksen mukaisesti koko koeajojakson aikana optisella ja laser partikkelilaskurilla.

Hammaspyörien koelaitteella suoritettujen väsytystestien yhteydessä mitattiin kokonaisvärähtelyä 5 Hz – 5 kHz taajuudella. Tunnuslukuina käytettiin tehollisarvoa, kurtosis arvoa ja huippukerointa, joilla pyrittiin tunnistamaan ja seuraamaan vaurion kehittyminen reaaliaikaisesti koelaitteen käynninvalvonnassa. Tuloksen perusteella huippukeroin, kurtosis arvo ja tehollisarvo tuottivat vaihtelevia arvoja ajetun kuormitustason perusteella. Parhaiten tuloksista osoitti seuraavan vaurion kasvua tehollisarvo, jota on mahdollista käyttää koelaitteen käynninvalvonnassa.

Avainsanat: koelaitte, hammaspyörä, väsytykestävyydesti, öljyn kunnonvalvonta, värähtely

# ABSTRACT

Ville Lahti: Development of monitoring and diagnostics of gear test rig  
Master of Sciences Thesis, 59 pages  
Tampere University  
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering and Industrial Systems  
January 2020

---

Gear fatigue tests are an essential part of the development of power transmission devices. Tooth surfaces fatigue causes tooth flank pitting, which results in changes in tooth profiles and eventually damages the gears. The purpose of this master's thesis was to study and develop the functionality and reliability of the monitoring diagnostics of the gear test rig at different opening conditions. The study utilized continuous oil particle counting and vibration measurements already installed in the gear test rig.

Gear fatigue tests were performed with the FZG gear test rig, which was run according to the standardized pitting test at constant torque. Fatigue tests were performed on three different types of material. The oil cleanness of the FZG gear test rig was monitored with three continuous particle counters. The test wheels input oil was measured with a laser particle counter and the output oil with an inductive particle counter and an optical particle counter. In general, the functionality of the inductive particle counter and the behavior of wear particles were investigated using five different types of circulating lubrication solutions. The vibration was measured with an accelerometer from the corner of the test gears.

Based on the results obtained in the tests, the particles tend to accumulate easily, for example, in the threads and cross-sectional changes of the tubes in the system. Sampling was found to play an essential role in the migration of particles to the particle counter during the tests. The inductive particle counter was able to logically detect particles of different sizes. For oil cleanness monitoring, a code was developed to track and compare oil input and output to the test rig with an optical and laser particle counter throughout the test period according to ISO 4406.

During the fatigue tests performed on the gear test rig, vibration was measured at 5 Hz to 5 kHz frequency. The indicators were the root mean square value, the kurtosis value and the crest factor, which were used to identify and monitor the development of damage in real-time during the monitoring diagnostics of the test rig. Based on the result, the crest factor, the kurtosis value and the root mean square value produced variable values based on the running torque level. The root mean square values showed the best correlation with damage development, so it can be used in monitoring diagnostics of the gear test rig.

Keywords: gear test rig, gear wheel, fatigue wear test, oil condition monitoring, vibration

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö oli osa Tampereen yliopiston konetekniikan maisteriohjelman. Tämä diplomityö on tehty tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunnan Tribologia ja koneenosat –tutkimusryhmässä. Diplomityön tarkoituksena oli tutkia ja kehittää hammaspyörien koe-laitteen käynninvalvontalaitteiden ja -menetelmien toimivuutta ja luotettavuutta.

Haluan esittää kiitokset Tribologia ja koneenosat –tutkimusryhmän kollegoille hyvästä opastuksesta. Esitän myös kiitokset läheisilleni ja opiskelukollegoille hyvästä kannustuksesta. Erityisen suuri kiitos työni tarkastajille professori Arto Lehtovaaralle ja dosentti Juha Miettiselle asiantuntevasta opastuksesta ja arvokkaista neuvoista koskien diplomityötäni. Viimeisenä haluan kiittää yrityksiä Wärtsilä Finland Oy ja Kumera Drives Oy, jonka osaprojektina diplomityö tehtiin.

Tampereella, 31.01.2020

Ville Lahti

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KONEIDEN KÄYNNINVALVONTA.....	3
2.1 Käynnissäpito ja kunnossapito .....	3
2.2 Luokitukset.....	3
2.3 Käynninvalvonta.....	4
2.4 Vaurioiden ennakointi.....	6
3. VOITELUAINEIDEN VALVONTA.....	7
3.1 Voiteluaineen tarkoitus vaihteistoissa.....	7
3.2 Öljyn partikkelianalyysi .....	8
3.3 Puhtausluokat .....	11
3.4 Näytteenottomenetelmät .....	14
4. VÄRÄHTELYMITTAUS .....	15
4.1 Värähtelymittaus käynninvalvonnassa .....	16
4.2 Värähtelysignaalin analyysi .....	17
4.2.1 Aikataso.....	17
4.2.2 Taajuustaso .....	18
4.3 Diagnostiikka.....	20
5. HAMMASPYÖRIEN KOELAITE .....	22
5.1 Koelaite.....	24
5.2 Öljyanalyysin laitteistot.....	26
5.3 Väsytestien koemenetelmä.....	27
6. KEHITYSKOhteet .....	30
6.1 Koemenetelmien tarkastelu ja analysointi .....	31
6.1.1 Koe 1 .....	32
6.1.2 Koe 2 .....	32
6.1.3 Koe 3 .....	34
6.1.4 Koe 4 .....	36
6.1.5 Koe 5 .....	37
6.1.6 Näytteenotto .....	38
6.2 Partikkeli data-analyysi .....	40
6.3 Mittauksien luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä .....	43
6.4 Värähtelyanalyysi.....	45
6.5 Väsytestien käynninvalvonnan kehittäminen.....	52
7. YHTEENVETO.....	54
LÄHTEET .....	56

# 1. JOHDANTO

Kunnossapito käsitteenä on laaja. Tämä tutkimus keskittyy kunnonvalvontaan, joka on yksi osa kunnossapitoa. Kunnonvalvonnasta voidaan käyttää laajempaa termiä kuntoon perustuva kunnossapito. Kuntoon perustuva kunnossapito on ehkäisevää kunnossapitoa, joka perustuu kohteen toiminnan, suorituskyvyn ja muiden parametrien seurantaan, joiden havaintojen perusteella toimitaan. Kuntoon perustuva kunnossapito pitää sisällään kokonaisvaltaisesti myös muut asiaan kytkeytyvät kunnossapitotoiminnot. Kunnonvalvonta voidaan suppeasti mieltää pelkästään kunnossapidossa tehtäviin mittauksiin ja kunnossapito puolestaan vain korjaavaksi toiminnaksi [1]. Tästä johtuen tässä tutkimuksessa laitteiden toiminnan ja parametrien seuraamisesta käytetään termiä käynninvalvonta.

Hammaspyörien testaukseen on kehitetty useita erilaisia testejä, joilla pystytään analysoimaan hammaspyörien käyttäytymistä erilaisissa tilanteissa. Tutkimustyön kohteena olevalla koelaitteella pystytään suorittamaan testejä, joilla selvitetään esimerkiksi hammaspyörien kulumista, tahmautumista, kuoppautumista, tärinää, sekä hampaan juuren murtumaa [2]. Väsymiskestävyystestit ovat tärkeitä tehonsiirtolaitteiden kehittämisen kannalta. Hammaspintojen väsyminen aiheuttaa hampaissa kuoppautumista, josta seuraa hammasprofiilien muutokset ja lopulta hammaspyörien vaurioituminen. Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutkia ja kehittää hammaspyörien väsymiskestävyystesteissä käytössä olevien käynninvalvontalaitteiden ja -menetelmien toimivuutta ja luotettavuutta. Koelaitte on Tribologia ja koneenosat -tutkimusryhmän käytössä Tampereen yliopistolla. Käynninvalvonnalla halutaan tiedostaa hammaskylkien pinnoissa alkava kuoppautuminen hyvin aikaisessa vaiheessa, ennen asetettua vauriokriteeriä. Työssä keskitytään ensisijaisesti hammaskylkien vaurioitumisen seurantaan hyödyntäen koelaitteeseen jo asennettuja öljyn jatkuvatoimista partikkelilaskentaa ja värähtely mittauksia [3]. Koejärjestelyllä on saatu lupaavia tuloksia hammaskylkien vaurioiden seurannasta [4]. Tutkimustyön tarkoituksena on partikkelilaskennan ja värähtelymittauksien reaaliaikainen hyödyntäminen pitkäkestoisissa väsymiskestävyystesteissä. Testilaitteen kehityksen lopullinen tavoite on lyhentää testattavien hammaspyörien koeaikaa vähentämällä visuaalisia tarkastuksia. Tarkastukset suoritettaisiin väsymiskestävyystestien käynninvalvonnalla saadun mittausdatan perusteella, josta pystyttäisiin seuraamaan vaurioiden kehittymistä. Vaurioiden kehittyessä lähelle asetettua vauriorajaa vaurioiden kehittyminen

voidaan varmistaa visuaalisesti ja ne voidaan dokumentoida valokuvaamalla ennen ja jälkeen vauriorajan ylittymisen. Tutkimustyön tarkoituksena on myös saada jokaisesta väsymiskestävyystestistä sisällytettyä koeajoraportteihin värähtely- ja hiukkasanalyysi.

Käynninvalvontaa lähdetään tutkimaan ja kehittämään öljyn partikkelilaskurin toiminnan ja luotettavuuden tarkastelulla. Öljyn partikkelilaskurin tuottamaa dataa analysoidaan MATLAB-ohjelmalla ja värähtelyn kiihtyvyyssanturista saatua aikatazon signaalia imc FAMOS-ohjelmalla.

## 2. KONEIDEN KÄYNNINVALVONTA

### 2.1 Käynnissäpito ja kunnossapito

PSK 6201 standardissa ”Käynnissäpito” on määritelty seuraavasti: ”Käytön lisäksi käyttökunnon tehtäviin voi sisältyä kohteen käyttökuntoon liittyviä tehtäviä kuten, puhdistukset, voitelu, asetukset, tuotantokoneiden korjaukset sekä kunnonvalvontaa ja tuotantokyvyn seuranta”. PSK 6201 mukaan ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson aikana”. [5]

Tutkimuksen käynninvalvontaan liittyy olennaisesti käynnissäpito ja kunnossapito. Molemmat käsitteet ovat laajasti käytössä Suomen teollisuuden tuotantolaitoksissa, jossa ne hyvin tunnetaan standardien myötä [6]. Käsitteet määrittelevät liian vahvasti tuotantolaitoksissa tapahtuvaa korjaavaa toimenpidettä, mikä ei ole tutkimuksessa olennaista. Käynninvalvonnalla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa samaa, kuin tuotantolaitoksissa tapahtuvaa mittaavan kunnonvalvonnan seuraamista. Poiketen siinä, että tarkoituksena on havaita laitteessa alkava vaurioituminen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, eikä pelkästään säilyttää laite toiminnallisessa tilassa.

### 2.2 Luokitukset

Kunnossapito on mahdollista luokitella monellakin eri tavalla, esimerkkinä SFS-EN 13306 [7] ja PSK 7501 [8] luokitukset kunnossapidolle. Kunnossapitoyhdistyksen luokitus jakaa käsitteet viiteen osaan [9]:

1. **Huolto** ylläpitää laitteille asetetun vaatimuksen ja toimintaympäristön mahdollisimman hyvänä. Usein huolto ajoitetaan jaksotetuksi ja määrätään suoritettavaksi päivän, viikon tai vastaavasti vuoden välein.
2. **Ehkäisevä kunnossapito** sisältää kaikki jaksotetut kunnossapidon suoritteet, kuten kunnonvalvonta, kuntoon perustava ja ennustava kunnossapito. Ehkäisevän kunnossapidon tarkoituksena on tehdä huoltotyöt ennen laitteen rikkoutumista.

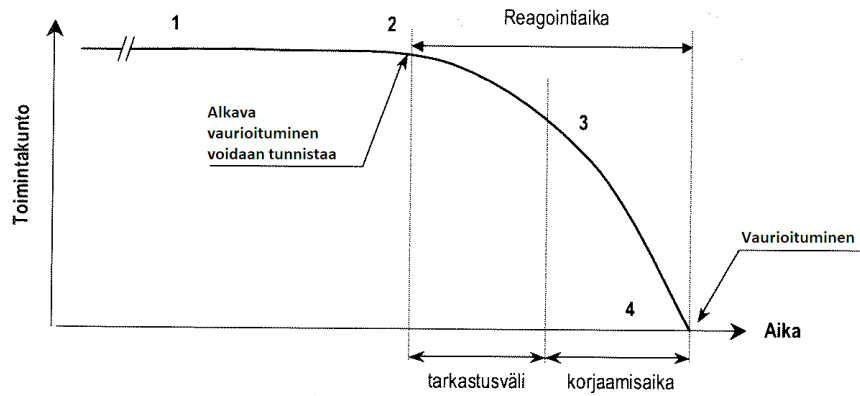


3. **Parantavalla kunnossapidolla** pyritään parantaman laitteiden luotettavuutta ja toimintavarmuutta tai modernisoidaan laitteet vastaamaan nykypäivän vaatimuksia ja uutta teknologian kehitystä.
4. **Korjaava kunnossapito** sisältää koneiden korjaus ja kunnostuksen. Siinä koneet palautetaan toimintakuntoon, jonkin komponentin rikkoutumisen johdosta.
5. **Viat ja vikaantumiset** selvitetään ja paikannetaan tuotannossa olevia tekijöitä, jotka epäedullisesti vaikuttavat prosessiin, kuten väärinkäyttö tai huonot komponentit.

Kunnossapidon luokitus on hyvä tehdä, kun aloitetaan kunnossapitostrategian suunnittelu. Luokituksella saadaan jaoteltua menettelytapoja ja määrittämiä. Luokitusten pohjalta pystytään ennakoimaan kunnossapidon henkilöstön tarve ja niiden sijoittuminen organisaatiossa. Myös talous, logistiikka ja valvontalaitteet pystytään suunnittelemaan määrittämiä pohjalta. Näillä luokituksilla pyritään varautumaan toiminnallisiin katkoksiin ja niiden estämiseen. Kunnossapidon kokonaisvaltaisella strategialla pyritään ennakointiin ja nopeaan reagointiin vian tullessa ilmi. [10]

## 2.3 Käynninvalvonta

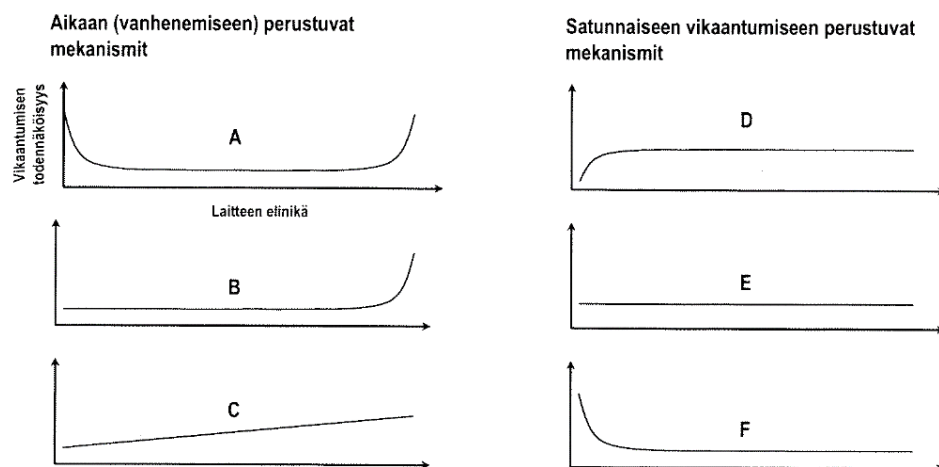
Hyvällä käynninvalvonnalla onnistutaan saavuttamaan suuria säästöjä. Käynninvalvonnassa on kuitenkin otettava huomioon, että kaikkien vikojen syntyä ei pystytä valvomaan. Jotkin viat voivat päästä kehittymään olosuhteissa, joissa niiden käynninaikaista kuntoa ei kyetä arvioimaan riittävän tarkasti. Tällöin laite usein rikkoutuu, kun vikaa ei onnistuttu paikantamaan sen alkuvaiheessa. Viat ovat tällöin satunnaisia ja niiden ennustaminen on vaikeaa, koska ne ovat ajallisesti niin suuresti jakautuneet. Satunnaisia vikoja voi muodostua hetkellisestä ylikuormituksesta. Näiden vikojen kehittymistä voidaan vähentää. Tihentämällä valvontaväliaikoja on mahdollisuus havaita vika alkuvaiheessa tai parantamalla ja analysoimalla rakennetta, asennusta, materiaalia ja virheellistä käyttöä. [11] Kuvasta 1 nähdään vikaantumisen kehittyminen. Mikäli vikaa ei havaita tarpeeksi ajoissa, reagointi-aika pienenee ja korjaukseen vaadittava aika on riittämätön.



**Kuva 1.** Vaurioitumisen vaiheet: 1. Vaurioituminen alkaa 2. Vaurio voidaan havaita 3. Reagointiaika 4. Vaurioituminen [9] muokattuna.

Säännöllisesti esiintyvien vaurioiden kehittyminen voidaan havaita toistuvuuden tai tiedossa olevan elinjaksoajan perusteella. Säännöllisesti vaurioituvien laitteiden kehityskulku johtuu yleensä kuluneesta osasta tai kuivumisesta. Tasavälein ajallisesti esiintyviin pystytään määrittelemään jaksotettu kappaleen vaihto ja ajallisesti satunnaisia, mutta säännöllisiä vaurioita pystytään paikantamaan määrävälein ajoitetuilla tarkastuksilla tai kiinteällä valvonnalla. Valvonta-aikoja määritettäessä on valittava riittävän tiheä valvonta-aika, jotta alkava vaurio pystytään havaitsemaan ajoissa. [11]

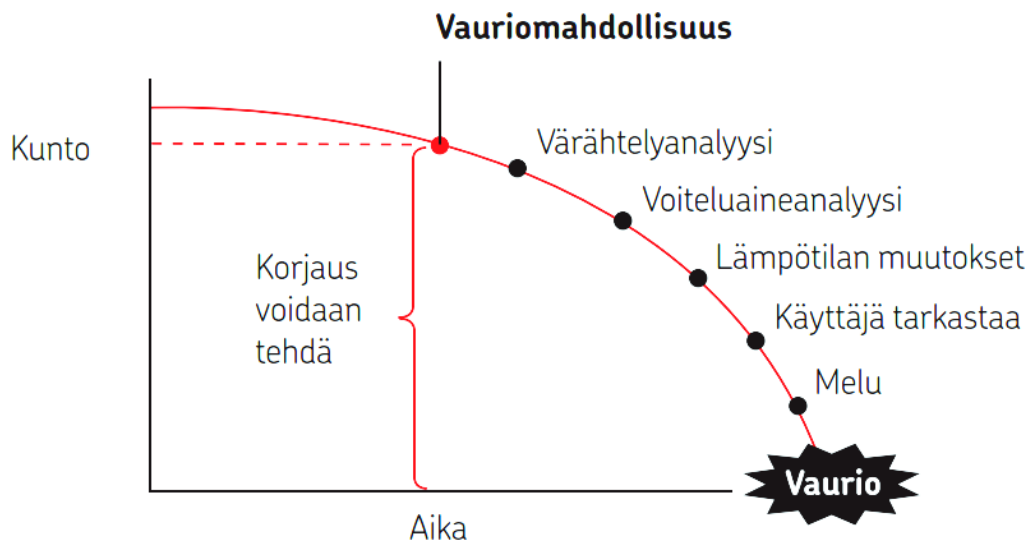
Kuvassa 2 on esitetty vikaantumisen todennäköisyyksiä laitteen elinjakson aikana. A) Kylpyamme-kuva, jossa alussa on suuri todennäköisyys laitteen vikaantumiselle, keskellä tasaista ja loppua kohden kasvaa voimakkaasti. B) Saman kaltainen kuin edellinen, mutta ilman alussa olevaa todennäköisyyttä vikaantumiselle. C) Tasaisesti nouseva vikaantumisen todennäköisyys, joka voidaan hyvin suunnitella jaksollista korjaavaa toimenpidettä.



**Kuva 2.** Vikaantumismalleja [9].

## 2.4 Vaurioiden ennakointi

Kun halutaan valvoa koneen todellista kuntoa reaaliaikaisesti, on hyvä suorittaa koneessa mittaavaa kunnonvalvontaa. Teollisuuden kaikissa koneissa tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, eikä kannattavaa. Kun konetta mitataan ja valvotaan koko ajan, ollaan tietoisia koneen todellisesta kunnosta. Vaurioiden kehittyminen pystytään myös selvittämään aikaisessa vaiheessa, joten tällä pystytään saamaan hyvin aikaa korjausten suunnitteluun ja varaosien tilaamiseen. Tuotannossa mittauksilla saataisiin hyvin estettyä yl-lättäviä tuotantokatkoksia. Mittaavassa kunnonvalvonnassa korjaukset suoritetaan vain tarvittaessa, ennen laitteen vaurioitumista. [12] Mittaavia kunnonvalvontamenetelmiä on hyvä hyödyntää käynninvalvonnassa. Kuvassa 3 on esitetty erilaisten mittauslaitteistojen vaurion havainnointikykyä laitteen toimintakuntoon nähden.



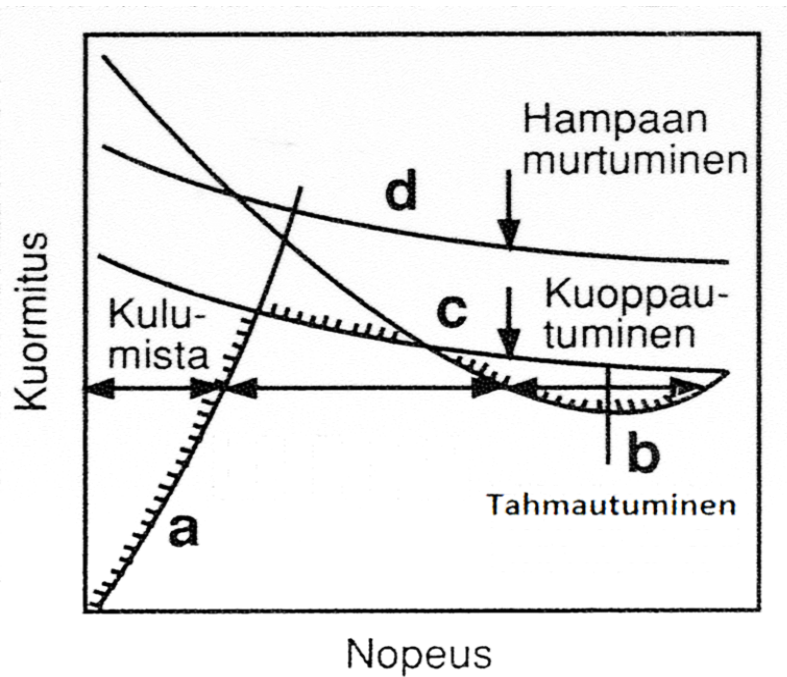
**Kuva 3.** Mittaavan kunnonvalvonnan vaurion havaitseminen [12].

## 3. VOITELUAINEIDEN VALVONTA

### 3.1 Voiteluaineen tarkoitus vaihteistoissa

Koneiden voiteluhuolto on ollut jo pidemmän aikaan osana teollisuutta. Oikeanlaisella voiteluhuollolla pystytään säästämään huolto- ja varaosakustannuksissa, sekä koneiden seisokkiaikoja saadaan lyhennettyä. Voiteluaineen ensisijainen tehtävä on vähentää kappaleiden välistä kitkaa pitämällä kappaleiden pinnat erotettuna toisistaan voitelukalvon avulla. Pienemmällä kitkalla kappaleiden kulumista ja lämpötilaa saadaan vähennettyä. Lisäksi öljy puhdistaa pintoja epäpuhtauksilta. [13]

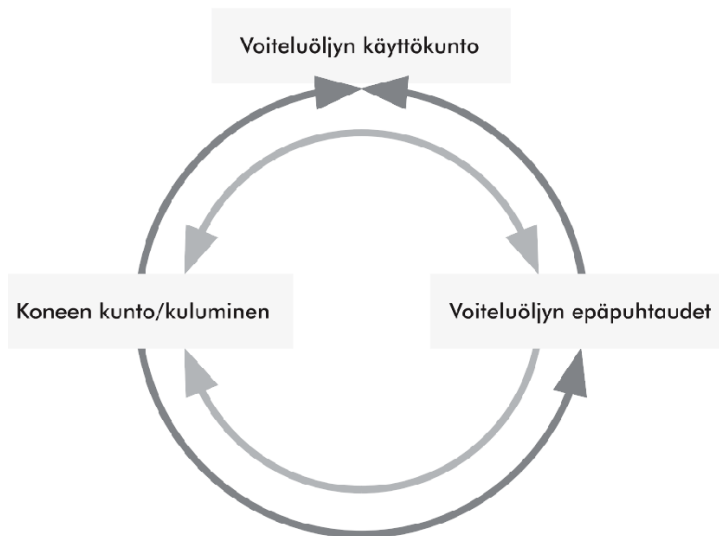
Vaihteistoöljyn ominaisuuksiin kuuluu ensisijaisesti ennaltaehkäistä hampaiden pinnoissa syntyviä pintavaurioita kaikissa olosuhteissa. Mikäli hammaspyörien voitelukalvo ei pysty pitämään hampaiden pintoja erillään, alkaa hampaissa esiintyä mikroskooppista kuoppautumista tai tahmutumista. Kuvassa 4 on esitetty vauriotyyppin riippuvuutta kehänopeudesta ja hampaisiin kohdistuvasta kuormituksesta. Kuvasta nähdään mihin asti voitelukalvo pystyy pitämään rynnössä olevien hampaiden pinnat riittävän erillään voimakkaan kulumisen ehkäisemiseksi (käyrä a). Käyrä pystytään määrittämään hydrodynaamisen voiteluteorian avulla. Paikallinen kosketus aiheuttaa kulumista hampaissa (käyrän a vasen puoli). Käyrä b esittää pintojen tahmutumista. Nopeuden kasvu saa tahmutumisrajan alenemaan, koska hampaiden välissä kasvava liukunopeus nostaa kitkalämpöä. Käyrä c osoittaa rajaa, missä pintojen väsymisestä johtuva kuoppautuminen alkaa hampaiden pinnassa kuormituksen kasvaessa. Käyrän c raja on vaikuttaa erityisesti hammaspyörien materiaali ja lämpökäsittely, mutta myös öljyn viskositeetti ja sen lisäaineet voivat muuttaa kuoppautumisrajaa. Käyrä d esittää hampaiden tyvimurtumista liiallisesta kuormituksesta. [14]



*Kuva 4. Vaihteiston vauriotyypit [14] muokattuna.*

### 3.2 Öljyn partikkelianalyysi

Jatkuvasti muuttuvat tilanteet ja uusiin haasteisiin vastaaminen asettavat korkeita vaatimuksia ennakoivalle kunnonvalvonnalle ja sen yhtenä osa-alueena toimivalle öljyn kunnonvalvonnalle. Voiteluöljyn analyysit kehittyvät ja tuloksista saadaan entistä enemmän tietoa koneen kunnosta. Voiteluöljyä voidaan jopa pitää yhtenä koneen osana. Analyysimenetelmillä voidaan määritellä koneen ja prosessin kuntoa, kuluneisuutta ja voitelun tehokkuutta. Voiteluöljyn epäpuhtauksien perusteella saadaan selville koneen kuluneisuus. [15] Kuvasta 5 nähdään käyttökunnon, epäpuhtauksien ja kuluneisuuden keskinäiset riippuvuudet.



**Kuva 5.** Voiteluöljyyn liittyvät keskinäiset riippuvuudet [16].

Öljyssä tapahtuu kemiallisia ja fysikaalisia muutoksia sen käytön aikana. Koneesta tai prosessista liukenee tai irtoaa kulumisen seurauksena epäpuhtauksia öljyyn. Jokainen koneen käynnistys, pysäytys ja käytöstä tulevat kuormitusvaihtelut synnyttävät rajavoitelutilanteita, missä voiteluöljyn kuormankantokyky voi pettää. Tällaisissa tilanteissa koneenosien liukuvien ja vierivien pintojen kulumisen lisääntyy. [16] Lisäksi ilmasta tulevat kosteus ja pöly, sekä korkea lämpötila aiheuttavat muutoksia öljyssä. Öljyn kunnonvalvonta onkin kaikkien tapahtumien seuraamista ja niihin reagoimista oikeaan aikaan. Öljyn kuntoa seurataan erilaisilla analyyseillä ja mittalaitteilla. Erilaiset öljyn analyysimenetelmät pyritään ryhmittelemään koejärjestelmävaatimusten mukaisesti. Taulukossa 1 on esitetty kaksi eri analyysia: perus- ja lisäanalyysi partikkelianalyysointiin. Öljyanalyyseilla pyritään saamaan vastaus seuraaviin kysymyksiin:

- Onko öljyssä säilynyt riittävä voiteluominaisuus?
- Öljyn riittävä puhtaustaso, jota voideltava laite vaatii.
- Voiko voiteluöljyn kulumishiukkasista määritellä koneen kuluneisuus?
- Tarvitaanko korjaavia toimenpiteitä analyysin tulosten pohjalta?

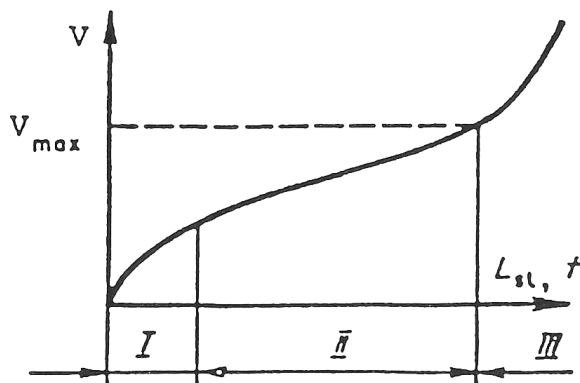
**Taulukko 1.** Tutkittavien öljyanalyysien jaottelu [15].

Perusominaisuuksien analyysit	Hiukkasanalyysit	Kulumametallianalyysi
Yleisimmät perusanalyysit	Epäpuhtaushiukkasten määrä ja kokojakauma	Koneenosien alkuainepitoisuudet (AAS, ICP)
Lisäaineanalyysit	Hiukkasten laatu ja muoto mikroskoopilla	Ferrografia – analyytinen (mikroskooppi), suorakulma-menettelmä

Voiteluöljyn yleisempiin perusanalyyseihin voidaan luokitella ne, jotka kaikista eniten ovat käytössä öljyn kunnonvalvonnassa, riippumatta öljyn laadusta tai käyttökohteesta. Perusanalyysillä pystytään yleisemmin tarkistamaan öljyn käyttökelpoisuus koneelle ja määrittämään tarvittaessa lisäaineanalyysit.

Ulkonäkö on yksi yleisemmistä analyyseistä ja se kertoo öljystä paljon kokeneelle analyysoijalle. Ulkonäön perusteella pystytään nopeasti havaitsemaan väri, sameus, kiinteiden epäpuhtauksien määrä ja koko. Normaalia suurempi kulumishiukkasten määrä indikoi koneen kulumisongelmasta ja antaa aiheita määrittellä tarkempi hiukkasanalyysi. [15]

Koneen käydessä sen kuluminen vaihtelee elinjakson mukaan: kuvan 6 mukaisesti koneen sisäänajossa (I) voiteluöljyyn irtoaa runsaasti hiukkasia, riippuen kulumisen kohteena olevan kappaleen pinnanmuodosta ja karheudesta. Normaaliin ajon saavuttaessa (II) hiukkasten määrä tasoittuu. Voimakasta kulumista tapahtuu elinjakson loppuvaiheessa (III). Hiukkasten muoto ja koko voi vaihdella elinjakson mukaan. Kulumisen perusteella voidaan valvoa koneen kuntoa. [17]



**Kulumisen (V) toiminta-ajan funktiona.**

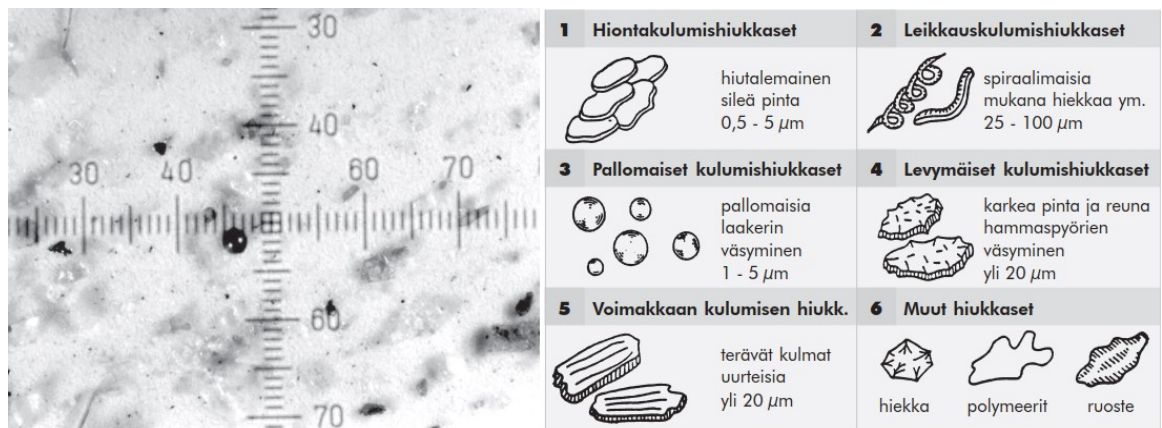
**Vaiheet: I Sisäänajokuluminen**

**II Tasainen kuluminen**

**III Voimakas (tuhoava) kuluminen**

**Kuva 6.** Kulumisen eri vaiheet [17].

Kun halutaan tarkastella paremmin öljyn sisältämiä hiukkasia, voidaan käyttää mikroskooppitarkastelua. Mikroskoopilla saadaan selvitettyä kulumishiukkasista muoto ja koko. Menetelmällä on myös merkitystä vika- ja vauriodiagnostiikassa. Kulumishiukkasien muodosta voidaan saada tietoa, mistä kuluminen on johtunut. [16] Kuvassa 7 on mikroskooppikuva, jossa on öljyn sisältämiä epäpuhtauksia ja eri kulumismekanismeista tulevia hiukkasia.



**Kuva 7.** Öljyn mikroskooppikuva epäpuhtauksista ja eri kulumismekanismeista tulevia hiukkasia (pienien viivojen väli mikroskooppikuvassa on 20 mikrometriä) [16].

Kappaleissa 3.3 ja 3.4 on tarkennettu partikkelianalyysia kulumishiukkasien koko- ja näytteenoton merkityksillä.

### 3.3 Puhtausluokat

Voiteluöljyn pitäminen puhtaana nostaa koneiden käyttöjaksoa ja käyttövarmuutta. Voiteluaineessa olevat epäpuhtaudet aiheuttavat koneissa hankaavaa kulumista ja heikentävät käyttöikää. Käytännössä öljyn puhtaudesta on suora yhteys sen käyttöikään. Öljyn suodatuksella saadaan pidettyä öljy halutulla puhtaustasolla. Öljyssä oleville partikkeleille on asetettu suuruusluokat. Luokituksessa tarkastellaan, kuinka monta kappaletta partikkeleita on yhdessä millilitrassa öljyä. [18]

Öljyn puhtausluokituksen ilmoitukseen voidaan käyttää standardeja ISO 4406 ja SAE AS4059. Puhtausluokitus kertoo, kuinka paljon öljyssä on kiinteitä partikkeleita. Puhtausluokat on yksinkertaistettu tapa ilmoittaa partikkelien määrä öljyssä.

ISO-4406:2017 on tällä hetkellä uusin korvaava standardi öljyn puhtausluokien tarkasteluun. Tässä diplomityössä kuitenkin käytetään ISO 4406:1999 standardia, koska mit-



tauksissa käytetyt laitteistot käyttävät vanhan standardin mukaista laskentaa öljyn partikkelien suhteen. Taulukossa 2 on esitetty ISO 4406:1999 standardin partikkelien jako asteikolla 0 – 28.

**Taulukko 2.** ISO 4406:1999 asteikon jako, kappaletta partikkeleita millilitrassa [19].

Asteikko (ISO code)	> Minimi	≤ Maksimi	Asteikko (ISO code)	> Minimi	≤ Maksimi
<b>0</b>	0,00	0,01	<b>15</b>	160	320
<b>1</b>	0,01	0,02	<b>16</b>	320	640
<b>2</b>	0,02	0,04	<b>17</b>	640	1300
<b>3</b>	0,04	0,08	<b>18</b>	1300	2500
<b>4</b>	0,08	0,16	<b>19</b>	2500	5000
<b>5</b>	0,16	0,32	<b>20</b>	5000	10000
<b>6</b>	0,32	0,64	<b>21</b>	10000	20000
<b>7</b>	0,64	1,3	<b>22</b>	20000	40000
<b>8</b>	1,3	2,5	<b>23</b>	40000	80000
<b>9</b>	2,5	5	<b>24</b>	80000	160000
<b>10</b>	5	10	<b>25</b>	160000	320000
<b>11</b>	10	20	<b>26</b>	320000	640000
<b>12</b>	20	40	<b>27</b>	640000	1300000
<b>13</b>	40	80	<b>28</b>	1300000	2500000
<b>14</b>	80	160	<b>&gt;28</b>	2500000	

Öljyn puhtausluokituksen määrittäminen tapahtuu laskemalla öljyyn sekoittuneiden epäpuhtauksien kappalemäärä ja skaalaamalla saatu tulos vastaamaan taulukon 2 asteikon arvoa. Laskenta voidaan tehdä taulukossa 3 esitettyjen menetelmien mukaisesti: Automaattisesti, kuten online-mittalaitteistolla, joka laskee virtaavasta öljystä epäpuhtaudet. Manuaalisesti mikroskoopilla pullonäytteestä, joka on otettu testattavasta koneesta. Epäpuhtauksien laskenta suoritetaan joko kahdessa tai kolmessa eri kokoluokassa, riippuen laskentamenetelmästä. Automaattisessa kumulatiivisessa partikkelien laskennassa tuloksena on kolmen luvun yhdistelmä, esimerkkinä 18/14/8 taulukon 3 mukaisesti. Ensimmäinen numero (18) esittää partikkeleita, jotka ovat yli 4 µm(c) (mikrometriä), toinen (14) kaikkia yli 6 µm(c) ja viimeinen (8) kaikkia yli 14 µm(c). Kumulatiivinen partikkelien laskenta tarkoittaa sitä, että kun lasketaan >6 µm(c) partikkeleita, niin koko luokan 14 µm(c) partikkelit ovat mukana laskennassa. Mikroskoopin asteikko käsittää vain kaksi numeroa: yli 5 µm ja yli 15 µm kokoiset. Tutkittaessa epäpuhtauksia manuaalisesti mikroskoopilla, saadaan myös selville partikkelien laatu ja muoto. [19]

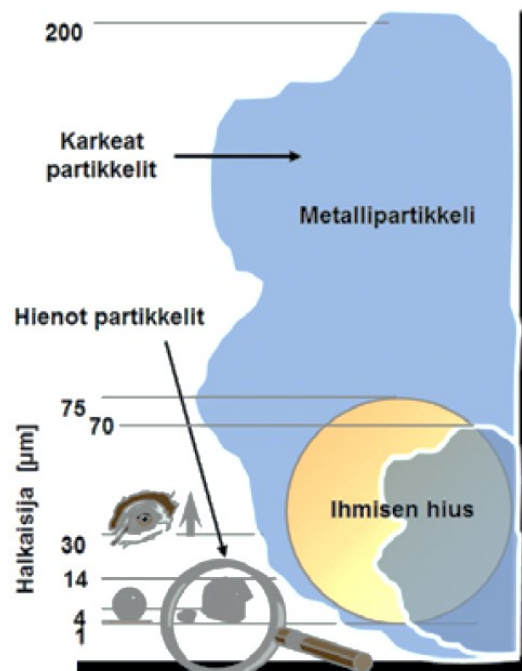
**Taulukko 3.** öljyn puhtausluokituksen esittäminen.

	18	/	14	/	8
Automaattinen laskenta	> 4 $\mu\text{m(c)}$		> 6 $\mu\text{m(c)}$		> 14 $\mu\text{m(c)}$
Mikroskooppi			> 5 $\mu\text{m}$		> 15 $\mu\text{m}$

Jalostamoilta tuleva uusi hydraulikkaöljy ei välttämättä ole tarpeeksi puhdasta. Kuljetukset ja öljyn säilyttäminen vaikuttavat oleellisesti sen puhtauteen. Vaikka säilyttäminen ja kuljetus olisi suoritettu jalostamolta aina loppukäyttäjälle asti asianmukaisesti, voi uuden öljyn puhtaustaso olla ISO 4406 mukaan 23/21/18. Nykyaikaiset hydraulikkajärjestelmät vaativat aiempaa puhtaampaa öljyä toimiakseen moitteettomasti. [20] Taulukossa 4 on esitetty erilaisia suuntaa antavia puhtaustasoja järjestelmille. Kuvassa 8 on esimerkki kuva partikkelien kokoluokasta, kun vertailun kohteena on ihmisen hius.

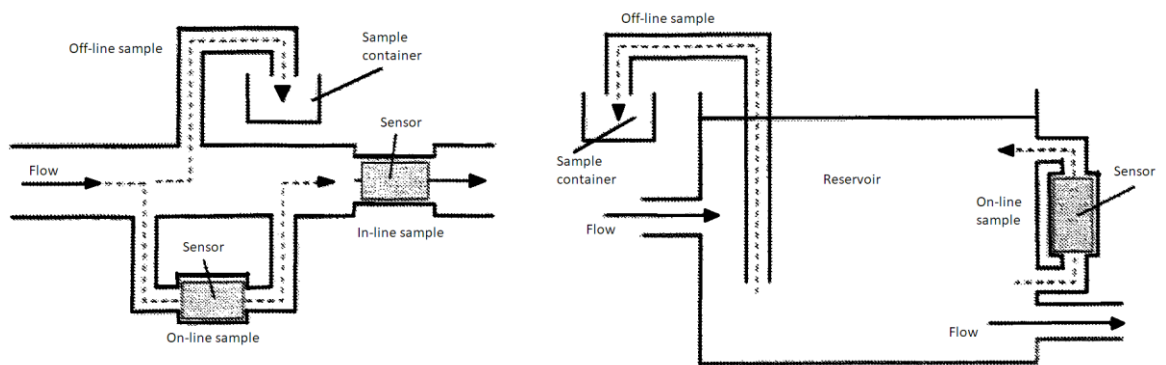
**Taulukko 4.** Suosituksia järjestelmien puhtausluokaksi [21].

Järjestelmä	Puhtausluokka, ISO 4406
Servohydrauliikka	16/13/10
Proportionaalihydrauliikka	19/16/13
Normaali hydraulikka	21/18/15
Kiertovoitelu	25/22/16

**Kuva 8.** partikkelien kokoluokat vertailtuna [20].

### 3.4 Näytteenottomenetelmät

Öljyn kunnonvalvontaa suoritetaan ottamalla öljystä analysoitavaksi kelpaava näyte. Näytteenotto tapahtuu puhtaissa olosuhteissa, jolloin öljyjärjestelmän ulkopuolelta ei pääse likaa vaikuttamaan näytteen tulokseen. Näytteenotto on yksi kunnonvalvonnan olennaisin kohta. Väärällä tavalla otetusta näytteestä voidaan tehdä johtopäätökset, jotka johtavat turhiin toimenpiteisiin. Lisäksi otettujen näytteiden analysointi ja siitä johduneet toimenpiteet nostavat kustannuksia. [16] Näytteenotto voidaan suorittaa liikuteltavalla tai kiinteällä mittauslaitteistolla. Kenttäolosuhteissa työskennellessä näytteet otetaan ”offline” eli valuttamalla tai pumpaamalla erityisellä öljynäytepumpulla öljyä puhtaaseen näytepulloon. Kiinteiden laitteiden kanssa voidaan käyttää ”online” ja ”inline” mittausmenetelmää käyttäviä laitteistoja. Online-kunnonvalvonnassa ohjataan osa öljystä menevään anturille, joka määrittää öljyn puhtauden. Inline-kunnonvalvonnassa kaikki öljy virtaa anturille, joka määrittää puhtauden. Kuvassa 9 on esitetty öljystä otettavien näytteenottomenetelmät virtaavasta putkesta ja säiliöstä.



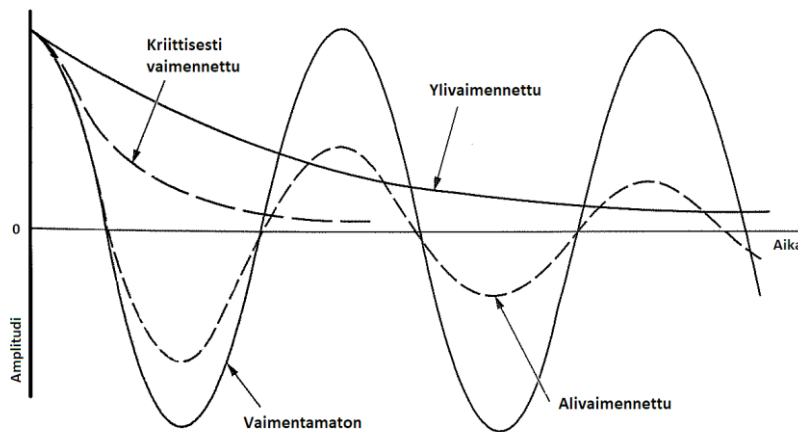
**Kuva 9.** Online-, Inline- ja Offline-näytteenottomenetelmät virtaavassa putkessa ja säiliöstä [22].

Offline-näytteiden ottamisella saadaan kattavat analysoinnit tehtyä. Offline ei kuitenkaan tarjoa reaaliaikaista kunnonvalvontaa koneesta, joka on toiminnassa. Ihanteellinen järjestelmä olisikin online-kunnonvalvonta liikuteltavalla alustalla, mikä mahdollistaisi reaaliaikaisen koneiden valvomisen. Öljyn online-kunnonvalvontaan on kehitetty erilaisia antureita partikkelien havainnointiin. Edistyneimpiä antureita partikkelien tunnistamiseen on induktiivinen, kapasitiivinen, akustinen ja optinen menetelmä. [23]

## 4. VÄRÄHTELYMITTAUS

Värähtelymittausta käytetään paljon ja se onkin yksi yleisimmistä menetelmistä kunnonvalvonnassa. Sitä käytetään käynninvalvonnan lisäksi vikaselvityksiin. Värähtelymittausta voidaan usein pitää yhtenä parhaista tavoista ennustaa vikaantumisen ennakoivassa kunnossapidossa. Erilaisia mittauslaitteita ja -menetelmiä on tarjolla laaja-alaisesti yrityksille. Ilman hyvää asiantuntemusta ja aikaisempaa kokemusta värähtelymittauksista on vaikea tietää, mitkä menetelmät ja laitteet ovat sopiva kyseisiin kunnonvalvonnan mittauksiin. [17]

Kaikki mekaanisesti toimivat koneet värähtelevät koneen käynnistä aiheutuvien herätevoimien takia. Joissain tapauksissa värähtely voi olla pientä ja luonnollista. Järjestelmä voi olla suunniteltu siten, että värähtely vaimennetaan hyvin tai rajataan halutulle tasolle. Voimakkaasti lisääntyvä värähtely voi tulla vierintälaakerista, vioittuneesta koneen komponentista tai valmistuksessa vahingoittuneesta osasta. Voimakas värähtely aiheuttaa rakenteellista heikkenemistä ja se voi johtaa koneen rikkoutumiseen. [24] Kuvassa 10 on esitetty harmoninen värähtely vaimentamattomana ja kolmella eri vaimennuksella.



**Kuva 10.** Harmoninen värähtely [25].

## 4.1 Värähtelymittaus käynninvalvonnassa

Värähtelymittaukset käynninvalvonnassa voivat laajimmillaan kattaa 0...1 GHz taajuusalueen. Ääni- ja ultraäänimittaukset perustuvat koneen pintojen aikaansaamiin värähteleviin paineaaltoihin, joita voidaan mitata ilmaääninä mikrofonilla. Koskettavilla mittausmenetelmillä mitataan suoraan laitteen pinnan värähtelyä. Mittausmenetelmiä on erilaisia, riippuen siitä halutaanko mitata korkea- vai matalataajuisia värähtelyä. [26]

Laitteen värähtelyä voidaan mitata erilaisina suureina. Siirtymänä, nopeutena ja kiihtyvyytenä värähtelyä pystytään mittaamaan laitteen pinnasta. Siirtymä ilmaisee mekaanisen poikkeaman etäisyytenä halutusta vertailupisteestä. Nopeutta mitataan aseman ja ajan muutoksen avulla. Kiihtyvyys ilmaisee nopeuden muutoksen tietyllä ajanhetkellä. Kaikille kolmelle mittasuurelle on omat anturinsa, jotka toimintatavoillaan ja rakenteeltaan eroavat toisistaan. Mitattavan suureen pitäisi pystyä havaitsemaan riittävän herkeit värähtelyt. Hitaasti pyörivissä koneissa, alle 300 kierrosta minuutissa, voi siirtymämittauksen valinta olla optimi. Normaalisti käytetään nopeusanturia hyvän herkkyyden ja laajan taajuusalueen takia. Värähtelyn energiamäärä on myös verrannollinen värähtelyn nopeuteen. Nopeakäyntisissä koneissa >9 000 kierrosta minuutissa ja mikäli on odotettavissa vikojen havaitsemista korkeilla taajuuksilla >1 000 Hz, käytetään yleensä kiihtyvyydenturina. [17]

Mikäli havaitaan, että mitattu signaalin värähtely on vain yksitaajuinen. Voidaan esittää suurteiden välistä yhteyttä seuraavasti:

$$\text{Siirtymä } x = A_p(\sin 2\pi ft) \quad (1)$$

$$\text{Nopeus } v = 2\pi f A_p(\cos 2\pi ft) \quad (2)$$

$$\text{Kiihtyvyys } a = -4\pi^2 f^2 A_p(\sin 2\pi ft) \quad (3)$$

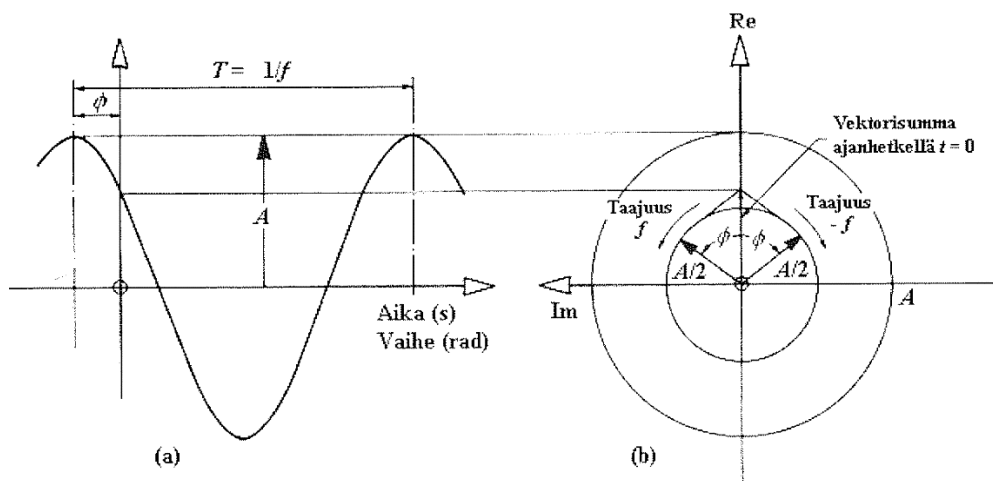
missä,  $A_p$  on siirtymän huippuarvo  
 $f$  on värähtelyn taajuus (Hz) ja  
 $t$  on aika

Mikäli mittaus on tehty kiihtyvyydenturilla ja halutaan tietää esimerkiksi nopeuden suuruus, voidaan se laskea edellä olevilla yhtälöillä, jos mitatun värähtelyn taajuus tunnetaan. [17]

## 4.2 Värähtelysignaalin analyysi

### 4.2.1 Aikataso

Käytännön värähtelymittaukset tehdään aina aikatasossa. Aikatasossa mitatessa värähtelyn voimakkuus esiintyy amplitudina. Vaikka signaali on sekava, voidaan oletuksena sanoa aikatasosignaalin muodostuvan useasta sinimuotoisesta taajuudesta. Kuvassa 11 on esitetty värähtelysignaalin kaksi esitystapaa aikatasolle. Aika-akseli esityksen varjo-puolena on vaiheen esiintyminen samalla akselilla ajan kanssa. Myös ajan näyttäytymisen negatiivisena on huono puoli, koska sille ei ole selvää fysikaalista vastinetta. Kompleksitasossa esitetty värähtely tuodaan esiin kahdella toisiaan vastakkain pyörivällä vektorin avulla. Molempien pituus on  $A/2$ . Värähtelyn amplitudi saadaan vektorien summasta. Ensimmäisen vektorin pyörimistaajuus on  $f$ , vaihekulma  $\phi$  ja toisen  $-f$ ,  $-\phi$ . Negatiivinen pyörimistaajuuden esiintyminen kompleksitasolla ei enää ole huono puoli, koska se tuo esiin vaihekulman negatiivista siirtymää. [26]



**Kuva 11.** Sinimuotoinen värähtelysignaali [26]. A) aika-akseli. B) kompleksitaso

Kuvassa 11 esiintyvän värähtelyn yhtälö voidaan lausua myös matemaattisesti muodossa

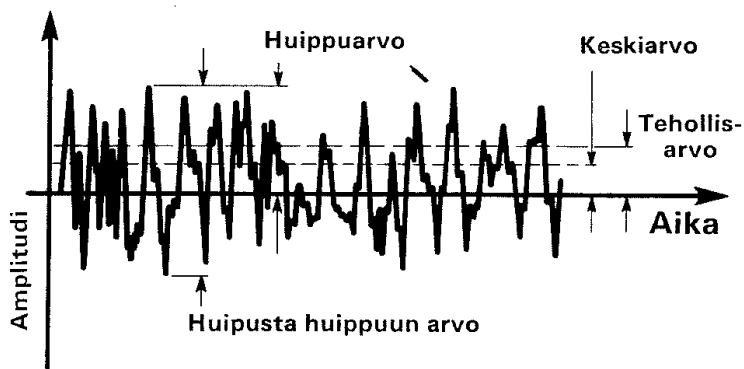
$$x(t) = A \cos(2\pi ft + \phi) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (4)$$

missä  $A$  on värähtelyn amplitudi,  $\phi$  on vaihekulma ajan hetkellä 0 ja  $f$  on taajuus. [26] Aikatason värähtelysignaalista ei pystytä suoraan huomaamaan ja kertomaan koneen

todellista kuntoa. Signaalista pystytään laskemaan värähtelyn voimakkuus usealla tavalla, sekä saamaan erilaisia voimakkuutta kuvaavia tilastollisia lukuarvoja. Tehollisarvo on yksi yleisin käytetty tapa ilmoittamaan värähtelysignaalin suuruutta [17]. Neliöllinen keskiarvo, josta käytetään myös nimitystä tehollisarvo ja rms-arvo (Root Mean Square). Digitaalitekniikassa tehollisarvo yhtälö värähtelyn nopeudelle lasketaan:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N v_i^2)} \quad (5)$$

missä, N on näytteiden lukumäärä ja  $v_i$  on hetkellisen näytteen arvo [26]. Tehollisarvo lasketaan yleensä värähtelyn nopeudelle taajuuskaistalla 10 Hz – 1000 Hz, jolloin siitä käytetään nimitystä värähtelysignaalin voimakkuus voidaan myös kuvata seuraavasti: huippuarvo kuvaa värähtelysignaalin itseisarvon maksimiamäärätyllä aikavälillä. Voidaan käyttää kuvaamaan lyhytaikaisia iskuja. Huipusta huippuun-arvo kuvaa värähtelysignaalin suurinta poikkeamaa positiivisen ja negatiivisen arvon välillä määrätyllä aikavälillä. Keskiarvo kuvaa lukuarvolla signaalin ominaisuutta, mutta sillä ei ole yhteyttä käyttökelpoiseen fysikaaliseen suureeseen. [27,28] Kuvassa 12 on esitetty värähtelyn voimakkuutta kuvaavia suureita.



**Kuva 12.** Värähtelyn voimakkuutta kuvaavat suureet [27].

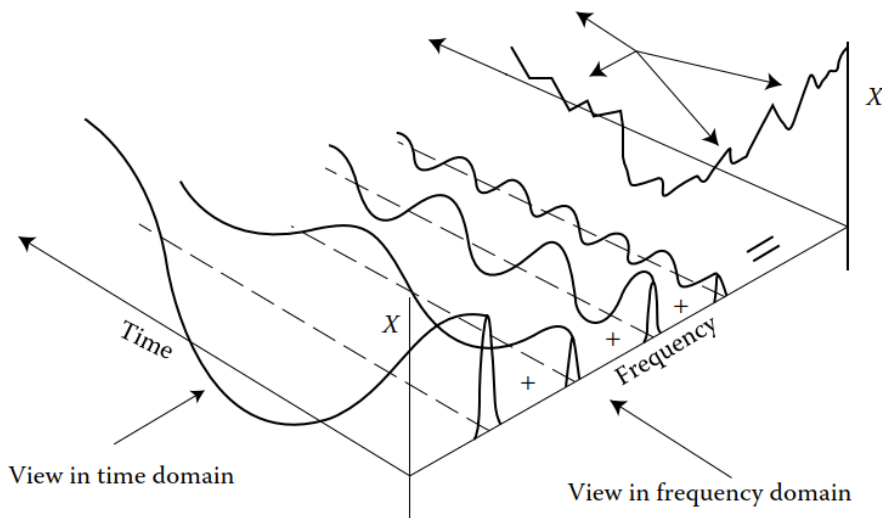
#### 4.2.2 Taajuustaso

Koneiden värähtelymittauksissa saadut aikatason mittaukset ovat aina monimutkaisia tulkita. Useat eri sinisignaalit vaihtelevin amplitudien ja vaihesiirtoineen samassa signaalissa ja kaikki liittyvät perusteellisesti koneen pyörimisnopeuteen. Kunnonvalvonnassa ollaankin yleisesti käytetty amplitudispektrianalyysiä kyseisissä tilanteissa. Aikatason signaalin taajuussisällön analysoinnissa käytetään Fast Fourier- muunnosta (FFT).

Muunnoksesta saadaan lopputuloksena amplitudispektri. [29] Fourier-muunnos tehdään yhtälöllä 6:

$$G(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(n) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (6)$$

missä,  $G(k)$  tarkoittaa amplitudia spektriviivalla  $k$  ( $k = 0 \dots \frac{N}{2}$ ),  $N$  on aikatason näytenpisteiden lukumäärä,  $g(n)$  on aikatasosignaali ( $n = 0 \dots N - 1$ ) ja  $e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}$  on FFT-matriisi (Fast Fourier transform). [26] Kuvassa 13 on esitetty värähtely signaalin taajuudet omissa aikatasoissa.



**Kuva 13.** Fourier-muunnoksen teoreettinen esitys [25].

Yleensä amplitudispektri esitetään huippuarvo tai tehollisarvo (rms) esityksenä. Amplitudispektristä voidaan laskea myös värähtelyn kokonaistaso tai tehollisarvo kyseisellä taajuuskaistalla. Muut tilastolliset tunnusluvut, kuten esimerkiksi crest factor ja kurtosis arvo määritetään aikatasosignaalista.

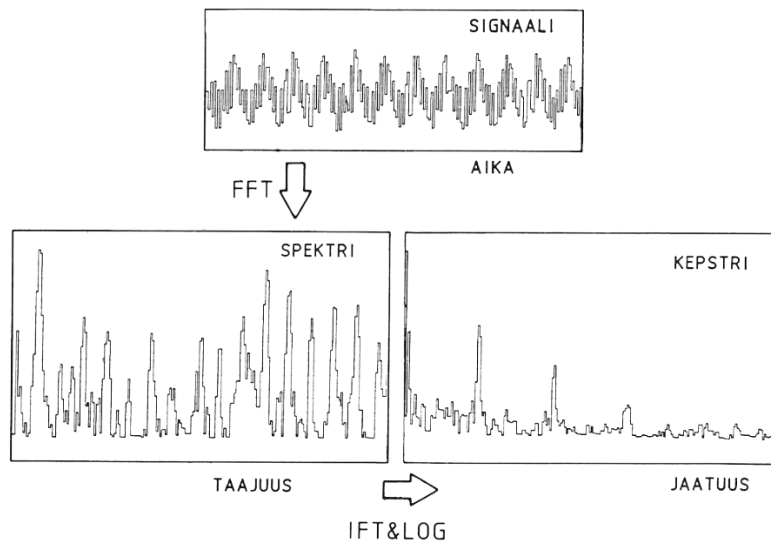
Hammaspyörien ja laakerien vikaantumisen tunnistamiseen käytetään toisinaan myös kepstrivalvontaa [30]. Logaritmin tehospeskin Fourier-muunnoksen neliötä kutsutaan nimellä kepstri [28]. Kepstri saadaan muuttamalla tehospeski logaritmiseksi amplitudispektriä ja siirtymällä käänteisellä Fourier-muunnoksen avulla takaisin aikatasoon. Muunnoksen yhteydessä X-akseli muuttuu taajuustasosta "jaatuustasoon" (frequency = taajuus, quefrequency = jaatuus). Kepstrianalyysi paljastaa värähtelysignaalin jaksolliset komponentit. Jaksollisiksi komponenteiksi luetaan jonkin harmoniset kerrannaiskomponentit sekä sivunauhataajuudet. Kepstriin ei herkästi vaikuta kuormituksesta tulevat vaihtelut, kuten tavalliseen amplitudispektriin. Lisämahdollisuutena on poistaa harmoniset komponenttien ja sivukaistojen aiheuttamat taajuudet ja muuntaa kepstri takaisin



amplitudispektri. Jäljellä olevat taajuudet on helpompi analysoida harmonisten komponenttien poistamisen jälkeen. [31,32] Kuvassa 14 on esitetty kepstrin muodostaminen aikatason värähtelysignaalista. Tehokepstri määritellään lähteessä [33] seuraavasti:

$$c(t) = IFT \{ \ln( A(f) ) \} \quad (7)$$

missä  $c(t)$  on kepstri,  $t$  on aika,  $IFT$  on käänteinen Fourier-muunnos,  $\ln$  on luonnollinen logaritmi,  $A(f)$  on tehospektri ja  $f$  on taajuus.

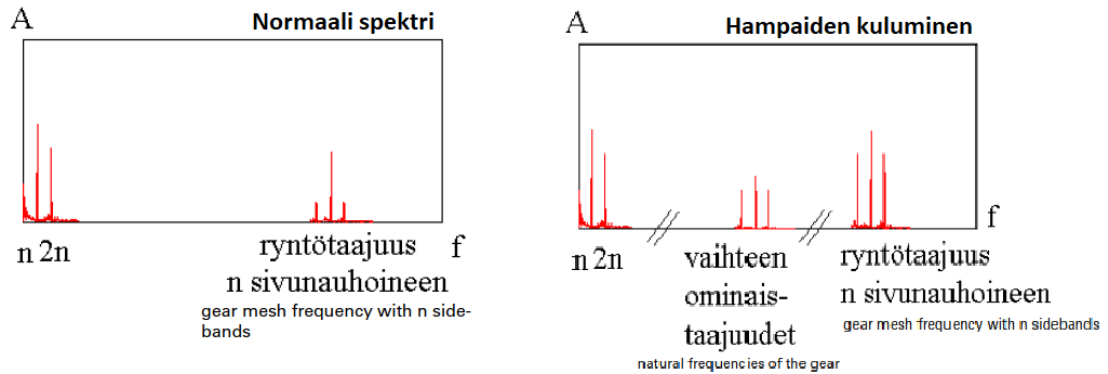


**Kuva 14.** Kepstrin muodostaminen [32].

### 4.3 Diagnostiikka

Hammasvaihteiden vianmäärityksessä oleellista on tietää hammaspyörien ryntötaajuus. Ryntötaajuus on hammaspyörässä olevien hampaiden lukumäärän ja pyörimistaajuuden tulo [28]. Erilaisia vikoja hammasvaihteissa voi olla muun muassa kuluminen, ylikuormitus, virheellinen linjaus ja akselien yhdensuuntaisuusvirhe. Vikojen tunnistamista on selvennetty lähteessä [34]. Ryntötaajuuden amplitudin voimistuminen ei välttämättä indikoi vian kehittymistä, koska amplitudin voimistuminen on riippuvainen kuormituksesta. Hampaisissa tapahtuva kuluminen saattaa pitää ryntötaajuuden amplitudin muuttumattomana, mutta ryntötaajuuden ympäristöön pyörimistaajuuden välein ilmestyvistä sivunauhoista voidaan huomata hampaiden vakava kuluminen. Hammasvaihteen monitorointiin soveltuva mittausten menetelmä on myös akselin pyörimiseen tahdistetun keskiarvoistetun aikatason signaalin mittaaminen. Signaalia analysoimalla saadaan selville yksittäisten hammas-

kosketusten aiheuttama värähtely, ja niitä voidaan verrata keskenään. Selvät poikkeamat indikoivat hampaan vikaantumista. [34] Kuvassa 15 on esitetty normaali amplitudispektri hammasvaihteen ryntötaajuudesta ja sivunauhasta, sekä muutos kulumisen johdosta.



**Kuva 15.** Hammasvaihteiden spektrin muutos [34].

Hammasvaihteiden monitorointiin soveltuvat myös erilaiset tilastolliset tunnusluvut, kuten värähtelyn tehollisarvo, kurtosis arvo ja huippukerroin. Signaalin tunnusluvut eivät sisällä taajuustietoa. Tästä syystä diagnosointi perustuu yleensä tunnuslukujen trendin seurantaan ja esimerkiksi hälytysrajojen ylityksiin.

Huippukerroin (Crest Factor) ja kurtosis arvo ilmaisevat signaalin piikikkyyttä [36]. Huippukerroin ja kurtosis arvoa käytetään aikatazon signaalin analysointiin kuvaamaan hampaan rikkoutumisesta aiheutuvaa impulsiivista tärinää. Molempia tunnuslukuja on myös käytetty ilmaisemaan pieniä paikallisia hammasvaurioita. [4,35] Lähteessä [36] on esitetty yhtälöt huippukertoimelle ja kurtosis arvolle seuraavasti:

$$\text{Huippukerroin} = \frac{\max|y_{\max}; y_{\min}|}{\sigma} \quad (8)$$

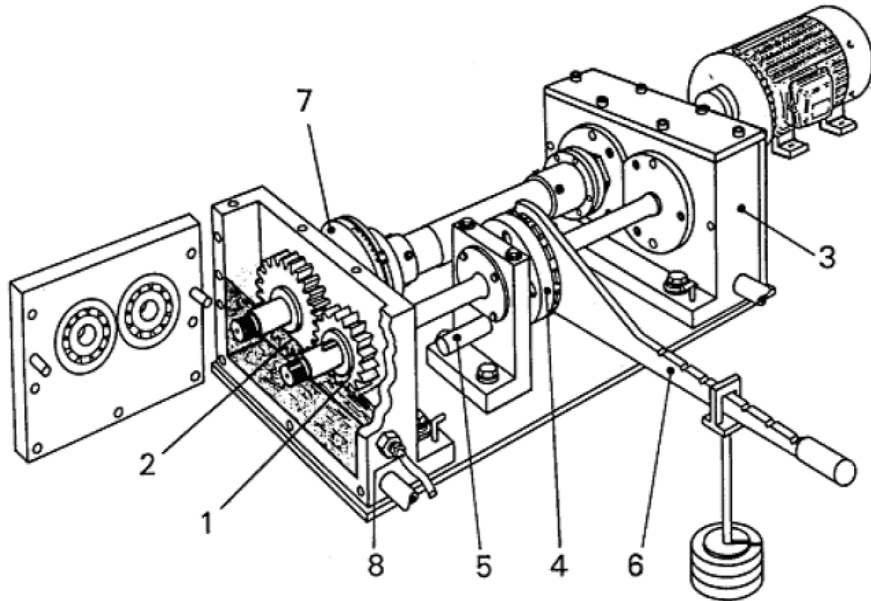
missä,  $\max|y_{\max}; y_{\min}|$  tarkoittaa signaalin huippuarvon itseisarvoa ja  $\sigma$  on keskihajonta.

$$\text{Kurtosis} = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^4 \quad (9)$$

Kurtosis arvon yhtälössä  $N$  on näytteiden lukumäärä ja  $y_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) signaalin arvo.  $\sigma$  on keskihajonta ja  $\bar{y}$  on signaalin keskiarvo.

## 5. HAMMASPYÖRIEN KOELAITE

Vaihteistojen hammaspyörien testaamiseen on kehitetty muun muassa FZG, IAE ja Ryder nimisiä koelaitteita [37]. Tässä tutkimustyössä käytössä oleva koelaitte on FZG. Kuva 16 on esitetty standardisoitu FZG-koelaitte.



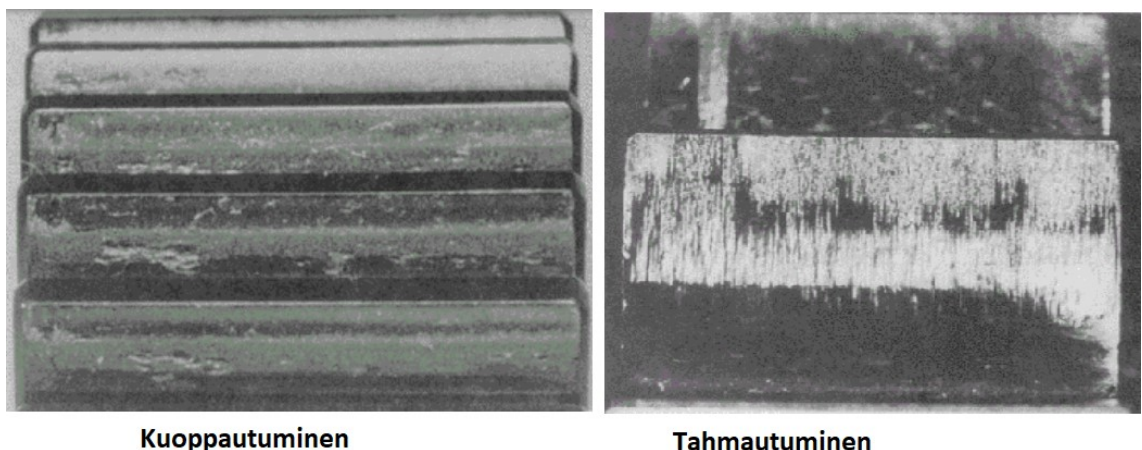
**Kuva 16.** FZG-koelaitte [14,37]. 1. Käyttävä koehammaspyörä 2. Käytettävä koehammaspyörä 3. Siirtohammasvaihte 4. Kuormituskytkin 5. Lukitsemispultti 6. Kuormitusvipu painoineen 7. Väännönmittauskytkin 8. Lämpömittarin anturi.

FZG-koelaitteessa on kaksi akselia, josta toiseen tuodaan sähkömoottorilla käyttövoima. Sähkömoottorin voima välittyy testattavien hammaspyörien kautta toiselle akselille, joka on kahdessa osassa. Lukituspultilla saadaan estettyä akselien pyöriminen, kun haluttua kuormitustasoa asetetaan kytkimenvälityksellä momenttiakselille. Asetettu vääntömomentti kulkeutuu siirtohammasvaihteiden kautta takaisin testattavien hampaiden kuormaksi muodostaen suljetun momenttikehän. Kun painoilla on saatu aikaan haluttu momentti, kytkin lukitaan ja kuormitusvipu painoineen poistetaan. FZG-koelaitteessa on 12 kuormitustasoa. Taulukossa 5 on esitetty kuormitustasot ja niiden vääntömomentit

**Taulukko 5.** FZG-koelaitteen kuormitustasot [38].

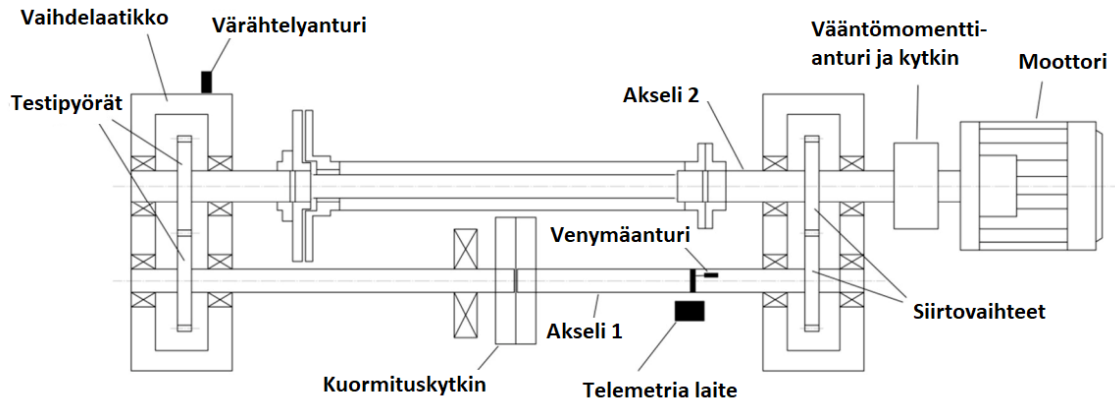
Kuormitustaso	Momentti [N*m]	Kuormitustaso	Momentti [N*m]	Kuormitustaso	Momentti [N*m]
L1	3,33	L5	94,14	L9	302,04
L2	13,73	L6	135,33	L10	372,65
L3	35,3	L7	183,38	L11	450,13
L4	60,8	L8	239,28	L12	534,46

FZG-koelaitteeseen on saatavilla A- ja C-tyyppisiä hammaspyöriä. Hammaspyörä valitaan halutun testin mukaan. A-tyypin hammaspyöriä käytetään muun muassa tutkittaessa tahmautumisvaurioiden syntymistä. Tahmautuminen tapahtuu yleensä korkeassa kosketuslämpötilassa (ohut voitelukalvo), joka syntyy, kun hammaskosketuksissa olevat pinnat liukuvat toisiaan vasten korkeassa kosketuspaineessa. Tahmautuminen voi tapahtua nopeasti, johtaen laitteen värähtelyn ja äänitason nousuun ja jopa laitteen rikkoutumiseen [39]. Tahmautumisen tutkimista FZG-koelaitteella voidaan suorittaa standardin SFS-ISO 14635 mukaisesti [40]. C-tyypin hammaspyöriä käytetään hammaspyörien kylkien väsytestauksissa, joka ilmenee kuoppautumisena, kun pinnoista irtoaa partikkeleita rasituksen johdosta. FZG-koelaitteeseen on kehitetty muutamia yleisiä testimetoja, kuten PT-C/9/90 kuormitustasolla 9 ja PT-C/10/90 kuormitustasolla 10. Lisäksi on kehitetty PTX-C/SNC/90 testi, jossa on muun muassa muokattu hampaan kyljen mikrogeometriaa. Muutoksilla ollaan saatu nopeutettua FZG-kokeita ja näin ollen saadaan nopeammin tuloksia mahdollisista vaurioista. [37] Kuvassa 17 on esitetty hammaspyörissä tapahtuvaa kuoppautumista ja tahmautumista.

**Kuva 17.** Esimerkki hammaspyörissä tapahtuvasta kuoppautumisesta ja tahmautumisesta [41].

## 5.1 Koelaitte

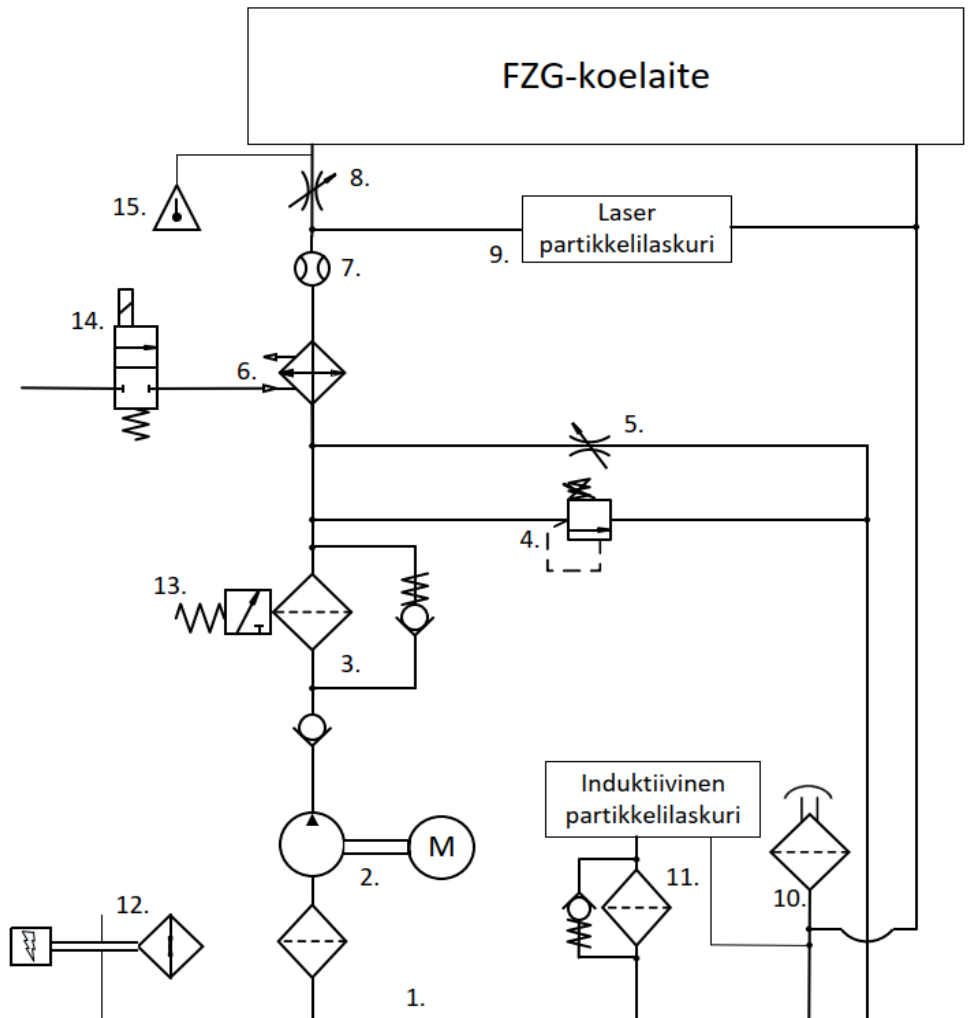
Tampereen yliopistolla olevaan FZG-koelaitteeseen on tehty vuosien aikana parannuksia. Parannuksilla on pyritty kohti luotettavampaa käynninvalvontaa. Käynninvalvonnalla tavoitellaan hammaspyörissä alkavan vaurioitumisen tiedostamista mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Ilman parannuksia koelaitte pysäytetään ja tarkistetaan visuaalisesti mikroskoopilla hammaskylkien kunto aina ennalta määrätyn ajan jälkeen. Kuvassa 18 on esitetty FZG-koelaitteeseen asennetut anturit ja niiden sijainnit koneessa.



**Kuva 18.** Tampereen yliopistolla olevan FZG-koelaitteen periaatekuva [3].

Lisäksi koneen voiteluöljyä valvotaan kahdella online-mittalaitteistolla. Ensimmäinen mittalaitte on asennettu valvomaan hydraulikkakoneikon suodattimelta tulevaa öljyn puhtautta ennen FZG-koelaitetta. Ensimmäinen voiteluöljyn online-mittalaitteisto on laser partikkelilaskuri. Toinen online-mittalaitteisto on asennettu valvomaan FZG-koelaitteelta tulevaa paluuöljyn puhtautta. Toinen voiteluöljyn online-mittalaitteisto on induktiivinen partikkelilaskuri, jossa on lisäksi paineistettu optinen partikkelilaskuri.

Induktiivinen öljyn kunnonvalvontajärjestelmä toimii kuvan 9 mukaisesti säiliöstä otettava online-näytteenottona. Kuvassa 19 on esitetty koelaitteessa oleva hydraulikkakaa-vio, sisältäen liitännät sekä laser, että induktiiviselle öljyn partikkelilaskureille.



**Kuva 19.** FZG-koelaitteen hydraulikkakaavio.

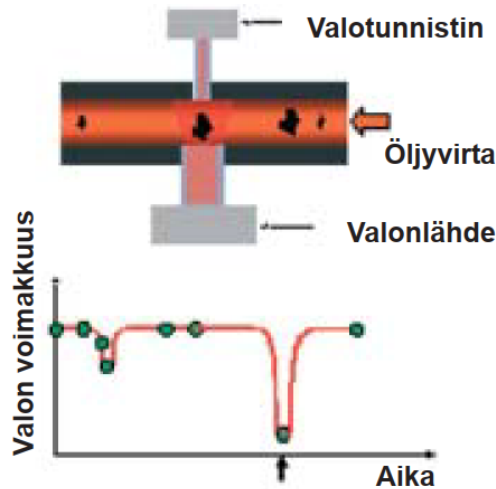
- |   |  |
|---|--|
| 1. Säiliö                                     | 10. Täyttökorkki ja huohotin, johon on liitetty FZG-koelaitteelta palaava öljy ja induktiivisen partikkelilaskurin voiteluöljyn näytteenotto |
| 2. Imusuodin ja pumppu                        | 11. Induktiivinen ja optinen voiteluöljyn kunnonvalvonta, varustettu öljyn paluusuodattimella  |
| 3. Painesuodatin                              | 12. Öljyn lämmitin   |
| 4. Varoventtiili                              | 13. Painekeytkin   |
| 5. Vastusventtiili                            | 14. Jäähdytysventtiili   |
| 6. Öljyn jäähdytin                            | 15. Lämpötilamittari   |
| 7. Virtausmittari                             |  |
| 8. Vastusventtiili                            |  |
| 9. Laser toiminen voiteluöljyn kunnonvalvonta |  |

## 5.2 Öljyanalyysin laitteistot

Laser partikkelilaskuri mittaa FZG-koelaitteelle menevän öljyn puhtautta reaaliaikaisesti. Partikkelien tunnistaminen perustuu leveään lasertekniikkaan, joka on toiminnaltaan samankaltainen kuin kuvassa 20 esitetty optisen anturin toiminta. Laser partikkelilaskuri tunnistaa ja tallettaa mittaamansa öljyn puhtauden kahdeksassa eri kokoluokassa. Lisäksi mukana on ISO 4406:1999 standardin kolme kokoluokkaa. Kokoluokat ovat:  $> 4 \mu m (c)$ ,  $> 6 \mu m (c)$ ,  $> 10 \mu m (c)$ ,  $> 14 \mu m (c)$ ,  $> 21 \mu m (c)$ ,  $25 \mu m (c)$ ,  $> 38 \mu m (c)$  ja  $> 70 \mu m (c)$ . Laser partikkelilaskurille menevän voiteluöljyn määrä on 25 millilitraa/minuutissa. Mittaukset tulostuvat partikkelilaskurin ohjelmaan yhden minuutin välein ja yksikkönä on kappaleita partikkelia/100 ml (millilitraa). Näin ollen FZG-koelaitteelle menevää voiteluöljyn kunnonvalvontaa suoritetaan neljän minuutin aikaikkunassa. Partikkelien tunnistusjärjestelmä toimii laserpohjaisella anturilla, joka pystyy maksimissaan tunnistamaan 20 000 partikkelin keskittymän 25 millilitrassa, 5% samanaikaisuudella. Mittalaite pystyy toimimaan ilman sisäistä pumppua. Järjestelmästä tuleva 0,2 – 20 baarin paine on riittävä voiteluöljyn valvontaan. [42]

Induktiivinen ja optinen partikkelilaskuri mittaavat FZG-koelaitteelta tulevan paluuöljyn puhtautta. Öljyn puhtauden kunnonvalvontaa suoritetaan kolmella eri anturilla. Ensimmäinen mittaa kappalemääräisesti öljyn mukana tulevia isoja ferromagneettisia partikkeleita, joita irtoaa väsymisen johdosta hammaspyörien hammaskyljistä. Tallennettavat kokoluokat ovat  $70 - 100 \mu m$ ,  $100 - 150 \mu m$  ja  $> 150 \mu m$ . Toisella anturilla mitataan pieniä partikkeleita öljynpuhtauden ISO 4406:1999 standardissa olevan taulukon mukaisesti. Lisäksi kolmantena tarkastellaan öljyn suhteellista vesipitoisuutta.

Pienten partikkelien anturin toiminta perustuu optiseen anturiin, joka määrittää partikkelien lukumäärän ja kokoluokan. Puhtausluokka määräytyy partikkelin läpi heijastavan valonlähteen, varjostuksen laajuuden ja keston mukaan, ottaen huomioon öljyn virtausnopeuden. [43] Kuvassa 20 on esitetty anturilta tulevan signaalin muutos partikkelien ohittaessa optisen anturin.



*Kuva 20. Optisen partikkelilaskurin toimintaperiaate [43].*

Hydrauliikkajärjestelmän vesipitoisuutta on hyvä valvoa. Vettä voi hydrauliikkajärjestelmässä ilmentyä kolmessa eri muodossa: a) liunneena veteen, jolloin vettä ei ole näkyvässä muodossa, b) emulgoituneena veteen, jolloin öljyn pinnalla alkaa näkyä ohuesti jakautuneita vesipisaroita, ja c) pelkkänä vetenä, jolloin veden pystyy huomioimaan helposti öljystä. Järjestelmän vesipitoisuus mitataan kapasitiivisen anturin avulla, jossa on kosteutta mittaava kerros. Kun anturin ympäristössä oleva kosteus lisääntyy, imeytyy se anturissa olevaan kerrokseen. Yhtäläillä laskeva kosteus saa kerroksen luovuttamaan itseensä imeytyneen kosteuden. Kapasitanssi muuttuu kosteuden mukaan ja anturi ilmoittaa mittaustuloksen kyllästymisprosenttia öljyn laadusta riippumatta. Tulos ilmoitetaan 0 – 100 prosentin välillä, jossa 0 % tarkoittaa vedetöntä öljyä. 100 % tulos kertoo, että öljy on saavuttanut veden kyllästymispisteen ja vesi alkaa erottua öljystä. [43]

### 5.3 Väsytestien koemenetelmä

Kaikki väsymiskokeet aloitetaan puhdistamalla halutut hammaspyörät ennen koelaitteeseen asentamista. Puhdistus suoritetaan liuotainaineella, jolla saadaan minimoitua koelaitteeseen joutuvia epäpuhtauksia. Koelaitteen järjestelmä pyritään pitämään mahdollisimman suljettuna ulkopuolista epäpuhtauksilta. Näin saadaan eri kokeiden väliset olosuhteet pysymään mahdollisimman vakiona. Samasta syystä osa koelaitteen öljystä vaihdetaan ennen koetta. Vaihdettava öljynmäärä lasketaan koelaitteen toteutuneista kierroksista siten, että öljy tulisi kokonaan uusittua, jos koelaitteella ajetaan puoli vuotta yhtäjaksoisesti.



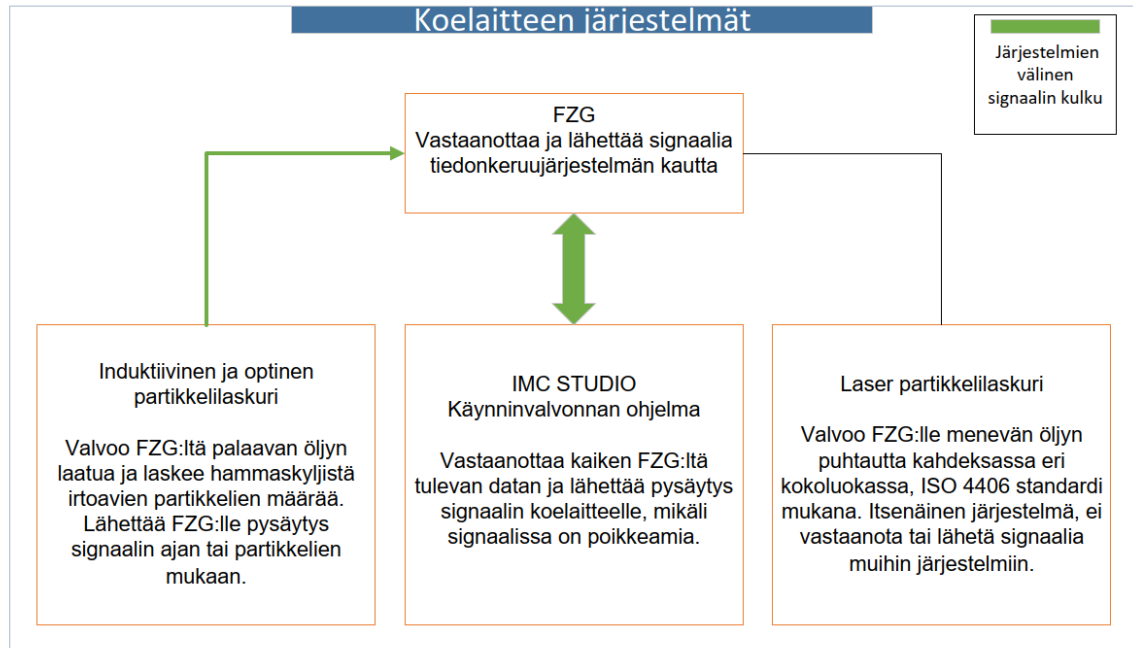
Ennen laitteen käynnistymistä järjestelmässä kiertävä öljy lämmitetään yli 60 celsiusasteeseen. Lisäksi odotetaan hammaspyörien ja akselien lämpiämistä. Akselien lämpötilamuutos vaikuttaa kuvassa 18 esiintyvään venymäliuskan arvoon. Akselien lämpötila pyritään stabiloimaan samaan, mitä se on koetilanteessa. Venymäanturi mittaa akselille asetettua vääntömomenttia. Vääntömomentti valitaan taulukossa 5 esitettyjen kuormatasojen mukaan.

Koelaitteelle määritellään käynnissäoloaika haluttujen kierrosten mukaan. Aika syötetään minuutteina induktiivisen partikkelilaskurin ohjelmaan, joka pystyy sammuttamaan koelaitteen halutun kierroslukumäärän jälkeen tai partikkelien kappalemäärän mukaan. Kuvassa 21 on esitetty partikkelilaskurin sallitut partikkelimäärät, jotka voidaan asettaa tilanteen mukaan. Mukana on myös koelaitteen käynnissäoloaika. Partikkelilaskurilta lähtee pysäytyssignaali koelaitteelle, mikäli asetetut rajat ylitetään. Kuvan 21 Vermehrung A-kohta tarkoittaa partikkelien määrää kokoluokassa  $70 - 100 \mu m$ , B-kohta partikkeleita  $100 - 150 \mu m$  ja C-kohta partikkeleita  $> 150 \mu m$ . Sallitut kappalemäärät syötetään laatikoihin ja Z-kohtaan asetetaan kokoluokkien yhteenlasketut sallitut kokonaiskappalemäärät.

Numeric input	
Minuten	3000
VermehrungA	2
VermehrungB	2
VermehrungC	2
VermehrungZ	3

**Kuva 21.** Partikkelilaskurin pysäytys signaalin asetukset.

Asetusten määrittämisen jälkeen voidaan aloittaa datan tallennus jokaisesta ohjelmasta ja käynnistää koelaitte. Kuvassa 22 on esitetty koelaitteen järjestelmien välisiä yhteyksiä.



**Kuva 22.** Koelaitteen järjestelmien väliset yhteydet.

Koelaitteen pysähtyessä tallennetut datat siirretään kovalevylle käsittelyyn. Osa datasta joudutaan tallentamaan ohjelman määrittelemään muotoon, josta se muutetaan jälkikäteen helpommin muokattavampaan muotoon. Mittausdata on tallennettu kolmessa eri muodossa, excel-tiedostona, tekstitiedostona ja imc STUDIOON tallentamana mittauslaitedata ".raw" muodossa. Imc STUDIOON tiedostoja pääsee muokkaamaan imc FAMOS ohjelmalla, joka kuuluu samaan ohjelmistopakettiin. Imc FAMOS on suunniteltu erilaisten signaalidatojen tutkimiseen ja käsittelyyn, lisäksi ohjelmalla voidaan suoraan tallettaa jatkoanalysointia varten data yhteneväiseen tiedostomuotoon.

## 6. KEHITYSKOhteet

Tämän tutkimustyön tarkoituksena on tutkia FZG-koelaitteen käynninvalvontaa, joka on Tribologia ja koneenosat -tutkimusryhmän käytössä Tampereen yliopistolla. Tutkimustyön aloitushetkellä hammaskylkien vaurioitumisen seuranta on valvottu visuaalisesti mikroskooppikuvilla. Koelaitteeseen on asetettu ennalta määrätty ajanjakso, minkä koelaitte pyörii. Testaus on perustunut koneenkäyttäjän arviointiin, kuinka kauan koelaitetta käytetään, jotta alkava vaurioituminen voidaan huomata. Tarkoituksena on ollut saada dokumentoitua jokainen hammaskylki ennen ja jälkeen vauriokriteerin. Näin ollen ollaan tietoisia hammaspyörän kierroslukumäärästä, kun vaurio tapahtuu. Hampaiden mikroskooppikuvista lasketaan vaurioitunut pinta-ala perustuen tarkastuksiin ennen ja jälkeen vauriorajan ylitystä. Interpoloinnilla saadaan määriteltyä tarkka kierroslukumäärä asetetulle vauriokriteerille. Interpolointi suoritetaan yhtälöllä 6 [44].

$$N_G = 10^{\log(N_V) - (A_G - A_V) \cdot \frac{\log\left(\frac{N_L}{N_V}\right)}{A_L - A_V}} \quad (6)$$

missä,  $N_L$  on kumulatiivinen kierrosten määrä tarkastus hetkellä, kun asetettu vauriokriteeri ollaan ylitetty.  $A_L$  on suhteellinen kuoppautumisalue kumulatiivisen  $N_L$  kierroksen kohdalla.  $N_V$  ja  $A_V$  on kumulatiivinen kierroslukumäärän ja suhteellinen kuoppautumisalue edellisellä tarkastushetkellä ennen vauriorajan ylittymistä.  $A_G$  on määritelty vaurioraja hampaan pinta-alasta.

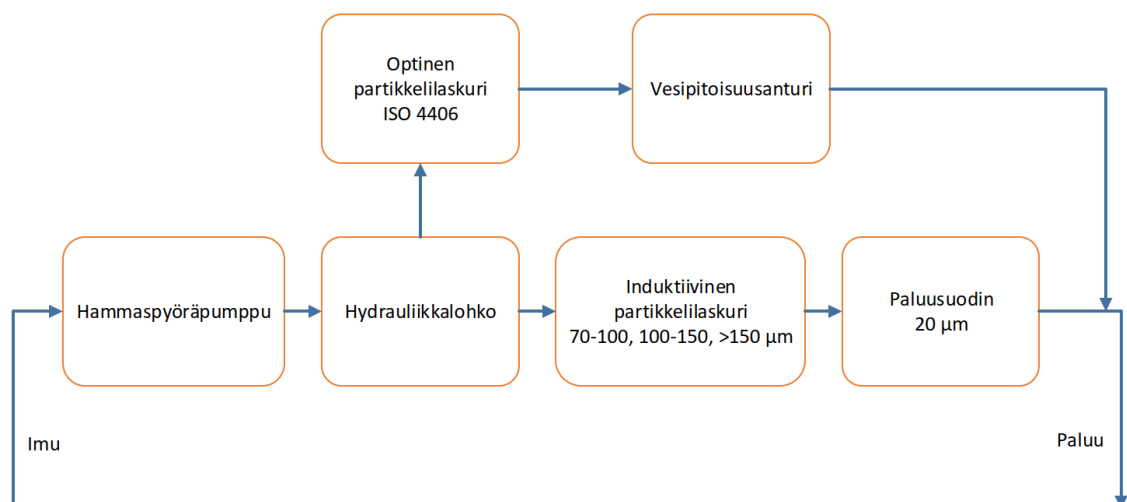
Hammaspyörien kuormittaminen alhaisilla kuormatasoilla (L4, L5) voi vaatia pitkiä testijaksoja, riippuen testattavasta materiaalista. Vauriokriteerin saavuttaminen voi joissain tapauksissa vaatia kymmeniä miljoonia kierroksia. Koelaitteella on mahdollista ajaa kuormitustestiä muutamasta minuutista aina 50 tuntiin asti tauotta. Käyttävä hammaspyörä pyörii 2250 kierrosta minuutissa ja maksimi asetettu testilaitteen käyntiaika on 50 tuntia = 3000 minuuttia. Kierroksia saadaan  $2250 * 3000 = 6,75$  miljoonaa kierrosta. Hampaat kuvataan ajatun testijakson loputtua, jotta saataisiin tarkastettua hammaskylkien sen hetkinen kunto. Hammaskylkien kuntoa joudutaan ajoittain tarkastelemaan liian useasti, koska ei pystytä ennustamaan vaurioitumista. Liialliset tarkastukset aiheuttavat taukoja koejaksoihin ja pidentävät testattavien hammaspyörien koeaikaa.

Tutkimuksen tavoitteena oli saada käynninvalvontalaitteistot toimimaan luotettavammin ja hyödynnettyä laitteistolla saatua mittausdataa hammaspyörien vaurioiden seuraamiseen. Mittausdatan avulla pystyttäisiin seuraamaan hammaskylkien alkavaa vaurioitu-

mista, mikä taas vähentäisi hammaspyörien testaamiseen käytettävää koeaikaa. Aloitushetkellä ongelmaksi on ilmentynyt öljyn kunnonvalvontalaitteiston datan tulkinta ja isojen partikkelien  $> 70\mu\text{m}$  havaitseminen öljystä testien aikana. Värähtelystä valvotaan tehollisarvoa ja ryntötaajuuden spektriä, mutta värähtelylle ei olla asetettu raja-arvoja. Molemmat laitteistot ovat toiminnassa, mutta eivät pysäytä testilaitetta kuluneisuuden johdosta. Yleisesti testilaitte pyörii asetetun ajan loppuun asti, ellei jokin ulkopuolinen häiriö, esimerkiksi venymäliuska-anturin signaalissa esiinny toiminnallista häiriötä, joka sammuttaa laitteen.

## 6.1 Koemenetelmien tarkastelu ja analysointi

Tutkimuskohteena on induktiivisen partikkelilaskurin toimivuus ja luotettavuus hammaspyörien vaurioiden seurannassa. Induktiivisella partikkelilaskurilla on saatu lupaavia koetuloksia hammaspyörien vaurioiden seurannassa [4]. Induktiivisen partikkelilaskurin rinnalle on myöhemmin lisätty paineistettu optinen partikkelilaskuri ja vesipitoisuusanturi, millä pystytään seuraamaan öljyn kuntoa ISO 4406 standardin mukaisesti. Lisäksi aikaisemmissa koetuloksissa on käytetty eri viskositeetilla olevaa öljyä. Kuvassa 23 on esitetty partikkelilaskurien järjestelmää. Hydraulikkalohkosta järjestelmä jaetaan kahteen rinnakkaiseen partikkelilaskuriin ja öljy palaa samaan hydraulikkaletkuun vasta paluusuotimen jälkeen, mistä se johdetaan takaisin säiliöön. Hydraulikkalohkosta öljyn virtausta on rajoitettu optiselle partikkelilaskurille. Anturille menevän öljyn virtaus on järjestelmän tietojen perusteella 250 millilitraa minuutissa ja järjestelmän kokonaisvirtaus on 2 litraa minuutissa.



**Kuva 23.** Partikkelilaskureiden järjestelmäkuvaus.

Induktiiviselle partikkelilaskurille suoritettiin 5 koetta, joilla haluttiin tutkia sen toimivuutta. Ensimmäisessä kokeessa poistettiin järjestelmän öljykierrosta siihen myöhemmin lisätty optinen partikkelilaskuri. Toisessa kokeessa puhdasta öljyä imettiin järjestelmän läpi ja tarkasteltiin öljyn puhtautta ja anturin toimivuutta. Kolmannessa kokeessa öljyyn lisättiin hallitusti induktiiviselle partikkelilaskurille sopivan kokoisia rautapartikkeleita ja testattiin partikkelilaskurin ominaisuuksia tunnistaa kokoluokkia. Neljännessä ja viidennessä kokeessa haluttiin saada pidemmän aikavälin dataa induktiivisen partikkelilaskurin toimivuudesta, kun kierrätetään öljyä järjestelmässä. Kokeissa havaittiin näytteenoton vaikutus induktiivisen partikkelilaskurin toimivuuteen. Induktiivisen partikkelilaskurin näytteenotosta hydraulikka säiliössä ei ollut tarkkaa tietoa, joten haluttiin varmistaa, miten näytteenotto on toteutettu säiliön sisällä.

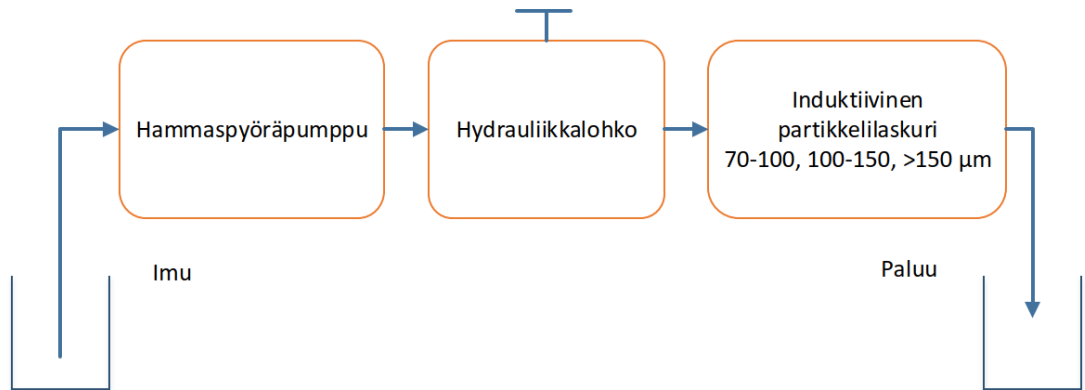
### **6.1.1 Koe 1**

Kokeessa 1 poistettiin optinen partikkelilaskuri, mikä valvoo öljyn kuntoa ISO 4406 standardin mukaan ja lisäksi vesipitoisuusanturi. Laitteiston irrotuksella pyrittiin minimoimaan partikkelilaskurin rakenteelliset muutokset aikaisempiin koetuloksiin verrattuna. Lisäosien poistamisella tarkasteltiin olisiko ollut mahdollista, että partikkelit olisivat kulkeutuneet väärälle anturille. Mikäli hydraulikkalohkon sisällä tapahtuisi jotain, mikä vaikuttaisi isompien partikkelien virtaamisen optiselle partikkelilaskurille pienemmästä virtauksesta huolimatta. Tällaisia vaikuttavia tekijöitä voisivat olla tukkeutunut öljykanava tai kriittisessä kohdassa turbulenttinen virtaus, mikä mahdollistaisi partikkelien ohjautumisen väärin. Optinen partikkelilaskuri irrotettiin järjestelmästä ja koelaitteella suoritettiin 23 tunnin koeajo, missä tutkittiin partikkelien kulkeutumista induktiiviselle partikkelilaskurille. Koe oli ensimmäinen partikkelilaskurin toiminnan tarkastamisessa ja se pystyttiin helposti toteuttamaan nopealla aikataululla ja vähäisellä vaikutuksella väsymiskokeisiin. Ensimmäisen kokeen toimenpiteellä ei huomattu olevan vaikutusta partikkelien kulkeutumiseen induktiiviselle partikkelilaskurille. Induktiivisen partikkelilaskurin oikeanlaisesta toimivuudesta ei kuitenkaan saatu varmuutta ensimmäisen kokeen aikana.

### **6.1.2 Koe 2**

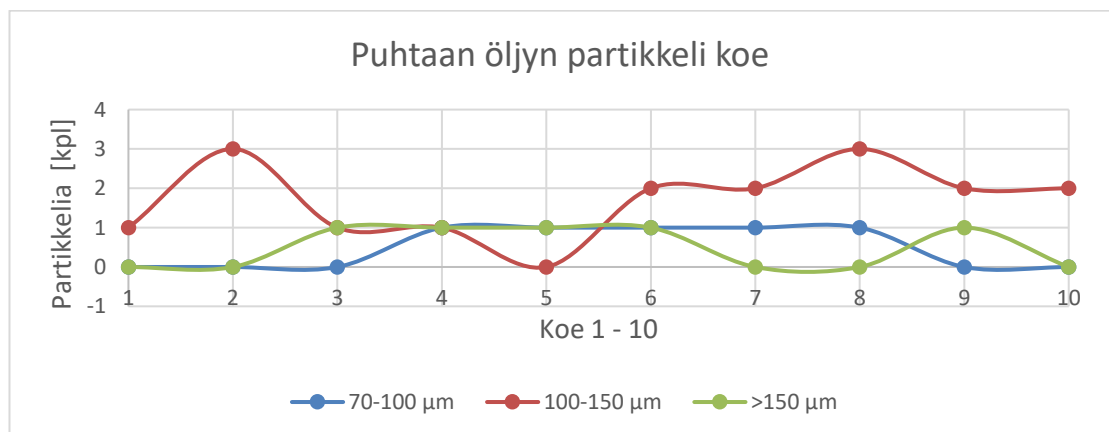
Toisen kokeen tarkoituksena oli saada vahvistus induktiivisen partikkelilaskurin ja järjestelmän toimivuudesta mahdollisimman yksinkertaisessa koeympäristössä. Kokeessa poistettiin kaikki ylimääräinen, mikä ei estänyt järjestelmän käyttöä. Toimivuuden analysointi aloitettiin poistamalla optinen partikkelilaskuri rinnalta. Lisäksi öljyn paluusuodatin irrotettiin järjestelmästä. Öljyn imu järjestelmään toteutettiin erillisellä hydraulikkaletkulla

10 litran kanisterista ja poisto tapahtuisi samanlaisella toimenpiteellä. Järjestelmästä oli saatu irrotettua ylimääräiset komponentit, jotka eivät vaikuttaneet sen toimivuuteen. Kuvassa 24 on esitetty induktiivisen partikkelilaskurin järjestelmä irrotettujen komponenttien jälkeen.



**Kuva 24.** Öljyn siirtyminen induktiiviselle partikkelilaskurille.

Kokeessa öljyä siirretään 10 litran kanisterista toiseen järjestelmän kautta. Ennen kokeen aloitusta järjestelmää huuhdeltiin ajamalla 3 litraa puhdasta öljyä läpi, jotta saatiin varmistettua järjestelmään liitettyjen hydrauliikkaletkujen puhtaus. Kokeessa olevaan uuteen kanisteriin laitettiin 8 litraa puhdasta öljyä tynnyristä. Koe aloitettiin siirtämällä 8 litraa puhdasta öljyä järjestelmän läpi 10 kertaa kanisterista toiseen. Jokaisen siirron jälkeen kanisterien paikkoja vaihdettiin ja sama öljy kierrätettiin uudelleen läpi. Öljyn lämpötila oli kokeen aikana huoneenlämpöistä. Kuvassa 25 on esitetty induktiivisen partikkelilaskurin tunnistamat partikkelijakaumat jokaisen öljyn testisiirron osalta.



**Kuva 25.** Puhtaan öljyn induktiivisen partikkelilaskurin koe.

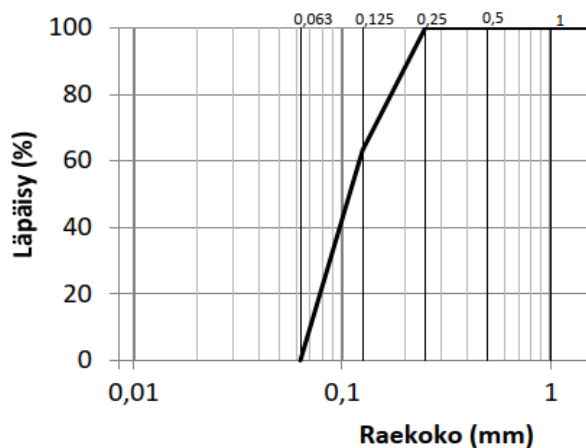
Kokeen ensimmäisestä osiosta voidaan havaita induktiivisen partikkelilaskurin tunnistavan eri kokoluokkien partikkeleita öljystä. Samalla havaitaan öljyn sisältämä partikkelimäärä, vaikka järjestelmä huuhdeltiin huolellisesti ja kokeessa käytettiin uutta öljyä.

### 6.1.3 Koe 3

Koetta jatkettiin lisäämällä rautapartikkeleita hallitusti öljyyn. Ennen öljyyn lisäämistä partikkelit pesuseulottiin ja poistettiin kokojakaumasta poikkeavat partikkelit. Pesuseulonta suoritettiin SFS-EN 933-1 mukaisesti [45]. Kuvassa 26 on esitetty pesuseulonnasta saatu raekokojakauma.

<b>Paino ennen seulontaa</b>	<b>98.7 g</b>
------------------------------	---------------

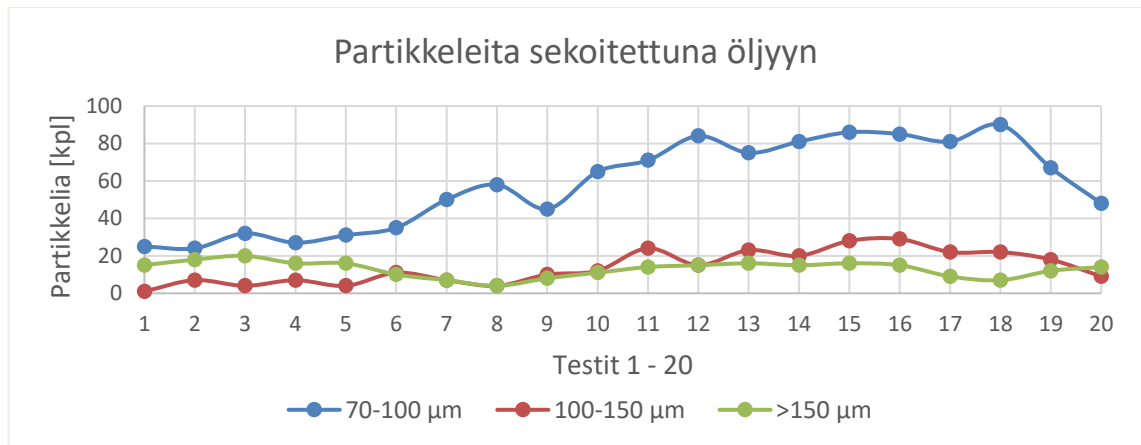
Seula (mm)	Seulalle jäi (g)	Seulalle jäi (%)	Läpäisy (%)
1	0	0	100
0.5	0	0	100
0.25	0	0	100
0.125	36.4	37	63
0.063	62.3	63.2	0
Pohja	0	0	
<b>Yhteensä</b>	<b>98.7</b>		



**Kuva 26.** Seulonnan raekokojakauma.

Rautapartikkelien lisäämisen jälkeen koetta jatkettiin samalla metodilla, kuin kokeessa 2. Öljyn lämpötila pidettiin huoneenlämpöisenä, eikä lämmitetty esimerkiksi koelait-

teessa käytettyyn lämpötilaan. Alhaisempi lämpötila antoi öljylle korkeamman viskositeetin, mikä hidasti öljyssä olevien partikkelien laskeutumista kanisterin pohjalle. Ennen öljyn loputtua kanisterista, jokaisen kokeen aikana kanisteria ravistettiin voimakkaasti. Ravistamisella saatiin öljy sekoitettua, minkä tarkoituksena oli osittain matkia putkessa aiheutuvaa turbulenttista ilmiötä, josta näyte on hyvä ottaa [46]. Hiljalleen virtaavassa öljyssä partikkelit voivat osittain laskeutua pohjalle [47]. Kuvassa 27 on esitetty induktiivisen partikkelilaskurin toimintaa havaita rautapartikkeleita öljystä.



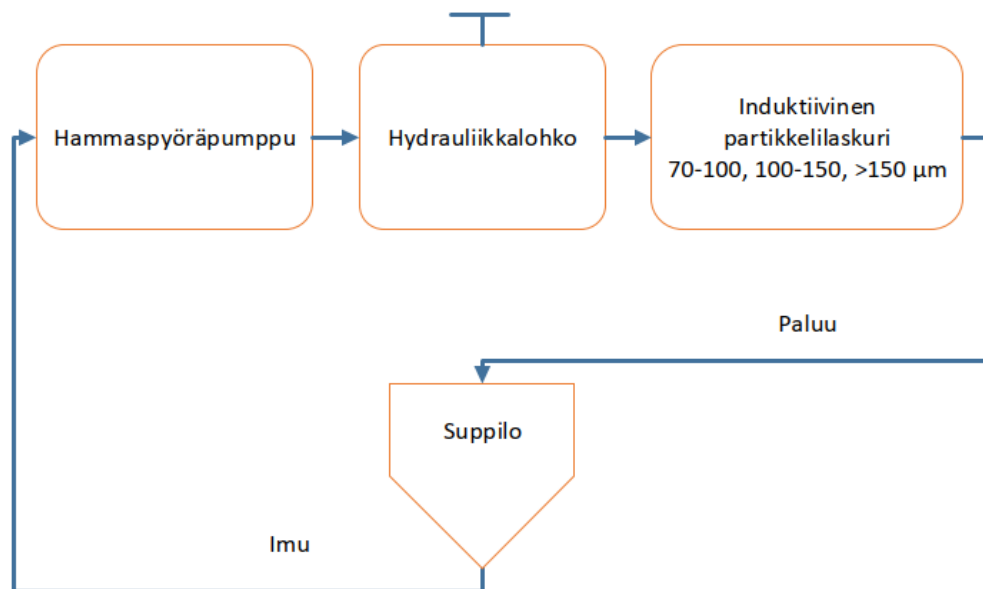
**Kuva 27.** Induktiivisen partikkelilaskurin toiminnallinen koe rautapartikkeleilla.

Kokeesta voidaan havaita, kuinka vaihtelevasti partikkelit kulkeutuivat järjestelmän läpi kokeen aikana. Pienet 70-100 µm kokoiset partikkelit nousivat radikaalisti ensimmäisten kymmenen suorituksen jälkeen. Ravistuksesta huolimatta partikkelit eivät kulkeutuneet tasaisesti. Syynä tälle voi olla partikkelien ”liimautuminen” osittain isommaksi raekooksi ja muutaman kerran jälkeen hammaspyöräpumppu irrotti partikkeleita toisistaan. Imuletkuun jäi kanisterin viimeiset desilitrat öljyä, mitkä saatiin imettyä ja imun katketessa osa öljystä valui partikkelien kanssa takaisin kanisteriin. Koe osoitti, että induktiivinen partikkelilaskurin anturi reagoi lisättyihin rautapartikkeleihin. Lisäksi pieniä partikkeleita 70-100 µm havaittiin kokeessa eniten, joka tuloksena on hyvin samansuuntainen raekokoanalyysin kanssa, jossa 63,2 prosenttia partikkeleista on alle 125 µm.



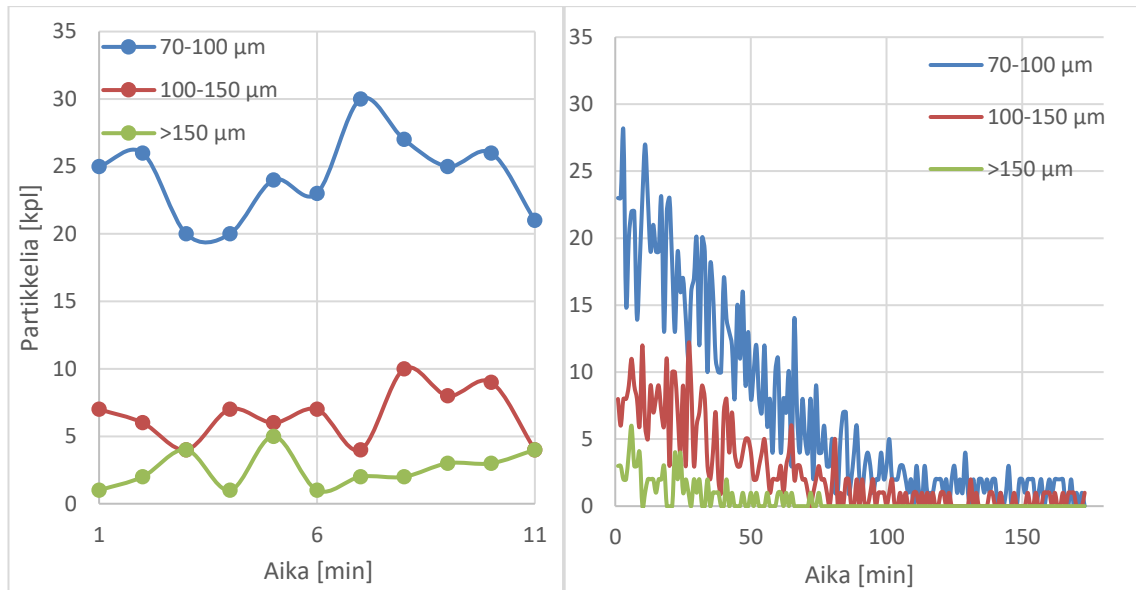
### 6.1.4 Koe 4

Neljännän kokeen tarkoituksena on kierrättää samaa öljyä induktiivisen partikkelilaskurin järjestelmän läpi. Periaatteessa käytössä olisi säiliö, mistä öljy otetaan kiertoon ja palautetaan samaan paikkaan. Ensimmäisten testien perusteella säiliö muutetaan suppiloksi, sillä oletuksella, että jokainen partikkeli kulkeutuisi virran mukana. Suppilolla saataisiin estettyä partikkelien juuttumisen paikoilleen. Partikkelit joutuisivat painovoiman vaikutuksesta suppilon pohjalle, mistä ne imettäisiin letkulla järjestelmään ja palautettaisiin takaisin suppiloon. Kokeen tuloksena tavoiteltiin tasaista trendiä, josta voidaan nähdä partikkelien kulkeutuminen järjestelmän läpi. Toteutus tehtiin kuvan 28 mukaisesti. Järjestelmän kaikki muut komponentit pidettiin ennallaan.



**Kuva 28.** Öljyn siirtyminen induktiiviselle partikkelilaskurille suppilon avulla.

Suppilossa kierrätettiin samaa öljyä, johon oltiin aikaisemmin laitettu partikkeleita. Suppilo on kooltaan iso, johon mahtuu 8 litraa öljyä. Kiertävässä järjestelmässä otettiin huomioon, että öljylle jäisi aikaa selkeentyä ennen uutta kierrosta. Isolla öljymäärällä saataisiin estettyä öljyn vaahtomaminen. Kuvassa 29 on esitetty suppilolla saadut ensimmäiset tulokset. Kuvassa pystyakselilla on partikkelien kappalemäärä ja vaaka-akselilla testaukseen käytetty aika minuuteissa.

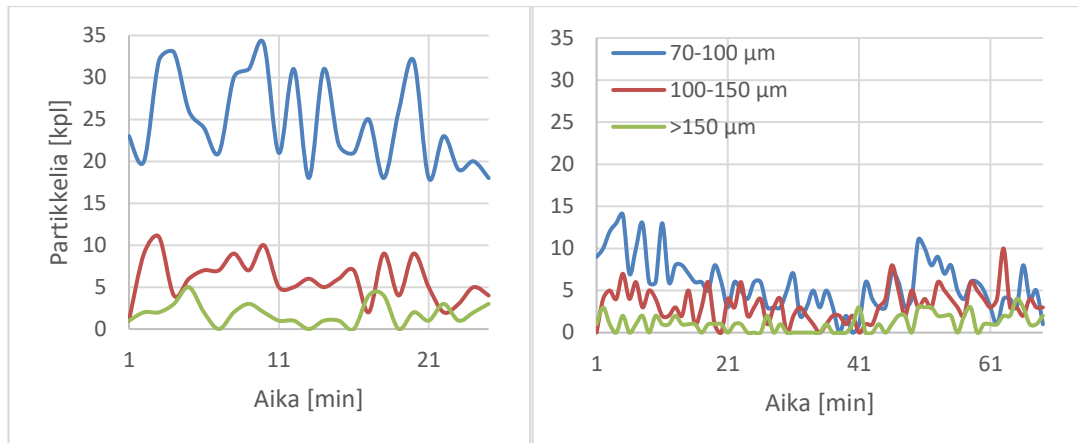


**Kuva 29.** Induktiivisen partikkelilaskurin toiminnan testaus suppilon kanssa.

Ensimmäinen koe suppilon kanssa toteutettiin lyhyellä 11 minuutin kokeella, vasemmanpuoleinen trendi. Haluttiin nähdä, onko rakenne suppilon kanssa toimiva. Ensimmäiset 11 minuuttia näyttää kokeen kannalta lupaavalta. Voisi olettaa partikkelien määrän käyttäytyvän kohtuullisen tasaisena trendinä, mistä nähtäisiin pidemmällä aikavälillä jatku-moa. Koetta jatkettiin seuraavaksi noin 180 minuuttia. Pidemmästä kokeesta voidaan havainnoida, että partikkelien kulkeutuminen järjestelmään on estynyt, oikeanpuoleinen trendi. Suppilo tyhjennettiin kokeen jälkeen ja saatiin selville osan partikkelien juuttuneen kiinni suppilon sisäpintaan.

### 6.1.5 Koe 5

Kokeessa 5 suppiloon tehtiin sekoittaja, joka pitää öljyn koko ajan liikkeessä estäen partikkelien jäämisen seinämään. Sekoittaessa öljyä tasaisesti partikkelit saatiin hyvin pienen pyörteen avulla liikkeelle. Kuvassa 30 on sekoittajalla saatuja tuloksia. Vasemmanpuoleinen trendi näyttäisi toimivaa rakennetta, jolla pystytään saamaan kohtalaisen vaakaata trendiä. Oikeanpuoleisessa trendissä sekoittaja pysäytettiin kahdeksi tunniksi ja yritettiin toistaa koetta.

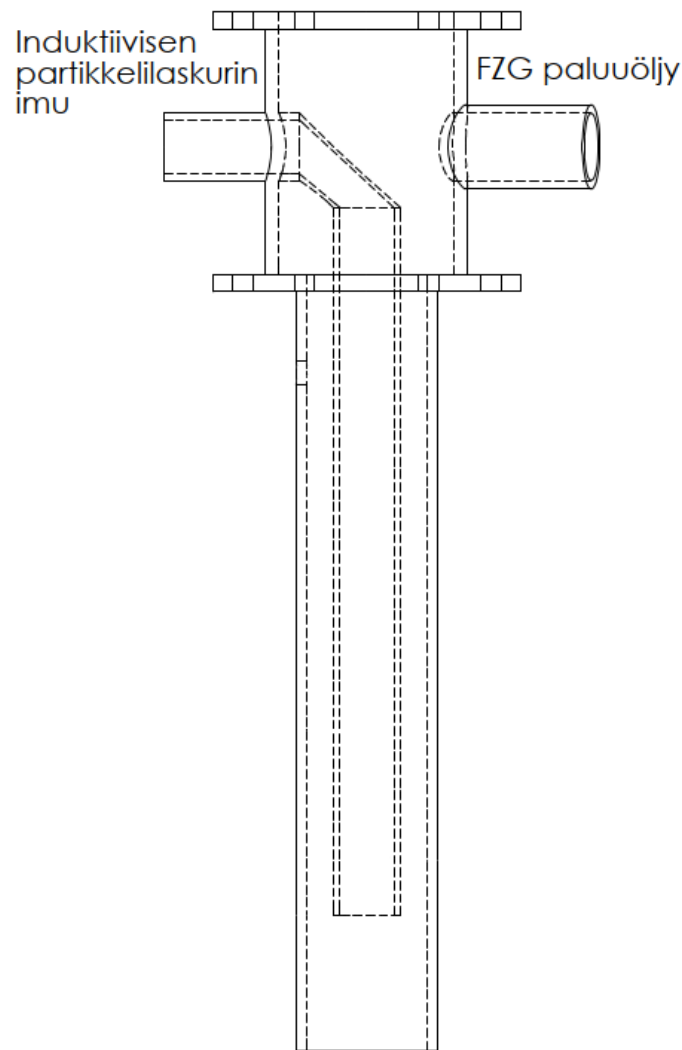


**Kuva 30.** Induktiivisen partikkelilaskurin testaus suppilon ja sekoittajan kanssa.

Kokonaisuutena saatiin osittain vakaata trendiä, mutta saman kokeen toistaminen ei tuottanut verrattavissa olevia tuloksia. Kaikkia trendejä katsoessa huomataan yhtäläisyytenä partikkelimäärän laskevan kokeellisen ajan pidentyessä. Partikkelit kumuloituvat hyvin herkästi pintoihin ja erityisesti erilaisiin öljyvirtausien katvealueisiin, esimerkiksi putkien kierteisiin ja poikkileikkausmuutoksiin.

### 6.1.6 Näytteenotto

Induktiivisen partikkelilaskurin toiminnan varmistamista selvitettiin vielä, kuinka säiliöön on toteutettu näytteenotto induktiiviselle partikkelilaskurille. Partikkelilaskurien pumppu saa öljyn FZG-hydrauliikkakoneikon säiliössä olevasta huohotinyhteestä. Samaan yhteen on asennettu FZG-koelaitteesta palaava öljy. Kuvassa 31 on esitetty FZG-koelaitteen paluuöljy ja induktiivisen partikkelilaskurin imuyhteet. FZG-koelaitteen öljy valuu vapaasti isomman putken sisälle, mistä se imetään partikkelilaskurien pumpulla järjestelmään.



**Kuva 31.** FZG-koelaitteen palaavan öljyn ja partikkelilaskurien imuyhteet.

Partikkelilaskurin järjestelmän virtausnopeudeksi on ilmoitettu 2 litraa minuutissa. Partikkelien kulkeutumisen varmistamiseksi mitattiin öljyn todellinen virtausnopeus induktiiviselle partikkelilaskurille. Öljyn virtausnopeus mitattiin paluusuodattimen jälkeen, mistä se palaa takaisin säiliölle. Virtausnopeudeksi saatiin noin 2.5 litraa minuutissa. FZG-koelaitteesta virtaa öljyä säiliöön 2 litraa minuutissa isomman putken sisälle ja samalla pienellä putkella imetään 2.5 litraa minuutissa. Partikkelilaskurien isomman virtausnopeuden ansiosta öljy nostattaa ja edesauttaa partikkelien kulkeutumista induktiiviselle partikkelilaskurille.

## 6.2 Partikkeli data-analyysi

FZG-koelaitteen öljyn puhtautta analysoidaan reaaliaikaisesti standardin ISO 4406 mukaisesti. FZG-koelaitteeseen menevää öljyä analysoidaan hydraulikkakoneikossa olevan painesuodattimen jälkeen laser partikkelilaskurilla. Laser partikkelilaskurilla pystytään varmistamaan koelaitteeseen syötettävän öljyn puhtaus. FZG-koelaitteen öljylle on asetettu puhtausvaatimukset väsymiskestävyystestejä suoritettaessa. Ohjelmasta pystytään reaaliaikaisesti valvomaan valittuja ISO luokkia trendinä. Laser partikkelilaskurin järjestelmästä öljyn puhtausanalyysin data saadaan Excel-tiedostomuotona ulos. Ohjelma suostuu tallettamaan 50 000 riviä yhteen tiedostoon, joka vastaa yli 830 tuntia tallennettua dataa.

Paalaavan öljyn puhtautta valvotaan reaaliaikaisesti optisella partikkelilaskurilla ISO luokituksen mukaan, joka on asennettu jälkikäteen induktiivisen partikkelilaskurin rinnalle. Koelaitteelta palaavan öljyn puhtaudesta pystytään analysoimaan hammaspyörien kulumisesta johtuva lisääntynyt epäpuhtauksien määrä öljyssä. Optisen ja induktiivisen partikkelilaskurin järjestelmästä saadaan öljyn puhtausanalyysi tekstitiedostona ulos.

Kuvassa 32 on esitetty partikkelilaskurien ohjelmien tallentamat suureet. Kuvassa ensimmäisenä on laser partikkelilaskurin Excel-tiedoston rivi, missä nähdään tallennetut kokoluokat ja aika. Kuvan alaosassa on tekstitiedostosta poimittu induktiivisen ja optisen partikkelilaskurin tallentama data samalla aikaleimalla. Tekstitiedoston "FeA" tarkoittaa induktiivisen partikkelilaskurin kokoluokkaa 70 – 100  $\mu\text{m}$ , "FeB" tarkoittaa 100 – 150  $\mu\text{m}$  ja "FeC" > 150  $\mu\text{m}$ . ISO koodin merkintätapa on molemmissa tiedostoissa erilainen, Excel-tiedostossa ISO koodin on samassa sarakkeessa kauttaviivalle erotettuna 21/18/0. Tekstitiedostossa ISO koodi ei ole järjestyksessä ilmoitettu, mutta on luettavissa 22/17/12. "SatLevel" on öljyn vesipitoisuusanturin mittaama tulos prosentteina ja "Zyklen" ohjelman laskennalliset kierrokset.

### Laser partikkelilaskurin data

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Time	ISO Code	>4 $\mu\text{m(c)}$	>6 $\mu\text{m(c)}$	>10 $\mu\text{m(c)}$	>14 $\mu\text{m(c)}$	>21 $\mu\text{m(c)}$	>25 $\mu\text{m(c)}$	>38 $\mu\text{m(c)}$	>70 $\mu\text{m(c)}$
2	2019-05-23 12:45:03	21/18/ 0	1755428	141896	916	0	0	0	0	0
3										

### Induktiivisen ja optisen partikkelilaskurin data

File Edit Format View Help

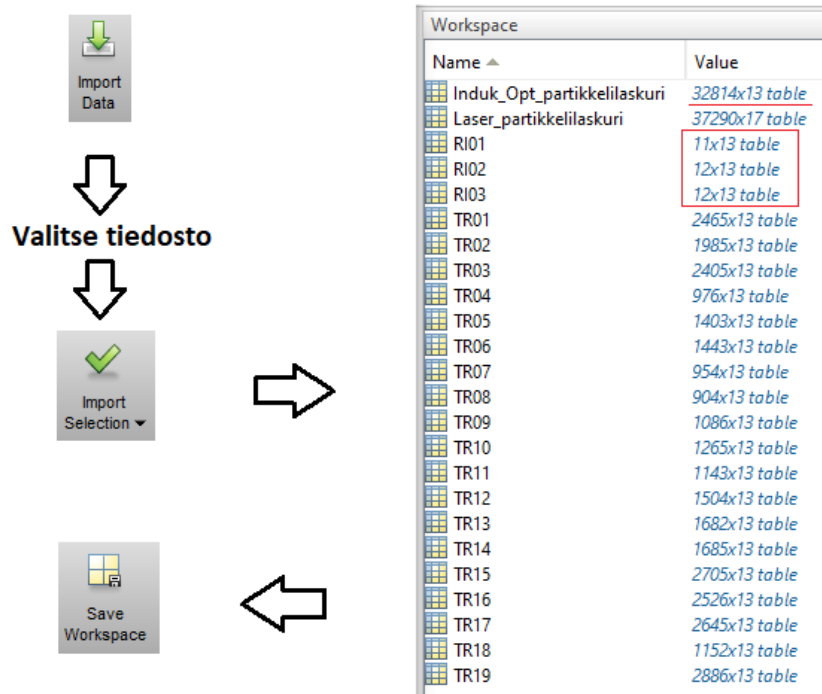
TimTime, Event, FeA, FeB, FeC, ISO14, ISO4, ISO6, SatLevel, Zyklen  
2019-05-23 12:45:00,0 - 0,0,0,0,12,22,17,3,0

**Kuva 32.** Partikkelilaskurien tallennetut suureet.

Partikkelilaskurien datan analysoimiseen käytetään MATLAB-ohjelmaa. Datan analysoiminen suoritetaan aloitusvaiheessa manuaalisesti. Tarkoituksena on saada tunnistettua käsin suoritettaessa työvaiheet, jotka voidaan jatkossa suorittaa MATLAB-ohjelmassa automaattisesti.

Data-analyysi aloitetaan tuomalla molempien partikkelilaskurien tiedostot samaan paikkaan, josta ne voidaan analysoida. Laser partikkelilaskurin data on tallennettu yhteen Excel-tiedostoon. Induktiivisen ja optisen partikkelilaskurin data tallentuu tekstitiedostona monessa osassa. Aina kun FZG-koelaitte käynnistetään ja sammutetaan uudelleen, luodaan samalla uusi tekstitiedosto. Tekstitiedostot nimetään testiajojen mukaan "Test Run 01, TR02 TR03 ...". Tiedostoja voi tulla yhdestä yhden hammaskyljen väsymiskestävyystestistä jopa yli 30 kappaletta. Usein kuitenkin väsymiskestävyystestit on saatu suoritettua alle 10 kappaaleen tiedostoilla.

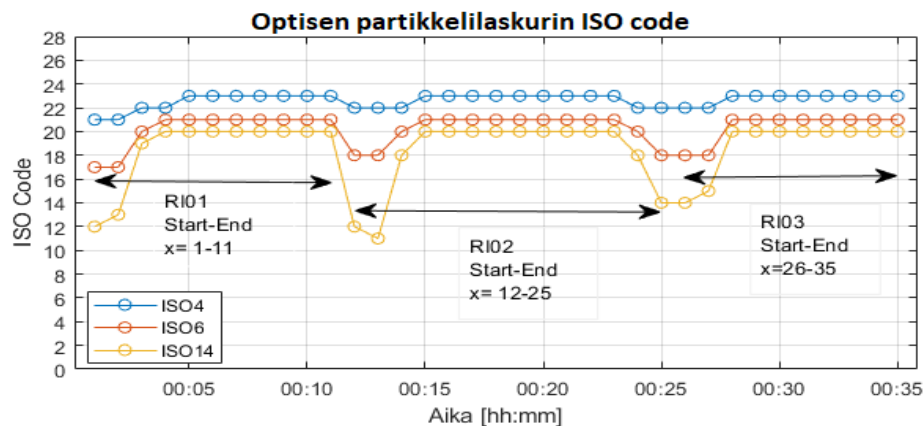
Kuvassa 33 on esitetty datan tuominen MATLAB-ohjelmaan. Kuvassa on laser partikkelilaskurin tiedosto yhtenä taulukkona, joka sisältää 37290 riviä. Induktiivisen ja optisen partikkelilaskurin tiedosto, koostuu "TR" taulukoista. Run In "RI" taulukot ovat väsymiskestävyystestien aloituksessa tulevia sisäänajovaiheen dataa. Partikkelilaskurien data tallentuu minuutin välein tiedostoon, 32814 rivin taulukossa on yli 22 päivää kestävä koeajo kyseessä.



**Kuva 33.** Datan tuominen MATLAB-ohjelmaan.

Laser partikkelilaskurin tallennus ei pysähdy itsestään, mistä johtuen datassa on suurempi rivimäärä. Induktiivisen ja optisen partikkelilaskurin datan aikaleimasta voidaan kohtalaisen hyvin tarkistaa koneen todellinen testiaika. Aloituksen aikaleima pitää minuutilleen paikkaansa, testin loputtua tallentuu vielä noin 5 minuutin ajan dataa, vaikka kone on pysähtynyt. Pidentetyllä tallennuksella on varmistettu, että koelaitteen sammutushetkellä irtoavat partikkelit ehtivät kulkeutumaan öljyn mukana partikkelilaskurille ennen kuin datan tallennus lopetetaan.

Kuvassa 34 on esitetty optisen partikkelilaskurin data ISO 4406 standardin mukaan. Kuvassa näkyvät sisäänajot suoritetaan 10 minuutin koeajolla. Jos halutaan suorittaa hammaspyörien väsymiskestävyystesti kuormitustasolla L4, suoritetaan sisäänajo tasoilla L1-L3. Kuormitustasoa nostetaan aina 10 minuutin välein haluttuun tasoon asti. Kuvasta huomataan aloituksessa tapahtuva noin 3-4 minuutin viive, jotta koelaitteesta irtoavat partikkelit saavuttavat partikkelilaskurin järjestelmän. Run In 02 lopussa on 3 minuutin jakso, missä koelaitte on ehtinyt olla pysähdyksissä.

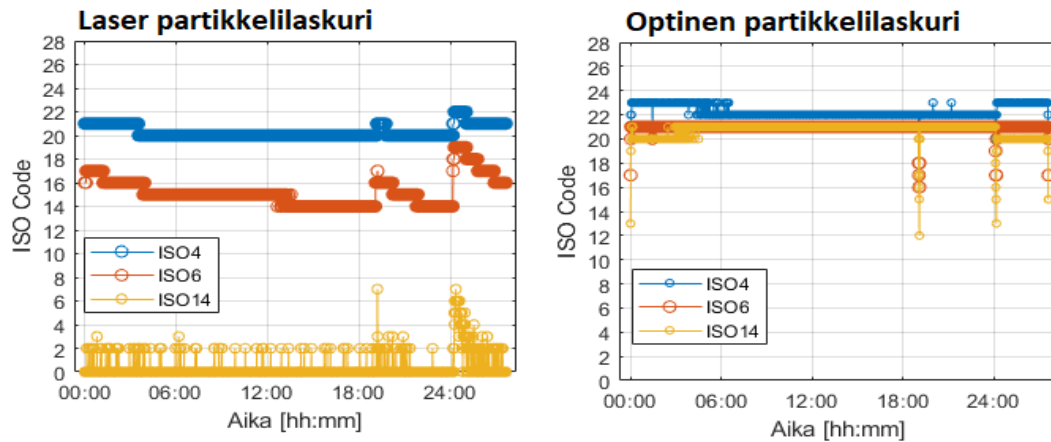


**Kuva 34.** Optisen partikkelilaskurin data sisäänajovaiheessa.

Tallennettujen partikkelilaskurien datan vertailemiseksi keskenään on poistettava ylimääräiset aikaleimat laser partikkelilaskurin tiedostosta. Vertailtavat aikaleimat otetaan induktiivisen ja optisen partikkelilaskurin tiedostosta. Mittausdatan vertailuun tehtiin MATLAB-ohjelmalla koodi. Koodilla saadaan molempien partikkelilaskurien data yhte-neväiseksi samalla aikaleimalla ja pystytään vertaamaan saatuja tuloksia.

Jokaisesta koelaitteella ajettua testidatasta saadaan piirrettyä öljyn kunnonvalvonnan puhtautta kuvaava trendi ISO luokkien mukaan. Kuvassa 35 on esitetty öljyn puhtaus hammaspyörien väsytestissä. Ensimmäisessä kuvassa on FZG-koelaitteeseen menevän öljyn puhtaus ja toisessa palaavan öljyn puhtaus. Kuvassa oleva X-akseli kuvaa

koelaitteella suoritetun testin pituutta. Kyseistä testiä on koelaitteella ajettu 27 tuntia ja 38 minuuttia.



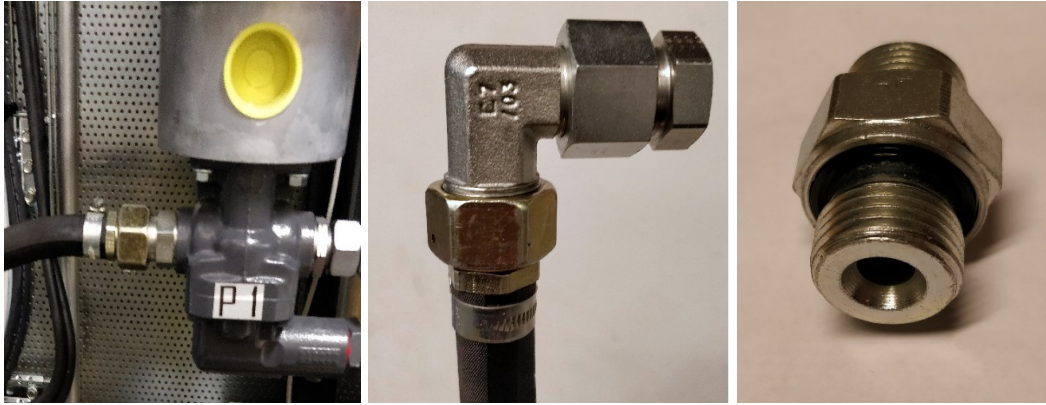
**Kuva 35.** Partikkelilaskurien ISO puhtausluokkien vertailu.

Kuvasta 35 nähdään partikkelimäärien käyttäytyminen kokeen aikana. Hammaskylkien kulumisen vuoksi partikkelimäärät eroavat kuvaajissa. Öljyn ulostulossa partikkelien määrä on suurempi kuin sisään menevässä öljyssä, joka on painesuodattimen läpi pumputtu koelaitteeseen.

### 6.3 Mittauksien luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä

Induktiivisen partikkelilaskurin toiminnallisessa kokeessa keskeisenä tuloksena oli partikkelien määrän väheneminen kokeen pidentyessä. Tämä tapahtui siitäkin huolimatta, että partikkelilaskurille järjestettiin yksinkertainen suljettu voitelukierto kuvan 28 mukaan, jossa tankkina toimi suppilo ja öljyä sekoitettiin. Lisäksi partikkelien määrässä oli vaihtelua ajan suhteen. Tuloksista voidaan päätellä, että partikkelit kumuloituvat hyvin herkästi esimerkiksi putkien kierteisiin ja poikkileikkausmuutoksiin. Induktiivisen partikkelilaskurin kokonaisuuden tarkastelussa havaittiin kohtia, joilla voi olla vaikutusta partikkelien kulkemiseen. Kuvassa 36 on esitetty imuletkun liittäminen hydraulikkapumppuun. Vaakatasossa oleva letku, joka on liitetty hydraulikkaliittimeen, on mahdollisesti kohta mihin partikkelit voisivat kumuloitua. Partikkelien kulkua induktiiviselle partikkelilaskurille pyrittiin helpottamaan pienillä muutoksilla, esimerkiksi asentamalla kulmaliitin, jolla saatiin muutettua poikkileikkausmuutoksen asentoa.

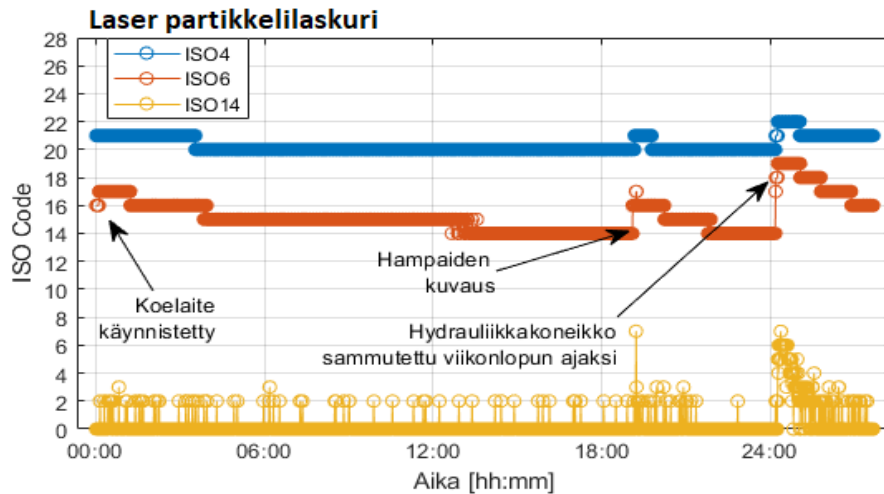




**Kuva 36.** Imuletkun asennon korjaus liittimellä.

Oikeanpuoleinen hydraulikkaniippa kaventaa sisähalkaisijan yli puolet pienemmäksi, verrattuna siihen, mitä se on hydraulikkaletkussa. Samanlaisia hydraulikkaniippoja on käytetty induktiivisen partikkelilaskurin järjestelmässä, missä erilaiset komponentit on sovitettu yhteen. Tämän tutkimuksen kannalta induktiivisen partikkelilaskurin toimivuuden testausta voidaan pitää riittävänä.

Partikkelilaskurien ISO puhtausluokkien datasta huomattiin tutkimuksessa, että hydraulikkakoneikon säiliössä öljy sekoittuu voitelukierron sammutusten ja käynnistysten yhteydessä. Hydraulikkakoneikon sammutus ja käynnistys aiheuttavat painemuutoksia imusuodattimessa, jossa osa siihen jääneistä epäpuhtauksia mahdollisesti irtoaa ja liukenee uudelleen kiertoon. Lisäksi säiliössä tapahtuvat virtausmuutokset voivat nostaa irronneita partikkeleita säiliön pohjalta uudelleen voitelukiertoon. Partikkeleita sekoittuu öljyyn eniten, kun hydraulikkakoneikko käynnistetään öljyn ollessa huoneenlämpöistä. Kuvassa 37 on esitetty laser partikkelilaskurin data yhden testin ajalta. Kuvasta huomataan partikkelien vähenevän pitkän ajon aikana. Hammaskylkien mikroskooppikuvausten ajaksi hydraulikkakoneikko on päällä, mutta öljy kulkee säiliössä minimikiertoventtiilin kautta. Viikonlopuksi hydraulikkakoneikko on sammutettu, minkä johdosta hammaspyörien testaamisen jatkuessa, on öljyyn sekoittunut suuri määrä epäpuhtauksina esiintyviä partikkeleita.

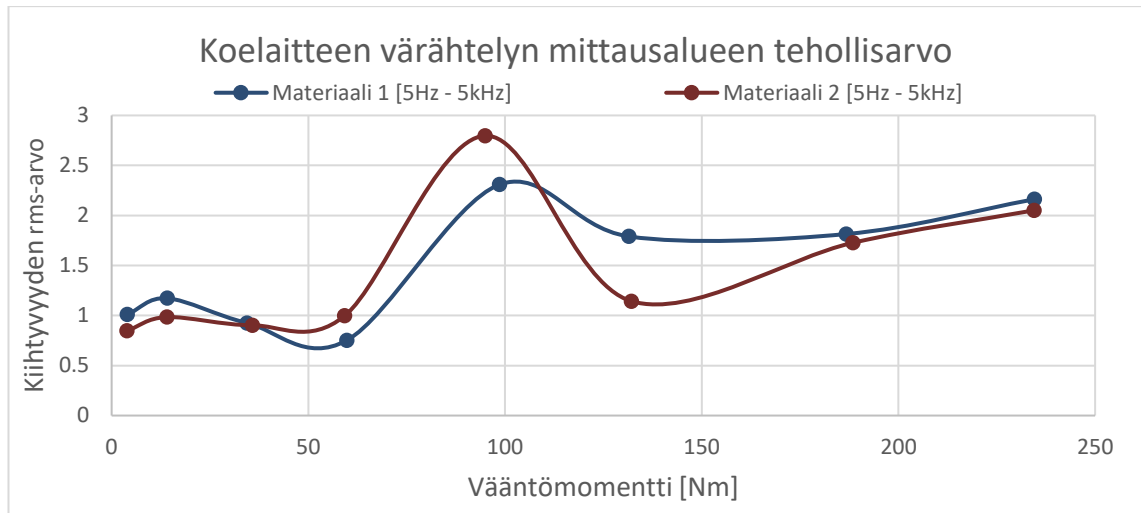


*Kuva 37. Pienten partikkelien sekoittuminen sisäänmenon voitelukiertoon.*

## 6.4 Värähtelyanalyysi

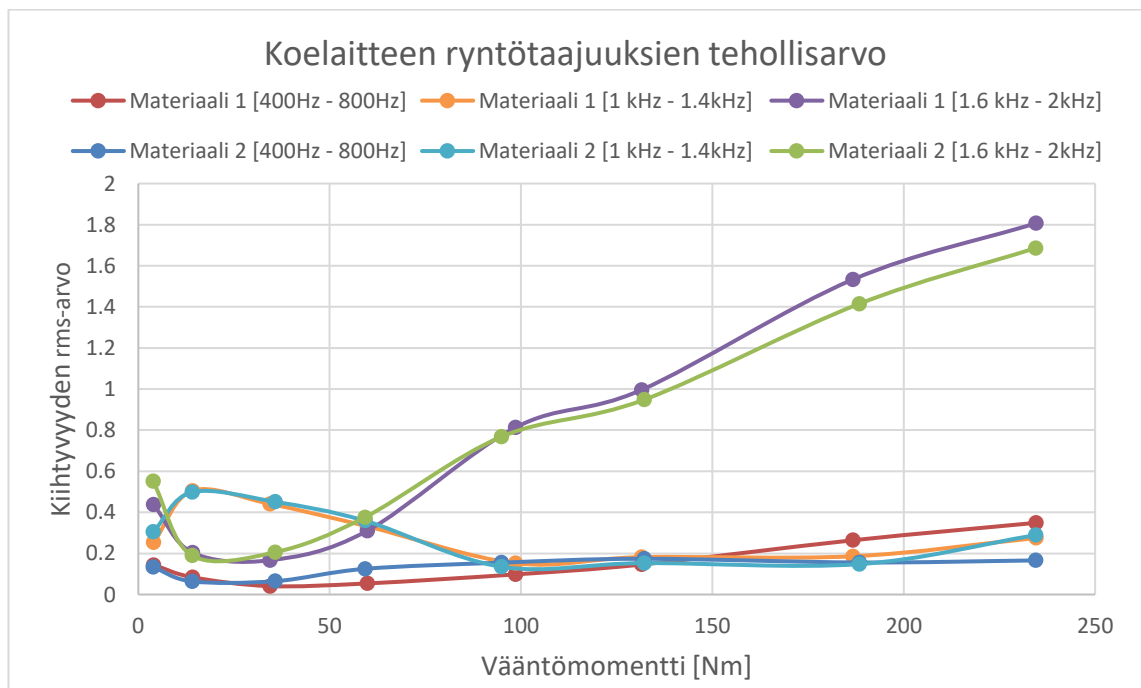
### Ryntötaajuuden värähtelyn analyysi

Värähtelyanalyysi aloitettiin tutkimalla koelaitteen mekaanista värähtelyä väsytykestävyysteisteissä. Tutkimuksessa vertaillaan kahden eri materiaalin, Materiaali 1 ja Materiaali 2, värähtelyä kuormitustasoilla L1 – L8. Mittaukset suoritettiin uusille hammaspyörille 10 minuutin testiajolla, jota edelsi 20 minuutin sisäänajovaihe jokaisella kuormitustasolla. Testitilanteessa koelaitteessa pidettiin sama pyörimisnopeus materiaalien välillä. Värähtelyn kiihtyvyyssignaali suodatettiin taajuuskaistaltaan kokonaisvärähtelyä mittaavaan alueeseen 5Hz – 5kHz ja tehtiin tilastollinen analyysi laskemalla siitä tehollisarvo. Kuvassa 38 on esitetty analyysin tulokset eri kuormitustasoilla. Kuvasta huomataan tehollisarvon nouseminen noin 90Nm kohdalla. Tehollisarvon nousu viittaisi koelaitteessa tapahtuvaan resonanssiin. Kiihtyvyyksien vaihtelun kuormituksen funktiona saattaa vaikuttaa myös hammaspyörien mikrogeometria, eli niin sanotut helpotukset.



**Kuva 38.** Koelaitteen värähtelyn mittausalueen tehollisarvo.

Ryntötaajuuden värähtelyn analysissa värähtelysignaali suodatettiin kolmeen taajuuskaistaan: ryntötaajuus 400 Hz – 800 Hz, ryntötaajuuden toinen kerrannainen 1 kHz – 1.4 kHz ja ryntötaajuuden kolmas kerrannainen 1.6kHz – 2 kHz. Suodatetut kiihtyvyyssignaalit analysointiin laskemalla tehollisarvo. Kuvassa 39 on esitetty koelaitteen värähtelyn kiihtyvyyden tehollisarvo eri kuormitustasoilla. Kuvasta voidaan huomata, että ryntötaajuuden kolmas kerrannainen nousee huomattavasti enemmän ensimmäiseen ja toiseen ryntötaajuuteen verrattuna.



**Kuva 39.** Koelaitteen värähtelyn kiihtyvyyden tehollisarvo eri kuormitustasoilla.

Kuvista nähdään koelaitteen värähtelyn tehollisarvojen käyttäytyminen eri kuormitustasoilla. Kahden eri materiaalien välinen vertailu ei myöskään tunnu tuovan suurta eroavaisuutta tuloksiin. Koelaitteen analyysi tehollisarvon tulosten mukaan on nousujohtainen kuormitustasojen kasvaessa, pois lukien mahdollisesta resonanssista aiheutuva kokonaisvärähtelyn kasvu.

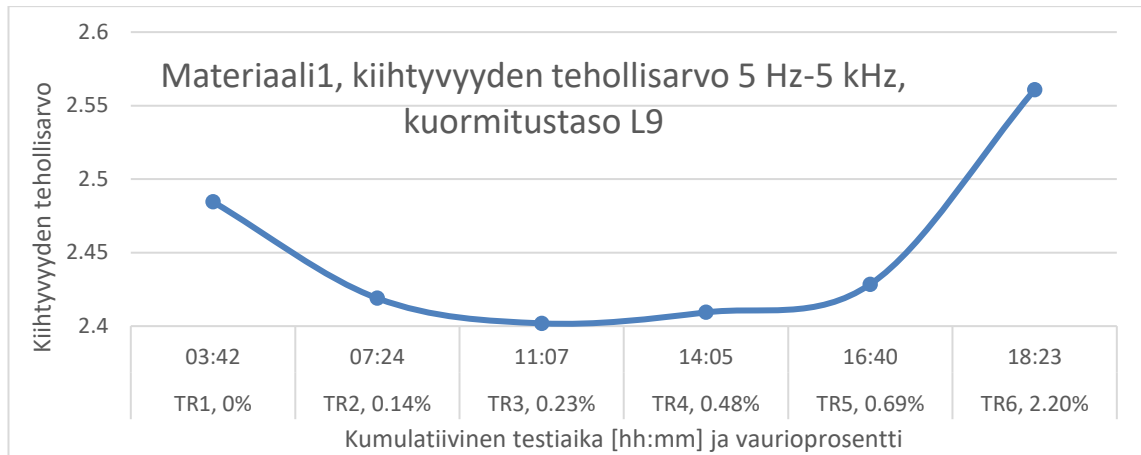
## Tunnuslukuanalyysi

Väsytesteissä tutkittiin mahdollisuutta tunnistaa hammaspyörissä alkava vaurioituminen analysoimalla värähtelyn kiihtyvyyttä. Kiihtyvyyssignaaliille tehtiin tilastollinen analyysi laskemalla siitä luvussa 4.3 esitetyt tunnusluvut, eli tehollisarvo, kurtosis arvo ja huippukerroin. Tunnusluvut laskettiin eri taajuuskaistoilta siten, että värähtelysignaali suodatettiin neljään eri taajuuskaistaan: kokonaisvärähtely 5 Hz – 5 kHz, ryntötaajuus 400 Hz – 800 Hz, ryntötaajuuden toinen kerrannainen 1 kHz – 1.4 kHz ja ryntötaajuuden kolmas kerrannainen 1.6kHz – 2 kHz.

Tutkimuksessa vertailtiin kahden eri materiaalin, Materiaali 1 ja Materiaali 2, tunnuslukuja eri kuormitustilanteissa, joissa on sama pyörimisnopeus sekä vaurioitumisen aste on tiedossa. Vaurioitumisen prosentti ilmoittaa vaurioituneen pinta-alan hampaankyljessä. Vauriokuvaus esitelty tarkemmin kappaleen 6 alussa.

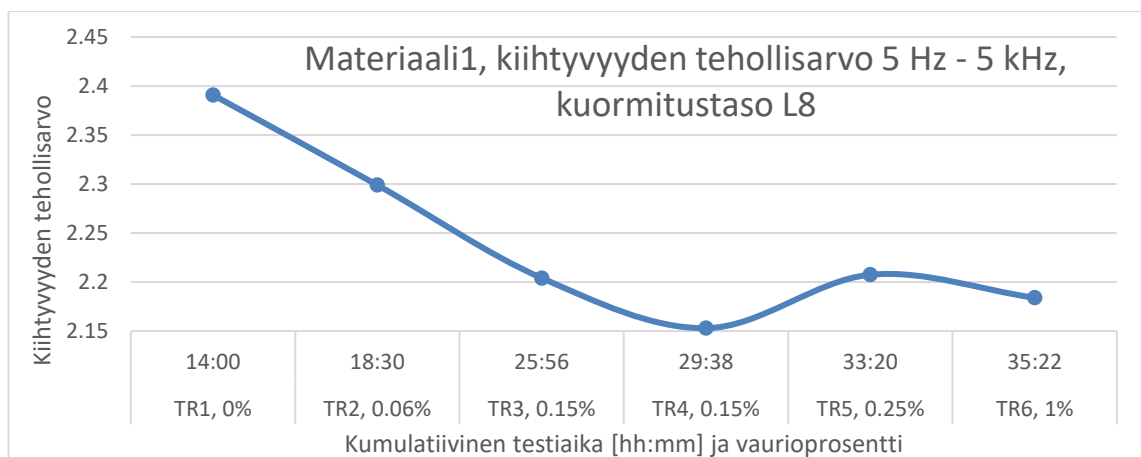
Tunnuslukuanalyysissa käytettiin hyödyksi koelaitteen testiajoja (test run). Jokaisen testiajon värähtelysignaalista otettiin 20 sekunnin näytejaksoja 10 minuutin välein. Värähtelysignaalin näytejakson ensimmäinen näyte otettiin 30 minuutin päästä koelaitteen käynnistymisestä, jolloin varmistettiin riittävä aika koelaitteen stabiloitumiselle. Värähtelysignaalista otetut näytteet analysoitiin tunnusluvuilla ja tuloksista otettiin keskiarvot koelaitteen testi ajojen mukaan. Tuloksissa on esitetty värähtelysignaalin kokonaisvärähtely 5 Hz – 5 kHz taajuuskaista. Ryntötaajuuksien analysoinnin tuloksena saatiin osittain vaihtelevia arvoja. Tästä johtuen kokonaisvärähtelyn tulokset kuvaavat paremmin vaurioitumisen lisääntymistä.

Materiaali 1 kokonaisvärähtelyn tehollisarvon taso on esitetty kuvassa 40 kuormitustasolla L9. Kuvasta huomaa kuinka pintojen hioutuminen on alussa laskenut ensin tehollisarvoa ja kasvanut myöhemmin vaurion kehittyessä. Kohtalaisen korkeasta kuormitustasosta johtuen vaurioituminen alkaa tapahtua hyvin aikaisessa vaiheessa.



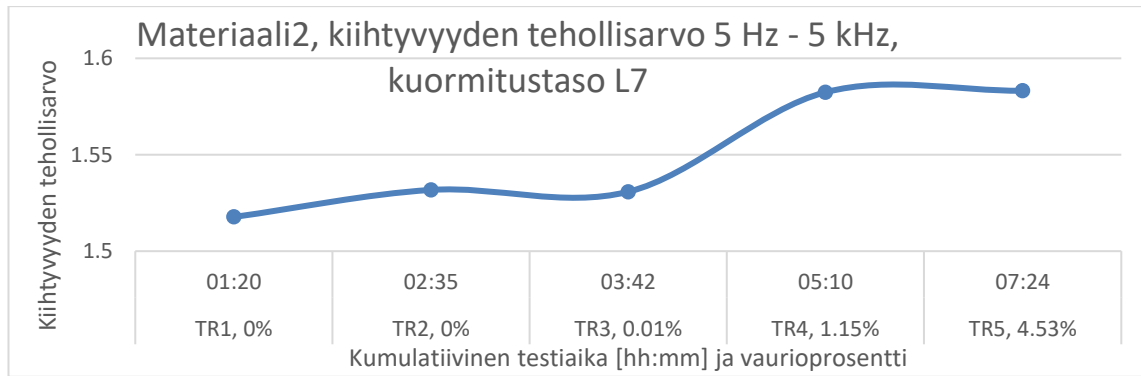
**Kuva 40.** Materiaali 1, kiihtyvyyden tehollisarvo 5 Hz – 5 kHz, kuormitustaso L9.

Kuormitustasolla L8 tehollisarvon kokonaisvärähtely on esitetty kuvassa 41. Kuvassa oleva tehollisarvo käyttäytyy kuormitustason muutoksesta johtuen eri tavalla, kuin aikaisemmassa kuvassa.

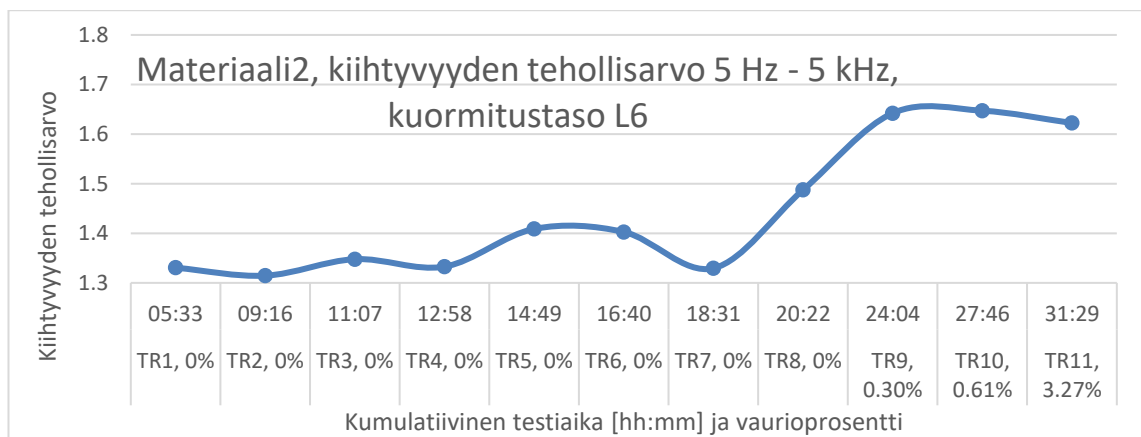


**Kuva 41.** Materiaali 1, kiihtyvyyden tehollisarvo 5 Hz – 5 kHz, kuormitustaso L8.

On mahdollista, että tehollisarvo olisi lähtenyt kasvamaan kuvassa 41, mikäli testiajoa oltaisiin jatkettu vastaamaan kuvan 40 vauriotumista. Materiaalista 2 analysoitiin kuormitustasot L7 ja L6. Kuvissa 42 ja 43 on esitetty materiaalin 2 kokonaisvärähtelyn tehollisarvo. Materiaali 2 ei ole yhtä kestävä, kuin materiaali 1, joten materiaalin 2 kuormitustasoiksi valittiin L7 ja L6, koska ne vastaavat kumulatiivisten testiaikojen kanssa parhaiten materiaalin 1 L9 ja L8 tasoa.



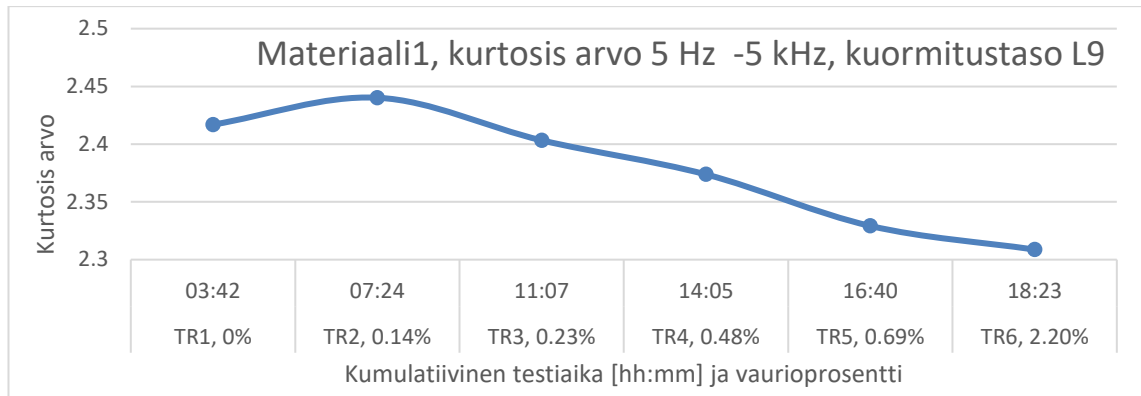
**Kuva 42.** Materiaali 2, kiihtyvyyden tehollisarvo 5 Hz – 5 kHz, kuormitustaso L7.



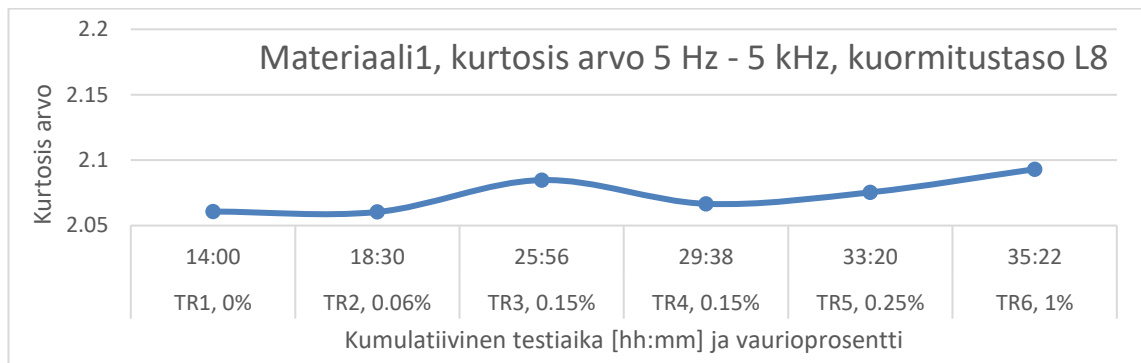
**Kuva 43.** Materiaali 2, kiihtyvyyden tehollisarvo 5 Hz – 5 kHz, kuormitustaso L6.

Materiaalin 2 kokonaisvärähtelyn taso kasvaa molemmissa kuvissa vaurion lisääntyessä. Kuormitustasolla L6 tehollisarvon vaihtelu on voimakkaampaa, kuin tasolla L7. Materiaali 1 ja materiaali 2 käyttäytyvät edellä esitettyjen kiihtyvyyden tehollisarvon kuvissa eri tavalla. Materiaali 1 kuvista näkee alussa tehollisarvon laskun, kun taas materiaali 2 tuottaa vakaampaa etenemistä ennen vaurioitumista. Ryntötaajuuksien analysoimisesta ainoastaan kolmas kerrannainen taajuustasolla 1.6 Hz – 2 kHz tuotti vastaavanlaisia kuvia, mitä saatiin kokonaisvärähtelyllä. Ensimmäinen ja toinen ryntötaajuuden kerrannainen ei tuottanut analyysissä kuvausta, mistä olisi pystytty indikoimaan alkava vaurioituminen.

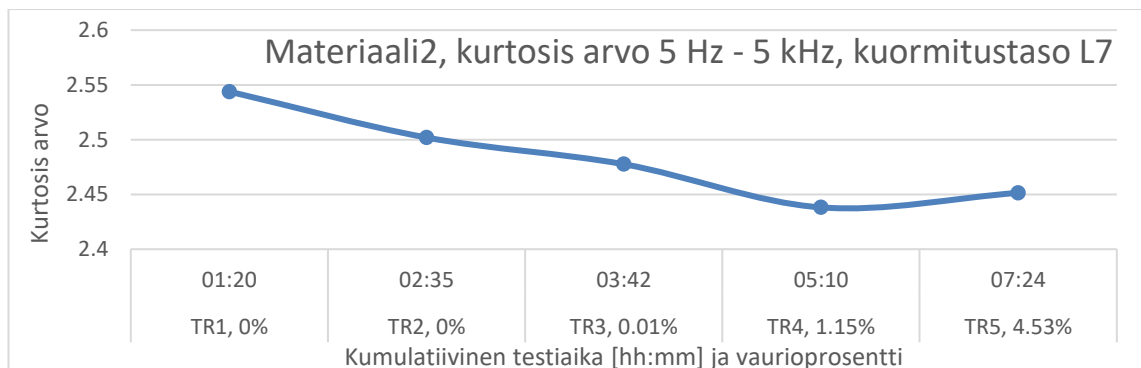
Analysoinnista saadut kurtosis arvon tulokset on esitetty kuvissa 44 – 47. Kuvissa on esitetty värähtelyn kokonaistasosta laskettu kurtosis arvo jokaiselle materiaalille ja kuormitustasolle.



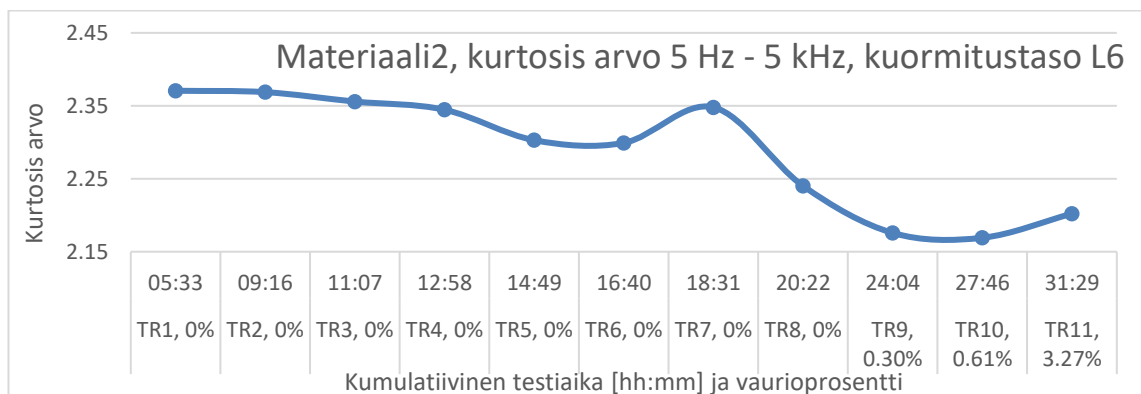
**Kuva 44. Materiaali 1, kurtosis arvo kuormitustasolla L9.**



**Kuva 45. Materiaali 1, kurtosis arvo kuormitustasolla L8.**

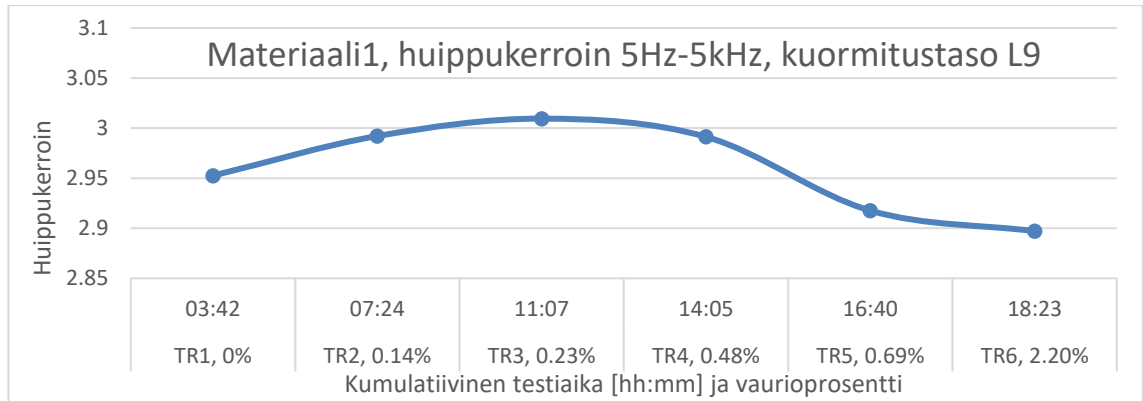


**Kuva 46. Materiaali 2, kurtosis arvo kuormitustasolla L7.**

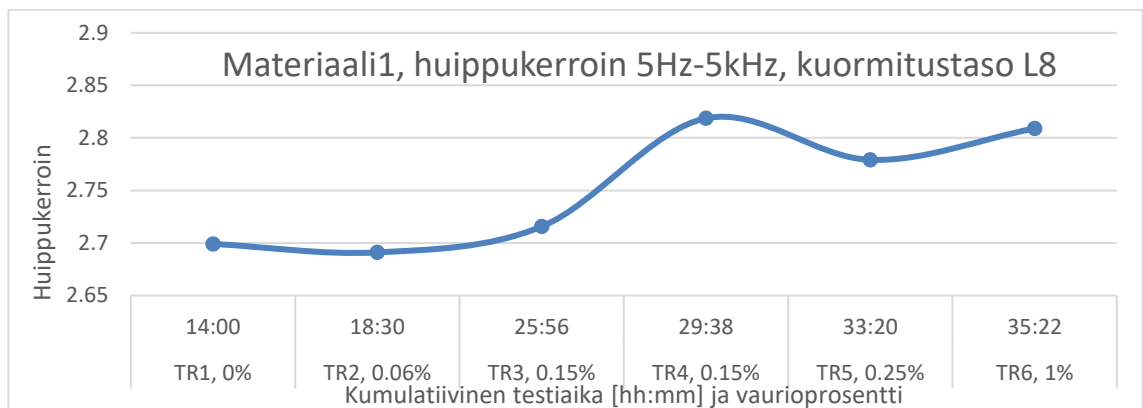


**Kuva 47. Materiaali 2, kurtosis arvo kuormitustasolla L6.**

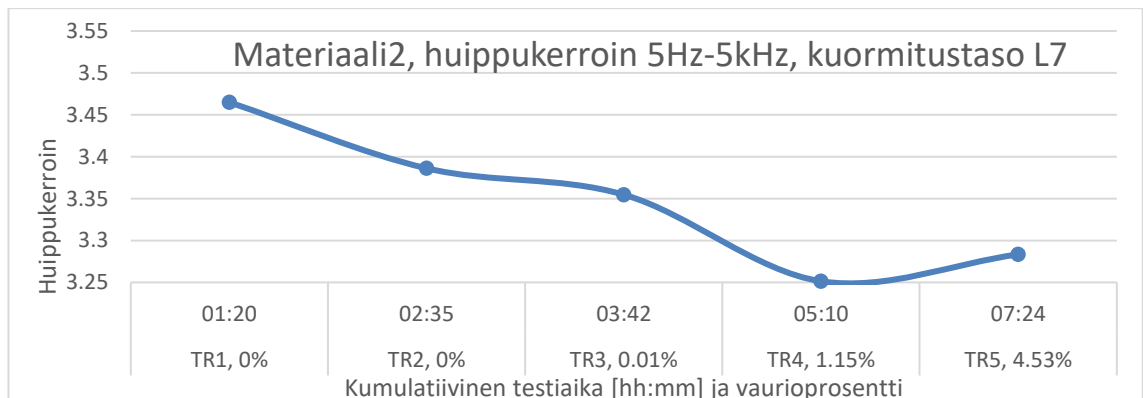
Analyysin perusteella kurtosis arvo näyttäisi laskevan alkavan vaurion kehittyessä. Kuva 45 on ainoa, jossa kurtosis arvo pysyttelee vakaamin samalla vaaka-akselilla. Ryntötaajuuksien analyysistä saatiin vastaavia tuloksia, kuin kuvassa 45, kohtuullisen vakaata trendiä, jossa tapahtuu pieniä muutoksia. Seuraavissa kuvissa 48 – 50 on esitelty huippukertoimen tulokset.



**Kuva 48.** Materiaali 1, huippukerroin kuormitustasolla L9.

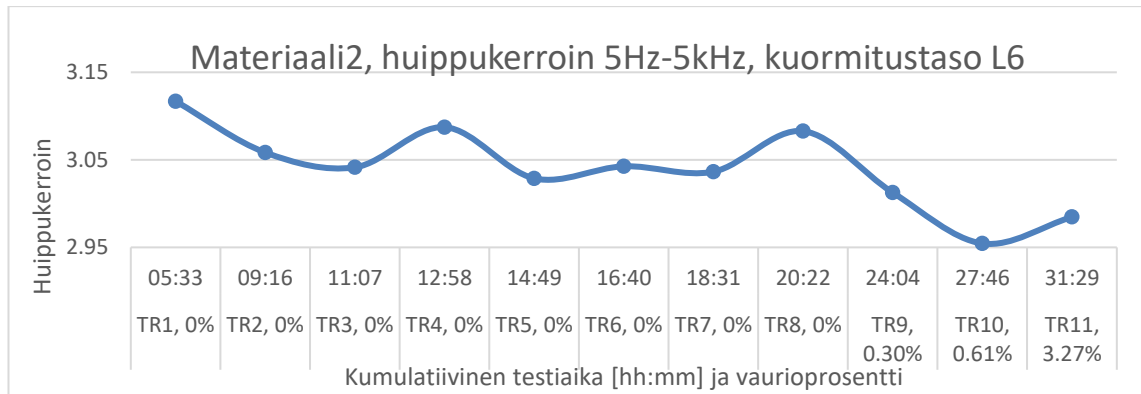


**Kuva 49.** Materiaali 1, huippukerroin kuormitustasolla L8.



**Kuva 50.** Materiaali 2, huippukerroin kuormitustasolla L7.





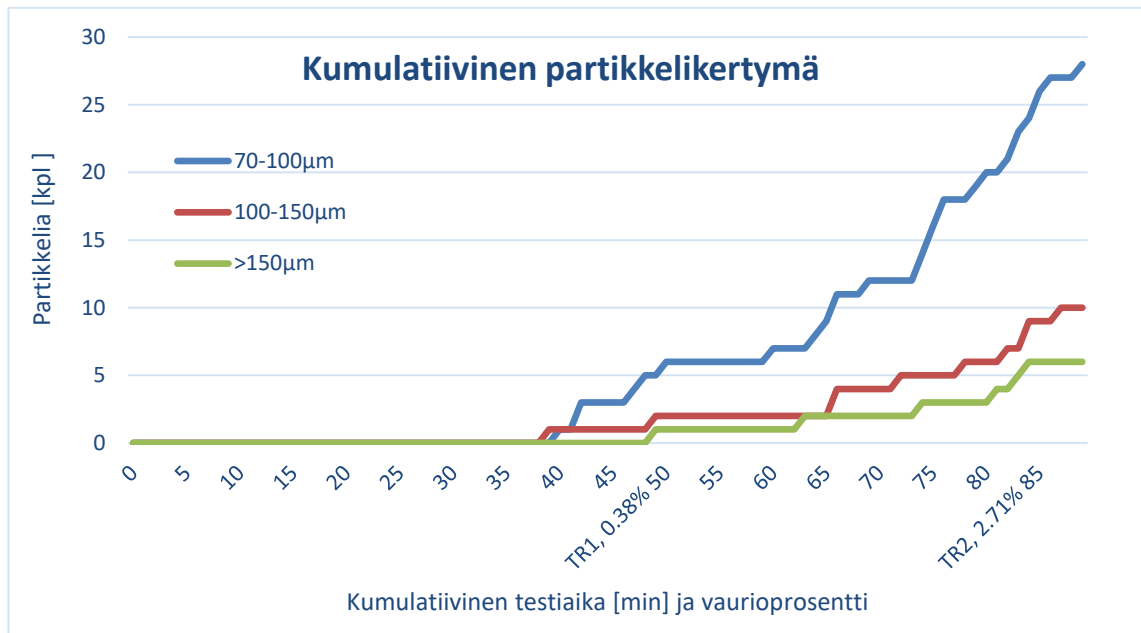
**Kuva 51. Materiaali 2, huippukerroin kuormitustasolla L6.**

Huippukertoimen tuloksista materiaali 1 trendi nousee vähän vaurion lisääntyessä ja materiaali 2 laskevaa trendiä. Ryntötaajuuksien analyysistä saatiin yhtä vaihtelevia trendejä, kuin kokonaisvärähtelytasolla.

Koelaitteella suoritettavia väsytestejä ajetaan monella kuormitustasolla ja lisäksi materiaalityypit vaikuttavat värähtelyn voimakkuuteen, nämä molemmat vaikuttavat tunnuslukujen tuloksiin. Tuloksista parhaiten vaurion lisääntymisestä indikoi kiihtyvyyden tehollisarvo, jossa kuvaajista yli puolet osoitti nousujohteista trendiä loppua kohden. Tuloksista voidaan päätellä kyseisten tunnuslukujen sopivan vaurio tarkasteluun tapauskohtaisesti, mutta koelaitteella eri kuormitustasot ja materiaalit vaikuttavat tunnuslukujen amplitudiin.

## 6.5 Väsytestien käynninvalvonnan kehittäminen

Hammaspyörien väsykestävyydestejä on analysoitu koelaitteeseen asennetun öljyn kunnonvalvontalaitteiston ja värähtelyn kiihtyvyyssanturin avulla. Öljyn kunnonvalvontalaitteistossa olevan induktiivisen partikkelilaskurin toimivuutta ja yleisemmin partikkelien käyttäytymistä voitelujärjestelmässä testattiin erilaisten kokeiden avulla kappaleessa 6.1. Kokeista voitiin todeta partikkelilaskurin looginen reagointi partikkelien määrään ja kokoon, sekä partikkelien herkkyys kiinnittyä putkistoihin ja pintoihin. Loppuvaiheessa väsytestejä koelaitteella haluttiin testata uuden materiaali 3 väsykestävyyttä. Materiaali 3 väsykestävyydesteissä induktiivinen partikkelilaskuri havaitsi partikkeleita enemmän, kuin aikaisemmissa testeissä. Onkin mahdollista, että materiaalityypillä on vaikutusta siihen, paljonko hampaankyljestä irtoaa kuoppautumisen johdosta isoja partikkeleita. Kuva 52 näyttää materiaali 3 kumulatiivisen partikkelikertymän. Kuvasta huomataan partikkelimäärän looginen kasvu vaurion edetessä.



**Kuva 52.** Materiaali 3 kumulatiivinen partikkelikertymä.

Öljyn puhtauden seuraamiseen tehtiin MATLAB tiedoston pohjalle koodi, jolla pystytään seuraamaan ISO 4406 puhtausluokkia. Koodilla saadaan mittausdatan analysoinnin tuloksena vertailtua FZG koelaitteen tulo ja paluu öljyn puhtautta koetilanteessa. Lopulliset hiukkanalyysin tulokset pystytään liittämään koeajoraportteihin.

Värähtelyanalyysistä saatiin hyviä tuloksia ja esitetyillä tunnusluvuilla erityisesti on mahdollista tiedostaa hammaskylkien vaurioituminen. Värähtelyanalyysi onkin hyvä lisä partikkelianalyysin rinnalle. Pelkästään värähtelyanalyysin tuloksista on vaikea tiedostaa alkavan vaurion aste, koska värähtelyn voimakkuus vaihtelee materiaalien ja kuormitustasojen mukaan. Koelaitteeseen onkin vaikea asettaa reaaliaikaisessa valvonnassa jotakin tiettyä pysäytysrajaa, ellei testattavasta materiaalista ole aikaisempaa tietoa. Tiedonkeruuohjelmaan IMC STUDIO rakennettiin kepstrivalvontaikkuna, mistä pysytään seuraamaan testihammaspörien ryntötaajuuden monikerrannaisia.

## 7. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia ja kehittää hammaspyörien koelaitteen väsymiskestävyydesteissä käytössä olevien käynninvalvontalaitteiden ja –menetelmien toimivuutta ja luotettavuutta. Työssä keskityttiin hammaskylkien vaurioitumisen seurantaan hyödyntäen koelaitteeseen jo asennettuja öljyn jatkuvatoimista partikkelilaskentaa ja värähtelymittauksia. Jatkuvatoimisen partikkelilaskurin luotettavuuden ja toiminnan varmistamiseksi tutkittiin kulumispartikkelien käyttäytymistä viidellä eri tyyppisellä kiertovoiteluratkaisulla. Ensimmäisessä kokeessa poistettiin induktiivisen partikkelilaskurin rinnalle jälkiasennettu optinen partikkelilaskuri. Toisessa kokeessa testattiin anturin toimivuutta ja herkkyyttä puhtaalla öljyllä. Kolmannessa kokeessa puhtaaseen öljyyn lisättiin hallitusti induktiiviselle partikkelilaskurille sopivan kokoisia rautapartikkeleita ja testattiin partikkelilaskurin ominaisuuksia tunnistaa kokoluokkia. Neljännessä ja viidennessä kokeessa haluttiin saada pidemmän aikavälin dataa induktiivisen partikkelilaskurin toimivuudesta ja partikkelien käyttäytymisestä voitelukiertojärjestelmässä. Kokeissa saatujen tulosten perusteella partikkelit kumuloituvat herkästi esimerkiksi järjestelmässä olevien putkien kier-teisiin ja poikkileikkausmuutoksiin sekä pintoihin. Näytteenotolla huomattiin testien aikana olevan merkitystä partikkelien kulkeutumiseen partikkelilaskurille, jonka seurauksena varmistettiin säiliöön rakennetun näytteenottopisteen toimivuus. Induktiivinen partikkelilaskuri pystyi loogisella tavalla havaitsemaan eri kokoluokan partikkeleita.

Lisäksi partikkelien ja induktiivisen anturin käyttäytymistä tutkittiin väsymiskestävyydestien yhteydessä eri materiaalityyppiä olevilla hammaspyörillä. Kokeita suoritettiin kolmella eri materiaalilla. Materiaalit 1 ja 2 tuottivat vähän ison kokoluokan partikkeleita kuoppautumisen johdosta. Alhaisilla kuormitustasoilla hammaskylkien kulumismekanismi voi vaihtua materiaalista riippuen kuoppautumisesta pinnan kulumiseen, joka vähentää ison kokoluokan partikkelien muodostamista, mutta nostaa pienten hiukkasten määrää. Materiaalien 1 ja 2 osalta induktiivisen partikkelilaskurin käyttäminen hampaankylkien vaurioiden ennustamiseen oli tapauskohtaista. Materiaali 3 tuotti kulumisen seurauksena runsaasti ison kokoluokan partikkeleita. Koelaitteeseen pystyttiin asettamaan pysäytysrajat ja ennustamaan alkava vaurioituminen partikkelimäärästä.

Öljyn epäpuhtauksien seuraamiseen tehtiin MATLAB koodi, jolla pystytään seuraamaan ISO 4406 standardin mukaisesti koelaitteeseen menevää ja sieltä tulevaa öljyä. Lisäksi koodilla pystytään luomaan havainnointikuvaajia öljyn puhtaudesta koeajon koko ajanjaksolta. Kuvaajista tehdyt analyysit saadaan sisällytettyä koeajoraportteihin.

Värähtelymittaukset suoritettiin koelaitteella jokaisella kuormitustasolla materiaalien 1 ja 2 osalta. Mittauksilla tutkittiin koelaitteen käyttäytymistä kokonaisvärähtely 5 Hz – 5 kHz taajuustasolla sekä hammaspyörien ryntötaajuusalueella, että niiden kerrannaisilla. Mittauksissa huomattiin koelaitteessa tapahtuvan kuormitustasolla L5 (94,14 Nm) kiihtyvyyden tehollisarvon nousua, joka mahdollisesti viittaisi koelaitteessa tapahtuvaan resonointiin. Ryntötaajuuksien tutkimisella huomattiin jokaisen osoittavan kiihtyvyyden tehollisarvon nousua kuormitustasojen kohotessa, mutta kolmannen ryntötaajuuden kerrannaisen 1.6 kHz – 2 kHz nousu oli voimakkainta.

Tunnuslukuanalyysistä kiihtyvyyden tehollisarvo taajuustasolla 5 Hz – 5 kHz reagoi parhaiten nousevasti hammaskylkien vaurion kasvuun. Kurtosis arvo ja huippukerrosanalyysin tulokseksi saatiin osittain vaihtelevia havainnointikuvaajia. Osa kuvaajista näytti lupaavilta vaurion ennustettavuuden kannalta, mutta materiaalityypillä huomattiin olevan suuri merkitys tunnuslukujen tuloksiin ja niiden hyödyntämiseen reaaliaikaisessa käynninvalvonnassa. Tunnuksia pystytään tapauskohtaisesti käyttämään hammaskylkien vaurioiden ennustamiseen, kun on aikaisempaa tietoa kyseisen materiaalityypin ja kuormitustason värähtelyn voimakkuudesta.

# LÄHTEET

- [1] H. Mikkonen, Kunnossapitolajit. Teoksessa: H. Mikkonen (toim.) Kuntoon perustuva kunnossapito: käsikirja, 1. painos, KP-Media Oy, Helsinki, 2009, s. 95–101.
- [2] FZG Technical Equipment, Technical University of Munich, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 11.09.2019): <http://www.fzg.mw.tum.de/en/research/technical-equipment/>
- [3] J. Kattelus, Upgrading measurement methods of a gear test rig, master's thesis, Tampere University of Technology, 2016, 49 p.
- [4] J. Kattelus, J. Miettinen, A. Lehtovaara, Detection of gear pitting failure progression with on-line particle monitoring, Tribology International, Vol. 118, 2018, pp. 458–464.
- [5] Kunnossapito käsitteet ja määritelmät, PSK Standardisointiyhdistys ry, PSK 6201, 2011.
- [6] PSK Standardit, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 8.10.2019): <https://psk-standardisointi.fi/>
- [7] Maintenance - Maintenance terminology, Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, SFS-EN 13306, 2017.
- [8] Prosessiteollisuuden kunnossapidon tunnusluvut, PSK Standardisointiyhdistys ry, PSK 7501, 2010.
- [9] J. Järviö, T. Piispa, T. Parantainen, T. Åström, Kunnossapito, 4. painos, KP-Media Oy, Helsinki, 2007.
- [10] T. Ansaharju, Koneenasennus ja -kunnossapito, 1. painos, WSOY, Helsinki, 2009, s. 298-301.
- [11] Toimituskunta: A. Tertsonen (pj.), A-J. Heilala, P. Ilvonen, H. Kalaniemi, P. Nikula, M. Sara, A. Sjöblom, P. Vuotila, Kunnossapito ja käyttövarmuus, Safematic, Jyväskylä, 1985.
- [12] SKF, SKF kunnossapitotuotteet ja voiteluaineet: pidentävät laakerien kestoikää, s. 98, Saatavissa (viitattu 10.07.2019): [https://www.skf.com/binary/123-163650/0901d196800637ed-03000\\_FI.pdf](https://www.skf.com/binary/123-163650/0901d196800637ed-03000_FI.pdf)
- [13] J. Hyvärinen, T. Kettunen, Voiteluhuolto, Valtion painatuskeskus, Helsinki, 1986.

- [14] W. H. Kara, *Voiteluaineet : valmistus, ominaisuudet, käyttö*, Otakustantamo, Hämeenlinna, 1989.
- [15] A. Korpi, A. Manninen, J. Rinkinen, K. Suontama, *Öljyjen kunnonvalvonta*. Teoksessa: *Teollisuusvoitelu*, 4. painos, KP-media Oy, Helsinki, 2006, s. 163–182.
- [16] *Öljyjen kunnonvalvonta*, Kunnossapito koulu, No. 76, Kunnossapito -lehden erikoisliite, lehti 1, 2003, Saatavissa (viitattu 12.09.2019): [https://promaint-intra.net/si-salto/uploads/Koulu\\_76\\_netti.pdf](https://promaint-intra.net/si-salto/uploads/Koulu_76_netti.pdf)
- [17] P. Nohynek, V. E. Lunme, *Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset*, 2. painos, Kotkan kirjapaino Oy, Hamina, 2004.
- [18] R. M. Gresham, G. E. Totten (toim), *Lubrication and Maintenance of Industrial Machinery: Best Practices and Reliability*, CRC Press, 2013.
- [19] *Hydraulic fluid power - Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles*, the International Organization for Standardization (ISO), ISO 4406, 1999.
- [20] A. Laamanen, *Likapartikkelit ovat hydraulijärjestelmän riesa*, Promaintlehti, No. 3, 2018, s. 22–25.
- [21] R. Malinen, P. Pulkkinen, K. Rätty, K. Suontama, P. Vuolle, *Voiteluaineiden puhtaus*. Teoksessa: *Teollisuusvoitelu*, 4. painos, KP-media Oy, Helsinki, 2006, ss. 113–162.
- [22] J. Rinkinen, *Condition monitoring and in-line maintenance of oil and on-line diagnostics of components in fluid power and circulating lubrication systems*, dissertation, Tampere University of Technology, Publication 661, 2007, p. 167.
- [23] X. Zhu, C. Zhong, J. Zhe, *Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring*, Vol. 109, 2017, pp. 473-484. Saatavissa (viitattu 09.09.2019): <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.01.015>
- [24] A. R. Crawford, S. Crawford, *The Simplified Handbook of Vibration Analysis - Volume 1: Introduction to Vibration Analysis Fundamentals, Computational Systems*, Incorporated (CSI), United State of America, 1992.
- [25] M. L. Adams, *Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting*, 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, 2010, p. 5 & 309.
- [26] J. Miettinen, E. Jantunen, *Mittasuureet ja signaalinkäsittelymenetelmät*. Teoksessa: H. Mikkonen (toim.) *Kuntoon perustuva kunnossapito: käsikirja*, 1. painos, KP-Media Oy, Helsinki, 2009, ss. 177–222.

- [27] Brüel & Kjær (toim.), Tärinän mittaus, Brüel & Kjær, Espoo, s. 5.
- [28] Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Käsitteet ja määritelmät. Käytettävät suureet ja mit-tayksiköt, PSK Standardisointiyhdistys ry, PSK 5701, 2017.
- [29] B. K. N. Rao, Vibration Monitoring. Teoksessa: Rao B. K. N. (toim.) Handbook of condi-tion monitoring, 1st edition, Elsevier, Lontoo, 1996, pp. 49–80.
- [30] R. B. Randall, Cepstrum Analysis. Teoksessa: S. Braun (toim.) Encyclopedia of Vibra-tion, 1st edition, Elsevier, San Diego, 2001, pp. 21–227.
- [31] R. Kuoppala, R. Leskinen, E. Leppämäki, Pyörivien koneiden käynninaikainen kunnon-valvonta, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Espoo, 1986, s. 30–31.
- [32] S. Aatola, K. Kerkkänen, R. Leskinen, J. Linjama, Mittaavan kunnossapidon menetelmät vaihdelaatikon kunnonvalvonnassa, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Espoo, 1989, s. 15–16.
- [33] R. B. Randall, A history of cepstrum analysis and its application to mechanical problems, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 97, 2017, pp. 3–19.
- [34] Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys, PSK Standardisointiyhdistys ry, PSK 5707, 2019, s. 23–27.
- [35] V. Sharma, A. Parey, A Review of Gear Fault Diagnosis Using Various Condition Indica-tors, Procedia Engineering, Vol. 144, 2016, pp. 253-263. Saatavissa (viitattu 02.12.2019): <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.05.131>
- [36] H. Mikkonen, J. Miettinen, E. Jantunen, Värähtelymittaukset. Teoksessa: H. Mikkonen (toim.) Kuntoon perustuva kunnossapito: käsikirja, 1. painos, KP-Media Oy, Helsinki, 2009, ss. 223–280.
- [37] B. Hoehn, P. Oster, T. Tobie, K. Michaaelis, Test methods for gear lubricants, Goriva i Maziva, Vol. Vol. 47, 2008, pp. 141–152.
- [38] G. Niemann, Operation istructions for the FZG gear oil test rig, Krottenmühl, obb: Max Wieland Prüfmaschinenbau, 1969, p. 40.
- [39] M. Savolainen, An Investigation into Scuffing and Subsurface Fatigue in a Lubricated Rolling/Sliding Contact, dissertation, Tampere University, Puplication 57, 2019, 84 p., Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-1080-6>

- [40] Gears -- FZG test procedures, Part 1: FZG test method A/8,3/90 for relative scuffing load-carrying capacity of oils, Suomen standardisoimisliitto SFS, SFS 14635-1, 2012.
- [41] J. R. Davis, Gear materials, properties, and manufacture, 1st edition, ASM International, Ohio, 2005, pp. 296–297.
- [42] Particle counters, Pamas, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 08.10.2019): <https://www.pamas.de/particle-counters/products-by-name/pamas-s50.html>
- [43] Hydac, Hydraulikka- ja voitelujärjestelmien kunnonvalvonta, Saatavissa (viitattu 30.08.2019): [http://www.hydac.fi/pdf/uutiset/Hydraulikka\\_ja\\_voitelujarjestelmien\\_kunnonvalvonta\\_OP.pdf](http://www.hydac.fi/pdf/uutiset/Hydraulikka_ja_voitelujarjestelmien_kunnonvalvonta_OP.pdf)
- [44] FVA – INFORMATION SHEET, Research Project No. 371 Practice Relevant Pitting Test, 2006.
- [45] Test for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method, Suomen standardisoimisliitto SFS, SFS-EN 933-1, 2012.
- [46] Teollisuushydraulijärjestelmän suunnittelu ja hankinta, Järjestelmän kunnossapidettävyys, PSK Standardisointiyhdistys ry, PSK6707, 2006, s. 16.
- [47] Teollisuuden koneistot. Vaihteiden ja tuotantokoneiden sekä niiden voiteluaineiden puhdistus, PSK Standardisointiyhdistys ry, PSK 7201, 2015, s. 6.