

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Automaatioteknologian koulutusohjelma

**Keijo-Markus Lahtinen**

**Kalanterin telan vyöhykesäätöventtiilien kunnonvalvonta**

Opinnäytetyö 27.3.2009  
insinööri (ylempi AMK) -tutkinto

Ohjaaja: päällikkö, portaalisovellukset Juhani Horelli  
Ohjaava opettaja: lehtori Jari Olli

Tekijä Otsikko	Keijo-Markus Lahtinen Kalanterin telan vyöhykesäätöventtiilien kunnonvalvonta.
Sivumäärä Aika	86 sivua 27.3.2009
Koulutusohjelma	automaatioteknologia
Tutkinto	insinööri (ylempi AMK)
Ohjaaja Ohjaava opettaja	päällikkö, portaalisovellukset Juhani Horelli lehtori Jari Olli
<p>Kalanteri on paperin tuotantolinjan loppuosalle sijoitettu paperin jälkikäsitteilylaite. Paperin poikittaissuuntaista paksuusprofiilia voidaan muokata kalanterin vyöhykesäädettyjen telojen avulla. Kunkin vyöhykkeen hydrauliseen ohjaukseen käytetään servoventtiiliä, joita yhden telan ohjauksessa voi olla 70 kpl. Venttiilin äkillinen vikaantuminen voi aiheuttaa odottamattoman seisokin ja sitä kautta tuotantotappioita. Tämän johdosta venttiilin ennakoiva kunnonvalvonta on tärkeässä asemassa.</p> <p>Opinnäytetyön tavoite oli selvittää mahdolliset ennakoivan kunnonvalvonnan ratkaisut vyöhykeohjausventtiileille. Työn sisällön tuli myös tukea Metso-konsernin sisäistä venttiilikunnonvalvonnan tuotekehitysprojektia.</p> <p>Tavoitetta lähestyttiin aluksi yleisellä tasolla, käsittelemällä ensiksi kunnonvalvontaa ja kalanterointia. Tämän jälkeen siirryttiin vyöhykeohjausventtiilin rakenteeseen, toimintaan ja vikaantumismekanismeihin. Lisäksi aiheesta julkaistu tutkimus sekä tilastollisten prosessinohjaustyökalujen käyttömahdollisuudet selvitettiin. Työn loppuosassa kartoitettiin kunnonvalvontaratkaisut Metso-konsernin sisällä.</p> <p>Eri aiheiden tutkiminen tuotti runsaasti oheistietoa ennakoivan kunnonvalvontaratkaisun jatkokehitystä ajatellen. Uutta tarkoitukseemme soveltuvaa kunnonvalvontamenetelmää ei noussut esille.</p>	
Hakusanat	kunnonvalvonta, servoventtiili, kalanteri

Author Title	Keijo-Markus Lahtinen Condition monitoring of calender roll zone control valves.
Number of Pages Date	86 27 March 2009
Degree Programme	Automation Technology
Degree	Master of Engineering
Instructor Supervisor	Juhani Horelli, Manager, Portal Solutions Jari Olli, Lecturer
<p>The calender is a paper finishing machine, located in the last part of the paper production line. The cross directional thickness profile of paper can be reshaped by the zone control rolls of the calender. The hydraulic control of each zone is implemented by a servo valve; there can be 70 such valves in each roll. A sudden failure of the valve can cause unexpected shutdown as well as production losses. For that reason predictive condition monitoring of the valve is considered important.</p> <p>The purpose of the thesis was to find potential predictive condition monitoring solutions for zone control valves. The content of the thesis also had to support the internal condition monitoring development project of the zone control valve in Metso Corporation.</p> <p>The main purpose was approached in a general level, first focusing on condition monitoring and calendaring. After that, the structure, functioning and failure mechanisms of zone control valves were studied. In addition, a research report concerning this subject was looked through and the possibilities of statistical process control tools were examined. Finally, The condition monitoring solutions in Metso Corporation were investigated.</p> <p>As a result, extensive support information for the further development of the predictive condition monitoring solution was gained. A new condition monitoring method was not, however, found.</p>	
Keywords	condition monitoring, servo valve, calender

# Sisällys

## Tiivistelmä

## Abstract

## Lyhenteet, käsitteet ja määritelmät

<b>1 Johdanto</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Metso-konserni</b>	<b>9</b>
1.1.1 Metso Paper -liiketoimintalinja	10
<b>1.2 Työn taustat ja tavoitteet</b>	<b>10</b>
<b>1.3 Työn rajaukset</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Työn rakenne ja eteneminen</b>	<b>12</b>
<b>2 Kunnonvalvonta</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Kunnonvalvonta yleisesti</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Kunnonvalvonnan vaiheet</b>	<b>14</b>
2.2.1 Valvontavaihe	14
2.2.2 Diagnosointivaihe	14
2.2.3 Prognosointivaihe	15
<b>2.3 OptiLoad-kalanterin etäkunnonvalvonta</b>	<b>15</b>
2.3.1 Etäkunnonvalvonnassa saavutettuja etuja	16
2.3.2 Miksi tarvitaan säännöllistä valvontaa	16
2.3.3 OptiLoad-kalanterin etäkunnonvalvonnan sisältöä	16
2.3.4 Tehokkuusseuranta	17
2.3.5 Raportointi	17
<b>3 Kalanteroinnin periaate</b>	<b>18</b>
<b>4 OptiLoad-monitelakalanteri</b>	<b>20</b>
<b>4.1 Yleistä</b>	<b>20</b>
<b>4.2 Rakenne ja päätoiminnot</b>	<b>21</b>
4.2.1 Pääkokooppa	21
4.2.2 Runko	22
4.2.3 Kuormitus	23
4.2.4 Telojen kevennys	24
4.2.6 Telat	25
4.2.6.1 Termotela	25
4.2.6.2 Taipumakompensoitu SymCDS-tela	25
4.2.6.3 Polymeeritela	26
4.2.6.4 Levitystela	26
4.2.6.5 Ohjaustela	27
4.2.6.6 Ulosottotela	27
<b>4.3 Taipumakompensoitu SymCDS-tela</b>	<b>27</b>
4.3.1 Pääkokooppa ja toiminta	28
4.3.2 Kuormitus	29
<b>5 TK-telan hydraulikka</b>	<b>29</b>
<b>5.1 Yleistä kalanterihydrauliikasta</b>	<b>29</b>
<b>5.2 TK-telan hydraulikkapiirit ja -komponentit</b>	<b>30</b>

5.3 Servoventtiilit	31
5.3.1 Yleistä	31
5.3.2 Käyttötarkoitus	31
5.3.3 Venttiilityypit	31
5.3.4 Keskeinen rakenne	32
5.3.5 Periaatteellinen toiminta	34
<b>6 Servoventtiilien vikaantuminen</b>	<b>35</b>
6.1 Yleistä	35
6.2 Vikaantumisen aiheuttajia	36
<b>7 Servoventtiilien kunnonvalvontamenetelmät</b>	<b>39</b>
7.1 Yleistä	39
7.2 Venttiilivalmistajien kunnonvalvontamenetelmät	39
7.2.1 Moog Inc.	39
7.2.1.1 Analogiset servoventtiilit	39
7.2.1.2 Digitaaliset servoventtiilit	40
7.2.2 Bosch Rexroth AG	41
7.3 Metso-konsernin kunnonvalvontamenetelmät	42
7.3.2 Automaatio-liiketoimintalinja	43
7.3.2.1 Neles-venttiilien kunnonvalvonta	43
7.5 Yhteenveto	44
<b>8 Suoritetut tutkimukset</b>	<b>45</b>
8.1 Tarvelähtöinen hydrauliiikan kunnonvalvonta - TAKU	45
8.1.1 Tutkimusprojektin esittely	45
8.1.2 Tutkimuksen tavoitteet	46
8.1.3 Venttiilitutkimus	46
8.1.3.1 Suoritettuja mittauksia	47
8.1.3.2 Venttiilimittausten johtopäätöksiä	47
8.1.4 Kunnonvalvontamenetelmien kirjallisuustutkimus	48
8.1.5 Kunnonvalvontamenetelmien patenttiselvitys	49
8.1.6 Julkaisut	50
8.1.7 TAKU-projektin yhteenveto	50
<b>9 Tilastollisia menetelmiä</b>	<b>51</b>
9.1 Tilastollinen prosessinohjaus – SPC	51
9.1.1 Yleistä	51
9.1.2 Normaalijakauma	52
9.1.3 Spesifikaatorajat	53
9.1.4 SPC:n perusmenetelmiä	53
9.1.5 Valvontakortit	53
9.1.5.1 x-R-valvontakortti	54
9.1.5.2 Valvontakorttien merkinnät	55
9.1.5.3 Valvontarajojen määrittäminen	55
9.1.5.4 Tulosten laskeminen	57
9.1.5.5 Tulosten tulkinta	58
9.1.5.6 Soveltaminen servoventtiilin kunnonvalvontaan	59
9.1.6 Syy-seurausdiagrammi	61
9.1.7 Histogrammi	62
9.1.8 Hajontadiagrammi	63
9.2 Muita tilastollisia menetelmiä	65
9.2.1 Regressioanalyysi	65

9.2.2 Excel-taulukkolaskentaohjelma	66
9.3 Tilastollisten menetelmien yhteenveto	66
10 Yhteenveto	68
Lähteet	71
Liite 1: Etäkunnonvalvontaesite	74
Liite 2: Kunnonvalvontamenetelmien kirjallisuustutkimus	76
Liite 3: Kunnonvalvonpatentit	79
Liite 4: TAKU-projektin aikaiset julkaisut TKK / KSU	81
Liite 5: TAKU-projektin aikaiset julkaisut TTY / IHA	84

## Lyhenteet, käsitteet ja määritelmät

CD		koneen poikkisuuntainen
DDV		Direct Drive Valves
DIV		Digital Interface Valve
DTM		(Device Type Manager) laitevalmistajan tuottama laitekuvaustiedosto, jolla hallitaan laiteasetuksia
FDT		(Field Device Tool) kenttälaitteiden ja järjestelmän välinen liikennöintistandardi
Formaatio		kuitujärjestys
Hoitopuoli	HP	se puoli koneesta, joka on valvomoon päin ja jolla suurin osa paikallisohjauksista sijaitsee (vrt. käyttöpuoli)
HEP		hydraulic, electric, pneumatic – module
IAC-P		Integrated Axis Controller
Itsekuormittuva tela		kalanteri kuormitetaan nostamalla taipumakompensoidun telan vaippaa hydraulisesti suhteessa akseliin
Kalanterointi		paperin käsittely kalanterilla eli kiillotus ja silitys sekä paksuusvaihteluiden tasoitus kahden tai useamman telan välissä puristamalla
Kaliiberi		paperin paksuus
Kiilto		valon heijastuminen paperin pinnasta paperin pintaominaisuudet
Konekalanteri		kalanteri, jossa on kaksi tai useampia kovapintaisia teloja
Käyttöpuoli	KP	se puoli koneesta, jolla suurin osa käytöistä sijaitsee (vrt. hoitopuoli)
Monitelakalanteri		kalanteri, jossa on useita päällekkäisiä kova- ja pehmeäpintaisia teloja
LVDT		Linear Variable Differential Transformer, lineaarisen poikkeaman mittaukseen käytetty muuntaja
LWC-paperi		(light weight coated) mekaanista massaa sisältävä, kevyesti päällystetty painopaperi

Nippi	kahden yhteen puristetun telan väli, kahden yhdensuuntaisen telan kosketuskohta
Offline-kalanteri	paperi- tai päällystyskoneesta erillään oleva kalanteri
Online-kalanteri	paperi- tai päällystyskoneen yhteydessä oleva kalanteri
Puristusaine	ilmaisee kuinka suurella voimalla paperia puristetaan nipissä
Puristusaika	ilmaisee kuinka pitkään paperi on puristuksissa nipissä
SC- paperi	(supercalendered) superkalanteroituja, mekaanista massaa sisältäviä, päällystämättömiä papereita, jotka jaetaan SC-A, SC-B ja SC-C -luokkiin kiiltävyytensä perusteella
SPC	(Statistical Process Control) tilastollinen laadun ohjaus
Sileys	paperin tasainen paksuus, syvärakenne
Soft-kalanteri	kalanteri, jonka nipissä on vähintään yksi pehmeäpintainen tela
SymCDS/HP	taipumakompensoitu, itsekuormittuva (Selfloading, S), suuri-tarkkuuksinen (High Precision, HP) tela
Taipumakompensoitu	telamassojen ja telojen kuormituksen aikaansaama taipuma kompensoidaan telan sisäisiä paine-eroja säätämällä
TK	taipumakompensoitu
Viivakuorma	nipissä kuormitussuunnassa vallitseva voima leveysyksikköä kohti (yksikkö kN/m)
WFC-paperi	(Wood Free Coated) päällystetty puuvapaa paperi
WinPED	The Windows based program for Parameterization, Editing and Diagnosis



# 1 Johdanto

## 1.1 Metso-konserni

Metso-konsernin juuret ulottuvat 1800-luvulle tai jopa kauemmaksi. Tuolloin edeltäjäyritykset käynnistivät toimintansa konepaja-, saha ja laivanrakennusteollisuuden parissa. 1700-luvun puolivälissä Helsingin edustalla sijaitsevassa Viaporin (Suomenlinnan) linnoituksessa toimi pieni allastelakka, joka päättyi 1900-luvulla Suomen valtion omistukseen ja osaksi Valmetia. Hieman ennen 1900-luvun puoliväliä useita Suomen valtion omistamia metallitehtaita yhdistyi Valtion Metallitehtäiksi, joista muutaman vuoden kuluttua muodostui Valmet Oy. Yhtiön tuotevalikoimaan kuuluivat mm. laivat, lentokoneet, aseet, veturit, traktorit, laivamoottorit ja hissit. [1]

Valmet aloitti paperikoneiden valmistuksen entisellä tykkitehtaallaan Rautpohjassa 1950-luvun alussa ja toimitti ensimmäisen paperikoneensa vuonna 1953. Valmet kohosi merkittäväksi kansainväliseksi paperikonevalmistajaksi 1960-luvun puolivälissä toimittaessaan useita koneita maailman johtaviin paperiteollisuusmaihin. [1]

1980-luku oli Suomessa suurten muutosten ja yrityskauppojen aikaa, jolloin myös Valmet selkeytti ja uudisti toimintaansa aloittaen keskittymisen paperikoneisiin ja niihin liittyvään teknologiaan. Valmet myi telakkateollisuutensa Wärtsilälle ja osti puolestaan Wärtsilältä Järvenpäässä toimivan paperin jälkikäsittelylaitteita valmistavan yksikön, josta muodostui Valmet Paperikoneet Oy. Voimakkaan kansainvälistymisen myötä Valmet listautui suomalaisista valtionyhtiöistä ensimmäisenä Helsingin pörssiin. Valmet järjesteli liiketoimintojaan 1990-luvulla, jolloin luotiin perustus uuden yhtiön luomiselle. Metso, uusi maailmanlaajuinen prosessiteollisuutta palveleva yritys, syntyi Valmet Oy:n ja Rauma Oy:n fuusion seurauksena vuonna 1999. [1]

Vuosituhanen vaihteen molemmin puolin yritysostot ja -myynnit ovat muokanneet Metso-konsernin rakennetta. Viime vuosien yritysostot ovat lähinnä keskittyneet täydentämään Metso Paperin ja Metso Automaation tuote- ja palvelutarjontaa. Tämän päivän Metsossa yhdistyvät kiven- ja mineraalienkäsittelyn, massan- ja

paperinvalmistuksen, voimantuotannon sekä prosessiautomaation johtavat innovaatiot maailmanlaajuisesti. [1]

Metso siirtyi 1.12.2008 uuteen liiketoimintarakenteeseen, jossa liiketoiminta on organisoitu kolmeen raportointisegmenttiin seuraavasti:

- *Mining and Construction Technology* koostuu *Mining-* ja *Construction-* liiketoimintalinjoista.
- *Energy and Environmental Technology* koostuu *Power-*, *Automation-* ja *Recycling-* liiketoimintalinjoista.
- *Paper and Fiber Technology* koostuu *Paper-*, *Fiber-* ja *Tissue-* liiketoimintalinjoista.

### **1.1.1 Metso Paper -liiketoimintalinja**

Metso Paper -liiketoimintalinja on johtavassa asemassa sellu- ja paperiteknologian toimittajana. Sellu- ja paperiteollisuuden asiakkaille tarjotaan täysi tuote- ja palveluvalikoima. Asiantuntemuksen ja palvelujen avulla parannetaan asiakkaiden prosessien tehokkuutta niiden koko elinkaaren ajan.

Pyrkimyksenä on tuote- ja palvelutarjonnan avulla kattaa entistä paremmin asiakkaiden tuotantoprosessien koko elinkaaren aikana tarvittavat palvelut, prosessiparannukset, koneuusinnat ja uudet prosessilinjat. Tavoitteena on myös yhteistyössä asiakkaiden kanssa parantaa sellun- ja paperinvalmistusprosessien kilpailukykyä ja tehokkuutta. Prosessien parantaminen, koneuusinnat sekä huolto liiketoiminta ovat toiminnan painopisteitä Euroopan ja Yhdysvaltojen alueella. Uusia huollossa tarvittavia tuotteita kehitetään jatkuvasti, ja tavoitteena onkin laajan toimitetun konekannan tehokas ylläpito lähellä asiakasta. [1]

### **1.2 Työn taustat ja tavoitteet**

Etäkunnonvalvonta on osa Metso Paper -liiketoimintalinjan Järvenpään Service-yksikön liiketoimintaa. Etäkunnonvalvontaan erikoistunut asiantuntijaryhmä myy ja projektoi paperin jälkikäsitteilylaitteiden etäkunnonvalvontaa asiakastehtaille globaalisti.

Seurannassa olevista koneista kerätään erilaista toimintoihin liittyvää informaatiota palvelimilla sijaitseviin tietokantoihin. Tietokannoissa oleva informaatio jalostetaan automaattisesti raporttiformaattiin, josta tuoteasiantuntijat muodostavat lopulliset asiakkaalle lähetettävät raportit.

OptiLoad-kalanteri on osa Metso Paper -liiketoimintalinjan Järvenpään yksikön valmistamaa kalanterituotevalikoimaa. Kalanterin vyöhykesäädettyjen telojen avulla saadaan tulevan paperirainan poikittaista profiilia muovattua halutunlaiseksi. Paperin poikittaisen profiilin muokkaus tapahtuu säätämällä telan vaipan muotoa telan sisällä olevien hydraulisten kenkien avulla. Kenkään vaikuttava hydraulipaine puristaa kenkiä telan vaippaa vasten sitä suuremmalla voimalla, mitä suurempi on paperin profiilin muutostarve. Hydrauliikkapaineen säätö tapahtuu servoventtiilin avulla. Kyseisiä venttiilejä kalanterissa on kymmeniä. Venttiilien oikea toiminta on avainasemassa, kun paperin profiilia halutaan muovata. Kalanterissa itsessään ei ole ennakoivaa diagnostiikkaa kyseisille venttiileille. Venttiilin huonoa toimintaa on vaikea huomata. Mikäli venttiili pääsee rikkoutumaan, saattaa siitä aiheutua odottamaton seisokki ja pahimmillaan tuotantomenetyksiä. Edellä mainitun johdosta luotettava, vikaantumisajankohtaa ennakoiva kunnonvalvontaratkaisu on tärkeässä asemassa. Kunnonvalvontaratkaisun lähtökohtana on se, että kaikki tarvittava tieto saadaan jo olemassa olevista suureista ja signaaleista ilman, että erillismittalaitteita tarvitsee asentaa.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää mahdolliset kunnonvalvontamenetelmät OptiLoad-kalanterin vyöhykesäädetyissä teloissa käytettäville servoventtiileille. Työn sisällön tulee myös tukea Metso-konsernin sisäistä venttiilikunnonvalvonnan tuotekehitysprojektia.

### **1.3 Työn rajaukset**

Tässä työssä keskitytään servoventtiileihin, joita käytetään Metso Paper -liiketoimintalinjan valmistamien OptiLoad-kalantereiden SymCDS- ja SymCDS/HP-telojen nippivyöhykkeiden profiloinnin säädössä. Opinnäytetyön ulkopuolelle jäävät kyseisten telojen vastavyöhykesäädön venttiilit, telaston kuormituksen säätöventtiilit ja muut hydrauliikkaventtiilit.

## 1.4 Työn rakenne ja eteneminen

Johdanto-osuuden jälkeen käydään yleisesti lävitse kunnonvalvonnan ja kalanteroinnin sisältöä, esitetään OptiLoad-kalanterin rakenne, pääkomponentit ja niiden toimintaperiaate. Lisäksi käydään yksityiskohtaisesti lävitse vyöhykekompensoidun telan rakenne ja toiminta. Tämän jälkeen tarkastellaan yleisesti telahydrauliikkaa sekä paneudutaan syvällisemmin servoventtiileihin. Hydrauliikka- ja venttiiliosuuden jälkeen tarkastellaan eri vikaantumistapoja, jonka jälkeen suoritetaan kunnonvalvontamenetelmien kartoitus Metso-konsernin sisällä. Suoritettujen tutkimusten osiossa paneudutaan Tekes-rahoitteiseen TAKU-projektiin ja projektin tulosten hyödyntämiseen tässä opinnäytetyössä. Ennen loppuyhteenvetoa kartoitetaan tilastollisen prosessin ohjauksen – SPC:n sekä muiden tilastollisten menetelmien soveltamismahdollisuudet servoventtiilin kunnonvalvontaan.

## 2 Kunnonvalvonta

### 2.1 Kunnonvalvonta yleisesti

Kunnonvalvonta on yksi osa kunnossapitoa, jossa erilaisin teknisin mittausmenetelmin ja analyysein määritellään koneen tai laitteen kunto sen käynnin aikana. Tavoitteena on myös pystyä määrittelemään jäljellä olevan luotettava käyttöaika. Kunnonvalvonnan avulla pyritään saamaan ennakoivaa tietoa alkavasta vikaantumisesta, jotta vältetään odottamattomat laiterikosta johtuvat seisokit. Tarvittavat korjaukset pystytään aikataulutamaan tuleviin suunniteltuihin seisokkeihin. Kunnonvalvontaa voidaan tehdä määrävälein tai se voi olla jatkuvaa.

Paperikoneen määrävälein suoritettavassa kunnonvalvonnassa kunnonvalvontahenkilöt käyvät lävitse ennalta suunnitellun valvontakierroksen, jonka yhteydessä esimerkiksi telojen laakereiden kuntotiedot rekisteröidään kannettavalle värähtelyanalysointilaitteelle. Valvonnan yhteydessä kunnonvalvonta voi olla myös aisteihin perustuvaa, jolloin pystytään helposti havaitsemaan jonkin koneenosan merkittävät käyttäytymisen muutokset.

Määrävälein suoritettavan kunnonvalvonnan työvälineinä käytetään yleensä sähköisiä mittaus- ja analysointimenetelmiä, joista tärkein on värähtelymittaus. Mittauksessa

talletetaan telan laakerin värähtelytasot mittalaitteen muistiin, josta ne siirretään tietokoneelle tarkempaa analyysiä varten. Laakerin alkava vikaantuminen nähdään selkeästi vertaamalla laakerin vikataajuuksien värähtelyamplitudeja laakerivalmistajan tietoihin. Värähtelymittausten avulla saadaan myös tietoa telojen, vaihdelaatikkojen ja käyttöjen kunnosta sekä linjausmuutoksista.

Metso Paper -liiketoimintalinja myy koneanalyysi- mittausspalvelua, jossa koko paperikoneen ja siihen liittyvien paperin jälkikäsitteilylaitteiden mekaaninen kunto pystytään määrittelemään värähtelymittauksien ja analyysien avulla. Mittausten avulla saadaan selville sekä ennakoivaa, että senhetkistä kunnonvalvontatietoa. Mittauksista tehdyn raportin ja siihen liittyvien toimenpidesuositusten perusteella asiakas pystyy suunnittelemaan korjausseisokit, varaosat sekä korjausten rahoituksen.

Telosten laakereiden kunnonvalvonta on pieni osa suurta kunnonvalvontakenttää. Paperin valmistusprosessissa on valtava määrä erilaisia toiminnan kannalta kriittisiä komponentteja, joiden jatkuva kunnonvalvonta on tärkeää. Metso Paper - liiketoimintalinjan toimittamissa paperikoneissa kerää Metso DNA - prosessinohjausjärjestelmä jatkuvasti myös kunnonvalvontaan liittyvää komponenttitason tietoa, jolloin koneen käyttäjä saa jo hyvissä ajoin mm. hälytystietoja laitteiden kunnosta. Kehittyneissä kenttälaitteissa on yleensä itsessään diagnostiikkaominaisuudet, joita hyödynnetään prosessinohjausjärjestelmän kautta.

Tärkeä työkalu paperikoneiden jatkuvassa kunnonvalvonnassa on Sensodec 6S - kunnonvalvontajärjestelmä. Mittausjärjestelmän avulla saadaan reaaliaikaista tietoa telosten laakereiden kunnosta kehityksestä. Myös pehmeäpinnoitteisten telosten vaipan kunnosta saadaan ennakoivaa valvontatietoa. Valvontajärjestelmän käyttöliittymässä kunnontasot on jaoteltu väreihin, joista vihreä väri osoittaa kaiken olevan kunnossa. Keltainen väri tarkoittaa sitä, että kyseisen laakerin tai telan kuntoon tulee jo kiinnittää huomiota ja ennakoivat kunnossapitotoimenpiteet tulee aloittaa. Punainen väri tarkoittaa, että vikaantuminen on jo kehittynyt vaaralliselle tasolle. Tilanne vaatii välittömiä toimenpiteitä, jotta mahdollinen laiterikko pystytään estämään.

Sekä Metso DNA -prosessinohjausjärjestelmän että Sensodec 6S -kunnonvalvontajärjestelmän tietoja on mahdollista tarkastella etäyhteyden kautta. Kyseisiä toimenpiteitä kutsutaan etäkunnonvalvonnaksi.

## **2.2 Kunnonvalvonnan vaiheet**

Kunnonvalvonta voidaan jakaa kolmeen toimintovaiheeseen, jotka ovat valvonta, diagnosointi ja prognosointi. [2]

### **2.2.1 Valvontavaihe**

Valvonnan kautta pyritään havaitsemaan alkava vikaantumisen mahdollisimman varhaisessa vaiheessa jo ennen kuin se on alkanut oireilla muutoksina prosessissa. Mikäli valvottava suure poikkeaa normaalista, siirrytään diagnosointivaiheeseen. Paperikoneella valvonta hoidetaan erilaisten kunnonvalvontajärjestelmien ja toimintojen avulla, joita ovat mm. seuraavat [2]:

- Metso DNA -prosessinohjausjärjestelmä
- koneohjauslogiikkajärjestelmät
- Sensodec 6S -kunnonvalvontajärjestelmä
- älykkäiden kenttälaitteiden oma diagnostiikka
- määrävälein suoritettut kunnonvalvontakierrokset käyttäen erillismittalaitteita
- alihankkijalta tilatut tai itse suoritettut kuntotestit ja analyysit.

### **2.2.2 Diagnosointivaihe**

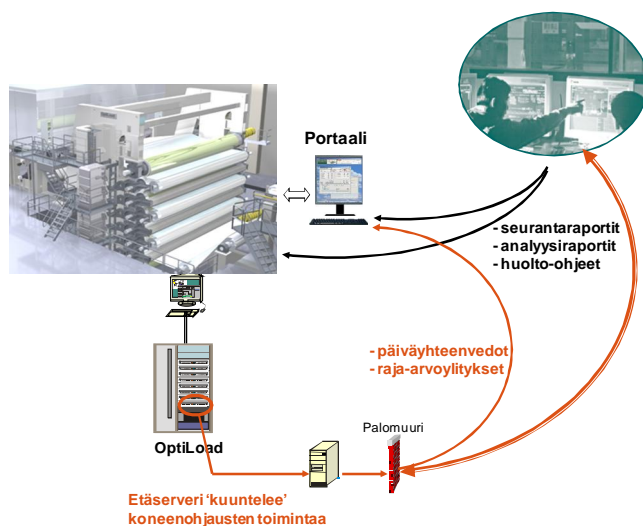
Mikäli laitteessa on havaittu valvontavaiheessa merkkejä alkavasta vikaantumisesta, siirrytään diagnosointivaiheeseen. Tässä vaiheessa pyritään selvittämään vikaantumistapa ja sen aiheuttaja. Selvityksen tukena käytetään kyseiseltä ajanjaksolta saatuja kunnonvalvonnan mittaustietojen analysointituloksia sekä prosessitietoja ja olosuhteita. Myös laitteen huolto- ja vikaantumishistoriatietoja voidaan käyttää hyödyksi. Diagnosointivaiheen lopputuloksena määritellään laitteen mahdolliset huoltotoimenpiteet sekä siirrytään prognosointivaiheeseen. [2]

### 2.2.3 Prognosointivaihe

Prognosoinnilla tarkoitetaan laitteen jäljellä olevan eliniän ennustamista. Tässä vaiheessa pyritään arvioimaan, kuinka nopeasti diagnoosivaiheessa havaittu vikaantuminen johtaa laitteen rikkoontumiseen. Kuten diagnosointivaiheessa myös, tässä vaiheessa apuna käytetään kunnonvalvonnan yhteydessä saatuja mittaustietoja sekä prosessitietoja ja -olosuhteita kyseiseltä ajanjaksolta. Myös laitteen huolto- ja vikaantumishistoriatietoja voidaan käyttää hyödyksi. Tämä kunnonvalvonnan vaihe on teollisuudessa vielä kehitysvaiheessa. Tämän opinnäytetyön yhtenä tarkoituksena on toimia työkaluna kehitettäessä servoventtiilin prognosointia. [2]

### 2.3 OptiLoad-kalanterin etäkunnonvalvonta

Etäkunnonvalvonnan avulla voidaan lisätä valvonnassa olevien koneiden käyttövarmuutta sekä tukea asiakastehtaiden ennakoivaa kunnossapitotoimintaa. Mittaustiedon sekä Metson asiantuntijoiden laajan kokemuksen hyödyntäminen ovat etäkunnonvalvonnan avaintekijöitä. Koneista kerätään jatkuvasti erilaista mittaustietoa, jotka analysoidaan. Analyysien perusteella muodostetaan huoltotarveraportti, joka toimitetaan sovituin väliajoin asiakkaalle. Tehtaan kunnossapitohenkilöt ovat näin jatkuvasti ajan tasalla koneen ajettavuuteen vaikuttavista tekijöistä. [3]



*Kuva 1. Kaaviokuva kalanterin etäkunnonvalvontajärjestelmästä. Etäpalvelimella tieto muokataan päivä- ja kuukausiraportteiksi, jotka siirtyvät suojatun VPN-yhteyden kautta Metson etäkeskukseen sekä asiakkaan kanssa yhteiseen portaaliin. [4 s. 11]*

### 2.3.1 Etäkunnonvalvonnassa saavutettuja etuja

Etäkunnonvalvonnalla saavutetaan seuraavia etuja [3]:

- Vähemmän häiriötekijöitä, jonka kautta saadaan tuotantotehokkuutta parannettua.
- Alkavat häiriöt pystytään paikantamaan ja ottamaan huomioon suunniteltaessa huoltoseisokkeja ja huolto-ohjelmia.
- Suunnitelmallisen ennakkohuollon ja kunnonseurannan kehitystyökalu.
- Etäkunnonvalvonta tukee huoltoa ja optimointia.
- Saadaan systemaattisesti kerättyä historiatietoa kalanterin toiminnan ja käyttövarmuuden kehityksestä.

### 2.3.2 Miksi tarvitaan säännöllistä valvontaa

OptiLoad-kalanterin automaatiotaso on korkea. Kaikkien osien saumaton yhteistoiminta edellyttää häiriötöntä toimintaa. Etäkunnonvalvonnan perusidea on siinä, että alkava vikaantuminen näkyy vähitellen muutoksina koneen eri toiminnoissa. Toimintojen seurannalla pystytään vertaamaan normaalia ja vikatilannetta keskenään. Seurannan avulla alkava vikaantuminen saadaan paikannettua, ennen kuin se kehittyy tuotantohäiriöksi. [3]

Etäkunnonvalvontatietoa kerätään koneenohjausjärjestelmistä. Tietojen analysoinneissa hyödynnetään tilastotieteellisiä ja matemaattisia malleja, joiden avulla voidaan paikallistaa alkava vikaantuminen. Paikallistettu häiriökohde voidaan tarkistaa ja ottaa huomioon ennakoivan huoltosuunnitelman laatimisessa. Asiakkaan kunnossapitotyön suunnittelu helpottuu, koska huoltoa vaativat kohteet ovat selvillä jo ennen huoltoseisokkia. Kalanterin toiminnasta ja käyttövarmuudesta saadaan samalla hyödyllistä tietoa kunnossapidon kehittämisen pohjaksi. [3]

### 2.3.3 OptiLoad-kalanterin etäkunnonvalvonnan sisältöä

Etäkunnonvalvonta kattaa mm. seuraavat toimintaryhmät:

- Alasylinterit
  - liikeaika, liikematka ja liike-ero
  - anturien toiminta
  - kuormitussäätöjen toimivuus



- Välitelasto
  - säätimien toiminta
  - anturien toiminta
- Sym-telojen toiminta
- Termo-telojen toiminta
- Hydrauliiikan ja koneikkojen toiminta

#### **2.3.4 Tehokkuusseuranta**

Etäkunnonvalvonnan yhteydessä kalanterin koneenohjauksista kerätään myös tietoa, jonka avulla voidaan seurata kalanterin tuotannollista tehokkuutta, joka on riippuvainen kalanterin senhetkisestä kunnosta. Tuotannollinen tehokkuus ilmaistaan tunnusluvuin, jotka kuvaavat kalanterin kuntoa. Tehokkuuslukujen avulla saadaan selville myös mahdolliset pullonkaulat eli toiminnot ja alueet, jotka hidastavat eniten tuotannollista toimintaa. Tehokkuusseuranta voidaan käyttää myös kalanterointiprosessin optimointiin eri paperilajeille sopivaksi. [3]

Tehokkuusseurantaan sisältyvät mm.

- paperin ratakatkojen seuranta
- paperin päänniennin seuranta
- telaston avausyiden seuranta.

#### **2.3.5 Raportointi**

Koneenohjauksista kerätty tieto muokataan automaattisesti seurantakäyriksi ennalta suunniteltuihin raporttipohjiin. Tietojen muokkaus suoritetaan asiakastehtaalla sijaitsevassa etäpalvelimessä. Seurantakäyrät ovat nähtävillä Metson ja asiakastehtaan yhteisessä portaalissa. Kuhunkin seurantakohteeseen on ennalta asetettu valvontarajat, joiden ylityksestä asiakas saa tiedon portaalin sekä Metson asiantuntijan kautta. [3]

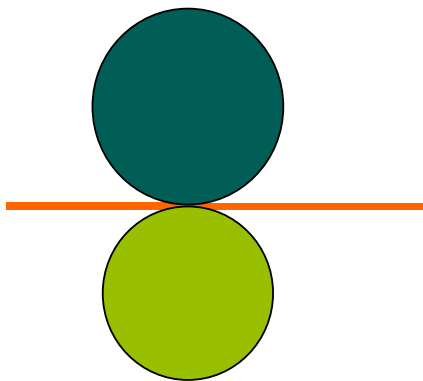
Asiakastehtaan kanssa valvonnasta laaditaan ennalta sovituin väliajoin laajempi seurantaraportti huoltoseisokkia varten sekä yksityiskohtaisempi analyysiraportti vuosihuollon suunnitteluhenkilöiden avuksi. Seurantaraportti sisältää yhteenvedon valvontakohteiden kunnosta sekä mahdolliset tarkistussuosituksset. Analyysiraportti

käsittää valvontakohteiden analyysit, toimenpide-suositukset sekä ohjeita kohteen kunnan tarkistukseen ja mahdollisen huoltotyön suorittamiseen. Kaikki kunnan-valvontaraportit arkistoidaan asiakastehtaan ja Metson yhteiselle portaalisivustolle myöhempää vertailua varten. [3]

### 3 Kalanteroinnin periaate

Kalanteroinnin periaate on tunnettu jo kauan. Perusajatus on lähtöisin tekstiiliteollisuudesta, jossa kankaiden ryppyisyyttä vähennettiin nykyistä mankeliä vastaavalla laitteella. Paperinvalmistukseen menetelmä levisi jo noin 1700-luvun loppupuolella, jolloin paperia valmistettiin vielä käsin. Paperikoneet alkoivat yleistyä 1800-luvulla. Ensimmäiset kalanterit olivat paperikoneen kuivatusosan perään rakennettuja konekalantereita, joilla vaikutettiin paperin ominaisuuksiin.

Yksinkertaisimmillaan kalanterointi on paperin- tai kartonkirainan puristamista kahden telan välisessä nipissä, kuva 2. Kalanterointia voidaan verrata vaatteiden silykseen, jossa silyteen vaikuttavina muuttujina ovat silyusraudan lämpötila, kankaan kosteus, puristusaine ja puristusaika.



*Kuva 2. Telojen välisen puristusvoiman, puristusajan, paperissa olevan kosteuden sekä telojen lämmön avulla saadaan paperin tai kartongin silyyttä ja kiiltoa parannettua. Myös paperin kaliiperivaihteluita saadaan tasattua. Kalanterointi nostaa myös paperin tiheyttä. [5]*

Paperin kiiltoon vaikuttavina muuttujina ovat telanipissä vaikuttava lämpötila sekä paperin kosteus. Korkean lämpötilan avulla paperin pinnassa olevat aineet pehmenevät, jolloin ne myös muokkautuvat helpommin. Korkeampi paperin kosteuspitoisuus alentaa paperin pehmenemislämpötilaa vaikuttaen alentavasti myös kalanterointiprosessin lämpötilatarpeeseen. Alhaisempi kalanterointilämpötila vaikuttaa osaltaan energiakulutukseen, joka puolestaan vaikuttaa kustannuksiin. Paperin kosteutta voidaan lisätä kalanterin radan kostutuslaitteella. [6]

Paperin sileyteen ja tiheyteen vaikuttavina muuttujina ovat telanipissä vaikuttava puristusaine ja puristusaika. Puristusaineen avulla saadaan paperin profiilin huippukohtia tasoitettua. Ideaalinen tilanne olisi se, että huippukohdat saataisiin tasoitettua tiivistämättä liikaa paperin rakennetta. Puristusajan avulla saadaan vaikutettua muutosten pysyvyyteen. Puristusaika on kääntäen verrannollinen kalanterin ajonopeuteen. Mitä suurempi ajonopeus on, sitä lyhyempi on puristusaika ja päinvastoin. Puristusaine riippuu telojen halkaisijoista, telapinnoitteen kimmoisuudesta sekä käyttäjän asettamasta viivakuormasta. [6]

Kalanterin ajon aikana kalanterointitulokseen vaikuttavia tekijöitä ovat mm.

- termotelojen lämpötila, ks. kohta 4.2.6.1 Termotela
- paperin kosteus
- viivakuorma
- ajonopeus
- telojen halkaisijat
- telapinnoitteiden kimmoisuus
- telanippien lukumäärä.

Kalanterointitulokseen vaikuttavat myös kalanterille tulevan paperin ominaisuudet, esimerkiksi

- massakoostumus
- formaatio
- päällystysmenetelmä
- päällystemäärä.

Paperin kalanterointitarve riippuu paperin loppulaatuvaatimuksista.

Mitä suuremmat ovat vaatimukset paperin paino-ominaisuuksien suhteen, sitä tehokkaampi kalanterointi tarvitaan. Sanomalehtipaperille riittää yleensä kevyt kalanterointi yksi- tai kaksinippisellä kalanterilla. Paino-ominaisuusvaatimuksien ollessa korkeat myös kiiltävyys ja sileysvaatimukset ovat korkeat; tällöin käytetään monitelakalanteria. [6]

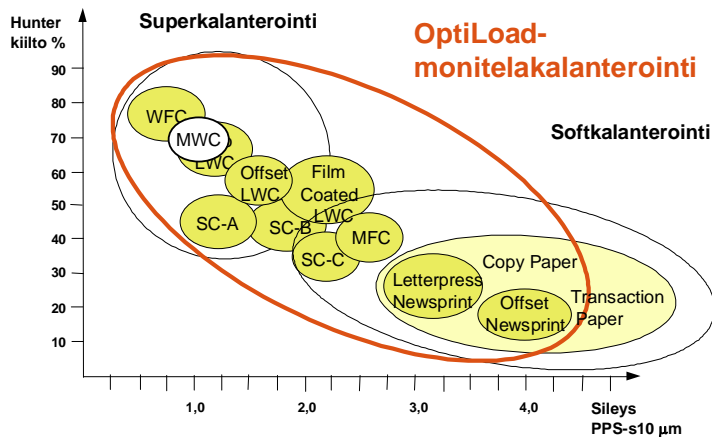
## **4 OptiLoad-monitelakalanteri**

### **4.1 Yleistä**

Paperiteollisuuden kehitystavoitteet ovat asettaneet haasteita myös laitetoimittajille. Tuotantonopeutta ja tehokkuutta on usein tarve nostaa samalla säilyttäen tai jopa parantaen asiakkaalle toimitettavan paperin laatua. Metso-konsernissa nähtiin paperiteollisuuden kasvun haasteet jo 90-luvun alkupuolella, jolloin uuden sukupolven moninippikalantereiden kehitys alkoi. Tuotekehityksen ja sen tuloksena syntyneet uuden sukupolven kalanterit ovat saavuttaneet ja säilyttäneet maailmalaajuisesti johtavan markkina- ja teknologia-aseman.

Optiload-kalanterin kehitysprojekti alkoi vuonna 1993, ja ensimmäinen Optiload-Offline-kalanteri toimitettiin asiakkaalle vuonna 1996. Kaksi vuotta myöhemmin toimitettiin asiakkaalle ensimmäinen OptiLoad-Online-kalanteri. Paperiteollisuudessa on vielä paljon käytössä perinteisiä superkalantereita, jotka aikanaan kuuluivat myös Metson tuotevalikoimaan. Optiload-kalanterin kehitystyön tuloksena vanhojen superkalantereiden modernisointi tuli myös mahdolliseksi. [7]

Viimeisimmän tuotekehityksen tuloksena Metso Paper -liiketoimintalinja on tuonut markkinoille OptiLoad-TwinLine-moninippikalanterin, jossa on kaksi telastoa vastakkain, tuoden mukanaan lukuisia etuja perinteiseen ratkaisuun verrattuna. Ensimmäinen Offline-malli toimitettiin asiakkaalle vuoden 2005 loppupuolella. Uusi OptiLoad-TwinLine-moninippikalanteri täydentää Optiload-kalanteriperhettä tähdäten korkealaatuisille SC-paperilaaduille. OptiLoad-kalanteri kattaa vastaavasti päällystetyt paperilaadut. [8]



Kuva 3. OptiLoad-monitelakalanteri soveltuu lähes kaikkien kalanteroitavien paperilajien valmistukseen joko online- tai offline-kalanterina. Suurin hyöty OptiLoadista saadaan, kun tuotetaan paperilajeja, joilla on korkeat kiilto- ja sileysvaatimukset (esim. SC-A, LWC) tai kun samalla koneella tuotetaan useita paperilajeja. [6] [9]

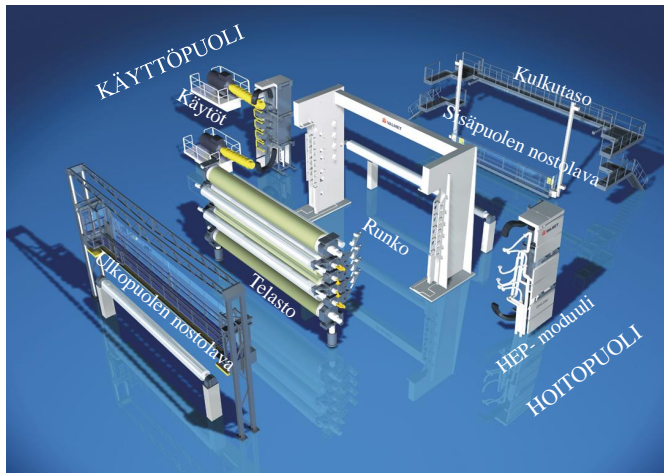
## 4.2 Rakenne ja päätoiminnot

### 4.2.1 Pääkokoontaminen

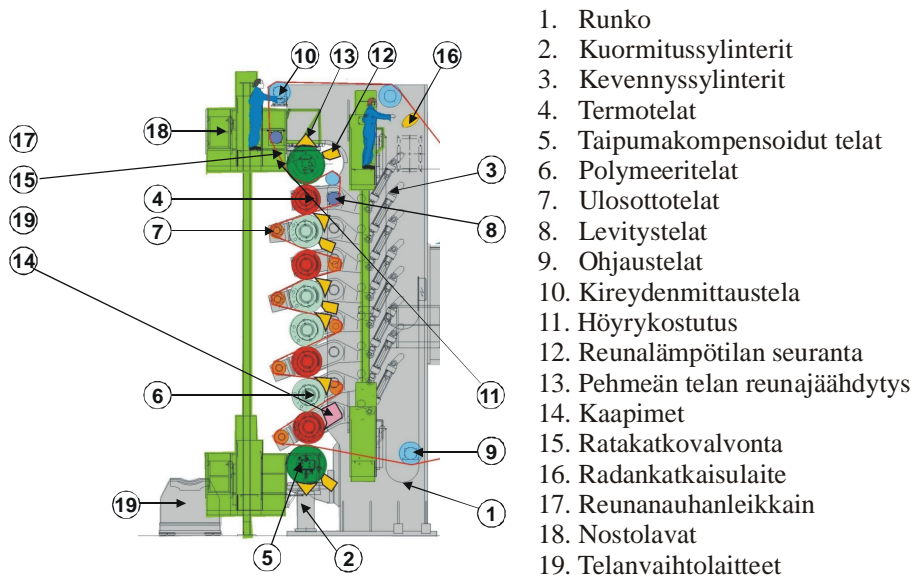
OptiLoad-monitelakalanteri koostuu moduuleista. Moduuliratkaisumalli on vastaus alun perin paperiteollisuudesta nousseisiin tarpeisiin. Metso Paper-liiketoimintalinjan Järvenpään tehtaan kalanteriverstaalla tapahtuu moduulien täyden mittakaavan esikokoontaminen ja testaukset ennen kohdetehtaalta lähetystä. Testauksessa käydään läpi kaikki toiminnot, jolloin varsinainen käyntiinajovaihe kohdetehtaalta jää mahdollisimman lyhyeksi. Kalanterin kokonaistoimitus sisältää itse kalanterin lisäksi myös hydraulikoneikot, käytöt ja ohjausjärjestelmän.

Moduuliratkaisumalli tuo mukanaan lukuisia etuja, mm.

- nopeuttaa verstaatestauksia ja tuotteen läpimenoaikaa nopean kokoonpanon kautta
- asennusaika kohdetehtaalta saadaan minimoitua
- asennuskustannukset saadaan optimoitua, joka vaikuttaa myös tuotteen kokonaishintaan
- operoinnin ja huollon kannalta käyttäjäystävällinen, helpon luoksepäästävyyden takia.



Kuva 4. Moduulirakenne mahdollistaa tuotteen nopean käyttöönoton kohdetehtaalla lyhentyneen asennusaikataulun kautta. Kustannussäästöä muodostuu sekä asiakkaalle että laitetoimittajalle. Edistysellinen vastaus paperiteollisuuden kysyntään. [7]



Kuva 5. Perinteiseen superkalanteriin verrattuna OptiLoad-kalanterilla on lukuisia edistysellisiä konstruktioparannuksia. Tärkeimpänä erona voidaan pitää sitä, että kutakin telaa voidaan keventää yksilöllisesti kevennyssylintereiden avulla. Kunkin telanpin kuormitus voidaan näin yksilöllisesti hallita. [9]

#### 4.2.2 Runko

Rungon muoto on suunniteltu optimaaliseksi ja tilaa säästäväksi. Se tuo mukanaan tiettyjä kilpailuetuja verrattuna muiden toimittajien ratkaisuihin. Koska telasto on

pystyssä, telojen irrotus nosturin avulla helpottuu. Telan irrottamiseksi huoltoa varten tarvitaan vain vaakasiirto kiinnityskohdastaan. Käyttöhenkilöstön on myös helppo suorittaa käyttöön liittyviä toimenpiteitä, koska telaston molemmin puolin voidaan liikkua nostolavojen avulla. Äkillisen ratakatkon tapahtuessa telaston pika-avaus voidaan suorittaa nopeasti ja näin saadaan telat suojeltua mahdollisilta nipin läpi kulkevilta paksummilta paperikerroksilta.

Runko koostuu rakenneteräksestä hitsaamalla valmistetuista kotelorakenteista, johon telojen lisäksi on kiinnitetty suurin osa kalanterin muista osista ja toimilaitteista.

#### **4.2.3 Kuormitus**

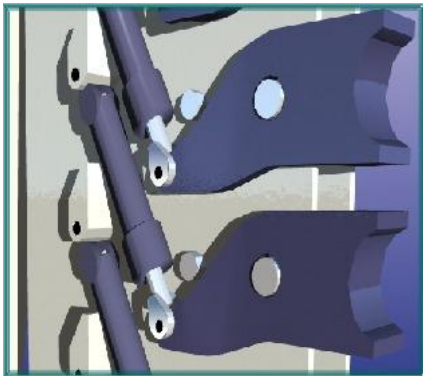
Kuormitus toteutetaan nostamalla alatelaa hoito- ja käyttöpuolen kuormitussylintereiden avulla. Kuormitustilanteessa nippi sulkeutuu ja koko telasto nousee kiinteää ylätelaa vasten. Telojen suojelemiseksi kuormitusjärjestelmässä on mukana myös telaston pika-avausjärjestelmä, ks. kuvat 5 ja 6. [9]



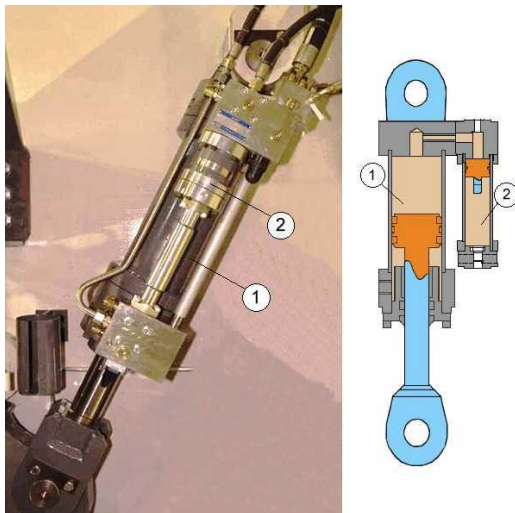
*Kuva 6. Hydraulinen kuormitussylinteri*

#### 4.2.4 Telojen kevennys

Kevennyksen avulla saadaan kaikkiin nippeihin sama viivakuorma. Välitelat on kiinnitetty runkoon nivelvipujen avulla. Nivelvipujen rungon puoleisissa päissä on kevennyssylinterit, ks. kuva 5.



*Kuva 7. Telakohtainen kevennys saadaan aikaan erillisillä kevennyssylintereillä, jotka on asennettu nivelvipujen ja rungon välille. [9]*



*Kuva 8. Oheisessa kuvassa osa 1 on kevennyssylinteri ja osa 2 pika-avausmäntä. Kevennyssylinterin pika-avausmännän avulla tehdään telaston pika-avaus häiriötilanteissa. Nivelvipuja, kevennyssylintereitä ja pika-avausmäntiä voidaan ohjata joko automaattisesti ohjausjärjestelmän avulla tai manuaalisesti valvomosta tai paikallisista ohjauskoteloista. [6]*



#### 4.2.6 Telat

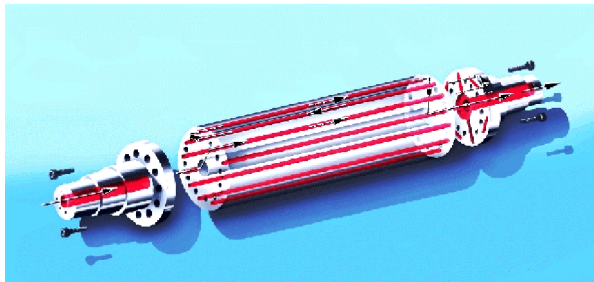
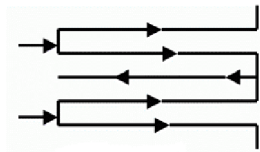
Telojen avulla saadaan aikaan paperiin tehtävät muutokset. Lopputuotteen eli paperin laadun kannalta telat sekä niiden oikea käsittely ja huolto ovat keskeisessä asemassa.

Tela voi myös olla osa säätöjärjestelmää oheiskomponentteineen. Komponenttien sekä säätöjen virityksen tulee olla kunnossa lopputuotteen optimaalista laatua ajatellen.

Telasto koostuu useista erilaisista teloista, joilla kullakin on oma yksilöllinen tehtävänsä halutun loppulaadun saamiseksi. Tela on usein myös pitkällisen kehityksen ja käyttökokemuksen kautta luotu konstruktio optimaalisen hyödyn saavuttamiseksi. Seuraavana käydään telat pääpiirteittäin lävitse. Kuvassa 5 on nähtävissä telojen sijoitus.

##### 4.2.6.1 Termotela

Termotelan lämmöllä säädetään paperin pinnan muokkautuvuutta. Termotelojen sijoitus telastossa on esitetty kuvassa 5, s.22.



*Kuva 9. Termotela on periferiaporattu tela, joka tarkoittaa sitä, että lämmityksen väliaine kiertää telan vaippaan poratuissa, pituussuuntaisissa rei'issä. Lämmityksen väliaineena on vesi tai termoöljy. Telan materiaali on joko teräs, valurauta tai kokillivalurauta. [5]*

##### 4.2.6.2 Taipumakompensoitu SymCDS-tela

OptiLoad-kalanterissa taipumakompensoituja teloja on kaksi, ja ne on sijoitettu telaston ala- ja yläpositioon. Telojen vaipalla saadaan aikaan viivakuormitus sekä profilointi ja

telaston taipuman kompensointi. Taipumakompensoidun telan rakennetta ja toimintaa kuvataan yksityiskohtaisemmin kohdassa 4.3.

#### 4.2.6.3 Polymeeritela

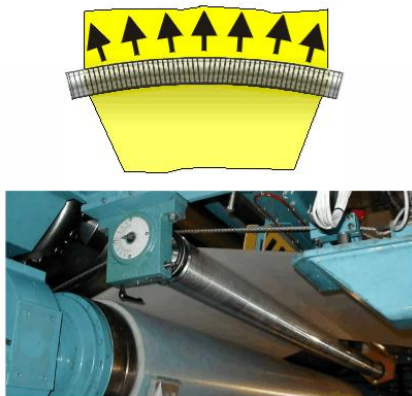
Kalanterin telastossa polymeeritela on sijoitettu termotelaa vasten, ja sen tehtävänä on tasata nipissä syntyvää painetta. Telaston keskellä, ks. kuva 5, on ns. kääntönippi, jossa paperin kalanteroitava puoli vaihdetaan kahden peräkkäisen polymeeritelan avulla. Kääntönipissä paperin molemmat puolet saadaan kalanteroitua termotelaa vasten.



*Kuva 10. Polymeeritelan vaippa on kokillivalua. Vaippa on pinnoitettu pehmeällä polymeeripinnoitteella. Telan sisällä on vesikierto, jolla tasataan telan sisäistä lämpötilaa. [9]*

#### 4.2.6.4 Levitystela

Levitystelan tarkoitus on levittää paperirataa ja poistaa radassa olevat veikit ennen nippiä. Levitystela tasaa myös koneen poikkisuunnassa paperin kulkemaa matkaa nipistä nippiin.



*Kuva 11. Levitystelat voivat rakenteeltaan olla teräksestä tai komposiitista valmistettuja. Levitysvaikutus perustuu telan kaarevuuteen. Pinta voi olla sileä tai uritettu. [6]*

#### 4.2.6.5 Ohjaustela

Teräksestä tai komposiitista valmistettujen ohjaustelojen tarkoitus on kuljettaa paperirataa konelinjassa laitteesta toiseen. Ohjaustelan pinta voi olla joko sileä tai uritettu. Urituksen tarkoituksena on tehostaa ilman poistumista telan ja radan välistä ja parantaa täten pitoa, ks. kuva 5, s. 22.

#### 4.2.6.6 Ulosottotela

Lähimpänä telastoa olevia ohjausteloja kutsutaan ulosottoteloiksi, ks. kuva 5, s.22. Ulosottotelat ohjaavat radan kalanterin telaston läpi. Ulosottotelojen sijoittelulla voidaan myös säätää, kuinka kauan termotelan lämpö pääsee vaikuttamaan paperiin ennen nippiä ja sen jälkeen.



*Kuva 12. Online-monitelakalantereissa ulosottoteloina on putkitelatyypinen ohjaustela. Offline-monitelakalantereissa ulosottoteloina käytetään yleensä kolmiosisaisia teräsvaippaisia teloja. Ulosottotelat korvaavat myös offline-monitelakalanterin telaston alueen levitystelat. [6]*

### 4.3 Taipumakompensoitu SymCDS-tela

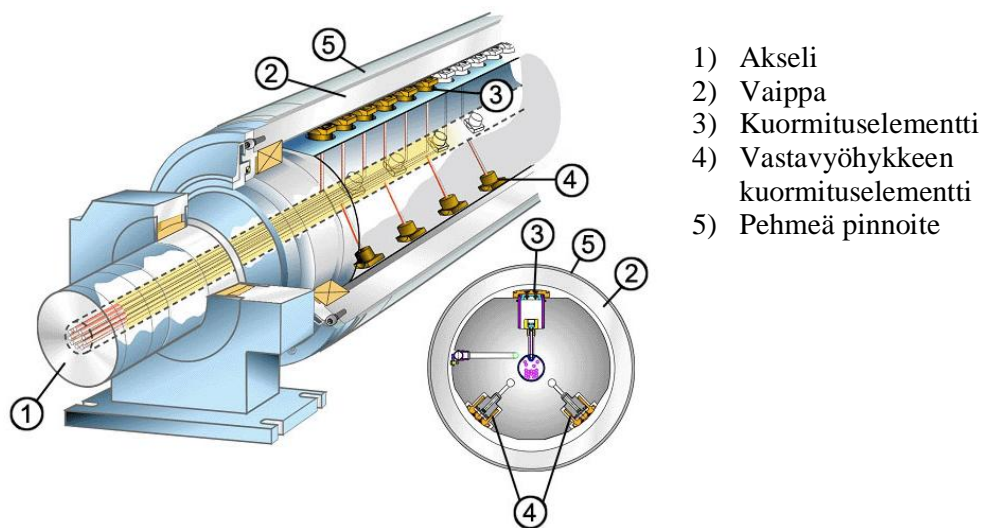
Profiloiva SymCDS-taipumakompensoitu tela edustaa tämän päivän huipputekniikkaa kalanterointiteknologiassa. Kalanteroitavan paperin poikkisuuntaiset paksuus- ja kiiltoprofiilin vaihtelut pystytään välittömästi korjaamaan. Edistyksellinen ohjausjärjestelmä, kapeat kuormituselementit sekä ohut telavaippa yhdessä saavat aikaan keskitetyn ja tarkan profiloituvasteen. Tela soveltuu hyvin myös alemmille nippikuormitusalueille.

Muita telan erityisominaisuuksia ovat mm.

- hyvä värähtelyvaimennuskyky
- matala energian kulutus
- vähäinen huollontarve

### 4.3.1 Pääkokoontapano ja toiminta

Optiload-TwinLine-monitelakalanterissa käytetään suuremman rakennenopeuden takia, liikkuvavaippaisia, liukulaakeroituja, taipumakompensoituja (TK) teloja. Näiden telojen tuotemerkki on SymCDS/HP. Vastaava tuotemerkki perus-OptliLoad-kalantereissa on SymCDS, jota myös tässä osiossa käsitellään. SymCDS/HP-telan rakenteellinen pääero SymCDS-telaan verrattuna löytyy laakeriratkaisun alueelta.



- 1) Akseli
- 2) Vaippa
- 3) Kuormituselementti
- 4) Vastavyöhykkeen kuormituselementti
- 5) Pehmeä pinnoite

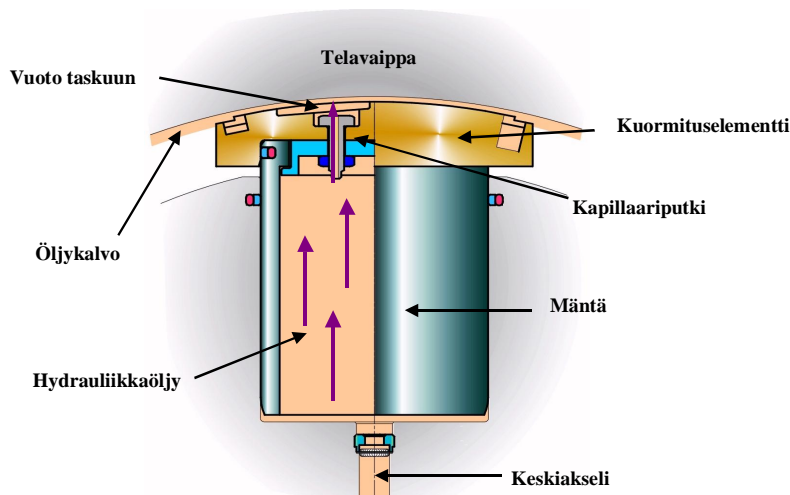
*Kuva 13. Liikkuvavaippaisen, itsekuormittuvan SymCDS-telan periaatteellinen rakenne. Paperin poikittaissuuntainen profilointi tehdään kuormittamalla kuormituselementtejä hydraulisesti telavaippaa vasten. Telan vaippa on valurautaa tai kokillivalurautaa. Tela voi olla kovapintainen tai polymeeripinnoitteinen. [10]*

Perus-OptiLoad-kalanterin TK-telat ovat rullalaakeroituja. Rullalaakeroinnin takia telan käyttönopeus jää matalammaksi kuin OptiLoad TwinLine-kalanterin liukulaakeroidun TK-telan. Kuvassa 13 rullalaakeri on sijoitettu telan rungon ja vaipan välille. Akseli ja siihen liittyvä runko kytkeytyy hoitopuolella tukilaakerin kautta koneen runkoon. Käyttöpuolella vastaava kytkeytyminen tapahtuu alennusvaihteen rungon kautta. Telan runko kuormituselementteineen ja hydraulikkaputkistoineen pysyy paikallaan, telan vaipan liikkuessa. Tästä johtuu myös liikkuvavaippaisen telan nimitys. Telan käyttöpuolen päässä sijaitsee alennusvaihte, jonka kautta käyttöenergia saadaan siirrettyä telan vaipalle. Telan akselin päissä sijaitsevat hydraulikkaputkien

pikaliitinpaneelit, joihin telan ulkopuolelta kytkeydytään taipuisien hydraulikkaletkujen avulla. Letkut ovat yhteydessä käyttö- ja hoitopuolella sijaitseviin venttiilikaappeihin, joissa kuormituselementtien ohjaukseen tarvittavat servoventtiilit sijaitsevat.

### 4.3.2 Kuormitus

Haluttu viivakuormaprofiili saavutetaan säätämällä kuormituselementeissä olevaa öljynpainetta ohjausjärjestelmän avulla. Kuormituselementtien ohjaus on jaettu vyöhykkeisiin, joten kuormitus voidaan kohdistaa tarkasti. Jokaista kuormituselementtiä ohjataan yksilöllisesti servoventtiilin kautta. Kuormituselementtien määrä riippuu telan leveydestä.



*Kuva 14. Nippivyöhykkeen kuormituselementti. Hydrauliikkaöljy muodostaa kapillaariputken ja taskun kautta kalvon kuormituselementin ja telavaipan välille, jolloin mekaanista yhteyttä osien välillä ei ole. [10]*

## 5 TK-telan hydraulikka

### 5.1 Yleistä kalanterihydrauliikasta

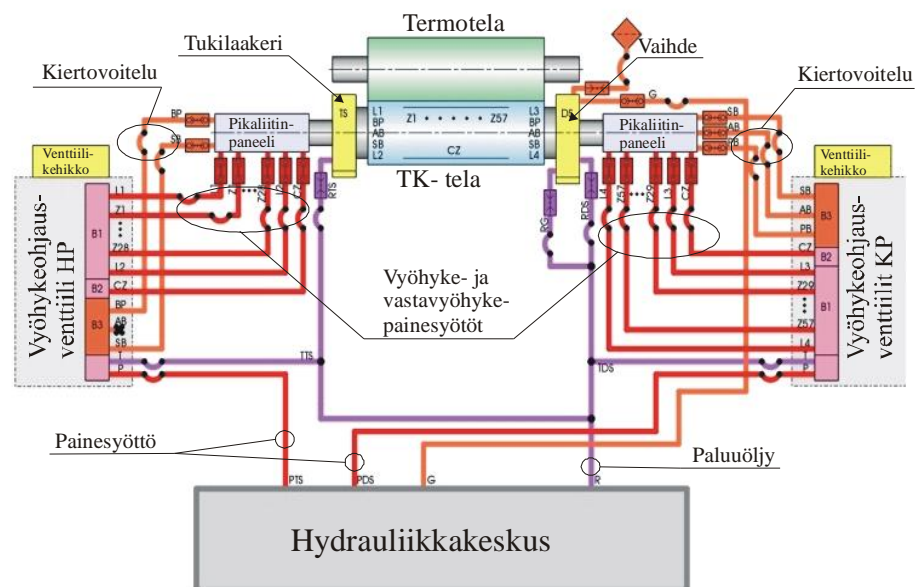
Hydrauliikan avulla kalanterissa saadaan aikaan telojen kuormitus, välitelojen kevennys sekä taipumakompensoitujen telojen vyöhykeprofilointi. Järjestelmä koostuu koneikoista, ohjaus- ja säätöventtiileistä, toimilaitteista eli hydraulikkasyntereistä sekä automaatiojärjestelmästä. Liikkeisiin tarvittava hydraulikkapaine tuotetaan hydraulikkakoneikolla, joka yleensä sijaitsee erillisessä tilassa kellaritasolla. Koneikon

tuottama paine on luokkaa 250 bar. Toimilaitteille vaikuttava paine on yleensä välillä. 5-250 bar. [6]

Hydrauliikkakoneikolla sijaitsevat sähkömoottorikäyttöiset pumpput, jotka pumpaavat suodatetun hydrauliikkaöljyn venttiilien kautta toimilaitteille eli hydrauliikkasyylintereille. Paluuöljy ohjataan takaisin koneikon öljysäiliöön. Hydrauliikkapiireissä kulkevan öljyn lämpötilaa säädetään koneikolla sijaitsevien lämmitysvastusten ja jäähtytyksen avulla. [6]

Hydrauliikan ohjausventtiilit sijaitsevat sekä kellaritason koneikolla että konetasolla automaatiokaapeissa. Venttiilit ovat yleensä ryhmitelty lohkoihin, joille kullekin tulee oma painesyöttölinjansa koneikolta. Toimilaitteiden voimansäätö tapahtuu paineenalennusventtiilien avulla. Liikenopeuksia säädetään öljyvirtauksen kuristusventtiilien avulla. Venttiilien toimintoja ohjataan joko automaatiojärjestelmän tai manuaalisen ohjauksen avulla. [6]

## 5.2 TK-telan hydrauliikkapiirit ja -komponentit



Kuva 15. Sym CDS-telaan liittyvä hydrauliikka. [5]

TK-telan vyöhyke- ja vastavyöhyke-elementtien, kuva 13, tarvitsema kuormituspaine tuotetaan hydrauliikkakeskuksessa. Keskuksesta paine johdetaan teräsputkissa

kalanterin hoito- sekä käyttöpuolella sijaitseviin hydraulikkakaappeihin, joissa se jaetaan eri venttiileille. Kaappien venttiilipaneelissa sijaitsevat sekä vyöhykkeiden- että vastavyöhykkeiden kuormituselementtien vaatimat venttiilit. Kutakin kuormitusvyöhykettä ohjataan omalla venttiilillään. Vastavyöhykkeen kuormituselementtejä ohjataan yhden venttiilin kautta. Venttiileiltä paine johdetaan TK-telan kuormituselementeille. Painelinjojen kytkeytyminen telaan tapahtuu telan kummassakin päässä sijaitsevan pikaliitinpaneelin sekä hydraulikkapaineletkujen avulla, ks. kuva 15.

### **5.3 Servoventtiilit**

#### **5.3.1 Yleistä**

Metso Paper -liiketoimintalinjan kalantereissa servoventtiileillä ja servo-proportionaaliventtiileillä säädetään hydraulikkatoimilaitteiden kuormituspainetta sekä liikenopeuksia. Venttiilien valmistajat ovat Moog Inc. tai Boch Rexroth AG. Servoventtiilien toimintaa käydään tarkemmin lävitse kohdassa 5.3.5.

#### **5.3.2 Käyttötarkoitus**

SymCDS- ja SymCDS/HP-teloissa venttiileitä käytetään nippivyöhykkeiden ja vastavyöhykkeiden kuormituselementtien hydraulikkaöljyn paineensäädössä ja sitä kautta nippivyöhykkeiden profiloinnissa. Lisäksi käyttökohteena on SymCDS/HP-telan liukulaakerin voiteluöljyn paineen ja virtauksen säätö.

#### **5.3.3 Venttiilityypit**

Ensimmäisten OptiLoad-kalantereiden servoventtiilit sekä servo-proportionaaliventtiilit olivat analogisia. Venttiilit oli kaapeloitu niitä ohjaavaan ohjausyksikköön. Venttiilien säädöt ja ohjausjärjestelmän viritykset tapahtuivat täysin manuaalisesti. Sym-telojen nippivyöhykkeen kuormituselementtien säätöön käytetyt servoventtiilit olivat tyyppimerkinnältään Moog D635pQ. Vastavyöhykkeen kuormituselementtien säätöön käytetty servo-proportionaaliventtiilin tyyppi oli Moog D691pQ.

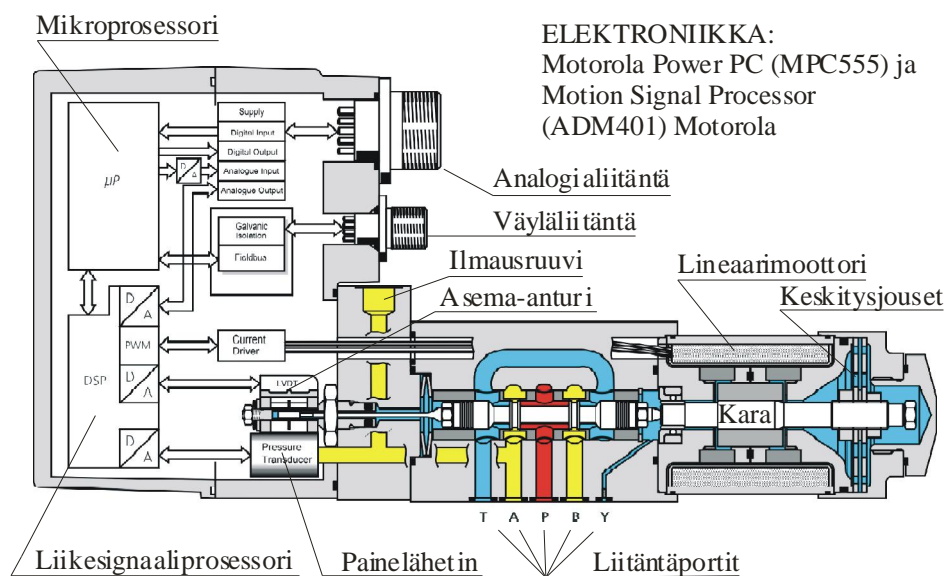
Viime vuosina venttiilien kehitys on harpannut pitkän askeleen eteenpäin. On siirrytty täysin digitaalisiin servo- ja servo-proportionaaliventtiileihin, joissa ohjauselektronikka

on integroitu venttiilin sisään. Tiedonsiirto tapahtuu CANOpen-kenttäväylän kautta. Viimeisin kehitysaskel venttiilin tiedonsiirrossa on Profibus-kenttäväylän tulo venttiileihin. Metso Paper -liiketoimintalinja on jo tehnyt periaatepäätöksen, että Profibus-kenttäväylää tullaan käyttämään sovelluksissa, jotka liittyvät yksi- tai kaksinippisiin kalantereihin. Monitelakalantereiden suhteen vastaavaa periaatepäätöstä ei ole vielä tehty.

SymCDS- ja SymCDS/HP-teloissa nippivyöhykkeen kuormituselementtien servoventtiilit ovat tyyppimerkinnältään Moog D638pQ. Vastavyöhykkeen kuormituselementtien säädössä käytetty servo-proportionaaliventtiili on tyyppimerkinnältään Moog D941pQ. Molemmat venttiilityypit ovat digitaalisia ja käyttävät CANOpen-kenttäväylää tiedonsiirtoon.

### 5.3.4 Keskeinen rakenne

Tämän opinnäytetyön alussa, kohdassa 1.3, työ rajattiin käsittelemään ainoastaan servoventtiileitä, joita käytetään SymCDS- ja SymCDS/HP-telojen nippivyöhykkeiden profiloinnin säädössä. Seuraavana esitellään digitaalisen CANOpen-kenttäväyläohjatun servoventtiilin Moog D638pQ rakenne pääpiirteittäin.



Kuva 16. Servoventtiilin Moog D638pQ sisäinen rakenne. [11]



Kuvassa 16 esitetty Moog D638pQ -servoventtiili sisältää seuraavia rakennekomponentteja ja toimintakokonaisuuksia [11] [12]:

### **Analogialiitäntä:**

Analogiasignaalit

- Analogiatulot (ohjelmoitavissa)
  - 2 sisääntuloa, +/- 10 V, potentiaalivapaa
  - 2 sisääntuloa, +/- 10 mA, potentiaalivapaa
  - 2 sisääntuloa, 4...20 mA, potentiaalivapaa
- Analogialähdöt
  - 2 lähtöä, 4...20 mA

Digitaalisignaalit

- 1 sisääntulo, 24 V =
- 2 lähtöä, 24 V =

### **Väyläliitäntä:**

- CANopen (Profibus DP-väylä tulossa)

### **Mikroprosessori:**

- Motorola Power PC (MPC 555)

### **Liikesignaali prosessori:**

- Motorola ADM 401

### **Asema-anturi LVDT**

- Karan aseman mittaus

### **Painelähetin:**

- Toimilaitteelle vaikuttavan hydraulikkapaineen mittaus

### **Lineaarimoottori:**

- Karan asemointi

### **Keskitysjouset:**

- Karan keskitys kun tilavuusvirta- ja/tai paineohjearvo on nolla.

### **Ilmausruuvi:**

- Ilmanpoisto toimilaitteelle menevästä painelinjasta.

### **Hydrauliikan liitäntäportit:**

- T: Hydrauliikkaöljyn paluulinja tankkiin.

- A: Toimilaiteliitäntä
- P: Syöttöpaineliitäntä
- B: Toimilaiteliitäntä
- Y: Vuotolinja

### 5.3.5 Periaatteellinen toiminta

Tämä venttiilityyppi on ns. DDV- eli suoraohjausventtiili 2-, 3-, 4-, tai 2 x 2-tiesovelluksiin.

Analogiseen servoventtiiliin Moog D635pQ verrattuna tällä venttiilityypillä on useita etuja, kuten esimerkiksi

- karan aseman mittaus LVDT-asema-anturin avulla
- parannettu paineenmittaus
- parannettu venttiilin sisäinen säätöpiiri.

Venttiili parametroidaan, aktivoidaan ja monitoroidaan CiA-standardin DSP 408 mukaisesti sisäänrakennetun CAN-kenttäväylärajoituksen kautta.

Venttiiliä voidaan ajaa joko suoraan CAN-kenttäväylän kautta tai ”analogisena”, jolloin väylää käytetään ainoastaan monitorointiin. Painesäätö (p- toiminto) tai paine- ja tilavuusvirtaussäätö (pQ-toiminto) ovat tälle venttiilityypille mahdollisia. Toimintojen vaihto tapahtuu joko parametroimalla CAN-kenttäväylän rajoituksen kautta, digitaalisäänmenojen kautta tai automaattisesti p/Q-säätimen avulla.

Venttiilin sisään on integroitu digitaalinen ohjaus- ja valvontaelektroniikka. Sisäisen mikroprosessorin sekä siihen liittyvän ohjelman avulla saadaan hoidettua kaikki tarvittavat ohjaukset ja toiminnot.

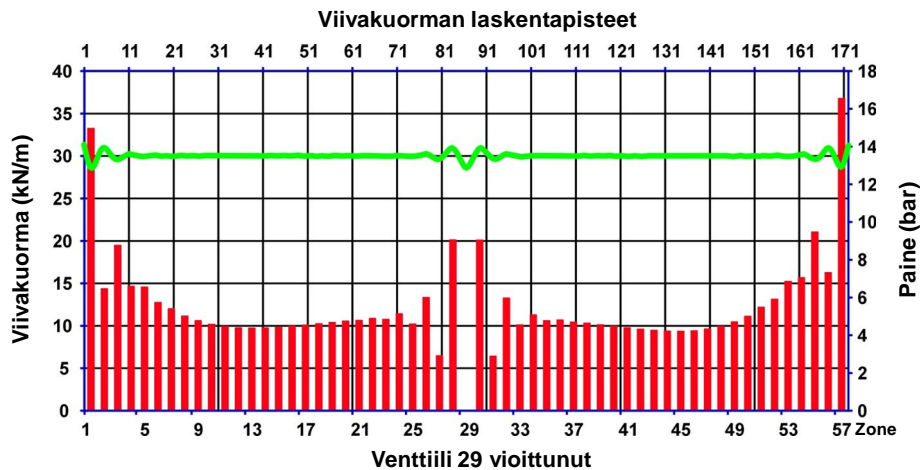
Karan aseman säätö tapahtuu kestopagneettirakenteisen lineaarivoimamoottorin avulla. Proportionaaliventtiiliin verrattuna tämä moottorityyppi pystyy säätämään karan asentoa keskiasennosta kumpaankin työsuuntaan. Tällä rakenteella pystytään tuottamaan voimakas säätöteho hyvillä staattisilla ja dynaamisilla ominaisuuksilla.

## 6 Servoventtiilien vikaantuminen

### 6.1 Yleistä

Vanhemman mallisten analogisten servoventtiilien kunnonvalvonta on varsin hankala toteuttaa, koska niissä itsessään ei ole vikadiagnostiikkaa kuten nykyaikaisissa digitaalisissa servoventtiileissä. Ainoat suureet, joita analogisista servoventtiileistä voidaan kunnonvalvontamielessä tarkastella, ovat paineen- ja/tai tilavuusvirtauksen ohjearvosignaali sekä paineen takaisinkytkentäsignaali painelähtimestä. Kyseisiä analogisia venttiilityyppejä, Moog D635 pQ ja Moog D691 pQ, on käytössä ensimmäisissä OptiLoad-kalantereissa.

Saatujen kenttäkokemusten mukaan digitaalisten servoventtiilien elektroniikka on erittäin vikasietoista eikä myöskään ole sähkömagneettisten häiriöiden suhteen yhtä herkkä kuin analoginen servoventtiili. Paperitehdasympäristössä isot taajuusmuuttajat ja sähkömoottorit voivat aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä. Analogisen tai digitaalisen servoventtiilin ollessa kyseessä ja vikaantumisen päästyä tapahtumaan vaikutukset nähdään yleensä vasta kalanteroidussa paperissa, kuva 17. [13, s. 22]



Kuva 17. Konekalanterin Sym-telan nippivyöhykkeen säätöelementtien paine sekä nipissä vaikuttava viivakuorma. Venttiilien 28 ja 30 säätöjärjestelmät yrittävät korjata venttiilin 29 vioittumisen aiheuttamaa tilannetta. Venttiilin vioittuminen aiheuttaa viivakuormamuutoksen kautta pientä muutosta myös kalanteroitavaan paperiin. Paperi on kuitenkin tässä tapauksessa vielä myyntikelpoista. [14]

## 6.2 Vikaantumisen aiheuttajia

Venttiilien vikaantuminen voi aiheutua useista eri syistä, joita ovat mm.

- mekaanisten osien tai elektronisten komponenttien valmistusvirheet
- asennusvirheet
- käyttövirheet
- liitinviat
- kaapelivauriot
- elektroniikan komponenttiviad
- elektroniikkaan kohdistuva värinä
- elektroniikan syöttöjännitevaihtelut ja häiriöt
- elektroniikkaan kohdistuva ympäristölämpötila
- epäpuhtaudet öljyssä
- karan ja/tai sitä ympäröivän holkin kuluminen
- karan takertelu tai jumiutuminen
- eroosio
- kavitointi
- paine- tai liike-takaisinkytkennän ongelmat
- keskitysjousten viruminen ja ominaisuuksien muuttuminen pitkällä aikavälillä.

Vikaantumistilanteessa venttiiliin kytketty toimilaite lakkaa yleensä toimimasta joko välittömästi tai hitaasti, riippuen vikaantumistavasta. Hydraulikkaöljyssä olevat epäpuhtaudet voivat kiilata karan johonkin asentoon, jolloin tapahtuu jumiutuminen. Tällaisessa tapauksessa ohjauselektroniikka yrittää korjata karan asentoa. Mikäli jumiutuminen äkillisesti vapautuu, voi se saada aikaa toimilaitteen äkillisen liikkeen. Tästä voi aiheutua toimilaitteen ja siihen kytketyn mekaniikan laiterikko. Erityisesti tämä on turvallisuusriski.

Luistin ja sitä ympäröivän holkin hankauskulumista eli hiertämistä tapahtuu venttiilin vanhetessa. Mikäli luistin ja holkin kovuuksilla on eroa, niin kovempi pinta leikkaa pois materiaalia vähemmän kovasta pinnasta. Vähän kerrallaan tämä voi muuttua kolmen väliseksi kulumiseksi, kun kulumisesta syntyneet hiukkaset vuorostaan alkavat kuluttaa

pintoja. Kulumishiukkaset sekoittuvat myös hydraulikkaöljyyn ja palaavat takaisin venttiiliin, mikäli suodattimen puhdistavat ominaisuudet eivät ole riittävät. [13, s.14]

Karan reunoja pyörivistävää kulumista voi aiheuttaa eroosio, jolloin karan pinnasta tulee kulunut ja huokoinen. Kulumisen vaikuttaa myös säätöpiirin toimintaan. Eroosion syntymistä edesauttaa karan ja holkin välinen pieni välys, suuri virtausnopeus ja paine. Eroosiossa virtauksen mukana kuljettamat öljyn epäpuhtauspartikkelit törmäävät karan pintoihin ja kulmiin aiheuttaen ”hiekkapuhallusvaikutuksen”. [13, s 16] [15]

Ajan myötä karan ja holkin välinen kuluminen ja mahdollisesti lisääntynyt kitka saattavat aiheuttaa muutoksia vasteeseen. Tässä tilanteessa kara ei toistuvasti liiku ohjearvon määräämään asemaan, vaan asemassa tapahtuu vaihteluja. Lisääntyneen kitkan takia kara ei ehkä pienellä ohjearvolla liikahda ollenkaan. Nämä oireet saattavat olla merkki siitä, että venttiili on tullut elinkaarensa päähän.

Venttiilin sisäinen painelähetin on alttiina hydraulikkapaineen dynaamiselle rasitukselle. Tämä voi aiheuttaa nollapisteen siirtymää lähettimeä lähtevään mittausalueeseen. Myös mittausalueen siirtymää tai vahvistuksen muutosta voi ajan kuluessa tapahtua. Lämpötilavaihtelut voivat myös aiheuttaa muutoksia painelähtetimen ominaisuuksiin. Edellä mainitut ominaisuuksien muutokset vaikuttavat jossain määrin venttiilin vasteeseen. Kara ei siirry ohjearvon määräämään asemaan, joka edelleen vaikuttaa venttiilistä lähtevään painetasoon. [15]

Karan asemaa mittaavassa asema-anturissa voi myös esiintyä nollapisteen siirtymää sekä mittausalueen vahvistuksen muutosta, jotka vaikuttavat edelleen venttiilin vasteeseen. Muutoksilla on myös yhteys lämpötilavaihteluihin. [15]

Servoventtiilin toiminnan luotettavuuden kannalta on olemassa ympäristön aiheuttamia riskitekijöitä, joita on suositeltavaa tarkastella jo hydraulikkajärjestelmän suunnitteluvaiheessa. Riskitekijöitä ovat mm. seuraavat [16]:

- yleinen puhtaus
- virheet käytössä

- paineiskut
- tärinät
- lämpösäteily
- sähköiset häiriöt
- öljyn puhtaus
- öljyn laatu.

Venttiilivalmistaja Moog Inc. on määritellyt viisi tärkeintä syytä, jotka johtavat venttiilin palautumiseen korjattavaksi pitkällä aikavälillä [16]:

1. Kasvaneet vaatimukset ympäristössä.
  - Tärinä, iskut, järjestelmän värähtelyt, kavitointi
  - Paineiskut lyhentävät elinikää ja aiheuttavat tuotantokatkoksia.
2. Integroitu elektroniikka
  - Osa elektroniikan rikkoutumisesta johtuu kohdan 1 syistä.
  - Korkea käyttölämpötila lyhentää komponenttitasolla elektroniikan ikää.
  - Integroitu elektroniikka on yleistynyt viimeisen 10 vuoden aikana.
3. Öljyn likaisuus
  - Epäpuhdas öljy (lika, vieraat aineet) on edelleen monessa sovelluksessa suurin ongelma venttiilien kannalta.
4. Koneiden modifiointi
  - Koneita kehitetään ajan myötä nopeammiksi, jolloin venttiilit joutuvat sopeutumaan uusiin olosuhteisiin. Mikäli asiaan ei ole riittävästi paneuduttu, on alkuperäinen venttiili väärä uusiin vaatimuksiin.
5. Ennakoivat huollot
  - Venttiilit lähetetään huoltoon ennakolta sovituin kriteerein ja huolto tehdään asiakkaan vaatiman laajuisesti – huollettu venttiili täyttää aina tehtaan venttiilille asettaman teknisen speksin.

## **7 Servoventtiilien kunnonvalvontamenetelmät**

### **7.1 Yleistä**

Metso-konsernin tuotteissa luotettavuus on ollut aina tärkeässä asemassa. Luotettavuus on sitä parempi, mitä alhaisempi on odottamattomien vikojen ja vaurioiden lukumäärä. Kun alkava vikaantuminen havaitaan jatkuvan seurannan avulla mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, voidaan huolto- ja kunnossapitotoimet suunnitella oikea-aikaisiksi ja välttää koneen odottamattomat viat ja vauriot sekä näistä aiheutuvat korkeat seisokkikustannukset.

Kalanterin Sym-telojen vyöhykesäädön servoventtiilit ovat kalanterointiprosessin kannalta keskeisessä asemassa. Venttiilin rikkoutuminen aiheuttaa laatumuutoksia kalanteroitavaan paperiin. Mikäli viallisia venttiileitä on useampia, seurauksena voi olla odottamaton seisokki, jolloin tuotantomenetyksen kustannukset ovat venttiilin arvoon nähden moninkertaiset.

Tässä osiossa pyritään selvittämään eri venttiilivalmistajien sekä Metso-konsernin käyttämät servoventtiilien kunnonvalvontamenetelmät. Yhteenveto-osiossa tarkastellaan eri menetelmien soveltuvuutta juuri meidän käyttötarkoitukseemme etäkunnonvalvonnan yhteydessä.

### **7.2 Venttiilivalmistajien kunnonvalvontamenetelmät**

#### **7.2.1 Moog Inc.**

##### **7.2.1.1 Analogiset servoventtiilit**

Laitetoimittajalla ei ole olemassa analogisten venttiilimallien ennakoivaan kunnonvalvontaan kehitettyä työkalua tai ohjelmistoa. Kunnonvalvonta ja sen menetelmien kehitys jää laitteiden jatkotoimittajan tai loppukäyttäjän tehtäväksi. Venttiilin ohje- ja oloarvoja voidaan mitata joko normaalin kunnonvalvonnan yhteydessä manuaalisesti tai ohjelmallisesti ohjauslogiikan tai Metso DNA - prosessinohjausjärjestelmän kautta. Painelähettimen kuntoa voidaan tutkia vertailumittauksen avulla, jolloin painelähettimen antamaa painelukemaa verrataan

tunnettuun painelukemaan. Painelähtetimen kunto voidaan tutkia määrävälein, jolloin kunnan kehityksestä voidaan nähdä sen trendi.

Voidaan olettaa, että ohje- ja oloarvojen keskinäisen vertaamisen pitkäaikaisseurannan avulla pystytään näkemään mahdolliset vikaantumista oireilevat muutokset ajoissa. Tällöin venttiilin huolto tai vaihto voidaan ajoittaa sopivaan seisokkiin. Ohje- ja oloarvovertailu antanee kuitenkin varsin suppean kuvan venttiilin kunnosta, ja on mahdollista, että venttiili vikaantuu tavalla, jota ei vertailumittauksella saada esille.

### **7.2.1.2 Digitaaliset servoventtiilit**

Tässä kohdassa käsitellään Moog DIV -servoventtiilimallin D638 pQ kunnonvalvontaa venttiilitoimittajan ja jälleentoimittajan näkökulmasta. Tätä servoventtiilityyppiä on saatavilla kahdella eri kenttäväylällä varustettuna. Kenttäväylätyypit ovat CANopen ja Profibus DP. CANopen-väyläinen venttiili on käytössä moninippisissä kalanterimalleissa OptiLoad ja TwinLine. Kohdassa 5.3.3 mainittiin, että Metso Paper -liiketoimintalinja on jo tehnyt periaatepäätöksen siitä, että Profibus DP -kenttäväylää tullaan käyttämään sovelluksissa, jotka liittyvät yksi- tai kaksinippisiin kalantereihin. Periaatepäätöstä moninippisten kalantereiden suhteen ei ole vielä tehty. Tulevaisuuden trendi on kuitenkin se, että Metson Järvenpään yksikön tuotteissa tullaan siirtymään kokonaisuudessaan Profibus DP -väyläisen servoventtiilin käyttöön. Seuraavan sukupolven väyläratkaisutkin servoventtiilien suhteen ovat jo kehitteillä, mutta ne eivät kuulu tämän opinnäytetyön piiriin.

Edellisessä kohdassa 7.2.1.1 kerrotut asiat pätevät myös kenttäväyläisille servoventtiileille. Kenttäväyläisissä malleissa lisämahdollisuuksia kunnonvalvonnan suhteen tuovat laajat diagnostiikkaominaisuudet sekä karan aseman mittaus sisäänrakennetun LVDT-anturin avulla. Varsinaista ennakoivan diagnostiikan työkalua ei venttiilitoimittajalla ole. Venttiilidiagnostiikkaan pääsee sisälle venttiilitoimittajan luoman konfigurointiohjelman (Moog Valve Configurator, MoVaCo) avulla.

Moog DIV sisältää tällä hetkellä satoja parametreja, joita käyttäjä voi lukea väylän kautta esimerkiksi Metso DNA -automaatiojärjestelmään tai koneohjauslogiikkaan.



Parametreja ovat mm.

- paineen ja karan aseman oloarvot, erosuureet, tilatiedot
- elektroniikan kuntoa valvovat parametrit
- jännitetarkkailut
- ohje vs. oloarvotarkkailut.

Automaatiojärjestelmästä halutut tiedot voidaan edelleen lukea etädiagnostiikkapalvelimelle jatkokäyttöön. Kummassakin, sekä CANopen- että Profibus DP -väyläisessä venttiilissä on saatavilla samat diagnostiikkatiedot.

Metson Järvenpään yksikön toimesta suoritettiin Profibus DP -väyläisen venttiilin pilottikokeilu, jossa ohjelmiston yhtenä uutena ominaisuutena testattiin eräänlainen diagnostiikkasekvenssi. Kyseinen sekvenssi kerää, muiden tehtävien antaessa tilaa, haluttua dataa venttiililtä DNA-automaatiojärjestelmään. Tällä hetkellä tallennetaan yleisen sisäisen diagnostiikan lisäksi vain sisäisen venttiilelektroniikan lämpötila, mutta myös muita rekistereitä voidaan lisätä keruuseen. Normaalit prosessiarvot kuten paineen ohje- ja oloarvo sekä tilavuusvirtauksen ohje- ja oloarvo eivät ole keruussa, koska ne ovat osa väyläohjausta ja löytyvät DNA-automaatiojärjestelmästä suoraan.

### **7.2.2 Bosch Rexroth AG**

Toinen tunnettu hydraulikkaventtiilien valmistaja on saksalainen Boch Rexroth AG, jonka valmistamia proportionaaliventtiileitä on myös käytössä Metson Järvenpään tuotteissa. Viimeisimmät Profibus DP-kenttäväyläiset venttiilit ovat tyyppimerkinnältään STW 0195 ja STW 0196. [17]

Boch Rexroth käyttää Profibus DP-väyläisistä venttiileistä myös nimitystä IAC-P-proportionaaliventtiilit. IAC:llä tarkoitetaan venttiilin sisäistä digitaalista ohjauselektroniikkaa. Venttiiliä hallinnoi mikroprosessori, joka säätää venttiilin toimintoja kuten esimerkiksi proportionaalisolenoidia. Tästä tulee venttiilin nimen viimeinen kirjain P (Proportional Solenoid / Proportional Valve). Karan asema saadaan takaisinkytkentänä ohjauselektroniikalle venttiilin sisäisellä, solenoidin induktiivisella

positiionmuuntimella. Venttiiliin päästään kytkeytymään WinPED-nimisellä PC-ohjelmalla.

Profibus DP -väylässä on kaksi master-slave-tyyppistä kommunikointiprotokollaa, DPV0 ja DPV1. Edellä mainitut venttiilityypit STW 0195 ja STW 0196 tukevat kumpaakin mainittua kommunikointiprotokollaa.

DPV0-kommunikointiprotokollan avulla pystytään käsittelemään ja lukemaan laitteen yleisiä parametreja kuten asetus- ja oloarvot, tilatiedot ja ohjaussanat. Päivitystapa on syklinen, jossa tietoa päivitetään jatkuvasti. Metso DNA -automaatiojärjestelmä tukee DPV0-liikennöintiä.

DPV1-kommunikointiprotokollan avulla pystytään muuttamaan venttiilin omia parametreja, mutta muutoksien päivitys on ns. asyklinen, jossa päivitykset tapahtuvat kun muut sykliset tehtävät antavat aikaa. Kommunikointiliikenne Metso DNA -automaatiojärjestelmän ja DPV1:n välillä on vielä kehitysvaiheessa. Ainoa tapa tällä hetkellä päästä käsiksi DPV1-kommunikointiin on käyttää Metso Automaatio -liiketoimintalinjan kehittämää FieldCare-ohjelmistoa. Tätä varten laitevalmistajalta tarvitaan kuitenkin laitteen ohjaintiedosto sekä käyttäjän puolelta runsaasti työtä. FieldCare-ohjelmistoa käsitellään tarkemmin kohdassa 7.3.2.1.

Boch Rexroth AG:n proportionaaliventtiilien STW 0195 ja STW 0196 suhteen voidaan todeta se, että etäkunnonvalvonnan kannalta tärkeät venttiilitiedot pystytään lukemaan Metso DNA -automaatiojärjestelmään tai koneohjauslogiikkaan edelleen käytettäväksi etäkunnonvalvontasovelluksissa. Venttiilitoimittajalla ei ole olemassa ennakoivaa kunnonvalvontamenetelmää servo- tai proportionaaliventtiileille, vaan menetelmän kehitys jää jälleentoimittajan tai loppukäyttäjän tehtäväksi.

### **7.3 Metso-konsernin kunnonvalvontamenetelmät**

Suoritin kunnonvalvontamenetelmiin liittyvän kartoituksen Metso-konserniin kuuluvien Mining-, Power- ja Automation -liiketoimintalinjojen sisällä. Kartoituksen tuloksena selvisi se, että kyseisissä yksiköissä ei servo- tai proportionaaliventtiilien ennakoivaan kunnonvalvontaan soveltuvaa menetelmää ole vielä kehitetty.

Metson Jyväskylän yksikössä venttiilien vikaantumiseen liittyvää tietoa ja kokemusta sen sijaan on runsaasti saatavilla.

### **7.3.2 Automaatio-liiketoimintalinja**

#### **7.3.2.1 Neles-venttiilien kunnonvalvonta**

Neles FieldCare on Metson kehittämä FDT/DTM-teknologiaan pohjautuva ratkaisu, jota käytetään älykkäiden kenttälaitteiden ajonaikaiseen seurantaan sekä niiden kunnossapitoon ja konfigurointiin. Tätä kenttälaitteiden hallintajärjestelmää käytetään joko suoraan tuotantoprosessin ohjausjärjestelmään liitettynä tai erillisenä kenttälaitteiden hallintatyökaluna. Neles FieldCare on riippumaton kommunikaatioprotokollasta ja sen merkittävimpinä etuina voidaan pitää mm. seuraavaa [18]:

- kenttälaitteiden kunnonvalvontatiedon keräys on-line tilassa
- avoin laitetuki
- nopea vianhaku ongelmatilanteissa
- pystyy tunnistamaan suorituskyvyn heikkenemisen
- huoltoseisokit voidaan suunnitella etukäteen.

Neles FieldCare -ohjelma koostuu FDT-kehysohjelmistosta ja DTM-käyttöliittymistä laitteille. FDT on avoimeen standardiin perustuva ohjelmisto, jota tukevat suurimmat laite- ja järjestelmätoimittajat. Ohjelmiston etuina ovat mm. kehittynyt vikadiagnostiikka, ennustava kunnossapito sekä avoimen teknologian mahdollistama laaja väylä- ja laitetuki. DTM-käyttöliittymät sisältävät laitekuvaustiedoston, jolla hallitaan laiteasetuksia. DTM-käyttöliittymää voidaan käyttää missä tahansa kehysohjelmassa ja niitä toimittavat laitevalmistajat.

FieldCare-ohjelmalla muodostetaan yhteys valvottavaan laitteeseen, joka voi olla esimerkiksi älykäs venttiiliohjain. Yhteyden muodostuttua DTM-käyttöliittymä avautuu omaan ikkunaansa. Käyttöliittymän kautta voidaan tutkia laitteesta senhetkisiä ja historiatietoja, joita voivat olla mm.

- monitorointitiedot

- elinkaari diagnostiikka
- hälytysrajat
- konfigurointitiedot
- kalibrointitiedot
- laitteen yleistiedot.

DTM-käyttöliittymän kautta voidaan valvottavan laitteen asetusarvoja muuttaa tai suorittaa valvottavan laitteen kalibrointi.

Yhtenä Neles FieldCaren etuna on laitetuki, joka tarkoittaa sitä, että mikä tahansa laitevalmistaja voi valmistaa omille laitteilleen DTM:ää, joita voidaan käyttää missä tahansa FDT:hen perustavassa kehityssovelluksessa kuten FieldCaressa.

Servoventtiilivalmistajilla Mooc Inc. ja Bosc Rexroth AG ei vielä ole kaupallisia DTM-käyttöliittymiä saatavilla, joten FieldCaren ominaisuuksia ei ainakaan toistaiseksi servoventtiilien suhteen pystytä hyödyntämään.

## **7.5 Yhteenveto**

Tässä osiossa selvitettiin, mitä ennakoivan kunnonvalvonnan menetelmiä on käytössä servoventtiilivalmistajilla, Metso konsernin sisällä sekä metsäkoneita valmistavalla entisellä Metson tytäryhtiöllä John Deere Forestry Oy:llä.

Venttiilivalmistajilla Moog Inc. ja Boch Rexroth AG:llä on käytössä omat konfigurointiohjelmat. Varsinaista yleiskäyttöistä kunnonvalvontatyökalua niillä ei ole. Tällä hetkellä lähinnä käyttökelpoinen kunnonvalvontaratkaisu servoventtiilien kunnonvalvontaan on Metson kehittämä FieldCare-ratkaisu. Tämän käytön esteenä toistaiseksi on DTM-käyttöliittymän puuttuminen servo- ja proportionaaliventtiileille.

Metso- konserniin kuuluvien Mining-, Power- ja Automation -liiketoimintalinjojen sisällä ei servo- tai proportionaaliventtiilien ennakoivaan kunnonvalvontaan soveltuvaa menetelmää ole vielä kehitetty. Metson automaattioratkaisujen suhteen lähinnä käyttökelpoisin on jo edellä mainittu FieldCare-ratkaisu. Mining- ja Power-

liiketoimintojen puolella kunnonvalvontamenetelmät kattavat lähinnä ylemmän automaatiotason, liittyen koneiden normaalien toimintaparametrien valvontaan.

Metson Jyväskylän yksikössä servoventtiilin kunnonvalvonta on vielä kehitysvaiheessa. Meneillään on projekti, jossa venttiilin kunnonvalvontatietoa voidaan kerätä 1 ms taajuudella, mikä mahdollista nopeiden ilmiöiden talteenoton. Tämän projektin myötä kehitettävä menetelmä on tarkoitettu säätö- ja koestuskäyttöön eikä sellaisenaan sovellu ennakoivan kunnonvalvonnan käyttöön.

Metsäkoneita valmistavalla entisellä Metson tytäryhtiöllä John Deere Forestry Oy:llä on käytössä TimberLink -harvesterin seurantajärjestelmä. Tämän järjestelmän avulla koneyrittäjä, kuljettajat ja huoltohenkilöstö voivat optimoida koneen tuottavuuden ja käyttöasteen sekä minimoida polttoainekulut ja muut päivittäiset käyttökustannukset. Tämä järjestelmän soveltaminen yksittäisen komponentin kuten servoventtiilin valvontaan edellyttäisi yhteistyötä, tutkimusta ja tuotekehitystä.

Lopuksi voidaan todeta se, että koko Metso-konsernin alueella tämä opinnäytetyö ja siihen liittyvät selvitykset luovat pohjaa ennakoivan kunnonvalvontamenetelmän edelleen kehittämiseksi

## **8 Suoritetut tutkimukset**

### **8.1 Tarvelähtöinen hydrauliiikan kunnonvalvonta - TAKU**

#### **8.1.1 Tutkimusprojektin esittely**

Tarvelähtöinen hydrauliiikan kunnonvalvonta - TAKU liittyi osatutkimuksena laajempaan Tekes-rahoitteiseen koneenrakennuksen teknologiaohjelmaan MASINA. Ohjelma toteutettiin vuosina 2002 – 2007, ja sen päätarkoitus oli tukea suomalaisen koneenrakennusteollisuuden menestymistä muuttuvassa maailmassa. [19]

TAKU- tutkimusprojekti oli yhteisprojekti TKK / Koneensuunnittelun, TTY / Hydrauliiikan ja automaation laitoksen sekä teollisuuskumppaneiden välillä.

Teollisuuskumppaneina projektiin osallistuivat Metso Oyj sekä John Deere Forestry Oy.

### 8.1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Päätavoitteena oli löytää ja kehittää hydraulikan ennakoivaan kunnonvalvontaan liittyviä menetelmiä yksittäisten komponenttien toimintojen osalta ja järjestelmässä esiintyvien erilaisten vuotojen osalta. [19]

Projektin yksityiskohtaisemmat tavoitteet olivat

- keskeisten komponenttien vikaantumismekanismien löytäminen
- vuotomekanismien löytäminen
- ulkoisten vuotojen ehkäisymenetelmien kehitys
- virtuaaliantureiden luominen kunnonvalvontaan
- mallipohjaisen kunnonvalvontamenetelmän kehitys hydraulikkajärjestelmän keskeisille komponenteille
- komponentin vikaantumisasteen tunnistavan mallin luominen.

### 8.1.3 Venttiilitutkimus

Tutkimukset jakautuivat neljälle osa-alueelle, jotka olivat venttiilitutkimus, pumppututkimus ajovoimansiirto ja tiivistetutkimus. Venttiilitutkimuksen liittyessä tämän opinnäytetyön aiheeseen käsitellään seuraavana siihen liittyviä asioita tarkemmin. [19]

Venttiilitutkimusta varten oli rakennettu erityinen venttiilikoelaite, jossa tutkittavat venttiilit olivat tyypiltään paine- ja suuntaproportionaaliventtiilejä.

Tutkimus sisälsi mm.

- staattisten ja dynaamisten mittausten vertailun diagnosointia varten
  - staattiset mittaukset osoittautuivat soveltuvammiksi, koska ne ovat tarkempia
- epäpuhtauksien vaikutus hydraulikkajärjestelmän käyttäytymiseen
- venttiilin kuntotilaa kuvailevien tekijöiden löytäminen
  - tekijöiksi osoittautuivat vuoto ja painevahvistuksen muuttuminen
- lämpökuormituksen vaikutus venttiilin digitaaliseen ohjauselektroniikkaan.

### 8.1.3.1 Suoritettuja mittauksia

Venttiileille tehtiin useita erityyppisiä mittauksia, joiden tarkoituksena oli selvittää uuden sekä vastaavan käytetyn venttiilin välisiä eroja. Näiden mittausten tavoitteena, venttiilien ominaisuuksien selvittämisen lisäksi, oli arvioida eri tunnuslukujen soveltuvuutta venttiilin kunnan mittaamiseen. Seuraavana esitettyjen mittausten perusteella uuden ja käytetyn venttiilin välille löytyi selkeitä eroja. [20]

Vuotomittaus sekä paineanturin arvojen validointi:

Lopputuloksena todettiin, että uusi venttiili vuotaa hieman vanhaa enemmän.

Käytetyssä venttiilissä paineanturin vahvistus oli noin 6 % liian pieni.

Askelvastemittaukset:

Mittaukset toteutettiin useilla eri paineohjeen arvolla samalla mitaten paineen oloarvoarvo. Lopputuloksena todettiin, että verrattuna uuteen venttiiliin, käytetyn venttiilin vasteaika oli n. 10 % suurempi ja asettumisaika n. 50 % pidempi. Käytetty venttiili jäi värähtelemään tietyn kokoisilla askeleilla.

### 8.1.3.2 Venttiilimittausten johtopäätöksiä

Vertailutestien perusteella vuoto- ja taajuusvastemittaus olivat huonoja venttiilin kunnan indikaattoreita. Askelvastemittaukset sen sijaan sopivat venttiilin kunnan määrittämiseen [20]. PAINELÄHETTIMEN kunnan tarkastukseen voidaan käyttää vertailupainelähetintä, jonka antamaan painearvoon venttiilin sisäistä painelähtetimen antamaa arvoa verrataan. Venttiilin karan kuluneisuuteen voidaan päästä käsiksi vuodon ja/tai paineen mittauksen avulla. Toinen mahdollisuus on monitoroida karan aseman ja/tai paineen ääriarvoja. Venttiilielektroniikan ja säätöpiirin tarkkailuun voidaan käyttää elektroniikan lämpötilamittausta ja karan aseman ja/tai paineen ääriarvojen monitorointia. [21]

Tutkittavat venttiilit olivat analogisella elektroniikalla varustettuja. Tutkimuksessa todettiin se, että uusia kunnanvalvonnan pohjaksi soveltuvia suureita sekä aiemmin tuntemattomia kunnanvalvontamenetelmiä ei noussut esille. Säätöpaineen tai karan aseman värähtelyanalyysiin perustuvien menetelmien kehitys edellyttää lisää

kenttämittauksia ja sovellustuntemusta. Lopuksi todettiin se, että vikasietoisuuden tutkimus on hankala alue koska muuttujia on paljon. Lisäksi yleensä käytetään eri toimittajien venttiileitä, jolloin tarvitaan yhteistyötä venttiilivalmistajien kanssa. [22]

#### **8.1.4 Kunnonvalvontamenetelmien kirjallisuustutkimus**

TAKU-projektiin liittyvä kunnonvalvontamenetelmien kirjallisuustutkimus tehtiin vuonna 2005. Tutkimuksen tekijä oli Jaakko Myllykylä Teknillisestä korkeakoulusta. Kirjallisuustutkimus on tämän opinnäytetyön liitteenä 3.

Tutkimuksen yhteydessä löytyi muutamia uusia julkaisuja, joista useimpien merkitys projektin kannalta oli vähäinen. Kiinnostavimman julkaisun on tehnyt Christian Stammen. Hänen väitöskirjansa *Condition Monitoring für intelligente hydraulische Linearantriebe* on tehty Saksassa Aachenin teknillisessä korkeakoulussa vuonna 2005. Ennen väitöstään hän oli samasta aiheesta julkaissut lukuisia lehtiartikkeleita ja konferenssijulkaisuja.

Tutkimuksen yhteydessä Internetistä löytyi julkaisuja, joista osa käsitteli erilaisia matemaattisia menetelmiä. Eräs mielenkiintoisimmista oli professori Sulo Lahdelman tekemä esitys mittaussignaalin korkeampi asteisesta derivoinnista. Derivoinnin avulla saadaan mittaussignaalista erotettua pienempitaajuisia värähtelyjä. Tätä menetelmää oli käytetty hitaasti pyörivien (2 Hz) laakereiden kunnonvalvontaan.

Muita esille tulleita matemaattisia menetelmiä olivat *Cluster-analyysi* ja *Dempster-Shafer*-algoritmi. Cluster-analyysissä on kyse usean eri mittaussignaalin ryhmittelystä eri ryhmiin. Mittaussignaalin sisältäessä vikaantumiseen viittaavaa poikkeavuutta se sisällytetään lähinnä olevaan ryhmäänsä. Normaalitoiminta sisällytetään omaan ryhmäänsä. Ryhmiä tarkasteltaessa voidaan määrättyistä vikaantumista indikoivista ryhmistä nähdä vikaantumisen edistyminen.

Dempster-Shafer-algoritmiin liittyvässä menetelmässä kerätään jatkuvasti uutta tietoa valvottavasta suureesta. Valvontasuureessa mahdollista vikaa indikoivalle poikkeamalle annetaan tietty todennäköisyys. Poikkeaman esiintyessä uudestaan sen esiintymistodennäköisyyttä päivitetään uudelleen. Päivittämiseen käytetään *Dempster-*



*Shafer*-algoritmia. Tutkittavia suureita voi olla useita. Todennäköisyyden kasvaessa riittävän suureksi voidaan siitä päätellä se, että laite on vikaantumassa tietyllä todennäköisyydellä.

### **8.1.5 Kunnonvalvontamenetelmien patenttiselvitys**

Patenttiselvityksiä teetettiin 2 kpl Tampereen Patenttitoimisto Oy:ssä. Patenttihakut kattoivat ajanjakson vuodesta 1975 vuoteen 2004. Patenttiselvityksen teettäjänä oli Terho Nykänen Tampereen teknillisestä yliopistosta. Olaf Calonius teknillisestä korkeakoulusta esitti koosteen patenttiselvityksistä TAKU-projektin loppuseminaarissa Tampereella 10.1.2006. Kooste on tämän opinnäytetyön liitteenä 3.

Ensimmäisen patenttihaun tuloksena löytyi 77 tiivistelmää ja toisella haulla 222 tiivistelmää. Molempien hakujen tiivistelmät käytiin lävitse ja molemmista tehtiin raportit. Kooste raporttien sisällöstä on liitteenä 3.

Useissa patenteissa toistui sama peruskuvio, jossa määritettiin diagnostiset tunnusluvut. Yksinkertaisimmillaan ne olivat jonkin mitatun suureen (paine, lämpötila) arvo tai niiden muutosnopeus. Tunnuslukuna saattoi olla myös suoritusarvo kuten teho. Virhemarginaali tai sallittu poikkeama määritettiin sovelluskohtaisesti tai kokemuspohjaisesti. Virhepäätelmien välttämiseksi ja virhemarginaalia määritettäessä oli huomioitava järjestelmän tilaan liittyviä suureita, kuten nesteen lämpötila. Esille nousi myös se, että sallittujen arvojen määrittäminen mallipohjaisesti oli suhteellisen harvinaista. Tämä viittasi siihen, että luotettavia laskentamalleja oli vaikea kehittää.

Tutkittavan laitteen kuntotila määritettiin vertaamalla saatua diagnostista tunnuslukua johonkin standardiarvoon. Tämä arvo oli uudelle tai kunnossa olevaksi tiedetylle komponentille määritetty vastaava tunnusluku. Poikkeaman ollessa suurempi kuin virhemarginaali annettiin ilmoitus laitteen huoltotarpeesta.

Toisena peruskuviona useissa patenteissa oli se, että tutkittavasta laitteesta tuotettiin enemmän kunnonvalvontatietoa. Ongelmaksi kuitenkin muodostuivat anturointikustannukset ja anturitiedon luotettavuus.

Laitteen kunnan prognoosiin käytettiin erilaisia menetelmiä aina yksinkertaisista trendianalyyseistä monimutkaisempiin tilastollisiin, herkkyyss-, todennäköisyys- tai hermoverkkoanalyysiin. Näiden menetelmien kuvaus patenteissa oli hyvin suppeaa. Tutkittavista suureista saatu tieto talletettiin tietokantoihin. Talletettu tieto oli tyypiltään

- mittaustietoa
- vikamoodianalyysin tuloksia
- virhelokeja
- huolto- ja korjaustietoja.

Tietokantojen sisältämää historiatietoa ja järjestelmästä saatua mittaustietoa vertailemalla pystyttiin päättämään järjestelmän kunto. Tietokantoja täydennettiin jatkuvasti, jolloin pystyttiin luomaan entistä tarkempia kuntoennusteita.

Patenttselvityksen yhteydessä saatu tieto ei välttämättä ollut testattua tietoa, ja myös sisällön taso vaihteli merkittävästi eri patenttien kesken. Näistä tekijöistä johtuen saadun tiedon luotettavuus ei ollut korkea.

### **8.1.6 Julkaisut**

Teknillisen korkeakoulun koneensuunnittelulaboratorion tutkimusryhmän julkaisutoiminta TAKU:n aihealueelta 2004 – 2004 on esitetty liitteessä 4 ja Tampereen teknillisen yliopiston hydrauliiikan ja automaatiolaitoksen tutkimusryhmän julkaisutoiminta TAKU:n aihealueelta 2003 – 2005 liitteessä 5.

### **8.1.7 TAKU-projektin yhteenveto**

Tutkimusprojektin aikana alkuperäiset tavoitteet muuttuivat. Joitakin tavoitteita oli jätettävä kokonaan pois, koska niihin ei löytynyt riittävästi resursseja. Koelaitteiden suunnitteluun ja rakentamiseen kului suunniteltua enemmän aikaa sekä resursseja. Menetelmätasolla kehitystyö jäi kesken. Joidenkin komponenttien tutkimiseen ei löytynyt riittävän hyvää ja yksinkertaista mittaus- tai havaintomenetelmää. Vaikka kaikkiin tavoitteisiin ei päästy, saatiin kuitenkin paljon lisätietoa eri komponenttien toiminnasta, kulumisesta sekä vikaantumismekanismeista. Projektin loppupuolella alkoi kunnanvalvonnan menetelmätason kehitystä tapahtua. Hydrauliiikan kunnanvalvonnan tutkimus teki suuren harppauksen eteenpäin ja loi hyvän pohjan jatkotutkimuksille. [23]

## 9 Tilastollisia menetelmiä

### 9.1 Tilastollinen prosessinohjaus – SPC

#### 9.1.1 Yleistä

Tilastollisesta prosessinohjauksesta käytetään kirjainlyhennettä SPC, joka muodostuu englannin kielen sanoista *Statistical Process Control*. SPC perustuu tilastotieteeseen ja mittaamiseen, jossa hyödynnetään tilastollisia menetelmiä prosessin valvontaan ja ohjaukseen. Menetelmää käytetään myös prosessin laadunvarmistuksen työkaluna. Prosessista kerätään mittaustietoa prosessista otettavien näytteiden avulla. Saatujen näytteiden perusteella laaditaan erilaisia tilastoja ja kuvaajia. Näiden avulla pystytään tunnistamaan prosessin vaihtelut ja muutokset, joilla on vaikutusta lopputuotoksen laatuun. Tunnistamisen jälkeen laaditaan toteutussuunnitelmat prosessin edelleen kehittämiseksi. Toteuttamisen jälkeen varmistetaan se, että tehdyt muutokset vaikuttavat prosessiin toivotulla tavalla.

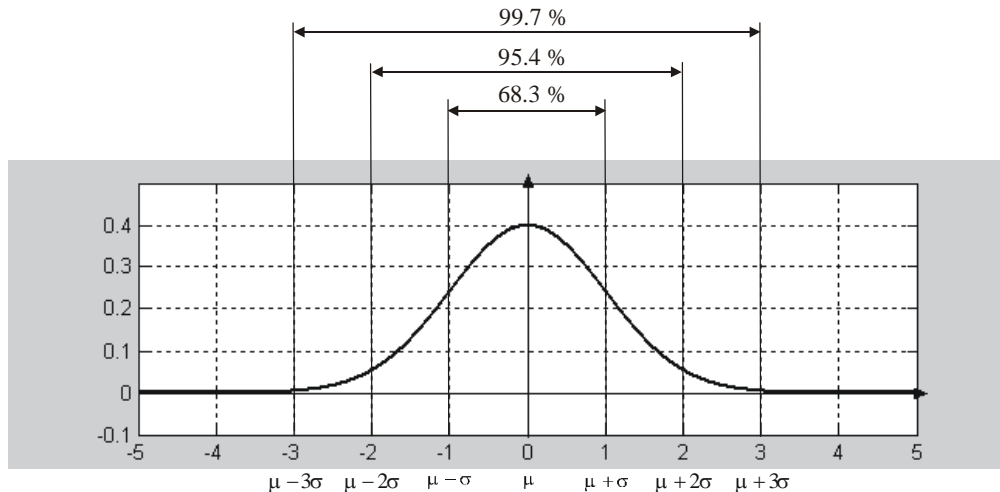
Prosessi sisältää yleensä useita parametreja, joilla kullakin on oma vaikutuksensa tuotteen laatuun. SPC:n avulla kokonaisprosessia hallitaan yksittäisten parametrien hallinnan avulla. Tarkoitus on saada jo ennakoivaa tietoa prosessin tilasta ennen sen mahdollista muuttumista hallitsemattomaksi. Yksittäisparametreissa tapahtuva vaihtelu tunnistetaan valvontakorttien avulla tuotetuista kuvaajista, esimerkiksi histogrammeista. Valvontakorttien kuvaajiin piirretään valvontarajat, jotka on määritelty esimerkiksi keskihajonnan perusteella. Prosessi on hallinnassa, kun mittausarvot pysyvät valvontarajojen sisällä. Valvontarajojen ylittyminen tarkoittaa sitä, että prosessissa on yhden tai useamman yksittäisen parametrin suhteen vikaa.

SPC-menetelmän tarkastelun tarkoitus tässä opinnäytetyössä on pyrkiä selvittämään sen käyttömahdollisuudet servoventtiilin ennakoivan kunnonvalvonnan yhteydessä.

Servoventtiilin ohjaus sisältää useita erilaisia parametreja kuten valvottava prosessikin. Yhden parametrin vikaantumista ennakoiva vaihtelu voi vaikuttaa häiritsevästi venttiilin kokonaistoimintaan ja sitä kautta paperinvalmistusprosessiin ja lopputuotteen laatuun.

### 9.1.2 Normaalijakauma

Todennäköisyysjakaumat ovat tärkeitä tilastollisia menetelmiä. Tärkein niistä on normaalijakauma. Normaalijakaumasta on johdettu myös muita jakaumia, joita ovat log, normaali ja gamma-jakauma. [24]



*Kuva 18. Normaalijakauma ja kaikkien mittaustulosten prosentuaalinen jakautuminen. Yhden yksikön muutos keskiarvosta  $\mu$  kuvaa standardipoikkeamaa, josta usein käytetään nimitystä sigma  $\sigma$ .*

Tuotantoprosessin tuotteet eivät koskaan ole aivan identtisiä, vaan niiden ominaisuuksissa on aina hajontaa. Lopputuotteen ominaisuuksien hajontaan vaikuttavat luonnollinen hajonta mm. raaka-ainekoostumuksessa, valmistusmenetelmissä, ympäristöolosuhteissa jne. Luonnollisen hajonnan johdosta tuotetta ei pystytä valmistamaan absoluuttisiin arvoihinsa vaan ennalta määriteltyjen toleranssirajojen sisälle. Jos ulkopuoliset häiriötekijät eivät pääse vaikuttamaan tuotantoprosessiin, mittaustulokset muodostavat normaalijakauman. Tässä tapauksessa prosessi on hallinnassa, eli ainoa lopputulokseen vaikuttava tekijä on luonnollinen hajonta. Normaalijakaumassa tapahtuu muutoksia, jos tuotantoprosessiin vaikuttaa jokin häiriötekijä. Tilastollisia menetelmiä hyväksikäyttäen tuotantoprosessin häiriötekijä pystytään paikallistamaan jo sen alkuvaiheessa. Varhaisessa vaiheessa havaittu häiriötekijä ehditään poistamaan, ennen kuin se ehtii vaikuttamaan lopputuotteen

laatuun. Tuotteen ominaisuuksille on yleensä määritelty toleranssialue jonka sisällä ominaisuuksien tulee olla. Tällöin tuote on hyväksyttävä.

### **9.1.3 Spesifikaatorajat**

Spesifikaatio- eli vaatimusrajat määrittelevät lopputuotteelle ne rajat, jotka tuotteen ominaisuuksien tulee täyttää, jotta tuote on vielä hyväksyttävissä. Spesifikaatio ilmoittaa tuotteen ominaisuuksien toleranssialueen. Toleranssialueen ollessa huomattavasti prosessin luonnollista hajontaa suurempi, virheellisiä tuotteita syntyy vähemmän ja päinvastoin. Tällöin kuitenkin normaalijakauman tulee olla toleranssialueen sisällä. Spesifikaatorajat tulee optimoida siten, että prosessin ollessa hallitussa tilassa sen luonnollinen hajonta ei ylitä spesifikaation ilmoittamaa toleranssialuetta. [24]

### **9.1.4 SPC:n perusmenetelmiä**

On sanottu, että 95 % laatuongelmista voidaan ratkaista käyttämällä seuraavaa seitsemää perusmenetelmää [24]:

- valvontakortit
- syy- seurausdiagrammi
- histogrammit
- hajontadiagrammit
- vuokaavio
- FMEA-analyysi
- Pareto-menetelmä.

Tämän opinnäytetyön kannalta ja myös SPC:n kannalta tärkeimmät työkalut ovat valvontakortit, syy-seurausdiagrammi, histogrammit, ja hajontadiagrammit, joita käsitellään seuraavana tarkemmin.

### **9.1.5 Valvontakortit**

Valvontakorttien avulla valvotaan prosessia sekä seurataan prosessin mahdollisia muutoksia. SPC:hen voidaan soveltaa manuaalisia valvontakortteja tai kaupallisia ohjelmistoja. Manuaalisten valvontakorttien pohjiin sovelletaan yleensä standardisoituja korttipohjia, joista esimerkkinä ovat x-R-valvontakortti SFS-standardi 4360. [25]

Valvontakortteja on kahta päätyyppiä, jotka ovat

- muuttujien eli mittaavien suureiden valvontaan tarkoitetut kortit
- attribuuttitiedon (on / ei) valvontaan tarkoitetut kortit.

Muuttujien valvontaa tarkoitetun valvontakortin perusajatuksena on prosessista otettujen näyte-erien perusteella piirtää käyrä, jonka avulla valvotaan prosessin tilaa. Valvontakortteihin asetetaan yleensä rajat kolmen standardipoikkeaman etäisyydelle keskiarvosta, ks. kuva 18. Valvontakäyrän jonkin pisteen ylittäessä valvontarajan prosessissa on häiriötila.

Muuttujien valvontaan tarkoitettuja korttityyppejä on useita, jotka ovat hieman toisistaan eroavia. Tärkeimpiä valvontakorttityyppejä ovat X-R-kortti, X-S-kortti ja Mediaanikortti. X-R-kortti on näistä yleisin, ja sitä käsitellään seuraavana. [25]

#### **9.1.5.1 x-R-valvontakortti**

Valvontakorttiperiaatetta voidaan myös tietyiltä osin soveltaa servoventtiilin kunnonvalvontaan. Venttiilin kuntoa kuvaa prosessin lopputuotteen hyvyys ja prosessiparametreja venttiilin kuntoon vaikuttavat parametrit, muuttujat.

x- ja R-valvontakorttien avulla esitetään graafisesti, kuinka seurattava suure vaihtelee ajan mukana. Kortteihin on merkitty myös seurattavan suureen sallitut vaihtelurajat. x- ja R-valvontakortit kuvaavat näytteestä mitatun ja lasketun keskiarvon  $\bar{x}$  ja vaihteluvälin  $R$  avulla valmistusprosessin tilaa [25]:

- onko valmistusprosessi hallittu
- esiintyykö valmistusprosessissa tietty trendi
- esiintyykö valmistusprosessissa ei satunnaisesti katsottavia vaihteluita.

x- ja R-valvontakortit sopivat valmistusprosessin ominaisuutta kuvaavan suureen seurantaan, jos suureen luonnollinen satunnaisvaihtelu on täysin tai lähes normaalijakauman mukaista.

### 9.1.5.2 Valvontakorttien merkinnät

$x$	mittausarvo
$n$	näyteyksiköiden lukumäärä
$k$	näytteiden lukumäärä
$\bar{x}$	näytteen mittausarvojen keskiarvo
$\bar{\bar{x}}$	näytteen mittausarvojen keskiarvojen keskiarvo
$R$	näytteen vaihteluväli
$\bar{R}$	näytteen vaihteluvälien keskiarvo
$V_Y$	ylempi valvontaraja
$V_A$	alempi valvontaraja
$K_v$	keskiviiva
$A_2$	$\bar{R}$ :n kerroin, jota käytetään määrättäessä valvontarajoja $3 \sigma$ :n etäisyydelle keskiviivasta x-valvontakortille
$D_3$	$\bar{R}$ :n kerroin, jota käytetään määrittäessä alemmaa valvontarajaa $3 \sigma$ :n etäisyydelle keskiviivasta R-valvontakortille
$D_4$	$\bar{R}$ :n kerroin, jota käytetään määrittäessä ylempää valvontarajaa $3 \sigma$ :n etäisyydelle keskiviivasta R-valvontakortille
$d_2$	R:n tai $\bar{R}$ :n odotusarvon suhde populaation keskihajontaan
$\sigma$	yksittäisten arvojen populaation keskihajonta
$m$	seurattavan suureen nimellisarvo
$\Delta$	seurattavan suureen toleranssi

### 9.1.5.3 Valvontarajojen määrittäminen

Kun prosessin hajontaa ei tunneta, ei valvontarajoja voida ennakoita asettaa, vaan ne lasketaan 20 ... 25 ensimmäisen näytteen eli noin sadan näyteyksikön tuloksista.

Valvontarajojen määrittämiseksi lasketaan näytteiden keskiarvojen  $\bar{x}$  keskiarvo  $\bar{\bar{x}}$  ja vaihteluvälien  $R$  keskiarvo  $\bar{R}$ . [25]

$$\bar{x} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_k}{k} = \frac{1}{k} \Sigma \bar{x} \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_k}{k} = \frac{1}{k} \Sigma R \quad (2)$$

$\bar{x}$  :n valvontarajat ja keskiviiva määritetään seuraavasti:

$$V_Y = \bar{x} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (3)$$

$$V_A = \bar{x} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (4)$$

$$K_V = \bar{x} \quad (5)$$

$R$  :n valvontarajat määritetään yhtälöillä 6 ja 7 ja keskiviiva määritetään yhtälöllä 8.

$$V_Y = \bar{R} \cdot D_4 \quad (6)$$

$$V_A = \bar{R} \cdot D_3 \quad (7)$$

$$K_V = \bar{R} \quad (8)$$



Taulukko 1. Kertoimien  $A_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  ja  $d_2$  arvot, kun valvontarajat ovat noin  $\pm 3\sigma$  keskiviivasta.

$n$	$A_2$	$D_3$	$D_4$	$d_2$
2	1,880	0	3,268	1,128
3	1,023	0	2,574	1,693
4	0,729	0	2,282	2,059
5	0,577	0	2,114	2,326
6	0,483	0	2,004	2,534
7	0,419	0,076	1,924	2,704
8	0,373	0,136	1,864	2,847
9	0,337	0,184	1,816	2,970
10	0,308	0,223	1,777	3,078

Kun valvontakortilla seurattaville suureille on asetettu toleranssit  $m \pm \Delta$  ja valvontakortilla seurataan  $n$ :n havainnon keskiarvoa, valitaan:

$$\bar{R} = d_2 \Delta / 3 \quad (9)$$

$$\bar{x} = m \quad (10)$$

#### 9.1.5.4 Tulosten laskeminen

Näytteestä mitatuista tuloksista lasketaan aritmeettinen keskiarvo  $\bar{x}$  ja vaihteluväli  $R$  [25]:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum \bar{x} \quad (11)$$

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (12)$$

Tulokset siirretään valvontakortteihin vastaavan näytteen kohdalle.

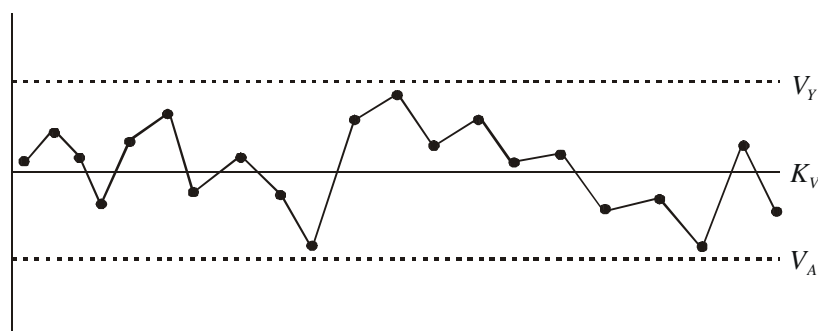
Jos näytteen  $\bar{x}$  - ja  $R$  -arvot pysyvät valvontakorttirajojen  $V_Y$  ja  $V_A$  välissä, on prosessi hallinnassa. Jos arvot menevät valvontarajojen ulkopuolelle, on prosessissa tapahtunut häiriö tai prosessi ei ole enää hallinnassa.

### 9.1.5.5 Tulosten tulkinta

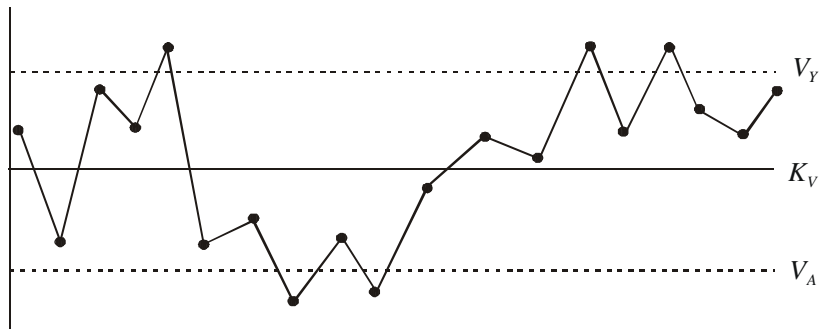
Prosessi on hallinnassa, jos kaikki valvontakortin mittausravot ovat valvontarajojen sisäpuolella. Valvontarajojen ylityessä prosessiin vaikuttaa jokin häiritsevä tekijä, jolloin prosessi ei ole enää hallinnassa. Valvontakäyristä voidaan saada ennakoivaa tietoa tulevasta raja-arvojen ylitymisestä tarkkailemalla mittausravojen trendiä.

Trendistä voidaan arvioida prosessin tilaa ja sen kehittymisen suuntaa. Jos nousevassa tai laskevassa trendissä on nähtävissä useita peräkkäisiä mittausravoja, on prosessi hitaasti muuttumassa epänormaaliin suuntaan. Mitä enemmän peräkkäisiä mittausravoja on, sitä pienempi on todennäköisyys, että kyseessä on satunnainen tekijä. Useiden peräkkäisten mittausravojen sijainti samalla puolella valvontakorttia osoittaa myös prosessin muutoksesta. Muita prosessin epänormaaliin tilaan liittyviä asioita ovat mm. seuraavat [24]:

- Valvontakäyrässä esiintyy jaksottaista vaihtelua.
- Kaksi kolmesta mittauspisteestä esiintyy 2-sigmarajojen ulkopuolella, ks. kuva 18.
- Mittauspisteistä 2/3 tulisi sijaita normaalijakauman keskimmaisissa kolmanneksissa ja 1/3 reunimmaisissa kolmanneksissa, ks. kuva 18.



Kuva 19. Prosessi on hallinnassa kaikkien mittauspisteiden ollessa valvontarajojen sisäpuolella.

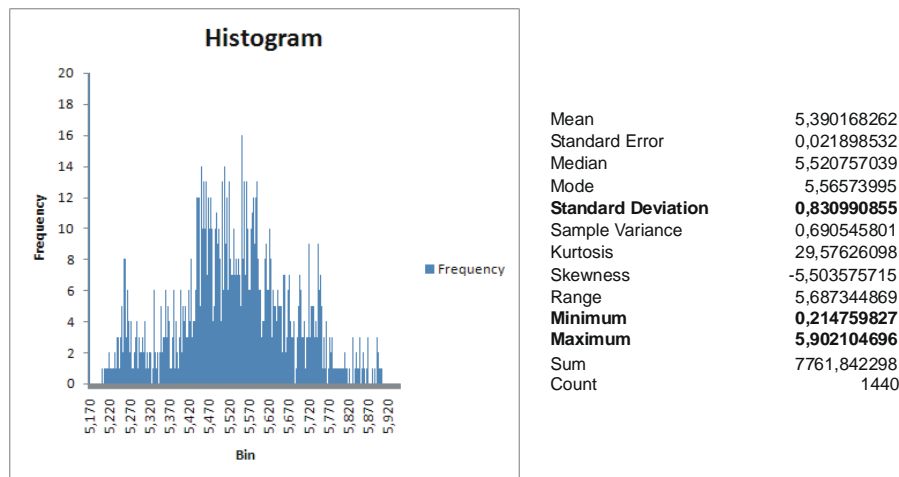


*Kuva 20. Valvontakorttien rajojen ylittyminen kuvaa sitä, että prosessi ei ole hallinnassa.*

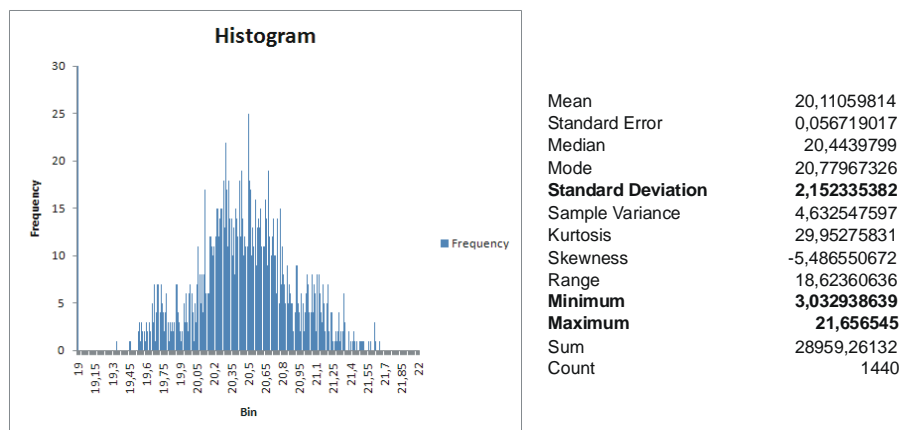
#### **9.1.5.6 Soveltaminen servoventtiilin kunnonvalvontaan**

x-R-korttia voidaan soveltaa myös servoventtiilin kunnonvalvontaan. Servoventtiili voidaan rinnastaa prosessin lopputuotteeseen, jonka laatuun eri prosessiparametrit vaikuttavat. Servoventtiilin tapauksessa lopputuotteen laatua vastaa venttiilin kunto. Venttiilin kuntoon vaikuttavat useat eri tekijät, joista osa on venttiilin sisäisiä mitattavia parametreja ja osa ulkoisia tekijöitä. Näitä on tarkemmin käsitelty kohdassa 9.1.6 Syyseuraus-diagrammi.

Tuotantoprosessien valvottavien suureiden kohdalla todettiin se, että jos ulkopuoliset häiriötekijät eivät pääse vaikuttamaan tuotantoprosessiin, mittaustulokset muodostavat normaalijakauman, ks. kohta 9.1.2. Servoventtiilin toimiessa normaalisti profiloinnissa, mittaussignaali sisältää sen luonnollisen hajonnan, eli normaalista venttiilin toiminnasta aiheutuneet vaihtelut. Venttiilin paine- ja asemasignaalin vaihtelut eivät kaikilta osin ole satunnaisvaihtelua, mutta siitä huolimatta vaihtelut noudattavat likipitään normaalijakaumaa, ks. kuvat 20 ja 21. Tämän olettamus todennettiin tutkimalla servoventtiilin painelähttimeltä ja asema-anturilta kerättyä mittaustiedettä. Informaatio oli kerätty sekunnin välein vuorokauden ajalta.



*Kuva 20. Painelähtetimen mittaussignaalin histogrammi sekä tilastolliset arvot. Kuvassa mukana ovat myös mahdolliset nippi auki-kiinni-tilanteet, jotka todennäköisesti hieman vääristävät jakaumaa. Histogrammi muodostettiin Excel- taulukkolaskentaohjelman datan analysointityökaluihin kuuluvan histogrammi- työkalun avulla. Tilastollisten arvojen laskentaan käytettiin tilastollista työkalua, Descriptive Statistics.*



*Kuva 21. Karan asema-anturin mittaussignaalin histogrammi sekä tilastolliset arvot.*

Servoventtiilin kunnan ja toiminnan kannalta tärkeimmät asiat ovat paineen- ja karan aseman mittaus, säätöpiirin toiminta, syöttöjännitteet sekä lämpötila. Paine- ja asemasignaalin, syöttöjännitteen sekä lämpötilan keskiarvolle ja vaihteluvälille voidaan laskemalla määrittää valvontarajat kaavojen 1 – 8 avulla. Valvontarajat asettuvat kolmen standardipoikkeaman  $3\sigma$  etäisyydelle keskiarvosta, ks. kuva 18.

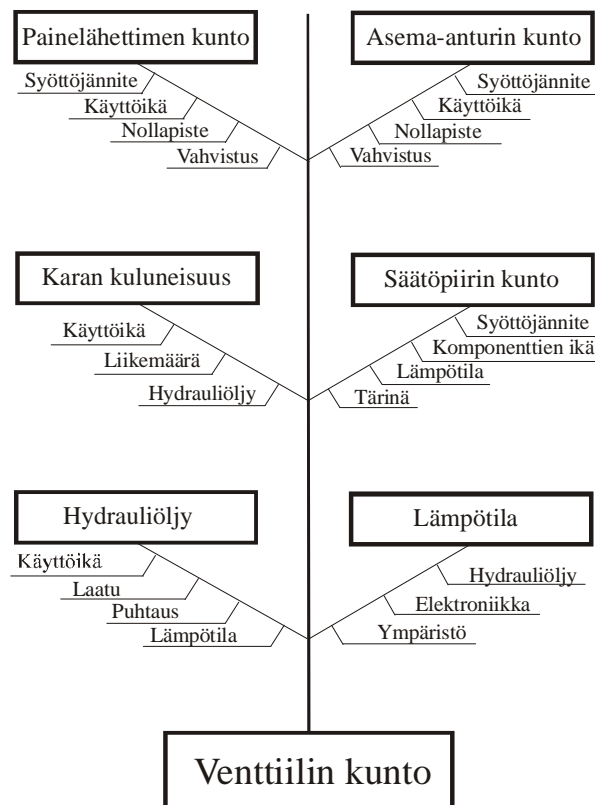
Keskiarvon  $\bar{x}$  valvonnalla päästään kiinni paine- ja asema-anturin nollapisteen ryömintään, lämpötilan muutokseen sekä syöttöjännitteen tason muutokseen.

Vaihteluvälin  $\bar{R}$  valvonta ilmaisee paine- ja asema-anturin vahvistuksen muutoksen. Syöttöjännitteiden suhteen vaihteluväli ilmaisee stabiilisuuden ja lämpötilan suhteen vaihtelurajat. Vikaantumista oirehtivat muutokset valvottavissa parametreissa aiheuttavat suureen keskiarvon ja vaihteluvälin muutoksia ja pahimmassa tapauksessa valvontarajojen ylityksen. Valvontakortin trendejä seuraamalla voidaan ennakoida tulevat ylitykset ja sitä kautta mahdollinen vikaantumisen ajankohta. Tämä kuitenkin edellyttää vertailua vastaavien tapausten historiatietojen kanssa.

Valvottavia suureita varten Metso DNA -ohjausjärjestelmään on mahdollista rakentaa erilliset laskentapiirit, jotka laskevat jatkuvasti seurattavan suureen keskiarvoa  $\bar{x}$  ja vaihteluvälin keskiarvoa  $\bar{R}$ . Laskenta tulee tehdä ainoastaan normaalin ajotilanteen aikana, jolloin profilointi on toiminnassa. Näin vältetään päälle-pois-ohjausten häiritsevä vaikutus laskentatuloksiin ja mittaustulosten jakaumaan. Laskentatulokset päivitetään erilliseen kuvaan, johon on piirretty myös valvontarajat. Erilliskuvat otetaan normaalin etäkunnonvalvonnan seurannan piiriin. Valvontarajojen ylityksiä varten voidaan rakentaa hälytyspiirit, jotka otetaan myös valvonnan piiriin.

### 9.1.6 Syy-seurausdiagrammi

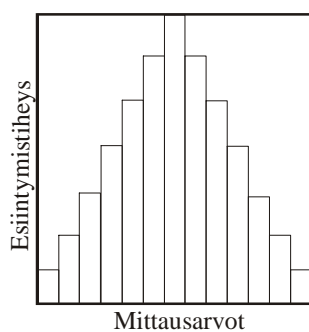
Prosessia tutkimalla voidaan selvittää kuinka prosessin eri tulosuureet vaikuttavat lähtösuureisiin tai lopputuotteen laatuun. Syy-seurausdiagrammi on visuaalinen apuväline prosessin kehittämisessä, mutta sitä voidaan soveltaa muuhunkin. Kuvassa 22 syy-seurausdiagrammia on sovellettu servoventtiilin kunnonvalvontaan. Kuva havainnollistaa selkeästi ne asiat, joilla on vaikutusta venttiilin kuntoon. Kuntoon vaikuttavat tekijät on ensin määritelty karkealla tasolla, josta edetään alatekijöihin jne.



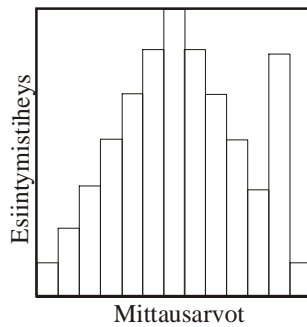
Kuva 22. Esimerkki syy-seurausdiagrammista sovellettuina servoventtiilin kunnonvalvontaan.

### 9.1.7 Histogrammi

Histogrammi on yleinen työkalu suurten näytemäärien tiedon esittämisessä, ja sitä käsiteltiin jo osittain kohdassa 9.1.5.6. Vaaka-akseli on jaettu luokkaväleihin (Bin), joihin kutakin luokkaväliä vastaavat mittausarvot sijoittuvat. Kunkin mittausarvon esiintymistiheys on pystyakselilla, ks. kuvat 23 ja 24.



Kuva 23. Histogrammin normaalimuoto. Keskiarvo on alueen (vaihteluvälin) keskellä. Suurin esiintymistiheys on alueen keskellä ja pienenee asteittain reunoja kohti.



*Kuva 24. Histogrammi tilanteesta, jossa normaalimuodon lisäksi näkyy erillishuippu. Erillishuippu kuvaa mittaussuureen poikkeavaa muutosta.*

Histogrammin muodosta pystytään arvioimaan prosessin mittaussuureiden tilaa. Ollessaan normaali mittaussuure antaa tietyn muotoisen histogrammin. Tavallisuudesta poikkeavat muutokset mittaussuureessa aiheuttavat histogrammin muodon muuttumisen, ks. kuva 24. Histogrammia voidaan käyttää myös servoventtiilin eri parametrien seurantaan. Esimerkiksi kuvan 24 mukaisen erillishuipun kasvu kuvaa sitä, että kyseisessä mittaussuureessa on enenevässä määrin tapahtumassa vikaantumista kuvaavaa poikkeamaa. Menetelmällä voidaan todennäköisesti seurata servoventtiilin karan takertelua, joka näkyy asema-anturin antamassa mittaussignaalisissa. Painelähtetimen tai asema-anturin nollapisteen muutos voidaan nähdä histogrammin toispuoleisuutena, eli keskiarvo on siirtynyt pois histogrammin keskeltä. Suureen normaalitilaa luotettavasti kuvaavaa histogrammia varten tulee mittaustietoa kerätä riittävän pitkältä aikaväliltä.

Histogrammin muodon antaman informaation lisäksi, siitä nähdään

- tarkasteltavan suureen suurin ja pienin arvo
- vaihteluväli
- keskittyminen ja keskiarvo
- suureen arvojen pysyminen spesifikaatioissaan.

### **9.1.8 Hajontadiagrammi**

Hajontadiagrammia käytetään tutkittaessa kahden muuttujan välistä korrelaatiota.

Muuttujat voivat olla

- laatuominaisuus ja siihen vaikuttava tekijä

- kaksi toisiinsa sidoksissa olevaa laatuominaisuutta
- kaksi tekijää suhteessa yksittäiseen laatuominaisuuteen. [24]

Hajontadiagrammin käyttö seuraa usein syy-seuraus-analyysiä, ks. kuva 22.

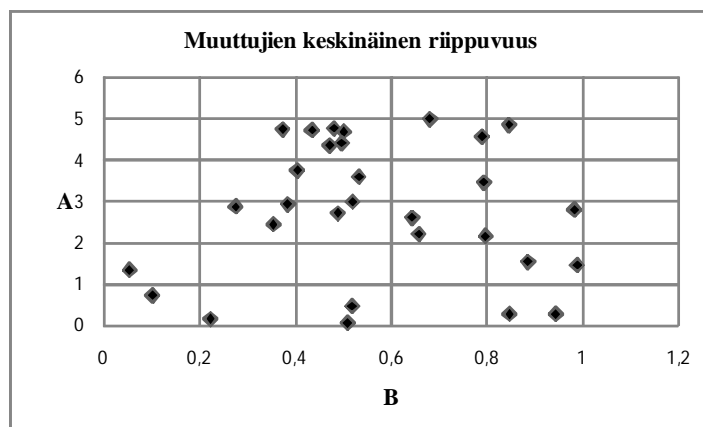
Servoventtiilin kunnonvalvonnan kannalta menetelmä on aputyökalu etsittäessä sopivia selitettäviä ja selittäviä muuttujakombinaatioita kunnonvalvonnan jatkokehitykseen.

Menetelmällä voidaan myös pois sulkea ne muuttujat, joilla ei ole toisiinsa vaikutusta.

Muuttujien keskinäisen suhteen voimakkuuden selville saamiseksi on hyödyllistä laskea korrelaatiokerroin, ks. taulukko 2.

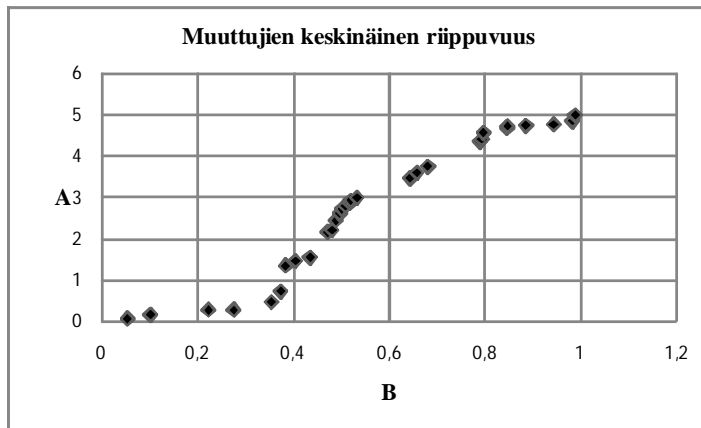
*Taulukko 2. Servoventtiilin parametrien väliset korrelaatiokertoimet. Taulukosta nähdään, että parametrit riippuvat lähes täysin toisistaan, koska korrelaatiokertoimet ovat lähes 1. Kertoimet on laskettu Excel-tilukkolaskentaohjelman Correlation-työkalun avulla. Laskennan mittausarvot oli kerätty sekunnin välein, vuorokauden ajalta.*

	<b>Paineen ohjearvo</b>	<b>Paineen oloarvo</b>	<b>Karan asema-arvo</b>
<b>Paineen ohjearvo</b>	1		
<b>Paineen oloarvo</b>	0,999977578	1	
<b>Karan asema-arvo</b>	0,989695741	0,989700806	1

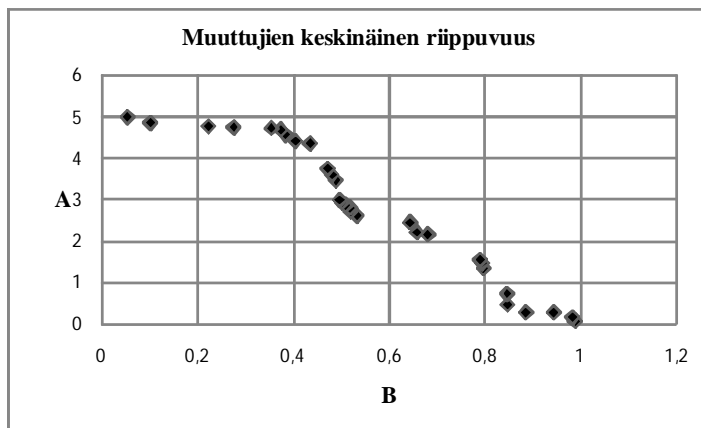


*Kuva 25. Esimerkki hajontadiagrammista (Scatter Chart), jossa muuttujilla A ja B ei ole keskinäistä korrelaatiota. Kuva on piirretty Excel-tilukkolaskentaohjelman Scatter Chart -toiminnolla.*





Kuva 26. Esimerkki hajontadiagrammista (Scatter Chart), jossa muuttujien A ja B välillä on jonkin asteinen korrelaatio. Muuttujan A arvon kasvaessa myös muuttujan B arvo kasvaa.



Kuva 27. Esimerkki hajontadiagrammista (Scatter Chart), jossa muuttujien A ja B välillä on jonkin asteinen korrelaatio. Muuttujan A arvon pienentyessä vastaavasti muuttujan B arvo kasvaa.

## 9.2 Muita tilastollisia menetelmiä

### 9.2.1 Regressioanalyysi

Regressioanalyysin avulla tutkitaan yhden tai useamman kvantitatiivisen selittävän muuttujan ja selitettävän muuttujan välisiä funktionaalisia riippuvuuksia. Oleellista analyysissä on tietää mallin funktionaalinen muoto sekä se, mikä on selitettävä muuttuja ja mitkä ovat selittäviä muuttujia. Selitettävän muuttujan tulee olla vähintään intervalliasteikon muuttuja. Selittävät muuttujat ovat yleensä myös vähintään intervalliasteikon muuttujia. Regressioanalyysin tulokset kertovat, mikä on yksittäisen

selittävän muuttujan osuus silloin, kun muiden vaikuttavien tekijöiden vaikutus selitettävään muuttujaan on otettu huomioon.

Servoventtiilin kunnonvalvontaa ajatellen regressioanalyysiä voidaan käyttää apuvälineenä tutkittaessa sopivia selittäviä muuttujia kunnonvalvonnan jatkokehitykseen. Analyysiä varten tulee ensin selvittää onko muuttujien välinen riippuvuus lineaarinen vai epälineaarinen. Excel-taulukkolaskentaohjelmasta analyysiä varten löytyy regressio-työkalu.

### 9.2.2 Excel-taulukkolaskentaohjelma

Taulukkolaskentaohjelman tiedon analysointi *Data analysis* -valikon alaisuudesta on työkalu *Descriptive Statistics*, jolla tutkittavasta taulukoidusta mittaustiedosta voi ajaa yleisimmät tilastolliset arvot, ks. kuvat 20 ja 21.

### 9.3 Tilastollisten menetelmien yhteenveto

Tilastollisista menetelmistä löytyi työkaluja, joita voidaan käyttää myös servoventtiilin ennakoivan kunnonvalvonnan yhteydessä. SPC-menetelmistä soveltuvimmat olivat x-R-valvontakortit, syy-seurausdiagrammi, histogrammi, hajontadiagrammi. Muista tilastollisista menetelmistä regressioanalyysi ja Excel-taulukkolaskentaohjelma olivat tärkeimmät.

x-R-valvontakortti:

Kortti on tarkoitettu pääasiassa prosessin valvontaan, mutta tietyiltä osin sitä voidaan soveltaa servoventtiilin kunnonvalvontaan. Servoventtiili voidaan rinnastaa prosessin lopputuotteeseen, jonka laatuun eri prosessiparametrit vaikuttavat. Servoventtiilin tapauksessa lopputuotteen laatua vastaa venttiilin kunto. Valvontakäyristä voidaan saada ennakoivaa tietoa tulevasta raja-arvojen ylittymisestä tarkkailemalla mittausarvojen trendiä.

Servoventtiilin kunnon ja toiminnan kannalta tärkeimmät asiat ovat paineen- ja karan aseman mittaus, säätöpiirin toiminta, syöttöjännitteet sekä lämpötila. Paine- ja asemasignaalin, syöttöjännitteen sekä lämpötilan keskiarvolle ja vaihteluvälille voidaan laskemalla määrittää valvontarajat. Keskiarvon  $\bar{x}$  valvonnalla päästään kiinni paine- ja

asema-anturin nollapisteen ryömintään, lämpötilan muutokseen sekä syöttöjännitteen tason muutokseen. Vaihteluvälin  $\bar{R}$  valvonta ilmaisee paine- ja asema-anturin vahvistuksen muutoksen. Syöttöjännitteiden suhteen vaihteluväli ilmaisee stabiilisuuden ja lämpötilan suhteen vaihtelurajat. Vikaantumista oirehtivat muutokset valvottavissa parametreissa aiheuttavat suureen keskiarvon ja vaihteluvälin muutoksia ja pahimmassa tapauksessa valvontarajojen ylityksen. Valvontakortin trendejä seuraamalla voidaan ennakoida tulevat ylitykset ja sitä kautta mahdollinen vikaantumisen ajankohta. Tämä kuitenkin edellyttää vertailua vastaavien tapausten historiatietojen kanssa.

Valvottavia suureita varten Metso DNA -ohjausjärjestelmään on mahdollista rakentaa erilliset laskentapiirit, jotka laskevat jatkuvasti seurattavan suureen keskiarvoa  $\bar{x}$  ja vaihteluvälin keskiarvoa  $\bar{R}$ . Laskentatulokset päivitetään erilliseen kuvaan, johon on piirretty myös valvontarajat. Erilliskuvat otetaan normaalin etäkunnonvalvonnan seurannan piiriin. Valvontarajojen ylityksiä varten voidaan rakentaa hälytyspiirit, jotka otetaan myös valvonnan piiriin.

Syy-seurausdiagrammi:

Tämä visuaalinen apuväline havainnollistaa selkeästi ne asiat, joilla on vaikutusta venttiilin kuntoon. Kuntoon vaikuttavat tekijät on ensin määritelty karkealla tasolla, josta edetään alatekijöihin jne., ks. kuva 22. Tätä menetelmää voidaan käyttää aputyökaluna muuttujien valinnassa kunnonvalvonnan jatkokehityksen yhteydessä.

Histogrammi:

Histogrammin muodosta pystytään arvioimaan venttiilisuureen hyvyttä. Seurattavan suureen ollessa normaali saadaan tietyn muotoinen histogrammi. Tavallisuudesta poikkeavat muutokset mittaussuureessa aiheuttavat histogrammin muodon muuttumisen, ks. kuva 24. Menetelmällä voidaan todennäköisesti seurata servoventtiilin karan takertelua, joka näkyy asema-anturin antamassa mittaussignaalisissa.

Painelähtetimen tai asema-anturin nollapisteen muutos voidaan nähdä histogrammin toispuoleisuutena, eli keskiarvo on siirtynyt pois histogrammin keskeltä. Suureen normaalitilaa luotettavasti kuvaavaa histogrammia varten tulee mittaustietoa kerätä riittävän pitkältä aikaväliltä.

Hajontadiagrammi:

Servoventtiilin kunnonvalvonnan kannalta menetelmä on aputyökalu etsittäessä sopivia selitettäviä ja selittäviä muuttujakombinaatioita kunnonvalvonnan jatkokehitykseen. Menetelmällä voidaan myös pois sulkea ne muuttujat, joilla ei ole toisiinsa vaikutusta.

Regressioanalyysi:

Regressioanalyysiä voidaan käyttää apuvälineenä tutkittaessa sopivia selittäviä muuttujia kunnonvalvonnan jatkokehityksessä. Analyysiä varten tulee ensin selvittää onko muuttujien välinen riippuvuus lineaarinen vai epälineaarinen.

Excel-tilukkolaskentaohjelma:

Ohjelma on monipuolinen ja erittäin käyttökelpoinen mm. tilastollisten tunnuslukujen laskentaan, histogrammien, sirontakuvien ja regressioanalyysin tekoon. Servoventtiilin karan takertelu on hyvin nopea ilmiö. Näiden ilmiöiden tutkimiseen löytyy FFT-työkalu (Fast Fourier Transform), jossa taajuusanalyysin keinoin on mahdollista päästä kiinni takertelun aiheuttamiin eri parametrien taajuuksiin ja amplitudeihin. Todennäköisesti karan takertelu edustaa tiettyä taajuusaluetta taajuusspektrissä. Kyseisen taajuusalueen spektriviivojen amplitudi kuvaa vikaantumisastetta, joka on sitä korkeampia, mitä pahempi takertelu on. Vikaantumistilanteessa venttiilin säätöpiiri yrittää korjata tilanteen normaaliksi. Korjausohjearvo on sitä suurempi, mitä pahempi takertelu on. FFT-työkalun käyttö edellyttää nykyiseen verrattuna, nopeampaa venttiilitiedon keruuta.

## 10 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää mahdolliset kunnonvalvontamenetelmät OptiLoad-kalanterin vyöhykesäädetyissä teloissa käytettäville servoventtiileille. Työn sisällön tuli myös tukea Metso-konsernin sisäistä venttiilikunnonvalvonnan tuotekehitysprojektia.

Tähän opinnäytetyöhön liittyneen tutkimisen ja kirjoittamisen myötä kertyi runsaasti tietoa OptiLoad-kalanterin ja sen vyöhykesäädetyin telan rakenteesta. Kirjoittamisen edetessä aiheeseen paneuduttiin yhä yksityiskohtaisemmin. Servoventtiilien rakenteesta,

toiminnasta, ominaisuuksista ja vikaantumistavoista saatiin kattavaa tietoa. Nämä tiedot ovat hyödyllisiä asiaan mahdollisesti liittyvien jatkotutkimusten kannalta.

Tähän työhön soveltuvista kunnonvalvontaratkaisuksista tehtiin kartoitus Metso-konsernin sisällä. Kartoituksen tuloksena selvisi se, että asiaa ei konsernissamme ole juuri tutkittu. Tämä opinnäytetyö on tässä mielessä uraa uurtavassa asemassa. Lähinnä tarkoitukseen soveltuva menetelmä on Metso Automaatio -liiketoimintalinjan kehittämä *Neles FieldCare -FDT/DTM*-teknologiaan pohjautuva ratkaisu. Tämä ratkaisu ei ole suoraan tarkoitukseemme soveltuva ilman jatkokehitystyötä, sillä servoventtiilin tarvitsema DTM-käyttöliittymä puuttuu.

Suorittujen tutkimusten osiossa käytiin lävitse Tekes-rahoitteiseen koneenrakennuksen teknologiaohjelmaan liittynyt osaprojekti TAKU (tarvelähtöinen hydrauliiikan kunnonvalvonta). Tutkimuksen tuloksena saatiin paljon lisätietoa eri komponenttien toiminnasta, kulumisesta sekä vikaantumismekanismeista. Lopuksi tutkimuksessa todettiin se, että uusia kunnonvalvonnan pohjaksi soveltuvia suureita sekä aiemmin tuntemattomia kunnonvalvontamenetelmiä ei noussut esille. Sen sijaan saatiin tietoa mm. siitä, että askelvastemittaukset sopivat venttiilin kunnon määrittämiseen.

Painelähtöimen kunnon tarkastukseen voidaan käyttää vertailupainelähetintä. Venttiilin karan kuluneisuuteen voidaan päästä käsiksi vuodon ja/tai paineen mittauksen avulla tai valvomalla karan aseman ja/tai paineen ääriarvoja. Venttiilielektroniikan ja säätöpiirin tarkkailuun voidaan käyttää elektroniikan lämpötilamittausta ja karan aseman ja/tai paineen ääriarvojen valvontaa.

Opinnäytetyössä tarkasteltiin SPC-työkalujen ja muiden tilastollisten menetelmien mahdollisuuksia servoventtiilin kunnonvalvontaan. Tarkastelun tuloksena soveltuvimmat SPC-menetelmät olivat x-R-valvontakortit, syy-seurausdiagrammi, histogrammi, hajontadiagrammi. Muista tilastollisista menetelmistä regressioanalyysi ja Excel-taulukkolaskentaohjelma olivat tärkeimmät. Nämä kuitenkin ovat lähinnä aputyökaluja, eivät valmiita tarkoitukseemme soveltuvia kunnonvalvontamenetelmiä.

Metson sisäisen venttiilikunnonvalvonnan jatkokehityksen kannalta tämä opinnäytetyö antoi runsaasti hyödyllistä tukimateriaalia. Uutta tarkoitukseemme soveltuvaa kunnonvalvontamenetelmää ei noussut esille.

## Lähteet

1. Metso-konserni (Metso-konsernin intranet): <<http://intra.metso.com/fi>>. Luettu 17.3.2008.
2. Olli, Jari: Tj Group Intelligentia Oy: Kunnonvalvonta, kunnossapito ja BI. Luentomateriaali pdf- muodossa. (WWW-dokumentti.) <<http://www.automationit.hut.fi/file.php?id=711>>. Luettu 28.10.2008.
3. Metso Paper -liiketoimintalinja: OptiLoad-kalenterin etäkunnonvalvonta. (Asiakasesite.)
4. Metso Paper- liiketoimintalinja: Etäkunnonvalvonta-case: OptiLoad, 2006. (Sisäinen esitysaineisto.)
5. Metso Paper -liiketoimintalinja: CCR tuotteiden esittely: Soft- ja konekalanterit, 29.5. 2008. (Sisäinen koulutusaineisto.)
6. Metso Paper -liiketoimintalinja: Calender Basics, 2002. (Sisäinen koulutusaineisto.)
7. Metso Paper -liiketoimintalinja: OptiLoad off-line multinip calender, 28.9.2005 (Sisäinen koulutusaineisto.)
8. Metso Paper knows calenders: Metso Paper Customer Magazine: Fiber&Paper. Volume 8, Issue 3, 2006
9. Metso Paper -liiketoimintalinja: CCR tuotteiden esittely: Monitelakalanterit, 29.5. 2008. (Sisäinen koulutusaineisto.)
10. Metso Paper -liiketoimintalinja: Taipumakompensoidut telat, 2004. (Sisäinen esitysmateriaali.)

11. Metso Paper -liiketoimintalinja: Metso DIV -koulutus, 23.-24.1.2003. (Sisäinen koulutusaineisto.)

12. Polarteknik: Moog D638: Käyttöohjeet pdf- muodossa. (WWW-dokumentit.)  
<[http://www.polarteknik.fi/polarteknik/products/hydraulics/components/industrial\\_valves/moog/index.php?lang=fi](http://www.polarteknik.fi/polarteknik/products/hydraulics/components/industrial_valves/moog/index.php?lang=fi)>. Luettu 25.8.2008.

13. Fluid Finland: Asiakaslehti pdf-muodossa. (WWW-dokumentti.)  
< [http://www.fluidfinland.net/Lehdet/FLUID\\_2\\_2007.pdf](http://www.fluidfinland.net/Lehdet/FLUID_2_2007.pdf)>. Luettu 10.9.2008.

14. Metso Paper -liiketoimintalinja: Multizone symCD(S) Rolls, 2003. (Sisäinen koulutusaineisto.)

15. Laitinen, Lauri: Teollisuusventtiilien Bosch ja Moog kunnonvalvontakeinot. PPT-esitys: HUT, 2005.

16. MOOG: Teollisuushydrauliikan vianetsintä: Proportionaali- ja servoventtiilien vikaantumismekanismit, Tampere 6-7.4.2005. (Pdf-dokumentti.)

17. Bosh Rexroth AG: Profibus protocol for IFB-P- and IAC-P-valves. (WWW-dokumentti RE 29015-02-Z/09.06.)  
< <http://www.boschrexroth.com/Rexroth-IHD/Home.cfm?Page=RDSearch&Filter=re29015-02-z> >. Luettu 1.10.2008.

18. Metso Corporation: (WWW-dokumentti.)  
<[http://www.metsoendress.com/metsoendress/index.nsf/FR?ReadForm&ATL=/MetsoEndress/valve\\_prd.nsf/WebWID/WTB-041109-2256F-AB83B](http://www.metsoendress.com/metsoendress/index.nsf/FR?ReadForm&ATL=/MetsoEndress/valve_prd.nsf/WebWID/WTB-041109-2256F-AB83B)>. Luettu 7.10.2008.

19. Tekes: MASINA – Koneenrakennuksen teknologiaohjelma 2002 – 2007. (WWW-pdf-dokumentti.) < [http://www.tekes.fi/julkaisut/Masina\\_loppuraportti.pdf](http://www.tekes.fi/julkaisut/Masina_loppuraportti.pdf)>. Luettu 6.11.2008.



20. Hänninen, Henri: Venttiilitutkimus. Power Point -esitys TAKU-projektin loppuseminaarissa Tampereella 10.1.2006. Teknillinen korkeakoulu.
21. Laitinen, Lauri: Teollisuusventtiilien - Bosch ja Moog - kunnonvalvontakeinot. Power Point -esitys, 11.5.2005. Teknillinen korkeakoulu.
22. Lahtinen, Juha: TAKU-hankkeen yhteenveto. Power Point -esitys TAKU-projektin loppuseminaarissa Tampereella 10.1.2006. Metso Oyj.
23. Pietola, Matti: TAKU-projektin kolme vuotta – mikä meni alkuperäisen tutkimussuunnitelman mukaan. Esitys TAKU-projektin loppuseminaarissa Tampereella 10.1.2006. Teknillinen korkeakoulu. (Word-dokumentti.)
24. Oulun yliopisto: Tilastollinen prosessinohjaus: perusteet ja menetelmät. (WWW-pdf-dokumentti.) <<http://herkules.oulu.fi/isbn9514275209/isbn9514275209.pdf>>. Luettu 19.11.2008.
25. SFS 4360: Laatutekniikka. X-R-valvontakortti. (WWW-dokumentti.) <<http://www.sfs.fi/luettelo/sfs.php?standard=SFS%204360>>. Luettu 20.11.2008.

## Liite 1: Etäkunnonvalvontaesite

# OptiLoad-kalanterin etäkunnonvalvonta

Etäkunnonvalvonnan tavoitteena on lisätä kalanterin käyttövarmuutta sekä tukea asiakastehtaan ennakoivaa kunnossapitoa. Etäkunnonvalvonnassa hyödynnetään mittaustietoa ja Metson asiantuntijoiden laajaa kokemusta. Kalanterin toimintaa seurataan keräämällä jatkuvasti mittaustietoja, analysoimalla ja tekemällä kerätystä tiedosta sovituin väliajoin huoltotarveraportti. Kalanterin ajettavuuteen vaikuttavien tekijöiden tilanne on näin jatkuvasti tehtaan kunnossapidon tiedossa.



Metso Paper

### Etäkunnonvalvonnan edut

- Alkavien häiriöiden paikantaminen ja ennakoiva korjaaminen suunnitellun huolto-ohjelman puitteissa
- Vähemmän häiriöitä, parantunut tuotantotehokkuus
- Kunnonseurannan ja suunnitelmallisen ennakkohuollon kehittyminen
- Huollon ja optimoinnin tärkeä tukitoiminto
- Systemaattinen tiedon kertyminen kalanterin toiminnasta ja käyttövarmuuden kehityksestä



### Miksi säännöllistä valvontaa

Etäkunnonvalvonta perustuu siihen, että alkava vikaantumisen näkyy muutoksina koneen toiminnassa. Toimintoja aktiivisesti seuraamalla pystytään vertaamaan normaalia ja vikatilannetta ja paikantamaan alkava vikaantumisen ennen kuin se kehittyy tuotantohäiriöksi.

Toimintojen vikaantumista ehkäistään keräämällä koneenohjauksista jatkuvaa tietoa ja hyödyntämällä sen analysoinnissa tilastotieteellisiä ja matemaattisia malleja. Näin paikannettu häiriökohde voidaan tarkistaa ja korjata normaalin ennakoivan huollon puitteissa. Kunnossapitotyön suunnittelu helpottuu, koska huoltoa vaativat kohteet ovat selvillä jo ennen huoltoseisokkia. Samalla saadaan kalanterin toiminnasta ja käyttövarmuudesta hyödyllistä tietoa kehittämisen pohjaksi.

Metso Paperin asiantuntijoilla on kokemusta ja erityisosaamista kerätyn valvontatiedon tulkinassa.

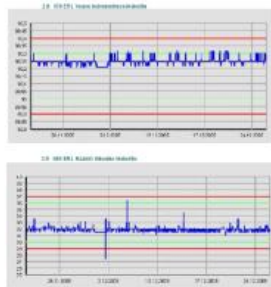
## Etäkunnonvalvonnan sisältö

OptiLoad-kalenterin mallista ja rakenteesta riippuen etäkunnonvalvonta kattaa seuraavat toimintaryhmät:

- Alasyliinterit
  - liikeaika, liikematka ja liike-ero
  - anturien toiminta
  - kuormitussäätöjen toimivuus
- Välitelasto
  - säätimien toiminta
  - anturien toiminta
- Sym-teleojen toiminta
- Termo-teleojen toiminta
- Hydrauliliikan ja koneikkojen toiminta

## Tehokkuusseuranta

Kalenterille tehdään etäkunnonvalvonnan tueksi tehokkuuslaskelmat, joiden avulla kalenterin kunnon kehittymistä seurataan tuotannollisin tehokkuusluvin. Tehokkuusluvut antavat tietoa siitä, mistä kullakin hetkellä löytyvät kalenterin keskeiset pullonkaulat. Tehokkuusseurannan avulla kalenterointiprosessia pystytään myös optimoimaan eri paperilajeille sopivaksi.



Mittausten seurantakäyrästä on aina päivän tasalla

## Tehokkuusseurannan tarkastelut

- Ratakatojen seuranta
- Pääviennin seuranta
- Avaussyiden seuranta

## Valvonnan raportointi

Valvontakohteista kertyvä tieto muokataan seuranta-käyriksi, jotka ovat asiakkaan käytettävissä tehtaan portaalisivuilla. Kullakin kohteella on valvontarajat, joiden ylityksistä ilmoitetaan.

Sovituin väliajoin valvonnasta laaditaan seurantaraportti huoltoseisokkia varten ja yksityiskohtainen analyysiraportti vuosihuollon suunnitteluun. Seurantaraportti sisältää yhteenvedon valvontakohteiden kunnosta sekä mahdolliset tarkistussuosituks. Analyysiraportti käsittelee valvontakohteiden analyysit, toimenpide-suositukset sekä ohjeita kohteen kunnon tarkistukseen ja mahdollisen huoltotyön suorittamiseen.

Raportointi arkistoidaan tehtaan portaalisivustolle myöhempää vertailua varten.

Seurantaraportti sisältää yhteenvedon koneen kunnosta

Analyysiraporttiin kuuluvat myös huolto-ohjeet

## Liite 2: Kunnonvalvontamenetelmien kirjallisuustutkimus



TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
IHA - Institute of Hydraulics and Automation

### KIRJALLISUUSTUTKIMUS SYYSKUUSSA 2005

**Jaakko Myllykylä**

8.11.2008

1

### KIRJALLISUUSTUTKIMUS

Haussa löytyi muutamia uusia julkaisuja.

Useimmat projektin kannalta vähämerkityksellisiä.

Kiinnostavin Christian Stammenin väitöskirja.

Condition Monitoring für intelligente hydraulische Linearantriebe

Väitös tehty Saksassa Aachenin teknillisessä korkeakoulussa 2005

Tekijä tehnyt ennen väitöstä lukuisia lehtiartikkeleita ja konferenssijulkaisuja samasta aiheesta.

Osa julkaisuista saatu netistä sähköisessä muodossa.

Väitöskirja saatiin marraskuun lopulla.

8.11.2008

2

## Muita julkaisuja

Netistä löytyi myös muita julkaisuja. Osa käsitteli erilaisia matemaattisia menetelmiä.

Eräs mielenkiintoinen oli prof. Sulo Lahdelman esittämä mittaussignaalin korkeampiasteinen derivointi.

Tämän avulla pystytään signaalista erottamaan pienempitaajuisia värähtelyjä. Lahdelma on käyttänyt menetelmää hitaasti pyörivien (2 Hz) laakerien kunnonvalvontaan.

Ajovoimansiirrossa normaali sykintä noin 300 Hz. Jos yksi mäntä viallinen, aiheutuu siitä noin 35 Hz värähtely. Tämä saadaan helpommin selville derivoitua signaalista kuin derivoimattomasta painesignaalista.

8.11.2008

## Muita matemaattisia menetelmiä

### Cluster Analysis

Monta eri signaalia.

Ryhmitellään eri ryhmiin, ehjä laite, laitteessa viallinen kohta.

Johdettava matemaattinen malli, milloin signaali on niin lähellä jotain ryhmää, että se voidaan sisällyttää ko. ryhmään.

Kun signaali ryhmitellään johonkin ryhmistä "laitteessa viallinen kohta", osoittaa se, että vikaantumista on tapahtumassa ja pystytään paikallistamaan viallinen kohta.

8.11.2008

## Muita matemaattisia menetelmiä

### Dempster-Shafer

Tapauksen esiintymiselle annetaan tietty todennäköisyys.

Koko aja kerätään uutta tietoa. Kun etsitty tapaus esiintyy uudestaan, päivitetään todennäköisyyttä uusien havaintojen pohjalta. Päivittämiseen käytetään Dempster-Shafer algoritmia. Tutkittavia ilmiöitä voi olla useita. Kun ilmiön tai useamman ilmiön todennäköisyys on riittävän suuri, voidaan päätellä, että laite on vikaantumassa tietyllä todennäköisyydellä.

## Liite 3: Kunnonvalvonpatentit



### Kunnonvalvontapatentit / TKK

- Tavoitteet:
  - Kunnonvalvonnan state-of-the-art katsausten täydentäminen
  - Löytää hyödyllisiä ideoita hydraulijärjestelmien kunnonvalvontaan
  - Patenttien hankinnan tueksi: lyhyiden selostusten tekeminen kiinnostavimmista patenteista
- Hakujen suoritus:
  - Tampereen Patenttitoimisto Oy / Erkki Rahkonen
  - Ajanjakso: vuodesta 2004 aina vuoteen 1975
  - Hakusanat 1: breakdown, equipment, failure, fault, forecast, machine, maintenance, malfunction, predict, prediction, predictive, prognosticat, vehicle => tulos 77 tiivistelmän (abstraktin) listaus
  - Hakusanat 2: komatsu, caterpillar; diagno?, monitor?, detect?, fault?, failure? => tulos 222 tiivistelmän listaus

HUT / Machine Design / Fluid Power



### Kunnonvalvontapatentit / TKK

- Tulosaineiston käsittely:
  - Molempien tuloslistausten kaikki patenttitiivistelmät on käyty läpi ja jokaista on lyhyesti selostettu ja kommentoitu
  - Kiinnostavimmista patenteista on laadittu erilliset referaatit
  - Lisäksi patenteja tilastoitiin mm. aihealueittain ja maantieteellisesti
  - Tulokset koottiin kahteen raporttiin

HUT / Machine Design / Fluid Power



## KV-patentit / Johtopäätökset

- Useissa patenteissa toistuva peruskuvio:
  - Diagnostisten tunnuslukujen määrittäminen: yksinkertaisimmillaan suoraan jonkin mitatun suureen (paine, lämpötila) arvo tai sen muutosnopeus. Tunnusluku voi myös olla suoritusarvo kuten teho.
  - Virhemarginaalin tai sallitun poikkeaman määrittäminen: sovelluskohtaisesti, kokemuksesta; virhepäätelmien välttämiseksi voidaan virhemarginaalia määritettäessä huomioida järjestelmän tilaan liittyviä suureita, kuten nesteen lämpötila. Sallittujen arvojen määrittäminen mallipohjaisesti oli suhteellisen harvinaista, mikä viittaa luotettavien laskentamallien kehittämisen vaikeuteen.
  - Kuntotilan määrittäminen: verrataan saatua diagnostista tunnuslukua johonkin standardiarvoon, joka on uudelle tai kunnossa olevaksi tiedetylle komponentille määritetty vastaava tunnusluku. Jos poikkeama on suurempi kuin virhemarginaali annetaan ilmoitus huoltotarpeesta.
- Toinen peruskuvio: tuotetaan enemmän kunnonvalvontatietoa. Ongelmana anturointikustannukset ja anturitiedon luotettavuus
- Ennusteiden laadinta
  - Menetelmiä: yksinkertaisista trendianalyysistä monimutkaisempiin tilastollisiin, herkkyys-, todennäköisyys- tai hermoverkkoanalyysiin.
  - Menetelmien kuvaus on kuitenkin patenteissa hyvin vajaan.

HUT / Machine Design / Fluid Power



## KV-patentit Johtopäätökset

- Tiedon hallinta
  - Tietokannat: Talletetaan tietoa mitatuista suureista, vikamoodianalyysin tuloksista, virhelokeista, huolto- ja korjaustiedoista. Tietokantojen sisältämän historiatiedon ja järjestelmästä mitattavan tiedon perusteella päätellään järjestelmän kunto. Tietokantoja täydennetään jatkuvasti yhä tarkempien ennusteiden luomiseksi.
  - Väyläratkaisut: Ajan hengen mukaista on, että järjestelmän komponenttien diagnostiikkayksiköt ovat yhteydessä toisiinsa ja järjestelmää valvovaan tietokoneeseen tietoliikenneväylän kautta.
  - Matkapuhelinlinkit: Etäkunnonvalvonnan tarpeita ajatellen diagnostiikkayksiköt voivat lähettää tietojaan matkapuhelinverkon kautta.
- Patenttitiedon luotettavuus ja käytettävyys
  - Kaupallisten mahdollisuuksien turvaaminen (ehkä tärkeämpää kuin teknisen toimivuuden varmistaminen)
  - Ideat esitetään usein hyvin yleisellä tasolla ja niiden dokumentointi on epämääräistä.
  - Ei välttämättä testattua tietoa.
  - Sisällön taso vaihtelee merkittävästi eri patenteissa.

HUT / Machine Design / Fluid Power



## **Liite 4: TAKU-projektin aikaiset julkaisut TKK / KSU**

### **2003**

*Kauranne, H., Kajaste J., Ellman A., Pietola M.* Dependency of an Axial Piston Pump Characteristics on Variation of Operating Conditions. Tampere University of Technology. Proceedings of the The Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power, May 7-9, 2003, Tampere, Finland. Tampere, Finland, 2003. p. 191-205.

*Kauranne, H., Kajaste, J., Ellman, A., Pietola, M.* Applicability of pump models for varying operational conditions. Proceedings of IMECE'03 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress, Washington, D.C. November 15-21, 2003. CD-ROM. 10 p. ISBN 0-7918-4664-4

*Kauranne, H., Calonius, O., Laitinen, L., Pietola, M.,* Hydrauliiikan tarvelähtöinen kunnossapito. Kunnossapito 6/2003. Kunnossapitoyhdistys ry., KP-Media, 2003. s. 14-17.

*Laitinen L.,* Valve Studies in Industrial Hydraulics. Diagnostics Workshop, 22.-23.10.2003. 13 s.

*Calonius, O.,* Rotary lip seals and mechanical face seals - a literature review. Otamedia Oy, Espoo, 2003. 17 p. Helsinki University of Technology Publications in Machine Design 6/2003. ISBN 951-22-6590-7.

*Laitinen, L.,* Hydraulitekniiikan kunnonvalvonnan State of the Art. Otamedia Oy, Espoo, 2003. 42 p. Helsinki University of Technology Publications in Machine Design 7/2003. ISBN 951-22-6725-X.

### **2004**

*Laitinen, L., Kauranne, H., and Pietola, M.*

Aging-dependent characteristic changes of a pressure control valve for a model-based monitoring in fluid power. Bath Workshop on Power Transmission & Control, PTMC 2004, 1-3 September 2004. p. 285-295.

*Laitinen, L. and Pietola, M.*

Hydraulic proportional valves – evaluation of changes in performance characteristics for condition monitoring purposes. 3rd Fluid Power Net International PhD Symposium, Terrassa, Spain, 30<sup>th</sup> June to 2<sup>nd</sup> July 2004.

*Kauranne, H.,* Hydraulipumppujen kunnonvalvonta. Kirjallisuuskatsaus. Otamedia Oy, Espoo, 2004. 30 p. Helsinki University of Technology Publications in Machine Design 3/2004. ISBN 951-22-7252-0.

*Calonius, O.,* Explicit Finite Element Analysis of Stresses and Tracking Capability of Spring-Energized Rotary Face Seal. Lecture, Abaqus Users' Meeting, 22–23 September 2004, Skokloster, Sweden.

**2005**

*Calonius, O., Pietola, M.*

Explicit Finite Element Analysis of Spring-Energized Rotary Face Seal for Industrial Process Machinery. The 18th Worldwide Abaqus Users' Conference, 18-20 May 2005, Stockholm, Sweden.

*Calonius, O., Pietola, M.* Finite element analysis of large diameter face seals for process machinery. CSC Report on Scientific Computing 2004-2005, CSC-Scientific Computing Ltd., Finland, 2005. ISBN 952-5520-04-8.

*Calonius, O., Pietola, M.* Explicit Finite element Analysis of Tracking Capability of Rotary Face Seals for Industrial Fluid Power Applications. The Sixth JFPS International Symposium on Fluid Power, 7-10 November 2005, Tsukuba, Japan. CD-ROM. 6 p.

*Kauranne H., Kajaste, J., Pietola, M.*

Condition monitoring of fluid power pump. The Ninth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'05, June 1-3, 2005, Linköping, Sweden. CD-ROM. 15 p.

*Laitinen, L., Pietola, M.*

Effect of contamination on wear of proportional control valves. The Ninth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'05, June 1-3, 2005, Linköping, Sweden. Extended abstracts. June 2. CD-ROM. 10 p.

*Ellman, A., Kauranne H., Kajaste, J., Pietola, M.*

Effect of parameter uncertainty on reliability of hydraulic transmission system simulation. Proceedings of IMECE2005. 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. November 5-11, 2005, Orlando, Florida USA. CD-ROM. 7 p.

*Kauranne H., Laihanen L.*

Hydrauliikan tarvelähtöinen kunnonvalvonta. MASINA tulosseminaari 19.10.2005, Hämeenlinna. [www.tekes.fi](http://www.tekes.fi). 12 s.

**2006** Abstractit lähetetty seuraavista:

*Calonius, O., Pietola, M.*

Finite element analysis of revised face seal design for process machinery. 5<sup>th</sup> International Conference on Advanced Engineering Design (AED2006), 11–14 June 2006, Prague, Czech Republic.

**2007** Seuraavat suunnitteilla (työnimiä)

*Calonius, O., Pietola, M.*

Condition monitoring of large diameter seals. The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'07, May 23-25, 2007, Tampere, Finland.

*Hänninen H., Pietola, M.*

Condition monitoring of proportional control valves. The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'07, May 23-25, 2007, Tampere, Finland.

*Kauranne H., Pietola, M.*

Condition monitoring of fluid power pump. The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'07, May 23-25, 2007, Tampere, Finland.

## Liite 5: TAKU-projektin aikaiset julkaisut TTY / IHA

### TAKU-projektin aiheeseen liittyviä julkaisuja 2003-2005 (TTY/IHA)

#### 2003 (3 kpl)

- **Esqué, S., Raneda, A., Ellman, A., 2003. "Techniques for studying a mobile hydraulic crane in virtual reality". International Journal of Fluid Power, Vol 4 No 2. pp. 25-34**
- **Rusanen, H. 2003. Model Oriented Condition Monitoring of Hydrostatic Transmission in Forest Machines. MSc Thesis. March 2003. Tampere University of Technology. 79 p., 30 enclosure pages**
- **Rusanen, H., 2003. Simulation and Measurements in Hydrostatic Transmission. Condition Monitoring Workshop 22-23.10.2003. Tampere. 16 p.**

#### Värikoodien selitykset:

- **Punainen** tarkoittaa **kansainvälisiä konferenssijulkaisuja**
- **Violetti** tarkoittaa projektissa tehtyjä **diplomitöitä**
- **Sininen** **kotimaisia lehtiartikkeleita.**
- **Musta** tarkoittaa **kotimaisia seminaari- ja kurssijulkaisuja.**

10.1.2005

TAKU-loppuseminaari

Jari Rinkinen

1

### TAKU-projektin aiheeseen liittyviä julkaisuja 2003-2005 (TTY/IHA)

#### 2004 (4 kpl)

4. **Koivula, T., 2004. Kokemuksia hydraulijärjestelmän vikapuu-analyysistä. Hydrauliiikan kunnonvalvonta ja diagnostiikka 2 -seminaari, Saariselkä, 14.-16.4.2004. 15 p.**
5. **Rinkinen, J., 2004. Kunnossapidon, kunnonvalvonnan ja diagnostiikan määrittelyjä - mistä kannattaa maksaa. Hydrauliiikan kunnonvalvonta ja diagnostiikka 2 –seminaari, Saariselkä, 14.-16.4.2004. 28 p.**
6. **Rusanen, H., 2004. FMECA ja sen soveltaminen kunnonvalvonnan työkaluna, Hydrauliiikan kunnonvalvonta ja diagnostiikka 2 –seminaari, Saariselkä, 14.-16.4.2004. 25 p.**
7. **Rusanen, H., Rinkinen, J., 2004. Model Oriented Condition Monitoring of Hydrostatic Transmission. 3rd Fluid Power Net International PhD Symposium, Terrassa, Spain, 30th June - 2nd July 2004. 11 p.**

10.1.2005

TAKU-loppuseminaari

Jari Rinkinen

2

## TAKU-projektin aiheeseen liittyviä julkaisuja 2003-2005 (TTY/IHA)

### 2005 (10 kpl)

8. Koivula T., Elo L., Rinkinen J., 2005. Liikkuvan kaluston hydrauliiikan kunnonvalvonta. Liikkuvan kaluston hydrauliiikkaa –seminaari. Helsinki 24.-25.1.2005. Autoalan koulutuskeskus Oy, SATL1/2005. 19 s.
9. Rinkinen J., Rusanen H., Koivula T., 2005. Hydraulijärjestelmien vikaantumisen päätekiöitä. Teollisuushydrauliikan vianetsintä -kurssi. Tampere 6.-7.4.2005. Kunnossapitoyhdistys ry. 7 s.
10. Koivula T., Rusanen H., Rinkinen J., 2005. Vikapuuanalyysillä vian alkulähteille. Teollisuushydrauliikan vianetsintä -kurssi. Tampere 6.-7.4.2005. Kunnossapitoyhdistys ry. 13 s.
11. Rusanen H., Koivula T., Rinkinen J., 2005. Vika-, vaikutus- ja kriittisyysanalyysin laatiminen sekä sen hyödyntäminen. Teollisuushydrauliikan vianetsintä -kurssi. Tampere 6.-7.4.2005. Kunnossapitoyhdistys ry. 8 s.

10.1.2005

TAKU-loppuseminaari

Jari Rinkinen

3

## TAKU-projektin aiheeseen liittyviä julkaisuja 2003-2005 (TTY/IHA)

12. Rinkinen J., Rusanen H., Koivula T., 2005. Hydraulijärjestelmien vikaantumisen päätekiöitä. Kunnossapito. Vol. 19, no 4. s. 28-32.
13. Rusanen, H., Koivula, T., Rinkinen, J., 2005. Experiences on Combining Failure Tree Analysis and Failure Mode, Effects and Criticality Analysis for Fault Diagnosis of Hydrostatic Transmission. Bath Workshop on Power Transmission & Motion Control. 7.-9.9.2005. Bath, United Kingdom, 13 p.
14. Rinkinen, J., Koivula, T., 2005. Experiences and Proposals for Condition Monitoring Methods of Hydraulic Valves. Maintenance Condition Monitoring and Diagnostics, 28.9.-29.9.2005. POHTO, Oulu, Finland, 2005. 15 p.
15. Kauranne H., Laihanen L. Hydrauliiikan tarvelähtöinen kunnonvalvonta. MASINA tulosseminaari 19.10.2005, Hämeen-linna. www.tekes.fi. 12 s.
16. Rusanen, H. Elo, L. Koivula, T. Rinkinen, J., 2005. Liikkuvan kaluston hydrauliiikan kunnonvalvonta ja vianetsintä. Työkonetekniikan päivät 25-26.10.2005. Helsinki. 26 s.
17. Laihanen L., 2005. Kulumisen vaikutukset hydraulisuuntaventtilin ominaisuuksiin. Diplomityö. Marraskuu 2005. Tampereen teknillinen yliopisto. 99 s., 3 liites.

10.1.2005

TAKU-loppuseminaari

Jari Rinkinen

4

## **Suunnitteilla olevia TAKU-projektin aiheeseen liittyviä julkaisuja 2006- (TTY/IHA)**

### Esque (TTY/IHA)

- A virtual model for developing signal processing methods for failure diagnostics of HST systems (Esqué, Rusanen)
- Qualitative analysis of common HST pump failures using simulation tools (Esqué)
- A multi-body approach on the modelling of a forwarder forest machine HST circuit (Esqué)

### Rusanen (Bosch Rexroth Oy)

- Feasibility of Temperature Measurement in Condition Monitoring Purposes in Mobile Hydraulics (Rusanen, Kauranne?)
- Usage of FFT and Wavelet analysis for Recognizing Faults in Hydrostatic Transmission (Rusanen, Esqué)
- Derivative of Real Number Order for Condition Monitoring of Hydraulic Components (Rusanen, Esqué)