



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ARI-PEKKA KETOLA  
AUTOMAATTISEN TESTAUSJÄRJESTELMÄN KÄYTTÖÖNOTTO  
TIETYILLE HYDRAULILAITTEILLE

Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Tikkanen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Teknisten tieteiden tiedekuntaneuvos-  
ton kokouksessa 7. lokakuuta 2015



## TIIVISTELMÄ

**ARI-PEKKA KETOLA:** Automaattisen testausjärjestelmän käyttöönotto tietyille hydraulilaitteille

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 130 sivua, 32 liitesivua

Toukokuu 2016

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Hydrauliteknikka

Tarkastaja: professori Seppo Tikkanen

**Avainsanat:** Automaattinen testausjärjestelmä, hydraulilaitteiden testaaminen, tilavuusvirran säätö ja mittaaminen, paineen säätö ja mittaaminen, proportionaaliventtiilit, mittausepävarmuus.

Teollisuudessa valmistetaan monia hydraulilaitteita erilaisiin asiakastarpeisiin. Hydraulisten laitteiden koekäyttö suoritetaan käytännössä aina ennen tuotteen toimitusta asiakkaalle ja yleensä tuotteen koekäytöstä laitetaan myös mittausraportti tuotteen mukaan todistukseksi suoritetuista mittauksista. Tuotteen testaaminen voidaan suorittaa manuaalisella, puoliautomaattisella tai täysin automaattisella testausjärjestelmällä.

Tässä diplomityössä toteutettiin automaattinen testausjärjestelmä Dynaset Oy:n hydraulisia korkeapainevesipumppuja, generaattoreita ja kompressoreita varten. Automaattisella testausjärjestelmällä haluttiin automatisoida nykyinen manuaalinen koekäyttömenetelmä. Testausjärjestelmän tavoitteena oli ohjata hydraulikoneikon tilavuusvirtaa ja painetta automaattisesti konfiguroidun testisekvenssin mukaan ja tuottaa automaattisesti mittaus- tuloksista mittausraportti, josta näkee onko koekäyttö hyväksytty vai hylätty. Koekäyttö hyväksytään jos mittaus tulokset olivat asetettujen laaturajojen sisällä ja jos koekäyttäjä hyväksyi laitteen visuaaliset tarkastukset.

Diplomityöprojekti aloitettiin tutustumalla koekäytettävien laitteiden nykyisiin koekäyttömenetelmiin, jotta tiedettiin mitä oltiin automatisoimassa sekä mitä haluttiin mitata ja ohjata. Seuraavaksi määriteltiin mittaus- ja ohjauskanavien määrät ja signaalityypit. Tämän jälkeen suunniteltiin hydraulikoneikon muutokset, testausjärjestelmän kytkentäkaappi ja käyttöliittymä sekä testisekvenssin konfigurointiohjelma. Suunnittelutyön jälkeen suoritettiin automaattisen testausjärjestelmän käyttöönotto, jolloin testattiin antureiden, ohjauslaitteiden, kytkentäkaapin, käyttöliittymän, tilavuusvirran säädön sekä paineen säädön toimivuudet vaatimusten mukaan.

Työn tuloksina todettiin, että automaattisen testausjärjestelmän käyttöönotto saatiin suoritettua onnistuneesti projektin aikana. Tilavuusvirran mittaaminen ja säätö toimivat sekä paineen mittaaminen ja säätö toimivat asetettujen vaatimusten mukaisesti. Haluttaessa parempaa säädettävyyttä, tulisi siirtyä käyttämään asematakaisinkytkettyjä proportionaaliventtiileitä. Käyttöliittymä toimi asetettujen vaatimusten mukaisesti lukuun ottamatta muutamia puutteita, jotka on syytä korjata ennen koekäyttöjen varsinaista aloittamista. Mittausepävarmuuslaskelmien perusteella voidaan suositella Dynaset Oy:ta valitsemaan vielä mittaus tarkkuudeltaan tarkemmat paineanturit, jolloin mittausepävarmuus pienenee.

## ABSTRACT

**ARI-PEKKA KETOLA:** Implementation of automatic testing system for certain hydraulic machines

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 130 pages, 32 Appendix pages

May 2016

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Fluid Power

Examiner: Professor Seppo Tikkanen

**Keywords:** automatic testing system, testing of hydraulic machines, measuring and controlling of flow, measuring and controlling of pressure, proportional valves, uncertainty of measuring.

In industry many hydraulic devices are made for different kind of customer needs. Test run of hydraulic devices is usually performed before sending device to customer. Usually measurements of test run are sent with the device to customer. Testing of hydraulic device could be done manually or semi-automatically or automatically.

Implementation of automatic testing system for certain hydraulic devices is performed in this thesis. Automatic testing system is made for Dynaset Oy. Dynaset Oy wants to automatize current manual testing system that is used for testing of hydraulic high pressure water pumps, generators and compressors. Goal was to control oil flow and pressure according to preconfigured test sequence. Automatic testing system should make electronic measurement report after every test so operator can see if test is passed or not. Test is passed if measurement results are inside preconfigured quality limits and if operator accepts visual tests of devices (e.g. is the pump leaking?).

Thesis project started by get to know how the current manual test run are made for different hydraulic devices of Dynaset Oy. After this we knew what were should be automatized and what magnitudes should be measured and controlled. Next we defined quantity and signal types of measuring and controlling channels (inputs and outputs). After this we designed changes to hydraulic power unit and to measurement and control box. Also configuration program and Inspector user interface were designed. After design work was the implementation of automatic testing system made. Implementation of automatic testing system included testing of sensors, control devices, electronic connections of measurement and control box and testing of user interface. Also controlling of flow and pressure were tested.

As results of this thesis we managed to implement automatic testing system successfully. Controlling of flow and pressure worked correctly and requirements was fulfilled. If better control properties are needed then I suggest to use servo-proportional valve with position transmitter. Also measuring of flow and pressure worked correctly and requirements of measurements was fulfilled. User interface worked correctly and requirements of user interface was fulfilled. There was few defects in user interface and they should be fixed before starting to use automatic testing system in production line. According to calculations of uncertainty of measurements I suggest that Dynaset Oy uses a bit more accurate pressure transmitters in pressure measuring. This is how uncertainty of measurement could be decreased.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ylöjärvellä sijaitsevalle Dynaset Oy:lle. Työn tilaajana toimi Dynaset Oy:n tuotekehityspäällikkö Timo Nieminen ja ohjaajina Jarno Viitanen (sähkö- ja automaatio) sekä Harri Kotka (mekaniikkasuunnittelu).

Diplomityön tarkastajan ja ohjaajana toimi professori Seppo Tikkanen ja haluan esittää hänelle kiitokset työn ohjaamisesta, tarkastamisesta ja hyvistä ohjeista. Lisäksi haluan esittää kiitokset Dynaset Oy:n Timo Niemiselle, joka mahdollisti tämän diplomityön tekemisen tarjoamalla haastavan diplomityöaiheen. Haluan kiittää myös projektin ohjaajina toimineita Jarno Viitasta ja Harri Kotkaa Dynaset Oy:sta. Kiitokset kuuluvat myös Pasi Yli-Kätkälle monista hyvistä ohjeista hydraulisten korkeapainevesipumppujen koekäyttöön liittyen.

Suurimmat kiitokset kuuluvat rakkaalle vaimolleni Susannalle tämän diplomityön tukemisesta, motivoimisesta ja kannustamisesta työn loppuun saattamiseksi. Kiitokset kuuluvat myös vanhemmilleni, jotka mahdollistivat opintojen aloittamisen Ilmajoen lukiossa.

Tampereella, 24.5.2016

---

Ari-Pekka Heikki Ketola

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	PROJEKTIN TAUSTATIEDOT JA TAUSTATEORIA .....	3
2.1	Diplomityöprojektin lähtökohta, tavoitteet ja vaatimukset .....	3
2.2	Yritys ja testattavat hydraulilaitteet.....	6
2.3	Vanha testausmenetelmä ja testausjärjestelmä.....	7
2.3.1	Vanha hydraulikoneikko .....	9
2.4	Mittaustekniikka.....	11
2.4.1	Anturin rakenne, toiminta ja luokittelu .....	11
2.4.2	Analogisen anturisignaalin siirto .....	13
2.4.3	Analogisen anturisignaalin käsittely .....	14
2.4.4	Digitaalisen anturisignaalin siirto .....	18
2.4.5	Digitaalisen anturisignaalin käsittely .....	21
2.4.6	Anturisignaalin staattiset ja dynaamiset ominaisuudet .....	22
2.4.7	Anturisignaalin siirtoon vaikuttavat häiriöt .....	27
2.5	Suureiden mittaaminen.....	28
2.5.1	Yleiset instrumentointi vaatimukset, SFS 5059 .....	28
2.5.2	Paineen mittaaminen ja mittausvaatimukset .....	29
2.5.3	Tilavuusvirran mittaaminen ja mittausvaatimukset .....	32
2.5.4	Lämpötilan mittaaminen ja mittausvaatimukset .....	35
2.5.5	Nesteen pinnankorkeuden mittaaminen ja mittausvaatimukset .....	37
2.6	Säätötekniikka .....	39
2.6.1	PID-Säätö .....	39
2.6.2	Proportionaali- ja servoventtiilit .....	42
2.6.3	Tilavuusvirran säätö .....	46
2.6.4	Paineen säätö.....	48
3.	AUTOMAATTISEN TESTAUSJÄRJESTELMÄN JA UUDEN TESTAUSMENETELMÄN YLEISKUVAUS .....	50
4.	AUTOMAATTISEN TESTAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU .....	53
4.1	Hydraulikoneikon muutosten suunnittelu .....	53
4.1.1	Hydraulikoneikon muutosten yleiset vaatimukset .....	53
4.1.2	Hydrauliikan muutosten tekninen toteutus .....	54
4.1.3	Hydraulikoneikkoon valitut komponentit .....	58
4.1.4	Mekaniikkamuutosten suunnittelu .....	62
4.2	Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaapin suunnittelu.....	62
4.2.1	Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaapin vaatimukset ...	62
4.2.2	Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaapin toteutus .....	64
4.3	Mittausohjelmiston suunnittelu ja esittely .....	66
4.3.1	Testisekvenssin konfigurointiohjelma .....	66
4.3.2	Inspector-käyttöliittymä .....	74
4.3.3	Twincat-ohjelmisto .....	81

4.4	Korkeapainevesipumppujen kuormituslaitteen esisuunnittelu.....	82
4.4.1	Kuormituslaitteen vaatimukset .....	82
4.4.2	Kuormituslaitteen esisuunnittelu.....	82
5.	AUTOMAATTISEN TESTAUSJÄRJESTELMÄN KÄYTTÖNOTTO JA TESTITULOKSET .....	85
5.1	Alkutyöt.....	85
5.2	Testausjärjestelmän kytkentäkaapin sähkökytkentöjen testaukset.....	86
5.3	Antureiden käyttöönottotestit.....	87
5.3.1	Antureiden skaalausparametrien määrittäminen.....	88
5.3.2	Paineanturien skaalausparametrien toiminnan verifiointi.....	89
5.3.3	Tilavuusvirta-anturin skaalausparametrien toiminnan verifiointi..	93
5.4	Käyttöliittymän ja PLC-koodin toiminnan verifiointi.....	96
5.4.1	Hätä- ja laaturajojen toiminnan verifiointi.....	96
5.4.2	Käyttöliittymän toiminnan verifiointi .....	98
5.5	Tilavuusvirran ohjaus ja säätö 2/2-suunta-proportionaaliventtiilillä.....	100
5.6	Paineen ohjaus ja säätö paineenrajoitusproportionaaliventtiilillä .....	106
5.7	Pallohanan testimittaukset.....	111
6.	MITTAUSTULOSTEN LUOTETTAVUUDEN JA MITTAUSEPÄVARMUUDEN ANALYSOINTI .....	117
6.1	Luotettavuus ja epävarmuus mittauksissa.....	117
6.2	Paineen mittauksen mittausepävarmuuden laskenta ja analysointi.....	121
6.3	Tilavuusvirran mittauksen mittausepävarmuuden laskenta ja analysointi.	123
7.	YHTEENVETO .....	125
7.1	Automaattisen testausjärjestelmän kehitysehdotukset .....	126
	LÄHTEET.....	128

## **LIITTEET**

LIITE A: VANHAN HYDRAULIKONEIKON HYDRAULIKAAVIO JA OSALUETTELO

LIITE B: SÄÄTIMEN VALINTAOHJEET

LIITE C: ZIEGLER-NICHOLS MENETELMÄ

LIITE D: UUDEN HYDRAULIKONEIKON HYDRAULIKAAVIO, OSALUETTELO JA VENTTIILEIDEN OHJAUSSEKVENSSIT

LIITE E: 2/2-SUUNTAPROPORTIONAALIVENTTIILI

LIITE F: KONFIGUROINTIOHJELMAN TESTIALGORITMI-VÄLILEHTI

LIITE G: PIENTEN VESIPUMPPUJEN KUORMITUSLAITTEEN HYDRAULIKAAVIO JA OSALUETTELO

LIITE H: AUTOMAATTISEN TESTAUSJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄKAAPIN SÄHKÖKYTKENTÖJEN TESTAAMINEN

LIITE I: SKAALAUSSPARAMETRIEN LASKENTA

LIITE J: PAINEANTUREIDEN VERTAILUMITTAUKSET

LIITE K: TILAVUUSVIRTA-ANTUREIDEN VERTAILUMITTAUKSET

LIITE L: TILAVUUSVIRRRAN SÄÄDÖN TOIMINNAN TESTAAMINEN

LIITE M: PAINEEN SÄÄDÖN TOIMINNAN TESTAAMINEN

LIITE N: ANTUREIDEN MITTAUSEPÄVARMUUKSIEN LASKENTA



## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Automaattisen testausjärjestelmän toimintaperiaate</i> .....	4
<b>Kuva 2.</b>	<i>HPW 200/30-45 korkeapainepumppu [2]</i> .....	6
<b>Kuva 3.</b>	<i>HG 6,5 Hydrauligeneraattori [2]</i> .....	7
<b>Kuva 4.</b>	<i>HK 450 Hydraulikompressori [2]</i> .....	7
<b>Kuva 5.</b>	<i>Vanha testausmenetelmä</i> .....	8
<b>Kuva 6.</b>	<i>Anturin rakenteen lohkokaavio [3, s. 7-8; 4, luku 4.1 s. 4; 5, s. 4-7]</i> .....	11
<b>Kuva 7.</b>	<i>Analoginen signaali</i> .....	13
<b>Kuva 8.</b>	<i>Alipäästösuodatin (a), ylipäästösuodatin (b), kaistanpäästösuodatin (c) sekä kaistanestosuodatin (d) [4, luku 4 s. 45]</i> .....	15
<b>Kuva 9.</b>	<i>Analogiasignaalin näytteistäminen (a) ja diskreettiaikaisen signaalin (b) muodostaminen, muokattu lähteestä [8, s. 129; 10, s. 70]</i> .....	16
<b>Kuva 10.</b>	<i>Mittausarvojen kvantisointi, muokattu lähteestä [3, s. 63; 8, s. 128; 10 nawrocki s. 70]</i> .....	17
<b>Kuva 11.</b>	<i>Laskostumisilmiö käytettäessä liian pientä näytteenottotaajuutta, muokattu lähteestä [3, s. 64]</i> .....	18
<b>Kuva 12.</b>	<i>Digitaalinen signaali</i> .....	19
<b>Kuva 13.</b>	<i>Absoluutti- eli koodianturin rakenne [12, s. 35]</i> .....	21
<b>Kuva 14.</b>	<i>Anturin lineaarisuus, muokattu lähteestä [5, s. 21]</i> .....	24
<b>Kuva 15.</b>	<i>Hystereesin ilmentyminen antureissa, muokattu lähteestä [5, s. 25]</i> .....	25
<b>Kuva 16.</b>	<i>Nollapisteen virhe (a), herkkyyden virhe (b) sekä herkkyyden ja nollapisteen yhteisvirhe (c), muokattu lähteestä [5, s. 23]</i> .....	26
<b>Kuva 17.</b>	<i>Kalvoanturi [12, s. 42]</i> .....	30
<b>Kuva 18.</b>	<i>Kalvopaineanturi venymäliuska-anturilla [12, s. 43]</i> .....	31
<b>Kuva 19.</b>	<i>Pietsosähköinen paineanturi [12, s. 44]</i> .....	31
<b>Kuva 20.</b>	<i>Kapseli- ja paljetyyppiset kalvoanturit [12, s. 43]</i> .....	32
<b>Kuva 21.</b>	<i>Kuristinlevy (a), venturiputki (b), virtaussuutin (c) ja Dall- virtausputki [5, s. 430]</i> .....	33
<b>Kuva 22.</b>	<i>Tilavuuskammioanturi [16]</i> .....	34
<b>Kuva 23.</b>	<i>Turbiinianturi [5, s.438 ]</i> .....	35
<b>Kuva 24.</b>	<i>Uimuriin perustuva nesteen pinnankorkeusanturi [12, s. 47]</i> .....	37
<b>Kuva 25.</b>	<i>Paine-eroon perustuva nesteen pinnankorkeusanturi, muokattu lähteestä [5, s. 463–464]</i> .....	38
<b>Kuva 26.</b>	<i>Ohjausjärjestelmän lohkokaavio, muokattu lähteestä [17, s. 12]</i> .....	39
<b>Kuva 27.</b>	<i>Säätöjärjestelmän lohkokaavio, muokattu lähteestä [17, s. 12]</i> .....	40
<b>Kuva 28.</b>	<i>Proportionaali- ja ON/OFF-magneettikelojen ominaiskäyrät [14, s. 332]</i> .....	43
<b>Kuva 29.</b>	<i>Voimaohjattu proportionaalimagneetti (Bosch Rexroth AG) [14, s. 332]</i> .....	44

<b>Kuva 30.</b>	<i>Asemaohjattu proportionaalimagneetti (Bosch Rexroth AG) [14, s. 332].....</i>	<i>44</i>
<b>Kuva 31.</b>	<i>Asematakaisinkytketty proportionaalimagneetti (Bosch Rexroth AG) [14, s. 334].....</i>	<i>45</i>
<b>Kuva 32.</b>	<i>Vääntömoottori [14, s. 334].....</i>	<i>46</i>
<b>Kuva 33.</b>	<i>2-tievirransäätöventtiili (Bosch Rexroth AG) [14, s. 346].....</i>	<i>47</i>
<b>Kuva 34.</b>	<i>Suoraanohjattu suunta-proportionaaliventtiili (Bosch Rexroth AG) [14, s. 340]. .....</i>	<i>48</i>
<b>Kuva 35.</b>	<i>Suoraanohjattu, asematakaisinkytketty paineenrajoitusproportionaaliventtiili (Bosch Rexroth AG) [14, s. 340].....</i>	<i>48</i>
<b>Kuva 36.</b>	<i>Uusi testausmenetelmä. ....</i>	<i>50</i>
<b>Kuva 37.</b>	<i>Automaattinen testausjärjestelmä. ....</i>	<i>51</i>
<b>Kuva 38.</b>	<i>Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaappi.....</i>	<i>64</i>
<b>Kuva 39.</b>	<i>Perusparametrien määrittäminen. ....</i>	<i>68</i>
<b>Kuva 40.</b>	<i>Sisäänmenojen määrittäminen. ....</i>	<i>69</i>
<b>Kuva 41.</b>	<i>Ulostulojen määrittäminen.....</i>	<i>70</i>
<b>Kuva 42.</b>	<i>Antureiden parametritiedosto.....</i>	<i>72</i>
<b>Kuva 43.</b>	<i>Ohjauslaitteiden parametritiedosto.....</i>	<i>73</i>
<b>Kuva 44.</b>	<i>Inspector käyttöliittymän etusivu.....</i>	<i>76</i>
<b>Kuva 45.</b>	<i>Testaaja, tuote ja reseptiikka osio.....</i>	<i>76</i>
<b>Kuva 46.</b>	<i>Tarkistuslista. ....</i>	<i>77</i>
<b>Kuva 47.</b>	<i>Esimerkki sähköisestä mittausraportista.....</i>	<i>78</i>
<b>Kuva 48.</b>	<i>Esimerkki CSV-tiedostosta. ....</i>	<i>79</i>
<b>Kuva 49.</b>	<i>Tuotteet välilehti.....</i>	<i>80</i>
<b>Kuva 50.</b>	<i>Mittaustulosten graafinen kuvaaja.....</i>	<i>80</i>
<b>Kuva 51.</b>	<i>Tarkistuslistat esitettynä käyttöliittymän tuotteet-välilehdellä.....</i>	<i>81</i>
<b>Kuva 52.</b>	<i>Vertailtavien paineantureiden kytkentä jakotukkiin.....</i>	<i>90</i>
<b>Kuva 53.</b>	<i>Toisiinsa vertailtujen Wika A10 paineanturien mittaus tulokset.....</i>	<i>92</i>
<b>Kuva 54.</b>	<i>Kracht tilavuusvirta-anturin ensimmäisen vertailumittauksen mittaus tulokset.....</i>	<i>95</i>
<b>Kuva 55.</b>	<i>Tilavuusvirran säätömittauksesta mitatut öljyn virtauksen ohjearvo, säätimen ulostulo, mitattu öljyn virtauksen oloarvo ja öljyn paine. ....</i>	<i>102</i>
<b>Kuva 56.</b>	<i>Tilavuusvirtavirheen itseisarvo säätömittausten aikana. ....</i>	<i>103</i>
<b>Kuva 57.</b>	<i>Paineen säätömittauksesta mitatut öljyn paineen ohjearvo, säätimen ulostulo, mitattu öljyn paine ja öljyn tilavuusvirta. ....</i>	<i>108</i>
<b>Kuva 58.</b>	<i>Paineen virheen itseisarvo säätömittausten aikana. ....</i>	<i>109</i>
<b>Kuva 59.</b>	<i>Pallohanan sähköinen mittausraportti.....</i>	<i>114</i>
<b>Kuva 60.</b>	<i>Pallohanan testimittauksista tallennetun CSV-tiedoston alku. ....</i>	<i>115</i>
<b>Kuva 61.</b>	<i>Kalibrointiketju ja mittausten jäljitettävyys [8, s. 153].....</i>	<i>117</i>
<b>Kuva 62.</b>	<i>Ziegler-Nicholsin 1/4-vaimennussuhdemenetelmä [15, s. 58].....</i>	<i>134</i>

<b>Kuva 63.</b>	<i>Prosessin reagointikäyrä [15, s. 59].</i> .....	135
<b>Kuva 64.</b>	<i>Prosessin reagointikäyrämenetelmä [15, s. 36].</i> .....	136

## TAULUKKOLUETTELO

<b>Taulukko 1.</b>	<i>Analogiset standardiviestit [4, luku 4 s. 37].....</i>	<i>14</i>
<b>Taulukko 2.</b>	<i>Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaapin signaalityypit ja kanavamäärät [1].....</i>	<i>63</i>
<b>Taulukko 3.</b>	<i>Vertailtujen paineantureiden mittaustulokset.....</i>	<i>91</i>
<b>Taulukko 4.</b>	<i>Vertailtujen tilavuusvirta-anturien mittaustulokset ensimmäisestä ja toisesta vertailumittauksesta. ....</i>	<i>94</i>
<b>Taulukko 5.</b>	<i>Tilavuusvirran säädössä käytetyt tilavuusvirtatasot. ....</i>	<i>101</i>
<b>Taulukko 6.</b>	<i>Tilavuusvirran säätötarkkuudet ja säätöajat.....</i>	<i>104</i>
<b>Taulukko 7.</b>	<i>Paineensäädössä käytetyt painetasot. ....</i>	<i>107</i>
<b>Taulukko 8.</b>	<i>Paineen säädön säätötarkkuus ja säätöaika eri mittauspisteissä. ....</i>	<i>110</i>
<b>Taulukko 9.</b>	<i>Pallohanan testaukseen käytettävät tilavuusvirtatasot. ....</i>	<i>111</i>
<b>Taulukko 10.</b>	<i>Pallohanan testimittauksessa asetetut laaturajat. ....</i>	<i>112</i>
<b>Taulukko 11.</b>	<i>Painelinjan paineanturin (Wika A10 0 – 400 bar) mittausepävarmuuden lasketut arvot.....</i>	<i>121</i>
<b>Taulukko 12.</b>	<i>Tankkilinjan paineanturin (Wika A10 0 – 100 bar) mittausepävarmuuden lasketut arvot.....</i>	<i>123</i>
<b>Taulukko 13.</b>	<i>Tilavuusvirta-anturin lasketut yhdistetty standardisepävarmuus ja laajennettu epävarmuus.....</i>	<i>124</i>
<b>Taulukko 14.</b>	<i>Ohjeet säätimen valintaan eri suureita säädettäessä [15, s. 57]. ....</i>	<i>133</i>
<b>Taulukko 15.</b>	<i>Säätimen parametrien valinta Ziegler-Nichols menetelmällä [15, s.60; 18, s. 163]. ....</i>	<i>136</i>
<b>Taulukko 16.</b>	<i>Säätimen parametrien valinta prosessikäyrä-metodilla [15, s.63–64; 18, s. 166].....</i>	<i>137</i>

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AD-muunnin	Laite, joka muuntaa jatkuvan analogiasignaalin diskreetiksi digitaalisignaaliksi
CSV	engl. Comma Separated Values, taulukkomainen tiedostomuoto, jossa pilkuilla on erotettu mittausarvot
DA-muunnin	Laite, joka muuntaa diskreetin digitaalisignaalin jatkuvaksi analogiasignaaliksi
EMC-hyväksytyt	engl. Electromagnetic Compatibility, laitteelle myönnettävä todistus, jonka mukaan laite on sähkömagneettisesti yhteensopiva eli laite sietää tietyn määrän häiriöitä eikä se aiheuta liikaa häiriöitä muille laitteille
FSO	engl. Full-Scale Output, anturin koko mittausalue
PFM	engl. Pulse Frequency Modulation, pulssin taajuusmodulaatio
PLC	engl. Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikka-ohjain
PWM	engl. Pulse Width Modulation, pulssin leveysmodulaatio
A	tietyn alueen pinta-ala
a	anturin skaalauskerroin (herkkyys)
$\alpha$	suodattamattoman anturisynteesin painokerroin (rekursiivisuodatin)
b	anturin offset (nollakohdan poikkeama)
$\beta$	edellisen suodatetun anturisynteesin painokerroin (rekursiivisuodatin)
e	erosuure (asetusarvon ja mittausarvon vähennys toisistaan)
F	voima
$f_s$	näytteenottotaajuus
$f_u$	prosessissa esiintyvä korkein mitattu taajuus
g	gravitaatiovakio
h	nesteen pinnan korkeus
$K_c$	
N	digitaalisignaalin tilojen määrä
P	paine
$p_{abs}$	absoluuttipaine
$p_i$	ilmanpaine
$p_n$	hydrostaattinen paine
$q_k$	kvantisointitarkkuus
$q_m$	muuntoresoluutio
$Q_{turb}$	kuristusyhtälö
$Q_{vc}$	tilavuusvirta mittakuristimen jälkeisessä kuroumakohdassa (vena contracta)
$\rho$	nesteen tiheys
$S_{i(n)}$	anturilta tuleva anturisynteesi
$S_{o(n)}$	rekursiivisuodattimen ulostuleva suodatettu signaali
$S_{o(n-1)}$	edellinen rekursiivisuodattimelta lähtenyt suodatettu signaali
$S(x_a)$	anturin herkkyys kohdassa $x_a$
$t_d$	derivointiaika
$t_i$	integroidaika
U	säädin algoritmi (P-, PI-, PD- tai PID-säädin)
$U_i$	anturin mittausalue
$U_o$	anturin ulostuloalue

$V_{\min}$	mittausalueen tai ulostuloalueen maksimiarvo
$V_{\max}$	mittausalueen tai ulostuloalueen minimiarvo

# 1. JOHDANTO

Teollisuudessa valmistetaan monia hydraulilaitteita erilaisiin asiakastarpeisiin. On hydraulisyylintereitä, -venttiileitä, -lohkoja ja muita hydraulikkaa käyttäviä teollisuuslaitteita sekä mobilekoneita. Tuotteiden ominaisuuksien testaaminen ja varmistaminen on käytännössä pakollista ennen tuotteen toimittamista asiakkaalle. Tuotteen ominaisuuksien mittaamisella varmistetaan tuotteen vaatimusten mukaisuudesta. Tuotteiden ominaisuuksien varmistamiseen on kehitetty erilaisia ratkaisuja niin manuaalisista yksinkertaisista hydraulikoneikoista aina automatisoituihin erikoisjärjestelmiin. Manuaalisilla testausjärjestelmillä onnistuu tuotteiden koekäyttö aina tiettyyn pisteeseen saakka riippuen halutusta mittausten laadusta, yrityksen käytettävissä olevista resursseista ja testausjärjestelmien määrästä. Haluttaessa tarkempia ja riippumattomia mittaustuloksia tulee koekäyttäjän vaikutus poistaa mittauksista. Tällöin saadaan vähennettyä mittaustulokseen vaikuttavien virheiden määrää, kun mittaustulokseen ei jää koekäyttäjän tulkinnan varaa ja sähköiset anturit lisäksi pienentävät mittausepävarmuutta oman mittaustarkkuutensa ansiosta. Automaattiset testausjärjestelmät tarjoavat mahdollisuuden mittaustulosten sähköiseen tallentamiseen, jolloin mittausraporttien arkistointi ja toisiinsa vertailu helpottuu. Kun paperisen mittauspöytäkirjan täyttäminen ja antureiden mittausarvojen lukeminen poistuu koekäyttäjän työtehtävistä, nopeutuu myös tuotteen koekäyttö. Tällöin koekäyttäjä voi keskittyä tarkastelemaan tuotteen ulkoista toimintaa visuaalisia ominaisuuksia tarkkailemalla, jolloin havaitaan helpommin ja nopeammin esimerkiksi tuotteen vuodot.

Tässä diplomityössä esitetään automaattisen testausjärjestelmän käyttöönotto Dynaset Oy:n hydraulisten korkeapainevesipumppujen, kompressoreiden ja generaattoreiden koekäyttöä varten. Tarkoituksena oli suorittaa järjestelmän käyttöönotto ja todeta sen toimivuus hydraulisella korkeapainevesipumpulla, jolloin tuotevastuuryhmien suunnittelijoiden on helpompi suorittaa jatkossa järjestelmän käyttöönotto oman alueensa laitteiden koekäyttöä varten. Automaattisella testausjärjestelmällä haluttiin automatisoida nykyinen manuaalinen koekäyttömenetelmä. Testausjärjestelmän tavoitteena oli ohjata hydraulikoneikon tilavuusvirtaa ja painetta automaattisesti ennalta konfiguroidun testisekvenssin mukaan. Tavoitteena oli, että hydraulilaitteiden nykyiset koekäyttöprosessit automatisoidaan ja niistä konfiguroidaan tietokoneohjelmalla konfigurointitiedosto, joka määrittelee kuinka hydraulikoneikon tilavuusvirtaa ja painetta ohjataan sekä säädetään ja mitä signaaleja mitataan ja tallennetaan sähköiseen mittausraporttiin. Konfigurointitiedostoon piti pystyä määrittelemään myös mittaustuloksille asetettavat laaturajat ja koekäyttäjälle esitettävät visuaaliset tarkastukset jolloin rajojen ylittäminen ja visuaalisten tarkastusten hylkääminen johtaa varsinaisen koekäytön hylkäämiseen.

Diplomityö jakautuu 6 päälukuun, joissa kerrotaan työn taustateoria, järjestelmän yleiskuvaus, järjestelmän suunnittelu, käyttöönotto sekä mittausepävarmuus laskelmat ja lopuksi yhteenveto. 2 luvussa kerrotaan tarkemmin työn lähtökohdat ja työn taustalla vaikuttava mittaus- ja säätötekniikka, jotta suureiden mittaamisen ja ohjaamisen ymmärtäisi paremmin.

Kolmannessa luvussa esitellään automaattisen testausjärjestelmän rakenne ja toiminta yleisellä tasolla. Uusi testausmenetelmä sekä automaattisen testausjärjestelmän rakenne käydään läpi lohkokaavioiden avulla.

Neljännessä luvussa perehdytään tarkemmin automaattisen testausjärjestelmän suunnitteluun. Testausjärjestelmän suunnitteluluku jakautuu hydraulikoneikon, testausjärjestelmän kytkentäkaapin ja mittausohjelmiston suunnitteluun sekä hydraulisten korkeapainepumppujen kuormituslaitteiston esisuunnitteluun.

Viidennessä luvussa kerrotaan varsinaisesta automaattisen testausjärjestelmän käyttöönotosta. Käyttöönottoluku jakautuu antureiden, ohjauslaitteiden, konfigurointiohjelman ja Inspector-käyttöliittymän käyttöönottotesteihin. Lisäksi tilavuusvirran sekä paineen säätö testattiin perusteellisesti ja järjestelmällä suoritettiin esimerkin vuoksi pallohanan testimittaukset, joilla voitiin demonstroida testausjärjestelmän toimintaa ja ominaisuuksia.

Kuudennessa luvussa kerrotaan mittausepävarmuuden laskennasta JCGM 100:2008 standardin (ohjeen) mukaan. Luvussa lasketaan testausjärjestelmän paineen mittauksen ja tilavuusvirran mittauksen yhdistetyt standardiepävarmuudet sekä laajennetut mittausepävarmuudet.

Seitsemännessä luvussa on diplomityön yhteenveto. Luvussa esitetään lisäksi ohjeita testausjärjestelmän jatkokehitykseen liittyen.



## 2. PROJEKTIN TAUSTATIEDOT JA TAUSTATEORIA

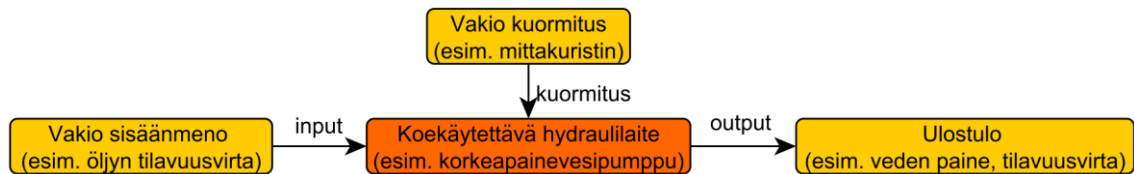
### 2.1 Diplomityöprojektin lähtökohta, tavoitteet ja vaatimukset

Tämä diplomityö tehtiin Dynaset Oy:n tuotannon tarpeesta. Automaattisella testausjärjestelmällä tullaan korvaamaan yrityksen hydraulilaitteiden manuaalinen koekäyttömenetelmä. Koekäytettäviä laitteita ovat Dynaset Oy:n valmistamat hydrauliset korkeapainepumput, generaattorit, kompressorit, magneetit ja muut yrityksen standardituotteet.

Projektin tavoitteena on automatisoida hydraulilaitteiden nykyiset manuaalisesti tehtävät koekäyttömenetelmät. Testausjärjestelmän tavoitteena on ohjata ja säätää hydraulikon tilavuusvirtaa sekä järjestelmän painetta automaattisesti konfiguroidun testisekvenssin mukaan. Testausjärjestelmän tarkoitus on tuottaa tarkempia sähköisiä mittausraportteja sekä asiakkaiden että Dynaset Oy:n tuotekehityksen tarpeisiin. Sähköinen mittausraportti sekä nopeuttaa että tarkentaa mittauksia verrattuna koekäyttäjän suorittamiin manuaalisiin mittauksiin. Nykyisin mittauspöytäkirjoja säilytetään kansioissa erillisessä huoneessa, joten sähköiset mittausraportit myös helpottavat mittaustulosten säilyttämistä sekä hyödyntämistä jatkossa.

Testausjärjestelmän tavoitteena on myös nopeuttaa koekäyttöä ja tehostaa laadun varmistamista standardisoimalla laitteiden koekäyttö. Laitteen koekäyttö nopeutuu, kun koekäyttäjän ei tarvitse lukea antureiden mittaustuloksia ja kirjata niitä mittauspöytäkirjaan. Standardoiduilla testeillä saadaan laatupoikkeamat esiin, jos laitteen suoritusarvot eivät vastaa asetettuja laaturajoja. Vakioituilla koekäytöllä saadaan myös keskenään vertailukelpoisia tuloksia.

Automaattisella testausjärjestelmällä tullaan ohjaamaan hydraulilaitteiden koekäyttöä automaattisesti konfiguroidun testialgoritmin mukaisesti. Laitteelle menevää öljyn tilavuusvirtaa, painetta sekä laitteen kuormitusta ohjataan ja säädetään automaattisella testausjärjestelmällä. Ydinajatus (katso kuva 1) on pitää laitteelle menevä sisäänmeno (*engl. input*) ja laitteen kuormitus testialgoritmista asetetussa arvossa sekä mitata ulostulo (*engl. output*). Tällä tavalla suoritetaan useita mittauksia laitteen koko tehoalueelta (0 – 100 %). Lopuksi mittaustulosten sekä koekäyttäjän tekemien visuaalisten tarkastusten perusteella määritetään onko laitteen koekäyttö hyväksytty vai hylätty.



**Kuva 1.** Automaattisen testausjärjestelmän toimintaperiaate.

Esimerkiksi hydraulisen korkeapainevesipumpun koekäytössä pumpulle menevän öljyn tilavuusvirta sekä tuotteen kuormitus pidetään vakiona ja ulostulevan veden paine sekä tilavuusvirta mitataan. Kyseinen mittausprosessi suoritetaan muuttamalla laitteen sisäänmeno askelmaisesti pumpun koko tehoalueelta (0–100 %). Pumpun suorituskykyarvot mitataan kunkin askeleen aikana, jolloin sisäänmeno ja kuormitus pidetään lähes vakioina.

Automaattisen testausjärjestelmän käyttöönottoprojekti koostuu seuraavista pääosa-alueista: hydraulikoneikon modernisoinnin (luku 4.1), testausjärjestelmän kytkentäkaapin (luku 4.2), testisekvenssin konfigurointiohjelman (luku 4.3.1) sekä testausjärjestelmän käyttöliittymän (luku 4.3.2) suunnittelut, korkeapainevesipumppujen kuormituslaitteen esisuunnittelu (luku 4.4) ja suurimpana osa-alueena koko testausjärjestelmän käyttöönotto (luku 5). Käyttöönottoluku sisältää muun muassa antureiden, ohjauslaitteiden, mittauskaapin sähkökytkentöjen sekä käyttöliittymän testaukset ja kalibroinnit. Lisäksi luvussa 6 lasketaan automaattisen testausjärjestelmän paineen sekä tilavuusvirran mittauksen mittausepävarmuudet.

Minun vastuullani oli tässä diplomityöprojektissä hydraulikoneikon modernisoinnin suunnittelu sekä testausjärjestelmän käyttöönoton suorittaminen. Osallistuin myös testisekvenssin konfigurointiohjelman määrittelyyn sekä suunnitteluun. Lisäksi osallistuin testausjärjestelmän käyttöliittymän määrittelyyn ja testaamiseen. Konfigurointiohjelman ja käyttöliittymän suunnittelun päävastuu oli Insolution Oy:lla.

Hydraulikoneikon modernisoinnin suunnittelussa vaatimuksena olivat öljyn tilavuusvirran ja paineen proportionaalinen säätö automaattisella testausjärjestelmällä. Laitteiden normaali testaaminen manuaalisella koekäyttömenetelmällä tulee säilyttää, koska automaattinen testausjärjestelmä on tarkoitettu niin sanottujen standardituotteiden koekäyttöihin. Erikoisempien räätälöityjen tuotteiden koekäyttöjä on hankala konfiguroida tietyn testialgoritmin pohjalle, koska laitteen testaamisesta ei ole vielä kertynyt kokemusta. Manuaalisen koekäytön säilyttämisellä on myös etu häiriötilanteissa, jolloin voidaan turvautua aiemmin hyväksi todettuihin testimenetelmiin. Näin tuotanto ei seisahtu missään vaiheessa ja vältytään lisäkustannuksilta. Suunnittelussa täytyy siten ottaa huomioon kaksi eri koekäyttömoodia: automaattinen koekäyttö ja manuaalinen koekäyttö. Automaattikoekäytössä öljyn tilavuusvirtaa ja/tai painetta säädetään automaattisella testausjärjestelmällä. Manuaalikoekäytössä öljyn tilavuusvirtaa ja painetta ohjataan suoraan hydraulikoneikolla.

Testausjärjestelmän kytkentäkaapin suunnittelussa päähuomiona ovat mittaus- ja ohjauskanavien määrät ja eri signaalityypit, mittausantureiden ja ohjauslaitteiden helppo liitettävyys, yhdenmukaisuus, liittimien sijoittelu sekä kytkentästandardin valinta. Mittaus- ja ohjauskanavien lukumäärät ja signaalityypit määritettiin tutustumalla nykyisiin testausmenetelmiin ja haastatteleamalla tuotevastuuryhmistä vastaavia suunnittelijoita. Testausjärjestelmän kytkentäkaapin suunnittelussa päävastuu oli Dynaset Oy:n Jarno Viitasella ja minä vastasin kaapin lävistyskuvien piirtämisestä sekä jatko kehittelystä.

Testisekvenssin konfigurointiohjelman vaatimuksena oli Excel-ympäristö [1], helppokäyttöisyys (automaattisuus, näppäily minimiin) sekä mahdollinen laajennettavuus anturien ja ohjauslaitteiden osalta. Testisekvenssit muodostetaan konfigurointiohjelmassa, johon haluttiin käyttää Excel-ympäristöä sen yleisyyden, taulukkomaisuuden ja tietojen jäsentelyominaisuuksien takia (soluihin on helppo viitata pääohjelmasta). Konfigurointiohjelman tuli koostua yhdestä Excel-tiedostosta, jossa määritetään testisekvenssi sekä mittauksessa käytetyt anturit ja ohjauslaitteet. Tulevaisuudessa anturien ja ohjauslaitteiden lisääntyessä niiden tiedot ja skaalausparametrit tuli olla helposti lisättävissä järjestelmään. Konfigurointiohjelmalla luodaan jokaiselle tuotteelle oma konfigurointitiedosto, joka määrittää tuotteen koekäytön etenemisen ja käytetyt mittausanturit sekä ohjauslaitteet. Konfigurointi

Testausjärjestelmää hallitaan selainpohjaisella Inspector-käyttöliittymällä ja sen toteuttamisesta vastasi Insolution Oy. Testausjärjestelmän käyttöliittymän vaatimukset olivat

- helppokäyttöisyys (mahdollisimman vähän näppäilyä),
- viivakoodin ja QR-koodin lukumahdollisuus henkilö- sekä tuotetietojen syöttämiseen,
- mittausdatan reaaliaikaikkuna,
- sarjatestauksen suorittaminen samanlaisille tuotteille (maksimissaan 8 kpl),
- tuottaa sähköinen mittausraportti tuotteen suoritusarvoista,
- tarjota raporttien tarkastelu mahdollisuus sekä testidatan tarkempi tarkastelumahdollisuus suoraan käyttöliittymässä suurenustyökäluä hyväksi käyttäen sekä
- käyttöliittymän hyvä suorituskyky (sillä selainpohjainen käyttöliittymä asettaa melko suuret rajoitukset ohjelman kuormittavuudelle).

Vuosien saatossa mittauksia syntyy paljon, joten tiedon hallintaan täytyy kiinnittää huomioita niin selain kuin palvelintasollakin. Tiedon lisääntyessä sen hallinnointi ja etsintä vaikeutuvat.

Testausjärjestelmän käyttöönoton tavoite oli todentaa järjestelmä toimivaksi, jonkun Dynaset tuotteen osalta, jolloin tiedetään testausjärjestelmän käyttökelpoisuus myös muiden laitteiden testaamista mietittäessä. Käyttöönotossa piti testata koko testausjärjestelmä: anturit (toiminta + skaalaukset), ohjauslaitteet (toiminta + skaalaukset), sähkökytkennät sekä käyttöliittymä. Käyttöönoton tarkoituksena on varmistaa järjestelmän toimivuus ja

todentaa toteutuneet vaatimukset sekä havaita mahdolliset suunnittelu/ajatusvirheet projektissa. Käyttöönottotestien jälkeen tuotevastuuryhmien suunnittelijoiden on tulevaisuudessa helpompi suorittaa testausjärjestelmän käyttöönotto omien tuotteidensa osalta, kun järjestelmän toiminta on todennettu yhdellä tuotteella oikeissa tuotanto-olosuhteissa.

## 2.2 Yritys ja testattavat hydraulilaitteet

Dynaset Oy valmistaa hydraulisia korkeapainevesipumppuja, generaattoreita sekä kompressoreita, jotka saavat käyttötehonsa asiakkaan mobilekoneen hydrauliliikasta ja ne muuntavat hydraulitehon korkeapainevedeksi, sähkötehoksi, paineilmaksi, magneetti- tai tärytehoksi.

Hydraulinen korkeapainevesipumppu (kuva 2) tuottaa korkeapaineista vettä hydraulitehon avulla. Hydraulisen korkeapainevesipumpun pääkomponentit ovat edestakaisin iskevä hydraulinen paineenmuunnin, painemittari, paine- ja tankkiliitännät hydrauliliikalle (käyttöteho) sekä imu- ja paineliitännät vedelle (antoteho). Mobilekoneen hydrauliteho muunnetaan hydraulisella korkeapainevesipumpulla korkeapainevedeksi. Korkeapainevesipumppu toimii paineenmuuntimena eli hydrauliteholla liikutetaan pumpun sisällä olevaa mäntäasetelmaa edestakaisin, jolloin molemmissa vesipäädyissä syntyy korkeapaineista vettä. Vesipäädyt on yhdistetty pumpun sisällä samaan lähtöliitännään. Syntyvää korkeapaineveettä voidaan käyttää esimerkiksi erilaisissa pesutehtävissä.



**Kuva 2.** *HPW 200/30-45 korkeapainepumppu [2].*

Hydrauligeneraattori (kuva 3) tuottaa 1-vaihe- ja 3-vaihevaihtovirtaa hydraulitehon avulla. Hydrauligeneraattorin pääkomponentit ovat hydraulimoottori, 3-tievirransäätöventtiili ja generaattori. Mobilekoneen hydrauliteho muunnetaan hydraulimoottorilla mekaaniseksi tehoksi, joka muunnetaan generaattorissa sähkötehoksi. Syntyvää sähkötehoa voidaan käyttää erilaisten sähkötyökalujen kuten kulmahiomakoneen tai työmaavalaisinten tehonlähteenä.



**Kuva 3.** *HG 6,5 Hydrauligeneraattori [2].*

Hydraulikompressori (kuva 4) tuottaa paineilmaa (max. 10 – 13 bar) hydraulitehosta. Hydraulikompressorin pääkomponentit ovat hydraulimoottori, 3-tievirrnsäätöventtiili, ilmajäähdytin, kompressori, imuilmasuodatin, painemittari, painekytkin, paineenrajoitusventtiili sekä ilmasäiliönä toimiva runko. Mobilekoneen hydrauliteho muunnetaan hydraulimoottorilla mekaaniseksi tehoksi, joka siirretään kompressoriin. Tällöin mekaaninen teho muunnetaan paineilmaksi. Syntyvää paineilmaa voidaan käyttää erilaisten paineilmatyökalujen kuten paineilmapulttipyssyn tehonlähteenä.



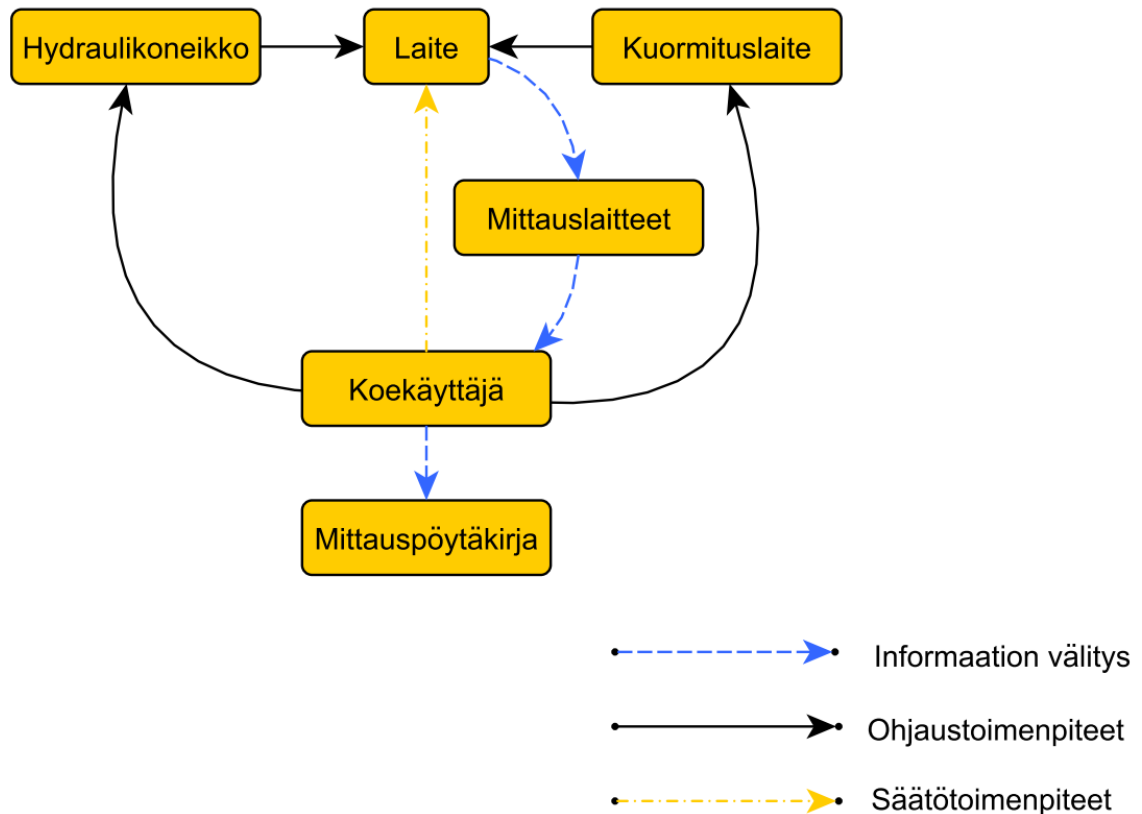
**Kuva 4.** *HK 450 Hydraulikompressori [2].*

### 2.3 Vanha testausmenetelmä ja testausjärjestelmä

Dynaset Oy:n hydraulilaitteet ovat tähän mennessä testattu perinteisellä hydraulikoneikolla. Koekäytettävien hydraulilaitteiden tarvitsema hydrauliteho tuotetaan hydraulikoneikolla, joka vastaa periaatteessa asiakkaan mobilekoneen hydraulijärjestelmää. Koekäytön tarkoituksena on testata laitteen toimivuus ja suorituskyky kokoonpanon jälkeen ennen tuotteen lähettämistä asiakkaalle. Tehdyt testit dokumentoidaan käsin mittauspöytäkirjaan, joka varastoidaan kyseisen tuoteperheen kansioon. Kun laite tulee huoltoon,

niin sen mittaustiedot voidaan tarvittaessa tarkistaa arkistoidusta mittauspöytäkirjoista, mutta mittaustulosten etsiminen voi olla melko haastavaa.

Vanhassa testausmenetelmässä itse koekäyttäjää on avainasemassa testin onnistumisen, luotettavuuden sekä testin hyväksymisen osalta. Kuvassa 5 on esitetty testausmenetelmän osalliset tekijät: koekäyttäjää, hydraulikoneikko, laite, kuormituslaite, mittauslaitteet sekä mittauspöytäkirja.



**Kuva 5.** Vanha testausmenetelmä.

Kuvassa 5 on esitetty kolme erilaista signaalia: Informaation välitys, ohjaustoimenpiteet sekä säätötoimenpiteet. Koekäyttäjää ohjaa hydraulikoneikkoa ja kuormituslaitetta. Hydraulikoneikko taas ohjaa laitetta ja kuormituslaite tuottaa kuormituksen laitteelle. Koekäyttäjää voi tehdä laitteelle myös tarvittavia säätötoimenpiteitä ennen varsinaisen koekäytön aloittamista. Mittauslaitteet mittaavat tuotteen ominaisuuksia kuten vesipumpun veden painetta ja tilavuusvirtaa. Antureiden mittausinformaatio välittyy koekäyttäjälle antureiden mittaritauluista. Koekäyttäjää taas välittää arvioimansa mittaustuloksen mittauspöytäkirjaan tietyllä lukematarkkuudella.

Testin alkaessa koekäyttäjää kytkee laitteeseen tarvittavat hydrauliletkut, kuormituslaitteen sekä mittauslaitteet testattavan hydraulilaitteen mukaan. Koekäyttäjää käynnistää hydraulikoneikon virtakytkimestä ja ohjaa 4/3-suuntaventtiilillä hydraulioöljyn laitteelle. Tämän jälkeen koekäyttäjää tekee laitteelle tarvittavat alkusäädöt esimerkiksi asettaa pai-

neenrajoitusventtiilin oikean avautumispaineen. Sen jälkeen suoritetaan varsinainen tuotteen koekäyttö eri kuormitusasteilla suunnittelijoiden laatimien työohjeiden mukaan. Koekäytössä esimerkiksi mitataan generaattorin sähkösuureita (jännite, virta, taajuus) eri kuormitustasoilla 0 – 100 % ja mittausarvot kirjataan mittauspöytäkirjaan. Testin jälkeen koekäyttäjä irroittaa laitteesta hydrauliletkut, kuormituslaitteen sekä mittauslaitteet ja arkistoi mittauspöytäkirjan hyväksytyn koekäytön jälkeen.

Koekäyttäjä vaikuttaa testin mittaustarkkuuteen suuresti, sillä hänen täytyy päättää mikä on mittausarvo, jos anturin näyttämä värähtelee. Lisäksi mittaustarkkuuteen vaikuttaa vielä anturin mittaustarkkuus, jolloin virheet kertaantuvat. Uudella testausjärjestelmällä saadaan eliminointua koekäyttäjän vaikutus (systemaattinen virhe) mittausarvoihin ja näin mittaustuloksista saadaan objektiivisia. Automaattiseen testausjärjestelmään siirryttäessä täytyy myös arvioida tiedonkeruulaitteiston, anturien kalibroinnin sekä ohjelmiston aiheuttamat mahdolliset mittausepävarmuudet.

Vanha testausmenetelmä voidaan jakaa 6 päävaiheeseen:

1. **Aloitustoimenpiteet:** Laitteeseen kytketään tarvittut hydrauliletkut, anturit ja kuormituslaite.
2. **Käynnistetään** hydraulikoneikko ja ohjataan hydraulioöljy tuotteelle.
3. **Tehdään tarvittavat alkusäädöt** (esimerkiksi paineenrajoitusventtiilin säätö).
4. **Suoritetaan varsinainen koekäyttö** työohjeiden mukaan ja kirjataan mittausulokset mittauspöytäkirjaan.
5. **Lopetustoimenpiteet:** puretaan instrumentoinnit.
6. Arkistoidaan mittauspöytäkirja.

### 2.3.1 Vanha hydraulikoneikko

Hydraulikoneikko on rakenteeltaan perinteinen kuormantunteva **LS-järjestelmä** (engl. *load sensing system*), jossa tilavuusvirta voidaan asettaa mekaanisesti 0 – 107 l/min ja paine sähköisesti (potentiometri) 0 – 280 bar. Hydraulikoneikon nimellinen käyttöteho on 22 kW. Hydraulikoneikossa on kaksi painelinjaa, yksi tankkilinja sekä yksi vuotolinja. Kaikki liittynät on varustettu pikaliittimillä, jolloin testattavan laitteen kytkeminen käy nopeasti. Tankkilinja menee jäähdyttimen kautta paluusuodattimelle ja sieltä tankkiin. Vuotolinja menee paluusuodattimen ohi suoraan tankkiin, jolloin siihen voidaan kytkeä testattavan laitteen vuotolinja tarvittaessa. Vuotolinjaan voidaan myös erehdyksessä kytkeä testattavan laitteen tankkilinja, jolloin öljysäiliöön palaavaa öljyä ei suodateta. Vanhan hydraulikoneikon hydraulikaavio ja osaluettelo ovat esitetty liitteessä A.

Hydraulikoneikon pääkomponentit ovat säätötilavuushydraulpumppu, sähkömoottori, mekaanisesti ohjattu 3/2-suunta-proportionaaliventtiili, mekaanisesti ohjattu 4/3-suunta-venttiili, sähköisesti ohjattu paineenrajoitusproportionaaliventtiili, vesijäähdytin, öljysäiliö, paluusuodatin, erillinen suodatuspiiri sekä koneikon ohjaamiseen käytettävä sähkökaappi.

Sähkömoottorilla tuotetaan käyttöteho kuormantuntevalle LS-ohjatulle säätötilavuuspumpulle, joka tuottaa testattaville laitteille hydraulitehon. LS-ohjattu säätötilavuuspumppu pyrkii pitämään LS-paineen ja pumpun paineen välisen paine-eron tehtaalla asetetussa 14 bar:ssa. Pumpulta saatava tilavuusvirta asetetaan mekaanisesti ohjatulla 3/2-suunta-proportionaaliventtiilillä, jonka yli oleva paine-ero vaikuttaa LS-säätimen paine-eroventtiilin karan molemmin puolin. Pumpun LS-säädin pyrkii pitämään karan yli olevan paine-eron ja siten 3/2-suunta-proportionaaliventtiilin läpi virtaavan tilavuusvirran vakiona suuntaventtiilin avautumasta riippumatta. Paine-ero pysyy vakiona, kun pumpattavan öljyn määrää lisätään tai lasketaan kuormituksen mukaan pumpun vinolevyn kulmaa säätämällä. Tällöin saavutetaan lähes vakio tilavuusvirta kuormituksesta riippumatta.<sup>1</sup>

Mekaanisesti ohjatulla 4/3-suuntaventtiilillä ohjataan öljy joko P1- tai P2-painelinjaan (erikokoiset letkut koekäytön nopeuttamiseksi), johon koekäytettävä hydraulilaite on liitetty. Kyseisessä suuntaventtilissä on sisäinen paineenrajoitusventtiili, joka toimii samalla järjestelmän pääpaineenrajoitusventtiilinä. Pumpun paineleikkurin sekä paineenrajoitusproportionaaliventtiilin peittäessä suuntaventtiilin sisäisen paineenrajoitusventtiili suojaa järjestelmää ylipaineelta.

Sähköisesti ohjatulla paineenrajoitusproportionaaliventtiilillä asetetaan järjestelmän sekä LS-paineen maksimiarvo kuhunkin testitilanteeseen sopivaksi (väliltä 0 – 280 bar). Sähköisesti ohjatun paineenrajoitusproportionaaliventtiilin avautumispaine on aseteltavissa potentiometrillä, jolloin avautumispaine on helposti säädettävissä. Paineenrajoitusproportionaaliventtiiliä ohjataan ohjainkortilla, jonka ohjausjännite on 0 – 10 V ja käyttöjännite 24 V. Ohjausjännite asetetaan hydraulikoneikon sähkökaapissa olevalla potentiometrillä, jolloin 0 – 10 V vastaa 0 – 280 bar. 10 V ohjausjännitteellä proportionaaliventtiilin josta painava levy liikkuu maksimiasentoonsa magneettikelan magneettikentän vaikutuksesta. Tällöin saavutetaan maksimijousipaine, johon järjestelmän paine voi maksimissaan nousta. Venttiilissä on myös virhetilanteiden varalle sisäinen mekaaninen paineenrajoitus 315 bar asti.

Hydrauliöljyn vesijäähdytin huolehtii öljyn oikeasta käyttölämpötilasta. Kun öljyn lämpötila ylittää tietyn asetusarvon, niin jäähdytinnestettä ohjaava 2/2-suuntaventtiili avataan. Tällöin jäähdytysneste alkaa kiertämään vesijäähdyttimen läpi ja samalla öljyn lämpötila laskee.

Öljysäiliö toimii järjestelmän hydrauliöljyn varastona, ilman erottimena sekä osittaisena jäähdyttimenä. Säiliöön on kiinnitetty paluusuodatin koekäytettävältä laitteelta palaavan

---

<sup>1</sup> Vertaa 2-tievirransasäätöventtiiliin, tässä painekompensointi tehdään pumpun säätimessä. Mekaanisesti ohjattu 3/2-suunta-proportionaaliventtiili toimii mittakuristimena.



öljyn suodatukseen. Säiliössä on lisäksi pinnankorkeusanturit öljyn tason valvontaan sekä lämpötila-anturi lämpötilan valvontaan.

Hydraulikoneikossa on myös erillinen suodatuspiiri, jossa vakiotilavuushydraulipumpulla pumpataan säiliössä olevaa öljyä erillisen suodattimen läpi. Tällöin öljyn puhtaus saadaan pidettyä riittävällä tasolla, kun suodattimien vaihdosta huolehditaan.

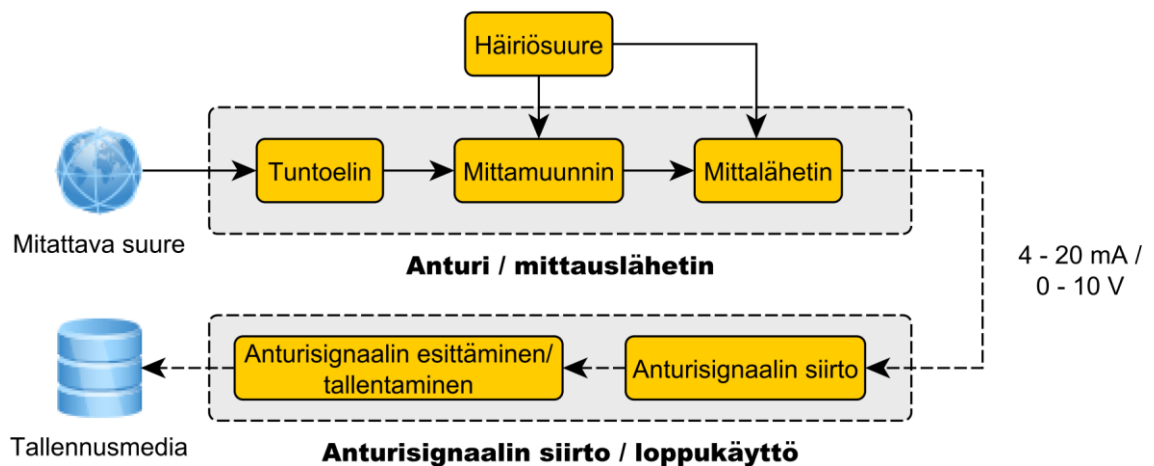
Hydraulikoneikon sähkökaapissa on kytkimet koneikon käynnistämiseen ja sammuttamiseen sekä monitorit järjestelmän paineen, tilavuusvirran ja lämpötilan tarkkailuun. Sähkökaapissa on myös hätäseis-kytkin ja kytkimet painerampin suorittamiseen. Painerampilla järjestelmän paine voidaan nostaa rampilla ylös pumpun paineleikkurin asetusarvoon asti ja takaisin alas. Sähkökaappiin on kytketty myös vikavalot erilaisten häiriöiden näyttämiseen. Sähkökaapin etupaneelissa on potentiometri, jolla säädetään järjestelmän maksimipainetaso testitilanteeseen sopivaksi.

## 2.4 Mittaustekniikka

### 2.4.1 Anturin rakenne, toiminta ja luokittelu

Suureiden mittaamiseen käytettävä anturi on laite, joka muuntaa mitattavan suureen (esimerkiksi lämpötilan) siihen verrannolliseksi standardianturisignaalksi [3, s. 7]. Konepaja- ja prosessitekniikassa antureita käytetään prosessin osana mittaamaan haluttua suuretta, kuten painetta tai tilavuusvirtaa. Anturin lähettämää mitta-arvoa voidaan käyttää prosessin säätämiseen (esimerkiksi tilavuusvirran säätöön), jolloin tietyllä toimilaitteella säädetään tilavuusvirtaa mitta-arvon mukaan joko suuremmaksi tai pienemmäksi.

Anturin rakenne on esitetty lohkokaaaviona kuvassa 6. Lohkokaaaviossa on esitetty anturin pääkomponentit: tuntoelin, mittamuunnin ja mittalähetin.



**Kuva 6.** Anturin rakenteen lohkokaaavio [3, s. 7-8; 4, luku 4.1 s. 4; 5, s. 4-7].

Tuntoelin on suorassa kosketuksessa mitattavan suuren esimerkiksi paineen kanssa. Tuntoelin välittää mitattavan suureen mittamuuntimelle, joka muuntaa suureen arvon sähkösuureeksi, kuten jännitteeksi. Tuntoelimen ja mittamuuntimen muodostamasta kokonaisuudesta käytetään yleisesti nimitystä anturi (*engl. transducer*). Mittalähetin muokkaa lähetettävän signaalin parempaan muotoon vahvistamalla alkuperäisen signaalin standardianturisignaaliksi (0 – 10 V tai 4 – 20 mA). Esimerkiksi termoparien tyypillinen ulostulo on muutamia millivoltteja, joten anturisignaalia täytyy vahvistaa ennen signaalin lähettämistä tiedonkeruulaitteistolle, jotta signaali mitattaisiin oikein eikä siihen tule suuria häiriöitä. Usein myös mittalähetin on integroitu anturiin ja tästä tuntoelimen, mittamuuntimen sekä mittalähtetimen muodostamasta kokonaisuudesta käytetään nimitystä mittauslähetin (*engl. transmitter*), jonka yleisnimenä käytetään yleensä ja myös tässä diplomityössä sanaa anturi. Antureita käytettäessä täytyy pitää mielessä, että anturin mittausarvoon vaikuttavat aina erilaiset häiriöt, jotka sisältyvät mittausprosessiin tai ovat prosessin ulkopuolisia häiriöitä. Häiriöt vaikuttavat itse mittausprosessiin, signaalin siirtoon ja tallentamiseen. [5, s. 4–7].

Anturimallista riippuen siihen voidaan vielä ajatella kuuluvan tuntoelimen, mittamuuntimen sekä mittalähtetimen lisäksi kaksi osiota: anturisignaalin siirto- sekä anturisignaalin käyttöosiot [5, s. 4–7]. Yleisesti anturisignaaleja luetaan etäällä antureista, jolloin signaalin siirtämiseen käytetään kierrettyä parikaapelia, coaxiaalikaapelia tai esimerkiksi 4-johdinkaapelia [6, s. 486; 7]. Sähkökaapelin siirtämä anturisignaali muunnetaan lopulliseen käyttökelpoiseen muotoon paneelimitarissa tai tiedonkeruuyksikössä. Muunnoksessa sähkösuure muunnetaan vastaamaan mitattavan suureen lopullista yksikköä. Esimerkiksi virtaviesti (4 – 20 mA) muunnetaan bar yksikkömuotoon anturille laskettujen skaalausparametrien avulla. Luonnollisesti anturisignaali täytyy ensin kuitenkin muuntaa analogiadigitaalimuunnoksella eli AD-muunnoksella (luku 2.4.3) digitaalisignaaliksi, jotta anturisignaalia voidaan käsitellä tiedonkeruujärjestelmällä.

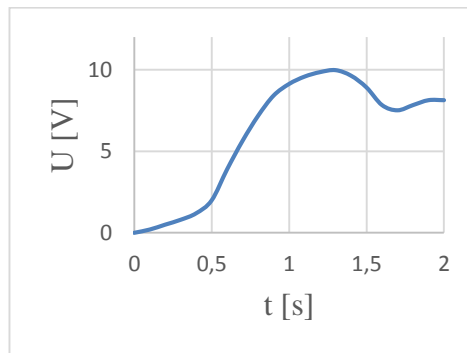
Joissakin antureissa on kiinteä näyttö ja mittausdatan tallentamismahdollisuus, jolloin anturiin voidaan ajatella kuuluvan kuvan 6 mukaiset osiot (5 kpl). Perinteisesti prosessiteollisuudessa käytetään kuitenkin aiemmin kuvattua anturia, joka koostuu 3:sta osiosta ja lopullinen mittausdata käytetään prosessista kauempana.

Anturit voidaan jakaa kahteen ryhmään niiden energiankäytön perusteella: passiivinen tai aktiivinen anturi [5, s. 12–14]. Passiivinen anturi ei tarvitse mittaamisen suorittamiseen ulkoista energialähdettä. Esimerkkinä on elohopealämpötila-anturi, jossa anturin toiminta perustuu elohopean lämpölaajenemiselle ympäristön lämpötilan muuttuessa. Aktiivinen anturi taas tarvitsee ulkoista energiaa mittauksen suorittamiseen. Esimerkkinä ovat kaikki sähköenergialla toimivat anturit, kuten sähköinen paineanturi. Aktiivinen anturi tarvitsee useamman sähköjohdon käyttöenergian kuljettamiseen, kun passiivinen anturi tarvitsee sähköjohdon vain anturisignaalin siirtämiseen.

Anturit voidaan jakaa myös anturisignaalin perusteella kahteen ryhmään: analogiseen ja digitaaliseen. Analogianturi lähettää jatkuvaa mittaustietoa ja digitaali-anturi lähettää diskreettiä askelmaista tilatietoa. [6, s. 6].

## 2.4.2 Analogisen anturisignaalin siirto

Anturin tuottama anturisignaali voidaan siirtää tiedonkeruujärjestelmälle jatkuvana analogia-, kaksitilaisena digitaali- tai aikaviestinä. Yleisimmin käytetyt signaalin siirtotavat ovat analogiset jännite- sekä virtaviestit. Jänniteviesti on näistä yksinkertaisempi, mutta se on alttiimpi ulkoisille häiriöille, joten prosessiteollisuudessa käytetään yleisimmin virtaviestiä. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki jatkuvasta analogiasignaalista 0 – 10 V. Kuvasta nähdään, että analoginen signaali antaa jatkuvaa tietoa mitattavasta suureesta.



**Kuva 7.** Analoginen signaali.

Yksinkertaisin signaalin siirtotapa on anturisignaalin siirtäminen jatkuvana vaihtelevana analogisena jänniteviestinä [5, s. 246]. Analogisen jänniteviestin amplitudi sisältää mittauksen arvon. Mitattu suure yleensä muunnetaan jo anturissa vaihtelevaksi sähkösuureeksi, joten on luonnollista välittää signaali eteenpäin sellaisenaan tai vahvistettuna. Mitatessa esimerkiksi painetta mittausalueella 0 – 100 bar voidaan käyttää anturia, joka lähettää anturisignaalin jänniteviestinä 0 – 10 V. Anturisignaalin heikkeneminen tulee ottaa huomioon etenkin jänniteviestiä käytettäessä ja signaalinsiirtomatkojen ollessa suuria (satoja metrejä). Pidemmällä signaalinsiirtomatkoilla johtimien resistanssi kasvaa ja samalla jännitesignaali heikkenee [5, s. 246]. Tästä johtuen todellinen mittaussarvo voi vääristyä liikaa tiedonkeruuyksikön päässä, joten mittaussarvo usein vahvistetaan anturissa ennen anturisignaalin lähettämistä.

Signaalin heikkenemistä ei esiinny pitkälläkään siirtomatkoilla (satoja metrejä), kun käytetään analogista vaihtelevaa virtaviestiä anturisignaalin siirtoon [9, s. 248]. Signaali ei heikkene, koska johtimien resistanssi ei vaikuta virran suuruuteen. Virtaviesti on myös häiriösietoisempi verrattuna jänniteviestiin, koska johtimen virran muuttamiseen vaaditaan paljon energiaa ulkopuolelta [4, luku 4 s. 37]. Prosessiteollisuudessa yleisimmin käytetty virtaviesti on 4 – 20 mA [8, s. 81]

Häiriösietoisuuden lisäksi virtaviestiä käytetään anturisignaalin siirtoon prosessiteollisuudessa, koska virtaviestillä voidaan havaita johtokatkokset ja yhdistämisongelmat [9, s. 248–249]. Nollatilassa virtaviestiä lähettävän anturin ulostulo on 4 mA ja johdon katketessa ulostulo putoaa arvoon 0 mA. Tällöin tiedonkeruuyksikkö tulkitsee anturin näyttämän johtokatkokseksi.

Virtaviestiä käytettäessä anturin muodostama jänniteviesti muunnetaan anturissa jännitevirtamuuntimella virtaviestiksi. Jännitevirtamuuntimessa on kaksi jänniteohjattua virtalähdettä, joista toinen tuottaa jatkuvan 4 mA käyttövirran ja toinen tuottaa mitattuun jännitteeseen verrannollisen virran väliltä 0 – 16 mA [5, s. 247–248]. Näiden kahden virtalähteen yhteenlaskettu virtaviesti on väliltä 4 – 20 mA. Muodostettu virtaviesti siirretään tiedonkeruuyksikölle, jossa virtaviesti yleensä muunnetaan operaatiovahvistimella tehtävällä virta-jännitemuunnoksella jänniteviestiksi.

Sähköisissä signaaleissa on ongelmana mittaussignaaliin indusoituvat häiriöt. Häiriöitä voi indusoida anturisignaaliin mittausjohtojen lähellä olevista virtakaapeleista ja magneettilähteistä kuten sähkömoottoreista sekä muista sähkömagneeteista. Häiriöiden indusoitumista voidaan estää suojaamalla kaapelit maadoitetulla metallikuorella [5, s. 246]. Tämä tarjoaa korkean suojan häiriöiden indusoitumista vastaan. Häiriösietoisuutta voidaan parantaa muuttamalla analogiaviesti pulssinleveys- tai taajuusmoduloinnilla aika- viestiksi [4, luku 4 s. 36]. Signaalinsiirtoon voidaan käyttää myös optiikkaa, joka on signaalinsiirtotavoista häiriösietoisin.

Analogiset standardiviestit on kerätty taulukkoon 1. Jännite- ja virtaviestien yleisimmin käytetyt standardiviestit ovat 0 – 10 V ja 4 – 20 mA.

**Taulukko 1.** Analogiset standardiviestit [4, luku 4 s. 37].

Jänniteviesti	Virtaviesti
0 – 10 V	0 – 20 mA
0 – 5 V	4 – 20 mA
1 – 5 V	
-5 – +5 V	
-10 – +10 V	

### 2.4.3 Analogisen anturisignaalin käsittely

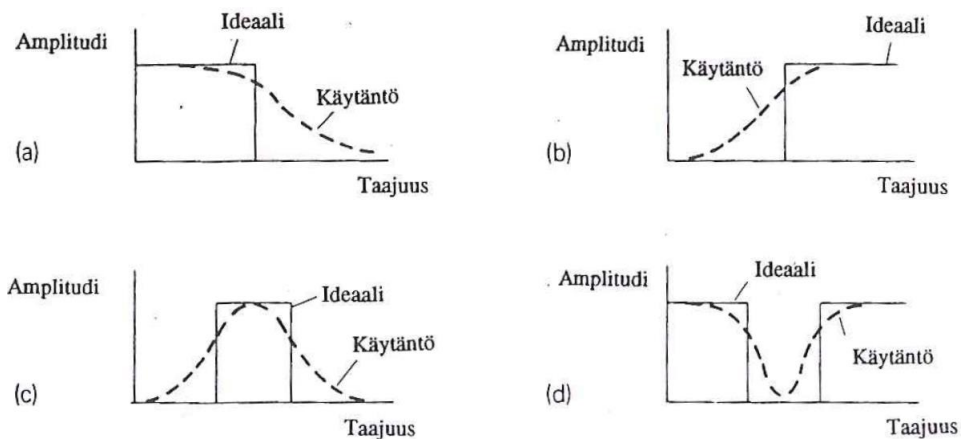
Analogisen anturisignaalin ominaisuuksiin kuuluu että se sisältää häiriöitä ja on harvoin sellaisenaan käyttökelpoinen tiedonkeruujärjestelmälle. Tällöin signaalia täytyy käsitellä, jotta anturin mittaustuloksista saadaan luotettavat. Seuraavaksi käydään läpi erilaisia signaalinkäsittelyoperaatioita, kuten mm. vahvistaminen, jännitealueen muuttaminen, suodatus, signaalin modulaatio, eristäminen ja analogiadigitaalimuuntaminen.

**Vahvistamisessa** anturisignaali vahvistetaan operaatiovahvistimella tiedonkeruukortille sopivaan käyttökelpoiseen muotoon [3, s. 47; 4 luku 4 s. 37–43]. Esimerkiksi termoparit

antavat ulostulona noin 5 mV viestiä, joten heikko anturisignaali kannattaa vahvistaa kertoimella 2000. Tällöin anturisignaali ( $5 \cdot 2000 \text{ mV} = 10 \text{ V}$ ) on käyttökelpoisempi 0 – 10 V mittausaluetta käyttävälle tiedonkeruukortille.

**Jännitealueen muuttamista** käytetään, jotta anturisignaali vastaisi tiedonkeruukortin mittausaluetta [3, s. 47; 4, luku 4 s. 45]. Esimerkiksi  $\pm 0,5 \text{ V}$  anturisignaalilla ja 0 – 1 V mittausalueella (tiedonkeruukortti), anturin lähettämään anturisignaaliin lisätään + 0,5 V. Tällöin mittausarvo tulkitaan oikein tiedonkeruukortilla.

**Suodatuksella** voidaan poistaa ei-toivotut häiriöt anturisignaalista [3, s. 47; 4, luku 4 s. 45–49]. Käytännössä häiriöitä ei voida täysin poistaa, mutta niiden amplitudia voidaan madaltaa, jolloin häiriöiden vaikutus mittaus-signaaliin on vähäinen. Kuvassa 8 on esitetty yleisimpien suodattimien ideaaliset ja reaaliset toimintatavat. Kuvassa on esitetty ali- (a) sekä ylipäästösuodatin (b), kaistanpäästö- (c) ja kaistanestosuodatin (d).



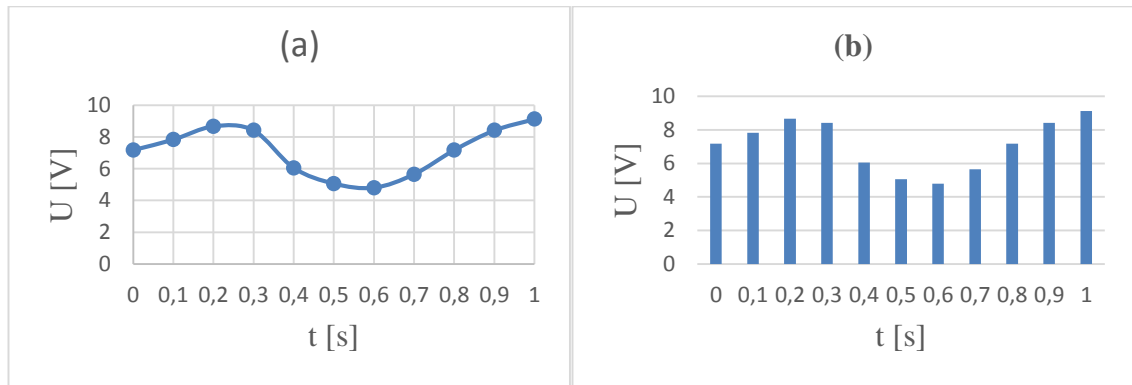
**Kuva 8.** Alipäästösuodatin (a), ylipäästösuodatin (b), kaistanpäästösuodatin (c) sekä kaistanestosuodatin (d) [4, luku 4 s. 45].

Alipäästösuodatin (a) päästää lävitseen vain tiettyä taajuutta matalammat anturisignaalit. Ylipäästösuodatin (b) päästää lävitseen vain tiettyä taajuutta korkeammat anturisignaalit. Kaistanpäästösuodatin (c) päästää lävitseen vain tietyn taajuusalueen anturisignaalit. Kaistanestosuodatin (d) suodattaa anturisignaalista tietyn taajuusalueen pois ja läpäisee muun taajuusalueen anturisignaalit.

**Signaalin modulaatiota** käytetään, jos alkuperäinen anturisignaali vääristyy voimakkaiden häiriöiden takia liian paljon anturisignaalin siirron aikana [3, s. 47; 5, s. 248–249]. Tällöin signaali muunnetaan analogisesta viestistä aikaviestiksi eli pulsseiksi, jolloin pulssit välittävät mittaustuloksen tiedonkeruujärjestelmälle. Pulssintaajuusmodulaatiossa (*engl. Pulse Frequency Modulation, PFM*) pulssien amplitudi ja pituus ovat vakioita, mutta lähetystaajuus on verrannollinen anturisignaaliin [3, s. 47; 5, s. 249]. Pulssinleveysmodulaatiossa (*engl. Pulse Width Modulation, PWM*) pulssien amplitudi ja taajuus ovat vakioita, mutta pulssien leveys on verrannollinen anturisignaaliin [3, s. 47]. Pulssi-jonot voidaan siirtää sähköisesti tai optoelektronisesti valokaapelia pitkin.

**Eristämisessä** anturi- ja ohjauslaitepiiri eristetään sähköisesti toisistaan, jolloin ohjauslaitepiirissä voidaan välttyä anturipiirin aiheuttamilta jännitepiikeiltä [3, s. 47; 4, luku 4 s. 43]. Näin saadaan suojattua arvokkaat mittauskomponentit. Eristämisen tarkoituksena on estää eri jännitelähteistä tehonsa saavien komponenttien sähköinen yhteenkytkeytyminen, josta seuraa häiriöitä anturisignaaliin.

**Analogiadigitaalimuunnosta eli AD-muunnosta** tarvitaan analogisten anturisignaalien muuntamiseen digitaaliseen muotoon digitaalisia tiedonkeruulaitteita varten [4, luku 4 s. 50; 10, s. 69–100; 11, s. 58]. AD-muunnoksessa on kaksi vaihetta: näytteenottovaihe ja mittaustuloksen kvantisointivaihe. **Näytteenottovaiheessa** analogiasignaalista otetaan mittausrvoja talteen tasavälein näytteenottoajan  $T_s$  tai näytteenottotaajuuden  $f_s = 1/T_s$  mukaisin väliajoin (kuva 9 (a)) [8, s. 128; 10, s. 69]. Näytteenoton tuloksena saadaan diskreetti aikainen signaali, joka voidaan esittää impulssijonona (kuva 9 (b)).



**Kuva 9.** Analogiasignaalin näytteistäminen (a) ja diskreetti aikaisen signaalin (b) muodostaminen, muokattu lähteestä [8, s. 129; 10, s. 70].

Kuvasta havaitaan, että esimerkksignaalin näytteenottotaajuus on  $f_s = 10$  Hz (kuva 9 (a)). Näytteistä on muodostettu diskreetti aikainen impulssijono, jonka impulssit kuvaavat mittausrvoa näytteenottohetkellä (kuva 9 (b)).

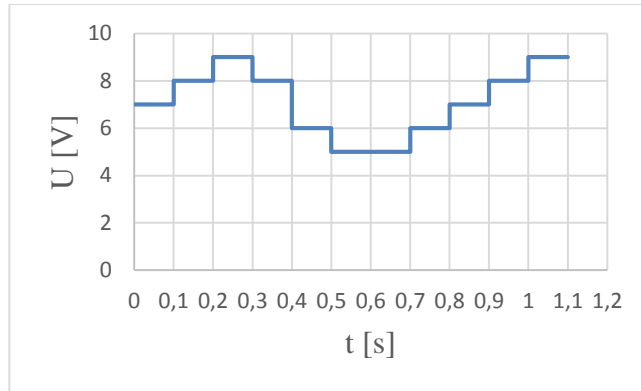
**Kvantisointivaiheessa** (katso kuva 10) impulssijono muunnetaan digitaaliseen binäärimuotoon, jossa kukin mittausrvo kuvataan tietyn suuruisen lukuna AD-muuntimen tarkkuuden mukaan [10, s. 72–74]. Kvantisoinnissa tapahtuu aina pyöristysvirhettä, joka riippuu itse AD-muuntimen resoluutiosta eli bittisyydestä ja anturin mittausalueesta. Pyöristysvirhettä kuvataan lauseella

$$q_k = \frac{U_i}{N} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2^n}, \quad (1)$$

jossa  $q_k$  on kvantisointitarkkuus,  $U_i$  on mittausrvo,  $N$  on digitaalisignaalin tilojen määrä ( $2^n$ ),  $V_{\max}$  on mittausrvoalueen yläraja,  $V_{\min}$  on mittausrvoalueen alaraja ja  $n$  on bittien luku-

määrä [10, s. 72–74]. Esimerkiksi 16-bittisellä AD-muuntimella ja 0 – 10 V anturisygnalia lähettävällä paineanturilla (0 – 400 bar) kvantisointitarkkuus  $q_k$  on  $q_k = \frac{U_i}{N} = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^n} = \frac{10\text{ V} - 0\text{ V}}{2^{16}} = \frac{10\text{ V}}{65536} = 0,000153\text{ V}$ .

Tästä saadaan kvantisointitarkkuudeksi bar yksikössä  $q = \frac{400\text{ bar} \times 0,000153\text{ V}}{10\text{ V}} = 0,0061\text{ bar}$ .



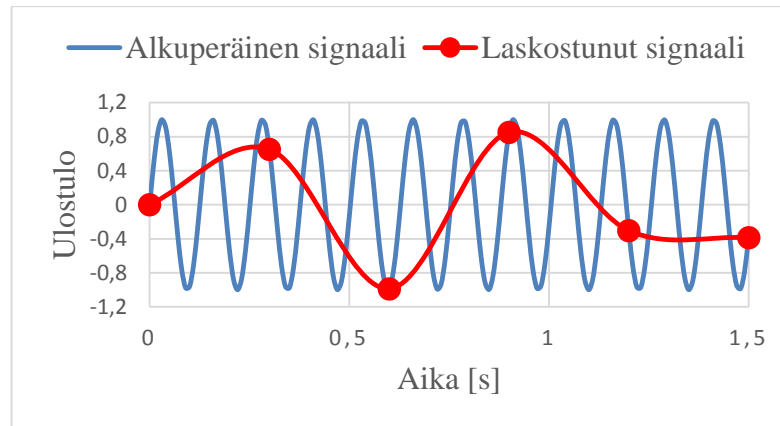
**Kuva 10.** Mittausarvojen kvantisointi, muokattu lähteestä [3, s. 63; 8, s. 128; 10 nawrocki s. 70].

Kuvassa esitetään kvantisoinnin jälkeinen digitaalinen signaali, joka on muodostettu alkuperäisestä analogiasignaalista. Kuvaa 10 ja 9 (b) vertaamalla nähdään alkuperäiseen mittausarvoon syntyvä kvantisointivirheen aiheuttama muunnosvirhe. Näytteenottohetkellä kukin mittausarvo esitetään mittausarvoa lähimpänä olevalla luvulla (bitillä), jolloin syntyy kvantisointivirhe. Tässä kuvassa kvantisointivirheenä on käytetty ylikorostetusti arvoa 1 V, jotta ilmiö on helposti havaittavissa.

Näytteenottovaiheessa oikean näytteenottotaajuuden valinta on tärkeässä roolissa, jotta mitattava prosessi kuvautuu oikein. Kun näytteenottotaajuus on liian pieni verrattuna mitattavan signaalin taajuuteen, tapahtuu taajuuden **alinäytteistyminen eli laskostuminen** (engl. *aliasing*) [8, s. 130–131; 10, s. 70–71; 12, s. 86–87]. Tällöin signaali vääristyy ja anturilla mitattu signaali näyttää täysin erilaiselta verrattuna oikeaan mitattavan suureen oloarvoon. Shannonin näytteistysteoreeman mukaan miniminäytteenottotaajuus  $f_s$  lasketaan kaavasta

$$f_s > 2 \times f_u, \quad (2)$$

jossa  $f_u$  on prosessissa esiintyvä korkein mitattu taajuus [10, s. 70]. Kuvassa 11 on havainnollistettu laskostumisilmiö. Kuvasta havaitaan, että käytettäessä liian pientä näytteenottotaajuutta kuvautuu mitattava signaali taajuudeltaan täysin erilaiseksi verrattuna mitattavan signaalin todelliseen oloarvoon.



**Kuva 11.** Laskostumisilmiö käytettäessä liian pientä näytteenottotaajuutta, muokattu lähteestä [3, s. 64].

Shannonin mukaan laskostumista ei pääse syntymään, kun näytteenottotaajuus on vähintään kaksi kertaa isompi kuin korkein esiintyvä taajuus. Käytännön nyrkkisääntönä voidaan pitää 5 – 10 kertaista näytteenottotaajuutta [3, s. 64; 4, luku 6 s. 14]. Laskostuminen voidaan estää myös käyttämällä alipäästösuodatinta ennen näytteistämistä. Tällöin alipäästösuodattimen rajataajuudeksi valitaan laskostumistaajuutta riittävästi pienempi arvo (engl. *anti-aliasing filter*) [8, s. 131; 12, s. 87].

AD-muuntimen tärkeitä parametreja ovat muun muassa: resoluutio, muunnosaika sekä analogiasignaalin mittausalue [10 nawrocki, s. 86–87]. AD-muuntimen resoluutio kuvaa analogiasignaalin esittämistarkkuutta tietyllä bittimäärällä. Jos AD-muunnin on 16 bittinen, niin käytössä  $2^{16} = 65536$  kpl bittejä mittausalueen esittämiseen.

Muunnosaika kuvaa AD-muunnokseen kuluvaa aikaa. Suurempi muunnosaika aiheuttaa suuremman viiveen signaaliin. Muunnosaika riippuu AD-muunnintyypistä.

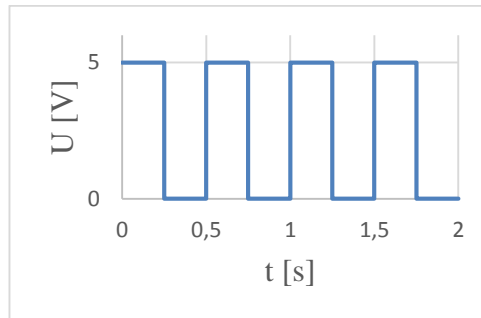
AD-muuntimen mittausalue antaa tiedon millaista anturisygnäalia kyseinen AD-muunnin voi käsitellä. AD-muunnin voi mallista riippuen käsitellä esimerkiksi jänniteviestejä (0 – 10 V) tai virtaviestejä (4 – 20 mA).

#### 2.4.4 Digitaalisen anturisygnäalin siirto

Digitaalinen anturisygnäali on diskreetin mittaus-tiedon siirtoa jännitepulssijonoilla. Digitaalisygnäalin siirrossa analoginen anturisygnäali muunnetaan ensin AD-muuntimella digitaaliseen binäärimuotoon (katso luku 2.4.3). Tämän jälkeen digitaaliviesti siirretään pulssijonoina eteenpäin, jolloin tasaleveillä jännitepulssilla kuvataan binääritilat 0 ja 1. Digitaalisen anturisygnäalin siirtämiseen on käytössä useita eri protokollia, mutta niiden peruseriaate on sama: Kuvataan binääritilat tietyillä jännitetasoilla, joista päätellään onko tila 0 vai 1 [5, s. 260]. Yleensä jännitetaso on +5 V järjestelmätyypistä riippuen [11, s. 58]. Tällöin +5 V jännite tarkoittaa binääri 1:tä ja 0 V jännite binääri 0:aa. Kuvassa 12



on esimerkki digitaalisesta signaalista. Kuvasta ilmenee, että digitaalinen signaali koostuu perättäisistä 5 V pulssisekvensseistä.



**Kuva 12.** Digitaalinen signaali.

Koska jänniteviestinsiirrossa esiintyy häiriöitä, niin on sovittu tietyt säännöt protokollasta riippuen digitaaliviestin siirtoon ja lukemiseen. Viestinvastaanottopäässä jänniteamplitudi väliltä 2 – 5 V tulkitaan 1-bitiksi ja 0 – 1 V jänniteamplitudi tulkitaan 0-bitiksi [11, s. 58]. Jännite väli 1 – 2 V on määrittelemätöntä aluetta [11, s. 58]. Näin ollen signaalin vaimentuminen ja häiriöiden indusoituminen ei ole niin merkittävää digitaaliviestin siirrossa verrattuna häiriöherkempään analogia-anturisignaalin siirtoon. Suurien häiriölähteiden lähellä voidaan käyttää häiriösietoisempaa korkeataajuisia pulssintaajuusmodulaatiota tai valokuitua signaalin siirtämiseen tiedonkeruujärjestelmälle [5, s. 260].

Digitaalianturit voidaan jakaa viiteen eri ryhmään:

- kaksi-,
- kolmi-,
- nelijohdinanturit,
- pulssi- sekä
- sarjaliikenneanturit.

**Kaksijohdinanturit**, kuten mekaaniset rajakytkimet, lämpötilakytkimet ja painekytkimet ovat yksinkertaisimpia digitaaliantureita [4, luku 4 s. 51]. Mekaaninen rajakytkin välittää yksinkertaista päällä/pois tilatietoa, jolloin anturin ollessa kytkettynä signaali menee kytkimen läpi ja kytkemättömänä signaali ei mene kytkimen läpi. Näin voidaan esimerkiksi tunnistaa jonkin komponentin läsnäolo.

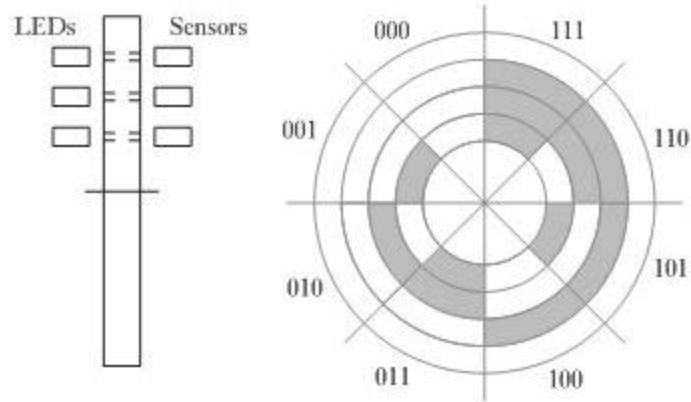
**Kolmijohdinantureita** ovat useimmat induktiiviset ja kapasitiiviset sekä valosähköiset anturit [4, luku 4 s. 51–52]. Antureissa on erillinen tyypillisesti +24 V jännitteensyöttö elektroniikkaosalla ja ne ovat joko PNP- tai NPN-tyyppiä. PNP-anturi on niin sanottu positiivista jännitettä kytkevä anturi ja NPN-anturi on negatiivista jännitettä kytkevä anturi [4, luku 4 s. 52]. Esimerkiksi valosähköinen PNP-tyyppinen anturi lähettää +24 V pulssin, kun se havaitsee valon. NPN-tyyppinen anturi taas lähettää 0 V pulssin eli se ohjaa signaalin maahan kohteen havaitessaan.

**Nelijohdinantureissa** jännitteen syöttö ja signaalin siirto on erotettu toisistaan eri sähköpiireihin. Häiriöiden esiintyminen on vähäistä, koska syöttö ja signaalin siirto ovat erotettu eri piireihin. Nelijohdinanturissa mittaussignaali johdetaan releen käämiin ja varsinainen anturisignaali saadaan releen kärkien johtimista [4, luku 4 s. 52].

Älykkäitä **sarjaliikenneantureita** tarvitaan anturisignaalin koostuessa luvuista tai muuten suuresta datamäärästä, kuten kuvankäsittely tai tarraimen puristusvoiman säätö [4, luku 4 s. 52]. Älykkäitä sarjaliikenneantureita käytetään muun muassa mobilekoneissa, joissa tiedonsiirto suoritetaan väylää (*engl. bus*) käyttämällä. Väylässä voidaan siirtää monen eri anturin mittaustietoja samaa kaapelia pitkin, jolloin jokaiselle anturille ei tarvitse vetää omaa sähköjohtoa ja näin antureita voidaan kytkeä paljon joustavammin tiedonkeruujärjestelmään [6, s. 490]. Uusien anturien lisääminen väylään on helppoa, sillä ainoastaan ohjelmistoon täytyy tehdä muutos uudesta anturista eikä pitkiä kaapeleita tarvitse vetää. Lisäksi järjestelmää ei tarvitse sammuttaa anturin lisäämisen ajaksi.

**Pulssianturia** käytetään aseman tai pyörintänopeuden laskentaan. Pulssianturia varten täytyy olla 1 tai useampia kanavia anturin mallista riippuen. Pulssianturit voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: inkrementti- ja absoluuttiantureihin [12, s. 34]. Inkrementtiantureissa on yleensä 2 – 3 kanavaa pulssien siirtoon, jolloin ensimmäisen kanavan pulsseista lasketaan asema ja/tai nopeus ja ensimmäisen sekä toisen kanavan pulssien välisestä vaihekulmasta lasketaan pyörintäsuunta [4, luku 4 s. 52]. Kolmatta kanavaa voidaan käyttää lähtöaseman ja täysien kierroksien laskemiseen.

Absoluuttianturi eli koodianturi koostuu yleensä valosähköisistä antureista ja koodikiekosta, jossa kiekon säteen suunnassa on eri vyöhykkeillä lomittain valoa läpäiseviä reikiä. Valo suunnataan kiekkoa kohti ja läpäisevät valonsäteet aktivoivat kyseisen vyöhykkeen anturit ja aktiivisten antureiden perusteella saadaan binäärimuodossa kiekon asema yksikäsitteisesti [5, s. 534–537; 12, s. 35–36]. Koodianturi tarvitsee yhtä monta kanavaa kuin koodikiekossa on vyöhykkeitä. Kuvassa 13 on esitetty 3-bittisen koodianturin rakenne. Kiekon radiaalisuunnassa on kolme vyöhykettä, joilla kullakin oma valon lähteensä ja valosensorinsa. Kiekko on jaettu 8 erilaiseen osioon, joissa eri vyöhykkeet joko läpäisevät tai eivät läpäise valoa. Muodostuva 3-bittinen anturi merkitsee, että kiekon asema voidaan esittää  $2^3$  bitin tarkkuudella.



Kuva 13. Absoluutti- eli koodianturin rakenne [12, s. 35].

## 2.4.5 Digitaalisen anturisignaalin käsittely

Digitaaliset anturisignaalit ovat yleensä sellaisenaan käyttökelpoisia, koska nykyaikaiset tiedonkeruulaitteistot ovat jo itsessään digitaalisia ja niissä voidaan suoraan hyödyntää digitaalinen signaali. Digitaaliset anturisignaalit tarvitsevat harvoin jatkokäsittelyä niiden ominaisuuksien takia. Digitaalisten anturisignaalin käsittelyssä yleisimpiä menetelmiä ovat digitaaliansalogiamuunnokset eli DA-muunnokset, signaalin eristäminen ja suodattaminen.

**DA-muunnos** muuntaa digitaalisen anturisignaalin analogiamuotoon, joka on käyttökelpoinen ohjattaessa esimerkiksi perinteistä suuntaproportionaaliventtiiliä. DA-muunnos on vastakkainen tapahtuma luvussa 2.4.3 esitetyllä AD-muunnoksella, jossa analogia- viesti muunnettiin digitaaliviestiksi. DA-muuntimen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat muuntoresoluutio, tarkkuus, asettumisaika sekä muunt nopeus. **Muuntoresoluutio** on ulostulosignaalin alue jaettuna digitaalisignaalin tilojen määrällä ja se lasketaan samalla tavalla kuin kvantisointitarkkuus (kaava 2) AD-muunnoksen yhteydessä. Nyt vain mitausalueen sijasta käytetään tiedonkeruukortin ulostuloaluetta osoittajassa. Muuntoresoluutio  $q_m$  lasketaan kaavasta

$$q_m = \frac{U_o}{N} = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^n}, \quad (3)$$

jossa  $U_o$  on I/O-kortin ulostuloalue,  $V_{max}$  on ulostulon maksimi- ja  $V_{min}$  ulostulon minimijännite,  $N$  on digitaalisignaalin tilojen määrä, joka voidaan lausua yhtälöllä  $2^n$ , jossa  $n$  on bittien määrä [10, s. 74–75]. Yleensä DA-muuntimen resoluutiota kuvataan muuntimen bittien lukumäärällä. Esimerkiksi 16-bittisen DA muuntimen, jonka ulostulosignaali on 0 – 10 V, muuntoresoluutio  $q_m$  on  $q_m = \frac{10V}{2^{16}} = \frac{10V}{65536} = 152,59 \mu V$ .

DA-muuntimen **tarkkuus** ilmoitetaan absoluuttisena tai suhteellisena virheenä. Absoluuttivirhe on todellisen ulostulon ja ideaalisen ulostulon välinen erotus. Suhteellinen virhe lasketaan absoluuttivirheen ja ulostuloalueen suhteena. [10, s. 74–75].

DA-muuntimen **asettumis aika** on digitaalisignaalin muutoksen ja tätä seuraavan analogiaulostulon asettumiseen kuuluva aika [10, s. 76]. Analogiasignaalin katsotaan asettuneen, kun se on saavuttanut arvonsa  $\pm 0,01$  % tarkkuudella ja asettumis aika mitataan yleensä mikro- tai nanosekunneissa.

DA-muuntimen **muunt nopeus** ilmoittaa kuinka monta muunnosta muunnin pystyy tekemään sekunnissa [10, s. 76]. DA-muunnosaika ilmoitetaan yksikössä näytettä per sekunti [SPS]. DA-muunnin malleista yleisimpiä ovat niin sanotut vastusjakajat (jännite tai virta) sekä pulssin kestoaikaa moduloivat DA-muuntimet.

Signaalin **eristämistä** käytetään ohjausjärjestelmän suojaamiseen signaalijohtimissa esiintyviltä jännitehuipuilta. Digitaalisen anturisignaalin eristämiseen käytetty yleisin menetelmä on optoeristäminen. Optoeristämässä signaalijohtimeen liitetään LED (*engl. Light Emitting Diode*) ja tulopiiriin fototransistori, joka reagoi valoon [4, luku 4 s. 53]. Näin signaali siirretään optoeristimessä valona, joka muunnetaan vastaanottopäässä fototransistorin avulla sähkösignaaliksi. Optoeristämisen avulla signaalijohdin saadaan eristettyä tiedonkeruujärjestelmästä.

**Digitaalisen anturisignaalin suodattamiseen** tarkoitetut suodattimet voidaan jakaa karkeasti kahteen päätyyppiin: FIR-suodattimiin (*engl. Finite Impulse Response*) ja IIR-suodattimiin (*engl. Infinite Impulse Response*). Tutustutaan ainoastaan tässä testausjärjestelmässä käytettyyn rekursiiviseen yksinapaiseen digitaalisuodattimeen (FIR-suodattimen eräs rakenne). Rekursiivisuodattimen ulostuleva suodatettu signaali lasketaan kaavalla

$$S_{o(n)} = \alpha S_{i(n)} + \beta S_{o(n-1)} = \alpha S_{i(n)} + (1 - \alpha) S_{o(n-1)}, \quad (4)$$

jossa  $S_{i(n)}$  on anturilta tuleva anturisignaali,  $\alpha$  on suodattamattoman anturisignaalin painokerroin,  $\beta$  on edellisen suodatetun anturisignaalin painokerroin, joka voidaan lausua myös muodossa  $\beta = 1 - \alpha$ ,  $S_{o(n-1)}$  on edellinen suodatettu signaali ja  $S_{o(n)}$  on rekursiivisuodattimesta ulostuleva suodatettu signaali [4, luku 4 s. 48–49; 5, s. 146]. Suodatuksen painokertoimen  $\alpha$  muuttaminen vaikuttaa siihen kuinka paljon painotetaan suodattamatonta anturisignaali ja kuinka paljon painotetaan edellistä jo suodatettua anturisignaalia. Suurella painokertoimella  $\alpha$  painotetaan nykyistä suodattamatonta anturisignaalia  $S_{i(n)}$  ja pienellä painokertoimella painotetaan jo suodatettua edellistä anturisignaalia  $S_{o(n-1)}$ . Yleensä painokertoimen arvo on  $\alpha \leq 1$ .

#### 2.4.6 Anturisignaalin staattiset ja dynaamiset ominaisuudet

Anturisignaaleja käsiteltäessä täytyy tuntea anturisignaaleihin liittyvät staattiset ja dynaamiset ominaisuudet, jotta osataan valita oikeat anturit tietyn prosessin mittaamiseen sekä tiedetään kuinka anturisignaali käyttäytyy. Anturisignaalin staattisia ominaisuuksia ovat staattinen tarkkuus, toistotarkkuus, herkkyys, lineaarisuus, erotustarkkuus, erotuskynnys,

hystereesi, nollapisteen virhe, herkkyuden virhe, ryömintävirhe. Anturisignaalin dynaamisia ominaisuuksia ovat dynaaminen virhe ja vasteaika.<sup>2</sup>

**Staattisella tarkkuudella** (*engl. accuracy*) tarkoitetaan anturin ilmoittaman mitta-arvon ja todellisen oloarvon välistä eroa [5, s. 17–18; 6 s. 13; 12, s. 23]. Absoluuttivirhe kuvaa staattista tarkkuutta ja se lasketaan mitatun arvon ja todellisen oloarvon erotuksena. Myös suhteellinen virhe kuvaa anturin staattista tarkkuutta ja se lasketaan absoluuttivirheen ja todellisen oloarvon suhteena [6, s. 13]. Anturin suhteellinen virhe ilmoitetaan yleensä prosentteina anturin täydestä mitta-alueesta (FSO) (*engl. Full-Scale Output*) tai prosentteina anturin oloarvosta. Virhearvoista käytetään suurempaa arvoa [3, s. 57]. Esimerkiksi paineanturin tarkkuuden ollessa 1 % FSO täydestä mitta-alueesta ja mitta-alueen ollessa 0 – 400 bar, niin anturin mitta-arvo voi poiketa todellisesta oloarvosta  $400\text{bar} \times 0,01 = \pm 4\text{ bar}$ .

**Toistotarkkuudella** (*engl. repeatability*) tarkoitetaan anturin kykyä toistaa sama mitta-arvo peräkkäisissä mittauksissa, kun mittaolosuhteet (ympäristö, käyttäjä, ...) pidetään vakioina [5, s. 18–19; 6, s. 14; 12, s. 24–25]. Yleensä anturin toistotarkkuus on suurempi kuin absoluuttinen staattinen tarkkuus.

**Herkkyydellä** (*engl. sensitivity*) tarkoitetaan anturin ulostuloalueen sekä anturin mitta-alueen välistä suhdetta tietyssä pisteessä ja se lasketaan kaavasta

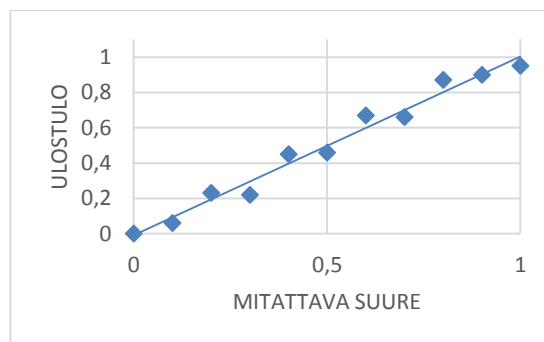
$$S(x_a) = \frac{dy}{dx}, \text{ kun } x = x_a, \quad (5)$$

jossa  $S$  on anturin herkkyys kohdassa  $x_a$ ,  $y$  on anturin ulostuloalue ja  $x$  on anturin mitta-alue [6, s. 15]. Esimerkiksi jänniteviestillä 0 – 10 V sekä paineanturilla, jonka mitta-alue on 400 bar, saadaan herkkyudeksi  $S = \frac{10\text{V}}{400\text{bar}} = 0,025\text{V}/\text{bar}$ . Tällöin paineen ollessa 100 bar anturin ulostulo on  $100\text{ bar} \times 0,025\text{ V}/\text{bar} = 2,5\text{ V}$ .

**Mitta-alueella** (*engl. range*) tarkoitetaan anturin minimi ja maksimi mitta-arvoja, jotka anturi on suunniteltu mittaamaan [5, s. 20–21; 6, s. 16–17; 12, s. 24–25]. Esimerkiksi paineanturin mitta-alue on 0 – 400 bar, niin anturilla voi minimissään mitata 0 bar ja maksimissaan 400 bar ylipainetta.

**Lineaarisuudella** tarkoitetaan anturin kalibroidun lähtöviestin poikkeamaa ideaalisesta suorastaviivasta [5, s. 20; 6, s. 13; 12, s. 23]. Lineaarisuuden määrittelyyn on esitetty monia eri tapoja, joita löytyy kirjallisuudesta. Kuvassa 14 on piirretty ideaalinen suora anturin mitta-alueesta ja sen ulostulosta.

<sup>2</sup> Anturisignaalin staattisista ja dynaamisista ominaisuuksista lisätietoa lähteistä [6, s. 12–36; 5, s. 17–33].



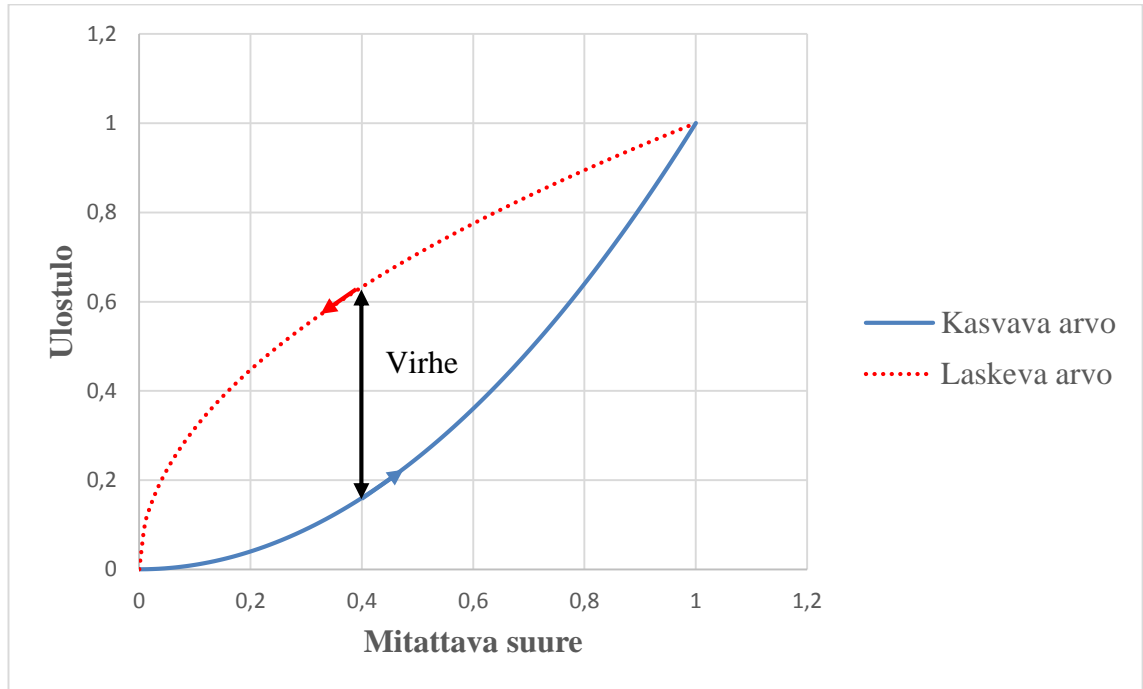
**Kuva 14.** Anturin lineaarisuus, muokattu lähteestä [5, s. 21].

Mittausanturin mittausarvot harvoin osuvat täsmällisesti suoralle vaan ne poikkeavat staattisen tarkkuuden rajoissa ideaalisuorasta mittaussuureen vaihdellaessa 0:sta mittaustuloksen maksimiarvoon. Tästä ilmiöstä käytetään nimitystä anturin lineaarisuus.

**Erotustarkkuudella eli resoluutiolla** tarkoitetaan pienintä muutosta mittausarvossa, joka aiheuttaa anturin ulostuloon muutoksen [4, luku 4 s. 1; 5, s. 22; 12, s. 25]. Esimerkiksi öljyn tilavuusvirta-anturin resoluution ollessa 1 L/min ja virtauksen muuttuessa arvosta 10 L/min arvoon 12,5 L/min, muuttuu anturin ulostulo vasta kun öljyn virtaus ylittää arvon 11 L/min.

**Errotuskynnnyksellä** (*engl. thresold*) tarkoitetaan pienintä mittausarvoa, jonka ylittyessä anturin ulostulo alkaa kasvamaan, kun mitattava suure kasvaa asteittain nolasta [4, luku 4 s. 1; 5, s. 22]. Esimerkiksi auton nopeusmittarien erotuskynnys on yleensä noin 15 km/h. Tällöin autolla kiihdytettäessä 0:sta 50 km/h alkaa nopeusmittarin ulostulo muuttumaan, kun auton vauhti ylittää arvon 15 km/h.

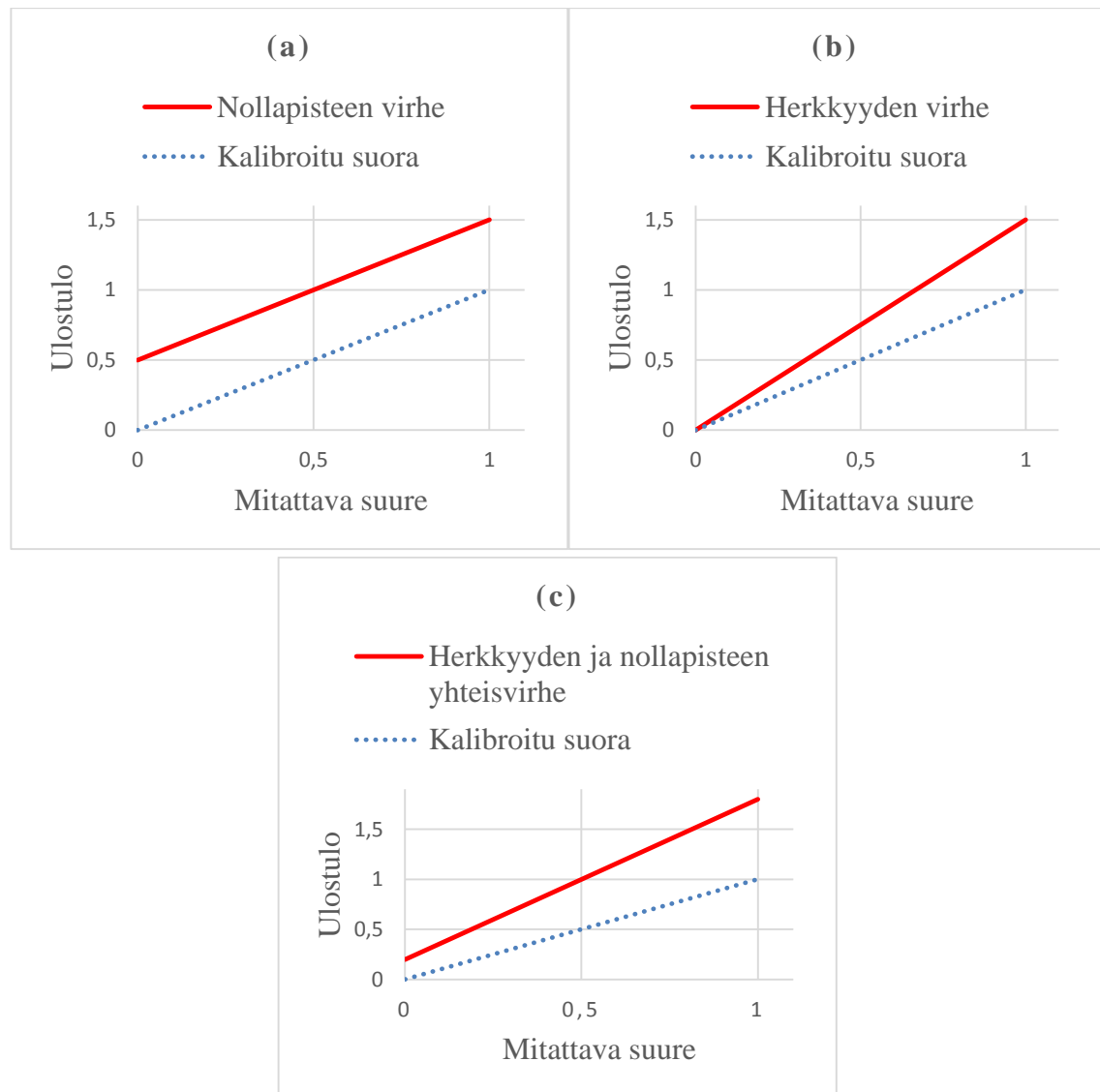
**Hystereesillä tarkoitetaan** anturin ulostulosten välistä eroa samalla mittausarvolla, kun mittalaitetta luetaan nousevaan ja laskevaan suuntaan [4, luku 4 s. 25–26; 5, s. 58; 12, s. 24]. Kuvassa 15 on esitetty hystereesi ilmiö. Kun mittausarvoa aluksi kasvatetaan lähtöarvosta ja pienennetään takaisin samaan arvoon, niin anturin ulostulot poikkeavat toisistaan. Tätä arvojen poikkeavuutta kutsutaan hystereesiksi. Hystereesiä esiintyy yleensä antureissa, joissa käytetään jousia [5 s. 25]. On myös havaittu, että hystereesiä esiintyy laitteissa, joissa kitkavoimat ovat erisuuret erisuuntiin liikuttaessa [5, s. 25].



**Kuva 15.** *Hystereesin ilmentyminen antureissa, muokattu lähteestä [5, s. 25].*

**Nollapisteen virhe** (*engl. zero drift*) tarkoittaa olosuhteiden muutoksesta syntyvää anturin ulostulon poikkeamaa nollassa, kun mitattava suure on nolla [6, s. 15]. Nollapisteen virhe syntyy olosuhteiden, kuten lämpötilan poiketessa kalibrointitilanteesta [5, s. 22–25]. Kuvassa 16 (a) on havainnollistettu nollapisteen virhe. Esimerkiksi lämpötilan ollessa eri verrattuna kalibrointilämpötilaan, siirtyy anturin nollapiste ja anturin ulostuloon tulee pysyvä nollapisteen virhe.

**Herkkyiden virhe** (*engl. sensitivity drift*) tarkoittaa olosuhteiden muutoksesta johtuvaa anturin herkkyiden muuttumista [5, s. 22–25; 6, s. 15]. Kuvassa 16 (b) on havainnollistettu herkkyiden virhe. Kuvasta huomataan, että anturin herkkyiden muuttuessa ulostuloarvo poikkeaa kalibroidusta arvosta. Esimerkiksi lämpötilan muutos aiheuttaa anturin herkkyiden muutoksen. Lämpötilan muutos vaikuttaa jousen ominaisuuksiin, koska kimmomoduuli on lämpötilasta riippuva. Tällöin jousia hyödyntävissä antureissa havaitaan virhettä herkkyiden muuttuessa lämpötilan poiketessa kalibrointilämpötilasta. Nollapisteen ja herkkyiden virheiden yhteisvaikutus on esitetty kuvassa 16 (c). Kuvasta havaitaan, että nollapisteen virhe aiheuttaa anturin ulostuloon pysyvän vakiovirheen ja herkkyiden virhe aiheuttaa anturin ulostuloon muuttuvan virheen.



**Kuva 16.** Nollapisteen virhe (a), herkkyyden virhe (b) sekä herkkyyden ja nollapisteen yhteisvirhe (c), muokattu lähteestä [5, s. 23].

**Ryömintävirhe** (engl. *drift*) kuvaa anturin tarkkuuden muutosta pitkän ajan kuluessa [3, s. 58; 11, s. 11]. Anturin ominaisuudet muuttuvat muun muassa käytön, kulumisen ja likaantumisen johdosta.

**Anturin dynaamisia** ominaisuuksia ovat dynaaminen virhe ja anturin vasteaika. Nämä dynaamiset ominaisuudet kuvaavat anturin käyttäytymistä, kun sillä mitataan ajan mukaan muuttuvaa suuretta. **Dynaaminen virhe** on anturin näyttämän ja suureen todellisen arvon välinen ero, kun staattinen virhe on nolla [6, s. 21]. Dynaaminen virhe kuvaa anturin näyttämien eroa kahdessa eri tilanteessa: staattisen ja dynaamisen suureen mittaamisen yhteydessä anturin näyttämät poikkeavat toisistaan, vaikka suureen todellinen arvo on sama sekä staattisessa että dynaamisessa mittaustilanteessa [6, s. 21]. Tätä sanotaan dynaamiseksi virheeksi. Dynaaminen virhe on yleensä hitausvirhe, koska sen aiheuttavat mittaustilanteiden osien ja näiden kytkentöjen mekaaniset, termiset ynnä muut inertiaat (hitaudet) [8, s. 169].



Anturin **vasteaika** kuvaa kuinka nopeasti anturi reagoi mitattavan suureen muutokseen [6, s. 21]. Anturin dynaamisia ominaisuuksia voidaan tarkastella mittaamalla ajan mukaan muuttuvaa suuretta. Anturilla voidaan mitata esimerkiksi impulssi-, askel- tai ramppisignaali ja tarkastella anturin reagoimista muuttuvaan signaaliin [6, s. 21].

### 2.4.7 Anturisignaalin siirtoon vaikuttavat häiriöt

Anturisignaalit ovat perinteisesti heikkotehoisia sähköisiä signaaleita, jolloin anturisignaalin siirtoon vaikuttavat häiriöt voivat aiheuttaa merkittäviäkin virheitä mittaustulokseen [8, s. 143]. Tarkastellaan seuraavaksi signaalin siirtoon vaikuttavia häiriöongelmia, jotka voidaan jakaa kolmeen perustekijään: häiriölähde, häiriön kytkeytyminen ja laitteen häiriön sietokyky.

**Häiriölähde** on sähköinen lähde, jonka sähkömagneettinen kenttä aiheuttaa virheitä anturisignaaliin. Häiriölähteen poisto on paras menetelmä poistaa anturisignaalin siirron häiriöitä, mutta se ei ole aina mahdollista. Pienillä mittaustaajuuksilla tavallisimpia häiriönlähteitä ovat

- voimavirtajohdot,
  - solenoidit ja releet,
  - muuntajat,
  - moottorit
- sekä radiotaajuuksilla
- radiopuhelimet ja muut lähettimet,
  - loisteputket,
  - staattisen varauksen purkaukset ja
  - ukkonen.

Solenoidiventtiilien varustaminen diodeilla, kipinöinnin poisto ohjausreleistä tai voimavirtajohdinten suojaaminen saattaa poistaa häiriöitä merkittävästi.

**Häiriön kytkeytymisessä** häiriölähde kytkeytyy anturisignaalin siirtoon signaalijohtimien tai virransyöttöpiirin kautta tai säteilemällä. Kytkeytymisen estämiseksi täytyy kiinnittää huomiota asennus- ja kytkentäratkaisuihin jo suunnitteluvaiheessa. Kytkeytyminen voi tapahtua galvaanisesti, induktiivisesti, kapasitiivisesti tai säteilemällä.

Galvaaninen kytkeytyminen tapahtuu, kun suurivirtaisilla ja pienivirtaisilla piireillä on yhteisiä virtateitä (esim. vahvistinten tulopiirit). Tällaisia rakenteita tulee varoa ja tämän vuoksi suositellaan muun muassa signaalinkäsittelylaitteille käytettäväksi stabiloitua virtalähdettä. Samoja virtalähteitä ei tule käyttää releiden syöttöön tai muihin tarkoituksiin, joissa esiintyy suuria virta-arvoja tai äkillisiä muutoksia. Lisäksi vahvistimien syöttövirta tulee viedä signaalipiireistä erillisenä eikä esim. yhteistä maatasoa pitkin. [8, s. 145].

Induktiivinen kytkeytyminen tapahtuu magneettikentän välityksellä, kun virran vaihtelut indusoivat piirissä esiintyviin silmukoihin jännitteitä [8, s. 145]. Induktiivinen kytkeytyminen voidaan estää välttämällä silmukoita sähköpiirin rakenteessa. Silmukka syntyy esimerkiksi maadoittamalla johdin molemmista päistä ja samalla myös piirin maavirrat aiheuttavat galvaanisesti kytkeytyvän häiriön [8, s. 145]. Signaalijohtimien kiertämistä käytetään kaapeleissa, koska muodostuvat silmukat ovat mahdollisimman pienet ja jokaisessa silmukassa magneettikentät kumoutuvat, kun lähekkäin kulkevissa signaalijohtimissa kulkee yhtä suuri virta eri suuntiin [3, s. 50]. Tällöin magneettikentän indusoima jännite (häiriö) jää mahdollisimman pieneksi.

Kapasitiivinen kytkeytyminen syntyy sähköpiirien välisten hajakapasitanssien seurauksena. Hajakapasitanssien kautta siirtyy virtaa, kun piirien jännitteet muuttuvat. Kapasitiivista kytkeytymistä voidaan välttää, kun esimerkiksi voimavirtajohdot ja signaalijohdot sijoitetaan mahdollisimman kauas toisistaan ja eri kaapelihyllyille. Signaalijohtimien metallivaipan maadoittamisella voidaan myös suojata signaalijohtimia kapasitiiviselta kytkeytymiseltä. [8, s. 145].

Sähköpiirin suojaaminen suoraan säteilemällä kytkeytyviltä häiriöiltä vaatii sähköpiirin erottamista sähkömagneettisista kentistä [8, s. 145]. Tällöin voidaan käyttää sähköä hyvin johtavaa metallikotelointia, jolloin myös kotelon ulkopuolelle jäävät johtimet vaativat suojauksen.

**Laitteen häiriönsietokykyyn** tulee kiinnittää huomiota häiriö alttiissa ympäristössä [3, s. 52]. Häiriöisessä ympäristössä on pyrittävä käyttämään laitteita, jotka luontaisesti sievät hyvin häiriöitä, kun häiriönlähteitä ei voida poistaa. EMC-hyväksytyjä laitteita (*engl. Electromagnetic Compatibility*) tulee suosia häiriöalttiissa ympäristössä.

## 2.5 Suureiden mittaaminen

Suureiden mittaamiseen on olemassa erinäisiä ohjeita sekä tapoja kirjoissa ja standardeissa kuten SFS 5059, jossa määritellään suurelta osin kaikki tähän työhön liittyvät suureiden mittaamenetelmät ja niiden reunaehdot. Standardia voidaan soveltaa prosessiteollisuudessa yleisimpien instrumenttien sijoittamisessa prosessiin, mutta varsinaisia asennusohjeita se ei sisällä. Asennustekniset tarkemmat vaatimukset on esitetty PSK-käsikirjan 2 standardeissa. Tässä rajoitutaan diplomityön kannalta oleellisiin suureisiin.

### 2.5.1 Yleiset instrumentointi vaatimukset, SFS 5059

Instrumenttia sijoitettaessa prosessiin tulee instrumentti sijoittaa siten, että ulkoisilta mekaanisilta iskuilta vältytään. Ympäristöolosuhteet sekä käyttö- ja mahdolliset huoltotoiminnot tulee ottaa huomioon asennuspaikkaa valittaessa. Lisäksi sijoituspaikan kustannusvaikutukset ja viranomais määräykset tulee huomioida. Mittauslaitetta sijoitettaessa tulee selvittää saavutetaanko valitulla asennustavalla ja anturilla sovellukselta vaadittu

mittaustarkkuus. Instrumentin sijoitusta tärkeeseen kohteeseen tulee välttää ja instrumentin ympärillä tulee olla riittävä tila huoltoa sekä asennusta ajatellen. [13, s. 3].

## 2.5.2 Paineen mittaaminen ja mittausvaatimukset

Paine on prosessiteollisuuden toiseksi yleisin mitattava suure lämpötilan jälkeen. Paineen mittauksella selvitetään hydraulijärjestelmän kuormitus tilanne yhdessä virtausmittauksen kanssa. Paine on kohtisuorasti tiettyyn pinta-alaan kohdistuva voima jaettuna alueen alalla, johon voima kohdistuu. Paine määritellään kaavalla

$$p = \frac{F}{A}, \quad (6)$$

jossa  $p$  on paine ja  $F$  on voima, joka kohdistuu kohtisuoraan tiettyyn pinta-alaan  $A$  [14, s. 468]. Tässä osiossa tutustutaan muutamiin yleisimpiin paineenmittausmenetelmiin ja paineantureihin.

Painetta mitattaessa ja paineanturia valittaessa tulee tietää seuraavat kolme määritelmää: **absoluuttipaine**, **mittaripaine** sekä **paine-ero**. Absoluuttipaineella tarkoitetaan nesteen painetta verrattuna absoluuttiseen nollepaineeseen eli tyhjiöön [5, s. 398; 12 s. 42]. Absoluuttipainemittarin mittaama nesteen absoluuttipaine lasketaan kaavasta

$$p_{abs} = p_n + p_i, \quad (7)$$

jossa  $p_n$  on nesteen paine ja  $p_i$  on ympäröivän ilman paine. Absoluuttipaineantureita käytetään korkeus- ja ilmanpainemittareissa.

Mittaripaineella tarkoitetaan nesteen painetta verrattuna ympäröivän ilman paineeseen [5, s. 398; 12, s. 42]. Mittaripaineantureita käytetään esimerkiksi hydraulijärjestelmän sekä renkaan paineen mittaamiseen.

Paine-erolla tarkoitetaan eri pisteen välistä eroa absoluuttipaineessa [5, s. 398; 12, s. 42]. Paine-eroantureita käytetään esimerkiksi ilman virtauksen mittaamiseen kuristimen läpi [12, s. 43].

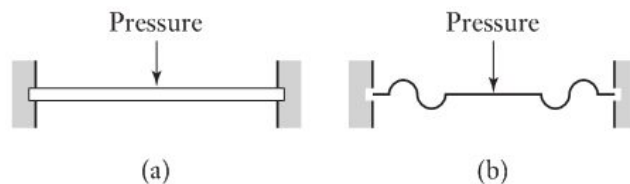
Paineen mittaus perustuu, joko paineen vertaamiseen tunnettuun voimaan tai paineen aiheuttaman elastisen elementin muodonmuutoksen mittaamiseen [6, s. 38]. Tunnettuun voimaan vertaamista käytetään paineantureiden kalibroinnissa esimerkiksi mäntämanometrillä. Mäntämanometrissa tunnetulla massalla luodaan sylinterin avulla tunnettu paine järjestelmään ja mitataan anturin ulostulo. Vertaamalla anturin näyttämää tunnettuun paineeseen saadaan anturi kalibroitua.

Tuntoelimen muodonmuutoksen mittaamiseen on kehitelty monenlaisia mekaanisia, sähköisiä, optisia ja magneettisia menetelmiä [5, s. 398–422; 6, s. 39–88]. Tyypillisimpiä

menetelmiä nesteen paineen mittaamiseen ovat erilaisten kalvojen, kapseleiden, palkeiden ja putkien siirtymän tai taipuman mittaaminen. Muodon muutoksen mittaamiseen perustuvia paineantureita ovat esimerkiksi bourdonputki-, kalvo-, kapseli-, palje-, sekä pietsosähköisetanturit.

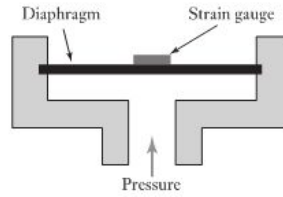
**Bourbonputki** (Eugene Bourbon 1849) on kaareva usein C kirjaimen muotoinen metalliputki, jonka toinen pää on suljettu. Kun suljettuun putkeen johdetaan paineistettu neste, niin putken vapaapää pyrkii suoristumaan [6, s. 40]. Putken vapaan pään liikkeestä saadaan mitattua nesteen paine [6, s. 40]. Tämän tyyppisiä antureita käytetään sekä mekaanisissa että sähköisissä mittareissa. Anturin mittausalue on putken rakenteesta riippuen 0 – 6000 bar ja mittaustarkkuus noin  $\pm 1\%$  FSO [5, s. 403–405].

**Kalvoanturit** (kuva 17) koostuvat joustavasta kalvo-osasta ja kalvon siirtymää mittaavista antureista. Kalvoantureissa paine johdetaan joustavan kalvon toiselle puolelle ja erilaisilla antureilla luetaan **kalvon paikallinen venymä, kokonaissiirtymä tai keskipisteen siirtymä** [6, s. 40]. Kalvon siirtymästä lasketaan kalvoon vaikuttava paine. Anturin kalvo on yleensä metallia, mutta myös muovia ja keraameja voidaan käyttää. Kalvoantureita voidaan käyttää mittausalueilla 0 – 50 bar (absoluuttipaine), 0 – 2000 bar (mittari-paine) sekä 2,5 bar (paine-ero) [5, s. 399]. Älykkäillä kalvoantureilla, jotka sisältävät lineaarisuuden kompensoinnin, voidaan päästä jopa  $\pm 0,1\%$  FSO mittaustarkkuuteen [5, s. 401].



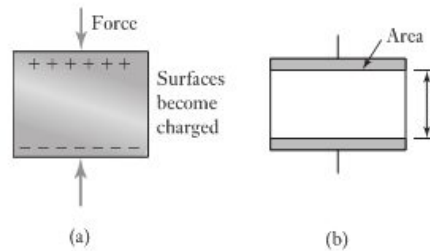
**Kuva 17.** Kalvoanturi [12, s. 42].

Kalvon **paikallisen venymän mittaamiseen** voidaan käyttää kalvoon kiinnitettyä venymäliuska-anturia, jonka resistanssi muuttuu metallikalvon sekä siihen kiinnitetyn venymäliuskan venyessä (kuva 18) [6, s. 80–88]. Tyypillisesti neljä kpl venymäliuska-anturia kytetään Wheatstonen sillan mukaisesti, jolloin sillan ulostulojännite on resistanssin funktio, joka johtuu venymäliuskan venymisestä [4, luku 4 s. 30–31; 5, s. 399–400]. Lämpötilan muuttuessa myös resistanssi muuttuu, mutta Wheatstonen silta tarjoaa rakenteestaan johtuen automaattisesti lämpötilankompensoinnin [4, luku 4 s. 31; 5, s. 400]. Venymäliuska-anturien matalaa ulostuloa täytyy vahvistaa kalliilla dc-vahvistimella, joten tätä korvaamaan on kehitetty pietsosähköiset paineanturit [5, s. 400].



**Kuva 18.** Kalvopaineanturi venymäliuska-anturilla [12, s. 43].

Pietsosähköiset paineanturit (kuva 19) perustuvat pietsosähköiselle materiaalille, joka muodostaa materiaalin molemmille puolille vastakkaiset sähköiset varaukset kappaletta puristettaessa tai venytettäessä [4, luku 4 s. 33; 12, s. 44]. Tällöin kappaleen yli syntyy jännite-ero, jota mittaamalla saadaan kappaleeseen kohdistuva paine selville. Yleisin käytetty pietsosähköinenmateriaali on kvartsikide, joka muodostaa varausjakauman, kun sitä painetaan tai venytetään. Pietsosähköisiä antureita käytetään dynaamisiin mittauksiin suurella taajuudella, koska elektrodeille syntyvä varaus alkaa vuotamaan ja varausero taasoittumaan pidemmän ajan kuluttua [12, s. 45]. Tällöin anturin näyttämä painelukema voi poiketa paljonkin oikeasta mitatusta arvosta.



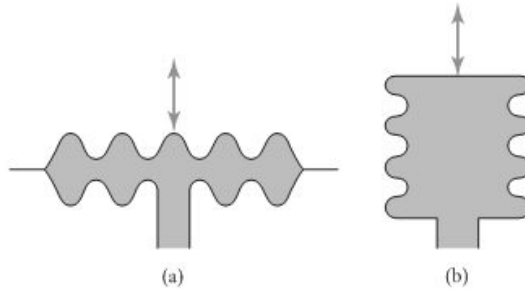
**Kuva 19.** Pietsosähköinen paineanturi [12, s. 44].

Kalvon **kokonaissiirtymän mittaamiseen** voidaan käyttää kapasitiivista-anturia, jossa kalvon siirtyminen mitataan kalvon ja sen lähellä olevan metallilevyn välisestä kapasitanssin muutoksesta [5, s. 401; 6, s. 38; 15, s. 135]. Kapasitiiviset kalvoanturit ovat yleisesti käytettyjä teollisuudessa ja ne tunnetaan nimellä Baratron anturi. Kapasitiivisia kalvoantureita voidaan valmistaa pienille mikrosirulle, joiden koko on pieni ja tarkkuus on noin  $\pm 0,2$  % FSO [5, s. 401]. Kalvon **keskipisteen siirtymän mittaamiseen** voidaan käyttää kalvoon kiinnitettyä tankoa, joka kuormittaa kauempana olevaa venymäliuska-anturia [6, s. 40–41].

**Kapseli-anturit** ovat kalvoantureita, joissa on kaksi aaltomaista kalvoa kiinnitetty toisiinsa (kuva 20 (a)). Aaltomaisten kalvojen siirtymä mitataan samalla tavalla kuin kalvoantureiden yhteydessä. Kapseli-antureiden herkkyyks on parempi verrattuna kalvoantureihin [6, s. 40–41].

**Paljeantureissa** on kiinnitetty toisiinsa kaksi kalvoa, joiden välissä on haitarimainen paineen vaikutuksesta venyvä kalvo (kuva 20 (b)). Palkeen siirtymä mitataan kalvoanturei-

den tapaan ja palkeen siirtymästä lasketaan nesteen paine. Palkeen siirtymä on suuri verrattuna kalvoanturiin, jolloin myös paljeanturin herkkyys on suurempi [6, s. 40–41]. Nykyään elektroniikan kehityttyä päästään kalvoantureilla jo riittävän hyviin tarkkuuksiin ja siten paljeantureiden sekä kapseliantureiden käyttö on vähentynyt niiden kalliiden valmistuskustannusten takia [5, s. 402]. Paljeantureita voidaan käyttää mittausalueilla 0 – 150 bar (mittaripaine) sekä 2,5 bar (paine-ero) [5, s. 402]. Paljeanturilla saavutettava mitaustarkkuus on noin  $\pm 0,5$  % FSO [5, s. 402].



**Kuva 20.** Kapseli- ja paljetyyppiset kalvoanturit [12, s. 43].

Paineen mittaukselle on asetettu tietyt **vaatimukset**, jotka löytyvät standardista SFS 5059. Painetta mitattaessa mittausyhde tulee sijoittaa putkistoon pienimmän virtauksen alueelle ottaen huomioon mahdollisesti sakkautuvat ja kiteytyvät aineet. Myös hydrostaattisen paineen ja dynaamisten häiriöiden aiheuttamat virheet mittaustuloksiin tulee ottaa huomioon. Ennen paineen mittausta tulee olla 5 – 10 d häiriötön putkiosuus ja paineen mittauksen jälkeen tulee olla 2 – 5 d häiriötön putkiosuus (d on putken sisähalkaisija). Mittausyhde varustetaan yleensä sulkuventtiilillä, jotta se voidaan erottaa prosessista ja tarvittaessa vaihtaa. Yhde sijoitetaan standardin SFS 5059 kuvan 2 mukaisesti joko putken päälle tai sivulle kuvan mukaiset asennusperiaatteet ja tilavaraukset huomioiden. Painemittaria sijoitettaessa tulee ottaa huomioon myös mahdollinen alipaineen syntyminen esimerkiksi kuristimien yhteydessä, jolloin mittausanturi voi vaurioitua tai häiriintyä ja antaa virheellistä tietoa. [13, s. 16–17]

### 2.5.3 Tilavuusvirran mittaaminen ja mittausvaatimukset

Virtausmittausta käytetään putkissa virtaavan nesteen tilavuusvirran mittaamiseen erilaisissa prosessiteollisuuden prosesseissa. Tilavuusvirta määritellään kaavalla  $Q = v \times A$ , jossa  $v$  on virtaavan nesteen nopeus ja  $A$  poikkipinta-ala putkelle, jonka sisällä neste virtaa [14, s. 472]. Virtauksen mittaamiseen on kehitetty vuosien saatossa monenlaisia antureita, joiden mittausperiaatteet ja tarkkuudet vaihtelevat suurestikin. Tutustutaan tässä osiossa muutamaa yleisimpiin virtausantureihin, kuten **paine-eroon perustuviin antureihin**, **turbiini-** sekä **tilavuuskammioantureihin**.

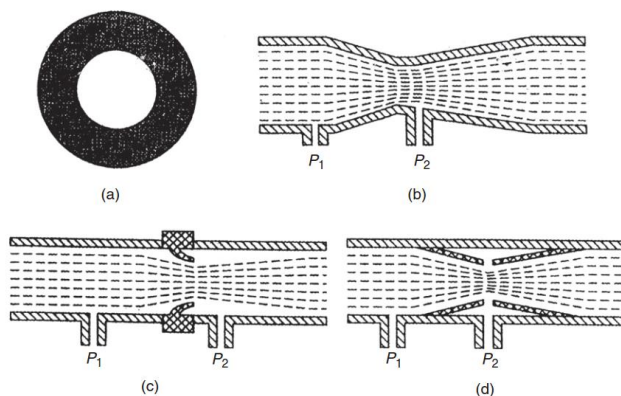
Yksinkertaisin menetelmä tilavuusvirran mittaamiseen on **paine-eroon perustuva** ratkaisu ohjata neste tunnetun muotoisen kuristimen läpi, jolloin kuristimen yli muodostuvasta paine-erosta voidaan laskea nesteen tilavuusvirta. Kuristimen jälkeisen kuroumakohdan (*vena contracta*) tilavuusvirran  $Q_{vc}$  laskemiseen voidaan käyttää Bernoullin yhtälöstä johdettua ja hieman yksinkertaistettua kaavaa

$$Q_{vc} = A_{vc} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_{vc})}{\rho}}, \quad (8)$$

jossa  $A_{vc}$  on kuroumakohdan virtauspoikkipinta-ala [ $m^2$ ],  $p_1$  on paine [Pa] ennen kuristinta,  $p_{vc}$  on paine [Pa] kuristimen jälkeen olevassa kuroumakohdassa ja  $\rho$  on nesteen tiheys [ $kg/m^3$ ] [14, s. 40]. Yhtälöä ei voida sellaisenaan soveltaa kuristinvirtausten laskentaan, sillä kuroumakohdan virtauspoikkipinta-alan ja paineen määrittäminen on käytännön hydraulijärjestelmissä lähes mahdotonta. Kuroumakohdan virtauspoikkipinta-alan sijasta voidaan käyttää helpommin määritettävää kuristimen virtauspoikkipinta-alaa sekä sopivalta etäisyydeltä kuristimesta alavirran puolelta mitattua painetta, kun nämä muutokset otetaan huomioon kokeellisesti määritetyllä kertoimella. Tällöin saadaan turbulentin virtauksen kaava

$$Q = C_d \times A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (9)$$

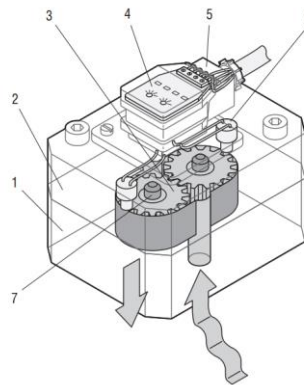
jossa  $C_d$  on kuristimen virtauskerroin [] (*engl. discharge coefficient*),  $A$  on kuristimen pinta-ala [ $m^2$ ],  $\Delta p = p_1 - p_2$  [Pa], jossa  $p_2$  on kuristimen jälkeen oleva paine kohdassa, jossa virtaus täyttää jälleen koko kanavan ja jossa virtaus on saavuttanut saman nopeuden kuin ennen kuristinta [14, s. 40]. Kuristimen virtauskerroin  $C_d$  on valmistajan kokeellisesti määrittämä kerroin. Tilavuusvirta-antureissa käytettyjä kuristimia (kuva 21) on muodoiltaan ja siten ominaisuuksiltaan useita erilaisia, kuten erilaiset kuristinlevyt (a), venturi-putket (b), virtaussuuttimet (c) ja kiilamaiset vastukset (d).



**Kuva 21.** Kuristinlevy (a), venturiputki (b), virtaussuutin (c) ja Dall-virtausputki [5, s. 430].

**Pitot-putki** mittaa nesteen paikallista nopeutta ja nopeuden avulla voidaan laskea nesteen tilavuusvirta, kun virtauspoikkipinta-ala tunnetaan. Pitot-putken etupäästä mitataan dynaaminen paine ja putken sivulla virtaukseen nähden kohtisuoraan olevista kanavista staattinen paine. Dynaamisen paineen ja staattisen paineen erotuksesta saadaan mitattua paine-eroanturilla virtausnopeus sekä laskettua tilavuusvirta [6, s. 45; 9, s. 327]. Pitot-putken huono puoli on, että ohut putki mittaa paine-eroa vain pieneltä alueelta ja näin ollen anturin tarkkuus kärsii [5, s. 435]. Pitot-putkesta on myös valmistettu kehittyneempiä versioita, joissa on monta mittausputkea koko putken korkeudelta ja näin saadaan muodostettua keskimääräinen tilavuusvirta putkessa [5, s. 435].

**Tilavuuskammioanturit** perustuvat syrjäytysperiaatteelle, jossa tietty syrjäytystilavuus läpäisee anturin tiettyssä ajassa tuottaen yhden tilavuuspulssisignaalin [6, s. 46; 9, s. 321–323]. Tällöin pulssien määrä tiettyssä ajassa vastaa tiettyä tilavuusvirtaa, kun kammion tilavuus on tunnettu. Kuvassa 22 on esitetty esimerkki tilavuuskammioanturista.



**Kuva 22.** Tilavuuskammioanturi [16].

Tilavuuskammioanturit ovat yleensä rakenteeltaan toisiinsa kytkettyjä ovaali- tai lieriöhammaspyöräpareja. Tällöin anturin läpi virtaava neste pyörittää hammaspyöräparia tietyllä nopeudella, joka riippuu nesteen tilavuusvirrasta ja hampaiden geometrian muodostamasta syrjäytystilavuudesta. Kun geometrinen syrjäytystilavuus ja pyörintänopeus tiedetään, niin tilavuusvirta voidaan laskea. Tilavuuskammioantureiden hammaspyörrien pyörintänopeus voidaan mitata akseliin kytketyllä takometrillä tai Hall-antureilla induktanssiin perustuen, jolloin anturin tunnistuskenttään ilmestynvä hammas tuottaa yhden pulssisignaalin. [6, s. 46; 9, s. 321–323]. Hammaspyöräanturien rakenteesta johtuen niissä esiintyy aina vuotoja, mutta silti kyseisten antureiden tarkkuus on anturirakenteesta riippuen  $\pm 0,5 - \pm 2 \%$ . [5, s. 436].

**Turbiinanturilla** (kuva 23) mitataan nesteen tilavuusvirtaa virtaukseen asennetulla turbiinilla, jonka pyörimisnopeutta mitataan Hall-antureilla [9, s. 323–325; 11, s. 110]. Nesteen virtaus saa turbiinin pyörimään tietyllä nopeudella ja Hall-anturien muodostamista pulsseista lasketaan pyörintänopeus. Pyörimisnopeudesta lasketaan siihen verrannollinen tilavuusvirta. Valmistajan ilmoittaman K-kertoimen mukaan tietty pulssitaajuus vastaa



tiettyä tilavuusvirtaa, jolloin tilavuusvirta saadaan selville [9, s. 324]. Turbiiniantureiden mittaustarkkuus voi olla jopa  $\pm 0,2\%$  tiettyjen olosuhteiden täytyessä [5, s. 439]. Turbiinianturit voivat ajan saatossa menettää mittaustarkkuuttaan laakereiden ja lapojen kuluessa, etenkin kuluttavilla nesteillä [5, s. 439]. Turbiinianturit voidaan sijoittaa painelinjaan ja ne ovat kooltaan pieniä verrattuna tilavuuskammioantureihin. Toisaalta standardissa SFS 5059 asetetaan ehdot häiriöttömille putkiosuuksille ennen ja jälkeen anturin, jolloin niitä ei välttämättä voi sijoittaa kovin ahtaisiin paikkoihin.

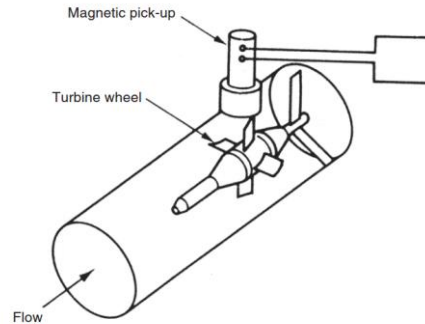


Figure 16.9  
Turbine flowmeter.

**Kuva 23.** Turbiinianturi [5, s.438 ].

Markkinoilla on olemassa myös monia erikoisantureita, jotka perustuvat **ultraäänen, magneettikentän tai coriolis-voimien mittaamiseen**. Näihin voi tutustua alan kirjallisuudessa, kuten [5, s. 425–458; 6, s. 41–48; 9, s. 320–341; 11, s. 99–117], mutta tämän työn kannalta ne eivät ole relevantteja.

Standardissa SFS 5059 on esitetty **mittausvaatimukset** erityyppisille virtausantureille. Standardi asettaa muun muassa venturiputkelle tietyt häiriöttömät putkiosuudet ennen ja jälkeen anturia. Standardissa SFS 5059 kuvataan myös asennusvaatimukset, kuten anturin asennussuunta (horisontaali / vertikaali). Näitä reunaehtoja noudattaen saavutetaan standardin mukaiset mittaustarkkuudet, kutakin anturityyppiä käytettäessä.

## 2.5.4 Lämpötilan mittaaminen ja mittausvaatimukset

Lämpötilan mittaus on prosessiteollisuuden yksi merkittävimpiä suureita mittaamista. Lämpö on useissa teollisuusprosesseissa se asia jolla prosessi pidetään käynnissä (lämpö = energiaa). Lämpötilan mittauksella saadaan selville prosessin tila, joka on tärkeää käsiteltäessä lämpötilaherkkiä aineita muun muassa räjähdysvaarallisuuden takia. Joissain prosesseissa valmistuslämpötila täytyy säilyttää tietyn toleranssin sisällä, jotta voidaan taata tasalaatuiset tuotteet valmistusolosuhteiden vakioinnilla. Myös valmistajien asettamat lämpötilavaatimukset tulee täyttyä ja tällöin voidaan laitteen lämpötilaa seurata erilaisilla lämpötilamittareilla ja lämpötila-antureilla.

Lämpötilan mittaaminen perustuu lämpötilan aiheuttamiin fyysisiin ja sähköisiin muutoksiin mittaussaineessa. Aineen fyysisten ominaisuuksien muutoksiin perustuvia antureita ovat esimerkiksi elohopea- sekä bimetallilämpötilamittarit ja aineen sähköisten ominaisuuksien muutoksiin perustuvia antureita ovat termoparit sekä resistanssin muutokseen perustuvat lämpötila-anturit.

**Elohopeamittaria** käytettäessä elohopea laajenee lämpötilan kasvaessa ja tällöin elohopeapatsas nousee lämpömittarissa. Lämpötilan nousu on luettavissa kalibroidusta lämpötila-asteikosta, joka on kiinnitetty lämpömittarin lasiputken viereen [11, s. 127–128]. On myös olemassa **bimetallilämpömittareita**, joista esimerkkinä on saunan lämpötilamittari. Siinä kaksi eri lämpölaajenemiskerrointa omaavaa metallilevyä on kiinnitetty toisiinsa. Lämpötilan muuttuessa toinen levy pitenee enemmän kuin toinen ja levyt taipuvat mutkalle. Lämpötilan muutos on luettavissa viisarin aseman muutoksesta mittarin asteikolta.

**Termoparit** perustuvat Thomas Seebeckin 1821 havaitsemalle fysikaaliselle ilmiölle, joka syntyy kun kaksi eri metallia liitetään toisiinsa päistään. Kun liitoskohdat ovat eri lämpötilassa, niin liitoskohtien välille syntyy sähkömotorinenvoima eli jännite [15, s. 179]. Jännitteen suuruus riippuu metallien materiaaleista. K-tyypin termopari on yleisimmin käytetty ja se on valmistettu chromel-alumel sekoituksesta. K-tyypin anturin herkkyys on  $41 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$  [12, s. 52].

**Resistanssin muutokseen** perustuvat lämpötila-anturit koostuvat yleensä lankavastuksesta, joka on suljettu lasikeraamikomposiittimateriaaliin. Metallilankavastuksen resistanssi tunnetaan tietyssä kalibrointi lämpötilassa ja mitattava lämpötila voidaan selvittää lankavastuksen resistanssin muutoksesta [11, s. 130]. Yleisimmin käytetty resistanssin muutokseen perustuva anturi on Pt-100 anturi, joka on tehty platinalangasta ja sen resistanssi on  $100 \Omega$  lämpötilassa  $0 ^\circ\text{C}$ .

Lämpötilan mittausvaatimukset on annettu standardissa SFS 5059, jonka mukaan anturia sijoitettaessa täytyy ottaa huomioon, ettei prosessiaine pääse kerääntymään lämpömittarin suojaputkeen. Anturin sijoituspaikka ei saa olla lämmitys- eikä jäähdytyslementin tai muun säteilevän pinnan lähellä eikä anturi saa sijaita tulevan virtauksen läheisyydessä. Anturin pään tulee sijaita nopeimman virtauksen alueella nopean vasteen saamiseksi ja suositeltavin sijoituspaikka on yleensä putkikäyrä. Sijoituspaikkaa valittaessa tulee ottaa huomioon asennuksen ja huollon vaatima vapaa tila ja muut standardin SFS 5059 vaatimukset. [13, s. 15–16].

## 2.5.5 Nesteen pinnankorkeuden mittaaminen ja mittausvaatimukset

Nesteen pinnankorkeuden mittaaminen on klassinen ongelma, jossa säiliön nesteen pinnankorkeutta mitataan erilaisilla pinnankorkeusantureilla tai kytkimillä. Pinnankorkeusmittausta käytetään, kun nesteen taso halutaan pitää tietyllä korkeudella ja mittaustuloksen perusteella tehdään säätötoimenpiteitä prosessiin. Myös pinnankorkeuskytkimiä käytetään varolaitteina varoittamaan käyttäjää tai prosessin pysäyttämiseen, kun nestetaso menee sille asetettujen rajojen ulkopuolelle. Tutustutaan erilaisiin pinnankorkeusantureihin, kuten uimureihin, pinnankorkeuskytkimiin ja paineen mittaamiseen perustuviin antureihin.

Yksinkertaisin ja ehkä halvin tapa pinnankorkeuden mittaamiseen on muun muassa auton moottoritilassa oleva mittatikku, jolla kuljettaja voi valvoa moottoriöljyn tasoa. Myös erilaisia kellunta-antureita tai kytkimiä on olemassa, jotka antavat mekaanisen, visuaalisen tai sähköisen signaalin, kun nestetaso saavuttaa asetetun rajakorkeuden.

**Uimureihin** perustuvat pinnankorkeusanturit koostuvat nesteen pinnalla kelluvasta uimurista ja sen asemaa mittaavasta anturista. Yksinkertainen tapa on kiinnittää uimuri nivelöidyn varren päähän, jolloin nesteen pinnan kohotessa myös uimuri nousee nesteen vaikutuksesta (kuva 24). Uimurin varteen on kiinnitetty myös potentiometri eli säätövastus, jota uimuri kääntää sen aseman muuttuessa nesteen pinnankorkeuden mukaan [5, s. 462–463; 12, s. 47]. Potentiometri on kytketty jännitelähteeseen ja potentiometrin yli olevaa jännitettä mitataan, jolloin nesteen pinnankorkeuden muuttuessa potentiometrin resistanssi sekä sen yli oleva jännite muuttuvat resistanssin muuttuessa.

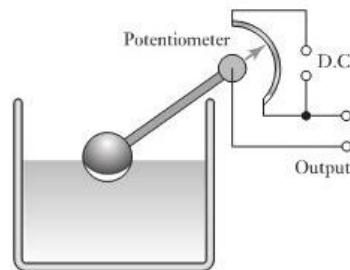


Figure 2.44 Float system.

**Kuva 24.** Uimuriin perustuva nesteen pinnankorkeusanturi [12, s. 47]

Uimureihin perustuvat **pinnankorkeuskytkimet** ovat myös yleisiä nestesäiliön pinnankorkeuden tarkkailussa. Pinnankorkeuskytkin koostuu tyypillisesti uimurista, joka sisältää kestopagneetin, seuraajamagneetista sekä seuraajamagneetin asemaa mittaavasta anturista [3, s. 77]. Uimuri on rengasmaisen suojaputken ympärillä oleva komponentti, joka nousee ja laskee pinnankorkeuden mukaan. Suojaputken sisällä oleva seuraajamagneetti

taas seuraa uimuria magneettisen voiman vaikuttaessa. Kun seuraajamagneetti nousee mittausanturin/kytkimen vaikutuskohtaan, niin anturi lähettää 1 tai 0 signaalin. Pinnan- korkeuskytkin on siis esimerkki digitaalisesta 2-johdinanturista.

Nestepatsaan synnyttämän **paineen mittaamiseen perustuvia pinnankorkeusantureita** käytetään myös yleisesti. Mittaamiseen voidaan käyttää säiliön pohjalle asennettua yli- painetta mittaavaa mittaripaineanturia tai paine-eroa mittaavaa paine-eroanturia (kuva 25), jota voidaan käyttää paineen mittaamiseen niin avoimessa kuin suljetussa tankissa. Nestepatsaan korkeus voidaan laskea hydrostaattisen paineen kaavasta

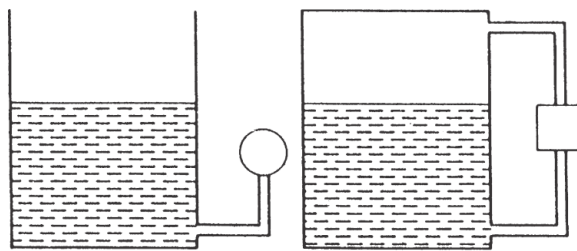
$$p_n = \rho gh, \quad (10)$$

jossa  $p_n$  on nesteen paine [Pa] säiliön pohjalla,  $\rho$  on nesteen tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ],  $g$  on gravitaatiovakio [ $\text{m/s}^2$ ] ja  $h$  on nestepatsaan korkeus [m] säiliössä [14, s. 40]. Korkeus  $h$  voidaan ratkaista, kun nesteen paine  $p_n$  säiliön pohjalla on mitattu.

Mittaripaineanturilla saadaan hieman epätarkempia tuloksia, sillä kyseinen paineanturi on kalibroitu tietylle ilmanpaineelle ja ilmanpaineen vaihtelu vaikuttaa siten mittaustuloksiin. Paine-eroanturilla nestepatsaan ja ilmanpaineen aiheuttamaa painetta säiliön pohjalla verrataan suoraan ilmanpaineeseen. Tällöin saadaan kaava muotoon

$$\Delta p = p_i + \rho gh - p_i \leftrightarrow \Delta p = \rho gh, \quad (11)$$

, jossa  $\Delta p$  on paine-ero paineanturin yli. Näin ollen ilmanpaineen vaihtelun vaikutus poistuu tuloksesta. Paineen mittaamisen heikkopuoli on nesteen tiheyden arvioiminen ja tiheyden vaihtelu lämpötilan mukaan [5, s. 463–464]. Tällöin järjestelmään voidaan liittää lämpömittari, jonka lukeman perusteella nesteen tiheyttä korjataan laskennallisesti. Tarkkuus vaihtelee välillä  $\pm 0,5 \dots \pm 0,1 \%$  FSO [5, s. 463–464].



**Kuva 25.** Paine-eroon perustuva nesteen pinnankorkeusanturi, muokattu lähteestä [5, s. 463–464].

Kapasitiivisia pinnankorkeusantureita käytetään sähköä johtamattomien nesteiden sekä kiinteiden rakeiden pinnankorkeuden mittaamiseen. Anturit koostuvat kahdesta tosistaan erotetuista levystä, joiden välistä kapasitanssin muutosta mitataan, kun nestepatsaan korkeus muuttuu levyjen välissä [5, s. 464–465]. Nestepatsaan korkeuden muuttuessa, muuttuu myös dielektrisen aineen määrä levyjen välissä, mikä johtaa kapasitanssin muutok-

seen levyjen yli. Tämä kapasitanssin muutos tulkitaan tietyllä kertoimella nesteen korkeuden muutoksena. Mitattavan aineen sisältämät epäpuhtaudet voivat kiinnittyä mittauserkyjen pintaan ja näin osaltaan häiritä mittaustulosta. Eri materiaalien dielektrisyysvakio on lämpötilariippuvainen, joten haluttaessa tarkkoja mittauksia täytyy dielektrisyysvakioita korjata lämpötilan mukaan [11, s. 87]. Kapasitiivisten pinnankorkeusanturien tyyppillinen tarkkuus on  $\pm 1 - 2 \%$ . [5, s. 464–465].

Ultraääneen, mikroaaltoihin, säteilyyn sekä laservalon heijastumiseen perustuvia erikoistarkoituksiin valmistettuja pinnankorkeusantureita on myös valmistettu. Näitä menetelmiä käytetään, kun mitataan pinnankorkeutta vaikeissa olosuhteissa. [5, s. 465–470].

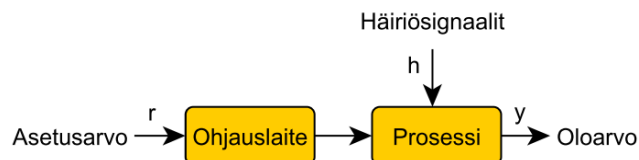
Pinnankorkeusanturien sijaintia mietittäessä tulee anturi sijoittaa siten, että se on huollon yhteydessä helposti saatavilla ja asennettavissa. Mittausyhte pitää sijoittaa siten että imuyhde, tuloyhde ja sekoittimet eivät aiheuta mittaukseen häiriöitä. Standardissa SFS 5059 on esitetty tarkemmat **mittausvaatimukset** erilaisille pinnankorkeusantureille.

## 2.6 Säätötekniikka

Teollisuudessa esiintyvien erilaisten prosessien, kuten veden lämpötilan tarkkaan säätämiseen tarvitaan säätöjärjestelmää, joka mittaa prosessin oloarvoa ja säätää sitä käyttäjän asetusarvoa kohti. Tässä rajoitetaan vain tämän diplomityön kannalta oleellisiin asioihin.

### 2.6.1 PID-Säätö

Säätöjärjestelmät jaetaan **avoimiin säätöjärjestelmiin** (*engl. open loop*) eli ohjausjärjestelmiin ja **suljettuihin takaisinkytkettyihin säätöjärjestelmiin** (*engl. closed loop*) [4, luku 6 s. 1–2]. Ohjausjärjestelmistä puuttuu prosessin tilaa mittaava takaisinkytkentä ja siten ohjausjärjestelmää ei voida käyttää prosessin tarkkaan säätöön. Kuvassa 26 on esitetty ohjausjärjestelmän periaatteellinen lohkokaavio. Kuvasta ilmenee ohjausjärjestelmän pääkomponentit ohjauslaite sekä prosessi.

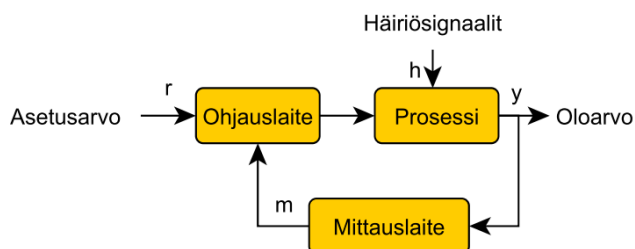


**Kuva 26.** Ohjausjärjestelmän lohkokaavio, muokattu lähteestä [17, s. 12].

Ohjauslaitteelle annetaan tietty asetusarvo  $r$  josta ohjauslaite muodostaa ohjausarvon prosessille. Ulkoiset häiriösignaalit  $h$  vaikuttavat prosessiin ja siten prosessin oloarvo  $y$  poikkeaa asetusarvosta. Esimerkiksi venttiiliohjatussa hydraulimoottorin nopeuden säädössä kuristusventtiilin avauma (asetusarvo  $r$ ) määrää hydraulimoottorin pyörimisnopeuden va-

kio-olosuhteissa ja -kuormituksella. Kuormituksen vaihdellessa esimerkiksi kitkan muuttuessa (häiriö) muuttuu myös kuristusventtiilin yli oleva paine-ero sekä siitä riippuvainen öljyn tilavuusvirta. Tilavuusvirran muuttuessa myös hydraulimoottorin pyörimisnopeus muuttuu. Pyörimisnopeuteen vaikuttavat siis asetusarvon lisäksi muun muassa moottorin kuormitus, nesteen viskositeetti, komponenttien ominaisuuksien muutokset, yksittäisten järjestelmän osien lineaarisuusvirheet sekä sähköisen ohjauksen häiriöt [14, s. 328].

Suljettu takaisinkytketty säätöjärjestelmä koostuu ohjauslaitteesta, prosessista ja prosessin tilaa mittaavasta mittauslaitteesta [17, s. 11]. Säätöjärjestelmä perustuu takaisinkytkennälle, jossa järjestelmän tilaa jatkuvasti mitataan ja tila pyritään säätämään käyttäjän asetusarvoon ulkoisista häiriöistä huolimatta. Kuvassa 27 on esitetty säätöjärjestelmän periaatteellinen lohkokaavio. Kuvasta näkyvät säätöjärjestelmän pääkomponentit: ohjauslaite, prosessi sekä mittauslaite.



**Kuva 27.** Säätöjärjestelmän lohkokaavio, muokattu lähteestä [17, s. 12].

Asetusarvo  $r$  ja prosessin mittaesarvo  $m$  annetaan ohjauslaitteelle, jonka jälkeen ohjauslaite muodostaa asetusarvon ja mittaesarvon perusteella prosessille ohjausarvon  $u$  säätöohjeen eli säätöalgoritmin mukaan. Ohjauslaite eli säädin pyrkii pitämään asetusarvon ja mittaesarvon välisen erosuureen nollassa prosessiin vaikuttavista ulkoisista häiriöistä riippumatta, jolloin on saavutettu käyttäjän asettama asetusarvo  $r$ .

Yleisimmät säätöalgoritmit ovat suhteellinen säätö eli **P-säätö** (engl. *Proportional Control*), suhteellinen ja integroiva säätö eli **PI-säätö** (engl. *Proportional plus Integral Control*), suhteellinen ja derivoiva säätö eli **PD-säätö** (engl. *Proportional plus Derivative Control*) sekä suhteellinen, integroiva ja derivoiva säätö eli **PID-säätö** (engl. *Proportional plus Integral plus Derivative Control*) [15, s. 29].

**P-säädin** on yksinkertaisin säädintyyppi, jota käytetään hitaiden prosessien säätämiseen. P-säätimen säätöalgoritmi on

$$U = K_c e, \quad (12)$$

jossa  $U$  on säätimen ulostuleva ohjausarvo,  $K_c$  on suhteellinen vahvistuskerroin ja  $e$  on erosuure [15, s. 54]. Kaavasta nähdään, että säätimen ohjausarvo on suoraan verrannollinen erosuureeseen. P-säätimessä ohjausarvon ja mitatun arvon välistä erosuuretta vahvistetaan tietyllä vahvistuskertoimella  $K_c$ , jonka suuruus vaikuttaa suoraan säätimen herkkyy-

teen. Suurella vahvistuksella säädin reagoi nopeasti ohjearvon sekä mittausarvon eroavaisuuksiin, mutta toisaalta vahvistusta kasvatettaessa järjestelmästä tulee myös epästabiilimpi. P-säätimen ominaisuuksiin kuuluu nopea vasteaika ja se on melko stabiili [15, s. 54]. Toisaalta P-säätimellä ei saavuta koskaan nollavirhettä ja staattisessa tilanteessa esiintyy siten poikkeama asetusravosta [15, s. 54].

**PI-säädintä** käytetään nopeiden prosessien säätämiseen, kun halutaan päästä parempaan säätötarkkuuteen. PI-säätimen säätöalgoritmi on

$$U = K_c e + \frac{K_c}{t_i} \int_0^t e dt, \quad (13)$$

jossa  $t_i$  on integrointiaika [15, s. 54]. PI-säätimessä on suhteellisen osion lisäksi integrointiosio, jossa erosuuretta integroidaan. Integrointiosio reagoi myös virheen kesto aikaan ja sen suuruuteen [15, s. 55]. Staattisessa tilanteessa PI-säätimen erosuure menee nolnaan integrointiosion vaikutuksesta [15, s. 54]. Toisaalta integroivan osan takia PI-säädin on epästabiilimpi verrattuna P-säätimeen ja säätimen parametrien asettaminen on haastavampaa, kun optimoitavana on kaksi toisiinsa vaikuttavaa parametria. PI-säädintä käytetään usein myös sen vaimennus tai suodatusominaisuuksien takia. Esimerkiksi tilavuusvirran säätö täytyy tapahtua nopeasti ja säädettävä suure sisältää paljonkin kohinaa, jolloin PI-säätimen vaimennus- ja suodatusominaisuudet tuovat helpotusta säätöön [15, s. 55].

**PD-säädintä** käytetään säätöprosessin viiveen kompensointiin. PD-säätimen säätöalgoritmi on

$$U = K_c e + K_c t_d \frac{de}{dt}, \quad (14)$$

jossa  $t_d$  on derivointiaika [15, s. 56]. Derivointiosion avulla kompensoidaan säätöprosessin viivettä eli reagointinopeutta, mutta säätövirheeseen sillä ei ole vaikutusta [15, s. 55]. PD-säätimen virittäminen on haasteellista, koska täytyy optimoida kaksi parametria. Virityksen haasteellisuudesta johtuen PD-säädintä käytetään yleensä vain prosesseissa, joissa esiintyy suuria viiveitä säädettävässä suureessa, kuten lämpötilan säädössä.

**PID-säädin** yhdistää suhteellisen, integrointi- sekä derivointiosion ominaisuudet, jolloin PID-säätimellä saavutetaan nopeat vasteajat ja nolla säätövirhe [15, s. 27–56]. PID-säätimen säätöalgoritmi on

$$U = K_c e + \frac{K_c}{t_i} \int_0^t e dt + K_c t_d \frac{de}{dt}. \quad (15)$$

PID-säätimen viritys on kuitenkin monimutkaisempaa, kuin P-säätimen viritys. Prosessiominaisuuksien muuttuessa myös parametreja täytyy virittää, jotta taataan säätimen oikeanlainen toiminta. PID-säädin tarjoaa kuitenkin erinomaisen säädettävyyden, kun sen parametrit on oikein viritetty.

Säätöalgoritmeista P-säätö on yksinkertaisin. P-säädintä käytetään yksinkertaisissa hitaissa prosesseissa, kun taas PI- ja PID säätimiä käytetään nopeiden prosessien säätämiseen. Parempiin säätöominaisuuksiin päästään myös lisäämällä takaisinkytkentöjen määrää säätöjärjestelmässä [17, s. 8]. Esimerkiksi tilavuusvirtaa voidaan säätää yhdellä takaisinkytkennällä, jossa mitattu öljyn virtaus muutetaan säätimessä erosuureen perusteella tietyksi ohjausarvoksi. Tällöin tilavuusvirtaa ohjaavan proportionaaliventtiilin karaa joko avataan tai suljetaan erosuureen mukaan. Parempaan säätöjärjestelmään päästään kahdella sisäkkäisellä takaisinkytkennällä [17, s. 8]. Kun proportionaaliventtiilissä on asemanturi, niin kara saavuttaa oikean aseman nopeammin ulkoisista häiriöistä, kuten kulumisesta ja virtausvoimista riippumatta.

Säädintä valittaessa täytyy miettiä säädettävää prosessia sekä säätimeltä haluttuja ominaisuuksia, kuten tarkkuutta, nopeutta ja stabiiliutta. Useinkaan samat säätimet eivät sovellu eri suureiden säätöön ja yleiset ohjeet säätimen valintaan on listattu liitteessä B olevaan taulukkoon 14.

Säätimen valinnan jälkeen täytyy säädin virittää, jotta se toimisi optimaalisesti kussakin säätöprosessissa. Säädintä voi lähteä virittämään kokeile ja erehdy – menetelmällä, mutta se osoittautuu usein melko työlääksi, sillä säädettävien parametrien määrän lisääntyessä myös virittäminen vaikeutuu. Säätimen virittämiseen on olemassa tehokkaampia menetelmiä, kuten erilaisia virheen minimointimenetelmiä sekä Ziegler-Nicholsin menetelmä [15, s.56–64, 18]. Virheen minimointimenetelmästä esimerkkinä on virheen pienimmän neliösumman menetelmää (ISE), jossa haetaan mahdollisimman pientä arvoa integroidun virheen neliölle ( $ISE = \int_0^{\infty} e^2$ ).

Virittämismenetelmistä ehkä tunnetuimmassa Ziegler-Nicholsin menetelmässä (1942) haetaan säädettävän prosessin reagoitikäyrälle oikeaa 1/4-vaimenemismuotoa. Perusideana on että prosessin reagoitikäyrän ensimmäisen ylityksen (aallon huippu) ja toisen ylityksen välinen amplitudien suhde olisi 4:1 [15, s. 57]. Tällöin saavutetaan Zieglerin ja Nicholsin mukaan kompromissi nopean vasteajan sekä asettumisen väliltä. Tarkemmat virittämisohjeet Ziegler-Nichols menetelmän käyttöön on kuvattu liitteessä B.

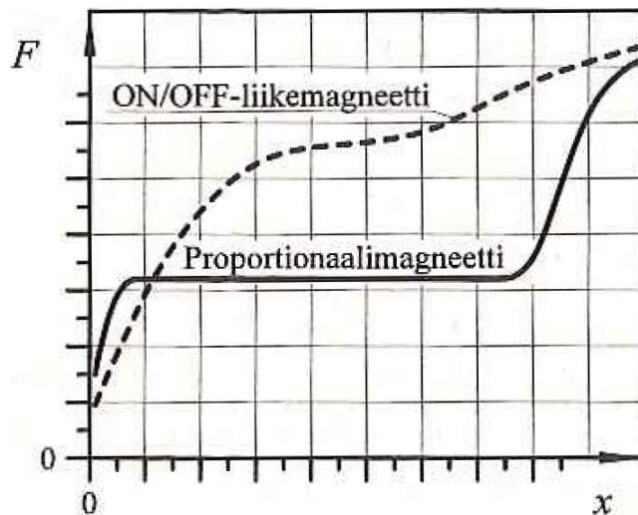
## 2.6.2 Proportionaali- ja servoventtiilit

Hydrauliikassa jatkuvaan ja portaattomaan tilavuusvirran suunnanohjaukseen, tilavuusvirran määrän ohjaukseen ja järjestelmän paineen ohjaamiseen käytetään **proportionaali, servoproportionaali- tai servoventtiileitä**. Venttiilit ryhmitellään karkeasti ohjausjär-



jestelmiin soveltuviin ja säätöjärjestelmiin soveltuviin venttiileihin niiden ominaisuuksien, kuten hystereesin, nousuajan ja rajataajuuden perusteella [14, s. 335–340]. Karkeasti voidaan ajatella, että proportionaaliventtiilit ilman karan asematakaisinkytkentää soveltuvat ohjausjärjestelmiin ja servoproportionaali- sekä servoventtiilit karan asematakaisinkytkennällä soveltuvat säätöjärjestelmiin [14, s. 331–335]. Proportionaali- sekä servoproportionaaliventtiileissä karan ohjaus on toteutettu lineaarimoottorilla, kuten proportionaalimagneetilla ja servoventtiileissä karan ohjaus on toteutettu vääntömoottorilla.

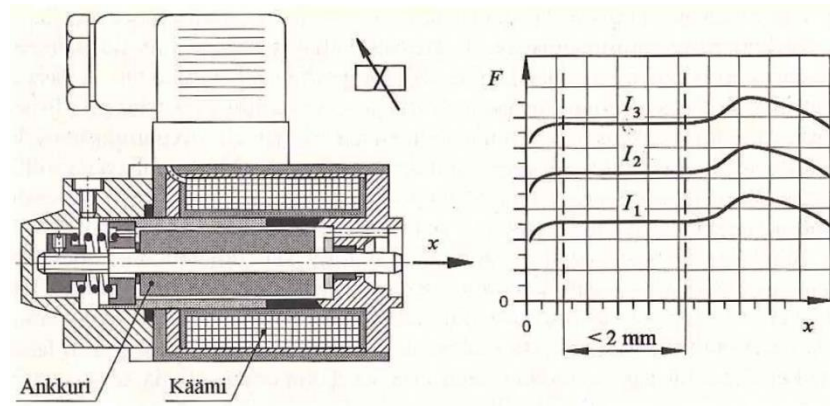
**Proportionaaliventtiilit** eroavat perinteisistä ON/OFF- suuntaventtiileistä ohjaustapansa vuoksi, sillä proportionaaliventtiileissä karan asemaa ja siten ohjattavaa suuretta voidaan ohjata portaattomasti tilasta toiseen siirryttäessä [14, s. 327]. Hydrauliventtiileissä yleisimmin käytetty lineaarimoottorityyppi on virtaohjattu tasavirtamagneetti eli proportionaalimagneetti, joka mahdollistaa portaattoman ohjauksen. Proportionaalimagneetti on sähkömekaaninen muunnin, joka muuntaa sille syötetyn sähköisen ohjausarvon lineaariliikkeeksi ja tuottaa samalla ohjausarvoon proportionaalisen eli suhteellisen voiman [14, s. 331]. Kuvassa 28 on esitetty proportionaalimagneetin ja ON/OFF-venttiilin liikemagneetin ominaiskäyrät.



**Kuva 28.** Proportionaali- ja ON/OFF-magneetikelojen ominaiskäyrät [14, s. 332].

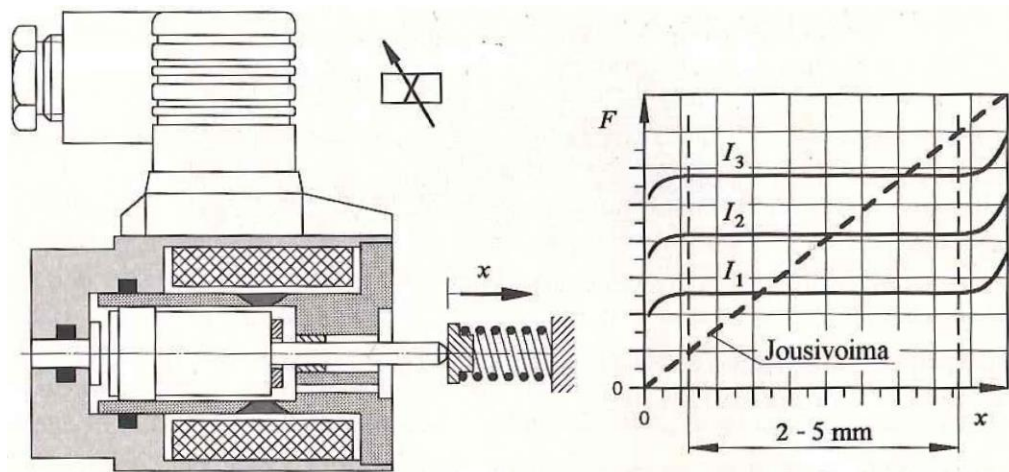
Proportionaalimagneetti tuottaa tietyllä ohjausvirralla lähes vakiovoiman liikealueellaan toisin kuin perinteisen ON/OFF-venttiilin magneetikela [14, s. 332]. ON/OFF-venttiilin liikemagneettia ei voida sen ominaiskäyrän takia käyttää jatkuvaan ohjaamiseen.

Proportionaalimagneetit voidaan jakaa voima- sekä asemaohjattuihin. Voimaohjatun magneetin (kuva 29) tarkoituksena on tuottaa syöttövirtaan suhteellinen vakiovoiman (ei liike) lyhyellä alle 2 mm liikealueellaan [14, s. 332]. Voimaohjattuja proportionaalimagneetteja käytetäänkin pääasiassa esiohjatuissa suunta- ja paineproportionaaliventtiileissä, joissa magneetin tuottama voima muunnetaan venttiilin pääkaran ohjaukseen käytettäväksi paineeksi.



**Kuva 29.** Voimaohjattu proportionaalimagneetti (Bosch Rexroth AG) [14, s. 332].

Asemaohjatun magneetin käyttökelpoinen liikealue on koosta riippuen noin 2 – 5 mm. Asemaohjatun magneetin (kuva 30) tuottama voima muunnetaan karan liikkeeksi kohdistamalla tuotettu voima karan liikettä vastustavaan jouseen [14, s. 332–333].



**Kuva 30.** Asemaohjattu proportionaalimagneetti (Bosch Rexroth AG) [14, s. 332].

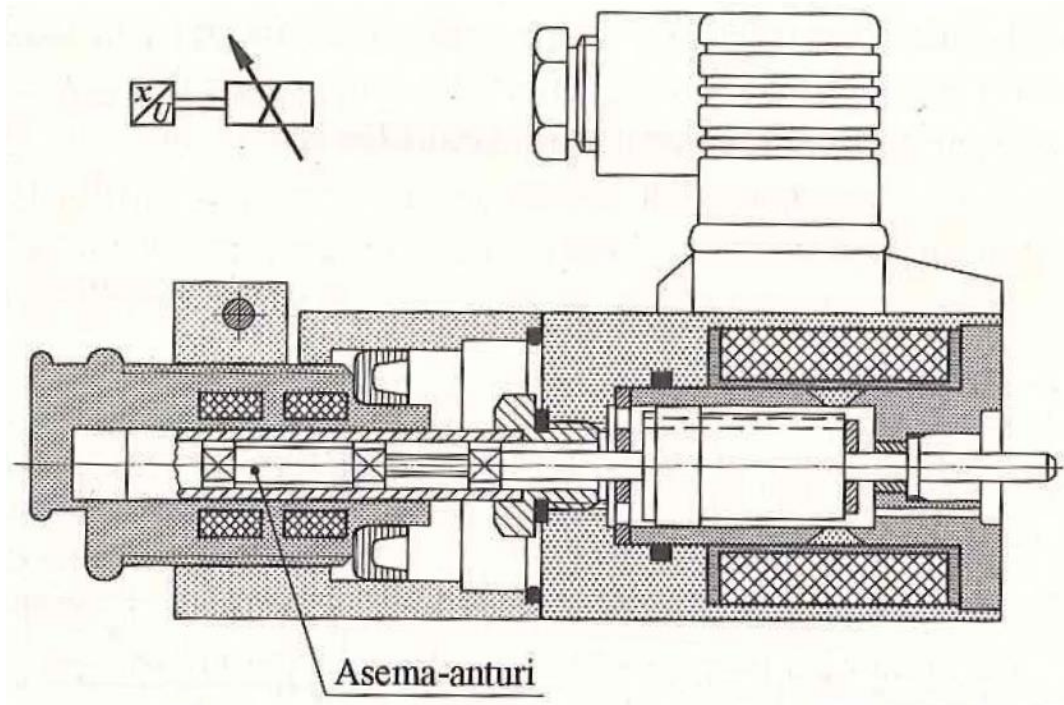
Tällöin karan siirtymä eli asema  $x$  riippuu syöttövirrasta ja karan liikettä vastustavan jousen ominaisuuksista. Asemaohjattuja magneetteja käytetään suunta-, paine- ja vastusproportionaaliventtiileissä. Karan asemaan vaikuttavat syöttövirran ja liikettä vastustavan jousen ominaisuuksien lisäksi erilaiset ulkoiset häiriöt, kuten karaan vaikuttavat virtausvoimat, kitkat, lämpötila ja magneettinen hystereesi [14, s. 333]. Ulkoisten häiriöiden johdosta venttiilin kara ei asetukaan tulosignaalia (ohjausarvoa) vastaavaan asemaan eikä lähtösignaali saa haluttua arvoa.

Asemointitarkkuuteen vaikuttavat häiriötekijät voidaan kompensoida muodostamalla venttiilin sisäinen säätöjärjestelmä, jossa karan asemaa mitataan asema-anturilla ja magneetin tuottamaa voimaa muutetaan, jotta saavutetaan haluttu asetusarvo. Asematakaisinkytkentä parantaa magneetin staattisia ja dynaamisia ominaisuuksia pienentämällä hyste-

reesiä ja parantamalla lineaarisuutta, toistotarkkuutta ja vasteherkkyyttä [14, s. 333]. Asematakaisinkytkentä kasvattaa magneetin jäykkyyttä, joka vaikuttaa myös suuresti venttiilin dynaamisiin ominaisuuksiin [14, s. 333].

Asematakaisinkytkennän merkitys kasvaa suuremmaksi mitä suurempia ovat häiriövoimat suhteessa magneetin tuottamaan voimaan [14, s. 333]. Tällöin suoraanohjatuissa venttiileissä häiriövoimat vaikuttavat suoraan karaan ja karaa ohjaavaan magneettiin, jolloin takaisinkytkentä on merkityksellisempi suoraanohjatuilla venttiileillä verrattuna esiohjattuihin venttiileihin.

Kuvassa 31 on esitetty asematakaisinkytketyn venttiilin halkileikkauskuva. Kuvasta nähdään venttiilin kara, karan ympärillä oleva proportionaalimagneetti sekä karaan kytketty asema-anturi.

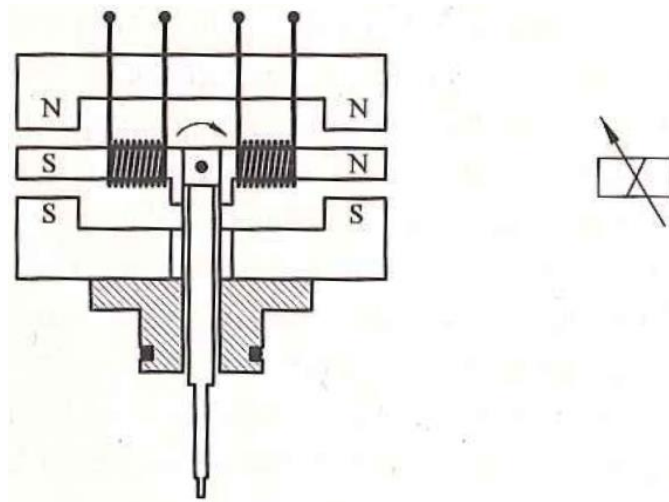


**Kuva 31.** Asematakaisinkytketty proportionaalimagneetti (Bosch Rexroth AG) [14, s. 334].

Karan liikuessa asema-anturi lähettää liikkeeseen verrannollisen aseman jolloin karan asema voidaan säätää asetusrvoon häiriöistä riippumatta. Asematakaisinkytkettyjä proportionaalimagneetteja käytetään suunta-, paine- ja vastusproportionaaliventtiileissä. Säätojärjestelmiin tarkoitetuissa proportionaaliventtiileissä eli **servoproportionaaliventtiileissä** karan asemaa ohjaava proportionaalimagneetti on aina asematakaisinkytketty [14, s. 334].

**Servoventtiileissä** sähköinen käskyarvo muunnetaan mekaaniseksi ohjausarvoksi yleensä vääntömoottoreilla. Myös muita sähkömekaanisia rakenteita käytetään, kuten proportionaalimagneettien kaltaisia lineaarimoottoreita ja askelmoottoreita. [14, s. 334]

Vääntömoottorit (kuva 32) ovat virtaohjattuja kestopagneettimoottoreita, jotka tuottavat syötettyyn ohjausvirtaan verrannollisen momentin. Vääntömoottorin tuottama momentti on melko pieni ja se täytyy vahvistaa, jotta vääntömoottorilla voidaan ohjata hydraulista tehoa. Momentin vahvistus tehdään joko yhdessä tai kahdessa vaiheessa, jolloin hydrauliventtiileistä tulee vastaavasti kaksi tai kolmiasteisia. Hydraulisina vahvistimina käytetään usein suihkuputki, suutin-läppä tai luistiventtiileitä.

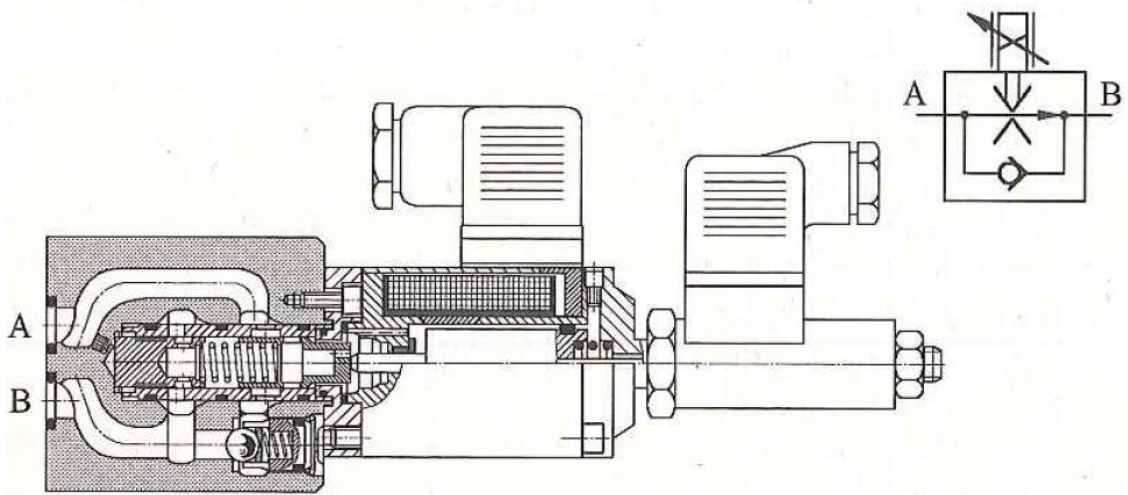


**Kuva 32.** Vääntömoottori [14, s. 334]

**Venttiileiden staattiset ja dynaamiset ominaisuudet** määrittävät soveltuuko venttiili ohjauslaitteeksi ohjaus- vai säätöjärjestelmään. Näihin ominaisuuksiin vaikuttavat muun muassa karan peitot, ohjauslaitteen magneettinen hystereesi, sähköisen ohjauslaitteen ja karan kitkat, välykset ja hitaus sekä ohjauslaitteen mahdollinen takaisinkytkentä [14, s. 335]. Venttiilin staattisia ja dynaamisia ominaisuuksia kuvataan yleensä termeillä venttiilin hystereesi, vasteen herkkyys, toistotarkkuus, tilavuusvirtavahvistus, painevahvistus, nousuaika, taajuusvaste ja rajataajuus. Näiden ominaisuuksien tarkemmat määritelmät löytyvät Hydraulitekniiikan kirjasta.

### 2.6.3 Tilavuusvirran säätö

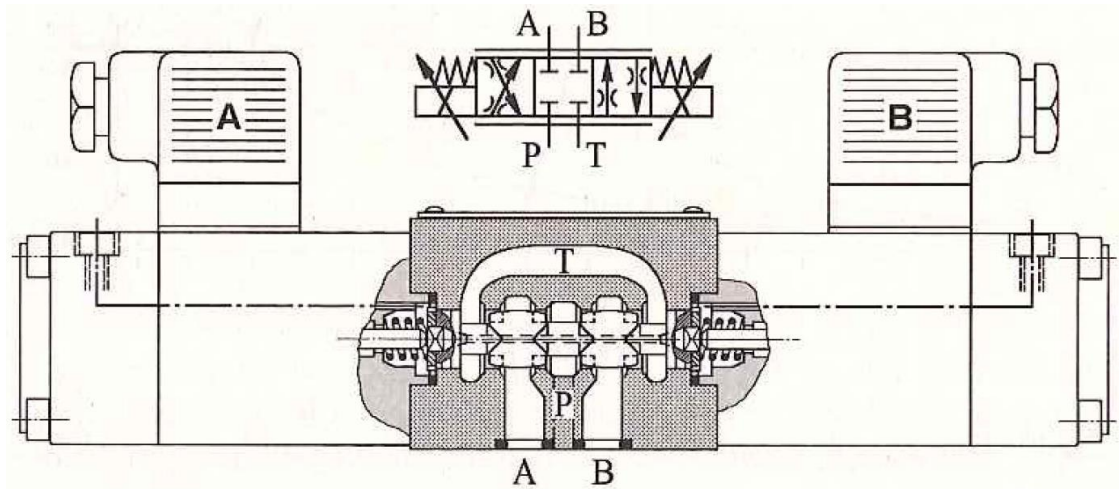
Tilavuusvirran säätöön tarvitaan säätöjärjestelmän mukaisesti (luku 2.6.1) mittaustieto tilavuusvirrasta, jotta ohjauslaitteen asetusarvoa voidaan muuttaa haluttuun suuntaan. Tilavuusvirran ohjaukseen on kehitetty monenlaisia venttiilirakenteita ja kuvassa 33 on esitetty asematakaisinkytketty 2-tievirrantsäätöventtiilin halkileikkauskuva.



**Kuva 33.** 2-tievirransäätöventtiili (Bosch Rexroth AG) [14, s. 346].

2-tievirrantoventtiilit toteutetaan tavallisesti yhdistämällä vastusproportionaaliventtiili sekä painekompensaattori. Vastusproportionaaliventtiilillä asetetaan karan avauma, jolloin mittakuristimena toimivan vastusproportionaaliventtiilin yli oleva paine-ero pyritään pitämään vakiona painekompensaattorilla. Tällöin tilavuusvirta pysyy lähes vakiona, mutta painekompensaattorin ominaisuuksista johtuen täysin kuormituksesta riippumattomaan tilavuusvirran ohjaukseen ei tällä venttiilillä päästä [14, s. 345]. Tarkempi tilavuusvirran säätö edellyttää tilavuusvirran mittausta ja mittaustiedon takaisinkytkentää ohjausarvoon. Tavallisesti tilavuusvirran mittausta toteutetaan erillisellä tilavuusvirta-anturilla. Tällöin tilavuusvirta-anturin mittausravon ja asetusarvon erosuureen mukaan säädetään 2-tievirransäätöventtiilin asetusarvoa.

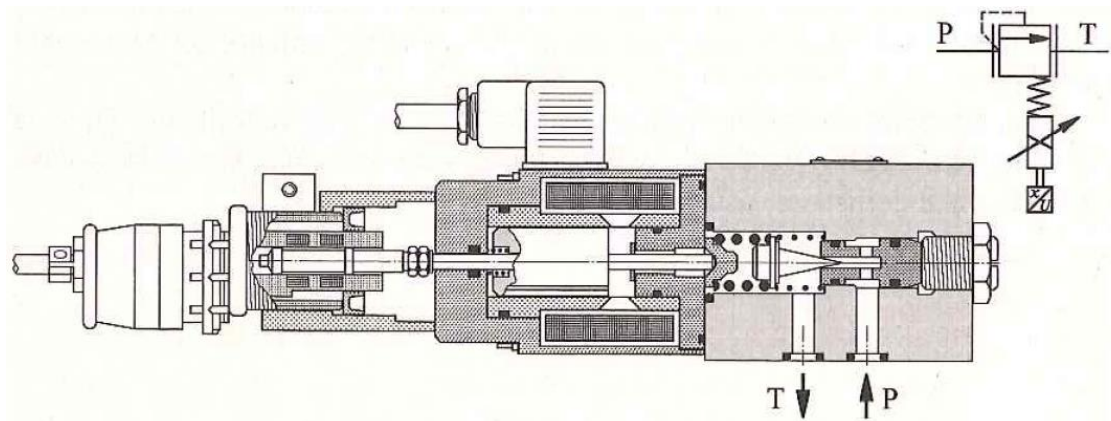
Kuvassa 34 on esitetty suoraanohjatun suuntaproportionaaliventtiilin halkileikkauskuva. Tavallisesti ilman karan asematakytkentää olevaa suuntaproportionaaliventtiiliä suositellaan vain ohjausjärjestelmissä käytettäväksi [14, s. 340]. Tällaista venttiiliä voidaan kuitenkin käyttää jos säätöjärjestelmän nopeudelle ja säätöominaisuuksille ei ole kovin suuria vaatimuksia. Tällöin suuntaproportionaaliventtiilin lisäksi tarvitaan tilavuusvirran mittaamiseen tarkoitettu tilavuusvirta-anturi. Tällaisen säätöjärjestelmän säätöominaisuudet ovat kuitenkin heikommät verrattuna karan asematakytkennällä oleviin venttiileihin verrattuna ja niitä tulee käyttää jos halutaan nopea ja säätöominaisuksiltaan parempi ja tarkempi säätöjärjestelmä.



**Kuva 34.** Suoraanohjattu suuntaproportionaaliventtiili (Bosch Rexroth AG) [14, s. 340].

## 2.6.4 Paineen säätö

Paineen säätö tarvitsee tilavuusvirran säädön tavoin mittaustiedon järjestelmän paineesta. Paineen säätämiseen on olemassa monenlaisia venttiileitä, mutta esiteellään seuraavaksi suoraanohjattu asematakaisinkytketty paineenrajoitusproportionaaliventtiili (kuva 35).



**Kuva 35.** Suoraanohjattu, asematakaisinkytketty paineenrajoitusproportionaaliventtiili (Bosch Rexroth AG) [14, s. 340].

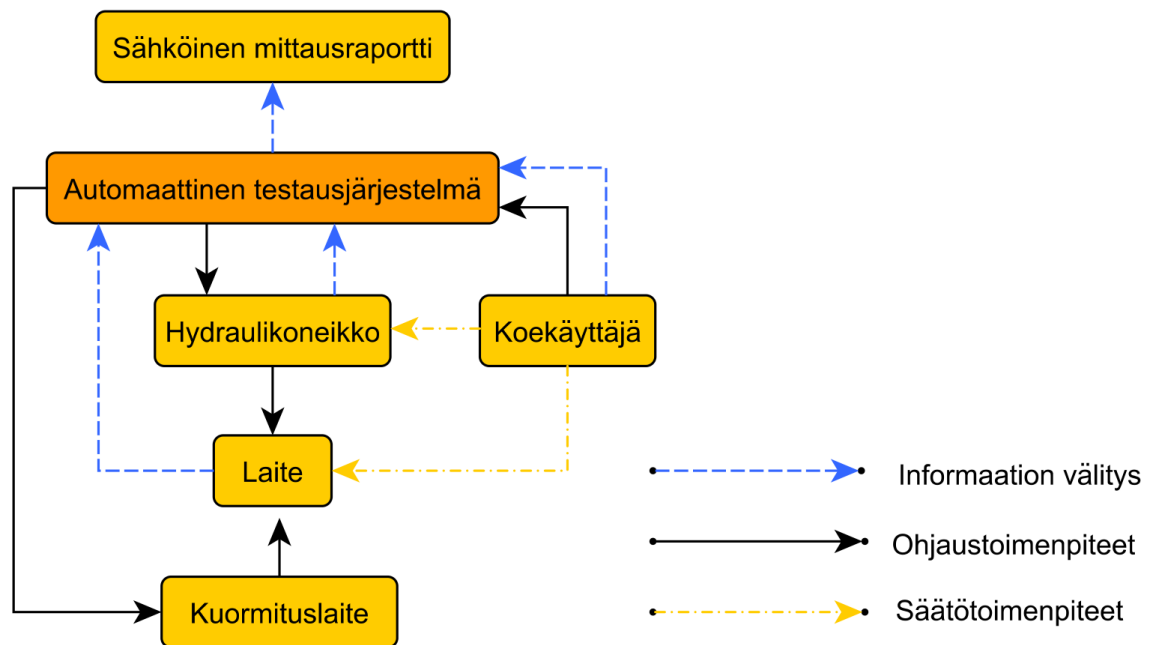
Venttiilin pääkomponentit ovat ohjainkortti, magneettikela, mäntä (ankkuri), jousi, kara ja istukka. Järjestelmän paine vaikuttaa istukkapintaa vasten olevan venttiilin karan oikealla puolella ja asemaohjattu proportionaalimagneetti vaikuttaa jousen välityksellä karan vasemmalla puolella. Proportionaalimagneetin liikkeen, jousen esikiristyksen eli jousi-

voiman ja siten myös venttiilin asetuspaineen suuruus riippuvat täten proportionaalimagneetin ohjausarvosta [14, s. 346]. Paineenrajoitusproportionaaliventtiilin avautumispaine saadaan I/O-kortin ohjaussignaalista. Ohjainkortti muuntaa ohjaussignaalin pulssinleveysmoduloiduksi (engl. pulse width modulation, PWM) virraksi ( $0 - 2,5$  A), joka syötetään magneettikelalle. Kelan tuottama magneettinen voima vaikuttaa mäntään, joka liikkuu tietyn matkan ja puristaa joustaa kasaan. Mäntä pysähtyy, kun magneettinen voima ja jousivoima ovat tasapainossa. Jousi painaa karan kartiomaista istukkapintaa vasten ja jousen jousipaine määrittää venttiilin avautumispaineen ja siten järjestelmän maksimipainetason. Kun karaan vaikuttava öljynpaine voittaa jousipaineen, niin venttiili avautuu. [22; 23].

Karan asemamittauksella venttiilin staattiset ja dynaamiset ominaisuudet parantuvat sekä karan asema saadaan määritettyä ulkoisista häiriöistä riippumatta. Suoraanohjatut paineenrajoitusproportionaaliventtiilit soveltuvat vain pienien tilavuusvirtojen ohjaukseen (ja säätämiseen) ja tavallisesti niitä käytetäänkin esiohjausventtiileinä esiohjatuisissa paineenrajoitusproportionaaliventtiileissä [14, s. 346]. Tarkempaan paineensäätöön vaaditaan kuitenkin järjestelmän paineen mittausta ja mittaustiedon takaisinkytkentä proportionaalimagneetin ohjausarvoon. Järjestelmän paine mitataan tavallisesti ulkoisella paineanturilla.

### 3. AUTOMAATTISEN TESTAUSJÄRJESTELMÄN JA UUDEN TESTAUSMENETELMÄN YLEISKUVAUS

Automaattinen testausjärjestelmä korvaa vanhan käytössä olleen testausmenetelmän, josta on kerrottu luvussa 2.3. Kuvassa 36 on esitetty uuden testausmenetelmän lohkokaa-  
vio, josta selviää mitkä tekijät ovat läsnä automaattisessa koekäytössä.



**Kuva 36.** Uusi testausmenetelmä.

Testausmenetelmään osallistuvat tekijät ovat: koekäyttäjä, automaattinen testausjärjestelmä, muokattu hydraulikoneikko, testattava laite ja kuormituslaite. Testattavista hydraulilaitteista on kerrottu tarkemmin luvussa 2.2. Lisäksi kuvasta havaitaan eri toimijoiden väliset signaalit: Informaation välitys, ohjaustoimenpiteet ja koekäytön aluksi tehtävät säättötoimenpiteet.

**Koekäyttäjä** on testin päähallitsija, joka aloittaa ja keskeyttää koekäytön hätätilanteissa. Koekäyttäjä liittää tarvittavat anturit ja letkut laitteeseen sekä tekee hydraulilaitteelle tarvittavat alkusäädöt, kuten paineenrajoitusventtiilin säädön. Koekäyttäjä myös käynnistää hydraulikoneikon alkusäätöjen yhteydessä ja ohjaa automaattisen testausjärjestelmän avulla varsinaista koekäyttöä.

Koekäytettävä hydraulilaitte saa käyttötehonsa **muokatulta hydraulikoneikolta**. Hydraulikoneikko perustuu vanhaan hydraulikoneikkoon, mutta siihen on lisätty sähköisesti

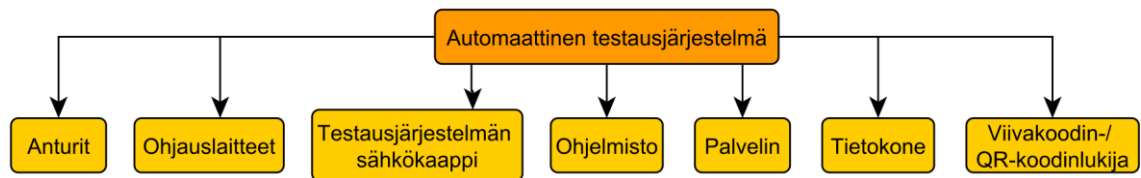


ohjattu 2/2-suuntaproportionaaliventtiili, paineanturit paine- ja tankkilinjaan sekä lämpötila-anturi hydraulioöljysäiliöön. Syöttöpainelinjassa on 2 kpl paineantureita, joista toista anturia käytetään mittaustiedon tallentamiseen testausjärjestelmällä ja toinen paineanturi näyttää mittaustiedon hydraulikoneikon paneelimitarissa. Tankkilinjassa olevaa paineanturia käytetään tankkilinjan paineen tallentamiseen sähköistä mittausraporttia varten. Öljysäiliössä olevaa lämpötila-anturia käytetään öljyn lämpötilan tallentamiseen koekäytön aikana. Tällöin mittauksista saadaan vertailukelpoisempia, kun tiedetään mittauslämpötila.

**Automaattinen testausjärjestelmä** ohjaa koekäyttöä ja hydraulikoneikkoa, joka tuottaa hydraulitehon hydraulilaitteelle. Hydraulikoneikko välittää tiedon tilastaan (ok tai ei ok) testausjärjestelmälle, joka tilan mukaan jatkaa tai ei jatka koekäyttöä. Automaattinen testausjärjestelmä mittaa laitteen suoritusarvoja, kuten veden painetta ja tilavuusvirtaa sekä keskeyttää koekäytön mikäli suoritusarvoille asetetut hätäraja-arvot ylitetään. Testausjärjestelmä ohjaa myös **kuormituslaitetta**, jolla luodaan keinokuormitus testattavalle laitteelle. Keinokuormituksena voidaan käyttää esimerkiksi korkeapainevesipumppujen koekäytössä yksinkertaisia mittakuristimia, joilla vastustetaan pumpattavan veden virtausta ja saadaan vesipaine kohoamaan.

Koekäytön lopuksi testausjärjestelmä tarkistaa oliko suoritusarvot asetettujen laaturajojen sisällä ja hyväksyykö koekäyttäjä laitteen visuaaliset tarkastukset. Jos mittaustulokset olivat laaturajojen sisällä ja koekäyttäjällä hyväksyi visuaaliset tarkastukset, niin laitteen koekäyttö on hyväksytty. Tämän jälkeen testausjärjestelmä tallentaa testitulokset tietokantaan ja luo **sähköisen mittausraportin** mittaustuloksista. Mittausraportista selviää hyväksyttiin vai hylättiinkö laitteen koekäyttö. Mittausraportista on esitetty kuva luvussa 4.3.2 sivulla 73.

Kuvassa 37 on esitetty automaattiseen testausjärjestelmään kuuluvat 7 eri osiota: anturit, ohjauslaitteet, testausjärjestelmän kytkentäkaappi, ohjelmisto, palvelin, tietokone sekä viivakoodin- ja QR-koodinlukija.



**Kuva 37.** *Automaattinen testausjärjestelmä.*

Testausjärjestelmä ohjelmisto koostuu konfigurointiohjelmasta sekä testausjärjestelmän varsinaisesta käyttöliittymästä. Konfigurointiohjelmalla luodaan jokaiselle laitteelle oma testialgoritmi ja käyttöliittymän kautta suoritetaan varsinainen koekäyttö.

**Konfigurointiohjelma** on Excel-pohjainen työkalu, jossa neljällä eri välilehdellä määritetään mittaustaajuus, hälytysaika, visuaaliset tarkastukset, käytettävät anturit (inputit),

käytettävät ohjaukset (outputit) sekä ajettava testialgoritmi. Käytetyille antureille määritellään hälytysrajat, joiden ylittyessä koekäyttö keskeytetään, kun rajat ovat olleet ylitytinä hälytysajan verran. Lisäksi antureille määritetään rekursiivisuodattimen painokerroin. Reskursiivisuodattimesta on kerrottu lisää luvussa 2.4.5. Käytetyille ohjauslaitteille voidaan valita PID-säätimen säädinparametrit, jos ohjauslaitetta halutaan käyttää säätämiseen. Testialgoritmi koostuu askeleista, joissa määritetään kunkin askeleen kesto aika, ohjausarvot ja laaturajat anturien näyttämille. Laaturajojen ylittyessä koekäyttö ajetaan loppuun, mutta laitteen koekäyttö hylätään. Konfiguroinnin jälkeen excel-tiedosto eli konfigurointitiedosto tallennetaan nimellä, johon tulee muun muassa laitteen tuotekoodi. Laitteen tuotekoodin perusteella konfigurointitiedosto on haettavissa palvelimelta koekäyttöä aloitettaessa.

**Testausjärjestelmän käyttöliittymä** on selain-pohjainen ohjelma, jonka kautta koekäyttöä hallitaan. Testin alussa luetaan **koodinlukijalla** koekäyttäjän sekä koeajettavan laitteen tiedot, jotka tulevat sitten sähköiseen mittausraporttiin. Laitteen tuotekoodin avulla haetaan laitekohtainen **konfigurointitiedosto** palvelimelta. Koejettavia laitteita voi olla 1 – 8 kpl ja kerralla voidaan ajaa vain yhden tuotekoodin laitteita, joille käytetään samaa konfigurointitiedostoa.

Koekäyttäjä käynnistää testin hallintapaneelistä ja tarkkailee koekäyttöä tietokoneen ruudulta näkyvistä mittausarvoista (reaaliaikanaäyttö) sekä tarkkailemalla itse laitetta. Koekäytön jälkeen koekäyttäjä tarkastaa **sähköisen mittausraportin**, josta näkyy testin tulokset. Koekäytön hylkäämisestä tulee tarkat merkinnät raporttiin, joiden perusteella voidaan paikantaa hylkääsy, kuten käytetty mittauskanava ja mitattu suure. Käyttöliittymästä pääsee myös katsomaan ja hakemaan aiemmin suoritettuja eri laitteiden mittausraportteja. Esimerkiksi laitteen tullessa huoltoon voidaan tarkistaa laitteen aikaisemmat mittausraportit.

**Testausjärjestelmän kytkentäkaapin** sisälle on kiinnitetty koekäyttöä ohjaava ohjelmoitava loogiikkaohjain eli PLC (*engl. Programmable Logic Controller*), johon on liitetty anturisignaaleja ja ohjausviestejä välittävät I/O-kortit (input/output). I/O-korttien jokaiselle kanavalle on vedetty sähköjohdot kytkentäkaapin etuseinässä olevista 4-napaisista M12 runkoliittimistä. Runkoliittimiin liitetään mittaukseen käytettyjen **antureiden** sekä **ohjauslaitteiden** sähköjohdot kulloisenkin koeajettavan laitteen mukaisesti. PLC on kytketty RJ45 kaapelilla yrityksen sisäiseen verkkoon, jonka kautta mittaus tieto välitetään palvelimelle raakadatana CSV-tiedostomuodossa (*engl. Comma Separated Values*). CSV-tiedostomuodolla tallennetaan yksinkertaista taulukkomuotoista tietoa tekstitiedostoon. CSV-tiedostossa taulukkorakenteen solut on erotettu toisistaan pilkuilla ja rivinvaihdolla. Palvelin muodostaa CSV-tiedostosta mittausarvoja havainnollistavan kuvaajan, joka tulee sähköiseen mittausraporttiin. Mittausarvoista muodostetun kuvaajan lisäksi PDF-muotoiseen (*engl. Portable Document Format*) sähköiseen mittausraporttiin tulee koekäyttäjän nimi, laitteen tiedot sekä koekäyttäjän suorittamien visuaalientarkastusten tulokset. Sekä CSV-tiedosto että PDF-raportit tallennetaan yrityksen palvelimelle.

## 4. AUTOMAATTISEN TESTAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

### 4.1 Hydraulikoneikon muutosten suunnittelu

#### 4.1.1 Hydraulikoneikon muutosten yleiset vaatimukset

Hydraulikoneikon modernisoinnin suunnittelussa päävaatimuksena ovat **öljyn virtauksen ja järjestelmän painetason proportionaalinen säätö sekä ohjaus automaattisella testausjärjestelmällä**. Tilavuusvirran ja paineen säätö vaatii mittaustiedot suureista sekä suureita ohjaavat ohjauslaitteet ja säätimen. Lisäksi tarvitaan järjestelmän lämpötilan mittausta, jotta voidaan identifioida missä lämpötilassa tuotteen testaus on suoritettu. Näin voidaan luotettavasti verrata kahden eri tuotteen testituloksia toisiinsa, kun testit on suoritettu lähes samalla öljyn lämpötilalla. Periaatteessa myös ympäristön lämpötila tulisi mitata, jolloin saadaan sen vaikutukset rekisteröityä mittausdataan, mutta tämä on mahdollista lisätä myöhemmin järjestelmään.

Öljyn tilavuusvirran ja järjestelmän painetason säätö vaativat **säätöjärjestelmän** (luku 2.6) mukaisesti mittaustiedon säädettävistä suureista, toimilaitteen suureiden ohjaamiseen sekä itse säätimen. Öljyn tilavuusvirran mittaamiseen tarvitaan tilavuusvirta-anturi ja järjestelmän paineen mittaamiseen elektroninen paineanturi. Kaikki **anturit** tulee valita siten että ne ovat yhteensopivia I/O-korttien sisäänmenojen (*engl. input*) kanssa, jotka hyväksyvät seuraavat anturisignaalit: analoginen virtaviesti 0 – 20 mA, analoginen jänniteviesti 0 – 10 V, digitaalinen korkeataajuuksinen pulssiviesti 0/24 V ja digitaalinen kaksitilainen on/off-viesti 0/24 V.

Paineanturit sijoitetaan siten, että tuotteen yli olevasta paine-erosta ja öljyn tilavuusvirrasta on mahdollista laskea tuotteelle siirrettävä hydraulinen käyttöteho. Esimerkiksi vesipumpulta mitataan vesipaine ja veden tilavuusvirta, näin laitteen antoteho voidaan laskea. Saaduista antotehon ja käyttötehon suhteesta voidaan laskea tarvittaessa laitteen **hyötysuhde**.

Öljyn tilavuusvirran ja järjestelmän paineen ohjaamiseen sekä säätämiseen voidaan käyttää **proportionaali-, servoproportionaali- tai servoventtiileitä**. Näistä ohjaus- ja säätöventtiileistä sekä niiden käytöstä tilavuusvirran ja paineen säätöön on kerrottu tarkemmin luvussa 2.6.

Säätöventtiileille täytyy valita **ohjainkortit**, jotka muodostavat I/O-kortin ohjaussignaaliin verrannollisen syöttövirran venttiilin magneettikelalle. Säätöventtiileitä ohjataan I/O-korteilla, joten ohjainkorttien tulee olla yhteensopivia I/O-korttien ohjaussignaalien

kanssa. Testausjärjestelmän I/O-korttien analogiaulostulot ovat 0 – 20 mA virtaviestejä. Lisäksi ohjainkorttien maksimisyöttövirran tulee olla yhteensopiva venttiilin magneettikelan kanssa sekä vahvistinkortin käyttöjännitteen tulee olla yhteensopiva venttiilin magneettikelan ja testausjärjestelmän I/O-kortin kanssa (24 V DC).

Säätöjärjestelmän muodostamiseen tarvitaan **PID-säädin**, joka säätää venttiilin karan aseman sellaiseksi, että haluttu tilavuusvirta tai paine saavutetaan. PID-säädin toteutettiin tässä järjestelmässä ohjelmakoodina ja säätimen käytöstä on kerrottu tarkemmin luvussa 4.3.1.

Suunnitteluvaatimuksena on myös manuaalisen koekäyttömahdollisuuden säilyttäminen, jolloin **kaksi eri koekäyttömoodia: automaattinen** ja **manuaalinen** asettavat tietyt haasteet ja rajoitteet hydraulikoneikkoa suunniteltaessa. Automaattijossa öljyn virtausta ja painetta säädetään testausjärjestelmällä ohjaamalla säätöventtiileitä. Manuaalijossa öljyn virtausta ohjataan mekaanisesti ohjatulla 3/2-suunta-proportionaaliventtiilillä (valintaventtiili) ja öljyn painetta sähköisesti ohjatulla paineenrajoitusproportionaaliventtiilillä.

Hydraulikoneikon muutoksia suunniteltaessa pyritään hyödyntämään olemassa olevan vanhan hydraulikoneikon komponentteja mahdollisuuksien mukaan. Vanhojen komponenttien soveltuvuus uuteen hydraulikoneikkoon käydään kuitenkin läpi tarkasti analysoimalla komponenttien suorituskykyarvot ja tutkimalla täyttävätkö komponentit niille asetetut vaatimukset. Kunkin pääkomponentin valintaan vaikuttavat vaatimukset on kerrottu komponenttivalintaa käsittelevässä luvussa 4.1.3.

Komponentteja valittaessa käytetään **mitoitusarvoina** alkuperäisiä säätötilavuushydraulipumpun ja sähkömoottorin tietoja. Tällöin mitoittamiseen käytettävä maksimitilavuusvirta  $Q_{\max}$  lasketaan kaavasta

$$Q = \frac{n \times V_k}{1000} = \frac{1500 \text{ rpm} \times 71 \text{ cm}^3}{1000} = 106,5 \frac{\text{L}}{\text{min}} \approx 107 \frac{\text{L}}{\text{min}}, \quad (16)$$

jossa  $n$  on sähkömoottorin kierrosnopeus [1/min] ja  $V_k$  on hydraulipumpun kierrostilavuus [ $\text{cm}^3$ ] [14, s. 477].

Komponenttien **paineenkeston** mitoittamiseen käytetään hydraulipumpun paineleikkurin asetuspainetta, jolloin järjestelmän maksimipaine on  $P_{\max} = 280$  bar. Käytännössä eri tuotteiden koekäytön yhteydessä yleisimmin käytetty maksimipainetaso on noin 210 bar.

#### 4.1.2 Hydrauliikan muutosten tekninen toteutus

Vaatimusten perusteella suunnitellut hydraulikoneikon muutokset sekä venttiileiden ohjaussekvenssit näkyvät liitteessä D olevasta hydraulikaaviosta, osaluettelosta ja ohjaussekvenssitaulukosta. Hydraulikoneikon pääkomponentit ovat

- säätötilavuushydraulipumppu,

- sähkömoottori,
- sähköisesti esiohjattu 2/2-suuntaproportionaaliventtiili,
- mekaanisesti suoraanohjattu 3/2-suuntaproportionaaliventtiili (valintaventtiili),
- öljyn tilavuusvirta-anturi (FT1), mekaanisesti suoraanohjattu 4/3-suuntaventtiili, painesuodatin,
- sähköisesti suoraanohjattu paineenrajoitusproportionaaliventtiili,
- öljyn paine-anturit (PT1, PT2 ja PT3),
- lämpötila-anturit (TT1, TT2),
- pinnankorkeuskytkimet (LT1, LT2),
- vesijäähdytin,
- paluusuodatin,
- öljysäiliö,
- erillinen suodatuspiiri,
- koneikon ohjaamiseen käytettävä koneikon sähkökaappi (ei näy hydraulikaaviossa) sekä
- testausjärjestelmän kytkentäkaappi (ei näy hydraulikaaviossa).

Uusi hydraulikoneikko perustuu vanhalle hydraulikoneikolle, josta on kerrottu luvussa 2.3.1. Uusi hydraulikoneikko toimii vanhan hydraulikoneikon periaatteita noudattaen, mutta siihen on lisätty käsiventtiilin rinnalle sähköisesti esiohjattu 2/2-suuntaproportionaaliventtiili, jota käytetään tilavuusvirran säätöön automaattiajossa. Lisäksi paineenrajoitusproportionaaliventtiilin ohjausta on muokattu (2 eri koekäyttömoodia) ja järjestelmään on lisätty paine- sekä lämpötila-antureita ja putkituksia on muutettu.

Vanhasta hydraulikoneikosta käytettiin seuraavat pääkomponentit: sähkömoottori, säätötilavuushydraulipumppu, mekaanisesti ohjattu 3/2-suuntaproportionaaliventtiili (valintaventtiili), painesuodatin, sähköisesti ohjattu paineenrajoitusproportionaaliventtiili, mekaanisesti ohjattu 4/3-suuntaventtiili, öljyn tilavuusvirta-anturi, pinnankorkeuskytkimet, vesijäähdytin, paluusuodatin, öljysäiliö ja erillinen suodatuspiiri. Uuteen koneikkoon lisätään 2/2-suuntaproportionaaliventtiili, öljyn paine-anturit (PT1, PT2 ja PT3), lämpötila-anturit (TT1, TT2) sekä tehdään vaadittavat muutokset putkitukseen ja koneikon sähkökaappiin (esimerkiksi automaatti/manuaali-kytkimen lisäys).

Uusi hydraulikoneikko on vanhan koneikon tapaan kuormantunteva LS-järjestelmä, jossa LS-ohjattu pumppu pyrkii pitämään pumpun paineen ja LS-paineen välisen paine-eron tehtaalla asetetussa 14 bar:ssa. Säätötilavuushydraulipumpulta saatava tilavuusvirta asetetaan **automaattitilassa 2/2-suuntaproportionaaliventtiilin** ja **manuaalitilassa 3/2-suuntaproportionaaliventtiilin** avaumaa muuttamalla. Proportionaaliventtiileiden yli oleva paine-ero vaikuttaa LS-säätimen paine-eroventtiilin karan molemmiin puolin. Pumpun LS-säädin pyrkii pitämään proportionaaliventtiilien karojen yli olevan paine-eron ja siten proportionaaliventtiilien läpi virtaavan tilavuusvirran vakiona proportionaaliventtiilien avaumista riippumatta. Paine-ero pysyy vakiona, kun pumpattavan öljyn määrää lisätään tai lasketaan kuormituksen mukaan pumpun vinolevyn kulmaa säätämällä. Tällöin saavutetaan lähes vakio tilavuusvirta kuormituksesta riippumatta

Automaattitilassa tilavuusvirtaa säädetään portaattomasti (väliltä 0 – 107 L/min) 2/2-suunta-proportionaaliventtiilin avaumaa säätämällä käyttäjän asetusarvon ja tilavuusvirta-anturin mittaussarvon erosuureen mukaan. Positiivisella erosuureella venttiilin avaumaa kasvatetaan ja negatiivisella erosuureella avaumaa pienennetään PID-säätimen säätöalgoritmien mukaisesti. Tilavuusvirran säädön toimivuus testattiin käyttöönoton yhteydessä ja mittaustulokset esitellään luvussa 5.5. Tilavuusvirtaa on myös mahdollista ohjata ilman PID-säädintä asettamalla tietyt ohjausarvot 2/2-suunta-proportionaaliventtiilille konfigurointiohjelmassa, jolloin takaisinkytkentää ei käytetä ja järjestelmä toimii ohjausjärjestelmänä.

Automaattitilassa painetta ohjataan ja säädetään **paineenrajoitusproportionaaliventtiilillä**, jolla asetetaan järjestelmän sekä LS-paineen maksimiarvo portaattomasti väliltä 0 – 280 bar. Yleensä paineenrajoitusproportionaaliventtiiliä ohjataan ilman PID-säädintä, jolloin painetakaisinkytkentää ei käytetä ja paineen asetusarvot saadaan konfigurointiohjelman asetusarvoista. PID-säädintä voidaan käyttää tarvittaessa myös painerampin ajamiseen, jolloin painetta säädetään säätämällä proportionaalipaineenrajoitusventtiilin avautumispainetta käyttäjän asetusarvon ja paine-anturin mittaussarvon erosuureen mukaan. Paineen säätö testattiin käyttöönoton yhteydessä ja mittaustulokset esitellään luvussa 5.6. Manuaalitilassa paineenrajoitusproportionaaliventtiilin avautumispaine on aseteltavissa koneikon sähkökaapissa olevalla potentiometrillä.

**Painesuodatinta** käytetään ennen paineenrajoitusproportionaaliventtiiliä, jolloin likapartikkelit eivät pääse aiheuttamaan jumiutumista ja vikatilanteita. Suodattimen absoluuttikoko on 2 µm.

Mekaanisesti ohjatulla Valvoilin **4/3-suunta-venttiilillä** ohjataan pumpulta tuleva öljy joko P1- tai P2-painelinjaan sen mukaan kumpaan linjaan koekäytettävä laite on liitetty. Painelinjoja on kaksi, jolloin toisessa linjassa voidaan käyttää suurille tilavuusvirroille isompaa letkua (3/4” – 1”) ja toisessa pienemmille tilavuusvirroille sopivaa letkukokoa (1/2”). Hydraulikoneikkossa on myös kaksitankkilinjaa T1 ja T2 samalla periaatteella. Järjestelmään on lisätty erillinen vuotolinja, ettei tuotannossa tule sekaannusta tankki- ja vuotolinjojen kanssa. Erillisen vuotolinjan ansiosta ei voida vahingossa ajaa öljyä tankkiin paluusuodattimen ohitse. Kaikki linjat on selvyuden vuoksi merkitty metallilaatoilla, joissa on kunkin linjan symbolit (P1, P2, T1, T2 ja L).

Mekaanisesti ohjatussa 4/3- suunta-venttiilissä on lisäksi sisäinen paineenrajoitusventtiili, joka toimii samalla järjestelmän pääpaineenrajoitusventtiilinä. Varoventtiilinä toimivan paineenrajoitusventtiilin asetusarvo säädetään noin 5 – 10 % paineleikkurin asetusarvoa suuremmaksi, jolloin varoventtiili säädetään asetusarvoon 305 bar. Pumpun paineleikkurin sekä paineenrajoitusproportionaaliventtiilin vikatilanteessa 4/3-suunta-venttiilin sisäinen paineenrajoitusventtiili suojaa järjestelmää ylipaineelta.

**Jäähdytin** huolehtii säiliöön palaavan öljyn oikeasta käyttölämpötilasta ja jäähdyttää sitä tarvittaessa. Kun öljyn lämpötila ylittää tietyn asetusarvon, niin jäähdytinnestettä ohjaava 2/2-suuntaventtiili avataan, jolloin neste alkaa kiertämään jäähdyttimen läpi ja samalla öljyn lämpötila laskee.

**Öljysäiliö** toimii järjestelmän hydrauliohjauksen varastona sekä osittaisena jäähdyttimenä. Öljysäiliöön on kiinnitetty **paluusuodatin** testattavalta tuotteelta palaavan öljyn suodatukseen, **pinnankorkeusanturit** öljyn tason valvontaan sekä **lämpötila-anturit** lämpötilan valvontaan. Lämpötila-anturi tulee sijoittaa SFS 5059 mukaan suurimman virtauksen alueelle, jolloin pumpun imuletku on luonteva sijoituspaikka [13, s. 15].

**Paineanturit** mittaavat järjestelmän paineen 4/3-suuntaventtiilin painelinjan mittausportista. Standardin SFS 5059 mukaisia häiriöttömiä putkiosuuksia ennen ja jälkeen paineantureiden ei pystytä toteuttamaan näin ahtaassa järjestelmässä, mutta paineanturien paikat on todettu toimivaksi vanhassa järjestelmässä paineen mittauksessa. Painelinjassa on kaksi paineanturia, joista toista käytetään painetiedon tallentamiseen ja toista käytetään järjestelmän painetaso ilmoittamiseen koekäyttäjälle hydraulikoneikon paneelimitarin avulla. Myös tankkilinjassa on paineanturi, jotta tuotteen yli oleva paine-ero voidaan laskea.

Öljyn tilavuusvirta mitataan hammaspyörätyyppisellä **kammiotilavuusanturilla**. Tilavuusvirta-anturi sijoitetaan painelinjaan ennen 4/3-suuntaventtiiliä vanhan järjestelmän mukaisesti. Tulee kuitenkin pitää mielessä, että 4/3-suuntaventtiilissä tapahtuva vuotovirtaus omalta osaltaan vähäisesti vääristää mittaustuloksia. Parempi sijoituspaikka voisi olla juuri tankkiliitännöiden jälkeen, jolloin vain tuotteen läpi menevä öljy kulkisi anturin läpi eikä korkeasta paineesta aiheutuisi vuotovirtaushäiriöitä.

Paine-erosta ja öljyn tilavuusvirrasta on mahdollista laskea tuotteelle menevä hydraulinen käyttöteho. Kun tuotteelta saatava antoteho mitataan samalla periaatteella, niin **hyötysuhde** voidaan tarvittaessa laskea. Tulee huomata, että paineenmittaukseen tulee hieman virhettä paine- ja tankkilinjoissa olevista pikaliittimistä. Tällöin paine-ero muodostuu todellista arvoa hieman suuremmaksi ja siten laskettu hyötysuhde on heikompi. Tällä ei ole merkitystä standardituotteiden peruskäytössä, mutta tuotekehityksen halutessa tarkempia tuloksia tulee mittaukset ottaa suoraan tuotteen paine ja tankkiliittimistä.

Koneikossa on myös **erillinen suodatuspiiri**, jossa vakiotilavuushydraulipumpulla pumpataan säiliössä olevaa öljyä erillisen suodattimen (2 µm) läpi. Lisäksi pohdittiin päälinjaan liitettävän isomman painesuodattimen lisäämistä järjestelmään, jolloin 2/2-suunta- ja propotionaaliventtiili, paineenrajoitusproportionaaliventtiili ja tilavuusvirta-anturi olisivat paremmin suojattuja likapartikkeleilta. Tällöin myös tuotteisiin koekäytön aikana kulkeutuva likapartikkeleiden määrä vähentyisi ja tämä osaltaan pidentäisi tuotteiden elinkaarta. Suunnittelupäällikön Timo Niemisen ja muiden suunnittelijoiden kanssa käytyjen

keskustelujen tuloksena todettiin kuitenkin erillisen suodatuspiirin suodatuskyky riittäväksi [1].

**Koneikon sähkökaapissa** on kytkimet koneikon käynnistämiseen ja sammuttamiseen sekä monitorit järjestelmän paineen, tilavuusvirran ja lämpötilan tarkkailuun. Sähkökaapiin on kytketty myös vikavalot erilaisten häiriöiden näyttämiseen. Sähkökaapin etupaneelissa on potentiometri, jolla säädetään manuaalillassa järjestelmän maksimipainetaso testitilanteeseen sopivaksi.

### 4.1.3 Hydraulikoneikkoon valitut komponentit

#### 2/2-SUUNTAPROPORTIONAALIVENTTIILIN JA OHJAINKORTIN VALINTA

**Vaatimukset** tilavuusvirran ohjaukseen ja säätöön valittavan toimilaitteen osalta olivat tilavuusvirran jatkuva portaaton säätö ja sijoitettavuus nykyiseen järjestelmään. Vaatimusten perusteella tilavuusvirtaa tullaan säätämään 2/2-suuntaproportionaaliventtiilillä, jossa ei ole asematakaisinkytkentää. Tilavuusvirran säätö olisi voitu toteuttaa myös esimerkiksi tarkemmalla ja nopeammalla servoproportionaali- tai servoventtiilillä, mutta 2/2-suuntaproportionaaliventtiilin käyttö yhdessä tilavuusvirta-anturin kanssa osoittautui toimivaksi, yksinkertaisimmaksi ja kustannustehokkaimmaksi tavaksi toteuttaa tilavuusvirran säätö ja ohjaus. Tilavuusvirran säädön testit ovat luvussa 5.5. Haluttaessa paremmat staattiset ja dynaamiset säätöominaisuudet tulee siirtyä asematakaisinkytkettyjen ja tarkempien servoproportionaali tai servoventtiilien käyttöön.

Valittaessa 2/2-suuntaproportionaaliventtiiliä tulee kiinnittää erityistä huomioita venttiilin hystereesiin, ominaiskäyrän (ohjausvirta/tilavuusvirta kuvaaja) muotoon tietyllä paine-erolla (ilmoitettu yleensä 8 tai 10 bar [14, s. 336]), venttiilin vuotovirtaukseen, kelan maksimivirtaan ja käyttöjännitteeseen sekä kustannustehokkuuteen.

Alkuun täytyy todeta, että eri valmistajien venttiilien ominaisuuksien luotettava vertaaminen toisiinsa on lähes mahdotonta valmistajien julkaisemia datalehtiä tarkastelemalla, mutta niitä voidaan pitää suuntaa antavina ohjeina. Venttiilien suoritusarvojen vertailu on hyvin vaikeaa sillä venttiilit on mitattu erilaisissa olosuhteissa kuten eri painehäviöillä, lämpötiloilla, öljyn viskositeeteilla, testilaitteilla ja niin edelleen.

Valitun venttiilin tuli olla rakenteeltaan istukkatyypinen jotta vuotovirtaus venttiilin yli olisi mitätön. Tällöin venttiilin vuotovirtaus ei häiritse manuaalillassa tapahtuvaa koe-käyttöä. Istukkatyyppisistä venttiileistä valittiin vertailtavaksi Hydac PWK12120WP, Sun Hydraulics FPHKMEN224 ja Hydraforce SP16-20. Näistä Hydac:n ja Hydraforcen venttiileillä hystereesi on pienempi kuin 5 % ja Sun Hydraulicsin hystereesiä ei valmistaja ilmoita [19–21]. Hydraforcen venttiilin säätöalue (@  $\Delta p = 11$  bar) osoittautuu datalehtien vertailun perusteella laajemmaksi tilavuusvirroilla 0 – 40 L/min verrattuna Hydacin venttiiliin. Tällöin käytettävän ohjausvirran skaala on suurempi ja ohjausarvon muuttaminen



muuttaa vähemmän virtauksen arvoa, joten päädyimme Hydraforcen venttiilin valintaan [20; 21]. Lisäksi Hydraforcen 2/2-suuntaapropotionaaliventtiilistä on hyviä käyttökoemuksia Dynaset Oy:ssa, mikä puolsi valintaa [1].

**Valittu venttiili** on patruunatyypinen sähköisesti esiohjattu Hydraforce SP16-20 2/2-suuntaapropotionaaliventtiili. Venttiilin rakenne ja symboli on esitetty liitteissä. Venttiili on jousen paineen sekä öljyn paineen vaikutuksesta perustilassaan (magneetikela ei ole aktiivinen) normaalisti suljettu, jolloin venttiilin läpi ei virtaa öljyä. Venttiilin avausta säädetään magneettikelan syöttövirtaa proportionaalisesti muuttamalla, jolloin magneettinvoima siirtää ankkuriin kiinnitetyn venttiilin karan istukkapinnasta. Syöttövirtaa muuttamalla voidaan asettaa portaattomasti portista 2 porttiin 1 virtaavan öljyn määrä.

Hydraforcen venttiilin hystereesi on pienempi kuin 5 %, kun ohjausvirta on 0 – 60 % ja hystereesi on pienempi kuin 10 %, kun ohjausvirta on 60 – 100 %. Venttiilin läpäisemä suurin sallittu maksimitilavuusvirta on 265 L/min ja maksimityöpaine on 250 bar. Paineenkesto on hyväksyttävissä, sillä järjestelmän painetaso on harvoin yli 250 bar ja venttiilien maksimipainetaso on aina ilmoitettua normaalia työpainetasoa suurempi. Katso tarkemmat tiedot liitteestä E.

2/2-suuntaapropotionaaliventtiilin ohjainkorttia valittaessa täytyi kiinnittää huomiota yhteensopivuuteen I/O-korttien sekä venttiilin magneettikelan kanssa. Ohjainkortin sisäänmeno täytyi tällöin olla 4 – 20 mA ja ulostulovirta magneettikelalle 0 – 1,2 A. Ohjainkortin käyttöjännitteen tuli olla 24 V DC ja dither-taajuuden (syöttövirran värähtelytaajuus) tuli olla aseteltavissa vähintään välille 100 – 400 Hz. Näiden tietojen perusteella valittiin hyväksi todettu pistokkeeseen integroitu Sun Hydraulics'in 990-G01-E016A ohjainkortti. Sun Hydraulics'in ohjainkorttia voidaan ohjata 4 – 20 mA analogiavirta-, 0 – 5 V analogiajännite- sekä 0 – 10 V analogiajännitevietillä.

## PAINEENRAJOITUSPROPORTIONAALIVENTTIILIN JA OHJAINKORTIN VALINTA

Vaatimukset paineen ohjaukseen ja säätöön olivat muun muassa paineen jatkuva porttaaton ohjaus automaattisella testausjärjestelmällä sekä manuaaliajossa koneikon I/O-kortilla. Vaatimusten perusteella painetta tullaan ohjaamaan ja säätämään paineenrajoitusproportionaaliventtiilillä, jossa ei ole asematakaisinkytkentää. Paineenrajoitusproportionaaliventtiilillä säädetään pumpun maksimipaine. Myös paineen säätö olisi voitu toteuttaa esimerkiksi tarkemmalla ja nopeammalla asema-anturilla varustetulla paineenrajoitusproportionaaliventtiilillä, mutta alkuperäinen venttiili osoittautui tarpeisiin nähden toimivaksi, yksinkertaisimmaksi ja kustannustehokkaimmaksi tavaksi toteuttaa painetason ohjaus ja tarvittaessa myös säätö. Paineen säädön testit on luvussa 5.6. Haluttaessa paremmat staattiset ja dynaamiset säätöominaisuudet tulee siirtyä asematakaisinkytkettyjen servoportionaali tai servoventtiilien käyttöön.

Valittu venttiili on alkuperäisen järjestelmän kartioistukkatyypinen sähköisesti suoraanohjattu Bosch Rexroth DBETX-1X/315G24–25NZ4M painerajoitusproportionaaliventtiili. Venttiili rakenne ja symboli löytyvät valmistajan internetsivuilta. Venttiilin hystereesi on pienempi kuin 4 % [22]. Venttiilin nimellistilavuusvirta on 1 L/min ja sallittu maksimitilavuusvirta on 1,5 L/min sekä maksimityöpaine on 315 bar. Venttiilin vasteaika on 60 ms 0 – 100 % ohjaussignaalia ja 70 ms 100 – 0 % ohjaussignaalia [22].

Paineenrajoitusproportionaaliventtiilin ohjainkorttia valittaessa täytyi kiinnittää huomiota yhteensopivuuteen testausjärjestelmän ohjaussignaalien (4 – 20 mA), venttiilin magneettikelan sekä koneikon oman I/O-kortin kanssa (0 – 10 V ohjaussignaali). Virtaviesti voidaan muuntaa virta-jännitemuuntajalla jänniteviestiksi, jolloin voidaan käyttää alkuperäistä jänniteohjattua ohjainkorttia [5, s. 247]. Ohjainkortin sisäänmeno täytyi tällöin olla 0 – 10 V ja ulostulovirta magneettikelalle 0 – 2,5 A. Ohjainkortin käyttöjännitteen tuli olla 24 V DC. Näiden tietojen perusteella valittiin kyseiseen venttiiliin tarkoitettu pistokkeeseen integroitu Bosch Rexroth VT-SSPA1-525-20/V0/0 ohjainkortti [23].

## PAINEAANTUREIDEN VALINTA

Paineantureita valittaessa vaatimuksena oli soveltuvuus järjestelmän työpaineelle ja anturisignaalin yhteensopivuus testausjärjestelmän I/O-korttien sekä koneikon I/O-kortin kanssa. Järjestelmän työpainetaso on 0 – 280 bar ja testausjärjestelmän I/O-korttien hyväksymät analogiset anturisignaalit ovat 0 – 10 V jänniteviesti sekä 0 – 20 mA virtaviesti. Lisäksi täytyi kiinnittää huomioita luvussa 2.4.6 käsiteltyihin anturisignaalin ominaisuuksiin, kuten mittaustarkkuuteen, toistotarkkuuteen, lineaarisuuteen ja lämpötila muutoksen aiheuttamaan muutokseen anturin mittaustarkkuudessa.

Paineanturiksi valittiin painelinjaan Wika A 10, jonka mittausalue on 0 – 400 bar, anturisignaali on 4 – 20 mA virtaviesti, mittaustarkkuus on 1 % mittausalueesta (FSO) ja lämpötilavirhe on maksimissaan 2,5 % mittausalueesta (FSO) [24]. Anturisignaaliksi valittiin jänniteviestiä häiriösietoisempi virtaviesti, koska hydraulikoneikon läheisyydessä esiintyy häiriöitä aiheuttavia magneettikenttiä. Magneettikentät syntyvät muiden tuotteiden, kuten hydraulisten sähkömagneettigeneraattoreiden koejaosta. Painelinjassa on kaksi paineanturia, joista toista käytetään painetiedon tallentamiseen ja toista käytetään järjestelmän painetiedon ilmoittamiseen hydraulikoneikon paneelimitarille.

Tankkilinjan paineanturiksi valittiin Wika A 10, jonka mittausalue on 0 – 100 bar, anturisignaali 4 – 20 mA sekä mittaustarkkuus 1 % mittausalueesta (FSO) ja lämpötilavirhe on maksimissaan 2,5 % mittausalueesta (FSO) [24]. Mittaosalue valittiin näinkin suureksi sillä samat muutokset tullaan tekemään neljään hydraulikoneikkoon, joilla ajetaan hyvin erilaisia tuotteita. Näiden tuotteiden koekäytössä voi esiintyä hetkellisesti hyvinkin suuria tankkipaineita, jolloin tankkipaineen mittaaminen on tärkeässä roolissa.

Standardin SFS 5059 mukaan ennen ja jälkeen paineantureiden on oltava tietyt matkat häiriöttömiä putkiosuuksia, mutta niitä ei pystytä täysin toteuttamaan näin ahtaassa järjestelmässä [13]. Paine-anturien sijoituspaikat on kuitenkin todettu toimivaksi vanhassa järjestelmässä paineen mittauksen osalta [1].

## TILAVUUSVIRTA-ANTURIN VALINTA

Tilavuusvirta-anturia valittaessa tuli pitää mielessä järjestelmän painetaso (0 – 280 bar), maksimitilavuusvirta 0 – 107 L/min sekä I/O-korttien yhteensopivuus anturisignaalin kanssa. Käytettävissä on analogiselle anturisignaali 0 – 10 V jänniteviestiä mittaava ja 0 – 20 mA virtaviestiä mittaavat I/O-kortit sekä pulssien laskentaan soveltuva digitaalinen pulssikortti. Lisäksi täytyi kiinnittää huomioita luvussa 2.4.6 käsiteltyihin anturisignaalin ominaisuuksiin, kuten mittaustarkkuuteen, toistotarkkuuteen ja lineaarisuuteen.

Tilavuusvirta-anturiksi valittiin vanhan hydraulikoneikon painelinjaan soveltuva Kracht VC 3 F1 PS kammiotilavuusanturi, jonka mittausalue on 0,6 – 160 L/min, anturisignaali 0/24 V pulssiviesti, tarkkuus 0,3 % lukemasta sekä resoluutio 333,33 pulssia/L [16]. Syrjäytysperiaatteella toimivan tilavuusvirta-anturin geometrinen hammastilavuus on 3.000 cm<sup>3</sup>, joten yksi pulssi vastaa 0,003 L tilavuutta. Kun tiedetään pulssien määrä tietyssä aikayksikössä, niin voidaan laskea tilavuusvirta.

Kracht tilavuusvirta-anturissa on kaksi anturisignaalikanavaa, jotka antavat 0/24 V pulssiviestejä. Kanavat ovat 90 asteen vaihesiirrossa, jolloin toista kanavaa voitaisiin käyttää öljyn suunnan ilmaisemiseen. Anturin toista kanavaa käytetään kuitenkin tilavuusvirtatiedon tallentamiseen sähköiseen mittausraporttiin ja toisesta kanavan mittaustieto näytetään koekäyttäjälle hydraulikoneikon paneelimittarin avulla.

Kracht kammiotilavuusanturin hyviin puoliin lukeutuu laaja viskositeetti alue sekä paineenkesto. Kammiotilavuusvirta-anturin sijoittamiselle prosessiin ei ole annettu standardissa SFS 5059 erinäisiä ohjeita häiriöttömistä putki osuuksista [13]. Tällöin kammiotilavuusvirta-anturi soveltuu mainiosti kyseiseen järjestelmään, koska putkilinjat kulkevat ahtaissa paikoissa ja häiriöttömiä putkiosuuksia on vaikea järjestää.

## LÄMPÖTILA-ANTUREIDEN VALINTA

Lämpötila-anturiksi valittiin resistanssin muutokseen perustuva IFM TM4101 lämpötila-anturi (PT-100) [25]. Platinavastuslangan resistanssi on 100 Ω, kun lämpötila on 0 °C. Lämpötila-anturi tarvitsee mittausmuuntimen, joka muuntaa resistanssin joko jännite- tai virtaviestiksi. Mittausmuuntimeksi valittiin IFM TP3233, joka muuntaa resistanssin 4 – 20 mA virtaviestiksi [26]. Lämpötila-anturi tulee sijoittaa SFS 5059 mukaan suurimman virtauksen alueelle, jolloin pumpun imuletku on luonteva sijoituspaikka [13, s. 15].

## RAJA-JA SUOJAKYTKIMIEN VALINTA

Vanhan järjestelmän raja- ja suojakytkimet olivat toimivia, joten niitä ei lähdetty vaihtamaan. Rajakytkimet tarvittiin öljyn pinnankorkeuden ylä- ja alarajalle. Suojakytkimet tarvittiin öljyn sekä sähkömoottorin lämpötilasuojaksi. Lämpökytkin toimii suojakytkimenä, joka pysäyttää koneikon öljyn lämpötilan ollessa korkea. Termistori toimii suojakytkimenä, joka pysäyttää sähkömoottorin, kun sen lämpötila kohoaa tietylle tasolle.

Öljyn pinnankorkeuden ylärajan rajakytkimeksi valittiin vanhan koneikon uimurityyppinen Electrotec LM2 CTA 450. Öljyn pinnankorkeuden alarajan rajakytkimeksi valittiin vanhan koneikon uimurityyppinen Electrotec LM1 TA 450 T80. Alarajan rajakytkin sisältää integroidun lämpötilakytkimen, joka aktivoituu 80 °C lämpötilassa.

### 4.1.4 Mekaniikkamuutosten suunnittelu

Hydraulikoneikkoon tarvittavat mekaniikkamuutokset ovat putkitusten muuttaminen hydraulikaavion mukaiseksi, 2/2-suuntaproportionaaliventtiilin sekä antureiden asennuspaikkojen suunnittelu ja kiinnittimien suunnittelu 2/2-suuntaproportionaaliventtiiliä varten.

## 4.2 Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaapin suunnittelu

### 4.2.1 Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaapin vaatimukset

Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaappiin liitetään hydraulilaitteen koejaossa tarvittavat anturit ja ohjauslaitteet. Antureiden avulla kerätään mittaustietoa tuotteen suorituskykyarvoista sähköiseen mittausraporttiin sekä ohjauslaitteilla ohjataan esimerkiksi tilavuusvirtaa ja painetta. Testausjärjestelmän kytkentäkaapin vaatimuksia määritettäessä täytyi tietää mitä suureita halutaan mitata ja ohjata kunkin standardituoteperheen koekäytössä. Eri standardituoteperheitä ovat korkeapainepumput, generaattorit ja kompressorit. Mitattavista ja ohjattavista suureista oli alustavat ehdotukset, mutta ne käytiin vielä läpi tuoteperheiden vastuuhenkilöitä haastatteleamalla ja dokumentoimalla tiedot. Kerättyjen tietojen perusteella määritettiin tarvittavat mittaus- ja ohjauskanavat sekä näiden perusteella vaatimuksiin soveltuvat I/O-kortit. Taulukkoon 2 on koostettu tiedot tarvittavista mittaus- ja ohjauskanavista.

**Taulukko 2.** Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaapin signaalityypit ja kanavamäärät [1].

I/O-korttityyppi	Signaali	Peruskanavat	Lisäkanavat
Analoginen sisäänmeno (AI)	4 – 20 [mA]	8 kpl	-
Analoginen sisäänmeno (AI)	0 – 10 [V]	6 kpl	-
Pulssiviesti (DI)	0/24 [V]	2 kpl	-
Digitaalinen sisäänmeno (DI)	0/24 [V]	8 kpl	1 kpl
Analoginen ulostulo (AO)	4 – 20 [mA]	3 kpl	-
Digitaalinen ulostulo (DO)	0/1 [V]	8 kpl	1 kpl

Taulukosta huomataan tarvittavat peruskanavat, jotka osallistuvat koekäytön varsinaiseen ohjaamiseen ja mittaamiseen sekä ylimääräiset lisäkanavat, joilla toteutetaan tarvittavat turvaominaisuudet. Anturisignaalin mittaamiseen tarvitaan tiedonkeruukortteja (input), joiden sisäänmenot ovat analogisia virtaviestejä (4 – 20 mA, 8 kpl), analogisia jänniteviestejä (0 – 10 V, 6 kpl), digitaalisia pulssiviestejä nopeaan pulssilaskentaan (0/24 V, 2 kpl) ja digitaalisia sisäänmenoja päällä/pois-tilan mittaamiseen (0/24 V, 8 kpl). Lisäksi tarvitaan I/O-kortteja, joiden ulostulot ovat analogisia virtaviestejä (4 – 20 mA, 3 kpl) sekä digitaalisia ulostuloja (0/24 V, 8 kpl).

Testausjärjestelmän turvaominaisuuksiin kuuluu, että testausjärjestelmä seuraa antureiden mittaustietojen perusteella koekäytön etenemistä ja testausjärjestelmän tulee HÄTÄ-signaalilla pysäyttää koneikko, jos konfiguroidut hätäraajat ylitetään. Lisäksi testausjärjestelmän tulee saada hydraulikoneikon tilasta kertova OK-signaali, jolloin koekäyttö on mahdollista aloittaa/jatkaa. Hydraulikoneikolta tuleva OK-signaali katkeaa hydraulikoneikon häiriön yhteydessä, jos esimerkiksi koneikon öljyn pinnankorkeuden alaraja aktivoituu. HÄTÄ-signaalin aktivoituessa tai OK-signaalin katketessa siihen asti mitattu data tallennetaan sähköiseen mittausraporttiin. HÄTÄ-signaali on digitaalinen ulostulo, jolle täytyy varata yksi lisäkanava. OK-signaali on digitaalinen sisäänmeno, jolle täytyy myös varata yksi lisäkanava.

Kytkenäkaapin vaatimukseen kuuluivat myös anturien ja ohjainlaitteiden helppo ja nopea liitettävyyden sekä vaihdettavuus. Tällöin täytyi kiinnittää huomiota liitstandardin valintaan ja liittimien sijoittamiseen.

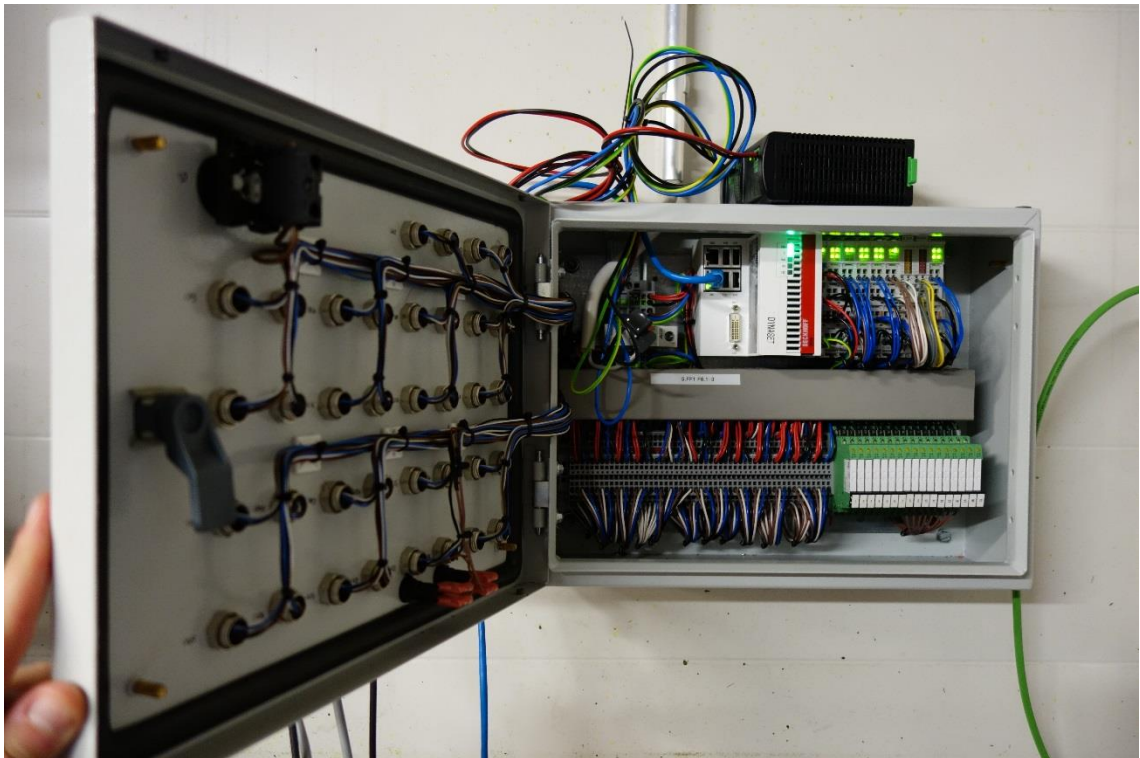
Koekäyttöä tullaan ohjaamaan selain-pohjaisesta käyttöliittymästä tietokoneella, jolloin tiedonkeruukortteihin tulee saada yhteys yrityksen verkosta. Lisäksi mittaustietojen tuli olla tallennettavissa sähköiseen muotoon yrityksen palvelimelle.

Mittauslaitteiston suorituskyvyille annettiin seuraavat suorituskykyvaatimukset: 1 kHz mittaustaajuus standardiajossa ja mahdollisuus 5 kHz mittaustaajuuteen. Perusmittaustaajuutta käytettäessä voidaan tallentaa maksimissaan 5 min koekäyttö (asetettu 300 000 riviä, mutta tätä voidaan tarvittaessa muokata yhtä parametria muuttamalla). Mittauksissa käytettyä mittaustaajuutta pienennettäessä tallennuskyky luonnollisesti kasvaa, sillä 1 Hz

mittaustaajuudella voidaan tallentaa maksimissaan 83 h 20 min pitkä koekäyttö. PLC:n suorituskyvyn tuli riittää kahdelle eri koekäyttöasemalle, jotka liitetään toisiinsa ethercat kaapelilla.

#### 4.2.2 Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaapin toteutus

Vaatimusten perusteella suunnitellun kytkentäkaapin rakenne on esitetty kuvassa 38. Kyt-kentäkaapin suunnittelun päävastaava oli Dynaset Oy:n Jarno Viitanen.



**Kuva 38.** *Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaappi.*

Kuvasta havaitaan kytkentäkaapin pääkomponentit:

- sulautettu PC (sisältää loogisen ohjainkortin eli PLC:n),
- sisäänmeno-/ulostulokortit PLC:n perään kytkettynä,
- virtalähde (tässä vielä kytkentäkaapin päällä),
- runkoliittimet antureille ja ohjauslaitteille kytkentäkaapin kannessa,
- releet digitaaliulostuloille syöttövirran ohjaukseen,
- automaattisulake,
- riviliittimet,
- virtakytkin sekä
- putkisulakkeet ohjauslaitteiden syöttövirralle.

Kyt-kentäkaappi osoittautui liian pieneksi, joten seuraava versio tehtiin isompaan kaappiin, jotta virtalähde mahtui kaapin sisään.

**PLC:ksi** valittiin Beckhoff CX5020. Beckhoff CX5020 on DIN-kiskolle asennettava sulautettu PC, jota voidaan käyttää TwinCat ohjelmiston avulla PLC:nä sekä liikkeenhallintajärjestelmänä [27]. Ohjelmointikielinä hyväksytään kaikki IEC-61131-3 standardin mukaiset kielet.

Beckhoff PLC voidaan liittää kahdella RJ45 liittimellä ethernet-verkkoon ja siihen voidaan liittää tarvittaessa ulkoinen näyttö DVI-porttiin sekä oheislaitteita USB-portteihin (4 kpl). Tallennusmedianana käytetään Compact Flash muistikorttia, joka sisältää käynnistysohjelmiston. PLC sisältää myös yhden sekunnin kapasitiivisen varavirtalähteen (*engl. uninterruptible power source, UPS*), jonka avulla tärkeät tiedot saadaan talteen virtakatkoksen aikana. Beckhoff PLC sisältää virtalähteen, jonka maksimi syöttövirta on 2 A ja syöttöjännite 24 V DC.

Tiedonkeruukortit liitetään PLC:hen työntämällä tiedonkeruukortti PLC:n kyljessä oleviin kiskoihin. Kytettäessä tiedonkeruukortti ja PLC yhdistyvät myös korttien kyljissä olevat virtaliittimet sekä E-bus väyläliittimet. Virtaliittimistä tiedonkeruukortit saavat käyttövirtansa (käytettävissä max 2 A yhteensä). PLC ja tiedonkeruukortit kommunikoi- vat EtherCat verkossa E-bus väyläliittimien välityksellä. Sulautetun PC:n kylkeen voidaan liittää monta tiedonkeruukorttia modulaariseksi paketiksi, sillä mittaustieto kulkee sisäisessä E-bus väylässä ja kortit saavat käyttöjännitteensä sisäisistä virtaliittimistä. EtherCat verkkoa on mahdollista jatkaa laajennuskorteilla, jolloin laajennuskortista voidaan kytkeä ethernet-kaapeli kauempana olevaan jakokorttiin. Jakokortin perään voidaan taas kytkeä monta tiedonkeruukorttia.

**Tiedonkeruukorteiksi** valittiin tarvittavien kanavien perusteella

- analoginen sisäänmeno 0 – 20 mA: 2 kpl Beckhoff EL3144 (16 bit, 4 kanavaa),
- analoginen sisäänmeno 0 – 10 V: 1 kpl Beckhoff EL3164 (16 bit, 4 kanavaa), 1 kpl Beckhoff EL3162 (16 bit, 2 kanavaa),
- digitaalinen pulssiviesti (0/24 V): 1 kpl Beckhoff EL1502 (32 bit, 2 kanavaa),
- digitaalinen sisäänmeno (0/24 V): 1 kpl Beckhoff EL1819 (16 kanavaa),
- analoginen ulostulo (0 – 20 mA): 1 kpl Beckhoff EL4114 (16 bit, 4 kanavaa) sekä
- digitaalinen ulostulo (0/24 V): 1 kpl Beckhoff EL2809 [28–32].

Valitut tiedonkeruukortit ovat terminaalityyppisiä, jotka voidaan liittää modulaariseksi paketiksi PLC:n kanssa. Tiedonkeruukortit ovat resoluutioltaan pääosin 16 bittisiä, mutta pulssiviestien laskentaan tarkoitettu kortti on 32 bittinen. Tiedonkeruukorttien anturisygnaalien mittaustarkkuus pienempi kuin 0,3 % täydestä mitta-alueesta (FSO). Tiedonkeruukorttien ulostulosignaalin tarkkuus on pienempi kuin 0,1 % täydestä ohjausalueesta (FSO). Tiedonkeruukorttien käyttöjännite on 24 V DC. Tarkemmat tiedot löytyvät valmistajan internetsivuilta.

Järjestelmään valittiin Murr Electronik MCS-B 5-110-240/24 **virtalähde**. Virtalähteen nimellisjännite on 110 – 240 V AC, ulostulojännite on 24 V DC ja maksimi syöttövirta on 5 A. Virtalähteessä on 6,3 A sisäinen sulake.

**Runkoliittimiksi** valittiin antureissa yleisesti käytettävät nelijohtimiset M12-runkoliittimet. Kytentäkaappiin etupaneelissa oleviin numeroituihin ja nimettyihin runkoliittimiin liitetään kaikki anturit ja ohjauslaitteet. Numeroinnin perusteella koekäyttäjä tietää mikälaista signaalia kukin kanava hyväksyy ja koekäyttöohjeen perusteella tarvittut anturit ja ohjauslaitteet on helposti liitettävistä koekäyttöä varten.

**Releitä** käytettiin digitaalisten ulostulojen ohjaamina tuottamaan tiedonkeruukortin antamaa 0,5 A virtaa suurempi syöttövirta. Digitaalisella ulostulolla ohjataan relettä, joka antaa tarvittaessa isomman syöttövirran esimerkiksi 2/2-suuntaventtiilin magneettikelalle. Releet ovat kytketty 5 A virtalähteeseen.

**Automaattisulakkeeksi** valittiin Eaton Moeller PLS6-C10 sulake. Automaattisulaketta käytetään suojausulakkeena suojaamaan järjestelmää ja se katkaisee kytentäkaapista virrat, kun käytettävä virta ylittää 10 A.

**2-kerrosriviliittimiä** käytettiin runkoliittimien liittämiseen tiedonkeruukorttiin ja virtalähteeseen. Riviliittimet jakavat virtalähteen plus ja miinusnavat anturien ja ohjauslaitteiden käyttöön sekä liittävät anturien ja ohjauslaitteiden signaalijohtimet tiedonkeruukortteihin. Jos runkoliittimeen tulee vikaa, niin se korvataan uudella ja johdotukset vedetään vain riviliittimille asti. Näin huoltotoimenpiteet mahdolliset lisäykset on helpompi tehdä järjestelmään myöhemmin.

**Virtakytkintä** käytetään kytkemään kytentäkaappiin virrat päälle tai pois päältä. Virtakytkin on kaksiasentoinen kiertokytkin.

**Putkisulakkeet** on liitetty analogisen ulostulokortin syöttövirtajohtimeen, jolloin voidaan suojata herkäät ja arvokkaat proportionaaliventtiilien vahvistinkortit. 2/2-suuntaproportionaaliventtiilin vahvistinkortille asennettiin 2 A sulake (magneettikelan maksimisyöttövirta 1,2 A). Paineenrajoitusproportionaaliventtiilin vahvistinkortille asennettiin 3 A sulake (magneettikelan maksimisyöttövirta 2,5 A).

## 4.3 Mittausohjelmiston suunnittelu ja esittely

### 4.3.1 Testisekvenssin konfigurointiohjelma

Hydraulilaitteiden koekäyttöä varten täytyy jokaiselle laitteelle olla oma laitekohtainen konfigurointitiedosto, joka sisältää laitekohtaisen testialgoritmin. Hydraulilaitteen koekäyttö suoritetaan automaattisella testausjärjestelmällä, joka ohjaa hydraulikoneikkoa



sekä kuormituslaitetta testialgoritmin mukaan. Testialgoritmi on testausjärjestelmän työohje koekäytön suorittamiseksi. Testialgoritmissa annetaan ohjeet koekäytössä käytettäville antureille ja ohjauslaitteille. Siellä annetaan myös hätäraja-arvot, jolloin koekäyttö tulee keskeyttää. Lisäksi siellä annetaan mm. käytettävä mittaustaajuus sekä ohjauslaitteiden arvot, kullakin ajanhetkellä. Testialgoritmissa määritellään myös laaturajat, joiden sisällä käytettyjen antureiden näyttämät tulee pysyä määritellyllä ajanhetkellä.

## VAATIMUKSET

Konfigurointiohjelman käyttöliittymän vaatimuksena oli, että se toteutetaan excel-alusella [1]. Konfigurointiohjelmassa tuli pystyä määrittelemään käytetty mittaustaajuus, viiveaika hylkäykseen, koekäyttäjälle esitettävät kysymykset visuaalisten testien suorittamiseksi, kuhunkin kanavaan liitetyt anturit sekä näiden hätärajat, kuhunkin kanavaan liitetyt ohjauslaitteet sekä PID-säätimen parametrien arvot kullekin ohjauslaitteelle/kanavalle. Anturien ja ohjauslaitteiden mittaus- ja ohjausalueet tuli olla asetettavissa erilaisille antureille ja niiden lisääminen myös tulevaisuudessa tuli olla mahdollista. Lisäksi tuli pystyä määrittelemään varsinainen testialgoritmi, jonka mukaan koekäyttö suoritetaan askelmaisesti edeten.

Testialgoritmissa piti pystyä määrittelemään, kunkin askeleen kesto sekä ohjauslaitteiden asetusarvot askeleen lopussa. Ohjauslaitteen asetusarvoa muutetaan lineaarisesti interpoloimalla edellisen vaiheen ja seuraavan vaiheen asetusarvojen välillä. Laaturajat tuli pystyä määrittelemään kullekin sisäänmenokanavalle ja askeleelle erikseen. Tällöin koekäyttö hylätään, jos tietyn kanavan mittausarvo ylittää asetetut laaturajat mittaushetkellä. Lisäksi tuli pystyä aktivoimaan PID-säädin tietyllä askeleella ohjauskanavalle 1 tai 2. PID-säätimen käskyarvon tuli olla myös lukittavissa säädettyyn arvoon, jolloin PID-säädin ei omalla toiminnallaan häiritse varsinaista koekäyttöä sekä mittaustapahtumaa. Näiden lisäksi määriteltiin yksi askel jonka lopussa on mahdollista pysäyttää testausjärjestelmän ohjauslaitteet testialgoritmissa asetettuihin asetusarvoihin. Tällöin ohjausarvot pidetään asetusarvoissaan ja koekäyttöä jatketaan käyttäjän kuittauksen jälkeen. Tämä pysäytysaskel on tarkoitettu alkusäätöjen tekemiseen, jolloin on mahdollista tehdä vaadittavat säätötoimenpiteet itse laitteelle ennen varsinaisen mittaustapahtuman aloittamista. Kun koekäyttäjä on valmis, hän käynnistää koekäytön virtuaalista nappia painamalla.

## SUUNNITTELU

Konfigurointiohjelman käyttöliittymästä oli tehty alustava versio Insolution Oy:ssä. Työn aikana alustavasta versiosta muokattiin automaattisen testausjärjestelmän käyttöön paremmin soveltuva versio vaatimusten määrittelyjen jälkeen.

Seuraavaksi käydään läpi konfigurointiohjelman käyttöliittymä ja tutustutaan sitten antureiden ja ohjauslaitteiden parametritiedostoihin. Konfigurointiohjelman käyttöliittymä eli konfigurointitiedosto on excel-tiedosto (1 kpl), jossa on neljä päävälilehteä:

- perusparametrit,

- sisäänmenot,
- ulostulot,
- testialgoritmi eli resepti

sekä kaksi apuvälilehteä:

- AI\_skaalaukset (antureiden skaalaukset) ja
- AO\_skaalaukset (ohjauslaitteiden skaalaukset).

Päävälilehtiä käytetään tuotteen koekäytön konfigurointiin sekä apuvälilehtiä antureiden ja ohjauslaitteiden parametrien tuontiin erillisistä excel-tiedostoista (2 kpl).

Ensimmäisellä välilehdellä määritellään tuotteen **perusparametrit**, kuten mittaustaajuus, hälytyksen viiveaika, tuotteen nimi sekä käyttäjälle esitettävät visuaaliset tarkastuskysymykset. Ensimmäisen välilehti on esitetty kuvassa 39.

	A	B	C
1	<b>Testipenkin yleiset parametrit</b>		
2			
3	Measurement Frequency	1000	[Hz]
4	Alarm delay time	1	[s]
5	Tuotenimi	HPW 200/30-45	
6			
7	Lisäkysymys	Kuristimen tiedot	
8	Lisäkysymys	Öljyn lämpötila?	
9			

**Kuva 39.** Perusparametrien määrittäminen.

Mittaustaajuuden (*engl. measurement frequency*) voi asettaa väliltä 0 – 5 kHz. Koekäyttö pysäytetään, kun hälytysrajat ovat olleet ylitettynä/alitettuna hälytyksen viiveajalla määritellyn ajan (*engl. alarm delay time*). Tuotenimeksi asetetaan koeajettavan tuotteen nimi, joka ilmestyy mittausraporttiin. Lisäkysymys kohdissa määritellään käyttäjälle esitettävät visuaaliset tarkastuskysymykset. Kysymyksiä saa määrittää lisää kirjoittamalla edellisen solun alapuolelle lisäkysymys ja sen oikealle puolelle esitettävän kysymyksen.

Kuvassa 40 on esitetty **sisäänmenojen** määrittämisvälilehti, jossa määritellään koekäytön sisäänmenot eli käytettävät anturit. Ne sarakkeet, jotka käyttäjän tulee määrittää, on merkitty keltaisella taustavärillä.

Channel	Type	Unit	Enabled	Name	a	b	Card unit	STOP limit LOW	STOP Limit High	HUOM!	Filter
1	AI	[bar]	1	Öljyn paine pP	0,015	-100,000	0...20 mA	-99990	99999	Wika A-10, 0-400 [bar]	1
2	AI	[bar]	1	Öljyn paine pT	0,004	-25,000	0...20 mA	-99990	99999	Wika A-10, 0-100 [bar]	1
3	AI	[L/min]	1	Öljyn virtausanturi Qoil	0,018	0,000	0...20 mA	-99990	99999	Kracht VC3 F1 PS, 1 pulssi = 3.000 cm³	1
4	AI		0				0...20 mA				
5	AI		0				0...20 mA				
6	AI		0				0...20 mA				
7	AI		0				0...20 mA				
8	AI		0				0...20 mA				
9	AI		0				0...20 mA				
10	AI		0				0...20 mA				
11	AI		0				0...10 V				
12	AI		0				0...10 V				
13	AI		0				0...10 V				
14	AI		0				0...10 V				
15	AI		0				0...10 V				
16	AI		0				0...10 V				
17	AI		0				Pulse 0/24 V				
18	AI		0				Pulse 0/24 V				
19	DI	0/1	1	Painekytin 1		1	0/24 V	0	0		1
20	DI		0				0/24 V				1
21	DI		0				0/24 V				1
22	DI		0				0/24 V				1
23	DI		0				0/24 V				1
24	DI		0				0/24 V				1
25	DI		0				0/24 V				1
26	DI		0				0/24 V				1

Kuva 40. Sisäänmenojen määrittäminen.

Kunkin kanavan numero ja anturin hyväksyty mittaussignaali on merkitty *Channel*- sekä *Card unit* -sarakkeisiin. Analogiset mittauskanavat määritetään siten että aluksi valitaan kanaviin kytketyt anturit name-sarakkeen soluissa olevista esiin tulevista valikoista. Tämän jälkeen anturin skaalausparametrit a ja b sekä skaalattu yksikkö ja anturin huomautukset ladataan automaattisesti ulkoisesta anturitiedostosta valitun kanavan riville.

*Enabled*-sarakkeessa määritellään käytetäänkö kyseistä kanavaa mittaustiedon tallentamiseen vai ei. Arvolla 1 kanava tallennetaan raporttiin ja arvolla 0 kanavaa ei tallenneta raporttiin. *Enabled*-sarakkeeseen ilmestyy automaattisesti arvo 1 jos kyseisen kanavan rivillä on valittuna anturi ja arvo 0 jos anturia ei ole valittu.

*Stop Limit Low/High* -sarakkeissa määritellään hätärajojen ala- ja yläarvot. Kun nämä arvot on ollut ylitettynä hälytyksen viiveajan verran, niin koekäyttö pysäytetään ja raporttiin tallennetaan siihen asti kerätyt mittaustiedot.

*Filter*-sarakkeessa määritellään kyseisen kanavan suodatusaste. Käytetty suodatusmetodi on rekursiivisuodatus. Suodatusaste voidaan asettaa väliltä [0 – 1]. Jos arvo on 1, niin kanavan tieto tallennetaan suodattamattomana raakadatan CSV-raakadatan sekä raporttiin. Arvoa 1 pienemmillä arvoilla suodatusaste lisääntyy nolaa kohti mentäessä. Rekursiivisuodattimesta on kerrottu luvussa 2.4.5.

Digitaalisten mittauskanavien määrittämiseen ei ole olemassa erillistä ladattavaa tiedostoa, sillä parametrit ovat yksinkertaisesti joko 0 tai 1 ja määritellään käsin. Digitaaliset

mittauskanavat määritetään aluksi kirjoittamalla anturin tai kytkimen nimi *Name*-sarakeeseen. Tämän jälkeen skaalausparametriksi a kirjoitetaan 1, jolloin testialgoritmissa määritetty luku luetaan sellaisenaan suoritettavaan koodiin eikä sitä skaalata. Skaalausta ei tarvita, kun mittauslaitteella on vain arvot 0 tai 1. *Unit*-sarakeeseen kirjoitetaan raportissa näytettävä yksikkö näin haluttaessa. Hätärājoihin määritellään arvot joiden sisällä anturin näyttämän halutaan pysyvän. Esimerkiksi *Stop Limit Low* sekä *Stop Limit High* -sarakeisiin laitetaan arvo 0, jotta painekeytkin keskeyttää koekäytön lähettäessään 24 V signaalia (arvo 1). Enabled-sarake toimii digitaalisten kanavien yhteydessä samalla tavalla kuin analogisten kanavien määrittelyn yhteydessä kerrottiin.

Digitaalisten mittauskanavien määrittämiseen ei tehty ulkoista tiedostoa, koska mittauslaitteiden nimet ja parametrit ovat tapauskohtaisia sekä toisaalta yksinkertaisesti että nopeasti määritettävissä. Ulkoinen tiedosto myös osaltaan kasvattaa konfigurointi-tiedostojen kokoa ja siten vie levyä tilaa sekä alentaa selainpohjaisen käyttöliittymän suorituskykyä.

Kuvassa 41 on esitetty **ulostulojen** määrittämiseen käytettävä välilehti. Ne sarakkeet, jotka käyttäjän tulee määrittellä, on merkitty keltaisella taustavärillä.

Channel	Type	Unit	Enabled	Name	a	b	Card Unit	Huom!	Kp	Ti	Td
1	AO	[bar]	1	Öljyn paine ohjaus	0,012	-68,750	0...20 mA	Bosch Rexroth DBETX (8-315 bar,	0	0	0
2	AO	[L/min]	1	Öljyn virtaus ohjaus	0,004	-26,750	0...20 mA	Hydraforce SP16-20	1,2	3	0
3	AO		0				0...20 mA				
4	AO		0				0...20 mA				
5	DO	0/1	1	on/off valve 1		1	0/24 V				
6	DO	0/1					0/24 V				
7	DO	0/1					0/24 V				
8	DO	0/1					0/24 V				
9	DO	0/1					0/24 V				
10	DO	0/1					0/24 V				
11	DO	0/1					0/24 V				
12	DO	0/1					0/24 V				
13	DO	0/1					0/24 V				
14	DO	0/1					0/24 V				

**Kuva 41.** Ulostulojen määrittäminen.

Kunkin kanavan numero ja ohjauslaitteen hyväksytty ohjaussignaali on merkitty *Channel*- sekä *Card unit* -sarakeisiin. Kuvasta havaitaan myös, että ulostulojen määrittämiseen käytettävä välilehti on rakenteeltaan hyvin samankaltainen kuin sisäänmenojen määrittämiseen käytettävä välilehti.

Analogiset ohjauskanavat määritetään siten että aluksi valitaan kanaviin kytketyt ohjauslaitteet *Name*-sarakeen soluissa olevista esiin tulevista valikoista. Tämän jälkeen ohjauslaitteen skaalausparametrit a ja b sekä skaalattu yksikkö ja huomiot ladataan automaattisesti sarakkeisiinsa ulkoisesta ohjauslaite tiedostosta.

*Enabled*-sarakkeella määritellään käytetäänkö kanavaa ohjaukseen vai ei. Ohjausta käytetään, jos arvo on yksi ja ohjausta ei käytetä, jos arvo on nolla.

Ohjauskanavia 1 ja 2 voidaan käyttää PID-säätöön, joten kyseisille kanaville määritellään tarvittaessa PID-säätimen parametrit: suhteellinen vahvistus  $K_i$ , integrointiaika  $T_i$  ja derivointiaika  $T_d$ . Säätimen parametrien määrittämisestä on kerrottu luvussa 2.6.

Digitaalisia ohjauskanavia määritettäessä ei merkitä hätärajoja toisin kuin digitaalisia sisäänmenoja määritettäessä tehtiin. Muilta osin digitaaliset ohjauskanavat määritetään samalla tavalla kuin digitaaliset sisäänmenot. Digitaaliset ohjauskanavat määritetään aluksi kirjoittamalla ohjauslaitteen nimi name-sarakkeeseen. Tämän jälkeen skaalausparametriksi a kirjoitetaan 1, jolloin testialgoritmissa määritetty luku luetaan sellaisenaan suoritettavaan koodiin eikä sitä skaalata. Unit sarakkeeseen kirjoitetaan raportissa näytettävä yksikkö niin haluttaessa. Enabled-sarake toimii digitaalisten ja analogisten kanavien kanssa samalla tavalla.

Liitteessä F on esitetty **testialgoritmin** määrittämiseen käytetty välilehti. Ne sarakkeet, jotka käyttäjän tulee määrittellä, on merkitty kuvaan keltaisella taustavärillä.

Kuvasta havaitaan, että testialgoritmi koostuu askelista eli riveistä, joilla määritetään kunkin askeleen kesto aika millisekunteina *Duration*-sarakkeeseen. Ohjauslaitteiden (sarakkeet F – Q) asetusrvot kunkin askeleen lopussa merkitään tälle kyseiselle riville analogisten signaalien osalta insinööriyksiköissä ja digitaalisten signaalien osalta 0 tai 1 arvona. Ohjauslaitteille syötettäviä asetusrvoja interpoloidaan edellisen askeleen asetusarvon ja nykyisen askeleen asetusarvon välillä, kun interpolointiaika on askeleen kesto aika. Askeleet suoritetaan peräkkäin, niin pitkälle kun askeleita riittää ja ohjausarvot menevät nolliin. Sisäänmeno- ja ulostulo välilehdillä määritettyjä skaalausparametreja käytetään askeleissa asetettujen asetusarvojen muuttamiseen PLC:n ymmärtämään bitti muotoon.

Stop-rajat sarakkeessa määritetään onko hätärajat käytössä vai ei kyseisen askeleen aikana. Hätärajat ovat käytössä arvolla 1 ja hätärajat eivät ole käytössä arvolla 0.

*Odota*-sarakkeessa määritetään askel, jonka päättyessä testiajo pysähtyy odottamaan käyttäjän kuittausta. Arvolla 1 testiajo pysähtyy askeleen päättyessä ja arvolla 0 testiajoa suoritetaan normaalisti askel kerrallaan. Kun *odota*-sarakkeessa on arvo 1, niin askeleen lopussa ohjauslaitteiden asetusarvot jäävät siihen tilaan, jossa ne olivat askeleen loppuessa. Käyttäjän kuittauksella koekäyttöä jatketaan seuraavasta askeleesta alkaen normaalisti.

Laaturajojen ala- ja ylärajat määritellään kullekin askeleelle sekä mittauskanavalle erikseen. Esimerkiksi kiihdytysvaiheeseen voidaan merkitä paineanturin laaturajoiksi 200 –

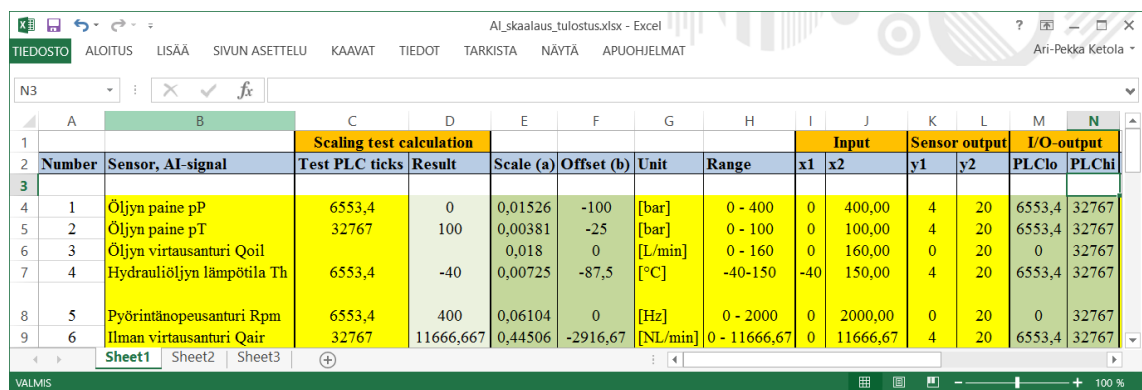
180 bar, jolloin tuotteen koekäyttö hylätään näiden laaturajojen ylittyessä/alittuessa askeleen aikana. Digitaalisen anturin laaturajoja täytettäessä asetetaan arvoiksi joko 0 tai 1. Jos halutaan mittaamalla varmistaa, että tietty on tai ei ole aktiivinen koekäytön ajan.

Perusparametrien, sisäänmenojen, ulostulojen ja testialgoritmin määrittelyn jälkeen muunnetaan kukin välilehti (4 kpl) omaksi CSV-tiedostoksi (save as .csv). Konfigurointitiedoston muodostamat 4 CSV-tiedostoa ladataan palvelimelta tuotteen QR-koodin luvun yhteydessä, jolloin hydraulilaitteen koekäyttö voidaan suorittaa suunnittelijan konfiguroimien asetusten mukaisesti.

**AI\_skaalaukset** ja **AO\_skaalaukset** apuvälilehdille ladataan excelin ominaisuuksista johtuen antureiden ja ohjauslaitteiden erilliset parametritiedostot (2 kpl).

**Anturien parametritiedostossa** määritetään antureiden skaalausparametrit. PLC:n koodissa skaalausparametreilla muutetaan tiedonkeruukortin binääri viesti käyttäjän ymmärtämiin insinööriyksiköihin, jolloin anturien mittausviesti saadaan oikeassa yksikössä. Esimerkiksi paineanturin mittaama paine 0 – 400 bar muunnetaan paineanturissa virtaviestiksi 4 – 20 mA. Tämän jälkeen analogista virtaviestiä mittaava tiedonkeruukortti muuntaa yleensä 4 – 20 mA virtaviestin 0 – 10 V jänniteviestiksi. Jänniteviesti muunnetaan A/D muunnoksella binääri viestiksi väliltä 0 – 32767 bittiä (16 bittinen tiedonkeruukortti, jossa 1 bitti on varattu etumerkille). Skaalausparametreja tarvitaan PLC:n koodissa muuntamaan tiedonkeruukortin välittämät binääri viestit takaisin insinööriyksiköihin, jolloin mittausarvot tallentuvat halutussa yksikössä sähköiseen mittausraporttiin.

Kuvassa 42 on esitetty **antureiden skaalausparametrien** määrittämiseen käytetty excel-tiedosto. Ne sarakkeet, jotka käyttäjän tulee määrittellä, on merkitty kuvaan keltaisella taustavärillä. Ne sarakkeet, jotka lasketaan automaattisesti, on merkitty kuvaan vihreällä taustavärillä.



AI_skaalaus_tulostus.xlsx - Excel																
TIEDOSTO ALOITUS LISÄÄ SIVUN ASETTELU KAAVAT TIEDOT TARKISTA NÄYTÄ APUOHJELMAT Ari-Pekka Ketola																
N3																
	A	B	C Scaling test calculation		D	E	F	G	H	I Input		J	K Sensor output	L	M	N
	Number	Sensor, AI-signal	Test PLC ticks	Result	Scale (a)	Offset (b)	Unit	Range	x1	x2	y1	y2	PLClo	PLChi		
4	1	Öljyn paine pP	6553,4	0	0,01526	-100	[bar]	0 - 400	0	400,00	4	20	6553,4	32767		
5	2	Öljyn paine pT	32767	100	0,00381	-25	[bar]	0 - 100	0	100,00	4	20	6553,4	32767		
6	3	Öljyn virtausanturi Qoil			0,018	0	[L/min]	0 - 160	0	160,00	0	20	0	32767		
7	4	Hydrauliöljyn lämpötila Th	6553,4	-40	0,00725	-87,5	[°C]	-40-150	-40	150,00	4	20	6553,4	32767		
8	5	Pyörintänopeusanturi Rpm	6553,4	400	0,06104	0	[Hz]	0 - 2000	0	2000,00	0	20	0	32767		
9	6	Ilman virtausanturi Qair	32767	11666,667	0,44506	-2916,67	[NL/min]	0 - 11666,67	0	11666,67	4	20	6553,4	32767		

**Kuva 42.** Antureiden parametritiedosto.

Anturien tiedot luetaan allekkain aina yhden anturin tiedot yhdelle riville. Anturin nimi merkitään *Sensor*-sarakeeseen, skaalattava insinööriyksikkö *Unit*-sarakeeseen ja antu-

rin mittausalue *Range*-sarakeeseen. Anturin mittausalueen alaraja merkitään *x1*-sarakeeseen ja yläraja *x2*-sarakeeseen. Anturin ulostuloalueen alaraja merkitään *y1*-sarakeeseen ja yläraja *y2*-sarakeeseen. Tämän jälkeen *PLClo*-sarakeessa lasketaan automaattisesti anturin ulostuloalueen alarajaa (4 mA) vastaava tiedonkeruukortin ulostuloalueen alaraja, kun tiedonkeruukortin ulostuloalue on 0 – 32767 (16 bittisellä kortilla). Tällöin verrannolla saadaan  $4/20 \cdot 32767 = 6553,4$ . Samalla periaatteella lasketaan tiedonkeruukortin ulostuloalueen yläraja *PLChi*-sarakeessa.

Skaalauksen toimivuutta voi testata *Scaling test calculation* -osiossa, jossa tietyllä binääriluvulla testataan mikä tulee *Result*-sarakeeseen mittaustuloksesi insinööriyksikössä. Esimerkiksi tiedonkeruukortin ulostulon näyttäessä 6553,4 bittiä pitäisi mittaustuloksen olla 0 bar, jolloin skaalaus toimii. Ylärajan toimivuuden voi testata samalla tavalla.

**Ohjaislaitteiden parametritiedostossa** määritetään ohjattavan suureen skaalausparametrit ohjaislaitteen tietojen avulla. PLC:n koodissa skaalausparametreilla muutetaan käyttäjän määrittämät ohjausarvot insinööriyksiköistä tiedonkeruukortin ymmärtäviksi biteiksi. Tämän jälkeen tiedonkeruukortti muuntaa binääriohjaisviestin 4 – 20 mA virtaviestiksi. Esimerkiksi paineenrajoitusproportionaaliventtiilin ohjauspaine määritellään väliltä 8 – 315 bar ja se muunnetaan skaalausparametreilla välillä 6553,4 – 32767 olevaksi binääriviestiksi.

Kuvassa 43 on esitetty **ohjaislaitteiden parametrien** määrittämiseen käytetty excel-tiedosto. Ne sarakkeet, jotka käyttäjän tulee määrittellä, on merkitty kuvaan keltaisella taustavärillä. Ne sarakkeet, jotka lasketaan automaattisesti, on merkitty kuvaan vihreällä taustavärillä.

Scaling test calculation														Output		Input		I/O input	
Number	Controller, AO-signal	Test PLC ticks	Result	Scale (a)	Offset (b)	Unit	Range	x1	x2	y1	y2	PLClo	PLChi						
1	Öljyn paine ohjaus	6553,4	8	0,011711	-68,75	[bar]	8 - 315	8	315	4	20	6553,4	32767						
2	Öljyn virtaus ohjaus	32767	107	0,004082	-26,75	[L/min]	0 - 107	0	107	4	20	6553,4	32767						

**Kuva 43.** Ohjaislaitteiden parametritiedosto.

Kuvasta havaitaan, että ohjaislaitteiden parametrit määritellään samalla tavoin kuin antureiden parametritiedoston yhteydessä tehtiin. Ohjaislaitteen nimi merkitään controller-sarakeeseen, insinööriyksikkö *Unit*-sarakeeseen ja ohjausalue *Range*-sarakeeseen. Ohjaislaitteen ohjattavan suureen alaraja merkitään *x1*-sarakeeseen ja yläraja *x2*-sarakeeseen. Ohjaislaitteen vahvistinkortin sisäänmenon alaraja merkitään *y1*-sarakeeseen ja yläraja *y2*-sarakeeseen. Tämän jälkeen *PLClo*-sarakeessa lasketaan automaattisesti ohjaislaitteen vahvistinkortin sisäänmenon alarajaa (4 mA) vastaava tiedonkeruukortin

sisäänmenoalueen alaraja, kun tiedonkeruukortin sisäänmenoalue on 0 – 32767 (16 bittisellä kortilla). Samalla periaatteella lasketaan tiedonkeruukortin sisäänmenoalueen yläraja *PLChi*-sarakkeessa.

PLC:n koodissa käyttäjän asetusarvo insinööriyksiköissä muunnetaan tiedonkeruukortin ymmärtämään binääriviestiin kaavalla

$$Bits\ in = \frac{asetusarvo - offset (b)}{skaala (a)}. \quad (17)$$

### 4.3.2 Inspector-käyttöliittymä

Testausjärjestelmää hallitaan selainpohjaisella Inspector käyttöliittymällä ja sen toteuttamisesta vastasi Insolution Oy. Käyttöliittymä hiottiin toimivaksi useiden testien myötä ja testissä havaittujen virheiden pohjalta.

#### VAATIMUKSET

Käyttöliittymän vaatimuksena oli **selainpohjainen ohjelmisto**, jolloin ei tarvita tietokoneelle erikseen asennettavaa ohjelmaa ja sitä pääsee käyttämään kaikkialta Dynaset Oy:n sisäverkosta. Käyttöliittymällä tullaan ohjaamaan tuotannossa tuotteiden koekäyttöä, jolloin halutaan mahdollisimman yksinkertainen ja toimiva ratkaisu.

Käyttöliittymässä tuli olla **viivakoodin ja QR-koodin lukumahdollisuus** henkilö- sekä tuotetietojen syöttämiseen mittausraporttiin. Lisäksi tuotetietojen perusteella haetaan palvelimelta tuotekohtainen testialgoritmi, jonka perusteella koekäyttö suoritetaan. Käyttöliittymän tuli sisältää **reaaliaikanäyttö** anturitietojen oloarvojen näyttämiseen, joita tarvitaan alkusäätöjen, kuten paineenrajoitusventtiilin säätämiseen sekä koekäytön tarkkailuun.

Käyttöliittymän tuli sisältää koekäytön **käynnistyspainike**. Lisäksi tuli olla **kuittausnappi**, jolla koekäyttäjät jatkaa koekäyttöä alkusäätöjen jälkeen. Myös **hätäseis-painike** tuli olla, jotta käyttäjän on mahdollista keskeyttää koekäyttö virhetilanteissa.

Käyttöliittymällä tuli voida suorittaa sama koekäyttö 1 – 8 samanlaiselle tuotteelle. Käyttöliittymässä tuli olla myös kohta koekäyttäjälle esitettäviä **visuaalisia tarkastuskysymyksiä** varten. Lisäksi tuli olla kohta **koekäyttäjän kommentteja** varten.

Koekäytön jälkeen käyttöliittymän tuli näyttää **pdf-muotoinen sähköinen mittausraportti**, joka muodostetaan CSV-tiedostoon tallennetusta raakadatasta. Tuotteen mittaus tuloksista muodostettu **CSV-raakadata** sekä sähköinen mittausraportti tallennetaan automaattisesti Dynaset Oy:n palvelimella. Sähköisestä mittausraportista tuli selvittää seuraavat asiat:

- tuotteen nimi,
- tuotekoodi,



- tuotteen sarjanumero,
- koekäyttäjän nimi,
- käytetty konfigurointitiedosto,
- CSV-raakadatan tiedostonimi,
- käytetty mittaustaajuus,
- graafinen kuvaaja mittaustuloksista,
- laaturajojen testin tulos (hyväksytty / hylätty),
- koekäyttäjän visuaalisten tarkastusten tulos: hyväksytty tai hylätty,
- koko testin tila: hyväksytty tai hylätty (hyväksytty: mittaustulokset laaturajojen sisällä + visuaaliset tarkastukset hyväksytyjä, hylätty: mittaustulokset laaturajojen ulkopuolelle tai visuaaliset tarkastukset hylättyjä)
- hylkäykseen johtanut syy, josta selviää mittauskanava sekä hylkäyksen aiheuttanut laaturaja (ylä- vai alaraja).

Käyttöliittymässä tuli olla mahdollisuus tarkastella suoritettujen koekäyttöjen sähköisiä mittausraportteja. Viimeisin suoritettu mittausraportti tuli olla saatavilla kaikille tuotteille käyttöliittymän kautta. **Aikaisemmat mittausraportit tuli myös säilyttää** palvelimella, jolloin testihistoria säilyy ja kyseisen tuotteen mittausraportteja päästään tarkastelemaan koko tuotteen elinkaaren ajalta. Aikaisempiin mittausraportteihin ei tarvinnut päästä käyttöliittymän kautta vaan manuaalisesti kansioita selaamalla verkkolevyiltä.

Käyttöliittymän kautta tuli olla mahdollista tarkastella tarkemmin mittausraportin graafista kuvaajaa. Kuvaajaa tuli voida suurentaa sekä mittauspisteiden arvoja tarkastella tarkemmin tietyllä ajanhetkellä. Myös **käyttöliittymän suorituskyky** oli yhtenä vaatimuksena, sillä selainpohjainen ohjelma asettaa melko suuret rajoitukset ohjelman kuormittavuudelle. Lisäksi käyttöliittymän tuli olla mahdollisimman helppokäyttöinen eli tarvittavien tietojen tuli näkyä kerrallaan tietokoneen ruudulta, jolloin sivua ei tarvitse selata alaspäin. Tietojen täyttäminen tuli tehdä mahdollisimman nopeaksi ja yksinkertaiseksi.

Vuosien saatossa mittausdataa syntyy testien myötä paljon, joten tiedon hallintaan täytyy kiinnittää huomioita niin selain kuin palvelin tasollakin. Tiedon lisääntyessä sen hallinnointi ja etsintä vaikeutuu. Tiedostot tulee nimetä selkeästi, jolloin voidaan käyttää windowsin resurssienhallinnan hakutoimintoa hyväksi tiettyä mittausraporttia etsittäessä.

## INSPECTOR KÄYTTÖLIITTYMÄN TOTEUTUS

Vaatimusten perusteella suunniteltu ja toteutettu Inspector käyttöliittymän etusivu on esitetty kuvassa 44, jossa näytetään testausvälilehti.



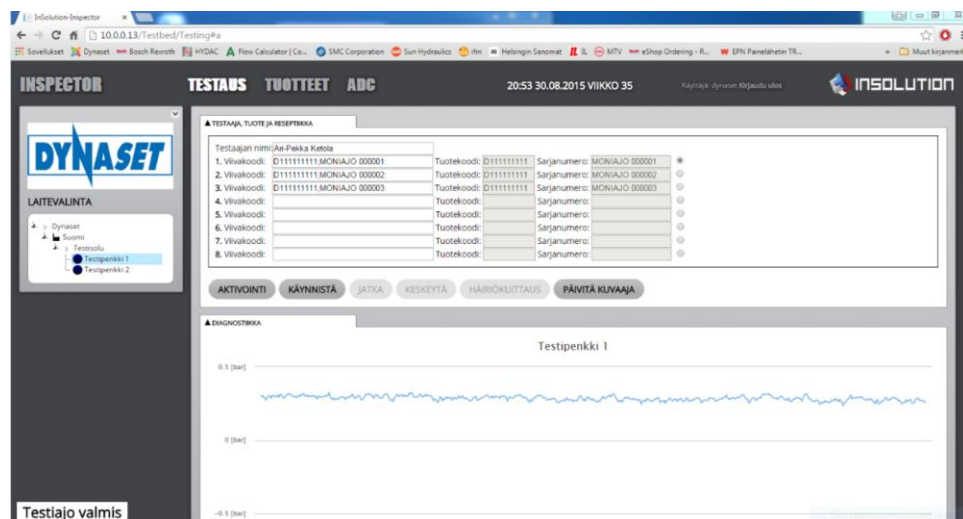
Kuva 44. Inspector käyttöliittymän etusivu.

Testausvälilehdellä on kolme erillistä osiota:

- testaja, tuote ja reseptiikka,
- diagnostiikka sekä
- tarkistuslista osiot.

**Testaja, tuote ja reseptiikka** osiossa syötetään koekäyttäjän sekä tuotteen tiedot ja tuotteen tietojen perusteella ladataan oikea konfigurointialgoritmi, jonka perusteella koekäyttö suoritetaan. **Diagnostiikka** osiossa on havaittavissa reaaliaika näyttö, josta nähdään mitattavat suureet graafisessa muodossa reaaliajassa. Tarkistuslista osiossa suoritetaan koekäyttäjälle esitettävät visuaaliset tarkastukset. Osioita oli mahdotonta saada näkymään tarkasti yhdeltä sivulta, joten ne jaettiin pienennettäviin välilehtiin, joka toi selkeyttä käyttöliittymään.

Testaja, tuote ja reseptiikka sekä diagnostiikka osiot on esitetty tarkemmin kuvassa 45. Kuvasta havaitaan tekstikentät koekäyttäjän nimeä varten sekä tuotteiden tietoja varten (1 – 8 kpl).



Kuva 45. Testaja, tuote ja reseptiikka osio.

Koekäyttäjän nimi luetaan testaajan nimi kenttään 2D-viivakoodinlukijalla. Testattavan tuotteen tiedot luetaan tuotteesta olevasta QR-koodista viivakoodi kenttään 2D-viivakoodinlukijalla. QR-koodista saatavan tuotteen tuotekoodin perusteella ladataan palvelimelta tuotekoodia vastaava konfigurointitiedosto tuotteen koekäyttöä varten. Lisäksi QR-koodista saatavat tuotekoodi sekä sarjanumero tallennetaan sähköiseen mittausraporttiin, jolloin mittausraportti ja testattava hydraulilaite ovat identifioitavissa. Koekäyttäjän nimi sekä tuotteen tiedot voidaan syöttää myös manuaalisesti tietokoneen näppäimistöltä, jos 2D-viivakoodinlukijaa ei voida jostain syystä käyttää.

Järjestelmällä voidaan ajaa sarja koekäyttönä 8 kpl samanlaisia tuotteita, jolloin koekäyttö pysähtyy aina yhden tuotteen koekäytön jälkeen ja käyttäjä käynnistää käynnistämällä seuraavan tuotteen koekäytön.

Konfigurointialgoritmi ladataan palvelimelta aktivointinappia painamalla ja tämän jälkeen koekäyttö käynnistetään käynnistä-nappia painamalla. Testausjärjestelmä säättää ohjauslaitteet konfigurointialgoritmin mukaisiin arvoihin ja jää odottamaan käyttäjän kuitausta tietyn askeleen loputtua, jos odota kohta oli aktivoitu konfigurointiohjelmassa. Jatka-napilla koekäyttäjä kuittaa alkusäädöt tehdyksi ja varsinainen koekäyttö aloitetaan. Keskeytä-napilla koekäyttö voidaan keskeyttää tarvittaessa.

**Diagnostiikkaosiossa** näytetään esimerkin omaisesti paineen arvo reaaliajassa graafisena kuvaajana. Kuvaaja on mahdollista tarkentaa tietyltä aikaväliltä, jolloin voidaan tarkastella tarkemmin mitattavan suureen käyttäytymistä koekäytön aikana. Päivitä kuvaajana nappia painamalla saadaan kuvaaja päivitettyä tarvittaessa, jos kuvaaja ei näy virhetilanteesta johtuen.

Kuvassa 46 näkyvässä **tarkistuslistassa** esitetään koekäyttäjälle tehtävät visuaaliset tarkastukset. Tarkastustehtävä on aluksi tilassa kesken ja koekäyttäjä muuttaa sen alasvetolista joko tilaan hyväksytty tai hylätty tarkastuksen jälkeen. Lisäksi kyseisen tarkastuksen kohdalle voi lisätä tekstikenttään kommentin esimerkiksi hylkäykseen johtaneesta tarkemmasta syystä.

**Kuva 46.** *Tarkistuslista.*

Koekäytön jälkeen koekäyttäjän on mahdollista tarkastella **sähköistä mittausraporttia** PDF-muodossa. Esimerkki sähköisestä mittausraportista on esitetty kuvassa 47.

## 1. Perustiedot

1

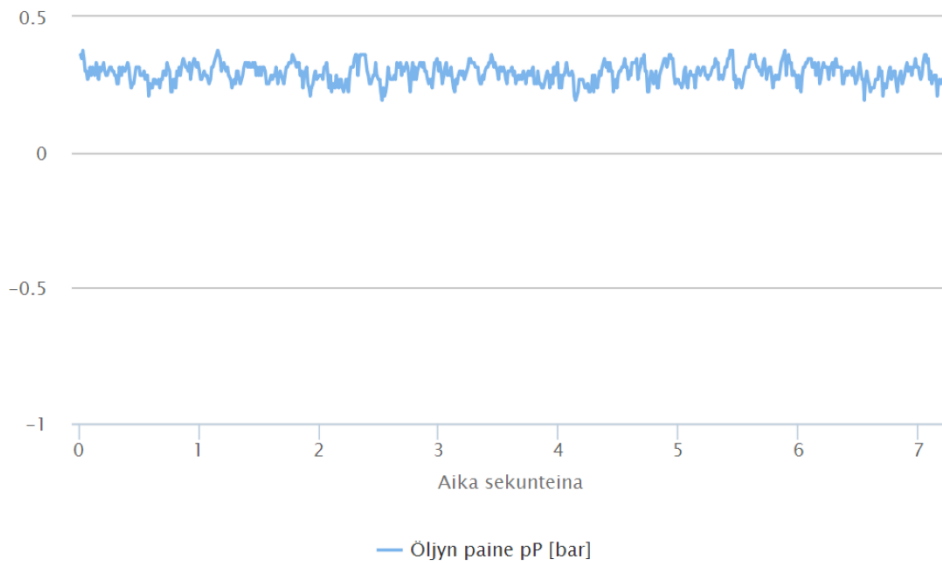
Testin ajankohta: 18:12 30.08.2015  
Viimeksi päivitetty: 18:12 30.08.2015

Testipenkki: Testipenkki 1		LAATURAJAT, YLÄRAJA AI	
Testaaja	Ari-Pekka Ketola	Tila	Hylätty
Sarjanumero	LAATURAJAyla 1	Reseptirevisio	rA
D-koodi	D111111111		
Datatieosto	Data_D111111111_rA_LAATURAJAyla 1_1_2015-08-30-18_12_04		
Reseptitiedosto	D111111111_rA	Mittaustaajuus	100Hz

## 2. Testiajomittaus

**HYLÄTTY Syy: Laaturaja, analogitulo: 1, yläraja ylitetty, Öljyn paine pP**

Tuote: D111111111 Sarjanumero: LAATURAJAyla 1 Tuotenimi: LAATURAJAT, YLÄRAJA AI Testin ajankohta: 30.08.2015 18:12



## 3. Tarkistuslista

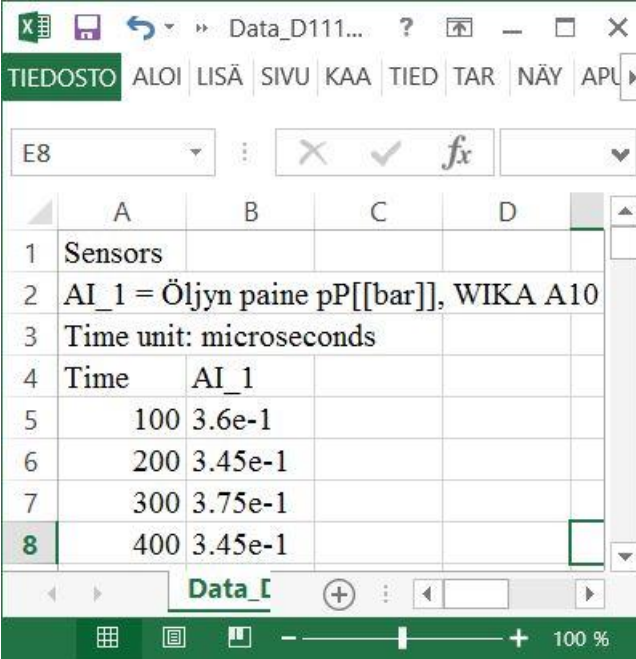
Tarkistuskohde	Kommentti	Tila
Toimiiko?	LAATURAJA, YLÄRAJA AI:TOIMII, OK! LAATURAJAT: -10...0	Hylätty

Powered by: **INSOLUTION**

**Kuva 47.** Esimerkki sähköisestä mittausraportista.

Kuvasta havaitaan sähköinen mittausraporttiesimerkki, jonka avulla on testattu laaturajojen toimivuutta. Raportti muodostuu vaatimusten perusteella kolmesta osiosta: perustiedot, testiajomittaus sekä tarkistuslista.

**Perustietoihin** tulee koekäytön varsinainen tulos yläosan taulukossa olevaan tila-kenttään, johon on tässä esimerkki koekäytössä kirjattu ”hylätty” laaturajojen ylityksen vuoksi. Perustietoihin tulee myös koekäytön alussa viivakoodista luettu koekäyttäjän nimi sekä QR-koodista luetut tuotekoodi ja sarjanumero. Lisäksi laitteen nimi (tässä ”laaturajat, yläraja AI”), konfigurointitiedoston nimi (reseptitiedosto), konfigurointitiedoston revisio (reseptirevisio) ja mittaustaajuus haetaan konfigurointitiedostosta. Datatiedosto kenttään merkitään nimi CSV-tiedostolle, josta tämän mittausraportin kuvaaja on muodostettu. Kuvassa 48 on esitetty esimerkki tallennetusta CSV-tiedostosta.



	A	B	C	D
1	Sensors			
2	AI_1 = Öljyn paine pP[[bar]], WIKA A10			
3	Time unit: microseconds			
4	Time	AI_1		
5	100	3.6e-1		
6	200	3.45e-1		
7	300	3.75e-1		
8	400	3.45e-1		

**Kuva 48.** Esimerkki CSV-tiedostosta.

CSV-tiedostoon tallennetaan kussakin mittauskanavassa käytetty anturi, mitattava suure sekä mitattavan suureen mittausarvot alekkain eri riville. Ohjauslaitteiden ollessa aktiivisena myös ohjauslaitteen asetusarvot kullakin askeleella tallennetaan sekä PID-säätimen ulostulo arvot. Aika näytetään yksiköissä 100  $\mu$ s.

**Testiajomittausosiossa** näytetään koekäyttömittausten tulos laaturajojen osalta sekä CSV-tiedostosta muodostettu graafinen kuvaaja. Kuvaaja muuttaa testitulokset lukuarvoihin verrattuna havainnollisempaan visuaaliseen muotoon. Lisäksi tässä osiossa näytetään vielä tarkempi syy, joka johti hylkäykseen. Tarkan hylkäyssyy perusteella on helpompi lähteä etsimään ja korjaamaan hylkäyksen aiheuttaja. **Tarkistuslistaosioon** on merkitty koekäyttäjän tekemät visuaaliset tarkastukset sekä tarkastusten tulokset ja kommentit.

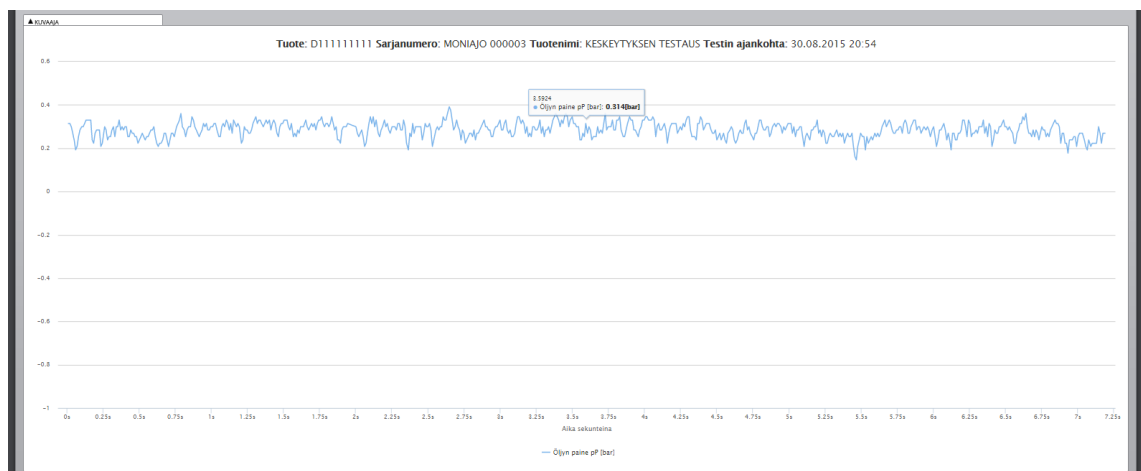
Inspector-käyttöliittymän **tuotteet-välilehdeltä** on tarkasteltavissa kaikkien koeajettujen laitteiden viimeisin mittausraportti. Kuvassa 49 on esitetty tuotteet-välilehti.

TILA	SARJANUMERO	TUOTEKOODI	TUOTENIMI	TESTIN AJANKOHTA	MUOKATTU	RESEPTIREVISIO	TESTIPENKKI	TESTAAJA	RAPORTTI
HYVÄKSYTTY	MONIAJO 000003	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:54	30.08.2015 20:54	rA	Testipenkki 1	Ari-Pekka Ketola	LATAA
HYVÄKSYTTY	MONIAJO 000002	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:53	30.08.2015 20:53	rA	Testipenkki 1	Ari-Pekka Ketola	LATAA
HYVÄKSYTTY	MONIAJO 000001	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:53	30.08.2015 20:53	rA	Testipenkki 1	Ari-Pekka Ketola	LATAA
HYVÄKSYTTY	KESKEYTYS 0004	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:49	30.08.2015 20:49	rA	Testipenkki 1	Ari-Pekka Ketola	LATAA
HYVÄKSYTTY	KESKEYTYS 0003	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:49	30.08.2015 20:49	rA	Testipenkki 1	Ari-Pekka Ketola	LATAA
KESKEN	KESKEYTYS 0002	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:48	30.08.2015 20:51	rA	Testipenkki 1	Ari-Pekka Ketola	LATAA
HYLÄTTY	KESKEYTYS 0001	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 18:49	30.08.2015 18:49	rA	Testipenkki 1	Ari-Pekka Ketola	LATAA
HYLÄTTY	LAATURAJAT, AI & DI	D111111111	LAATURAJAT, AI & DI	30.08.2015 18:46	30.08.2015 18:47	rA	Testipenkki 1	Ari-Pekka Ketola	LATAA
HYVÄKSYTTY	LAATURAJAT, AI & DI	D111111111	LAATURAJAT, AI & DI	30.08.2015 18:44	30.08.2015 18:44	rA	Testipenkki 1	Ari-Pekka Ketola	LATAA

Kuva 49. Tuotteet välilehti.

Laitteiden mittausraportit voidaan listata laskevaan tai nousevaan järjestykseen testin tilan, sarjanumeron, tuotekoodin, tuotenimen, testin ajankohdan tai koekäyttäjän mukaan. Lisäksi koekäyttäjä voi valita kuinka monta riviä näytetään. Raporttien etsimiseen voidaan käyttää selaimen sisäistä hakutoimintoa.

Tuotteet-välilehdeltä voi myös tarkastella tarkemmin mittausraportin **kuvaajaa**, josta on esimerkki kuvassa 50.



Kuva 50. Mittaustulosten graafinen kuvaaja.

Esimerkiksi painetietoa voi tarkastella tietyllä ajan hetkellä suurennustyökalua käyttäen. Kun kuvaajan päällä pitää hiiren vasenta näppäintä päällä ja rajaa tietyn alueen kuvaajasta, niin kuva suurentuu tälle alueelle. Lisäksi mitatun suuren arvon näkee tarkemmin kullakin ajan hetkellä, kun vie hiiren kursorin käyrän päälle. Tällöin käyrän yläpuolelle ilmestyy ruutu, jossa näkyy suuren mittausarvo ja hiirtä liikuttamalla pitkin käyrää näkee myös suuren arvon eri mittauskohdissa.

Lisäksi **tarkastuslistat** ovat näkyvissä tuotteetvälilehden alaosiossa. Kuvassa 51 on esitetty tarkastuslistat tuotteet-välilehdellä.

TILO	SARJANUMERO	TUOTEKODI	TUOTENIMI	TESTIN AJANKOHTA	MUOKIATU	RESEPTIREVISIO	TESTIPENKKI	TESTAJA	RAPORTTI
HYVÄKSYTTY	MOKNAJO 000003	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:54			30.08.2015 20:54	rA	Testipenkki 1
HYVÄKSYTTY	MOKNAJO 000002	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:53			30.08.2015 20:53	rA	Testipenkki 1
HYVÄKSYTTY	MOKNAJO 000001	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:52			30.08.2015 20:52	rA	Testipenkki 1
HYVÄKSYTTY	KESKEYTYS 0004	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:49			30.08.2015 20:49	rA	Testipenkki 1
HYVÄKSYTTY	KESKEYTYS 0003	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:49			30.08.2015 20:49	rA	Testipenkki 1
KESKEN	KESKEYTYS 0002	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 20:48			30.08.2015 20:51	rA	Testipenkki 1
HYLÄTTY	KESKEYTYS 0001	D111111111	KESKEYTYKSEN TESTAUS	30.08.2015 18:49			30.08.2015 18:49	rA	Testipenkki 1
HYVÄKSYTTY	LAATURAJAHL01	D111111111	LAATURAJAT, A1 & D1	30.08.2015 18:46			30.08.2015 18:47	rA	Testipenkki 1
HYVÄKSYTTY	LAATURAJAHL02	D111111111	LAATURAJAT, A1 & D1	30.08.2015 18:44			30.08.2015 18:44	rA	Testipenkki 1
HYVÄKSYTTY	LAATURAJAHL01	D111111111	LAATURAJAT, A1	30.08.2015 18:41			30.08.2015 18:41	rA	Testipenkki 1

**Kuva 51.** Tarkastuslistat esitettyinä käyttöliittymän tuotteet-välilehdellä.

Visuaalisten tarkastusten vastauksia voi muuttaa tai kommentteja lisätä, jos testit unohdettiin jostain syystä tehdä varsinaisen koekäytön jälkeen. Visuaalisen tarkastuksen tilan voi valita kolmesta arvosta: kesken, hyväksytty tai hylätty. Tila on kesken, jos kysymyksen unohdettiin vastata varsinaisen koekäytön jälkeen.

Koekäytön tila ei muutu hyväksytty tilaan ennen kuin mittaukset on suoritettu hyväksytysti ja kaikki visuaaliset tarkastukset on hyväksytty. Koekäyttäjälle jää lopullinen vastuu tuotteen toimittamisesta varastoon hyväksytty mittausraportti tuotteen mukana. Varastohenkilöiden vastuulle jää tarkastaa mittausraportista, että tuotteen koekäyttö todella oli hyväksytty ennen tuotteen lähettämistä asiakkaalle.

Inspector käyttöliittymän **ADC-välilehdeltä** on myös tarkasteltavissa testijärjestelmän käyttötietoja, kuten käytettävyys ja käyttöaste tietyllä ajanjaksolla. Tähän ei kuitenkaan tutustu tässä tarkemmin.

### 4.3.3 Twincat-ohjelmisto

TwinCat-ohjelmistoa tarvitaan testausjärjestelmän käyttöönotossa PLC:n ja I/O-korttien konfigurointiin ja ohjaukseen lataamiseen PLC:lle. Konfigurointi tapahtuu TwinCat System Managerissa, jossa määritellään käytetyn PLC:n ja I/O-korttien asetukset. Konfiguroinnin jälkeen PLC:lle ladataan PLC:n ja I/O-korttien ohjaukseen TwinCat PLC Controlin avulla. PLC:n ja IO-korttien konfiguroinnin ja ohjaukseen tuotti Insolution Oy, joten TwinCatin käyttöön System Managerin ja PLC Controlin avulla ei tutustuta sen tarkemmin.

System managerin avulla on mahdollista päästä näkemään tarkempia tietoja yksittäisistä I/O-korteista ja PLC:stä. System manageria käytettiin hyväksi käyttöönoton yhteydessä antureita sekä ohjaukslaitteita testattaessa.

## **4.4 Korkeapainevesipumppujen kuormituslaitteen esisuunnittelu**

### **4.4.1 Kuormituslaitteen vaatimukset**

Korkeapainevesipumppujen testaamisessa tarvitaan kuormituslaitteistoa, jolla saadaan pumpattavan veden paine nostettua lähelle pumpun maksimipainetta, kun veden tilavuusvirta on vesipumpun maksimiarvossa. Kuormituslaitetta tarvitaan, jotta korkeapainevesipumpun suorituskykyarvot voidaan testata automaattisesti ja mittaustulokset voidaan tällöin tallentaa sähköiseen mittausraporttiin. Tarvitaan siis mittaustiedot veden paineesta ja tilavuusvirrasta sekä öljyn paineesta ja tilavuusvirrasta. Tällöin saadaan varmistettua, että korkeapainevesipumpun suorituskykyarvot vastaavat odotuksia ja samalla varmistetaan pumpun mekaaninen toiminta. Kuormituslaitteistolla tulee pystyä suorittamaan myös hitaampaa koekäyttöä matalalla veden tilavuusvirralla, jolloin kuormituspaineen tulee myös nousta lähelle maksimiarvoa.

Korkeapainevesipumpun paineenrajoitusventtiilin säätämisen tulee olla mahdollista, joten vesipainelinja on voitava sulkea säännöllisesti pumpun paineenrajoitusventtiilin säätötoimenpiteitä varten. Kuormituslaitteiston ohjaamisen tulee tapahtua pääasiassa automaattisesti, mutta myös normaali manuaalikoekäytön tulee olla mahdollista. Kuormituslaitteella tullaan ajamaan todennäköisesti kahta eri mallia olevaa korkeapainevesipumpua, joten siinä täytyy olla 4 kpl mittakuristimia. Mittakuristimilla toteutetaan eri pumppujen kaksi eri nopeusaluetta pumppujen ominaisuuksien testaamista varten.

Laitteiston mitoitusvaatimuksena ovat hydraulikoneikon maksimipaine ja isomman käytetyn korkeapainevesipumpun maksimitilavuusvirta (40 L/min). Kuormituslaitteen tulee kestää hydraulikoneikon tuottama maksimipaine (280 bar), jos korkeapainevesipumpun paineenrajoitusventtiili jumittuu ja hydraulioiljynpaine pääsee nousemaan hydraulipumpun paineleikkurin asetusarvoon. Vesimäntien ja hydraulimäntien pinta-alasuhteet on huomioitava, koska korkeapainevesipumppu toimii myös paineenmuuntimena ja paine voi olla korkeampi vesipainelinjassa verrattuna hydraulipainelijaan. Hydraulikoneikon paineenrajoitusproportionaaliventtiilin asetusarvo tulee toki asettaa aina siten, että hydraulioiljyn paine ei ylitä testattavan tuotteen sallittua maksimiarvoa.

Kuormituslaitteistoa suunniteltaessa on huomioitava huollettavuus sekä valittujen komponenttien kemiallinen yhteensopivuus veden kanssa.

### **4.4.2 Kuormituslaitteen esisuunnittelu**

Pienten korkeapainevesipumppujen varsinaisena kuormituslaitteena suunniteltiin käytettävän yksinkertaisia mittakuristimia, joilla muodostetaan tietyn suuruinen kuormitus kor-



keapainevesipumpun vesipainelinjaan kuristimen muodostaman painehäviön avulla. Korkeapainevesipumppu pumppaa vesipainelinjaan vettä, jonka virtausta kuristetaan. Veden tilavuusvirta kasvaa lineaarisesti vesipumpulle pumpattavan hydraulioöljyn tilavuusvirtaan nähden. Tällöin veden paine nousee turbulenttisen kuristusyhtälön mukaan, kun hydraulioöljyn virtausta kasvattamalla nousee myös veden virtaus kuristimen läpi. Samalla pumpun tehokäyrä (veden paine ja tilavuusvirta) mitataan ja katsotaan päästäänkö vaadittuihin suorituskykyarvoihin.

Liitteessä G on esitetty esisuunnitelman hydraulikaavio kuormituslaitteistolle. Kuormituslaitteiston pääkomponentit ovat mittakuristimet (4 kpl), korkeapainevedelle tarkoitetut sähköisesti suoraanohjatut 2/2-suuntaventtiilit (3 kpl), paineilmalla esiohjatut 2/2-suuntaventtiilit (2 kpl, paineilmakäyttöiset vinoistukkaventtiilit), paineilmalle tarkoitettu sähköisestäiohjattu 2/2-suuntaventtiili, sulkuventtiilit (5 kpl), imusuodatin, veden paine- sekä tilavuusvirta-anturit.

**Mittakuristimet** (4 kpl) mitoitettiin sopivan kokoisiksi siten, että vesipaine nousee haluttuun arvoon tietyillä veden tilavuusvirroilla. Mittakuristimien asennuspaikkaan täytyi kiinnittää huomiota, jotta ne olisivat helposti vaihdettavat ja puhdistettavat. Mittakuristimet varustettiin lisäksi integroiduilla vesipainesuodattimilla pienten kuristimien tukkeutumisen estämiseksi. Mittakuristimista on kerrallaan käytössä aina 2 kpl, jolloin halutut kuristimet valitaan liittämällä korkeapainevesiletkujen pikaliittimet haluttuihin kuristimiin.

Korkeapainevedelle tarkoitetut Danfoss Nessie **2/2-suuntaventtiilit** (2 kpl) ohjaavat korkeapainevesipumpulta tulevan korkeapaineisen veden halutun kuristimen läpi. Kuristimen koko valitaan halutun nopeusalueen mukaan, jolloin isolla kuristimella tarvitaan suuri tilavuusvirta ja pienellä kuristimella riittää pieni tilavuusvirta vesipaineen nostamiseksi lähelle maksimipainetta. 2/2-suuntaventtiilit ovat normaalisti suljettuja ja sähköisesti suoraanohjattuja, jotta kuormituslaitteella voidaan tarvittaessa suorittaa manuaalikoekäyttöä sekä paineenrajoitusventtiili voidaan säätää sulkemalla kaikki linjat. Lisäksi vesipainelinjassa on yksi Danfoss Nessie korkeapaine 2/2-suuntaventtiili, jolla voidaan ohjata pumpattava neste toiseen säiliöön tarvittaessa.

Järjestelmään on valittu myös 2 kpl **paineilmatoimisia 2/2-suuntaventtiileitä** (vinoistukkaventtiilit). Venttiileitä esiohjataan sähköisestäiohjatuilla 3/2-suuntaventtiileillä. Nämä esiohjausventtiilit avaavat/sulkevat 2/2-suuntaventtiilin paineilman avulla. Vinoistukkaventtiileistä toinen on normaalistiavoin ja toinen on normaalistisuljettu. Venttiilit ovat tarkoituksella pumpun imulinjassa ja näillä venttiileillä ohjataan korkeapainevesipumpun imulinjaan imettävää nestettä koekäyttötilanteen mukaan. Venttiileitä valittaessa täytyi kiinnittää huomiota venttiilin painehäviöön kavitaation välttämiseksi. Lisäksi venttiilin tuli pystyä kytkeytymään alipainelinjassakin (imulinja).

Pumpun imulinjaan on kytketty myös **sähköisesti ohjattu 2/2-suuntaventtiili**, jolla pumppu voidaan tyhjentää vedestä paineilman avulla. Lisäksi kaikki imulinjaan sijoitetut 2/2-suuntaventtiilit on varustettu rinnankytketyillä sulkuventtiilillä, joilla venttiili voidaan tarvittaessa kytkeä tai ohittaa.

**Imusuodattimella** suodatetaan vesisäiliössä mahdollisesti olevat epäpuhtaudet pois. Näin pumppuun ei mene koekäytössä likaa, joka voi heikentää pumpun kestoikää.

**Vesipaineanturiksi** valittiin Wika A10 0 – 400 bar paineanturi. Paineanturi on sama kuin hydraulikoneikon öljyn paineen mittaamiseen on käytetty.

**Veden tilavuusvirta-anturiksi** valittiin esimerkin omaisesti IFM SM2000 (5 – 600 L/min). Kyseinen magneettis-induktiivinen tilavuusvirta-anturi soveltuu imulinjaan, koska sen aiheuttama painehäviö on mittaamistavasta johtuen todella pieni. Anturin mitaustarkkuus voi kärsiä suuren mittaalueen takia, joten tämän anturin valintaan kannattaa kiinnittää huomiota lopullista suunnitelmaa tehtäessä.

## 5. AUTOMAATTISEN TESTAUSJÄRJESTELMÄN KÄYTTÖÖNOTTO JA TESTITULOKSET

Käyttöönotto suoritettiin Dynaset Oy:n sähköosaston puoleisessa koekäyttöhuoneessa. Automaattisen testausjärjestelmän toimivuus tuli todentaa käyttöönottotestien myötä, jolloin kyseinen testausjärjestelmä voidaan myöhemmin ottaa käyttöön eri tuotteiden koekäytössä (hydrauliset korkeapainevesipumput, generaattorit, kompressorit yms.). Testausjärjestelmän toimivuutta testattiin käyttöönottotestien yhteydessä suorittamalla testimittaukset korkeapainevesipumpulle, sulkuhanalle (pallohana) sekä mittakuristimelle.

### 5.1 Alkutyöt

Ennen varsinaisen testauksen aloittamista täytyi suorittaa mittauskaapin kokoonpano sekä tehdä tarvittavat muutokset vanhaan vielä tuotannossa olevaan hydraulikoneikkoon ja korkeapainevesipumpun testikäyttöön tarkoitettuun kuormituslaitteeseen. Lisäksi PLC ja I/O-kortit täytyi aluksi konfiguroida ja ohjauksoodi täytyi siirtää PLC:lle, jotta varsinaiset käyttöönottotestit voitiin aloittaa. Johdotukset toteutettiin 10 m mittaisista IFM:n 4-johtimisista sähköjohdoista, joissa oli M12-naarasliittimet.

Vanhaan hydraulikoneikkoon toteutettiin luvussa 4.1 esitetyt muutokset 2/2-suuntaproportionaaliventtiilin lisäämisen osalta ja lisättiin HydraForcen 2/2-suuntaproportionaaliventtiili mekaanisesti ohjatun 3/2-suuntaproportionaaliventtiilin rinnalle. Suuntaproportionaaliventtiilin vahvistinkortti liitettiin valmistetulla sähkökaapelilla testausjärjestelmän kytkentäkaappiin.

Paineenrajoitusproportionaaliventtiilinä käytettiin hydraulikoneikon alkuperäistä Bosch Rexrothin valmistamaa venttiiliä. Testaamisen yhteydessä paineenrajoitusproportionaaliventtiilin ohjainkortti vaihdettiin aina toiseen ohjainkorttiin, joka oli liitettynä testausjärjestelmän kytkentäkaappiin. Lisäksi virtausanturin vahvistinkortti vaihdettiin aina testin ajaksi toiseen vahvistinkorttiin, joka oli yhdistetty sähköjohtimella testausjärjestelmään.

Tehtyjen muokkausten avulla voitiin automaattisen testausjärjestelmän toimivuus testata ja tarvittaessa testaamiseen käytetty hydraulikoneikko voitiin nopeasti palauttaa tuotannon käyttöön vaihtamalla ohjain- sekä vahvistinkortit alkuperäisiin kortteihin. Näin taatiin myös tuotannon jouheva toiminta automaattista testausjärjestelmää käyttöönotettaessa ja järjestelmän toimivuus saatiin testattua pääosallittain ennen koneikkoon tehtäviä muita muutoksia.

## 5.2 Testausjärjestelmän kytkentäkaapin sähkökytkentöjen testaukset

PLC:n ja I/O-korttien konfiguroinnin ja alkutestauksen jälkeen testattiin kytkentäkaapin sähkökytkennät. Testeissä käytiin läpi kaikki kytkentäkaapin anturi- ja ohjauslaitekytkennät. Testattavia kanavia olivat

- analogiset 0 – 20 mA virtaviestimittauskanavat (8 kpl),
- analogiset 0 – 10 V jänniteviestimittauskanavat (6 kpl),
- digitaaliset pulssiviestimittauskanavat (2 kpl),
- digitaaliset sisäänmenokanavat (8 kpl),
- analogiset 0 – 20 mA virtaviesti ohjauskanavat (4 kpl) ja
- digitaaliset ulostulokanavat (8 kpl).

Digitaalisten sisäänmeno- ja ulostulokorttien ylimääräisiä kanavia ei testattu, koska niille ei tehty kytkentöjä kytkentäkaapin etupaneeliin (8 kpl ylimääräisiä digitaalisia sisäänmenoja ja 8 kpl ylimääräisiä digitaalisia ulostuloja). Testausjärjestelmän kytkentäkaapin sähkökytkentöjen testausten mittauspöytäkirja on esitetty liitteessä H.

**Analogiset virtaviestikanavat** testattiin 4 – 20 mA virtaviestiä lähettävällä paineanturilla (0 – 400 bar mittausalue). Kanavan toiminta todettiin TwinCatin system managerin kautta tarkasteltavana olevan tiedonkeruukortin mittauskanavan reaaliaikänäyttöä tarkkailemalla. Kun anturi liitettiin mittauskanavaan, niin reaaliaikänäytössä tuli näkyä 6554 bitin mittausviesti, joka vastaa 0 bar ylipaineella 4 mA virtaviestiä. Virtaviestikanavia testattaessa havaittiin runkoliittimen ja tiedonkeruukortin välillä sähköjohtojen kytkentävirhe, jossa tietyt kanavat oli kytketty ristiin ja täten System Manager näytti mittausarvon väärässä kanavassa. Kytkentävirhe korjattiin toimivaksi, jolloin mittausarvot tallentuvat oikealle kanavalle jatkossa. Kytkentävirhe johtui virheestä sähkökaaviossa.

**Analogiset jänniteviestikanavat** testattiin TwinCatin System Managerin pakotustoiminnolla, jolla voitiin antaa PLC:n kautta pakotettu mittausviesti binääri viestinä väliltä 0 – 32767 bittiä. Kytkentäkaapin etupaneelin runkoliittimien kytkennät kyseiselle tiedonkeruukortille testattiin yleismittarilla. Runkoliittimen ja tiedonkeruukortin välinen johdotus testattiin liittämällä yleismittarin toinen johdin runkoliittimen pinniin ja toinen johdin tiedonkeruukortin mittauskanavaan, johon kyseisen runkoliittimen pinnin pitäisi olla kytkettynä sähköjohdolla. Mittaukset päätettiin toteuttaa tällä tavalla, kun saatavilla ei ollut jänniteviestiä lähettävää paineanturia. Myös jänniteviestikanavia testatessa havaittiin sähköjohtojen ristiinkytkentävirhe, joka korjattiin toimivaksi.

**Digitaaliset pulssiviestin mittauskanavat** testattiin koneikon Kracht tilavuusvirta-anturilla. Hydraulikoneikolla pumpattiin öljyä 4/3-suuntaventtiilin ollessa vapaakiertoasennolla ja samalla katsottiin System Managerista, että lähettääkö tilavuusvirta-anturi pulssiviestiä tiedonkeruukortille. Sähkökytkentä todettiin toimivaksi.

**Digitaaliset sisäänmenokanavat** tarkastettiin yksinkertaisella mekaanisella kytkimellä, jolla yhdistettiin virta lähteen +24 V jännite sekä tiedonkeruukortin mittauskanava. Kun kytkin aktivoitiin, System Managerista katsottiin että vaihtuuko digitaalisen sisäänmenokanavan tila nollassa yhteen. Näin testattiin kaikki digitaaliset sisäänmenot (8 kpl) ja niiden todettiin toimivan.

**Analogiset ulostulokanavat** testattiin yhdistämällä kanaviin 2/2-suuntaproportionaaliventtiili ja ohjaamalla venttiiliä system managerin pakotustoiminnolla binääri viestillä välillä 6554 – 32767 bittiä. Tietyllä ohjausviestillä karan tulisi avautua, jolloin öljy alkaa virrata venttiilin läpi. Tämä havaitaan hydraulikoneikon Kracht tilavuusvirta-anturin näyttämästä sekä paine- ja tankkiliitäntöjen väliin testin ajaksi liitetystä mekaanisesta tilavuusvirta-anturista. Analogisten ulostulojen testauksessa havaittiin epähuomiossa syntynyt virheellinen sähkökytkentä 2/2-suuntaproportionaaliventtiilin sähköjohdossa, mutta sähköjohdotukset runkoliittimen ja tiedonkeruukortin välillä todettiin toimiviksi. Virheellinen sähkökytkentä korjattiin toimivaksi.

Digitaaliset ulostulot tarkastettiin 24 V jänniteellä toimivalla lampulla, joka yhdistettiin runkoliittimessä ohjauskortin ulostulonapaan (+24 V) sekä virtalähteen 0 V napaan. Kun ulostulo aktivoitiin System Managerista pakotustoiminnolla, niin lampun tuli syttyä palamaan. Tämän olisi myös voinut testata yleismittarilla, mutta päädyin tähän yksinkertaisempaan ja havainnollisempaan testaustapaan.

Sähkökytkentöjen testauksesta tehty mittauspöytäkirja on esitetty liitteessä H. Mittauspöytäkirjasta huomataan sähkökytkentöjen mahdolliset virheet ja muut testin aikana ilmenneet asiat.

### 5.3 Antureiden käyttöönototestit

Antureiden käyttöönoton yhteydessä antureiden skaalausparametrit tuli aluksi laskea antureiden mittausalueen, anturisignaalin ulostuloalueen sekä mittauskortin resoluution perusteella. Skaalausparametreja tarvitaan PLC-koodissa muuntamaan tiedonkeruukorttien lähettämät binääri viestit insinööriyksiköihin, jotka tallennetaan sähköiseen mittausraporttiin. Skaalausparametrien laskennan jälkeen tuli vielä kokeellisesti todentaa, että lasketut skaalausparametrit sekä automaattinen testausjärjestelmä toimivat oikein. Tällöin tarvittiin vertailumittauksia, joissa valittujen antureiden mittausarvoja verrataan ennalta tunnettuihin toimiviin antureihin. Näin voitiin todeta skaalausparametrit oikeiksi ja mittausjärjestelmän sekä antureiden tiedettiin toimivan oikein. Vertailumittaukset suoritettiin hydraulikoneikkoon valituille Wika A10 paineantureille sekä Kracht tilavuusvirta-anturille.

Varsinaisia tarkempia kalibrointimittauksia antureille ei suoritettu, sillä vertailumittaukset todettiin riittäväksi menetelmäksi Dynaset Oy:n suunnittelijoiden kanssa käytyjen keskustelujen pohjalta [1]. Paineantureiden kalibrointipöytäkirja tuli antureiden mukana,

mutta alkuperäisen Kracht tilavuusvirta-anturin kalibrointipöytäkirjaa ei ollut saatavilla ja se pitäisi viedä kalibroitavaksi haluttaessa tarkempia ja luotettavampia mittaustuloksia. Seuraavissa alaluvuissa kerrotaan antureiden skaalausparametrien määrittämisestä sekä antureille suoritetuista vertailumittauksista ja niistä saaduista tuloksista.

### 5.3.1 Antureiden skaalausparametrien määrittäminen

Laskettujen skaalausparametrien avulla PLC ohjaukoodi muuntaa tiedonkeruukortin lähettämän binäärimittausarvon insinööriyksikköön, joka tallennetaan sähköiseen mittauspöytäkirjaan. Anturi lähettää mittaustuloksen esimerkiksi virtaviestinä, jonka tiedonkeruukortti muuntaa binääriksi. PLC:n ohjaukoodissa tiedonkeruukortin välittämä binääri viesti taas muunnetaan skaalausparametreilla insinööriyksiköihin, jolloin mittaustieto voidaan tallentaa ymmärrettävässä olevaan muotoon. Seuraavaksi kerrotaan antureiden skaalausparametrien laskenta yleisellä tasolla ja esitetään paineanturien sekä tilavuusvirta-anturin lasketut skaalausparametrit. Yleisten skaalausparametrien laskentaan käytettyjen kaavojen tarkempi laskenta löytyy liitteestä I. Myös paineanturien sekä tilavuusvirta-anturin tarkempi laskenta löytyy liitteestä I.

Tiedonkeruukortin välittämä binääri viesti voidaan muuntaa insinööriyksiköksi kaavalla  $Y = aX + b$ , jossa Y on mittaustuloksen insinööriyksiköissä, a on skaalauskerroin, X on tiedonkeruukortin lähettämä binääri viesti ja b on offset (nollakohdan poikkeama). Binääri viesti kerrotaan skaalauksella ja siihen lisätään tietty arvo, jolloin binäärimittausviesti saadaan muunnettua haluttuun insinööriyksikköön. Skaalauskerroin a ja offset b määritetään anturin mittaustulosta (esim. 0 – 400 bar) ja ulostuloalueesta (esim. 4 – 20 mA) sekä tiedonkeruukortin resoluutiosta (bittistä).

Antureiden skaalauskerroin a lasketaan kaavasta

$$a = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}, \quad (18)$$

jossa  $Y_2$  on anturin mittaustuloksen yläraja (ilmoitetaan halutussa skaalattavassa insinööriyksikössä),  $Y_1$  on anturin mittaustuloksen alaraja yläraja (ilmoitetaan halutussa skaalattavassa insinööriyksikössä),  $X_2$  on tiedonkeruukortin ulostuloalueen yläraja ja  $X_1$  tiedonkeruukortin ulostuloalueen alaraja. Tiedonkeruukortin ulostuloalueen yläraja 16 bittisellä kortilla on  $2^{16-1} = 32767$  bittiä (yksi bitti on varattu etumerkille). Tiedonkeruukortin ulostuloalueen alaraja riippuu anturisignaalin ulostuloalueen alarajasta ja se lasketaan kaavasta

$$X_1 = \frac{Z_1}{Z_2} X_2, \quad (19)$$

jossa  $Z_1$  on anturin ulostuloalueen (mA) alaraja ja  $Z_2$  on anturin ulostuloalueen (mA) yläraja. Anturin mittaustuloksen nollakohdan offset b lasketaan kaavasta

$$b = Y_1 - aX_1 . \quad (20)$$

Skaalausparametrien määrittämisen jälkeen binääri viesti on muunnettavissa PLC-koodissa haluttuun insinööriyksikköön. Skaalausparametrien toimivuus tulee vielä todentaa erillisillä vertailumittauksilla, joissa anturien mittausarvoa verrataan tunnetun anturin mittausarvoon.

Wika A10 0 – 400 bar paineanturin skaalauskerroin on  $a = 0,01526$  bar/bit ja offset on  $b = -100$  bar. Wika A10 0 – 100 bar paineanturin skaalauskerroin  $a$  on  $a = 0,00382$  bar/bit ja offset  $b$  on  $b = -25$  bar. Kracht VC 3 F1 PS 0 – 160 L/min tilavuusvirta-anturin skaalauskerroin on  $a = 0,018$  L/min/bit ja offset on  $b = 0$  L/min. Antureiden skaalausparametrien tarkempi laskenta on esitetty liitteessä I.

### 5.3.2 Paineanturien skaalausparametrien toiminnan verifiointi

#### MITTAUSMENETELMÄ

Paineanturien vertailumittauksissa kytkettiin 4 kpl paineantureita jakotukkiin, johon kytkettiin hydraulikoneikon painelinja. Öljyä pumpattiin tulppaa vasten ja paineantureilla mitattiin paine painelinjassa. Painetta kasvatettiin askelmaisesti lähtötasosta (0 bar) pumpun paineleikkurin asetusarvoon (280 bar) asti ja takaisin lähtötasoon (0 bar). Paineaskeleiden aikana antureiden näyttämät tallennettiin tai kirjattiin ylös, jotta niitä voitiin myöhemmin vertailla toisiinsa.

Kuvassa 52 on esitetty paineantureiden kytkentä jakotukkiin.



**Kuva 52.** Vertailtaviin paineantureiden kytkentä jakotukkiin

Vertailtavia paineantureita olivat koneikkoon valitut Wika A10 paineanturit (0 – 400 bar), digitaalinäytöllinen Parker Service Junior paineanturi (0 – 600 bar) sekä vanhassa hydraulikoneikossa oleva Trafak Nat paineanturi (0 – 400 bar). Wika A10 paineanturit oli kytketty keskimmäisiin mittauspikaliittimiin, Parkerin paineanturi vasempaan ja Trafakin paineanturi oikeanpuolimmaiseen mittauspikaliittimeen. Trafak:in sekä Parkerin paineanturin tiedettiin näyttävän suhteellisen oikeita lukemia. Wika A10 1A004MSEBU paineanturi oli kytketty testausjärjestelmän kanavaan AI\_1 (4 – 20 mA) ja Wika A10 1A004MSG41E kanavaan AI\_3 (4 – 20 mA). Parker sekä Trafak paineantureiden mittausarvot kirjattiin käsin mittauspöytäkirjaan ja Wika A10 paineantureiden mittausarvot tallennettiin sähköiseen mittausraporttiin automaattisen testausjärjestelmän avulla. Wika A10 paineantureiden mittausarvojen tallentamiseen käytetty mittaustaajuus oli 100 Hz.

## TULOKSET

Taulukossa 3 on esitetty tulokset vertailuille paineantureille. Parkerin ja Trafakin paineantureille ilmoitettiin lukema katsomalla arvo painemittarien näytöistä. Wika A10 paineanturien arvot on ilmoitettu taulukkoon laskemalla excelissä 100 Hz mittaustaajuudella tallennetusta raakadatatista keskiarvo kullekin paineaskeleelle. Tällä tavoin saatiin Wika



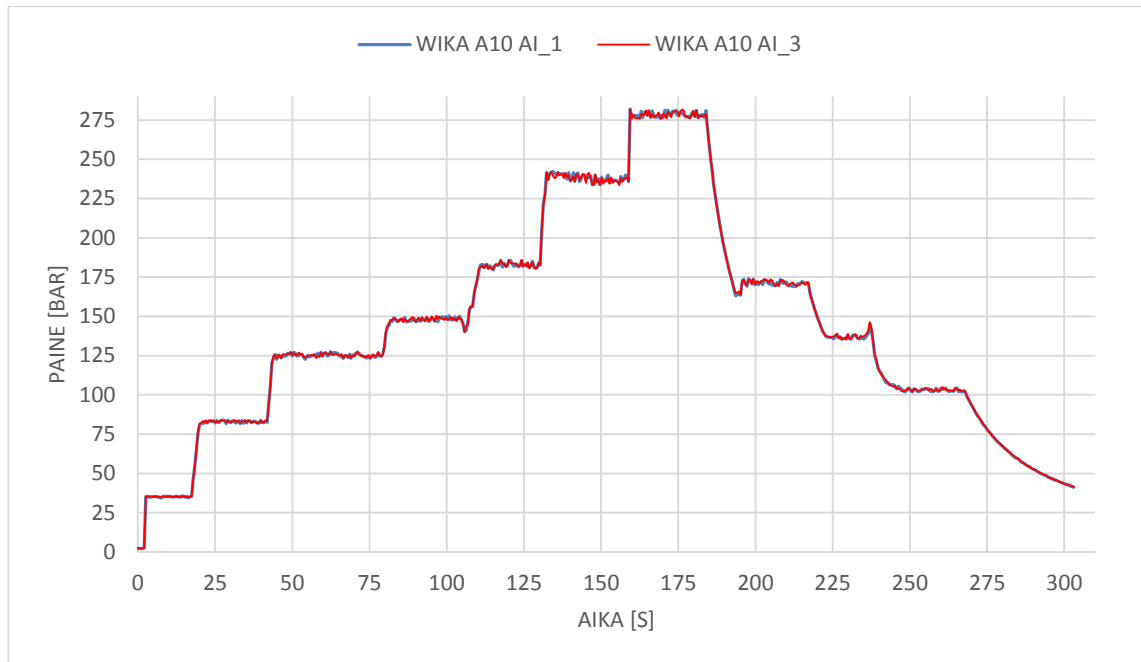
A10 paineantureille edustavin mittausarvo kultakin paineaskeleelta ja anturien lukemia voitiin vertailla skaalauksen toimivuuden testaamiseksi.

*Taulukko 3. Vertailtujen paineantureiden mittaustulokset.*

Mittaus numero	Parker	Trafak	Wika A10 AI_1	Wika A10 AI_3
1.	35	35,2	35,1	35,2
2.	83	83,1	82,8	83
3.	<b>126</b>	<b>126,1</b>	<b>125,1</b>	<b>125,2</b>
4.	148	148,5	148,1	148,3
5.	183	183,7	182,7	182,8
6.	<b>239</b>	<b>239,2</b>	<b>238</b>	<b>238</b>
7.	278	279,3	278,7	278,6
8.	171,3	172	171,5	171,6
9.	137	137,5	137,2	137,4
10.	103	103,5	103,2	103,4
11.	41	41,3	41,5	41,6

Taulukosta havaitaan, että paineanturien lukemat ovat johdonmukaisia ja lähellä toisiaan. Mittauspisteissä 3 ja 6 esiintyy paineanturien välillä suurimmat poikkeamat ja mittauspisteessä 6 maksimipoikkeama Wika A10 (AI\_1) ja Parkerin anturin välillä on 1,0 bar sekä Wika A10 (AI\_1) ja Trafakin anturin välillä on 1,2 bar. Mittauspisteessä 6 on maksimipoikkeama Wika A10 (AI\_3) ja Parkerin anturin välillä on 1,0 bar sekä Wika A10 (AI\_3) ja Trafakin anturin välillä on 1,2 bar. Muissa mittauspisteissä paineanturien näyttämät osuvat lähemmäksi toisiaan. Tämä satunnainen poikkeaminen on selitettävissä Parkerin ja Trafakin paineanturien lukematarkkuudella sekä koekäyttäjän osuudella mittaus tuloksiin. Parkerin ja Trafakin yhteydessä koekäyttäjät lukee paineen mittausarvon tietyllä hetkellä ja tallentaa yhden ainoan lukeman mittauspöytäkirjaan.

Kuvaan 53 on piirretty Wika A10 (AI\_1) ja Wika A10 (AI\_3) paineanturien mittausarvot vertailumittausten aikana käytettäessä 2 Hz mittaustaajuutta. Mittaustaajuuden pienentäminen tehtiin excelissä valitsemalla mittauspisteitä 0,5 välein (2 Hz), kun alkuperäinen mittausdata oli kerätty 0,01 s välein (100 Hz). Mittaustaajuuden pienentämistä käytettiin, jotta ylimääräiset painepiikit saatiin kuvasta pois ja kuva tuli selkeämmäksi.



**Kuva 53.** Toisiinsa vertailtujen Wika A10 paineanturien mittaustulokset.

Kuvasta huomataan, että Wika A10 paineanturien mittausravot ovat hyvin lähellä toisiaan koko mittauksen ajan. Käytettäessä samaa skaalausparametria molemmille antureille ei synny merkittävää virhettä, mutta systemaattinen virhe kuitenkin. Tämä syntyy, kun skaalauskerroin  $a$  ja offset  $b$  ovat laskettu nimellisistä arvoista eikä valmistajan antamista kalibroituista arvoista. Paineantureiden piirtämä painekäyrä näyttää värähtelevän, mikä johtuu paineen luonteesta ja osittain myös mäntäpumpun pulssimaisesta tilavuusvirrasta. Käytetty testausmenetelmä soveltuu lähinnä skaalausparametrien toimivuuden testaamiseen eikä kalibrointiin. Kalibrointi tulee suorittaa esimerkiksi mäntämanometrillä, joka tuottaa tasaisen paineen.

Vertailtaessa Wika A10 paineantureita toisiinsa havaitaan niiden välillä hyvin pieniä poikkeamia, jotka johtunevat osittain käytetyistä skaalausparametreista ja osittain antureiden yksilöllisistä ominaisuuksista. Wika A10 paineantureille käytettiin nimellisestä mittaus- ja ulostuloalueesta sekä tiedonkeruukortin resoluutiosta laskettuja skaalausparametreja  $a$  ja  $b$ . Yleisiä parametreja käytettiin, jotta antureiden parametritiedostoa saatiin pienemmäksi, mutta samalla anturien mittaustuloksiin tulee systemaattista virhettä. Tämä johtuu anturin nolapisteen sekä herkkyyden laskennallisesta virheestä.

Yleisten skaalausparametrien käytöstä oletettiin aiheutuvan vain vähän virhettä mittausravoon [1]. Mittaustulosten luotettavuuden ja vertailukelpoisuuden takia kannattaa jatkossa kuitenkin käyttää jokaiselle anturille erikseen valmistajan kalibrointipöytäkirjasta laskettuja skaalausparametreja. Anturien skaalausparametrit tulee identifioida anturikohtaisesti, jolloin tiedetään missä koneikossa käytetään mitäkin anturia. Jokainen anturi on yksilö, joten se tarvitsee omat skaalausparametritnsä näyttääkseen oikeaa mittaustulosta.

Paineanturien skaalausparametrien laskennan todetaan onnistuneen hyvin, sillä paineanturien mittausarvot ovat lähellä vertailuun käytettyjen muiden paineanturien mittausarvoja. Mittaustuloksissa voidaan päästä jatkossa vieläkin tarkempaan tulokseen käyttämällä skaalausparametrien laskennassa valmistajan ilmoittamia kalibroituja arvoja. Näin saadaan poistettua systemaattinen virhe mittaustuloksista ja mittaustuloksista saadaan paremmin vertailukelpoisia. Tällöin varmistetaan mittausten vertailtavuus pitkälläkin aikavälillä. Myös paineantureiden kalibrointiin kannattaa panostaa vuosien saatossa, jotta mittaukset ovat vertailukelpoisia keskenään.

### **5.3.3 Tilavuusvirta-anturin skaalausparametrien toiminnan verifiointi**

#### **MITTAUSMENETELMÄ**

Tilavuusvirta-anturin vertailumittaukset (2 kpl) suoritettiin pumpaamalla öljyä mekaanisen tilavuusvirta-anturin sekä sähköisen tilavuusvirta-anturin läpi ja mittausten jälkeen antureiden mittaustuloksia verrattiin toisiinsa. Vertailumittauksissa virtauksen määrää kasvatettiin askelmaisesti lähtötasosta (0 L/min) aina hydraulipumpun maksimitilavuusvirtauksen arvoon (107 L/min) ja takaisin lähtötasoon (0 L/min). Tilavuusvirta-antureiden mittausarvot tallennettiin tai kirjattiin ylös kunkin tilavuusvirta-askeleen aikana, jotta antureiden näyttämiä voitiin verrata toisiinsa.

Mekaaninen tilavuusvirta-anturi on rotametryyppinen Lake B4B-6HV-30 tilavuusvirta-anturi (15 – 115 L/min) ja sähköinen tilavuusvirta-anturi on syrjäytysperiaatteella toimiva Kracht VC 3 F1 PS tilavuuskammioanturi (0,6 – 160 L/min). Mittausten aikana mekaaninen tilavuusvirta-anturi oli kytketty hydraulikoneikon paine- ja tankkilinjojen väliin ja sähköinen tilavuusvirta-anturi oli kiinteästi asennettuna pumpun painelinjaan. Hydraulikoneikon tilavuusvirran ohjaus suoritettiin mekaanisesti ohjatulla 3/2-suunta-proportio-naaliventtiilillä.

Vertailumittauksia suoritettiin 2 kpl, joista toisessa Kracht tilavuusvirta-anturi oli kytketty testausjärjestelmän kanavaan 16 ja toisessa vertailumittauksessa Kracht tilavuusvirta-anturi oli liitetty koneikon paneelimitariin. Ensimmäisessä vertailumittauksessa Kracht tilavuusvirta-anturin mittausarvot tallennettiin sähköiseen mittausraporttiin 100 Hz mittaustaajuudella ja mekaanisen Lake tilavuusvirta-anturin mittausarvot käsin mitaustuspöytäkirjaan. Toisessa vertailumittauksessa Kracht anturin ja Lake tilavuusvirta-anturin mittausarvot tallennettiin käsin mitaustuspöytäkirjaan. Vertailumittauksilla selvitettiin sähköiselle Kracht tilavuusvirta-anturille laskettujen skaalausparametrien toimivuus vertaamalla sähköisen tilavuusvirta-anturin lukemaa mekaaniseen tilavuusvirta-anturiin.

## TULOKSET

Taulukossa 4 on esitetty tilavuusvirta-anturien mittaustulokset ensimmäisestä ja toisesta vertailumittauksesta. Ensimmäisessä mittauksessa Kracht tilavuusvirta-anturin mittausravot on tallennettu testausjärjestelmän tiedonkeruukortilla ja mekaanisen Lake tilavuusvirta-anturin mittausravot kirjattiin käsin mittauspöytäkirjaan. Kracht tilavuusvirta-anturin mittausravot on laskettu kunkin tilavuusvirta-askleen keskiarvona Excelissä. Tällöin käytetty mittaustaajuus oli 100 Hz. Tällä menetelmällä saatiin Kracht tilavuusvirta-anturille edustavin mittausravo kultakin tilavuusvirta-askeleelta ja tilavuusvirta-anturien lukemia voitiin vertailla skaalauksen toimivuuden testaamiseksi. Toisessa mittauksessa Kracht tilavuusvirta-anturi oli liitetty hydraulikoneikon paneelimitariin ja Kracht anturin sekä Lake tilavuusvirta-anturin mittausravot kirjattiin käsin mittauspöytäkirjaan.

**Taulukko 4.** Vertailtujen tilavuusvirta-anturien mittaustulokset ensimmäisestä ja toisesta vertailumittauksesta.

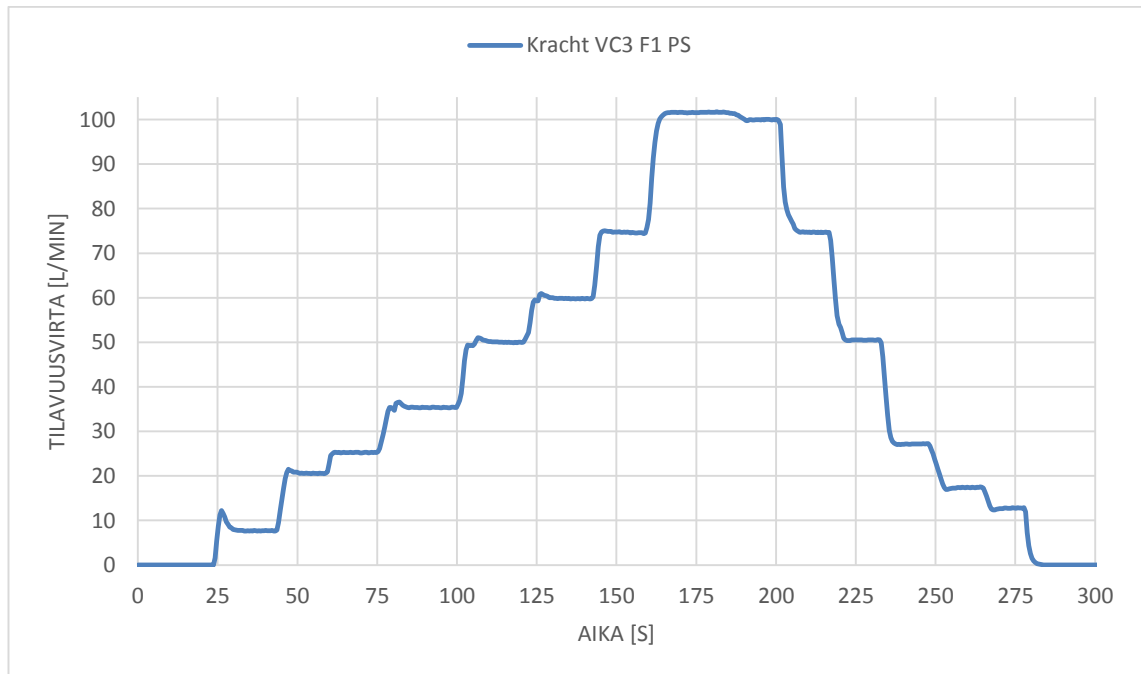
Mittaus nro.	I mittaus		II mittaus	
	Kracht VC 3 F1 PS (Tiedonkeruukortti)	Lake B4B- 6HV-30	Kracht VC 3 F1 PS (Panelimitari)	Lake B4B- 6HV-30
1.	0	0	0	0
2.	7,7	10	11,7	10
3.	20,6	20	25,1	25
4.	25,3	25	35,1	35
5.	35,6	35	49,5	50
6.	50,0	50	59,6	60
7.	59,8	60	75,1	75
8.	74,7	75	100,7	100
<b>9.</b>	<b>101,6</b>	<b>103</b>	101,7	101
10.	100,0	100	100,2	100
11.	74,7	75	75,0	75,8
12.	50,5	50	50,7	50
<b>13.</b>	<b>27,2</b>	<b>25</b>	<b>26,5</b>	<b>25</b>
<b>14.</b>	<b>17,4</b>	<b>15</b>	<b>17,7</b>	<b>15</b>
15.	12,7	10	12,9	10

Taulukosta havaitaan, että mittaustarkkuuksien rajoissa tilavuusvirta-anturien lukemat ovat johdonmukaisia ja lähellä toisiaan. Ensimmäisessä mittauksessa antureiden mittausravojen maksimipoikkeama esiintyy mittauspisteessä 14, jolloin antureiden mittausero on 2,4 L/min. Tämä selittyy mekaanisen tilavuusvirta-anturin melko suurella mittauserpätarkkuudella, sillä kyseisen anturin mittaustarkkuus on  $\pm 2\%$  mittauseroalueesta (FSO) ja Kracht tilavuusvirta-anturin mittaustarkkuus on 0,3 % lukemasta. Tällöin mittaustarkkuuden rajoissa anturit näyttävät lähellä toisiaan olevia lukemia. Mekaanisen tilavuusvirta-anturin luettavuus ja koekäyttäjän lukematarkkuus vaikuttavat myös osittain mittaustulokseen.

Toisessa mittauksessa mittauspisteissä 14 ja 15 havaitaan suurimmat mittauspoikkeamat, mutta mittauspiste 15 on Lake anturin mittausalueen ulkopuolella, joten se jätetään huomioimatta. Mittauspisteessä 14 havaitaan mittausarvojen maksimipoikkeama 2,7 L/min. Mittaustarkkuuksien rajoissa todetaan antureiden lukemien olevan lähellä toisiaan ja johdonmukaisia.

Ensimmäisessä mittauksessa havaittu maksimipoikkeama Kracht ja Lake tilavuusvirta-anturien välillä oli 2,4 L/min ja toisessa mittauksessa havaittu suurin maksimipoikkeama oli 2,7 L/min. Nämä maksimipoikkeamat selittyvät mekaanisen tilavuusvirta-anturin suhteellisen huonolla tarkkuudella, joka on  $\pm 2\%$  mittausalueesta. Myös koekäyttäjällä on tähän osittain vaikutusta, sillä koekäyttäjä lukee anturin mittausarvon mitta-asteikolla ja tästä syntyy lukemavirhettä. Kun nämä yksittäispisteet jätetään huomioimatta mittavirheen takia, niin antureiden näyttämät poikkeavat toisistaan maksimissaan vain  $n. \pm 0,6$  L/min ensimmäisessä vertailumittauksessa ja 0,7 l/min toisessa vertailumittauksessa. Tulosten perusteella Kracht tilavuusvirta-anturille laskettujen skaalausparametrien todetaan toimivan hyvin.

Kuvassa 54 on esitetty ensimmäisen vertailumittauksen mittauskäyrä Kracht tilavuusvirta-anturille. Piirtämiseen käytetty mittaustaajuus oli 2 Hz, jolloin kuvaaja saatiin helpommin piirrettyä Excelissä (vähemmän mittauspisteitä). Tällöin näytteenottoväli oli 0,5 s, kun alkuperäinen mittausdata oli tallennettu 0,01 s välein mittaustaajuudella 100 Hz.



**Kuva 54.** Kracht tilavuusvirta-anturin ensimmäisen vertailumittauksen mittaustulokset.

Kuvasta havaitaan, että tilavuusvirta pysyy melko tasaisena tilavuusvirta-askeleiden aikana. Askeleiden välillä siirryttäessä on havaittavissa pientä seilaamista, koska tilavuusvirran asettelu tehtiin käsin mekaanisesti ohjatulla 3/2-suuntaproportionaaliventtiilillä. Kuvassa näkyvistä askeleista laskettiin keskiarvot Excelissä ja arvot on kirjattu taulukoon 4.

## 5.4 Käyttöliittymän ja PLC-koodin toiminnan verifiointi

Tässä osiossa käydään läpi käyttöliittymän oikea toiminnallisuus, jolloin voidaan olla varmoja, että Insolution Oy:ssa suunniteltu käyttöliittymä ja PLC-koodi toimivat vaatimusten mukaan. Automaattisella testausjärjestelmällä ajettiin virtuaalitestejä, joiden aikana testausjärjestelmään oli liitettynä paineanturi analogia sisäänmenoon sekä on/off-kytkin digitaaliksi sisäänmenoon. Koneikko pidettiin sammuksissa, mutta kyseisten anturien mittausrvojen mukaan testattiin järjestelmän toimivuus hätärajojen sekä laaturajojen osalta.

### 5.4.1 Hätä- ja laaturajojen toiminnan verifiointi

**Hätärajojen** toimivuus testattiin analogisilla sekä digitaalisilla mittauskanavilla. Hätärajat määritettiin konfigurointiohjelmassa kulloisenkin rajan testaukseen sopivaksi ja katsottiin toimiko järjestelmä loogisesti oikein hätärajan ylittyessä tai alittuessa. Hätärajan ylittyessä tai alittuessa sähköiseen mittausraporttiin pitää tulla merkintä, josta selviää hylkäyksen aiheuttanut hätärajan ylittyminen tai alittuminen sekä hylkäyksen aiheuttaneen mittauskanavan tiedot. Analogista kanavaa testattaessa testausjärjestelmään oli liitettynä 0 – 400 bar paineanturi, joka lähettää 4 – 20 mA virtaviestiä. Digitaalista kanavaa testattiin on/off-kytkimen avulla, joko aktivoimalla tai deaktivoimalla kytkin. Hätärajat testattiin sekä analogisen että digitaalisen mittauskanavan ala- ja ylärajoilla.

**Analogisisäänmenokanavan hätärajojen** alaraja testattiin asettamalla hätärajat välille 1 – 10 bar (Stop Limit Low – Stop Limit High), jolloin koneikon ollessa pysähdyksissä paineanturi näyttää arvoa 0 bar ja tällöin mittausraporttiin pitäisi tulla merkintä hylätty sekä hylkäyksen aiheuttanut kanava. Analogiakanavan hätärajojen yläraja testattiin vastaavalla tavalla asettamalla hätärajat välille -10 – -1 bar. Järjestelmä tulkitsi molemmat tapaukset hätätilanteeksi ja keskeytti koekäytön konfigurointiohjelmassa asetetun viiveajan jälkeen. Hätärajat testattiin myös asettamalla hätärajoiksi -1 – 10 bar, jolloin koekäyttö hyväksyttiin paineanturin näyttäessä arvoa 0 bar. Analogiasisäänmenokanavien hätärajojen todettiin toimivan oikein.

**Digitaalisisäänmenokanavan hätärajojen** alaraja testattiin asettamalla hätärajat välille 1 – 1, jolloin koekäyttö keskeytetään mittausarvon poiketessa kyseisestä arvosta. Kanavaan liitetyn kytkimen annettiin olla nolatilassa ennen mittauksen aloittamista, jolloin järjestelmä keskeytti koekäytön viiveajan jälkeen, koska digitaalisisäänmenon tila oli 0. Digitaalisisäänmenokanavan hätärajojen yläraja testattiin vastaavalla tavalla asettamalla

hätärajat välille 0 – 0 ja aktivoimalla kytkin, jolloin koekäyttö keskeytetään mittausarvon ollessa 1. Digitaalisäänmenokanavat testattiin myös asettamalla hätärajat ja kytkin samaan arvoon (1 ja 0), jolloin koekäytön tulee suoriutua hyväksytysti. Digitaalisäänmenokanavien hätärajojen todettiin toimivan oikein.

**Laaturajojen** toimivuus testattiin analogisilla sekä digitaalisilla mittauskanavilla. Laaturajat määritettiin konfigurointiohjelmassa testialgoritmivälilehdellä tietylle askeleelle, jonka aikana suoritetaan mittausarvon vertailu laaturajoihin. Jos laaturajat ylittyvät tai alittuvat määritellyn askeleen aikana, niin sähköiseen mittausraporttiin pitää tulla merkintä, josta selviää hylkäyksen aiheuttanut laaturajojen ylittyminen tai alittuminen sekä hylkäyksen aiheuttaneen mittauskanavan tiedot.

**Analogisisäänmenokanavan laaturajojen** alarajan toimivuus testattiin lähes samalla tavalla kuin hätärajat. Testialgoritmissa määriteltiin tietylle askeleelle laaturajoiksi 1 – 10 bar, jolloin paineen ollessa edelleen 0 bar pitää sähköiseen mittausraporttiin tulla merkintä laaturajojen alituksesta ja hylkäyksen aiheuttaneen mittauskanavan tiedot. Laaturajojen ylärajan toimivuus testattiin asettamalla laaturajoiksi -10 – -1 bar, jolloin paineen ollessa edelleen 0 bar pitää sähköiseen mittausraporttiin tulla merkintä laaturajojen ylityksestä ja hylkäyksen aiheuttaneen mittauskanavan tiedot. Laaturajojen toimivuus testattiin myös asettamalla laaturajat välille -1 – +1, jolloin sähköiseen mittausraporttiin pitää tulla merkintä hyväksyty, koska paine on nolla bar. Analogiasäänmenokanavien laaturajojen todettiin toimivan oikein.

**Digitaalisäänmenokanavan laaturajojen** toimivuus testattiin asettamalla testialgoritmissa tietyn askeleen kohdalle arvo, jonka ilmetessä tulee tuotteen koekäyttö hylätä. Toiminta testattiin asettamalla tietyn askeleen kohdalle arvo 0, jolloin kytkimen ollessa 0 tilassa pitää tuotteen koekäyttö hylätä ja sähköiseen mittausraporttiin pitää tulla merkintä laaturajat hylätty sekä kyseisen mittauskanavan tiedot. Laaturajojen toiminta testattiin myös aktivoimalla kytkin ja asettamalla digitaalikanavan laaturaja arvoon 1, jolloin tuotteen koekäyttö tulee myös hylätä. Laaturajojen hyväksyntä testattiin asettamalla digitaalikanavan laaturaja arvoon 1 sekä kytkin tilaan 0 ja ajamalla koekäyttö, jolloin tuotteen koekäyttö tulee hyväksyä. Digitaalisäänmenokanavien laaturajojen todettiin toimivan oikein.

Laaturajojen toimivuus testattiin myös **analogi- sekä digitaalikanavien yhtäaikaisella mittauksella**. Kun molempien kanavien laaturajat asetettiin siten että hylkäys tulee aiheutua molemmista kanavista, niin sähköiseen mittausraporttiin tuli merkintä vain digitaalisesta kanavasta. Tuotteen koekäytön hyväksyntä toimi, kun molemmat laaturajat asetettiin siten että tuotteen koekäyttö tulee hyväksyä. Näiden huomioiden pohjalta ohjauskoodiin voisi lisätä ominaisuuden, joka listaa kaikki hylkäyksen aiheuttajat mittausraporttiin. Tämä ei tosin ole pakollista, sillä yhden korjatun virheen jälkeen havaitaan myös toinen vaikuttanut virhe, mikäli se on vielä aktiivinen.

Hätä- ja laaturajojen todettiin testien myötä toimivan asetettujen vaatimusten mukaan. Tehdyistä testeistä on saatavilla mittausraportit, mutta niitä ei laitettu tämän työn liitteeksi suuren sivumäärän takia.

## 5.4.2 Käyttöliittymän toiminnan verifiointi

Käyttöliittymän toiminta testattiin käymällä läpi tuotteen koekäyttö alusta loppuun vaihe kerrallaan ja tutkimalla toimiiko käyttöliittymä vaatimusten mukaan. Suunnitteluvaiheessa määriteltiin vaatimukset käyttöliittymälle sekä esiteltiin käyttöliittymän ominaisuudet ja tässä vaiheessa vielä testataan toimiiko käyttöliittymä varmasti niin kuin sen tuleekin toimia.

Testaaminen aloitettiin lukemalla koekäyttäjän nimi henkilökortin viivakoodista koodinlukijalla. Tämän todettiin toimivan sekä koodinlukijalla, että käsisyötöllä näppäimistöltä.

Laitteen tuotekoodi sekä sarjanumero luettiin laitteen QR-koodista koodinlukijalla ja tämän todettiin toimivan sekä koodinlukijalla että myös näppäimistöltä syötettäessä. QR-koodin lukemista testattiin myös yleisimmissä virhetilanteissa, joita voi esiintyä. Näitä ovat esimerkiksi saman laitteen QR-koodin lukeminen kahteen kertaan. Duplikaattien lukeminen ei saa olla mahdollista, sillä tällöin mittaukset voivat tallentua väärälle laitteelle moniajon yhteydessä. Testien myötä todettiin, että järjestelmä ei anna lukea kahta samaa QR-koodia, sillä se tyhjentää viivakoodikentän aina kun siihen yritetään lukea jo aiemmin luettua QR-koodia. Myös varsinainen QR-koodin virheellisyys testattiin väärin konfiguroidulla QR-koodilla, jolloin QR-koodin poiketessa QR-koodin syntaksista annetaan virheilmoitus. Järjestelmää testattiin myös lukemalla sellainen QR-koodi, jota vastaava konfigurointitiedostoja ei löydy palvelimelta, jolloin käyttöliittymä ilmoittaa myös virhetilanteesta. QR-koodin lukemisen todettiin toimivan oikein virhetilanteissa sekä oikein määritellyn QR-koodin lukeminen onnistui hyvin.

Käyttöliittymän testaamisen yhteydessä havaittiin, että testausvälilehdelle olisi myös järkevää ilmoittaa testattavan laitteen nimi, joka saadaan konfigurointiohjelman perusparametritvälilehdeltä. Tämä tuo selkeyttä ja myös lisää koekäytön turvallisuutta, sillä näin koekäyttäjä tietää, että järjestelmään ladattiin oikean laitteen konfigurointitiedosto. Väärää konfigurointitiedostoa käytettäessä suoritetaan laitteen koekäyttö väärällä tavalla ja laite voi altistua ylikuormitukselle sekä hajota koekäytön yhteydessä. Tällöin myös vaaratilanteen syntyminen on todennäköistä. Vaaratilanteiden välttämiseksi **tulee testausvälilehdelle lisätä testattavan laitteen nimi** seuraavan käyttöliittymän päivityksen yhteydessä.

Laitteen koekäyttö aloitetaan painamalla **käynnistä-nappia**, jonka jälkeen ohjauslaitteet asetettiin **odota-tilan** mukaisiin asetusarvoihin. Odota-tilan todettiin toimivan, sillä koneikko pysähtyi määriteltyyn askeleeseen, jolle oli määritelty tietty tilavuusvirta askeleen



aikana. Odota-tilan aikana pallohanan kuristaminen näkyy paineen nousuna reaaliaikaikkunassa, mutta kyseiset mittausarvot eivät vaatimusten mukaisesti tallennu mittausraporttiin.

**Jatka-napilla** varsinainen koekäyttö käynnistyy niin kuin pitääkin. koekäytön aikana reaaliaikaikkunasta on mahdollista katsoa kunkin anturin oloarvoa erikseen reaaliajassa sekä tarkemmin tietyllä pienellä ajanhetkellä. Suurennustyökalun skaalaus ei toimi odotetusti. Suurennustyökalu venyttää valitun alueen x-akselin suunnassa, mutta skaalausta ei kuitenkaan tapahdu y-akselin suunnassa. Tällöin mittausignaali näyttää vääristyneeltä ja venytetyltä. Tämä **tulee korjata** seuraavan käyttöliittymän päivityksen yhteydessä.

Reaaliaikaikkunan alapuolella on esitetty koekäyttäjälle **visuaaliset tarkastuskysymykset**, jotka tulee suorittaa ja kysymyksiin tulee valita vastaus esiin tulevasta valikosta. Vastaukseksi voi valita kesken, hylätty tai hyväksyty. Visuaalisten tarkastusosoiden todettiin toimivan, sillä koekäyttäjän tallentama vastaus tallentui myös mittausraporttiin. Lisäksi mittausraporttiin jää kesken merkintä siihen asti kunnes visuaalisiin tarkastuskysymyksiin on vastattu. Kysymyksiin voi vastata myös myöhemmin avaamalla kyseisen laitteen mittausraportin tuotteet-välilehdeltä. Tällöin koekäyttäjän vastuulle jää täyttää visuaaliset tarkastuskohdat, koska käyttöliittymä ei rakenteestaan johtuen pakota tähän. Toisaalta myös visuaalisten testien suorittaminen tai suorittamatta jättäminen on käyttäjän vastuulla, mikä tulee osaltaan pitää mielessä raporteja lukiessaan.

Koekäytön valmistuttua sähköinen mittausraportti ilmestyy tarkasteltavaksi ja tähän menee tiedostokoosta riippuen aikaa n. 5 – 10 s. Käyttöliittymän **suorituskyvyn** todettiin olevan vaatimusten mukainen korkeapainevesipumpun testin osalta, mutta tulee huomata, että pidemmällä testeillä tiedostokoko sekä raportin luontiaika kasvavat. Projektin aikana tässä tiedostonluontinopeudessa esiintyi suuria haasteita, mutta suorituskyky saatiin vaatimusten mukaiseksi.

**Tuotteet-välilehdeltä** tarkastettiin ilmestyikö kyseinen mittausraportti sinne ja tämän todettiin toimivan. Raportin pystyi lataamaan raportti sarakkeen lataa-nappia painamalla, jolloin mittausraporttia voi tarkastella myös myöhemmin. Raportin valitsemalla ilmestyi myös mittausraportin kuvaaja, josta pystyi tarkastelemaan mittautietoja tietyllä ajanhetkellä liikuttamalla hiirtä käyrän päällä. Mittautietoa pystyi tarkastelemaan myös tarkemmin suurennustyökalulla, mutta tässä oli ongelma skaalauksen kanssa. Suurennustyökalua käytettäessä käyrä suurennetaan valitulla aikavälillä vain x-akselin suunnassa eikä ollenkaan y-akselin suunnassa. Tämä skaalausongelma **tulee myös korjata** käyttöliittymän päivityksen yhteydessä. Visuaalisiin tarkastuksiin voi vielä vastata täältä, jos vastaukset unohtuivat täyttää. On huomattava, että vastaukset voi täyttää jälkikäteen vaikka kyseisiä testejä ei olisikaan varsinaisesti suorittanut, joten myös väärän laitteen mittausraportin muokkaaminen on mahdollista. Vanhat mittausraportit ovat toki tallessa palvelimella, joten suurempaa vahinkoa ei virheestä koidu. Koulutettujen ja ammattitaitoisten

koekäyttäjien osalta tämä kuitenkin voidaan jättää heidän vastuulle, mutta tämä riski virheen mahdollisuuteen tulee osaltaan huomioida ja pitää mielessä.

Tuotteet-välilehden mittausraporttien **ryhmittelyn** (engl. sorting) toimivuus testattiin seuraavissa sarakkeissa: tila, sarjanumero, tuotekoodi, tuotenimi, testin ajankohta, muokattu, reseptiversio, testipenkki ja testaaja. Ryhmittelyn todettiin toimivan. Myös selaimen etsintätoiminnon todettiin toimivan, kunhan näytä-ikkunasta oli valittuna kaikki raportit näytettäväksi. Tämä voi tosin muodostua tulevaisuudessa pullonkaulaksi, koska mittausraportteja muodostuu useita satoja vuosien saatossa. Verkkolevyltä myös tarkasteltiin koekäyttöhistorian säilyvyyttä. Raportit nimetään siten että vanhimman mittausraportin nimen tulee merkintä 00 ja siitä seuraavaan aina 01 jne. Uusimman mittausraportin nimen perään ei tule numeromerkintää ollenkaan, joten siitä tunnistetaan uusin raportti. Tässä havaittiin testien aikana esiintyvän ongelmia, kun samalle laitteelle ajettiin peräkkäin koekäyttöjä, niin laitteen tilakenttä näytti menevän sekaisin ja tila näytti olevan kesken vaikka sen olisi pitänyt olla hyväksytty. Tämä **tulee tarkistaa ja korjata** käyttöliittymän päivityksen yhteydessä ennen kuin testausjärjestelmällä aletaan suorittamaan laitteiden koekäyttöjä, sillä mittausraportit voivat mennä sekaisin.

Käyttöliittymän päivitykseen tulee kiinnittää huomiota, sillä tarvittavat korjaukset tulee saattaa päätökseen ennen automaattisen testausjärjestelmän tuotantokäyttöönottoa. Käyttöliittymän päivityksiä ei ehditty testaaman tämän diplomityöprojektin aikana ja testausvastuu siirtyy Dynaset Oy:lle.

## 5.5 Tilavuusvirran ohjaus ja säätö 2/2-suuntaproportionaaliventtiilillä

### MITTAUSMENETELMÄ

Tilavuusvirran säädön toiminta verifioitiin säätämällä pumpulta tulevaa tilavuusvirtaa testialgoritmi välilehdellä määritettyjen tilavuusvirtatasojen mukaan ja vertaamalla saavutettua tilavuusvirtaa haluttuun tilavuusvirtaan. Säädön toiminta testattiin muokatussa hydraulikoneikossa säätämällä 2/2-suuntaproportionaaliventtilin avauksella hydraulipumpun vinolevyn kulmaa ja siten tilavuusvirtaa. Tilavuusvirran säätöön käytettiin PI-säädintä, jonka kertoimet määriteltiin konfigurointiohjelman ohjauksetvälilehdellä. PI-säädin aktivoitiin testialgoritmi välilehdellä laittamalla AO\_2\_fb sarakkeeseen arvo 1, kun säätimen haluttiin olevan toiminnassa. PI-säätimen takaisinkytkentä otettiin tilavuusvirta-anturilta ja ohjearvon sekä mittausarvon erosuureen perusteella säädettiin 2/2-suuntaproportionaaliventtiilin avausta säädinparametrien mukaan. Testin jälkeen verrattiin CSV-tiedostoon tallennettuja mitattua ja haluttua tilavuusvirtaa toisiinsa sekä voitiin tarkastella säätimen ulostuloa ja järjestelmän painetta.

Säätimen nopeudelle ja tarkkuudelle ei ollut asetettu projektin alussa mitään varsinaisia vaatimuksia vaan säätimen sekä testausjärjestelmän käytännötoiminta tuli todentaa ja

osoittaa, että testausjärjestelmä soveltuu sellaisenaan Dynaset Oy:n tuotteiden automaattiseen koekäyttöön. Testausjärjestelmän toiminta todennettiin automatisoimalla korkeapainevesipumpun koekäyttö, mutta näiden mittaustulosten julkaisemiselle ei saatu lupaa Dynaset Oy:stä. Korkeapainevesipumpun sijasta öljyä pumpattiin osittain suljetun pallohanan läpi määriteltyjen tilavuusvirta-asteiden mukaisesti ja tästä testistä otettiin mittaustulokset tähän diplomityöhön.

Hydraulikoneikolla pumpattiin taulukon 5 mukaiset tilavuusvirtatasot. Tilavuusvirran säätö tehdään varsinaisesti säätöpisteissä 3 – 7 ja pisteet 1, 2 ja 8 ovat vain testin suorittamiseen käytettyjä apupisteitä.

**Taulukko 5.** *Tilavuusvirran säädössä käytetyt tilavuusvirtatasot.*

Säätöpiste	Tilavuusvirta [L/min]
1.	0
2.	20
3.	40
4.	60
5.	80
6.	60
7.	40
8.	0

Taulukon mukaan tilavuusvirta ohjattiin aluksi arvoon 20 L/min, jonka jälkeen aloitettiin varsinainen säätö arvoon 40 L/min. Tämän jälkeen säätöä jatkettiin askelmaisesti säätäen tilavuusvirta arvoihin 60 L/min, 80 L/min ja takaisin arvoon 40 L/min. Lopuksi tilavuusvirta ohjattiin arvoon 0 L/min.

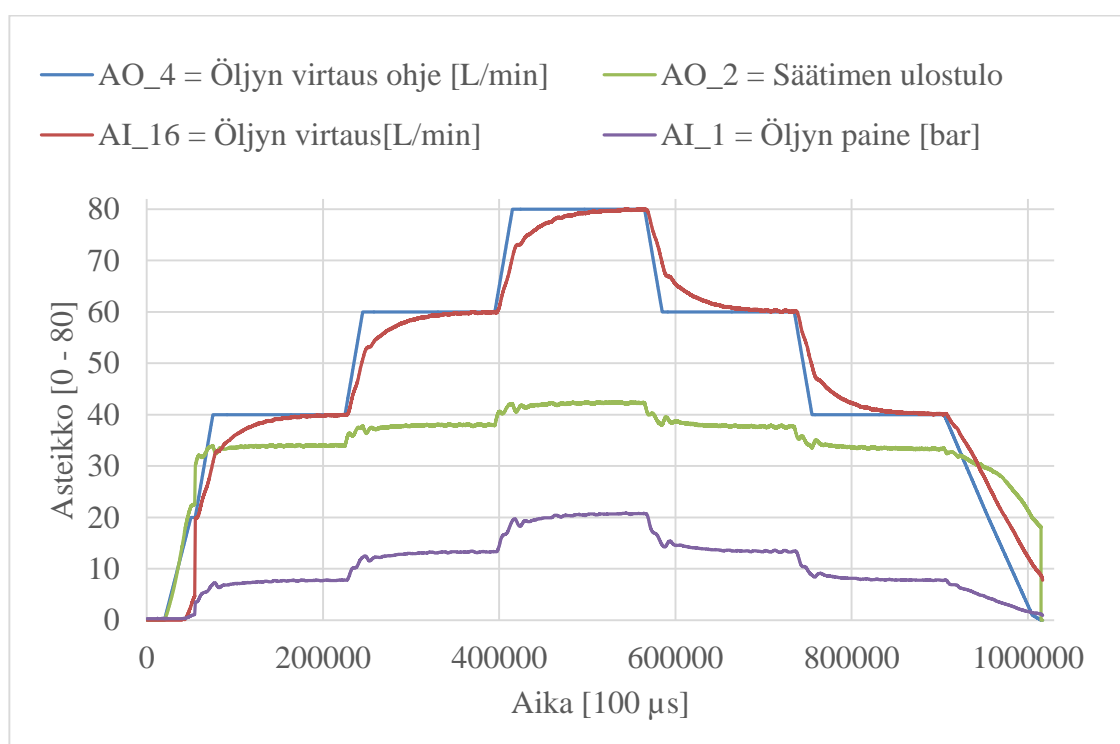
Mittauksiin käytettiin wika A10 paineanturia (0 – 400 bar) sekä Kracht VC 3 F1 PS tilavuusvirta-anturia (0 – 160 L/min). Tilavuusvirran säätöön käytettiin HydraForce SP-16-20 2/2-suuntaproportioaaliventiliä. Paineanturi oli kytketty analogiamittauskanavaan (AI\_1), tilavuusvirta-anturi pulssikanavaan (AI\_16, 2 pulssikanava) ja 2/2-suuntaproportioaalili oli kytketty analogiaohjauskanavaan (AO\_2). Käytetty mittaustaajuus oli 100 Hz.

Mittauksissa käytetyt rekursiivisuodattimen kertoimet olivat paineanturilla 0,001 ja tilavuusvirta-anturilla 0,01 (näiden käytöstä on kerrottu luvussa 4.3.1). Suodatusarvot jäivät epähuomiossa näinkin isoiksi, kun tilavuusvirran säätömitaukset suoritettiin paineen säätömittausten jälkeen. Paine on luonteeltaan pulssimainen sekä värähtelevä ja paineen säädössä jouduttiin käyttämään suurta suodatusta, ettei säädin ala värähtelemään. Pienemmillä suodatusarvoilla paineenkuvaajaan tulisi isompia painepiikkejä ja tilavuusvirrankuvaaja värähtelisi hieman enemmän. Mittaustulokset antavat siis oikeat tulokset (keskiarvon), joista on leikattu isommat piikit pois.

Tilavuusvirran säädön testitulokset on esitetty kuvissa 55 ja 56. Kuvassa 55 näkyy saavutettu ja haluttu tilavuusvirta, säätimen ulostulo sekä paine. Kuvassa 56 näkyy halutun ja saavutetun tilavuusvirran välisen virheen itseisarvo.

## TULOKSET

Kuvassa 55 on esitetty tilavuusvirran ohjearvo sekä mitattu arvo, öljyn paine ennen pallohanaa ja säätimen varsinainen ulostulo, joka menee ohjausviestinä tiedonkeruukortilta 2/2-suuntaproportionaaliventtiilin ohjainkortille. Säätimen ulostulon skaalaus on PLC:n ohjaukskoodista ja esitystavasta johtuen vain suuntaa antava tässä kuvassa ja kuvasta ei voi päätellä varsinaista säätimeltä ulostulevaa ohjausviestiä insinööriyksiköissä eikä milliampeereissa. Kuvaajasta tosin näkee, milloin säädin säätää 2/2-suuntaproportionaaliventtiilin karan asemaa.



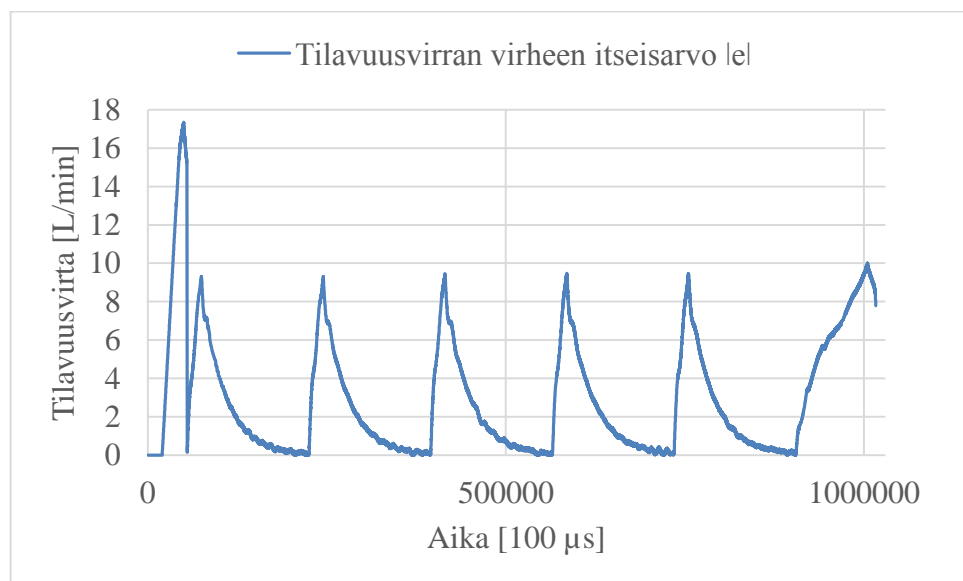
**Kuva 55.** Tilavuusvirran säätömittauksesta mitatut öljyn virtauksen ohjearvo, säätimen ulostulo, mitattu öljyn virtauksen oloarvo ja öljyn paine.

X-akselilla on ilmoitettu aika yksikössä  $100 \mu\text{s}$  ja y-akselin asteikko on välillä 0 – 82. Käyrien arvot luetaan y-akselilta ja kunkin signaalin yksikön voi tarkastaa otsikkotaulussa olevien signaalien nimistä. Tilavuusvirran ohjearvo saavutetaan todella tarkasti, mutta melko hitaasti. PI-säätimen ulostulon havaitaan hieman värähtelevän, kun mitta-arvo on lähes saavuttanut ohjearvon. Värähtely havaitaan myös tilavuusvirrassa, mutta amplitudiltaan pienempänä. Paineen havaitaan myös värähtelevän siirryttäessä tilavuusvirta-tasolta toiselle. Tämä paineen värähtely johtuu säätimen ulostulon värähtelystä tila-

vuusvirtaa säädettäessä. Paineenkuvaajasta on suodatuksen myötä leikkautunut painepiikit pois, joten kuvaajan muoto ei ole aivan todellinen, mutta suodatus auttaa myös havaitsemaan paineen keskimääräisen arvon paremmin.

Tässä vaiheessa PI(D)-säätimeen ei ollut vielä tehty lukitustoimintoa, joka estäisi säätimen värähtelyn aiheuttaman mittausvirheen tuloksissa. Säätimen lukitustoiminto lukitsee säätimen ulostuloarvon tietyksi arvoksi, kun ohjearvo on saavutettu askeleen lopussa. Tällöin proportionaaliventtiilin kara pysyy paikallaan eikä säätimen ominaisuudet siten aiheuta mittausvirhettä tuloksiin. Tilavuusvirtatason muutoksen havaitaan näkyvän melko pienenä muutoksena säätimen ulostulossa, jolloin pienillä ohjearvon muutoksilla tapahtuu melko suuri tilavuusvirran muutos. Tilavuusvirran suuri muutos ohjauksien pienellä muutoksella johtuu venttiilin ominaisuuksista, jotka havaitaan liitteessä G esitetystä venttiilin ominaiskäyrästä. Ominaiskäyrästä havaitaan, että 11 bar paine-erolla venttiilin läpäisy kasvaa loivemmin välillä 0 – 18 L/min (ohjaus 0 – 60 %) ja jyrkemmin välillä 18 – 98 L/min (ohjaus 60 – 100 %).

Kuvassa 56 on esitetty tilavuusvirtavirheen itseisarvo mittausten aikana. Tilavuusvirran virhe laskettiin vähentämällä ohjearvosta toteutunut mittausarvo ja tästä otettiin itseisarvo.



**Kuva 56.** Tilavuusvirtavirheen itseisarvo säätömittausten aikana.

Tilavuusvirtavirheen aallon harja syntyy tilavuusvirran ohjearvon muuttuessa äkillisesti tilavuusvirta-askeleesta seuraavan. Ohjearvon muutoksen jälkeen PID-säädin säätää venttiilin avausta siten että ohjearvo saavutetaan. Kuvasta havaitaan, että tilavuusvirtavirheen itseisarvon maksimivirhe on 9,46 L/min ja se esiintyy säätöpisteessä 5. Tällöin aikaa on kulunut 75,5 s (6. aallonharja vasemmalta laskettaessa). Säätöpisteet 1, 2 ja 8 eivät kuuluneet varsinaiseen tilavuusvirran säätöön, joten ne jätetään huomioimatta.

Järjestelmälle laskettiin säätötarkkuuden itseisarvo ja säätöaika eri mittauspisteissä erikseen, jonka jälkeen arvoista laskettiin keskimääräiset arvot säätötarkkuudelle ja säätöajalle. Säätötarkkuudet ja säätöajat eri mittauspisteissä on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6.** Tilavuusvirran säätötarkkuudet ja säätöajat.

Tilavuusvirtataso	Tilavuusvirta [L/min]	Säätötarkkuus (keskiarvo) [L/min]	Säätöaika [s]
1.	0	-	-
2.	20	-	-
3.	40	0,096	6,968
4.	60	0,109	5,565
5.	80	0,084	4,636
6.	60	0,124	5,625
7.	40	<b>0,131</b>	<b>7,121</b>
8.	0	-	-

Säätöaika laskettiin ohjauksen muutoshetkestä siihen hetkeen kun asetusarvo oli saavutettu  $\pm 5$  % tarkkuudella. Näin tehtiin jokaiselle mittauspisteelle (3 - 7) ja näistä mittauspisteiden säätöajoista laskettiin keskimääräinen säätöaika koko mittaukselle. Maksimisäätöajaksi saatiin 80,6 s - 73,5 s = 7,1 s (mittauspiste 7) ja **keskimääräiseksi säätöajaksi** laskettiin säätöaikojen keskiarvosta **6,0 s**. Eri tilavuusvirtatasojen säätöajoista laskettua keskiarvoa voidaan pitää edustavana arvona järjestelmän säätönopeudelle, kun tilavuusvirtatasojen välinen hyppy on noin 20 L/min. Säätöaika riippuu paljon siitä miten se lasketaan ja nyt päädyttiin käyttämään rajahtona kirjallisuudessa myös monesti käytettyä  $\pm 5$  % säätötarkkuutta. Esimerkiksi  $\pm 2$  % säätötarkkuudella mittauspisteessä 7 saadaan säätönopeudeksi 83,5 s - 73,5 s = 10,0 s. Tällöin ollaan jo hyvällä tarkkuusalueella, mutta säätöaika on melko suuri.

Säätötarkkuus laskettiin kunkin mittauspisteen lopussa keskiarvona mitatuista arvoista. Keskiarvo otettiin kunkin askeleen viimeisen 1 sekunnin ajalta. Mitatuista ja lasketuista tilavuusvirtavirheen itseisarvoista laskettiin keskiarvo sekunnin ajalta ja nämä arvot on listattu säätötarkkuus-sarakkeeseen. Säätötarkkuus oli huonoimmillaan  $\pm 0,13$  L/min ja **keskimääräiseksi säätötarkkuudeksi** laskettiin säätötarkkuuksien keskiarvosta  $\pm$  **0,11 L/min**.

Säädön nopeuteen ja stabiiliuteen vaikuttivat konfigurointiohjelman ohjausvälilehdellä asetetut säätöparametrit. Nämä säätöparametrit haettiin käytännön testien myötä arvoihin  $k_p = 1,2$ ,  $T_i = 3$  ja  $T_d = 0$ . Näitä kertoimia ei lähdetty optimoimaan minkään säätimen säätöohjeen, kuten Ziechlers-Nicholsin säätöteorian, mukaan. Myös integroidun neliövirheen menetelmää (*engl. minimum Integral Square Error, ISE*) olisi voinut käyttää, jolloin integroidulle virheen neliölle haetaan pienintä arvoa säädön kestoajalta. Säädintä ei lähdetty optimoimaan sen tarkemmin, koska jokaiselle laitteelle täytyy määrittää kertoimet kuitenkin erikseen ja tämä ei kuulunut työn varsinaiseen päämäärään. Säätöparametreja

säätämällä voisi siis saada vielä parempia tuloksia aikaiseksi, mutta suhteellista vahvistusta (kp) nostettaessa järjestelmä alkoi värähtelemään hallitsemattomasti ja siten päädyttiin valittuihin säädinparametreihin.

Tulosten perusteella havaittiin, että tilavuusvirta saavutetaan tarkasti (keskimäärin  $\pm 0,11$  L/min tarkkuudella), mutta hieman hitaasti (keksimäärin 6,0 s). Järjestelmä on siten säätönopeudeltaan hieman hidas, mutta tähän sovellukseen käypä, sillä järjestelmältä ei edellytetäkään äärimmäistä säätönopeutta vaan hyvää säätötarkkuutta koekäytön luonteen vuoksi. Tilavuusvirran havaittiin hieman värähtelevän lähellä säätöpistettä, mikä johtuu säätimen ulostulon värähtelystä. Säätimen vaikutus mittaustuloksiin voidaan poistaa tekemällä säätimeen lukitusominaisuus, joka lukitsee säätimen ulostulon tietyn askeleen lopussa. Näin venttiilin avaus ja tilavuusvirta ovat lähes vakiot, jolloin mitataan suoraan laitteen ominaisuuksia (mäntäpumpun ulostulo on toki hieman sykkivää). Säätimen lukitustoimintoa ei ehditty testaamaan, koska sen teko oli vielä kesken diplomityöprojektin loppuessa. **Säätimen lukituksen toiminta tulee varmistaa** ennen laitteiden koekäyttöä.

Istukkatyyppistä 2/2-suuntaapropotionaaliventtiilillä päästiin yllättävän hyvään tarkkuuteen ja säätönopeus oli riittävä. Haluttaessa parempaa säädettävyyttä, tarkkuutta ja nopeutta tulee siirtyä 2/2-suuntaapropotionaaliventtiileihin karan asemamittauksella (servopropotionaaliventtiili). Tällöin venttiilistä tulee niin sanotusti jäykempi ja ulkoisten häiriöiden, kuten virtausvoimien, hystereesin ja karan kulumisen vaikutus karan asemaan saadaan eliminoitua [14, s. 333]. Lisäksi karan asematakaisinkytketyn 2-tievirransasäätöventtiilin käyttämistä voidaan pohtia tilavuusvirran säätämiseen.

Testausjärjestelmää voidaan käyttää myös ohjausjärjestelmänä säätöjärjestelmän sijasta kytkemällä PID-säädin pois päältä, mutta tällöin tilavuusvirran mittausrvo poikkeaa merkittävästi halutusta arvosta. Tämä johtuu venttiilin ominaiskäyrästä, sillä tilavuusvirta venttiilin läpi ei kasva lineaarisesti venttiilin kelan ohjausvirran kasvaessa, kun paine-ero venttiilin yli pidetään vakiona. Tällöin pienellä ohjausvirtatasolla tehty tietyn suuruinen ohjausvirran kasvatus tuottaa pienemmän kasvun tilavuusvirrassa, kun suurilla ohjausvirtatasoilla tehty yhtä suuri ohjausvirran kasvatus (havaittavissa liitteenä olevasta venttiilin ominaiskäyrästä). Näin ollen haluttua tilavuusvirtaa on vaikea ennalta määrittää. Progressiivisesti kasvava ominaiskäyrä olisi voitu saavuttaa luistityyppisellä propotionaaliventtiilillä, jonka karan ohjausreunoissa on V:n muotoiset viisteet. Järjestelmään ei kuitenkaan haluttu pohjalaatta-asenteista cetop venttiiliä vaan putkistoasenteinen lohko, jossa on patruunaventtiili tyyppinen suuntaapropotionaaliventtiili.

Lisäksi tietyissä testausolosuhteissa määritetty ohjausrvo tuottaa arvoltaan erisuuruisen tilavuusvirran erilaisissa olosuhteissa. Tilavuusvirran muutokseen vaikuttavista olosuhteiden muutoksesta voidaan pitää öljyn lämpötilan muutoksen vaikutusta öljyn viskositeettiin ja siten suoraan tilavuusvirtaan. Toisin sanoen testausjärjestelmän käyttö ohjausjärjestelmänä tilavuusvirran ohjaukseen on melko haastavaa.

## 5.6 Paineen ohjaus ja säätö paineenrajoitusproportionaaliventtiilillä

### MITTAUSMENETELMÄ

Paineen säädön toimivuus testattiin muokatussa hydraulikoneikossa paineenrajoitusproportionaaliventtiin avautumispaineen asetusarvoa säätämällä. Asetusarvoa säätämällä säädettiin paineenrajoitusproportionaaliventtiin avautumispainetta ja siten järjestelmän painetasoa. Testissä ajettiin konfigurointiohjelman testialgoritmivälilehdellä määritellyt painetasot. Öljyä pumpattiin lähes suljetun pallohanan läpi, jolloin paineen oli mahdollista nousta koekäytössä vaaditulle tasolle. Testin jälkeen verrattiin CSV-tiedostoon tallennettuja paineen ohjearvoa ja mittausarvoa toisiinsa sekä voitiin tarkastella säätimen ulostuloa ja tilavuusvirtaa.

Paineen säätöön käytettiin PI-säädintä, jonka kertoimet määriteltiin konfigurointiohjelman ohjauksetvälilehdellä. PI-säädin aktivoitiin testialgoritmivälilehdellä laittamalla AO\_1\_fb sarakkeeseen arvo 1, kun säätimen haluttiin olevan toiminnassa. PI-säätimen takaisinkytkentä otettiin Wika A10 0 – 400 bar paineanturilta ja ohjearvon sekä mittausarvon erosuureen perusteella säädettiin paineenrajoitusproportionaaliventtiin avautumispaineen asetusarvoa säädinparametrien mukaan.

Säätimen nopeudelle ja tarkkuudelle ei ollut asetettu projektin alussa mitään varsinaisia vaatimuksia vaan säätimen sekä testausjärjestelmän käytännön toiminta tuli todentaa ja osoittaa, että testausjärjestelmä soveltuu sellaisenaan Dynaset Oy:n tuotteiden automaattiseen koekäyttöön. Paineen säätöä ei juurikaan tarvita koekäytöissä, sillä paineenrajoitusproportionaaliventtiiliä käytetään lähinnä koekäytön maksimipaineen asetukseen eli koekäytön alkaessa asetusarvo asetetaan esimerkiksi 200 bar ja tämä raja-arvo toimii hätärajana, jolloin laitteet eivät hajoa ylisuuren paineen takia. Paineen säätöä voidaan kuitenkin käyttää esimerkiksi kuristimen ominaiskäyrän mittaamiseen, joten paineen säädön toiminta testattiin myös.

Hydraulikoneikolla ajettiin taulukon 7 mukaiset painetasot. Paineen säätö tehdään varsinaisesti säätöpisteissä 3 – 7 ja pisteet 1, 2, 8 ja 9 ovat vain testin suorittamiseen käytettyjä apupisteitä.



**Taulukko 7.** *Paineensäädössä käytetyt painetasot.*

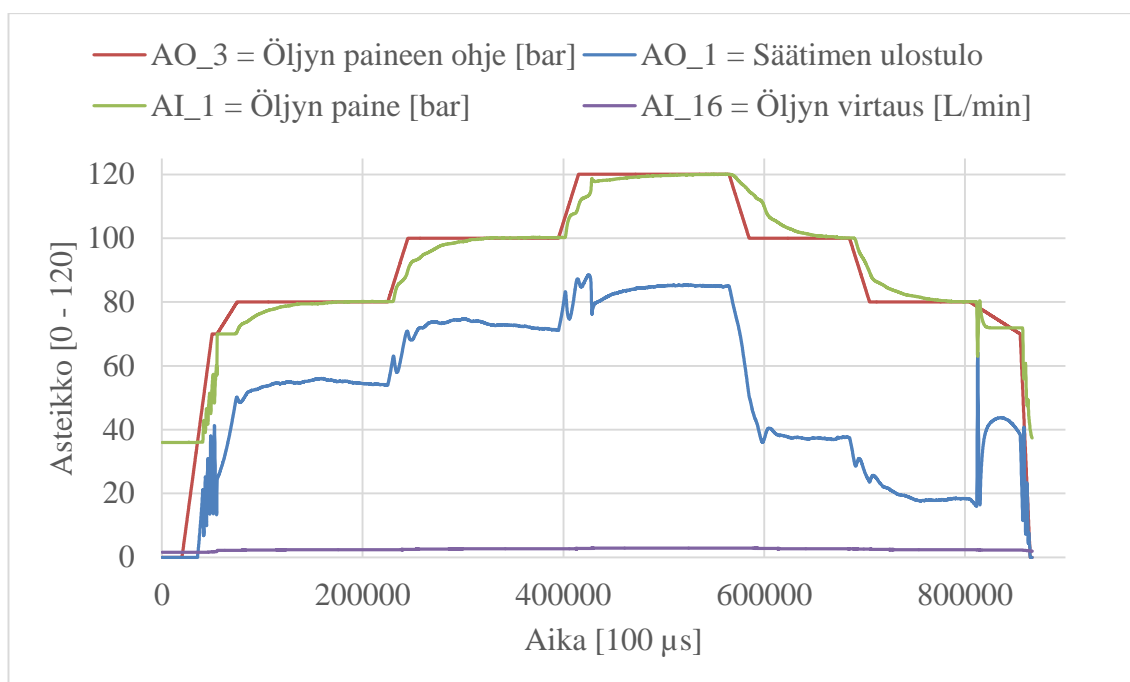
Säätöpiste	Painetaso [bar]
1.	0
2.	70
3.	80
4.	100
5.	120
6.	100
7.	80
8.	70
9.	0

Mittauksiin käytettiin wika A10 paineanturia (0 – 400 bar) sekä Kracht VC 3 F1 PS tilavuusvirta-anturia (0 – 160 L/min). Ohjauslaitteena oli Bosch Rexroth DBETX 0 – 315 bar paineenrajoitusproportionaaliventtiili. Paineanturi oli kytketty analogiamittauskanavaan (AI\_1), tilavuusvirta-anturi pulssikanavaan (AI\_16, 2 pulssikanava) ja paineerajoitusproportionaaliventtiili analogiaohjauskanavaan AO\_1. Käytetty mittaustaajuus oli 100 Hz.

Mittauksissa käytetyt rekursiivisen suodattimen kertoimet olivat paineanturilla 0,001 ja tilavuusvirta-anturilla 0,01. Suodatusarvot valittiin tarkoituksella näinkin isoiksi painesäädön takia, koska paine on luonnostaan melko värähtelevää, niin paineen säätö on siten hankalaa. Ilman suodattamista myös säädin alkaa värähtelemään painepiikkien mukaan ja säätö ei onnistu. Pienemmillä suodatusarvoilla paineenkuvaajaan tulisi korkeampia painepiikkejä.

## TULOKSET

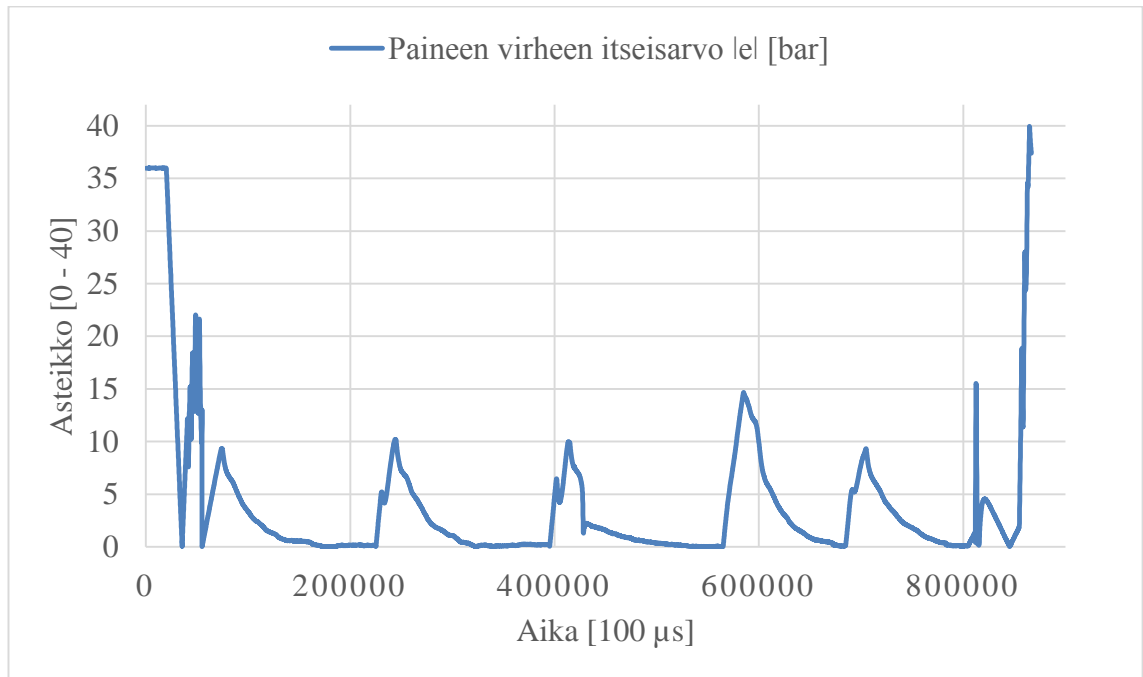
Kuvassa 57 on esitetty paineen ohjearvo sekä mitattu arvo, öljyn virtaus ja säätimen ulostulo, joka menee ohjausviestinä tiedonkeruukortilta paineenrajoitusproportionaaliventtiilin vahvistinkortille. Säätimen ulostulon skaalaus on PLC:n ohjauskoodista ja esitystavasta johtuen vain suuntaa antava tässä kuvassa ja kuvasta ei voi päätellä varsinaista säätimeltä ulostulevaa ohjausviestiä insinööriyksiköissä eikä milliampeereissa. Kuvaajasta tosin näkee, milloin säädin säätää paineenrajoitusproportionaaliventtiilin asetusarvoa.



**Kuva 57.** Paineen säätömittauksesta mitatut öljyn paineen ohjearvo, säätimen ulostulo, mitattu öljyn paine ja öljyn tilavuusvirta.

X-akselilla on ilmoitettu aika yksikössä  $100 \mu\text{s}$  ( $200\,000 \times 100 \mu\text{s} = 20 \text{ s}$ ) ja y-akselin asteikko on välillä 0 – 120. Käyrien arvot luetaan y-akselilta ja kunkin signaalin yksikön voi tarkastaa otsikkotaulussa olevista signaalien nimistä. Kuvasta havaitaan, että paineen ohjearvo saavutetaan tarkasti. PI-säätimen ulostulon havaitaan aaltoilevan melko paljon, kun säätö aloitetaan siirtymällä arvosta 70 bar arvoon 80 bar. Tämä aaltoilu havaitaan myös paineessa, mutta pienempänä amplitudina (johtuu osittain suodatuksesta). Tässä vaiheessa PI(D)-säätimeen ei ollut vielä tehty lukitustoimintoa, joka estäisi säätimen toiminnan aiheuttaman mittausvirheen tuloksissa. Lukitustoiminnossa säätimen ulostulo on lukittu ja proportionaaliventtiin kara pysyy paikallaan eikä säätimen ominaisuudet siten aiheuta mittausvirhettä tuloksiin. **Säätimen lukitustoiminto tulee testata** ennen testaajärjestelmän käyttöönottoa. Mittausten aikana tilavuusvirta on alle 5 L/min ja se näyttää melko tasaiselta (johtunee osittain myös suodatuksesta), mutta matalan tason perusteella tilavuusvirran vaihtelusta ei voi tarkasti sanoa mitään.

Kuvassa 58 on esitetty paineen virheen itseisarvo mittausten aikana. Paineen virheen itseisarvo laskettiin vähentämällä ohjearvosta mittaussarvo.



**Kuva 58.** Paineen virheen itseisarvo säätömittausten aikana.

X-akselilla on ilmoitettu aika yksikössä  $100 \mu\text{s}$  ( $200\,000 \times 100 \mu\text{s} = 20 \text{ s}$ ) ja y-akselin asteikko on välillä  $0 - 40 \text{ bar}$ . Kuvasta havaitaan paineen virheen aaltomainen muoto. Paineen virheen aallon harja syntyy paineen ohjearvon muuttuessa äkillisesti painetasosta seuraavaan painetasoon. Ohjearvon muutoksen jälkeen PID-säädin säätää paineenrajoitusproportionaaliventtiin asetusrvoa siten että ohjearvo saavutetaan. Paineensäätö suoritettiin varsinaisesti säätöpisteissä 3 – 7 eli kolmannesta aallon harjasta seitsemänteen aallon harjaan. Siten 2 ensimmäistä ja 2 viimeistä aallon harjaa eivät kuuluneet varsinaiseen mittaukseen ja niistä ei tarvitse välittää. Paineen säätö arvosta 70 bar arvoon 80 bar alkaa noin 5 sekunnin kohdalta, kun säätövirhe alkaa nousemaan jyrkästi arvoon 10 bar ja noin ajan hetkellä 15 sekuntia ollaan lähes 0 bar säätövirheessä. Kuvasta havaitaan, että paineen säädön itseisarvon maksimivirhe on 14,69 bar ja se esiintyy säätöpisteessä 6. Tällöin aikaa on kulunut 58,50 s (6. aallonharja vasemmalta laskettaessa).

Järjestelmälle laskettiin paineen säädön staattinen säätötarkkuus itseisarvona ja säätöaika eri mittauspisteissä erikseen ja sitten näistä muodostettiin keskimääräiset arvot paineen säätötarkkuudelle ja säätöajalle. Lasketut säätötarkkuudet ja säätöajat eri mittauspisteissä on esitetty taulukossa 8.

**Taulukko 8.** Paineen säädön säätötarkkuus ja säätöaika eri mittauspisteissä.

Mittauspiste	Painetaso [bar]	Säätötarkkuus (keskiarvo) [bar]	Säätöaika [s] (5 % säätötarkkuus)
1.	0	-	-
2.	70	-	-
3.	80	0,142	4,012
4.	100	0,206	3,663
5.	120	0,032	3,142
6.	100	0,101	4,840
7.	80	0,094	4,115
8.	70	-	-
9.	0	-	-

Paineen säätöaika laskettiin ohjauksen muutoshetkestä siihen hetkeen, kun säätö oli saavutettu 5 % tarkkuudella. Maksimisäätöajaksi saatiin 61,3 s - 56,5 s = 4,8 s ja **keskimääräiseksi säätöajaksi** laskettiin säätöaikojen keskiarvosta **4,0 s**. Eri painetasojen säätöajoista laskettua keskiarvoa voidaan pitää edustavana arvona järjestelmän säätönopeudelle, kun painetasojen välinen ero on noin 20 bar. Säätöaika riippuu paljon siitä miten se lasketaan ja nyt päädyttiin käyttämään rajaehtona kirjallisuudessa myös monesti käytettyä  $\pm 5$  % säätötarkkuutta. Esimerkiksi  $\pm 2$  % säätötarkkuudella säätöpisteessä 6 saadaan säätönopeudeksi 63,3 s - 56,5 s = 6,8 s. Tällöin ollaan jo hyvällä tarkkuusalueella, mutta säätöaika on suurempi verrattuna 5 % säätötarkkuudella laskettuun säätöaikaan.

Säätötarkkuus laskettiin kunkin mittauspisteen lopussa keskiarvona mitatuista arvoista. Keskiarvo otettiin kunkin askeleen viimeisen 1 sekunnin ajalta. Lasketut säätötarkkuusarvot on listattu säätötarkkuus-sarakkeeseen. Maksimisäätövirheeksi laskettiin  $\pm 0,21$  bar ja **keskimääräiseksi säätötarkkuudeksi** laskettiin säätötarkkuuksien keskiarvosta  **$\pm 0,11$  bar**. Suoraanohjatulla paineenrajoitusproportionaaliventtiilillä päästiin yllättävän hyvään staattiseen tarkkuuteen ja säätönopeus oli käyttötarkoitukseen nähden riittävä.

Säädön nopeuteen ja stabiiliuteen vaikuttivat konfigurointiohjelman ohjausvälilehdellä asetetut säätöparametrit. Nämä säätöparametrit haettiin paineen säädölle erikseen ja arvoiksi asetettiin käytännön testien myötä  $k_p = 2,8$ ;  $T_i = 2$  ja  $T_d = 0$ . Näitä kertoimia ei lähdetty optimoimaan minkään tarkan säätimen säätöohjeen, kuten Ziechler-Nicholsin säätöteorian mukaan. Myös integroidun neliövirheen menetelmää (engl. minimum Integral Square Error, ISE) olisi voinut käyttää, jossa haetaan integroidulle virheen neliölle pienintä arvoa säädön kestoajalta. Säädintä ei lähdetty optimoimaan sen tarkemmin, koska jokaiselle laitteelle täytyy nämä kertoimet erikseen määrittää kuitenkin ja tämä ei kuulunut työn varsinaiseen päämäärään. Säätöparametreja säätämällä voisi siis saada vielä parempia tuloksia aikaiseksi, mutta suhteellista vahvistusta ( $k_p$ ), kun lähti nostamaan, niin järjestelmä alkoi värähtelemään hallitsemattomasti ja siten päädyttiin valittuihin säädinparametreihin.

## 5.7 Pallohanan testimittaukset

Automaattisella testausjärjestelmällä tehtiin esimerkinomainen testimittaus, jossa testattavana laitteena oli pallohana. Testimittauksen avulla käytiin läpi koko testausprosessi sekä järjestelmän toiminta. Käydään tässä yleisellä tasolla läpi tämä koejaprosessi ja sen vaiheet sekä laitteen testauksesta tulevat raportit ja tulokset.

Testattavana laitteena ollut pallohana oli kytketty hydraulikoneikon painelinjan sekä tankkilinjan väliin ja pallohanan etupuolelle oli asennettu paineanturi. Hydraulikoneikolla koeajettiin taulukon 9 mukaiset tilavuusvirtatasot. Tilavuusvirran säätö tehdään varsinaisesti säätöpisteissä 3 – 6 ja pisteet 1, 2 ja 8 ovat vain testin suorittamiseen käytettyjä apupisteitä.

**Taulukko 9.** Pallohanan testaukseen käytettävät tilavuusvirtatasot.

Säätöpiste	Tilavuusvirta [L/min]
1.	0
2.	10
3.	16
4.	23
5.	29
6.	32
7.	10
8.	0

Taulukon mukaan tilavuusvirran ohjattiin aluksi arvoon 10 L/min, jonka jälkeen aloitettiin varsinainen säätö arvoon 16 L/min. Tämän jälkeen säätöä jatkettiin askelmaisesti säätäen tilavuusvirta arvoihin 23 L/min, 29 L/min ja arvoon 32 L/min. Lopuksi tilavuusvirta ohjattiin arvoon 0 L/min.

Testimittauksen antureina käytettiin Wika A10 0 – 400 bar paineanturia (AI\_1) ja Kracht VC3 F1 PS 0 – 160 L/min tilavuusvirta-anturia. Ohjauslaitteena oli HydraForce 2/2-suuntaproportionaaliventtiili (AO\_2). Mittaustulosten tallentamiseen käytetty mittaustaaajuus oli 100 Hz.

## KOEKÄYTTÖPROSESSIN KONFIGUROINTI

Ennen laitteen koekäyttöä täytyy suunnittelijan tehdä testattavalle laitteelle koekäyttöprosessin konfigurointitiedosto, joka määrittelee miten laitteen koekäyttö tapahtuu ja mitä tietoja koekäytöstä tallennetaan sähköiseen mittausraporttiin. Konfigurointiohjelmalla tehdyn konfigurointitiedoston määrittelystä on kerrottu tarkemmin luvussa 4.3.1.

Konfigurointiohjelman ensimmäisellä välilehdellä määriteltiin yleiset parametrit kuten mittaustaaajuus. Käytetyt anturit, anturien turvarajat sekä signaalien rekursiivisuodatuksen painokertoimet määritellään sisäänmenot-välilehdellä. Käytetyt ohjauslaitteet sekä kulle-

kin kanavalle käytetyn PID-säätimen säädinparametrit määritellään ulostulot-välilehdellä. Varsinaisen koekäytön määrittely tapahtuu testialgoritmi-välilehdellä, jossa määritellään ohjauslaitteiden asetusarvot kullakin askeleella sekä askeleen pituudet millisekunteina. Testialgoritmi välilehdellä määritellään myös käytettyjen mittauskanavien laaturajat analogia- sekä digitaalikanaville ja määritellään millä askeleella halutaan käyttää PID-säädintä ohjauslaitteen säätämiseen asetusarvon mukaiseksi. Asetetut laaturajat on esitetty taulukossa 10.

**Taulukko 10.** *Pallohanan testimittauksessa asetetut laaturajat.*

Säätöpiste	Tilavuusvirta [L/min]	Tilavuusvirran laaturajat [L/min]
1.	0	-
2.	10	-
3.	16	14 – 18
4.	23	21 – 25
5.	29	27 – 31
6.	32	30 – 34
7.	10	-
8.	0	-

Kussakin säätöpisteessä tulee mitatun tilavuusvirran olla asetettujen laaturajojen sisällä. Jos esimerkiksi säätöpisteessä 3 mitattu tilavuusvirta onkin 13 L/min, niin varsinainen koekäyttö hylätään. Varsinaisissa säätöpisteissä on tilavuusvirralle asetettu  $\pm 2$  L/min laaturajat.

## KOEKÄYTÖN SUORITUS

Laitteen koekäyttö aloitetaan kytkemällä työohjeen mukaisesti tarvittavat hydrauliletkut, anturit sekä sähköjohdot antureille ja ohjauslaitteille. Tämän jälkeen käynnistetään hydraulikoneikko tyhjäkäynnille, valitaan hydraulikoneikon sähkökaapista automaattinen koekäyttömoodi ja ohjataan suuntaventtiili haluttuun asentoon. Testausjärjestelmän Inspector käyttöliittymä käynnistetään.

Toisessa vaiheessa luetaan laitteen QR-koodi sekä koekäyttäjän nimikyltistä viivaakodi. QR-koodin sisältämällä tuotekoodilla haetaan palvelimelta laitteen koekäyttöprosessin konfigurointitiedosto, joka tehttiin ennen koekäyttöä. Nimikyltin viivaakoodista tallennetaan koekäyttäjän nimi sähköiseen mittausraporttiin.

Kolmannessa vaiheessa käynnistetään laitteen koekäyttö Inspector käyttöliittymästä. Jos laitteelle tehdään alkusäätöjä odota-tilan aikana, niin näiden jälkeen koekäyttäjää painaa jatka-nappia, jolloin varsinainen koekäyttö alkaa.

Neljännessä vaiheessa laitteelle tehdään käyttöliittymässä esitetyt tarvittavat visuaaliset tarkastukset. Esimerkiksi pallohanan koekäytön yhteydessä voidaan vaatia tarkastamaan, että vuotaako hana tai toimiiko se jotenkin normaalista poikkeavasti.

Viidennessä vaiheessa tulostetaan koekäytöstä tallennettu sähköinen mittausraportti. Kuvassa 59 on esitetty pallohanan sähköinen mittausraportti. Pallohanan testimittaus on mennyt hyväksytysti läpi, koska säädetty tilavuusvirta oli sallituissa rajoissa ja koekäyttäjä on hyväksynyt visuaaliset tarkastukset. Mittausraportin yläosasta löytyy tiedoston nimi raakadata CSV-tiedostolle, jos koekäyttäjä (suunnittelija) haluaa tarkastella mittaus-tuloksia tarkemmin.

## 1. Perustiedot

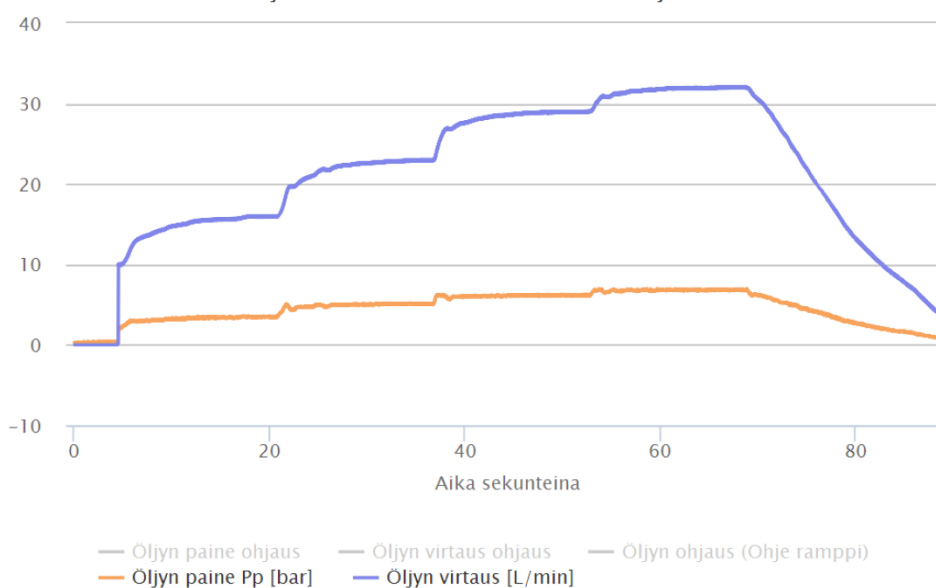
Testin ajankohta: 17:46 27.08.2015  
Viimeksi päivitetty: 17:49 27.08.2015

Testipenkki: Testipenkki 1		Pallohana	
Testaaja	Ari-Pekka Ketola	Tila	Hyväksytty
Sarjanumero	Virtaus säätö1	Reseptirevisio	rB
D-koodi	D33333333		
Datatieosto	Data_D333333333_rB_Virtaus säätö1_1_2015-08-27-17_47_50		
Reseptitiedosto	D333333333_rB	Mittaustaajuus	100Hz

## 2. Testiajomittaus

**HYVÄKSYTTY**

Tuote: D33333333 Sarjanumero: Virtaus säätö1 Tuotenimi: Pallohana Testin ajankohta: 27.08.2015 17:46



## 3. Tarkistuslista

Tarkistuskohde	Kommentti	Tila
Toimiiko säätö?	OK	Hyväksytty
Säätimen asetukset?	KP = 1,2 TI = 3 TD = 0	Hyväksytty
Lämpötila?	33 C	Hyväksytty

Powered by: **INSOLUTION**

**Kuva 59.** Pallohanan sähköinen mittausraportti.



Kuvassa 60 on esitetty pallohanan mittauksista tallennetun CSV-tiedoston alkua. CSV-tiedostoon on merkitty käytetyt mittauslaitteet ja mittayksiköt. Myös ohjauslaitteelle menevä säätimen ulostulo (AO\_2) ja säädettävän suureen haluttu asetusarvo (AO\_4) tallentuvat CSV-tiedostoon. Aika tallennetaan mikrosekunneina.

	A	B	C	D	E	F
1	Sensors					
2	AI_1 = Öljin paine Pp[[bar]], Wika A10, 0-400					
3	AI_16 = Öljin virtaus[[L/min]], Kracht VC3 F1 PS					
4	AO_2 = Öljin virtaus ohjaus[[L/min]],					
5	AO_4 = Öljin virtaus (Ohje ramppi)[[L/min]],					
6	Time unit: microseconds					
7	Time	AO_2	AO_4	AI_1	AI_16	
8	100	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
9	200	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
10	300	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
11	400	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
12	500	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
13	646	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
14	746	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
15	846	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
16	946	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
17	1046	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
18	1146	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
19	1246	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
20	1346	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
21	1446	1.00E-03	0	2.84E-01	0	
22	1598	1.00E-03	0	2.99E-01	0	
23	1698	1.00E-03	0	2.99E-01	0	

**Kuva 60.** Pallohanan testimittauksista tallennetun CSV-tiedoston alku.

Kuudennessa ja viimeisessä vaiheessa puretaan instrumentointi, jolloin anturit ja sähköjohdot irroitetaan. Tämän jälkeen laite on valmis pakattavaksi ja lähetettäväksi asiakkaalle.

## KOEKÄYTTÖPROSESSIN YHTEENVETO

Laitteen koekäyttö voidaan jakaa 6 päävaiheeseen:

1. **Aloitustoimenpiteet:** Laite kytketään testausjärjestelmään. Tällöin kytketään mm. hydrauliletkut, anturit sekä sähköjohdot antureille ja ohjauslaitteille. Käynnistetään hydraulikoneikko, asetetaan suuntaventtiili haluttuun asentoon ja avataan testausjärjestelmän käyttöliittymä.
2. **Luetaan laitteen QR-koodi sekä koekäyttäjän nimikortista viivakoodi**, jolloin saadaan koekäyttäjän nimi sähköiseen mittausraporttiin sekä ladataan laitteen koekäyttöprosessin konfigurointitiedosto palvelimelta.
3. Käynnistetään **varsinainen** koekäyttö ja tehdään **tarvittavat alkusäädöt**. Jatetaan koekäyttöä jatka-napilla.
4. Tehdään laitteelle käyttöliittymässä esitetyt **visuaaliset tarkastukset**.
5. Käyttöliittymä valmistaa laitteen koekäytöstä **sähköisen mittausraportin**, josta selviää, että hyväksyttiinkö laitteen koekäyttö. Mittausraportti voidaan tulostaa, jolloin se voidaan laittaa laitteen mukaan.
6. **Lopetustoimenpiteet:** puretaan instrumentoinnit.

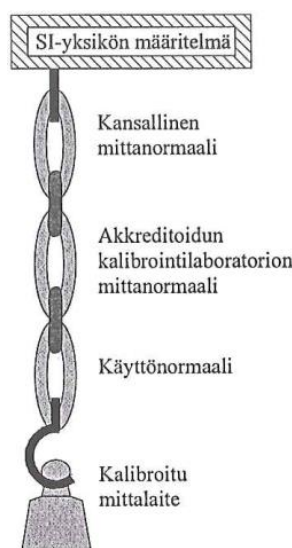
## 6. MITTAUSTULOSTEN LUOTETTAVUUDEN JA MITTAUSEPÄVARMUUDEN ANALYSOINTI

Automaattisen testausjärjestelmän tuloksia tarkasteltaessa on hyvä tietää millainen on kunkin mitattavan suureen mittausepävarmuus ja siten mittaustulosten luotettavuus. Mittausepävarmuuden perusteella voidaan päätellä missä rajoissa esimerkiksi tilavuusvirran sekä paineen mittaustulokset vaihtelevat. Kun tiedetään mittaustulosten mittausepävarmuus, niin eri laitteiden mittaustuloksia voidaan luotettavasti verrata toisiinsa.

Tässä luvussa käydään läpi mittaustulosten luotettavuuden ja mittausepävarmuuden analysointi. Luvussa 6.1 kerrotaan yleisesti mittausten luotettavuudesta ja epävarmuudesta. Luvussa 6.2 käydään läpi paineen mittauksen mittausepävarmuuden laskenta ja tulosten analysointi. Luvussa 6.3 käydään läpi tilavuusvirran mittauksen mittausepävarmuuden laskenta ja tulosten analysointi.

### 6.1 Luotettavuus ja epävarmuus mittauksissa

Eräs mittaustulosten luotettavuuden tärkeä edellytys on niiden jäljitettävyys. Mittaustulosten jäljitettävyydellä tarkoitetaan katkeamatonta kalibrointiketjua, jossa yksittäinen mittaaminen voidaan liittää korkeimman tason kansainvälisiin mittanormaaleihin [8, s. 149]. Jotta eri paikoissa tapahtuvat mittaukset ovat vertailukelpoisia, niiden on perustuttava näihin yleisesti hyväksytyihin kansainvälisiin mittanormaaleihin. Kuvassa 61 on esitetty katkeamaton kalibrointiketju, joka takaa mittausten jäljitettävyyden.



**Kuva 61.** Kalibrointiketju ja mittausten jäljitettävyys [8, s. 153].

Kuvasta havaitaan, että kalibrointiketju lähtee suureen mittayksikön määritelmästä, joka on määritelty kansainvälisessä mittayksikköjärjestelmässä (*System International, SI*). Mittayksikön määritelmä perustuu primaarinormaaleihin tai normaalimenetelmiin siitä riippuen, kummalla saadaan korkeampi metrologinen laatu. Primaarinormaalilla siirretään määritelty mittayksikkö alempiin mittanormaaleihin vertausmittausmenetelmällä, jota kutsutaan kalibroinniksi [3, s. 6]. Esimerkiksi 1 kg primaarinormaalia (vanhin kansainvälinen primaarinormaali, määritelmä vuodelta 1901) säilytetään Ranskassa Sevres:ssa sijaitsevassa laboratoriossa.

Kun mittauslaitetta kalibroidaan, sitä verrataan paikallisesti käytettyyn korkeamman tason käyttönormaaliiin. Tämän käyttönormaaliiin kalibrointi täytyy suorittaa yhtä tasoa korkeamman Akkreditoidun kalibrointilaboratorion mittanormaaliiin vertaamalla. Akkreditoidun kalibrointilaboratorion mittanormaali taas on kalibroitu yhtä tasoa korkeammalla kansallisen mittanormaalilaboratorion mittanormaaliiin vertaamalla. Lisäksi kansallisen mittanormaalilaboratorion mittanormaali on kalibroitu korkeimman tason kansainvälisellä primaarinormaalilla, jolloin sanotaan, että mittauksilla on jäljitettävyys. Käytännössä kansallinen mittanormaali kalibroidaan erikseen valmistetulla kansainvälisellä sekundäärinormaalilla, koska kansainvälistä primaarinormaalia on säilytettävä erittäin huolellisesti. Kansainvälistä primaarinormaalia siis käytetään hyvin vähän itse kalibrointiin. [3, s. 6; 8, s. 149–153].

Kansallisella mittanormaalilaboratorioilla tai Akkreditoiduilla kalibrointilaboratorioilla on oikeus antaa suorittamastaan kalibroinnista vastaavantasoinen kalibrointitodistus [8, s. 153]. Tällaisella virallisella todistuksella on suuri merkitys kansainvälisessä kaupankäynnissä, kun halutaan esimerkiksi osoittaa, että yrityksen laatujärjestelmä perustuu jäljitettäviin mittauksiin. Esimerkiksi tuotteelle haettava ISO-9000 sertifikaatti voi asettaa vaatimuksia mittaustulosten jäljitettävyydelle, mikäli ilmoitettavat suuret ovat tuotetta ostavan asiakkaan kannalta oleellisia. Sertifikaatin myötä mitattavan suureen mittausepävarmuus ja määritysperuste on aina ilmoitettava, mutta mitattavan suureen mittausepävarmuudelle ei aseteta mitään rajoja ja se on tuotteen valmistajan päätettävissä [3, s. 7].

Automaattisen testausjärjestelmän mittaustuloksia tarkasteltaessa täytyy muistaa, että mittaukseen sisältyy aina tietyn suuruinen mittausepävarmuus eli mittausvirhe. Mittaustulosten epävarmuudet täytyy määrittää, jotta tiedetään testausjärjestelmän mittaustuloksiin liittyvä epävarmuus sekä voidaan tehdä luotettavaa vertailua eri tuotteiden mittaustulosten välillä.

Mittausjärjestelmien mittausrvirheet voidaan jakaa mittausrvirheisiin, jotka syntyvät itse mittausrprosessin aikana ja siirtohäiriöihin, jotka syntyvät mittaussignaalin siirron ja käsittelyn aikana. Käsitellään tässä mittausrprosessin aikana syntyvät mittausrvirheet, sillä siirtohäiriöiden aiheuttamat mittausrvirheet on jo käsitelty aiemmin luvussa 2.4.7. Mittausrprosessin aikana syntyvät mittausrvirheet voidaan edelleen jakaa karkeisiin, systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin.

**Karkeat virheet** ovat mittaajan tekemiä inhimillisiä erehdyksiä tai mittauslaitteiston virhetoimintoja, jotka mitätöivät mittaustulokset [33, s. 7; 3, s. 23]. Karkeita virheitä voi aiheutua esimerkiksi väärin kirjatuista mittausarvoista tai tilavuusvirran mittauksen yhteydessä nesteessä olevista ilmakuplista. Mittaustulokset on hylättävä, jos on syytä epäillä karkeanvirheen vaikuttaneen mittauksiin.

Kun mittausta toistetaan, aiheuttavat **systemaattiset virheet** mitaustulokseen vakiona pysyvän virheen, jos olosuhteet pysyvät vakioina tai tietyn lain mukaan muuttuvan virheen, jos olosuhteet muuttuvat [6, s. 17; 33, s. 7–8]. Systemaattisten virheiden lähteitä itse anturin lisäksi ovat mittausmenetelmä, mitaaja sekä ympäristön olosuhteiden muutokset. Anturin tuottamia systemaattisia virheitä aiheuttavat luvussa 2.2.6 kerrotut anturin ominaisuuksista johtuvat luontaiset virheet, kuten staattinentarkkuus, toistotarkkuus, resoluutio, hystereesi, herkkyuden virhe sekä nollapisteen virhe. Nämä anturin aiheuttamat virheet on ilmoitettu valmistajan datalehdessä yleensä prosentteina täydestä näyttämästä (*engl. FSO*). Muita esimerkkejä systemaattisista virheistä ovat esimerkiksi analogisen paineanturin taipunut viisari, muutokset anturin ominaisuuksissa (kuluminen, ryömintävirhe) tai kalibroimattoman anturin käyttäminen mittauksissa [5, s. 41]. Systemaattisia virheitä ei voida eliminoida kasvattamalla mitausten määrää ja siksi ne on pyrittävä poistamaan tai minimoimaan mittausjärjestelmässä [3, s. 23].

Systemaattisten virheiden poistamisen jälkeen mitaustulokseen vaikuttava jäljelle jäävä virhe on **satunnaisvirhe** [6, s. 18]. Satunnaisvirheet ovat mitausvirheitä, joiden suuruus ja etumerkki vaihtelevat satunnaisella tavalla, vaikka mitattava suure pidetään vakiona [5, s. 41; 6, s. 18]. Kun vakiona pysyvälle suurelle tehdään suuri määrä mittauksia vakio olosuhteissa, niin satunnaisvirheiden keskiarvo lähestyy nollaa (esiintymistiheyden todennäköisyys on yhtä suuri sekä positiivisille että negatiivisille satunnaisvirheille) [6, s. 17; 33, s. 7]. Tällöin satunnaisvirheet seuraavat normaalijakaumaa, jonka keskiarvo on nolla [33, s. 7]. Satunnaisvirheet voidaan eliminoida suorittamalla suuri määrä mittauksia samoissa olosuhteissa [5, s. 41]. Satunnaisvirheet aiheutuvat hallitsemattomista olosuhteiden muutoksista, mittausjärjestelmän epävakauksesta tai muista luonteeltaan satunnaisista ulkoisista häiriöistä, jotka estävät mittausjärjestelmää tuottamasta aina samaa mitaustulosta vakiona pysyvälle suurelle [3, s. 23; 33, s. 7].

Mittaustuloksiin sisältyy aina virheitä eli mittausepävarmuutta ja siksi on ilmoitettava mitaustuloksen vaihteluväli, jolle mitaustulos osuu. Mittausepävarmuutta arvioitaessa kaikki systemaattiset virheet on poistettu mittausjärjestelmästä. Mittausepävarmuuden tarkastelu voidaan suorittaa arvioimalla virherajat absoluuttisina virherajoina tai tilastollisina virherajoina. Absoluuttiset virherajat määritetään virhekomponenttien suurimpien mahdollisten esiintyvien virheiden mukaan. Absoluuttiset virherajat antavat usein aivan liian pessimistisen arvon mittausepävarmuudelle verrattuna käytännössä esiintyviin vir-

hearvoihin. Tilastollinen virheraja on mittausvirheen tilastomatematiikkaan ominaisuuksiin perustuva virherajojen arvioimismenetelmä ja sen on todettu soveltuvan paremmin käytännön virhetarkasteluihin [3, s. 28; 8, s. 163–164].

Tilastollisessa virherajamenetelmässä mittausepävarmuudelle ilmoitetaan tietty vaihteluväli, jonka sisällä mittaustulos ilmoitetulla todennäköisyydellä on. Mittausepävarmuuden arviointiin ja laskemiseen tilastollisen virherajamenetelmän avulla on julkaistu standardi JCGM 100:2008, joka perustuu ISO (*engl. the International Organization for Standardization*) organisaation vuonna 1995 julkaisemalle ohjeelle ”Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)”. Mittausepävarmuutta määritettäessä korjataan aluksi systemaattiset virheet pois ja tämän jälkeen tavoitteena on määrittää joko yhdistetty standardiepävarmuus tai laajennettu epävarmuus. JCCM 100:2008 ohjeen mukaan mittausepävarmuuden määrittäminen tehdään seuraavasti:

1. Arvioidaan mittaustuloksiin vaikuttavien tekijöiden suuruusluokat ja tunnistetaan mittauksiin oleellisesti vaikuttavat tekijät.
2. Määritetään mittauksen **matemaattinen malli** eli yhtälö, joka kuvaa mistä tekijöistä ( $X_1, X_2, \dots, X_N$ ) mittaustulos  $Y$  riippuu:  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ . Yhtälön tulee sisältää kaikki tekijät, korjaukset ja korjauskertoimet, jotka voivat aiheuttaa merkittävän epävarmuuskomponentin mittaustulokseen.
3. Matemaattisen mallin perusteella luetellaan epävarmuuskomponentit (mittaustarkkuudet), jotka ryhmitellään kahteen eri luokkaan sen perusteella, miten niiden arvot estimoidaan. **Tyyppin A** eli sisäisen epävarmuuden komponentit, joiden suuruus arvioidaan samoissa olosuhteissa suoritetuista toistetuista mittauksista (tilastolliset kokeet).  
**Tyyppin B** eli ulkoisen epävarmuuden komponentit, joiden suuruus arvioidaan muista tiedoista kuin samoissa olosuhteissa toistetuista mittauksista. Näitä muita tietoja ovat esimerkiksi aikaisemmat mittaustulokset, yleinen tieto samanlaisista instrumenteista, valmistajan antamat tiedot ja kalibrointitiedot.
4. Määritetään **keskihajonnat eli standardiepävarmuudet**  $u(x_i)$  joko tyyppin A tai tyyppin B epävarmuuskomponenteille.
5. Arvioidaan, vaikuttavatko jotkin tekijät oleellisesti toisiinsa ja tarvittaessa määritetään näiden välinen korrelaatio (covariance).
6. Lasketaan yhdistetty standardiepävarmuus  $u_c$  yhdistämällä yksittäisten epävarmuuskomponenttien standardiepävarmuudet. Jos kaikki standardiepävarmuudet ovat toisistaan riippumattomia, niin yhdistetty standardiepävarmuus lasketaan kaavasta  $u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_N)^2}$ . Jos tekijät korreloivat, niin katso ohje ISO:n GUM julkaisusta.
7. Lasketaan laajennettu epävarmuus  $U$  kaavasta  $U = ku_c$ , jossa  $k$  on kattavuuskerroin. Kattavuuskerroin  $k$  valitaan siten, että mittaustulos on tietyllä todennäköisyydellä laskettujen epävarmuusrajojen sisällä. Kattavuuskerroin  $k$  on yleensä 2, jolloin mittaustulos on likimain 95 % todennäköisyydellä laajennettujen epävarmuusrajojen sisällä.
8. Ilmoitetaan mittaustulosten yhteydessä joko yhdistetty standardiepävarmuus  $u_c$  tai laajennettu epävarmuus  $U$ . Laajennettun epävarmuuden yhteydessä ilmoitetaan kattavuuskerroin  $k$ , jolla tulokseen on päästy. Esim. mittaustulos on  $100 \pm 1$  bar, kun kattavuuskerroin  $k$  on 2 (luotettavuustaso 95 %).

[8, s. 179–184; 34, s. 8–27; 35, s. 6–7].

Testausjärjestelmän tärkeimmät mitattavat suureet ovat paine sekä tilavuusvirta. Paineen ja tilavuusvirran mittauksen mittausepävarmuuksien laskenta on esitetty luvuissa 6.2 ja 6.3.

## 6.2 Paineen mittauksen mittausepävarmuuden laskenta ja analysointi

Paineen mittaamiseen käytettiin hydraulikoneikon painelinjassa Wika A10 0 – 400 bar paineanturia ja tankkilinjassa Wika A10 0 – 100 bar paineanturia. Käytetyille paineantureille suoritettiin mittausepävarmuuden laskenta JCGM 100:2008 ohjeen mukaan. Paineanturien mittausepävarmuuksien tarkempi laskenta on esitetty liitteessä N.

**Painelinjan paineanturin** (Wika A10 0 – 400 bar) laajennetun mittausepävarmuuden laskennassa on otettu huomioon paineanturin, IO-kortin ja paineanturin kalibraattorin tarkkuudet kalibrointiolosuhteissa. Lisäksi laskettiin mittausepävarmuus tilanteessa, jossa lämpötila poikkeaa kalibrointiolosuhteista. Paineanturin valmistaja ilmoittaa lämpötilavirheen tyypilliseksi arvoksi 1 % mittausalueesta (FSO) ja maksimiarvoksi 2,5 % mittausalueesta (FSO), kun lämpötila-alue on 0 – 80 °C [24]. Käytetään laskuissa valmistajan ilmoittamaa tyypillistä lämpötilavirhettä, koska se on todennäköisesti määritetty tilastollisten testien myötä (tilastollinen virherajamenetelmä).

Paineanturin valmistajan ilmoittama mittaustarkkuus on 1 % mittausalueesta (FSO) [24]. I/O-kortin valmistajan ilmoittama mittaustarkkuus on 0,3 % mittausalueesta (FSO) [30]. Paineanturin valmistajan käyttämän kalibraattorin arvioitu tarkkuus on 0,1 % mittausalueesta (FSO).

Taulukossa 11 on esitetty painelinjan paineanturin mittausepävarmuuden laskelmista kerätyt tulokset. Mittausepävarmuuden lasketut arvot on ilmoitettu kalibrointilämpötilassa sekä lämpötilan poiketessa 60 °C astetta kalibrointilämpötilasta (paineanturin valmistajan ilmoittama maksimilämpötilavirhe). Taulukkoon on kerätty yhdistetty standardiepävarmuus, suhteellinen yhdistetty standardiepävarmuus, laajennettu epävarmuus sekä suhteellinen laajennettu epävarmuus.

**Taulukko 11.** Painelinjan paineanturin (Wika A10 0 – 400 bar) mittausepävarmuuden lasketut arvot.

Lämpötila	Yhdistetty standardiepävarmuus	Suhteellinen yhdistetty standardiepävarmuus	Laajennettu epävarmuus	Suhteellinen laajennettu epävarmuus
Kalibrointilämpötila	± 4,2 bar	1,0 %	± 8,4 bar	2,1 %
Tyypillinen lämpötilavirhe (ΔT = 60 °C)	± 5,8 bar	1,4 %	± 11,6 bar	2,9 %

Kalibrointiolosuhteissa painelinjan paineanturin yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi laskettiin  $u_{c,p1} = \pm 4,195$  bar ja suhteelliseksi yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi laskettiin  $w_{p1} = 1,049$  %. Painelinjan paineanturin laajennetuksi epävarmuudeksi laskettiin  $U_{p1} = \pm k \cdot u_{c,p1} = \pm 8,4$  bar kattavuuskertoimella  $k = 2$  (95 % luotettavuustaso) ja suhteelliseksi laajennetuksi epävarmuudeksi laskettiin  $W_{p1} = 2,1$  %.

Kalibrointiolosuhteissa lasketut painelinjan paineanturin laajennettu epävarmuus ( $U_{p1} = \pm 8,4$  bar) sekä suhteellinen laajennettu epävarmuus ( $W_{p1} = 2,1$  %) ovat melko suuria ja nämä täytyy pitää mielessä mittaustuloksia tulkittaessa. Painelinjan paineanturin mitta-alueetta pienentämällä saataisiin laajennettua epävarmuutta pienemmäksi, mutta seuraavan anturin mitta-alue on standardin mukainen 250 bar, joka ei sovellu hydraulikon 280 bar työpaineelle. Valmistajalta on saatavissa myös tarkempi paineanturi, jonka mittaustarkkuus on 0,5 %. Tarkemmalla anturilla painelinjan paineanturin laajennetuksi epävarmuudeksi saataisiin ( $U_{p1,b} = \pm 4,7$  bar) sekä suhteelliseksi laajennetuksi epävarmuudeksi ( $W_{p1,b} = 1,2$  %). Tarkempi paineanturi olisi siten hyvä vaihtoehto, jolloin mittaasepävarmuus pienentyisi puoleen alkuperäisestä ja samalla pystyttäisiin mittaamaan myös koneikon maksimityöpaineita sekä piikkipaineita.

Tyypillisellä lämpötilavirheellä painelinjan paineanturin yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi laskettiin  $u_{c,p1,dT} = \pm 5,8$  bar ja suhteelliseksi yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi laskettiin  $w_{p1,dT} = 1,4$  %. Tällöin paineanturin laajennetuksi epävarmuudeksi  $U_{p1,dT}$  laskettiin  $U_{p1,dT} = \pm 11,6$  bar (kattavuuskertoimella  $k = 2$ ) ja suhteelliseksi laajennetuksi epävarmuudeksi laskettiin  $W_{p1,dT} = 2,9$  %. Lämpötilan muutoksella kalibrointiolosuhteisiin nähden on siis merkittävä vaikutus mittaasepävarmuuteen (noin + 7 bar). Älykkäillä lämpötilakompensoiduilla paineantureilla voidaan saavuttaa tarkempia mittaustuloksia, kun niissä on sisäinen lämpötilan kompensointiin tarkoitettu osio.

**Tankkilinjan paineanturin** (Wika A10 0 – 100 bar) mittaustarkkuus on myös 1 % mitta-alueesta (FSO) [24]. Myös muut mittaustarkkuudet pysyvät samoina kuin painelinjan paineanturin mittaasepävarmuutta laskettaessa.

Taulukossa 12 on esitetty tankkilinjan paineanturin mittaasepävarmuuden laskelmista kerätyt tulokset. Mittaasepävarmuuden lasketut arvot on ilmoitettu kalibrointilämpötilassa sekä lämpötilan poiketessa 60 °C astetta kalibrointilämpötilasta (paineanturin valmistajan ilmoittama tyypillinen lämpötilavirhe). Taulukkoon on kerätty yhdistetty standardiepävarmuus, suhteellinen yhdistetty standardiepävarmuus, laajennettu epävarmuus sekä suhteellinen laajennettu epävarmuus.



**Taulukko 12.** Tankkilinjan paineanturin (Wika A10 0 – 100 bar) mittausepävarmuuden lasketut arvot.

Lämpötila	Yhdistetty standardiepävarmuus	Suhteellinen yhdistetty standardiepävarmuus	Laajennettu epävarmuus	Suhteellinen laajennettu epävarmuus
Kalibrointilämpötila	$\pm 1,0$ bar	1,0 %	$\pm 2,1$ bar	2,1 %
Tyypillinen lämpötilavirhe ( $\Delta T = 60$ °C)	$\pm 1,4$ bar	1,4 %	$\pm 2,9$ bar	2,9 %

Kalibrointiolosuhteissa tankkilinjan paineanturin yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi laskettiin  $u_{c,p2} = \pm 1,0$  bar ja suhteelliseksi yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi laskettiin  $w_{p2} = 1,0$  %. Tankkilinjan paineanturin laajennetuksi epävarmuudeksi laskettiin  $U_{p2} = \pm 2,1$  bar kattavuuskertoimella  $k = 2$  (95 % luotettavuustaso) ja suhteelliseksi laajennetuksi epävarmuudeksi laskettiin  $W_{p2} = 2,1$  %. Laajennettu epävarmuus on tankkilinjan paineanturilla pienemmästä mitta-alueesta johtuen pienempi verrattuna painelinjan anturiin. Suhteellinen laajennettu epävarmuus on sama tankki sekä painelijan paineantureilla, koska anturit ovat ominaisuuksiltaan samoja. Tarkemmalla paineanturilla laajennetuksi epävarmuudeksi saataisiin  $U_{p2,b} = \pm 1,2$  bar (kattavuuskertoimella  $k = 2$ ) ja suhteelliseksi laajennetuksi epävarmuudeksi saataisiin  $W_{p2,b} = 1,2$  %. Tarkemmalla paineanturilla laajennettu mittausepävarmuus lähes puolittuisi.

Maksimilämpötilavirheellä tankkilinjan paineanturin yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi laskettiin  $u_{c,p2,dT} = \pm 1,4$  bar ja suhteelliseksi yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi laskettiin  $w_{p2,dT} = 1,4$  %. Tällöin paineanturin laajennetuksi epävarmuudeksi laskettiin  $U_{p2,dT} = \pm 2,9$  bar kattavuuskertoimella  $k = 2$  (95 % luotettavuustaso) ja suhteelliseksi laajennetuksi epävarmuudeksi laskettiin  $W_{p2,dT} = 2,9$  %. Myös tankkilinjan paineanturin tuloksista havaitaan, että lämpötilan muutoksella on suurin merkitys mittausepävarmuuteen. Lämpötilakompensoinnilla saataisiin haluttaessa tarkennettua tankkilinjan mittauksia, mutta tulosten kannalta merkittävin asia olisi saada painelinjan paineanturin mittausepävarmuutta pienemmäksi. Tarkempi paineanturi tankkilinjassa pienentäisi mittausepävarmuuden puoleen alkuperäisestä, jolloin saadaan tarkempia mittaustuloksia.

### 6.3 Tilavuusvirran mittauksen mittausepävarmuuden laskenta ja analysointi

Tilavuusvirran mittaamiseen käytettiin Kracht VC 3 F1 PS kammiotilavuusvirta-anturia. Käytetylle tilavuusvirta-anturille suoritettiin mittausepävarmuuden laskenta JCGM 100:2008 ohjeen mukaan. Tilavuusvirran mittausepävarmuuden tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä N.

Tilavuusvirta-anturin (Kracht VC 3 F1 PS, 0 – 160 L/min) laajennetun mittausepävarmuuden laskennassa on otettu huomioon tilavuusvirta-anturin mittaustarkkuus sekä resoluutio ja tilavuusvirta-anturin kalibraattorin mittaustarkkuus kalibrointiolosuhteissa. Tilavuusvirta-anturin valmistajan ilmoittama mittaustarkkuus on 0,3 % lukemasta (reading). Tilavuusvirta-anturin valmistajan ilmoituksen mukaan anturi lähettää yhtä läpäisytystä litraa kohden 333,33 pulssia eli anturin resoluutio on  $1/333,33 \text{ L} = 0,003 \text{ L}$ . Tästä laskettiin näytteenottoajan (100 ms) aikana yhden pulssin muutoksen aiheuttama tilavuusvirran muutos. Tällöin resoluution aiheuttamaksi standardiepävarmuudeksi saatiin 0,52 L/min. Tilavuusvirta-anturin valmistajan käyttämän kalibraattorin arvioitu tarkkuus on 0,03 % lukemasta (reading). IO-kortti on pulssitietoa lukeva mittauskortti, jolle ei ole ilmoitettu mittaustarkkuutta. Käytetyn IO-kortin maksimipulssitaajuus on 100 kHz ja se riittää hyvin. Lämpötilavirheen aiheuttamaa mittausepävarmuutta ei laskettu tilavuusvirta-anturille, koska valmistaja ei ole ilmoittanut mitään lämpötilariippuvuutta. Lisäksi lämpötilavirhe on hyvin pieni tilavuuskammioanturilla ja se vaikuttaa lähinnä anturin vuotovirtauksiin.

Taulukossa 13 on esitetty tilavuusvirta-anturin mittausepävarmuuden laskelmista kerätyt tulokset. Taulukkoon on kerätty yhdistetty standardiepävarmuus, suhteellinen yhdistetty standardiepävarmuus, laajennettu epävarmuus sekä suhteellinen laajennettu epävarmuus.

**Taulukko 13.** *Tilavuusvirta-anturin lasketut yhdistetty standardiepävarmuus ja laajennettu epävarmuus.*

Lämpötila	Yhdistetty standardiepävarmuus	Suhteellinen yhdistetty standardiepävarmuus	Laajennettu epävarmuus	Suhteellinen laajennettu epävarmuus
Kalibrointi-lämpötila	$\pm 0,62 \text{ L/min}$	0,56 %	$\pm 1,23 \text{ L/min}$	1,12 %

Tilavuusvirta-anturin laajennetun mittausepävarmuuden yksityiskohtainen laskenta on esitetty liitteessä K ja laskennassa käytettiin tilavuusvirtana hydraulikoneikon maksimivilavuusvirtaa 110 L/min. Kalibrointiolosuhteissa tilavuusvirta-anturin yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi laskettiin  $u_{c,q} = \pm 0,62 \text{ L/min}$  ja suhteelliseksi yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi laskettiin  $w_q = 0,56 \%$ . Tilavuusvirta-anturin laajennetuksi epävarmuudeksi laskettiin  $U_q = \pm 1,23 \text{ L/min}$  kattavuuskertoimella  $k = 2$  (95 % luotettavuustaso) ja suhteelliseksi laajennetuksi epävarmuudeksi laskettiin  $W_q = 1,12 \%$ . Tilavuusvirta-anturin laajennettu epävarmuus on melko pieni ja kyseisellä järjestelmällä saavutetaan tilavuusvirran mittauksessa tarkkoja tuloksia, kun kalibroinnista vaan huolehditaan.

## 7. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä suoritettiin käyttöönotto automaattiselle testausjärjestelmälle, jolla tullaan tulevaisuudessa suorittamaan muun muassa hydraulisten korkeapainevesipumpujen, generaattoreiden ja kompressoreiden koekäyttö Dynaset Oy:n tuotannossa. Työn tarkoituksena oli korvata yrityksessä käytetty perinteinen manuaalisesti tehtävä koekäyttöprosessi. Tällä hetkellä koekäyttö suoritetaan käyttäen perinteistä manuaalista hydraulikoneikkoa sekä manuaalisesti luettavia antureita. Koekäytön jälkeen hydraulilaitteen suoritusarvojen mittaustulokset kirjataan käsin mittauspöytäkirjaan. Automaattisen testausjärjestelmän tavoitteena oli tilavuusvirran ja paineen säätö sekä ohjaus konfiguroidun testaussekvenssin mukaisesti.

Diplomityöprojekti aloitettiin tutustumalla koekäytettävien laitteiden nykyisiin koekäytömenetelmiin, jotta tiedettiin mitä oltiin automatisoimassa. Koekäyttöön tutustumisen jälkeen keskusteltiin tuoteryhmistä vastaavien suunnittelijoiden kanssa heidän haluamistaan mittausvaatimuksista ja tämän pohjalta määriteltiin sekä tarkastettiin mitä haluttiin mitata ja mitä ohjata. Keskustelujen pohjalta kirjattiin vaadittujen mittaus- ja ohjauskanavien signaalityypit ja määrät. Tämän jälkeen suunniteltiin ja toteutettiin hydraulikoneikon muutokset yhteen tuotannossa olleeseen hydraulikoneikkoon. Testausjärjestelmän käyttöliittymä sekä konfigurointiohjelma olivat suunnittelussa Insolution Oy:ssa. Osallistuin myös osittain testausjärjestelmän sekä konfigurointiohjelman käyttöliittymän suunnitteluun. Laitteiston valmistumisen ja hydraulikoneikon muutosten jälkeen päästiin suorittamaan varsinainen automaattisen testausjärjestelmän käyttöönotto, jossa testattiin antureiden, ohjauslaitteiden, kytkentäkaapin, käyttöliittymän, tilavuusvirran säädön sekä paineen säädön toimivuudet vaatimusten mukaan. Käyttöönototesteissä testattujen osaluokkien havaittiin toimivan oikein ja vaatimusten mukaan.

Käyttöönototesteissä keskimääräiseksi tilavuusvirran säätönopeudeksi laskettiin 6,0 s ja keskimääräiseksi tilavuusvirran säätötarkkuudeksi laskettiin  $\pm 0,11$  L/min. Keskimääräiseksi paineen säätönopeudeksi laskettiin 4,0 s ja keskimääräiseksi paineen säätötarkkuudeksi laskettiin  $\pm 0,11$  bar. Tilavuusvirran sekä paineen säädön todettiin toimivan vaatimusten mukaan.

Luotettavuuslaskelmilla painelinjan paineanturin laajennetuksi mittausepävarmuudeksi kalibrointilämpötilassa laskettiin  $U_{p1} = \pm 8,4$  bar (kattavuuskerroin  $k = 2$ ) ja tyypillisellä lämpötilavirheellä  $U_{p1,dT} = \pm 11,6$  bar. Tankkilinjan paineanturin laajennetuksi mittausepävarmuudeksi kalibrointilämpötilassa laskettiin  $U_{p2} = \pm 2,1$  bar ja tyypillisellä lämpötilavirheellä  $U_{p2,dT} = \pm 2,9$  bar. Tilavuusvirta-anturin laajennetuksi mittausepävarmuudeksi kalibrointilämpötilassa laskettiin  $U_q = \pm 1,23$  L/min.

Diplomityön alussa asetettiin tavoitteeksi suorittaa automaattisen testausjärjestelmän käyttöönotto tietyille Dynaset Oy:n hydraulilaitteille. Projektin alussa määriteltiin, että testausjärjestelmällä tulee voida säätää sekä ohjata painetta ja tilavuusvirtaa konfiguroidun testisekvenssin mukaisesti. Testausjärjestelmän tuli myös automaattisesti tulkita mittaustulokset joko hyväksytyiksi tai hyläytyiksi asetettujen laaturajojen mukaan. Koe-käyttäjälle tuli jättää mahdollisuus hylätä koekäyttö visuaalisten testien tai muun huomatu-  
n syyn takia. Testausjärjestelmän tuli tuottaa sähköinen mittausraportti asiakkaan sekä tuotekehityksen tarpeisiin. Testausjärjestelmän yhtenä tavoitteena oli poistaa koekäyttäjän vaikutukset mittaustuloksiin ja näin saada lähes vakioitua mittausprosessi. Tällöin saadaan tehokkaammin havaittua sallituista arvoista poikkeavat laitteet ja valmistettavien tuotteiden laatua saadaan vielä parannettua. Käyttöönottossa suoritettujen testien ja mit-  
tausten perusteella voidaan todeta, että työn alussa automaattiselle testausjärjestelmälle asetetut vaatimukset ja tavoitteet saavutettiin hyvin.

Seuraavana vaiheena on tuotevastuuryhmiä vetävien suunnittelijoiden tehtävänä suorittaa testausjärjestelmän käyttöönotto oman tuoteperheen laitteelleen. Korkeapainevesipum-  
puilla tämän järjestelmän toiminta jo testattiinkin ja järjestelmän todettiin toimivan. Käyt-  
töönottossa suunnittelijat valmistavat laitteillaan konfigurointiohjelmalla konfigurointi-  
tiedoston, jossa määritellään muun muassa käytettävät anturit, ohjauslaitteet ja testialgo-  
ritmi. Tämän jälkeen konfigurointitiedoston toiminta testataan käytännön testeillä. Tässä  
työssä tehtiin korkeapainevesipumppujen esisuunnittelu, mutta muille tuoteperheille täy-  
tyy tehdä vielä tarkemmat suunnitelmat kuormituslaitteiden osalta. Kompessoreille ja  
isommille korkeapainevesipumpuille tehtiin myös alustavat ideoinnit kuormituslaitteiden  
osalta, mutta niitä ei lähdetty tässä diplomityössä esittämään.

## 7.1 Automaattisen testausjärjestelmän kehitysehdotukset

Paineenrajoitusproportionaaliventtiilin datalehdellä lukee, että venttiiliä voidaan käyttää  
vakiotilavuusvirralla 0,7 – 1 L/min, joten venttiilin edessä voidaan testata 2-tievirransää-  
töventtiiliä. Tämä voi parantaa venttiilin toimintaa ja painerampin aikana epämääräisesti  
esiintyvät paineen värinät ja huojunnat voidaan saada poistettua.

Automaattisen testausjärjestelmän kytkentäkaappi tulee tehdä vastaisuudessa isompaan  
koteloon, jolloin myös virtalähde mahtuu kaappiin sisälle. Tällainen versio valmistettiin-  
kin jo, mutta sen käyttöönottoa ei ehditty suorittamaan. Lisäksi koneikko käy ja sammuta  
koneikko signaalit kannattaa vetää yhdellä 4-napaisella sähköjohdolla, jolloin vältetään  
yhden sähköjohdon kytkemiseltä.

Konfigurointiohjelmassa suositellaan käytettävän kaikille antureille valmistajan kalib-  
rointitiedoista laskettuja skaalausparametreja, jolloin saadaan poistettua systemaattiset  
virheet mittaustuloksista. Tällöin mittaustulosten vertailukelpoisuus säilyy paremmin.

Käyttöliittymään tulee lisätä koekäytettävän laitteen nimi sekaannuksien ja vaaratilanteiden välttämiseksi. Lisäksi käyttöliittymään tulee lisätä turvaominaisuus, joka antaa vain koneikon vieressä olevan tietokoneen ohjata koneikkoa. Tällöin välttyään vaaratilanteelta, että suunnittelija esimerkiksi vahingossa käynnistää koekäytön, jos hän testaa konfigurointitiedoston avaamista toimistosta käsin. Myös käyttöliittymän suurennustyökalut tulee korjata, jotta suurennus tapahtuisi myös y-akselin suunnassa.

## LÄHTEET

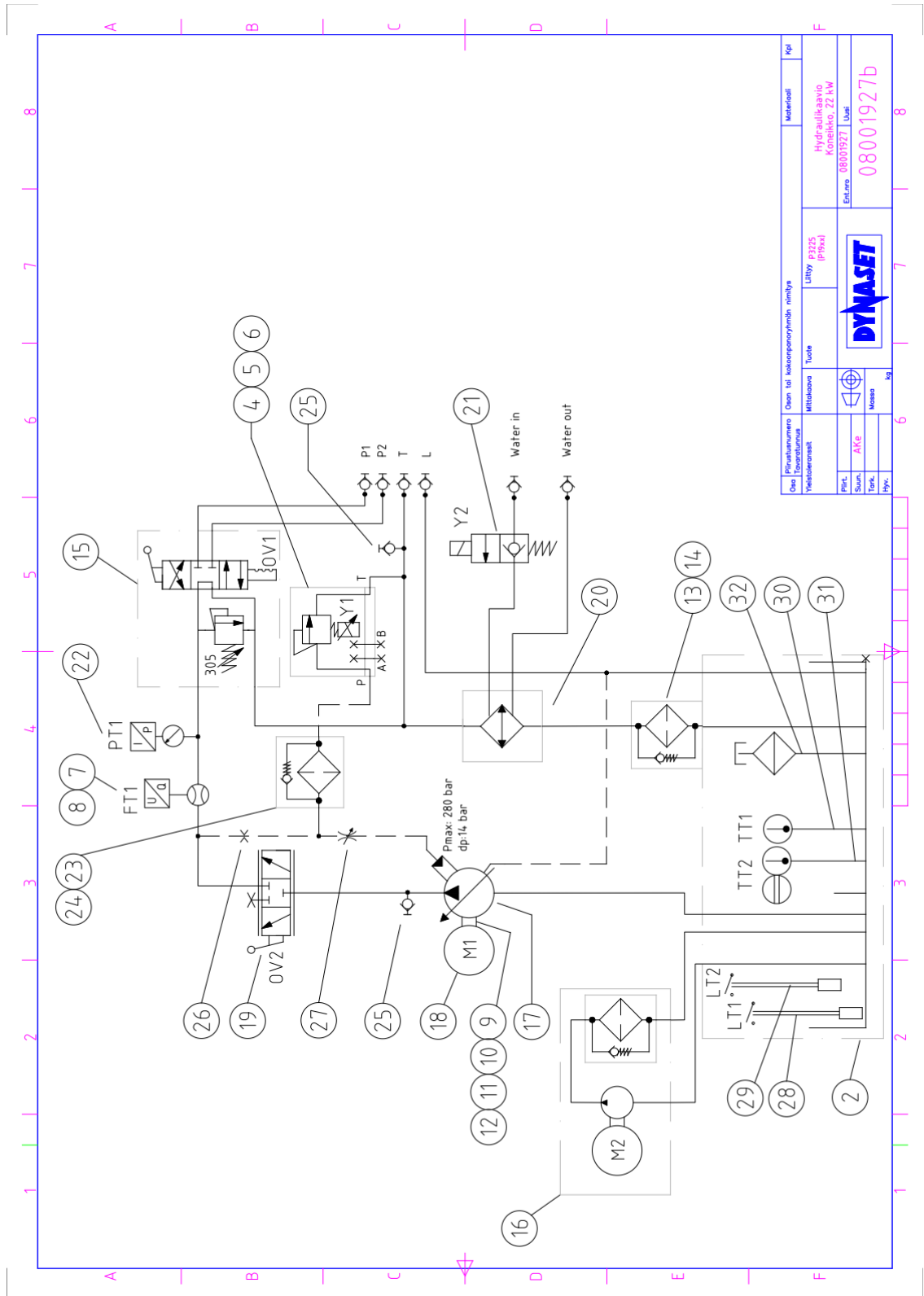
- [1] A. Karppinen; H. Kotka; T. Nieminen; J. Viitanen; P. Yli-Kätkä, Suunnitteluosasto, Dynaset Oy, Ylöjärvi, Haastattelu 2015.
- [2] Tuotteet, Dynaset Oy, web page. Available (accessed 1.10.2015): <http://dynaset.fi/index.php/fi/tuotteet>.
- [3] A. Ellman, Hydrauliiikan ja koneautomaation mittaukset, Tampere, Finland, 2002.
- [4] M. Airila, Mekatroniikka, 5.th ed. Otatiето, Helsinki, Finland, 1999, 389 p.
- [5] A.S. Morris, R. Langari, Measurement and Instrumentation: Theory and Application, Elsevier, London, UK, 2012, 581-617 p.
- [6] R. Pallas-Areny, J.G. Webster, Sensors And Signal Conditioning, 2.th ed. John Wiley & Sons, Inc., Canada, 2000, 587 p.
- [7] Anturikaapelit, naaras, IFM Electronic Oy, web page. Available (accessed 4.12.2015): [http://www.ifm.com/ifmfin/web/pmain/090\\_010\\_030.html](http://www.ifm.com/ifmfin/web/pmain/090_010_030.html).
- [8] O. Aumala, Mittaustekniikan perusteet, 11.th ed. Otatiето Oy, Helsinki, Finland, 2002, 223 p.
- [9] J.L. Johnson, Basic Electronics for Hydraulic Motion Control, Penton Publishing Inc., Cleveland, Ohio, USA, 1992, 405-35 p.
- [10] W. Nawrocki, Measurement Systems and Sensors, Arctech House Inc., Norwood, Massachusetts, USA, 2005, 325 p.
- [11] W.C. Dunn, Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control, The McGraw-Hill Companies Inc., United States of America, 2005, 322 p.
- [12] W. Bolton, Mechatronics: A Multidisciplinary Approach, 4.th ed. Pearson Education UK, Hampshire, UK, 2009, 593 p.
- [13] SFS 5059, Instrumentointi. Instrumenttien sijoittaminen prosessiin = Instrumentation. Placing of Process Instruments, 2.th ed. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, Finland, 2007, 27 p.
- [14] H. Kauranna, J. Kajaste, M. Vilenius, Hydrauliteknikka, 1.th ed. Werner Söderström Osakeyhtiö, Helsinki, Finland, 2008, 487 p.
- [15] T.A. Hyghes, Measurement and Control Basics, 3.th ed. The Instrumentation, Systems and Automation Society, Research Triangle Park, North Carolina, USA, 2002, 371 p.


- [16] Gear Type Flow Meter VC, Kracht, Literature Number: VC / GB / 01.12, Jan. 2012, 27 p. Available: [http://kracht.eu/uploads/tx\\_ttproducts/datasheet/VC\\_GB\\_01-12\\_neu.pdf](http://kracht.eu/uploads/tx_ttproducts/datasheet/VC_GB_01-12_neu.pdf).
- [17] J. Fonselius, J. Rinkinen, M. Vilenius, Servotekniikka, Oy Edita Ab, Helsinki, Finland, 1998, 194 p.
- [18] B. Barraclough, K. Dutton, S. Thompson, The Art of Control Engineering, Addison Wesley Longman, Harlow, Essex, England, 1997, 813 p.
- [19] Pilot operated, normally closed, electro-proportional throttle with reverse flow check, model FPHKMEN224, Sun Hydraulics Corporation, web page. Available (accessed 05.05.2016): <http://www.sunhydraulics.com/model/FPHK/MEN224>.
- [20] Proportional Flow Control Valve, PWK12120WP, Spool Type, Pilot-Operated, Normally Closed, Hydac Fluidtechnik GmbH, Literature Number: E 5.991.8.2/09.13, Sep. 2013, 2 p. Available: <http://www.hydac.com/fileadmin/pdb/pdf/PRO0000000000000000000000059918020011.pdf>.
- [21] Proportional flow control valve, SP16-20 Poppet, 2-Way, Normally Closed, HydraForce, Literature Number: 2.014.2, 2 p. Available: <http://hydraforce.com/Port/Prop-pdf/2-014-1.pdf>.
- [22] Proportional pressure relief valve DBETX, Bosch Rexroth AG, Literature document: RE29161 / 07.05, Jul. 2005, 12 p. Available: [https://md.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/re29161\\_2005-07.pdf?db=brmv2&lvid=1097371&mvid=12086&clid=20&sid=34A3DE35A5E26648F37EFCFA90520BF6.borex-tc&sch=M&id=12086,20,1097371](https://md.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/re29161_2005-07.pdf?db=brmv2&lvid=1097371&mvid=12086&clid=20&sid=34A3DE35A5E26648F37EFCFA90520BF6.borex-tc&sch=M&id=12086,20,1097371).
- [23] Plug-in amplifier VT-SSPA1, Bosch Rexroth AG, Literature number: RE 30264/07.12, Jul. 2012, 8 p. Available: [https://md.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/re30264\\_2012-07.pdf?db=brmv2&lvid=1166489&mvid=12086&clid=20&sid=34A3DE35A5E26648F37EFCFA90520BF6.borex-tc&sch=M&id=12086,20,1166489](https://md.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/re30264_2012-07.pdf?db=brmv2&lvid=1166489&mvid=12086&clid=20&sid=34A3DE35A5E26648F37EFCFA90520BF6.borex-tc&sch=M&id=12086,20,1166489).
- [24] Pressure transmitter for general industrial applications, Model A-10, Wika, Literature Number: PE 81.60, Jul. 2014, 8 p. Available: [http://www.wika.fi/upload/DS\\_PE8160\\_en\\_co\\_1631.pdf](http://www.wika.fi/upload/DS_PE8160_en_co_1631.pdf).
- [25] Lämpötila-anturit, TM4101, IFM electronic GmbH, Literature Number: TM-025KFBR14- /US/, Nov. 2011, 2 p. Available: <http://tds.ifm-electronic.com/tentacle/fin/TM4101.pdf>.
- [26] Valvontalaitteet, TP3233, IFM electronic GmbH, Literature Number: TP- FEC -A-ZVG/US/, Aug. 2010, 2 p. Available: <http://tds.ifm-electronic.com/tentacle/fin/TP3233.pdf>.
- [27] Hardware Documentation, CX50x0, Embedded-PC, Beckhoff, Literature Number: Version 1.7, Oct. 2015, 81 p. Available: [http://download.beckhoff.com/download/document/ipc/embedded-pc/embedded-pc-cx/cx5000\\_hwen.pdf](http://download.beckhoff.com/download/document/ipc/embedded-pc/embedded-pc-cx/cx5000_hwen.pdf).

- [28] Documentation, EL15xx, Up/down counter 24 VDC, Beckhoff, Literature Number: Version 3.0, Dec. 2015, 140 p. Available: <http://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/el15xxen.pdf>.
- [29] Documentation, EL28xx, Digital HD output Terminals, Beckhoff, Literature Number: Version 2.1, Feb. 2016, 127 p. Available: <http://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/el28xxen.pdf>.
- [30] Documentation, EL31xx, Analog Input Terminals (16 Bit), Beckhoff, Literature Number: Version 5.0, Oct. 2015, 166 p. Available: <http://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/el31xxen.pdf>.
- [31] Documentation, EL41xx, Analog Output Terminals (16 bit), Beckhoff, Literature Number: Version 4.0, Nov. 2015, 161 p. Available: <http://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/el41xxen.pdf>.
- [32] Documentation, EL18xx, Digital HD Input Terminals, Beckhoff, Literature Number: Version 2.1, Sep. 2015, 96 p. Available: <http://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/el18xxen.pdf>.
- [33] S.V. Gupta, Measurement Uncertainties: Physical parameters and Calibration of Instruments, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Germany, 2012, 321 p.
- [34] JCGM 100, Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Joint Committee for Guides in Metrology, 2008, 120 p.
- [35] PSK 3401, Kalibroinnin hankinta ja suorittaminen teollisuudessa, PSK Standardisointiyhdistys ry, Finland, 2011, 22-3 p.



# LIITE A: VANHAN HYDRAULIKONEIKON HYDRAULIKAAVIO JA OSALUETTELO



			Piir.nro: 08001927 Name/proj.no: Liitty, P3225 mittausautomaatti Suunnittelija: AKe Muutokset: AKe	
			<b>Osaluettelo</b>	
Osanro.	Osa	Malli	Tiedot	kpl
1	Pöytärunko			1
2	Öljysäiliö			1
3	Valumaallas			1
4	Paineenrajoitusproportionaali venttiili	Bosch Rexroth DBETX-1X/315G24-25NZ4M	NS6 315bar 1L I=2,5A (RD29161)	1
5	Ohjainkortti	Bosch Rexroth VT-SSPA1-525-20/V0	U e 0-10 V, U b = 24 V DC	1
6	Pohjalaatta ns6	NS6		1
7	Virtausmittari	Kracht VC3 F1 PS	350 bar, 0-160 lpm, NS16	1
8	Pohjalaatta	Kracht VC3 F1 PS anturin pohjalaatta	G1"	1
9	Väliäippä	HLC10		1
10	Sakarakytkin	ROTEX42P556201		1
11	Sakarakytkin	RoteX42GG 48		1
12	Joustoelementti			1
13	Suodatin runko	MPF180-1-G1		1
14	Suodatinpatruuna	A10		1
15	4/3-suuntaventtiili	Valvoil SD16/1	P, A & B = G3/4" ja T = G1"	1
16	Suodatusyksikkö	Hydac OLF-5-S-120-N-N5DM002-E		1
17	Hydraulipumppu	Bosch Rexroth A10VO71R-DFR1/31R-PSC62N00	VG = 71 cm <sup>3</sup> , Pmax = 280 bar, Ppeak = 350 bar	1
18	Sähkömoottori	K11R180L422/1500B35	22 kW	1
19	3/2-suuntaventtiili	DDF3V-03-A	G 1/2", käsivalintaventtiili	1
20	Vesijäähdytin	Pilan TP-C3	G1 1/4"	1
21	2/2-suuntaventtiili	ASCO SCG238A048	G3/4", NC	1
22	Painanturi	Trafak NAT	0-400 bar, 4-20 mA, R 1/4 u	1
23	Runko, Painesuodatin	Parker HPA	280 bar	1
24	Suodatinpatruuna, Painesuodatin	Parker HPR 1219	2 µm	1
25	Mittauspikaliitin			2
26	Mittakuristin		0,8 mm	1
27	Säädettävä kuristin	Parker 9N400S	345 bar, 19 lpm, R1/4	1
28	Pinnankorkeusanturi	Electrotec LM 1 TA 450 T80	Alaraja, Pinnankorkeus/lämpötilakytkin	1
29	Pinnankorkeusanturi	Electrotec LM 2 CTA 450	Yläaraja	1
30	Lämpötila-anturi		Termopari, K-tyyppi	1
31	Lämpömittari		Lämpötilan + öljynkorkeuden tarkistaminen mittalasisista	1
32	Täyttökorkki/huohotin			1

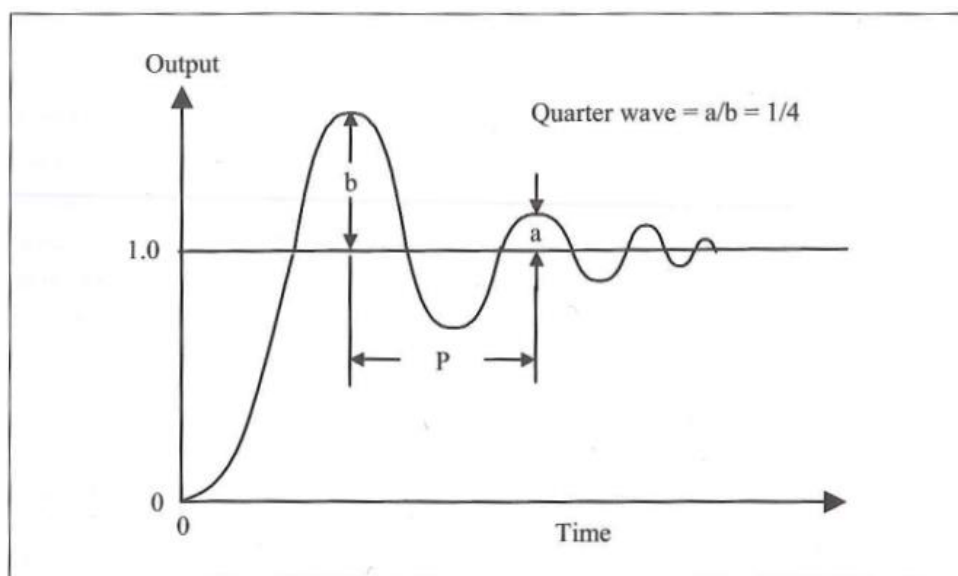
**LIITE B: SÄÄTIMEN VALINTAOHJEET***Taulukko 14. Ohjeet säätimen valintaan eri suureita säädettäessä [15, s. 57].*

Säädettävä suure	Säätimen tila		
	Proportionaalinen, P	Integrointi, I	Derivointi, D
Tilavuusvirta	Aina	Yleensä	Ei koskaan
Pinnankorkeus	Aina	Yleensä	Harvoin
Lämpötila	Aina	Yleensä	Yleensä
Paine	Aina	Yleensä	Joskus

## LIITE C: ZIEGLER-NICHOLS MENETELMÄ

### ONE-QUARTER DECAY RATIO METHOD

Ziegler-Nicholsin  $\frac{1}{4}$ -vaimennussuhdemenetelmässä on tarkoitus muodostaa sellainen prosessin reaktiivikäyrä, että ensimmäisen ylityksen (aallon huippu) ja toisen ylityksen välinen amplitudien suhde olisi 4:1 (katso kuva 62). Tällöin saavutetaan Zieglerin ja Nicholsin mukaan kompromissi nopean vasteajan sekä nopean asettumisen väliltä. Jotta kyseiseen prosessikäyrän muotoon päästään, niin tulee määrittää säädettävän prosessin kriittinen vahvistus  $S_u$  (Ultimate gain) sekä kriittinenjaksonaika  $P_u$  (Ultimate period) ainostaan säätimen suhteellisen vahvistuksen ollessa päällä (I ja D osa pois päältä). Kyseisten kertoimien avulla määritetään säätimen kertoimet suhteelliselle vahvistukselle  $K_c$ , integrointiajalle  $t_i$  ja derivointiajalle  $t_d$  säädin algoritmista riippuen.



**Kuva 62.** Ziegler-Nicholsin  $\frac{1}{4}$ -vaimennussuhdemenetelmä [15, s. 58].

Kriittisellä vahvistuksella tarkoitetaan P-säätimen sellaista vahvistuksen arvoa, että prosessi oskilloi harmonisen siniaallon muotoisesti (Kuva 63 (b)) ja prosessi pysyy juuri ja juuri stabiilina [15, s. 58]. Jos vahvistusta kasvatetaan tästä arvosta, niin prosessista tulee epästabiili (kuva 63 (a)) ja sen hallinta menetetään. Jos vahvistusta pienennetään kriittisestä pisteestä, niin prosessi vaimentuu stabiiliksi tiettyyn arvoon. Tätä vahvistuksen arvoa kutsutaan siis kriittiseksi vahvistukseksi. Kriittinenjaksonaika  $P_u$  taas on kahden perättäisen aallonharjan välinen aikaero, kun ollaan kriittisen vahvistuksen pisteessä [15, s. 58]. Näiden kahden arvon perusteella määritetään kertoimet suhteelliselle vahvistukselle  $K_c$ , integrointiajalle  $t_i$  ja derivointiajalle  $t_d$  säädin algoritmista riippuen.

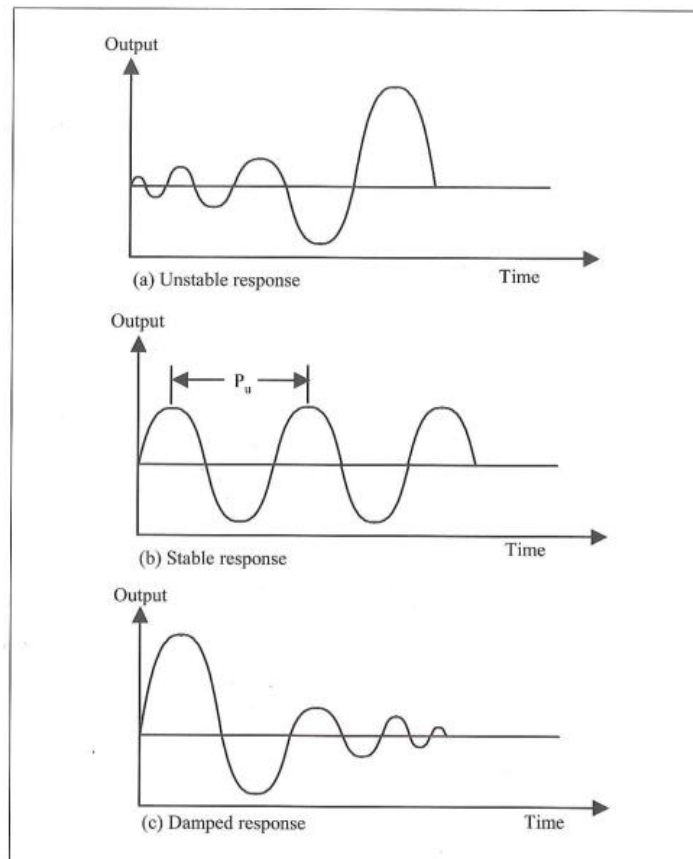
Tulee huomata, että tämä optimi vaimennussuhteen menetelmän yhtälöt ovat empiisiä ja niiden on tarkoitus tuottaa vaimennussuhde, jolla päästään  $\frac{1}{4}$ -aallon muotoon, jolloin olla saavutettu hyvä säätö Zieglerin ja Nicholsin mukaan. Monissa säätötapauksissa tämä reunaehto on kuitenkin riittämätön, sillä on löydettävissä ääretön määrä ratkaisuja, joilla

päästään kyseiseen aaltomuotoon [15, s. 61]. Näin ollen on hankala osoittaa yleisellä tasolla milloin on saavutettu hyvän säädön mukaiset säätimen parametrit.

Seuravaksi esitetään vaiheittainen menetelmä PID-säätimen virittämiseksi .

1. Aseta säädin P-säätö tilaan, jolloin derivointiaika  $t_d$  asetetaan nolnaan ja integrointi-  
aika  $t_i$  äärettömän suureksi.
2. Aseta säädin automaattitilaan ja tarkista, että takaisinkytkentä on päällä.
3. Muodosta prosessiin häiriö esimerkiksi säätimen ohjearvoa hieman muuttamalla  
ja tarkkaile prosessikäyrän muotoa.
4. Kasvata vahvistusta  $K_c$  nolhasta vähitellen kriittisen vahvistuksen pisteeseen, kun-  
nes prosessi oskilloi harmonisen siniaallon mukaisesti (kuva 63 (b)). Prosessista  
tulee epästabiili (kuva 63 (a)), kun vahvistusta kasvatetaan yli kriittisen pisteen.  
Liian pienellä vahvistuksella prosessi vaimenee ja oskillointi loppuu (kuva 62  
(c)). Toista kohta 3 ja 4, kunnes prosessi oskilloi ja olet saavuttanut kuvan 63 (b)  
käyrän muodon.
5. Kun saavutat stabiilin oskillointitilan, niin kirjaa ylös kriittinen vahvistus  $S_u$  sekä  
kriittinenjaksonaika  $P_u$ .
6. Muodosta säätimen parametrit taulukon 15 avulla käytetyn säädintyyppin mukai-  
sesti.

[15, s. 57–61].



**Kuva 63.** *Prosessin reagointikäyrä [15, s. 59].*

**Taulukko 15.** Säätimen parametrien valinta Ziegler-Nichols menetelmällä [15, s.60; 18, s. 163].

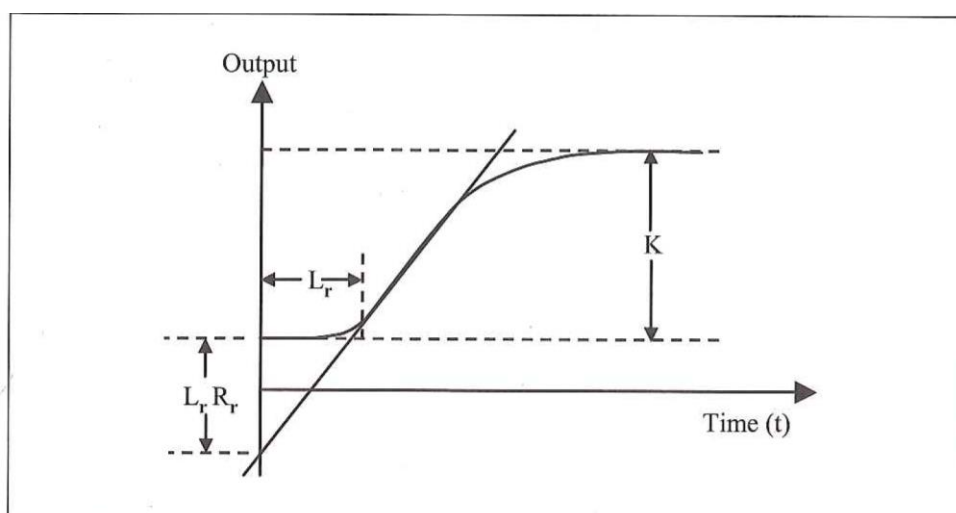
Säädintyyppi	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5S_u$	-	-
PI	$0,45S_u$	$\frac{P_u}{1,2}$	-
PD	$0,6S_u$	-	$\frac{P_u}{8}$
PID	$0,6S_u$	$0,5P_u$	$\frac{P_u}{8}$

## PROSESSIN REAGINTIKÄYRÄMENETELMÄ

Toinen Zieglerin ja Nicholsin esittämä menetelmä säätimen virittämiseen on niin sanottu prosessin reagoitikäyrämenetelmä. Siinä avoimen säätöpiirin prosessiin syötetään askelmuutos ja samalla tutkitaan prosessin reagointia.

Seuravaksi esitetään menetelmä PID-säätimen virittämiseksi [15, s. 61–64; 18, s. 165–166].

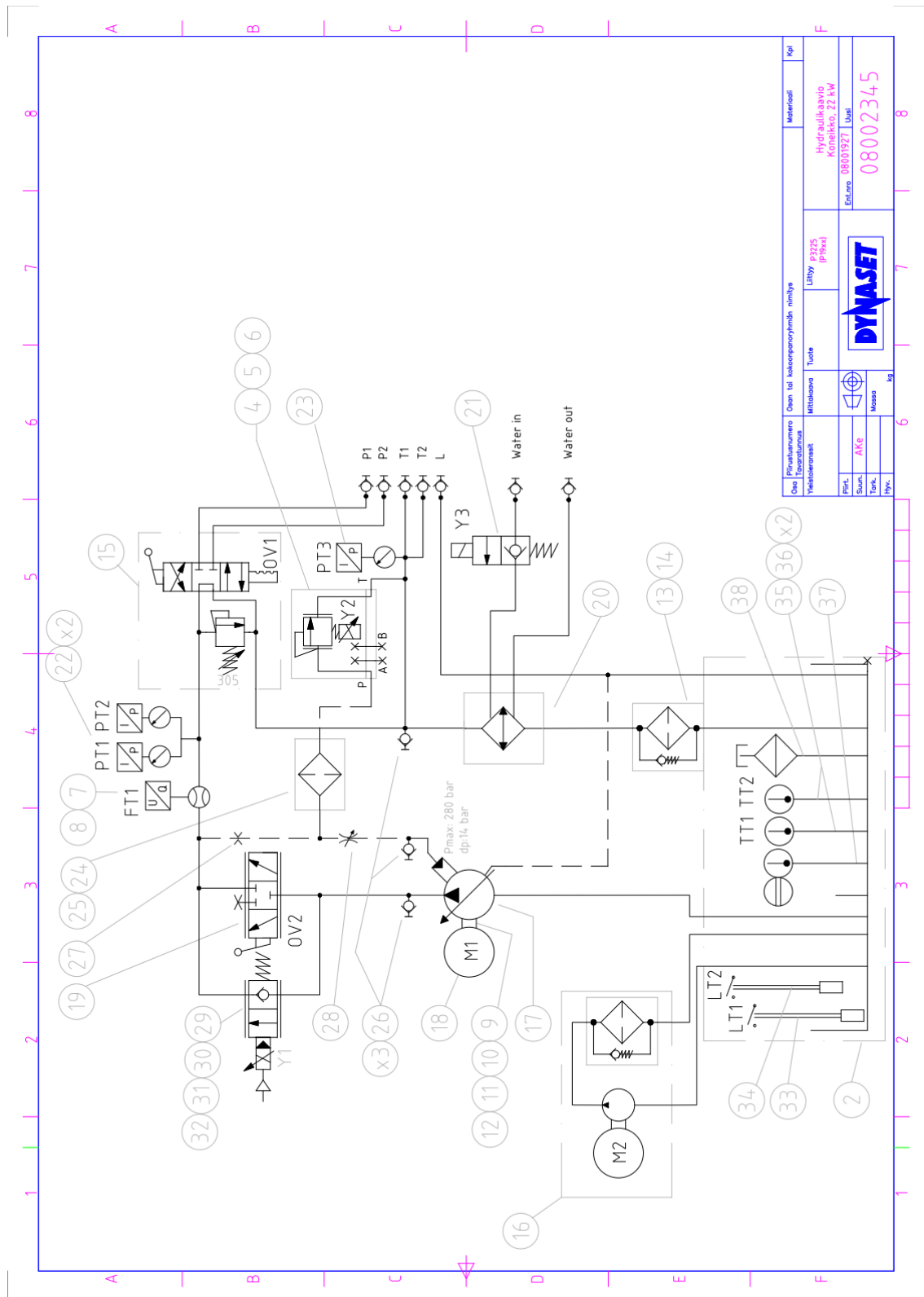
1. Aseta säädin manuaalitilaan (open-loop).
  2. Säätimen ollessa manuaalitilassa muuta säätimen ulostuloarvoa askelmaisesti. Tämän voit tehdä muuttamalla säätimen ohjearvoa pienellä askeleella.
  3. Tallenna prosessin vaste.
  4. Piirrä tangenti vastekäyrän maksimi kulmakertoimen kohdalle (kuva 64). Tämä kulmakertoimen on prosessin reagoitusuhde  $R_r$ .
  5. Kulmakertoimen ja alkuperäisen oloarvon leikkauspisteestä luetaan viive  $L_r$ .
  6. Muodosta säätimen parametrit taulukon 16 avulla käytetyn säädintyyppin mukaisesti.
  7. Aseta viritetty säädin automaattitilaan.
- [15, s. 61–64].

**Kuva 64.** Prosessin reagoitikäyrämenetelmä [15, s. 36].


**Taulukko 16.** Säätimen parametrien valinta prosessikäyrä-metodilla [15, s.63–64; 18, s. 166].

Säädintyyppi	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{1}{L_r R_r}$	-	-
PI	$\frac{0,9}{L_r R_r}$	$3,3L_r$	-
PD	-	-	-
PID	$\frac{1,2}{L_r R_r}$	$2,0L_r$	$0,5L_r$

# LIITE D: UUDEN HYDRAULIKONEIKON HYDRAULIKAAVIO, OSALUETTELO JA VENTTIILEIDEN OHJAUSSEKVENSSIT





			Piir.nro: 08002345 Nimi/proj.no: P3225 automaattinen mittausjärjestelmä Suunnittelija: Ari-Pekka Ketola Muutokset: Ari-Pekka Ketola		
Osanro.	Osa	Malli	Osaluettelo	Tiedot	Kpl
1	Pöytärunko				1
2	Öljysäiliö				1
3	Valumaallas				1
4	Paineenrajoitusproportionaaliventtiili	Bosch Rexroth DBETX-1X/315G24-25NZ4M		Pmax = 315bar, Pmin = 8 bar, Qnom 1L, Ub =24 V DC, I=2,5A, NS6, Hystereesi < 4%, Vasteaika (100%): 60 / 70 ms (on/off)	1
5	Ohjainkortti	Bosch Rexroth VT-SSPA1-525-20/V0/0		Ue = 0-10 V, Ub = 24 V DC	1
6	Pohjalaatta nsö	NS6		Bosch paineproportionaaliventtiilin pohjalaatta	1
7	Virtausanturi	Kracht VC3 F1 PS		Pmax = 315 bar, Ppeak = 350 bar, Qmax = 0.6-160 lpm, Vgz = 3.000 cm <sup>3</sup> , NS16, Tarkkuus: 0,3% lukemasta	1
8	Pohjalaatta			G1", Kracht VC3 F1 PS anturin pohjalaatta	1
9	Välilaippa	HLC10			1
10	Sakarakytkin	ROTEX42P556201			1
11	Sakarakytkin	RoteX42GG 48			1
12	Joustoelementti				1
13	Suodatin runko	MPF180-1-G1			1
14	Suodatinpatruuna	A10			1
15	4/3-suuntaventtiili	Valvoil SD16/1/AC(YG-175)/P-18L/RC		P, A & B = G3/4" ja T = G1"	1
16	Suodatusyksikkö	Hydac OLF-5-S-120-N-N5DM002-E			1
17	Hydraulipumppu	Bosch Rexroth A10VO71R-DFR1/31R-PSC62N00		VG = 71 cm <sup>3</sup> , Pmax = 280 bar, Ppeak = 350 bar	1
18	Sähkömoottori	K11R180L422/1500B35		22 kW	1
19	3/2-suuntaventtiili	DDF3V-03-A		3-tievalintaventtiili, G1/2"	1
20	Vesijäähdytin	Pilan TP-C3		G1 1/4"	1
21	2/2-suuntaventtiili	ASCO SCG238A048		G3/4", NC	1
22	Paineanturi	Wika A10		0-400 bar, 4-20 mA, G 1/4 B EN 837 (painemittariliitäntä), Tarkkuus < 1% FSO (25 °C)	2
23	Paineanturi	Wika A10		0-100 bar, 4-20 mA, G 1/4 B EN 837 (painemittariliitäntä), Tarkkuus < 1% FSO (25 °C)	1
24	Runko, Painesuodatin	Parker HPA		Pmax = 280 bar	1
25	Suodatinpatruuna, Painesuodatin	Parker HPR 1219		Suodatusaste: 2 µm	1
26	Mittauspikaliitin				3
27	Mittakuristin			D = 0,8 mm	1
28	Säädettävä kuristin	Parker 9N400S		Pmax = 345 bar, Qmax = 19 lpm, G1/4"	1
29	2/2-suuntaproportionaaliventtiili	Hydraforce SP16-20		Qmax = 265 lpm, Pmax = 250 bar	1
30	Venttiililohko	BF324275ST		G1"	1
31	Magneettikela	Hydraforce 6356024 24 VDG 10-16		24 V DC	1
32	Ohjainkortti	Sun Hydraulics 990-G01-E016A		Ie = 4-20mA (Ue = 0-10V 0-5V ), Ub = 24 V DC	1
33	Pinnankorkeusanturi	Electrotec LM 1 TA 450 T80		Alaraja, Pinnankorkeus/lämpötilakytkin	1
34	Pinnankorkeusanturi	Electrotec LM 2 CTA 450		Yläaraja	1
35	Lämpötila-anturi	IFM TM4101		PT100, G1/4", 4-johdin	2
36	Mittausmuunnin	IFM TP3233		PT100/4..20mA, 24VDC, M12 liittimet	2
37	Lämpömittari			Lämpötilan + öljynkorkeuden tarkistaminen mittalasisista	1
38	Täyttökorkki/huohotin				1

### Hydrauliiventiilien ohjaukset eri järjestelmän toiminnoissa:

Sähköventtiilit:	Valmiustila	Virtauksen säätö	Paineen säätö	Korkea lämpötila / Vaaditaan jäähdytystä	P -> P1 (Virtaus porttiin P1)	P -> P2 (Virtaus porttiin P2)
Y1		X				
Y2			X			
Y3				X		

Manuaali-venttiilit:						
OV1.1 (1)						X
OV1.2 (1)	X					
OV1.3 (1)					X	
OV2		X				

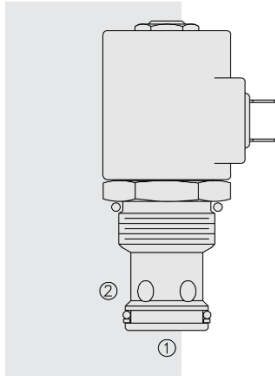
(1)	OV1.1 = Ohjausventtiili 1, asento 1: P -> P2
	OV1.2 = Ohjausventtiili 1, asento 2: P -> T
	OV1.3 = Ohjausventtiili 1, asento 3: P -> P1

# LIITE E: 2/2-SUUNTAPROPORTIONAALIVENTTIILI

Blue rectangles are links to other catalog pages.

## ELECTRO-PROPORTIONAL VALVES—DIRECTIONAL CONTROL

### SP16-20 Poppet, 2-Way, Normally Closed



#### DESCRIPTION

A proportional solenoid-operated, 2-way, poppet-type, normally closed, screw-in hydraulic cartridge valve for low-leakage blocking and load-holding applications.

#### OPERATION

When de-energized, the SP16-20 acts as a check valve, allowing flow from ① to ②, and blocking flow from ② to ①. When energized, the ② to ① flow path opens. Flow is proportional to current applied to the coil.

**Note:** If low voltage is expected on the machine, 12 or 24 volt systems will require the use of 10 volt or 20 volt coils respectively. See "SP Valves and Coil Operating Parameters," page 2.002.1.

#### FEATURES

- Industry-common cavity.
- Efficient wet-armature construction.
- Continuous-duty rated coils.
- Optional waterproof E-Coils rated up to IP69K.
- Manual override options.

#### RATINGS

**Operating Pressure:** 250 bar (3625 psi)

**Flow:** Up to 265 lpm (70 gpm); see performance curves.

**Dither/Pulse Frequency:** 100 to 400 Hz

**Hysteresis:** Less than 5% below 60% of I-max.; Less than 10% above 60% of I-max.

**Maximum Control Current:** 1.2 amps

**Max. Internal Leakage:** 5 drops per minute at rated pressure

**Temperature:** -40 to 120°C with standard Buna seals

**Fluids:** Mineral-based or synthetics with lubricating properties at viscosities of 7.4 to 420 cSt (50 to 2000 sus); See Temperature and Oil Viscosity, page 9.060.1

**Filtration:** See page 9.010.1; **Installation:** No Restrictions. See page 9.020.1

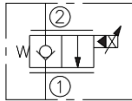
**Cavity:** VC16-2; See page 9.116.1; **Cavity Tool:** CT16-2XX; See page 8.600.1

**Seal Kit:** SK16-2X-T; See page 8.650.1

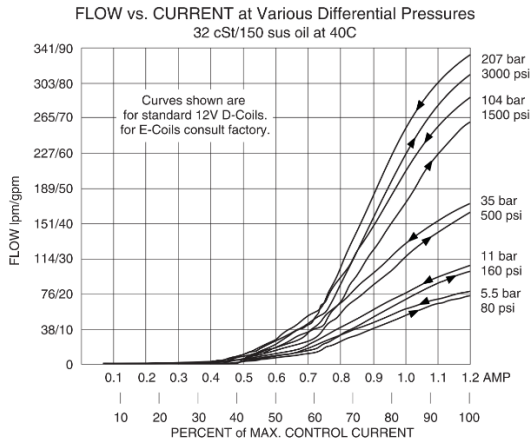
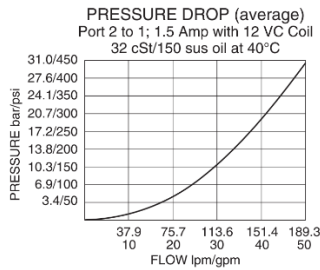
**Coil Nut:** Part No. 7004400; for E-coils manuf. prior to 1-1-04, see page 3.400.1.

#### SYMBOLS

#### USAS/ISO:



#### PERFORMANCE



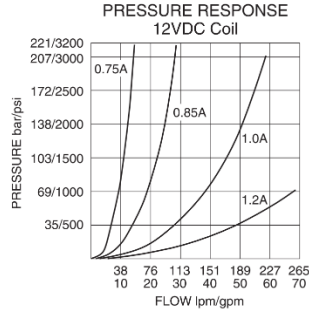
Performance information continued on following page.

Blue rectangles are links to other catalog pages.



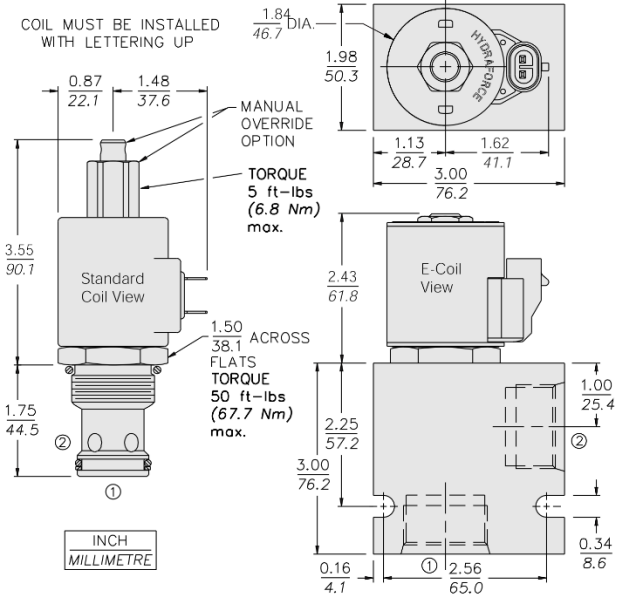
**SP16-20**

**PERFORMANCE (cont'd.)**



**Recommended Electronic Controllers:**  
See page 2.001.1 or our Electronics catalog.

**DIMENSIONS**



**MATERIALS**

**Cartridge:** Weight: 0.32 kg. (0.71 lbs.) Steel with hardened work surfaces. Zinc-plated exposed surfaces; Buna N O-rings and back-ups standard.

**Standard Ported Body:** Weight: 0.57 kg. (1.25 lbs.) Anodized high-strength 6061 T6 aluminum alloy, rated to 207 bar (3000 psi). Ductile iron bodies available; dimensions may differ. See page 8.016.1.

**Standard Coil:** Weight: 0.27 kg. (0.60 lbs.) Unitized thermoplastic encapsulated, Class H high temperature magnetwire. See page 3.200.1.

**E-Coil:** Weight: 0.41 kg. (0.9 lbs.) Perfect wound, fully encapsulated with rugged external metal shell. Rated up to IP69K with integral connectors.

**Note: See page 3.400.1 for all E-Coil retrofit applications.**

**TO ORDER**

**SP16-20**

<b>Option</b>	None (Blank)	<b>Voltage</b>	<b>DS</b>
Manual Override	<b>M</b>	<b>0</b> Less Coil**	<b>DG</b> DIN 43650
Manual Override	<b>Y</b>	<b>10</b> 10 VDC†	<b>DL</b> Leadwires (2)
Manual Override	<b>J</b>	<b>12</b> 12 VDC	<b>DL/W</b> Leads w/Weatherpack Connectors
		<b>20</b> 20 VDC†	<b>DR</b> Deutsch DT04-2P
		<b>24</b> 24 VDC	<b>Termination (VDC) E-Coil</b>
			<b>ER</b> Deutsch DT04-2P (IP69K Rated)
			<b>EY</b> Metri-Pack® 150.2A (IP69K Rated)
<b>Porting</b>	<b>0</b> Cartridge Only	<b>Seals</b>	Coils with internal diode are available. Consult factory.
	<b>12T</b> SAE 12	<b>N</b> Buna N (Std.)	
	<b>16T</b> SAE 16	<b>V</b> Fluorocarbon	
	<b>6B</b> 3/4 in. BSP*	<b>P</b> Polyurethane	
	<b>8B</b> 1 in. BSP*		

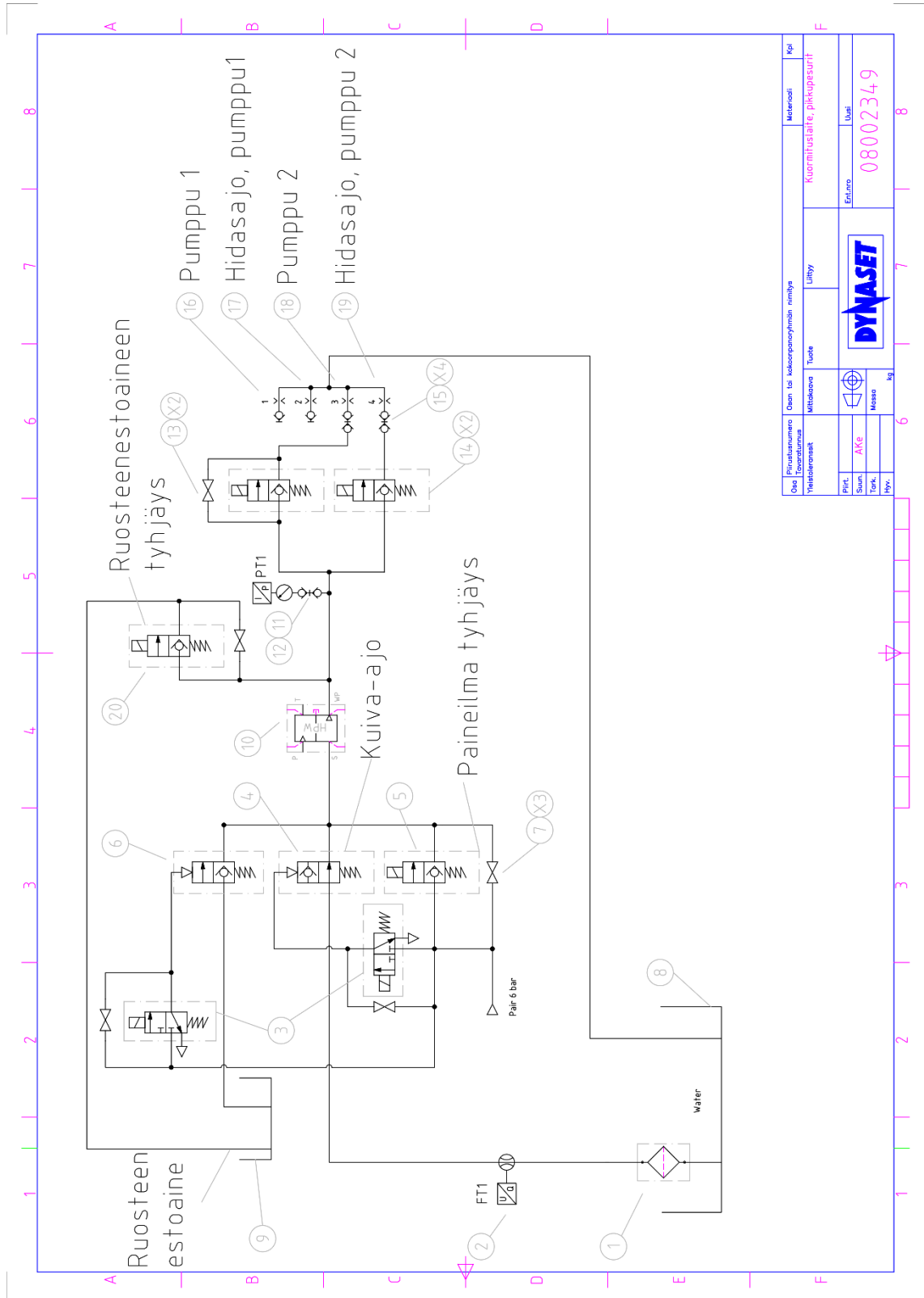
\*BSP Body; U.K. Mfr. Only

†10 VDC and 20 VDC coils should be used for most continuous-duty applications. Consult factory.


\*\*Includes Std. Coil Nut



## LIITE G: PIENTEN VESIPUMPPUJEN KUORMITUSLAITTEEN HYDRAULIKAAVIO JA OSALUETTELO



One	Pluuratuksen	Osien tai kokonaisuuden nimitys	Merkeissä	Yp
Pluur.	Erämerkintä	Mittakaava	Liitety	Kuormituslaitte, pikkupesurit
Siun.	AKK	Tuote		
Tonk.		Massa		
Hyv.		kg		
		08002349		

			Piir.nro: 08002349 Nimi/proj.no: Kuormituslaite, korkeapainepumput Suunnittelija: Ari-Pekka Ketola Muutokset: Ari-Pekka Ketola	
			<b>Osaluettelo</b>	
<b>Osanro.</b>	<b>Osa</b>	<b>Malli</b>	<b>Tiedot</b>	<b>Kpl</b>
1	Imusuodatin			1
2	Virtausanturi	IFM SM2000	Q = 5 - 600 lpm	1
3	3/2-suuntaventtiili	Asco SC G356B053 V Ms	Paineilmaohjausventtiili, 24VDC, 1/8"	2
4	2/2-suuntaventtiili	Asco E290A389	Vinoistukkaventtiili, G 1", NO	1
5	2/2-suuntaventtiili	Sirai 2/2	Paineilmaventtiili, 1/8", NC, 24V, Orifice size 1,6 mm	1
6	2/2-suuntaventtiili	Asco E290A792	Vinoistukkaventtiili, G 1/2", NC	1
7	Sulkuventtiili	ITV 63002	G 1/8"	3
8	Vesisäiliö			1
9	Ruosteenestoaineen säiliö			1
10	HPW korkeapainepumppu	Testattava pumppu		1
11	Mittauspikaliitin			1
12	Paineanturi	Wika A10	0-400 bar, 4-20 mA, G 1/4 B EN 837 (painemittariliitäntä), Tarkkuus < 1% FSO (25 °C)	1
13	Sulkuventtiili	Korkeapaineventtiili	G 1/2", p_max = 500 bar	2
14	2/2-suuntaventtiili	Danfoss VDHT 1/2" HP	G 1/2", VDHT 30 E 2/2-24V HP	2
15	Pikaliitin		G 1/2"	4
16	Mittakuristin		Koko = 1	1
17	Mittakuristin		Koko = 2	1
18	Mittakuristin		Koko = 3	1
19	Mittakuristin		Koko = 4	1
20	2/2-suuntaventtiili	Danfoss VDHT 3/8" HP	G 3/8", VDHT 30 E 2/2-24V HP	1

## LIITE H: AUTOMAATTISEN TESTAUSJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄKAAPIN SÄHKÖKYTKENTÖJEN TESTAUSPÖYTÄKIRJA

<b>Dynaset Oy</b>	<b>Automaattisen testausjärjestelmän käyttöönotto</b>	<b>22.7.2015</b>
	Kytkentäkaapin sähkökytkentöjen testauspöytäkirja	Ari-Pekka Ketola

Kanava	Anturisignaali	Testimenetelmä	Toimivuus	Havainnot
CH 1	AI 0- 20 mA	Paineanturi	OK	Paineanturin sähköjohdon kytkentävirhe korjattu.
CH 2	AI 0 - 20 mA	Paineanturi	OK	
CH 3	AI 0 - 20 mA	Paineanturi	OK	
CH 4	AI 0 - 20 mA	Paineanturi	OK	
CH 5	AI 0 - 20 mA	Paineanturi	OK	
CH 6	AI 0 - 20 mA	Paineanturi	OK	Ristiinkyt- kentävirhe ka- navan CH 7 kanssa.
CH 7	AI 0 - 20 mA	Paineanturi	OK	Ristiinkyt- kentävirhe ka- navan CH 6 kanssa.
CH 8	AI 0 - 20 mA	Paineanturi	OK	
CH 9	AI 0 - 10 V	System Manager	OK	
CH 10	AI 0 - 10 V	System Manager	OK	
CH 11	AI 0 - 10 V	System Manager	OK	
CH 12	AI 0 - 10 V	System Manager	OK	
CH 13	AI 0 - 10 V	System Manager	OK	
CH 14	AI 0 - 10 V	System Manager	OK	
CH 15	DI 0/24 V (pulse)	Tilavuusvirta-anturi	OK	
CH 16	DI 0/24 V (pulse)	Tilavuusvirta-anturi	OK	
CH 17	DI 0/24 V	Kytkin	OK	
CH 18	DI 0/24 V	Kytkin	OK	
CH 19	DI 0/24 V	Kytkin	OK	
CH 20	DI 0/24 V	Kytkin	OK	
CH 21	DI 0/24 V	Kytkin	OK	
CH 22	DI 0/24 V	Kytkin	OK	
CH 23	DI 0/24 V	Kytkin	OK	
CH 24	DI 0/24 V	Kytkin	OK	
CH 25	DO 0/24 V	Sähkölamppu	OK	
CH 26	DO 0/24 V	Sähkölamppu	OK	
CH 27	DO 0/24 V	Sähkölamppu	OK	



CH 28	DO 0/24 V	Sähkölamppu	OK	
CH 29	DO 0/24 V	Sähkölamppu	OK	
CH 30	DO 0/24 V	Sähkölamppu	OK	
CH 31	DO 0/24 V	Sähkölamppu	OK	
CH 32	DO 0/24 V	Sähkölamppu	OK	
CH 33	AO 0 - 20 mA	2/2-suuntaproportio- naaliventtiili	OK	Venttiin sähköjohdon kytkentävirhe korjattu.
CH 34	AO 0 - 20 mA	Paineenrajoitus-proportio- naaliventtiili	OK	Ongelma vahvistinkortin ja venttiilin liitäntöjen kanssa korjattu.
CH 35	AO 0 - 20 mA	2/2-suuntaproportio- naaliventtiili	OK	
CH 36	AO 0 - 20 mA	2/2-suuntaproportio- naaliventtiili	OK	

## LIITE I: SKAALAUSPARAMETRIEN LASKENTA

### Yleisten skaalausparametrien laskenta (binääri viestin muunto insinööriyksiköihin)

Anturin mittausalueen yläraja:  $Y_2$  (ilmoitetaan skaalattavassa insinööriyksikössä esim. bar):

Anturin mittausalueen alaraja:  $Y_1$  (ilmoitetaan skaalattavassa insinööriyksikössä esim. bar):

Anturin ulostuloalueen yläraja:  $Z_2$

Anturin ulostuloalueen alaraja:  $Z_1$

Tiedonkenukortin resoluutio (bittimäärä):  $n = 16$

Tiedonkenukortin ulostuloalueen yläraja:  $X_2 = 2^{n-1} - 1$

Bittimäärästä vähennetään exponentissa 1, koska 1 bitti on varattu etumerkin näyttämiseen ja tuloksesta vähennetään 1, sillä binääri viesti alkaa arvosta 0.

Tiedonkenukortin ulostuloalueen laskennallinen alaraja (riippuvainen anturin ulostuloalueen ala- ja ylärajojen suhteesta):

$$X_1 = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot X_2$$

Anturin skaalauskerroin:  $a$

Offset:  $b$

Yleinen suoran yhtälö:  $y = a \cdot x + b$

Anturin mittausarvo mittausalueen alarajalla:  $Y_1 = a \cdot X_1 + b$

$$\Rightarrow b = Y_1 - a \cdot X_1$$

Anturin mittausarvo mittausalueen ylärajalla:  $Y_2 = a \cdot X_2 + b$

$$\Rightarrow b = Y_2 - a \cdot X_2$$

Merkitään yhtälöt yhtäsuuriksi:  $\Rightarrow Y_1 - a \cdot X_1 = Y_2 - a \cdot X_2$

$$\Rightarrow a \cdot X_2 - a \cdot X_1 = Y_2 - Y_1$$

**Skaalauskerroin:**  $\Rightarrow a = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$

**Offsetin ratkaisu anturin  
mittausalueen alarajan  
yhtälöstä:**

$$b = Y_1 - a \cdot X_1$$

$$\Rightarrow b = Y_1 - \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \cdot X_1$$

### **Paineanturin skaalausparametrien laskenta**

**Wika A10 0 - 400 bar:**

Anturin mittausalueen yläraja:  $Y_2 := 400\text{bar}$

Anturin mittausalueen alaraja:  $Y_1 := 0\text{bar}$

Anturin ulostuloalueen yläraja:  $Z_2 := 20\text{mA}$

Anturin ulostuloalueen alaraja:  $Z_1 := 4\text{mA}$

Tiedonkennukortin resoluutio (bittimäärä):  $n := 16$

Tiedonkennukortin ulostuloalueen yläraja:  $X_2 := (2^{n-1} - 1) = 32767 \cdot \text{bit}$

Tiedonkennukortin ulostuloalueen alaraja:  $X_1 := \frac{Z_1}{Z_2} \cdot X_2 = 6553.4 \cdot \text{bit}$

Anturin skaalauskerroin:  $a := \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = 0.015259 \cdot \frac{\text{bar}}{\text{bit}}$

Offset:  $b := Y_1 - \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \cdot X_1 = -100 \cdot \text{bar}$

**Tarkistetaan paineanturin näyttämä mittauskortin ulostuloalueen alarajalla:**

$$X_{\text{ala}} := X_1 = 6553.4$$

$$Y_{\text{ala}} := a \cdot X_{\text{ala}} + b = 0 \cdot \text{bar}$$

**Tarkistetaan paineanturin näyttämä mittauskortin ulostuloalueen puolessa välissä:**

$$X_{\text{puoliväli}} := X_1 + \frac{X_2 - X_1}{2} = 19660.2$$

$$Y_{\text{puoliväli}} := a \cdot X_{\text{puoliväli}} + b = 200 \cdot \text{bar}$$

**Tarkistetaan paineanturin näyttämä mittauskortin ulostuloalueen ylärajalla:**

$$X_{\text{ylä}} := X_2 = 32767$$

$$Y_{\text{ylä}} := a \cdot X_{\text{ylä}} + b = 400 \cdot \text{bar}$$

**Wika A10 0 - 100 bar (mittausalue muuttuu ja siten myös skaalausparametrit, tiedonkeruukortti pysyy samana):**

Anturin mittausalueen yläraja:  $Y_2 := 100\text{bar}$

Anturin mittausalueen alaraja:  $Y_1 := 0\text{bar}$

Anturin skaalauskerroin:  $a := \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = 0.003815 \cdot \frac{\text{bar}}{\text{bit}}$

Offset:  $b := Y_1 - \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \cdot X_1 = -25 \cdot \text{bar}$

**Tarkistetaan paineanturin näyttämä mittauskortin ulostulalueen alarajalla:**

$$X_{\text{ala}} := X_1 = 6553.4$$

$$Y_{\text{ala}} := a \cdot X_{\text{ala}} + b = 0 \cdot \text{bar}$$

**Tarkistetaan paineanturin näyttämä mittauskortin ulostulalueen puolella välissä:**

$$X_{\text{puoliväli}} := X_1 + \frac{X_2 - X_1}{2} = 19660.2$$

$$Y_{\text{puoliväli}} := a \cdot X_{\text{puoliväli}} + b = 50 \cdot \text{bar}$$

**Tarkistetaan paineanturin näyttämä mittauskortin ulostulalueen ylärajalla:**

$$X_{\text{ylä}} := X_2 = 32767$$

$$Y_{\text{ylä}} := a \cdot X_{\text{ylä}} + b = 100 \cdot \text{bar}$$

**Tilavuusvirta-anturin skaalausparametrien laskenta**

Yhtä pulssia vastaava tilavuus (yhden hampaan välin syrjäytystilavuus):  $V_{gz} := 3.000\text{cm}^3 = 0.003\text{ L}$

Pulssien määrän mittaamiseen käytettävä mittausaika:  $t_{\text{mit}} := 100\text{ms} = 0.1\text{ s}$

Pulssien lukumäärä mittausajassa (tämä saadaan tilavuusvirta-anturilta pulssiviestinä):  $n_{\text{pulssi}}$

Mittaustaaajuuden jakokerroin:  $k := 100$

Pulssitaajuus:  $f_{\text{pulssi}} = \frac{n_{\text{pulssi}}}{t_{\text{mit}}} \cdot \frac{1}{k}$

Taajuus joudutaan jakamaan tässä kohtaa kertoimella 100, koska PLC-koodin puolella mittaustaaajuus kerrotaan 100:lla tarkkuuden ylläpitämiseksi. Tällöin saadaan oikeita tuloksia mitattua.

Yleinen suoran yhtälö:  $y = a \cdot x + b$

Anturin mittausarvo mittausalueen alarajalla:  $Y_1 = a \cdot n_{\text{pulssi}} + b$

$$\Rightarrow 0 = a \cdot 0 + b$$

Offset:  $\Rightarrow b = 0$

**Tilavuusvirran yhtälö:**  $Q = V_{gz} \cdot f_{\text{pulssi}} = V_{gz} \cdot \frac{n_{\text{pulssi}}}{t_{\text{mit}}} \cdot \frac{1}{k}$

Toisaalta tilavuusvirta on:  $Q = a \cdot n_{\text{pulssi}} + (0)$

$$\Rightarrow V_{gz} \cdot \frac{n_{\text{pulssi}}}{t_{\text{mit}}} \cdot \frac{1}{k} = a \cdot n_{\text{pulssi}}$$

**Anturin skaalauskerroin:**  $\Rightarrow a := V_{gz} \cdot \frac{1}{t_{\text{mit}} \cdot k} = 0.018 \cdot \frac{\text{L}}{\text{min}}$

**Offset:**  $b := 0$

**Tarkistetaan tilavuusvirta-anturin näyttämä mittauskortin alarajalla:**

$$X_{\text{ala}} := 0$$

$$Y_{\text{ala}} := a \cdot X_{\text{ala}} + b = 0 \cdot \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

**Tarkistetaan tilavuusvirta-anturin näyttämä mittauskortin ulostuloalueen puolella välissä (80L/min):**

Jos yksi pulssi tulee minuutissa niin tilavuusvirta on:  $Q_1 := \frac{V_{\text{gz}}}{\text{min}} = 0.003 \cdot \frac{\text{L}}{\text{min}}$

Lasketaan pulssien lukumäärä  $X_{\text{puoliväli}}$  mittausajassa ( $t_{\text{mit}} = 0.1 \text{ s}$ ), kun tilavuusvirta on L/min. Käytetään laskemiseen verrantoa.

$$X_{\text{puoliväli}} := \frac{80 \frac{\text{L}}{\text{min}}}{0.003 \frac{\text{L}}{\text{min}}} \cdot \frac{1}{60 \cdot 10} \cdot k = 4444.444$$

(Tässä täytyy jakaa 600 sadalla, kun minuutti muunnetaan yksikköön 0,1s.

Lisäksi täytyy kertoa jakokertoimella

100 jotta yksiköt menevät oikein, koska skaalauskerroinissa käytettiin

jakokerrointa PLC-koodin takia.)

$$Y_{\text{puoliväli}} := a \cdot X_{\text{puoliväli}} + b = 80 \cdot \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

**Tarkistetaan tilavuusvirta-anturin näyttämä mittauskortin ylärajalla:**

$$X_{\text{ylä}} := \frac{160 \frac{\text{L}}{\text{min}}}{0.003 \frac{\text{L}}{\text{min}}} \cdot \frac{1}{60 \cdot 10} \cdot k = 8888.889$$

$$Y_{\text{ylä}} := a \cdot X_{\text{ylä}} + b = 160 \cdot \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

## LIITE J: PAINEANTURIEN VERTAILUMITTAUKSET

<b>Dynaset Oy</b>	<b>Automaattisen testausjärjestelmän käyttöönotto</b>	<b>28.8.2015</b>
	Paineanturin skaalauksen ja toimivuuden testauspöytäkirja	Ari-Pekka Ketola

### KÄYTETYT MITTALAITTEET JA MITTAUSTAAJUUS

- Wika A10 1A004MSEBU (AI\_1)
  - a. Mittausalue: 0 – 400 bar
  - b. Anturisignaali: 4 – 20 mA
  - c. Käyttöjännite: 24 V DC
  - d. Mittaustarkkuus: 1 % mittausalueesta (FSO)
- Wika A10 1A004MSG41E (AI\_3)
  - a. Mittausalue: 0 – 400 bar
  - b. Anturisignaali: 4 – 20 mA
  - c. Käyttöjännite: 24 V DC
  - d. Mittaustarkkuus: 1 % mittausalueesta (FSO)
- Trafak NAT 257736-024
  - a. Mittausalue: 0 – 400 bar
  - b. Anturisignaali: 4 – 20 mA
  - c. Käyttöjännite: 24 V DC
  - d. Mittaustarkkuus: 2 % mittausalueesta (FSO)
- Parker Service Junior SCJN-600-01
  - a. Mittausalue: 0 – 600 bar
  - b. Anturisignaali: Digitaalinäyttö
  - c. Käyttövirta: Sisäinen akku
  - d. Mittaustarkkuus: 0,5 % mittausalueesta (FSO)
- Mittaustaaajuus: 100 Hz



**LIITE K: TILAVUUSVIRTA-ANTURIEN VERTAILUMITTAUKSET**

<b>Dynaset Oy</b>	<b>Automaattinen testausjärjestelmä</b>	<b>28.8.2015</b>
	Tilavuusvirta-anturin skaalauksen ja toimivuuden testauspöytäkirja	Ari-Pekka Ketola

**KÄYTETYT MITTALAITTEET JA MITTAUSTAAJUUS**

- Kracht VC 3 F1 PS (AI\_16, testausjärjestelmä)
  - a. Mittausalue: 0,6 – 160 L/min
  - b. Anturisignaali: Pulssiviesti
  - c. Käyttöjännite: 24 V DC
  - d. Mittaustarkkuus: 0,3 % lukemasta
- Lake B4B-6HV-30
  - a. Mittausalue: 15 – 115 L/min
  - b. Anturisignaali: visuaalinen asteikko (rotametri)
  - c. Mittaustarkkuus:  $\pm 2\%$  mittausalueesta (FSO)
- Kracht VC 3 F1 PS (hydraulikoneikon panelimittari)
  - a. Mittausalue: 0,6 – 160 L/min
  - b. Anturisignaali: Pulssiviesti
  - c. Käyttöjännite: 24 V DC
  - d. Mittaustarkkuus: 0,3 % lukemasta
- Mittaustaajuus: 100 Hz

## LIITE L: TILAVUUSVIRRRAN SÄÄDÖN TOIMINNAN TESTAAMINEN

<b>Dynaset Oy</b>	<b>Automaattinen testausjärjestelmä</b>	<b>28.8.2015</b>
	Tilavuusvirran säädön testauspöytäkirja	Ari-Pekka Ketola

### KÄYTETYT MITTALAITTEET JA MITTAUSASETUKSET

- Kracht VC 3 F1 PS (AI\_16, testausjärjestelmä)
  - a. Mittausalue: 0,6 – 160 L/min
  - b. Anturisygnäali: Pulssiviesti
  - c. Käyttöjännite: 24 V DC
  - d. Mittaustarkkuus: 0,3 % lukemasta
- Wika A10 1A004MSEBU (AI\_1)
  - a. Mittausalue: 0 – 400 bar
  - b. Anturisygnäali: 4 – 20 mA
  - c. Käyttöjännite: 24 V DC
  - d. Mittaustarkkuus: 1% mittausalueesta (FSO)
- Mittaustaajuus: 100 Hz

**LIITE M: PAINEEN SÄÄDÖN TOIMINNAN TESTAAMINEN**

<b>Dynaset Oy</b>	<b>Automaattinen testausjärjestelmä</b>	<b>28.8.2015</b>
	Paineen säädön testauspöytäkirja	Ari-Pekka Ketola

**KÄYTETYT MITTALAITTEET JA MITTAUSASETUKSET**

- Kracht VC 3 F1 PS (AI\_16, testausjärjestelmä)
  - a. Mittausalue: 0,6 – 160 L/min
  - b. Anturisignaali: Pulssiviesti
  - c. Käyttöjännite: 24 V DC
  - d. Mittatarkkuus: 0,3 % lukemasta
- Wika A10 1A004MSEBU (AI\_1)
  - a. Mittausalue: 0 – 400 bar
  - b. Anturisignaali: 4 – 20 mA
  - c. Käyttöjännite: 24 V DC
  - d. Mittaustarkkuus: 1% mitta-alueesta (FSO)
- Mittaustaajuus: 100 Hz

## LIITE N: ANTUREIDEN MITTAUSEPÄVARMUUKSIEN LASKENTA

### Wika A10 0 - 400 bar paine-anturin mittausepävarmuuden

#### **laskelmat:**

Paineanturin P1  $FS_{p1} := 400\text{bar}$

mittausalue:

Valmistaja ilmoittaa paineanturin P1 tarkkuudeksi täydestä mittausalueesta FSO (sisältää epälineaarisuuden, hystereesin, nollakohdan virheen, ja mittausarvon vaihtelun IEC 61298-2 standardin mukaan. Nämä on ilmoitettu kalibrointi lämpötilassa):

$$e_{p1} := 1.0\% = 0.01$$

Paineanturin P1 standardiepävarmuus (keskihajonta) kalibrointilämpötilassa:

$$u_{p1} := e_{p1} \cdot FS_{p1} = 4 \cdot \text{bar}$$

Valmistaja ilmoittaa IO-kortin tarkkuudeksi täydestä mittausalueesta FSO (huoneen lämmössä).

$$e_{IO} := 0.3\% = 0.003$$

IO-kortin standardiepävarmuus:

$$u_{IO,p1} := e_{IO} \cdot FS_{p1} = 1.2 \cdot \text{bar}$$

Arvioidaan paineanturin valmistajan käyttämän kalibraattorin tarkkuudeksi (kalibraattorin tarkkuuden tulee vähintään olla 10 kertaa tarkempi kuin kalibroitavan paineanturin tarkkuus):

$$e_{cal,p} := 0.1\% = 0.001$$

Kalibraattorin standardiepävarmuus:

$$u_{cal,p1} := e_{cal,p} \cdot FS_{p1} = 0.4 \cdot \text{bar}$$

**Paineanturin P1 yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi  $u_{c,p1}$  kalibrointi lämpötilassa saadaan:**

$$u_{c,p1} := \sqrt{u_{p1}^2 + u_{IO,p1}^2 + u_{cal,p1}^2} = 4.2 \cdot \text{bar}$$

Paineen suhteellinen standardivirhe täydellä näyttämällä kalibrointi lämpötilassa:

$$w_{p1} = \frac{u_{c,p1}}{FS_{p1}} \cdot 100\% \quad \Rightarrow \quad w_{p1} := \frac{u_{c,p1}}{FS_{p1}} \cdot 100\% = 1.0\%$$

**Paineanturin P1 laajennetuksi epävarmuudeksi  $U_{p1}$  kalibrointilämpötilassa kattavuuskertoimella  $k = 2$  (95 % luotettavuustasolla) saadaan :**

$$U_{p1} := 2 \cdot u_{c,p1} = 8.4 \cdot \text{bar}$$

Paineanturin P1 suhteellinen laajennettuvirhe täydellä näyttämällä kalibrointilämpötilassa:

$$W_{p1} = \frac{U_{p1}}{FS_{p1}} \cdot 100\% \quad \Rightarrow \quad W_{p1} := \frac{U_{p1}}{FS_{p1}} \cdot 100\% = 2.1\%$$

**Lasketaan lämpötilavirheen aiheuttama vaikutus paineen mittaasepävarmuuteen, kun paineanturin maksimikäyttölämpötila on 80 C:**

Valmistaja ilmoittaa tyypilliseksi lämpötilavirheeksi täydestä mitta-alueesta FSO lämpötila-alueella 0-80 C:

$$e_{dT,p} := 1.0\%$$

Paineanturin P1 lämpötilavirheestä johtuva standardiepävarmuus:

$$u_{dT,p1} := e_{dT,p} \cdot FS_{p1} = 4 \cdot \text{bar}$$

**Paineanturin P1 yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi  $u_{c,p1,dT}$  saadaan (lämpötilaeron ollessa +60 C verrattuna kalibrointilämpötilaan):**

$$u_{c,p1,dT} := \sqrt{u_{p1}^2 + u_{IO,p1}^2 + u_{cal,p1}^2 + u_{dT,p1}^2} = 5.8 \cdot \text{bar}$$

Paineanturin P1 suhteellinen standardiepävarmuus täydellä näyttämällä lämpötila virheen ollessa + 60C:

$$w_{p1,dT} = \frac{u_{c,p1,dT}}{FS_{p1}} \cdot 100\% \Rightarrow w_{p1,dT} := \frac{u_{c,p1,dT}}{FS_{p1}} \cdot 100\% = 1.4\%$$

**Paineanturin P1 laajennetuksi epävarmuudeksi  $U_{p1,dT}$  saadaan kattavuuskertoimen ollessa  $k = 2$  (luotettavuustaso 95%, lämpötilaero + 60 C):**

$$U_{p1,dT} := 2 \cdot u_{c,p1,dT} = 11.6 \cdot \text{bar}$$

Paineanturin P1 suhteellinen laajennettu epävarmuus täydellä näyttämällä (lämpötilavirhe on + 60 C):

$$W_{p1,dT} = \frac{U_{p1,dT}}{FS_{p1}} \cdot 100\% \Rightarrow W_{p1,dT} := \frac{U_{p1,dT}}{FS_{p1}} \cdot 100\% = 2.9\%$$

**Wika A10 0 - 100 bar paine-anturin mittaasepävarmuuden**

**laskelmat:**

Paineanturin P2

$$FS_{p2} := 100 \text{bar}$$

mittausalue:

Valmistaja ilmoittaa paineanturin P2 tarkkuudeksi täydestä mitta-alueesta FSO (sisältää epälineaarisuuden, hystereesin, nollakohdan virheen, ja mitta-arvon vaihtelun IEC 61298-2 standardin mukaan. Nämä on ilmoitettu kalibrointi lämpötilassa):

$$e_{p2} := 1.0\% = 0.01$$

Paineanturin P2 standardiepävarmuus kalibrointilämpötilassa:

$$u_{p2} := e_{p2} \cdot FS_{p2} = 1 \cdot \text{bar}$$

Valmistaja ilmoittaa IO-kortin tarkkuudeksi  $e_{IO} = 0.003$   
täydestä mittausalueesta FSO (huoneen lämmössä).

IO-kortin aiheuttama standardiepävarmuus:  $u_{IO.p2} := e_{IO} \cdot FS_{p2} = 0.3 \cdot \text{bar}$

Arvioidaan paineanturin valmistajan käyttämän kalibraattorin tarkkuudeksi (kalibraattorin tarkkuuden tulee vähintään olla 10 kertaa tarkempi kuin kalibroittavan paineanturin tarkkuus):

$$e_{cal.p} = 0.001$$

Kalibraattorin standardiepävarmuus:  $u_{cal.p2} := e_{cal.p} \cdot FS_{p2} = 0.1 \cdot \text{bar}$

**Paineanturin P2 yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi  $u_{c.p2}$  kalibrointi lämpötilassa saadaan:**

$$u_{c.p2} := \sqrt{u_{p2}^2 + u_{IO.p2}^2 + u_{cal.p2}^2} = 1 \cdot \text{bar}$$

Paineanturin P2 suhteellinen standardiepävarmuus täydellä näyttämällä kalibrointi lämpötilassa:

$$w_{p2} = \frac{u_{c.p2}}{FS_{p2}} \cdot 100\% \quad \Rightarrow \quad w_{p2} := \frac{u_{c.p2}}{FS_{p2}} \cdot 100\% = 1 \cdot \%$$

**Paineanturin P2 laajennetuksi epävarmuudeksi  $U_{p2}$  kalibrointilämpötilassa kattavuuskertoimella  $k = 2$  saadaan :**

$$U_{p2} := 2 \cdot u_{c.p2} = 2.1 \cdot \text{bar}$$

Paineanturin P2 suhteellinen laajennettu epävarmuus täydellä näyttämällä kalibrointilämpötilassa:

$$W_{p2} = \frac{U_{p2}}{FS_{p2}} \cdot 100\% \quad \Rightarrow \quad W_{p2} := \frac{U_{p2}}{FS_{p2}} \cdot 100\% = 2.1 \cdot \%$$

**Lasketaan lämpötilavirheen aiheuttama vaikutus paineen mittaasepävarmuuteen, kun paineanturin maksimikäyttölämpötila on 80 C:**

Valmistaja ilmoittaa tyypilliseksi lämpötilavirheeksi täydestä mittausalueesta FSO lämpötila-alueella 0-80 C:  $e_{dT.p} = 1 \cdot \%$

Paineanturin P2 lämpötilavirheestä johtuva standardiepävarmuus:  $u_{dT.p2} := e_{dT.p} \cdot FS_{p2} = 1 \cdot \text{bar}$

**Paineanturin P2 yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi  $u_{c.p2.dT}$  saadaan (lämpötilaeron ollessa +60 C verrattuna kalibrointilämpötilaan):**

$$u_{c.p2.dT} := \sqrt{u_{p2}^2 + u_{IO.p2}^2 + u_{cal.p2}^2 + u_{dT.p2}^2} = 1.4 \cdot \text{bar}$$

Paineanturin P2 suhteellinen standardiepävarmuus täydellä näyttämällä lämpötila virheen ollessa + 60C:

$$w_{p2.dT} = \frac{u_{c.p2.dT}}{FS_{p2}} \cdot 100\% \Rightarrow w_{p2.dT} := \frac{u_{c.p2.dT}}{FS_{p2}} \cdot 100\% = 1.4 \cdot \%$$

**Paineanturin P2 laajennetuksi epävarmuudeksi  $U_{p2.dT}$  saadaan kattavuuskertoimen ollessa  $k = 2$  (luotettavuustaso 95%, lämpötilaero + 60 C):**

$$U_{p2.dT} := 2 \cdot u_{c.p2.dT} = 2.9 \cdot \text{bar}$$

Paineanturin P2 suhteellinen laajennettuvirhe täydellä näyttämällä (lämpötilavirhe on + 60 C):

$$W_{p2.dT} = \frac{U_{p2.dT}}{FS_{p2}} \cdot 100\% \Rightarrow W_{p2.dT} := \frac{U_{p2.dT}}{FS_{p2}} \cdot 100\% = 2.9 \cdot \%$$

**Kracht VC3 F1 PS 0-160 L/min tilavuusvirta-anturin mittausepävarmuuden laskelmat:**

Tilavuusvirta-anturin tarkkuus on ilmoitettu valmistajan katalogissa prosentteina lukemasta, joten lasketaan laajennettu mittausepävarmuus hydraulikoneikon laskennallisella maksimi tilavuusvirralla (likimain 110 L/min)

Maksimi tilavuusvirta:  $Q_{\max} := 110 \frac{\text{L}}{\text{min}}$

Valmistaja ilmoittaa tilavuusvirta-anturin tarkkuudeksi mittausravosta:  $e_q := 0.3\% = 0.003$

Tilavuusvirta-anturin standardiepävarmuus (keskihajonta) kalibrointi lämpötilassa:  $u_q := e_q \cdot Q_{\max} = 0.33 \cdot \frac{\text{L}}{\text{min}}$

Pulssiviestillä IO-korteissa ei ole mittausepävarmuutta, vaan pulssit voidaan mitata aina 100 kHz taajuuteen asti ja se riittää hyvin.

Arvioidaan tilavuusvirta-anturin valmistajan käyttämän kalibraattorin tarkkuus. Kalibraattorin tarkkuuden tulee vähintään olla 10 kertaa tarkempi kuin kalibroitavan tilavuusvirta-anturin tarkkuus. Arvioidaan kalibraattorin tarkkuudeksi:

$$e_{cal.q} := 0.03\% = 0.0003$$

Kalibraattorin standardiepävarmuus:  $u_{cal.q} := e_{cal.q} \cdot Q_{\max} = 0.033 \cdot \frac{\text{L}}{\text{min}}$

Tilavuusvirta-anturin resoluutio on valmistajan mukaan (yhden pulssin poikkeaman aiheuttama tilavuusero):

$$q_r := \frac{1L}{333.33} = 0.003 L$$

Tilavuusvirta-anturin resoluutio on 0.003L, joten mitattava arvo voi muuttua -0.0015L ... + 0.0015 L ilman että mitattavan suureen muutos vaikuttuttaisi anturin lukemaan. Tällöin tiedetään, että lukema on varmasti välillä  $q \pm a$ , jossa  $q$  on näyttämien keskiarvo ja  $-a \dots +a$  on -0.0015L ... + 0.0015 L.

Resoluutiosta johtuva mittauspoikkeama:

$$a_r := \frac{q_r}{2} = 0.0015 L$$

Tilavuusvirta-anturilla käytetty pulssien mittaamisen näyteaika  $t_{mit} := 100ms$ , joten resoluution aiheuttama tilavuusvirran poikkeama:

$$e_{q,err} := \frac{a_r}{t_{mit}} = 0.9 \cdot \frac{L}{min}$$

Resoluution aiheuttaman tilavuusvirtapoikkeaman standardiepävarmuus on tasaisesti jakautunut, joten se lasketaan tasajakauman kaavalla:

$$u_{q,res} := \frac{e_{q,err}}{\sqrt{3}} = 0.5196 \cdot \frac{L}{min}$$

**Tilavuusvirta-anturin yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi  $u_q$  kalibrointi lämpötilassa saadaan:**

$$u_{c,q} := \sqrt{u_q^2 + u_{cal,q}^2 + u_{q,res}^2} = 0.62 \cdot \frac{L}{min}$$

Tilavuusvirran suhteellinen standardiepävarmuus täydellä näyttämällä kalibrointi lämpötilassa:

$$w_q = \frac{u_{c,q}}{Q_{max}} \cdot 100\% \quad \Rightarrow \quad w_q := \frac{u_{c,q}}{Q_{max}} \cdot 100\% = 0.56\%$$

**Tilavuusvirta-anturin laajennetuksi epävarmuudeksi  $U_q$  kalibrointi lämpötilassa saadaan kattavuuskertoimen ollessa  $k = 2$  (luotettavuustasolla 95%):**

$$U_q := 2 \cdot u_{c,q} = 1.23 \cdot \frac{L}{min}$$

Tilavuusvirran suhteellinen laajennettu epävarmuus täydellä näyttämällä kalibrointi lämpötilassa:

$$W_q = \frac{U_q}{Q_{max}} \cdot 100\% \quad \Rightarrow \quad W_q := \frac{U_q}{Q_{max}} \cdot 100\% = 1.12\%$$