



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Tuomo Kaukonen

Tilastollisen prosessinohjauksen ja menetelmien kehittäminen koneistuksessa

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Diplomityö
Energiatekniikka

Vaasa 2022

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Tuomo Kaukonen	
Tutkielman nimi:	Tilastollisen prosessinohjauksen ja menetelmien kehittäminen koneistuksessa	
Tutkinto:	Diplomi-insinööri	
Oppiaine:	Energiatekniikka	
Työn ohjaaja:	Ville Tuomi	
Valmistumisvuosi:	2022	Sivumäärä: 112

TIIVISTELMÄ:

Tämä diplomityö käsittelee tilastollisen prosessinohjauksen teoriaa ja sen kehittämistä kohdeyrityksen koneistuksessa. Tilastollinen prosessinohjaus (engl. Statistical Process Control, SPC) tarkoittaa jatkuvaa seurantaa niin, että prosessi pysyisi hallinnassa. Sen avulla pystytään havaitsemaan prosessissa tapahtuvat muutokset erilaisten kaavioiden ja histogrammien avulla. Työn tavoitteiksi asetettiin selvittää kohdeyrityksen tämänhetkinen tilanne SPC:n käytön suhteen ja tämän jälkeen pyrkiä löytämään keinoja parantaa sen käyttöä tuotannossa.

Haastatteluita pidettiin työntekijöille, joiden avulla saatiin luotua selkeä kuva tuotannon tämänhetkisestä tilanteesta. Tässä yhteydessä saatiin myös työntekijöiden mielipiteet parannuskohteista ja tunnistettiin tämänhetkiset kompastuskivet, jotka ovat vaikuttaneet SPC:n käyttöön tuotannossa. Keskustelujen perusteella huomattiin, että SPC:n käyttöä ei tuotannon puolella ole juuri ollenkaan. Yksi ongelmakohta tässä on käytettävän SPC-sovelluksen vähäiset lisenssit, jonka vuoksi työntekijöillä ei ole mahdollista käyttää SPC:tä jokapäiväisessä työssä tuotannon puolella. SPC:n dataa on käytetty suurimmaksi osaksi vain laatupalaverissa.

Testikappaleelle suoritettiin toistotarkkuusmittauksia, jotta saatiin testattua mittausprosessin epävarmuus, joka vaikuttaa datan luotettavuuteen prosessin hallinnassa. Mittauksien perusteella löydettiin kehitystä vaativia kohteita, mutta myös pystyttiin todentamaan, että suurin osa mittauksista on hyvällä tasolla. Erityisesti samankeskeyssyysmitoissa havaittiin liian suurta vaihtelua.

Kohdeyrityksen koneistusprosessia käytiin läpi SPC-ohjelmiston avulla, jotta saatiin selville prosessin tämänhetkinen tila. Kerätyn datan perusteella todettiin, että prosessi on pääpiirteittäin hallinnassa, mutta myös kohdennettiin mittoja, joissa havaittiin erityisyyden läsnäolo ja puutteellinen prosessin kohdistus.

Tutkimuksen perusteella voitiin todeta, että SPC:n käytöstä voisi olla hyötyä kohdeyrityksen koneistuksessa. Haastatteluista saatujen vastausten, suoritettujen mittausten sekä SPC-ohjelmistoon kerätyn datan avulla paikannettiin kohteita, joita tulisi tulevaisuudessa kehittää, kun halutaan hyödyntää tilastollista prosessinohjausta tuotannossa.

AVAINSANAT: laaduntarkkailu, tilastollinen prosessin ohjaus, koneistus, jatkuva parantaminen

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and Innovations**

Author: Tuomo Kaukonen
Title: Developing Statistical Process Control and Process in Manufacturing
Degree: Master of Science in Technology
Programme: Energy and Information Technology
Supervisor: Ville Tuomi
Year: 2022 **Pages: 112**

SUMMARY:

This Thesis studies the theory of statistical process control and its possible development in the machining of the target company. Statistical Process Control (SPC) means continuous monitoring so that the process remains under control. It makes it possible to detect changes in the process with the help of different charts and histograms. The objectives of the work were to find out the current situation of the target company with regards to the use of SPC and then to try to find ways to improve its use in the production.

Interviews were conducted with employees to provide a clear picture of the current state of production with respect to the use of SPC. In this context, employees' opinions on areas for improvement were also obtained and the current stumbling blocks that have affected the use of SPC in production were identified. Based on the discussions, it was found that there is almost no use of SPC on the production side. One problem here is the limited licenses of the SPC application used, which makes it impossible for employees to use SPC in their day-to-day work on the production side. For the most part, SPC data has only been used in quality meetings.

Repeatability measurement test was conducted in order to find out the uncertainty in the measurement process which affects the reliability of the data in process control. Based on the measurements, objects requiring development were found, but it was also possible to verify that most of the measurements are at a good level. Excessive variation in concentricity dimensions were observed in particular.

The machining process of the target company was reviewed using SPC software to find out the current status of the process. Based on the data collected, it was found that the process was broadly under control, but measures were also targeted where the presence of a special cause and the lack of focus on the process were observed.

Based on the study, it could be concluded that the use of SPC could be useful in the machining of the target company. With the help of the answers received from the interviews, the measurements performed, and the data collected in the SPC software, objects were identified that should be developed in the future when it is desired to utilize statistical process control in the production.

KEYWORDS: quality control, statistical process control, machining, continuous improvement

Sisälllys

Kuvat	7
Kuviot	8
Taulukot	9
Lyhenteet ja symbolit	10
1 Johdanto	12
2 Tilastollinen prosessinohjaus	14
2.1 Prosessin määritelmä	14
2.2 Yleinen syy	15
2.3 Erityinen syy	15
2.4 Histogrammi	16
3 Tilastollisen prosessin ohjauksen keskeisiä käsitteitä	20
3.1 Vaihteluväli, <i>R</i> , <i>MR</i>	20
3.2 Liukuva vaihteluväli	20
3.3 Keskihajonta	21
3.3.1 Koko perusjoukon hajonta, <i>σ</i>	21
3.3.2 Näyte-erän keskihajonta, <i>s</i>	21
3.3.3 Mittaustulosten kokonaiskeskihajonta, <i>st</i> , <i>σt</i>	22
3.3.4 Hajonnan laskettu estimaatti, <i>σ</i>	22
3.4 Ohjauskortit	23
3.4.1 \bar{x}/MR tai I-MR	24
3.4.2 Ohjausrajat	25
3.4.3 Toimenpidesäännöt	27
3.4.3.1 Toimenpidesääntö 1, havainnot ohjausrajojen ulkopuolella	27
3.4.3.2 Toimenpidesääntö 2, polut	28
3.4.3.3 Toimenpidesääntö 3, jaksottaisuus	30
3.4.3.4 Toimenpidesääntö 4, lähestyminen keskiarvoa	30

3.4.4	Varoitusrajat	31
3.5	Suorituskykyluvut	32
3.5.1	Maksimisuorituskykyluku, <i>C_p</i>	32
3.5.2	Suorituskykyluku, <i>C_{pk}</i>	33
3.6	Asiakkaan ääni	34
3.7	Prosessin ääni	35
3.8	Entropia	38
3.9	Prosessin tilat	38
3.9.1	Ihanteellinen tila	38
3.9.2	Kynnystila	39
3.9.3	Kaaoksen partaalla	41
3.9.4	Kaaoksen tila	42
3.10	Tyyppin 1 ja 2 virheet prosessissa	43
4	Mittaussysteemin analyysi	45
4.1	Tyyppin 1 ja 2 virheet mittauksessa	46
4.2	Gage R&R	49
4.3	Tyyppin 1 Gage -tutkimus	50
5	Koneistuksen kehitysmenetelmät	52
5.1	DMAIC	52
5.2	PDCA	54
5.3	Seitsemän laatu työkalua	56
6	Lähtötaso koneistuksessa	58
6.1	Prosessin kulku	58
6.2	Ongelmakohdat ja riskit prosessissa	60
6.2.1	Valu	60
6.2.2	Mittaus	61
6.2.3	SPC-ohjelmiston käyttö	62
6.3	Palaute ja havainnot	63
6.4	Toimintamalli	64
6.5	Laadunseuranta	64

7	Henkilökohtaiset haastattelut	66
7.1	Tulokset haastattelujen perusteella	66
7.1.1	SPC:n käyttö kohdeyrityksessä	66
7.1.2	Parannuskohteet ja niiden valinta	67
7.1.3	Jatkuva parantaminen ja ennaltaehkäisevä laadunvarmistus	68
7.1.4	Muutoksien dokumentointi	68
7.1.5	Informaation kulku koneistuksessa	68
7.1.6	Seitsemän laatutyökalua	69
7.1.7	Päätelmät haastatteluiden perusteella	69
8	Mittausepävarmuuden määrittäminen	71
8.1	Menetelmä	71
8.1.1	Vaihtelunaiheuttajat mittausprosessissa	72
8.2	Tulokset	73
8.2.1	Mitta 1	75
8.2.2	Mitta 2	77
8.2.3	Mitta 3	80
8.2.4	Mitta 4	83
9	Prosessin läpikäynti SPC:n avulla	87
9.1	Vaativustenvastaisuudet mittausdatan perusteella	88
9.2	Prosessin suorituskyky	89
9.3	Vaativustenvastaisuudet vikailmoitusdatan perusteella	96
10	Yhteenveto	97
	Lähteet	100
	Liitteet	102
	Liite 1. Teemahaastattelun kysymykset	102
	Liite 2. Suorituskykykäyrä	103
	Liite 3. Mitta 2:n tulokset	104
	Liite 4. Mitta 2:n tulokset koneelta yksi	105
	Liite 5. Mitta 2:n tulokset koneelta kaksi	106

Liite 6. Mitta 6:n tulokset	107
Liite 7. Mitta 6:n tulokset koneelta yksi	108
Liite 8. Mitta 6:n tulokset koneelta kaksi	109
Liite 9. Mitta 20:n tulokset	110
Liite 10. Mitta 20:n tulokset koneelta yksi	111
Liite 11. Mitta 20:n tulokset koneelta kaksi	112

Kuvat

Kuva 1. Prosessiin ja erään kohdistuva toiminta. (mukaillen Kume, 1989, s. 40)	17
Kuva 2. Tyypilliset histogrammimuodot (mukaillen Kume, 1989, s. 51)	18
Kuva 3. 3 sigman sääntö (mukaillen Kume, 1989, s. 64)	26
Kuva 4. Havaintoja ohjausrajojen ulkopuolella.	28
Kuva 5. Havainnot vain toisella puolella keskiarvoa.	29
Kuva 6. Seitsemän peräkkäisen havainnon nouseva trendi.	29
Kuva 7. Jaksottaisuus havainnoissa.	30
Kuva 8. Vain noin kolmasosa havainnoista lähestyy keskiarvoa.	31
Kuva 9. Valvontarajat.	32
Kuva 10. Asiakkaan ääni kolmella tavalla (mukaillen Scherkenbach, 1991, s. 13).	35
Kuva 11. Asiakkaan ja prosessin äänen sovitus (mukaillen Scherkenbach, 1991, s. 15).	36
Kuva 12. Vakaa prosessin ääni (mukaillen Scherkenbach, 1991, s. 175).	37
Kuva 13. Epävakaa prosessin ääni (mukaillen Scherkenbach, 1991, s. 176).	37
Kuva 14. Ihanteellinen tila (mukaillen Owen, 1989, s. 102).	39
Kuva 15. Kynnystila (mukaillen Owen, 1989, s. 102).	40
Kuva 16. Kaaoksen partaalla -tila (mukaillen Owen, 1989, s. 102).	41
Kuva 17. Kaaoksen tila (mukaillen Owen, 1989, s.102).	42
Kuva 18. Todellisen ja havaitun jakauman ero. (mukaillen Wetherill, 1991, s. 47).	45
Kuva 19. Tyypin 1 virhe esitettynä toleranssirajoilla (mukaillen AIAG, 2010, s. 19).	47
Kuva 20. Tyypin 2 virhe esitettynä toleranssirajoilla (mukaillen AIAG, 2010, s. 19).	47
Kuva 21. Päätöksenteko-alueet toleranssien mukaan. (mukaillen AIAG, 2010, s. 20).	48
Kuva 22. MAIC-prosessi (mukaillen Karjalainen & Karjalainen, 2002, s. 44).	52
Kuva 23. SIPOC- prosessi (mukaillen Karjalainen & Karjalainen, 2002, s. 47).	53
Kuva 24. Demingin ympyrä (mukaillen Salomäki, 2003, s. 45).	55
Kuva 25. Keskiarvoympyrä ja suurin sovitettu ympyrä.	74

Kuviot

Kuvio 1. Mitta 1:n mittaustulokset.	75
Kuvio 2. Mitta 1:n histogrammi.	76
Kuvio 3. Mitta 1:n hajonta.	77
Kuvio 4. Mitta 2:n mittaustulokset.	78
Kuvio 5. Mitta 2:n histogrammi.	79
Kuvio 6. Mitta 2:n hajonta	80
Kuvio 7. Mitta 3:n mittaustulokset.	81
Kuvio 8. Mitta 3:n histogrammi.	82
Kuvio 9. Mitta 3:n hajonta.	83
Kuvio 10. Mitta 4:n mittaustulokset.	84
Kuvio 11. Mitta 4:n histogrammi.	85
Kuvio 12. Mitta 4:n hajonta.	86
Kuvio 13. Mitan 20 histogrammi ilman suodatusta.	93
Kuvio 14. Mitan 20 histogrammi koneelta yksi.	93
Kuvio 15. Mitan 20 histogrammi koneelta kaksi.	94

Taulukot

Taulukko 1. Prosessin kolme yleisimmin havaittua vikaa.	88
Taulukko 2. Koneelta yksi havaitut kolme yleisintä vikaa.	89
Taulukko 3. Koneelta kaksi havaitut kolme yleisintä vikaa.	89
Taulukko 4. Prosessin maksimisuorituskyky ja todellinen suorituskyky.	90
Taulukko 5. Tarkastellun prosessin kyvykkyyssindeksit	95

Lyhenteet ja symbolit

Lyhenteet

LCL	Alempi kontrolliraja (Lower Control Limit)
LSL	Alempi spesifikaatoraja (Lower Specification Limit)
MR	Liikkuva vaihteluväli (Moving range)
SPC	Tilastollinen prosessinohjaus (Statistical Process Control)
UCL	Ylempi kontrolliraja (Upper Control Limit)
USL	Ylempi spesifikaatoraja (Upper Specification Limit)

Symbolit

σ	Koko perusjoukon keskihajonta (standardipoikkeama)
σ_{actual}^2	Todellinen prosessin varianssi
σ_{msa}^2	Mittaussysteemin varianssi
σ_{obs}^2	Havaittu prosessin varianssi
$\hat{\sigma}_t$	Prosessin hajonnan estimaatti
C_g	Mittalaitteen kyvykkyyssindeksi
C_p	Prosessin pitkän ajan kyvykkyyssindeksi
C_{pk}	Prosessin lyhyen ajan kyvykkyyssindeksi
$(C_p)_{\text{obs}}$	Havaittu prosessin kyvykkyyssindeksi
$(C_p)_{\text{actual}}$	Todellinen prosessin kyvykkyyssindeksi
$(C_p)_{\text{obs}}$	Mittaussysteemin kyvykkyyssindeksi
k	Näyte-erän näytemäärä
n	Näytteen järjestysnumero
N	Perusjoukon koko
R	Vaihteluväli
s	Näyte-erän keskihajonta
s_t	Mittaustulosten kokonaiskeskihajonta
T	Prosessin tavoitearvo

x_i	Yksittäisen näytteen mittaustulos
\bar{x}	Mittaustulosten keskiarvo

1 Johdanto

Jatkuvan parantamisen perustan voi selittää yksinkertaisesti kahdella sanalla – vaihtelevuuden vähentäminen. Sama periaate toimii myös tilastolliselle prosessinohjaukselle (SPC), jossa tarkoituksena on vaihtelua vähentämällä saada prosessi pysymään tilassa, joka on hallittavissa ja ennakoitavissa. (Logothetis, 1992, s. 15) Tilastollinen prosessinohjaus on tehokas tapa muuttaa ajattelutapaa passiivisesta jälkikäteen tarkastamisesta aktiivisesti ennakoivaan toimintaan. Tämän avulla voidaan pyrkiä kehittämään prosessin tuottavuutta sekä vähentämään kustannuksia. (Li, 2021, s.1)

Nykyään monet yritykset ovat pyrkineet implementoimaan tilastollisen prosessinohjauksen toimintamallia, mutta joidenkin tehtyjen tutkimuksien mukaan lopullinen käyttöönotto yrityksissä on jäänyt hieman vajaaksi. Ruotsissa tehdyn tutkimuksen mukaan monet yritykset ovat aloittaneet tilastollisten metodien käyttöönoton, mutta vaihtelevien syiden vuoksi lopullinen metodien käyttö on vain vähäistä (Lundkvist, 2018). Tähän vaikuttavia syitä on esimerkiksi alhainen sitoutuminen käytäntöön sekä vähäinen tieto aiheesta. Roger Merrimanin (2018) suorittaman tutkimuksen mukaan kävi ilmi, että tutkimukseen osallistuvien suurten yritysten joukosta 28,5 % eivät käyttäneet SPC:tä ollenkaan. Loput tutkimukseen osallistuneet yritykset olivat implementoineet SPC:n toimintaansa jossain määrin, mutta käytön suuruutta ei tässä eroteltu. Tutkimuksessa pyrittiin löytämään myös mahdollisia esteitä käytölle ja tällaisia oli muun muassa resurssien vähäisyys, tekniikan ja terminologian vähäinen ymmärrys sekä yrityksen johdon ymmärrys laadusta ja SPC:n hyödyistä yritykselle. (Merriman, 2018, s. 52–53) Sitoutuminen, tieto ja osallistuminen ovat avain asemassa uusien toimintatapojen implementoinnissa ja erityisesti johdotoportaalla on merkittävä vaikutus kehityksessä (Logothetis, 1992, s. 2–3).

Gejdoš (2015) suoritti kokeellisen tutkimuksen tilastollisen prosessinohjauksen hyödyistä jatkuvassa parantamisessa ja totesi, että SPC:llä, erityisesti DMAIC-kehitysmallin kanssa, on positiivisia vaikutuksia prosessin ja yrityksen toimintaan. Sousa ja muut (2017) suorittivat tutkimuksen, jossa tutkittiin SPC:n käytön vaikutusta tuotteen laadun parantamisessa. Tuotetta tutkittiin SPC:n avulla ennen varsinaista tuotteen tuotantovaihetta

sekä sen aikana. Tutkimuksessa pystyttiin osoittamaan tuotteen ongelmakohdat ja ehdottamaan parannuskohteita käyttäen tilastollista prosessinohjausta.

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia ja selvittää nykytilanne kohdeyrityksen tehtaan koneistuksessa tilastollisen prosessinohjauksen käytön suhteen ja etsiä mahdollisia parannuskohteita. Tilastollinen prosessinohjaus on kohdeyrityksessä otettu aikaisemmin käyttöön, mutta tämän integroiminen tuotantoon on ollut puutteellista ja hyötyjä sen käytöstä on saatu vain vähän. Tutkimusta varten haastateltiin valikoituja henkilöitä, jotka ovat oleellisia tuotantoprosessille sekä suoritettiin testikappaleelle toistotarkkuusmittaukset. Näiden tulosten perusteella saatiin laaja kuva tuotannon tämänhetkisestä tilanteesta ja tunnistettiin kohdat, jotka vaatisivat mahdollisesti parannettavaa, jotta SPC:tä voitaisiin tulevaisuudessa käyttää sujuvasti.

Tutkimuksen alussa käydään ensin läpi oleellista teoriaa ja käsitellään toimeksiantajan lähtötilannetta. Tilastollisesta prosessinohjauksesta kerrotaan kappaleessa 2 ja tälle työlle oleelliset käsitteet käsitellään kappaleessa 3, sekä muuta oleellista teoriaa kappaleissa 4 ja 5. Toimeksiantajan tuotannon lähtötilannetta avataan ja selitetään tarkemmin kappaleessa 6.

Työssä tehdyt haastattelut ja mittaukset tuli suunnitella selkeästi ja toteuttaa tämän mukaan. Näistä saatu data on suuressa roolissa, kun pyritään löytämään kehityskohteita toimeksiantajalle. Työn eri vaiheista ja prosessista kerrotaan tarkemmin kappaleissa 7, 8 ja 9. Työn lopuksi laadittiin yhteenveto tutkimuksen tuloksista, jotka on selitetty tarkemmin kappaleessa 10.

2 Tilastollinen prosessinohjaus

Tilastollisen prosessinohjauksen, toisin sanoen SPC:n (Statistical Process Control), avulla pyritään saavuttamaan hallittu prosessi, joka on ennustettavissa ja joka tuottaa tasalaatuisia lopputuotetta. Tällaisen prosessin määrittämiseen tarvitaan dataa. (Owen, s. 16)

Tilastollisen prosessinohjauksen juuret yltävät 1920-luvulle Walter Shewhartin toteamukseen, jonka mukaan jokaisessa prosessissa ilmenee vaihtelua, jossa vaikuttavina tekijöinä on yleisiä ja erityisiä syitä. Nämä syyt vaikuttavat datan vaihtelevuuteen, mutta samalla myös prosessin ennustettavuuteen. (Wheeler s. 4–6)

Tässä kappaleessa käsitellään tilastollisen prosessinohjauksen teoriaa. Kohdeyrityksen olemassa olevat prosessit huomioon ottaen, työssä on pyritty rajaamaan teoriaosuutta niin, että vain oleelliset aiheet käsitellään.

2.1 Prosessin määritelmä

Prosessi on tapahtuma, missä syöte muutetaan tuotokseksi. Prosessi voidaan jakaa osatekijöihin (ihminen, materiaali, kone, menetelmä ja ympäristö), jotka ovat itsessään sekä syötteitä että tuotoksia. Pelkästään materiaali ei ole tuotos vaan myös muut osatekijät muuttuvat ajan saatossa. Muutokset osatekijöissä ovat luonnollista, normaalia vaihtelua ja vaikuttavat suoraan lopputuotteen laatuun. Vaihtelut voivat sekä vahvistaa että kumota toisiaan. Prosessin normaali kokonaisvaihtelu koostuu vaihtelujen yhteisvaikutuksesta. (Scherkenbach, 1991, s. 7–8; Salomäki, 2003, s. 117–118)

On olemassa kahdenlaisia prosesseja. Niitä, joiden vaihtelu on tilastollisesti kontrollissa ja niitä, joiden ei ole. Vaikka laatu olisikin tilastollisesti kontrollissa se ei silti ole vakiota vaan vaihtelevaa. Kontrollissa olevaan vaihteluun vaikuttaa ainoastaan yleinen syy, kun taas ei-kontrollissa olevaan vaihteluun vaikuttaa yleisen syyn lisäksi erityinen syy. (Shewhart, 1931, s. 6–14)

2.2 Yleinen syy

Yleinen syy on prosessissa aina mukana oleva ja jatkuvasti siihen vaikuttava häiriö, joka aiheuttaa luonnollista vaihtelua, jota sanotaan myös kohinaksi. Se koostuu monista vaihtelun lähteistä, kuten vaihteluista materiaaleissa, kappaleiden toleransseissa tai ympäristöolosuhteissa, mitkä eivät välttämättä yksistään, vaan yhdessä aiheuttavat sattumanvaraisia tuloksia. Luonnollisen vaihtelun tulokset muodostavat normaalijakauman ja siksi sille pystytään matemaattisesti määrittelemään suhteellisen luotettavat rajat, jotka kuvaavat kohinan suuruutta. (Logothetis, 1992, s. 16; Salomäki, 2003, s. 192–193) Rajojen avulla voidaan, ainakin suurin piirtein, määrittää todennäköisyys vaihtelun osumiselle ohjausrajojen sisäpuolelle. (Shewhart, 1931, s. 6)

Yleisiä syitä ei pystytä kokonaan poistamaan prosessista, mutta niiden aiheuttamaa luonnollista vaihtelua voidaan pienentää (Shewhart, 1931, s. 17–18, 131). Kohina on osa prosessia, joten sen pienentämiseen vaaditaan kehitystoimenpiteiden kohdistamista itse prosessiin. Täten yksittäisen mittaustuloksen perusteella ei voida pienentää luonnollista vaihtelua, vaan on tarkasteltava useampaa mittaustulosta pidemmältä aikaväliltä. Investoimalla ja muuttamalla toimintatapoja voidaan löytää parannuksia osatekijöihin ja täten pienentää kohinaa. Yleensä on johdon vastuulla pienentää yleisistä syistä johtuvaa vaihtelua, koska muutosta vaaditaan itse prosessiin, siihen kuinka se on suunniteltu ja rakennettu. Prosessin luonnollisen hajonnan pienentäminen vähitellen tukee jatkuvan parantamisen toimintaperiaatetta. (Logothetis, 1992, s. 16; Salomäki, 2003, s. 192)

2.3 Erityinen syy

Erityinen syy on prosessiin kuulumaton häiriö, joka voi ilmentyä äkillisesti ja joka yleensä pystytään havaitsemaan kohinasta erottuvana piikkinä. Havaitsemista helpottaa luonnolliselle vaihtelulle lasketut rajat, jolloin erityisyys näkyy poikkeamana odotettavissa olevasta vaihtelusta. Havaitsemisen helppous riippuu prosessin luonnollisen kohina suuruudesta. Erityisyyt saattavat jonkin verran peittyä suuren kohinan sekaan. Täten pienemmän kohinan prosessista on helpompi löytää erityisyyt. (Salomäki, 2003, s. 193)

Prosessia ei saa säätää erityisyyden perusteella vaan täytyy etsiä sen aiheuttaja, poistaa sen vaikutus prosessiin ja pyrkiä varmistamaan, että sitä ei ole mahdollista enää tapahtua tulevaisuudessa. Erityisyyden ilmaantuessa, muutosta ei vaadita itse prosessiin, vaan johonkin tiettyyn prosessin osaan. Tämän takia erityisyyden löytämisen ja poistamisen tulee normaalisti, mutta ei yksinomaan, hoitaa joku, joka on suoraan yhteydessä prosessiin, kuten esimerkiksi koneenkäyttäjä. (Logothetis, 1992, s. 16, 230: Salomäki, 2003, s. 193)

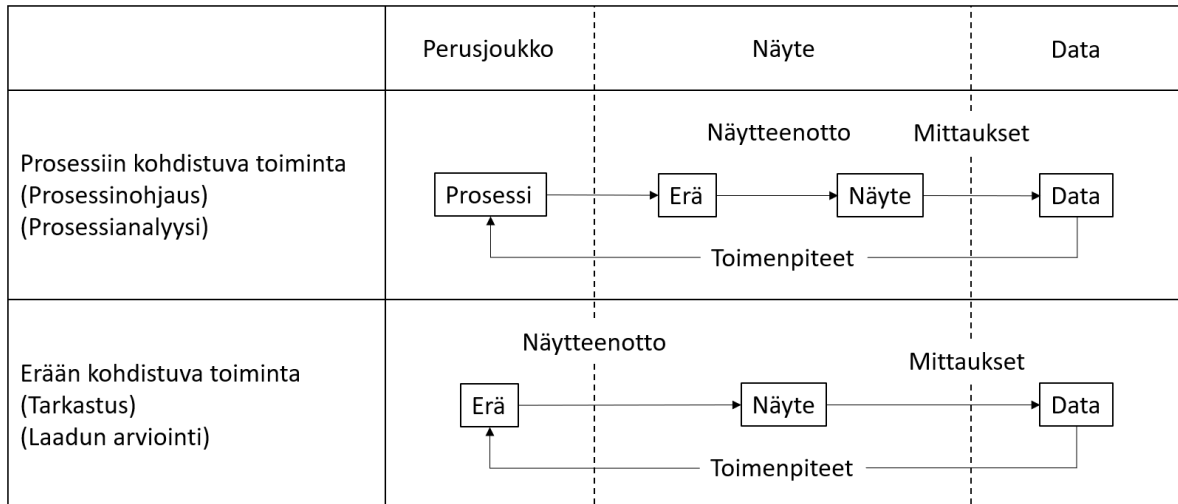
2.4 Histogrammi

Prosessi koostuu osatekijöistä (ihmiset, koneet, materiaalit, menetelmät ja ympäristö), joissa tapahtuu aina jossain määrin vaihtelua. Jopa vakioiksi oletetut tekijät eivät todellisuudessa pysy täysin vakioina. Prosessista saaduille arvoille pätee tietyt säännöt ja nämä arvot noudattavat tiettyä jakaumaa.

Näytetarkastuksessa erästä otetaan näyte ja sille tehdään mittaukset, joiden perusteella päätetään, hyväksytäänkö koko erä vai ei. Näytteen avulla ei tarkastella pelkästään näytettä, vaan koko erän ominaisuuksia. Näytteenottoon perustuvassa \bar{x} -R-kortissa tämä tarkoittaa prosessin tilan seuraamista eikä yksittäisen näytteen ominaisuuksien seuraamista.

Perusjoukoksi kutsutaan kokonaisuutta, joka koostuu tarkastelun kohteena olevista yksilöistä. Näytteenotossa erä ja \bar{x} -R-kortissa prosessi ovat perusjoukkoja. Erä koostuu joukosta tiettyjä yksilöitä, kun taas prosessi koostuu osatekijöistä, jotka yhdessä valmistavat joukon tuotteita. Kun tarkoituksena on saada tietoja perusjoukosta, otetaan siitä yksi tai useampi yksilö tarkasteluun. Tällöin yksilöt muodostavat näytteen. Näyte tulisi valita siten, että se peilaa kaikkia perusjoukon ominaisuuksia, sillä sitä käytetään koko perusjoukon ominaisuuksien arvioinnissa. Yleisesti käytetään satunnaisnäytteenottomenetelmää, jossa jokaisella yksilöllä on yhtä suuri todennäköisyys tulla valituksi. Tällä menetelmällä

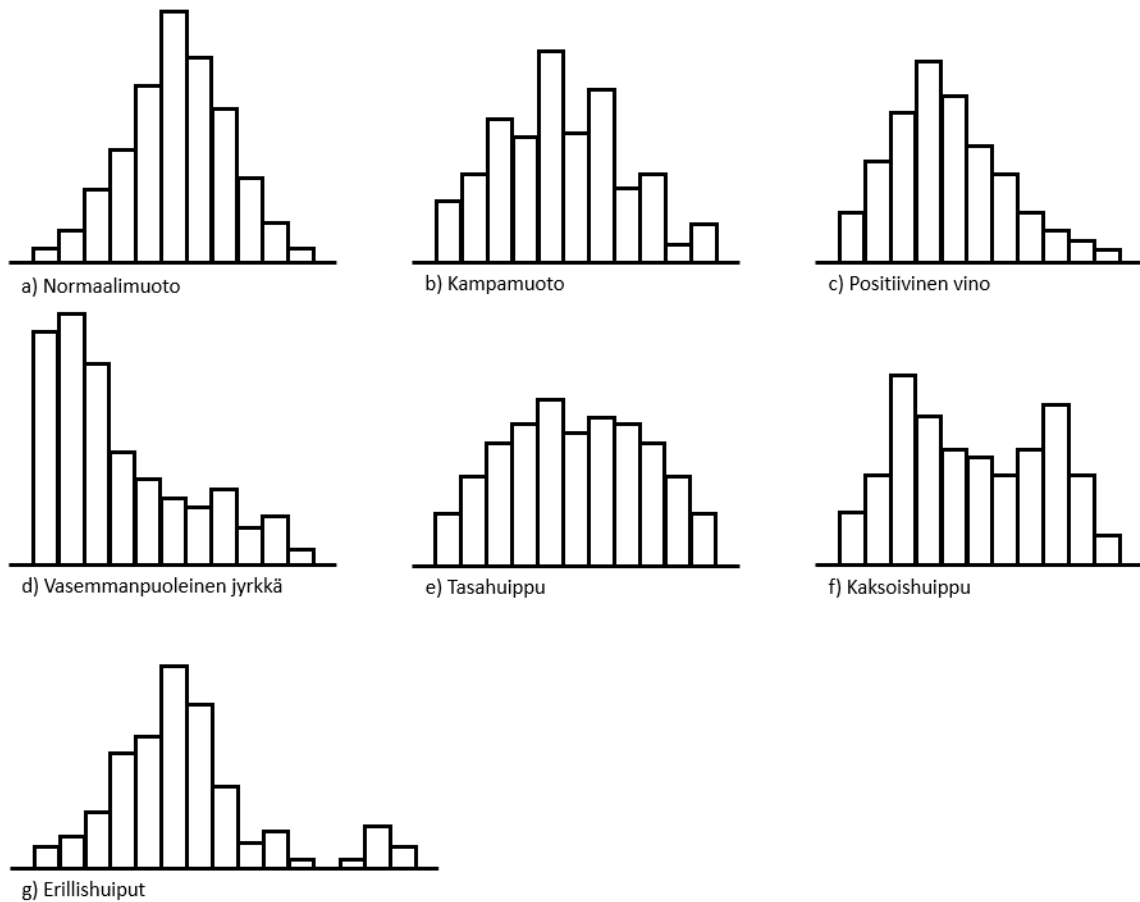
otettua näytettä kutsutaan satunnaisotokseksi. Kuvassa 1 on havainnollistettu näytteenotto-prosessi, josta ilmenee perusjoukon, näytteen ja datan välinen suhde.



Kuva 1. Prosessiin ja erään kohdistuva toiminta. (mukaillen Kume, 1989, s. 40)

Kuvasta 1 nähdään, että mittauksien avulla saatu data toimii perusjoukkoon tehtävien toimenpiteiden perustana. Kun tarkastellaan suurempaa näytettä, saadaan myös enemmän tietoa perusjoukosta. Tietomäärän kasvaessa, sen tulkinta vaikeutuu. Suuren tietomäärän tulkitseminen nopeasti onnistuu graafisen histogrammin avulla.

Analysoidessa prosessia, histogrammin muoto voi kertoa hyödyllistä tietoa perusjoukon tilasta. Alla olevassa kuvassa 2 on esitetty tyypillisiä histogrammimuotoja. (Kume, 1989, s. 39–65)



Kuva 2. Tyypilliset histogrammimuodot (mukaillen Kume, 1989, s. 51)

- Normaalimuoto on yleisin histogrammimuoto.
- Kampamuodossa joka toisen luokan esiintymistiheys on korkeampi. Muoto voi johtua arvojen pyörityksistä.
- Vinossa muodossa korkein frekvenssi on histogrammin keskikohdasta hieman oikealla tai vasemmalla puolella. Muoto voi syntyä, kun prosessin joko ylä- tai alarajaa seurataan spesifikaatorajojen avulla.
- Jyrkässä muodossa korkein frekvenssi on histogrammin keskikohdasta kaukana oikealla tai vasemmalla. Muoto voi syntyä, kun spesifikaatorajan ylittävät arvot on jätetty pois tai kun matalampaa tai suurempaa arvoa ei voi esiintyä.
- Tasahuippuisessa muodossa ei ole havaittavissa selkeää korkeinta frekvenssiä. Muoto voi johtua usean eri keskiarvon omaavan jakauman sekoittumisesta.

- f) Kaksoishuippuisessa muodossa on havaittavissa kaksi erillistä frekvenssihuippua. Muoto voi johtua kahden eri keskiarvon omaavan jakauman sekoittumisesta.
- g) Erillishuippuisessa muodossa on havaittavissa frekvenssihuipun lisäksi toinen paljon pienempi huippu etäällä frekvenssihuipusta. Muoto voi johtua virheestä mittauksessa tai häiriöstä prosessissa.

3 Tilastollisen prosessin ohjauksen keskeisiä käsitteitä

Tilastollisessa prosessin ohjauksessa käytetään erilaisia käsitteitä ja laskukaavoja, joiden tarkoitus on selventää ja auttaa tulkitsemaan saatuja tuloksia. Tässä kappaleessa selvennetään keskeisimpiä käsitteitä liittyen prosessin ohjaukseen ja näin pyritään luomaan selkeä mielikuva mitä apuvälineitä tilastolliseen prosessin ohjaukseen liittyy.

3.1 Vaihteluväli, R , MR

Vaihteluväli (engl. range, R) tarkoittaa havaintoaineiston suurimman ja pienimmän havainnon erotusta. Täten se on aina yhtä suuri tai suurempi luku kuin nolla. Näyte-erän vaihteluväli lasketaan kaavan 1 avulla. (Salomäki, 2003, s. 180)

$$R_n = \max(x_{n1}; x_{n2}; \dots; x_{nk}) - \min(x_{n1}; x_{n2}; \dots; x_{nk}), \quad (1)$$

missä

n näyte-erän järjestysnumero

k näyte-erän näytemäärä

3.2 Liukuva vaihteluväli

Liukuva vaihteluväli (engl. moving range, MR) tarkoittaa näytteen ja edellisen näytteen erotuksen itseisarvoa ja se lasketaan kaavalla 2. Liukuva vaihteluväli voidaan myös laskea näyte-erän keskiarvon ja edellisen näyte-erän keskiarvon erotuksen itseisarvona, kaavalla 3. (Salomäki, 2003, s. 180)

$$MR_n = |x_n - x_{n-1}| \quad (2)$$

tai

$$MR_n = |\bar{x}_n - \bar{x}_{n-1}|, \quad (3)$$

missä

n näytteen tai näyte-erän järjestysnumero

3.3 Keskihajonta

Keskihajonta kuvaa otoksen näytteiden leviämistä keskiarvonsa ympärille. Pieni keskihajonta tarkoittaa, että näytteet ovat jakautuneet lähelle toisiaan. (Salomäki, 2003, s. 180) Tässä kappaleessa on esitelty erilaisia keskihajonnan sovelluksia.

3.3.1 Koko perusjoukon hajonta, σ

Kun tarkoitetaan koko perusjoukon hajontaa, käytetään keskihajonnan tunnuksena sigmaa (σ). Koko perusjoukon keskihajonta lasketaan kaavalla 4. (Salomäki, 2003, s. 180)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}, \quad (4)$$

missä

σ perusjoukon keskihajonta

N perusjoukon koko

x_i yksittäisen näytteen mittaustulos

\bar{x} mittaustulosten keskiarvo

3.3.2 Näyte-erän keskihajonta, s

Koko perusjoukkoa ei ole aina mahdollista tutkia. Tällaisessa tilanteessa joudutaan tyytymään perusjoukosta otettuun otokseen, jossa on rajallinen määrä mittauksia ja jonka avulla pystytään arvioimaan eli estimoimaan hajonta. Rajallisena ja tunnettuna tulosjoukkona voi toimia esimerkiksi yksi näyte-erä. Yksittäisen näyte-erän keskihajontaa ei voi käyttää sellaisenaan kuvaamaan huomattavasti tunnettua tulosjoukkoa suurempaa joukkoa. Näyte-erän keskihajonta lasketaan kaavalla 5. (Salomäki, 2003, s. 181)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (5)$$

missä

- s näyte-erän keskihajonta
- n näyte-erän koko
- x_i yksittäisen näytteen mittaustulos
- \bar{x} mittaustulosten keskiarvo

3.3.3 Mittaustulosten kokonaiskeskihajonta, s_t , $\hat{\sigma}_t$

Tulosjoukon muodostuessa kaikista käytettävissä olevista mittaustuloksista, voidaan laskea mittaustulosten kokonaiskeskihajonta, s_t (engl. total process variation). Mikäli mittaustuloksia on riittävästi eli mieluiten vähintään 150, voidaan mittaustulosten kokonaiskeskihajontaa käyttää prosessin hajonnan parhaana estimaattina. Mittaustulosten kokonaiskeskihajonta lasketaan kaavalla 6. (Salomäki, 2003, s. 181)

$$s_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = \hat{\sigma}_t, \quad (6)$$

missä

- s_t mittaustulosten kokonaiskeskihajonta
- n kaikkien käytettävissä olevien näytteiden lukumäärä
- x_i yksittäisen näytteen mittaustulos
- \bar{x} mittaustulosten keskiarvo
- $\hat{\sigma}_t$ prosessin hajonnan estimaatti

3.3.4 Hajonnan laskettu estimaatti, $\hat{\sigma}$

Prosessin keskihajontaa ei pystytä tarkasti laskemaan, vaan sitä pitää estimoida näyteerien hajonnan (s) tai näyte-erien vaihteluvälin (R) perusteella. Sigmamerkin päällä oleva

hattu korostaa, että keskihajonta on arviointiin perustuva. Kun prosessi on hallinnassa ja se noudattaa suurin piirtein normaalijakaumaa, voidaan prosessin arvioimisessa käyttää apuna estimaattia.

Estimaatin laskenta perustuu näyte-erien sisäisen ja näyte-erien välisen vaihtelun ennustettavuuteen. Näyte-erien välinen vaihtelu on nähtävillä \bar{x} -kuvaajasta ja erien sisäinen vaihtelu MR, R tai s-kuvaajasta. Kaavat 7, 8 ja 9 ovat yleisimmät eri ohjauskorteissa käytetyt estimaatin laskentakaavat. (Salomäki, 2003, s. 180–183)

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad ; \bar{x}/R\text{-kortti} \quad (7)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{s}}{c_4} \quad ; \bar{x}/s\text{-kortti} \quad (8)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad ; x/MR\text{-kortti} \quad (9)$$

3.4 Ohjauskortit

Tärkeä apuväline prosessin hallittavuuden seuraamisessa ovat erilaiset ohjauskortit. Ohjauskortista on tulkittavissa vaikuttaako prosessiin yleisten syiden lisäksi erityissyitä eli onko prosessi tilastollisesti hallinnassa. Prosessin aikana ohjauskortti lukee dataa, jonka perusteella lasketaan ominaisia tunnuslukuja. Tällaisia ovat esimerkiksi keskiarvo ja vaihteluväli. Nämä merkitään pisteinä valvonta-alueelle, joista muodostuu kuvaaja. Ohjauskortin luoman kuvaajan avulla voidaan saada viitteitä erityissyiden läsnäolosta ja näin ollen niiden aiheuttama vaihtelu voidaan määritellä ja poistaa. (Logothetis, 1992, s. 266–267; Järnefelt, 1990, s. 9). Prosessin, johon vaikuttaa ainoastaan yleiset syyt, tunnusmerkit ovat seuraavat:

1. Kaikki pisteet ovat ohjausrajojen sisällä.
2. Keskiviivan molemmin puolin on suunnilleen saman verran pisteitä.
3. Pisteet eivät noudata mitään erityistä kaavaa.

4. Noin kolmasosa pisteistä lähentelee ohjausrajoja ja loput pisteistä on ± 1 :n keskihajonnan sisällä keskiviivasta.

Kuvaajat, jotka eivät noudata kaikkia edellä mainittuja tunnusmerkkejä, indikoivat erityisyyden vaikuttavan prosessiin, jolloin tilanne tulisi tutkia ja mahdollisesti poistaa havaitut erityisyyt.

3.4.1 \bar{x}/MR tai I-MR

\bar{x}/MR -kortissa käytetään yksittäisiä näytteitä näyte-erän sijaan. Yksittäisiä näytteitä käytetään muun muassa, kun mittauksien välinen aika on liian suuri, jolloin näyte-erän muodostamisesta syntyisi viivettä tai kun jokaista mittausta tarvitaan prosessin arviointiin. \bar{x}/MR -kortti sisältää kaksi kuvaajaa, \bar{x} -kuvaajan ja MR -kuvaajan. \bar{x} -kuvaajassa yksittäiset arvot kuvaavat prosessin vaihtelua ja jakauman keskiarvoa. MR -kuvaajassa peräkkäisistä näytteistä lasketaan liukuva vaihteluväli kuvaamaan jakauman hajontaa. Liukuva vaihteluväli on tavanomaisesti kahden peräkkäisen näytteen erotuksen itseisarvo. Tällöin käytetään taulukon kerrointa näyte-eräkoon kaksi mukaan. Jos liukuva vaihteluväli lasketaan yhden näytteen yli, käytetään kertoimena kolmea. (Salomäki, 2003, s. 240)

\bar{x} -kuvaajan keskiarvo lasketaan kaavalla 10 (Salomäki, 2003, s. 241).

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_k}{k}, \quad (10)$$

missä

k yksittäisten arvojen lukumäärä

MR -kuvaajan keskiarvo lasketaan kaavalla 11 ja 12 (Salomäki, 2003, s. 241).

$$\overline{MR} = \frac{MR_1 + MR_2 + \dots + MR_{k-1}}{k-1} \quad (11)$$

$$MR_i = |x_{i+1} - x_i|, \quad (12)$$

missä

$$i = 1 \dots k - 1$$

x-kuvaajan valvontarajat laskenta suoritetaan kaavoilla 13 ja 14 (Salomäki, 2003, s. 241).

$$UCL_x = \bar{x} + E_2 \overline{MR} \quad (13)$$

$$LCL_x = \bar{x} - E_2 \overline{MR}, \quad (14)$$

missä

E_2 taulukosta valittava kerroin

MR-kuvaajan valvontarajojen laskemiseen käytetään kaavaa 15 (Salomäki, 2003, s. 241).

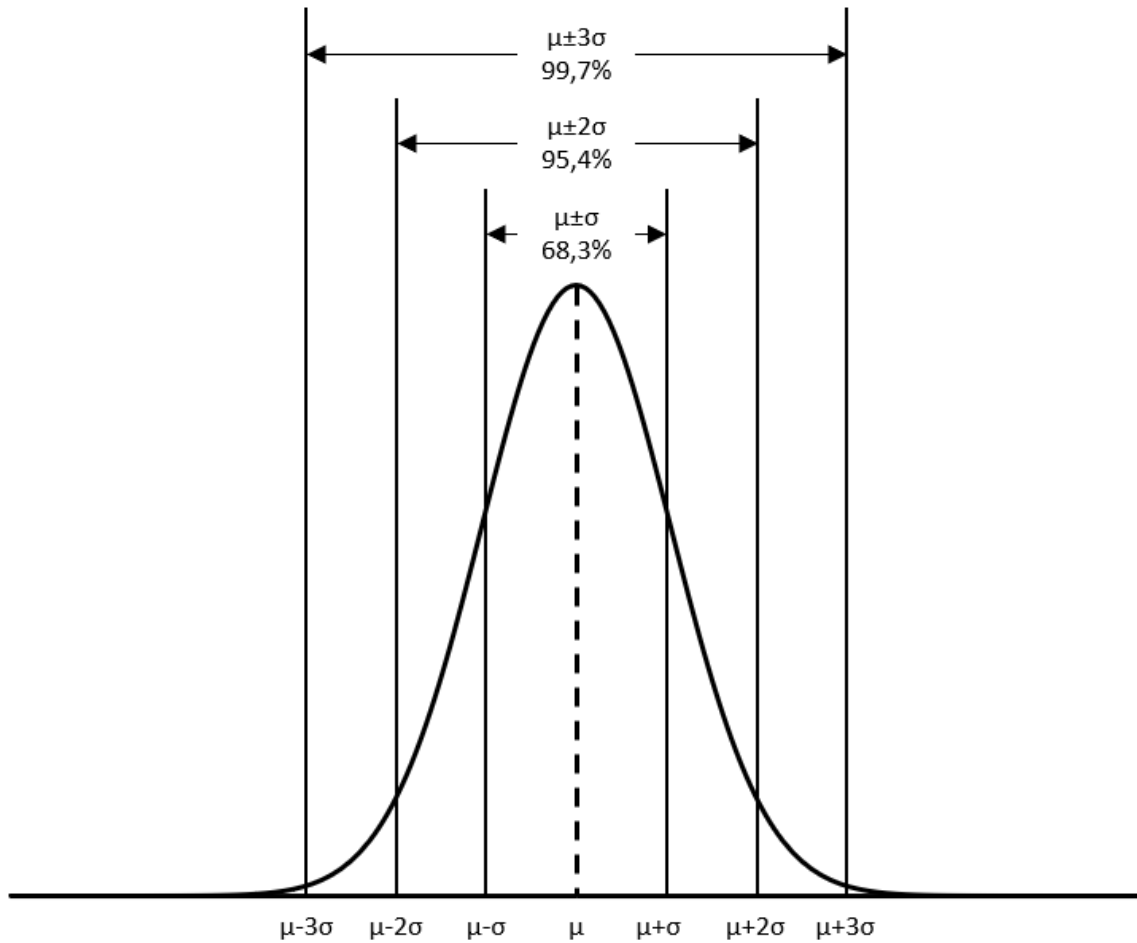
$$UCL_{MR} = D_4 \overline{MR}, \quad (15)$$

missä

D_4 taulukosta valittava kerroin

3.4.2 Ohjausrajat

Tilastollisen prosessinohjauksen apuna käytetään hajonnan estimaattiin perustuvia ohjausrajoja. Normaalisti nämä määritetään symmetrisesti keskiarvon kummallekin puolelle kolminkertaisen hajonnan estimaatin etäisyydelle.



Kuva 3. 3 sigman sääntö (mukaillen Kume, 1989, s. 64)

Tällöin ohjausrajojen väli kattaa 99,73 % havainnoista, eli lähes kaikki. Tätä kutsutaan myös 3 sigman säännöksi (Kume, 1989, s. 63). Kuvassa 3 on esitetty normaalijakauma, jolle on merkattu $\pm 3\sigma$ rajat. Ohjausrajoja on ylä- ja alaohjausrajat, jotka lasketaan kaavoilla 16 ja 17. (Salomäki, 2003, s. 206)

$$UCL = \mu + 3\hat{\sigma} \quad (16)$$

$$LCL = \mu - 3\hat{\sigma}, \quad (17)$$

missä

UCL yläohjausraja (Upper Control Limit)

LCL	alaohjausraja (Lower Control Limit)
μ	havaintojen keskiarvo
$\hat{\sigma}$	prosessin keskihajonnan laskettu estimaatti

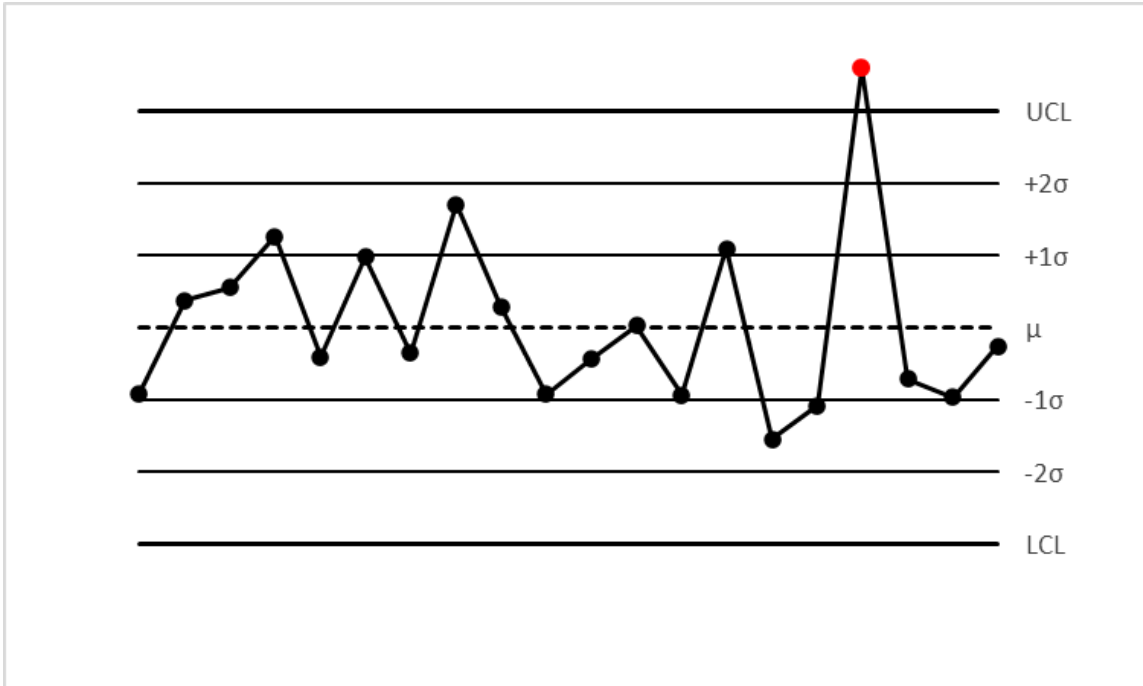
Ohjausrajat ovat indikaattoreita sille, onko prosessi hallinnassa vai ei. Rajojen ylitys kertoo, että prosessiin on vaikuttanut jokin tekijä, jonka vuoksi tilastollisesta todennäköisyydestä poikkeava havainto on tapahtunut. Tällaisessa tilanteessa tulee selvittää mistä poikkeama johtuu. (Salomäki, 2003, s. 207)

3.4.3 Toimenpidesäännöt

Erityisyyden havaitsemista varten on luotu kaikille ohjauskorteille soveltuvia yleisiä toimenpidesääntöjä. Toimenpiteitä, kuten selvittäminen, tutkiminen ja erityisyyden poistaminen, tulee tehdä, kun yksikin sääntö toteutuu. (Logothetis, 1992, s. 266–267) Seuraavissa kappaleissa on selitetty eri toimenpidesäännöt tarkemmin sekä varoitusrajat.

3.4.3.1 Toimenpidesääntö 1, havainnot ohjausrajojen ulkopuolella

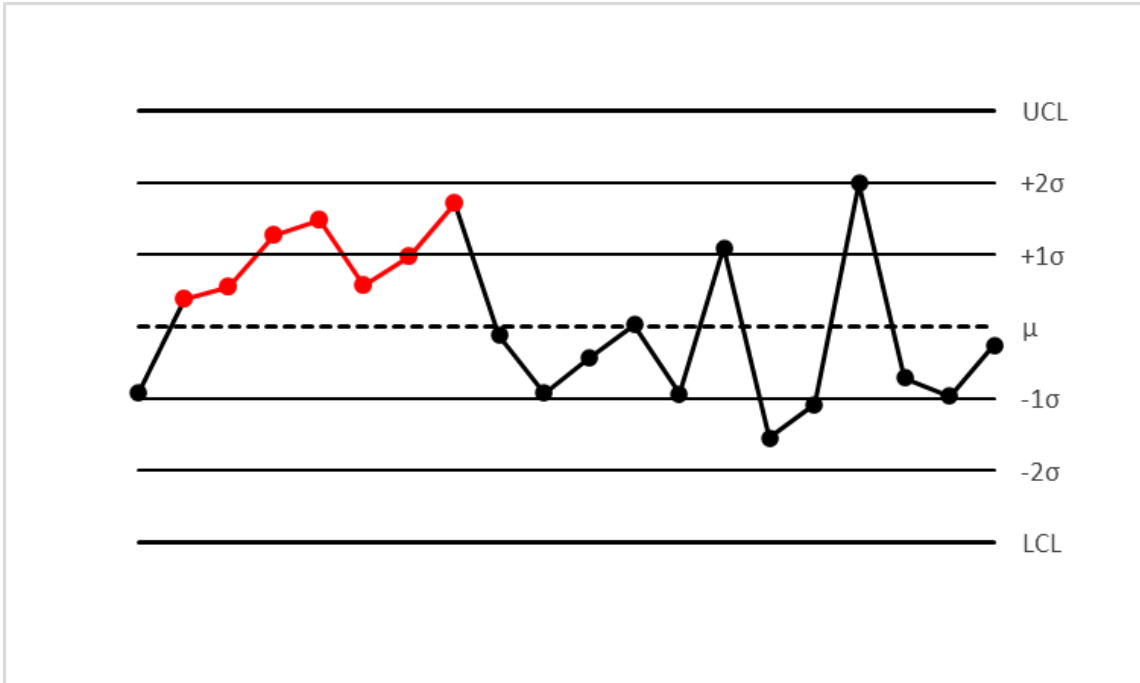
Ensimmäinen toimenpidesääntö on se, kun ohjausrajojen ulkopuolella on vähintään yksi piste. Mikäli prosessissa ei ole tapahtunut muutosta, todennäköisyys, että piste ylittää joko ylemmän tai alemman ohjausrajan sattumalta, on noin 1:1000. Ohjausrajat lasetaan uudelleen ilman ylittävää pistettä, mikäli erityisyys on löydetty ja pysyvästi poistettu. Muutoin ylittävä piste hyväksytään osaksi prosessia. Kuvassa 4 on graafin muodossa esitetty esimerkki tilanteesta, jossa yksi piste ylittää ohjausrajan. (Logothetis, 1992, s. 267–268; Kume, 1985, s. 107–109; Owen, 1989, s. 115–118.)



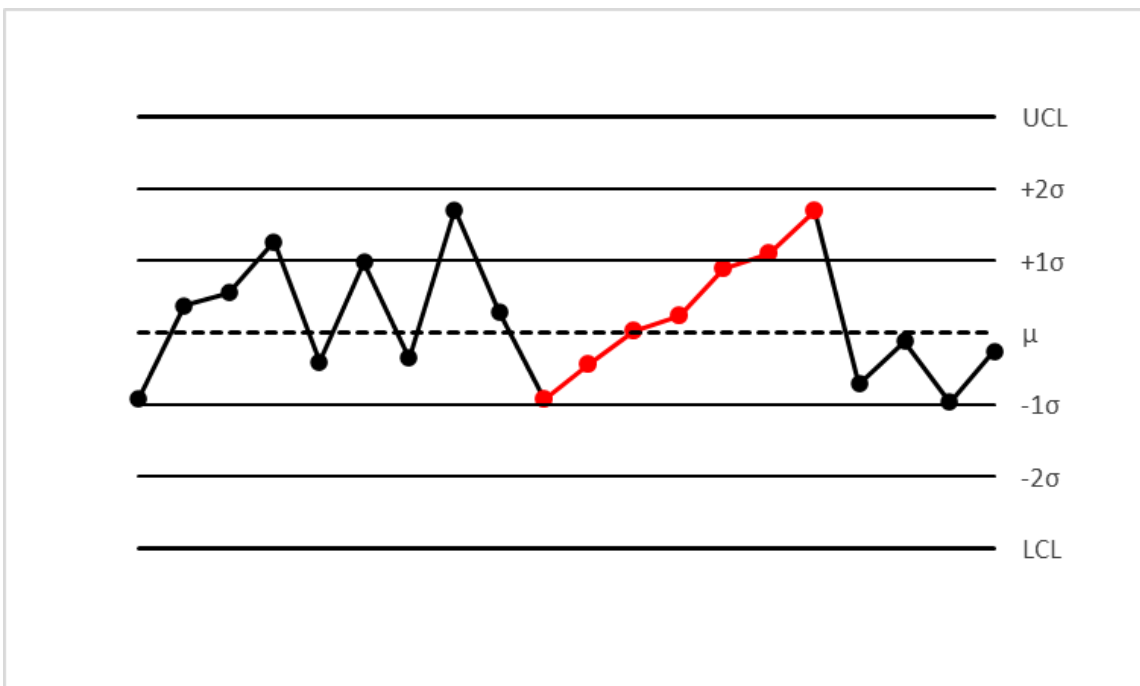
Kuva 4. Havaintoja ohjausrajojen ulkopuolella.

3.4.3.2 Toimenpidesäätö 2, polut

Kun vähintään seitsemän peräkkäistä pistettä muodostaa joko nousevan tai laskevan trendin tai sijoittuu vain toiselle puolen keskiviivaa muodostaen polun, tätä kutsutaan seitsemän säännöksi. Vastaavia tilanteita pidetään epänormaaleina, koska niiden tapahtumisen todennäköisyys on 1:128. Myös alle seitsemän pisteen polut tulkitaan epänormaaleiksi, mikäli vähintään 10/11, 12/14 tai 16/20 peräkkäisestä pisteestä sijoittuu vain keskiviivan toiselle puolen. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty esimerkki tilanne, jossa seitsemän peräkkäistä pistettä muodostaa laskevan tai nousevan trendin. (Logothetis, 1992, s. 267–268; Kume, 1985, s. 107–109; Owen, 1989, s. 115–118.)



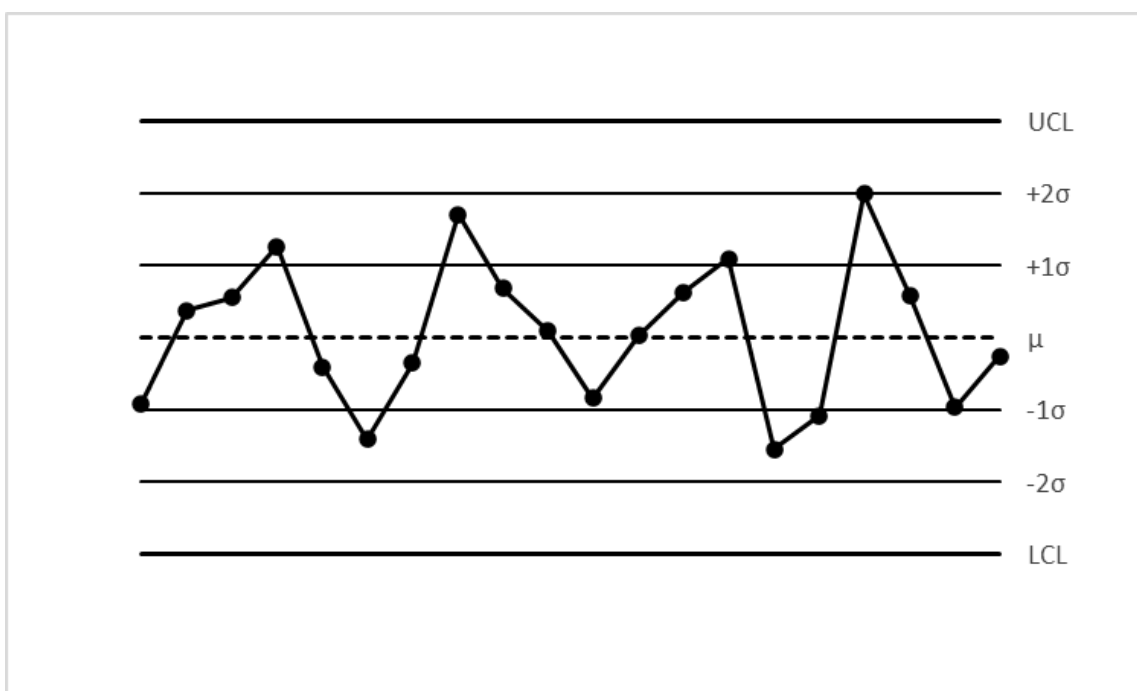
Kuva 5. Havainnot vain toisella puolella keskiarvoa.



Kuva 6. Seitsemän peräkkäisen havainnon nouseva trendi.

3.4.3.3 Toimenpidesääntö 3, jaksottaisuus

Kolmas sääntö on tilanne, jossa pisteet muodostavat helposti havaittavissa olevia ei-satunnaisia kuvioita tai jaksottaisuutta. Kuvioden aiheuttajan pitäisi olla helposti paikannettavissa. Muun muassa tietyn ajanjakson olosuhteet tai eri toimittajien materiaalien sekoittuminen voivat saada aikaan näitä. Vaikutus voi olla ei-toivottu, mutta se voi olla myös hyödyllinen. Kuvassa 7 on esitetty tällainen esimerkki tilanne. (Logothetis, 1992, s. 267–268; Kume, 1989, s. 107–109; Owen, 1989, s. 115–118.)

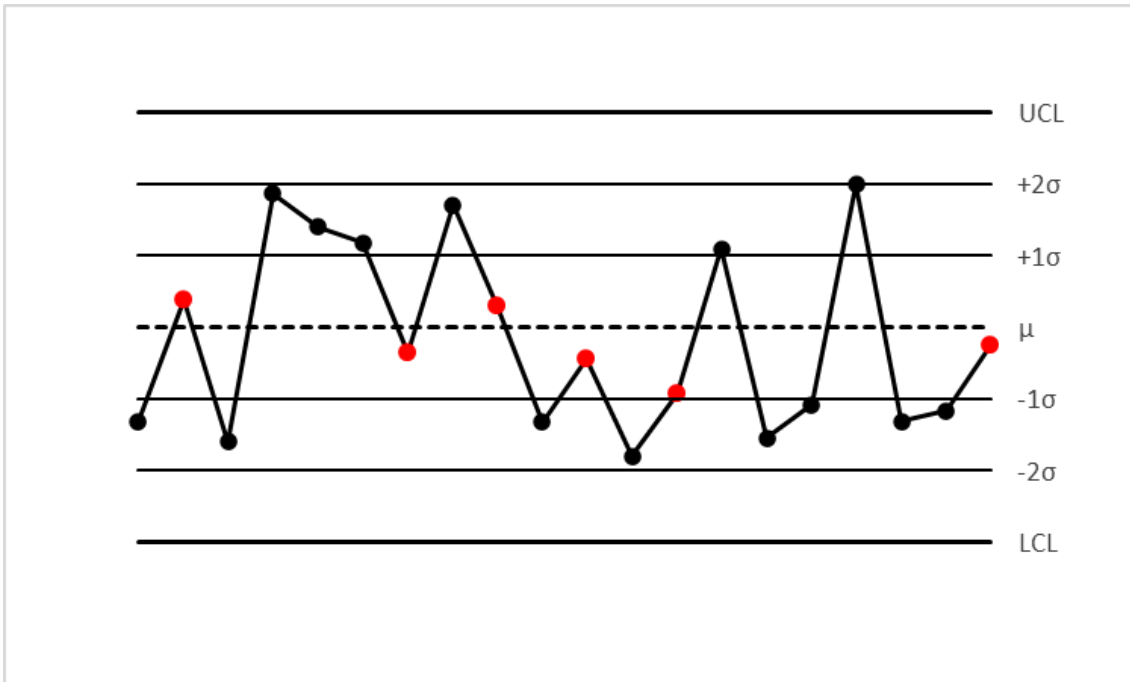


Kuva 7. Jaksottaisuus havainnoissa.

3.4.3.4 Toimenpidesääntö 4, lähestyminen keskiarvoa

Kun pisteistä reilusti alle tai yli kaksi kolmasosaa sijoittuu ± 1 :n keskihajonnan sisälle keskiviivasta, on kyseessä toimenpidesääntö 4 (ks. kuva 8). Sääntö perustuu normaalijakauman ominaisuuksiin. Normaalijakaumassa ± 1 keskihajontaa keskiviivasta rajaa noin 68,3 % jakaumasta. Tilanne voi johtua epätarkoituksenmukaisesta alaryhmiin jaosta. Alaryhmissä sekoittuvat eri perusjoukkojen arvot, aiheuttaen liian suuren etäisyyden valvontarajoissa. Alaryhmiin jakotavan muutos on välttämätöntä tällaisessa tilanteessa.

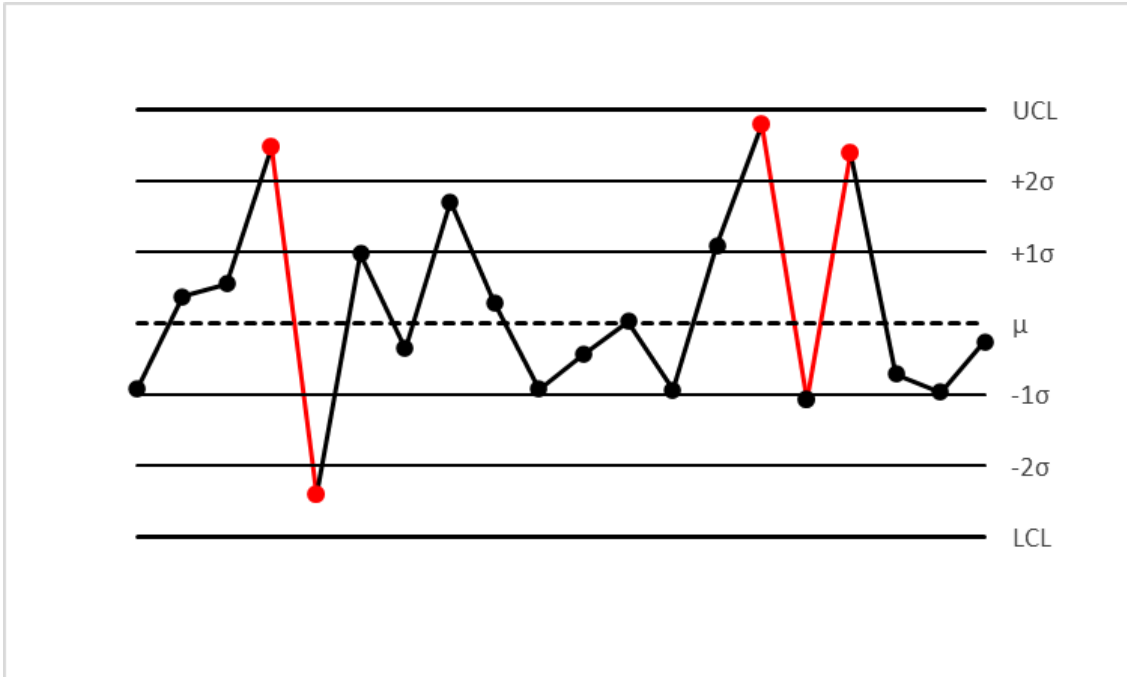
Mikäli jakauma on vino, kuten vaihteluvälikuvaajassa, tulee tämän säännön kanssa olla varovainen. (Logothetis, 1992, s. 267–268: Kume, 1989, s. 107–109: Owen, 1989, s. 115–118.)



Kuva 8. Vain noin kolmasosa havainnoista lähestyy keskiarvoa.

3.4.4 Varoitusrajat

Toimenpidesääntöjen lisäksi voidaan käyttää varoitusrajoja, jotka sijoitetaan ± 2 :n keskihajonnan päähän keskiviivasta (ks. kuva 9). Tällöin, kun kaksi kolmesta peräkkäisestä pisteestä sijoittuu ± 2 :n keskihajonnan ulkopuolelle keskiviivasta, katsotaan tämän olevan epänormaali tilanne. Epäsymmetrisen jakauman kanssa tulee olla varovainen. (Logothetis, 1992, s. 267–268: Kume, 1989, s. 107–109: Owen, 1989, s. 115–118.)



Kuva 9. Valvontarajat.

3.5 Suorituskykyluvut

Prosesseille voidaan laskea suorituskykyluvut, joiden avulla nähdään prosessista tai tuotteista mitattuja tuloksia tilastollisessa suhteessa tuotteen vaatimukseen. Tällä tavoin saadaan myös mitattua prosessin kykyä tuottaa vaatimustenmukaisia tuotteita. Jotta suorituskykyluvut voidaan laskea, tulee prosessin olla hallinnassa ja tulosten muodostaa tai lähes muodostaa normaalijakauman. (Salomäki, 2003, s. 184, s. 195) Seuraavissa kappaleissa on esitelty suorituskykyluvut ja niiden laskentakaavat.

3.5.1 Maksimisuorituskykyluku, C_p

C_p (engl. Capability index) kuvaa prosessin teoreettista maksimisuorituskykyä prosessin toleranssialueen ja nykyisen vaihtelun avulla. Toleranssialue jaetaan prosessin ohjausrajien rajaamalla alueella, joka vastaa kuutta prosessin estimoitua keskihajontaa eli 99,73 %:a vaihtelusta. Prosessin vaihtelu voi sijoittua toleranssialueen ulkopuolelle eikä sen sijaintia huomioida kaavassa. Koska kaava vaatii toleranssialueen, maksimisuorituskykylukua ei voida laskea prosessille, jossa on käytössä yksipuolinen toleranssi. Prosessin

teoreettinen maksimisuorituskykyluku lasketaan kaavalla 18. Mitä suurempi C_p arvo on, sitä parempi on prosessin teoreettinen maksimisuorituskyky. (Salomäki, 2003, s. 195–196)

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\hat{\sigma}} \quad (18)$$

3.5.2 Suorituskykyluku, C_{pk}

C_{pk} (engl. Capability index) kuvaa hallinnassa olevan prosessin suorituskykyä prosessin ala- ja ylätoleranssin, nykyisen vaihtelun ja vaihtelun keskiarvon avulla. Kun prosessin tavoitearvo on toleranssin keskellä, voidaan suorituskykyluku laskea kaavalla 19. Suorituskykyluvun kaavassa lasketaan vaihtelun keskiarvon minimietäisyys toleranssirajoihin ja täten saadaan todellinen kuva prosessin nykyisestä suorituskyvystä. Mitä suurempi C_{pk} arvo on, sitä parempi on prosessin suorituskyky. Hyvä prosessin vaatimuksena pidetään yleisesti C_{pk} arvoa, joka on suurempi kuin 1,33. (Salomäki, 2003, s. 196–198)

$$C_{pk} = \min \left(\frac{USL - \bar{x}}{3\hat{\sigma}}; \frac{\bar{x} - LSL}{3\hat{\sigma}} \right) \quad (19)$$

Mikäli prosessin tavoitearvo ei ole toleranssialueen keskellä, täytyy suorituskykyluku laskea epäkeskeisyyden korjauskertoimen k avulla. Korjauskerroin lasketaan kaavalla 20 (Salomäki, 2003, s. 196).

$$k = \frac{T - \bar{x}}{\frac{1}{2}(USL - LSL)}, \quad (20)$$

missä

T prosessin tavoitearvo

\bar{x} prosessin mittaustulosten keskiarvo

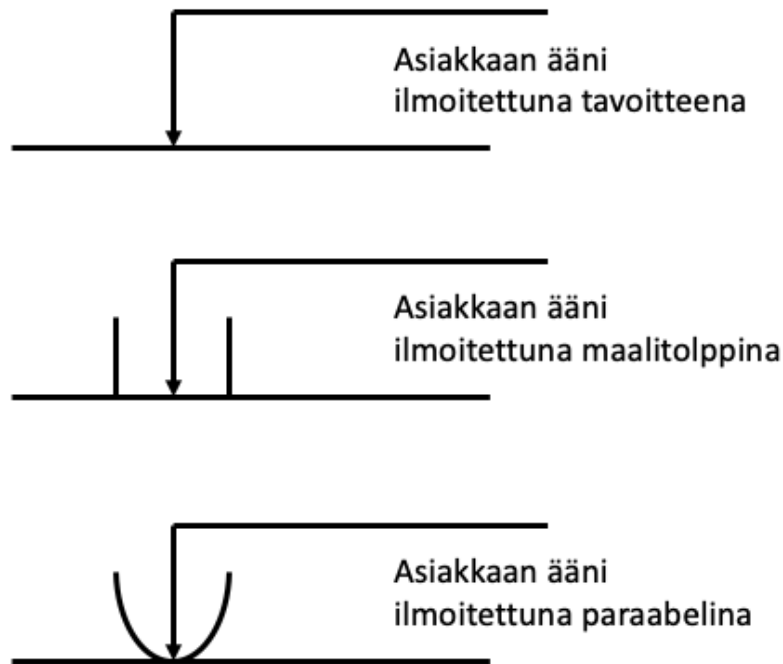
Kun korjauskerroin on laskettu, voidaan prosessin todellinen suorituskykyluku laskea kaavalla 21 (Salomäki, 2003, s. 196).

$$C_{pk} = (1 - k)C_p \quad (21)$$

3.6 Asiakkaan ääni

Asiakkaan haluista ja tarpeista sekä heidän havainnoista palveluissa tai tuotteissa käytetään termiä asiakkaan ääni. Palveluiden ja tuotteiden spesifikaatiot, kriittiset ominaisuudet sekä kehityskohteet pystytään tunnistamaan sen avulla. Asiakkaan äänen avulla voidaan mitata asiakastytyvääisyyttä ja havaita asiakastytyvääisyyteen vaikuttavat tekijät. (Karjalainen, 2002, s. 112) Asiakkaaksi ei luetella ainoastaan loppuasiakasta, vaan myös potentiaaliset asiakkaat, jonkun toisen asiakkaat sekä yhtiön sisäiset asiakkaat kuten esimerkiksi asentajat (Scherkenbach, 1991, s. 12).

Asiakkaan ääntä voidaan kuvailla monella tapaa. Tunnettuja kuvauksia ovat maalitolpiksin sanotut spesifikaatorajat sekä tavoite. Vähemmän tunnettu, mutta hyödyllinen kuvaus on paraabeli. Spesifikaatorajoja käytettäessä asiakkaan ei koeta kärsivän minkäänlaisista häviöstä, mikäli palvelu tai tuote pysyy maalitolppien sisäpuolella. Ulkopuolelle joutuessaan asiakas kärsii täyden häviön. Kuvassa 10 on esitetty erilaiset asiakkaan äänen kuvailu tavat. (Scherkenbach, 1991, s. 13: 250–251)

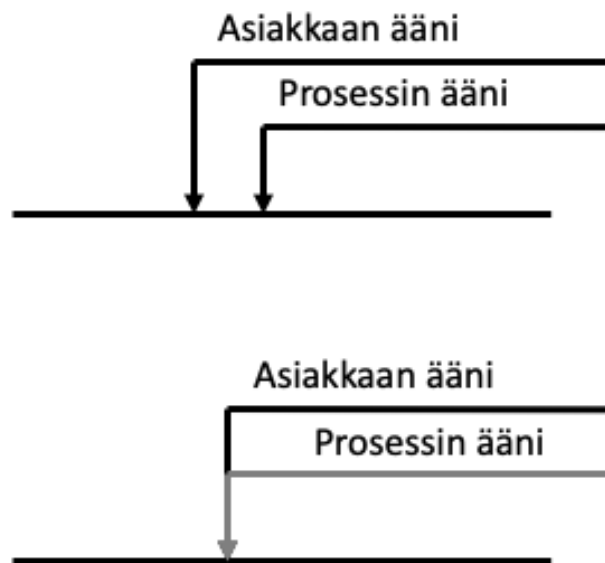


Kuva 10. Asiakkaan ääni kolmella tavalla (mukaillen Scherkenbach, 1991, s. 13).

3.7 Prosessin ääni

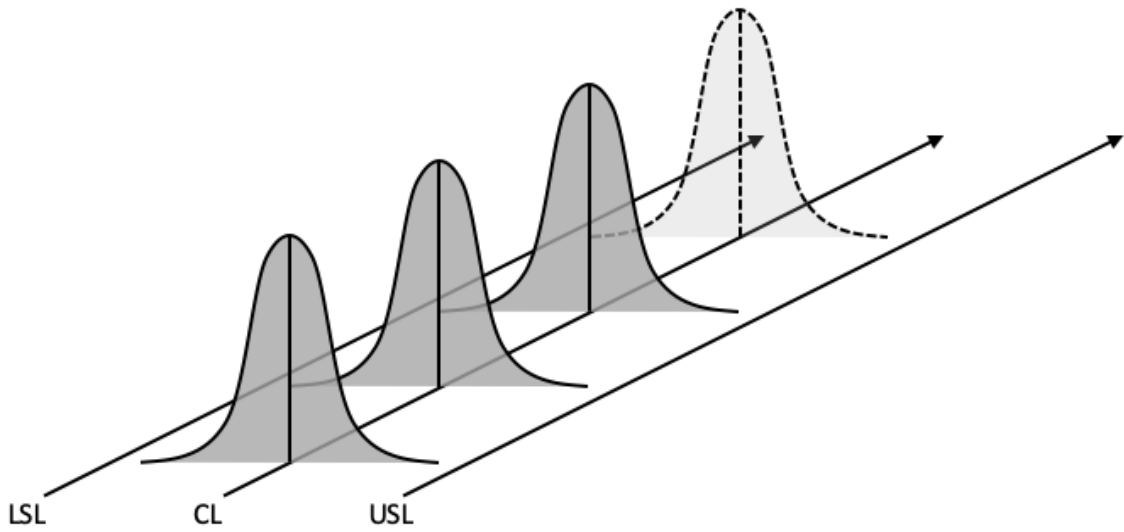
Prosessin varsinaista tuotosta tai lopputulosta sanotaan prosessin ääneksi (Scherkenbach, 1991, s. 14). Matemaattisesti se voidaan ilmoittaa prosessin lasketuilla luonnollisilla prosessirajoilla. Ne ilmoittavat onko prosessi tilastollisesti hallinnassa ja mikäli on, niin minkälaista tuotosta on tulevaisuudessa odotettavissa. (Wheeler & Chambers, 1992, s. 46: 120)

Scherkenbach (1991, s. 14) kirjoittaa, että jokaisen prosessimanagerin tehtävänä on sovittaa asiakkaan ääni prosessin äänen kanssa. Asiakkaan ääneen vaikuttamisen hän kertoo tapahtuvan muun muassa mainostamalla tai keskustelemalla asiakkaan kanssa, kun taas prosessin ääneen voidaan vaikuttaa säätämällä osatekijöitä (ihminen, materiaali, laitteet, menetelmä ja ympäristö). Kuvassa 11 on esitetty asiakkaan ja prosessin äänien sovitus yhteen.



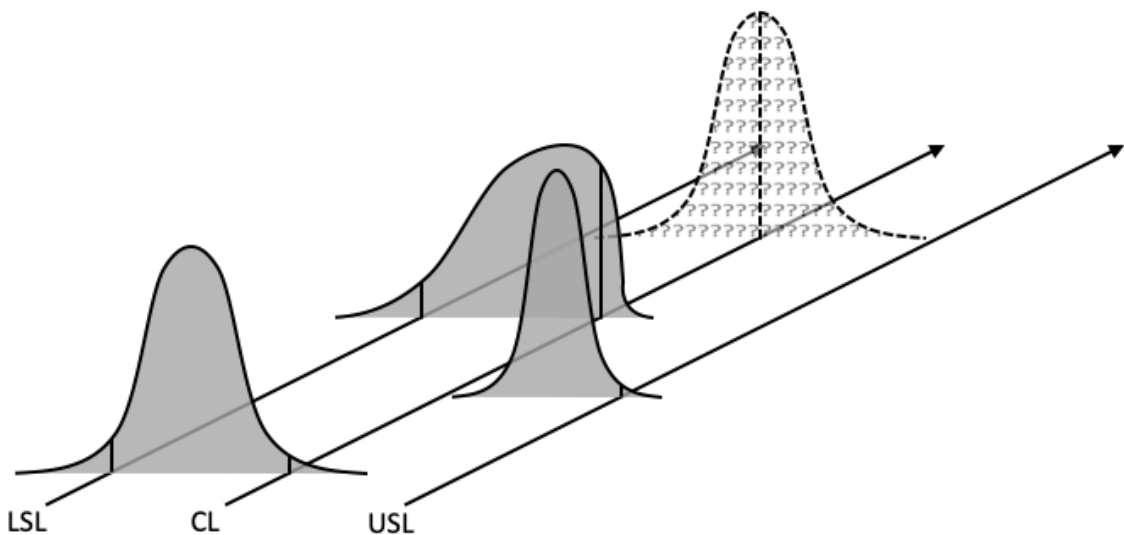
Kuva 11. Asiakkaan ja prosessin äänen sovitus (mukaillen Scherkenbach, 1991, s. 15).

Kun ajan kuluessa osatekijät pysyvät likimain muuttumattomina, on prosessin ääni vakaa ja voidaan olettaa näkevän samanlaisia tuloksia tulevaisuudessa. Kuvassa 12 on tämä esitettyä visuaalisesti. Prosesseissa tehdään päätöksiä, joiden vaikutukset näkyvät tulevaisuudessa. Mahdollisuus vaikuttaa tulevaan odotetusti on parempi prosessin äänen ollessa vakaa kuin epävakaa. Tilastollisella vakaudella voidaan lisätä tietämystä prosessista.



Kuva 12. Vakaa prosessin ääni (mukaillen Scherkenbach, 1991, s. 175).

Kun ajan kuluessa osatekijät muuttuvat, on prosessin ääni epävakaata ja tulevaisuuden ennustaminen haastavaa. Tulevaisuuden ennustaminen perustuu aiempaan tietämykseen aiheesta, mutta nykyisen datan osoittaessa epävakaata prosessin ääntä, myös usko tietämykseen vähenee. Kuvassa 13 on kuvattuna epävakaata prosessin ääni. (Scherkenbach, 1991, s. 175–176)



Kuva 13. Epävakaata prosessin ääni (mukaillen Scherkenbach, 1991, s. 176).

3.8 Entropia

Universaali voima, entropia, vaikuttaa jokaiseen prosessiin, aiheuttaen kulumista, heikkenemistä, hajoamista, rikkoutumista ja epäonnistumista. Entropian takia prosessin tila ei pysy jatkuvasti vakiona, vaan muuttuu hiljalleen kohti kaaosta. Välttyäkseen kaaokselta, entropian aiheuttamia vaikutuksia pitää jatkuvasti korjata. Jotta korjaukset on helppo suorittaa, täytyy entropian vaikutukset kyseiseen prosessiin olla tiedossa. On erittäin vaikeaa korjata mitään, jos ei tiedetä, että jotain pitää korjata. Prosessi kuitenkin ajautuu väistämättömästi kaaokseen, mikäli entropian vaikutukset pääsevät hallitsemaan prosessia, koska niitä ei ole korjattu. (Wheeler & Chambers, 1992, s. 16)

3.9 Prosessin tilat

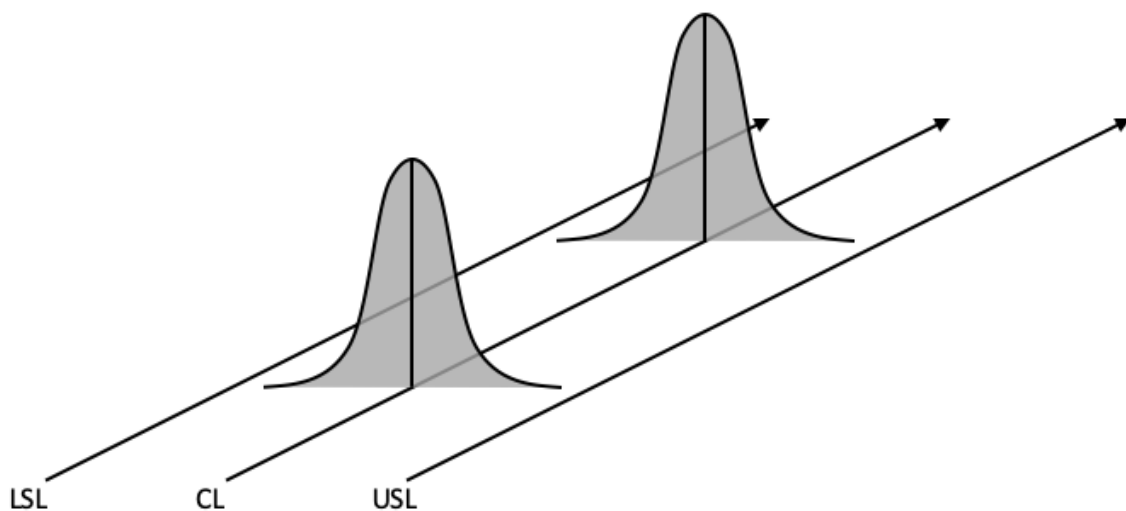
Wheeler ja Chambers (1992, s. 12–17) kertovat, että prosessin jatkuvalla parantamisella voidaan saavuttaa ihanteellinen tilanne, jossa 100 % tuotteista ovat vaatimustenmukaisia, kun samalla prosessi on tilastollisesti hallinnassa. Tilanne ei kuitenkaan ole pysyvä, vaan kummatkin saavutukset ovat alttiita huonontumaan. Yhdessä nämä muodostavat prosessin neljä mahdollista tilaa. Jokainen tuotantoprosessi kuuluu yhteen näistä tiloista.

3.9.1 Ihanteellinen tila

Prosessin ollessa ihanteellisessa tilassa, se tuottaa 100 % vaatimustenmukaisia tuotteita ja se on tilastollisesti hallinnassa. Hyviä tuotteita tulee niin kauan, kun prosessi pysyy hallinnassa. Kuvassa 14 on esitettyä ihanteellinen tila visuaalisesti. Kuvassa nuolet esittävät ala- ja ylätoleranssirajoja, toleranssialueen keskiviivaa sekä ajan kulumista. Tila pysyy ihanteellisena, mikäli seuraavat neljä ehtoa toteutuvat:

1. Ajan kuluessa, prosessin täytyy olla luontaisesti vakaa.
2. Prosessia tulee käyttää johdonmukaisesti ja vakaasti, ei tehdä mielivaltaisia muutoksia.
3. Prosessin keskiarvon tulee asettaa asianmukaiselle tasolle ja ylläpitää siinä.

4. Prosessin luonnollisen hajonnan tulee mahtua tuotteelle määritettyjen toleranssirajojen sisään.



Kuva 14. Ihanteellinen tila (mukaillen Owen, 1989, s. 102).

Prosessin ohjauksettien käyttö on ainoa keino, jolla tiedetään, että nämä neljä ehtoa ovat voimassa ja jolla niitä pystytään ylläpitämään päivästä toiseen. Ohjauksettien avulla pystytään havaitsemaan ongelmat, ennen kuin ne ovat liian vakavia aiheuttaakseen vaatimustenvastaisia tuotteita. Prosessin pitäminen ihanteellisessa tilassa, valvontakorttien aktiivisella käytöllä, johtaa prosessin jatkuvaan parantamiseen, mikä tekee tuotteista entistä yhteneväisempiä. Tämä lisää tuottavuutta ja pienentää kustannuksia. Kappaleessa 3.4 on kerrottu tarkemmin ohjauksettien ja niihin liittyvistä käsitteistä. (Wheeler & Chambers, 1992, s. 12–17)

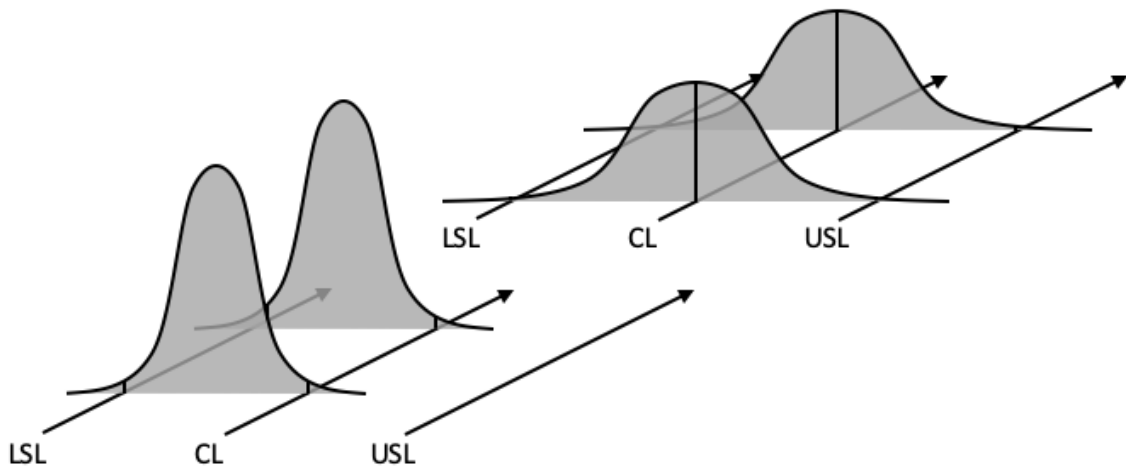
3.9.2 Kynnystila

Kynnystilassa prosessi tuottaa muutamia vaatimustenvastaisia tuotteita, vaikka prosessi on tilastollisesti hallinnassa. Koska prosessi on tilastollisessa hallinnassa, pysyy tuotteen vaihtelu johdonmukaisena niin kauan kun prosessi on hallinnassa. Tällaisessa tilanteessa

vaatimustenvastaisia tuotteita tulee syntymään sama määrä aina, niin kauan, kunnes prosessia tai toleranssirajoja muutetaan.

Osa vaatimustenvastaisista tuotteista päätyy aina asiakkaalle, mikäli prosessi niitä tekee. Perinteisellä 100 % tarkastuksella voidaan vähentää asiakkaalle päätyvien vaatimustenvastaisten kappaleiden lukumäärää, mutta ei poistaa kokonaan. Vaatimustenvastaisten kappaleiden valmistuksen lopettaminen on tähän oikea ratkaisu. Koska prosessin vaihtelu on jo johdonmukaista, tulee kynnyksessä muokata itse prosessia.

Vaatimustenvastaisien tuotteiden synty saattaa johtua siitä, että prosessin keskiarvoa ei ole kohdistettu tai se on kohdistettu väärin. Tässä tapauksessa selvittää suhteellisen yksinkertaisilla toimenpiteillä. Kuvan 15 vasemmalla on esitettyä prosessin kohdistuksen puutos. Jos taas prosessille ennalta määritellyt toleranssirajat ylittyvät prosessin luonnollisen vaihtelun takia, tulee joko prosessin vaihtelua tai toleranssirajoja muuttaa.



Kuva 15. Kynnyksinä (mukaillen Owen, 1989, s. 102).

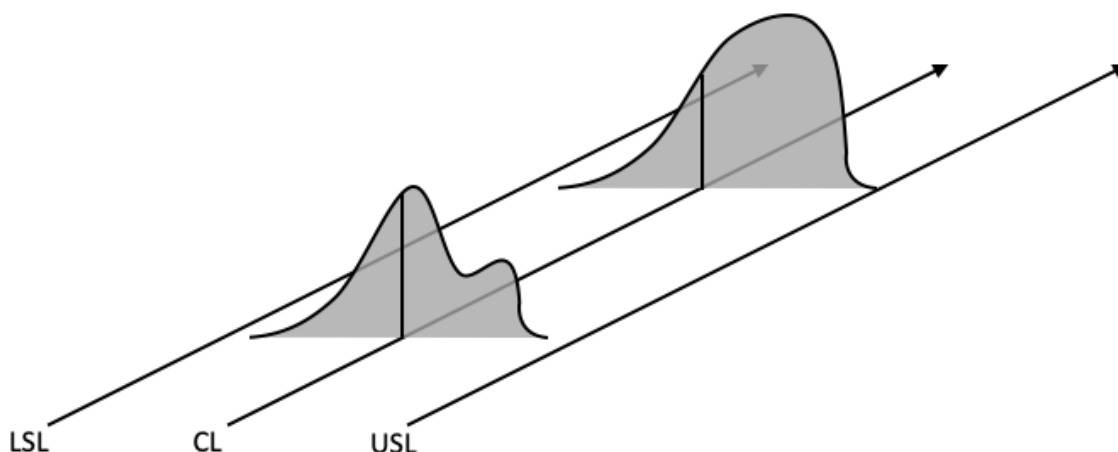
Kuvassa oikealla on esitettyä liian suuri prosessin luonnollinen vaihtelu. Toleranssirajojen muutokseen vaaditaan asiakkaan hyväksyntä, mikä voi olla haastavaa saada. Hyväksynnän saamista voidaan helpottaa osoittamalla, että prosessi on vakaa ja

johdonmukainen. Tämä pystytään toteamaan ohjaukorttien avulla. (Wheeler & Chambers, 1992, s. 12–17)

3.9.3 Kaaoksen partaalla

Tässä tilassa prosessi tuottaa 100 % vaatimuksenmukaisia tuotteita, mutta se ei ole tilastollisesti hallinnassa. Vaatimustenvastaisia tuotteita ei päädy asiakkaalle, niin kauan kun prosessi tuottaa 100 % hyviä tuotteita. Tällainen tilanne ei kuitenkaan jatku loputtomiin. Tuotteiden ominaisuudet muuttuvat jatkuvasti ja koska prosessi ei ole tilastollisesti hallinnassa, prosessin vaihtelu on epäjohdonmukaista.

Kun prosessi ei ole tilastollisessa hallinnassa, siihen satunnaisesti vaikuttaa jokin erityisyys. Tuotteiden ollessa 100 % vaatimustenmukaisia, helposti ajatellaan, että prosessissa on kaikki kunnossa, vaikka erityisyyt muuttavatkin jatkuvasti prosessia. Tästä aiheutuu lopulta se, että aikanaan tulee myös vaatimustenvastaisia tuotteita. Tilanne tulee yllättäen ja siksi voi olla vaikeaa tietää miksi siihen päädyttiin ja kuinka siitä päästään pois. Kuvassa 16 on esitettyä kaaoksen partaalla -tilan prosessin vaihtelu.



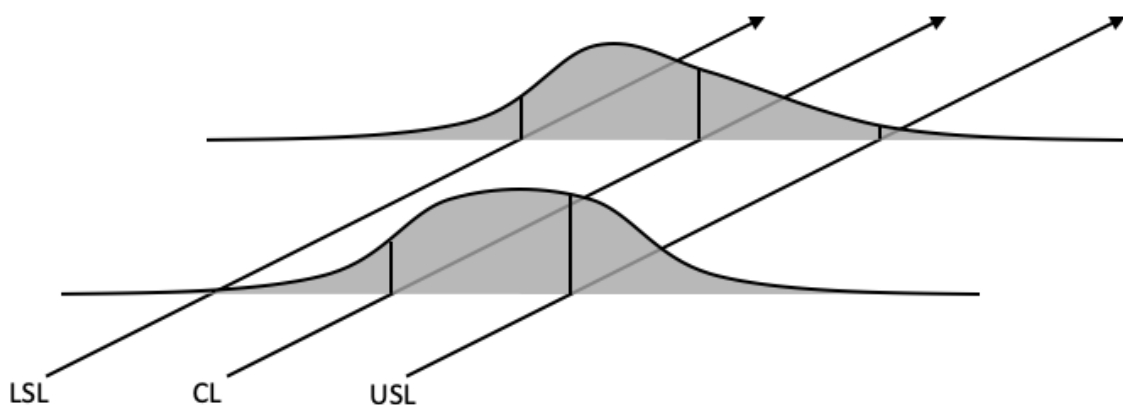
Kuva 16. Kaaoksen partaalla -tila (mukaillen Owen, 1989, s. 102).

Kaaoksen partaalla -tilassa luullaan, että prosessi on tuottajan hallinnassa, vaikka todellisuudessa erityisyyt hallitsevat sitä. Erityisyyt muuttavat prosessin jakaumaa ja

keskiarvoa, tehden tulevan ennustamisesta mahdotonta. Jo seuraava tuote saattaa olla vaatimustenvastainen, ilman minkäänlaista varoitusta, jolloin prosessin tila muuttuu kaaoksen partaalta kaaokseen. Erityisyyden poistaminen vaati ohjauskorttien käyttämistä ja se on ainoa keino kaaoksen partaalta pois pääsemiseksi. (Wheeler & Chambers, 1992, s. 12–17)

3.9.4 Kaaoksen tila

Kaaoksessa prosessi tuottaa vaatimustenvastaisia tuotteita eikä se ole tilastollisesti hallinnassa. Vaatimustenvastaisten tuotteiden määrä vaihtelee jatkuvasti, joten ei voida luotettavasti sanoa mikä osuus tuotteista tulevaisuudessa on huonoja. Yleensä ei tiedetä mitä prosessissa tulisi korjata, vaikka tiedetään, että on ongelmia. Erityisyyt saavat prosessissa aikaan satunnaisia muutoksia, mitkä tekevät ongelmien korjaamisesta erittäin haastavaa. Prosessiin tehdyn tarvittavan korjaavan toimenpiteen jälkeen erityisyyt jatkavat prosessin muuttamista, johtaen vain lyhytaikaiseen helpotukseen. Prosessiin tehty tarpeeton muokkaus puolestaan saattaa virheellisesti näyttää onnistumiselta, johtuen satunnaisesta muutoksesta prosessissa. Kuvassa 17 on esitettyä kaaoksen tila. Kaaoksesta pois pääsemiseksi, ainoa keino edistyä on ensiksi poistaa erityisyyt, joka onnistuu ainoastaan ohjauskortteja käyttämällä. (Wheeler & Chambers, 1992, s. 12–17)



Kuva 17. Kaaoksen tila (mukaillen Owen, 1989, s.102).

3.10 Tyypin 1 ja 2 virheet prosessissa

Tilastollista prosessinohjausta käytettäessä, prosessista otetuiden näytteiden avulla lasketaan prosessin keskiarvo ja vaihteluväli. Tuloksena voimme päätellä, onko prosessi tilastollisesti hallinnassa. Prosessin jakauman leveyden muutos, keskiarvon muutos, tai tietyn ongelman esiintyminen tietyinä ajankohtana, voi olla syy miksi prosessi ei ole tilastollisesti hallinnassa. Prosessin todellinen jakauman leveys ja keskiarvo voivat olla vakioita, vaikka näytteenotolle ominaisen vaihtelun vuoksi näytteiden osoittamat prosessin jakauman leveys ja keskiarvo vaihtelevatkin näytteittäin. Kun näytehavainnot piirretään ohjauskorttiin, syntyy kaksi mahdollista riskiä.

1. Tyypin 1 riski: prosessiin tehdään korjaavia toimenpiteitä, vaikka todellista muutosta prosessissa ei ole tapahtunutkaan.
2. Tyypin 2 riski: prosessiin ei tehdä korjaavia toimenpiteitä, vaikka oikea muutos prosessissa on kuitenkin tapahtunut.

Tyypin 1 riskissä, näyte indikoi jotain harvinaista trendiä tai, että ohjausrajat ovat ylittyneet, vaikka muutosta ei ole tapahtunut. Täten syntyy väärä toimintapäätös. Tyypin 2 riski on tyypin 1 riskin vastakohta. Näyte ei viittaa mihinkään trendiin ja on ohjausrajojen sisällä. Tämän takia ei huomata, että prosessissa on tapahtunut muutoksia. Kun prosessissa tapahtuneen muutoksen koko kasvaa, tyypin 2 riskin mahdollisuus pienenee. (Wetherill & Brown, 1991, s. 86–87)

Peruseriaatteena on, että kun ohjauskortit indikoivat, ettei prosessi ole hallinnassa, on ryhdyttävä jonkinlaisiin toimiin. Toimet eivät välttämättä ainoastaan tarkoita erityisyyden poistamista, vaan ne voivat myös olla yksinkertaisesti tutkimista tai ennaltaehkäisevää toimintaa. Tutkimalla voidaan löytää erityisyyttä, jonka vaikutus prosessiin voi olla jopa positiivinen ja jota kannattaa jäljitellä tulevaisuudessa. (Logothetis, 1992, s. 234)

Näiden kahden vastakkaisen riskin vuoksi, ohjauskorttien suunnittelussa joudutaan tekemään kompromissi. Tavanomaisesti ohjausrajat sijoitetaan ± 3 :n keskihajonnan

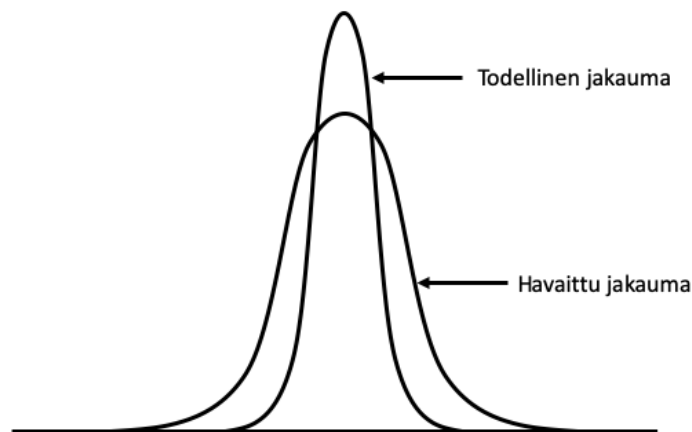
päähän jakauman keskiarvosta, jolloin todennäköisyys, että näyte osuu rajojen ulkopuolelle, on noin 0,27 %. Myös $\pm 3,09$:n keskihajonnan päähän jakauman keskiarvosta sijoitettavia ohjausrajoja käytetään. Tällöin todennäköisyys rajojen ylittymiselle on noin 0,2 %. Käytettäessä kumpia tahansa ohjausrajoja, todennäköisyys, että näyte osuu rajojen ulkopuolelle, on riittävän pieni, että voidaan olettaa sen johtuvan enemmän erityisyydestä kuin sattumasta.

Perusta erityisyyden läsnäolon määrittämiselle perustuukin siis siihen, että tapahtumalla on erityisen pieni todennäköisyys tapahtua sattumalta. Prosessiin tehtävät toimenpiteet täytyvätkin täten pohjautua epätodennäköisiin tapahtumiin. (Wetherill & Brown, 1991, s. 87; Logothetis, 1992, s. 234)

Ohjausrajojen lisäksi yleinen käytäntö on käyttää varoitusrajoja. Yleisesti rajat sijoitetaan ± 2 :n ja hieman harvemmin $\pm 1,96$:n keskihajonnan päähän jakauman keskiarvosta. Näytteen osuminen ± 2 :n keskihajonnan rajan ulkopuolelle, tapahtuu noin 4,6 % todennäköisyydellä. Tapahtuma ei ole vielä riittävän epätodennäköinen erityisyyksi, mutta kahden perättäisen näytteen osuminen varoitusrajojen ulkopuolelle on. Sen todennäköisyys on noin 0,2 %. Jos kaksi peräkkäistä näytettä ylittää saman rajan, on todennäköisyys sille noin 0,05 %. Kun käytetään $\pm 1,96$:n keskihajonnan varoitusrajoja, todennäköisyydet ovat vastaavasti noin 0,25 % ja 0,06 %. (Wetherill & Brown, 1991, s. 87–88)

4 Mittaussysteemin analyysi

Mittaus on prosessin vaihe, joka antaa palautetta edellisistä prosessin vaiheista. Palaute koostuu mitatusta vaihtelusta, jonka avulla pitäisi pystyä kertomaan lopputuloksen kelvollisuus. Mittaustulos ei kuitenkaan koskaan ole täysin oikea, vaan parhaimmassakin tapauksessa hyvä likiarvo (ks. kuva 18). Usein virheellisesti oletetaan, että mittauksesta saadaan aina eksakti arvo (Karjalainen, 2002, s. 47). Mittaustulos koostuu kahdesta vaihtelusta, prosessin vaihtelusta ja mittausprosessin vaihtelusta. Kun mittauksella on tarkoitus mitata prosessin vaihtelua, päästään sitä parempiin tuloksiin mitä parempi mittausjärjestelmän suorituskyky on. Suorituskykyisellä mittausjärjestelmällä prosessin vaihtelusta saadaan todellisempi ja luotettavampi kuva. (Salomäki, 2003, s. 133)



Kuva 18. Todellisen ja havaitun jakauman ero. (mukaiillen Wetherill, 1991, s. 47).

Mittausprosessin vaihtelu heijastuu suoraan prosessin laaduntuottokykyyn, tehden siitä todellista huonomman. Suuri vaihtelu saattaa aiheuttaa sen, että hyväksytään huonoja ja hylätään hyviä tuotteita ilman, että sitä tiedostetaan. Samalla saatetaan luulla, että vaihtelu johtuu prosessista ja täten investoidaan kalliisiin prosessin kehitystoimenpiteisiin, vaikka vaihtelu johtuukin oikeasti mittauksesta. (Salomäki, 2003, s.133) Ainoa keino olla varma mittausprosessin suorituskyvystä, eli mittausepävarmuudesta, on suorittaa testi sen selvittämiseksi (Wetherill, 1991, s.48). Mittaussysteemin luotettavuus täytyy

määrittää ennen kuin itse prosessin kyvykkyyttä voidaan määrittää (Karjalainen, 2002, s. 142).

Luotettavin keino mittausepävarmuuden selvittämiseksi on mitata samaa kohdetta useita kertoja. Vaikka sama mittaaja mittaisi samaa kohdetta monta kertaa, mittausepävarmuudesta johtuen hänen tuloksensa saattavat vaihdella eri kerroilla. Useiden mitauskertojen vaihtelusta syntyy hajonta, joka kuvaa mittausjärjestelmää. Mikäli mittaajia on useampi, pystytään määrittämään myös mittaajista johtuva vaihtelu.

Testin tuloksen perusteella saadaan rajat, joiden sisällä todellisen tuloksen arvioidaan olevan valitulla todennäköisyydellä. Yleisesti käytössä on joko 95 %:n tai 99 %:n luottamusrajat. Tällöin mittaustulos on esimerkiksi 95 %:n varmuudella määriteltyjen rajojen sisällä eli saatu mittaustulos ei siltikään ole eksakti. Mittausjärjestelmän suorituskyky ilmoitetaan määritellyillä rajoilla. Luotettavan järjestelmän rajat ovat korkeintaan 10 % spesifikaatioalueesta. (Salomäki, 2003, s. 133–134)

Mittaustuloksen ollessa spesifikaatorajojen tuntumassa, ei voida saavuttaa täyttä varmuutta, onko mitta oikeasti toleranssialueella vai ei. Mittausepävarmuus huomioiden, prosessin vaihtelua tulee pienentää selvästi toleranssialueen sisäpuolelle, jotta vältetään rajojen tuntumassa olemiselta. Tilastollisten menetelmien käyttö on siihen ainoa ratkaisu. (Salomäki, 2003, s. 135)

4.1 Tyypin 1 ja 2 virheet mittauksessa

Mittausprosessin ollessa tilastollisesti hallinnassa, ilman kohdistusvirhettä, sen vaihtelu johtuu toistettavuudesta ja uusittavuudesta. Saman tuotteen samaa mittaa mitattaessa useita kertoja, muodostuu mittaustuloksista normaalijakauma. Mikäli jakauman joku osa menee päällekkäin mitan toleranssirajan kanssa, on olemassa riski, että tuotteelle tehdään väärä käyttöpäätös. Päällekkäisyydestä seuraa kaksi tilannetta, joissa on mahdollisuus virheeseen.

Ensimmäinen on tyypin 1 virhe, jossa vaatimustenmukaista tuotetta luullaan vaatimustenvastaiseksi. Tätä sanotaan myös tuottajan riskiksi, koska virheestä aiheutuneet tappiot tulevat tuottajalle. Kuvassa 19 on esitetty tyypin 1 virhe. Nuolet esittävät tuotteen todellista mittaa ja harmaat alueet mittaa, jolla tuotteen virheellisesti luullaan olevan. Harmaat alueet ovat toleranssialueen ylityksiä. (AIAG, 2010, s. 19)

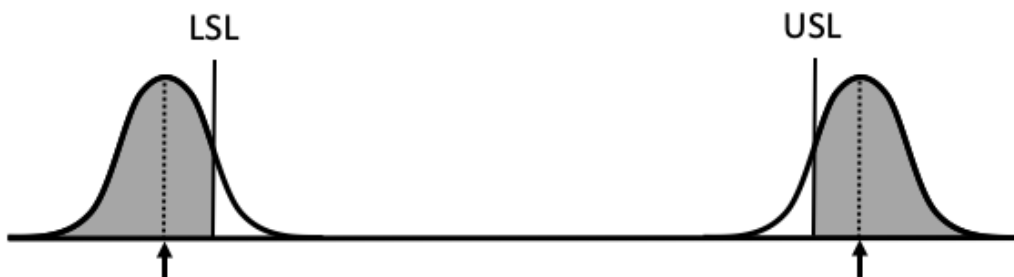
Tyypin I virhe



Kuva 19. Tyypin 1 virhe esitettyä toleranssirajoilla (mukaillen AIAG, 2010, s. 19).

Toinen on tyypin 2 virhe, jossa vaatimustenvastaista tuotetta luullaan vaatimustenmukaiseksi. Tätä sanotaan myös asiakkaan riskiksi, koska virheestä aiheutuneet tappiot käärii asiakas. Kuvassa 20 on esitetty tyypin 2 virhe. Nuolet esittävät tuotteen todellista mittaa ja valkoiset alueet mittaa, jolla tuotteen virheellisesti luullaan olevan. Harmaat alueet ovat toleranssialueen ylityksiä. (AIAG, 2010, s. 19)

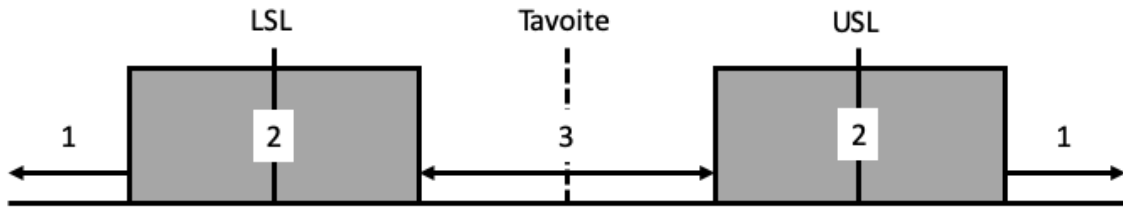
Tyypin II virhe



Kuva 20. Tyypin 2 virhe esitettyä toleranssirajoilla (mukaillen AIAG, 2010, s. 19).

Mittausjärjestelmän virheen leikatessa tuotteen toleranssirajan, on ainut tilanne, jolloin tuotteesta voidaan tehdä väärä käyttöpäätös, kun tarkastellaan käyttöpäätöksiä

toleranssirajojen suhteen. Tästä johtuen voidaan määrittää kolme erillistä aluetta. Kuvassa 21 on esitetty kyseiset alueet. Alueella 1 vaatimustenvastaiset tuotteet ovat aina vaatimustenvastaisia. Alueella 2 on riski, että tehdään virheellinen päätös, joko tyyppin 1 tai tyyppin 2 virhe. Alueella 3 vaatimustenmukaiset tuotteet ovat aina vaatimustenmukaisia. (AIAG, 2010, s. 19–20)



Kuva 21. Päätöksenteko-alueet toleranssien mukaan. (mukaillen AIAG, 2010, s. 20).

Tavoitteena tulisi olla väärin käyttöpäätösten lukumäärän pienentäminen mahdollisimman pieneksi, jolloin maksimoidaan oikeat käyttöpäätökset. Tähän on olemassa kaksi tapaa:

1. Mittausjärjestelmän parannus pienentämällä sen hajontaa eli kuvan 21 harmaita alueita, niin paljon, että kaikki valmistetut kappaleet kuuluvat alueelle 3.
2. Tuotantoprosessin parantaminen pienentämällä sen hajontaa niin paljon, ettei kappaleita valmisteta kuvan 21 harmailla alueilla.

Mittausprosessin täytyy kuitenkin olla sekä tilastollisesti hallinnassa että ilman kohdistusvirhettä, jotta voidaan tehdä luotettavia käyttöpäätöksiä. Mikäli edes toinen näistä ei toteudu, mikä tahansa havaittu arvo voi johtaa väärään käyttöpäätökseen. (AIAG, 2010, s. 19–20)

Mittausvirhe voi aiheuttaa väriä käyttöpäätöksiä tuotteissa, mutta se voi vaikuttaa negatiivisesti myös prosessipäätöksiin. Prosessipäätöksiin vaikutus voi olla seuraava:

1. Prosessiin saatetaan tehdä muutoksia, kun yleistä syytä luullaan erityisyyksi

2. Prosessiin ei tehdä muutoksia, kun erityisyyttä luullaan yleiseksi syyksi.

Päätöksentekoon voi vaikuttaa mittaussysteemin vaihtelu, jolla on suora vaikutus prosessin havaittuun vaihteluun, vakauteen ja odotusarvoon. Havaitun ja todellisen prosessin vaihtelun suhde lasketaan kaavalla 22. (AIAG, 2010, s. 20–21)

$$\sigma_{obs}^2 = \sigma_{act}^2 + \sigma_{msa}^2, \quad (22)$$

missä

σ_{obs}^2 havaittu prosessin varianssi

σ_{act}^2 todellinen prosessin varianssi

σ_{msa}^2 mittaussysteemin varianssi

Havaitun kyvykkyyksindeksin ja todellisen ja mittaussysteemin kyvykkyyksindeksien välinen suhde johdetaan korvaamalla kyvykkyyksindeksin yhtälö (ks. kaava 18) varianssiyhtälöön (kaava 23) (AIAG, 2010, s. 21).

$$(C_p)_{obs}^{-2} = (C_p)_{act}^{-2} + (C_p)_{msa}^{-2} \quad (23)$$

Todellista prosessin kyvykkyyksindeksiä voidaan verrata graafisesti havaitun prosessin kyvykkyyksindeksiin, kun oletetaan, että mittausjärjestelmä on kalibroitu eli ilman kohdistusvirhettä ja tilastollisessa hallinnassa. Siksi voidaan sanoa, että todellisen prosessin kyvykkyyden ja mittausprosessista johtuvan vaihtelun yhdistelmä kuvaa havaittua prosessin kyvykkyyttä. Mittauksesta johtuva vaihtelu tulee täten ottaa huomioon, kun tavoitellaan tiettyä kyvykkyyttä prosessissa. (AIAG, 2010, s.21)

4.2 Gage R&R

Mittaussysteemin tutkimiseen käytetään menetelmää Gage R&R (Gage Repeatability & Reproducibility), jonka avulla voidaan selvittää mittausprosessin toistettavuutta ja

uusittavuutta. Tulosten perusteella tiedetään, kuinka paljon tulosten vaihtelevuudesta johtuu itse mittausprosessista.

Gage R&R -tutkimuksessa käytetään jotain työkalua, jolla saadaan tehtyä samanlaiset mittaukset monta kertaa. Tämä voi olla esimerkiksi viivoitin tai mittapää. Tutkimus koostuu kahdesta osasta, joista toisessa tutkitaan mittaussysteemin toistettavuutta. Tällä tarkoitetaan mittauksia, jotka suoritetaan samalle kappaleelle samalla tavalla monta kertaa. Mittauksien tulee suorittaa sama henkilö. Toisin sanoen, kun tarkastellaan toistettavuutta, pyritään löytämään vastaus siihen voiko vaihtelevuus johtua pelkästään mittauslaitteista tai mittausprosessista. Toisessa osassa tutkitaan mittausten uusittavuutta. Tässä tarkastelun kohteena on mittausprosessi, joka suoritetaan samalle kappaleelle samalla tavalla monta kertaa, mutta mittaukset onkin suorittanut eri henkilö. Tuloksien perusteella nähdään vaikuttaako mittausten suorittaja tuloksien vaihtelevuuteen. (Hessing, n.d.)

Gage R&R on työkaluna tärkeä erityisesti sellaisissa tapauksissa, kun tuotannossa on tapahtunut jotain merkittäviä muutoksia kuten työkalujen vaihtoja. Myös uudet työntekijät voivat olla tekijä, joka vaikuttaa tulosten vaihtelevuuteen. Kun tuotannossa huomataan poikkeavuutta, on monesti järkevää tutkia ensin Gage R&R -menetelmällä mittausprosessi läpi. Näin voidaan löytää mahdolliset vaihtelevuudet itse prosessissa ennen kuin aletaan tutkia itse tuotetta ja koko tuotantolinjaa, joka voi käydä myös taloudellisesti kalliimmaksi. (Hessing, n.d.)

4.3 Tyypin 1 Gage -tutkimus

Tyypin 1 Gage -tutkimuksessa arvioidaan mittalaitteen ja mittauksen vaihtelua, ja siinä ei oteta huomioon muita vaihtelun lähteitä. Tarkoituksena on arvioida poikkeamaa sekä mittauksen toistettavuutta. Toistettavuudella tarkoitetaan kykyä tehdä samanlainen mittaus monta kertaa samalle osalle. Tyypin 1 Gage -tutkimus on tärkeä väline mittaussysteemin analysoinnissa. (Karjalainen, 2014)

Tutkimuksen tempo on nopea, sillä siinä tutkitaan vain yhtä mittakohdetta. Toimenpide suoritetaan helposti ohjauskorteilla, kuten I-mR kortilla. Toistettavuutta voidaan mitata laskemalla mittalaitteelle kyvykkyyssindeksi, jonka saa laskettua kaavalla 24. (Karjalainen, 2014)

$$C_g = \frac{\frac{K}{100} * toleranssi}{L * s}, \quad (24)$$

missä

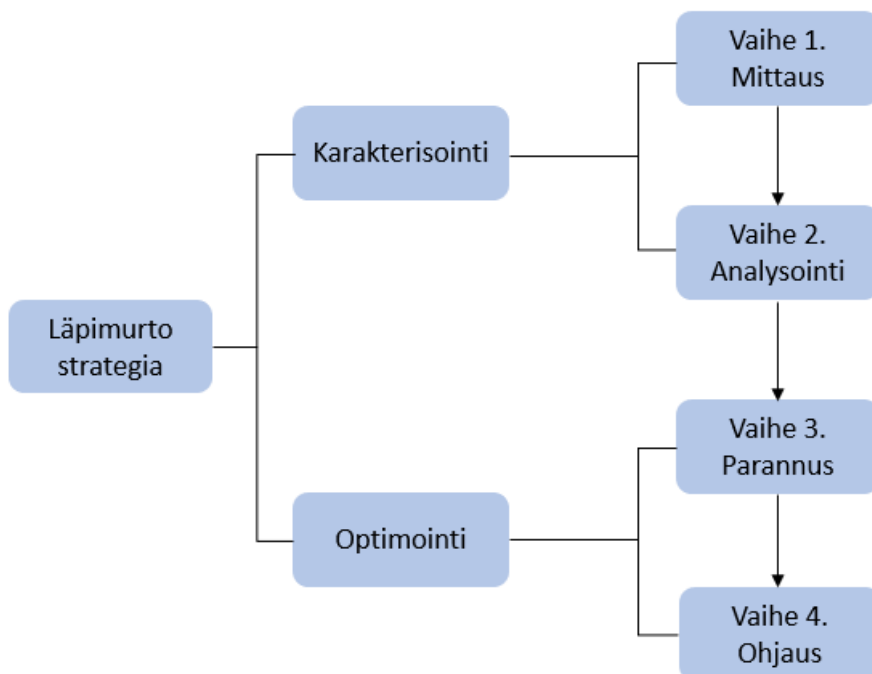
- K osuus toleranssista (oletus 10)
- s mittausten standardipoikkeama
- L standardipoikkeamien lukumäärä (6 on oletus)

5 Koneistuksen kehitysmenetelmät

Tässä kappaleessa käsitellään kahta hyvin yleistä kehitysmenetelmää. Nämä ovat DMAIC ja PDCA. Pääpiirteittäin menetelmät ovat hyvin samankaltaisia, mutta DMAIC-menetelmä sisältää hieman eri työvaiheita kuin PDCA. Näiden lisäksi tässä kappaleessa kerrotaan seitsemästä laatu työkalusta.

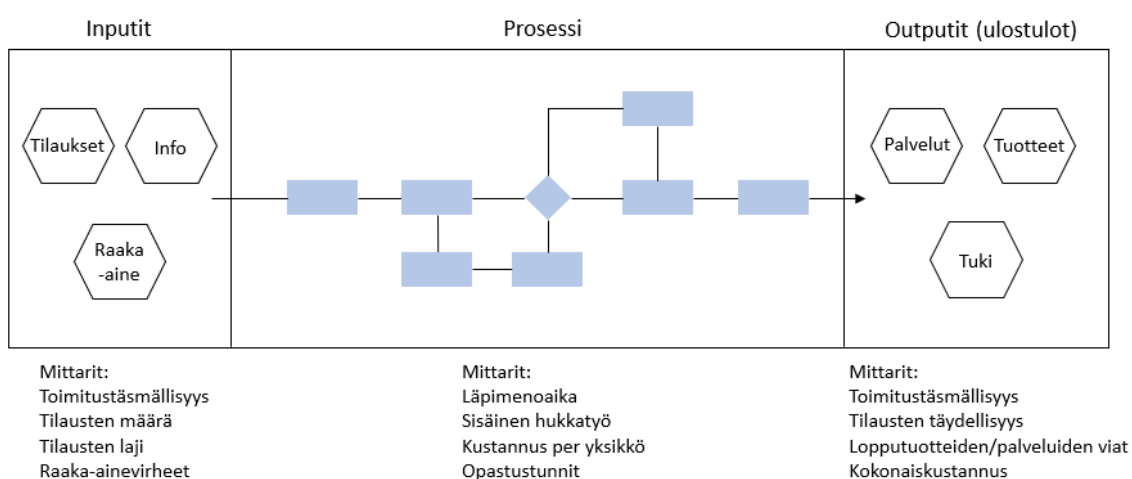
5.1 DMAIC

Mikel J. Harryn kehittämä DMAIC-menetelmä on ongelmanratkaisumalli, joka on luotu suorituskyvyn parantamista varten. Tässä menetelmässä haetaan erityisyyttä, jotka vaikuttavat prosessiin. DMAIC on lyhennetty sanoista define (määrittely), measurement (mittaus), analysis (analyysi), improvement (kehitys) ja control (ohjaus). Nämä voidaan jakaa kahteen vaiheeseen – karakterisointi- ja optimointivaiheeseen (ks. kuva 22). DMAIC kuuluu Lean Six Sigma laatu työkaluihin.



Kuva 22. MAIC-prosessi (mukaillen Karjalainen & Karjalainen, 2002, s. 44).

DMAIC-menetelmän ensimmäisessä vaiheessa määritetään ongelmat ja mahdolliset asiakasvaatimukset. Näistä saadaan selville projektin tarkoitus ja tavoitteet sekä saadaan määritettyä sen laajuus. Siinä listataan tekijöitä, jotka ovat tärkeitä ja kriittisiä laadun, toimitusajan ja kustannusten osalta. Tässä vaiheessa tavoitteena on myös saada kuvaus tuotteen jalostusarvosta (SIPOC, supplier-input-process-output-customers). Kuvassa 23 on selvennetty SIPOC-prosessi ja sen mittarit.



Kuva 23. SIPOC- prosessi (mukaiillen Karjalainen & Karjalainen, 2002, s. 47).

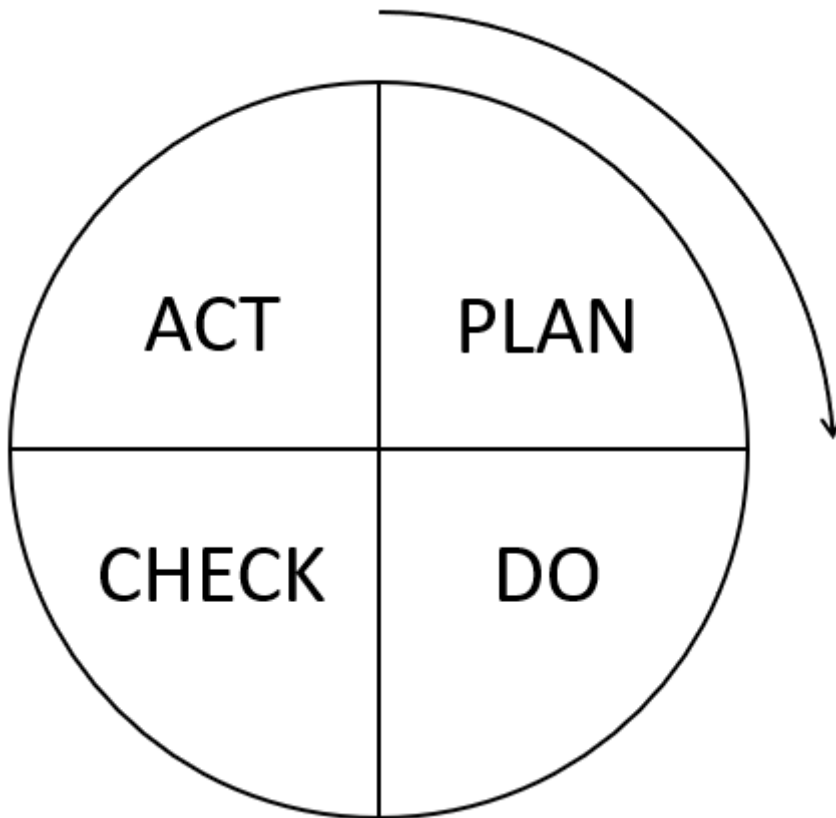
Ongelmien määrittämisen jälkeen päästään karakterisointiin, joihin sisältyy mittaus- ja analysointivaihe. Mittausvaiheessa valitaan yksi tai useampi syytekijä, joita tutkitaan. Tässä voidaan käyttää apuna tilastollista prosessinohjausta. Valitusta syytekijästä kerätään dataa, jonka pohjalta määrittelyvaiheen tavoitteita voidaan tarvittaessa hienosäätää. Tässä vaiheessa on myös tärkeää varmistaa mittauksien luotettavuus Gage R&R -analyysillä. Mittausvaiheen tuloksena saadaan selville lähtötilanne sekä dataa, jonka avulla voidaan rajata ongelmaa. Tämä toimii karakterisoinnin toiseen vaiheeseen, analysointiin. Tässä tarkoituksena on ideoida ja paikallistaa ongelman aiheuttajat ja niiden ratkaisut. Näistä luodaan hypoteesi, joka myöhemmin joko vahvistetaan tai kumotaan dataa ja tilastollisia analyysejä apuna käyttäen.

Optimointiin sisältyy loput kaksi vaihetta, jotka ovat kehitys ja ohjaus. Kun hypoteesi on saatu tehtyä analyysivaiheessa, voidaan siirtyä kehitysvaiheeseen. Tässä tarkoituksena

on testata ja soveltaa mahdollisia ratkaisuja, joiden tuloksena tulisi saada luotua suunnitelma ja testata kyseiset toimenpiteet, joiden tulisi ratkaista kyseiset ongelmat. Tällöin tulisi olla myös selvät sävelet siitä, kuinka tuloksia voidaan arvioida. Viimeinen vaihe DMAIC-parannusprosessissa on ohjaus. Tämä edellyttää sitä, että prosessi on stabiili. Ohjausvaiheen tavoitteena on toimia proaktiivisesti ja arvioida luotuja ratkaisuja ja selvittää kuinka saatuja tuloksia voidaan ylläpitää tulevaisuudessa. Tässä apuvälineenä toimii SPC eli tilastollinen prosessinohjaus. Lopputuloksena saadaan selkeä kuva tilanteesta ennen ja jälkeen DMAIC-menetelmää. (Karjalainen & Karjalainen, 2002, s. 43–53)

5.2 PDCA

PDCA-kehitysmenetelmä tulee sanoista Plan (suunnittele), Do (tee), Check (tarkista) ja Act (toteuta). Kyseessä on jatkuvan parannuksen kehitysmalli, joka tunnetaan myös nimellä Demingin ympyrä (Salomäki, 2003, s. 45). Tämä kehityksen kehä koostuu neljästä vaiheesta. Ensimmäinen menetelmän vaihe on tunnistaa ongelma tai kehityksen kohde. Tässä vaiheessa luodaan pohja koko tulevalle kehitysprosessille. Tärkeää on miettiä tarkasti, onko kyseisen ongelman ratkaiseminen tai kehittäminen sen arvoista. Oleellinen vaikuttava tekijä on myös se, kehen ongelma kohdistuu ja kuinka ongelman ratkaiseminen voisi vaikuttaa. Hyvän suunnitelman pohja on tarkkaan mietityn hypoteesin luominen, testausvaiheen suunnittelu sekä riittävän datan kerääminen tulevia vaiheita varten. Huonosti toteutettu suunnitteluvaihe voi olla taloudellisesti kallis ja epätehokas prosessin seuraavissa vaiheissa. Kuvassa 24 on kuvattu Demingin ympyrä ja sen vaiheet. (Deming, 2000, s. 132)



Kuva 24. Demingin ympyrä (mukaillen Salomäki, 2003, s. 45).

Prosessin toisessa vaiheessa toteutetaan suunnitellut testaukset. Alussa voi olla järkevämpää tehdä testit pienimuotoisena, sillä se on monesti halvempaa ja myös nopeampaa toteuttaa. Testauksista tehdään tarvittavat raportit ja kirjataan saatu data tulevaa varten.

Kolmannessa vaiheessa tarkastellaan testauksien tuloksia tarkemmin. On tärkeää, että tuloksiin voidaan luottaa ja, että testi suoritettiin annettujen speksien mukaan. Tässä vaiheessa otetaan huomioon suunnitteluvaiheessa asetetut hypoteesit ja suunnitelmat ja verrataan niitä testausten tuloksiin.

Neljännessä ja viimeisessä vaiheessa testien tuloksien perusteella ratkaisu joko otetaan käyttöön taikka se hylätään. Tässä vaiheessa on myös mahdollisuus tehdä uudelleen testauksia esimerkiksi isommalla testijoukolla. (Deming, 2000, s. 133)

5.3 Seitsemän laatutyökalua

Laadun parantamisen apuna käytetään erilaisia laatutyökaluja. Näille työkaluille ei ole olemassa virallisia standardeja, mutta ajan saatossa on muodostunut lähes standardin kaltaisia käytäntöjä ja yrityskohtaisia ohjeita. Tässä kappaleessa esitetään yleisimpiä SPC:n apuna käytettyjä työkaluja. Näitä työkaluja ovat histogrammit, kalanruotokaaviot, tarkastuskortit, Pareto-kuvaajat, vuokaaviot, hajontakaaviot sekä ohjauskortit. (Salomäki, 2003, s. 337–338)

Eryteisesti valvontakorttien käytössä histogrammit soveltuvat tehtävään hyvin. Histogrammin tarkka määritelmä on graafinen esitys frekvenssijakaumasta. Tarkoitus on kuvata mittaustulosten määrää tietyllä asteikkovälillä. Histogrammit on selitetty tarkemmin kappaleessa 2.4. (Salomäki, 2003, s. 339)

Kalanruotokaavio tai Ishikawa-kaavio on syy-seuraus-analyysi, jossa tavoitteena on löytää mahdollisimman monta syytä seuraukselle. Tällainen voi olla esimerkiksi joku ongelma. Analyysissä otetaan huomioon prosessiajattelu ja oletetaan tuloksen olevan jonkin prosessiin vaikuttavan tekijän tai ilmiön seuraus. Syy-seuraus-analyysin tuloksena muodostuu kaavio, josta tunnistetaan epäselvien häiriöiden perussyyt. Jotta prosessi saadaan hallintaan, tulee tuntea siihen liittyvät syy-seuraussuhteet. (Salomäki, 2003, s. 346)

Tarkastuskortissa huomioitavat aiheet luokitellaan ja näihin merkitään kappalemäärinä, kuinka monta kertaa kyseistä aihetta on havaittu. Korttiin myös erotellaan erilaiset kohteet mistä havaintoja on löydetty. Tätä yksinkertaista tiedon keräysmenetelmää voidaan soveltaa hyvin tulosten, havaintojen ja syiden alustavaan luokitteluun. (Salomäki, 2003, s. 348)

Pareto-kuvaaja voi muistuttaa hyvinkin paljon histogrammia. Molemmissa on laadittu luokkajako, mutta Pareto-kuvaajassa näiden järjestystä ei ole sidottu keskenään. Nämä havainnot luokitellaan kuvaajassa suuruusjärjestykseen, jonka suunta on laskeva

vasemmalta katsottaessa. Pareto-kuvaajan aineisto on ennalta kerättyä dataa. Kuvaajaan voidaan myös lisätä oikeaan reunaan kumulatiivista kertymää kuvaava viiva, josta voidaan helposti nähdä esimerkiksi viiden suurimman ryhmän osuus kaikista havainnoista. (Salomäki, 2003, s. 350)

Erilaisten symbolien ja nuoliviivojen avulla voidaan osoittaa tuotteen, työn tai asian etenemistä ja näiden keskinäisiä riippuvuuksia. Tällaista kaaviota kutsutaan vuokaavioksi. Symboleilla on omat määrätyt tarkoituksensa ja nuoliviivat kertovat asian tai vaiheiden siirtymistä toiseen. Tällaista kaaviota voidaan hyödyntää esimerkiksi tapahtumaketjujen havainnollistamisessa sekä ongelma-alueiden ja turhien vaiheiden tunnistamisessa. Kaavion on tarkoitus olla selkeä, jotta sen lukeminen ja ymmärtäminen on helppoa. (Salomäki, 2003, s. 353)

Kuvaajaa, johon x- ja y-asteikoille merkitään kahdesta muuttujasta mitatut havainnot, kutsutaan hajontakaavioksi. Kuvaajan avulla saadaan visuaalisesti näytettyä havainnot niin, että siitä pystyy helposti näkemään poikkeavat havainnot. (Salomäki, 2003, s. 356) Hajontakaavioiden tärkeä ominaisuus, datan analysoinnin lisäksi, on kyky kontrolloida prosessin hallittavuutta, jolloin prosessiin vaikuttavat tekijät pystytään huomaamaan ajoissa ilman suurempia vaikutuksia lopputuotteeseen (Li, 2021, s. 3).

SPC:n tärkein työkalu on ohjauskortit, jonka perusajatuksena on havainnollistaa helppo ja tilastollisesti luotettava analyysi prosessin tilanteesta. Ohjauskorttien toiminta ja erilaiset ohjauskortit on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.4. (Salomäki, 2003, s. 356)

6 Lähtötaso koneistuksessa

6.1 Prosessin kulku

Kohdeyrityksessä valmistetaan valuista koneistuksen ja myöhemmässä vaiheessa asennuksen avulla valmiita kappaleita käyttökohteeseensa. Valuja on kolme eri mallia, mutta jokaisesta valusta on useampaa eri koneistusversiota, joissa mitat ja piirteet saattavat hieman poiketa toisistaan. Kohdeyritys ei itse valmista valuja, vaan niille on kaksi toimittajaa. Valujen design ja valamiseen tarvittavat mallivarusteet ovat kohdeyrityksen suunnittelemia, mutta itse valamisprosessi puolestaan toimittajan oma, joskin kohdeyrityksen hyväksymä.

Kohdeyrityksessä on käytössä kolme CNC-konetta, ja ne ovat kahdelta eri valmistajalta. Kulloisellekin koneelle on tietyt koneistusversiot mitä niillä ajetaan, mutta joitakin versioita voidaan ajaa myös kahdella eri koneella. Tavanomaisesti on käytössä tietyt kaksi eri kiinnitintä per koneistusversio, mutta joskus, esimerkiksi huoltotarpeen aikana, voidaan joutua käyttämään useampaa eri kiinnitintä. Koneistusversiosta riippuen kappaleet koneistetaan joko kahdessa tai kolmessa vaiheessa. Vaiheiden välillä kappaletta käännetään kiinnittimessä.

Koneistuksessa työkaluja on erittäin monta erilaista ja tämän lisäksi joillakin on myös vähintään yksi varatyökalu. Jokaiselle työkalulle on määrätty koneistusaika, jonka täytyttyä työkalu tai sen teräpalat tulee vaihtaa uusiin. Työkalun tai sen teräpalojen päivityksen uusiin hoidetaan manuaalisesti, hyödyntäen kuitenkin esiasetuslaitetta. Koneen valmistajasta riippuen, käytetään varatyökaluja hieman toisistaan poikkeavilla tavoilla. Toisen valmistajan kone käyttää paikassa yksi olevan työkalun koneistusajan loppuun ennen kuin siirtyy varatyökaluun. Toisen valmistajan kone puolestaan vaihtaa jokaisen käyttökerran jälkeen seuraavaan varatyökaluun.

Kun kappale on koneistettu, siirtyy se robotisoidun jäysteenpoiston ja pesun kautta automatisoituun mittaukseen 3D-koordinaattimittauskoneelle. Mikäli mittauskoneelle on

jonossa kappaleita, siirtyy uusi kappale puskuriin, ja mittauskoneelle vasta, kun edellä olevat kappaleet on mitattu. Kohdeyrityksessä jokaiselle kappaleelle suoritetaan 100-prosenttinen mittausta.

3D-koordinaattimittauskone sijaitsee erillisessä huoneessa, jotta ilmankosteus saadaan pidettyä minimissään ja mittapäiden ja ympäristön mittauslämpötila likimain vakiona. Lämpötilan säätely hoidetaan ilmastointilaitteen avulla ja tavoitteena on pitää se +20 °C:ssa. Mittaushuoneeseen kappale siirtyy, kun robotti lataa kappaleen rullaradalla sijaitsevalle paletille, huoneen rullaovi aukeaa, kuljetin kuljettaa kappaleen mittaushuoneeseen ja rullaovi sulkeutuu. Rajakytkimen avulla paletti ja kappale pysähtyy aina likimain samaan kohtaan rullarataa. Kappaleen tarkka sijainti saadaan mittaamalla siitä x-, y- ja z-tasot. Tavanomaisesti kappaleen lämpötila on aina huoneen lämpötilaa korkeampi ja se huomioidaan mittaamalla kappaleen lämpötila ja käyttämällä lämpötilakompensaatiota. Mittauspäitä mittauskoneella on yhteensä viisi. Näistä yksi on lämpötilan, yksi pinnankarheuden ja loput kolme tasojen mittausta varten. Tasojen mittaukseen käytettävät mittauspäät sisältävät vielä seitsemän mittauskärkeä, joiden halkaisijat ja etäisyydet mittauspäähän kiinnityskohdasta vaihtelevat.

Kun kappale on mitattu, tulostuu siitä mittauspöytäkirja verkkokansioon ja kappaleen jäljitettävyytiedot ja kriittisten mittojen mittausdata laadunhallintajärjestelmään. Samalla tulostuu myös haluttujen mittojen mittausdata erilliseen tietokantaan. Kappaleista tyypillisesti mitataan yli kolmesataa mittausta, mutta koneistusversiosta riippuen lukema saattaa hieman vaihdella. Mitat sisältävät muun muassa halkaisija-, etäisyys-, kohtisuoruus-, ympyrämuotoisuus-, tasomaisuus-, muotovirhe- ja samankeskiyysmittauksia, mutta myös piirteiden paikkakoordinaattien sijainti kappaleen tai jonkin piirteen nollapisteen tulostetaan. Koko mittauksesta kriittisiä mittoja kappaleen toiminnan ja asennettavuuden kannalta on noin 50. Tietokantaan tyypillisesti viedään vain kappaleen kriittisten mittojen data, mutta mahdollisuus olisi myös viedä kaikki mittaus tulokset. Tietokantaan vietävät mittaus tulokset täytyy erikseen määrittää mittausohjelmaan. SPC-ohjelmiston avulla voidaan lukea tietokantaa, jolloin prosessin tilan seuraaminen on helpompaa kuin

pelkästään mittauspöytäkirjoja selaamalla. Mittauksen jälkeen kappale siirtyy jäysteenpoistoasemalle, jossa manuaalisesti tarkastetaan robotisoidun jäysteenpoiston jälki ja samalla myös mittauspöytäkirjasta mahdolliset toleranssialueiden ylitykset. Mikäli ylityksiä on, merkataan kappale ja siirretään erilliselle alueelle, muutoin kappale jatkaa tuotannossa eteenpäin sisäiselle asiakkaalle.

6.2 Ongelmakohdat ja riskit prosessissa

Tässä kappaleessa pyrkimyksenä on tunnistaa ja käsitellä mahdolliset ongelmakohdat ja riskit tuotannon prosessissa. Tutkimuksessa tunnistettiin mahdollisiksi ongelmakohdiksi valu, mittaus prosessi sekä SPC-ohjelmiston käyttö.

6.2.1 Valu

Tutkimuksen aikana kävi ilmi, että eri valmistajien valut arvellaan poikkeavan enemmän tai vähemmän toisistaan. Valutoleranssit ovat kuitenkin melko suurehkoja, jolloin ongelmatilanteissa on vaikeaa osoittaa, että vika olisi itse valussa. Lisäksi ongelmana on se, että oletettu vika tulee ilmi vasta valmiin kappaleen mittauksessa, jolloin häiriötä aiheuttavat tai erityisyyttä indikoivat piirteet on mahdollisesti jo koneistettu pois. Valujen eroavaisuus on käynyt ilmi, kun kahden koneistetun sylinterimäisen reiän samanksisuutta on mitattu ja siinä ei olla toisinaan päästy toleranssialueen sisälle. On arveltu, että valureiät ovat hieman sivussa tavoitellusta kohdasta, jolloin se aiheuttaa koneistuksissa pitkien työkalujen vääntymistä ja näin ollen virhettä samanksisuuteen. Tähän korjaava ja ennaltaehkäisevä toimenpide on muuttaa joko koneistusmenetelmää tai itse valua. Tutkimuksen aikana kuitenkin huomattiin, että valun muutosprosessi on yleensä paljon aikaa ja rahaa vaativa toimenpide, jonka lisäksi saattaa joskus ilmetä uusia valuvikoja ei-toivottuihin paikkoihin. Koneistusmenetelmän muutos puolestaan voi olla kallis, mutta onnistuvuus yleensä nopeammin todettavissa. Kohdeyrityksessä onkin ongelmapaikkaan tilattu uusi työkalu, jolla ongelman oletetaan poistuvan.

6.2.2 Mittaus

Mittauksessa havaittuja ongelmakohtia tai mahdollisia riskejä ovat kappaleen pitkä läpimenoaika koneistuksen valmistumisesta mittaukseen, pitkä mittausohjelman kesto ja kappaleiden puhtaus mittauksessa. Kun kappale on koneistettu, kestää sillä minimissään yksi tunti, että sen mittaus alkaa mittauskoneella. Mikäli työkuorma on korkea, läpimenoaika on keskimäärin noin kolme tuntia. Mittausohjelmat puolestaan kestävät keskimäärin noin yhden tunnin, jolloin keskimääräinen kokonaisläpimenoaika on noin neljä tuntia. Tästä seuraa riski, että viallisia kappaleita ehtii valmistua useampia ennen kuin siihen keretään reagoimaan. Jotta vastaavalta tilanteelta vältyttäisiin, on kohdeyrityksessä käytössä työkalujen automaattinen rikkotarkistus, jonka tavoitteena on karsia yllättäen hajonneet työkalut ennen kuin niitä keretään käyttämään uudestaan. Mikäli kuitenkin jokin prosessin osa ei ole hallinnassa, vaikka työkalut olisivatkin ehjiä, ei tarvita isoa muutosta, että vaatimustenvastaisia kappaleita syntyy ennen kuin siihen keretään reagoimaan. Kokonaisläpimenoajan lyhentäminen vaatisi nopeampaa kappaleiden pesua, jäysteenpoistoa ja mittausta ja täten kalliita muutoksia prosessiin. Tähän on kuitenkin olemassa halvempi ja laatua parantava korjaava ja ennaltaehkäisevä toimenpide. Prosessista tulisi poistaa erityissyyntä aiheuttajat, pienentää prosessin vaihtelu riittävälle tasolle ja ohjata prosessi spesifikaatioalueen keskelle tai yksipuoleisessa toleroinnissa miniarvoon ja valvoa, että siinä pysytään. Kun prosessi on saatu ihanteelliseen tilaan, voidaan mittausohjelmia mahdollisesti lyhentää ja siirtyä otantamittaukseen, jolloin tietyn väliajoin tehdään kappaleelle kokonaismittaus ja muulloin lyhennetty mittaus.

Vaikka kappaleet käyvät koneistuksen jälkeen pesukoneella, niiden pintaan jää silti kerros grafiittipölyä, joka pystytään havaitsemaan pyyhkäisytestillä ja toistomittauksilla. Pesua ei voida tehdä kuumalla pesuliuksella, koska se kuumentaisi kappaletta, joka vaikuttaisi mittaustuloksiin. Mikäli kappaleen annettaisiin jäähtyä ennen mittausta, pidentäisi se puolestaan läpimenoaikkaa. Koordinaattimittauskoneella ei myöskään ole mahdollista suorittaa kappaleelle uusintamittausta, vaan se tulee lähettää yrityksen sisällä sijaitsevalle toiselle mittauskoneelle tarkistusmittaukseen. Tämä puolestaan epäsuorasti nostaa kappaleiden hintaa ja samalla vaikeuttaa reagoimista erityissyyhin. Epäpuhtauden

tarkkaa vaikutusta mittaukseen on vaikea määrittää, koska esimerkiksi toistomittauksessa mittakärjen arvioidaan kulkevan likimmiten samoja reittejä pitkin, jolloin ensimmäisellä mittauskerralla mittakärki pyyhkii osan grafiittipölystä pois ja samalla osa tarttuu itse mittakärkeen. Täten jokaisella toistolla tilanne on yksilöllinen. Epäpuhtaus saattaa parantaa joitakin mittaustuloksia ja huonontaa toisia, mutta seurauksena kuitenkin on mittaustulosten ja täten kokonaisprosessin havaitun hajonnan kasvaminen. Samalla tyyppien 1 ja 2 virheiden todennäköisyys kasvaa. Korjaavana ja ennaltaehkäisevänä toimenpiteenä tässäkin ongelmassa toimii prosessin hajonnan pienentäminen, ohjaaminen ja valvonta. Täten, kun prosessin kyvykkyyden indeksi, C_{pk} on riittävällä tasolla eli yli 1,33, ei nykyisestä puhtaustasosta aiheudu ongelmia.

6.2.3 SPC-ohjelmiston käyttö

Kohdeyritys hankki mittaustulosten ja prosessin seuraamista varten erään SPC-ohjelmiston vuonna 2018 ja siihen muutaman lisenssin. Ohjelmistosta on kahta eri versiota, jotka hieman poikkeavat toisistaan. Ensimmäisellä kerätään mittaustuloksia, luodaan siitä tietokantoja ja näitä hyödyntäen voidaan reaaliaikaisesti monitoroida ja analysoida prosessia. Tämä versio sijaitsee ainoastaan koordinaattimittauskoneen tietokoneella. Toinen versio puolestaan on hieman kevyempi verrattuna ensimmäiseen. Tällä voidaan lukea ensimmäisen version luomia tietokantoja ja monitoroida, analysoida ja suodattaa niiden dataa etäältä esimerkiksi toimistosta.

Vaikka ohjelmisto on ollut käytössä yrityksessä jo neljä vuotta, sen käyttö on kuitenkin puutteellista ja erittäin vähäistä. Tilastollisesta prosessinohjauksesta on järjestetty lyhyt koulutus, jolla on ollut tarkoituksena tarjota perustietoa tilastollisen prosessinohjauksen teoriasta, mutta mitään koulutuksia ei ole järjestetty itse ohjelmiston käytöstä. Tutkimuksen aikana kävi ilmi, että ohjelmiston käyttö on ollut hankalaa, koska ohjelmistosta on täytynyt erikseen valita monitoroitava koneistusversio ja samalla pitänyt tietää, mikä koneistusversio on mitattu viimeksi, jotta saadaan mahdollisimman tuore tieto prosessin tilasta. Ohjelmistosta saa kuitenkin valittua asetuksen, jonka avulla näkymä päivittyy reaaliaikaisesti ja automaattisesti viimeiseksi valmistuneen mittauksen mukaan. Myös

lissenssien lukumäärä on ollut ongelmallinen. Ohjelmisto ei välttämättä ole ollut käytettävissä siellä missä sen on koettu olevan tarpeellinen, vaan lissenssejä on ollut käytössä vain muutamilla käyttäjillä.

6.3 Palaute ja havainnot

Valmiit kappaleet toimitetaan sisäiselle asiakkaalle. Negatiivinen palaute asiakkaalta voi tulla suullisesti tai sähköpostin muodossa, mutta aina kuitenkin järjestelmän kautta vikailmoituksella. Viasta riippuen vikailmoituksella voidaan vaatia varaston tarkistusta, uuden kappaleen toimittamista ja juurisyyn selvittämistä. Melko harvoin kuitenkin negatiivinen palaute koskee itse koneistusta, koska vaatimustenvastaiset yksilöt ovat jo pyrittävä karsimaan pois mittaustulosten avulla.

Asiakkaan äänenä toimii koneistuspiirustus, joka antaa tavoitellut arvot/piirteet koneistetulle kappaleelle, jotta asiakas pystyy siihen asentamaan halutut osat ongelmitta ja jotta kyseinen komponentti toimii käyttökohteessaan suunnitellusti. Käytössä on spesifikaatorajat, ja tavoite nykyään on ollut, että koneistettu piirre on spesifikaatorajojen sisällä. Ei ole ollut erityisesti väliä onko mittaustulos spesifikaation ylä- vai alarajalla, kunhan se vaan on rajojen sisällä. Tämä aiheuttaa sen, että spesifikaatorajojen lähellä oltaessa pienikin muutos prosessissa voi aiheuttaa vaatimustenvastaisen kappaleen. Kun tähän vielä lisätään huono toistotarkkuus mittauksessa, ei voida olla varmoja päätykö asiakkaalle vaatimustenvastaisia kappaleita. Tutkimuksen yhtenä tarkoituksena on pyrkiä tuomaan kohdeyritykseen uutta ajattelutapaa, jossa tavoitetta pidetään spesifikaatorajojen sijasta ylöspäin aukeavana paraabelina. Kun tavoitetta ajatellaan ylöspäin aukeavana paraabelina, sen matalimmassa kohdassa oltaessa tuottajan ja asiakkaan ei koeta kärsivän minkäänlaista tappiota, mutta kun siirrytään matalimmasta kohdasta pois päin, kumpaan suuntaan tahansa, kustannukset kasvavat eksponentiaalisesti. Spesifikaatorajat antavat sitten lopullisen käyttöpäättökseen kuitenkin kyseiselle mitalle. Tällä ajattelutavalla pyritään painottamaan, että on tärkeää valvoa prosessia ja pyrkiä pitämään sen keskiarvo likimain paraabelin alimmassa kohdassa.

6.4 Toimintamalli

Mikäli yrityksen koneistuksesta valmistuu vaatimustenvastainen kappale, on heidän toimintamallinsa seuraava. Koneistuksen operaattorit merkkavat vaatimustenvastaisen kappaleen ja siirtävät sen sivuun erilliselle alueelle odottamaan käyttöpäätöstä. Mikäli he kuitenkin epäilevät, että on tapahtunut mittausrvirhe esimerkiksi liasta johtuen, siirtävät he kappaleen uudelleenmittaukseen erilliselle koordinaattimittauskoneelle. Samalla koneistajat tarkastavat viasta riippuen työkalun kunnan ja vaihtavat uuteen, mikäli kokevat tarpeelliseksi.

Tarkastaja tutkii kappaleen mittauspöytäkirjan, toteaa voiko kappaleen mahdollisesti korjata ja antaa kappaleelle käyttöpäätöksen. Käyttöpäätöksen tueksi hän myös voi laittaa kappaleen uusintamittaukseen, mikäli sitä ei olla vielä tehty. Uusintamittauksen jälkeen, jos vika vielä ilmenee ja sitä ei tarkastajan mielestä voida hyväksyä, avaa hän vikailmoituksen, jolloin tieto menee myös työnjohdolle. Laadunhallintajärjestelmä estää mitattavien kappaleiden pääsyn tuotannossa eteenpäin ja vaatii tarkastajalta hyväksynnän.

Jos vika on systemaattinen ja sen aiheuttajan poistamiseksi arvellaan tarvitsevan menetelmään muutoksia, menetelmänkehittäjä tutkii tapausta koneistajien kanssa. Mikäli menetelmän muutos vaatii investointeja, on niistä vastuussa työnjohto ja johtoporras.

Vian poistuminen todetaan seuraamalla uuden kappaleen mittaustuloksia. Mittaustulokset tarkastetaan mittauspöytäkirjoista, vaikka SPC-ohjelmisto olisi käytettävissä. Jos vika vielä ilmenee, jatketaan juurisyyntutkimista ja tehdään uusia korjaavia toimenpiteitä, kunnes kappale on vaatimustenmukainen.

6.5 Laadunseuranta

Kohdeyrityksessä tuotannon laatua seurataan pääosin säännöllisissä laatupalavereissa. Näiden tarkoituksena on käydä läpi saatua dataa mittauksista, huomata mahdollisia

ongelmakohtia sekä ideoita näille parantavia toimenpiteitä. SPC:n käyttö onkin ollut pääosin läsnä kyseisissä palavereissa erilaisten kaavioiden muodossa, jotka on saatu SPC-ohjelmistosta.

Tutkimuksessa suoritettujen haastattelujen tarkoituksena oli saada käsitys laadunseurannan käyttötavoista kohdeyrityksessä ja näitä käsitellään tarkemmin kappaleessa 8.

7 Henkilökohtaiset haastattelut

Jotta kohdeyrityksen tämänhetkisestä tilanteesta saataisiin mahdollisimman laaja kuva, päätettiin valmistella kysymyksiä ja suorittaa henkilökohtaisesti haastatteluja henkilöiden kanssa, jotka ovat tai olisivat tekemisissä SPC:n kanssa. Henkilöt haastatteluihin valittiin itse ottaen huomioon työntekijän asema tuotannossa. Mukaan valikoituivat kyseisen koneistuspajan johtaja, työnjohtaja ja menetelmäkehittäjä.

Haastattelut toteutettiin teemahaastattelun ja puolistrukturoidun haastattelun sekoituksena, jolloin ennen haastatteluja laadittiin valmiiksi kysymykset liittyen valittuihin teemoihin. Keskustelu kysymysten pohjalta haluttiin kuitenkin pitää avoimena, jotta saataisiin luontevasti esiin työntekijöiden mielipiteitä ja ajatuksia SPC:stä ja sen käytöstä. Haastattelut järjestettiin etäyhteyksiä hyödyntäen Teams-sovelluksen kautta.

Kysymysten teemoiksi valittiin tilastollisen prosessin nykytilanne koneistuksessa ja kuinka sitä olisi tulevaisuudessa hyvä käyttää. Kysymykset haastatteluihin pyrittiin valikoimaan niin, että vastauksista kävisi selkeästi ilmi, kuinka SPC:tä käytetään tällä hetkellä vai käytetäänkö sitä ollenkaan. Näiden lisäksi haluttiin selvittää, onko kohdeyrityksessä otettu käyttöön mitään tukitoimintoja SPC:n rinnalle. Tällaisia voisi olla esimerkiksi erilaiset lokit tai päiväkirjat menneistä korjaustoimenpiteistä.

7.1 Tulokset haastattelujen perusteella

7.1.1 SPC:n käyttö kohdeyrityksessä

Haastatteluista kävi ilmi hyvin selkeästi, että tilastollinen prosessinohjaus on otettu aikoinaan kohdeyrityksessä käyttöön, mutta sen jokapäiväinen käyttö on loppujen lopuksi vähäistä. Yksi iso syytekijä tässä on käytettävän ohjelmiston vähäinen lisenssimäärä. Lisenssejä on aikoinaan saatu tietty määrä ja näitä on jaettu tietyille henkilöille. Kohdeyrityksessä kuitenkin vaihdetaan työkonetta tasaisella syklillä, joka tarkoittaa sitä, että määrätty lisenssi SPC-ohjelmistoon häviää vanhan työkonteen mukana, ellei lisenssiä muista

siirtää. Tästä syystä lisenssejä voi niin sanotusti hävitä ajan saatossa inhimillisten erheiden vuoksi. Tällä hetkellä SPC-ohjelmisto on pääsääntöisesti käytössä vain mittaushjelmien tekijällä, joka sitten tarvittaessa jakaa sieltä saatuja graafeja ja dataa johtajille. Tällöin siis työntekijät, jotka voisivat hyötyä SPC:stä jokapäiväisessä työssä, eivät ole päässeet helposti käsiksi ohjelmiston dataan. Mahdolliset mittaylitykset nähdään ainoastaan mittapöytäkirjoja selailemalla, joka on taas manuaalista työtä ja vaatii paljon aikaa.

SPC-ohjelmiston käytöstä, ei haastattelujen mukaan ole saatu koulutusta juuri ollenkaan. Käyttöönoton aikaan on ollut pienimuotoinen palaveri, jossa on hieman selitetty ohjelmistoa. Yleinen mielipide oli haastatteluissa, että koulutusta tulisi saada enemmän varsinkin siinä vaiheessa, jos SPC tulee käyttöön enemmän tuotannon puolella.

7.1.2 Parannuskohteet ja niiden valinta

SPC:n käyttöön liittyvät mittaustulosten perusteella tehtävät parannustoimenpiteet ja jatkuva kehittäminen. Haastatteluissa pyrittiin saamaan vastauksia siihen, kuinka parannuskohteita, toisin sanoen vikoja, paikannetaan nykyään ja millä periaatteella valitaan parannettavat kohteet. Menetelmänkehittäjän ja työnjohtajan vastaukset erosivat siinä mielessä verstaan johtajan vastauksesta, sillä tuotannon puolella ei ole SPC:tä käytössä jatkuvasti. Mittapöytäkirjat toimivat tällä hetkellä lähteenä löytää vikoja ja parannettavia kohteita, kun taas verstaan johtaja seuraa SPC:n dataa laatupalavereissa ja näkee sieltä samat ongelmakohdat. Parannettavat kohteet valitaan sitten sen mukaan, kuinka kriittinen ongelma on kyseessä, toisin sanoen kuinka suuri ylitys ja kuinka kriittinen mitta on kyseessä. Tästä toimintamallista oli yhtenäinen mielipide kaikkien haastateltavien keskuudessa. Kun tuotannossa tulee vastaan parannettavaa, voivat koneistajat ensin tutkia asiaa ja miettiä kuinka prosessia voidaan kehittää. Tässä vaiheessa kuitenkin myös menetelmänkehittäjä astuu kuvioon mukaan. Kehitysprosessin jälkeen kappaleiden koneistusta jatketaan ja seurataan mihin suuntaan mittaustulokset menevät.

Isompien sekä toistuvien vikojen tutkimiseksi saatetaan järjestää problem solving -palaveri, jonka periaatteena on saada mielikuva ongelmasta ja päästä lopputulokseen, kuinka

ongelma ratkaistaan. Haastatteluiden perusteella voidaan todeta, että tällaisia ongelman ratkomisiin liittyviä palavereja järjestetään kohdeyrityksessä, joskin ei usein.

7.1.3 Jatkuva parantaminen ja ennaltaehkäisevä laadunvarmistus

Haastatteluiden perusteella kävi ilmi, että jatkuvaa parantamista ei ole juuri ollenkaan. Prosessi on enemmän niin sanotusti tulipalojen sammuttelua. Tämä tarkoittaa sitä, että kun tuotannossa tulee vastaan joku mittaylitys, aletaan vasta siinä vaiheessa tutkimaan mistä ylitys johtuu. SPC:tä apuna käyttäen ylitys voitaisiin ehkä ennakoida, jolloin sitä ei mahdollisesti tapahtuisi ollenkaan. Tällaiseen ehkäisevään laadunvarmistukseen tulee myös ottaa huomioon koneistuksen pitkät ajoajat. Koneistuksen alkamisesta mittauksen loppuun voi kulua jopa kahdeksan tuntia, jonka aikana on saatu ajettua muita kappaleita. Tämä tarkoittaa sitä, että reaaliaikaista dataa on lähes mahdoton saada. Uudessa tuotantolaitoksessa kyseinen aika koneistuksesta mittausdatan saantiin tulee mahdollisesti vielä pitenemään. Jatkuvan parantamisen puutteeseen vaikuttaa omalta osin myös resurssit koneistusverstaalla. Haastatteluista saatiin sellainen käsitys, että olisi hyvä olla oma henkilö nimitettynä vain kehitystyöhön, jonka osa-alueeseen kuuluisi jatkuva parantaminen.

7.1.4 Muutoksien dokumentointi

Kun tuotannossa tehdään kehitystoimenpiteitä ja prosessia parannetaan, olisi hyvä dokumentoida menneet muutokset tulevaisuutta varten. Haastatteluissa kävi ilmi, että tällaista käytäntöä ei ole implementoitu ollenkaan. Yleinen mielipide oli kuitenkin, että loki tai päiväkirja muutoksista olisi vain positiivinen asia. Sitä seuraamalla voisi nähdä helposti, koska ja mitä muutoksia on tehty. Loki olisi myös hyvä sijoittaa niin, että kaikki pääsisivät lukemaan lokia.

7.1.5 Informaation kulku koneistuksessa

Pääsääntöisesti haastatteluista sai mielikuvan, että informaatio koneistuksessa kulkee suhteellisen hyvin. Koneistajat ovat tietoisia mahdollisista mittaylityksistä keskenään ja

tieto kulkeutuu työnjohtajalle ja menetelmämiehille. Johdossa seurataan SPC:n dataa ja saadaan sitä kautta tieto mittaylityksistä. Huomioitava asia on kuitenkin se, että johtoon ei aina välttämättä kulkeudu tieto siitä, mihin on korjaustoimenpiteissä päädytty. Informaation kulkuun voisi olla myös hyödyksi edellä mainitut lokit ja päiväkirjat.

Koneistusverstaalla on otettu käyttöön WhatsApp-keskusteluryhmä, johon jokainen saa laittaa ilmoitusluonteisia asioita liittyen esimerkiksi koneistusprosessiin tai mittaylityksiin. Keskusteluryhmään on liitetty kaikki koneistajat, menetelmämiehet, työnjohtaja sekä verstaan johtaja. Oletuksena on, että jokainen lukee kyseiseen ryhmään laitettua informaation, mutta varmuutta ei kuitenkaan ole, että kaikki informaatio kulkeutuu jokaiselle.

7.1.6 Seitsemän laatutyökalua

Haastatteluiden perusteella haluttiin myös selvittää, käytetäänkö kohdeyrityksessä seitsemää laatutyökalua ja mitä näistä käytetään. Yksiselitteistä vastausta tähän ei pysty antamaan, sillä eri asemassa työskentelevät henkilöt olivat tietoisia eri työkaluista. Kokonaisuudessaan lähes kaikkia seitsemää työkalua käytetään jossain määrin kohdeyrityksessä. Ainut poikkeus tähän on hajontakaaviot, joita ei haastatteluiden perusteella ole tällä hetkellä aktiivisessa käytössä ollenkaan.

Näitä kohdeyrityksessä käytettyjä laatutyökaluja on sovellettu erilaisiin käyttötarkoituksiin ja kävikin selväksi, että montaa työkalua ei käytetä samaan käyttötarkoitukseen. Poikkeuksena tähän on toki ohjauskaaviot ja histogrammit, joita kumpaakin hyödynnetään lähinnä SPC:n käytön apuna.

7.1.7 Päätelmät haastatteluiden perusteella

Yleinen mielipide haastattelujen perusteella oli, että SPC on tai olisi hyvä työkalu koneistuksessa. Keskusteluista sai hyvän mielikuvan siitä, kuinka prosessi toimii tällä hetkellä

koneistuksessa ja mitä siellä voisi mahdollisesti kehittää, jotta se luonnistuisi vielä paremmin.

SPC tulisi saada käyttöön myös tuotannon puolelle. Sitä seuraamalla näkee nopeasti ja helposti halutut mitat ja onko näissä ollut ongelmia. Näin ollen viatkin voitaisiin huomata nopeammin, kun ei tarvitsisi alkaa selailemaan mittapöytäkirjoja. Jotta SPC ja sen ohjelmisto voitaisiin ottaa luontevasti käyttöön, tulisi saada järjestettyä kattava koulutus kaikille työntekijöille, jotka SPC:tä käyttäisi jokapäiväisessä työssään. On ymmärrettävää, että jos työntekijät eivät tiedä kuinka ohjelmistoa käytetään ja kuinka sitä luetaan, jää helposti sen käyttäminen vähäiseksi. Ohjelmiston käytöstä voisi myös kirjoittaa ytimekkäät ohjeet, josta saisi tarkistettua tarvittaessa, kuinka sitä käytetään. Ohjeet tulisi sijoittaa samaan paikkaan SPC-ohjelmiston kanssa, jolloin ne ovat helposti saatavilla.

Lokien tai päiväkirjojen käyttöönotto auttaisi informaation kulussa, kun ne olisi sijoitettu paikkaan, johon kaikki pääsisivät käsiksi, esimerkiksi verkkokansioon. Tämä voisi olla tallennettuna jollekin serverille kohdeyrityksessä, jolloin tieto päivittyisi kaikille yhtenäisesti. Tuotannonpuolella loki tai päiväkirja voisi olla sijoitettuna työkaluhuoneeseen, jolloin esimerkiksi työkalujen numerot olisivat helposti saatavilla. Samassa paikassa voisi olla saatavana myös SPC-ohjelmisto, jolloin mahdollisiin mittaylityksiin pystyttäisiin reagoimaan nopeasti. Tällöin kaikki tarvittava tieto olisi samassa paikassa. Samalla pystyisi näkemään mahdolliset ongelmakohdat ja lokista pystyisi katsomaan onko samassa mittassa ollut aikaisemmin ongelmia ja myös onko kyseiselle mitalle tehty jotain korjaustoimenpiteitä. Lokissa tulisi olla lyhyt ja ytimekäs selitys kyseisestä ongelmakohdasta, mitä mittaa ja työkalua se mahdollisesti koskee ja mitä korjaustoimenpiteitä ongelman korjaamiseksi on tehty. Samoin päivämäärä koska vika on huomattu ja koska korjaustoimenpiteet on suoritettu. Näin ollen osataan myös tarkkailla kyseisiä mittoja tulevaisuudessa ja nähdään, onko korjaustoimenpiteet onnistuneet odotetusti.

8 Mittausepävarmuuden määrittäminen

Prosessiin tehtävien mittausten tarkkuus tulee olla riittävän hyvä, että tuotteiden laadun toteaminen ja varmistus on luotettavaa, mutta myös, että prosessia voidaan ohjata halutusti ja tarkoituksenmukaisesti. Kohdeyrityksessä ei oltu aiemmin tehty mittausepävarmuuden määrittämistä 3D-koordinaattimittauskoneelle, jolloin ei myöskään ollut varmuutta kuinka suuri osa havaitusta prosessin vaihtelusta johtuu mittausepävarmuudesta.

Kohdeyrityksessä tuotetut kappaleet mitataan automaattiosolussa osana prosessia olevalla 3D-koordinaattimittauskoneella. Tuotannonohjausjärjestelmä identifioi solussa olevat kappaleet ja täten osaa valita kulloisellekin kappaleelle oikean mittausohjelman. Mittausprosessi on täysin automatisoitu, jolloin 3D-koordinaattimittauskoneen käyttöön ei tarvita ihmisen läsnäoloa. Ainoastaan mittausohjelmien teon, mittauskoneen kalibroinnin ja häiriöiden poiston suorittaa ihminen. Tämän vuoksi tässä työssä mittaustarkkuuden määrittämiseen ei käytetty yleisesti hyväksi havaittua Gage R&R-menetelmää, koska se mittaisi myös operaattorista johtuvaa vaihtelua eli uusittavuutta.

8.1 Menetelmä

Mittausprosessista johtuva vaihtelu selvitettiin Tyypin 1 Gage -menetelmän avulla. Menetelmä arvioi mittausprosessin täsmällisyyttä (engl. bias) ja toistettavuutta kalibroidun kappaleen avulla. Yrityksen tuotteet ovat kuitenkin erittäin kompleksisia ja kriittisiä mittoja on monessa eri tasossa, jolloin sopivaa valmiiksi kalibroituja kappaleita ei ollut saatavilla. Toistotarkkuusmittaukset haluttiin suorittaa käyttämällä yrityksen valmistamaa tuotetta, jolloin tulos myös vastaisi mahdollisimman paljon todellisuutta. Päätöstä tuki myös tieto 3D-koordinaattimittauskoneen johteiden ongelmista menneisyydessä. Haluttiin, että mittauskone mittaa samoista kohdista johteita kuin päivittäisessä käytössäkin. Koska mittauksissa käytettiin yrityksen valmistamaa tuotetta, ei mittojen kalibroituja arvoja tiedetty ja täten täsmällisyyttä ei voitu määrittää. Mielenkiinnon kohteena kuitenkin oli toistettavuuden määrittäminen, koska sen avulla saadaan arvio mittausten osuudesta havaitussa kokonaisvaihtelussa.

Valitulle kappaleelle suoritettiin mahdollisimman monta mittauskertaa. Käytettävissä olevan ajan vuoksi kerettiin kappaleelle suorittaa 25 toistokertaa, joista ensimmäinen mittauskerta suoritettiin kappaleelle sellaisenaan kuin se tuotantolinjalta tulee. Ensimmäisen mittauskerran jälkeen kappale puhdistettiin manuaalisesti liinan ja rasvanpoistajan avulla, jotta saataisiin arvio kuinka paljon kappaleen puhtaus vaikuttaa mittaustuloksiin. Mittauspään mittauskärjet kuitenkin jätettiin puhdistamatta. Yhden mittaustuloksen perusteella lian vaikutusta mittaustuloksiin on vaikea määrittää luotettavasti, mutta tulosten perusteella saatiin kuitenkin arvio, että nykyinen puhtaustaso vaikuttaa mittaustuloksiin.

Mittausprosessin vaihtelunaiheuttajat pyrittiin määrittämään mahdollisimman hyvin ennen toistotarkkuusmittauksien suorittamista, jotta toistomittauksissa ei jätettäisi huomioida mitään, mikä oleellisesti vaikuttaisi tuloksiin. Rajallisen ajan vuoksi mittausohjelmaa karsittiin noin 15 minuutin pituiseksi ja yksi vaihtelunaiheuttaja jätettiin pois mittausprosessista. Seuraavassa kappaleessa on esiteltynä havaitut vaihtelunaiheuttajat.

8.1.1 Vaihtelunaiheuttajat mittausprosessissa

Mittausprosessi alkaa, kun robotti asettaa koneistetun kappaleen mittauspaletin päälle. Kappale lepää paletissa nastojen päällä, joten asettumisessa tapahtuu hieman vaihtelua. Kappaletta ei kuitenkaan uudelleen asetettu toistomittauksien välissä palettiin, koska se olisi vienyt liian paljon aikaa ja mahdollisesti vähentänyt toistojen määrää. Asettumisen aiheuttama vaihtelu kuitenkin tulkittiin vähäiseksi, koska koordinaattimittauskone määrittää kappaleen paikan ja asennon aina ennen varsinaista mittausta.

Kun kappale on paletilla, kuljetin vie kappaleen mittahuoneeseen, jossa rajakytkin pysäyttää kuljettimen ja täten paletin. Kuljetin pysähtyy joka kerta silminnähtävästi hieman eri kohtaan. Tämä otettiin huomioon mittauksia tehdessä ajamalla kuljetin manuaalisesti aina ennen mittausta rullaradan päästä päähän.

Mittaushuoneessa ilmastointilaitte pyrkii pitämään tasaisen +20°C lämpötilan huoneessa. Todellisuudessa mitattava kappale on aina lämpimämpi kuin tavoiteltu lämpötila. Tämä otetaan huomioon mittaamalla kappaleen lämpötila ennen varsinaista mittausprosessia ja laskemalla tämän arvon mukaan lämpötilakompensaatio. Lämpötilakompensaatio oli käytössä myös toistomittauksia tehdessä.

Kappaleiden mittauksessa käytetään tavanomaisesti viittä eri mittauspäättä, mutta ajan säästämiseksi näitä karsittiin testissä kahteen. Valikoiduista mittauspäistä toinen mittasi kappaleen lämpötilan ja toinen piirteitä ja tasoja. Mittauspäätt valikoitiin sen mukaan, mitä piirrettä niillä mitataan ja kuinka tarkka toleranssi mitalla on. Testissä päädyttiin käyttämään mittauskärkiä, joilla mitataan kappaleessa tasomaisuutta, halkaisijoita, samankeskisyyttä ja paikkaa. Kyseiset piirteet ovat myös niitä piirteitä, joissa yrityksessä on havaittu ongelmia.

Myös kappaleen puhtaus arvioitiin yhdeksi vaihtelunaiheuttajaksi, mutta sen huomioiminen on hankalaa yhdelle ja samalle kappaleelle tehtäessä mittauksia, koska jokaisen mittauksen jälkeen kappaleen puhtaus arvoitiin hieman muuttuvan. Tämän vuoksi vain yksi mittauskerta suoritettiin kappaleelle, niin kuin se tuotantolinjalta tulee.

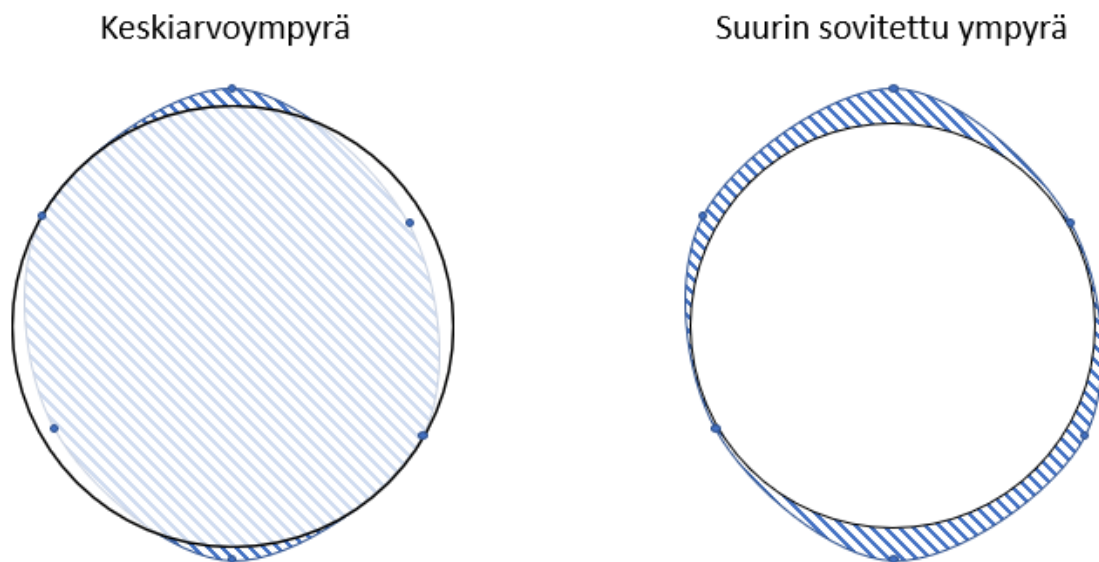
8.2 Tulokset

Jokainen piirre mitattiin 25 kertaa ja jokaiselle piirteelle laskettiin näiden toistojen tuloksien avulla omat kontrollirajat. Laskennoissa käytettiin myös ensimmäisen mittauksen tuloksia. Luottamustasona käytettiin 99,73 % eli +/- kolmen sigman keskihajontaa. Kun kontrollirajat oltiin saatu laskettua, jaettiin kulloisenkin toleranssialueen kymmenesosa kontrollirajojen rajaamalla alueella. Tulokseksi saatiin mittauksien toistettavuusindeksit eli C_g-indeksit.

Mitatut piirteet olivat porauksia ja tasoja, joiden avulla saatiin laskettua halkaisija-, samankeskisyys-, muotovirhe-, kohtisuoruus- ja paikkamittoja. Tässä työssä kuitenkin

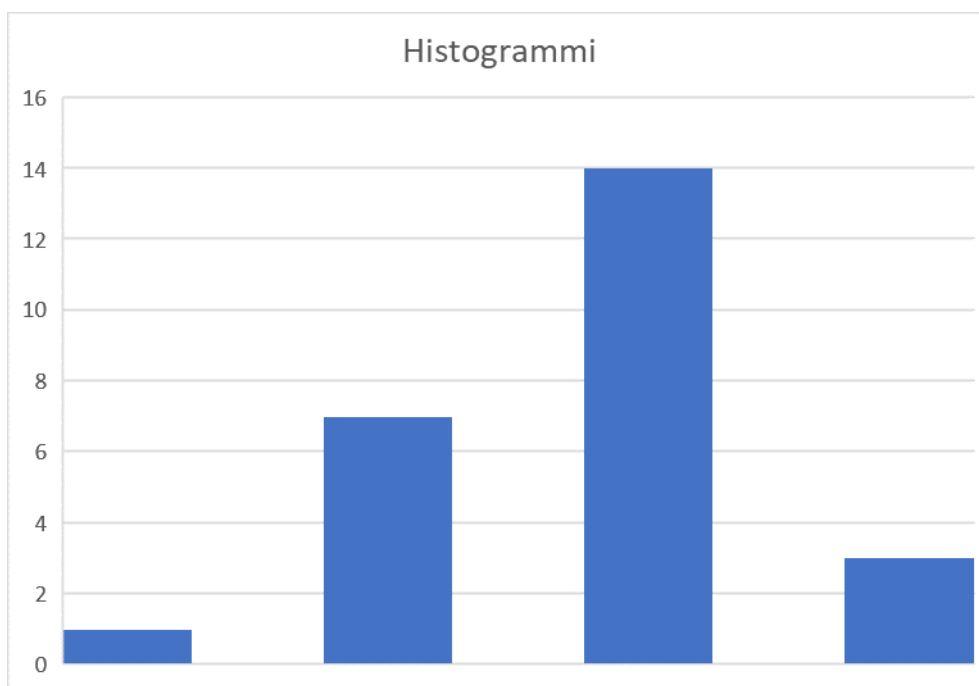
keskityttiin vain halkaisija- ja samankeskisyysmittoihin, koska niissä on tiukin toleranssi-alue ja eniten havaittuja ongelmia.

Porauksista mitattiin haluttu määrä pisteitä ja näiden mukaan suodatus laski ja sovitti mittauspisteisiin ympyrän. Sovitetusta ympyrästä saatiin siten piirteelle halkaisija. Mittauksissa käytettiin kahta erilaista suodatusta halkaisijoiden laskemiseen. Käytetyt suodatukset olivat tilanteesta riippuen joko best fit -tai suurin sovitettu ympyrä -suodatukset. Best fit -suodatus sovittaa pisteisiin keskiarvoympyrän pienimmän neliösumman menetelmällä. Tällöin ympyrä on aina hieman isompi kuin suurin mittauspisteiden sisään mahtuva ympyrä, mutta ei ole niin altis liian aiheuttamille virheellisille mittaustuloksille. Suurin sovitettu ympyrä -suodatus puolestaan laskee nimensä mukaisesti mitattujen pisteiden sisään mahtuvan suurimman ympyrän. Tämä suodatus muuttaa voimakkaasti ympyrän paikkakoordinaatteja, mikäli jokin mittauspiste on virheellinen. Kuvassa 25 on ilmoitettu keskiarvoympyrä ja suurin sovitettu ympyrä visuaalisesti.



Kuva 25. Keskiarvoympyrä ja suurin sovitettu ympyrä.

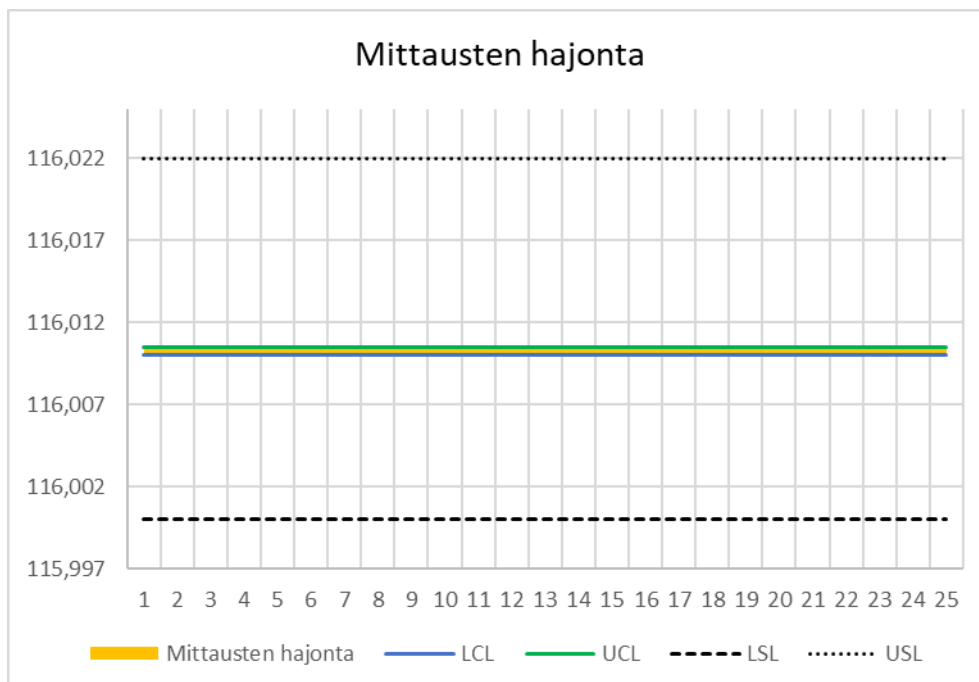
Mittauksen kuvaajasta on tulkittavissa epänormaalia pisteiden esiintymistä eli tilastollisesti harvinaista tilannetta, kuten seitsemän peräkkäistä mittauspistettä ainoastaan toisella puolen keskiarvoa. Tällaisen tilanteen todennäköisyys on noin $8/1000$. Histogrammi näyttää normaalijakautuneelta, mutta joka toinen luokka on tyhjä (ks. kuvio 2). Tilanteet kuitenkin todennäköisesti johtuivat mittauskoneen suorittamista tulosten pyörityksistä. Nyt merkitseväksi numeroksi oltiin asetettu millin kymmenestuhannesosa ja tulosten perusteella se olikin riittävä, vaikka kuvaajat eivät näytäkään tilastollisesti todennäköisiltä. Mikäli merkitsevänä tuloksena oltaisiin käytetty millimetrin sadastuhannesosia, todennäköisesti seitsemän peräkkäisen pisteen polkua ei olisi esiintynyt. Jos mittauksissa puolestaan oltaisiin merkitsevänä lukemana käytetty millimetrin tuhannesosia, olisi mitta 1 antanut 25 kertaa tuloksen 116,010mm.



Kuvio 2. Mitta 1:n histogrammi.

Toistettavuusindeksiksi mitta 1:lle saatiin noin 5,07. Toistettavuusindeksi on yli 1,33 eli riittävän tarkka, että tuotantoprosessista saadaan luotettavaa palautetta mittauksien avulla. Tulosten perusteella on erittäin pieni riski, että tehdään mittauksista johtuen

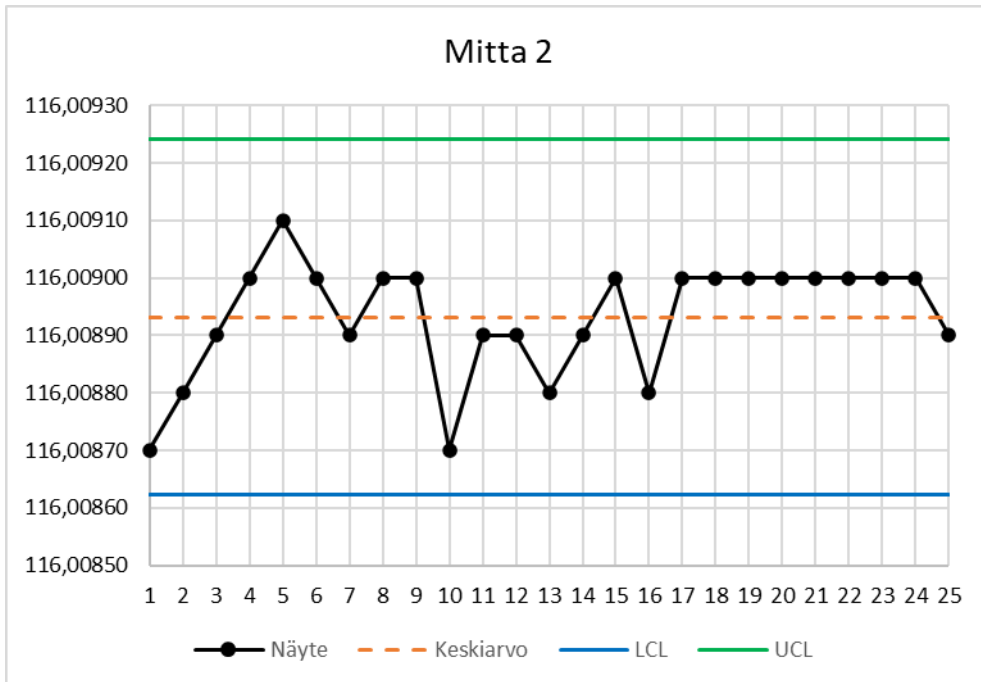
tyypin 1 tai 2 virhe. Toistomittauksen vaihtelu sijoittuu spesifikaatorajojen sisään kuvion 3 osoittamalla tavalla.



Kuvio 3. Mitta 1:n hajonta.

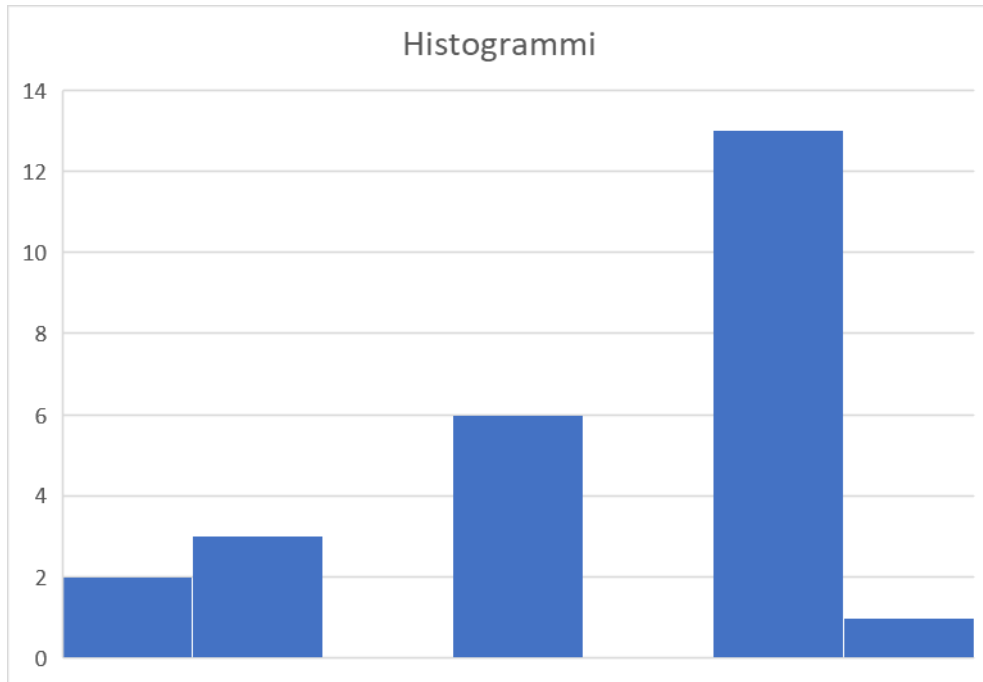
8.2.2 Mitta 2

Mitta 2 mitattiin samasta porauksesta kuin mitta 1, mutta eri syvyydeltä. Muuten mittaus suoritettiin täysin samalla lailla kuin mitta 1:n mittaus. Mittauksen kuvaajasta ja histogrammista on tulkittavissa epänormaalia pisteiden esiintymistä eli tilastollisesti harvinaista tilannetta, kuten esimerkiksi kahdeksan peräkkäistä mittauspistettä ainoastaan toisella puolen keskiarvoa (ks. kuvio 4). Tällaisen tapauksen todennäköisyys on noin $4/1000$. Mikäli merkitsevänä numerona oltaisiin käytetty millimetrin tuhannes osia, olisi mitta 2 antanut 25 kertaa 116,009mm.



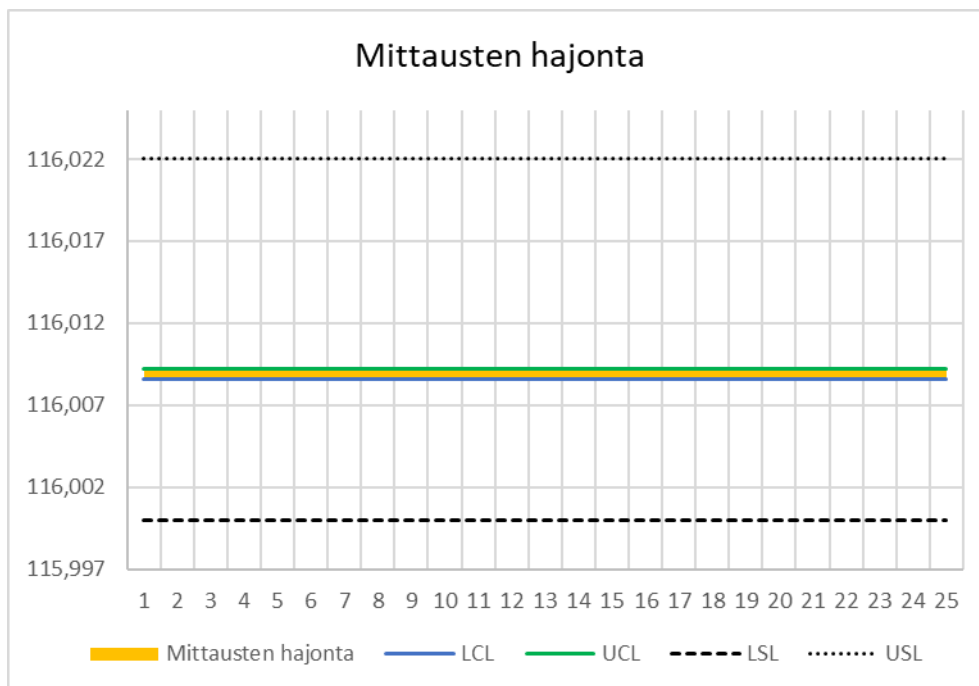
Kuvio 4. Mitta 2:n mittaustulokset.

Histogrammi muodostui vasemmalle loivaksi, kun käytettiin seitsemää luokkaa. Tämä viittaisi siihen, että histogrammin kaksi ensimmäistä pylvästä vasemmalta puolelta katsottuna ovat tuloksia, jolloin mittaustuloksiin vaikutti piirteen puhtaus. Tätä tukisi se, että oikealle päin mentäessä tulee jossain kohtaan raja vastaan, jolloin halkaisija saavuttaa maksiminsa ja jota isompia lukemia ei teoriassa pitäisi tulla. Parempia tuloksia oltaisiin saatu, kun mittauskertoja olisi ollut enemmän ja oltaisiin käytetty merkitsevänä numerona millimetrin sadastuhannesosia. Kuviossa 5 on esitettyä mitta 2:n histogrammi.



Kuvio 5. Mitta 2:n histogrammi.

Toistettavuusindeksiksi mitta 2:lle saatiin noin 3,56, joka rajaa noin 0,0006 mm alueen. Tulos on hyvä ja prosessista saadaan luotettavaa palautetta. Kuviossa 6 on esitettyä mitta 2:n laskettujen kontrollirajojen rajaama alue sovitettuna spesifikaatorajoihin.

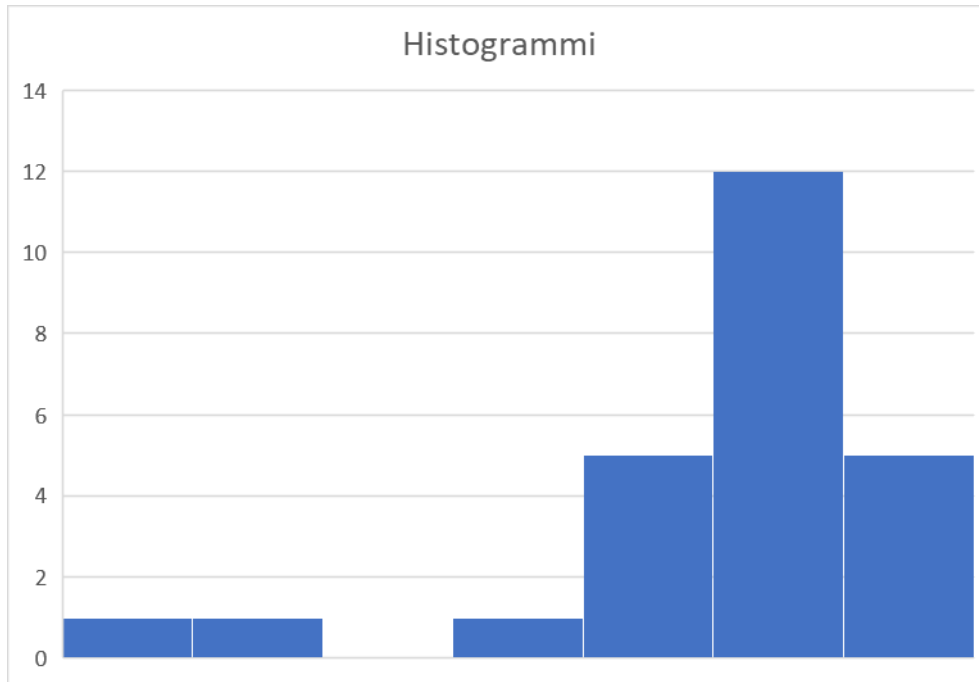


Kuvio 6. Mitta 2:n hajonta

8.2.3 Mitta 3

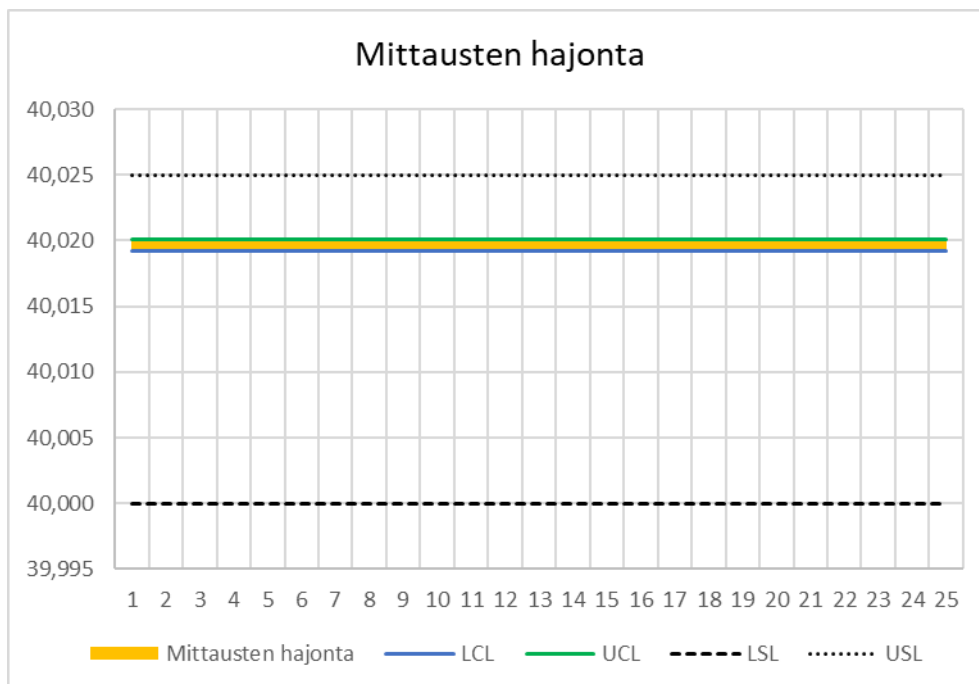
Mitta 3:ssa mitattiin sylinterimäisestä porauksesta kahdelta eri syvyydeltä halkaisijat ja näiden mukaan mittauskone laski sylinterille paikkakoordinaatit ja halkaisijan. Kummaltakin syvyydeltä mitattiin neljä mittauspistettä. Tuotannossa sylinteri mitataan useammasta syvyydestä ja mittauspisteitä käytetään huomattavasti enemmän, mutta toistomittauksissa mittauspisteitä karsittiin, jotta mittausohjelman aikaa saatiin lyhyemmäksi. Halkaisijan ja sen paikkakoordinaatit mittauskone laski käyttäen suurinta sovitettua ympyrää (ks. kuva 25).

Ensimmäinen mittaustulos sijoittui kontrollirajojen ulkopuolelle, joka indikoi, että mittausprosessissa on mahdollisesti läsnä erityisyyttä. Koska tiedettiin, että ensimmäinen mittauskerta suoritettiin koneellisesti puhdistetulle kappaleelle, tultiin siihen johtopäätökseen, että tilastollisesti poikkeava tulos johtui kappaleen puhtaudesta. Vaikuttaisi myös siltä, että mittauskärkeen jäi hieman likaa ainakin seuraavien kahden toiston ajaksi. Tätä tukee myös se, että halkaisija oli ensimmäisillä mittauksilla pienempi. Kun kontrollirajat laskettiin ilman kolmea ensimmäistä toistoa, jäi myös toisen mittauskerran tulos reilusti



Kuvio 8. Mitta 3:n histogrammi.

Kaikki mittauskerrat huomioiden, tuli toistettavuusindeksiksi noin 2,63, kun taas viimeisellä 22 pisteellä laskettuna saatiin noin 6,04. Kontrollirajojen rajaama alue on noin 0,001 mm, kun ne laskettiin kaikilla 25:llä mittaustuloksella. Jos merkitsevänä numerona oltaisiin käytetty millimetrin tuhannesosaa, olisi kaksi ensimmäistä tulosta ollut 40,019mm ja loput 40,020mm. Kuviossa 9 on esitettyä mitta 3:n laskettujen kontrollirajojen rajaama alue suhteessa spesifikaatorajoihin.



Kuvio 9. Mitta 3:n hajonta.

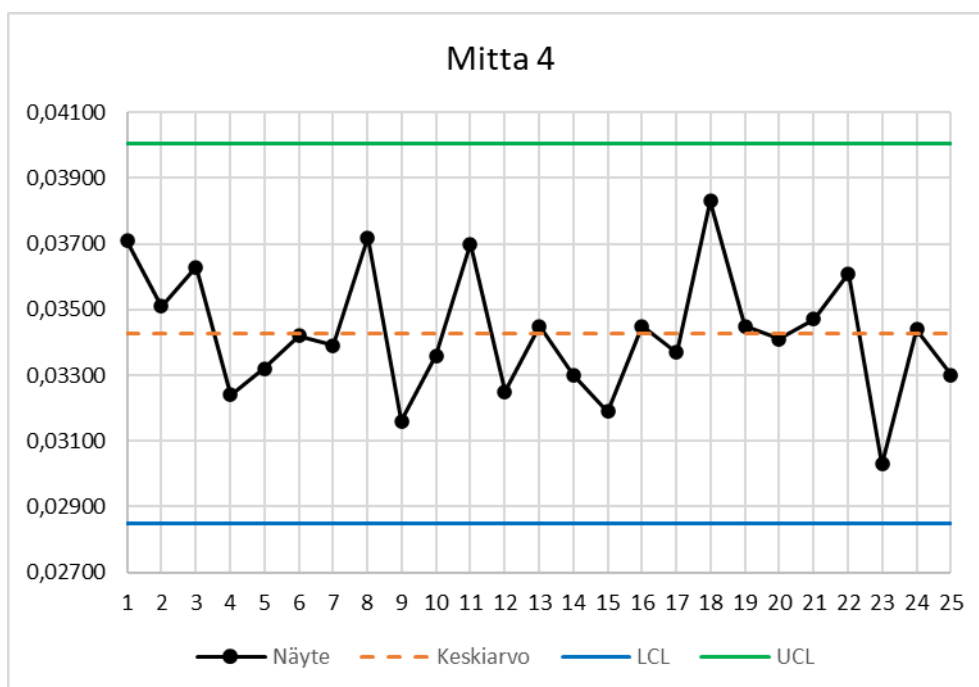
8.2.4 Mitta 4

Mitta 4 on mitta 1:n ja mitta 3:n välinen samankeskisyys. Se saadaan, kun mitta 3:n sylinterin akseli asetetaan nolla-akseliksi ja verrataan siihen mitta 1:n halkaisijan paikkaa. Mittaus on erittäin herkkä lialle, koska siinä tarvitaan mitta 3:n kahden eri halkaisijan paikkakoordinaatteja ja mitta 1:n halkaisijan paikkakoordinaatteja. Jos mitta 3:ssa edes toisessa halkaisijassa on likaa tai paljon hajontaa, kääntää se nolla-akselia, joka vaikuttaa suoraan samankeskisyyteen.

Mitta 1:n ja mitta 3:n mittauksiin käytetään samaa mittauspäättä, mutta eri mittauskärkeä. Mitta 1 mitataan eri puolelta kappaletta kuin mitta 3, jolloin mittauskärkien välinen kulma on 180 astetta. Tämä todennäköisesti suurentaa mittauksien hajontaa ja täten pienentää toistettavuusindeksiä. Lisäksi mittauksia tehdessä huomattiin, että mittauspää ei ole tasapainossa, koska toinen mittauskärjistä on pidempi ja tämän takia tasapainotus on puutteellinen. Tilanne tuli ilmi, kun mittauskone vei mittauspään sille tarkoitettuun telineeseen, jolloin mittauspää aina silminnähtävästi heilahti. Kävi kuitenkin ilmi, että

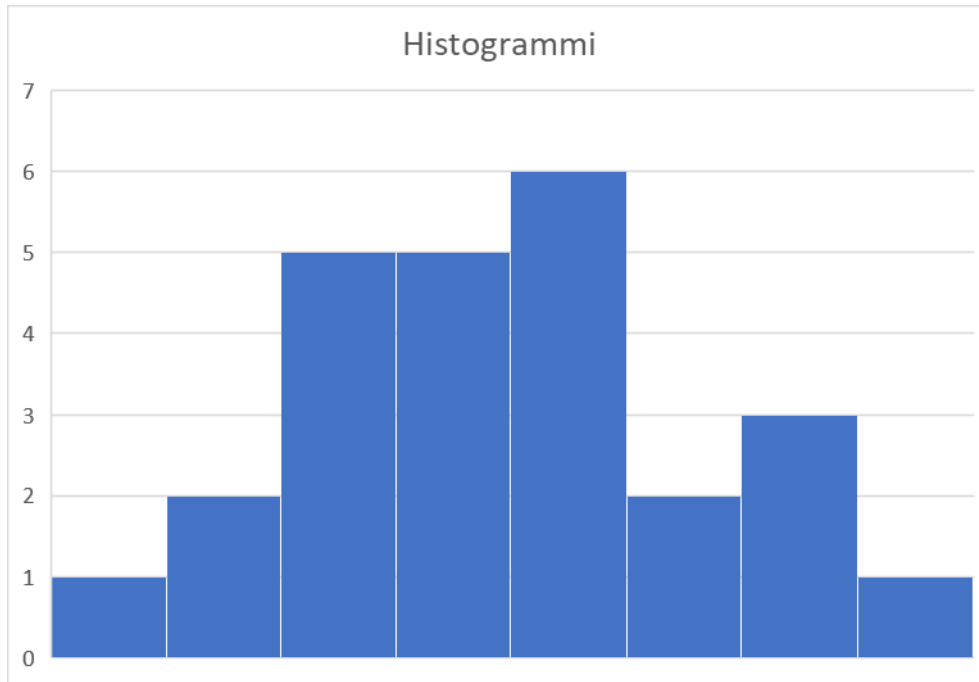
mittauskone osaa ottaa huomioon mittauspään epätasapainon, mutta se jäi epäselväksi, kuinka tämä on varmennettu.

Mitta 4:n kuvaajassa (ks. kuvio 10) ei ole havaittavissa erityisyyttä ja se vaikuttaa olevan tilastollisesti hallinnassa. Siinä on kuitenkin selvästi suurin hajonta, mittausten vaihteluvälin ollessa 0,008 mm. Lisäksi ensimmäisen mittauksen puhtauden vaikutusta ei voida todeta kuvaajasta, koska se ei erityisesti erotu muista tuloksista. Puhtauden vaikutusta samankeskisyyteen on vaikea määrittää, koska lika ei välttämättä siirrä paikkakoordinaatteja aina samaan suuntaan. Todellisuutta parhaiten kuvaavan tilanteen saadaan luotua, kun mittauspisteitä lisätään.



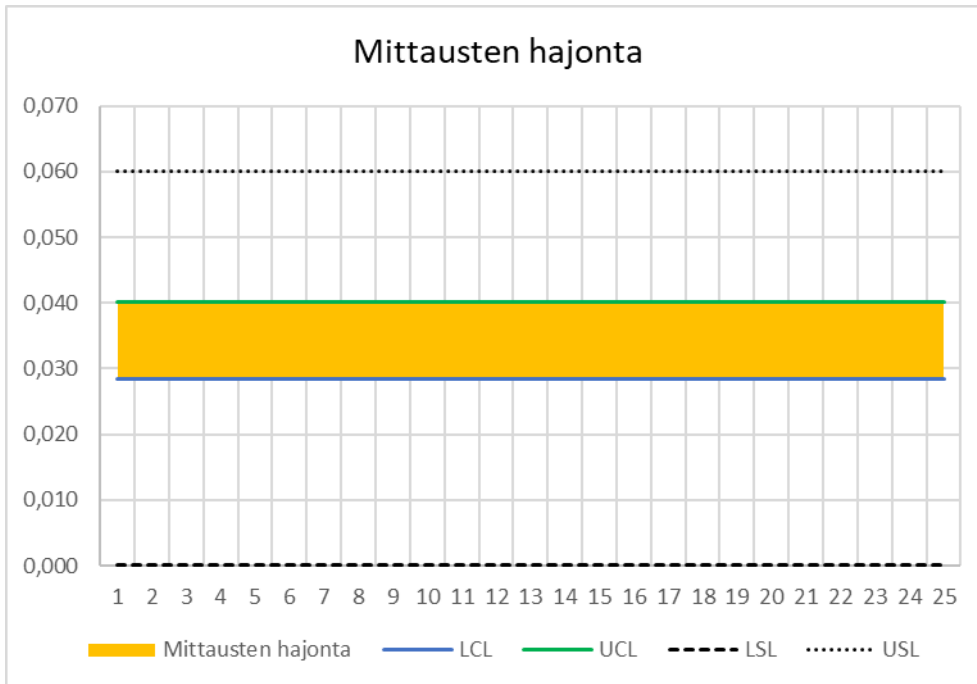
Kuvio 10. Mitta 4:n mittaustulokset.

Myös mitta 4:n histogrammi (ks. kuvio 11) on lähes normaalijakautunut, kun käytettiin kahdeksaa luokkaa. Histogrammista ei voida suoraan havaita mitään huomiota herättävää tilannetta. Paremmiin todellisuutta kuvaaviin tuloksiin saataisiin, kun suoritettaisiin mittaustoistoja enemmän.



Kuvio 11. Mitta 4:n histogrammi.

Kontrollirajojen vaihteluväliksi saatiin noin 0,012 mm. Tämä tarkoittaa, että 99,73 %:n todennäköisyydellä mitattu tulos on $\pm 0,006$ mm rajojen sisäpuolella. Toistettavuusindeksi tulee täten noin 0,52, joka on liian pieni ja voi täten aiheuttaa mittauksista johtuvan tyyppin 1 tai 2 virheen, kun ollaan spesifikaatorajan tuntumassa. Liitteessä 2 on esitettyä samankeskisyysmittauksen suorituskykykäyrä (engl. Gage Performance Curve), josta voidaan visuaalisesti nähdä tyyppin 1 ja 2 virheen alueen. Kaaviossa ei ole otettu huomioon mahdollista bias-virhettä eli systemaattista virhettä, vaan kaavio esittää virheellisen käytöpäätöksen todennäköisyyden yläspesifikaatorajalla. Suuri hajonta ei kuitenkaan aiheuta ongelmia, jos prosessi on tilastollisesti hallinnassa ja ohjattuna mahdollisimman lähelle nollaa. Kuviossa 12 on esitettyä mitta 4:n kontrollirajojen rajaama alue suhteessa spesifikaatioalueeseen.



Kuvio 12. Mitta 4:n hajonta.

9 Prosessin läpikäynti SPC:n avulla

Kohdeyrityksessä kerätään mittausdataa SPC-sovelluksen luettavaksi 15:stä koneistusversiota. Koneistusversiosta riippuen data pitää sisällään noin 20–45 mittausta. Pääosin koneistusversiot ovat samankaltaisia keskenään, mutta jotkin piirteet, nominaalimitat ja toleranssit poikkeavat hieman toisistaan.

Tässä työssä otettiin tarkasteluun yksi koneistusversio ja siitä Pareto-analyysiä hyödyntäen selvitettiin useimmiten vaatimuksenvastaisia kappaleita aiheuttavat mitat. SPC-ohjelmistoa ja tilastollisen prosessinohjauksen teoriaa hyödyntäen pyrittiin selvittämään, mistä ylitykset johtuvat ja kuinka prosessia voitaisiin kehittää.

Datan tueksi selvitettiin vielä vuonna 2021 eniten kustannuksia aiheuttaneet, koneistuksesta johtuneet vaatimustenvastaisuudet. Täytyy huomioida, että toleranssialueen ylitys ei aina automaattisesti tarkoita kappaleen hylkäämistä, vaan se tulee tutkia. Ylitys voi johtua häiriöstä mittauksessa, kuten liasta tai liian huonosta toistotarkkuudesta. Jokaisesta korjausta vaativasta tai romutettavasta kappaleesta avataan vikailmoitus, johon kirjataan kappaleessa esiintyvä vaatimuksenvastaisuus ja epäilty syy, minkä takia vaatimuksenvastainen kappale syntyi. Vikailmoitusten datasta myös tehtiin Pareto-analyysi, jolloin saatiin selville, minkälaiset ongelmat aiheuttivat eniten kustannuksia todellisuudessa.

Koneistusversioksi valikoitui yksi uusimmista malleista, joista kerätään dataa, jolloin dataa ei ollut kertynyt niin paljon kuin tavanomaisesti, mutta kuitenkin yli 100 kappaleesta. Kyseistä versiota koneistetaan kahdella eri koneella, joten pyrittiin selvittämään, onko koneiden välillä huomattavissa merkittäviä eroja. Lisäksi käytössä on kaksi eri kiinnitintä, joita käytetään molemmilla koneilla, mutta niiden välillä ei havaittu merkittävää eroa.

Pareto-analyysejä mittausdatasta tehtiin yhteensä kolme. Ensimmäisessä tarkasteltiin viimeisimmän sadan kappaleen vikoja, riippumatta koneesta. Toisessa tarkasteltiin pelkästään koneen yksi vikoja ja kolmannessa pelkästään koneen kaksi vikoja. Koneelta yksi

oli kerättyä dataa 60 kappaleesta ja koneelta kaksi 42 kappaleesta. Tarkasteltavana olevassa koneistusmallissa SPC-ohjelmistolla seurataan vain samankeskisyys- ja halkaisijamittoja. Muissa malleissa saatetaan näiden lisäksi seurata muoto- ja paikkavirhemittoja, mutta niissä ei olla havaittu ongelmia.

9.1 Vaatimustenvastaisuudet mittausdatan perusteella

Sadasta viimeiseksi koneistetusta kappaleesta, sisältäen datan molemmilta koneilta, 14 mitassa 21:stä on ollut toleranssialueen ylityksiä. Vioista noin 56 % oli halkaisijamitoissa ja loput noin 44 % samankeskisyysmitoissa. Vian esiintyvyys oli 140 % eli 1,4 vikaa per kappale. Ohjelmisto laskee viaksi, vaikka toleranssialueen ylitys olisi vain 0,0001 mm, kun yrityksessä tavallisesti merkitsevä numerona käytetään millin tuhannesosia.

Kun tarkasteltiin molemmilta koneilta tulleita kappaleita, yleisimmin vikoja esiintyi halkaisijamitassa D50, jolloin vikojen esiintyvyys oli jopa 25 %. Tämä kattaa noin 18 % kaikista vioista. Toiseksi yleisimmin vikoja esiintyi samankeskisyysmitassa C97_1, jota esiintyi 18 %:ssa kaikista kappaleista ja kaikista vioista se vastasi noin 13 %. Kolmanneksi yleisin viallinen piirre oli halkaisija D61_2, jonka esiintyvyys oli noin 17 % ja osuus kaikista vioista 12 %. Kolmen mitan viat kattavat noin 43 % kaikista vioista. Taulukossa 1 on esitetty edellä mainitut kolme mitta, joissa havaittiin eniten vikoja.

Taulukko 1. Prosessin kolme yleisimmin havaittua vikaa.

Piirre	Esiintyvyys	Osuus vioista	Kumulatiivinen osuus
D50	25,00 %	17,86 %	17,86 %
C97_1	18,00 %	12,86 %	30,71 %
D61_2	17,00 %	12,14 %	42,86 %

Kun suodattimena käytettiin konetta yksi, saatiin seuraavat tulokset. Kolme useimmiten vaatimustenvastaisuutta aiheuttavat piirteet olivat kaikki halkaisijamittoja. Yleisimpänä oli mitta D50, jossa vikaa esiintyi jopa 45 %:ssa kappaleista. Tämän osuus kaikista vioista oli noin 23 %. Toiseksi yleisimpänä oli D61_2, jota esiintyi noin 28 %:ssa kappaleista. Sen

osuus vioista oli noin 14 %. Kolmantena oli mitta D61_1, joka on samanlainen piirre kuin D61_2, mutta se sijaitsee eri kohdassa kappaletta. Sen esiintyvyys oli 25 % ja osuus vioista noin 13 %. Kolmen piirteen viat kattavat 50 % kaikista kappaleessa esiintyvistä vioista. Koneelta yksi kappaleita oli valmistunut 60 ja niissä oli yhteensä 118 vikaa, joka tekee noin kaksi vikaa per kappale. Halkaisijavikojen osuus kaikista vioista oli noin 69 % ja loput 31 % esiintyi samankeskisyyksimitoissa. Taulukossa 2 on esitetty edellä mainitut kolme yleisimmin havaittua vikaa koneelta yksi.

Taulukko 2. Koneelta yksi havaitut kolme yleisintä vikaa.

Piirre	Esiintyvyys	Osuus vi- oista	Kumulatiivi- nen osuus
D50	45,00 %	22,88 %	22,88 %
D61_2	28,33 %	14,41 %	37,29 %
D61_1	25,00 %	12,71 %	50,00 %

Kun suodattimena käytettiin konetta kaksi, oli valmistuneita kappaleita yhteensä 42 ja niissä yhteensä 28 vikaa, joka tekee noin 0,67 vikaa per kappale. Kolme yleisimmin esiintyvää vikaa on esitetty taulukossa 3. Nämä kolme mittaa kattavat jopa noin 71 % kaikista vioista.

Taulukko 3. Koneelta kaksi havaitut kolme yleisintä vikaa.

Piirre	Esiintyvyys	Osuus vi- oista	Kumulatiivi- nen osuus
C97_1	26,19 %	39,29 %	39,29 %
C116_2	11,90 %	17,86 %	57,14 %
C97_2	9,52 %	14,29 %	71,43 %

9.2 Prosessin suorituskyky

Prosessin suorituskykyä tarkasteltiin C_p - ja C_{pk} -indeksien avulla. C_p -indeksi kertoo prosessin teoreettisen maksimisuorituskyvyn, kun taas C_{pk} -indeksi kertoo todellisen suorituskyvyn. Valitun koneistusmallin 100 viimeisintä kappaletta oltiin koneistettu noin 60:n

peräkkäisen päivän aikana, jolloin ensimmäiset kappaleet eivät välttämättä edusta prosessin tämänhetkistä tilaa. Tämän takia suorituskäytöjen laskemiseen käytettiin 25:n uusimman kappaleen mittaustuloksia.

Taulukossa 4 on esitettyä jokaisen mitan C_p - ja C_{pk} -indeksit, ilman datan suodattamista sekä niin, että suodattimina käytettiin konetta yksi (MC1) ja konetta kaksi (MC2). Mitoista 13 ensimmäistä ovat halkaisijamittoja ja loput samankeskiyysmittoja. Taulukkoon merkittiin punaisella kunkin suodatuksen kolme yleisintä viallista mitta. Prosessin kolme yleisimmin viallista piirrettä ovat mitta 2, 6 ja 20.

Taulukko 4. Prosessin maksimisuorituskyky ja todellinen suorituskyky.

Mitta	Piirre	MC1 & MC2		MC1		MC2	
		C_p	C_{pk}	C_p	C_{pk}	C_p	C_{pk}
1	D	0,66	0,49	2,25	0,55	4,71	3,26
2	D	0,66	0,49	2,24	0,57	4,58	3,15
3	D	1,30	0,90	1,34	0,95	3,62	2,32
4	D	1,21	0,83	1,25	0,86	3,21	2,05
5	D	1,79	0,76	5,00	1,38	6,16	2,93
6	D	0,83	0,25	3,54	0,03	4,49	3,70
7	D	2,65	0,93	2,28	0,79	4,89	1,65
8	D	2,53	0,73	2,24	0,65	5,19	1,43
9	D	1,08	0,95	2,55	1,68	3,41	2,80
10	D	1,15	1,13	2,13	1,78	3,65	2,52
11	D	2,41	1,87	2,98	2,53	4,86	3,44
12	D	2,29	1,60	2,77	2,12	5,25	3,26
13	D	3,44	1,14	3,29	1,26	6,12	2,06
14	C	1,53	0,86	1,64	0,74	2,93	2,22
15	C	1,23	0,69	1,23	0,66	1,35	0,73
16	C	1,60	0,94	1,92	1,26	1,54	0,82
17	C	1,53	0,66	3,05	1,61	1,33	0,41
18	C	1,07	0,37	1,20	0,36	1,23	0,53
19	C	1,55	0,72	2,43	0,88	1,37	0,86
20	C	1,05	0,54	1,07	0,63	1,04	0,29
21	C	1,55	0,29	2,62	0,46	1,13	0,32

Liitteissä 3–11 on esitettyä prosessin kolmen yleisimmän vian ohjauskortit. Vaaleanvihreä alue kuvaa ± 1 :n keskihajonnan rajaamaa aluetta, keltaiset alueet ± 2 :n keskihajonnan rajaamaa aluetta ja punaiset alueet ± 3 :n keskihajonnan rajaamaa aluetta. Alempaa

spesifikaatorajaa kuvaa vihreä viiva ja ylempää punainen. Ohjauskorttien ohjausrajoja ei oltu lukittu, joten kaavion taustan väri muuttui viimeisen mittaustuloksen mukaan seuraavasti:

- Vihreä, kun tulos on spesifikaatioalueella ja alle 80 %:n päässä nominaalimitasta.
- Keltainen, kun tulos on spesifikaatioalueella ja yli 80 %:n päässä nominaalimitasta.
- Tummanpunainen, kun tulos on spesifikaatioalueen ulkopuolella.

Todellisuudessa, kun ohjausrajat on lukittu, muuttuu taustan väri seuraavasti:

- Vihreä, kun tulos on ohjausrajojen sisällä.
- Keltainen, kun tulos on ohjausrajojen ulkopuolella.
- Tummanpunainen, kun tulos on spesifikaatioalueen ulkopuolella.

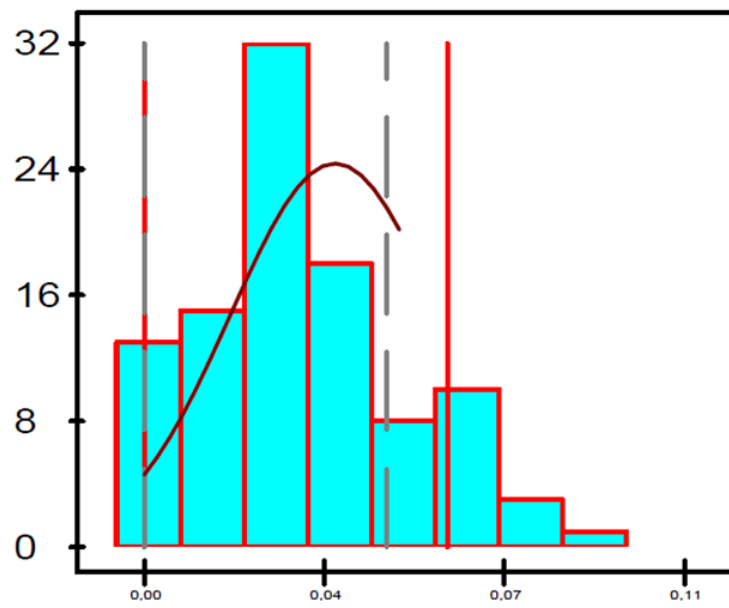
80 %:n raja on suunniteltu prosessin sisäänajoa varten, kun mittaustuloksia ei ole vielä riittävästi ohjausrajojen määrittämistä varten. Tarkastelun kohteena olevalle koneistustallille ei oltu tehty ohjausrajojen lukitusta ja sitä ei voinut tehdä muulla kuin mittauskoneen tietokoneella olevalla SPC-ohjelmalla.

Taulukosta 4 nähdään, että prosessin kolmen yleisimmän vian C_p - ja C_{pk} -indeksien arvot ovat liian pieniä, joten myös tulevaisuudessa on odotettavissa samanlaisia tai huonompia tuloksia ellei prosessia kehitetä. Liitteessä 3 on mitan 2 ohjauskortti. Siinä on selkeästi erotettavissa jaksottaisuutta ja tilastollisesti epänormaali tilanne, koska lähes kaikki pisteet sijaitsevat ± 1 :n keskihajonnan rajaaman alueen sisällä. Tämä tilanne johtuu siitä, että koneen yksi ja kaksi tulokset ovat sekoittuneet keskenään. Liitteissä 4 ja 5 on mitan 2 mittaustulokset suodatettuna kone kohtaisesti. Liitteessä 4 on koneen yksi ohjauskortti ja siitä on helppo havaita puutteellinen kohdistus ja että prosessi on kynnystilassa. Mitan C_p -indeksi on 2,24, jolloin kohdistamalla prosessi spesifikaatioalueen keskelle, välttyttiin suurella todennäköisyydellä spesifikaatioalueen ylityksiltä. Liitteessä 5 on koneen

kaksi ohjauskortti. Siitä on havaittavissa vain pieni kohdistusvirhe, mutta se ei aiheuta toimenpiteitä, koska C_{pk} -indeksi on 3,15.

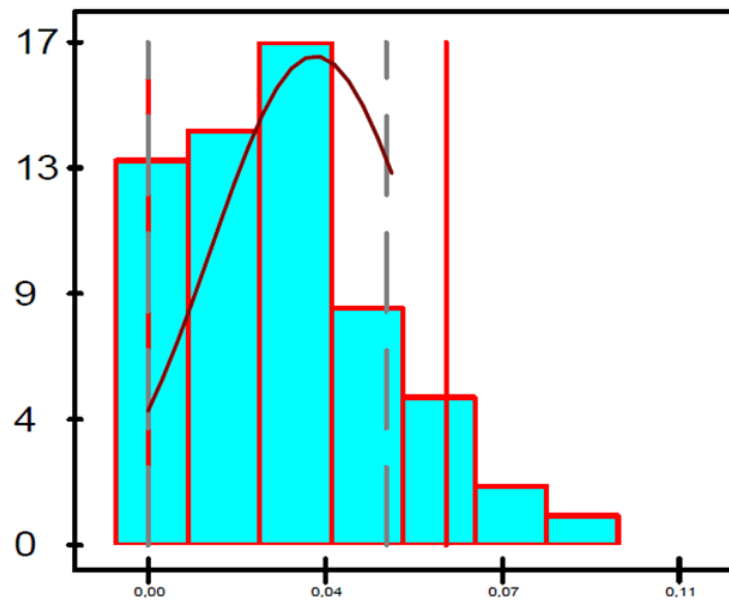
Mitta 6:n ohjauskortti on esitetty liitteissä 6, 7 ja 8. Liitteessä 6 on ohjauskortti ilman suodatusta, liitteessä 7 koneella yksi valmistetut kappaleet ja liitteessä 8 koneella kaksi valmistetut kappaleet. Suodattamattomasta ohjauskortista voidaan havaita samanlaista tilastollisesti harvinaista tilannetta kuin mitan 2 ohjauskortista eli vaaditaan tietojen suodattamista, että löydetään mitan ongelma. Koneella yksi on erittäin huono kohdistus ja täten vaatimustenvastaisia kappaleita on odotettavissa paljon myös tulevaisuudessa. Mitan C_p -indeksi on 3,54 eli prosessi tulee olemaan erinomaisella tasolla, kun se kohdistetaan oikein. Täten myös tämän mitan kohdalla prosessi on kynnystilassa. Koneen kaksi suorituskyky on erittäin hyvä ja täten ei aiheuta toimenpiteitä.

Mitta 20:n ohjauskortti on esitetty liitteissä 9, 10 ja 11. Liitteessä 9 on ohjauskortti ilman suodatusta, liitteessä 10 koneella yksi valmistetut kappaleet ja liitteessä 11 koneella kaksi valmistetut kappaleet. Prosessin kyvykkyyksien arvot ovat liian matalia, jolloin edes kohdistamalla prosessi oikein, ei voida välttyä vaatimustenvastaisilta kappaleilta. Lisäksi kaikkien kolmen ohjauskorttien liikkuvan vaihteluvälin kaaviot osoittavat, että prosessiin vaikuttaa jokin erityisyys. Tämä on havaittavissa myös mitan histogrammeista. Kuviossa 13 on esitetty viimeisen 100:n kappaleen arvot ilman suodatusta. Histogrammista voidaan nähdä, että se ei ole normaalijakautunut ja siinä on havaittavissa erillishuippu.



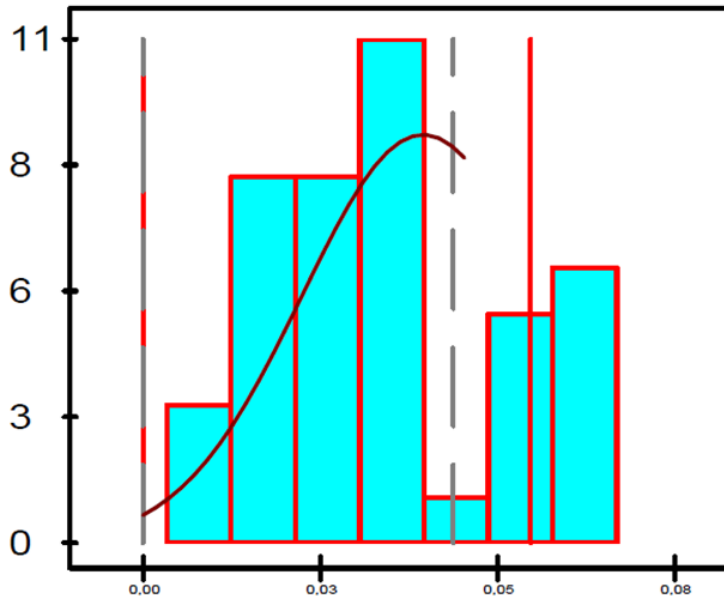
Kuvio 13. Mitan 20 histogrammi ilman suodatusta.

Kuviossa 14 on esitettyä kaikki koneelta yksi valmistuneet kappaleet. Histogrammi vaihtaa normaalijakautuneelta, mutta muutamia arvoja menee spesifikaatioalueen ulkopuolelle, joka tarkoittaa, että prosessin hajonta on liian suurta.



Kuvio 14. Mitan 20 histogrammi koneelta yksi.

Kuviossa 15 on esitetty kaikki koneelta kaksi valmistuneet kappaleet. Histogrammista nähdään, että se ei ole normaalijakautunut ja siinä on selkeä erillishuippu. Myös koneelta kaksi valmistuneiden kappaleiden hajonta on liian suuri.



Kuvio 15. Mitan 20 histogrammi koneelta kaksi.

Edellä mainittujen tulosten perusteella voidaan todeta, että prosessi on kaaoksen tilassa. Prosessiin vaikuttavat erityisyyt tulisi paikantaa, poistaa ja ennaltaehkäistä niiden esiintyminen tulevaisuudessa. Vasta kun erityisyyt on saatu poistettua prosessista, voidaan prosessin hajontaa pienentää, jos se on enää välttämätöntä.

Taulukossa 5 on esitetty tarkastellun koneistusversion kaikkien mittojen C_p - ja C_{pk} -indeksit korostaen niiden vaatimusten riittävyyttä. Punaisella on merkattuna kyvykkyyksindeksit, jotka ovat alle 1,0, keltaisella ne, jotka ovat yli 1,0, mutta alle 1,33 ja vihreällä ne, jotka ovat arvoltaan yli 1,33. Tästä voidaan helposti havaita, että molempien koneiden halkaisijamittojen maksimisuorituskyvyt ovat pääpiirteittäin riittävän hyviä, mutta koneella yksi on kahdeksassa mitassa kohdistusvirhe. Näissä mitoissa tulisi prosessi kohdistaa spesifikaatioalueen keskelle, niin vaatimustenvastaisilta kappaleilta vältyttäisiin tulevaisuudessa todennäköisemmin. Kohdeyrityksessä tarkoille porauksille on suunniteltu

työkalujen runko-osat mittatilaustyönä. Runko-osaan vaihdetaan aika ajoin teräpalat, jotka määrittävät piirteen halkaisijan. Tällöin halkaisijaa ei voida pelkästään teräpaloja säätämällä pienentää riittävästi, jolloin prosessin kohdistusta ei voida tehdä pelkästään säätämällä. Jotta prosessi saadaan ohjattua spesifikaatioalueen keskelle, tulisi tilata uudet runko-osat.

Tarkastelun kohteeksi valitun samankeskisyysmitan lisäksi muissa samankeskisyysmitoissa näyttäisi olevan puutteellinen kohdistus tai liian suuri hajonta (ks. taulukko 5). Todennäköisesti myös näihin mittoihin vaikuttaa erityisyy.

Taulukko 5. Tarkastellun prosessin kyvykkyyksindeksit

Mitta	Piirre	MC1 & MC2		MC1		MC2	
		C _p	C _{pk}	C _p	C _{pk}	C _p	C _{pk}
1	D	0,66	0,49	2,25	0,55	4,71	3,26
2	D	0,66	0,49	2,24	0,57	4,58	3,15
3	D	1,30	0,90	1,34	0,95	3,62	2,32
4	D	1,21	0,83	1,25	0,86	3,21	2,05
5	D	1,79	0,76	5,00	1,38	6,16	2,93
6	D	0,83	0,25	3,54	0,03	4,49	3,70
7	D	2,65	0,93	2,28	0,79	4,89	1,65
8	D	2,53	0,73	2,24	0,65	5,19	1,43
9	D	1,08	0,95	2,55	1,68	3,41	2,80
10	D	1,15	1,13	2,13	1,78	3,65	2,52
11	D	2,41	1,87	2,98	2,53	4,86	3,44
12	D	2,29	1,60	2,77	2,12	5,25	3,26
13	D	3,44	1,14	3,29	1,26	6,12	2,06
14	C	1,53	0,86	1,64	0,74	2,93	2,22
15	C	1,23	0,69	1,23	0,66	1,35	0,73
16	C	1,60	0,94	1,92	1,26	1,54	0,82
17	C	1,53	0,66	3,05	1,61	1,33	0,41
18	C	1,07	0,37	1,20	0,36	1,23	0,53
19	C	1,55	0,72	2,43	0,88	1,37	0,86
20	C	1,05	0,54	1,07	0,63	1,04	0,29
21	C	1,55	0,29	2,62	0,46	1,13	0,32

Toistotarkkuusmittauksissa havaittiin, että samankeskisyysmittauksen hajonta oli liian suurta verrattuna toleranssialueeseen. Tämä suurentaa prosessin havaittua hajontaa, joka pienentää kyvykkyyksindeksiä ja samalla hankaloittaa hallittavuutta. Epäilyksenä on, että kappaleiden puhtaustaso vaihtelee liikaa ja tämä ei välttämättä tullut riittävän hyvin ilmi toistotarkkuustestiä tehdessä. Kappaleiden koneellista puhdistusta tulisi kehittää,

joka voisi pienentää samankeskisyysmittojen hajontaa. Toisena päätekijänä liian suurelle hajonnalle arvellaan olevan valujen mittojen suuri vaihtelevuus. Koneistusmenetelmää tulisi kehittää niin, että valujen vaihtelevuus ei vaikuttaisi liikaa lopputulokseen.

9.3 Vaatimustenvastaisuudet vikailmoitusdatan perusteella

Vikailmoitusdatan avulla selvitettiin vuonna 2021 korjattujen tai romutettujen kappaleiden kustannukset. Dataa suodatettiin niin, että se sisälsi vain koneistuksesta johtuneet viat, mutta kuitenkin niin, että jokainen koneistusmalli oli mukana analyysissä.

Eniten kustannuksia aiheutui vaatimustenvastaisista samankeskisyysmitoista. Tämän osuus kokonaiskustannuksista oli noin 44 %. Toiseksi eniten kustannuksia aiheutui vaatimustenvastaisesta halkaisijasta, jonka osuus oli noin 18 % kaikista kustannuksista. Kolmanneksi eniten kustannuksia aiheutti työkalun hajoaminen, jonka osuus kustannuksista oli myös noin 18 %. Nämä kolme virhettä aiheuttivat noin 80 % kaikista kustannuksista. Muita kustannuksia aiheuttavia ongelmia datan perusteella olivat menetelmä virhe, väärä käytetty työkalu, kiinnittimessä ollut häiriö ja ohjelmavirhe.

Mittauskoneen mittausdatassa on virheitä, johtuen kappaleiden puhtaudesta, mutta epäillyt virheet tarkastetaan aina uusintamittauksen avulla, jolloin kappale puhdistetaan aina manuaalisesti. Puutteelliset kohdistukset halkaisijamitoissa ja erityissyyntä läsnäolo samankeskisyysmitoissa selvästikin aiheuttavat todellisia ylimääräisiä kustannuksia.

10 Yhteenveto

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tänä päivänä kohdeyrityksen SPC:n hyödyntäminen koneistuksessa on varsin puutteellista. Aikaisemmin aloitettu käytäntö ei erinäisten syiden vuoksi ole koskaan otettu jokapäiväiseen työhön käyttöön. Vähäiset lisenssien määrät SPC-ohjelmistoon sekä ymmärrys sen käytöstä ovat suuri vaikuttava tekijä, kun puhutaan SPC:n käytöstä kohdeyrityksen tuotannossa. Haastattelujen perusteella saatiin kuitenkin käsitys, että SPC:n periaate olisi työntekijöiden hallussa ja uskomus sen hyödyllisyydestä kävi kaikissa haastatteluissa ilmi. Tilastollisen prosessinohjauksen avulla voitaisiin analysoida dataa helposti sekä mahdollisesti tehdä ennakoivia toimenpiteitä ennen kuin merkittäviä muutoksia prosessissa tapahtuu.

Jotta SPC voitaisiin ottaa laajalti käyttöön kohdeyrityksessä, tulisi kaikille työntekijöille järjestää koulutus, jossa käytäisiin SPC:n periaate läpi sekä ohjeistettaisiin SPC-ohjelmiston käyttöä. Asianmukaiset ohjeistukset ja varmuus itse sovelluksen käytöstä alentavat työntekijöiden kynnystä hyödyntää tilastollista prosessinohjausta tuotannossa. On ymmärrettävää, että jos perusasiat eivät ole hallussa, jää datan seuraaminen SPC-ohjelmiston avulla helposti tekemättä. SPC:n seuraamista helpottamaan tulisi sen painoittaminen tuotannossa mieltä tarkkaan niin, että se on helposti käytettävissä. Kirjalliset ohjeet olisi myös hyvä olla saatavilla, jotta työntekijät voivat tarkistaa yksityiskohtia sieltä niiden unohtuessa. Ohjeiden sisältö tulisi pitää yksinkertaisena ja sisällyttää siihen vain oleellinen tieto SPC-ohjelmistoon liittyen.

Lisenssien puuttuminen SPC-ohjelmistoon on yksi vaikuttavimmista kompastuskivistä tällä hetkellä. Tiedettävästi lisenssejä on jäljellä vain muutama. Jotta SPC:tä voitaisiin käyttää jatkuvasti ja tehokkaasti, tulisi lisenssejä hankkia lisää, varsinkin sellaisille työntekijöille ja koneille, joissa ohjelmistoa jatkuvasti tulisi käyttää. Tämä tarkoittaisi sitä, että yksi lisenssi tuli ainakin olla tuotannon puolella työntekijöiden käytettävissä ja tämän lisäksi lisenssejä olisi hyvä olla koneistuspujan johtajalla, menetelmän kehittäjällä ja työnjohtajalla. Näin ollen henkilöt, jotka dataa hyödyntävät jokapäiväisessä työssään, pääsisivät käsiksi ohjelmistoon ja sieltä saataviin kaavioihin.

Tutkimuksessa suoritetuilla toistotarkkuusmittauksilla saatiin hyvä käsitys tuotannossa tapahtuvan mittauksen tämänhetkisestä tilasta ja ongelmakohdista. Tuloksena voidaan sanoa, että mittauksien avulla saadaan pääpiirteittäin erittäin hyvää ja riittävää palautetta prosessista, jonka vuoksi tilastollista prosessinohjausta on mahdollista luotettavasti ja tarkoituksenmukaisesti käyttää. Ongelmakohdiksi ilmaantui kappaleen puhtaustaso, mikä ei toistomittauksien perusteella haitallisesti vaikuta halkaisijamittoihin, mutta samankeskiyysmittauksiin sillä arvellaan olevan enemmän merkitystä. Lisäksi samankeskiyysmittauksen toistotarkkuus ei ollut riittävällä tasolla, jolloin on mahdollisuus, että tehdään tyyppin 1 tai 2 virhe, kun mittaustulos on spesifikaatorajan tuntumassa. Huono toistotarkkuus ei aiheuta ongelmia, mikäli prosessi on tilastollisesti hallinnassa ja ohjattuna mahdollisimman lähelle nollaa.

Myös SPC-ohjelmiston avulla pystyttiin paikantamaan kehitystä vaativia kohtia. Halkaisijamittojen hajonta oli riittävän pieni, mutta kohdistus oli puutteellinen. Samankeskiyysmitassa havaittiin erityissyyntä läsnäolo, joka todennäköisesti suurentaa mitan hajontaa ja aiheuttaa vaatimustenvastaisia kappaleita.

Kehityskohteita tulevaisuuteen jäi samankeskiyysmittauksen hajonnan pienentäminen ja pienentämisen toteaminen. Tämä mahdollisesti voidaan saavuttaa, kun varmistetaan, että mittauskone osaa todella huomioida mittauspään tasapainottamisen, varmistetaan riittävä puhtaustaso ja mahdollisesti muutetaan mittauspäättä niin, että molemmat piirteet voidaan mitata samalta puolelta kappaletta, jos mahdollista.

Työn tuloksia voidaan pitää luotettavina, sillä tulokset perustuvat vakiintuneisiin tilastollisiin mittauksiin ja haastatteluihin. Tutkimuksen tuloksia voi kohdeyrityksessä hyödyntää tulevaisuudessa, kun halutaan kehittää SPC:n käyttöä koneistuksessa tai muissa yrityksen prosesseissa. Tutkimuksen perusteella tulevaisuudessa voisi tutkia toimenpiteitä, joiden avulla saavutettaisiin riittävä puhtaustaso kustannustehokkaasti. Lisäksi voitaisiin tutkia kuinka usein toistotarkkuusmittaukset kannattaa suorittaa ja olisiko siihen

mahdollista teettää kalibroitu kappale, jolloin saataisiin myös selville sen hetkinen systemaattinen mittausvirhe.

Lähteet

- AIAG, (2010). *Measurement Systems Analysis Reference Manual (4. painos)*. Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation.
- Deming, W.E. (2000). *Out of the Crisis*. MIT Press. (Alun perin julkaistu 1982)
- Gejdoš, P. (2015). *Continuous Quality Improvement by Statistical Process Control*. *Procedia Economics and Finance*, Vol. 34, s. 565-572. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01669-X](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01669-X)
- Hessing, T. (n.d.) *Gage Repeatability and Reproducibility (R&R)*. Noudettu 11.1.2022 osoitteesta <https://sixsigmastudyguide.com/repeatability-and-reproducibility-rr/>
- Järnefelt, G. (1990). *Tuoteprosessien tilastollinen valvonta – SPC*. Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- Karjalainen, T & Karjalainen, E.E. (2002). *Six Sigma – Uuden sukupolven johtamis- ja laatu menetelmä*. Quality Knowhow Karjalainen Oy.
- Karjalainen, T. (2014) *Informaation luotettavuus on usein kehityksen este – Tunnista mittausjärjestelmän vaihtelu*. Quality Knowhow Karjalainen Oy. Noudettu 22.8.2021 osoitteesta <http://www.qk-karjalainen.fi/fi/artikkelit/mittausjärjestelmän-vaihtelu/>
- Kume, H. (1989). *Laadun parantamisen tilastolliset menetelmät*. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. (Alun perin julkaistu 1985).
- Li, J. (2021). *Application of statistical process control in engineering quality management*. IOP Conference Series. Earth and Environmental Science, 831(1) <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/831/1/012073>
- Logothetis, N. (1992). *Managing for Total Quality: From Deming to Taguchi and SPC*. Prentice Hall International.
- Lundkvist, P., Bergquist, B. & Vanhatalo, E. (2018). *Statistical methods – still ignored? The testimony of Swedish alumni*. *Total Quality Management & Business Excellence*, 31:3-4, 245-262. <https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1426449>
- Merriman, (2018). *A Review of Current Implementations of statistical process control in large organizations*. *Journal of Management & Engineering Integration*, 11(2), 46-54. Noudettu 21.3.2022 osoitteesta <https://www.proquest.com/scholarly-jour>

nals/review-current-implementations-statistical/docview/2316725381/se-2?ac
countid=14797

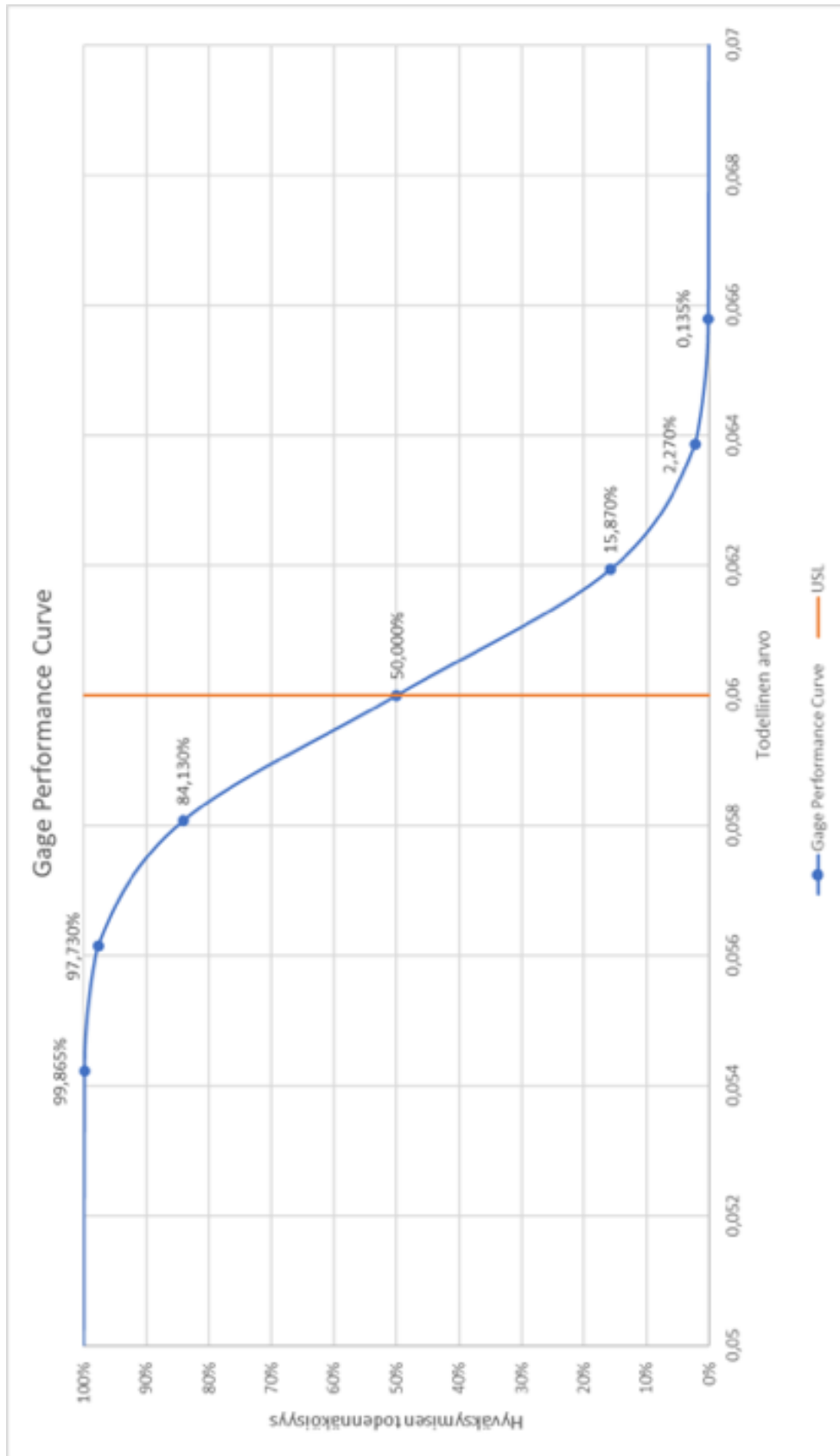
- Owen, M. (1989). *SPC and Continuous Improvement*. IFS Publications.
- Salomäki, R. (2003). *Suorituskykyiset prosessit: Hyödynnä SPC* (2. uudistettu painos).
Metalliteollisuuden keskusliitto.
- Scherkenbach, W.W. (1991). *Deming's Road to Continual Improvement*. SPC Press.
- Shewhart, W.A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. D. Van
Nostrand Company.
- Sousa, S., Rodrigues, N. & Nunes, E. (2017). *Application of SPC and Quality Tools for Pro
cess Improvement*. *Procedia Manufacturing*, Vol. 11, s. 1215-1222.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.247>
- Wetherill, G.B & Brown, D.W. (1991). *Statistical Process Control: Theory and practice*.
Chapman and Hall.
- Wheeler, D.J & Chambers, D.S. (1992). *Understanding Statistical Process Control*. SPC
Press.

Liitteet

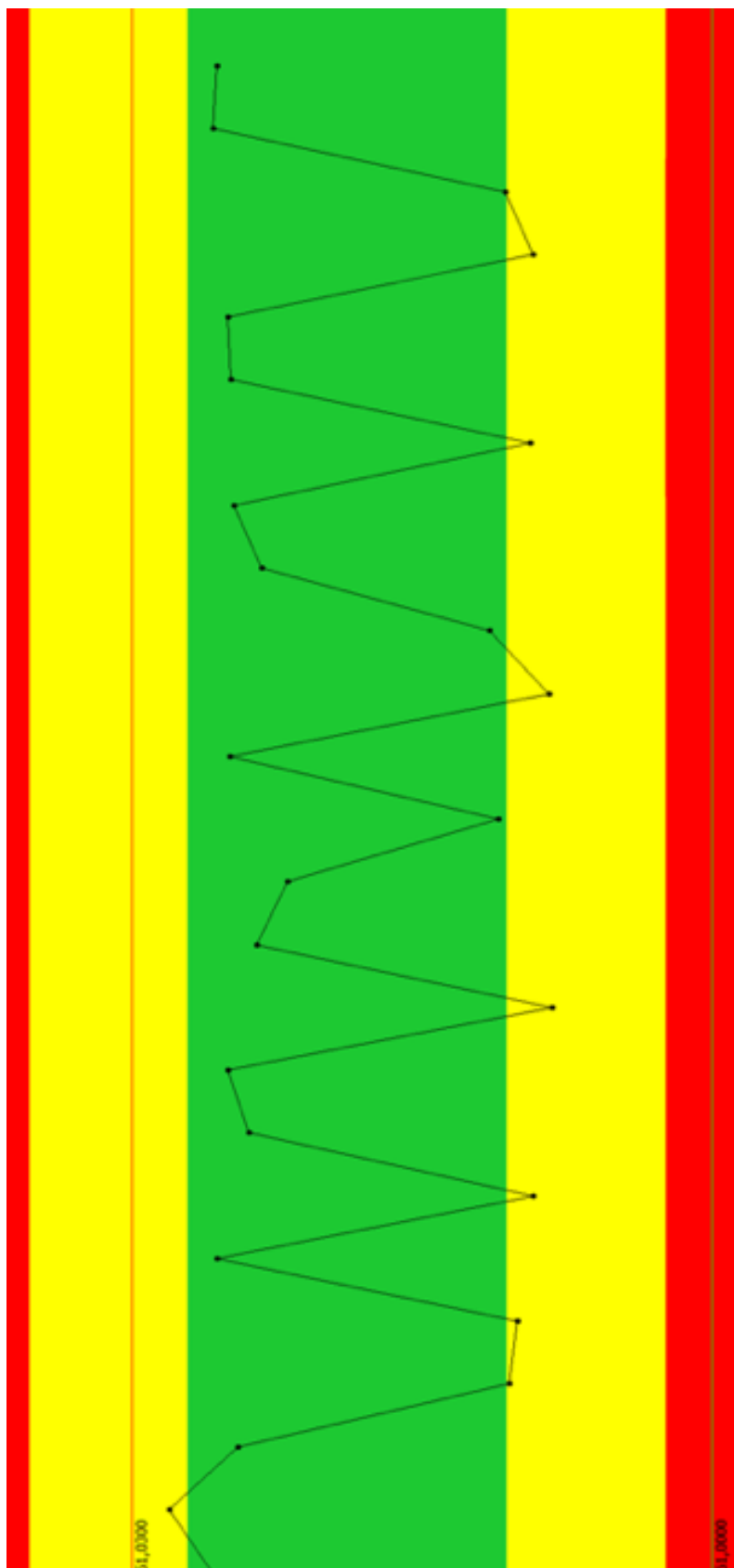
Liite 1. Teemahaastattelun kysymykset

1. Miksi SPC on/ei ole/ei ole enää käytössä?
 - Kuka sitä käyttää?
 - Onko haastavaa ja miksi?
 - Kuinka sitä käytetään jokapäiväisessä työssä?
 - Koetko, että siitä olisi/on hyötyä?
2. Onko SPC:stä saatu koulutusta?
 - Onko koulutus ollut riittävää?
 - Haluaisitko lisäkoulutusta?
3. Onko SPC-ohjelmistosta saatu koulutusta?
 - Onko koulutus ollut riittävää?
 - Haluaisitko lisäkoulutusta?
4. Kuinka kehitysprosessi on määritetty nykyään?
 - Kuinka viat paikannetaan?
 - Miten paikannetaan kehitystä vaativat kohteet?
 - Kuka tekee parannukset/kehitykset?
 - Kuinka parannuksen toimivuus todistetaan?
5. Onko ennaltaehkäisevää laadunvarmistusta vai tehdäänkö sitä vain jälkikäteen?
6. Löytyykö lokia/päiväkirjaa tehdyistä korjaavista toimenpiteistä?
 - Jos on, niin hyödynnetäänkö sitä tulevilla korjauksissa?
7. Kulkeeko informaatio (mittaustulokset) riittävän hyvin?
 - Koneistajille?
 - Menetelmän kehittäjille?
 - Laadulle?
 - Johtoon?
8. Onko asioihin aina mahdollista itse vaikuttaa?
 - Missä tapauksessa ei?
9. Onko jatkuvaa parantamista vai tulipalojen sammuttelua?
10. Mitä mittoja SPC:hen olisi hyvä sisällyttää?
11. Oletko ollut mukana problem solving -palavereissa ja minkä perusteella niitä pidetään?

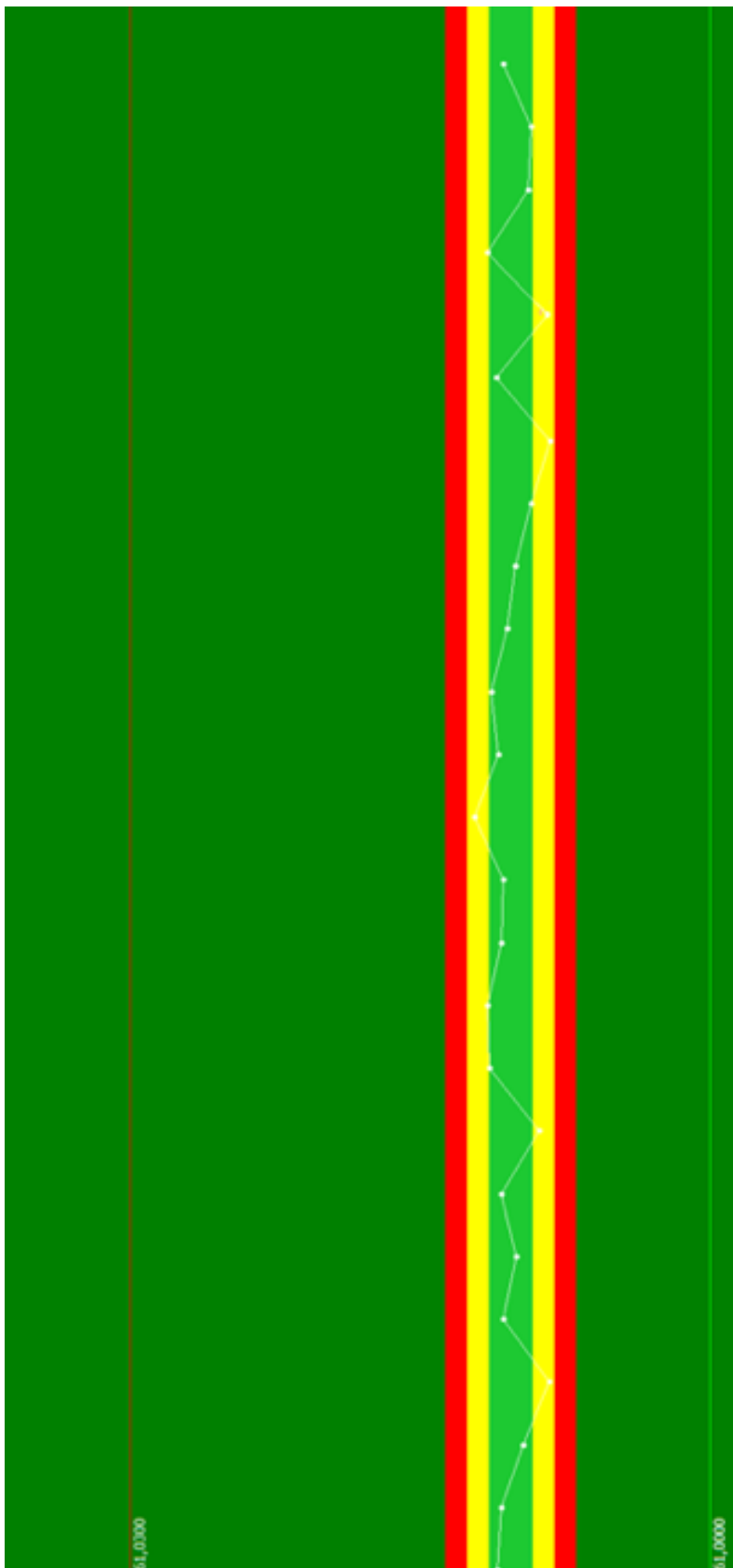
Liite 2. Suorituskykykäyrä



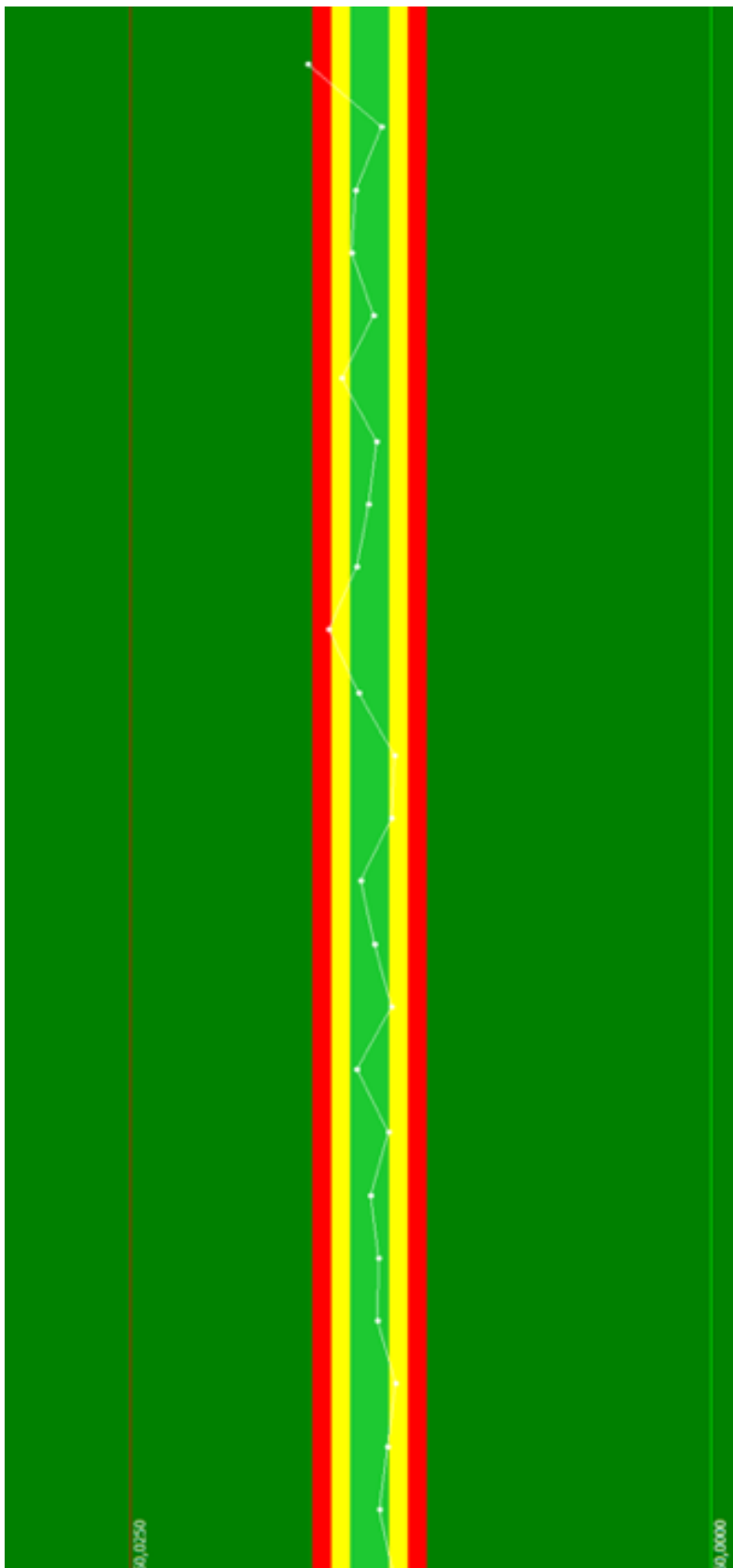
Liite 3. Mitta 2:n tulokset



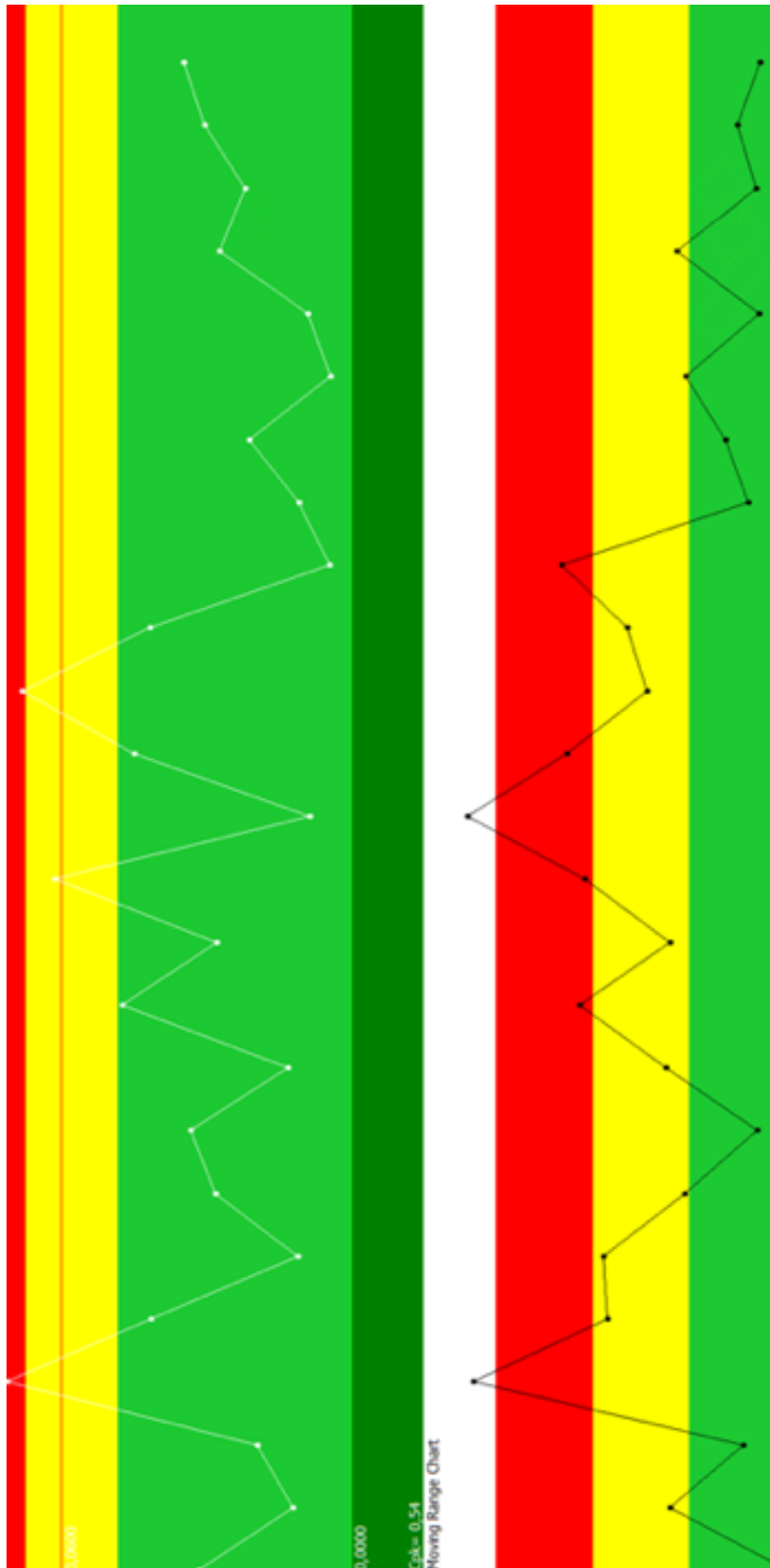
Liite 4. Mitta 2:n tulokset koneelta yksi

Liite 5. Mitta 2:n tulokset koneelta kaksi

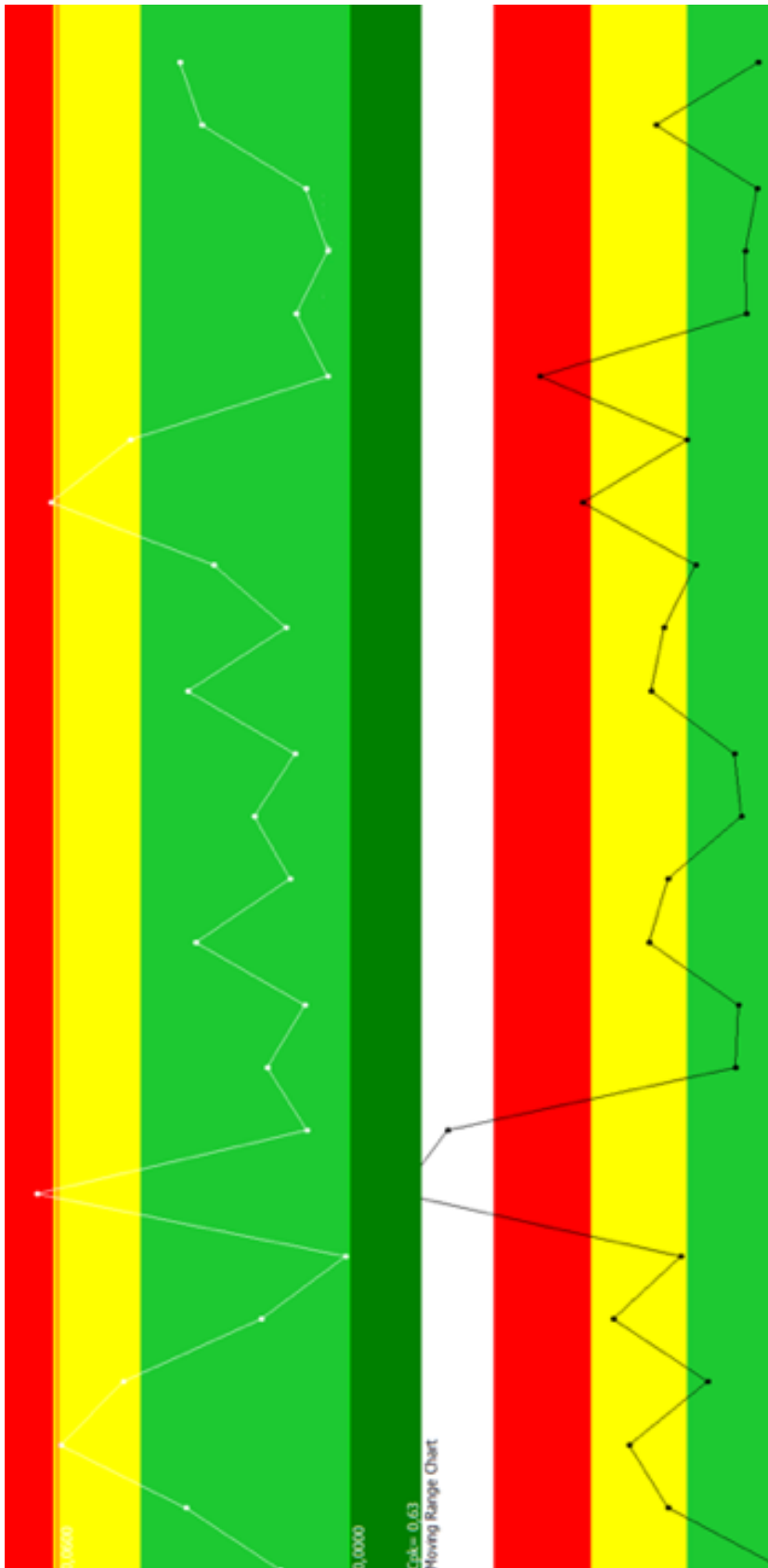
Liite 7. Mitta 6:n tulokset koneelta yksi

Liite 8. Mitta 6:n tulokset koneelta kaksi

Liite 9. Mitta 20:n tulokset



Liite 10. Mitta 20:n tulokset koneelta yksi



Liite 11. Mitta 20:n tulokset koneelta kaksi

