

Jere Purmonen

# Testausaseman vaihtelun pienentäminen ja ensisaannon parantaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

4.5.2017

Tekijä Otsikko	Jere Purmonen Testausaseman vaihtelun pienentäminen ja ensisaannon parantaminen
Sivumäärä Aika	37 sivua + 2 liitettä 4.5.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikka ja terveydenhuollon tekniikka
Ohjaajat	tuotantopäällikkö Satu Savolainen-Pulli lehtori Esko Tattari
<p>Insinööriyössä tutkittiin Vaisala Oyj:n toimeksiantona tuotantosolun testausaseman hallitsemattoman vaihtelun lähteitä ja ajoittain heikkoon ensisaantoon johtavia syitä. Työn tavoitteena oli löytää ja toteuttaa ratkaisuja, joilla pienennetään solun tahtiaikaa ja etenkin tahtiajan vaihtelua.</p> <p>Tutkimalla mittausdataa ja tekemällä havaintoja paikan päällä löydettiin häiriön aiheuttajia testausaseman mittausolosuhteissa, tunnistettiin turhaa yliprosessointia ja löydettiin testauslaitteiston puutteita, jotka hankaloittavat operaattorin työntekoa. Ongelmien korjaamiseksi kehitettiin ratkaisuja, joiden toimivuus todettiin kokeellisesti rakentamalla prototyyppäjä ja suorittamalla Gage R&amp;R -toistoajoja.</p> <p>Työn lopputuloksena rakennettiin kokonaisuudessaan uusi testausasema, joka on yksinkertaistettu, kattavasti standardoitu sekä suunniteltu torjumaan yleisimmät vaihtelun lähteet. Harkittujen laitevalintojen ansiosta uusi asema kykenee osoitetusti vähentämään mitaustulosten ja tahtiajan vaihtelua sekä muuta hukkaa.</p> <p>Insinööriyön liitteet sisältävät luottamuksellista tietoa ja on salattu toimeksiantajan pyynnöstä.</p>	
Avainsanat	sarjatuotanto, vaihtelu, tahtiaika, toistettavuus

Author Title	Jere Purmonen Reduction of Variation and Improvement of the First Pass Yield of a Test Station
Number of Pages Date	37 pages + 2 appendices 4 May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation Option	Electronics and Medical Engineering
Instructors	Satu Savolainen-Pulli, Production Manager Esko Tattari, Senior Lecturer
<p>This thesis work was commissioned by Vaisala Oyj to examine the sources of uncontrollable variation and reasons leading to intermittently poor first pass yields of the test station in a production cell. The objective was to find and implement solutions that reduce the cycle time and particularly variation in cycle times of the production cell.</p> <p>Disturbances in the measurement conditions were discovered by researching measurement data and making observations on site. Additionally, the research uncovered both overprocessing and shortcomings in the testing equipment that hinder the work of the cell operator. The problems were addressed by developing prototypes that were validated through deployment of the Gage R&amp;R methodology.</p> <p>The work resulted in the construction of an entirely new test station. It is simplified, comprehensively standardised and designed to remove the most common sources of variation. The new test station features deliberately selected equipment that provably reduces variation of measurement results, cycle times and other wastes of manufacturing.</p> <p>The appendices contain confidential information and have been kept undisclosed at the request of the commissioner of the work.</p>	
Keywords	mass production, variation, cycle time, repeatability

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lean-periaatteet	2
3	Tilastolliset menetelmät	5
3.1	Laadunohjaus	5
3.2	Tilastollinen prosessinohjaus	6
3.3	Toistettavuus ja uusittavuus	8
3.4	Gage R&R Minitab-ohjelmistolla	9
4	Testausaseman nykytila	12
4.1	Saanto ja väärät negatiiviset tulokset	13
4.2	Väärrien negatiivisten tulosten erittely	14
4.3	Lopulliset hylkäykset	16
4.4	Anturiyksikön virhenäyttämät	18
4.5	GPS- ja telemetriaviat	20
4.6	Ajallinen hukka	21
5	Uuden testausaseman prototyyppi	22
5.1	Olosuhteiden tasaaminen	22
5.2	Prototyypin rakennus	23
5.3	Viivakoodinlukija	24
5.4	Toistettavuus prototyyppillä ja tuotantoasemilla	25
6	Uuden testausaseman lopullinen versio	28
6.1	Testiajan lyhentäminen	29
6.2	Toistoajat	30
6.2.1	Ideaaliolosuhteet	30
6.2.2	Haastavat olosuhteet	31
6.3	Viivakoodinlukijan vaikutus tahtiaikaan	33
7	Yhteenveto	34

Liitteet

Liite 1. Loppukokoonpanon prosessikuvaus

Liite 2. Pakkaussolun testausaseman testisekvenssi

## Lyhenteet

ANOVA	<i>Analysis of variance.</i> Varianssianalyysi.
CSV	<i>Comma-separated values.</i> Tekstipohjainen tiedostomuoto taulukoidulle datalle.
EMC	<i>Electromagnetic compatibility.</i> Sähkömagneettinen yhteensopivuus.
ESD	<i>Electrostatic discharge.</i> Sähköstaattinen purkaus.
GPS	<i>Global Positioning System.</i> Satelliittipaikannusjärjestelmä.
MS Excel	<i>Microsoft Excel.</i> Taulukkolaskentaohjelmisto.
RFID	<i>Radio frequency identification.</i> Radiotaajuinen etätunnistus.
R&R	<i>Repeatability and reproducibility.</i> Toistettavuus ja uusittavuus.
SI	<i>Système international d'unités.</i> Kansainvälinen mittayksikköjärjestelmä.
SPC	<i>Statistical Process Control.</i> Tilastollinen prosessinohjaus.

## 1 Johdanto

Lean-ajattelusta on tullut arkipäivää kaikilla teknologiateollisuuden aloilla ja sen soveltaminen on tunnusomaista lähes kaikille alansa johtaville yrityksille. Lean-periaatteita käytetään toiminnan kehittämiseen myös Vaisala Oyj:ssä, joka on tämän insinööriyön toimeksiantaja. Vaisalan valmistamien elektroniikkalaitteiden sarjatuotannossa lean-työkälyt soveltuvat muun muassa työvaiheiden standardointiin, arvaamattoman vaihtelun vähentämiseen sekä hukkan poistamiseen.

Lean-ajatteluun kuuluu erottamattomasti jatkuvan parantamisen kehä ja pyrkimys parempaan. Vaikka täydellisyyttä ei voi koskaan saavuttaa, sitä voi aina lähestyä askel kerrallaan. Tämäkin insinööriyö on jatkoa siitä, mihin aiemmin suoritettujen parannusprojektien ja opinnäytetyöt ovat päättyneet, ja se määrittää vastaavasti lähtökohdan seuraaville kehitystarpeille.

Insinööriyön tutkimuksen kohteena on testausasema tuotantosolussa, jossa valmistetaan ympäristön olosuhteiden mittaamiseen käytettäviä laitteita. Tuotantosolun kapasiteetti vaihtelee aika ajoin epästabiilin tahtiajan sekä testausaseman väärin negatiivisten tulosten johdosta. Vaihtelu on osittain kausiluonteista ja aiheuttaa epävarmuutta tuotannon suunnitteluun.

Analysoimalla mittausdataa sekä tekemällä havaintoja paikan päällä tunnistetaan vaihtelun syitä tuotantosolun testaus- ja valmistusprosessissa. Työn tavoitteena on löytää ja toteuttaa ratkaisuja, joilla pienennetään tahtiajan vaihtelua ja parannetaan testausaseman ensisaantoa.

Vaisala Oyj

Vaisala Oyj on suomalainen pörssiyritys, joka on erikoistunut ympäristön ja teollisuuden mittausratkaisuihin. Weather -liiketoiminta-alue valmistaa sään mittaukseen tarkoitettuja laitteita muun muassa ilmatieteen laitoksille, puolustusvoimille sekä tieliikenteen, rautateiden, lentoliikenteen ja merenkulun tarpeisiin. Controlled Environment -liiketoiminta-alue palvelee teollisuudenaloja. [1.]

Vaisalan historia alkaa jo 1930-luvulta, jolloin yrityksen perustaja, professori Vilho Väisälä kehitti oman radioluotaimensa ylälmakehän mittaukseen. Vaisala on sittemmin laajentanut mittalaitteiden ja palvelujen tarjontaa eri aloille, mutta yrityksen ydinosamiseksi lukeutuu kaikissa tapauksissa mittausantureiden valmistus ja kalibrointi. Nykyään Vaisala on vahvasti vientivetoinen teollisuusyritys, joka työllistää noin 1600 henkilöä kansainvälisesti ja vie 98 % tuotannostaan ulkomaille. [2.]

Ominaista Vaisalan toiminnalle on *high mix, low volume* -toimitusketju eli laaja valikoima tuotteita, joita valmistetaan pieniä määriä. Viimeisen kymmenen vuoden aikana tuotteiden toimitusvarmuutta ja laatua on parannettu etenkin soveltamalla koko yrityksen laajuisesti lean-periaatteita sekä jatkuvaa parantamista. [3.]

## 2 Lean-periaatteet

Vaisalassa sovelletaan laajalti lean-periaatteita, joiden mielletään yleisesti saaneen alkunsa japanilaisesta autoteollisuudesta. Autonvalmistaja Toyota otti jo 1970-luvulla käyttöön johtamisfilosofian, jolla tavoiteltiin ylivoimaista laatua ja ylivoimaista toimituskykyä [4, s. 30]. Yrityksen lean-ohjelma voidaan mieltää kattokäsitteenä valmistustapojen ja johtamistyökalujen kokoelmalle, joita käytetään läpi koko toimitusketjun [4, s. 6]. Seuraavaksi esitellään niitä lean-periaatteita, jotka ovat olennaisia tämän insinööriyön kannalta.

### Virtaus ja imu

Lean-kulttuurin keskiössä ovat käsitteet virtaus ja imu. Täydellinen virtaus edellyttää, että jokaisen prosessivaiheen eräkoko on mahdollisimman pieni. Ihanteellisin eräkoko on aina yksi; tällöin tuotantoprosessin jokaisessa vaiheessa käsitellään yhtä tuotetta kerrallaan, eikä vaiheiden väliin pääse syntymään puskurivarastoja. Kun prosessissa käsitellään vain yhtä tuotetta kerrallaan, viat on mahdollista havaita heti ennen kuin suurempaa viallista erää on valmistettu. Toimivaa virtausta kuvaa tahtiaika, joka kertoo, kuinka usein tuotantoketjussa syntyy valmis tuote. [4, s. 72.]

Virtausta hallitaan imuohjauksella. Se tarkoittaa, että asiakastilaukset ohjaavat tuotantoa. Tuotantoprosessin viimeinen vaihe vastaanottaa tilauksen ja siirtää edeltäville vaiheille taaksepäin signaalin, joka sallii tarvittavien osien valmistamisen. Mikään prosessivaihe ei aloita seuraavan kappaleen valmistusta ennen kuin edellinen kappale on siirretty



eteenpäin. Näin ollen yhden prosessivaiheen pysähtyessä koko tuotantoketju seisahtuu. [4, s. 80–81.]

Imuperiaatteessa seuraava prosessivaihe nähdään aina edellisen prosessivaiheen asiakkaana. Viimeisen prosessivaiheen asiakas on tuotteen todellinen loppukäyttäjä. Tuotanto rakentuu ajatukseen, että jokaiseen prosessivaiheeseen sisältyy tehdylle toimenpiteelle testaus tai muu laadunvarmistus. Vialliset osat erotellaan heti, ja prosessiketjun seuraava asiakas voi odottaa saavansa toimivia komponentteja. Kun vialliset osat hylätään heti syntyessään, ei niistä turhaan koota toimimattomia lopputuotteita.

#### Juuri oikeaan tarpeeseen

Tasaisen virtauksen saavutukset näkyvät sekä taloudellisena hyötynä että asiakkaan kokemana laatuna. Kun tuotteen valmistusaika on ennustettavissa, voidaan tuote toimittaa asiakkaalle luvatussa ajassa. Materiaalihankinnat voidaan tehdä juuri oikeaan tarpeeseen, eikä yrityksen varoja ole sidottu välivarastoihin. Tuotanto voidaan suunnitella asiakastarpeen mukaan ja henkilöstöresursseja jakaa tehokkaammin. Ennen kaikkea virtaus ja imu takaavat laadun, sillä tuotantoketju pysähtyy heti ongelman esiintyessä, mikä pakottaa puuttumaan ongelmaan ennen kuin viallisia tuotteita ehtii kerääntyä. [4, s. 72.]

#### Modulaarisuus

Onnistunut lean-periaatteiden käyttöönotto edellyttää, että tuotantomalli on otettu huomioon jo tuotteen suunnitteluvaiheessa. Suunnittelun perustana on rajattu määrä perusmalleja, jotka jakavat keskenään mahdollisimman suuren määrän yhtenäisiä komponentteja, sekä yksinkertaistettu valmistus. [4, s. 57.] Tuotanto rakentuu monituotelinjan varaan, joka koostuu tuotantosoluista. Soluihin keskitetään pieniä kokonaisuuksia siten, että niissä valmistetaan esimerkiksi tuotemallista riippumatta samanlaisia moduuleja, tai mahdollisimman pienillä asetusajoilla eri perusmallien osa- tai loppukokoonpanoja valmiista moduuleista. [4, s. 60.]

Solujen käsittämät kokonaisuudet valikoidaan siten, että niiden tahtiajat ovat mahdollisimman samat. Näin virtaus säilyy katkeamattomana. Vaihtoehtoisesti jonkin solun tahtiaika voi olla toisen solun kerrannainen, jolloin samanlaisia soluja voi toimia useita rinnakkain.

## Hukan tunnistaminen ja poistaminen

Prosessi voi sisältää lukuisia toimintoja, jotka lisäävät kustannuksia, mutta eivät tuo mitään lisäarvoa tuotteelle. Kaikki tällaiset toiminnot ovat hukkaa. Hellittämätön hukan poistaminen on lean-ajattelun ydin. [4, s. 86.]

Yksi olennaisimpia tuotantoketjun mittareita on prosessin läpimenoaika. Läpimenoaika on koko se aika, joka kuluu yhden tuotteen valmistukseen raaka-aineista valmiiseen lopputuotteen lopputuotteen valmistukseen. Selkeä yhden kappaleen virtaus antaa mahdollisuuden läpimenoajan hahmottamiseen, mutta tämä on ainoastaan lähtökohta prosessin parantamiseen. Useimmiten huomataan, että valtaosa prosessiin kuluvasta ajasta on hukkaa [4, s. 86].

Hukkaa ilmenee etenkin odottamisena. Odotus on harvemmin aikaa, jota työntekijältä kuluu koneen suoritusta odottaessa, vaan pikemminkin aikaa, jolloin tuote seisoo jossain seuraavaan tuotantovaiheeseen. Odotusta syntyy aina, kun prosessivaiheiden välillä siirretään yhtä kappaletta suurempia eräkokoja. Toisaalta yhden kappaleen eräkoolla on vaarana synnyttää paljon turhaa liikettä, kun työntekijä siirtää jatkuvasti tuotteita eteenpäin. Turhaan liikkeeseen pureudutaan siirtämällä kaikki prosessivaiheet fyysisesti mahdollisimman lähelle toisiaan ja tarvittavat materiaalit käden ulottuville tuotantosoluihin.

Myös solun sisällä esiintyy hukkaa, kuten ylimääräistä tekemistä, liikettä ja virheiden korjaamista. Jopa tarpeetonta työstämistä voi löytyä, kun kyseenalaistetaan jokaisen työvaiheen tuoma lisäarvo asiakkaalle. Seuraamalla tarkasti jokaista käden liikettä ja tavaroitten siirtelyä löydetään asioita, jotka on mahdollista tehdä paremmin. Standardoimalla kaikki työvaiheet parhaaksi havaittujen menetelmien mukaisiksi vähennetään arvaamattomia vaihtelua. [4, s. 87.]

Työntekijän tekemiä virheitä voidaan vähentää suunnittelemalla valmistettava tuote, mutta myös työkalut, koneet ja muut apuvälineet siten, että fyysinen rajoite estää virheen syntymisen työvaiheessa. Tätä kutsutaan *Poka-Yoke* -menetelmäksi. Esimerkkejä tällaisesta suunnittelusta ovat liittimet, joita ei pysty kytkemään väärin päin, tai osa, joka ei väärin koottuna sovi testilaitteen ohjaimeen. Tämä pakottaa työntekijän korjaamaan virheen välittömästi ennen työn jatkamista. [4, s. 101.]

## Jatkuva parantaminen

Lean ei ole tila, jonka voi lopullisesti saavuttaa, vaan pyrkimys jatkuvaan parantamiseen. Vaikka ideaalina on virheetön tuotanto, käytännössä leanin ajatuksena on katkeamaton toiminnan kehittäminen. Toimintaa kehitetään järjestelmällisesti valitsemalla kerralla työn alle vain pieniä, hallittavan kokoisia osia. Olennaista on muistaa, että jatkuva kehittäminen on ryhmätoimintaa, jossa kaikkien näkemykset otetaan huomioon. Tavallisesti työntekijällä itsellään on korvaamaton ymmärrys siitä, miten jokin työvaihe suoritetaan, ja mitä siinä kannattaisi parantaa. [4, s. 106–107.]

## 3 Tilastolliset menetelmät

### 3.1 Laadunohjaus

Laadulla on lukuisia eri määritelmiä. Esimerkiksi tuotannon näkökulmasta laatu tarkoittaa, että tuote sopii ominaisuuksiltaan niihin toleranssirajoihin, jotka tuotteelle on määritelty ja asiakkaalle on luvattu. Halutun lopputuloksen saavuttamiseksi tuotteen ominaisuuksien ei tarvitse olla absoluuttisen tarkkoja, vaan riittää, että ne täyttävät tietyt kriteerit. [5, s. 20.] Laadukas tuote on suunniteltu niin, että se toimii halutulla tavalla, vaikka tietyt poikkeamat sallitaan.

Jotta laatua voitaisiin arvioida, sitä täytyy kyetä mittaamaan. Eräs laatuajattelun oppi-isä oli Walter Edwards Deming, jonka näkemyksen mukaan vaihtelu on keskeisin syy huonoon laatuun. Parannuksia tehdään vähentämällä epävarmuutta tuotteen suunnittelussa ja valmistuksessa. [5, s. 22.]

Siinä missä laadunvalvonnalla tarkoitetaan poikkeavien tuotteiden havaitsemista ja korjaamista tai hylkäämistä, laadunohjaus käsittää valvonnan avulla kerättyjen tilastojen hyödyntämisen myös pidemmältä aikaväliltä [5, s. 29]. Havaitsemalla, missä ja milloin vaihtelua esiintyy, voidaan puuttua sen juurisyihin. Nykyään tilastoja kerätään tavallisesti sähköisiin tietokantoihin. Havaintojen raportointiprosessi voi jopa olla täysin automaattinen.

### 3.2 Tilastollinen prosessinohjaus

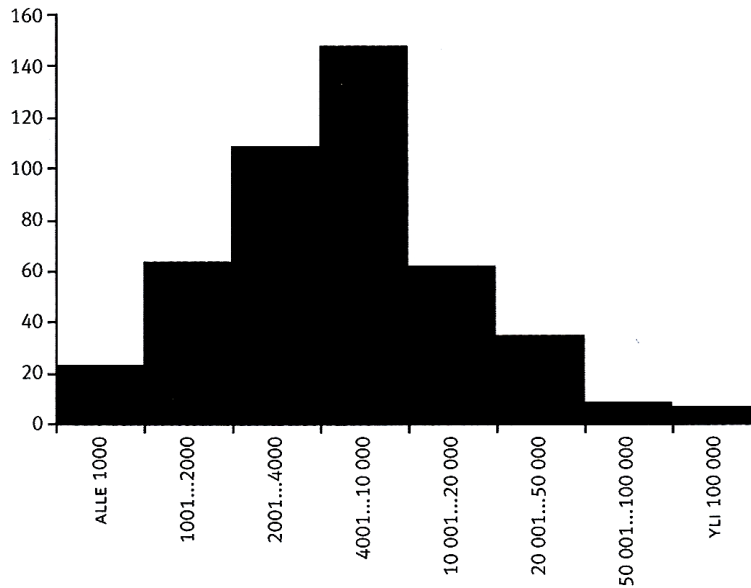
Laadunohjauksessa mitataan tavanomaisesti tuotteen ominaisuuksien poikkeamaa tavoitearvoista. Samaa periaatetta voidaan soveltaa koko tuotteen valmistusprosessiin. Kun havaintoja käsitellään joukkona, on kyse tilastollisten menetelmien soveltamisesta, ja puhutaan tilastollisesta prosessinohjauksesta (SPC, engl. Statistical Process Control). [6, s. 166–167.]

Laadunohjaus on osa prosessinohjausta, mutta prosessin mittaamiseen käytetään myös suureita kuten saanto ja tahtiaika. Kun prosessi on tilastollisesti hallinnassa eli stabiili, saadaan sen normaalitilasta käsitys pitkän aikavälin keskiarvon ja keskihajonnan perusteella. Tällöin prosessiin hitaastikin vaikuttavat häiriöt voidaan havaita jo ennen kuin ne johtavat tuotteiden hylkäämisiin. [6, s. 168.] Toisaalta SPC:n avulla havaitaan myös äkillisiä virheitä, joihin tulee puuttua heti [5, s. 81].

Alun perin Japanissa yleistyi käsite seitsemästä laatutyökalusta [6, s. 338]. Tässä keskitytään erityisesti kahteen niistä, histogrammiin ja Pareto-kuvaajaan.

#### Histogrammi

Histogrammilla visualisoidaan esiintymistiheyttä. Histogrammissa määritellään mittaus tulosten vaihteluväli, jaetaan se samankokoisiin osiin eli luokkaväleihin, ja esitetään pylväsdiagrammina kuhunkin luokkaväliin osuvien mittaus tulosten määrä. Pylväät piirretään kiinni toisiinsa, jotta tyhjät luokkavälit erottuisivat selkeästi. Kuvio antaa mittaus tulosten jakaumasta visuaalisen esityksen, joka on tulkittavissa. Normaalimuotoisesta poikkeava jakauma kertoo oloista tai prosesseista, jotka tuottavat keskenään erilaisia tuloksia. [5, s. 63.] Histogrammin ulkoasusta on esimerkki kuvassa 1.



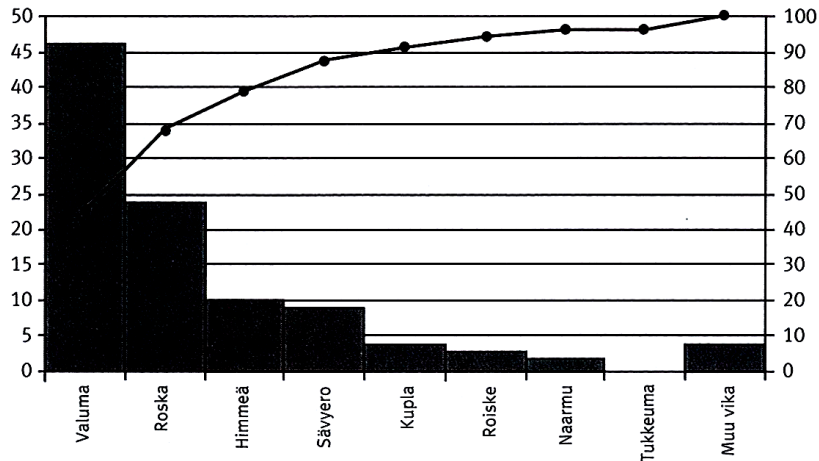
Kuva 1. Esimerkki histogrammista [6, s. 344].

Histogrammin luokkien määrä vaikuttaa merkittävästi jakauman ulkonäköön. Perussääntö luokkien määräksi on havaintojen määrän neliöjuuri. Erilaisilla luokkajaoilla muoto saattaa kuitenkin vaihdella niin, että analysointi on mahdotonta. Tämä kiellii siitä, että muutamat yksittäiset mittaus tulokset vaikuttavat jakauman muotoon, jolloin mittaus tulosten määrä ei ole riittävä. [6, s. 341–343.]

### Pareto-kuvaaja

Pareto-kuvaaja muistuttaa histogrammia siten, että myös sillä havainnollistetaan esiintymistiheyttä. Erotuksena vaaka-akseliin sijoitetaan kuvaavia havaintoryhmiä, joilla ei ole keskinäistä järjestystä. Lähtöaineisto voi olla esimerkiksi tarkastuslista, johon on merkitty vikojen esiintymistiheys kategorioittain. Tällöin kuvaaja esittää visuaalisesti vikasyiden yleisyyden. [6, s. 350–352.]

Pareto-kuvaajassa eri luokkien esiintymistiheydet esitetään pylväsdiagrammina järjestettynä vasemmalta oikealle laskevassa järjestyksessä. Usein kuvaajaan liitetään myös kumulatiivista kertymää osoittava viiva ja merkitään kunkin luokan prosentuaalinen osuus kokonaismäärästä. Haluttaessa tietyn esiintymiskynnyksen alittavat havainnot voidaan yhdistää Muut-ryhmään, joka sijoitetaan poikkeuksellisesti vaaka-akselilla viimeiseksi, vaikka ryhmä ei olisi järjestyksessä pienin. Pareto-kuvaajan ulkoasusta on esimerkki kuvassa 2.



Kuva 2. Esimerkki Pareto-kuvaajasta [6, s. 352].

Kuvaaja saattaa johtaa virheellisiin johtopäätöksiin, mikäli luokkajako ei ole tarkkaan harjittu. Jos jokin luokka on jaettu muita pienempiin alaluokkiin, tulokset eivät ole vertailukelpoisia. Haastavia ovat myös tilanteet, joissa osa havainnoista kuuluu useampaan kuin yhteen luokkaan. Tällöin kumulatiivinen kertymä on suurempi kuin havaintojen kokonaismäärä, mikä vääristää kuvaajaa. Ratkaisuna luokkia voidaan ryhmitellä uudelleen, tai merkitä luokkien yhdistelmät omina luokkina. Mikäli erilaisia yhdistelmiä on paljon, mutta niiden suhteellinen osuus on hyvin vähäinen, voidaan ne myös yhdistää Muut-luokkaan.

### 3.3 Toistettavuus ja uusittavuus

Mittausjärjestelmä, kuten esimerkiksi valmistettavaa tuotetta tutkiva testausasema, on hyödytön, jos sen tuottamien mittaustulosten luotettavuus on epävarmaa. Mittausjärjestelmän hyväksyttävyyttä voi arvioida tilastollisilla menetelmillä, mutta on huomioitava, että prosessin suorituskykyyn vaikuttaa itse laitteiston lisäksi moni ulkoinen tekijä, kuten ympäristön olosuhteet ja työntekijöiden menettelytavat. [7, s. 392.]

Jos esimerkkinä käytetään sovellusta, jossa mitataan jonkin anturin näyttämää referenssianturin näyttämää vasten, eräs ilmiselvä tekijä on referenssianturin stabiilius. Referenssilaitteen mittaustarkkuus on myös tiedettävä ja sen tulee olla asianmukaisesti kalibroitu. Jos kaikkia mittaukseen vaikuttavia tekijöitä ei tunneta, järjestelmä on epästabiili, ja siitä tehtävät tilastolliset johtopäätökset ovat todennäköisesti merkityksettömiä.

Stabiilin mittausjärjestelmän kaksi keskeistä ominaisuutta ovat *toistettavuus* (engl. repeatability) ja *uusittavuus* (engl. reproducibility). Toistettavuudella tarkoitetaan saman testattavan laitteen kykyä tuottaa sama mittaustulos, kun mittaus toistetaan useita kertoja. Mittaukset tulee toistaa mahdollisimman identtisissä olosuhteissa. Toistettavuuden mittareita ovat muun muassa keskihajonta ja vaihteluväli, jotka lasketaan mittaustuloksista. Pyrkimys on saavuttaa mahdollisimman vähäinen vaihtelu. Vaihtelun hyväksyttävyyttä voidaan arvioida suhteuttamalla se mittausprosessin toleranssirajoihin. [7, s. 393.]

Uusittavuus merkitsee laitteen kykyä tuottaa sama mittaustulos, kun jokin mittausprosessin osa on muuttunut. Muuttujaa nimitetään tässä yhteydessä *operaattoriksi*. Operaattori saattaa olla esimerkiksi eri työntekijä, muuttunut prosessivaihe tai mittauslaitteistoon vaihdettu osa. Uusittavuuskokeessa halutaan tietää, tuottaako mittausjärjestelmä samoja tuloksia operaattorista riippumatta. Olennaista on, että sekä toistettavuus- että uusittavuuskokeissa mittaukseen käytetään samoja testattavia laitteita. Tutkittavien operaattoreiden on oltava selkeästi määriteltä ja kaikkien muiden olosuhteiden on pysyttävä mahdollisimman identtisinä. [7, s. 393.]

Uusittavuuskokeita suoritetaan, kun prosessiin on tehty muutos, ja halutaan tietää, onko mittausjärjestelmä parempi kuin vanha prosessi, tai ylipäätään hyväksyttävä. Tällöin toistettavuuskokeet suoritetaan sekä ennen että jälkeen operaattorin muutoksen ja tuloksia vertaillaan.

#### 3.4 Gage R&R Minitab-ohjelmistolla

Gage R&R on toistettavuuden ja uusittavuuden laskentaan kehitetty tilastollinen menetelmä. Laskentapohja perustuu varianssianalyysia soveltavaan matematiikkaan (ANOVA, engl. analysis of variance). Menetelmä soveltuu erityisesti mittausjärjestelmien arviointiin. Vaisalan käytössä on Minitab 17 -ohjelmisto, jonka avulla kerätystä mittausdatasta on helppo laskea R&R -tunnuslukuja [8].

Jotta hajonnasta saataisiin luotettava arvio, tulee mittaus toistaa riittävän monta kertaa. Useampi toisto parantaa luottamustasoa, mutta riittävälle toistojen määrälle ei ole täsmällistä ohjetta. Esimerkkinä Minitabin ohjeistuksessa 20 toistoa pidetään riittävänä määränä [9]. Jos toistoajojen suorittaminen on huomattavan kallista tai aikaavievää, tehtävien toistojen määrä on päätettävä erityistä harkintaa käyttäen. Jos halutaan lisäksi

luotettavaa dataa testattavien laitteiden keskinäisestä vaihtelusta, myös laitteita tulisi vähintään sama määrä. Tämä tarkoittaa, että toistoja kertyy vähintään  $20 \cdot 20 \cdot$  operaattorien määrä, eli jopa tuhansia.

Minitab-ohjelmistoon syötetään toistoajoista kerätty data esimerkiksi MS Excel tai CSV-muodossa. Omiin sarakkeisiinsa erotellaan testattujen laitteiden tunnisteen, esimerkiksi sarjanumerot, operaattorin tunniste sekä tutkittava mittaustulos. Raporttia laadittaessa syötetään mittaustulokselle sallitut toleranssirajat. Valmis raportti esittää muun muassa mittaustulosten toistettavuuden sekä mittaustulosten uusittavuuden operaattoreiden kesken. Raportissa esitetään myös vaihtelun suhde ilmoitettuihin toleranssirajoihin. [8.]

Tavallisesti toistoajoja tehdään useammalla kuin yhdellä laitteella. Silloin tärkeää on, että jokainen laite testataan yhtä monta kertaa. Lisäksi sama määrä toistoja on suoritettava jokaiselle tutkittavalle operaattorille. Kun toistoajoissa on tietoja useammasta laitteesta, Gage-raporttiin voidaan laskea myös laitteiden keskinäinen vaihtelu (engl. Part-to-Part). Näin raportti pystyy erottelemaan vaihtelun eri lähteet. [10.]

Gage-raportissa vaihtelu tarkoittaa oletusarvoisesti keskihajontaa kerrottuna kuudella, eli kuuden sigman arvoa ( $6\sigma$ ). Kuuden sigman periaate on kehitetty Motorolassa 1980-luvulla ja yleistynyt nopeasti ympäri maailman. Laskennallisesti normaalijakautuneesta aineistosta peräti 99,99966 % näytteistä osuu kuuden keskihajonnan vaihteluvälin sisälle, kun mittaustarkkuudelle sallitaan 1,5 sigman toleranssi. [11, s. 7.] Käänteisesti tämä tarkoittaa, että vain 3,4 ppm tuotteista jäisi toleranssirajojen ulkopuolelle. Tavoite on siis, että hajonta suhteessa toleranssirajoihin on riittävän pientä, jotta kuuden keskihajonnan osuus jakaumasta sopisi toleranssirajojen sisään.

#### Hyväksyttävyyden arviointi

Minitabin Gage R&R -raportissa esitetään muun muassa graafisesti mittaustulosten vaihtelu operaattori- sekä osakohtaisesti. Tärkeimpänä yhteenvetona ilmoitetaan keskihajonnan suhde annettuihin toleranssirajoihin (*%Tolerance*).

Ohjeistuksessaan Minitab noudattaa kyseisille tunnusluvuille Automotive Industry Action Groupin suositusrajoja, jotka on esitetty taulukossa 1.



Taulukko 1. Gage R&amp;R -vaihteluarvojen tulkintaohje [8].

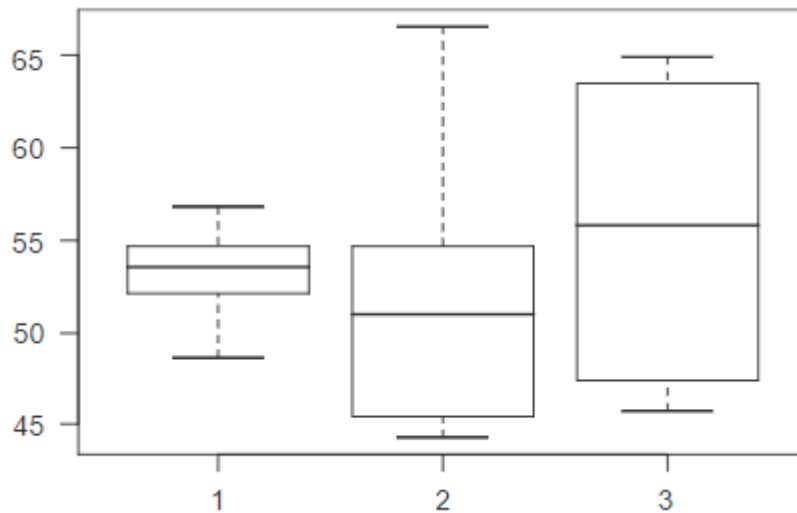
<b>%Tolerance</b>	<b>Tulkinta</b>
Alle 10 %	Tulos on hyväksyttävä.
10 % - 30 %	Tulos on hyväksyttävä riippuen sovelluksesta, mittausjärjestelmän erikoisolosuhteista ja muista poikkeavista tekijöistä.
Yli 30 %	Tulos ei ole hyväksyttävä.

Vaihteluarvoja tulkittaessa kannattaa huomioida, että toistettavuus koskee kaikkia mittauksia operaattorista riippumatta. Jos halutaan laskea mittauksen toistettavuus kullekin operaattorille erikseen, tulee jokaista operaattoria kohden laatia erillinen raportti.

#### Laatikkopiirros

Gage R&R -raporttia tulkittaessa, kuten yleensäkin näytteiden vaihtelua tulkittaessa, laatikkopiirros on havainnollinen tapa esittää vaihteluväli visuaalisesti. Kuvaajassa pystyakseli kattaa koko näyte-erän vaihteluvälin. Laatikon korkeus kuvastaa vaihteluvälin kahta keskimmäistä kvartiilia eli neljäsosaa, toisin sanoen sitä väliä, johon 50 % mediaania lähimpänä olevaa näytettä sijoittuu. Näin ollen matalampi laatikko tarkoittaa pienempää vaihtelua.

Lisäksi laatikosta piirretään ylä- ja alasuuntaan janat, jotka ulottuvat koko vaihteluvälin ylä- ja alapäähän. Janat ovat kuitenkin aina korkeintaan 1,5 kertaa laatikkopiirroksen korkuisia. Jos näytteitä jää tämän välin ulkopuolelle, pidetään niitä poikkeavina, ja ne merkitään omina pisteinään. [12, s. 11.]



Kuva 3. Esimerkki laatikkopiirroksista [12, s. 12].

Laatikkopiirroksista on esimerkki kuvassa 3. Piirroksien on merkitty näytteiden mediaani omaa poikkiviivanaan. Erottamisen helpottamiseksi vaihteluvälilijanojen päihin piirretään myös joskus poikkiviiva. Normaalijakautunut aineisto tuottaa symmetrisiä laatikkopiirroksia.

#### 4 Testausaseman nykytila

Tutkimuksen kohteena oli erään Vaisalassa valmistettavan mittalaitteen pakkaussolu ja solussa sijaitseva testausasema. Jokaisen tuotteen on läpäistävä testi ennen pakkaamista. Solu toimii yhden kappaleen eräkoon periaatteella: Operaattori asettaa laitteen testausasemaan ja käynnistää testin. Testin aikana operaattori ehtii pakata viimeksi testatun laitteen yksittäispakkaukseen sekä liimata pakkaukseen tarvittavat tarrat. Pakkaamisen aikana testi valmistuu ja seuraava laite on valmis pakattavaksi.

Pakkaussoluun saapuvat laitteet ovat läpäisseet kaikki pakkaussolussa suoritettavat testit jo aikaisemmissa prosessivaiheissa. Pakkaussolun testausaseman pääasiallinen tarkoitus on varmistaa, että laite on edelleen toimiva niin sanottujen R- ja K-prosessien jälkeen. Koko loppukokoonpanon valmistusprosessi on kuvattu tarkemmin liitteessä 1.

Pakkaussolun kehittämisestä lean-periaatteiden mukaisesti on jo aiemmin valmistunut yksi insinööriyö. Sen keskeisimpiä havaintoja oli, että pakkaussolun ongelmat johtuvat tahtiajan hallitsemattomasta vaihtelusta [13]. Työ on johtanut prosessin parannuksiin,

mutta osa sen avulla tunnistetuista ongelmista on edelleen ratkaisematta. Tässä insinööriydessä keskitytään pakkaussolun testausaseman aiheuttamaan vaihteluun.

Testattujen laitteiden hylkäyssyiden esiintymistiheydestä laadittiin tilastoja hakemalla Vaisalan SPC-tietokannasta koko vuoden 2016 aineisto. Tietokannasta saatiin CSV-muotoista dataa, jota käsiteltiin MS Excel -ohjelmistolla haluttujen tietojen laskemiseksi. Tilastojen laskeminen käsin oli välttämätöntä, sillä Vaisalan käyttämä SPC-ohjelmisto ei kyennyt kaikkien haluttujen tietojen laskemiseen. SPC-ohjelmistoa käytettäessä huomattiin niin ikään, että sen suorituskyky ei riitä suurien datamäärien käsittelemiseen.

CSV-datassa esiintyy jokainen ajettu testisekvenssi omana rivinään. Sarakkeissa on kaikki mitatut ja lasketut suureet sekä testattavan laitteen tietoja, kuten sarjanumero ja tuotetyyppi. Datasta on mahdollista erotella esimerkiksi hylätyt, läpi menneet tai vain tietyistä vikasyistä hylätyt yksilöt. Lopuksi MS Excel- ja Minitab-ohjelmistoilla luotiin tutkitavista tapauksista Pareto-kuvaajia sekä histogrammeja, joita tulkittiin.

#### 4.1 Saanto ja väärät negatiiviset tulokset

Aineisto sisältää noin 77 000 ajettua testisekvenssiä. Suodattamalla pois toistuvasti esiintyvät sarjanumerot löydettiin 72 209 uniikkia laitetta. Poistamalla aineistosta hylätyt laitteet lopulliseksi määräksi saadaan 71 898 laitetta, mikä vastaa asiakkaille toimitettujen laitteiden määrää.

Kaikista aineiston laitteista 69 827 kappaletta läpäisi testin ensiyrityksellä. Näin ollen prosessin ensisaanto (engl. First Pass Yield) oli 96,7 %. Laitteista 311 kappaletta hylättiin lopullisesti eli ei läpäissyt testiä edes uusintayrityksellä. Täten kokonaissaanto (engl. Final Yield) oli 99,6 %.

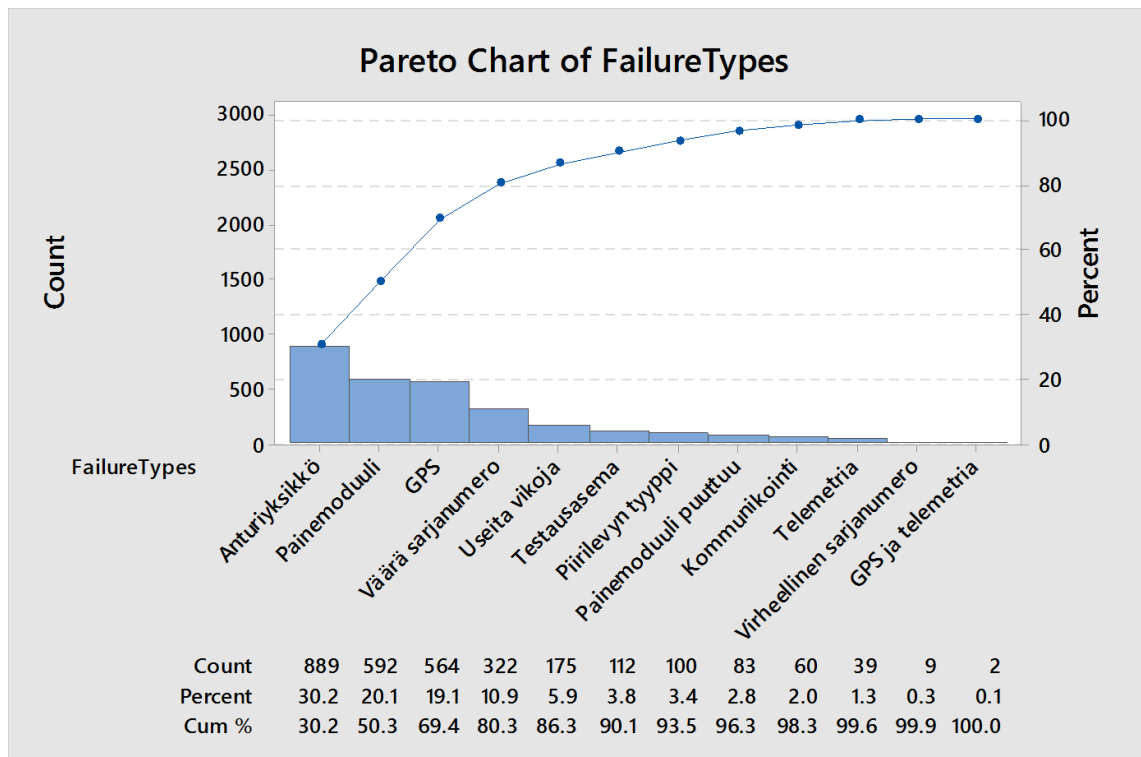
Tunnuslukuista huomataan, että 2,9 % testatuista tuotteista ei läpäissyt testiä ensiyrityksellä, vaikka ne myöhemmin kelpuutettiin. Solun operaattoreilla on voimassa ohjeistus, että hylätyn laitteen voi testata uudelleen ja laite kelpuutetaan, jos se läpäisee testin uusintayrityksellä. Oletuksena on, että tällaisessa tapauksessa alkuperäinen hylkäys oli väärä negatiivinen tulos, joka johtui testausaseman häiriöstä. Oletus on kohtuullinen, kun otetaan huomioon, että kaikki testattavat laitteet on jo testattu kerran aikaisemmissa prosessivaiheissa, joten lähtökohtaisesti niiden kuuluisi olla toimivia.

Tunnistamalla testausaseman vikoja, jotka johtavat virheellisesti hylkäykseen, voidaan parantaa ensisaantoa ja täten vähentää tahtiajan vaihtelua. Vähentämällä testausasemasta johtuvia vikoja saadaan luotettavampaa mittausdataa, joka on välttämätöntä, jotta SPC-seurannan avulla olisi mahdollista erottaa pitkän aikavälin muutoksia normaalista kohinasta. Tällaisilla parannuksilla on positiivinen vaikutus sekä solun kapasiteettiin että tuotteen laatuun.

#### 4.2 Väärien negatiivisten tulosten erittely

Aineistosta eroteltiin sarjanumeron perusteella laitteet, jotka läpäisivät testin vasta uusintayrityksellä, sekä laitteet, jotka hylättiin lopullisesti. Laite perii sarjanumeronsa käyttämältään mittariyksiköltä, mutta piirilevyllä on oma sarjanumeronsa. On teoriassa mahdollista, että aineistossa saattaa esiintyä samalla sarjanumerolla eri piirilevyjä, mikäli piirilevy on hylätty ja anturiyksikkö siirretty uuteen piirilevyyn. Operaattoreille annettu ohjeistus ei kuitenkaan salli anturiyksikön uudelleenkäyttöä hylätyn testin jälkeen.

Kuvassa 4 on esitetty sellaisten vikojen esiintymistiheys, jotka eivät toistuneet uusintayrityksellä. Kyse on siis testausasemasta johtuvista vääristä negatiivisista. Kaaviota on pelkistetty yhdistämällä testausaseman raportoimat hylkäykset sen mukaan, mihin komponenttiin ne paikantuvat. Testisekvenssiä on kuvattu tarkemmin liitteessä 2.



Kuva 4. Pareto-kuvaaja vääristä negatiivisista.

Analyysistä huomataan, että yleisimpiä vääriä negatiivisia ovat anturiyksikön mittausarvojen poikkeamat. Anturiyksikkö sisältää lämpötilan ja suhteellisen ilmankosteuden mittauksen. Seuraavaksi yleisimpiä ovat painemoduulin arvojen poikkeamat sekä GPS-satelliittipaikannuksen häiriöt. Yhdessä nämä kolme vikasyitä kattavat lähes 70 % tapauksista.

Painemoduuleihin liittyvien vikojen juurisyytä on jo tunnistettu omissa projekteissaan, eikä niitä käsitellä tässä työssä.

Väärä sarjanumero tarkoittaa, että testausasemaan syötetty anturiyksikön sarjanumero ei vastaa sitä anturiyksikön sarjanumeroa, joka piirilevylle on tallennettu. Tavallisesti vika selittyy operaattorin virheellä: Joko testiohjelmaan on luettu viivakoodinlukijalla muun kuin testiin laitetun tuotteen sarjanumero, tai vastaavanlainen virhe on tapahtunut jo aikaisemmassa tuotantovaiheessa, R- tai K-prosessin aikana. Kaikkia tämäntyyppisiä virheitä tiedetään aika ajoin tapahtuneen, mutta kaavion paljastama kokonaismäärä on huolestuttava, sillä sarjanumerosekaannusten selvittelyyn kuluu runsaasti aikaa, ja ne johtavat usein turhiin laitteiden hylkäämisiin.

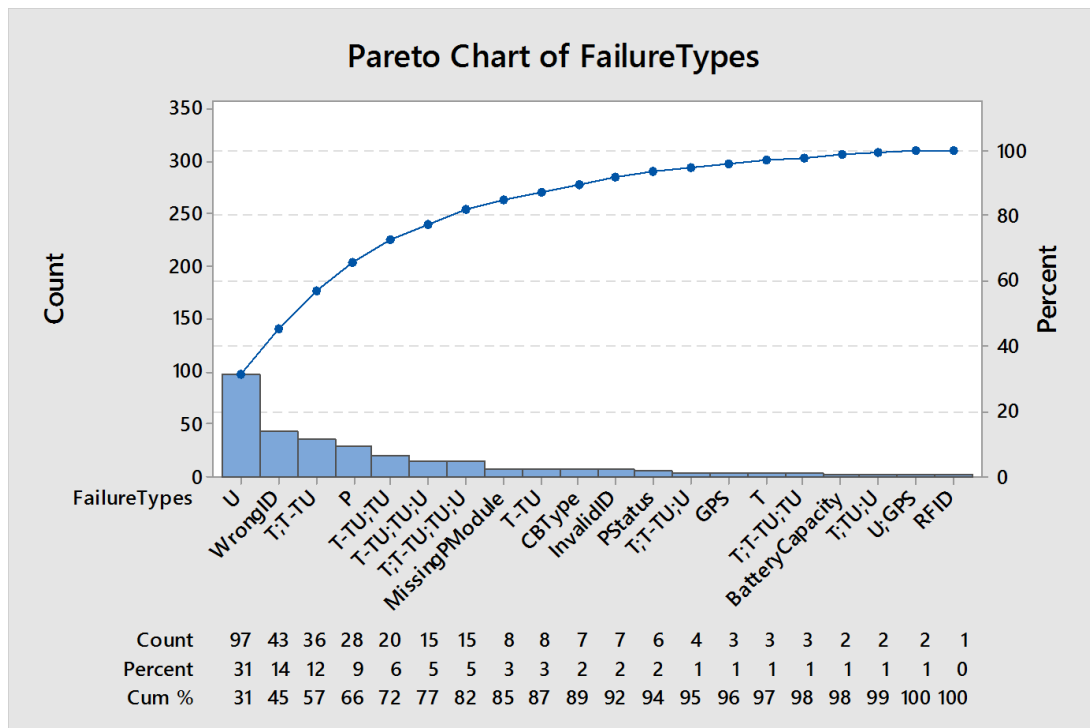
Testausaseman häiriöstä johtuvia syitä ovat hylätyt referenssimittarin näyttämät. Tällöin joksikin referenssimittarin arvoksi on tyypillisesti rekisteröity nolla, ja testi on hylätty automaattisesti. Testausasemasta johtuviksi on merkitty myös ne testisekvenssit, jotka ovat tuntemattomasta syystä keskeytyneet.

Vikasyistä piirilevyn tyyppi, kommunikointi, telemetria ja virheellinen sarjanumero viittaavat joko piirilevyn vikaantumiseen tai testausaseman ja laitteen välisen RFID- eli langattoman radioyhteyden häiriöön. Tällaisia vikoja ilmenee, kun laite palauttaa odottamattomia arvoja tai yhteyden muodostaminen ei onnistu. Kaiken kaikkiaan piirilevyn mittaus tuloksista johtuvat väärät negatiiviset ovat verrattain harvinaisia, pois lukien GPS-viat.

Useita vikoja sisältäneet yksilöt on yhdistetty omaan kategoriaansa kuvaajan selkeyttämiseksi. Katteoria sisältää runsaasti eri vikasyiden yhdistelmiä, mutta se on suhteessa pieni, joten näitä vikasyitä ei tässä tarkemmin erotella.

#### 4.3 Lopulliset hylkäykset

Vikasyiden esiintymistiheyttä analysoitiin myös laitteista, jotka hylättiin lopullisesti. Pareto-kuvaaja on esitetty kuvassa 5. Tässä kaaviossa vikasyitä on eritelty tarkemmin. Yleisin vikasy on kosteusanturin virhenäyttämä (U). Jos kaikki anturiyksikköön liittyvät viat (T, TU, T-TU, U) lasketaan yhteen, kattavat ne noin 65 % tapauksista.



Kuva 5. Pareto-kuvaaja lopullisten hylkäysten vikasyistä

Anturivikojen juurisyy, erityisesti U-anturin, on mitä luultavammin vikaantuminen R-prosessin aikana. Tunnetaan myös tapauksia, jossa anturiyksikön puutteiden takia alun perin heikkolaatuisen komponentin viat ovat esiintyneet vain tietyissä olosuhteissa ja siksi ilmenneet vasta pakkaussolun testausasemassa. Tämän tyyppisten vikojen alkulähde on edeltävissä prosessivaiheissa.

Koska pakkaussolun testausasemassa ilmenevät toistuvasti vialliset tuotteet ovat verrattain harvinaisia, operaattorille annettu ohjeistus on jättää kyseiset yksilöt prosessi-insinöörin tutkittavaksi. Tavanomaisesti prosessi-insinööri toistaa testin eri pakkaussolussa varmistaakseen, että vika on pysyvä eikä testausasemasta riippuva. Tämän jälkeen tehdään päätös tuotteen korjaamisesta tai romuttamisesta.

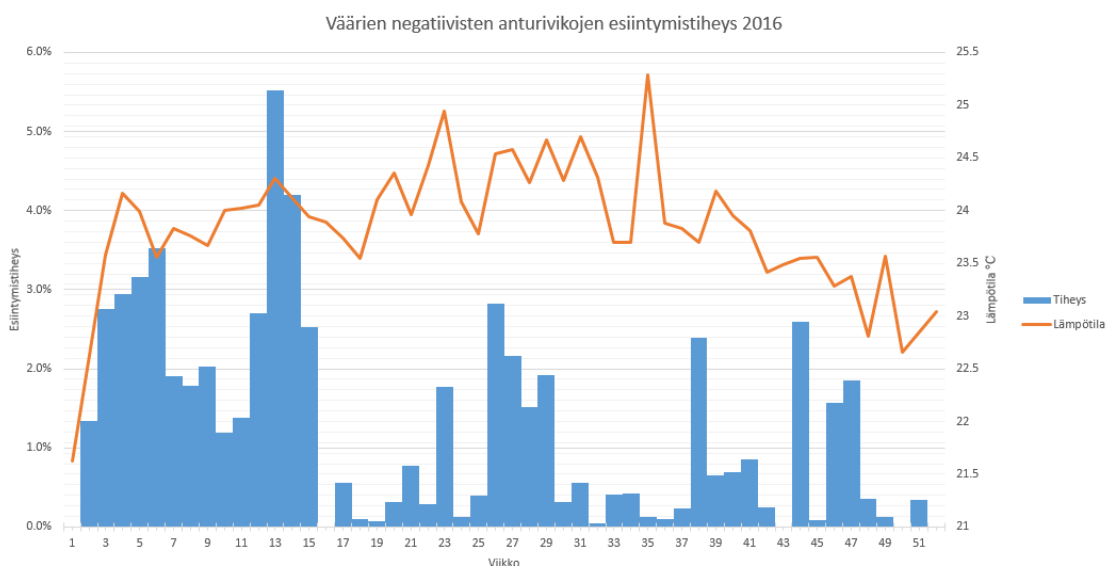
Muista vioista yleisimpiä ovat väärä sarjanumero, joka selittyy operaattorin virheellä kuten edellisessä kappaleessa, sekä viallinen tai unohtunut painemoduuli. Prosessia on vuoden 2016 aikana muutettu siten, että viallinen painemoduuli on mahdollista vaihtaa uuteen. Näin ollen painemoduulista johtuvia laitteen lopullisia hylkäämisiä ei pitäisi enää tapahtua, paitsi tapauksissa, joissa vika johtuu piirilevyn liittimen viasta.

Joitakin yksittäisiä laitteita on hylätty piirilevyn vian takia. Vikojen juurisyitä on vaikea arvioida, sillä piirilevyt ovat läpäisseet samat testit aikaisemmissa prosessivaiheissa, eikä niitä ole sen jälkeen prosessoitu. Muutamista yksilöistä on löytynyt huonoja juotoksia, mutta kaikkia piirilevyjä ei ole tutkittu kattavasti. Todennäköisiä piirilevyn vikaantumisen aiheuttajia ovat sähköstaattinen purkaus eli ESD-tapahtuma tai operaattorin käsittelyvirhe.

#### 4.4 Anturiyksikön virhenäyttämät

Anturiyksiköstä kritisoidaan T-, TU- ja U-arvojen ja referenssimittarin näyttämän välistä erotusta. Lisäksi T- ja TU-lämpötila-arvojen erotuksella on oma hylkäysrajansa. Kaikkia näitä vikoja esiintyy merkittävästi sekä yksinään että yhdistelminä. Mittaustulosten keskiarvo ei keskity millekään tietylle alueelle, vaan ongelmana on suuri vaihtelu. Kun mitausarvojen poikkeamia tutkitaan koko vuoden ajalta, aikajakaumassa esiintyy selkeitä jaksottaisia muutoksia, joiden alkuperä on epäselvä.

Useiden operaattorien havaintojen perusteella lämpötila- ja kosteusantureista johtuvia ongelmia ilmenee erityisesti kesän hellejaksojen aikana. Kuva 6 havainnollistaa anturi-poikkeamien osalta värien negatiivisten tulosten esiintymistiheyttä koko vuoden 2016 ajalta. Esiintymistiheys on suhteutettu viikkokohtaisesti testattujen laitteiden määrään.



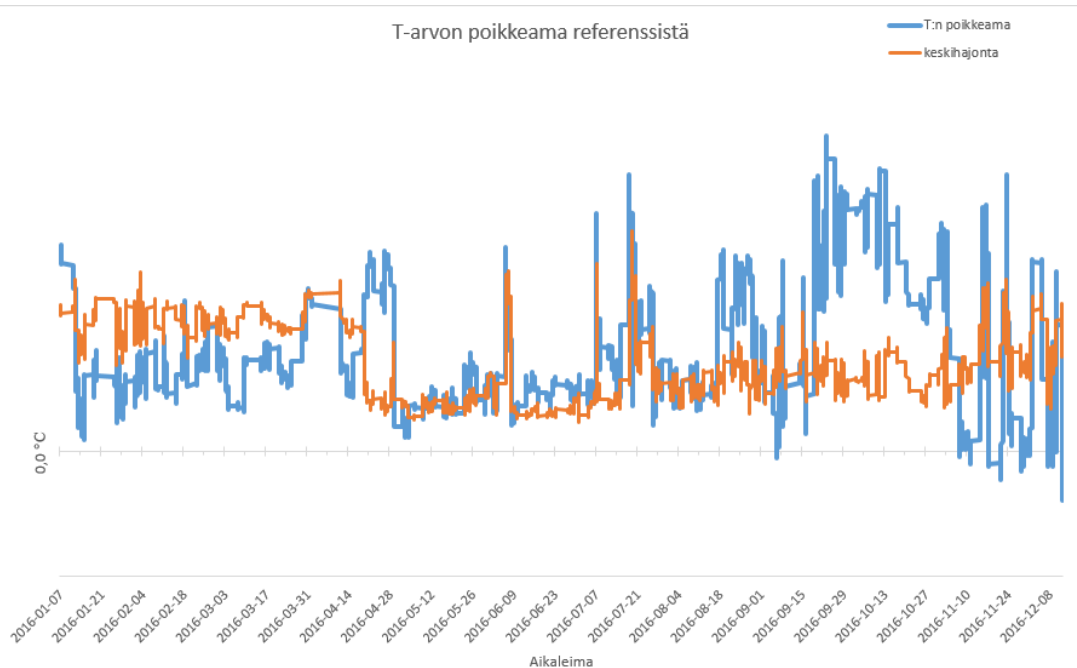
Kuva 6. Histogrammi anturiyksikköön liittyvien värien negatiivisten sekä sisälämpötilan aikajakaumasta.



Kuvaajassa on esitetty myös referenssimittareiden rekisteröimä sisälämpötila. Sisälämpötila kohoaa jossain määrin kesäkuukausien aikana tuotantotilassa olevasta ilmastoinnista huolimatta. Viikolla 16 testausasemissa otettiin käyttöön tuulettimet lämpötilavaihtelujen tasaamiseksi, mikä näkyy selkeästi kuvaajassa esiintymistiheyden laskuna [14]. Kesäviikkojen aikana vikojen määrä on kohonnut, mutta yksittäisiä piikkejä esiintyy myös myöhemmin syksyllä. Esiintymistiheys ei yksiselitteisesti korreloi pelkästään lämpötilan eikä tuulettimen asennuksen kanssa.

Tutkimalla T-arvojen poikkeamaa aikajakamalla koko vuoden ajalta voidaan arvioida vaihtelun suuruutta ja sen muutosta eri aikajaksoina.

Kuvassa 7 on esitetty aikasarja vuodelta 2016 yhden pakkaussolun T-arvojen ja lämpötilareferenssin erotuksesta 100 näytteen liukuvana keskiarvona (sininen käyrä) sekä vastaava keskihajonta (oranssi käyrä). Kummankin tavoitetaso on nolla.



Kuva 7. T-arvojen poikkeama referenssistä yhdessä pakkaussolussa.

Aikajana sisältää kaikki testausasemalla testatut laitteet, pois lukien selkeästi poikkeavat havainnot. Kuvasta huomataan edellisen kuvan tapaan selkeä parannus viikon 16 tienoilla, joka näkyy keskihajonnan laskuna. Sen jälkeen keskihajonta on ollut aika ajoin koholla muun muassa kesän aikana.

Kuvasta huomataan, että lämpötilapoikkeaman keskiarvo on pysynyt selkeästi nollan yläpuolella, vaikka odotettavissa olisi ollut vaihtelua tasaisesti nollan molemmin puolin. Poikkeaman suuruudessa on myös selkeitä eroja aikakausittain.

Muiden testausasemien kohdalla näkyy samanlaista kausittaista vaihtelua, mutta muutokset eivät ole keskenään yhteneväisiä. Tämä sulkee pois mahdollisuuden, että kyseessä olisi pelkästään tuotantoerille ominainen vaihtelu, sillä tuotannossa olevat anturierät jakaantuvat tasaisesti eri soluihin. Vastaavasti TU-arvojen poikkeamissa sekä T:n ja TU:n erotuksissa on myös eroavaisuuksia.

Vaikka U-anturin vika onkin yleisin syy laitteen lopulliselle hylkäämiselle, väärissä negatiivisissa U-anturi ei ole yhtä suuri ongelma kuin lämpötila-antureiden vaihtelu.

Pakkaussolujen testausasemien ulkoasua verrattaessa havaittiin, että testauslaitteiston asettelussa on eroavaisuuksia erityisesti referenssimittarin mittapään sijoittelun osalta. Mittapää on kiinnitetty johdoistaan nippusiteellä laitteen kohdistusjigin lähetyville, missä ne roikkuvat vapaasti ilmassa. Huolto-ohjeissa ei ole määritelty tarkasti mittapään sijaintia [14] ja kiinnitystavasta johtuen on todennäköistä, että mittapää ovat aika ajoin päässeet siirtymään esimerkiksi huoltotoimenpiteiden aikana tai vahingossa aiheutetusta tärähdyksestä.

Mittapään epämääräinen sijoittelu voi selittää osan mittausten testausasemakohtaisesta vaihtelusta. Selkeitä testausympäristöön vaikuttavia seikkoja ovat myös muut tuotantotilassa sijaitsevat laitteet. Monet niistä tuottavat runsaasti lämpöä tai puhaltavat kosteaa ilmaa. Niin ikään henkilö- ja tavaraliikenne tiloissa sekä ovien availu ja sulkeminen aiheuttavat hetkellisiä ilmavirtauksia.

#### 4.5 GPS- ja telemetriaviat

Huomion arvoista on, että loppusaantoa tutkittaessa todellisia GPS-vikoja on esiintynyt yhteensä vain viisi kappaletta, eikä telemetriavikoja ole esiintynyt yhtäkään. Sen sijaan ensisaantoa tarkasteltaessa yli 19 % vääristä negatiivisista johtui GPS:stä ja hyvin pieni osa radiosignaalin laadusta. Näiden lukujen valossa GPS- ja telemetriatesteistä saatava hyöty muuttuu kyseenalaiseksi.

Kyseisten viiden yksilön mittausdataa tutkittiin tarkemmin, ja todettiin, että ne ovat vastaanottaneet GPS-signaalia hyväksyttävällä signaali-kohinasuhteella, mutta eivät ole onnistuneet muodostamaan kiinnitystä yhteenkään GPS-satelliittiin.

Vähäisen määrän vuoksi pakkaussolussa GPS-viallisiksi osoittautuneiden piirilevyjen tarkempaa tutkimista on pidetty toissijaisena, ja kyseiset yksilöt on romutettu. Siksi tämän työn tarkoitukseen ei ollut saatavilla fyysisesti tutkittavaa yksilöä, ja vian alkuperä jää toistaiseksi tuntemattomaksi.

GPS-piirin testaaminen todellisessa ympäristössä on haastavaa, sillä GPS-signaali on altis ympäristön häiriöille myös tuotantotilojen ulkopuolella. Esimerkiksi sääolosuhteet sekä maastoesteet vaikuttavat GPS-signaalin laatuun. Tuotantotiloissa myös sähkömagneettisen yhteensopivuuden eli EMC:n ongelmat voivat aiheuttaa häiriöitä. Vaisalan tuotantotiloissa signaalia joudutaan vahvistamaan ulkoisen antennin ja toistimen avulla, jotta GPS ylipäätään toimisi sisällä.

Koska GPS-testi on jo suoritettu kertaalleen aikaisemmassa prosessivaiheessa, ja GPS-vikojen esiintyminen vasta pakkaussolussa on ilmeisen harvinaista, voidaan koko GPS-testiä pitää yliprosessointina, joka aiheuttaa hukkaa. Sama pätee telemetriatesteihin.

Ilman GPS- ja telemetriatestejä viisi mahdollisesti viallista laitetta olisi päätynyt asiakkaalle. Määrä on 69 ppm kaikista valmistetuista tuotteista. Näkemykset hyväksyttävästä määrästä ovat toki subjektiivisia, mutta luku on pieni suhteessa tuotteelle asetettuihin laatutavoitteisiin, jotka määritellään muun muassa takuupalautusten määränä. Johtopäätöksenä GPS- ja telemetriatestien suorittamista pakkaussolussa voidaan pitää tarpeettomana.

#### 4.6 Ajallinen hukka

Vaisalaan aiemmin suoritetun insinööriyön mukaan pakkaussolun tahtiaika on normaalilanteessa keskimäärin 80 sekuntia [13, s. 24]. Tästä voidaan karkeasti arvioida sekä väärin negatiivisten tulosten että lopullisten hylkäysten hukkaamaa työaika.

Koska ajettuja testisekvenssejä oli yhteensä 77199, ja näistä 71898 johti valmiiseen tuotteeseen, hylättyjä testejä oli yhteensä 5301. Operaattorin työajan sekä testausasemien

käyttöasteen kannalta tämä tarkoittaa, että vuonna 2016 pakkaussolujen saanto-ongelmat aiheuttivat 118 tunnin eli noin 16 henkilötyöpäivän aikahukan. Aikahukka on vähennettävissä etenkin toimenpiteillä, jotka parantavat ensisaantoa.

Edellä mainitussa insinööriyössä on myös kiinnitetty huomiota pakkaussolun viivakoodinlukijan epäluotettavuuteen. Lukijaa on hankala käyttää, ja sen käyttö edellyttää ylimääräisiä kädenliikkeitä, mikä aiheuttaa vaihtelua solun tahtiaikaan:

Myös solun testerissä käytettävä viivakoodinlukija aiheuttaa välillä ylimääräistä viivästystä. Viivakoodinlukijan päivittäminen parempaan saattaisi parantaa solun toimintaa yhden pakkauskierroksen osalta muutaman sekunnin. [13, s. 22.]

Lisäksi on muistettava, että vikojen selvittelyyn ja korjaukseen kuluu monesti ylimääräistä aikaa, jonka määrää on mahdotonta arvioida tarkasti. Yleisesti heikko ensisaanto aiheuttaa vaihtelua tahtiaikaan, mikä vaikeuttaa tuotannon suunnittelua ja häiritsee tuotannon virtausta kokonaisuutena.

## 5 Uuden testausaseman prototyyppi

Vikasyitä tutkittaessa päätettiin pakkaussolun ensisaannon parantamiseksi rakentaa uusi testausasema. Rakentaminen aloitettiin kehittämällä uusi prototyyppi. Prototyypin keskeisimpiä eroja on, että siihen ei sisälly tarpeettomaksi todettuja GPS- ja telemetriatestejä. Lisäksi haluttiin kehittää testauskammio, joka vähentäisi anturiyksikön mitaustulosten vaihtelua, sekä löytää soveltuvampi viivakoodinlukija ja integroida se testausasemaan.

### 5.1 Olosuhteiden tasaaminen

Pakkaussolun testausasemassa ei ole minkäänlaista kammiota, joka suojaisi laitetta ympäristön olosuhdemuutoksilta testin aikana. Suljettu kammio suojaisi laitetta ainakin muulta kuin itse testauslaitteiston aiheuttamilta olosuhdemuutoksilta, kuten äkillisiltä ilmavirtauksilta.

Pakkaussolun testausasemaan ei kuitenkaan käytännössä olisi mahdollista rakentaa täysin suljettavaa kammiota, sillä testattava laite asetetaan kohdistusjigiin, joka sijaitsee

tarra-aplikaattorin alapuolella. Testin päätyttyä applikaattori tulostaa automaattisesti laitetarran valmiiseen laitteeseen. Koko tarrakoneen sisällyttäminen kammioon olisi äärimmäisen epäkäytännöllistä. Lisäksi tarrakone itsessään todennäköisesti vaikuttaisi kammion sisällä lähiympäristönsä lämpötilaan.

Testausasemaan päätettiin rakentaa pieni, osittain avoin kammio tarra-aplikaattorin alapuolelle niin, että testattavan laitteen kohta, johon applikaattori kiinnittää laitetarran, jää kammion ulkopuolelle tarra-aplikaattorin ulottuviin.

Antureiden osalta mittaustulosten vaihtelu on yhdistettävissä äkillisiin lämpötila- ja kosteusmuutoksiin testisekvenssin aikana, sillä testattavan tuotteen antureiden reaktiokyky on suunniteltu erityisen nopeaksi: Lämpötilan vasteaika on 0,5 s ja ilmankosteuden vasteaika on alle 0,3 s huoneen ilman normaalioloissa. Testausaseman referenssimittarina käytetään SI-jäljitettävästi kalibroitua teollisen luokan mittalaitetta, joka on huomattavasti tarkempi, mutta stabiloituu verrattain hitaasti olosuhteiden muuttuessa. Tällaisissa tilanteissa laitteen antureiden ja referenssimittarin näyttämien välille voi siis syntyä hetkellisesti suuriakin eroja.

Olosuhteiden tasaamiseksi haluttiin kammioon ylimääräinen lämpötilaa tasaava elementti. Suunnittelun pohjana käytettiin alumiinista siiliä, jonka läpi puhalletaan huoneenilmaa. Siili on lämpöä erinomaisesti johtava kappale, jolla on runsaasti pinta-alaa sekä kohtuullinen lämpökapasiteetti, ja kykenee siten johtamaan nopeasti lämpöenergiaa ympäröivään ilmaan tai päin vastoin [15, s. 34].

## 5.2 Prototyypin rakennus

Lähtökohtana prototyypin kehittämiseen päätettiin rakentaa päistään avoin lieriö, jonka sisällä on referenssimittarin mittapää sekä lämpötilavaihtelua tasaava elementti. Tässä mallissa testattava laite asetetaan anturiyksikkö edellä osittain putken sisälle. Referenssimittarin mittapää kiinnitettiin läpireiällä putken sisään. Putken toiseen päähän sijoitettiin tuuletin. Pyöreä alumiininen siili sijoitettiin tuulettimen ja mittapään väliin.

Prototyypin suunnitteluun käytettiin aluksi helposti saatavilla olevia työstettäviä materiaaleja, kuten pahvikierrehylsyn palaa sekä BeeWaTec-putkia ja liitospaloja. Pahviputken

halkaisija valikoitui siten, että se on kokonsa puolensa riittävän suuri putkeen asetettaville laitteille, mutta samalla riittävän pieni mahtuakseen pakkaussolun tarra-aplikaattorin alla olevaan tilaan.

Kammio haluttiin toteuttaa niin, että testattavan laitteen asettaminen testausasemaan onnistuisi hidastamatta operaattorin työtä. Putken eteen asennettiin muovinen kelkka, jota pitkin laitteen voi liu'uttaa putkeen. Näin operaattorin ei tarvitse käyttää erityistä tarkkuutta välttääkseen antureiden osumista putken seinämiin. Kelkkaan toteutettiin jyrsimällä muoto, joka ohjaa operaattoria työntämään laitteen juuri oikeaan kohtaan putkea, ja estää työntäystä laitetta liian syvälle putkeen.

Kelkan pohjaan kiinnitettiin RFID-lukija, jota testiohjelmisto tarvitsee laitteen kanssa kommunikoidakseen. Lisäksi kelkkaan upotettiin samanlainen optinen tunnistin kuin tuotantoasemien kohdistusjigissä on käytössä. Tunnistimen signaali kertoo testiohjelmalle, että testattava laite on paikallaan ja testi voi käynnistyä. Testin päätyttyä se kertoo myös, milloin laite poistetaan testausasemasta, jolloin laitteen pakkaustarra tulostetaan.

Mittapään kiinnityskohta putkessa valittiin niin, että se kohdistuu mahdollisimman lähelle testattavan laitteen antureita. Lisäksi putkeen on mahdollista lisätä liitin, johon mittapää kierretään kiinni. Näin mittapään sijoittelu voidaan vakinaistaa ja poistaa yksi todennäköinen vaihtelun lähde.

Testausasemaa varten rakennettiin runko, johon liu'utuskelkka ja putki kiinnitettiin. Runkoon lisättiin myös siivekkeet pöytään kiinnitystä varten. Näin testausasema olisi kokonaisuutena asennettavissa ja siirrettävissä ilman, että sen osia tarvitsisi kohdistaa uudelleen.

### 5.3 Viivakoodinlukija

Nykytilassa ennen testisekvenssin alkamista operaattori skannaa anturiyksikön Data-Matrix-koodista laitteen sarjanumeron ja asettaa laitteen testausaseman kohdistusjigiin. Jigissä on optinen tunnistin, joka käynnistää testin havaittuaan laitteen. Koska pakkausoluissa käytettävät viivakoodinlukijat ovat tunnettuja hankaluudestaan, haluttiin löytää korvaava malli, joka toimii luotettavammin.

Sarjanumeron skannaaminen viivakoodinlukijalla on vaikeaa, sillä skannattava kaksiulotteinen DataMatrix-koodi on huomattavan pienikokoinen ja se on tulostettu erittäin heijastavalle pinnalle. Tämän johdosta sopivan lukijamallin löytäminen oli haastavaa. Kokeiluun valittiin kolme lukijamallia, joiden arveltiin olevan ominaisuuksiensa puolesta riittäviä. Valaistusvoimakkuuden ja valotusajan sekä sijoitteluvaihtoehtojen yhdistelmiä jouduttiin kuitenkin testaamaan laajamittaisesti ennen kuin toimiva järjestely löydettiin.

Kaksi mallia asennettiin kukin päiväksi tuotantoasemaan operaattorin testattavaksi; ainoastaan toinen niistä suoriutui moitteettomasti. Kolmas malli hylättiin ilman koekäyttöä, sillä sen tarjoamat valotusasetukset osoittautuivat sopimattomiksi. Näin ollen kokeilumalleista yksi valikoitui jatkokäyttöön.

Koska viivakoodi sijaitsee testattavan laitteen pohjassa, ja viivakoodinlukija on häikäisyn estämiseksi sijoitettu osoittamaan alaspäin, joutuu operaattori viivakoodin lukeakseen kääntämään laitteen ympäri, mikä aiheuttaa turhan ja epäergonomisen kädenliikkeen. Prototyypikammiota rakennettaessa kyseenalaistettiin operaattorin tarve lukea sarjanumero erikseen ennen testin aloittamista. Uusi viivakoodinlukija integroitiin kammioon tekemällä kammioputken pohjaan reikä. Lukija kiinnitettiin testausaseman runkoon putken alapuolelle. Näin operaattori voi asettaa laitteen suoraan kammioon, jossa viivakoodinlukija skannaa sarjanumeron ja käynnistää testisekvenssin välittömästi.

Liu'utuskelkkaan integroitu viivakoodinlukija yhdistettynä optiseen tunnistimeen toimeenpanee käytännössä Poka-Yoke -mekanismin. Järjestely varmistaa, että viivakoodinlukijan skannaama sarjanumero kuuluu testausasemassa olevalle laitteelle, eikä operaattori pysty enää vahingossa syöttämään testiohjelmaan väärän laitteen sarjanumeroa.

Viivakoodinlukijan todettiin tuottavan merkittävästi lämpöä, minkä pelättiin vaikuttavan mittaustuloksiin. Lämpenemisen vaikutus, kuten prototyypin soveltuvuus yleensäkin, selvitettiin Gage R&R -toistoajoilla.

#### 5.4 Toistettavuus prototyypillä ja tuotantoasemilla

Prototyypin suorituskyvyn arviointiin käytettiin Gage R&R -menetelmää. Suorittamalla runsaasti toistoajoja testikappaleilla kerättiin mittausdataa, jonka perusteella arvioitiin

muutosten vaikutusta vaihtelun määrään sekä prototyypin soveltuvuutta tuotantokäyttöön yleisesti.

Prototyypin testaamiseen hankittiin samanlainen referenssimittari, joka tuotantosoluisakin on käytössä. Lisäksi testauskäyttöön hankittiin tietokone, johon asennettiin sama testiohjelmisto. Vertailukelpoisuuden takaamiseksi laitteistoa kootessa kiinnitettiin erityistä huomiota siihen, että prototyypin ja tuotantosolujen välille ei ilmestyisi tahattomia eroavaisuuksia.

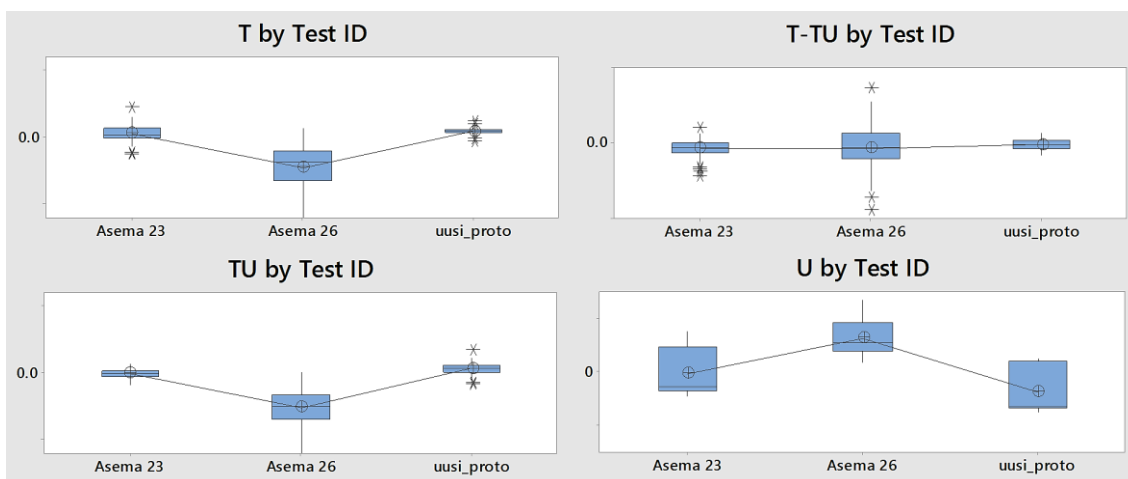
Laitteistoa koottaessa huomattiin, että tuotantosoluissa eräs mittauksen keskiarvoistusta säätelevä parametri on ollut tahattomasti väärässä asetuksessa. Parametri on saattanut johtaa osaan vuoden 2016 ajalta tutkitun aineiston hylkäyksistä, mutta virheen vaikutus on todennäköisesti pieni. Varmuuden vuoksi parametri muutettiin kuitenkin tuotantosoluihin Gage R&R -toistojen ajaksi, jotta verrattavien laitteistojen kesken ei olisi ylimääräistä muuttujaa.

Ajankäytön kohtuullistamiseksi testikappaleiden määrä minimoitiin kahteen. Kahdella laitteella ei ole mahdollista muodostaa luotettavaa laskelmaa laitteiden välisistä eroista, mutta tutkimuksen kohteena ei ollut osakohtainen vaihtelu, vaan testausaseman vaihtelu.

Vertailulaitteiksi valittiin eri tuotantoeristä kaksi yksilöä, joista kukin testattiin 23 kertaa kahdella eri tuotantoasemalla. R&R -raportteja laadittiin suorittamalla samoilla yksilöillä saman verran toistoajoja prototyypiasemassa. Vertailun kohteeksi otettiin anturiyksikön näyttämien eli T-, TU- ja U-arvon poikkemat sekä T:n ja TU:n erotus (T-TU).

Mittaustulokset on esitetty laatikkopiirroksina kuvassa 8. Kunkin testin kuvaajassa pystyakseli kattaa testin hyväksyttävien arvojen välin.





Kuva 8. Prototyypin mittaustulosten vaihtelu verrattuna kahteen tuotantoasemaan.

Suoritettaessa toistoajoja tuotantoasemilla 23 ja 26 huomattiin, että asemien kesken on merkittäviä eroja mittaustulosten vaihtelussa. Vaikka asemien kesken saattaa olla muitakin eroja, pääsyyksi epäiltiin asemien ympäristöä. Asema 23 sijaitsee syrjempänä muista tuotantolaitteista ja toistoajot asemalla tehtiin illalla, jolloin tiloissa ei ollut muuta tuotantoa ja ihmisiä liikkui alueella hyvin harvoin. Asema 26 sijaitsee muiden tuotantolaitteiden välittömässä läheisyydessä, jotka tuottavat lämmintä poistoilmaa. Lisäksi aseman 26 toistoajot tehtiin päivän aikana, jolloin tiloissa oli muutakin tuotantoa käynnissä.

Jokaiselle testausasemalle laskettiin erikseen Minitabin *%Tolerance*-arvot toistettavuuden osalta. Arvo kertoo vaihtelun suhteen hylkäysrajoihin, joten pienempi arvo on parempi. Lisäksi laskettiin uusittavuus kahden tuotantoaseman välillä. Tulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Mittaustulosten toistettavuus tuotantoasemilla ja prototyypillä sekä tuotantoasemien välinen uusittavuus.

<b>%Tolerance</b>	<b>Uusittavuus asemat 23 ja 26</b>	<b>Toistettavuus asema 23</b>	<b>Toistettavuus asema 26</b>	<b>Toistettavuus prototyypillä</b>
T	89,99 %	30,07 %	95,57 %	12,92 %
TU	90,32 %	17,49 %	70,78 %	21,74 %
T-TU	0 %	37,11 %	97,00 %	18,04 %
U	95,07 %	16,38 %	29,87 %	6,14 %

Kun ohjearvona hyväksyttävyydelle on korkeintaan 30 %:n vaihteluarvo, kummankaan tuotantoaseman toistettavuus ei ole kokonaisuutena hyväksyttävää. Uusittavuus eli kyky toistaa sama tulos eri tuotantoasemalla kärsii varsinaisten mittaustulosten eroavaisuu- den eikä niinkään niiden vaihtelun johdosta. Ainoastaan T:n ja TU:n erotuksen osalta uusittavuus on erinomainen, sillä mittaustulosten keskiarvo on tuotantoasemilla lähes sama.

Tuloksista ilmenee, että prototyyppi suoriutuu vaihtelun osalta pääosin yhtä hyvin tai pa- remmin kuin asema 23 ideaaliolosuhteissa ja huomattavasti paremmin kuin asema 26 normaaliolosuhteissa. Prototyyppiä ei kuitenkaan testattu vielä asema 26:a vastaavissa olosuhteissa. Näin ollen prototyypin testausta päätettiin jatkaa samalla, kun siirryttiin tuo- tantokelpoisen mallin valmistamiseen.

## 6 Uuden testausaseman lopullinen versio

Prototyypin perusteella rakennettiin kestävämmistä materiaaleista huolitellumpi, lopulli- nen versio, joka olisi samalla helppo dokumentoida ja monistaa. Testausaseman lopulli- sessä versiossa päädyttiin säilyttämään BeeWaTec-putkista ja liitospaloista rakennettu runko, sillä tarvittavien osien kiinnittäminen runkoon osoittautui erinomaisen yksinker- taiseksi.

Kammioputken ja liu'utuskelkan tilalle oli valittava materiaaleja, jotka soveltuvat ominai- suksiensa puolesta sähköstaattisille purkauksille eli ESD:lle herkkien materiaalien kä- sittelyyn. Materiaalien ja henkilöiden liikkuessa tai hankautuessa toisiinsa syntyy jatku- vasti staattisia varauksia, joiden purkautuminen elektroniseen komponenttiin voi vaurioit- taa sitä. ESD-yhteensopivilta materiaaleilta vaaditaan riittävän pieni pintaresistanssi, jotta niihin mahdollisesti syntyvät varaukset pääsevät purkautumaan vapaasti hallittua kanavaa pitkin. Kaikilla ESD-suojatun alueen laitteilla tulee olla suojamaahan yhteys, jonka kokonaisresistanssi on korkeintaan 35 M $\Omega$ , mutta vähintään 1 M $\Omega$ , jotta varaukset purkautuisivat hallitusti. [16.]

Metallit ovat erinomaisia johtimia, mutta muovit ovat yleensä eristäviä materiaalia. On olemassa erityisiä ESD-yhteensopivia muoviseoksia, joiden pintaresistanssi on riittävän

alhainen. Uusi kammioputki sahattiin teräsputkesta ja työstettiin paikan päällä. Sen sijaan liu'utuskelkka teetettiin ESD-yhteensopivasta muovista, ulkopuolisella urakoitsijalla tietokoneavusteisen mallin perusteella.

Koska kaikki osat kiinnittyvät johtavasti metalliseen runkoon ja ovat siten samassa potentiaalissa, riittää, että runko kytketään ESD-potentiaalirasian kautta maahan. Vaisalan tuotantotilojen tapauksessa tämäkään ei ole tarpeellista, sillä tiloissa on ESD-maahan johtavat lattiat sekä yhteensopivat työtasot. Tällöin pelkän testikammion rungon kiinnittäminen työtasoon riittää. Suunnittelemalla helposti ESD-maahan kytkettävä laitteisto haluttiin taata ketterä asennus ja helppo siirrettävyys.

Referenssimittarin mittapään lopullista kiinnitystä varten putkeen asennettiin kiinnityskierre. Näin mittapään sijoittelu vakinaistettiin, ja nippusidesommitelmista voidaan luopua. Lopulliseen versioon hankittiin pyöreä siili, joka sopii halkaisijaltaan kammion putkeen. Niin ikään siili kiinnitettiin putkeen pysyvästi kahdella putken pinnan läpi kiinnityksellä ruuvilla, joiden väliin siili lukittuu.

## 6.1 Testiajan lyhentäminen

Testisekvenssin varsinaiseen mittausdataan keräämiseen käytettävä aika on määritelty testiohjelmassa 40 sekunniksi. Testissä suoritettava GPS-testi edellyttää tämän verran aikaa, jotta laite ehtisi hakea kiinnitykset GPS-satelliitteihin. Toisaalta antureiden mittausdatasta arvioidaan vain viimeisimmän 6 sekunnin keskiarvoa referenssimittarin viimeisintä lukemaa vasten. [14.] Poistettaessa GPS-testi asemasta on hyvin mahdollista, että kokonaistestiaikaa voidaan lyhentää. Ennen mittausdatan keräämistä anturit tarvitsevat kuitenkin jonkin verran aikaa stabiloituakseen kammion olosuhteisiin, joten 6 sekuntia on todennäköisesti liian lyhyt aika, mutta 40 sekuntia on luultavasti silti enemmän kuin tarpeeksi.

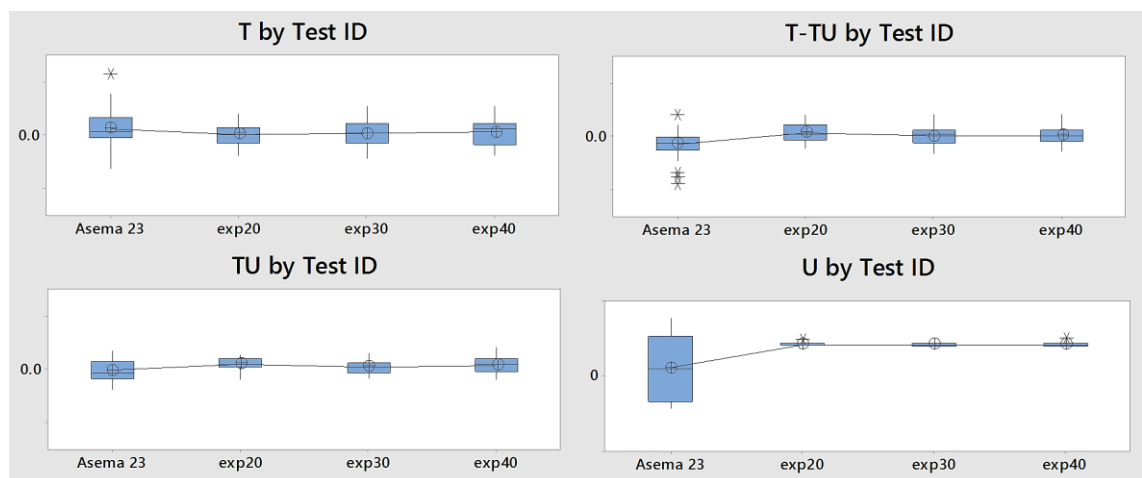
Uuden testausaseman toistoajojen yhteydessä päätettiin selvittää, säilyykö mittaustulosten toistettavuus, kun testiaikaa lasketaan. Testiaikojen pituudeksi valikoitiin 20 sekuntia, 30 sekuntia sekä alkuperäinen 40 sekuntia, ja jokaista kohden suoritettiin toistoajot, joista laadittiin Gage R&R -raportti.

## 6.2 Toistoajot

Lopullisissa toistoajoissa haluttiin verrata uuden testiaseman suorituskykyä sekä ideaaliolosuhteissa että asema 26:ta vastaavassa tilanteessa, jossa välittömään läheisyyteen sijoitettu tuotantolaitte on käynnissä ja tuottaa lämmintä poistoilmaa. Näin simuloitiin tilannetta, jossa ympäristössä liikkuu hallitsemattomia ilmvirtauksia. Samalla kummasakin asetelmassa kokeiltiin kolmea eri testiaikaa. Lopulliseen Gage R&R -raporttiin valittiin siis aiemmin suoritettujen kahden tuotantoaseman toistoajojen lisäksi yhteensä kuusi eri operaattoria, joista jokaista kohden suoritettiin kahdella laitteella 23 toistoa.

### 6.2.1 Ideaaliolosuhteet

Uudella testausaseman versiolla tehtiin toistoajoja kolmella eri testiajalla (20, 30 ja 40 sekuntia). Tuloksia verrattiin tuotantoasemaan 23 ideaaliolosuhteissa. Kuten alustavissakin toistoajoissa, lämpötilamittausten osalta uuden aseman suorituskyky oli samaa luokkaa tai marginaalisesti parempaa kuin tuotantoaseman. Tulokset on esitetty laatikopiirroksina kuvassa 9.



Kuva 9. Uuden aseman mittaustulosten vaihtelu verrattuna tuotantoasemaan ideaaliolosuhteissa. exp-arvot vastaavat uudessa testausasemassa käytettyä testiaikaa sekunneissa.

Yllättäen kuitenkin näissä toistoajoissa U-arvon vaihtelu uudella asemalla on merkittävästi pienempää kuin tuotantoasemalla. Vaihtelun pienuus huomioon ottaen uuden aseman keskiarvon erittäin yhdenmukainen siirtymä nolasta on erikoista. Todennäköisin

selitys on, että edellisten toistoajojen välillä testikappaleita ei ole säilytetty kosteusanturille suotuisissa olosuhteissa, mikä tunnetusti aiheuttaa kosteusanturin näyttämän ryömintää [14].

Taulukko 3. Mittaustulosten toistettavuus tuotantoasemalla 23 ja uudella testausasemalla eri testiajoilla, sekä asemien välinen uusittavuus.

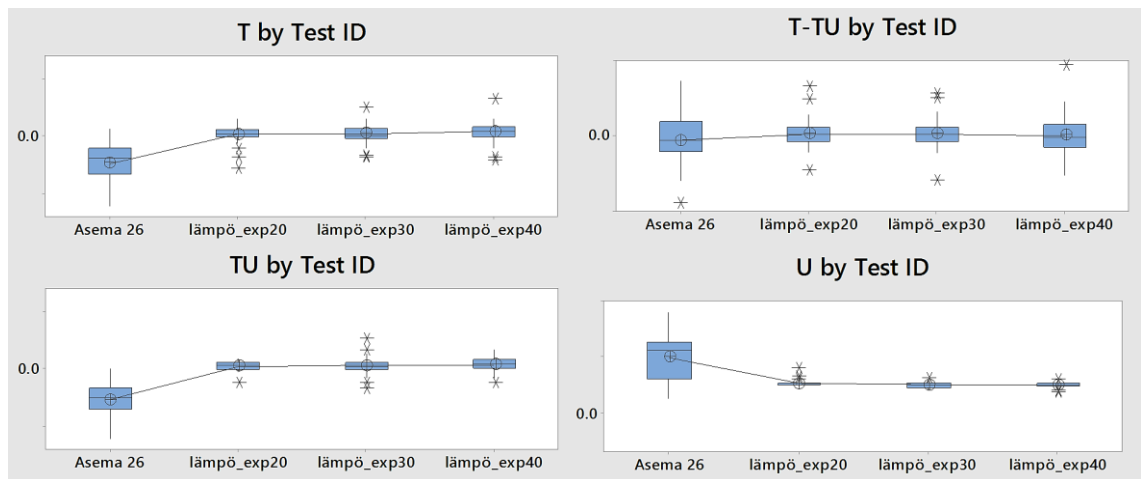
%Tolerance	Asema 23	Proto 20 s	Proto 30 s	Proto 40 s	Uusittavuus
T	30,07 %	18,85 %	21,96 %	22,79 %	2,75 %
TU	17,49 %	12,24 %	11,76 %	15,21 %	4,72 %
T-TU	37,11 %	25,25 %	28,77 %	24,63 %	13,40 %
U	16,38 %	3,52 %	2,76 %	4,32 %	61,58 %

Vaihtelun suhde hylkäysrajoihin eri testiajoilla on esitetty taulukossa 3. Taulukossa on myös esitetty uusittavuus kaikkien viiden operaattorin kesken. Tulokset osoittavat, että uudella testausasemalla toistettavuus on kaikilta osin hyväksyttävää, eikä testiajan pituus vaikuta olennaisesti lopputulokseen. Tämä tukee ajatusta, että ilman GPS:ää testiajan voi puolittaa 20 sekuntiin.

Uusittavuus on erinomaista paitsi kosteusmittauksen osalta, mikä selittyy aiemmin mainitulla mittausarvojen siirtymällä.

### 6.2.2 Haastavat olosuhteet

Jotta uuden testausaseman lopullisesta versiosta saataisiin mittaustuloksia, jotka ovat vertailukelpoisia tuotantoasemaan 26, asetettiin uuden aseman taakse samanlainen lämpöä tuottava tuotantolaite, joka todennäköisesti selittää myös asema 26:n selvästi suuremman vaihtelun. Uuden aseman toistoajat tehtiin edelleen kolmella eri testiajalla (20, 30 ja 40 sekuntia). Tulokset on esitetty laatikkopiirroksina kuvassa 10.



Kuva 10. Uuden testausaseman mittaustulosten vaihtelu verrattuna tuotantoasemaan, kun ympäristössä oli ylimääräisiä tuotantolaitteita. exp-arvot vastaavat uudessa testausasemassa käytettyä testiaikaa sekunneissa.

Haastavissa olosuhteissa myös uuden aseman vaihtelu kasvoi entisestä, mutta asema suoriutui T:n, TU:n ja U:n osalta huomattavasti paremmin kuin tuotantoasema 26. Ainoastaan T:n ja TU:n erotuksen osalta tulokset ovat suurin piirtein samoja. Erityisesti huomio kiinnittyy siihen, että uudella testausasemalla mittaustulosten keskimääräinen siirtymä nollassa on huomattavasti pienempi.

Taulukko 4. Mittaustulosten toistettavuus tuotantoasemalla 26 ja uudella testausasemalla eri testiajoilla haastavissa olosuhteissa.

%Tolerance	Asema 26	Proto 20 s	Proto 30 s	Proto 40 s
T	95,57 %	40,40 %	42,03 %	44,91 %
TU	70,78 %	19,86 %	33,69 %	29,20 %
T-TU	97,00 %	54,06 %	55,98 %	73,40 %
U	29,87 %	7,81 %	7,09 %	6,63 %

Vaihtelun suhde hylkäysrajoihin eri testiajoilla on esitetty taulukossa 4. Uuden aseman toistettavuus on ohjerajoihin nähden heikkoa, mutta kuitenkin kaikilta osin selkeästi parempaa kuin tuotantoasemalla 26. Eri testiajoilla suoritettujen tulosten vaihtelussa on hieman suurempia eroavaisuuksia kuin ideaaliosuhteissa, ja ne ovat osittain keskenään ristiriitaisia. Koska tässä testiympäristössä on enemmän vaihtelua, täsmällisempien tulosten saaminen vaatisi luultavasti runsaasti enemmän toistoajoja.

Kaikki suoritettavat toistoajat puoltavat joka tapauksessa johtopäätöstä, että uusi testausasema kykenee vähentämään mittaustulosten vaihtelua. Lisäksi kokeiltavaksi otetut eripituiset testiajat eivät vaikuta testien toistettavuuteen myöskään haastavissa olosuhteissa. Tämä vahvistaa edelleen johtopäätöstä, että ilman GPS:ää testiajan puolittaminen 20 sekuntiin on mahdollista ilman epäsuotuisia seuraamuksia.

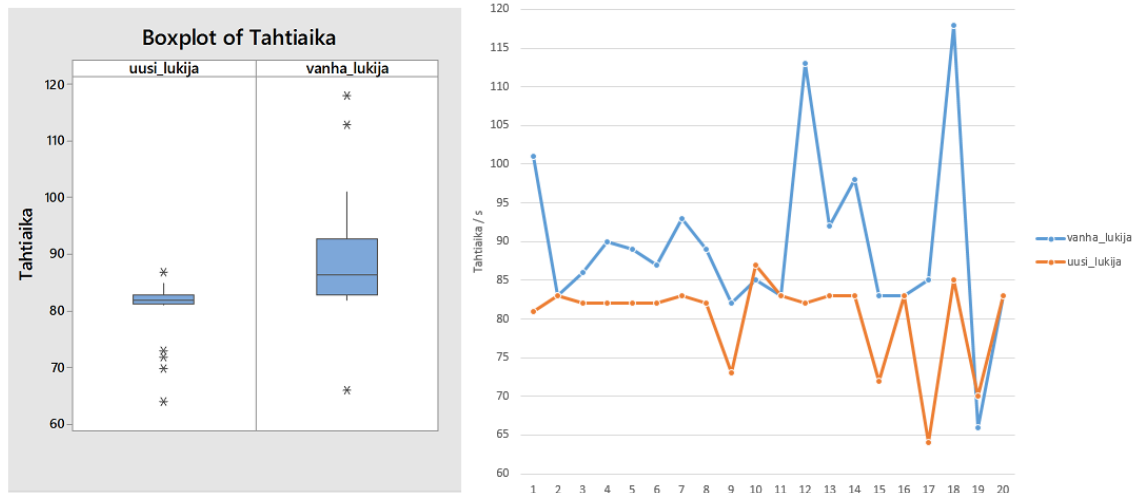
### 6.3 Viivakoodinlukijan vaikutus tahtiaikaan

Uuden viivakoodinlukijamallin vaikutus pakkaussolun operaattorin tahtiaikaan selvitettiin suorittamalla toistokoe sekä uudella että vanhalla lukijalla. Koska uutta testausasemaa ei ollut vielä hyväksytty tuotantokäyttöön, ja toisaalta koska kokeeseen ei haluttu tuoda mitään ylimääräisiä muuttujia, käytettiin toistokokeisiin vanhaa tuotantosolua. Lukija asennettiin soluun tilapäisesti niin, että se lukee sarjanumeron itsestään heti, kun laite asetetaan kohdistusjigiin. Kummallakin lukijalla tehtiin 20 normaalia pakkauskierrosta. Vaihdettaessa tuotantosoluun uusi lukijamalli annettiin operaattorin totutella sen käyttöön ennen toistokokeen aloittamista.

Ulkopuolisten muuttujien vaikutusta kokeeseen hallittiin suunnittelemalla koe harkitusti niin, että sama operaattori suorittaa molemmat kokeet. Ennen kokeen aloitusta varmistettiin, että tuotantolaitteet toimivat ja solussa on riittävästi tuotantomateriaalia, jotta kokeen aikana operaattorin aikaa ei kuluisi ylimääräisiin tehtäviin. Kokeen ajoitus sovittiin niin, ettei sen aikana pidettäisi taukoja, ja operaattorin työrauhaa varjeltiin pitämällä kokeen aikana ulkopuoliset henkilöt poissa tuotantosolun alueelta.

Vaikka pakkaussolun työtä ei vielä ole kokonaan standardoitu, tehtävään valitulla operaattorilla todettiin olevan runsaasti kokemusta työvaiheesta sekä hyvin vakiintuneet työskentelytavat. Näiden järjestelyiden turvin pyrittiin takaamaan, että kokeen aikana tahtiaikaan vaikuttaisi ainoastaan normaali pakkausrutiini sekä viivakoodinlukijan käyttämiseen kuluva aika.

Tahtiaika saatiin testiohjelman rekisteröimistä testin aloitusajoista laskemalla testin aloitusajan erotus edeltävän testin aloitusaikaan. Tuloksista luotiin kuvaajat, jotka on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Tahtiajan vertailu laatikkopiirroksena sekä sirontakuviona.

Uudella lukijalla tahtiajan keskiarvo lyheni 89,5 sekunnista 80,3 sekuntiin, eli noin 9 sekuntia. Huomattavaa on myös, että tahtiajan vaihtelu supistui merkittävästi. On muistettava, että todennäköisesti tahtiaika vaihtelee muun muassa operaattorikohtaisesti, ja näytteiden määrä on suppea, joten tuloksista voi tehdä vain rajallisia johtopäätöksiä. Yleisellä tasolla ne ovat silti lupaavia.

## 7 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli tunnistaa testausaseman heikkoon ensisaantoon johtavia syitä sekä vaihtelun lähteitä yleisesti. Ongelmien lähteet löydettiin ja priorisoitiin esiintymistiheyden mukaan. Työn tuloksena kehitettiin uusi testausaseman prototyyppi, joka on kyennyt osoittamaan suotuisia vaikutuksia mittaustulosten vaihteluun sekä solun tahtiaikaan. Yhteenvetona voidaan todeta, että insinööriyön tavoitteet saavutettiin.

Prototyypin kehitystyössä lean-periaatteet olivat etusijalla, ja uusi testausasema rakennettiin sortumatta kompromisseihin työntekijän kokeman käytettävyyden tai asennus- ja huoltotoimenpiteiden edellyttämän ketteryuden osalta. Suunnittelussa pyrittiin yksinkertaisuuteen hyödyntäen samalla Vaisalassa vakiintuneita yhdenmukaisia toimintatapoja.

Käytännössä uusi testausaseman prototyyppi on kattavampaa dokumentointia ja lopullista hyväksyntää vaille valmis tuotantokäyttöön. Insinööriyön tiukasta aikatauluvaatimuksesta huolimatta käytettävissä olleen ajan puitteissa suoritettiin riittävästi kokeita ja



toistoajoja prototyypin tuomien etujen toteamiseksi. Toki vasta tuotantokäytössä sekä ajan kanssa on mahdollista kerätä kattavasti SPC-dataa testausaseman lopullista arviointia varten. Toisaalta standardoimalla kaikki tuotantoasemat esimerkiksi kehitetyn prototyypin mukaisiksi saavutetaan joka tapauksessa epävarmuuden minimoinnin ja testausylläpidon työn helpottamisen kannalta kiistattomia etuja.

Vaikka pelkästään uuden viivakoodinlukijan käyttöönotto vanhoissa tuotantoasemissa olisi myös mahdollista, on huomioitava lukijan aiheuttama lämpeneminen, jolla olisi todennäköisesti epäsuotuisia seuraamuksia ilman uuden testausaseman lämpöä tasaavia ominaisuuksia.

### Suosituks

Insinööriyössä tehtyjen havaintojen pohjalta voidaan koostaa suositukset ensisijaisiksi jatkotoimenpiteiksi seuraavasti:

- Monistetaan ja hyväksytään uusi tuotantoasema tuotantokäyttöön
- Poistetaan tarpeettomaksi havaitut GPS- ja telemetrietestit
- Edellä mainittujen testien poistamisen mahdollistamana lyhennetään testi-aikaa 20 sekunnilla, jolloin testausasema ei ole pakkaussolun virtauksessa pullonkaula, eikä uudelleen testaaminen hukkaa yhtä paljon työaikaa
- Mikäli ensisaanto nousee riittävän korkealle tasolle, kielletään uudelleen testaaminen ilman prosessi-insinöörin lupaa, mikä pakottaa reagoimaan nopeammin poikkeavaan hylkäysten määrään
- Hyväksytään uusi viivakoodinlukija tuotantokäyttöön, jolloin pakkaussolun tahtiaika lyhenee ja tahtiajan vaihtelu pienenee
- Kehitetään R- ja K-prosesseja sarjanumerosekaannusten estämiseksi
- Kehitetään SPC-ohjelmistoa tarkoitukseen sopivammaksi sekä otetaan käyttöön tahtiajan seuranta.

Nämä toimenpiteet ovat vähintäänkin päteviä ensiaskeleita stabiilin tuotantoprosessin luomisessa, joka on edellytys tilastollisen prosessinohjauksen tehokkaalle käytölle.

## Lähteet

- 1 Liiketoiminta-alueet ja asiakkaat. 2017. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj. <<https://web.vaisala.com/fi/about-vaisala/business-areas-and-customers>>. Luettu 6.3.2017.
- 2 Historia. 2017. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj. <<https://web.vaisala.com/fi/about-vaisala/history>>. Luettu 6.3.2017.
- 3 Vaisala Production System. 2016. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj. <<http://www.vaisala.fi/fi/investors/reports/capital-markets-day/Esitykset/Vaisala%20Production%20System.pdf>>. Päivitetty 11.5.2016. Luettu 6.3.2017.
- 4 Tuominen, Kari. 2010. Lean - Kohti täydellisyyttä. Helsinki: Readme.fi.
- 5 Andersson, Paul H. & Tikka, Heikki. 1997. Mittaus- ja laatutekniikat. Helsinki: WSOY.
- 6 Salomäki, Rauno. 1999. Hyödynnä SPC: Suorituskykyiset prosessit. Helsinki: Metalliteollisuuden Keskusliitto.
- 7 Henderson, G. Robin. 2011. Six Sigma Quality Improvement with Minitab. Midlothian, UK: Wiley.
- 8 What is a gage R&R (repeatability and reproducibility) study? 2017. Verkkodokumentti. Minitab. <<http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/quality-tools/measurement-system-analysis/gage-r-r-analyses/what-is-a-gage-r-r-study/>>. Luettu 16.3.2017.
- 9 Repeatability and reproducibility in measurement systems. 2017. Verkkodokumentti. Minitab. <<http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/quality-tools/measurement-system-analysis/gage-r-r-analyses/repeatability-and-reproducibility/>>. Luettu 16.3.2017.
- 10 What are variance components in a gage R&R study? 2017. Verkkodokumentti. Minitab. <<http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/quality-tools/measurement-system-analysis/gage-r-r-analyses/variance-components/>>. Luettu 16.3.2017.
- 11 Meran, Renata et.al. 2013. Six Sigma + Lean Toolset. Frankfurt, Saksa: Springer.
- 12 Ellison, Stephen L R et.al. 2009. Practical Statistics for the Analytical Scientist: A Bench Guide. Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry.
- 13 Romppanen, Joonas. 2016. Pakkaussolun työpisteen kehittäminen lean-periaatteiden mukaisesti. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

- 14 Oinas, Janne. 2017. Senior Test Engineer, Vaisala Oyj, Vantaa. Keskustelu 5.4.2017.
- 15 Lee, HoSung. 2010. Thermal design: heat sinks, thermoelectric generators and coolers, heat pipes, and heat exchangers. Hoboken, NJ: Wiley.
- 16 Basic ESD Control Procedures and Materials. 2017. Verkkodokumentti. EOS/ESD Association, Inc. <<https://www.esda.org/about-esd/esd-fundamentals/part-3-basic-esd-control-procedures-and-materials/>>. Luettu 24.3.2017.