

Veera Hauhtonen

**VÄRISÄVYMITTAUKSEN  
LUOTETTAVUUS JA TOISTETTAVUUS**  
Geometrialtaan pienet ja kaarevat muoviosat

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Syyskuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Veera Hauhtonen: Värisävymittauksen luotettavuus ja toistettavuus – Geometrialtaan pienet ja kaarevat muoviosat  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma  
Syyskuu 2021

---

Värisävymittaus on yksi MSK Plast Oy:n käyttämistä tuotannonaikaisista mittausten menetelmistä. Tässä työssä tutkitaan värisävymittauksen luotettavuutta ja toistettavuutta, kun mitataan geometrialtaan pienten ja/tai kaarevien ruiskuvalulla valmistettujen muovikappaleiden värisävyä. Tutkimuksen tavoitteena on löytää mahdollisimman luotettavat ja toistettavat mittausten menetelmät osille, joita on geometriansa vuoksi vaikea mitata. Yrityksessä on useita työntekijöitä jotka suorittavat värisävymittauksia. Tämän vuoksi halutaan selvittää, kuinka paljon vaihtelua eri mittaajat aiheuttavat mittaustuloksiin. Tarkoitus on luoda työntekijöiden käyttöön osakohtainen ohjeistus, jossa määritellään kaikille yrityksen valmistamille mitattaville osille sopivin mittaustapa ja värimittarin mittakärki. Liitteessä A on esitetty tutkimustulosten pohjalta luotu ohjeistus tutkittavana olleiden osien osalta. Tutkimuksen värisävymittaukset suoritettiin spektrofotometriä käyttäen. Spektrofotometri on mittalaite, jonka toiminta perustuu spektrofotometriaan. Käytössä oli Konica Minolta CM-700d spektrofotometri, joka käyttää CIELAB-väriavaruuden värikoordinaatteja värisävyn numeeriseen ilmaisuun.

Työhön sisältyy neljä erillistä tutkimusta: mittarin mittakärkien ja tutkittavien osien mittaustapojen vertailu, olosuhdemittaukset, stabiilisuusmittaus sekä MSA-tutkimus. Tutkimuksen ensimmäisessä osassa vertailtiin tutkimukseen valittuja mittakärkiä ja yhden tutkittavan osatyypin mittaustapojen. Olosuhdemittauksia oli suorittamassa kolme eri mittaajaa: kokenut mittaaja, jonkin verran mitannut mittaaja ja täysin kokematon mittaaja. Olosuhdemittaukset suoritettiin tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa valittuja kärkiä ja mittaustapojen käyttäen. Tutkittavana oli viisi eri olosuhdetta: valoisa, pimeä, mittaustapa valkoista ja mustaa taustaa vasten sekä mittaustapa mustaa pehmustetta vasten. Stabiilisuusmittauksessa tutkittiin mittaustulosten vaihtelua ajan funktiona, kun mittaukset suoritettiin mahdollisimman muuttumattomissa olosuhteissa peräkkäisinä työpäivinä. MSA-tutkimuksen avulla selvitettiin, kuinka suuri osa mittaustulosten vaihtelusta johtuu itse mittaustapojen menetelmästä. Tuloksia analysoidessa vertailtiin mittaustulosten hajontaa sekä kunkin mittaustapojen menetelmän kyvykkyyttä.

Yleisesti ottaen tutkimustulosten perusteella tulit siihen tulokseen, että käytössä oleva mittalaite ei täysin sovellu geometrialtaan pienten ja kaarevien osien värisävyn mittaamiseen. Mittarin kärjen mittaustapa ei peity kokonaan, kun mitattava osa asetetaan sitä vasten. Tällöin mittarin käyttämä valo ei kohdistu suoraan osan pintaan, joten mittaustulos vääristyy. Eri mittaajien ja olosuhteiden välillä havaittiin olevan selvää eroa. Mittaajien välinen ero korostui erityisesti, kun mitattiin hyvin pieniä ja kaarevia osia. Erosta ei kuitenkaan löytynyt selkeää johdonmukaisuutta, vaan oli täysin osa- ja olosuhdekohtaista, kenellä mittaajista oli pienin hajonta mittaustuloksissa. Mittaustulosten todettiin olevan stabiileja ajan suhteen.

Mittaustulosten pohjalta päädyttiin ratkaisuun, että mittaukset tullaan jatkossa suorittamaan valoisassa, sillä se on käytännön järjestelyiden kannalta yksinkertaisin ratkaisu. Jokainen mittaaja tulee jatkossa suorittamaan mittaukset samassa paikassa samaa mittaustapojen menetelmää noudattaen, jotta mittaajien välinen ero saadaan minimoitua.

Avainsanat: Värisävymittaus, spektrofotometri, spektrofotometria, CIELAB, luotettavuus, toistettavuus

# ALKUSANAT

Tämä tutkimus sai alkunsa MSK Plast Oy:n tarpeesta kehittää ruiskuvalun tuotannaikaista mittausmenetelmänsä värisävymittaukselle. Tutkimussuunnitelma mahdollisimman optimaalisen mittausmenetelmän löytämiselle on kehitetty yhdessä yrityksen laatuorganisaation jäsenten kanssa. Ideoita tutkimukseen on vastaanotettu myös muilta yrityksessä työskenteleviltä henkilöiltä, jotka ovat olleet aiheesta kiinnostuneita. Tutkimukseen kuuluvia mittauksia on ollut tekemässä minun lisäksi kolme mittaajaa.

Värisävymittaus oli minulle kokonaisuudessaan melko tuntematon mittausmenetelmä ennen tutkimuksen alkua, mutta kiinnostukseni heräsi nopeasti aiheeseen tutustuttuani. Haasteita tutkimukseen toi aiempien samaa aihetta käsittelevien tutkimusaineistojen vähyys. Tutkimuksen aloitus oli tämän vuoksi lähinnä eri vaihtoehtojen pohtimista ja kokeilua, kunnes tutkittavaksi sopivat menetelmät löytyivät. Kun alkuun päästiin, tutkimus eteni sujuvasti ja ongelmitta loppuun asti.

Haluan kiittää yritystä saamastani mahdollisuudesta suorittaa kyseinen tutkimus ja olla mukana mittausprosessin kehittämisessä. Kiitän yrityksen laatuorganisaatiota sekä kandidaatintutkielmani ohjaajaa Sanna Auvista tuesta, avusta ja neuvoista, joita minulla on ollut saatavilla koko tutkimus- ja kirjoitusprosessin ajan. Lisäksi kiitän tutkimukseen osallistuneita mittaajia pitkäjänteisyydestä sekä kiinnostuksesta tekemääni tutkimusta kohtaan.

Tampereella, 29.9.2021

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. VÄRISÄVYMITTAUS .....	2
2.1 Valo ja väri.....	2
2.2 Spektrofotometri ja spektrofotometria.....	2
2.3 CIELAB.....	4
3. TILASTOLLINEN LAADUNVALVONTA .....	6
3.1 Toistettavuus ja luotettavuus .....	6
3.2 Kyvykkyys, stabiilisuus ja MSA.....	6
4. MITTAUSTEN SUORITUS .....	8
4.1 Tutkimuksen välineistö.....	8
4.2 Mittakärkien ja mittauskohtien testaus ja valinta .....	12
4.3 Värisävymittaukset eri olosuhteissa .....	14
4.4 Stabiilisuuden mittaaminen ja MSA-tutkimus .....	18
5. MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI .....	20
5.1 Olosuhteiden vaikutus.....	20
5.2 Stabiilisuus .....	23
5.3 Toistettavuus ja luotettavuus .....	26
5.4 MSA-mittausten tulokset.....	28
6. YHTEENVETO .....	33
LÄHTEET .....	36

LIITE A: Ote osakohtaisesta ohjeistuksesta

LIITE B: Kyvykkyysraportti osalle 1, kärki- ja mittauskohtamittaus

LIITE C: Kyvykkyysraportti osalle 2, kärki- ja mittauskohtamittaus

LIITE D: Kyvykkyysraportti osalle 3 (värimalli), kärki- ja mittauskohtamittaus

LIITE E: Kyvykkyysraportti osalle 2, olosuhdemittaukset

LIITE F: Kyvykkyysraportti osalle 1 (kohta 1), olosuhdemittaukset

LIITE G: Kyvykkyysraportti osalle 1 (kohta 3), olosuhdemittaukset

LIITE H: Kyvykkyysraportti osalle 3 (värimalli), olosuhdemittaukset

LIITE I: MSA-mittauksen tulokset (valoisa)

LIITE J: MSA-mittauksen tulokset (musta pehmuste)

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CIELAB	CIE:n värivaruus L*a*b*-koordinaatistossa
GRR	Gage Repeatability and Reproducibility
Gage R&R	Gage Repeatability and Reproducibility
MSA	Measurement Systems Analysis

$\Delta E$	Väriero
$\Delta a^*$	a-koordinaattien erotus
$\Delta b^*$	b-koordinaattien erotus
$\Delta L^*$	L-koordinaattien erotus
$\Delta x$	Koordinaattipisteiden erotus
$\Delta x_{trial}^*$	näytekappaleesta mitattu värikoordinaatti
$\Delta x_{standard}^*$	värikoordinaatin standardiarvo
$\mu$	keskiarvo
$\sigma$	keskihajonta
$T$	toleranssivälin pituus
$T_+$	toleranssin yläraja
$T_-$	toleranssin alaraja
$a^*$	CIELAB värivaruuden a-koordinaatti
$b^*$	CIELAB värivaruuden b-koordinaatti
$L^*$	CIELAB värivaruuden L-koordinaatti
$P$	prosessin suoritusarvo
$P_p$	indeksi prosessin suoritusarvolle
$P_{pk}$	indeksi prosessin suoritusarvolle

# 1. JOHDANTO

MSK Plast Oy valmistaa ruisku- ja reaktiovalamalla muovituotteita laajasti erilaisiin käyttötarkoituksiin. Osalle tuotteista suoritetaan säännöllisesti tuotannonaikaisia värisävymittauksia osana laadunvalvontaa. Haasteena on, että käytössä oleva värisävymittari ei vaikuta täysin soveltuvan geometrialtaan pienten ja/tai kaarevien kappaleiden värisävyn mittaamiseen. Jopa peräkkäiset mittaustulokset samasta kohdasta mitattuna saattavat poiketa toisistaan merkittävästi, vaikka mittausolosuhteet pysyvät samana.

Tutkimuksen tarkoitus on selvittää, millä mittausolosuhteiden kombinaatiolla saadaan luotettavimpia ja toistettavimpia mittaustuloksia. Työn suorituksen aikana tutkitaan eri mittakärkien ja mittaushuoneiden välisiä eroja, mittaustulosten stabiilisuutta sekä eri mittausjärjestelmien välistä eroa. Lisäksi selvitetään, onko vallitsevilla mittausolosuhteilla systemaattista vaikutusta mittaustuloksiin ja kuinka suuri osa mittaustulosten vaihtelusta johtuu mittausjärjestelmän sisäisistä virheistä. Yritys on rakentamassa uutta mittaushuonetta, joten tutkimuksen tulokset saattavat vaikuttaa siihen, millaiset olosuhteet uudessa mittaushuoneessa tulee olemaan. Tutkimussuunnitelma ja -aikataulu on laadittu yhdessä yrityksen laatuorganisaation kanssa.

Luvussa 2 käsitellään värisävymittauksen teoreettista taustaa. Luvussa esitellään spektrofotometria käsitteenä ja käydään läpi spektrofotometrin sekä tässä työssä käytetyn väriavaruuden perusteet. Luku 3 esittelee lyhyesti tässä tutkimuksessa tulosten analysoinnissa käytetyt tilastollisen laadunvalvonnan menetelmät. Luvussa 4 käydään läpi työn suorituksen vaiheet sekä mittakärkien ja mittaushuoneiden valinnan tulosten esittely ja analyysi. Luku 5 vastaa tutkimuskysymyksiin värisävymittauksen mittaustulosten luotettavuudesta ja toistettavuudesta. Luvussa esitetään olosuhte-, stabiilisuus- ja MSA-mittausten tulokset ja niiden analysointi. Luvussa 6 kerrotaan tutkimuksen tuloksien avulla johdetut johtopäätökset sekä yritykselle esitettävä tulevaisuuden toimintasuunnitelma värisävymittauksen osalta.

## 2. VÄRISÄVYMITTAUS

Luku 2 käsittelee spektrofotometriin ja spektrofotometriaan liittyvää teoreettista taustaa. Luvussa 2.1 Käsitellään perusasiat valosta ja väristä. Luvussa 2.2 esitellään spektrofotometrin perusrakenne ja toimintaperiaate sekä spektrofotometria ilmiönä. Luku 2.3 esittelee tässä työssä käytetyn CIELAB-väriavaruuden sekä matemaattisen laskukaavan värieron laskemiselle.

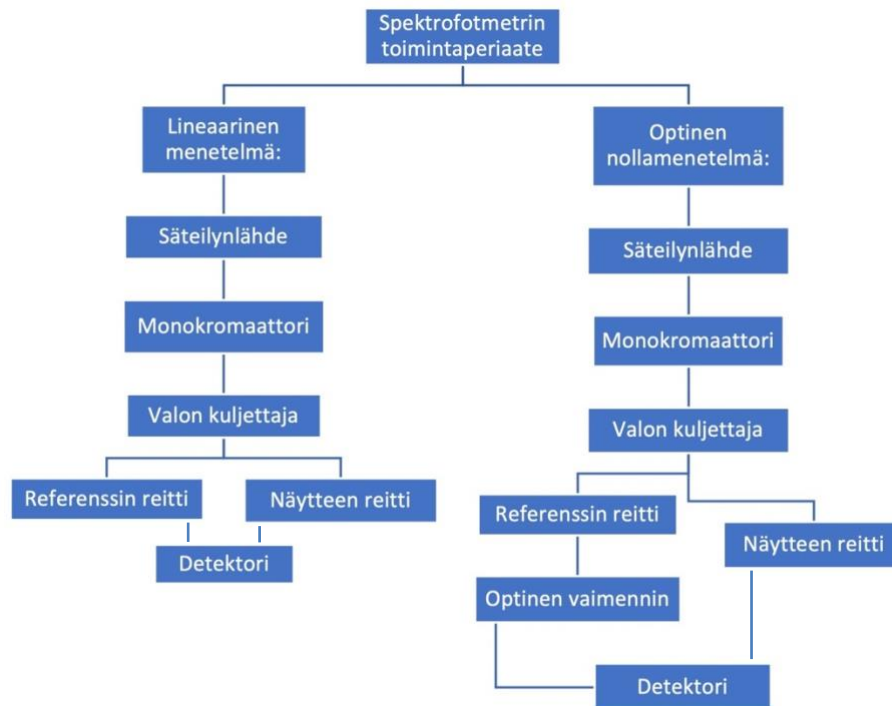
### 2.1 Valo ja väri

Valo on sähkömagneettista säteilyä, joka koostuu valon eri aallonpituuksista [1, s.1]. Näkyvän valon alueeksi kutsutaan aallonpituusalueetta 380 nm – 780 nm [2, s.36]. Tällä näkyvän valon alueella valon eri aallonpituudet taittuvat eri tavoin muodostaen näkyvää valoa eri väreissä [1, s.1].

Väriin värisävy, valoisuus ja kylläisyys aiheuttavat värien välille värieron. Tätä värieroa voidaan mitata spektrofotometrillä ja värisävy voidaan ilmaista numeerisesti väriavaruutta ja sen koordinaatteja käyttäen. [3, s.7–19]

### 2.2 Spektrofotometri ja spektrofotometria

Spektrofotometri on mittalaite, jota käytetään värisävyn mittaamiseen. Mittaamisella tarkoitetaan suoritettuja kokeellisia toimenpiteitä, joilla saadaan selville mitattavan suureen arvo [4, s.54]. Spektrofotometrin toiminta perustuu spektrofotometriaan, eli se mittaa tutkittavan näytteen optisia läpäisy- ja heijastusominaisuuksia tietyllä aallonpituusalueella. Kaikilla spektrofotometreillä on samantyylinen toimintaperiaate ja rakenne: spektrofotometreissä on säteilyn (valon) lähde, joka valaisee näytteen, ja monokromaattori, jolla eristetään haluttu aallonpituus säteilylähteen lähettämästä spektristä. Näiden lisäksi mittaussysteemiin kuuluvat mitattava näyte, mittarin detektori ja sen apulaitteet. Detektori vastaanottaa signaalin ja synnyttää signaalia vastaavan vasteen, joka voidaan mitata. [5, s.510] Spektrofotometrin perusrakenne on esitetty seuraavalla sivulla kuvassa 1.



**Kuva 1:** Mukailten [5, s.510]: Spektrofotometrin toimintaperiaate

Lineaariseen menetelmään perustuvan spektrofotometrin toiminta perustuu detektorin lineaarisen vasteen tarkkuuteen. Optisessa nollamenetelmässä menetelmässä vertaillaan tutkittavan säteen ja referenssisäteen intensiteettien yhtäpitävyyttä. [5, s.510] Tässä tutkimuksessa värisävymittaukset suoritettiin käsikäyttöistä Konica Minolta CM-700d-spektrofotometriä käyttäen. Kyseinen mittalaite on esitetty kuvassa 2.



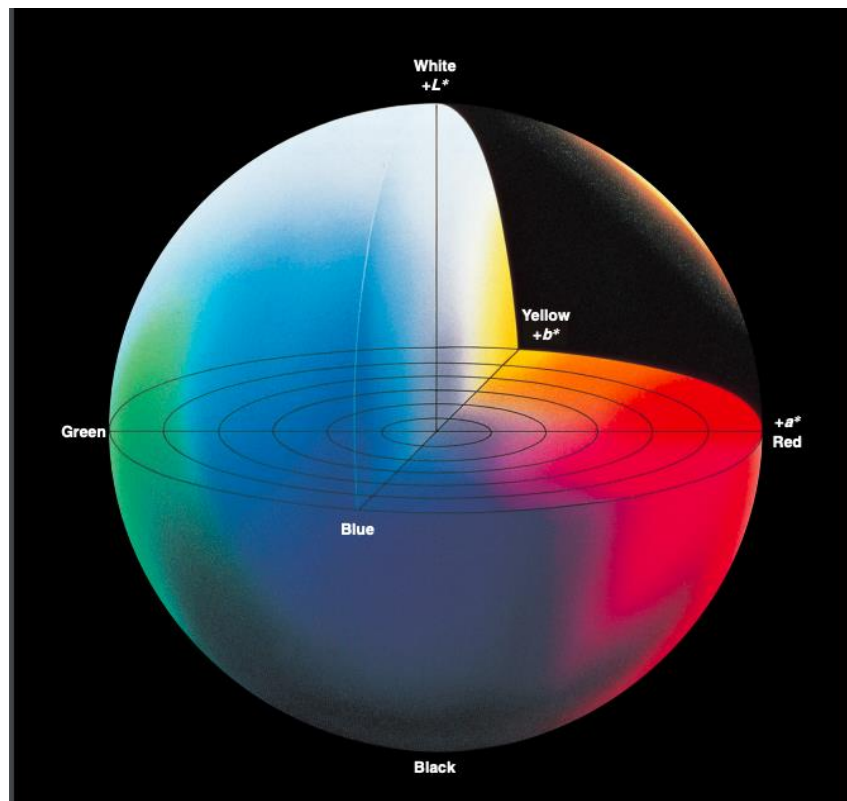
**Kuva 2:** Konica Minolta CM-700d -spektrofotometri [6]



Tässä työssä spektrofotometria käytettiin tuotannonaikaisessa laadunvalvonnassa ruiskuvalettujen muovikappaleiden värisävyn mittaamiseen. Kyseisessä mittarissa on kaksoissäde-systeemi (double-beam system), joka kompensoi valon spektrin voimakkuuksien sekä ominaisuuksien pieniä vaihteluita [7, s.128].

## 2.3 CIELAB

CIELAB-väriavaruus on yksi käytetyimmistä väriavaruuksista. CIELABin on luonut CIE (Commission Internationale de l'Eclairage / Kansainvälinen valaistuskomissio) vuonna 1976. Kolmiulotteinen CIELAB-väriavaruus koostuu kolmesta koordinaattiakselista:  $L^*$  kuvastaa valoisuutta ja  $a^*$  ja  $b^*$  ovat värikoordinaatteja.  $A^*$ -koordinaatti kertoo värisävyn punaisen ja vihreän väliltä ja  $b^*$ -koordinaatti keltaisen ja sinisen väliltä. [3, s.18-19] CIELAB-väriavaruus on esitetty kuvassa 3.



**Kuva 3:** CIELAB-väriavaruus [3, s.19]

$L^*$ -,  $a^*$ - ja  $b^*$ -koordinaattien avulla saadaan muodostettua  $\Delta E$ , joka kuvaa mitatun värisävyn eroa määrättyyn target-värisävyn eli referenssiin niiden välisen vektorin pituutena väriavaruudessa.  $\Delta E_{ab}$  määritetään käyttämällä kaavaa

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (1)$$

jossa  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  ja  $\Delta b^*$  ovat mitatun värisävyn  $L^*$ -,  $a^*$ - ja  $b^*$ -koordinaattien sekä ja target-sävyn vastaavien koordinaattien erotukset kaavan (2) mukaisesti. Erotus  $\Delta x^*$  lasketaan kaavalla

$$\Delta x^* = \Delta x_{trial}^* - \Delta x_{standard}^*, \quad (2)$$

jossa  $\Delta x_{trial}^*$  on koordinaatti, joka saadaan näytekappaletta mittaamalla, ja  $\Delta x_{standard}^*$  on standardoitu arvo eli target mitattavalle värikoordinaatille. [2, s.61] Mitä pienempi  $\Delta E$  on, sitä pienempi väriero on. Taulukossa 1 on esitetty suurpiirteiset määritelmät erisuuruisille värieron arvoille.

**Taulukko 1: Värieron selkeys, mukailen [8]**

$\Delta E$	Värieron selkeys
0–1	lähes huomaamaton ero
1–2	hyvin pieni ero, jonka vain kokenut mittaaja huomaa
2–3,5	selkeä ero, myös kokematon mittaaja huomaa eron
3,5–5	huomattava ero
>6	todella huomattava ero

Koska värieron selkeys on pitkälti mittajaan kokemuksesta ja näkökyvystä riippuvaa, eivät taulukon arvot välttämättä ole täysin totuudenmukaisia tai vertailukelpoisia. Arvojen on kuitenkin todettu olevan riittävän tarkat arviot, jotta yritys voi käyttää niitä havainnollistavina esimerkkeinä kouluttaessaan uusia mittajia.

## 3. TILASTOLLINEN LAADUNVALVONTA

Luvussa 3 esitellään tässä työssä tulosten analysoinnissa käytetyt tilastollisen laadunvalvonnan menetelmät. Luvussa 3.1 määritellään käsitteet toistettavuus ja luotettavuus, mitkä ovat mittaamenetelmän ominaisuuksia, joita tässä tutkimuksessa analysoidaan. Luvussa 3.2 selvitetään termit kyvykkyys ja stabiilisuus, jotka ovat tässä työssä mittaustuloksista tutkittavia tilastollisia ominaisuuksia. Lisäksi esitellään lyhyesti MSA terminä sekä käydään läpi mitä MSA-tutkimuksella pyritään selvittämään.

### 3.1 Toistettavuus ja luotettavuus

Toistettavuutta voidaan tutkia mittaamalla identtisiä ominaisuuksia identtisellä mittaamenetelmällä identtisissä mittaolosuhteissa useita kertoja. Tutkitaan siis mittaustulosten vaihtelua määrätyissä mittaolosuhteissa. [9, s.7] Toistettavuus ottaa huomioon sekä mittausjärjestelmän sisäisen vaihtelun että mittausjärjestelmän sisäisestä virheestä johtuvan vaihtelun. [9, s.217] Toistettavuus on eri asia kuin uusittavuus. Jotta mittaamenetelmä olisi uusittava, mittaustulosten tulisi olla yhtäpitäviä, vaikka ne suoritettaisiin eri olosuhteissa eri mittaajan toimesta. [4, s.55]

Mittaustulosta pidetään luotettavana, mikäli samanlaisia tuloksia saadaan yhtäläisissä olosuhteissa mittaamalla. Tässä tutkimuksessa mittaustuloksen luotettavuutta analysoidaan vertailemalla saatuja mittaustuloksia asiakkaan määrittämästä värimallista mitattuihin tuloksiin, sillä sen värisävy tiedetään. Mittaamenetelmän on oltava luotettava, jotta se voi olla pätevä menetelmä halutun ominaisuuden mittaamiseen. Luotettavuutta tutkittaessa tulee arvioida mittausvirheiden suuruutta ja vaikutusta mittaustulokseen.

### 3.2 Kyvykkyys, stabiilisuus ja MSA

Prosessin suoritusarvo  $P$  (Performance) on prosessin, eli tässä tapauksessa värisävymittauksen aikaansaamien tulosten mittari. Se kuvaa sitä, mitä prosessilla on jo saatu aikaan, sekä ennustaa prosessin kyvykkyyttä tulevaisuudessa. Tässä tutkimuksessa kyvykkyydellä kuvataan mittaamenetelmän kykyä tuottaa mittaustuloksia, jotka ovat menetelmälle määritettyjen toleranssirajojen sisällä. Suoritusarvolle voidaan laskea indeksi  $P_{pk}$  suhteessa prosessille määritettyihin toleransseihin. Kyvykkyyttä kuvaava  $P_{pk}$  saadaan laskettua kaavalla

$$P_{pk} = \frac{T_+ - T_-}{6\sigma}, \quad (3)$$

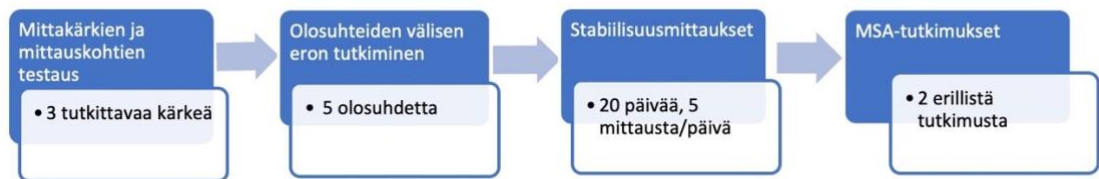
jossa  $T_+$  on prosessille määritellyn toleranssin yläraja,  $T_-$  on toleranssin alaraja ja  $\sigma$  kuvaa mittaustulosten keskihajontaa. [10, s.85–98] Tässä työssä eri mittausten menetelmillä saatuja mittaustuloksia vertailtiin esimerkiksi kyvykkyyden  $P_{pk}$  arvojen avulla. Mitä korkeampi kyvykkyyden arvo menetelmällä tai prosessilla on, sitä kyvykkäämpi se on. Tuloksia päätettiin analysoida kyvykkyyden kannalta, sillä yritys on aiemmin käyttänyt samaa analysointimenetelmää erilaisten menetelmien ja prosessien analysoinnissa.

Stabiilisuudella tarkoitetaan sekä mittausprosessin tilastollista vakautta (statistical stability) että mittaustulosten vakautta ajan funktiona (measurement stability). Tilastollisella vakaudella kuvataan mittausprosessin vakautta, joka on ennustettavissa sen sisäisestä vaihtelusta huolimatta. Mittaustulosten vakaudella tarkoitetaan pyrkimystä siihen, että mittausjärjestelmä täyttää sille määritellyn mittausstandardin vaatimukset koko käyttöikänsä ajan. [9, s.218] Stabiilisuutta tutkitaan usein selvittämällä, onko mitattujen tulosten keskiarvon sekä referenssiarvon välillä eroa eli bias-*virhettä*. Bias-*virhe* on mittausjärjestelmän systemaattista *virhettä*. [9, s.6]

MSA (Measurement System Analysis, myös GRR tai Gage R&R) tunnistaa mittaukseen vaikuttavat *virhelähteet*. MSA:ta käytetään määrittämään, kuinka suuri osuus mittauksen *virheestä* johtuu mittausjärjestelmästä. [11, s.79] MSA-tutkimuksen avulla saadaan arvio mittauksen toistettavuudesta ja uusittavuudesta. Yksinkertaistettuna MSA on mittausjärjestelmän suorituksen analyysi, jolla määritetään mittausjärjestelmän *virheeseen* liittyvän vaihtelun määrä. [9, s.7]

## 4. MITTAUSTEN SUORITUS

Tässä työssä suoritettiin neljä erillistä mittausosiota. Tutkimuksessa käytetyt tutkittavat kappaleet ja mittauskärjet esitellään luvussa 4.1. Luku 4.2 käsittelee mittakärkien ja mittauskohtien valintaa. Luvussa käydään läpi mittauksen suorittaminen sekä esitellään mittaustulokset ja niiden analysoinnin perusteella tehdyt johtopäätökset. Tulosten analysointi käsitellään poikkeuksellisesti jo tässä luvussa, jotta teksti etenisi mahdollisimman kronologisessa järjestyksessä. Tutkimusten muiden osien tulokset ja analyysi ovat luettavissa luvussa 5. Luvussa 4.3 käydään läpi kaikissa viidessä olosuhteessa suoritettujen olosuhdemittausten mittausjärjestelyt. Luku 4.4 käsittelee tutkimuksen loppuvaiheessa suoritettua MSA-mittauksen sekä stabiilisuustutkimuksen mittausten suorittamisen ja mittausjärjestelyt. Kuvassa 4 on esitetty järjestys, jossa eri mittausosiot suoritettiin.



**Kuva 4:** Mittausten kulku

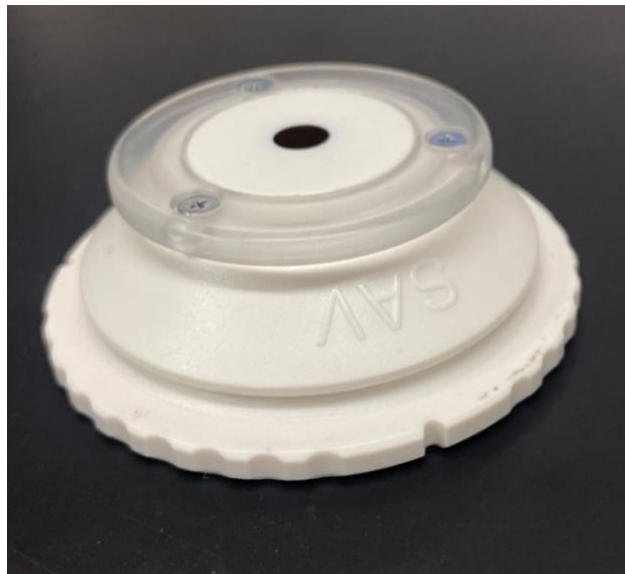
Tutkimuksen ensimmäisen osuuden tulosten perusteella määritellään tutkittaville osille mittakärjet ja mittauskohdat joita käytetään tutkimuksen muissa osissa. Mittauksia suorittivat samat henkilöt koko tutkimuksen ajan.

### 4.1 Tutkimuksen välineistö

Konica Minolta CM-700d-spektrofotometrin lisäksi työssä käytettiin erilaisia mittakärkiä sekä tutkittiin kolmea eri osatyyppeä. Seuraavilla sivuilla kuvissa 5, 6 ja 7 on esitetty tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa käytetyt mittakärjet. Kaikki tutkimukseen kuuluvat mittaukset on suoritettu värisävymittarin ohjekirjan mittausohjeita noudattaen [7, s. 29-31, 76]. Mittari kalibroitiin aina mitattavan osa vaihtuessa ja/tai kun mittausten suorittaja vaihtui.



**Kuva 5: Mittakärki 1**



**Kuva 6: Mittakärki 2**

Mittakärjet 1 ja 2 ovat alkuperäisiä mittariin kuuluvia kärkiä. Seuraavan sivun kuvan 7 mittakärki 3 on tehty kiinnittämällä mittakärki 2:seen kolme pyöreää tiivistetarraa. Tiivistetarrat ovat keskenään samanlaisia ja ne on asetettu silmämääräisesti kiinni mittakärjen keskellä olevan aukon reunaan niin, että tiivistetarrat eivät peitä aukkoa. Kyseinen mittakärki valittiin tutkimukseen, sillä mittalaitteen valmistaja ehdotti mittakärjen tiivistämistä kolmesta pisteestä aukon ympärillä, kun kysyttiin neuvoa kaarevien osien värisävyn mittaamiseen.



**Kuva 7: Mittakärki 3**

Kuvassa 8 sekä seuraavalla sivulla kuvissa 9 ja 10 on esitetty muoviosat, joita mittaamalla tutkimus suoritettiin. Kuviin on merkitty punaisella osien mittauskohdat. Asiakkaan logo on peitetty kuvassa 8.



**Kuva 8: Osa 1**

Tähän asti tuotannaikaiset mittaukset on suoritettu osasta 1 vaihtelevasti kaikkia kuvaan 8 merkittyjä mittauskohtia käyttäen. Jokainen mittaja on itse valinnut kohdan josta mittaa. Tämän käytännön on kuitenkin havaittu aiheuttavan merkittävää hajontaa mittaustulosten välillä.



**Kuva 9:** Osa 2



**Kuva 10:** Värimalli (osa 3)

Osia 1 ja 2 oli molempia tutkittavana kaksi kappaletta Näiden lisäksi tutkittiin osaa 3 eli värimallia. Tutkittavia osia oli siis yhteensä 5 kappaletta. Värimalli on asiakkaan asettama target kyseiseen tuoteperheeseen kuuluvien osien värisävyille. Koska kappaleet kuuluvat samaan tuoteperheeseen ja loppukokoonpanoon, niiden tulisi olla silmämääräisesti katsottuna samanväriset. Asiakas on määrittänyt toleranssin kyseiseen loppukokoonpanoon tulevien osien värisävyille. Värikoordinaattien arvo saa olla  $\pm 3,00$



target-arvoon verrattuna ja värieron  $\Delta E$  maksimiarvo on 3,00. Toleranssi vaihtelee asiakas-, osa-, väri- ja kokoonpanokohtaisesti.

## 4.2 Mittakärkien ja mittauskohtien testaus ja valinta

Mittaukset aloitettiin tutkimalla millaisilla mittausjärjestelyillä (mittakärki ja mittauskohta) mittaustulokset ovat toistettavimpia. Osassa 1 on kolme vaihtoehtoista mittauskohtaa, eli sille määritetään mittauskärjen lisäksi kyvykkäin mittauskohta. Osassa 2 ja värimallissa on vain yksi mahdollinen mittauskohta, joten niille määritetään ainoastaan sopivin mittauskärki. Ennen mittauksen aloittamista kokeiltiin erilaisia tiivisteitä ja pehmusteita alkuperäisiin mittakärkiin. Lisäksi 3D-tulostettiin kaksi mittakärkeä, joihin pursotettiin tiiviste. Kaikki näistä päätettiin hylätä, eikä niitä otettu mukaan jatkotutkimuksiin, sillä mittaustulosten väriero  $\Delta E$  poikkesi huomattavasti alkuperäisillä kärjillä mitatuista tuloksista. Voitiin siis päätellä, että tiivisteet ja pehmusteet vääristävät mittaustulosta: pehmusteet päästivät mittarin käyttämän valon lävitseen ympäristöön ja tiivisteet veivät mittakärjen liian kauas mitattavan osan pinnasta. Lupaavimmalta vaikutti mittakärki 3, joten se valittiin yhdeksi kärjeksi tutkimuksen ensimmäiseen vaiheeseen jossa kullekin osatyypille määritettiin sopivin mittakärki. Kuvassa 11 on esitetty 3D-tulostettu mittakärki, sekä osa tiivisterenkaista. Mikään kuvan 11 osista ei kuitenkaan osoittautunut toimivaksi.



**Kuva 11:** 3D-tulostettu mittakärki ja tiivisterenkaita

Yksi mittaaja suoritti samoissa mittausolosuhteissa jokaiselle osalle jokaiseen mittauskohtaan jokaisella mittakärjellä 30 mittausta. Osia 1 ja 3 mitattiin niin, että ne olivat tuettuna pöytää vasten. Osaa 2 mitattiin pitämällä sitä kädessä, jotta osasta saatiin parempi ote. Kärjen valinta tehtiin mittaustulosten hajontaa ja kyvykkyyttä vertailemalla. Taulukossa 2 on esitetty mittaustulokset, joiden perusteella mittakärjet ja mittauskohdat on valittu. Värieron  $\Delta E$  keskiarvot ja keskihajonnat sekä mittausprosessin kyvykkyyden arvot on taulukoitu. Jotta mittausprosessi olisi mahdollisimman toistettava, kyvykkyyden arvon tulee olla mahdollisimman suuri ja keskihajonnan mahdollisimman pieni.

Kärjistä 1 ja 2 luotiin kyvykkyysraportit (Process Capability report) Minitab-sovelluksen Normal Capability Analysis -toimintoa käyttäen. Mittakärkien ja mittauskohtien valinnat tehtiin taulukon 2 arvoja vertailemalla, mutta kuvaajat luotiin tehtyjen päätelmien tueksi sekä mahdollistamaan mittaustulosten graafinen tarkastelu ja vertailu.

**Taulukko 2: Mittakärki- ja mittauskohtamittausten tulokset**

		osa 1			osa 2	osa 3
		kohta 1	kohta 2	kohta 3		
<b>Kärki 1</b>	<b>Keskiarvo</b>	0,86	1,75	0,69	2,77	1,59
	<b>Keskihajonta</b>	0,46	1,15	0,22	0,74	0,063
	<b>P<sub>pk</sub></b>	0,62	0,36	1,03	0,10	7,45
<b>Kärki 2</b>	<b>Keskiarvo</b>	1,06	1,70	0,63	2,69	1,3
	<b>Keskihajonta</b>	0,60	1,36	0,32	0,31	0,060
	<b>P<sub>pk</sub></b>	0,59	0,32	0,65	0,33	7,68
<b>Kärki 3</b>	<b>Keskiarvo</b>	1,88	2,31	1,74	3,59	3,46
	<b>Keskihajonta</b>	0,69	0,52	0,48	0,72	0,57
	<b>P<sub>pk</sub></b>	0,54	0,45	0,87	0,28	0,27

Taulukon 2 tuloksista nähdään, että kärjellä 3 tehtyjen mittausten tulokset poikkeavat muista tuloksista. Vaikka värieron  $\Delta E$  keskihajonta ei merkittävästi poikkea muilla kärjillä tehdyistä mittauksista, keskiarvo on selvästi isompi. Referenssinä käytetyn värimallin (osa 3) tuloksista nähdään, että väriero on kärkeä 3 käyttämällä selkeästi suurempi kuin kahdella muulla kärjellä mitattuna ja kyvykkyyttä kuvaava  $P_{pk}$ -arvo on selvästi pienempi. Kun mittauksia suoritettiin käytännössä, huomattiin valon karkaavan mittakärjen ja

mitattavan osan välistä. Tällöin mittarin valo ei kohdistu suoraan mitattavan osan pintaan ja mittaustulos vääristyy. Näiden johdosta kärki 3 hylättiin, eikä sillä tehdä jatkossa mittauksia.

Osalle 1 parhaaksi mittauskohdaksi osoittautui keskihajontaa ja  $P_{pk}$ -arvoa vertailemalla kohta 3 kärkeä 1 käyttäen. Yrityksessä tuotannonaikaisia värisävymittauksia tehdään myös osa 1:sen vastakappaleelle, missä kyseistä mittauskohtaa ei ole. Vastakappaleet tulevat loppukokoonpanoon vierekkäin ja niiden mittaustuloksia voidaan vertailla luotettavasti vain, jos mittaukset suoritetaan samasta mittauskohdasta. Tämän vuoksi osalle 1 valittiin jatkotutkimuksia varten myös toinen mittauskohta. Keskihajontaa ja  $P_{pk}$ -arvoa vertailemalla valittiin toiseksi tutkittavaksi mittauskohdaksi kohta 1, jota mitataan käyttämällä kärkeä 1. Kohta 2 hylättiin, sillä siitä mitattuna hajonnan arvot olivat selvästi suuremmat kuin muista kohdista mitattuna. Päätökseen hylkäämisestä vaikutti myös se, että kohta 2 ei ole näkyvässä tuotteen loppukokoonpanossa. Liitteessä B on esitetty kyvykkyysraportti osalle 1.

Osassa 2 on vain yksi mahdollinen mittauskohta, joten sille valittiin ainoastaan sopiva mittakärki. Taulukon 2 tuloksista nähdään, että  $P_{pk}$ -arvo on suurempi ja keskihajonta pienempi, kun mittaukset on suoritettu kärkeä 2 käyttäen. Näin ollen kärki 2 valittiin jatkotutkimuksiin. Liitteessä C on esitetty kyvykkyysraportti osalle 2.

Värimallin (osa 3) tuloksista taulukossa 2 nähdään, että kärkien 1 ja 2 toistettavuudella ei näyttäisi olevan merkittävää eroa. Tämän perusteella voidaan päätellä, että värisävymittaus tasaiselta pinnalta voidaan suorittaa toistettavasti kumpaa tahansa kärjistä käyttäen. Jatkotutkimuksia varten valittiin kärki 2, sillä sen  $P_{pk}$ -arvo on hieman suurempi ja keskihajonta hieman pienempi kuin kärjellä 1. Liitteessä D on esitetty kyvykkyysraportti osalle 3.

### 4.3 Värisävymittaukset eri olosuhteissa

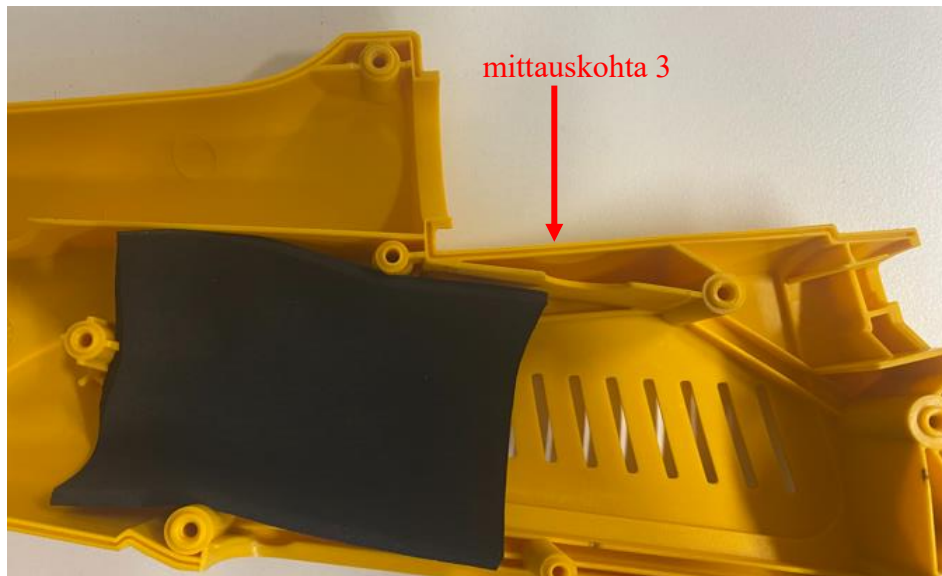
Olosuhdemittaukset suoritettiin yhdelle kappaleelle jokaista osatyyppiä. Tutkittavia osia tässä osiossa oli siis kolme kappaletta. Mittaukset tehtiin tutkimuksen edellisessä vaiheessa valittuja mittakärkiä ja mittauskohtia käyttäen. Mittaajia oli kolme, joista mittaaja A on kokenut mittaaja usean vuoden kokemuksella värisävymittauksesta, mittaajalla B on jonkin verran kokemusta ja mittaajalla C ei ollut lainkaan aiempaa kokemusta.

Kukin mittaaja teki 50 mittausta kullekin osalle määritellystä mittauskohdasta käyttäen kyseiselle mittauskohdalle valittua mittakärkeä. Mitattavien osien ja mittauskohtien järjestys pysyi kaikissa olosuhteissa samana. Mittaukset suoritettiin viitenä eri päivänä

ja jokaisena päivänä tutkittiin eri olosuhteen vaikutusta mittaustuloksiin. Tutkittuja mittaolosuhteita olivat valoisa ympäristö, pimeä ympäristö, mittaus valkoista taustaa vasten, mittaus mustaa taustaa vasten sekä mittaus mustaa pehmustetta vasten. Kuten tutkimuksen edellisessä vaiheessa, osat mitattiin pöytää vasten aseteltuina, jotta osa sekä mittari pysyisivät mahdollisimman vakaana. Ainoana poikkeuksena osa 2 jota mitattiin kädessä pitäen pimeässä ja valoisassa ympäristössä sekä mustaa pehmustetta vasten mitatessa.

Valoisassa ympäristössä, valkoista ja mustaa taustaa sekä mustaa pehmustetta vasten mittaaminen suoritettiin samassa mittaustilassa. Kaikissa näissä mittauksissa oli samanlainen valaistus. Mittaus pimeässä suoritettiin erillisessä tilassa johon ei pääse luonnonvaloa. Tällöin mittari asetettiin osaa vasten, kun valot olivat päällä, mutta mittaus suoritettiin vasta kun valot oli sammutettu.

Mittaus mustaa pehmustetta vasten suoritettiin asettamalla pala pehmustetta mitattavan kohdan taustapuolelle niin, että se oli mahdollisimman tiiviisti osaa vasten. Kuvassa 12 sekä seuraavalla sivulla kuvissa 13 ja 14 on esitetty mustan pehmusteen asettelu kunkin osan mittauksessa.



**Kuva 12:** Pehmusteen käyttö osan 1 mittauksessa

Kuten kuvasta 12 nähdään, mittauskohta 3:n taustapuolella on hyvin vähän tilaa, eli sitä vasten on vaikea asettaa pehmustetta. Näin ollen olosuhdemittaukset mustaa pehmustetta käyttäen päätettiin jättää tekemättä kyseiselle mittauskohdalle.



**Kuva 13:** Pehmusteen käyttö osan 2 mittauksessa

Osaa 2 mitatessa pehmuste käärittiin mahdollisimman tiiviille rullalle osan sisään kuvan 13 osoittamalla tavalla, jotta se asettuisi tiiviisti osan sisäpintaa vasten mittauskohdan kohdalta. Osa 3 asetettiin mitatessa pehmusteen päälle, kuten on esitetty kuvassa 14.



**Kuva 14:** Pehmusteen käyttö osan 3 mittauksessa

Musta pehmuste valittiin yhdeksi olosuhteeksi, sillä reaktiovalamalla valmistettujen osien värisävyä on mitattu mustaa taustaa vasten onnistuneesti. Reaktiovalulla valmistetut kappaleet on valmistettu mustasta valoa läpäisemättömästä muovista. Osat on maalattu, joten mitataan maalipinnan eikä itse osan värisävyä. Ruiskuvaletut kappaleet ovat värjättyjä ja ne päästävät mittarin valoa läpi jonkin verran raaka-aineesta ja käytetystä väriaineesta riippuen. Ruiskuvaletut osat ovat kooltaan huomattavasti pienempiä kuin reaktiovaletut, joten päätettiin kokeilla pienen mustan pehmustepalan käyttöä. Kokeilulla pyrittiin luomaan vastaava mittausjärjestely myös ruiskuvalulla valmistetuille osille.

Valkoista ja mustaa taustaa vasten mitatessa osat asetettiin pöydälle taustaa vasten. Jokainen mittaja käytti mittauksissaan samoja taustoja. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty mitattavien osien asettelu käytettyjen taustojen päälle.



**Kuva 15:** Mitattavat osat valkoista taustaa vasten



**Kuva 16:** Mitattavat osat mustaa taustaa vasten

Taustana käytettiin muovista alustaa jonka toinen puoli on valkoinen ja toinen musta. Alustan valkoinen puoli on aiemmin ollut käytössä läpikuultavien muoviosien värisävyn mittauksessa. Mustaa puolta ei ole aiemmin hyödynnetty mittauksissa.

#### 4.4 Stabiilisuuden mittaaminen ja MSA-tutkimus

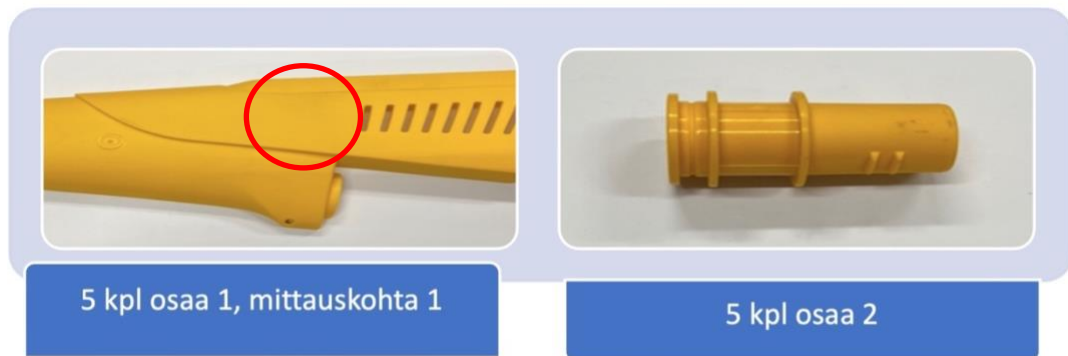
Stabiilisuusmittaukset suoritti yksi mittaaja, joka kahdenkymmenen peräkkäisen työpäivän ajan mittasi värimallin (osa 3) värisävyn viisi kertaa peräkkäin. Mittaukset suoritettiin jokaisella mittauskerralla samassa paikassa ja mittausolosuhteiden vaihtelut pyrittiin minimoimaan. Värimallia (osa 3) säilytetään aina pahvikuoreen pakattuna ja valolta suojattuna. Näin säilytettynä se altistuu mahdollisimman vähän ympäristölleen, mikä saattaisi aiheuttaa kulumaa ja värisävyn muutosta osassa. Erityisesti keltaisissa osissa on havaittu selkeää värisävyn muutosta ajan myötä, kun ne ovat altistuneet jatkuvalla UV-säteilylle.

Tutkimuksen viimeisenä osana suoritettiin MSA-tutkimus. Mittaajina toimivat samat mittaajat A, B ja C kuin olosuhdemittauksissa. Olosuhdemittausten tulosten perusteella päätettiin suorittaa kaksi erillistä MSA-mittausta: ensimmäisessä mittauksessa olosuhteena oli valoisa ympäristö ja toisessa mittauksessa käytettiin samaa mustaa pehmustetta kuin olosuhdemittauksissa. Molemmat MSA-mittaukset suoritettiin samana päivänä peräkkäin. Perustelut kyseisten olosuhteiden valinnalle MSA-tutkimukseen on esitetty luvussa 5.1.

Molemmissa MSA-mittauksissa tutkittavana oli kymmenen osaa. Kaikki tutkittavat osat olivat joko osatyyppiä 1 tai 2. Valoisan olosuhteen MSA-mittauksessa tutkittiin neljää kappaletta osaa 2 sekä kuutta kappaletta osaa 1. Näistä kuudesta kappaleesta osatyyppiä 1, kolmesta osasta tutkittiin mittauskohtaa 1 ja kolmesta osasta mittauskohtaa 3. Mustan pehmustetta käyttäessä sekä osia 1 että osia 2 oli molempia 5 kappaletta. Tällöin osasta 1 mitattiin ainoastaan mittauskohtaa 1, sillä mittauskohtaa 3 vasten ei voida sen geometrian vuoksi asettaa mustaa pehmustetta. Molemmissa MSA-tutkimuksissa mitattavana olleet osat numeroitiin yhdestä kymmeneen. Kuvan 17 ja seuraavan sivun kuvan 18 kaavioissa on esitetty MSA-mittauksissa käytetyt osat.



**Kuva 17:** Valoisan olosuhteen MSA-mittauksessa käytetyt osat



**Kuva 18:** Mustan pehmusteen MSA-mittauksessa käytetyt osat

MSA-mittauksissa kullekin osalle ja mittauskohdalle käytettiin aiemmin määriteltyä mittakärkeä. Kummassakin MSA-mittauksessa Minitab-sovelluksella asetettiin mitattavat osat satunnaiseen järjestykseen. Jokainen mittaaja mittasi kaikki kymmenen osaa vuorollaan sovelluksen määrittämässä järjestyksessä. Mittauskierroksia tehtiin kolme, eli jokainen mittaaja mittasi jokaisen osan yhteensä kolme kertaa yhden MSA-mittauksen aikana.



# 5. MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Luku 5 esittelee tutkimuksessa saadut mittaustulokset sekä niiden perusteella tehdyn analysoinnin. Luvussa 5.1 esitellään tutkimuksen toisen vaiheen tulokset kaikkien tutkittujen olosuhteiden, kappaleiden ja mittaushkohtien osalta. Lisäksi analysoidaan olosuhteiden vaikutusta mittaustuloksiin ja valitaan olosuhteet MSA-tutkimukseen. Luvussa 5.2 analysoidaan stabiilisuusmittauksen tuloksia. Luvussa 5.3 analysoidaan mittaustulosten toistettavuutta ja luotettavuutta olosuhteiden ja mittaajien kannalta ja pohditaan syitä saatujen tulosten takana. Luvussa 5.4 käydään läpi molempien MSA-mittausten tulokset ja niistä tehdyt päätelmät.

## 5.1 Olosuhteiden vaikutus

Ennako-odotus olosuhdemittausten tuloksista oli, että valoisa ympäristö ja valkoinen tausta mahdollistaisivat mahdollisimman luotettavat ja toistettavat mittaustulokset. Tähän mennessä tuotannonaikaiset mittaukset on pääosin suoritettu valoisassa tilassa. Vain muutamia värimittattavia osia on tarkoituksellisesti mitattu valkoista taustaa vasten. Muulloin taustan väri on vaihdellut sen mukaan, missä värisävy mittaukset on suoritettu. Pimeän ympäristön odotettiin parantavan mittauksen luotettavuutta, sillä silloin ympäristöstä tuleva valo ei vaikuttaisi mittaustulokseen. Mittaajien välillä odotettiin olevan selkeää vaihtelua.

Kun tehtiin lopulliset päätökset olosuhteista, jotka etenivät jatkotutkimuksiin MSA-mittauksen muodossa, otettiin huomioon myös mittaajien kokemukset erilaisissa olosuhteissa mittaamisesta. Tämän lisäksi otettiin huomioon mahdolliset käytännön ongelmat, joita saattaisi tulla eteen, kun valittua mittaushmenetelmää alettaisiin käyttää tuotannonaikaisissa mittauksissa.

Tutkittuja olosuhteita analysoitiin samoja tilastollisia arvoja käyttäen, kuin mittakärkiä ja mittaushkohtia tutkittaessa tehtiin. Taulukossa 3 on esitetty olosuhdemittausten tulokset kullekin osatyypille sekä valituille mittaushkohdille kussakin olosuhteessa. Värieron  $\Delta E$  keskiarvot ja keskihajonnat sekä mittaushprosessin kyvykkyydet on taulukoitu.

**Taulukko 3: olosuhdemittausten tulokset**

		valoisa	pimeä	valkoinen tausta	musta tausta	musta pehmuste
osa 1, kohta 1	Keskiarvo	0,97	1,59	1,52	1,75	1,07
	Keskihajonta	0,54	1,35	0,35	0,34	0,06
	$P_{pk}$	0,60	0,35	1,43	1,23	6,17
osa 1, kohta 3	Keskiarvo	0,77	1,10	0,87	0,92	-
	Keskihajonta	0,21	0,73	0,17	0,18	-
	$P_{pk}$	1,24	0,50	1,67	1,68	-
osa 2	Keskiarvo	2,37	2,88	2,60	2,91	2,80
	Keskihajonta	0,67	1,69	0,91	0,94	1,18
	$P_{pk}$	0,31	0,02	0,15	0,03	0,06
osa 3	Keskiarvo	1,42	1,38	2,02	1,79	1,47
	Keskihajonta	0,08	0,06	0,11	0,06	0,06
	$P_{pk}$	6,09	7,39	3,03	7,29	8,10

Taulukossa 3 esitetyt kyvykkyyden  $P_{pk}$  arvoja vertailemalla huomataan, että olosuhteilla on selvästi vaikutusta prosessin kyvykkyyteen kaikilla tutkittavana olleilla osilla ja mittauskohdilla. Osaa 2 on kaarevan muotonsa ja pienen kokonsa vuoksi vaikea mitata. Olosuhdemittauksen tulokset osoittavat, että ainakaan mikään tutkituista olosuhteista ei juurikaan vaikuta mittausprosessin kyvykkyyteen kyseiselle osalle. Osalle 2 mittaus tulosten hajonta on pienin valoisassa ympäristössä ja tällöin myös kyvykkyyden arvo on suurin. Tultiin lopputulokseen, että olosuhteiden vaikutusta tutkimalla ei kyseiselle osalle löytynyt optimaalista mittausolosuhdetta. Tästä voidaan päätellä, että osan 2 värisävyä ei välttämättä saada missään olosuhteessa mitattua toistettavasti ja luotettavasti käytössä olevalla spektrofotometrillä. Mittakärkeä ei ole mahdollista asettaa osaa vasten niin, että kärjen aukko peittyisi kokonaan. Tällöin mittarin käyttämä valo pääsee karkaamaan eikä kohdistu kokonaan osan 2 pintaan. Osan 2 kyvykkyyseraportti eri olosuhteille on nähtävissä liitteessä E.

Osan 1 tuloksista nähdään, että käyttämällä mustaa pehmustetta saadaan todella pieni hajonta mittaus tuloksille, kun mitataan mittauskohtaa 1. Tämä mittausmenetelmä on

selkeästi kyvykkäin kyseiselle mittauskohdalle. Pimeässä ympäristössä mitatessa hajonta on melko suuri.

Tulokset valoisassa ympäristössä eivät vastanneet hypoteesia. Osan 1 molemmille mittauskohdille mittausprosessin kyvykkyys valoisassa ympäristössä on matalampi kuin mustaa tai valkoista taustaa vasten mitatessa. Tämän pääteltiin johtuvan mahdollisesti siitä, että yksivärinen tausta luo stabiilimman mittausolosuhteen kuin esimerkiksi kirjava pöydän kansi mitattavan osan taustalla. Mustaa ja valkoista taustaa vasten suoritettavat olosuhdemittaukset suoritettiin valoisassa tilassa, joten ainoa ero verrattuna valoisassa ympäristössä suoritettuihin mittauksiin on taustan käyttö. Osan 1 mittauskohdan 1 kyvykkyysraportti eri olosuhteille on nähtävissä liitteessä F ja mittauskohdan 3 kyvykkyysraportti liitteessä G.

Värimallin (osa 3) mittaustulosten hajonta on pieni kaikissa tutkituissa olosuhteissa. Kyseinen kappale on geometrialtaan yksinkertainen ja sen pinta on tasainen, joten mittakärjen asettaminen osaa vasten ja mittarin pitäminen vakaana on helpompaa kuin muita tutkittuja osia mitatessa. Tästä pääteltiin, että osien kaareva muoto on todella merkittävä virhelähde mittauksissa. Osan 3 kyvykkyysraportti eri olosuhteille on esitetty liitteessä H.

Olosuhdemittausten tulosten perusteella tultiin siihen tulokseen, että pimeässä mittaaminen on liian epävarma keino tuotannon aikaisten mittausten suorittamiseen. Kyvykkyuden  $P_{pk}$  arvot ovat tällöin osaa 3 lukuun ottamatta heikot muihin olosuhteisiin verrattuna. Jokainen tutkimukseen osallistunut mittaaja oli yhtä mieltä siitä, että pimeässä mittaaminen oli haastavaa. Pimeässä mitatessa on vaikea varmistaa, että mittarin mittakärki pysyy vakaasti osaa vasten koko mittauksen ajan. Pimeässä mittaaminen vaatisi aina kaksi työntekijää, sillä toisen täytyisi huolehtia valojen sammutuksesta. Käytännön järjestelyjen kannalta tämä ei olisi edullista ja tarkoituksena onkin määrittää mittausmenetelmä johon tarvitaan vain yksi työntekijä kerrallaan suorittamaan mittauksia.

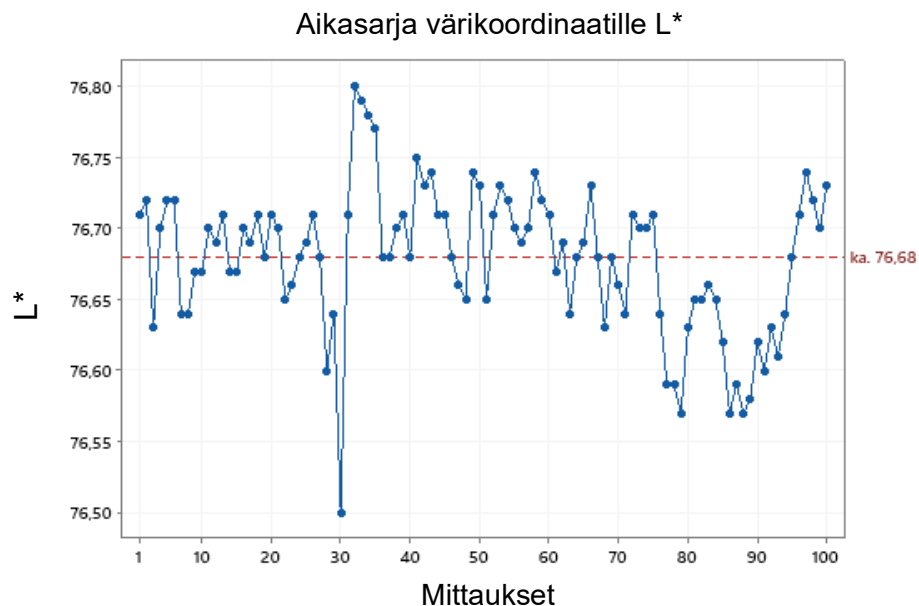
Myös mustan taustan käytön epäiltiin aiheuttavan virhettä mittauksessa. On mahdollista, että musta ja valo läpäisemätön tausta vääristää mittaustulosta saaden osan vaikuttamaan todellista väriään tummemmalta. Tällöin tulos ei ole luotettava, vaikka se hajonnan puolesta olisikin toistettava. Samoihin päätelmiin tultiin mustan pehmusteen käytöstä. Siitä huolimatta musta pehmuste päätettiin valita olosuhteeksi MSA-tutkimukseen, sillä sitä käyttämällä olosuhdemittauksissa päästiin todella hyviin tuloksiin kyvykkyuden ja hajonnan osalta. Kyvykkyuden arvot olivat yleisesti ottaen hyviä mittauksille, joissa käytettiin valkoista taustaa. Ennako-odotuksista poiketen valkoinen

tausta oli heikoin olosuhde värimallille, kun verrataan kyvykkyyden arvoja ja hajonnan suuruutta. Valkoista taustaa ei valittu olosuhteeksi MSA-tutkimukseen, mutta on mahdollista, että uuteen mittahuoneeseen tulee värimittauspisteelle käytettäväksi valkoinen alusta, sillä sen käyttö on välttämätöntä läpinäkyvien osien värisävyä mitatessa.

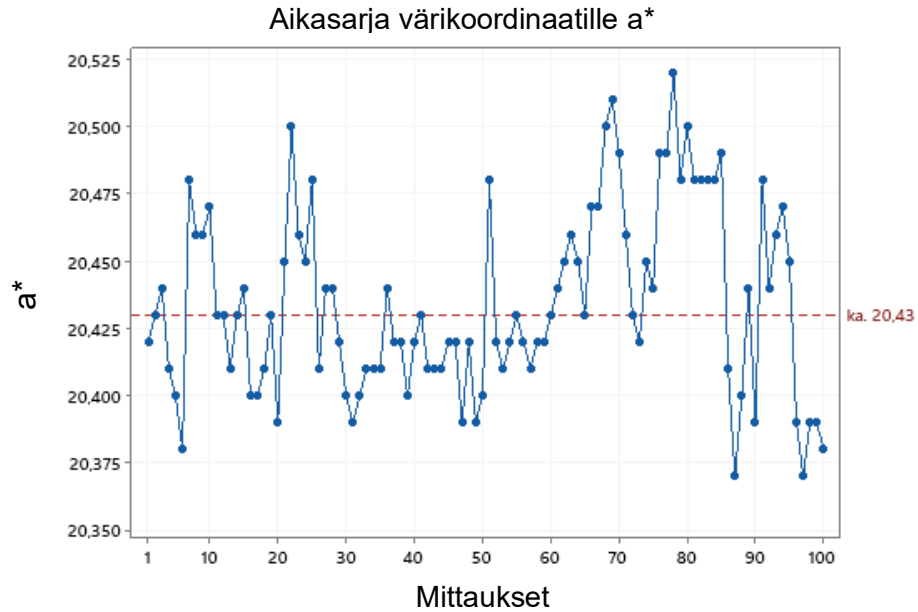
Vaikka valoisa ympäristö ei olosuhdemittausten perusteella vaikuttaisi olevan paras vaihtoehto tutkittaville osille, valittiin se kuitenkin olosuhteeksi MSA-tutkimukseen. Valinta tehtiin, sillä mittaukset on tähän mennessä suoritettu pääosin valoisassa ja se on käytännön järjestelyjen kannalta kaikista yksinkertaisin olosuhde tuotannon aikaisten mittausten suorittamista ajatellen. Mitä enemmän olosuhdemuuttujia mittaamiseen liittyy, sitä vaikeampaa siitä mittaajille tulee ja sitä suuremmalla todennäköisyydellä jotain unohtuu jolloin eri mittaajien tekemät mittaukset eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Käytettävyyden kannalta mittausmenetelmän tulee olla mahdollisimman yksinkertainen.

## 5.2 Stabiilisuus

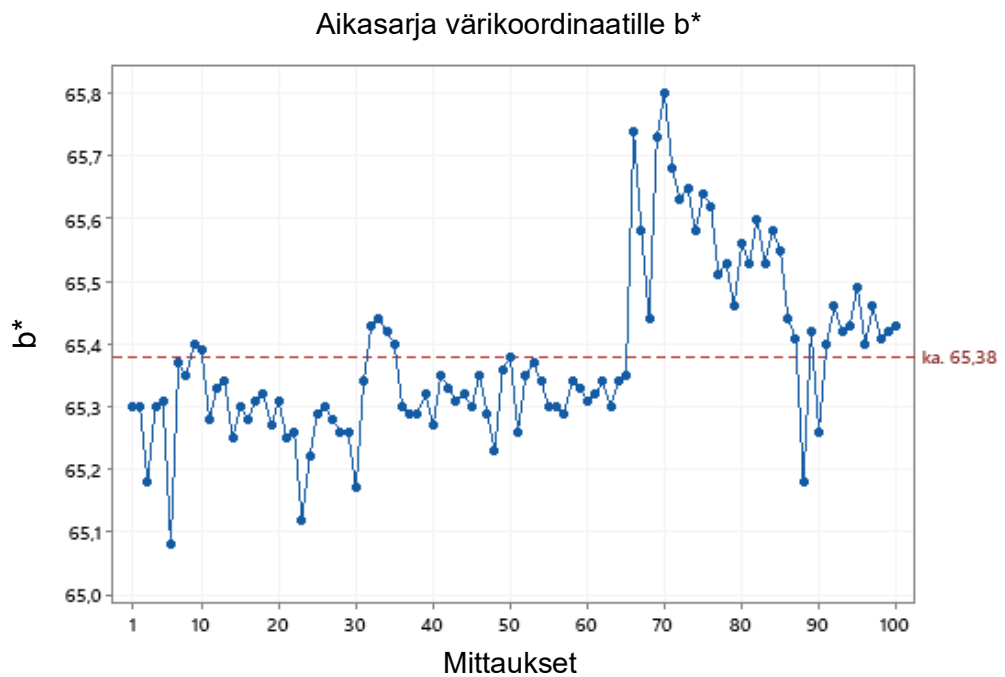
Stabiilisuusmittauksen tulokset on esitetty Minitabin Variable Charts for Individuals -toimintoa käyttäen. Kuvassa 19 ja seuraavan sivun kuvissa 20 ja 21 on esitetty stabiilisuusmittauksen tulokset aikasarjoina kaikille värikoordinaateille. Mittaustulosten keskiarvo on merkitty kuviin punaisella katkoviivalla. Pystyakselilla on esitetty koordinaatin arvo ja vaaka-akselilla mittaukset aikajärjestyksessä.



**Kuva 19:** Stabiilisuusmittauksen tulokset värikoordinaatille L\*

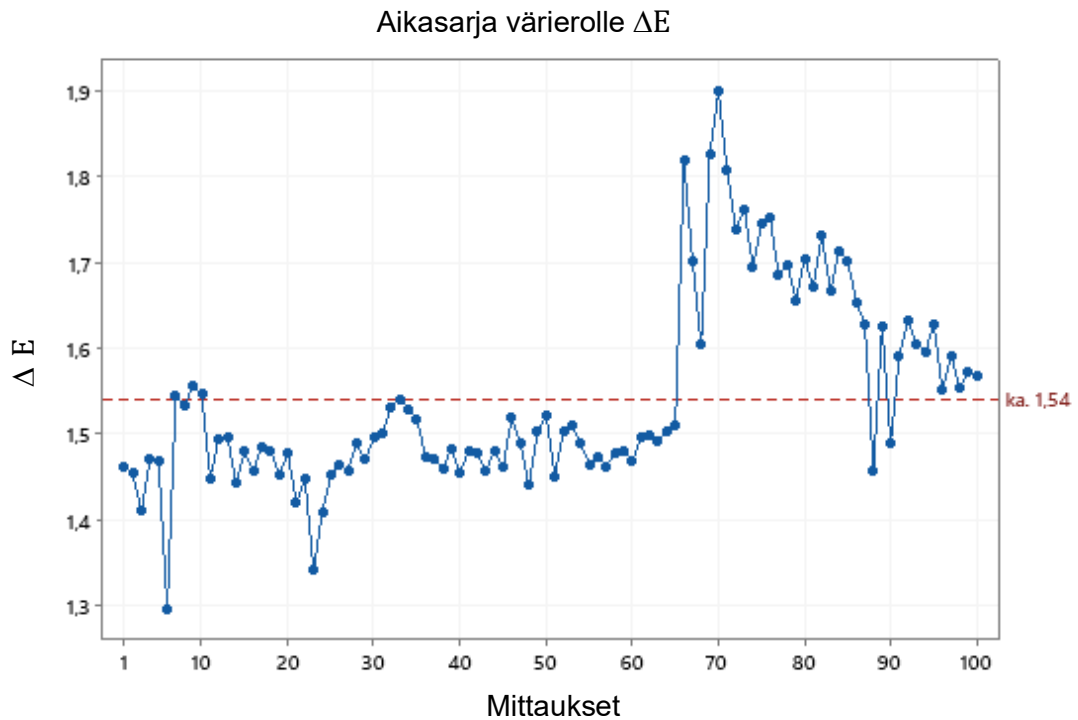


**Kuva 20:** Stabiilisuustittauksen tulokset värikoordinaatille  $a^*$



**Kuva 21:** Stabiilisuustittauksen tulokset värikoordinaatille  $b^*$

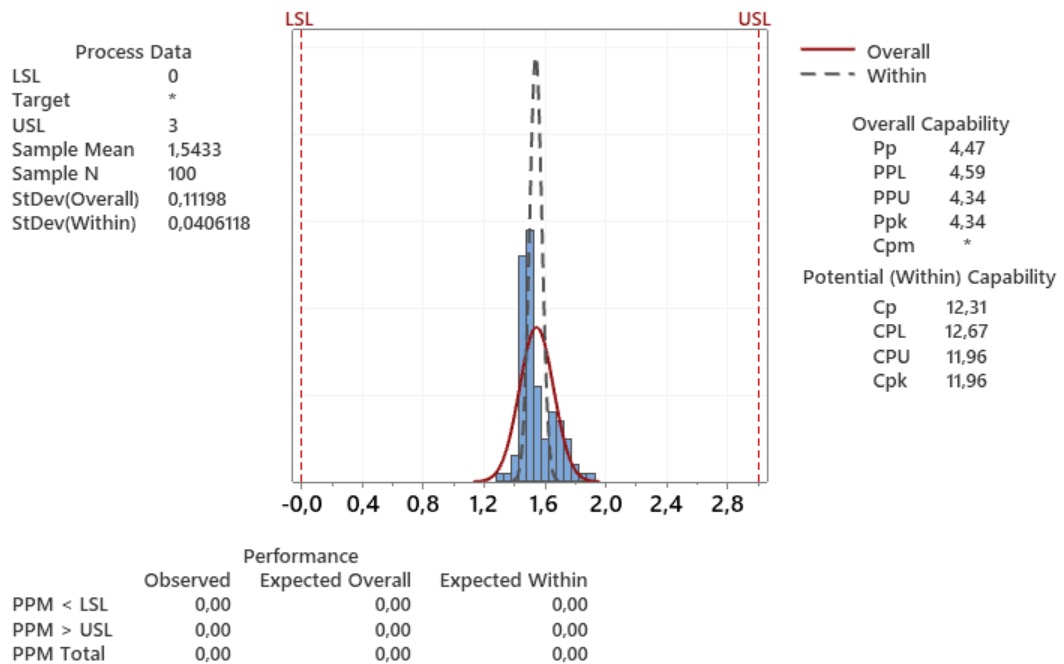
Kuvaajien perusteella kaikkien värikoordinaattiarvojen tulokset ovat melko stabiileja. Kun ottaa huomioon, että asiakkaan määrittämä toleranssi kullekin koordinaatille target-väriin nähden on  $\pm 3,00$ ; mittaustulosten vaihtelu on todella pientä. Vain yksittäiset mittaustulokset poikkeavat selkeästi keskiarvosta. Seuraavalla sivulla kuvassa 22 on esitetty stabiilisuustittauksen tulokset värierolle  $\Delta E$ . Pystyakselilla on esitetty väriero  $\Delta E$  ja vaaka-akselilla mittaukset aikajärjestyksessä.



**Kuva 22:** Stabiilisuustutkimuksen tulokset värierolle  $\Delta E$

Kuvia 21 ja 22 vertailemalla huomataan, että värikoordinaatin  $b^*$  ja värieron  $\Delta E$  stabiilisuuskäyriä muistuttavat muodoltaan hyvin paljon toisiaan. Stabiilisuustutkimusten loppupuolella muutaman päivän ajalta mitatut tulokset poikkeavat selvästi keskiarvosta. Näyttäisi kuitenkin siltä, että mittauksien tulokset olisivat palautumassa takaisin kohti keskiarvoa. Tästä ei kuitenkaan voida olla varmoja, sillä stabiilisuustutkimukset lopetettiin 20 päivän jälkeen, joten ei tiedetä miten tulosten kehitys olisi jatkunut. Käyrien yhtenevien muotojen avulla pääteltiin, että värieron  $\Delta E$  käyriä aiheuttaa nimenomaan värikoordinaatti  $b^*$ :n tulosten vaihtelu. Tämä saattaa johtua esimerkiksi vallitsevien sääolosuhteiden aiheuttamasta vaihtelusta valoisuudessa, sillä stabiilisuustutkimukset suoritettiin tilassa johon pääsee luonnonvaloa. Värierolle  $\Delta E$  tehtiin myös kyvykkyyserä stabiilisuustutkimuksen tuloksista. Käyriä on esitetty seuraavalla sivulla kuvassa 23.

### Kyvykkyyseraportti värierolle $\Delta E$



The actual process spread is represented by 6 sigma.

**Kuva 23:** Kyvykkyyseraportti värierolle  $\Delta E$

Mittaustulosten jakauma on hyvin kapea ja keskihajonta pieni ( $\mu = 0,11$ ). Lisäksi mittausprosessi on varsin kyvykäs. Hypoteesi stabiilisuusmittauksista oli, että värieron sekä kaikkien värien värikoordinaattien arvot olisivat melko stabiileja millä tahansa aikavälillä. Tulokset vastasivat odotuksia muuten, paitsi muutaman päivän ajalta mittausten loppupuolelta kuten nähdään kuvista 21 ja 22.

### 5.3 Toistettavuus ja luotettavuus

Mittaustulosten toistettavuutta analysoitiin vertailemalla eroja eri mittaajien välillä. Yrityksessä tuotannonaikaisia mittauksia suorittaa useampi eri henkilö, joten valitun mittausmenetelmän tulisi olla mahdollisimman toistettava, jotta eri aikoina ja eri mittaajien toimesta suoritettavat mittaukset olisivat keskenään vertailukelpoisia. Osa- ja mittauskohtaiset hajonnan arvot jokaiselle mittaajalle on eritelty seuraavalla sivulla taulukossa 4.

**Taulukko 4: Eri mittaajien mittaustulosten hajonnat**

		<b>valoisa</b>	<b>pimeä</b>	<b>musta pehmuste</b>	<b>valkoinen tausta</b>	<b>musta tausta</b>
<b>mittaaja A</b>	<b>osa 1, kohta 1</b>	0,51	0,61	0,05	0,21	0,21
	<b>osa 1, kohta 3</b>	0,18	0,90	-	0,26	0,12
	<b>osa 2</b>	0,87	1,62	0,88	0,53	0,55
	<b>osa 3</b>	0,03	0,06	0,04	0,07	0,05
<b>mittaaja B</b>	<b>osa 1, kohta 1</b>	0,57	1,55	0,07	0,37	0,19
	<b>osa 1, kohta 3</b>	0,13	0,32	-	0,15	0,16
	<b>osa 2</b>	0,33	0,49	0,22	0,92	0,95
	<b>osa 3</b>	0,03	0,05	0,03	0,09	0,06
<b>mittaaja C</b>	<b>osa 1, kohta 1</b>	0,18	0,17	0,04	0,25	0,32
	<b>osa 1, kohta 3</b>	0,21	0,74	-	0,04	0,03
	<b>osa 2</b>	0,64	2,20	1,51	1,07	1,07
	<b>osa 3</b>	0,07	0,07	0,09	0,09	0,06

Taulukon 4 tuloksista nähdään, että mittaajien välillä on selkeää hajontaa. Jokaisella mittaajalla hajonta on olosuhteista riippumatta todella pieni värimallia (osa 3) mitatessa. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että tasaisen muotonsa vuoksi mittari on helppo pitää vakaana sitä vasten. Olosuhdemittausten perusteella vaikuttaisi siis siltä, että värimallia saadaan mitattua kaikista toistettavimmin. Osien 1 ja 2 tuloksille ei taulukon 4 hajontojen perusteella näytä olevan samankaltaista yhteneväisyyttä. Hajonnan suuruudet vaihtelevat niin mittaajien, mittaushkohtien kuin olosuhteidenkin välillä. Tuloksista ei ole selvästi nähtävissä, että esimerkiksi tietyssä olosuhteessa mitatessa tulosten hajonta olisi pienempi kuin toisissa.



Mittauksia suorittaessa tutkittiin myös kalibroinnin vaikutusta mittaustuloksiin. Kun mittaria ei kalibroitu, mittaustulosten  $L^*$ -koordinaatti oli selvästi pienempi kuin kalibroinnin jälkeen. Muiden värikoordinaattien arvoissa ei ollut selkeää eroa. CIELAB-väriavaruudessa  $L^*$ -akseli on värisävy mustasta valkoiseen. Spektrofotometriä kalibroidessa sen suorittama toiminto on nimeltään White Calibration, jossa mittari kalibroi itsensä käyttäen referenssiarvona kalibroitikärjen valkoista mittaushohtoa. Kalibroitikärki on esitetty kuvassa 24.



**Kuva 24:** Värisävymittarin kalibroitikärki (White calibration)

Mittarin kalibroimatta jättämisen pääteltiin vaikuttavan ainoastaan  $L^*$ -koordinaatin arvoon (eli väriin mustan ja valkoisen välillä), koska kalibrointi tehtiin käyttämällä referenssinä valkoista väriä. Näin ollen saatiin selville, että kalibroinnilla on vaikutusta mittaustulokseen ja sen luotettavuuteen. Jatkotoimenpiteenä kaikki spektrofotometrin käyttäjiä ohjeistettiin kalibroimaan mittari aina ennen tuotannonaikaisten mittausten suorittamista.

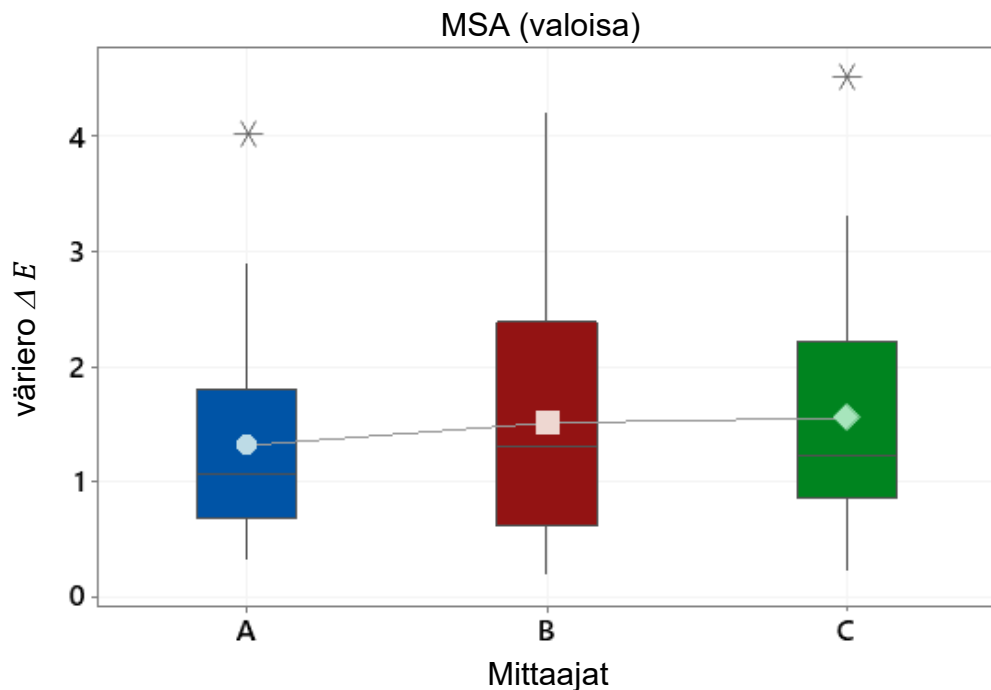
#### **5.4 MSA-mittausten tulokset**

MSA-mittausten tuloksia analysointiin Minitab-sovelluksen Gage R&R crossed -toimintoa käyttäen. Valoisassa suoritettujen MSA-mittauksien tulokset ovat kokonaisuudessaan nähtävillä liitteessä I ja mustaa pehmustetta vasten suoritettujen MSA-mittauksien tulokset liitteessä J. Analysoinnin kannalta keskeisimmät tilastolliset arvot on esitetty seuraavalla sivulla taulukossa 5.

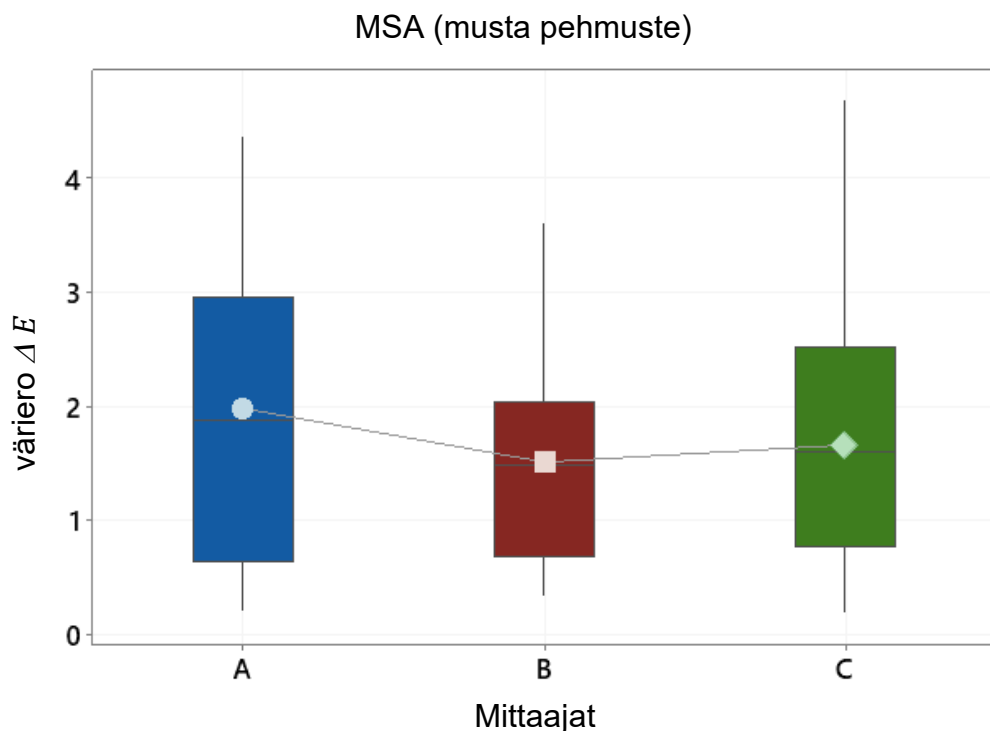
**Taulukko 5: MSA-mittausten tulokset**

	MSA (valoisa)	MSA (musta pehmuste)
<b>Mittaussysteemistä johtuva vaihtelu suhteessa koko prosessin vaihteluun</b>	51,4 %	48,7 %
<b>Mittaustulosten keskihajonta</b>	0,97	1,12

Molempien MSA-tutkimusten tuloksista selvisi, että kyseisissä olosuhteissa merkittävä osa mittaustulosten vaihtelusta aiheutuu itse mittaussysteemistä ja sen epävarmuudesta. Myös hajonnan arvot ovat molemmissa olosuhteissa samaa suuruusluokkaa. Taulukon 5 numeeristen arvojen perusteella vaikuttaa siltä, että tutkittujen olosuhteiden välillä ei mittaustulosten kannalta ole merkittävää eroa. Kuvassa 25 on esitetty havainnollistus mittaajien välisestä erosta stabiilisuustutkimuksessa, joka suoritettiin valoisassa mittaolosuhteessa.

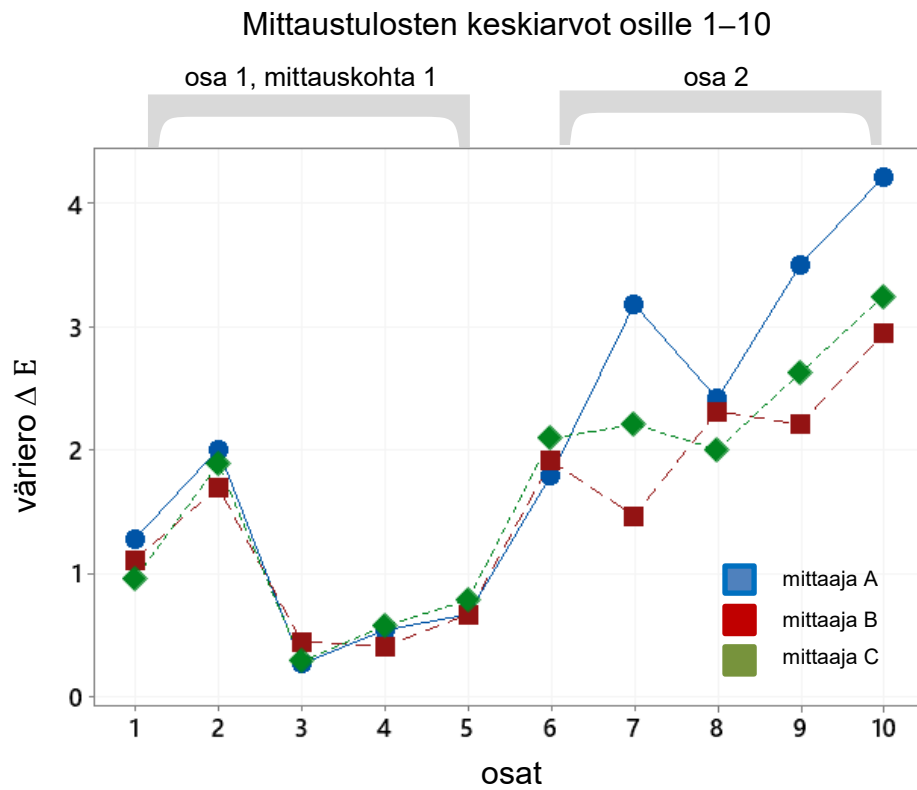
**Kuva 25: Mittaajien ero (valoisa)**

Kuvassa 25 vaaka-akselille on asetettu mittaajat ja pystyakselille värieron  $\Delta E$  arvot. Kunkin mittaajan kohdalla värillisen palkin alueelle sijoittuu 50 % kyseisen mittaajan saamista mittaustuloksista. Loput tuloksista asettuvat pystyviivalle. Tähdet kuvaavat muista tuloksista selkeästi poikkeavia yksittäisiä mittaustuloksia. Värillisen palkin päällä oleva kuvio on asetunut palkissa siihen kohtaan kuvaajan pystyakselilla, mihin kyseisen mittaajan mittaustulosten mediaani asettuu. Palkin päällä oleva poikkiviiva kuvaa kyseisen mittaajan mittaustulosten keskiarvon kohtaa. Kuvassa 26 on esitetty vastaava kuvaaja stabiilisuustutkimuksen tuloksista, kun käytettiin mustaa pehmustetta.

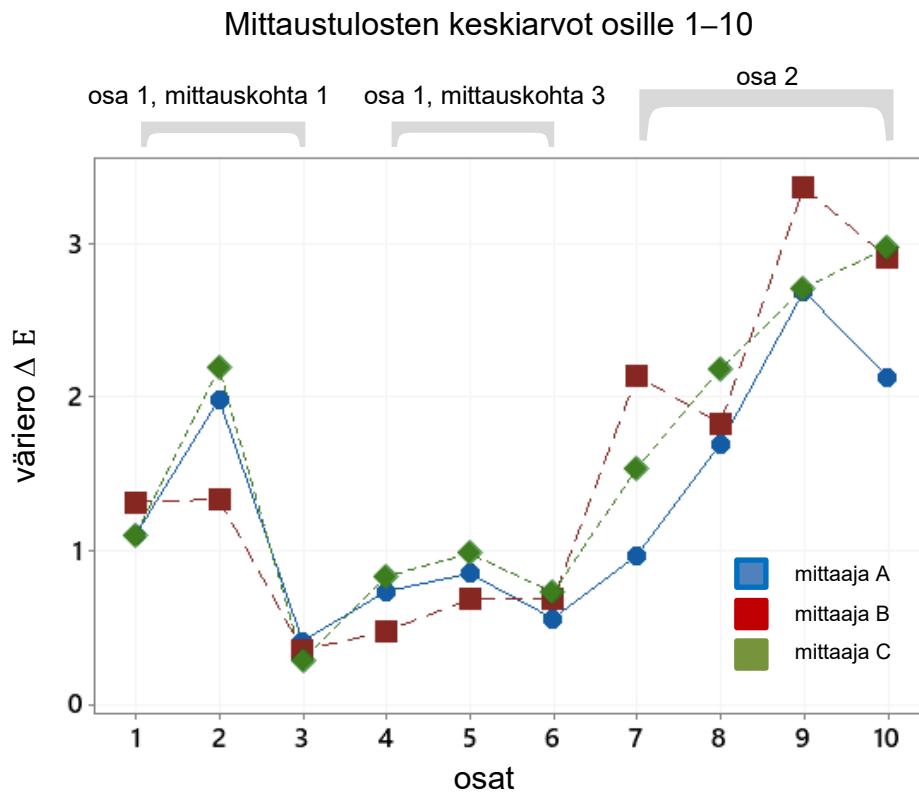


**Kuva 26:** Mittaajien ero (musta pehmuste)

Kuvia 25 ja 26 analysoimalla tullaan samaan lopputulokseen kuin taulukon 4 arvoja vertailemalla, eli mittaajien välillä on eroa. Mittaajasta ja olosuhteesta riippumatta mittaustulosten keskiarvot kuitenkin asettuvat lähes samoille kohdille ja pysyvät toleranssirajojen sisällä ( $0 \leq \Delta E \leq 3$ ). Seuraavalla sivulla kuvissa 27 ja 28 on esitetty mittaustulosten keskiarvojen hajontaa kullekin MSA-tutkimuksessa mitatulle osalle.



Kuva 27: Mittaustulosten keskiarvot osakohtaisesti (musta pehmuste)



Kuva 28: Mittaustulosten keskiarvot osakohtaisesti (valoisa)

Edellisen sivun kuvissa 27 ja 28 pystyakselilla on väriero  $\Delta E$  ja vaaka-akselilla mitatut osat numerojärjestyksessä. Kuvassa 27 vaaka-akselilla numerot 1–5 ovat osatyyppiä 1 ja ne kaikki mitattiin kohdasta 1, sillä kohtaan 3 on vaikea asettaa pehmustetta. Numerot 6–10 kuvaavat osatyyppiä 2. Kuvassa 28 vaaka-akselilla numerot 1–6 ovat osatyyppiä 1 ja osat 7–10 osatyyppiä 2. Numeroiduista osista 1–3 mitattiin mittauskohtaa 1 ja osista 4–6 mittauskohtaa 3. Symbolin kohta pystyakselilla kuvaa kyseisen mittajaan mittaamien tulosten keskiarvoa kyseiselle osalle.

Kuvista 27 ja 28 nähdään, että mittaajien välillä ei ole merkittävää eroa kummassakaan olosuhteessa, kun mitataan osaa 1. Sen sijaan osaa 2 mitatessa molemmissa olosuhteissa on havaittavissa selkeää eroa eri mittaajien mittaustulosten välillä. Tästä pääteltiin, että olosuhteesta riippumatta kyseistä mittaria käytettäessä ei ole mahdollista saada aikaan toistettavia mittaustuloksia, kun mittaukset tehdään osalle 2. Tämän voidaan olettaa johtuvan osan geometriasta. Osa on kooltaan hyvin pieni ja sen pinta on kaareva, joten sitä on vaikeaa pitää vakaasti pöytää vasten. Tämän vuoksi osaa mitataan niin, että sitä pidetään kädessä. Tämä saattaa aiheuttaa eroja mittaajien välille, sillä jokainen pitää osaa itselleen luontevimmassa asennossa. Myös esimerkiksi käsien väsyminen ja väsyminen ovat yksilöllisiä ja aiheuttavat virhettä mittaustuloksissa. Kuten jo aiemmin on tullut ilmi, osaa 2 mitatessa mittakärkeä ei saa asetettua tiiviisti ja vakaasti mitattavan osan pintaa vasten.

## 6. YHTEENVETO

Tutkimuksen tulokset olivat osin ennalta-arvattavissa, mutta myös paljon uutta selvisi. Aiemmin oli käytännössä huomattu, että eri mittaajien välillä on merkittävää eroa. Tutkimuksen avulla selvisi, että mittaajien välisissä eroissa ei kuitenkaan ilmene systemaattisuutta. Ei siis voida olettaa, että kokenut mittaaja olisi tarkempi, tai hänen mittaustuloksillaan olisi pienempi hajonta kuin mittaajalla, jolla on vähemmän tai ei lainkaan kokemusta värisävyn mittaamisesta. Kuvat 27 ja 28 havainnollistavat hyvin mittaajien välistä eroa eri osatyypeille. Geometrialtaan pienten ja kaarevien osien värisävymittauksen tuloksissa on huomattavaa vaihtelua eri mittaajien välillä verrattuna osiin, joiden mittaush kohta on tasaisempi. Tämän perusteella tultiin siihen tulokseen, että tutkitut mittaush menetelmät eivät ole toistettavia geometrialtaan pienille ja kaareville osille. Mittaustuloksille saatiin pienin hajonta kärkeä 2 käyttäen, joten sitä tullaan jatkossa käyttämään kaarevien osien värisävyn mittaamisessa.

Tasaisista mittaush kohdista mitattujen tulosten hajonta oli yleisesti ottaen todella pieni. Tasaisia mittaush kohtia tässä tutkimuksessa olivat osa 3 sekä osan 1 mittaush kohta 3. Tulokset vastasivat odotuksia sekä muita aiheeseen liittyviä tutkimusaineistoja. Esimerkiksi International Dentistry SA lehdessä julkaistu artikkeli ”Repeatability of colour reading with a clinical and laboratory spectrophotometer” raportoi tulokset tutkimuksesta jossa mitattiin värisävyyä tasaiselta pinnalta [12]. Molemmilla mittareilla mitattuna värieron  $\Delta E$  hajonnat ovat todella pieniä kaikille tutkituille kappaleille.

Tutkimustulosten perusteella luotiin ohjeistus tuotannaikaisiin mittauksiin. Ohjeistus tässä työssä tutkittujen osien osalta on nähtävissä liitteessä A. Kaikista muista yrityksen valmistamista värimittavista osista määritettiin yksi mittaush kohta, jota jokaisen mittaajan tulee jatkossa käyttää. Mittakärki valittiin kullekin osalle sen perusteella, kumpi tuntui asettuvan valittuun mittaush kohtaan mahdollisimman vakaasti. Näin ollen jatkossa jokainen mittaaja tulee mittaamaan osia samalla tavalla. Tällä pyritään jatkossa minimoimaan mittaajien välinen ero, vaikka sitä ei pystytä kokonaan poistamaan edes stabiileilla olosuhteilla. Tuotannon sujuvuuden kannalta on välttämätöntä, että osaavia mittaajia on useita jokaisessa vuorossa. Tämän vuoksi ei ole mahdollista, että olisi vain muutama mittaaja, vaikka se vähentäisikin eri mittaajista johtuvaa mittaustulosten vaihtelua. Tultiin siis siihen tulokseen, että toistettavan ja uusittavan mittaush menetelmän kehittäminen geometrialtaan pienille ja kaareville osille on mahdotonta niin kauan, kuin mittauksia suorittaa useampi mittaaja.

Koska asiakkaan määrittämän värimallin värisävy tiedetään, mittauksen luotettavuutta analysoitiin sen perusteella, millä mittausjärjestelyillä värimallista mitattuna värieron  $\Delta E$  on mahdollisimman pieni. Tultiin siihen tulokseen, että luotettavimmat mittausolosuhteet ovat valoisa ja pimeä. Tämän lopputuloksen, sekä käytännön järjestelyjen yksinkertaistamisen vuoksi mittaukset tullaan jatkossa suorittamaan valoisassa mittaustilassa. Myös mustaa pehmustetta käyttämällä päästiin lähes samoihin tuloksiin. Värieron arvon lisäksi luotettavuutta analysoitiin käytännön kokemusten perusteella. Tutkittavien osien 1 ja 2 mittauskohdat ovat kaarevia, joten niiden mittaaminen on vaikeaa. Mitatessa huomattiin, että kaarevasta kohdasta mitatessa mittarin valo pääsee karkaamaan mitattavan pinnan ja mittakärjen välistä. Tällöin spektrofotometrin valo ei kohdistu täysin mitattavaan pintaan, eli mittaustulos vääristyy. Koska mittakärjen tiivistäminen tiivistemassalla tai kuvan 11 tiivisterenkailla ei onnistunut, pääteltiin, että käytössä oleva mittari ei sovellu geometrialtaan pienten ja kaarevien osien mittaamiseen. Täten kyseisellä mittarilla ei ole mahdollista saada täysin luotettavia tuloksia tutkittavista osista. Mittaamista jatketaan kuitenkin tulevaisuudessa samaa mittaria käyttäen, sillä tulokset ovat suuntaa antavia ja niille on mahdollista suorittaa myös silmämääräinen värisävyn vertailu samaan tuoteperheeseen kuuluvien osien kanssa.

Stabiilisuusmittausten perusteella havaittiin mittaustulosten olevan suhteellisen stabiileja lyhyellä aikavälillä tutkittuna, kun mittaukset suoritti sama mittaja mahdollisimman muuttumattomissa olosuhteissa. Värikoordinaattien  $L^*$ ,  $a^*$  ja  $b^*$  sekä värieron  $\Delta E$  arvot pysyvät selkeästi toleranssirajojen sisällä.

Koska huomattiin, että eri olosuhteilla on vaikutusta mittaustulosten arvoihin sekä hajontaan, värimittaukselle rakennetaan mittauspiste uuteen mittahuoneeseen. Mittauspisteelle tulee kirkas valaistus ja vaalea tasavärinen tausta. Tutkimuksessa huomattiin, että mittarin valo läpäisee mitattavan osan. Tällöin myös taustan väri ja kirjavuus vaikuttaa mittaustulokseen. Mittahuoneeseen ei pääse luonnonvaloa, joten valoisuuden kannalta mittausolosuhteet ovat stabiilit kaikkina vuorokauden- ja vuodenaikoina. Mittauspisteelle valittiin nämä olosuhteet olosuhdemittausten tulosten perusteella sekä huomioimalla käytännön järjestelyt. Koska mittaustilaa käytetään värisävymittauksen lisäksi myös muihin mittauksiin, olisi vaikeaa suorittaa mittaukset pimeässä. Mittausprosessin tulisi olla mittajan kannalta mahdollisimman yksinkertainen: mitä enemmän eroja eri osien mittausolosuhteissa ja -menetelmässä on, sitä todennäköisemmin tapahtuisi virheitä ja unohduksia. Tällöin mittaustulokset eivät olisi täysin vertailukelpoisia keskenään. Mittausprosessin yksinkertaistamiseksi päätettiin siis luopua mustan pehmusteen käytöstä. Tämän lisäksi epäiltiin, että se

vääristää mittaustulosta samaan tapaan kuin musta tausta, kun mittarin valo pääsee osan läpi, jolloin osan väri vaikuttaa todellista sävyään tummemmalta. Tummaa taustaa ja mustaa pehmustetta ei siis tulla jatkossa käyttämään, sillä niitä käyttäessä mittaustulosta ei voida pitää luotettavana. Jatkoa varten annettiin ehdotus, että kokeiltaisiin myös valkoisen pehmusteen vaikutusta mittaustuloksiin. Valkoista pehmustetta voitaisiin mahdollisesti hyödyntää sellaisten osien värisävyn mittauksessa, joiden mittauskohta on vaikea asettaa pöytätasolla olevaa vaaleaa mittaustaustaa vasten.



# LÄHTEET

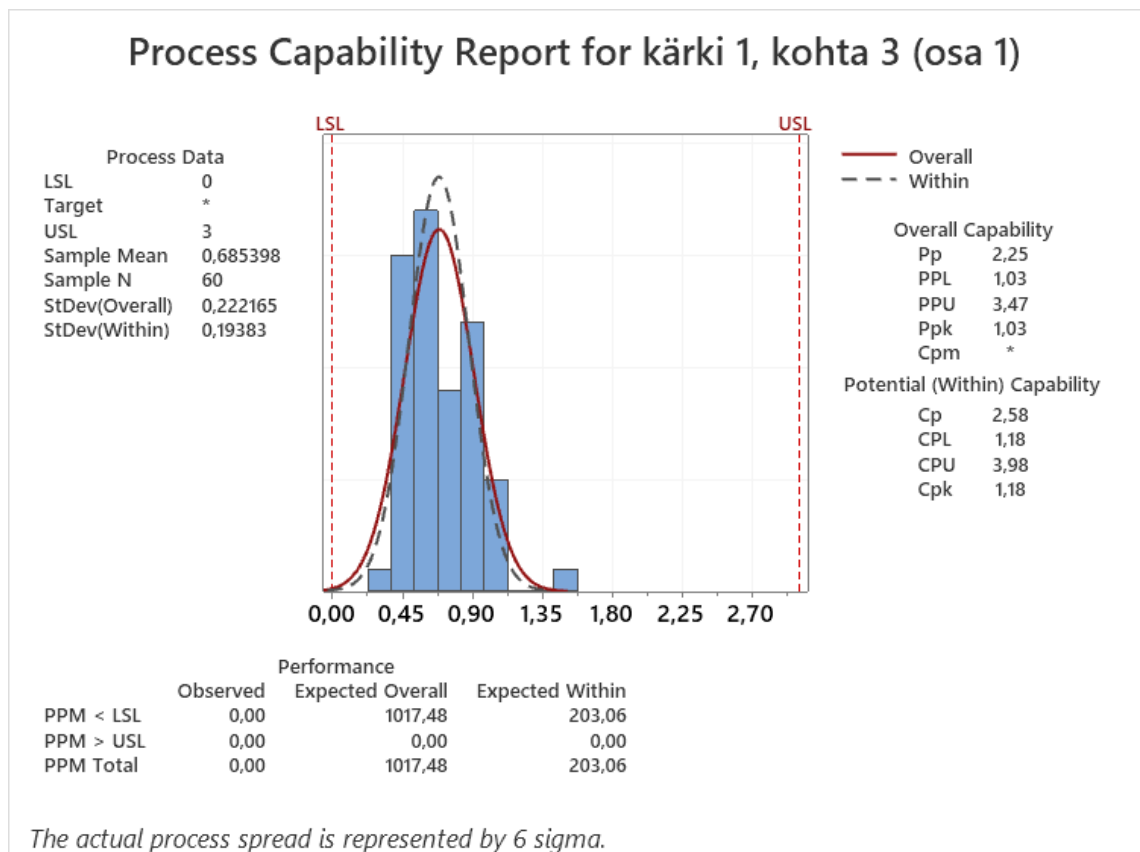
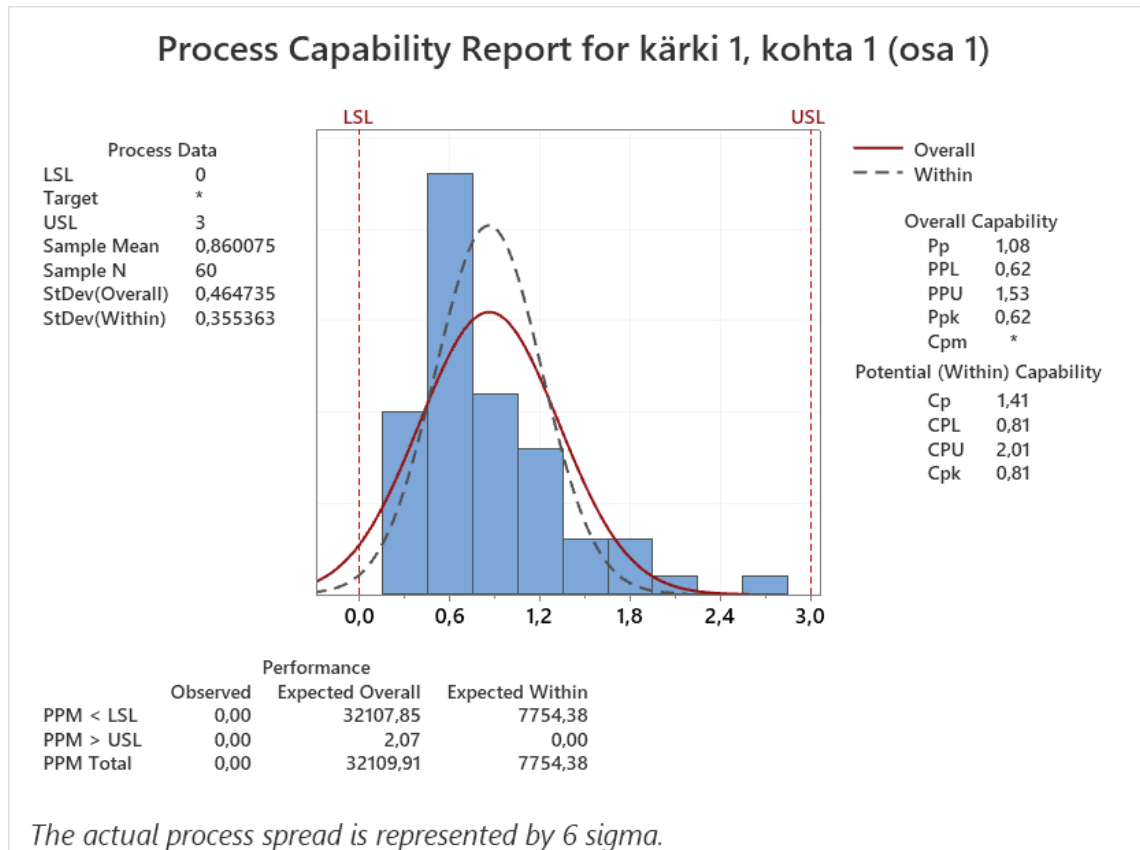
- [1] Oxford University Press (Edited by Michael G. Gor), Spectrophotometry & Spectrofluorimetry – A Practical Approach, Oxford University Press, 2000, 1 p.
- [2] Kurt Nassau, Color for Science, Art and Technology, Elsevier Science B.V., 1998, pp. 36, 61
- [3] Precise Color Communication – Color control from perception to instrumentation, Konica Minolta, pp. 7-19, (viitattu 1.7.2021) saatavissa: [https://www5.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring\\_Instruments/4\\_Learning\\_Centre/C\\_A/PRECISE\\_COLOR\\_COMMUNICATION/PCC\\_2020/precisecolor\\_catalogcacpk\\_eng.pdf](https://www5.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring_Instruments/4_Learning_Centre/C_A/PRECISE_COLOR_COMMUNICATION/PCC_2020/precisecolor_catalogcacpk_eng.pdf)
- [4] Metalliteollisuuden keskusliitto, Konepajan Mittaustekniikka, Metalliteollisuuskustannus OY, 1987, s.54–55
- [5] A.W.S. Tarrant, "Chapter 28 – optical measurements" in Instrumentation Reference Book, Fourth Edition, Edited by W. Boyes (2010), 510 p.
- [6] Konica Minolta – Measuring Instruments, Portable Spectrophotometers CM-700d/600d, (viitattu 9.8.2021), saatavissa: <https://www5.konicaminolta.eu/en/measuring-instruments/products/colour-measurement/spectrophotometers-portable/cm-700d-cm-600d/introduction.html>
- [7] Konica Minolta, Spectrophotometer CM-700d/600d Instruction Manual, 2008, pp. 29–31, 76, 128
- [8] Help efi, Delta E, Delta H, Delta T: What does it mean?, (viitattu 9.8.2021) Saatavissa: [https://help.efi.com/fieryxf/KnowledgeBase/color/Delta%20E\\_H\\_T.pdf](https://help.efi.com/fieryxf/KnowledgeBase/color/Delta%20E_H_T.pdf)
- [9] AIAG 2010, Measurement System Analysis – MSA Fourth Edition, Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 2010, pp. 6–7, 217–218
- [10] Eero E. Karjalainen, Tanja Karjalainen, Lean Six Sigm 2.0 ja Laatu teknologia, Quality Knowhow Karjalainen Oy, 2020, pp. 85–98
- [11] Gentleman Robert, Hornik Kurt, Parmiagiani Giovanni, Six Sigma with R – Statistical Engineering for Process Improvement, Springer Science+Business Media New York, 2012, 79 p.

- [12] Gabriele Corciolani, Alessandro Vichi, Repeatability of colour reading with a clinical and laboratory spectrophotometer, *International Dentistry SA* VOL 8, NO. 5, pp 62–70

## LIITE A: Ote osakohtaisesta ohjeistuksesta

OSA (tuotekoodi)	KOHTA	KÄRKI	MAX ΔE
[REDACTED]			3,00
[REDACTED]			3,00

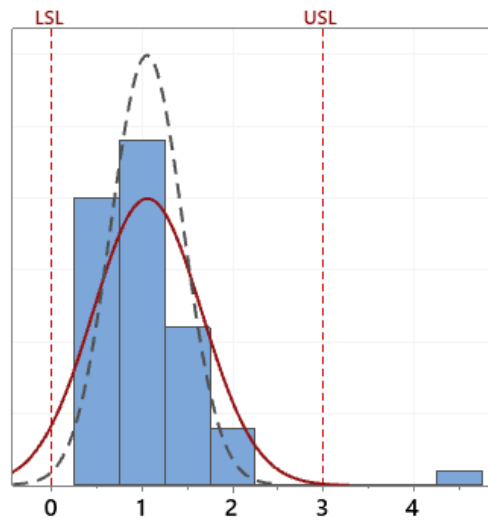
LIITE B: Kyvykkyyseraportti osalle 1, kärki- ja mittauskohtamittaus



### Process Capability Report for kärki 2, kohta 1 (osa 1)

Process Data

LSL	0
Target	*
USL	3
Sample Mean	1,05715
Sample N	60
StDev(Overall)	0,599601
StDev(Within)	0,399279



Overall Capability	
Pp	0,83
PPL	0,59
PPU	1,08
Ppk	0,59
Cpm	*
Potential (Within) Capability	
Cp	1,25
CPL	0,88
CPU	1,62
Cpk	0,88

Performance

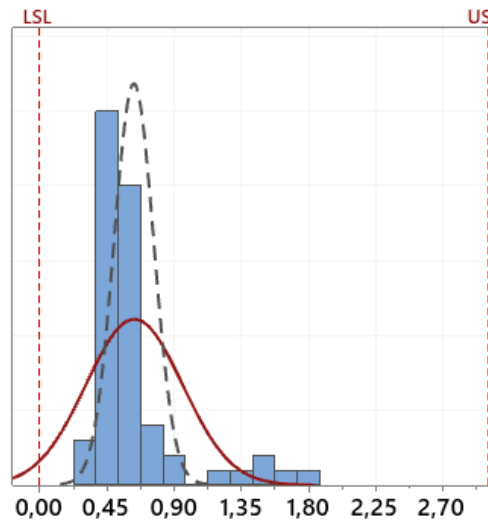
	Observed	Expected Overall	Expected Within
PPM < LSL	0,00	38942,95	4052,74
PPM > USL	16666,67	597,15	0,57
PPM Total	16666,67	39540,10	4053,31

The actual process spread is represented by 6 sigma.

### Process Capability Report for kärki 2, kohta 3 (osa 1)

Process Data

LSL	0
Target	*
USL	3
Sample Mean	0,631271
Sample N	60
StDev(Overall)	0,323988
StDev(Within)	0,133726



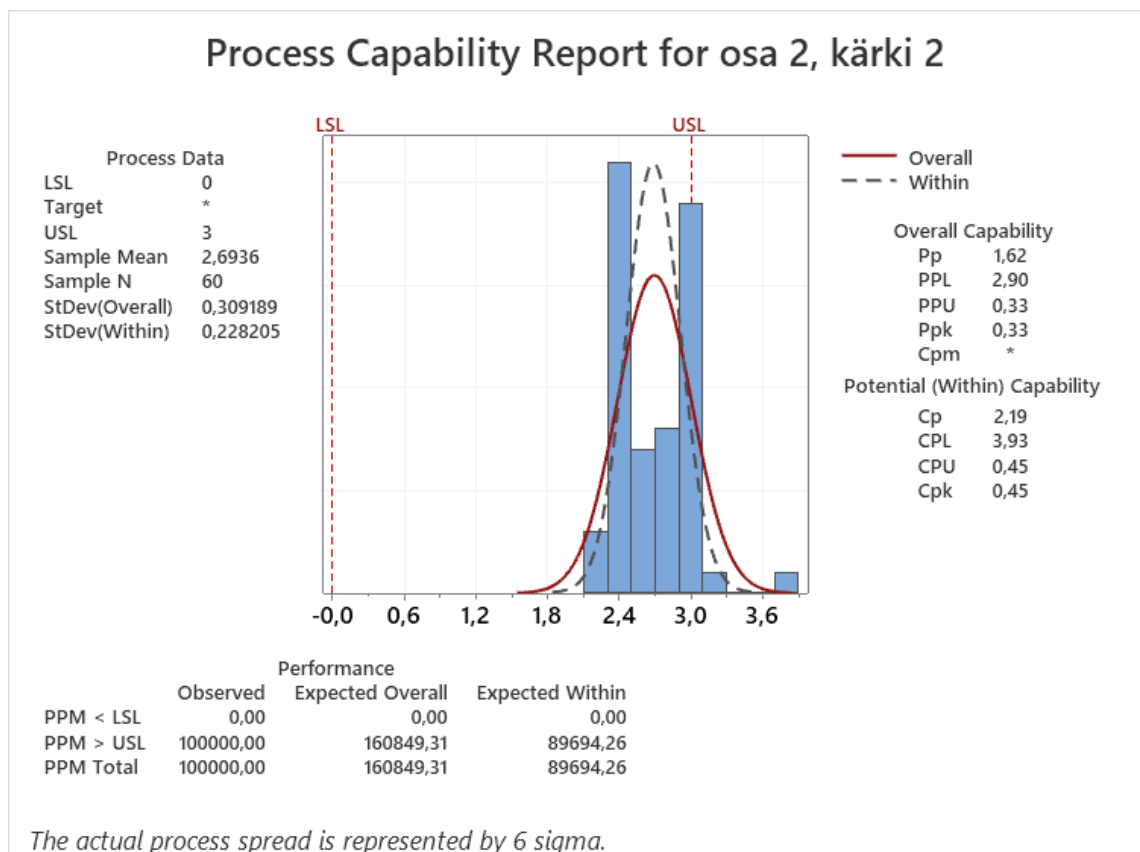
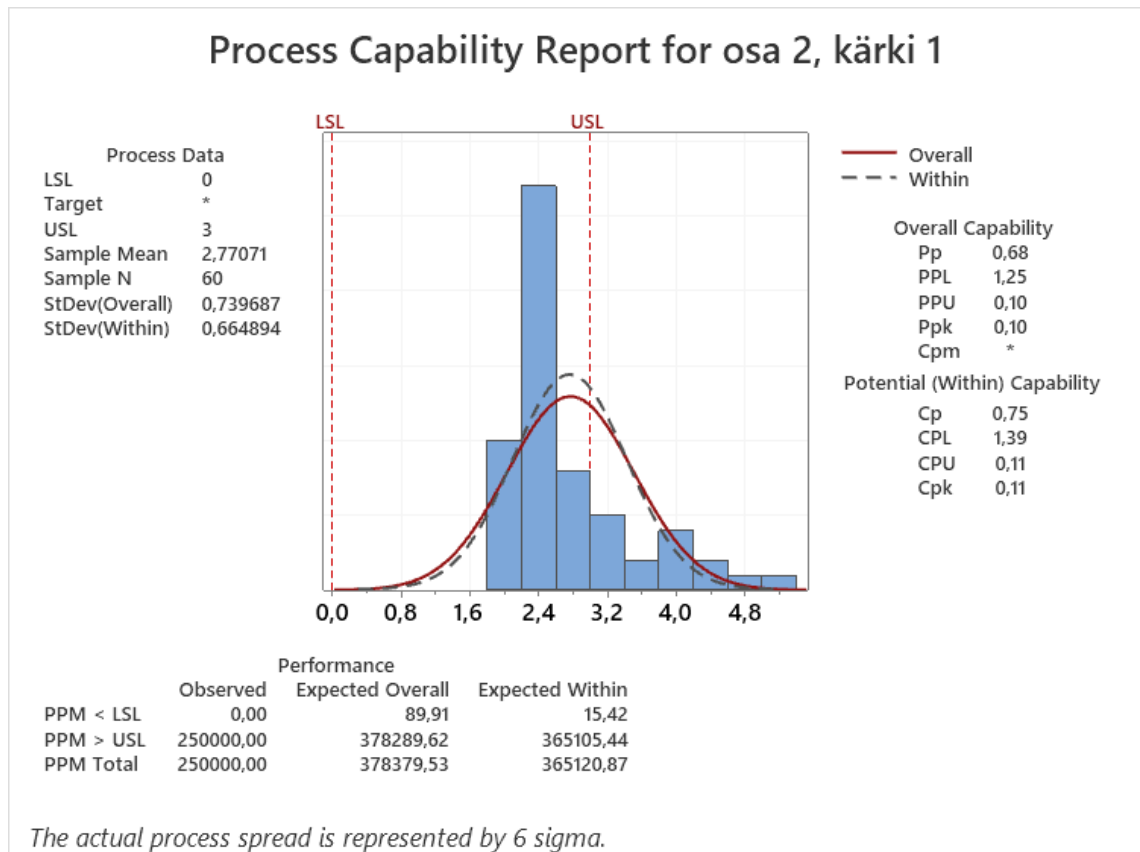
Overall Capability	
Pp	1,54
PPL	0,65
PPU	2,44
Ppk	0,65
Cpm	*
Potential (Within) Capability	
Cp	3,74
CPL	1,57
CPU	5,90
Cpk	1,57

Performance

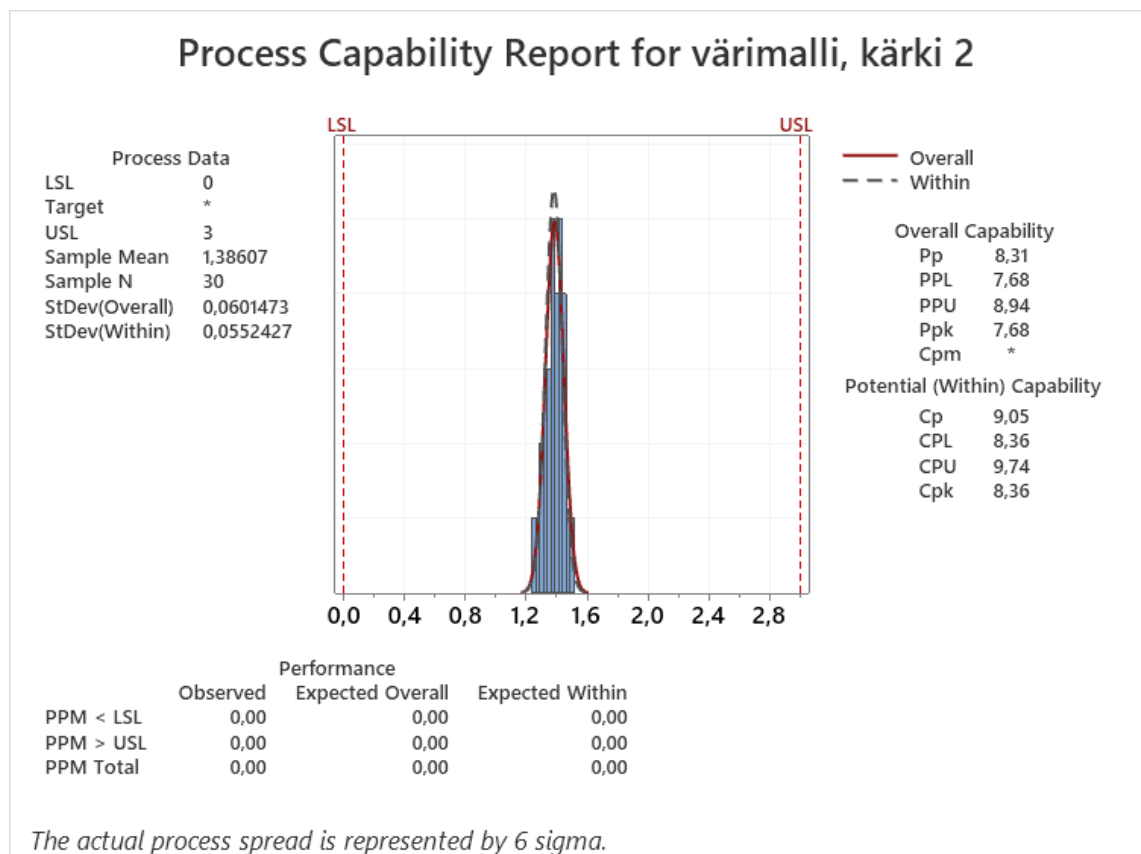
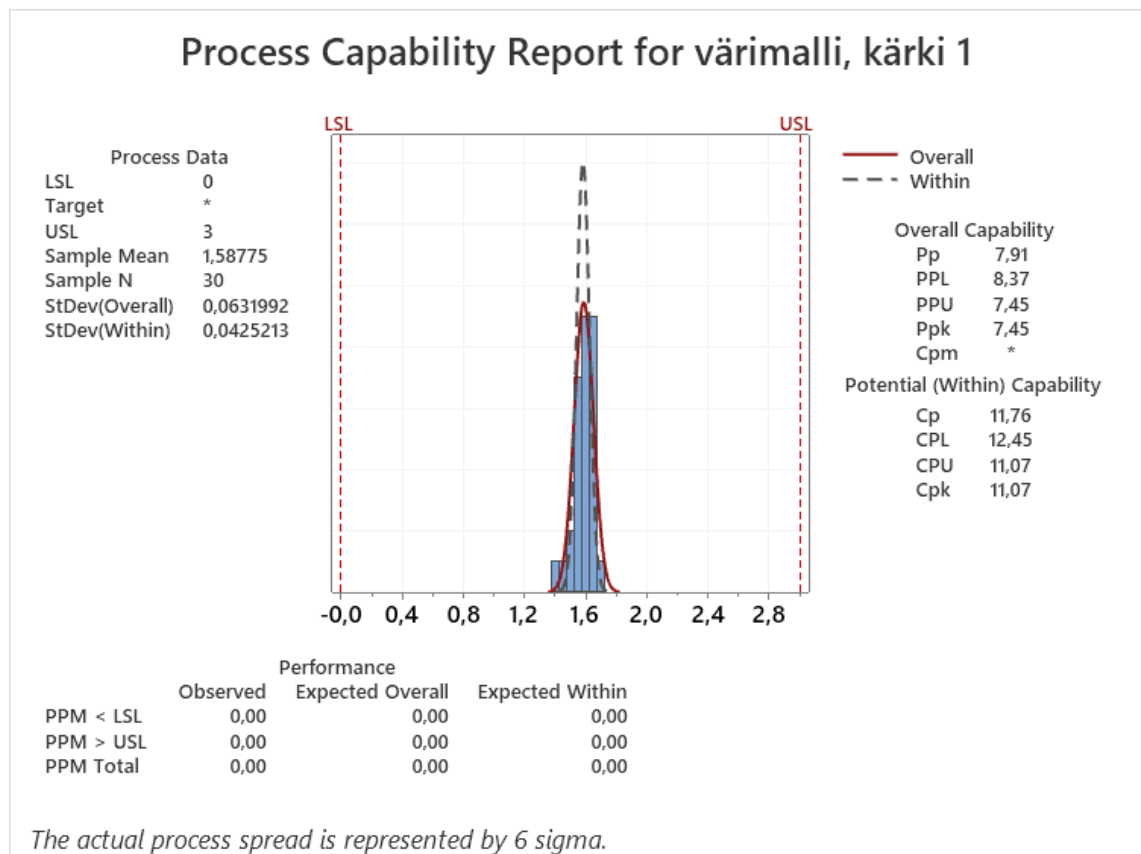
	Observed	Expected Overall	Expected Within
PPM < LSL	0,00	25681,06	1,18
PPM > USL	0,00	0,00	0,00
PPM Total	0,00	25681,06	1,18

The actual process spread is represented by 6 sigma.

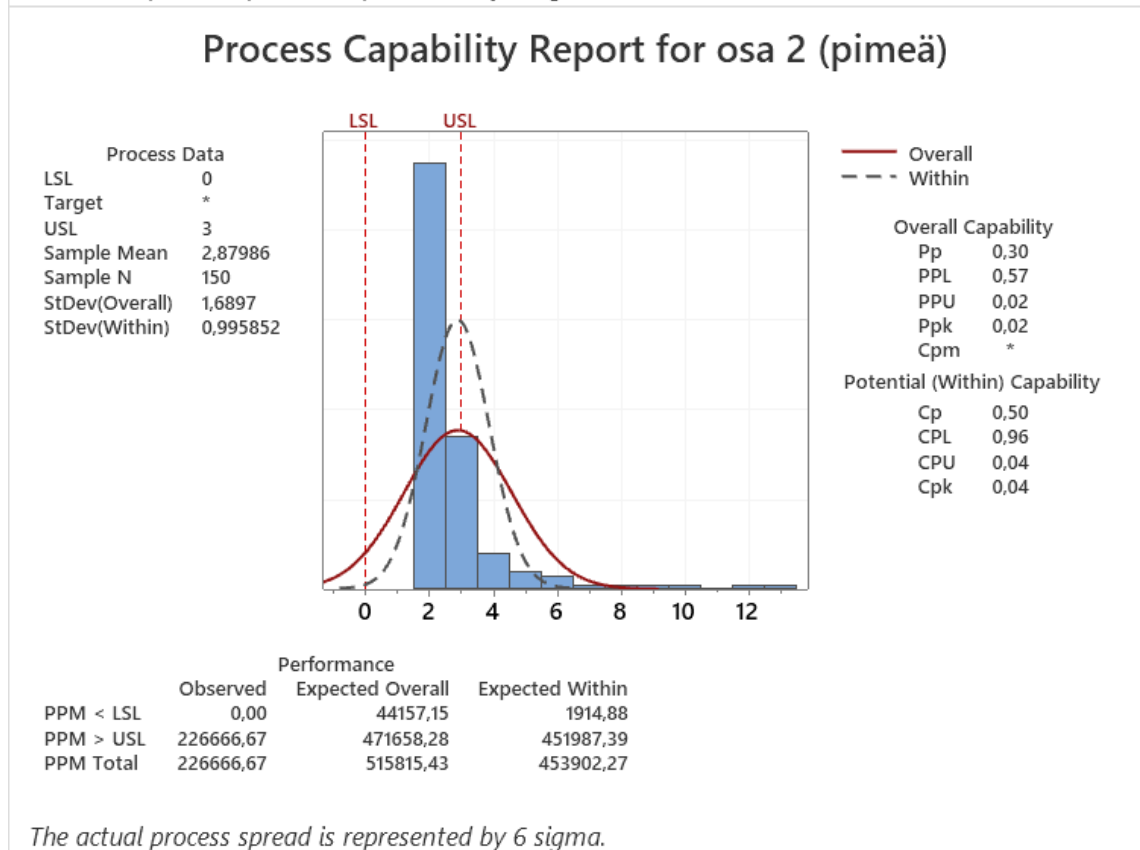
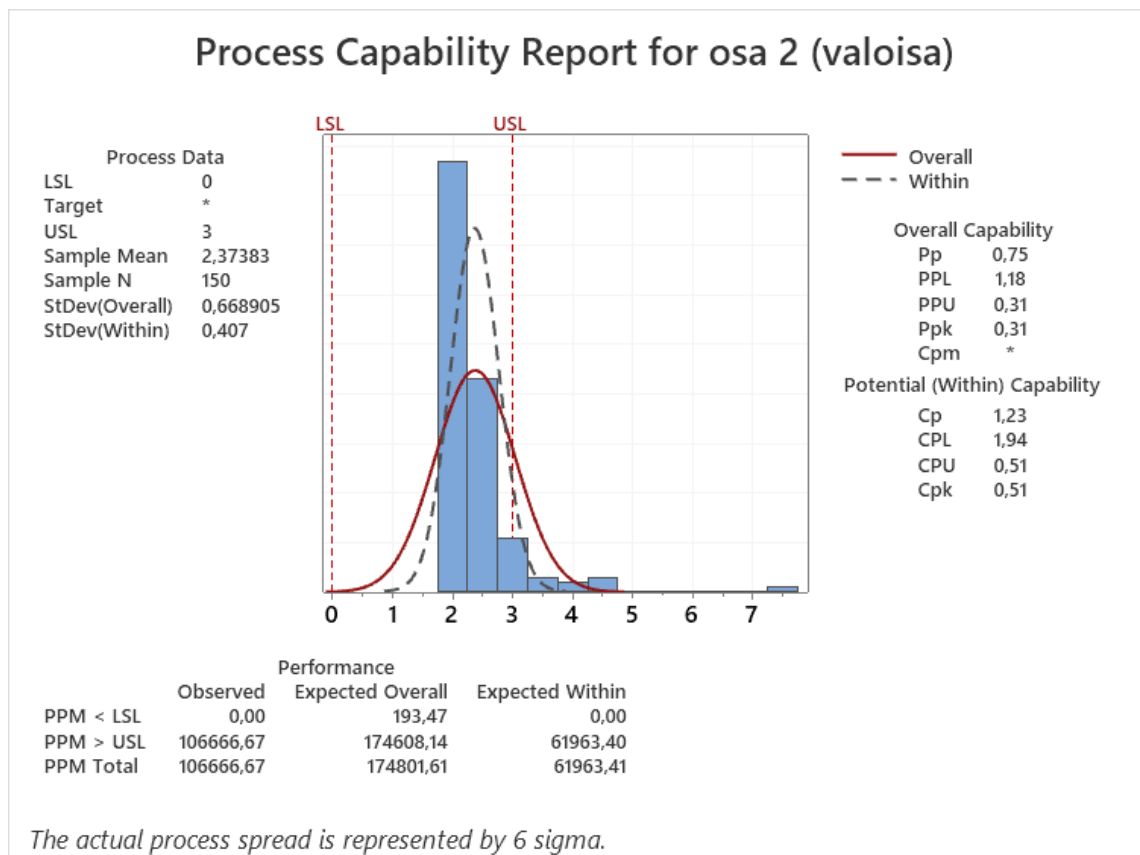
LIITE C: Kyvykkyyseraportti osalle 2, kärki- ja mittauskohtamittaus



## LIITE D: Kyvykkyyseraportti osalle 3 (värimalli), kärki- ja mittauskohtamittaus

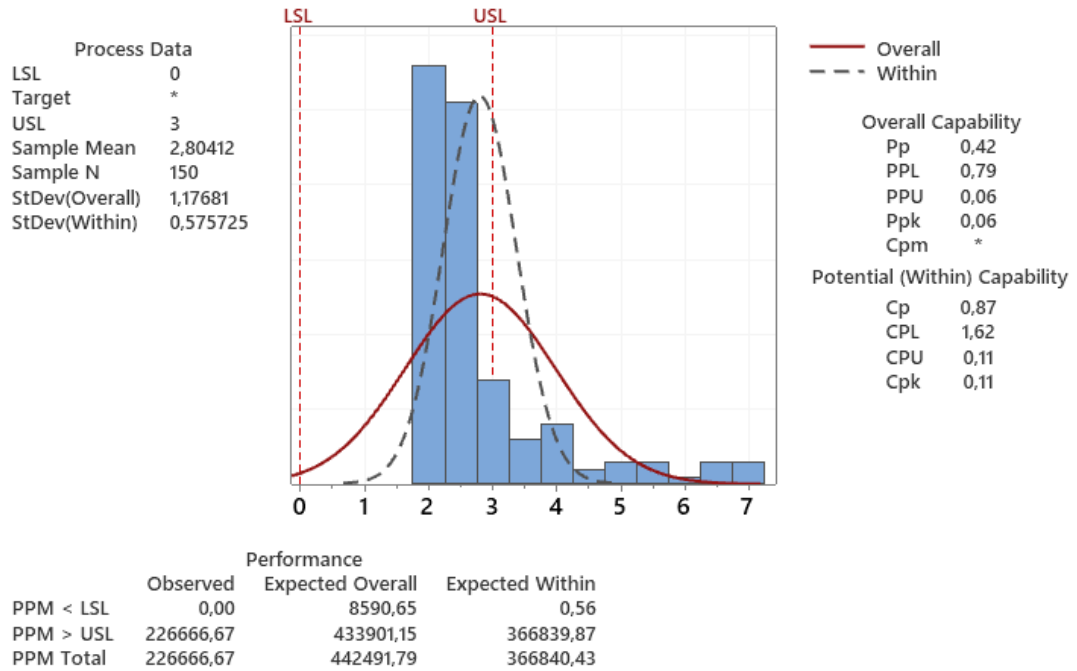


LIITE E: Kyvykkyyseraportti osalle 2, olosuhdemittaukset



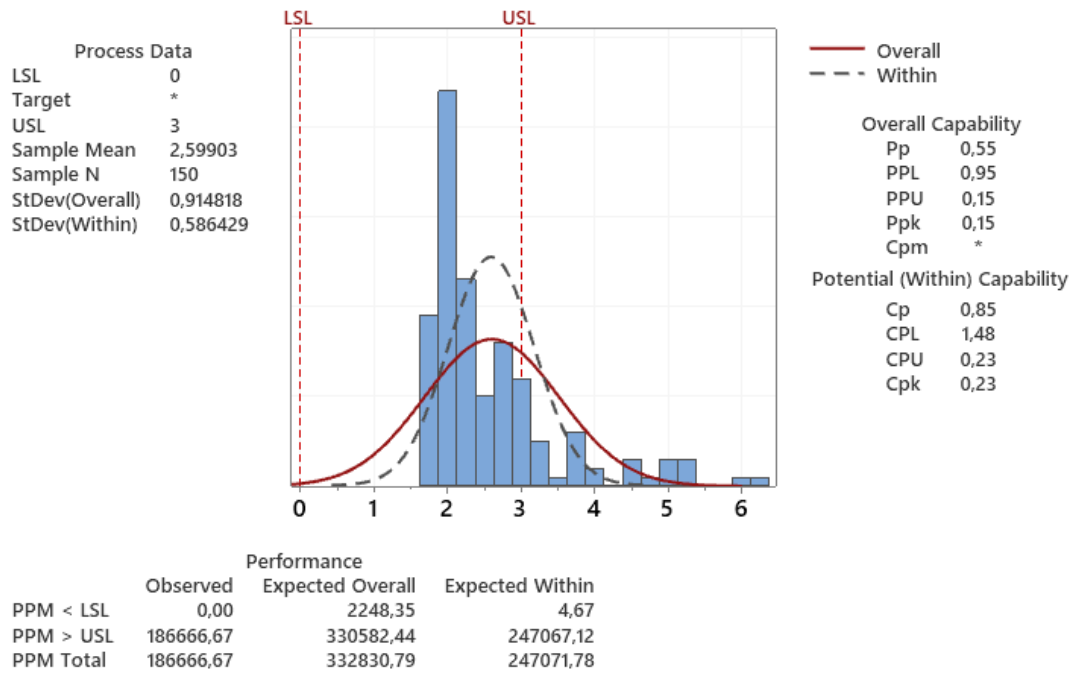


### Process Capability Report for osa 2 (musta pehmuste)



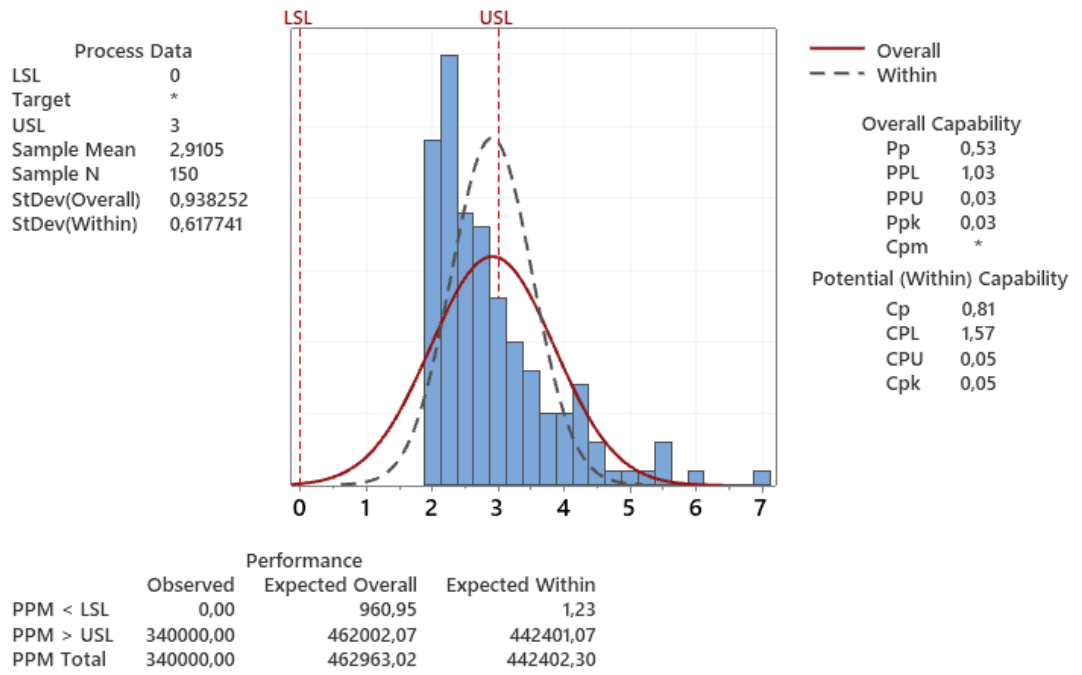
The actual process spread is represented by 6 sigma.

### Process Capability Report for osa 2 (valk. tausta)



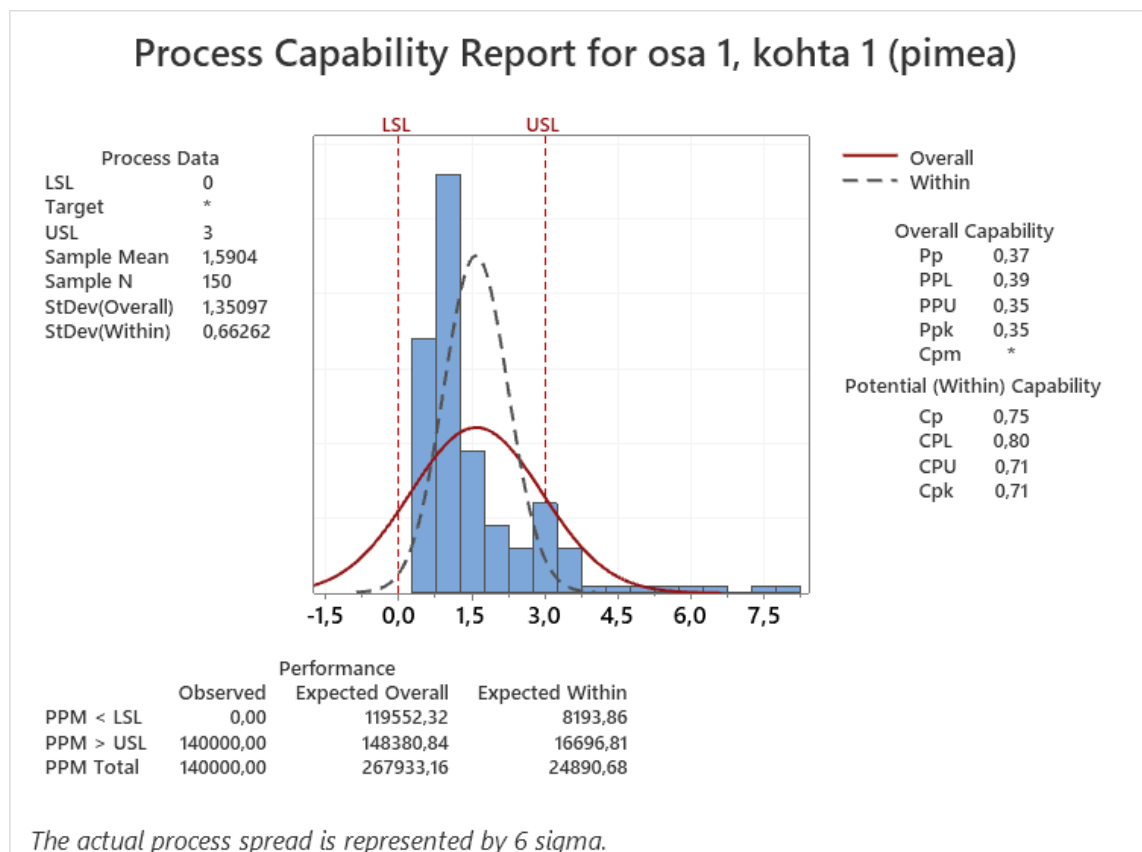
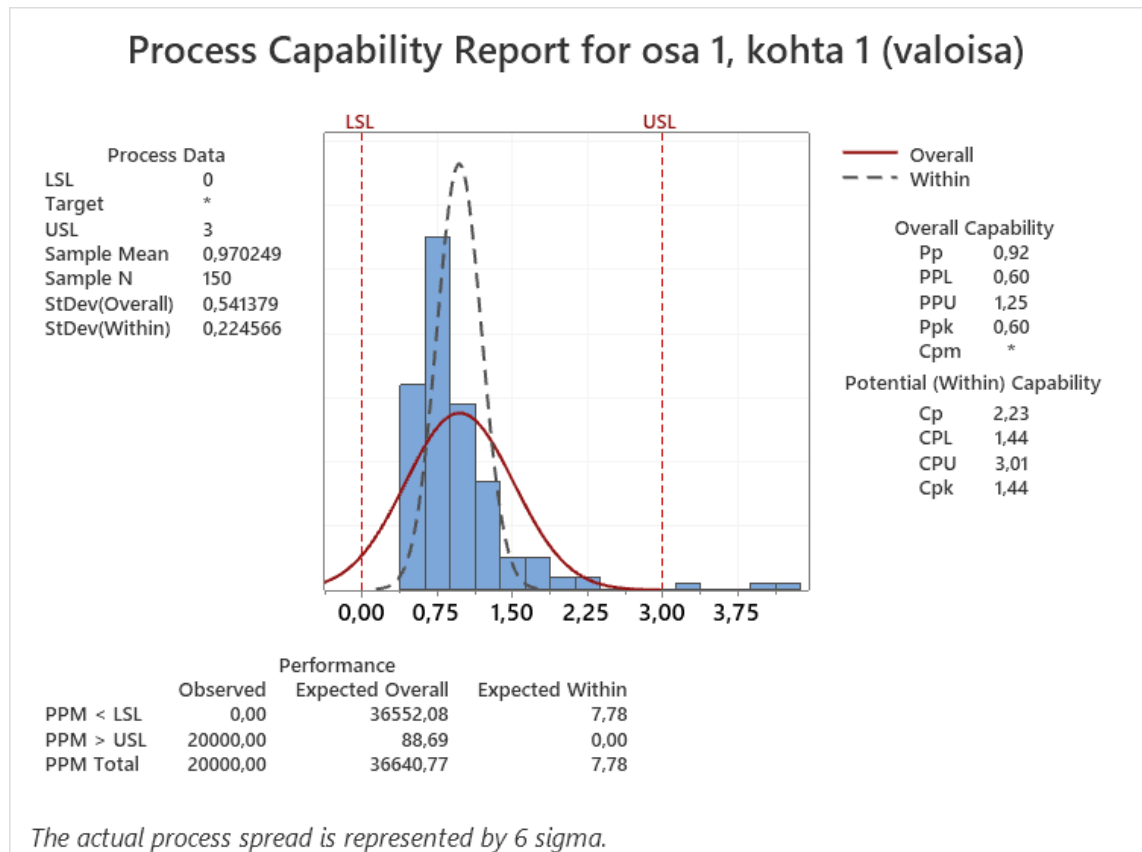
The actual process spread is represented by 6 sigma.

## Process Capability Report for osa 2 (musta tausta)

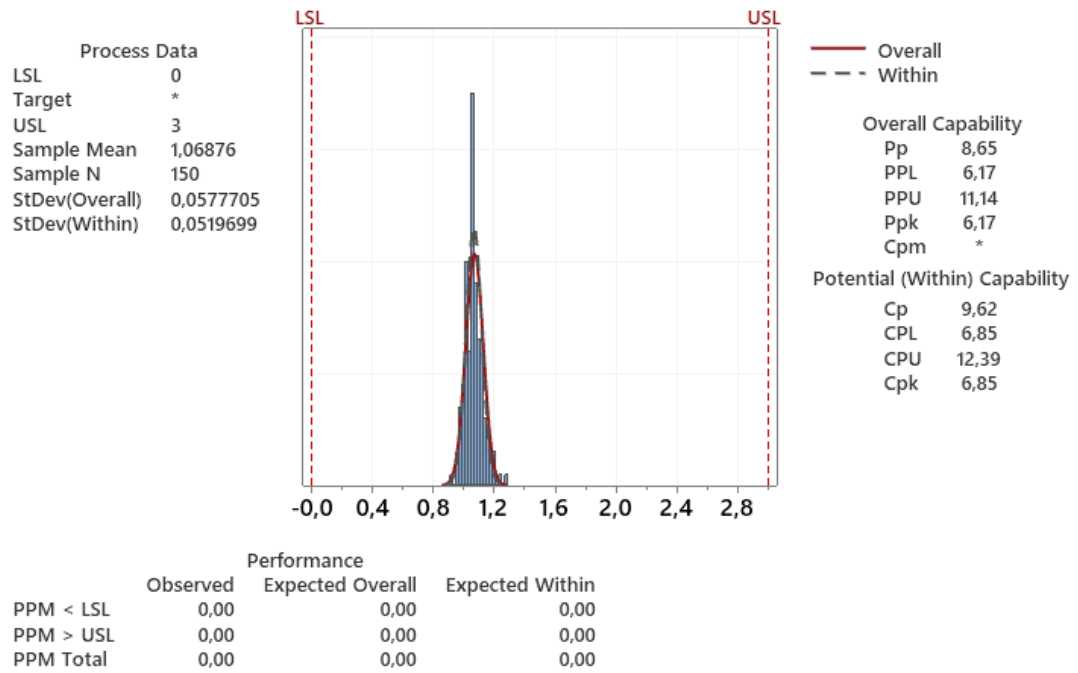


*The actual process spread is represented by 6 sigma.*

## LIITE F: Kyvykkyyssraportti osalle 1 (kohta 1), olosuhdemittaukset

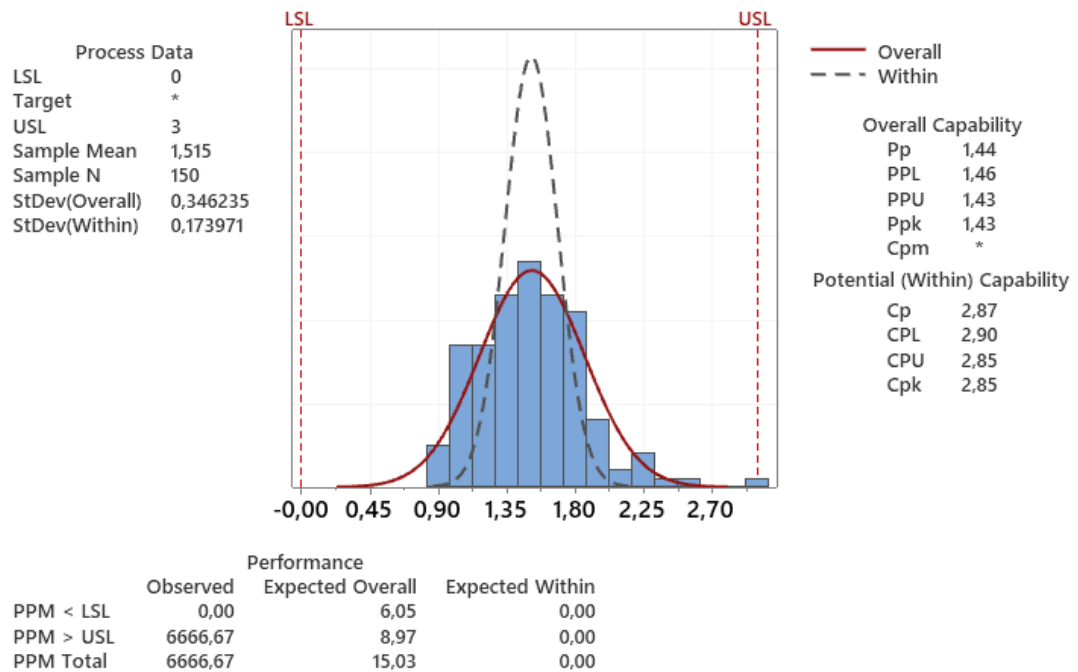


### Process Capability Report for osa 1, kohta 1 (musta pehmuste)



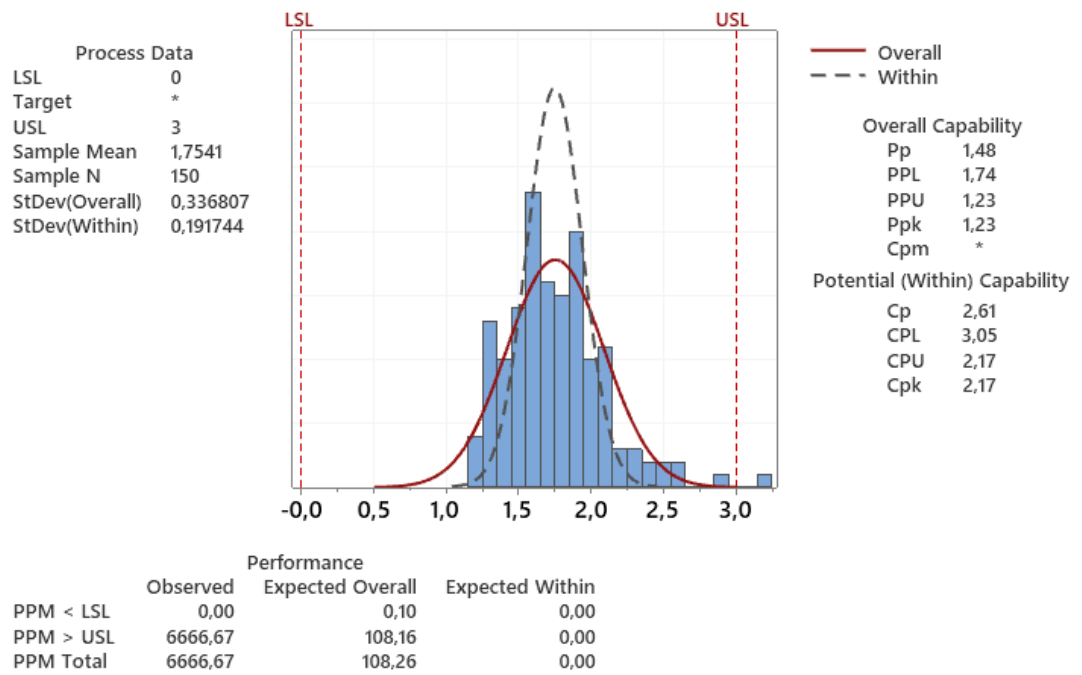
The actual process spread is represented by 6 sigma.

### Process Capability Report for osa 1, kohta 1 (valk. tausta)



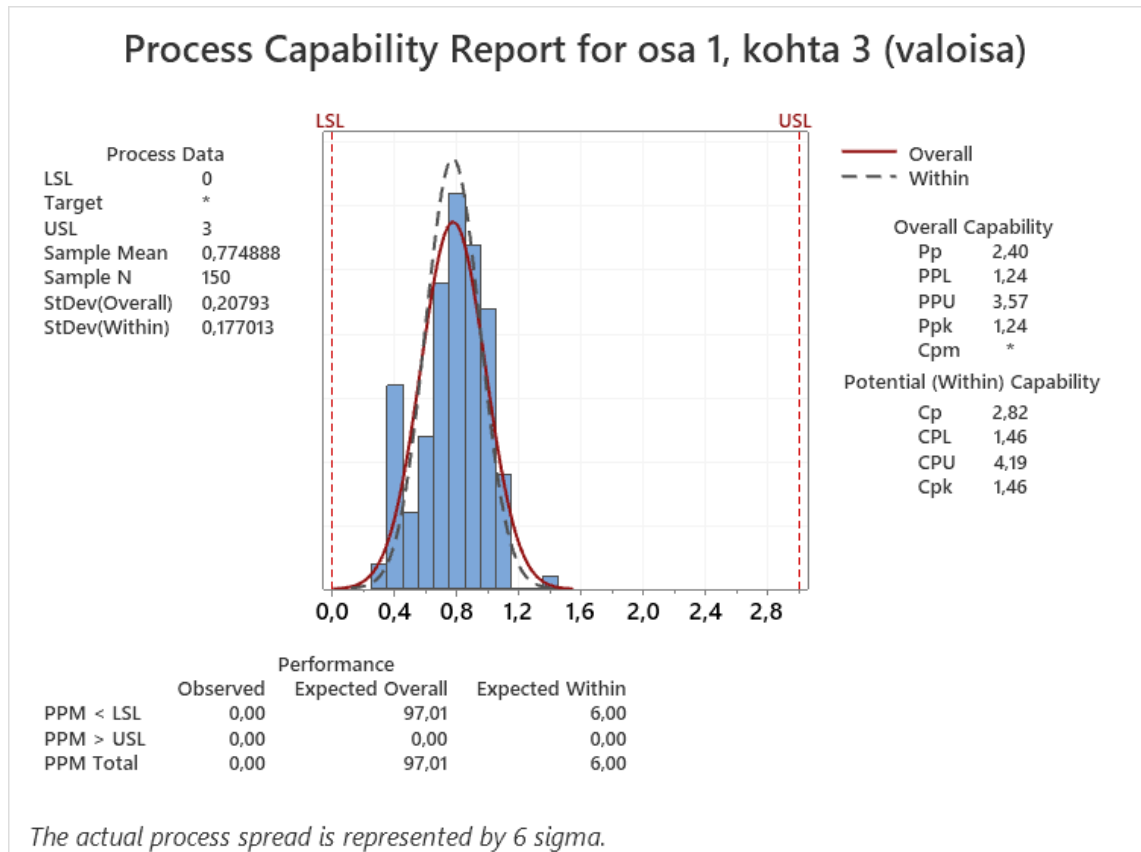
The actual process spread is represented by 6 sigma.

## Process Capability Report for osa 1, kohta 1 (musta tausta)

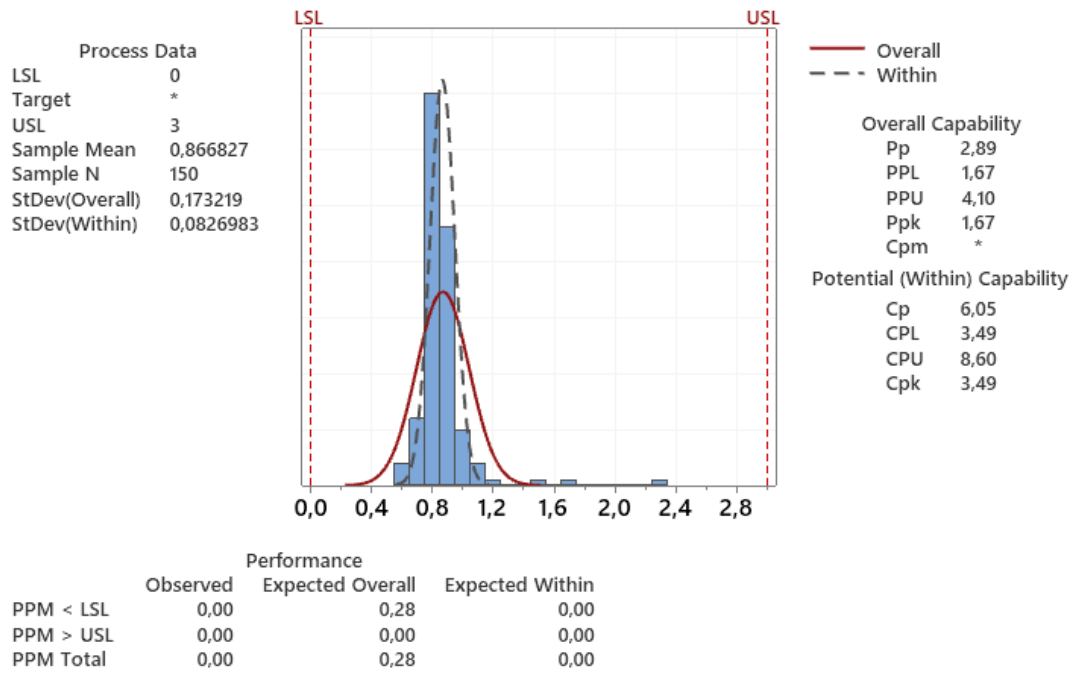


*The actual process spread is represented by 6 sigma.*

## LIITE G: Kyvykkyyssraportti osalle 1 (kohta 3), olosuhdemittaukset

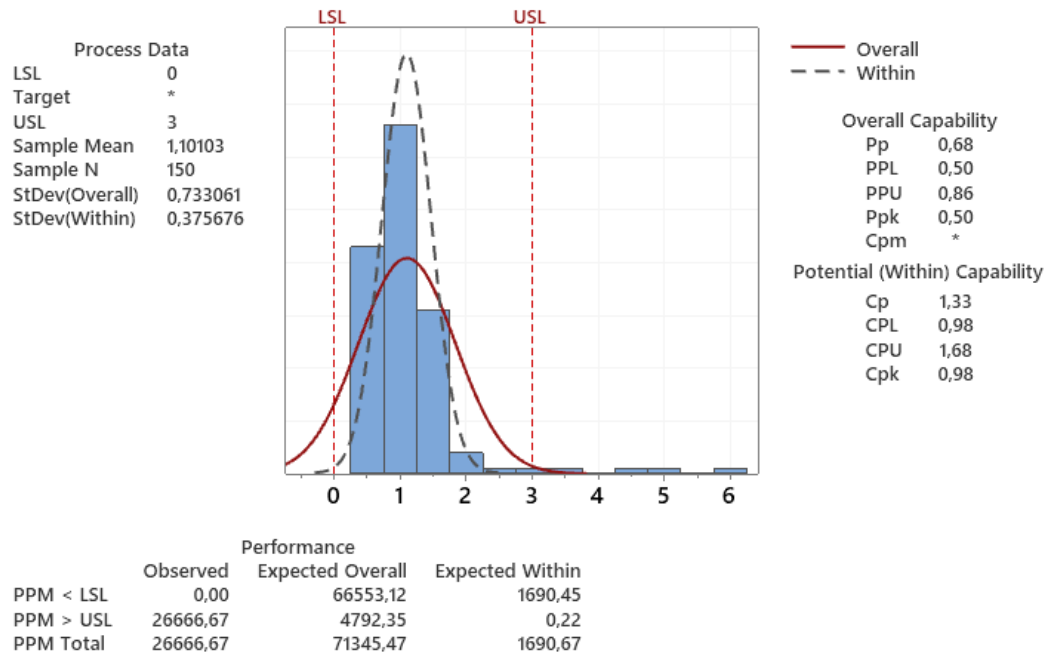


### Process Capability Report for osa 1, kohta 3 (valk. tausta)



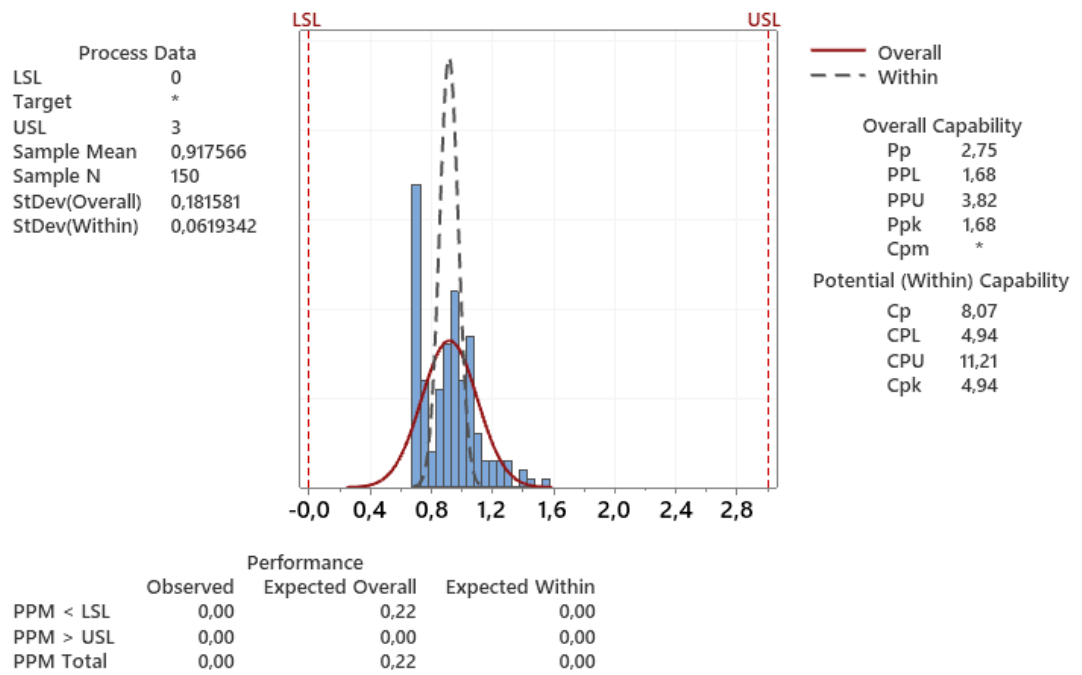
The actual process spread is represented by 6 sigma.

### Process Capability Report for osa 1, kohta 3 (pimeä)



The actual process spread is represented by 6 sigma.

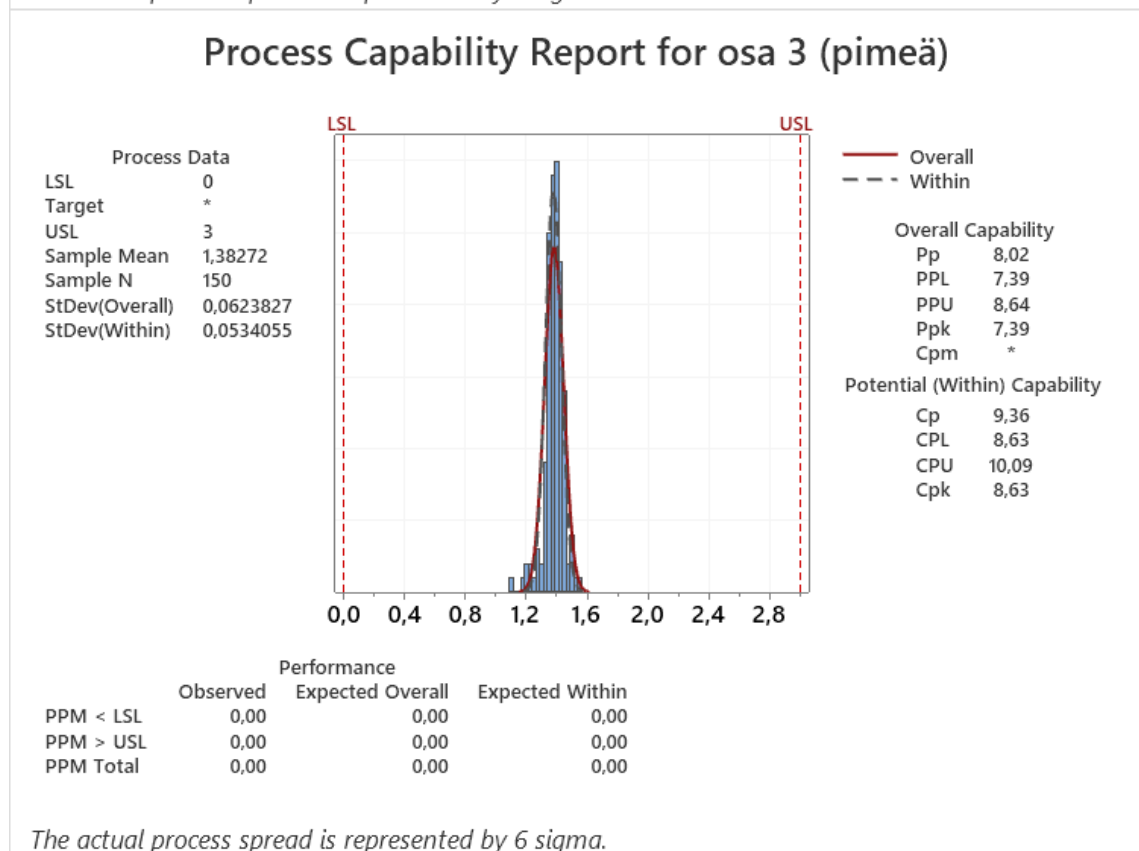
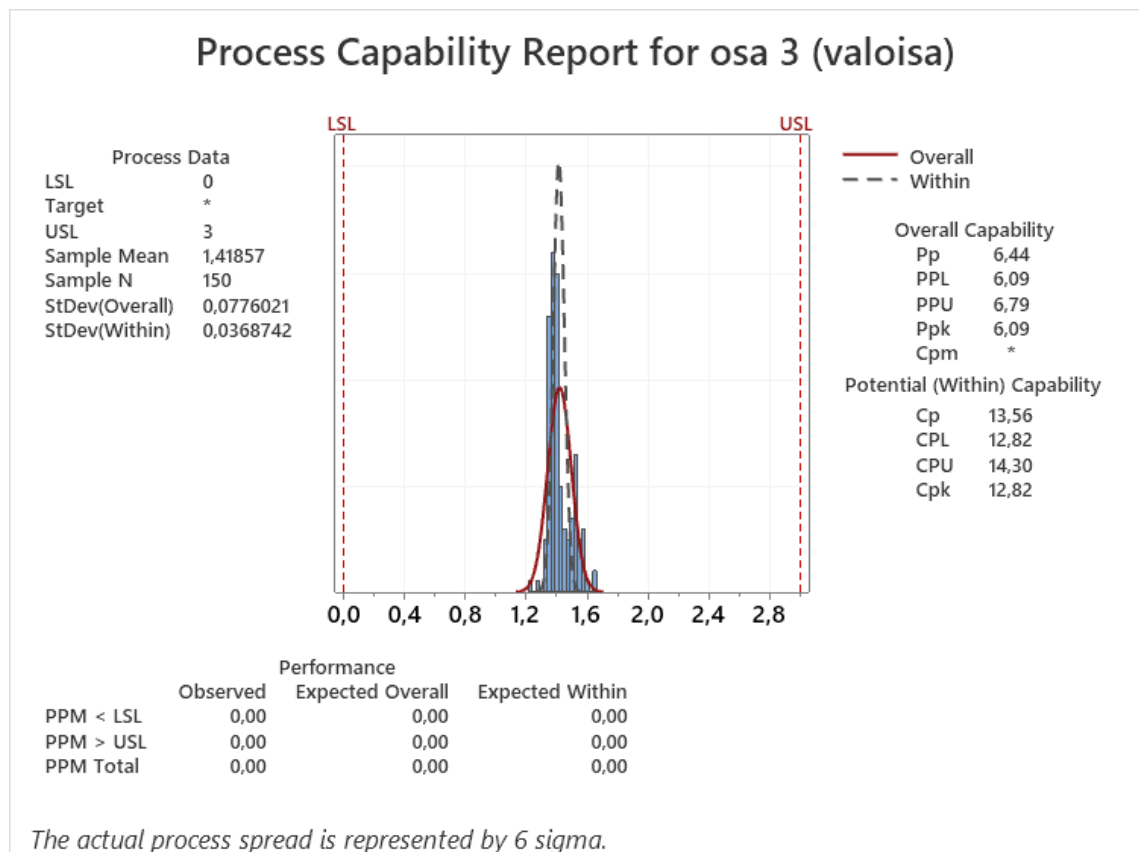
## Process Capability Report for osa 1, kohta 3 (musta tausta)



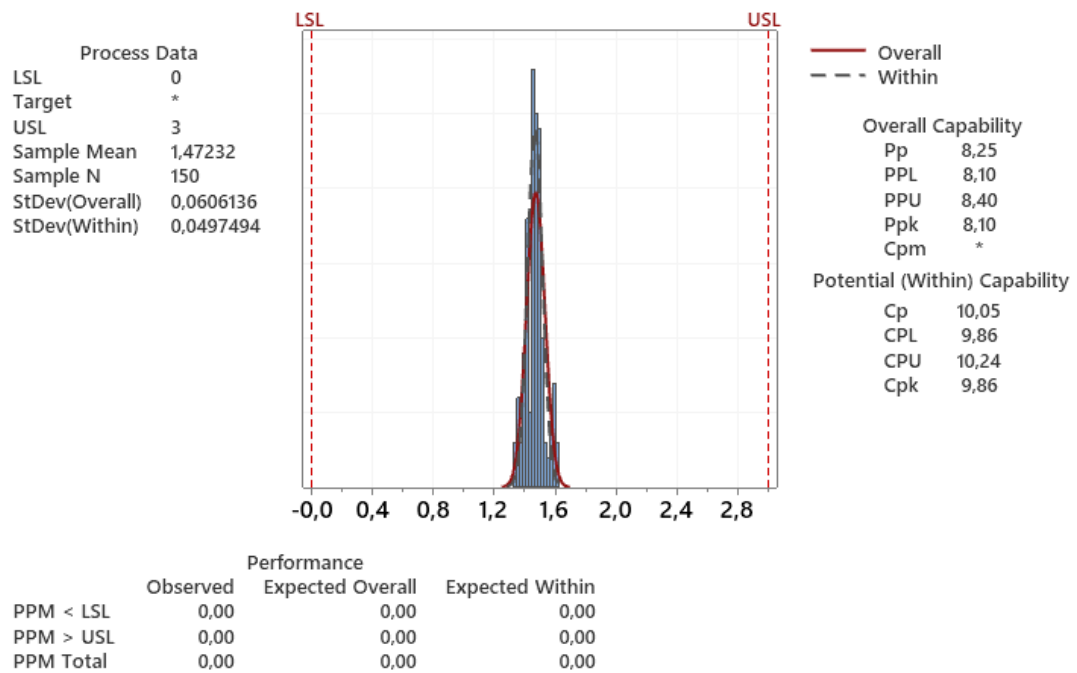
*The actual process spread is represented by 6 sigma.*



## LIITE H: Kyvykkyyseraportti osalle 3 (värimalli), olosuhdemittaukset

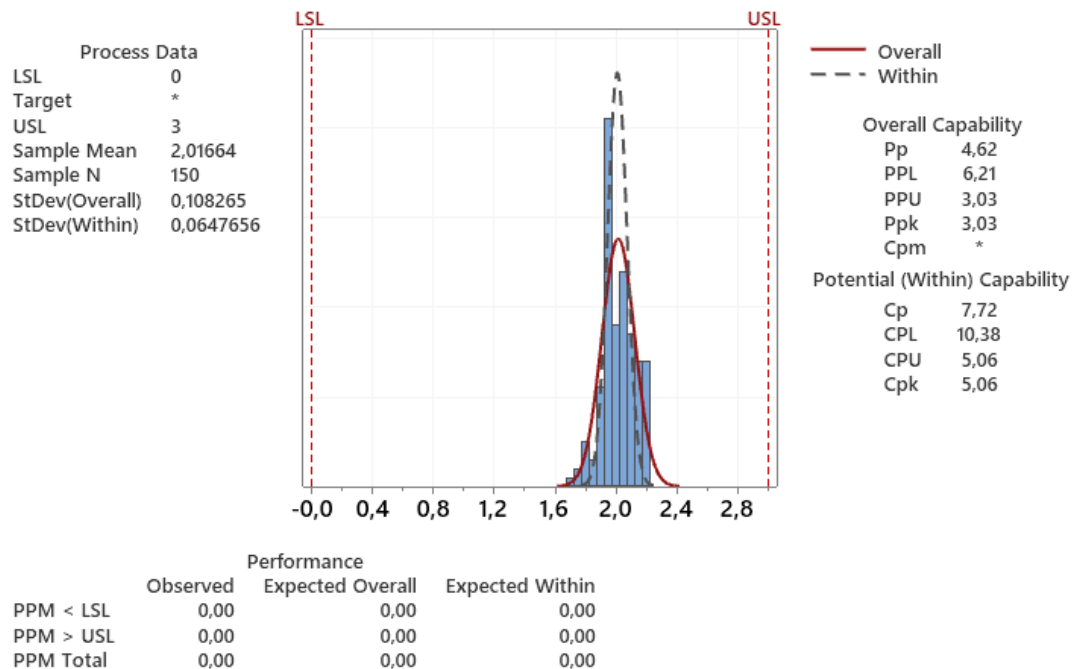


## Process Capability Report for osa 3 (musta pehmuste)



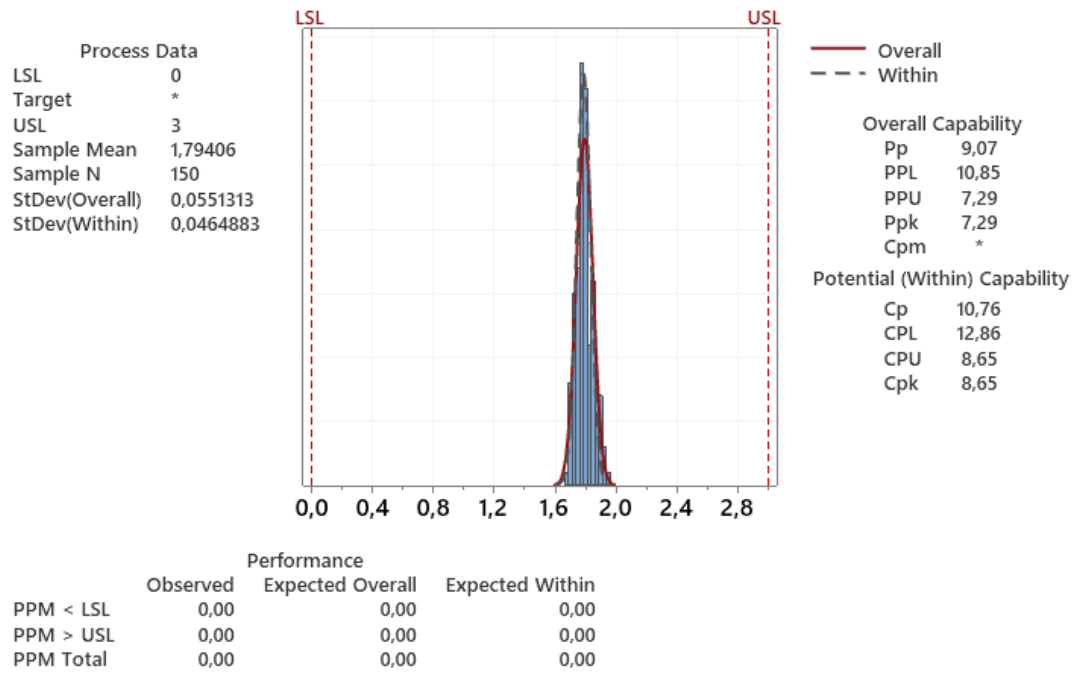
The actual process spread is represented by 6 sigma.

## Process Capability Report for osa 3 (valk. tausta)



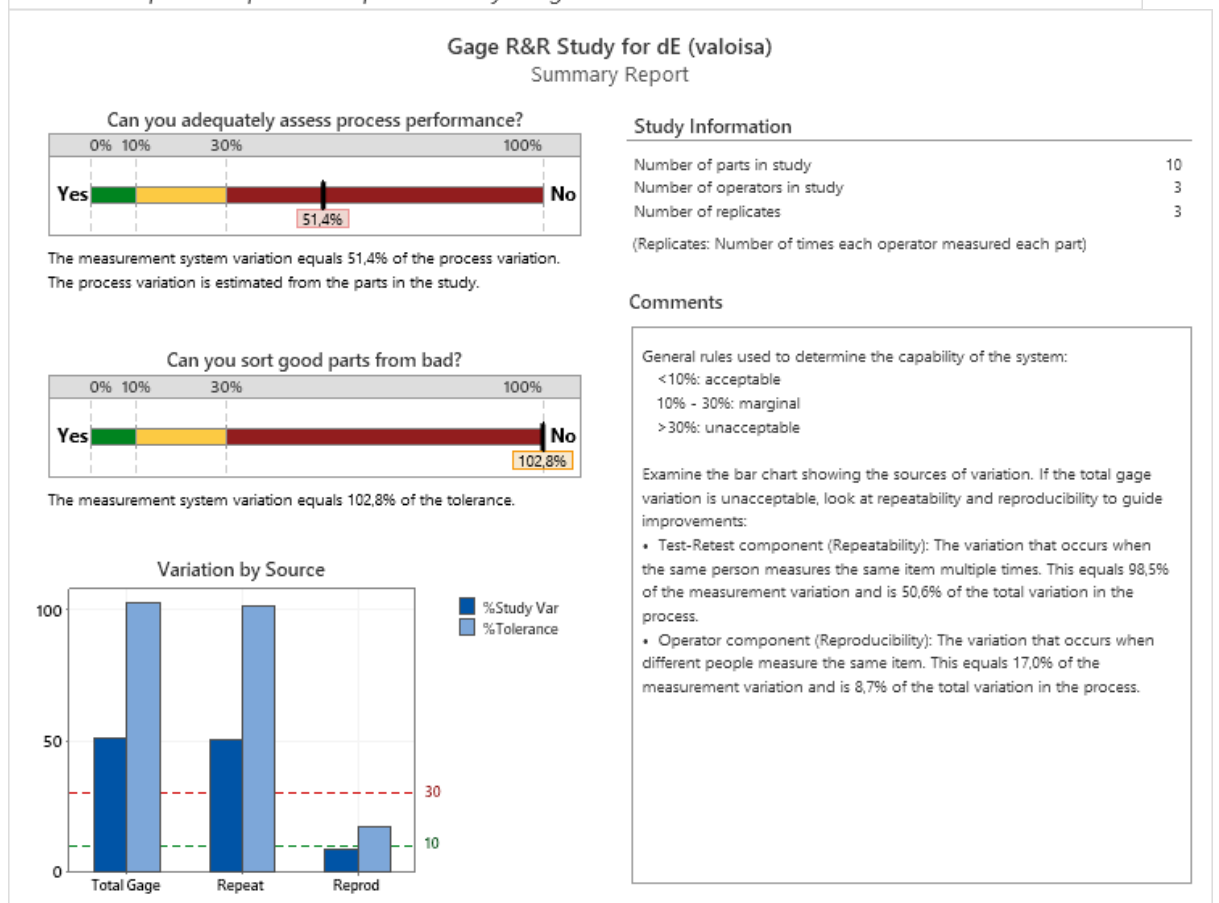
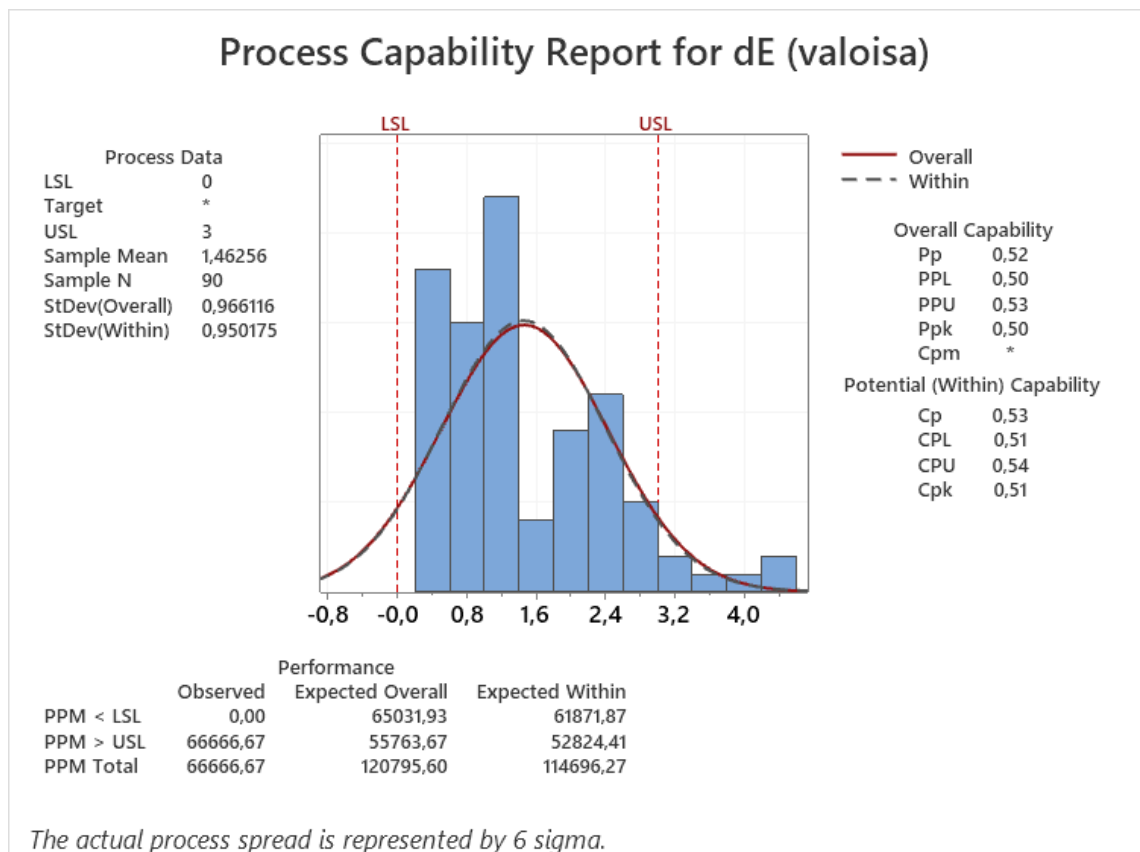
The actual process spread is represented by 6 sigma.

## Process Capability Report for osa 3 (musta tausta)



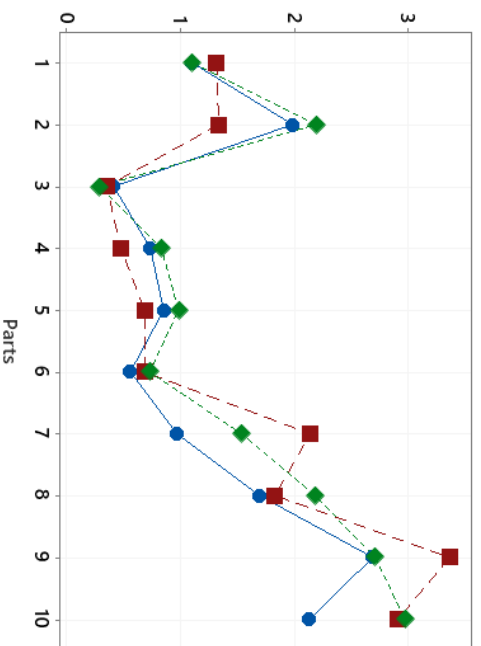
*The actual process spread is represented by 6 sigma.*

LIITE I: MSA-mittauksen tulokset (valoisa)

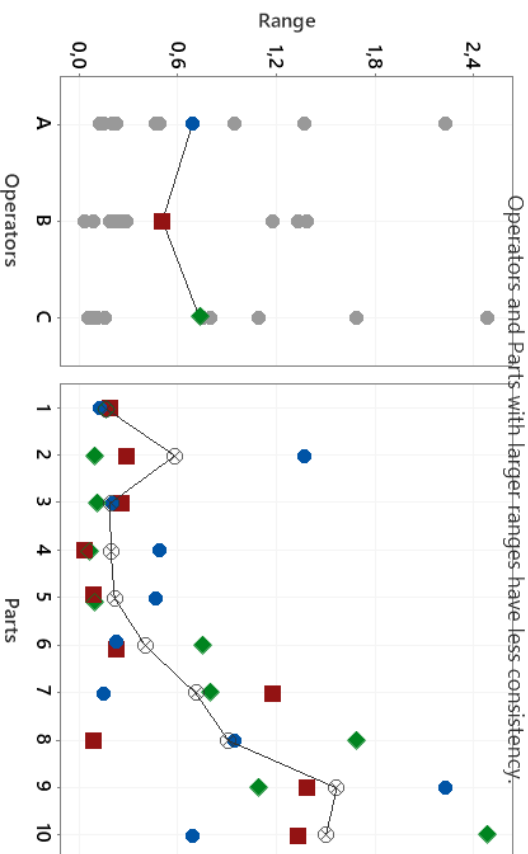


### Gage R&R Study for dE (valoisa) Variation Report

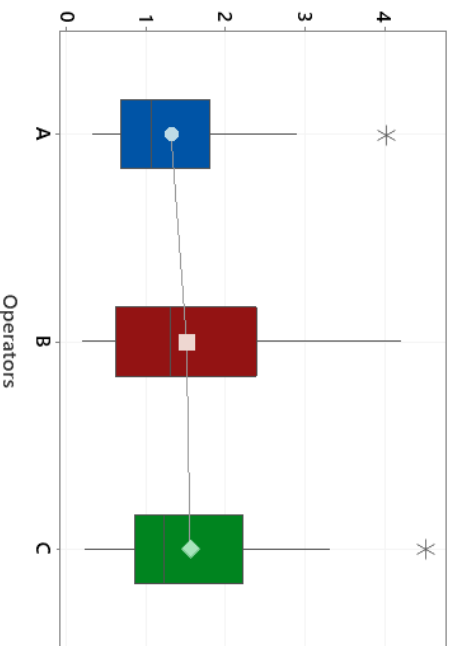
Reproducibility — Operator by Part Interaction  
Look for abnormal points or patterns.



Test-Retest Ranges (Repeatability)  
Operators and Parts with larger ranges have less consistency.



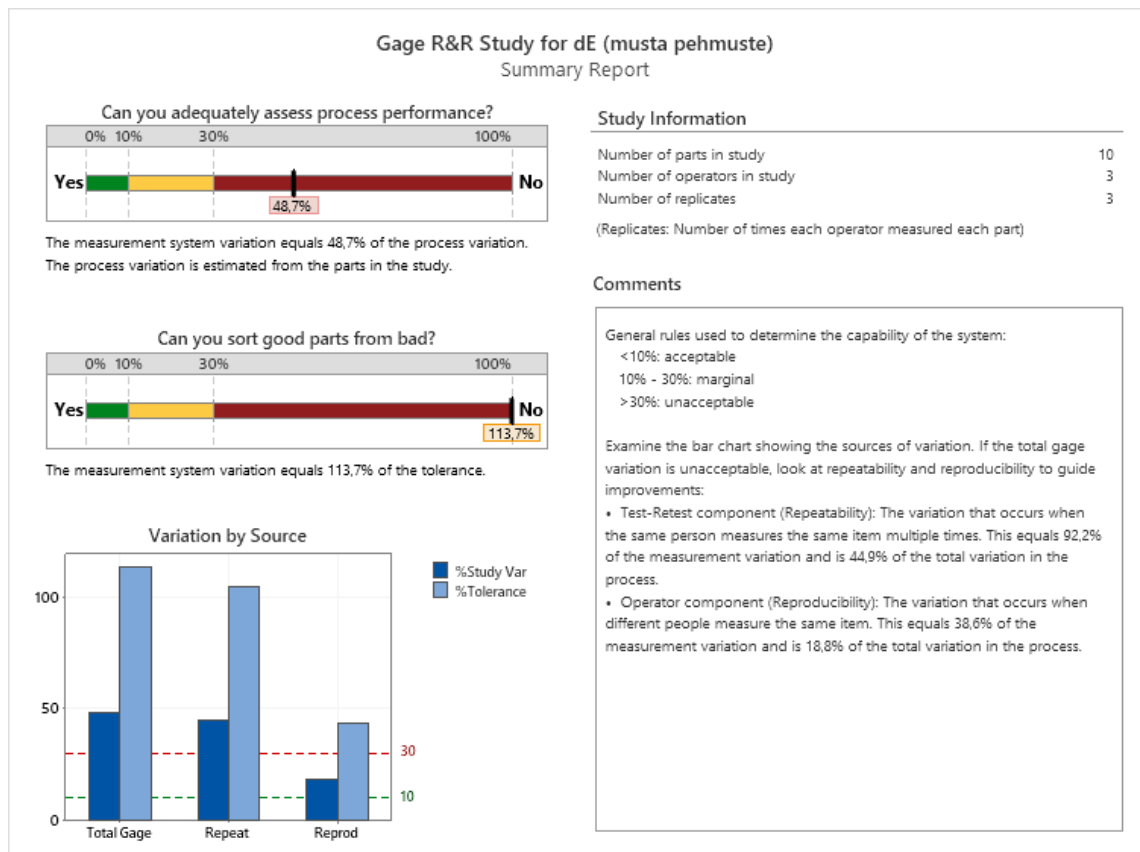
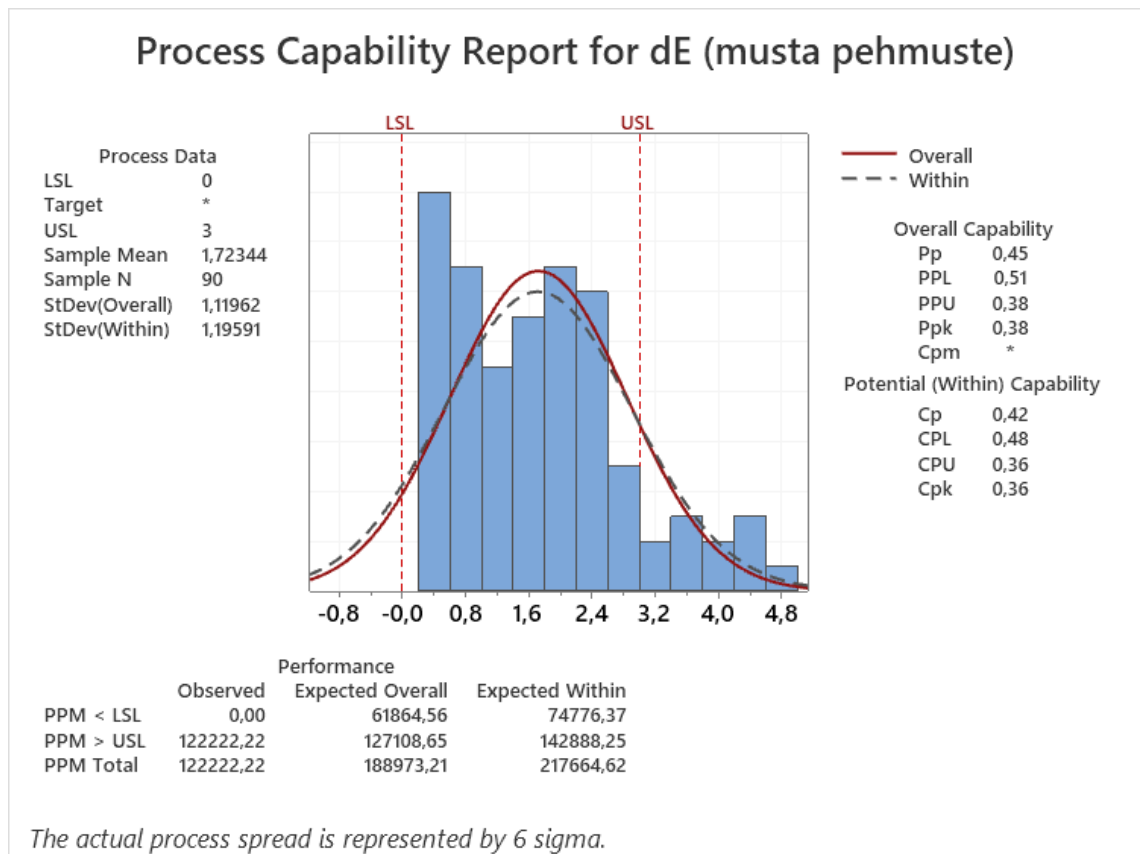
Reproducibility — Operator Main Effects  
Look for operators with higher or lower averages.



Source	StDev	%Study Variation	%Tolerance
Total Gage	0,514	51,35	102,82
Repeatability	0,507	50,60	101,32
Reproducibility	0,088	8,74	17,50
Operator	0,088	8,74	17,50
Part-to-Part	0,859	85,81	171,80
Study Variation	1,001	100,00	200,22

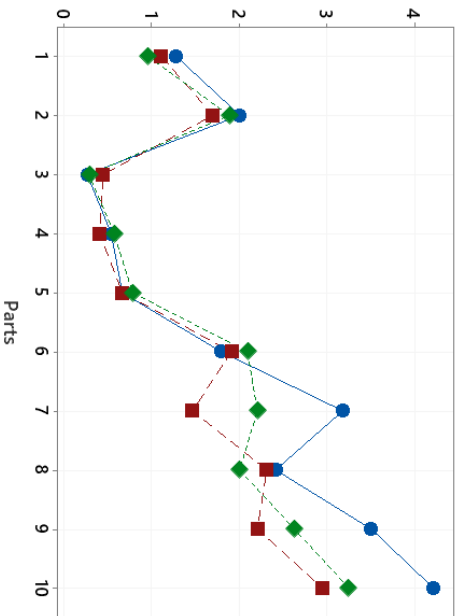
Tolerance (upper spec - lower spec): 3  
The Operator by Part interaction was not statistically significant and was removed from the table.

**LIITE J: MSA-mittauksen tulokset (musta pehmuste)**

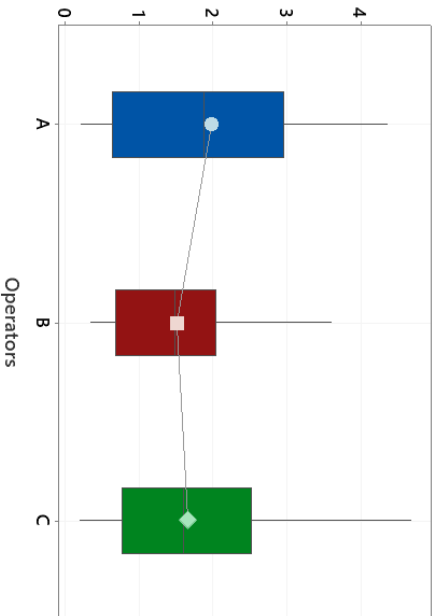


### Gage R&R Study for dE (musta pehmuste) Variation Report

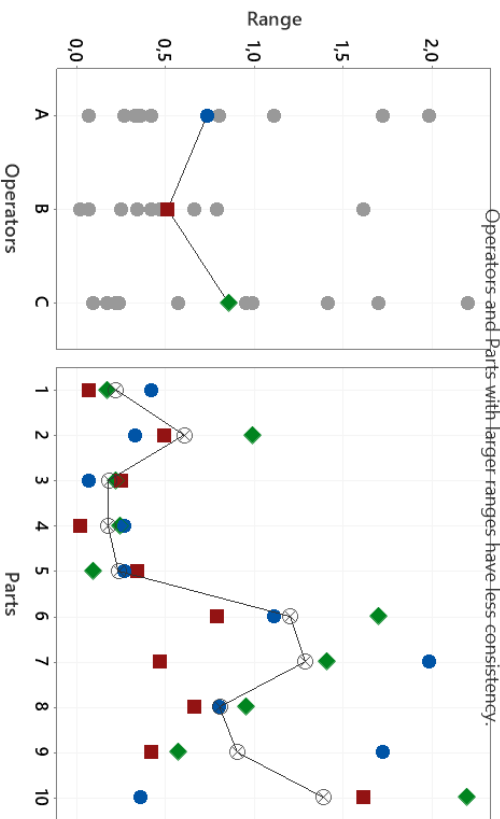
**Reproducibility — Operator by Part Interaction**  
Look for abnormal points or patterns.



**Reproducibility — Operator Main Effects**  
Look for operators with higher or lower averages.



**Test-Retest Ranges (Repeatability)**  
Operators and Parts with larger ranges have less consistency.



Source	STDev	%Study Variation	%Tolerance
Total Gage	0.568	48.69	113.68
Repeatability	0.524	44.91	104.85
Reproducibility	0.220	18.82	43.93
Operator	0.220	18.82	43.93
Part-to-Part	1.020	87.34	203.92
Study Variation	1.167	100.00	233.47

Tolerance (upper spec - lower spec): 3

The Operator by Part interaction was not statistically significant and was removed from the table.