



# Laskentaohjelma mittausepävarmuuden määrittämiseen

Standardin ISO 15530-3 mukainen menetelmä

## 1. Johdanto

Mittausepävarmuuden arviointi on konepajoissa haastava, mutta erittäin tärkeä tehtävä. Aivan erityisen vaikeaa on luotettavasti arvioida koordinaattimittauskoneilla saatavien mittaustulosten epävarmuutta.

ISO GPS-standardi ISO 15530-3 tarjoaa koemittauksiin perustuvan menetelmän, jonka käyttö ei vaadi perehtyneisyyttä epävarmuuden arviointien teoriaan. Standardin mukaisia menetelmiä voidaan käyttää mittausepävarmuuden arvioinnin lisäksi mittausepävarmuuden parantamiseen.

Taulukko 1 Samanlaisuusvaatimukset

Ominaisuus	Vaatimukset	
Mitalliset ominaisuudet	Pituusmitat	Samanlaisuus: ± 25 mm alle 250 mm:n mitoille ± 10 % yli 250 mm:n mitoille
	Kulmamitat	Samanlaisuus ± 5°
Muodot ja pinnankarheus	Toiminnallisesti samanlainen	
Materiaali (so. Lämpöpiteneimis-kerroin, kovuus ja joustavuus)	Toiminnallisesti samanlainen	
Mittaustapa	Sama	
Anturirakenne	Sama	

Kaikkien samanlaisuusehtojen on oltava voimassa samanaikaisesti.

Tilanne on yksinkertainen, jos kalibroitu työkappale tai vertailunormaali on aivan

lyhyesti kuvattuna menetelmän ideana on käyttää vertailukappaleita, joille hankitaan kalibrointitodistus akkreditoidusta mittauslaboratoriosta. Vertailukappaletta mitataan sitten yrityksen omilla mittausvälineillä. Mittaustulosten ja kalibrointitodistuksen avulla voidaan sitten laskea käytettävän mittausmenetelmän mittausepävarmuus vertailukappaleen kaltaiselle työkappaleelle. Vertailukappale on valittava siten, että se edustaa mahdollisimman hyvin tuotannossa olevia kappaleita.

Standardissa ISO 15530-3 menetelmän soveltaminen on rajattu vain koordinaattimittauskoneiden epävarmuuden arviointiin, mutta se sopii hyvin kaikille muillekin mittauslaitteille ja mittauksille.

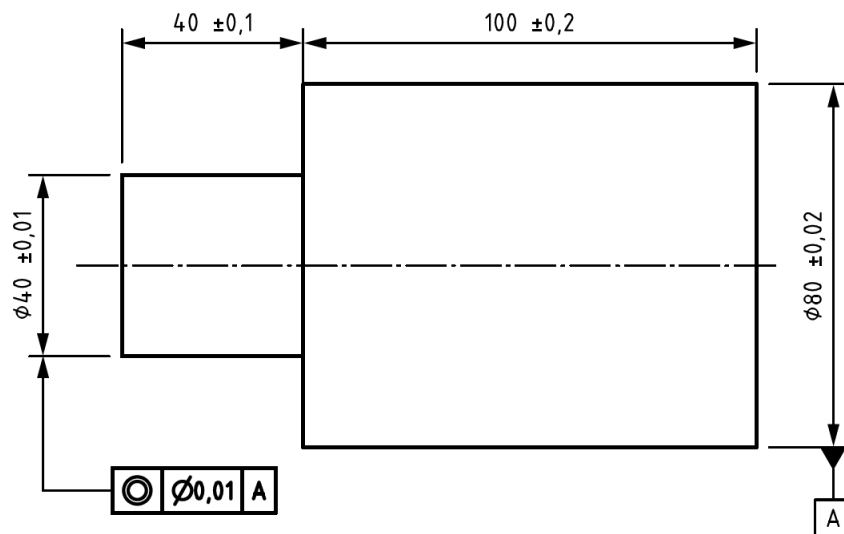
## 2. Menetelmän käyttämisen edellytykset

Menetelmän keskeinen edellytys on mitattavien kappaleitten ja mittausten samanlaisuus. Samanlaisuuteen liittyvät vaatimukset on esitetty taulukossa 1.

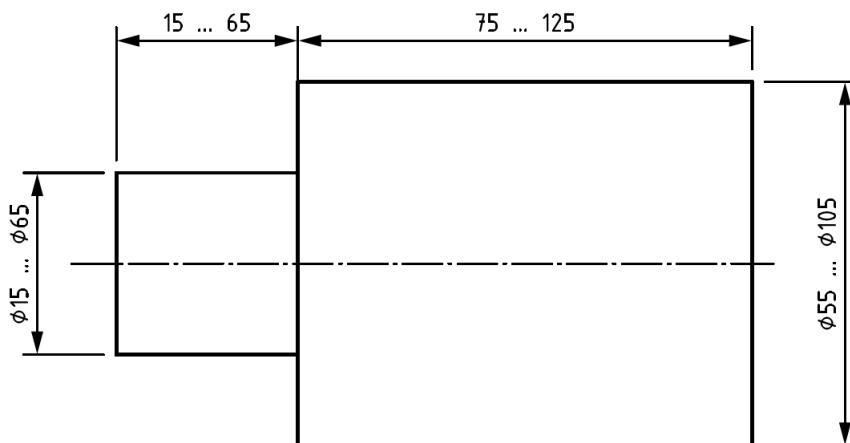
samantyyppinen kuin ne tavalliset työkappaleet, joihin mittausepävarmuusarviota käytetään.

Tilanne on yksinkertainen myös silloin, jos mittausepävarmuutta halutaan käyttää esimerkiksi tavallisiin sisä- tai ulkopuolisiin halkaisijamittoihin. Toki tällöinkin on pituusmitan samanlaisuuden lisäksi huomattava vaatimukset samanlaisesta pinnankarheudesta, seinämänpaksuuksista, materiaaliominaisuuksista ja erityisesti koordinaattimittauskoneilla samanlaisesta mittausohjelmasta anturirakenteineen ja liikeratoineen.

Muoto- ja sijaintitoleranssien mittausepävarmuusarvioissa on huomattava, että samanlaisuusvaatimus koskee toleroidun elementin lisäksi myös peruselementtiä. Kuva 1. havainnollistaa samanlaisuusvaatimuksia tapauksessa, jossa käytetään sama-akselisuustoleranssille koemittauksin määriteltyä mittausepävarmuutta.



a) Mittausepävarmuuden määrittämisessä käytettävä vertailunormaali



b) Samanlaisuusehdot täyttävät halkaisija- ja pituusalueet mitattaville tuotantokappaleille

Kuva 1 Esimerkki samanlaisuusvaatimuksista sama-akselisuustoleranssille

### 3. Termit

Taulukko 2 Mittausepävarmuuden laskennassa käytettävät lyhenteet

Merkki	Tulkinta
$b$	Arvioinnissa havaittu systemaattinen virhe
$\Delta_i$	Kalibroidun työkappaleen mitatun ja kalibroidun arvon ero käytettäessä vertailumittausta
$k$	Kattavuuskerroin
$l$	Mitattu mitta
$n$	Toistettujen mittausten lukumäärä
$T$	Työkappaleen tai mittanormaanin lämpötilan keskiarvo
$U_{cal}$	Kalibroidun työkappaleen tai mittanormaanin arvon standardiepävarmuus
$U_p$	Mittausmenetelmän standardiepävarmuus
$U_b$	Systemaattiseen virheen standardiepävarmuus
$U_w$	Systemaattiseen virheen standardiepävarmuus
$U_{wp}$	Kalibroimattoman työkappaleen mekaanisten ominaisuuksien vaihteluun liitetty standardiepävarmuus
$U_{wt}$	Kalibroimattoman työkappaleen lämpöpiteneiskertoimen vaihteluun liitetty standardiepävarmuus
$U_a$	Lämpöpiteneiskertoimen standardiepävarmuus
$U$	Laajennettu mittausepävarmuus
$U_{cal}$	Kalibroidun työkappaleen tai mittanormaanin laajennettu mittausepävarmuus
$X_{cal}$	Kalibroidun työkappaleen tai mittanormaanin parametrin kalibroinnissa mitattu arvo
$y$	Mittaustulos
$y_i$	Mittaustulokset mittausepävarmuutta arvioitaessa
$y_i^*$	Koordinaattimittauskoneen korjaamattomat lukemat mittausepävarmuuden arvioinnissa, kun käytetään vertailumittausmenetelmää
$\bar{y}$	Mittaustulosten keskiarvo

#### 4. Menetelmän käyttö mittausepävarmuuden hallitsemiseksi

Standardin ISO 15530-3 mukaisen menetelmän käyttö edellyttää:

1. Vähintään yhtä vertailukappaletta, jonka oikeat (kalibroidut) mittaustulokset mittausepävarmuuksineen ovat käytettävissä koemittauksissa,
2. normaaleissa mittausolosuhteissa tehtäviä koemittauksia,
3. mittausepävarmuuden laskentaa esimerkiksi liitteenä olevan Excel-taulukon avulla ja
4. määrävälein toistettavia kalibroidun vertailukappaleen mittauksia.

Yrityksen tuotannosta riippuen vertailukappaleeksi valitaan tyypillisiä tuotantokappaleita tai sopivia mittanormaaleja.

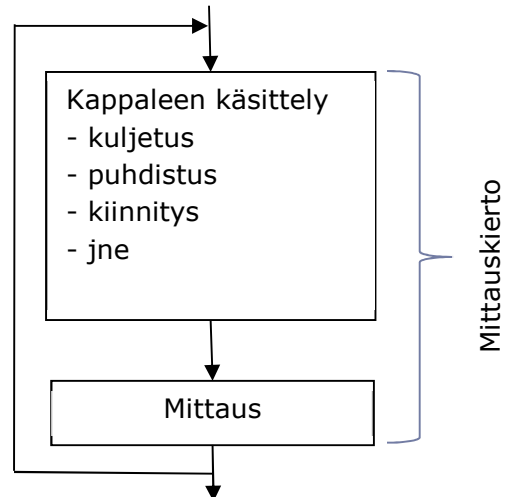
Kun tuotantokappale kalibroidaan jäljittävästi, siitä tulee vertailukappale. Vertailukappaletta ei tavallisesti toimiteta edelleen muun tuotannon mukana vaan se säilytetään ja kalibroidaan aikaan myös uudelleen. Näin kertyy tietoa myös tuotantokappaleitten stabiiliudesta.

HUOM. Standardissa vertailukappaleesta tai mittanormaalista käytetään nimityksiä kalibroitu työkappale ja vertailunormaali.

Kalibroituja vertailukappaleita tarvitaan vähintään yksi. Mittausepävarmuuden selvityksessä käytettävä vertailukappale (tai -kappalet) voidaan mitata itse, kunhan mittaus on jäljitettävissä. Usein

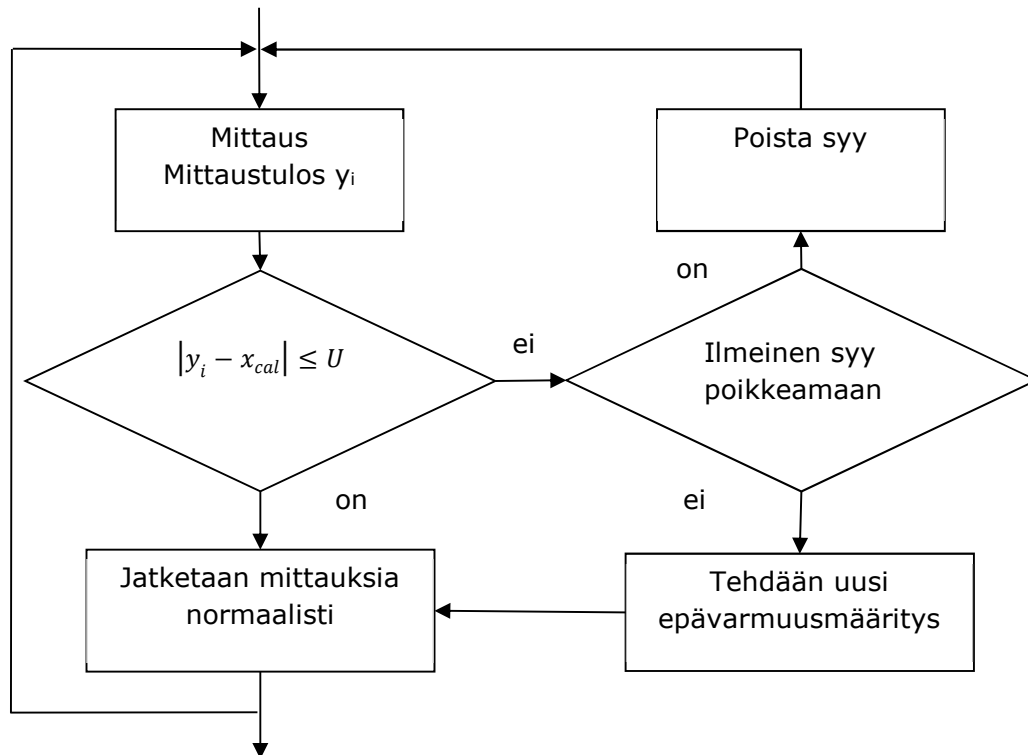
on suositeltavaa teettää mittaus akreditoitussa mittauspaikassa tai kansallisessa mittauslaboratoriossa. Ennen mittauksen teettämistä on syytä varmistaa riittävän pieni mittausepä-varmuus. Liitteenä olevan Excel-taulukon mittausepä-varmuudet ovat suuntaa antavia, mutta ne on syytä varmistaa ennen tilausta. Kalibrointitodistuksessa tai mittausraportissa mittaustulos  $y$  ja sen laajennettu epävarmuus  $U$  pitää ilmoittaa muodossa  $y \pm U$ , missä  $U$  on määritetty kattavuuskertoimella  $k=2$ , vastaa noin 95 % todennäköisyyttä.

Tilastollisen vaihtelun selvittämiseksi vertailukappaleen koemittauksia pitää olla vähintään 20 ja mittaustapahtumia eri aikoina vähintään 10. Jos mittaustapahtumia on kymmenen, tarvitaan vähintään 2 kalibroitu vertailukappaleita. Liitteenä oleva Excel-taulukko lähtee yhden kalibroidun työkappaleen oletuksesta. Koemittaus on täysin samanlainen kuin kaikki tavallisetkin tuotantomittaukset muuten kuin siten, että vertailukappale on yksi mittauksen kohteista (kuva 2).



Kuva 2 Tavallinen mittauskierto (ei vertailumittausta)

Mittausten luotettavuuden pysyvyyden varmistamiseksi kalibroitu vertailukappale on syytä mitata esimerkiksi kerran viikossa uudelleen. Jos mittauksessa saatu tulos on laskettu mittausepävarmuus huomioiden sama kuin kalibrointitulos voidaan mittausepävarmuuslaskelman katsoa edelleen olevan voimassa. Jos mittaustulos poikkeaa kalibrointituloksesta enemmän kuin mittausepävarmuuden verran, pitää selvittää poikkeaman syy tai uusia mittausepävarmuuslaskelma uusilla koemittauksilla (kuva 3).



Kuva 3 Määrävälein tehtävän tarkastusmittauksen arviointi

Kuvassa 3 termi  $y_i$  on tarkastusmittauksessa saatu mittaustulos,  $x_{cal}$  on referenssinormaalina kalibroinnissa saatu tulos ja  $U$  on kyseiselle mittaukselle koemittauksin saatu laajennettu mittausepävarmuus.

#### 5. Menetelmän käyttö mittaustarkkuuden parantamiseksi

Menetelmän käyttö edellyttää:

1. Vähintään kahta vertailukappaletta tai vertailunormaalina, joiden oikeat (kalibroidut) mittaustulokset mittausepävarmuuksineen ovat käytettävissä koemittauksissa,
2. tavallisissa mittausolosuhteissa tehtäviä koemittauksia,
3. mittausepävarmuuden laskentaa esimerkiksi liitteenä olevan Excel-ohjelman avulla,
4. toisen kalibroidun työkappaleen käyttöä vertailunormaalina vertailumittauksissa ja

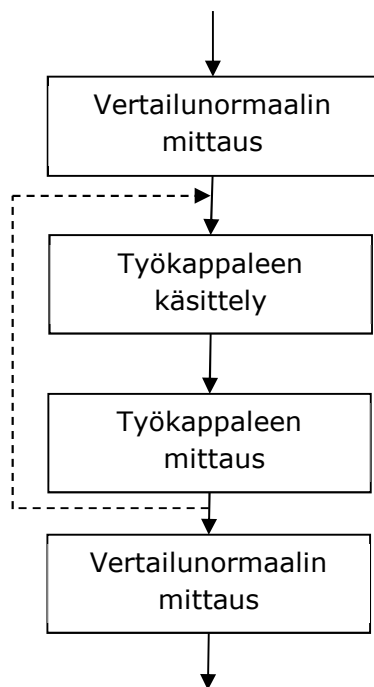
5. määrävälein toistettavia kalibroidun työkappaleen mittauksia.

Vertailumittauksessa tarvitaan aina vähintään kaksi kalibroidusta työkappaleesta muodostunutta vertailukappaletta tai sopivaa mittanormaalina. Toista vertailukappaletta tai mittanormaalina kutsutaan vertailunormaaliksi, koska se on mukana myös kaikissa tavallisissa vertailumittauksissa. Toista vertailukappaletta tai mittanormaalina tarvitaan vertailumittauksen mittausepävarmuuden määrittämiseen liittyvissä koemittauksissa.

Kalibroijujen työkappaleitten kalibroinnin epävarmuuteen on syytä kiinnittää vertailumittauksissa vielä suurempaa huomiota kuin tavallisissa mittauksissa, koska kalibroinnin epävarmuus on usein ratkaisevan suuri lopullisen mittausepävarmuuden kannalta.

Vertailumittauksessa vertailunormaalina mitataan aina kahteen kertaan (Kuva 4). Ensimmäinen mittaus tehdään ennen

mitattavan kappaleen (kappaleitten) mitausta ja toinen mittaus sen jälkeen, kun on mitattu mitattava kappale tai kappaleet. Vertailunormaalille saatujen mitaustulosten keskiarvon poikkeamaa vertailunormalin kalibroidusta mittaustuloksesta käytetään korjauksena mitattavan kappaleen mittaustulokselle. Menetelmä poistaa mittalaitteen systemaattisia virheitä.



Kuva 4 Mittaustapahtuma vertailumittauksessa

Tilastollisen luotettavuuden vuoksi koemittauksia pitää olla vähintään 20 ja mittaustapahtumia eri aikoina vähintään 10. Jos mittaustapahtumia on kymmenen, tarvitaan vähintään 3 kalibroitu työkappaleita tai soveltuvaa mitta-normaalialia. Liitteenä oleva Excel-taulukko lähtee kahden kalibroidun mittanormalin oletuksesta.

Mittausten luotettavuuden pysyvyyden varmistamiseksi kalibroitu työkappale on syytä mitata esimerkiksi kerran viikossa uudelleen. Jos mittauksessa saatu tulos

on laskettu mittausepävarmuus huomioi-den sama kuin kalibrintituloksesta voidaan mittausepävarmuuslaskelman katsoa edelleen olevan voimassa. Jos mittaustulos poikkeaa kalibrintituloksesta enemmän kuin mittausepävarmuuden verran pitää selvittää poikkeaman syy tai uusia mittausepävarmuuslaskelmaa uusilla koemittauksilla.

#### 6. Excel-laskentaohjelman käyttö

Tähän artikkeliin liittyvän Excel-tiedoston taulukot ovat avoimia. Niistä kannattaa ottaa varmuuskopio sen varalle, että joku sattuu muuttamaan taulukoissa kohtia, joita ei saisi muuttaa. Taulukoissa, joissa laskentaa suoritetaan, on lähtökohtana se, että vain keltaisiin ruutuihin tulee syöttää pyydettyjä arvoja.

Koska taulukot ovat avoimia niitä voi muokata mieleisekseen. Ei-vertailumittauksen epävarmuustaulukossa on valmiina paikka viidelle mitalle, joista esimerkiksi on käytetty kolme. Haluttaessa taulukkoa voi käyttää esimerkiksi vain yhdenkin mitan mittausepävarmuuden selvittämiseen. Vastaavasti taulukkoa voi laajentaa viittä useammallekin mitalle.

Tietyn yrityksen omiin tarpeisiin laaditun raportointipohjan laadinta etukäteen on vaikeaa. Siksi mallissa on vain yksi esimerkki.

Raportointisivuille voidaan laittaa esimerkiksi seuraavia tietoja:

- yrityksen nimi
- mittauskoneen tyyppi ja numero
- työkappaleen nimitys ja piirustusnumero
- tietoa edellisistä kontrollimittauksista
- tuloksia edelleen toimitettujen kappaleitten mitoista
- jne.

## 7. Epävarmuuslaskennan perusteet

Kalibroititodistuksessa tai mittausraportissa mittaustulos  $y$  ja sen laajennettu epävarmuus  $U$  pitää ilmoittaa muodossa  $y \pm U$ , missä  $U$  on määritetty kattavuuskertoimella  $k=2$ , vastaa noin 95 % todennäköisyyttä.

Neljä mittausepävarmuustekijää on periaatteessa otettava huomioon mittauksia tehtäessä. Niiden standardiepävarmuudet on esitetty seuraavasti:

$u_{cal}$  kalibroititodistuksessa annettu kalibroidun työkappaleen kalibroinnin standardiepävarmuus,

$u_p$  mittausmenetelmän määritelty standardiepävarmuus (kaava 1),

$u_b$  kalibroitu työkappaletta käyttäen arvioitu mittausprosessin systemaattiseen virheen standardiepävarmuus

$u_w$  materiaaliin ja valmistusvaihteluihin liittyvä standardiepävarmuus (erot lämpöpitenemiskertoimissa, muotovirheissä, pinnankarheudessa, joustavuudessa ja plastisuudessa),

Minkä tahansa mitatun suureen laajennettu mittausepävarmuus  $U$  lasketaan näistä standardiepävarmuuksista seuraavasti:

$$U = k \times \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2} \quad 1)$$

Kattavuuskertoimeksi  $k$  suositellaan valittavaksi  $k = 2$  vastaa 95% n todennäköisyyttä.

Taulukko 3 Epävarmuuskomponentit ja niiden huomioiminen mittausepävarmuusarviossa

Epävarmuustekijä	Arviointimenetelmä (GUM:n mukaan <sup>a</sup> )	Merkintä
Koordinaattimittauskoneen geometriset virheet	A	Yhdistettynä $u_p$
Koordinaattimittauskoneen lämpötila		
Koordinaattimittauskoneen vällys		
Työkappaleen lämpötila		
Anturijärjestelmän systemaattinen virhe		
Koordinaattimittauskoneen toistettavuus		
Koordinaattimittauskoneen asteikon resoluutio		
Koordinaattimittauskoneen lämpötilagradientit		
Anturijärjestelmän satunnaiset virheet		
Anturin vaihdon epävarmuus		
Menetelmästä johtuvat virheet (kiinnitys, käsittely, jne.)		
Liasta aiheutuvat virheet		
Mittausstrategiasta johtuvat virheet	B	$u_{cal}$
Kalibroidun työkappaleen kalibroinnin epävarmuus		
Kaikki tekijät, jotka vaikuttavat termiin $u_p$ ja lämpötilaolosuhteet kalibroidun työkappaleen arvioinnissa	B	$u_b$
Työkappaleen ja kalibroidun työkappaleen erot <ul style="list-style-type: none"> <li>pinnankarheus</li> <li>muoto</li> <li>lämpöpitenemiskerroin</li> <li>joustavuus</li> </ul>	A tai B	$u_w$
HUOM. Mittausepävarmuustekijöitten lista voi olla epätäydellinen		
a GUM = ISO/IEC Guide 98-3		



Yksittäiset mittausepävarmuustekijät on arvioitu seuraavasti.

**Kalibroidun työkappaleen standardiepävarmuus  $u_{cal}$**

Standardiepävarmuus  $u_{cal}$  lasketaan kalibrintitodistuksen antamista laajennetusta mittausepävarmuudesta  $U_{cal}$  ja kattavuuskertoimesta  $k$ .

$$u_{cal} = U_{cal}/k$$

Tarkkaa huomiota on kiinnitettävä GUM:n kohtaan 3.3.2 (ISO/IEC Guide 98-3:2008) varmistettaessa, että mittausepävarmuus edustaa samaa mittauskohdetta, jota mittaauksessa on käytetty. Jos näin ei ole, pitää harkita lisää mittausepävarmuustekijöitä.

**Mittausmenetelmän mittausepävarmuus (standardipoikkeama, systemaattinen virhe ja systemaattisen virheen standardipoikkeama)**

**Mittausmenetelmän standardipoikkeama  $u_p$**

Standardipoikkeama  $u_p$  määritetään seuraavasti

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Missä

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$n$  on mittaustulosten lukumäärä.

**Systemaattinen virhe  $b$**

Useimmissa tapauksissa systemaattinen virhe  $b$  kalibroidun työkappaleen koordinaattimittauskoneella saadun arvon  $y_i$  ja kalibroidun arvon  $x_{cal}$  välillä voidaan huomata:

$$b = \bar{y} - x_{cal}$$

GUM:n suosituksen mukaan mittaustuloksia pitäisi korjata systemaattisen vaikutuksen määrällä. Tapauksissa, missä tämä ei kenties ole mahdollista, mittaus voidaan ilmaista:

$$Y = y - b \pm U$$

On äärimmäisen tärkeää, että yksittäiset arvot listataan kalibrintitodistuksessa erikseen.

**Systemaattisen virheen standardipoikkeama  $u_b$**

Systemaattinen virhe  $b$  on arvioitu 20:llä (tai useammalla) kalibroidun työkappaleen mittauksella. Virheeseen  $b$  liittyvä standardipoikkeama sisältää näitten mittausten keskiarvon standardipoikkeaman. Tämä keskiarvon standardipoikkeama, tilastotieteellinen suure, on pieni, koska vaatimuksena on vähintään 20 mittausta ja se voidaan jättää huomaamatta tässä arviointi prosessissa. Kuitenkin standardiepävarmuus  $b$  sisältää myös vaikutuksen kalibroidun työkappaleen lämpöpiteneiskertoimen epävarmuudesta. Tämä tekijä ei ole hylättävissä ja se pitää lisätä (koordinaattimittauskoneille, joissa on ja joissa ei ole lämpötilakompensointia).

Tässä tapauksessa epävarmuus  $u_b$  lasketaan kaavalla:

$$u_b = (T - 20 \text{ °C}) \times u_a \times l$$

missä:

$u_a$  on kalibroidun työkappaleen lämpöpiteneiskertoimen standardiepävarmuus; se on tavallisesti sama kuin työkappaleitten lämpöpiteneiskertoimen standardiepävarmuus. Erikoistapauksessa, missä myös kalibroidun työkappaleen lämpöpiteneiskerroin on kalibroitu ja mittausepävarmuuden arvioinnissa käytetty koordinaattimittauskone käyttää lämpötilakompensointia, kaavan terminä  $u_a$  käytetään kalibroidulle lämpöpiteneiskertoimelle ilmoitettua epävarmuutta.

$T$  on kalibroidun työkappaleen lämpötilojen keskiarvo mittausepävarmuuden arviointiprosessin aikana.

$l$  on mitattu mitta.

HUOM. 1 Standardiepävarmuuden  $u_b$  kaava on sama epävarmuudelle  $u_{wt}$ ; se laskee sekä kalibroidun työkappaleen epävarmuuden että mitattavien kalibroimattomien työkappaleitten lämpöpitenemiskertoimien vaihtelun.

HUOM. 2 Termi  $u_b$  on tarpeen sekä koordinaattimittauskoneille, jotka käyttävät lämpötilakompensointia, että niille, jotka eivät käytä. Ensimmäisessä tapauksessa tämä epävarmuus edustaa virheelliseen lämpöpitenemisen kompensointiin liittyvää virhettä ja jälkimmäisessä tapauksessa se edustaa kalibroidun työkappaleen lämpöpitenemiskertoimen ja kalibroimattomien työkappaleitten keskimääräisen lämpöpitenemiskertoimen eroa.

### Valmistusprosessin standardiepävarmuus $u_w$

Kalibroimattomien työkappaleitten valmistusprosessin muutoksista aiheutuvat vaihtelut muotovirheissä ja pinnankarheudessa sekä materiaalieroista aiheutuvat vaihtelut joustavuudessa ja pinnan ominaisuuksissa vaikuttavat mittausten epävarmuuteen. Standardiepävarmuus  $u_{wp}$  kattaa nämä vaikutukset. Huomaa, että kalibroituja työkappaleitten käyttö osittain ottaa huomioon yllä mainitut virhelähteet. Jos käytetään useita kalibroituja työkappaleita ja kaikki mitatut työkappaleet vastaavat yllä mainituilta ominaisuuksiltaan niille asetettuja vaatimuksia, tämä tekijä voidaan luokitella epäoleelliseksi ja siksi hylätä. Samoin, jos kalibroimattomien työkappaleitten vaihtelut ovat vähäpätöisiä, tämä tekijä voidaan luokitella epäoleelliseksi. Jos valmistusprosessin epävarmuustekijöitä ei voida hylätä, termissä  $u_{wp}$  pitää ottaa huomioon lisää tekijöitä. Vastaavat muoto- ja pinnankarheustoleranssit voivat toimia tällaisina tekijöinä.

Lisäksi mitattavien työkappaleitten lämpöpitenemiskerroin on oleellinen

mittausepävarmuustekijä. Tämä suure  $u_{wt}$  lasketaan kaavalla

$$u_{wt} = (T - 20 \text{ °C}) \times u_\alpha \times l$$

missä

$u_\alpha$  on työkappaleitten lämpöpitenemiskertoimen standardipoikkeama, se voidaan arvioida joukosta materiaalitoimitajien toimittamia lämpöpitenemiskertoimen arvoja;

$T$  on työkappaleen lämpötilan keskiarvo mittaustapahtuman aikana, ilmaistuna celsiusasteina;

$l$  on mitattu dimensio.

Sitten  $u_w$  lasketaan seuraavasti:

$$u_w = \sqrt{u_{wt}^2 + u_{wp}^2}$$

## 8. Viitetiedot

Tässä raportissa esitettävät menetelmät pohjautuvat standardiin SFS-EN ISO 15530-3. On suositeltavaa, että standardi on käytettävissä tämän raportin ja laskentaohjelman lisäksi (esim. yksityiskohtien tarkastamista varten ja laatujärjestelmän vaatimusten täyttämiseksi).

Standardeja voi ostaa SFS:n verkkokaupasta [www.sales.sfs.fi](http://www.sales.sfs.fi)