



# Mittausepävarmuus osana kalibroinnin metrologista jäljitettävyyttä

Mäkelä Jonna

OPINNÄYTETYÖ  
Lokakuu 2020

Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Koneautomaatio

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Koneautomaatio

MÄKELÄ, JONNA:

Mittausepävarmuus osana kalibroinnin metrologista jäljitettävyyttä

Opinnäytetyö 56 sivua  
Lokakuu 2020

---

Opinnäytetyö laadittiin Insta ILS Oy:lle, jonka Part-145 huolto-organisaatio huoltaa ja tarkastaa pääosin ilmailukäytössä olevia lentokone-, testi- ja mittalaitteita. Aiemmin kaikki huolto-, tarkastus- ja kalibrointityöt kirjattiin laitekohtaisille tarkastuspöytäkirjatulosteille. Lisäksi laitteille laadittiin erillinen todistus. Opinnäytetyön tavoitteena oli vähentää näiden paperitulosteiden määrää. Tavoitteena oli myös kehittää kalibrointitoimintaa mittausepävarmuuslaskennan osalta, koska mittausepävarmuus on tärkeä osa kalibroinnin metrologista jäljitettävyyttä. Jälkimmäiseen aiheeseen perehdyttiin erilaisten standardien ja oppaiden sekä VTT Mikesin järjestämän Mittausepävarmuusarviointin jatkokurssin avulla.

Opinnäytetyönä laadittiin tarkastuspöytäkirjapohja, jota on mahdollisuus käyttää sähköisessä muodossa ja joka sisältää menetelmän mittausepävarmuuden määrittämiseksi. Tarkastuspöytäkirjan kansilehti toimii tarvittaessa joko kalibrointitodistuksena tai huoltotodisteena. Tarkastuspöytäkirja laadittiin Microsoft Excel -laskentataulukko-ohjelmistolla, koska se mahdollisti solujen lukitukset ja laskentakaavojen automatisoinnin. Opinnäytetyön raportista laadittiin perehdytysmateriaali erityisesti kalibroinnin mittausepävarmuuden määrittämiseen. Teoriaosuudessa käsiteltiin kalibrointiin liittyviä termejä ja mittausepävarmuuden laskentaperiaatteita. Opinnäytetyön avulla on mahdollista perehtyä mittausepävarmuuden laskentaan suomen kielellä.

Vaikka opinnäytetyön aiheeseen liittyviä erilaisia standardeja ja oppaita on saatavilla, opinnäytetyön materiaali tuo yritykselle mahdollisuuden ottaa mittausepävarmuuslaskelmat käyttöön kattavammin. Microsoft Excel soveltuu hyvin mittausepävarmuuslaskennan harjoitteluun, mutta myös yritysten epävarmuuslaskelmien ylläpitoon. Excelin avulla mittausepävarmuus laaditaan mittaus tulosten yhteyteen samaan tiedostoon. Se ei kuitenkaan sovellu kovin hyvin useita kymmeniä mittauspisteitä sisältäville kalibroinneille tai mittauksille, koska jokainen laskentataulukko on laadittava erikseen. Mittausepävarmuuslaskentaa voisi jatkossa kehittää lisää valmiiden kaupallisten laskentasovellusten avulla.

---

Asiasanat: mittausepävarmuus, kalibrointi, metrologinen jäljitettävyys

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
Machine Automation

MÄKELÄ, JONNA:  
Measurement Uncertainty as Part of Metrological Traceability of Calibration

Bachelor's thesis 56 pages  
October 2020

---

Bachelor's thesis was prepared for the Part-145 maintenance organization of Insta ILS Oy, which operate in the field of aviation. The purpose of thesis was to create a digital used test data report which would also contain measurement uncertainty. Measurement uncertainty is a very important factor in metrological traceability of calibration. The data related to measurement uncertainty were collected from different standards and guides and the continuation course of the VTT Mikes.

The test data report was prepared with the Microsoft Excel spreadsheet program because of its locking system and automatic calculation possibilities. The cover page of the test data report can be used either as certificate of calibration or a certificate of maintenance. Different calibration terms and the calculation principle of the measurement uncertainty of calibration were processed in the theory part of thesis.

With the help of Microsoft Excel, it was possible to include the measurement uncertainties and the measurement results in one file. Even though Excel is quite good for calculating measurement uncertainty, it is not very well suited for the task when there are too many measurement points. The uncertainty calculation process could be developed further using other commercial calculating applications in the future.

---

Key words: measurement uncertainty, calibration, metrological traceability

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	YRITYS .....	7
3	MITTALAITTEEN KALIBROINTIIN LIITTYVIÄ KÄSITTEITÄ .....	9
	3.1 Kalibrointi .....	9
	3.2 Metrologinen jäljitettävyys .....	10
	3.3 Akkreditoitu kalibrointi .....	11
	3.4 Validointi ja varmentaminen .....	12
	3.5 TAR ja TUR .....	14
	3.6 Mittausvirhe ja korjaus .....	15
4	MITTAUSEPÄVARMUUS .....	17
	4.1 Mitä on mittausepävarmuus? .....	17
	4.2 Lähtö- ja tulosuureet .....	19
	4.3 Standardiepävarmuuden arviointi .....	20
	4.3.1 A- ja B-typin epävarmuustekijät .....	20
	4.3.2 Todennäköisyysjakaumat .....	21
	4.4 Herkkyyskerroin ja epävarmuus .....	27
	4.5 Korrelaatio .....	29
	4.6 Yhdistetty standardiepävarmuus .....	31
	4.7 Kattavuuskerroin ja efektiivinen vapausaste .....	32
	4.8 Laajennettu mittausepävarmuus .....	35
	4.9 Mittaustuloksen esittäminen .....	36
5	TULOKSET .....	39
	5.1 Esimerkki mittausepävarmuuden laskennasta .....	39
	5.1.1 Esimerkki korrelaatiosta .....	46
	5.2 Sähköisesti täytettävä tarkastuspöytäkirja .....	49
6	POHDINTA .....	52
	LÄHTEET .....	54

**LYHENTEET JA TERMIT**

BIPM	Kansainvälinen paino- ja mittaustoimisto (International Bureau of Weights and Measurements)
EA	Euroopan akkreditoinnin yhteistyöjärjestö (the European co-operation for Accreditation)
EASA	Euroopan lentoturvallisuusvirasto (European Aviation Safety Agency)
FINAS	FINAS-akkreditointipalvelu (Finnish Accreditation Service)
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardisoimisjärjestö (International Electrotechnical Commission)
ILAC	Kansainvälinen laboratorioiden ja tarkastuslaitosten akkreditointijärjestö (International Laboratory Accreditation Cooperation)
ISO	Kansainvälinen standardisoimisjärjestö (International Organization for Standardization)
NASA	Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintoviranomainen (National Aeronautics and Space Administration)
PART-145	Traficomien myöntämä huolto-organisaation toimilupa
SFS ry	Suomen Standardisoimisliitto
SI	Kansainvälinen mittayksikköjärjestelmä
TAR	Test Accuracy Ratio
Traficom	Liikenne- ja viestintävirasto
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
TUR	Test Uncertainty Ratio
UKAS	Yhdistyneen kuningaskunnan akkreditointipalvelu (UK's National Accreditation Body)
VTT MIKES	Metrologiainstituutti (Suomessa)

## 1 JOHDANTO

Mittausepävarmuus on tärkeä osa metrologisesti jäljitettävää kalibrointia. Kun mittalaitetta kalibroidaan, halutaan tietää minkä verran mittalaite näyttää väärin. Mittaustulokseen ei kuitenkaan voi koskaan luottaa sataprosenttisesti. Tätä mittaustuloksen luotettavuutta arvioidaan mittausepävarmuuden avulla. (FINAS 2016b.) Vaikka aiheesta löytyy paljon erilaisia standardeja ja ohjeita, mittauksen tai kalibroinnin epävarmuuden määrittäminen saatetaan kokea liian haastavaksi toteuttaa riittävällä laajuudella. Epävarmuuslaskelmien laatiminen vaatii harjoittelua ja standardeihin syventyminen saattaa olla työlästä.

Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää Insta ILS Oy:n mittausepävarmuuden laskentamenetelmiä. Teoriaosuuden tavoitteena on luoda suomenkielinen perehdytysmateriaali erityisesti kalibroinnin mittausepävarmuuden määrittämiseen ja niiden ymmärtämiseen. Teoriaosuudesta on hyötyä myös mittaamiseen liittyvissä epävarmuuslaskelmissa, koska laskentaperiaatteet ovat samanlaiset. Perehdytysmateriaalia on tarkoitus hyödyntää yrityksen toiminnassa. Tavoitteena on myös vähentää paperitulosteiden määrää laatimalla sähköisesti täytettävä tarkastuspöytäkirjapohja, joka soveltuu sekä lentokone-, testi- että mittalaitteille. Sen tarkoituksena on korvata tulosteena käytettävät tarkastuspöytäkirjat.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa keskitytään kalibrointiin liittyviin käsitteisiin ja mittausepävarmuuslaskentaan. Kalibrointiin liittyvät käsitteet auttavat ymmärtämään miksi mittausepävarmuus ilmoitetaan kalibrointituloksen yhteydessä. Mittausepävarmuuden laskentaperiaatteet sen sijaan auttavat ymmärtämään mistä kaikista mittausepävarmuus koostuu. Mittausepävarmuuden teoriaosuudesta rajattiin pois muun muassa sovitusyhtälöt ja konvoluutio. Vaikka sähköisesti täytettävä tarkastuspöytäkirja on erittäin tärkeässä osassa yrityksen huoltotoiminnan kehittämistä, tarkastuspöytäkirjan sisältöä ei kuvata tarkasti tässä julkisessa opinnäytetyössä.

## 2 YRITYS

Opinnäytetyö laadittiin Tampereella Sarankulmassa sijaitsevalle Insta ILS Oy:lle, joka on yksi kuudesta Insta Group Oy:n konserniin kuuluvasta toimialayhtiöstä. Insta on perheyritys, jossa jokainen toimialayhtiö on erikoistunut omaan toimialaansa esimerkiksi sähköautomaatioon ja turvalliseen digitalisaatioon. Viisi muuta toimialayhtiötä ovat Insta Automation Oy, Insta Defsec Oy, Insta Digital Oy, Insta Response Oy ja Insta Secrays Oy. Insta ILS Oy on asiantuntija avioniikan, miehittämättömän ilmailun ja korkeateknologian parissa. (Insta n.d.) Ilmailun parissa työskenneltäessä toiminnalle on asetettu paljon erilaisia vaatimuksia esimerkiksi Suomen siviili-ilmailuviranomaisten, Liikenne- ja viestintäviraston (Traficom), Euroopan unionin lentoturvallisuusviraston (EASA) ja Sotilas-ilmailun viranomaisyksikön (SVY) toimesta.

Insta ILS Oy:ssa on sekä huolto- että suunnitteluorganisaatio. Ilmailulaitehuolto eli Part-145 huolto-organisaatio huoltaa erilaisia ilmailuun liittyviä siviili- ja sotilas-ilmailulaitteita. Part-145 tarkoittaa liikenne- ja viestintävirasto Traficom:n myöntämää huolto-organisaation toimilupaa. Lisäksi se tarkastaa ja kalibroi erilaisia mitalaitteita, joita käytetään pääsääntöisesti huolto-organisaation omassa toiminnassa. Kalibrointi on tärkeä osa Part-145 huolto-organisaation huoltotoimintaa, koska esimerkiksi Euroopan Komission asetuksen N:o 1321/2014 (16, 21, 71) mukaan lentokelpoisuuden ylläpidossa käytettävät työvälineet ja laitteet on tarvittaessa kalibroitava. Asetuksen mukaan kalibrointien tulee olla lisäksi hyväksytyjen standardien mukaisia.

Ilmailulaitehuollossa dokumentoinnin ja dokumenttien arkistoinnin tärkeyttä ei voi liikaa korostaa. Esimerkiksi kaikille huollettaville, tarkastettaville ja kalibroittaville laitteille laaditaan tarkastuspöytäkirjat, jotka voivat perustua laitevalmistajien ohjeisiin tai yleisiin standardeihin. Ne sisältävät erilaisia huolto-, mittaus-, testi- ja/tai kalibrointikohtia. Tarkastuspöytäkirjat laadittiin aiemmin vain Microsoft Word -tekstinkäsittelyohjelmistolla. Tarkastuspöytäkirjan laatija ja hyväksyjä allekirjoittivat tarkastuspöytäkirjan käsin, jonka jälkeen se skannattiin PDF-muotoon huolto-organisaation tietojärjestelmään. Sieltä huoltomekaanikot tulostivat tarkastuspöytäkirjan käyttöönsä. Tarkastuspöytäkirjat täytettiin käsin, ja erilaisissa

laskentaa vaativissa mittauksissa käytettiin laskinta. Työn päätyttyä mekaanikko ja työn tarkastaja allekirjoittivat tarkastuspöytäkirjan, jonka jälkeen se jälleen skannattiin tietojärjestelmään. Huollettaville, tarkastettaville ja kalibroituville laitteille laaditaan tarkastuspöytäkirjan lisäksi erillinen todistus. Lentokoneessa oleville laitteille laaditaan yleisesti ilmailualalla käytössä oleva huoltotodistus, mutta testi- ja maalaitteille laaditaan Insta ILS Oy:n oman todistusohjelman mukainen huoltotodiste. Kalibroituville laitteille laaditaan kalibroitodistus. Myös nämä todistukset allekirjoitettiin käsin ja skannattiin tietojärjestelmään. Opinnäytetyön tarkoitus on vähentää paperitulosteiden määrää ja ottaa käyttöön sähköisesti täytettävät tarkastuspöytäkirjat, joissa on sähköiset allekirjoitukset.

### 3 MITTALAITTEEN KALIBROINTIIN LIITTYVIÄ KÄSITTEITÄ

#### 3.1 Kalibrointi

Kokemuksen perusteella kalibrointi ymmärretään eri maissa hieman eri tavalla. Joskus se yhdistetään säätämiseen eli virittämiseen. Ajatellaan, että säädetään mittarin näyttämää kohdalleen, kun kalibroidaan. Kalibrointia saatetaan käyttää myös kuvaamaan laitteen visuaalista tarkastamista tai esimerkiksi testaamista, mikä antaa virheellisen kuvan kalibroinnista. Mutta mitä kalibrointi oikeastaan tarkoittaa?

Kalibroinnit liittyvät moniin mitattaviin suurealueisiin. Mitattavia suureita ovat esimerkiksi vaihto- ja tasasähkösuureet, vääntömomentti, voima, paine, lämpötila, kiihtyvyys, kulma, pituus ja massa. Näitä suureita mitataan erilaisilla mittalaitteilla, ja jotta voidaan todentaa mittausten luotettavuus, mittalaitteet kalibroidaan säännöllisin välein. (FINAS 2019.) Kansainvälisen paino- ja mittaustoimisto BIPM:n julkaiseman oppaan JCGM 200 (2012, 28) ja Suomen Standardisoimisliiton SFS ry:n julkaiseman SFS-OPAS 99 (2010, 37) mukaan kalibroinnissa verrataan keskenään sekä kalibroitavan mittalaitteen näyttämää että kalibroitavaa mittalaitetta tarkemman laitteen kuten mittanormaanin näyttämää. Tästä näyttämien vertaamisesta eli kalibroinnista saadaan mittaustulos määritellyissä olosuhteissa. Kalibrointiin liittyy myös laitteiden mittausepävarmuuksien välinen yhteys.

Kalibroinnissa selvitetään kalibroitavan mittalaitteen virhe eli minkä verran mittalaitteen näyttämä poikkeaa mittanormaanin näyttämästä. Jos mittalaitteen virhe on liian suuri, mittalaite joko viritetään eli säädetään paremmaksi tai mittalaitteen virhe huomioidaan käyttötilanteessa esimerkiksi korjauskertoimen avulla. (FINAS 2016b.) Virittäminen ei kuitenkaan ole kalibrointia, ja mittalaite kalibroidaan uudelleen virittämisen jälkeen (JCGM 200 2012, 28, 37; SFS-OPAS 99 2010, 44). FINAS-akkreditointipalvelun internetsivujen mukaan (FINAS 2016b) kalibroinnin tulee aina sisältää mittausepävarmuus, joka kuvaa kuinka luotettava saatu mittaustulos on. Tämä on ymmärrettävää, koska yhdenkään kalibroinnissa käytetyn laitteen näyttämän ei voida koskaan olettaa olevan täysin oikea.

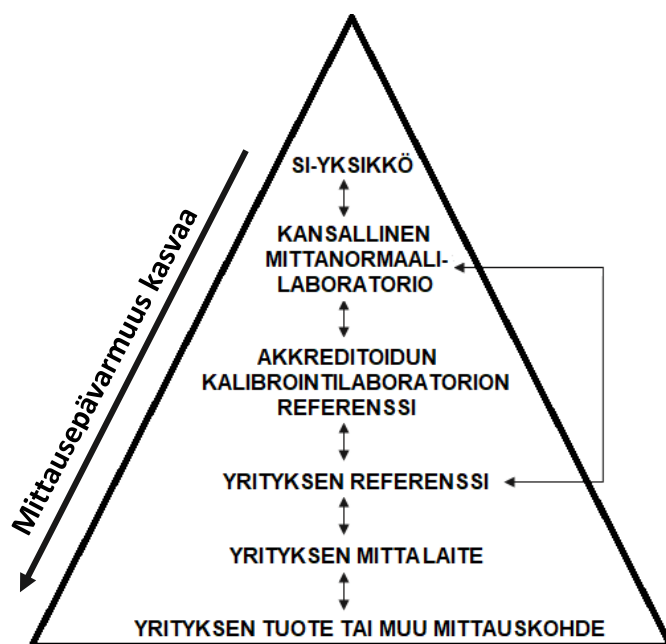
Kalibroinnissa käytettävää tarkempaa laitetta kutsutaan esimerkiksi kalibrintilaitteeksi, kalibraattoriksi, referenssiksi tai mittanormaaliksi. Mittanormaali voi tarkoittaa mittaustajustelmaa, mittalaitetta tai vertailuainetta, jolle on määritetty suureen arvo ja sen mittauserpävarmuus. Mittanormaaleita käytetään erilaisiin tarkoituksiin. Referenssinormaaleilla kalibroidaan muita mittanormaaleita ja käyttönormaaleilla kalibroidaan mittalaitteita. Siirtonormaalit ovat ensisijaisesti tarkoitettu kuljetettaviksi, ja niillä voi olla tähän tarkoitukseen soveltuva rakenne. Primaari- ja sekundaarinormaalit voivat toimia referenssinormaaleina tai kansallisina ja kansainvälisinä mittanormaaleina. (SFS-OPAS 99 2010, 43, 51—54.)

### 3.2 Metrologinen jäljitettävyys

Kalibroitaessa mittalaitteita on tiedettävä kuinka luotettavia mittaukset ovat. Tätä luotettavuutta arvioidaan metrologisen jäljitettävyyden avulla. Kansainvälisen paino- ja mittaustoimisto BIPM:n julkaiseman oppaan JCGM 200 (2012, 29) mukaan metrologinen jäljitettävyys tarkoittaa kalibrintiketjua, joka on katkeamaton, dokumentoitu, ja joka johtaa kansainväliseen mittayksikköjärjestelmään siten, että mittauserpävarmuus kasvaa jokaisessa kalibroinnissa. FINAS-akkreditointipalvelu suosittelee internetsivuillaan (FINAS 2016c), että metrologisesti jäljitettävissä kalibroinneissa kaikki kalibrintiketjun laitteet kalibroidaan säännöllisesti. Kalibrintiketjun laitteet merkitään myös yksilötunnuksilla. SI-järjestelmä on yleensä ylimpänä metrologisesti jäljitettävää katkeamatonta kalibrintiketjua (kuva 1). (FINAS 2016c.) Suomessa SI-järjestelmästä vastaa metrologiainstituutti VTT-MIKES. (FINAS 2016c.) On kuitenkin tärkeää huomata, että kaikki metrologisesti jäljitettävät kalibroinnit eivät aina johda SI-järjestelmään. Näissä tilanteissa on selvitettävä, ovatko referenssin sertifiointi ja kalibrintimenetelmä riittävän päteviä. Jälkimmäinen toteutetaan esimerkiksi yleisten standardien tai vertailumittausten avulla. (SFS 17025 2017, 13.)

Suomen Standardisoimisliiton julkaisemassa standardissa SFS-EN ISO/IEC 17025 (2017, 29) todetaan, että metrologinen jäljitettävyys toteutuu silloin, kun mittaustulos, mittauserpävarmuus dokumentoidaan ja käytettävien referenssien mittauserpävarmuus ja mitattavan suureen tarkkuus huomioidaan.

daan. Edellä kuvatun lisäksi kalibroinnin suorittavan tahon on osoitettava pätevyytensä. Riittävä pätevyys voidaan osoittaa joko kolmannen osapuolen tunnustuksella, asiakkaan suorittamalla ulkopuolisella arvioinnilla tai itsearvioinnilla. (SFS 17025 2017, 29.) Vaikka SFS-EN ISO/IEC 17025-standardi (2017) on suunnattu testaus- ja kalibrointilaboratorioiden pätevyyksien osoittamiseen, se kuvaa hyvin ne menetelmät, joilla kalibrointitulosten voidaan sanoa olevan metrologisesti jäljitettäviä.



KUVA 1. Metrologisesti jäljitettävä kalibrointiketju (FINAS 2016c, muokattu)

### 3.3 Akkreditoitu kalibrointi

Kalibroinnin ei ole oltava akkreditoitu ollakseen kalibrointi, mutta asiakkaan näkökulmasta ajatellen akkreditointi on kuitenkin luotettavuuden ja pätevyyden arviointia helpottava tekijä. Akkreditointi takaa sen, että jokin luotettava taho on arvioinut toiminnan (FINAS 2016a). Kun kalibrointitoiminta on akkreditoitua, asiakas voi luottaa siihen, että kalibroinnit ovat riittävän päteviä, kaikki metrologiseen jäljitettävyyteen liittyvät asiat on otettu huomioon ja akkreditoituja kalibrointeja tekevät laboratoriot toimivat standardin SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 vaatimusten mukaisesti. Standardi vastaa myös standardin ISO 9001 mukaisen toimintajärjestelmän vaatimuksia. (FINAS 2016a; FINAS 2019.) Akkreditointivaatimus voi perustua myös esimerkiksi viranomaisvaatimukseen (FINAS 2016a). Suomessa

akkreditointiin liittyviä pätevyysarviointeja suorittaa FINAS-akkreditointipalvelu. Kalibrointeja suorittavat akkreditoidut kalibrointilaboratoriot saavat FINAS-akkreditointitunnuksen, joka on kuvan 2 mukainen. (FINAS 2019.) Kyseinen tunnus merkitään kalibrointitodistukseen akkreditoiduissa kalibroinneissa. Ajantasaiset akkreditoitujen toimijoiden pätevyysalueet ovat nähtävillä FINAS-akkreditointipalvelun internetsivuilla (FINAS n.d).



KUVA 2. Akkreditoitujen kalibrointilaboratorioiden tunnus (FINAS 2019)

On kuitenkin tärkeää huomata, että vaikka yrityksellä on akkreditointi, se ei välttämättä koske kaikkea yrityksen toimintaa. Akkreditointi koskee niitä pätevyysalueen osa-alueita, jotka ovat hyväksytysti arvioitu (FINAS 2018). Tästä voidaan päätellä, että jos esimerkiksi kalibrointitoiminnassa yrityksen painesuure on akkreditoitu vain absoluuttipaineen osalta, se ei tarkoita, että ylipainemittarin tai yleismittarin kalibrointi olisi metrologisesti jäljitettävissä. Asiakkaan näkökulmasta ajatellen, metrologisesta jäljitettävyydestä ja kalibroinnin laadusta on aina erikseen varmistuttava niissä tilanteissa, joissa suure ei ole akkreditoitu. Tämä on huomioitu myös esimerkiksi Euroopan unionin lentoturvallisuusviraston EASA:n (2015, 35—39) laatimassa ohjeessa ”Foreign Part-145 approvals -Tools & Equipment”. Ohje suosittelee akkreditoitujen kalibrointilaboratorioiden käyttämistä. Jos mittalaitteita ei kalibroida akkreditoidusti, menetelmistä on erikseen varmistuttava useiden vaatimusten mukaisesti.

### 3.4 Validointi ja varmentaminen

Muita kalibroinnin yhteydessä esiintyviä termejä ovat esimerkiksi validointi ja varmentaminen. Validointi on tärkeä osa kalibrointi- ja testauslaboratorioiden pätevyyttä (SFS 17025 2017, 16). Validointi tarkoittaa varmentamista eli validoinnin on tarkoitus selvittää erilaisten vaatimusten sopivuus käyttötarkoitukseen. Varmentamisella tai toisin sanoen verifiointilla todennetaan, täyttääkö esimerkiksi

jokin mittausmenettely tai -järjestelmä sille määritetyt vaatimukset. Tällainen vaatimus voi olla esimerkiksi laitevalmistajan spesifikaationmukaisuus. (SFS-OPAS 99 2010, 39—40.) Kalibrointitoiminnassa validoinnin tarkoitus on arvioida kalibrointimenetelmän luotettavuutta tai tarkastella laitteiden käsittelyä ja kuljetusta. Validoinnin tärkeys nousee esille erityisesti silloin, jos kalibrointimenetelmät kehitetään itse, ne eivät perustu yleisiin standardeihin tai yleisistä standardeista poiketaan jollain tapaa. Jos menetelmiä muutetaan, menetelmät validoidaan uudelleen. (SFS 17025 2017, 16.) Kansainvälisen paino- ja mittaustoimisto BIPM:n julkaiseman oppaan JCGM 200 (2012, 31) mukaan varmentaminen ei ole aina validointia. Tämä voidaan ymmärtää siten, että varmentamisessa ei arvioida menetelmän sopivuutta käyttötarkoitukseen. Tällöin varmentamisen tarkoituksena on vain selvittää, onko menetelmä tai mittaus sellainen kuin sen on luvattu olevan. Toisin kuin kalibroinnissa, varmentamisessa suositellaan mittausepävarmuuden huomioimista. (JCGM 200 2012, 31.) Suosituksesta voidaan päätellä, että mittausepävarmuuden määrittäminen ei ole välttämätöntä.

Mittausprosessien ja -laitteistojen vaatimuksiin liittyvässä standardissa SFS-EN ISO 10012 (2003, 10) käsitellään metrologista varmentamista, jonka sen sijaan kuvataan tarkoittavan niitä toimintoja, joilla varmistetaan, että mittauslaitteisto soveltuu käyttötarkoitukseensa. Metrologiseen varmennukseen sisältyy yleensä myös kalibrointi tai jokin muu todentaminen sekä tarvittaessa virittäminen. Tärkeänä pidetään myös sitä, että mittausepävarmuus olisi mittausvirheen lisäksi mittauslaitteiston vaatimusrajojen sisällä. (SFS 10012 2003, 12, 20.) Varmentamiseen liittyy myös lakisääteinen varmentaminen, jos laki tai erilaiset direktiivit edellyttävät varmentamista. Lakisääteinen varmennus on vaatimuksena esimerkiksi kaupoissa käytettävillä vaaoilla. Lakisääteisessä varmennuksessa mittalaitte tarkastetaan siten, että sen mittaustulokset ovat määritettyjen varmennusvirherajojen sisällä. Lisäksi mittalaitteen tyyppitarkastuksessa ja esimerkiksi määräaikaistarkastuksessa todennetaan mittalaitteen oikeanlainen toiminta. Edellä kuvatun lisäksi erona kalibrointiin on se, että lakisääteisessä varmennuksessa mittausepävarmuutta ei määritetä, ja mittalaitteen näyttämän oikeellisuutta ei varmennuksen jälkeen epäillä. Suomessa lakisääteisiä varmennuksia tekee Turvallisuus ja kemikaalivirasto Tukes:n hyväksymät tarkastuslaitokset. (Ojanen-Saloranta ym. 2017, 13—14.)

### 3.5 TAR ja TUR

Edellisessä luvussa kuvattujen termien lisäksi saattaa kalibroinnin yhteydessä tulla esille myös termit TAR ja TUR. TAR (Test Accuracy Ratio) kuvaa mitattavan kohteen tarkkuuden ja mittalaitteen tarkkuuden suhdetta. Kalibroinnissa tämä tarkoittaa kalibroitavan tai tarkastettavan laitteen tarkkuuden suhdetta mittanormaalina toimivan kalibrintilaitteen tarkkuuteen. Laskennan tarkoituksena on selvittää, onko kalibrintilaite riittävän tarkka kalibrointiin. Kun tiedetään laitteiden tarkkuudet eli spesifikaatiot, TAR on

$$\text{TAR} = \frac{\pm \text{Tarkastettavan laitteen tarkkuus}}{\pm \text{Kalibrintilaitteen tarkkuus}}. \quad (1)$$

Jos  $\text{TAR} \geq 4$ , kalibrintilaite on riittävän tarkka kalibrointiin. TAR soveltuu esimerkiksi uusien mittavälineiden valintaan. (Mitutoyo 2018, 1—2.)

Toinen vastaavanlainen laskentamenetelmä TUR (Test Uncertainty Ratio) vertaa mitattavan kohteen tarkkuutta kalibrintilaitteen mittausepävarmuuteen. Kun tiedetään tarkastettavan laitteen tarkkuus ja kalibrintilaitteen laajennettu mittausepävarmuus  $U$ , TUR on

$$\text{TUR} = \frac{\pm \text{Tarkastettavan laitteen tarkkuus}}{\pm \text{Kalibrintilaitteen mittausepävarmuus}}. \quad (2)$$

Jos  $\text{TUR} \geq 4$ , kalibrintilaite on riittävän tarkka kalibrointiin. TUR soveltuu kalibrintilaitteen valintaan, koska se huomioi myös mittausepävarmuuden. (Mitutoyo 2018, 1—2.) Laskelmista voidaan päätellä, että on suositeltavaa laskea sekä TAR että TUR, kun halutaan selvittää, onko kalibrintilaite riittävän tarkka. TAR:n ja TUR:n määrittäminen ei ole kuitenkaan riittävää kuvaamaan koko kalibroinnin luotettavuutta, koska kalibrintilaitteen lisäksi kalibrointiin vaikuttaa paljon muitakin mittausepävarmuustekijöitä (Beamex n.d). Beamexin (n.d) internetsivuilla todetaan, että on suositeltavaa laskea aina koko kalibroinnin mittausepävarmuus, koska se sisältää myös esimerkiksi mittausmenetelmän arvioinnin. Myös standardi SFS-EN ISO 10012 (2003, 38) painottaa koko mittausprosessin mittausepävarmuuden huomioimisen tärkeyttä, kun mittauslaitteistoa valitaan käyttökohteeseen.

### 3.6 Mittausvirhe ja korjaus

Kalibroinnin tarkoitus on selvittää minkä verran kalibroitava laite näyttää väärin eli mikä on kalibroitavan laitteen virhe (FINAS 2016b). Jos esimerkiksi kalibroinnissa saadaan mittanormaalimittaus tulokseksi  $x_{\text{ref}}$  ja kalibroitavan laitteen tai mittalaitteen mittaus tulokseksi  $y$ , kalibroitavan laitteen mittausvirhe on

$$y_{\text{err}} = y - x_{\text{ref}}. \quad (3)$$

Mittausvirhe on negatiivinen, kun mittalaitteen mittaus tulos  $y$  on pienempi kuin mittanormaalimittaus tulos  $x_{\text{ref}}$ . Vastaavasti positiivinen virhe ilmaisee, että mittalaitteen mittaus tulos on suurempi kuin mittanormaalimittaus tulos. Mittanormaalimittaus tulosta ei ole kuitenkaan suositeltavaa ajatella ”oikeana” tai ”todellisena” mittaus tuloksena, koska aina sekin sisältää jonkin verran virhettä. Luotettavampi mittaus tulos saadaan, kun laitteen kalibroinnissa saatu mittausvirhe huomioidaan sen käyttötilanteessa. Mittausvirhe voidaan huomioida käyttämällä korjausta, jolloin mittausvirheen etumerkki vaihdetaan. Jos mittausvirhe on negatiivinen, korjaus on positiivinen. Jos esimerkiksi mittanormaalimittausvirhe huomioidaan mittalaitteen kalibroinnissa, lisätään korjaus mittanormaalimittaus tulokseen. Tästä voidaan myös käyttää nimitystä virheen kompensointi. Mittausvirheen kompensoinnissa voidaan käyttää myös korjauskerrointa. Jos mittanormaalimittausvirhe  $x_{\text{cor}}$  huomioidaan mittanormaalimittaus tuloksessa  $x_{\text{ref}}$ , saadaan kalibroitavan laitteen mittausvirheeksi

$$y_{\text{err}} = y - (x_{\text{ref}} + x_{\text{cor}}), \quad (4)$$

jossa  $y$  on kalibroitavan laitteen mittaus tulos. (EA-4/02 2013, 5; JCGM 100 2008, 36, 50; Ojanen-Saloranta ym. 2017, 11; SFS-OPAS 99 2010, 32, 44.)

Mutta mistä mittausvirheet johtuvat? Tähän ei ole yksiselitteistä vastausta, koska virhelähteitä voi olla useita erilaisia, ja ne vaihtelevat riippuen siitä mitä mitataan. Mittaukseen vaikuttavia erilaisia virhelähteitä on kuitenkin osattava arvioida. Virhearviointia voi helpottaa ajattelemalla virhelähteet joko systemaattisiin tai satunnaisiin virheisiin (Hietala ym.). Systemaattinen virhe kuvaa virhettä, joka ilmenee

toistuvasti, ja sen syynä voi olla esimerkiksi viallinen laite tai virheellinen mittausmenetelmä. Satunnainen virhe sen sijaan ei ole toistuva. Se voi johtua esimerkiksi mittaajan vireystilasta aiheuttaen satunnaisia huolimattomuusvirheitä. Systemaattinen virhe voidaan todennäköisesti poistaa tai sen vaikutusta voidaan pienentää, mutta satunnaisiin virheisiin ei välttämättä voida vaikuttaa. (Hietala ym.; SFS-OPAS 99 2010, 33.)

## 4 MITTAUSEPÄVARMUUS

### 4.1 Mitä on mittausepävarmuus?

Luvussa 3 sivuttiin aihetta, miksi mittausepävarmuus on tärkeää määrittää. Se on tärkeä osa kalibroinnissa saatujen mittaustulosten metrologista jäljitettävyyttä (SFS 17025 2017, 29). Epävarmuusoppaiden perusteella voidaan päätellä, että kalibrointia ei voida oikeastaan sanoa metrologisesti jäljitettäväksi, jos mittaustulokselle ei ole määritetty mittausepävarmuutta. Mitä alempana kalibrointiketjussa ollaan (kuva 1), sitä suurempi mittausepävarmuus mittaauksella on. (FINAS 2016b). Kun kyse on mittaamisesta, mittaustuloksia on voitava pitää luotettavina (JCGM 100 2008, viii). Mittausepävarmuuden määrittäminen on usein myös vaatimuksena erilaisissa standardeissa kuten esimerkiksi testaus- ja kalibrointilaboratorioiden pätevyysvaatimuksia koskevassa standardissa SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 ja mittausten hallintajärjestelmiä koskevassa standardissa SFS-EN ISO 10012:2003. Voidaan päätellä, että laadukkaassa mittaamisessa on tärkeää erilaisten ulkoisten epävarmuustekijöiden vaikutuksien arvioiminen. Mittausepävarmuus voidaan laskea esimerkiksi Microsoft Excel -laskentataulukko-ohjelmistolla tai jollakin mittausepävarmuuslaskentaan laaditulla kaupallisella sovelluksella kuten GUM Workbench -sovelluksella (Hogan 2016).

Mittausepävarmuus kuvaa mittaustuloksen arvioitua hajaantumista mittaustuloksen ympärille. Se ilmoitetaan laajennettuna mittausepävarmuutena  $U$ , ja hajaantumista kuvataan etumerkillä  $\pm$ . Mittausepävarmuus kertoo minkä verran mittaustulos voi korkeintaan poiketa mitatusta, koska mittaustuloksen ei voida koskaan olettaa olevan sataprosenttisen oikea. (JCGM 100 2008, 2, 23.) Koska mittausepävarmuus perustuu todennäköisyyslaskentaan, on hyvä muistaa, ettei mittausepävarmuuskaan ole koskaan sataprosenttisen luotettava. Jotta epävarmuusarviointien määrittäminen olisi mahdollisimman luotettavaa ympäri maailman, on määritetty yleiset periaatteet, joilla epävarmuusarvioiteja laaditaan (JCGM 100 2008, viii). Mittausepävarmuuden määrittäminen vaatii harjoittelua, ja mittauskokemuksella on mahdollista arvioida helpommin mittaustilanteeseen liittyviä epävarmuustekijöitä. Erilaisista standardeista ja oppaista löytyy hyviä esimerkkejä, joita on myös suositeltavaa hyödyntää. Oppaiden esimerkkejä on hyvä

käyttää apuna myös siksi, että epävarmuuslaskelmista tulisi realistisempia. Epävarmuustekijöiden arvioimisessa saattaa nimittäin käydä helposti siten, että mittausepävarmuus arvioidaan varmuuden vuoksi hieman suuremmaksi, jotta sen käyttäminen tuntuisi turvallisemmalta. (JCGM 100 2008, 54.)

Akkreditoituilla kalibrointilaboratorioilla mittausepävarmuuden määrittäminen perustuu yleensä Euroopan akkreditoinnin yhteistyöjärjestö EA:n laboratoriokomitean julkaisemaan oppaaseen EA-4/02 M:2013 (FINAS 2019). Toinen hyvä mittausten epävarmuuslaskentaan laadittu opas on Kansainvälisen paino- ja mittaustoimisto BIPM:n julkaisema opas JCGM 100:2008, josta käytetään myös nimitystä GUM. Standardeja tutkimalla voidaan todeta, että mittausepävarmuuslaskennan periaatteet ovat samanlaiset sekä mitaamisessa että kalibroinnissa. Yleensä epävarmuustekijät vaihtelevat riippuen siitä mitä mitataan tai kalibroidaan, mutta molemmissa voi olla myös samanlaisia epävarmuustekijöitä. Esimerkiksi mittaaja voi vaikuttaa mittaustulosten luotettavuuteen molemmissa tilanteissa (Hemminki ym. 2011, 41). Mittaaja voidaan arvioida yhdeksi epävarmuustekijäksi, jos mittaajalla on mittaustulokseen selvästi vaikutusta (Hemminki ym. 2011, 41).

Mittausepävarmuustekijöitä arvioitaessa ja määritettäessä on hyvä tietää myös mikä ei ole mittausepävarmuutta. Edellisessä kappaleessa todettiin, että mittaaja voi vaikuttaa mittaustulokseen. Silloin on kuitenkin tärkeää erottaa mittaajan tekemät virheet. Stephanie Bellin (2001, 10) mukaan mittausepävarmuuslaskennassa ei saa arvioida mittaajan huolimattomuusvirheitä tai osaamattomuutta. Lisäksi mittalaitteen toleranssit, tarkkuus, spesifikaatiot ja mittausvirheet eivät ole mittausepävarmuutta. Ne kuvaavat laitteen ominaisuuksia, ja niitä ei pidä kutsua mittausepävarmuudeksi. (Bell 2001, 10—11.) Mittausepävarmuus kuvaa vain saadun mittaustuloksen luotettavuutta. Mittausepävarmuus saatetaan helposti sekoittaa myös virherajoihin, joita käytetään esimerkiksi erilaisissa laboratoriomittauksissa. Virherajaa kuvataan samanlaisella etumerkillä ( $\pm$ ) kuin mittausepävarmuutta.

## 4.2 Lähtö- ja tulosuureet

Mittausepävarmuusarviointi aloitetaan erilaisten mittausvirhettä mahdollisesti aiheuttavien komponenttien määrittämisestä. Näitä komponentteja voidaan ajatella epävarmuustekijöinä tai tulosuureina. Niille määritetään jokin matemaattisesti kuvaava suuretunnus, joka voi olla esimerkiksi muotoa  $X_i$ , jossa  $i$  on  $1,2,3\dots N$  ja  $N$  on tulosuureiden määrä. (EA-4/02 2013, 5.) Alaindeksin  $i$  ja kirjaimen  $X$  tilalla voidaan käyttää myös muita kuvaavia lyhenteitä tai kirjaimia. Epävarmuustekijöiden määrittämisen tarkoitus on muodostaa funktionaalinen yhteys lähtösuureen  $Y$  kanssa (EA-4/02 2013, 5). Lähtösuuretta  $Y$  voidaan ajatella mitattavana suureena. Suureiden funktionaalista yhteyttä kuvataan kaavalla (5) siten, että lähtösuure on

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (5)$$

jossa  $f$  on mallifunktio, joka kuvaa mittaus- ja arviointimenettelyjä,  $X$  on epävarmuustekijä eli tulosuure ja  $N$  on tulosuureiden määrä. Tulosuureet saadaan joko suoraan mittauksesta tai ulkoisista dokumenteista kuten kalibrointitodistuksista. Suoraan mittauksesta saatavat tulosuureet voivat olla esimerkiksi toistettuja mittauksia tai kokemukseen perustuvia arvioita. (EA-4/02 2013, 5; JCGM 100 2008, 8—9.)

Pienellä kirjaimella kuvattu tunnus  $x_i$  kuvaa tulosuureen  $X_i$  odotettua arvoa tai odotusarvoa esimerkiksi mittaustulosta, korjausta tai korjauskerrointa, jossa  $i$  on  $1,2,3\dots N$  ja  $N$  on tulosuureiden määrä. Mitattavan suureen eli lähtösuureen  $Y$  odotettua arvoa  $y$  voidaan ajatella mittaus- tai kalibrointituloksena. Lähtösuureen odotettu arvo voi olla esimerkiksi mittalaitteen virhe, joka saadaan tulosuureiden odotusarvojen perusteella. Suureiden odotusarvojen funktionaalista yhteyttä kuvataan kaavalla (6) siten, että lähtösuureen mittaustulos eli odotettu arvo on

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N), \quad (6)$$

jossa  $f$  on mallifunktio, joka kuvaa mittaus- ja arviointimenettelyjä,  $x$  on epävarmuustekijän eli tulosuureen odotettu arvo ja  $N$  on tulosuureiden määrä. (EA-4/02 2013, 5; JCGM 100 2008, 9.)

### 4.3 Standardiepävarmuuden arviointi

Standardiepävarmuus kuvaa yksittäisen mittausepävarmuustekijän keskihajontaa, ja sitä kuvataan tunnuksella  $u(x_i)$  (SFS-OPAS 99 2010, 36). Standardiepävarmuus voidaan laskea joko absoluuttisena tai suhteellisena standardiepävarmuutena. Suhteellinen epävarmuus ilmaisee epävarmuuden suhdetta tulokseen, joka voidaan laskea esimerkiksi prosentteina eli sadasosina. Jos mittaustuloksen laajennettu mittausepävarmuus  $U$  ilmoitetaan absoluuttisena tuloksena, sen on oltava samassa mittayksikössä kuin mittaustuloksen. (Hemminki ym. 2011, 35.) Kuitenkaan vielä standardiepävarmuutta arvioitaessa kaikkien tulosuureiden ei ole välttämätöntä olla samassa mittayksikössä.

#### 4.3.1 A- ja B-tyyppien epävarmuustekijät

Standardiepävarmuutta arvioitaessa epävarmuustekijät jaetaan kahteen eri tyyppiin, jotka ovat A ja B. A-tyyppien epävarmuustekijöiden arviointi perustuu tilastotieteeseen. Tilastollinen laskenta perustuu usein mittaustulosten keskiarvon laskentaan. A-tyyppien epävarmuustekijöiden arvioinnissa tärkeää on mittaustulosten otantojen määrä eli toistettavuus. (EA-4/02 2013, 6.) Kun mittausta toistetaan, mittausmenettelyn ja mittausjärjestelmän on oltava samanlaisia ja mittaajien ja ympäristöolosuhteiden on oltava muuttumattomia (SFS-OPAS 99 2010, 33). A-tyyppien arvioitua standardiepävarmuutta laskettaessa, ensin lasketaan mittaustulosten keskiarvon  $\bar{q}$  keskihajonta  $s(q)$ . Mittaustulosten keskiarvo on

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i, \quad (7)$$

jossa  $q_i$  on mittaustulos,  $n$  on mittausten lukumäärä ja  $i$  on 1, 2, 3, ...,  $n$ . Kun mittaustulosten keskiarvo  $\bar{q}$  on laskettu, keskihajonta on

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}. \quad (8)$$

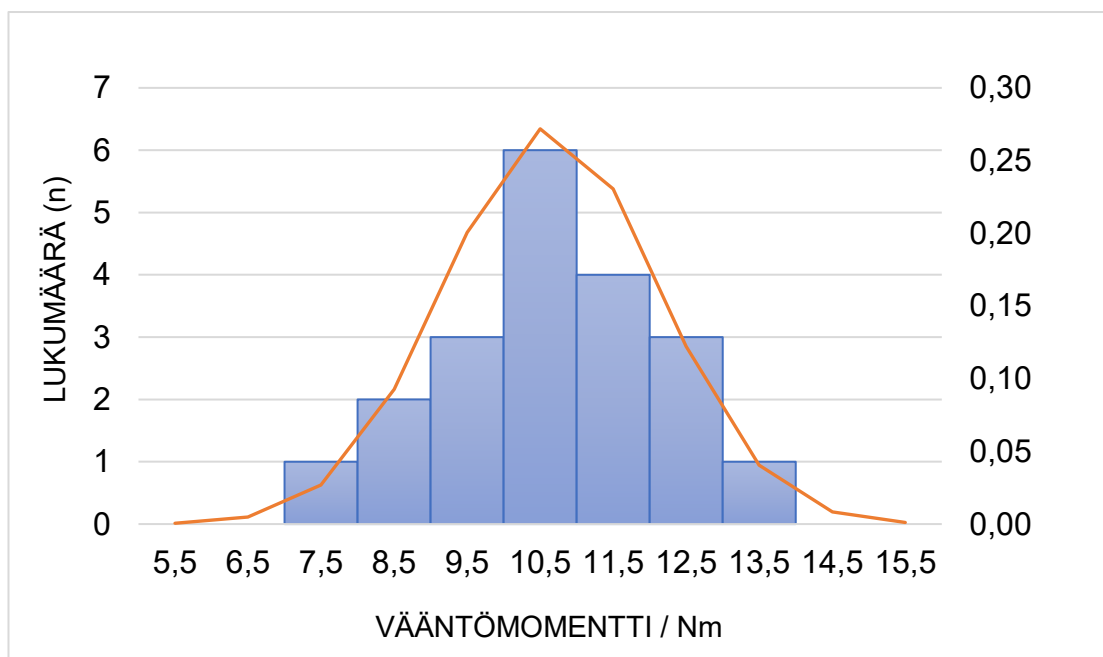
(EA-4/02 2013, 6.) Keskihajonta voidaan laskea mittaustuloksista Microsoft Excel -laskentataulukko-ohjelmiston funktiolla KESKIHAJONTA.S(luku1;[luku2];...). Funktio laskee keskihajonnan " $n-1$ "-menetelmällä, jossa  $n$  on mittausten lukumäärä. Funktiota käytettäessä keskiarvoa ei erikseen lasketa. (Microsoft n.d.a.)

B-tyypin epävarmuustekijöiden arviointi perustuu kaikkeen muuhun kuin tilastolliseen laskentaan. B-tyyppiä käytetään, kun epävarmuustekijä perustuu esimerkiksi yleiseen tieteelliseen lähteeseen, mittauskokemukseen tai valmistajan spesifikaatioihin. Eräs yleisimmistä B-tyypin epävarmuustekijöistä on mittanormaanin mittausepävarmuus. Mittanormaanin aiheuttamaan mittausepävarmuuteen liittyy myös vuosittaisten mittaustulosten ryömintä eli stabiilius. (EA-4/02 2013, 7.) Stabiilius kuvaa sitä kuinka hyvin metrologiset ominaisuudet pysyvät muuttumattomina ajan kuluessa (SFS-OPAS 99 2010, 48). Eräs melko yleinen epävarmuustekijä on myös kalibroitavan mittalaitteen resoluutio eli näyttölaitteen erottelukyky (JCGM 100 2008, 6). Erottelukyky tarkoittaa pienintä näyttämän muutosta, joka on silmin havaittavissa (SFS OPAS 99 2010, 48). Muita epävarmuustekijöitä voivat olla esimerkiksi ympäristöolosuhteiden kuten lämpötilan, kosteuden, ilmanpaineen tai värinän vaikutus, mittaajan vaikutus esimerkiksi analogisen viisarimitarin luentatarkkuuteen sekä mittausmenetelmä (JCGM 100 2008, 6). Epävarmuustekijä voi olla myös esimerkiksi hystereesi eli nousevalla ja laskevalla mittaussuunnalla saatujen mittaustulosten erotus (Ojanen-Saloranta ym. 2017, 55, 70). Useista vaihtoehdoista voidaan päätellä, että B-tyypin epävarmuustekijät ovat huomattavasti yleisempiä.

### 4.3.2 Todennäköisyysjakaumat

Todennäköisyysjakauman avulla lasketaan standardiepävarmuuden eli yhden yksittäisen epävarmuustekijän keskihajonta (SFS-OPAS 99 2010, 36). Jakaumatyyppi määrittää standardiepävarmuuden laskennassa olevan jakajan suuruuden (UKAS 2007, 14). Pohditaan todennäköisyysjakaumatyyppin valintaa mittausten toistettavuuden avulla. Jos mittausta toistetaan useita kertoja, millä tapaa mittaustulokset hajaantuisivat, jos niitä kirjattaisiin vaakasuuntaiselle x-akselille? Päätellään, että mittaustulokset hajaantuvat jollakin satunnaisella tavalla sinne

tänne x-akselia. Tällä satunnaisella hajaantumisella on kuitenkin jonkinlainen todennäköisyys. (Bell 2011, 9—10.) Tällaista mittaustulosten hajaantumista kuvaa esimerkiksi normaalijakauma eli Gaussin käyrä, joka on yleisimpiä jakaumatyyppjä. Normaalijakaumassa mittaustulokset hajaantuvat siten, että suurin osa mittaustuloksista on lähellä tavoitearvoa eli mittaustulosten keskiarvoa ja osa hajaantuu pidemmälle (kuvio 1). Kauimpana keskiarvosta on vain yksittäisiä mittaustuloksia. (Bell 2011, 9; JCGM 100 2008, 15—16.)



KUVIO 1. Esimerkki normaalijakaumasta (JCGM 100 2008, 15—16, muokattu)

Kuvion 1 oranssi käyrä kuvaa normaalijakaumaa ja pylväskaavio mittaustuloksia, joista normaalijakauma muodostuu. Kuvio 1 on laadittu Microsoft Excel -laskentataulukko-ohjelmistolla taulukon 1 mukaisista vääntömomentin mittaustuloksista. Mittaustulokset on saatu, kun vääntömomenttiavainta on kuormitettu kuvitteellisesti 20 kertaa samassa mittauspisteessä. Esimerkki perustuu Kansainvälisen paino- ja mittaustoimisto BIPM:n julkaisemaan oppaaseen JCGM 100 (2008, 15—16). Voidaan päätellä, että mittausten toistettavuus on tärkeä osa mittauksen luotettavuutta. Mitä useampi mittaustulos samasta mittauspisteestä saadaan toistamalla samaa mittausta, sitä luotettavampi arvio mittaustuloksen epävarmuudelle saadaan.

TAULUKKO 1. Normaalijakautuneet mittaustulokset (JCGM 100 2008, 15—16, muokattu)

Vaihteluväli: $T_1 \leq T \leq T_2$		Vääntömomentti
$T_1$ / Nm	$T_2$ / Nm	$T$ / Nm
4,5	5,5	N/A
5,5	6,5	N/A
6,5	7,5	6,8
7,5	8,5	8,2; 8,3
8,5	9,5	8,6; 9,1; 9,5
9,5	10,5	9,6; 9,8; 9,9; 10,1; 10,4; 10,4
10,5	11,5	10,7; 11,0; 11,1; 11,2
11,5	12,5	11,6; 11,8 12,4
12,5	13,5	12,7
13,5	14,5	N/A
14,5	15,5	N/A

A-tyyppin epävarmuustekijä on usein normaalijakautunut, mutta ei kuitenkaan aina. Kun A-tyyppin epävarmuustekijän keskihajonta  $s(q)$  on laskettu kaavalla (8) ja A-tyyppin epävarmuustekijä arvioidaan normaalijakautuneeksi, A-tyyppin epävarmuustekijän aiheuttama standardiepävarmuus on

$$s(\bar{q}) = u(\bar{q}) = u(x_i) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}}, \quad (9)$$

jossa  $n$  on mittausten lukumäärä,  $i$  on 1,2,3... $N$  ja  $N$  on tulosuureiden määrä. (EA-4/02 2013, 6—7.) Kun epävarmuustekijänä käytetään kalibrointilaitteen kalibrointitodistuksesta saatavaa mittausepävarmuutta  $U_{\text{ref}}$ , ja jos se on ilmoitettu kattavuuskertoimella  $k$ , kalibrointilaitteen aiheuttama standardiepävarmuus on

$$u(x_{\text{ref}}) = \frac{U_{\text{ref}}}{k}. \quad (10)$$

(UKAS 2007, 14.) Kattavuuskerroin kuvaa laajennetun mittausepävarmuuden luottamustasoa. (JCGM 100 2008, 24.) Jos valmistaja on ilmoittanut kalibrointilaitteen spesifikaation jollakin luottamusvälillä tai kattavuuskertoimella, voidaan

spesifikaatiota käyttää epävarmuustekijänä. Tällöin spesifikaation aiheuttama standardiepävarmuus on

$$u(x_{\text{spec}}) = \frac{\text{Spesifikaatio}}{k}, \quad (11)$$

jossa  $k$  on kattavuuskerroin. (UKAS 2007, 14.)

Toinen yleinen jakaumatyyppi on tasajakauma, jota käytetään erityisesti B-typin epävarmuustekijöiden jakaumana. Tasajakaumassa mittaustulokset hajaantuvat yhtä tasaisesti joka puolelle määritettyä mittausväliä eli suurimman ja pienimmän lukeman välille. Jos epävarmuustekijä arvioidaan tasajakautuneeksi, epävarmuustekijän eli tulosuureen aiheuttama standardiepävarmuus on

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad (12)$$

jossa  $a$  on ylärajan  $a_+$  ja alarajan  $a_-$  puoliväli,  $i$  on 1, 2, 3... $N$  ja  $N$  on tulosuureiden lukumäärä. Ylä- ja alarajat voivat olla esimerkiksi laitteen spesifikaatio. Kun kaavaan (12) kirjataan yläraja  $a_+$  ja alaraja  $a_-$ , tulosuureen aiheuttama standardiepävarmuus on toisella tapaa esitettynä

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{3}} = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}}. \quad (13)$$

Kaavaa (13) käytetään, jos esimerkiksi ylä- ja alarajat ovat epäsymmetriset. (JCGM 100 2008, 11, 13.) Jos standardiepävarmuus lasketaan tasajakauman tapauksessa suhteellisena, tulosuureen aiheuttama standardiepävarmuus on

$$u(x_i) = \frac{\frac{a}{x_i} \cdot 100 \%}{\sqrt{3}}, \quad (14)$$

jossa  $x_i$  on tulosuureen odotettu arvo ja  $a$  on ylärajan  $a_+$  ja alarajan  $a_-$  puoliväli. (JCGM 100 2008, 13; SFS 6789-2 2017, 22.)

Kalibroitavan laitteen resoluution vaikutus kokonaisepävarmuuteen lasketaan yleensä tasajakauman avulla. Jos digitaalisen vääntömomenttiavaimen resoluutio on 0,01 Nm ja näyttämä ei vaella eli ei huuju, on lukeman oltava vähintään  $\pm 0,005$  Nm, jotta sen muutos näkyisi digitaalinäytöllä. Tällöin resoluution aiheuttamaksi standardiepävarmuudeksi saadaan kaavalla (12)

$$u(x_{\text{res}}) = \frac{0,005 \text{ Nm}}{\sqrt{3}} = 0,0029 \text{ Nm} \approx 0,003 \text{ Nm}.$$

(UKAS 2007, 14.) Jos standardiepävarmuus lasketaan kaavalla (13), resoluution aiheuttamaksi standardiepävarmuudeksi saadaan

$$u(x_{\text{res}}) = \frac{0,005 \text{ Nm} - (-0,005 \text{ Nm})}{2\sqrt{3}} = \frac{0,005 \text{ Nm} - (-0,005 \text{ Nm})}{\sqrt{12}} \approx 0,003 \text{ Nm}$$

(JCGM 100 2008, 13). Jos momenttiavaimen resoluution standardiepävarmuus lasketaan suhteellisena, lasketaan se odotusarvosta, joka tässä esimerkissä on momenttiavaimen mittauspiste eli momenttiavaimen asetettu momentti. Kun momenttiavaimen asetettu momentti on esimerkiksi 10,00 Nm, resoluution aiheuttamaksi suhteelliseksi standardiepävarmuudeksi saadaan kaavalla (14)

$$u(x_{\text{res}}) = \frac{0,005 \text{ Nm}}{10,00 \text{ Nm}} \cdot 100 \% = \frac{0,005}{10} \cdot 100 \% = 0,029 \% \approx 0,03 \%. \quad (15)$$

(JCGM 100 2008, 13; SFS 6789-2 2017, 22.)

Edellä todettiin, että tasajakaumassa mittaustulokset hajaantuvat yhtä tasaisesti joka puolelle määritettyä mittaussväliä. Kolmiojakauman tapauksessa mittaustulokset hajaantuvat yleisemmin lähemmäksi mittausalueen reunoja kuin keskiosaa (JCGM 100 2008, 14). Jos esimerkiksi digitaalisen momenttiavaimen nollalukema huuju enemmän kuin resoluution verran, lisätään nollalukeman "huojunta" mukaan resoluution aiheuttamaan standardiepävarmuuteen. Kun yhdistetään

kaksi tasajakautunutta epävarmuustekijää, niiden yhdistelmä arvioidaan kolmiojakautuneeksi. Kun epävarmuustekijä arvioidaan kolmiojakautuneeksi, epävarmuustekijän eli tulosuureen aiheuttama standardiepävarmuus on

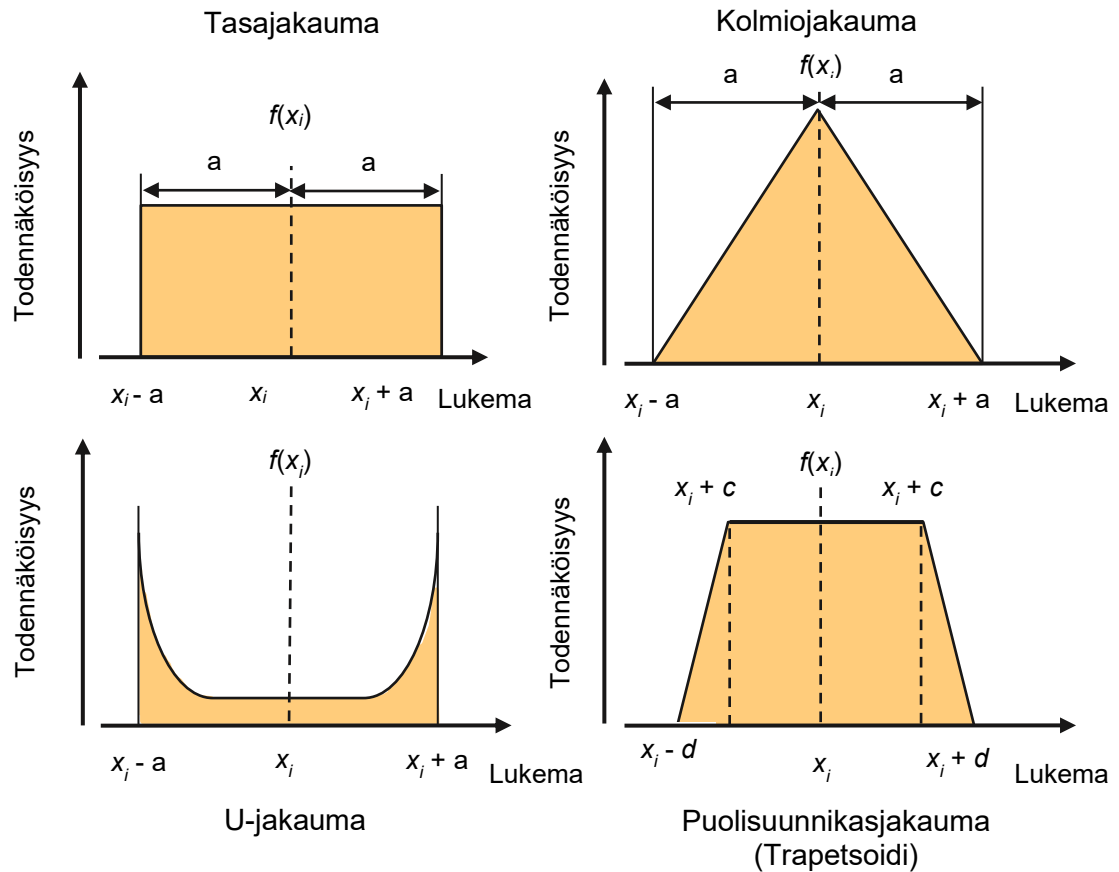
$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}, \quad (16)$$

jossa  $a$  on ylärajan  $a_+$  ja alarajan  $a_-$  puoliväli. (SFS 6789-2 2017, 15; UKAS 2007, 11—12, 14.) U-jakauma on tasa- ja kolmiojakaumaa harvinaisempi. U-jakauman tilanteessa mittaustulokset hajaantuvat sinimuotoisesti. Jos epävarmuustekijä arvioidaan U-jakautuneeksi, tulosuureen aiheuttama standardiepävarmuus on

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{2}}, \quad (17)$$

jossa  $a$  on ylärajan  $a_+$  ja alarajan  $a_-$  puoliväli. (UKAS 2007, 11—12, 14.)

Kuvassa 3 on esitetty tasa-, kolmio-, U- ja puolisuunnikasjakaumat. Kuva perustuu Yhdistyneen kuningaskunnan akkreditointipalvelun UKAS:n julkaisemaan oppaaseen M3003 (2007, 11—12) ja Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintoviranomaisen NASA:n julkaisemaan oppaaseen NASA-HDBK-8739.19-3 (2010, 13, 29—30). Termi  $x_i$  kuvaa suureen odotettua arvoa ja  $a$  kuvaa ylä- ja alarajan puoliväliä. Puolisuunnikasjakaumassa termit  $c$  ja  $d$  kuvaavat ylä- ja alarajoja. Todennäköisyysjakaumat voivat siis vaihdella kaikkien edellä mainittujen jakaumatyyppien välillä. Jakauma voi olla myös jokin muu todennäköisyyslaskentaan perustuva jakaumatyyppi esimerkiksi Lognormaalijakauma (NASA 2010, 13, 47). Oppaiden esimerkkien perusteella voidaan kuitenkin havaita, että normaali-, tasa-, kolmio- ja U-jakaumat ovat yleisimmin käytössä olevia jakaumatyyppejä.



KUVA 3. Tasa-, kolmio-, U- ja puolisuunnikasjakauma (NASA 2010, 13; M3003 2007, 11—12; muokattu)

#### 4.4 Herkkyyskerroin ja epävarmuus

Herkkyyskerroimen  $c_i$  avulla määritetään yksittäisen standardiepävarmuuden vaikutus kokonaisepävarmuuteen. Herkkyyskerroimen avulla myös eri mittayksikössä olevat standardiepävarmuudet lasketaan siten, että kaikki epävarmuudet ovat lopulta samassa mittayksikössä. Herkkyyskerroimen laskenta perustuu osittaisderivointiin tekijän suhteen, jolloin herkkyyskerroin on

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X_1=x_1 \dots X_N=x_N}, \quad (18)$$

jossa  $f$  on mallifunktio,  $X_i$  on tulosuure,  $x_i$  tulosuureen odotettu arvo,  $i$  on 1, 2, 3... $N$  ja  $N$  on tulosuureiden lukumäärä. Herkkyyskerrointa voidaan ajatella yksinkertaisemmin lineaarisen suoran kulmakertoimen tapaan eli minkä verran pysty-

eli y-akselin lukema muuttuu, kun vaaka- eli x-akselin lukema muuttuu. (UKAS 2007, 15.) Herkkyyskerroin kuvaa kuinka jyrkkä suora on. Jos lineaarinen suora on nouseva, herkkyyskerroin on positiivinen, ja jos se on laskeva, herkkyyskerroin on negatiivinen. (KvantiMOTV 2008.) Kun herkkyyskerroin lasketaan lineaarisen suoran kulmakertoimen tapaan, herkkyyskerroin on

$$c_i = \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (19)$$

jossa  $y_1$  ja  $y_2$  ovat y-akselin pisteitä ja  $x_1$  ja  $x_2$  ovat x-akselin pisteitä. (Tammer-teknikka 2005, 28.) Pisteet voidaan määrittää esimerkiksi kokeellisesti mittaamalla siten, että selvitetään minkä verran suure  $Y$  muuttuu, kun suure  $X$  muuttuu. (JCGM 100 2008, 20.) Herkkyyskerroin on usein joko 1 tai -1, jolloin kyseessä on täysin lineaarinen suora (Iisakka & Saxholm 2020). Herkkyyskerroin voidaan laskea myös numeerisella arvioinnilla, jossa muutetaan yhden tulosuureen odotettua arvoa ja lasketaan sen vaikutus lopputulokseen. (JCGM 100 2008, 19–20.) Jos tulosuureen odotettua arvoa  $x_i$  muutetaan lisäämällä siihen standardiepävarmuus  $u(x_i)$  ja lasketaan sen vaikutus lopputulokseen, saadaan eräällä numeerisen arvioinnin menetelmällä herkkyyskerroimeksi

$$c_i = \frac{\{f[x_i + u(x_i), x_j, \dots, x_N] - f(x_i, x_j, \dots, x_N)\}}{u(x_i)}, \quad (20)$$

jossa  $f$  kuvaa funktionaalista yhteyttä,  $x_j$  on tulosuureen  $X_j$  odotettu arvo ja  $N$  on tulosuureiden lukumäärä (Iisakka & Saxholm 2020.) Kun lopulta herkkyyskerroin  $c_i$  tiedetään, yksittäisen epävarmuustekijän eli tulosuureen vaikutus kokonaisepävarmuuteen kuvataan epävarmuutena  $u_i(y)$ , jonka suuruus on

$$u_i(y) = c_i u(x_i), \quad (21)$$

jossa  $u(x_i)$  on epävarmuustekijän standardiepävarmuus,  $i$  on 1, 2, 3... $N$  ja  $N$  on tulosuureiden lukumäärä. (EA-4/02 2013, 9, 19.)

Mittaustulokseen voi vaikuttaa esimerkiksi kalibroinnin aikana muuttuva lämpötila. Tästä voidaan tehdä helposti kokeellinen mittaus muuttamalla lämpötilaa ja

mittaamalla jonkin muun suureen samanaikaista muutosta. Jos esimerkiksi lämpötila muuttuu mittauksen aikana  $\pm 2,00 \text{ }^\circ\text{C}$  ja resistanssi muuttuu  $\pm 0,50 \text{ } \Omega$ , herkkyyskertoimeksi saadaan kaavalla (19)

$$c_i = \frac{0,50 \text{ } \Omega}{2,00 \text{ }^\circ\text{C}} = 0,25 \frac{\text{ } \Omega}{^\circ\text{C}}.$$

Lämpötilaeron aiheuttamaksi standardiepävarmuudeksi saadaan kaavalla (12)

$$u(x_{\Delta t}) = \frac{2,00 \text{ }^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 1,15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Lämpötila aiheuttaa standardiepävarmuuden ja herkkyyskerroimen perusteella resistanssimittaukseen epävarmuuden, joka on kaavalla (21)

$$u_{\Delta t}(y) = 0,25 \frac{\text{ } \Omega}{^\circ\text{C}} \cdot 1,15 \text{ }^\circ\text{C} = 0,29 \text{ } \Omega.$$

(Iisakka & Saxholm 2020.)

#### 4.5 Korrelaatio

Korrelaatio kuvaa kahden eri muuttujan keskinäistä lineaarista riippuvuussuhdetta toisiinsa. Korrelaation vaikutusta arvioidaan yleisimmin Pearsonin korrelaatiokerroimen  $r$  avulla. Lineaarista riippuvuutta ei ole, jos korrelaatiokerroin on nolla. Korrelaatiokerroin voi olla  $-1$  ja  $+1$  välillä, ja mitä lähempänä kyseisiä lukuja ollaan, sitä voimakkaampi lineaarinen riippuvuus on eli sitä jyrkempi on lineaarinen suora. (KvantiMOTV 2004; Taanila 2019.) Jotta voidaan selvittää, onko epävarmuustekijöillä eli tulosuureilla toisiinsa lineaarisia riippuvuuksia, lasketaan ensin epävarmuustekijöiden välisen riippuvuuden voimakkuutta kuvaava kovarianssi  $u(x_i, x_j)$ . Suureet  $x_i$  ja  $x_j$  kuvaavat tulosuureiden odotusarvoja. Vertailu tehdään samaa aikaa vain kahdelle tulosuureelle. Jos korrelaatioita havaitaan useilla eri tulosuureilla, korrelaatiot huomioidaan, kun epävarmuustekijät yhdistetään. (EA-4/02 2013, 19; JCGM 100 2008, 21—22; Taanila 2019.)

Tulosuureiden odotettujen arvojen  $x_i$  ja  $x_j$  keskiarvojen välinen kovarianssi on

$$u(x_i, x_j) = s(\bar{x}_i, \bar{x}_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j), \quad (22)$$

jossa  $n$  on arvojen lukumäärä,  $x_{ik}$  on arvojen  $x_i$  yksittäinen arvo  $k$ ,  $x_{jk}$  on arvojen  $x_j$  yksittäinen arvo  $k$  ja  $\bar{x}_i$  ja  $\bar{x}_j$  ovat arvojen  $x_i$  ja  $x_j$  keskiarvot. Arvot voivat olla esimerkiksi mittaustuloksia. (EA-4/02 2013, 19; Iisakka & Saxholm 2020; JCGM 100 2008, 21—22; Taanila 2019.) Kovarianssi voidaan laskea lähes suoraan Excel-laskentataulukko-ohjelmiston funktiolla KOVARIANSSI.S(matriisi1;matriisi2), jossa matriisit 1 ja 2 ovat kahden eri tulosuureen mittaustuloksia tai arvoja. KOVARIANSSI.S-funktion tulos on kuitenkin jaettava mittaustulosten lukumäärällä  $n$ . Jos esimerkiksi matriisi 1:n mittaustuloksia on kymmenen, jolloin myös matriisi 2:n mittaustuloksia on kymmenen, kirjoitetaan funktio muotoon KOVARIANSSI.S(matriisi1;matriisi2)/10. (Iisakka & Saxholm 2020; Microsoft n.d.b.)

Edellä kuvatun perusteella voidaan todeta, että korrelaation vaikutuksen arvioiminen vaatii mittausdataa. Mittausdataa saadaan erityisesti A-tyyppin tilastolliseen laskentaan perustuvalla menetelmällä (Iisakka & Saxholm 2020). B-tyyppin epävarmuustekijöiden kohdalla tilanne on haastavampi. Tutkija Ilkka lisäkan ja erikoistutkija Sari Saxholm:n (2020) luennolla todettiin, että B-tyyppin epävarmuustekijöiden korrelaatiokerroin voidaan määrittää joko kokeellisesti, analysoimalla tai joko kokemuksen tai yleisen tiedon perusteella. Kun mittausdatan tai muun tiedon perusteella kovarianssi  $u(x_i, x_j)$  on laskettu, korrelaatiokerroin on

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}, \quad (23)$$

jossa  $u(x_i)$  ja  $u(x_j)$  ovat tulosuureiden odotusarvojen  $x_i$  ja  $x_j$  standardiepävarmuudet. Jos korrelaatiokertoimeksi saadaan nolla, epävarmuustekijöillä ei ole keskinäistä riippuvuussuhdetta. Jos korrelaatiokerroin ei ole nolla ja se on välillä  $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$ , korrelaatio huomioidaan yhdistetyn standardiepävarmuuden laskennassa, poistetaan epävarmuustekijöiden keskinäinen riippuvuus, jos se on mahdollista tai yhdistetään yksi korreloimaton epävarmuustekijä niistä tekijöistä, joilla on keskinäinen riippuvuus toisiinsa. (Iisakka & Saxholm 2020; JCGM 100

2008, 21.) lisäksi ja Saxholm:n (2020) luennolla todettiin, että epävarmuustekijöillä on keskinäinen lineaarinen riippuvuus esimerkiksi sellaisessa mittaustilanteessa, jossa samaa suuretta mitataan kahdella eri laitteella. Esimerkiksi, jos kaasupullosta tulevaa samaa painetta mitataan sekä referenssinä toimivalla painevaa’alla että kalibroitavalla painekalibraattorilla, ovat nämä mittaustulokset keskinäisessä riippuvuussuhteessa. Muita tilanteita, joissa korrelaatiota voidaan havaita ovat esimerkiksi referenssinä toimivien punnussarjojen käyttö, pituusmittavälineen ja mittanormaalin samanaikainen lämpötilan muuttuminen sekä paineen ja lämpötilan samanaikainen muuttuminen. (Iisakka & Saxholm 2020.) Luennon harjoitusmateriaalien perusteella mittauksen kokonaisepävarmuus voi kasvaa, vaikka joissakin tapauksissa se voi myös pienentyä, kun korrelaation vaikutus huomioidaan epävarmuuslaskennassa.

#### 4.6 Yhdistetty standardiepävarmuus

Yhdistetty standardiepävarmuus  $u_c(y)$  kuvaa kaikkien tulosuureiden eli epävarmuustekijöiden yhteisvaikutusta. Kun epävarmuudet yhdistetään, niiden on oltava samassa mittayksikössä. Yhdistetty standardiepävarmuus saadaan, kun epävarmuudet lasketaan neliöllisesti yhteen ja saadusta tuloksesta otetaan neliöjuuri. Yhdistetty standardiepävarmuus  $u_c(y)$  ilmoitetaan yleensä kattavuuskerroin  $k=1$ , joka kuvaa 68,27 %:n luottamustasoa normaalijakauman tapauksessa. Kattavuuskerroin ja todennäköisyysjakauman tyyppi voivat kuitenkin vaihdella. (UKAS 2007, 16—17, 29.) Yhdistetty standardiepävarmuus voidaan laskea kahdella eri tavalla riippuen siitä, onko epävarmuustekijöillä keskinäisiä riippuvuussuhteita vai ei. Jos korrelaatioita ei ole ja yksittäiset epävarmuudet  $u_i(y)$  ovat laskettu kaavalla (21), yhdistetty standardiepävarmuus on

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}, \quad (24)$$

jossa  $N$  on tulosuureiden lukumäärä ja  $i$  on  $1, 2, 3, \dots, N$ . (EA-4/02 2013, 8, 19; JCGM 100 2008, 19.) Jos tulosuureiden epävarmuuksia  $u_i(y)$  ei laskettu kaavalla (17),

kaavaan (24) sijoitetaan tulosuureiden standardiepävarmuudet  $u(x_i)$  ja niiden herkkyyskerroimet  $c_i$ , jolloin yhdistetty standardiepävarmuus on

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)}, \quad (25)$$

jossa  $N$  on tulosuureiden lukumäärä ja  $i$  on  $1, 2, 3, \dots, N$ . (JCGM 100 2008, 19.) Kaavoja (24) ja (25) testaamalla voidaan todeta, että yhdistetty standardiepävarmuus ei pienene, vaikka herkkyyskerroin  $c_i$  olisi negatiivinen.

Jos epävarmuustekijöillä on havaittu keskinäisiä lineaarisia riippuvuussuhteita toisiinsa, korrelaatio(t) huomioidaan yhdistetyn standardiepävarmuuden laskennassa, jolloin yhdistetty standardiepävarmuus on

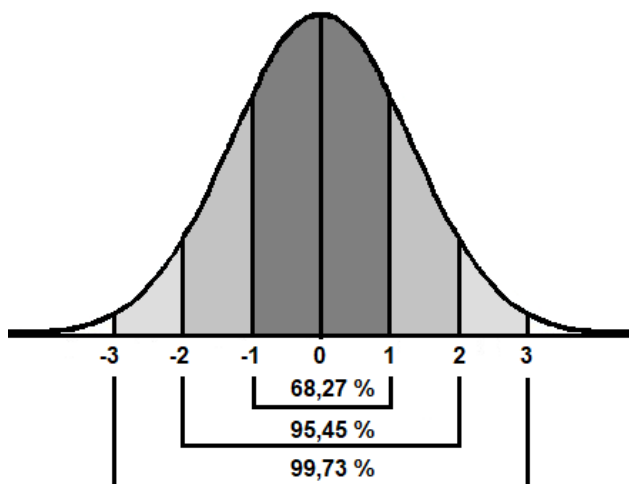
$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)}, \quad (26)$$

jossa  $N$  on tulosuureiden lukumäärä,  $i$  on  $1, 2, 3, \dots, N$ ,  $c_i$  ja  $c_j$  ovat tulosuureiden odotettujen arvojen  $x_i$  ja  $x_j$  herkkyyskerroimet,  $u(x_i)$  ja  $u(x_j)$  ovat tulosuureiden standardiepävarmuudet ja  $r(x_i, x_j)$  on korrelaatiokerroin (EA-4/02 2013, 19). Kaavasta (26) nähdään, että sen alkuosa vastaa kaavaa (25), mutta siihen on lisätty summalauseke, joka huomioi epävarmuustekijöiden korrelaatiot. Lisäksi on huomattava, että yhdistettyyn standardiepävarmuuteen vaikuttaa herkkyyskerroimen etumerkki toisin kuin kaavassa (25).

#### 4.7 Kattavuuskerroin ja efektiivinen vapausaste

Edellisessä luvussa todettiin, että yhdistetty standardiepävarmuus ilmoitetaan yleensä kattavuuskertoimella  $k=1$ . Koska kattavuuskerroin  $k=1$  kuvaa 68,27 % luottamustasoa normaalijakauman tapauksessa (kuva 4), laajennettu mitausepävarmuus  $U$  ilmoitetaan jollakin muulla luotettavammalla todennäköisyy-

dellä. Tällöin käytetään normaalijakauman tapauksessa yleensä joko kattavuuskerrointa  $k=2$ , joka kuvaa 95,45 % luottamustasoa tai kattavuuskerrointa  $k=3$ , joka kuvaa 99,73 % luottamustasoa (kuva 4). Luottamustaso kuvaa kuinka todennäköisesti mittaustulos on saadun mittausepävarmuuden rajojen sisällä. (JCGM 100 2008, 24; UKAS 2007, 17.) Yhdistetty standardiepävarmuus ja laajennettu mittaasepävarmuus eivät kuitenkaan aina ole normaalijakautuneita eikä niiden kattavuuskerroin aina ole tasan  $k=1$ ,  $k=2$  tai  $k=3$ . (UKAS 2007, 28—30.)



KUVA 4. Normaalijakauman luottamustasot (Hemminki ym. 2011, 37, muokattu)

Jos epävarmuustekijöitä on vähintään kolme, ja niiden epävarmuusarviot ovat luotettavia, voidaan olettaa, että laajennettu mittaasepävarmuus on normaalijakautunut (EA-4/02 2013, 11). Kalibroinnin mittaasepävarmuuslaskentaan perustuvan ohjeen EA-4/02 M (2013, 11) mukaan yleisimmin käytössä olevaa 95,45 % luottamustasoa normaalijakauman tapauksessa kattavuuskertoimella  $k=2$  voidaan käyttää vain, jos mittaus on riittävän luotettava. Esimerkiksi A-tyyppiin perustuvalla epävarmuustekijällä on oltava riittävästi toistettuja mittauksia. Mittauksen voidaan todeta olevan riittävän luotettava silloin, kun efektiivisten vapausasteiden  $v_{eff}$  määrä on riittävä. Riittävä efektiivisten vapausasteiden määrä  $v_{eff}$  kertoo mittaasepävarmuuden kattavuuskertoimen lukuarvon (taulukko 2). Jos vapausasteiden määrä jää liian pieneksi eli esimerkiksi, jos A-tyypin epävarmuustekijällä on toistettuja mittauksia liian vähän, todennäköisyysjakaumana käytetään normaalijakauman sijasta studentin  $t$ -jakaumaa. Studentin  $t$ -jakauma muistuttaa kuitenkin normaalijakaumaa. (JCGM 100 2008, 76—78; EA-4/02 2013, 11, 22—23; UKAS 2007, 28—30.) Taulukosta 2 voidaan havaita, että 95,45 % luottamustaso ei tarkoita sitä, että kattavuuskerroin olisi tasan  $k=2$ . Jos efektiivisiä

vapausasteita  $v_{eff}$  on vain kaksi, kattavuuskerroin on 4,53, vaikka luottamustaso on 95,45 %. Tällöin laajennettu mittausepävarmuus  $U$  on yli kaksi kertaa huonompi. Toisaalta 99,73 % luottamustasoa käytettäessä, kattavuuskertoimen  $k=3$  arvo saavutetaan vasta, kun efektiivisten vapausasteiden määrä on yli 30. Kattavuuskertoimen  $k=3$  käyttö vaatii A-tyyppin standardiepävarmuutta arvioitaessa huomattavasti enemmän mittausten toistoja kuin kattavuuskerroin  $k=2$ .

TAULUKKO 2. Kattavuuskerroin ja vapausaste studentin  $t$ -jakauman tapauksessa (JCGM 100 2008, 78; EA-4/02 2013, 23; muokattu)

$v_{eff} =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
95,45 %, $k =$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,32	2,28
99,73 %, $k =$	235,8	19,21	9,22	6,62	5,51	4,90	4,53	4,28	4,09	3,96
68,27 %, $k =$	1,84	1,32	1,20	1,14	1,11	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05
$v_{eff} =$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
95,45 %, $k =$	2,25	2,23	2,21	2,20	2,18	2,17	2,16	2,15	2,14	2,13
99,73 %, $k =$	3,85	3,76	3,69	3,64	3,59	3,54	3,51	3,48	3,45	3,42
68,27 %, $k =$	1,05	1,04	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
$v_{eff} =$	25	30	35	40	45	50	100	$\infty$	-	-
95,45 %, $k =$	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,025	2,000	-	-
99,73 %, $k =$	3,33	3,27	3,23	3,20	3,18	3,16	3,077	3,000	-	-
68,27 %, $k =$	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,005	1,000	-	-

Kun tiedetään yksittäisten epävarmuustekijöiden epävarmuudet  $u_i(y)$  ja yhdistetty standardiepävarmuus  $u_c(y)$ , saadaan efektiiviseksi vapausasteeksi

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}, \quad (27)$$

jossa  $v_i$  on  $n-1$ ,  $n$  on mittausten lukumäärä,  $i$  on 1, 2, 3... $N$  ja  $N$  on tulosuureiden lukumäärä. Kaavaa (27) kutsutaan Welch-Satterthwaite:n kaavaksi. (EA-4/02 2013, 22—23.) B-tyyppin standardiepävarmuudet eivät perustu toistettavuuteen, joten niiden voidaan olettaa olevan riittävän luotettavia sellaisenaan. Tällöin tekijä  $v_i$  on käytännössä ääretön. (lisakka & Saxholm 2020.) On hyvä huomata, että vapausasteen määrä voi olla hyvä, vaikka toistettuja mittauksia olisi vähemmän, jos A-tyyppin epävarmuustekijän vaikutus kokonaisepävarmuuteen on selvästi

muita epävarmuustekijöitä pienempi (UKAS 2007, 30). Tutkija Ilkka Iisakan ja erikoistutkija Sari Saxholm:n (2020) luennolla todettiin, että toistettavuus tulisi ottaa huomioon jollain tapaa, koska se määrittelee mittausepävarmuuden luotettavuutta. Koska mittausten toistaminen ei ole aina mahdollista, eräs vaihtoehto on toistaa mittaus muutaman kerran, jolloin voidaan käyttää kattavuuskerrointa  $k=4,53$ . Toinen vaihtoehto on lisätä jokin ylimääräinen B-tyypin epävarmuustekijä, joka on sen verran suuri, että voidaan olettaa A-tyypin epävarmuustekijän jäävän lähes merkityksettömäksi. Tällöin voidaan olettaa vapausasteiden määrän olevan riittävä ja käyttää kattavuuskerrointa  $k=2$ . (Iisaka & Saxholm 2020.)

#### 4.8 Laajennettu mittausepävarmuus

Kuten edellisessä luvussa todettiin, laajennettu mittausepävarmuus  $U$  annetaan yleensä kattavuuskertoimella  $k=2$ , joka vastaa normaalijakauman tapauksessa noin 95,45 % luottamusväliä. Lopulta kuitenkin vapausasteiden määrä  $v_{eff}$  vaikuttaa kattavuuskertoimen lukuarvoon ja todennäköisyysjakauman tyyppiin. (EA-4/02 2013, 11.) Laajennettu mittausepävarmuus kuvaa mittaustuloksen mittausepävarmuutta. Laajennettu mittausepävarmuus on

$$U = ku_c(y), \quad (28)$$

jossa  $k$  on kattavuuskerroin ja  $u_c(y)$  on yhdistetty standardiepävarmuus. Laajennettu mittausepävarmuus ilmoitetaan siten, että siinä on yhtä monta merkitsevää numeroa kuin mittaustuloksessa. (JCGM 100 2008, 23, 26.) BIPM:n julkaisema opas JCGM 100 (2008, 26) suosittelee kuitenkin, että mittausepävarmuus annetaan enintään kahdella merkitsevällä numerolla. Laajennettu mittausepävarmuus ilmoitetaan joko samassa yksikössä kuin mittaustulos tai suhteellisena mittausepävarmuutena kuten prosenttina (ILAC-P14:01 2013, 7).

Epävarmuuslaskentaohjeessa EA-4/02 (2013, 54, 58) käsiteltiin muita kattavuuskertoimen ja todennäköisyysjakauman vaihtoehtoja. Esimerkiksi yleismittarin jännitemittauksen epävarmuuslaskennassa vain yhden epävarmuustekijän (näytön resoluution) todettiin olevan selvästi hallitseva, minkä takia laajennettu mittausepävarmuus  $U$  ilmoitettiin kattavuuskertoimella  $k=1,65$ . Sen todennäköisyys

ilmoitettiin tasajakaumana. Myös toisessa esimerkissä havaittiin työntömitan resoluution olevan selvästi muita epävarmuustekijöitä suurempi, jolloin käytettiin kattavuuskerrointa  $k=1,83$ , jonka todennäköisyys ilmoitettiin puolisuunnikasjakaumana. Molemmissa tapauksissa käytettiin kuitenkin n. 95 % luottamustasoa. (EA-4/02 2013, 54, 58.)

#### 4.9 Mittaustuloksen esittäminen

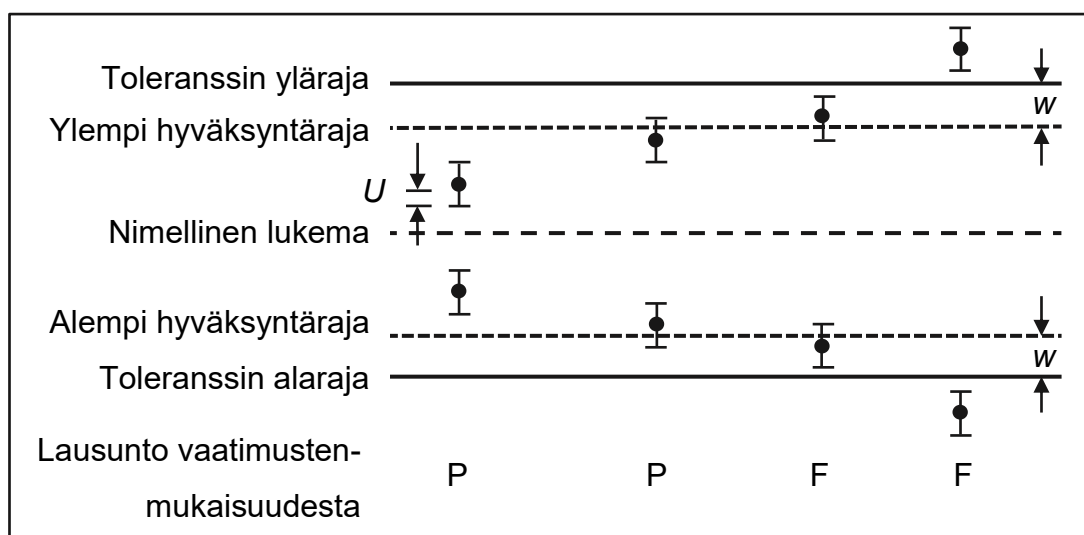
Kun laajennettu mittausepävarmuus  $U$  on tiedossa, se esitetään muodossa  $y \pm U$ , jossa  $y$  on lähtösuureen odotusarvo eli mittaustulos. Kalibrointitodistukseen kirjataan myös käytetty kattavuuskerroin, luottamustaso ja todennäköisyysjakauma, johon mittausepävarmuus perustuu. Tämä voidaan esittää esimerkiksi siten, että laajennettu mittausepävarmuus on ilmoitettu kattavuuskertoimella  $k=2$ , joka vastaa normaalijakauman tapauksessa n. 95 % luottamustasoa. Kattavuuskerroin voidaan ilmoittaa myös tarkempaan lukemana, koska kattavuuskerroin on harvoin tasan  $k=2$ . Kalibrointitodistuksessa voidaan ilmoittaa myös efektiivisten vapausasteiden  $v_{eff}$  määrä. (ILAC-P14:01 2013, 8; JCGM 100 2008, 24, 26.) Mittaustuloksen ja mittausepävarmuuden esittämistavat vaihtelevat riippuen siitä mitä on mitattu ja miten. Kalibrointitulokset voidaan esittää esimerkiksi taulukkona, käyränä, diagrammina tai funktiona (SFS-OPAS 99 2010, 38). Tarkastellaan esittämistapaa esimerkin avulla, jossa mitattiin yleismittarin tasajännitettä  $10,0 V_{DC}$  mittauspisteessä. Yleismittarin virheeksi saatiin  $-0,2 V_{DC}$  ja mittausepävarmuudeksi  $U = \pm 0,1 V_{DC}$  ( $k=2$ ). Tulos voidaan esittää siten, että yleismittarin virhe  $10 V_{DC}$  mittauspisteessä on  $(-0,2 \pm 0,1) V_{DC}$  ( $k=2$ ). (EA-4/02 2013, 34, 54.) Sama voidaan esittää myös taulukkomuodossa (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Esimerkki mittaustuloksen esittämisestä taulukossa

Yleismittarin lukema	Kalibraattorin lukema	Yleismittarin virhe	Kalibroinnin epävarmuus ( $k=2$ )
$10 V_{DC}$	$10,2 V_{DC}$	$-0,2 V_{DC}$	$\pm 0,1 V_{DC}$

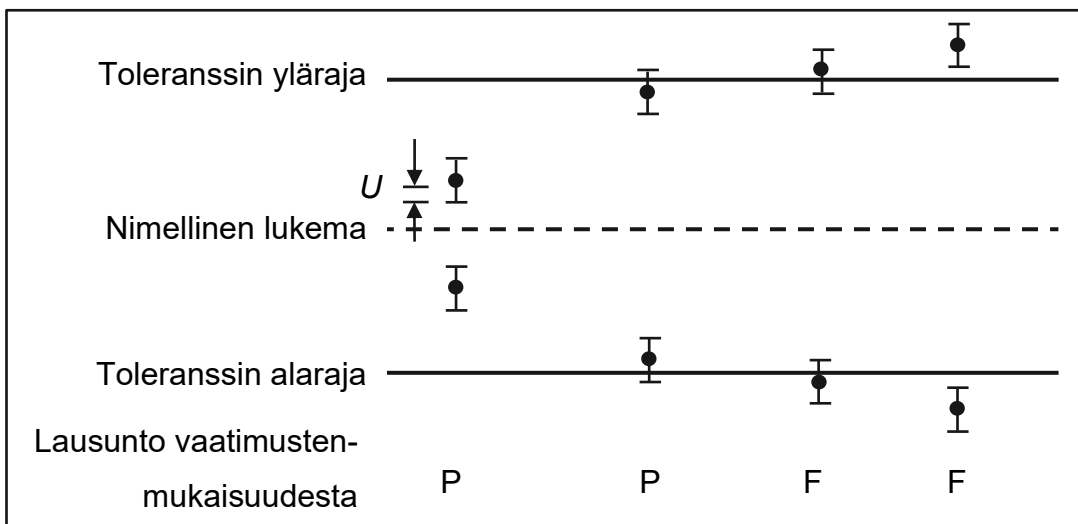
Kalibrointitodistuksessa ei yleensä oteta kantaa laitteen spesifikaationmukaisuuteen, koska kalibroinnin ensisijainen tarkoitus on vain selvittää kalibroitavan lait-

teen virhe. Jos kalibrointitodistuksessa annetaan lausunto spesifikaationmukaisuudesta, käytetty päätössääntö ilmoitetaan selkeästi. Tämä tarkoittaa lausuntoa vaatimustenmukaisuudesta eli onko laite toleranssissa tai ovatko mittaustulokset hyväksytyt tai hylätyt. Päätössääntönsä tarkoituksena on myös ilmaista millä tavalla mittaasepävarmuus on huomioitu lausuntoa annettaessa. (SFS 17025:2017, 14, 21.) Lausunto vaatimustenmukaisuudesta on esitetty testaus- ja kalibrointilaboratorioiden pätevyysvaatimuksia kuvaavassa standardissa SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 (2017, 14, 21). Kansainvälisen laboratorioiden ja tarkastuslaitosten akkreditointijärjestö ILAC:n julkaisemassa oppaassa ILAC-G8:09 (2019, 8—10) tarkennetaan vaatimustenmukaisuuden esittämistapoja. Oppaan mukaan päätössääntö voidaan esittää esimerkiksi kuvan 5 mukaisesti, jossa on sekä pisteellä merkitty mittaustulos että laajennettu mittaasepävarmuus  $U$ .



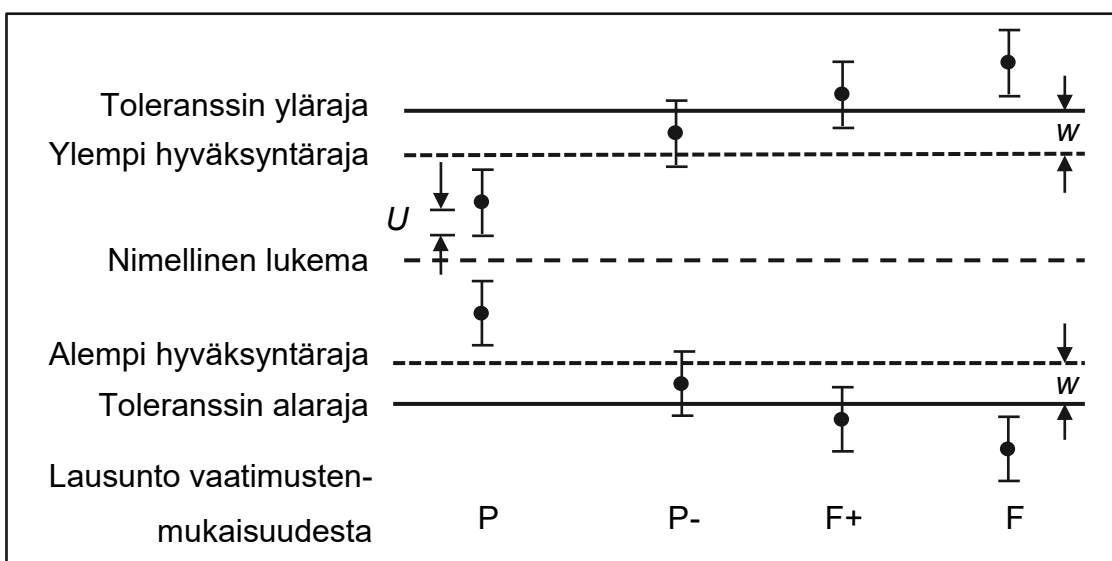
KUVA 5. Päätössääntö hyväksyntärajoineen (ILAC-G8:09 2019, 9, muokattu)

Päätössääntönsä voidaan käyttää esimerkiksi kirjainta P (Pass) kuvaamaan hyväksytyä mittaustulosta ja kirjainta F (Fail) kuvaamaan hylätyä mittaustulosta (kuva 5). Päätössääntö laaditaan lausuntona, jossa huomioidaan hyväksyntärajat eli suojakaista  $w$ . Kun mittaustulokset ovat hyväksyntärajojen sisällä, mittausten vaatimustenmukaisuus on hyväksytty, vaikka mittaasepävarmuus ei olisi kokonaan hyväksyntärajojen sisällä. (ILAC-G8:09 2019, 8—10.) Päätössääntö voidaan huomioida myös ilman hyväksyntärajoja (kuva 6). (ILAC-G8:09 2019, 8—10.) Kuvista 5 ja 6 voidaan päätellä, että hyväksyntärajat tuovat mittaustulokseen lisää luotettavuutta. Kuvasta 6 nähdään, että mittaustulos on hyväksytty, vaikka mittaasepävarmuus ei ole aivan toleranssin sisällä.



KUVA 6. Päätössääntö ilman hyväksyntärajoja (ILAC-G8:09 2019, 9, muokattu)

Päätössääntö voidaan esittää hyväksyntärajoilla myös siten, että käytetään hyväksytty (P) ja hylätty (F) termien lisäksi termejä ehdollisesti hyväksytty (P-) ja ehdollisesti hylätty (F+). (ILAC-G8:09 2019, 10.) Kuvasta 7 voidaan havaita, että ehdollisesti hyväksytyssä lausunnossa (P-) mittaustulos ei ole hyväksyntärajojen sisällä, mutta mittausepävarmuus on osittain. Ehdollisesti hylätyssä lausunnossa (F+) mittaustulos ei ole toleranssin sisällä, mutta mittausepävarmuus on osittain. Mittausepävarmuus ei kuitenkaan ole välttämättä hyväksyntärajan sisällä kuten ehdollisesti hyväksytyssä lausunnossa. Täysin hyväksytty mittaustulos on vain silloin, kun sekä mittaustulos että mittausepävarmuus ovat hyväksyntärajojen sisällä.



KUVA 7. Esimerkki kolmannesta päätössäännöstä hyväksyntärajoineen (ILAC-G8:09 2019, 10, muokattu)

## 5 TULOKSET

### 5.1 Esimerkki mittausepävarmuuden laskennasta

Taulukossa 4 on esitetty esimerkki vääntömomenttiavaimen mittausepävarmuuden laskennasta. Taulukon muotoilua tiivistettiin, joten se ei ole tässä esimerkissä oikeassa koossaan. Taulukko laadittiin Microsoft Excel -laskentataulukko-ohjelmistolla, ja sen muotoilu perustui oppaan EA-4/02 (2013) sivulla 11 esitettyyn taulukkoon. Vastaavanlainen taulukkopohja laadittiin sähköisesti täytettävän tarkastuspöytäkirjan yhteyteen omalle välilehdelle. Momenttiavaimen suhteellinen mittausepävarmuus laskettiin edellisissä luvuissa kuvattujen laskentaperusteiden ja standardin SFS-EN ISO 6789-2 (2017, 12—29) avulla. Taulukosta 4 havaitaan, että kalibrointilaitteen resoluution seurauksena tuloksissa on merkittäviä numeroita enemmän kuin momenttiavaimen mittaustuloksessa. Tämän esimerkin mittaustulokset eivät perustu todellisiin mittauksiin.

TAULUKKO 4. Vääntömomenttiavaimen mittausepävarmuuden laskentataulukko (muokattu EA-4/02 2013, 11)

Suure $X_i$	Kuvaus, $X_i$	Odotusarvo, $x_i$	Standardiepävarmuus, $u(x_i)$	Jakauma	$c_i$	Epävarmuus, $u_i(y)$	Vaapausasteet $\nu_i$
$X_{dut}$	Momenttiavaimen lukema	10,00 Nm					
$X_{res}$	Momenttiavaimen resoluutio	0,00 Nm	0,029 %	Tasa B	1	0,029 %	9999
$X_{re}$	Kalibrointilaitteen lukema	10,112 Nm	0,052 %	Norm. A	-1	-0,052 %	4
$X_{md}$	Kalibrointilaitteen korjaus	0,020 Nm	0,075 %	Norm. B	-1	-0,075 %	9999
$X_{rep}$	Uusittavuus	0,00 Nm	0,137 %	Tasa B	1	0,137 %	9999
$X_{od}$	Vääntöion geom. vaikutus	0,00 Nm	0,204 %	Tasa B	1	0,204 %	9999
$X_{int}$	Sovituspl geom. vaikutus	0,00 Nm	0,048 %	Tasa B	1	0,048 %	9999
$X_i$	Vääntöpisteen vaikutus	0,00 Nm	0,187 %	Tasa B	1	0,187 %	9999
	Momenttiavaimen virhe	-0,13 Nm					$\nu_{eff} : \infty$
Yhdistetty standardiepävarmuus				Normaali	$u_c(y) \pm$	0,327 %	$k= 1$
<b>Laajennettu mittausepävarmuus</b>				<b>Normaali</b>	<b><math>U \pm</math></b>	<b>0,65 %</b>	<b><math>k= 2</math></b>

Taulukon ”Odotusarvo,  $x_i$ ” -sarakeesta nähdään, että momenttiavaimen lukema oli 10,00 Nm. Mittanormaalina toimivan kalibrointilaitteen lukema  $X_i$  oli

10,112 Nm ja lukeman korjaus oli 0,020 Nm. Korjauksesta pääteltiin, että kalibrointilaitteen virhe oli negatiivinen eli -0,020 Nm. Koska muut odotusarvot olivat nolliä eli ne eivät vaikuttaneet mittaustulokseen, saatiin momenttiavaimen mittaustulokseksi eli mittausrvirheeksi kaavalla (4)

$$y_{\text{err}} = 10,00 \text{ Nm} - (10,112 \text{ Nm} + 0,020 \text{ Nm}) = -0,132 \text{ Nm} = -0,13 \text{ Nm}.$$

On kuitenkin huomattava, että myös muilla odotusarvoilla voi olla vaikutusta mittaustulokseen riippuen mittauksesta. Jos momenttiavaimen mittaustulokseen olisi vaikuttanut esimerkiksi muita korjauskertoimia tai mittaustuloksia, ne olisi arvioitu kaavan (6) mukaisesti. Momenttiavaimen resoluutio  $X_{\text{res}}$  oli 0,01 Nm, ja sen arvioitiin vaikuttavan tasajakautuneesti. Resoluution aiheuttama suhteellinen standardiepävarmuus  $u(x_{\text{res}})$  oli 0,029 %, ja se laskettiin kaavan (15) mukaisesti. (SFS 6789-2 2017, 19, 22.) Kalibrointilaitteen korjaus  $X_{\text{md}}$  kuvasi kalibrointilaitteen mittaustuloksen mittauserävarmuutta, joka kalibrointilaitteen kalibrointitodistuksessa oli annettu kattavuuskertoimella  $k=2$ . Kalibrointilaitteen virhe oli tässä esimerkissä normaalijakauman tapauksessa  $-0,020 \text{ Nm} \pm 0,150 \% (k=2)$ , jolloin korjauksen aiheuttamaksi standardiepävarmuudeksi saatiin kaavalla (10)

$$u(x_{\text{md}}) = \frac{0,150 \%}{2} = 0,075 \%.$$

(SFS 6789-2 2017, 18, 28.)

Momenttiavain kalibroidiin ensin 10,00 Nm:n mittauspisteessä kuormittamalla momenttiavainta viisi kertaa (taulukko 5). Kuormitus kuvasi mittausten toistettavuutta, jossa mittaustulokset olivat kalibrointilaitteen lukemia. Kokemuksen perusteella voidaan todeta, että momenttiavain kalibroidaan usein vääntömomenttipenkissä, jossa vetovoima kohdistuu esimerkiksi momenttiavaimen vääntökahvassa merkittävään kohtaan. Momenttiavaimen kalibroinnissa mitattiin myös vääntöpisteen vaikutus  $X_i$ , jossa tätä vetovoiman kohdistuspistettä muutettiin  $\pm 10 \text{ mm}$  (taulukko 5). Tämä tarkoitti sitä, että momenttiavainta kuormitettiin kahdesta eri vääntövarren kohdasta, joista toinen oli -10 mm:n ja toinen +10 mm:n päässä siitä vääntöpisteestä, jossa suoritettiin ensimmäinen viiden mittauksen kuormitus. Mittaustuloksista laskettiin lisäksi keskiarvot. (SFS 6789-2 2017, 17, 21, 26.)

Momenttiavaimen kuormituksessa oli kyse tilastolliseen laskentaan perustuvasta toistettavuudesta, joka perustui A-typin normaalijakaumaan. Tällöin kuormituksen eli kalibrintilaitteen mittaustulosten aiheuttama standardiepävarmuus  $u(x_{re})$  saatiin laskemalla mittaustulosten keskiarvon keskihajonta. Keskiarvoksi saatiin mittaustulosten perusteella kaavalla (7)

$$\bar{q} = \frac{(10,120 + 10,096 + 10,105 + 10,115 + 10,125) \text{ Nm}}{5} = 10,112 \text{ Nm.}$$

Keskiarvon laskemisen jälkeen keskihajonnaksi saatiin kaavalla (8)

$$s(q) = \sqrt{\frac{[(10,120 - 10,112)^2 + (10,096 - 10,112)^2 + (10,105 - 10,112)^2 + (10,115 - 10,112)^2 + (10,125 - 10,112)^2] \text{ Nm}}{(5 - 1)}} = 0,012 \text{ Nm.}$$

Kun huomioitiin keskihajonta suhteellisena tuloksena, kuormituksen aiheuttamaksi standardiepävarmuudeksi saatiin kaavalla (9)

$$s(\bar{q}) = u(\bar{q}) = u(x_{re}) = \frac{0,012 \text{ Nm}}{10,00 \text{ Nm}} \cdot 100 \% = 0,052 \%.$$

(SFS 6789-2 2017, 18—19, 26—27.) Momenttiavaimen vääntöpisteen vaikutus laskettiin mittaustulosten keskiarvojen erotuksena vähentämällä -10 mm:n vääntöpisteen mittaustulosten keskiarvosta +10 mm:n vääntöpisteen mittaustulosten keskiarvo. Taulukosta 5 nähdään, että tämä keskiarvojen välinen erotus oli 0,065 Nm. Vääntöpisteen vaikutus arvioitiin olevan tasajakautunut, ja sen vaikutuksen arvioitiin olevan 0,5-kertainen. Kun huomioitiin keskiarvojen välinen erotus suhteellisena tuloksena, vääntöpisteen aiheuttamaksi standardiepävarmuudeksi saatiin kaavalla (13)

$$u(x_i) = \frac{0,065 \text{ Nm}}{10,00 \text{ Nm}} \cdot 100 \% = 0,187 \% \quad (29)$$

(SFS 6789-2 2017, 17, 19, 26.)

TAULUKKO 5. Mittaustuloksia (muokattu SFS 6789-2 2017, 21, 25—26)

Momenttiavaimen asetettu lukema	Kalibrointilaitteen mittaustulokset (kuormitus)	Kalibrointilaitteen mittaustulokset	
		Asento <sub>1</sub> -10 mm	Asento <sub>2</sub> +10 mm
Nm	Nm	Nm	Nm
10,00	10,120	10,090	10,030
	10,096	10,100	10,025
	10,105	10,098	10,022
	10,115	10,095	10,042
	10,125	10,102	10,018
	-	10,075	10,027
	-	10,095	10,029
	-	10,088	10,015
	-	10,100	10,035
	-	10,071	10,022
Keskiarvo:	10,112	10,091	10,027
Vääntöpiste (Asento <sub>1</sub> - Asento <sub>2</sub> )		0,065 Nm	

Taulukosta 4 nähdään vielä kolme muuta momenttiavaimen kalibrointiin liittyvää epävarmuustekijää, joista eräs oli uusittavuus  $X_{rep}$ . Kun momenttiavainta kuormitettiin asetetussa mittauspisteessä neljä eri sarjaa, saatiin taulukon 6 mukaiset mittaustulokset. Momenttiavain poistettiin kalibrointipenkistä mittaussarjojen välissä. Myös näistä mittaustuloksista laskettiin keskiarvot. Kun neljän sarjan suurimmasta keskiarvosta vähennettiin pienin keskiarvo, saatiin lukemaksi 0,047 Nm. Standardiepävarmuus laskettiin samalla tavalla kuin kaavassa (29). Tällöin uusittavuuden aiheuttamaksi standardiepävarmuudeksi saatiin

$$u(x_{rep}) = \frac{\frac{0,047 \text{ Nm}}{10,00 \text{ Nm}} \cdot 100 \%}{2\sqrt{3}} = 0,137 \%$$

(SFS 6789-2 2017, 15, 19, 22—23.)

TAULUKKO 6. Uusittavuus (muokattu SFS 6789-2 2017, 22—23)

Momenttiavaimen asetettu lukema	Kalibrointilaitteen mittaustulokset toistettaessa mittaussarja neljä kertaa			
	Toisto 1	Toisto 2	Toisto 3	Toisto 4
Nm	Nm	Nm	Nm	Nm
10,00	10,087	10,117	10,079	10,110
	10,105	10,133	10,070	10,105
	10,100	10,122	10,082	10,125
	10,098	10,170	10,089	10,100
	10,115	10,110	10,095	10,107
Keskiarvo:	10,101	10,130	10,083	10,109
Uusittavuus (max-min)	0,047 Nm			

Kaksi muuta epävarmuustekijää olivat vääntiön geometrinen vaikutus  $X_{od}$  ja sovituskappaleen geometrinen vaikutus  $X_{int}$ . Molemmissa mittaustapahtumissa mitattiin neljä sarjaa kuormittamalla momenttiavainta kymmenen kertaa jokaisessa sarjassa (taulukko 7). Vääntiön vaikutusta mitattaessa, momenttiavaimen räikkäpäättä käännettiin  $90^\circ$  ennen jokaista mittaussarjaa. Sovituskappaleen vaikutusta mitattaessa, kalibrointilaitteen ja momenttiavaimen välissä olevaa sovitinta käännettiin  $90^\circ$  ennen jokaista mittaussarjaa. Momenttiavain poistettiin kalibrointipenkistä mittaussarjojen välissä. Molemmissa mittaustapahtumissa sarjan suurimmasta keskiarvosta vähennettiin pienin keskiarvo (max-min). Standardiepävarmuus laskettiin samalla tavalla kuin kaavassa (29). Tällöin vääntiön aiheuttamaksi standardiepävarmuudeksi saatiin

$$u(x_{od}) = \frac{0,071 \text{ Nm}}{10,00 \text{ Nm}} \cdot 100 \% = 0,204 \%$$

Sovituskappaleen aiheuttamaksi standardiepävarmuudeksi saatiin

$$u(x_{int}) = \frac{0,017 \text{ Nm}}{10,00 \text{ Nm}} \cdot 100 \% = 0,187 \%$$

(SFS 6789-2 2017, 16—17, 19, 23—25.)

TAULUKKO 7. Vääntiön ja sovituskappaleen geometrinen vaikutus (muokattu SFS 6789-2 2017, 23—25)

Momenttiavaimen asetettu lukema	Kalibrointilaitteen mittaustulokset momenttiavaimen vääntiön eri asennoissa			
	Asento 0°	Asento 90°	Asento 180°	Asento 270°
Nm	Nm	Nm	Nm	Nm
10,00	10,120	10,080	10,061	10,140
	10,122	10,088	10,067	10,142
	10,102	10,105	10,086	10,122
	10,115	10,075	10,054	10,125
	10,135	10,091	10,072	10,155
	10,119	10,085	10,074	10,139
	10,122	10,077	10,058	10,142
	10,102	10,080	10,064	10,122
	10,120	10,085	10,058	10,140
	10,130	10,095	10,077	10,150
Keskiarvo:	10,119	10,086	10,067	10,138
"Vääntiö" (max-min)	0,071 Nm			
Momenttiavaimen asetettu lukema	Kalibrointilaitteen mittaustulokset sovituskappaleen eri asennoissa			
	Asento 0°	Asento 90°	Asento 180°	Asento 270°
Nm	Nm	Nm	Nm	Nm
10,00	10,108	10,125	10,090	10,100
	10,130	10,122	10,098	10,110
	10,123	10,109	10,115	10,092
	10,108	10,090	10,085	10,105
	10,102	10,109	10,101	10,125
	10,100	10,102	10,095	10,109
	10,095	10,107	10,087	10,112
	10,110	10,095	10,090	10,092
	10,123	10,120	10,095	10,110
	10,128	10,090	10,105	10,120
Keskiarvo:	10,113	10,107	10,096	10,108
"Sovituskpl" (max-min)	0,017 Nm			

Herkkyyskertoimet laskettiin numeerisen arvioinnin perusteella odotusarvoista  $x_i$ . Esimerkiksi momenttiavaimen resoluution herkkyyskertoimeksi saatiin kaavalla (20)

$$c_{\text{res}} = \frac{\left\{ \begin{aligned} & [10,00 + (0,0 + \frac{0,029\%}{100\%} \cdot 10,00) - (10,112 + 0,020) + 0,0 + 0,0 + 0,0 + 0,0] \\ & - [10,00 + 0,0 - (10,112 + 0,020) + 0,0 + 0,0 + 0,0 + 0,0] \end{aligned} \right\}_{\text{Nm}}}{\frac{0,029\%}{100\%} \cdot 10,00 \text{ Nm}} = 1.$$

Kalibrointilaitteen korjauksen herkkyyskertoimeksi saatiin kaavalla (20)

$$c_{\text{md}} = \frac{\left\{ \begin{aligned} & [10,00 + 0,0 - (10,112 + 0,020 + \frac{0,075\%}{100\%} \cdot 10,00) + 0,0 + 0,0 + 0,0 + 0,0] \\ & - [10,00 + 0,0 - (10,112 + 0,020) + 0,0 + 0,0 + 0,0 + 0,0] \end{aligned} \right\}_{\text{Nm}}}{\frac{0,075\%}{100\%} \cdot 10,00 \text{ Nm}} = -1.$$

Taulukosta 4 nähdään, että herkkyyskerroin  $c_i$  oli kaikissa 1 tai -1, jolloin epävarmuus  $u_i(y)$  oli itseisarvoltaan standardiepävarmuuden  $u(x_i)$  suuruinen. Esimerkiksi resoluution  $X_{\text{res}}$  epävarmuudeksi  $u_{\text{res}}(y)$  saatiin kaavalla (21)

$$u_{\text{res}}(y) = 1 \cdot 0,029\% = 0,029\%.$$

Standardin SFS-EN ISO 6789-2:2017 mukaisessa kalibroinnissa korrelaatioita ei havaittu, jolloin yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi saatiin kaavalla (24)

$$u_c(y) = \sqrt{(0,029^2 + 0,052^2 + 0,075^2 + 0,137^2 + 0,204^2 + 0,048^2 + 0,187^2)} \% = 0,327\%.$$

Yhdistetty standardiepävarmuus ilmoitettiin normaalijakauman tapauksessa kattavuuskertoimella  $k=1$ . Vapausasteet ajateltiin äärettöminä ( $\infty$ ) B-tyyppin epävarmuustekijöillä, ja tässä esimerkissä äärettömyyttä kuvattiin luvulla 9999. A-tyypillä  $v_i$  oli  $n-1$ . Taulukosta 4 nähdään, että momenttiavaimen ensimmäisessä kuormituksessa ( $X_{\text{re}}$ ) mittaustuloksia toistettiin viisi kertaa, joten  $v_{\text{re}}$  oli 4 ( $5-1=4$ ). Efektiviseksi vapausasteeksi saatiin kaavalla (27)

$$v_{\text{eff}} = \frac{(0,327\%)^4}{\left( \frac{0,029^4}{9999} + \frac{0,052^4}{4} + \frac{0,075^4}{9999} + \frac{0,137^4}{9999} + \frac{0,204^4}{9999} + \frac{0,048^4}{9999} + \frac{0,187^4}{9999} \right) \%^4} = 5182.$$

Tuloksen perusteella käytettiin kattavuuskerrointa  $k=2$ . Taulukosta 2 nähdään, että efektiivisten vapausasteiden määrä  $v_{eff}$  on oikeastaan ääretön, kun tulos on yli 100. Laajennettu mittausepävarmuus ilmoitettiin kattavuuskertoimella  $k=2$ , joka vastaa normaalijakauman tapauksessa n. 95 % luottamustasoa. Laajennetuksi mittausepävarmuudeksi saatiin kaavalla (28)

$$U = 2 \cdot 0,327 \% = 0,654 \%$$

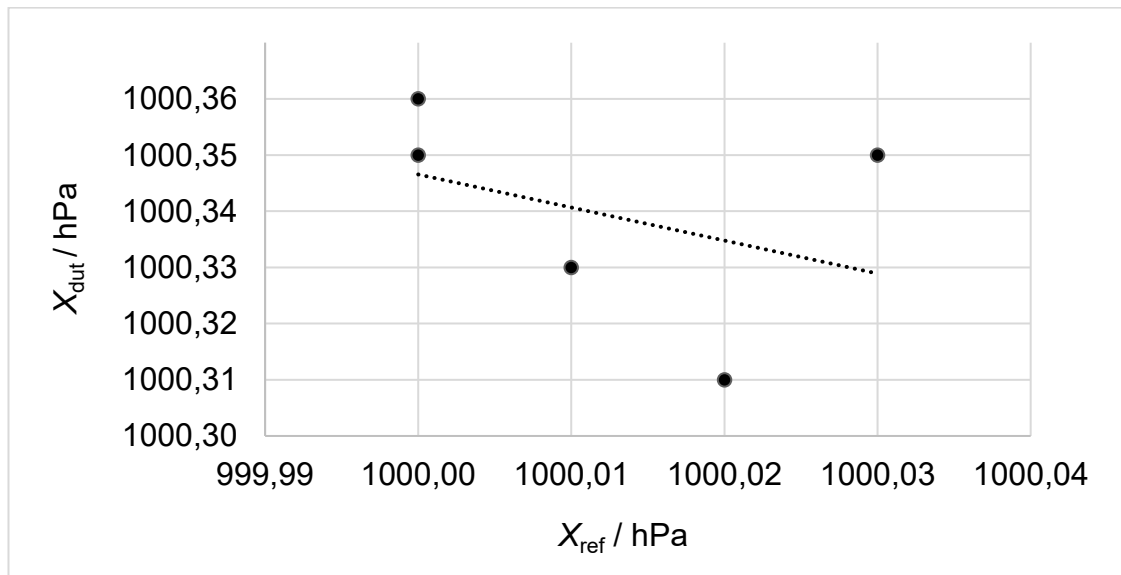
### 5.1.1 Esimerkki korrelaatiosta

Jos epävarmuustekijöillä havaitaan korrelaatiota, yhdistetty standardiepävarmuus  $u_c(y)$  lasketaan hieman eri tavalla kuin edellisessä esimerkissä. Excel-laskenta laadittiin sähköisesti täytettävään tarkastuspöytäkirjaan siten, että laskentataulukon (taulukko 4) viereen laadittiin kolme valmista taulukkoa korrelaatioiden laskemiseksi. Taulukossa 8 on esitetty hieman muokattu esimerkki yhdestä tällaisesta laskentataulukosta.

TAULUKKO 8. Korrelaation laskentataulukko

	Korrelaatiossa olevien suureiden mittaustulokset	
	$X_{ref}$	$X_{dut}$
	hPa	hPa
	1000,00	1000,35
	1000,02	1000,31
	1000,00	1000,36
	1000,03	1000,35
	1000,01	1000,33
Keskiarvo	1000,01	1000,34
Standardiepävarmuus $u(x_i)$ ja $u(x_j)$	0,0058	0,0089
Keskiarvojen kovarianssi $u(x_i, x_j)$	-0,000020	
Korrelaatiokerroin $r(x_i, x_j)$	-0,38	
Suureen herkkyyserroin $c_i$	-1	1
$u_c(y)$ korrelaatio huomioitu $\pm$	0,012	
$u_c(y)$ ilman korrelaatiota $\pm$	0,011	

Yhdellä taulukolla voi laskea vain kahden eri tulosuureen välisen korrelaation vaikutuksen. Jos korrelaatiota havaitaan, laskentataulukon vihreällä pohjavärillä oleva yhdistetty standardiepävarmuus, jossa korrelaatio on huomioitu, liitetään taulukon 4 mukaisessa epävarmuuslaskentataulukossa olevan yhdistetyn standardiepävarmuuden tilalle. Taulukon 8 mukainen laskentaesimerkki laadittiin painemittauksesta, jossa sarakkeessa  $X_{\text{ref}}$  on mittanormaalina käytettävän painevaa'an mittaustulokset ja sarakkeessa  $X_{\text{dut}}$  on kalibroittavan painekalibraattorin mittaustulokset. Mittaustulokset ovat esitetty yksikössä hPa (hehtopascal), mutta ne eivät ole todellisesta mittaustilanteesta. Kun korrelaation vaikutusta arvioidaan, kirjataan mittaustulokset taulukon 8 mukaisesti yksiköiden alapuolelle. Tässä esimerkissä mittaustuloksia oli vain viisi. Sen lisäksi taulukkoon kirjattiin suureiden herkkyyskerroimet  $c_i$ . Muut lukemat Excel laski itse Excelin soluihin laadittujen laskentakaavojen avulla. Taulukosta 8 voidaan havaita, että suureilla on keskinäinen riippuvuus toisiinsa, koska korrelaatiokerroin  $r(x_i, x_j)$  ei ole nolla. Mittausepävarmuusarvioinnin jatkokurssilla (Iisakka & Saxholm 2020) suositeltiin laatimaan mittaustuloksista myös kuvaaja, josta voi tarkemmin havainnoida korrelaation vaikutusta. Koska esimerkin mittaustuloksista (taulukko 8) muodostui lineaarinen suora (kuvio 2), todettiin suureilla olevan keskinäinen lineaarinen riippuvuus toisiinsa.



KUVIO 2. Lineaarinen suora mittaustuloksista

Taulukossa 8 olevat standardiepävarmuudet  $u(x_i)$  ja  $u(x_j)$  laskettiin mittaustulosten keskiarvojen keskihajonnoista kaavan (9) mukaisesti. Koska tästä on aiemmassa luvussa esitetty esimerkki, sitä ei esitetä uudestaan. Sen sijaan keskiarvojen kovarianssiksi saatiin kaavalla (22)

$$\begin{aligned} & u(x_i, x_j) \\ = & \frac{[(1000,00 - 1000,01)(1000,35 - 1000,34) + \dots + (1000,01 - 1000,01)(1000,33 - 1000,34)] \text{ hPa}^2}{5(5 - 1)} \\ & = -0,000020 \text{ hPa}^2. \end{aligned}$$

Edellä olevasta kaavasta on huomattava, että siihen ei ollut mahdollista sijoittaa kaikkia lukemia. Keskiarvojen kovarianssin laskemisen jälkeen laskettiin korrelaatiokerroin. Korrelaatiokertoimeksi saatiin kaavalla (23)

$$r(x_i, x_j) = \frac{-0,000020 \text{ hPa}^2}{(0,0058 \cdot 0,0089) \text{ hPa}^2} = -0,38.$$

Koska korrelaatiokerroin ei ollut nolla, todettiin suureilla olevan keskinäinen riippuvuus. Kun yhdistetty standardiepävarmuus laskettiin vain näille kahdelle suurelle, saatiin yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi kaavalla (26)

$$\begin{aligned} & u_c(y) \\ = & \sqrt{\{[0,0058 \cdot (-1)]^2 + (0,0089 \cdot 1)^2\} \text{ hPa}^2 + 2 \cdot [(-1) \cdot 1 \cdot (0,0058 \cdot 0,0089) \text{ hPa}^2 \cdot (-0,38)]\}} \\ & = 0,012 \text{ hPa}. \end{aligned}$$

Jos korrelaation vaikutusta ei huomioitaisi, olisi yhdistetty standardiepävarmuus ollut näiden kahden suureen kohdalla hieman pienempi. Jos korrelaation vaikutusta ei huomioitaisi, olisi yhdistetty standardiepävarmuus kaavalla (25)

$$u_c(y) = \sqrt{\{[0,0058 \cdot (-1)]^2 + (0,0089 \cdot 1)^2\} \text{ hPa}^2} = 0,011 \text{ hPa}.$$

Tässä esimerkissä korrelaation vaikutus laajennettuun mittausepävarmuuteen olisi ollut todella pieni.

## 5.2 Sähköisesti täytettävä tarkastuspöytäkirja

Kuten aiemmin todettiin, opinnäytetyön aihe muodostui sähköisesti täytettävän tarkastuspöytäkirjan yhteyteen, koska se toi mahdollisuuden kehittää myös mittausepävarmuuden laskentamenetelmiä. Sähköisesti täytettävä tarkastuspöytäkirja laadittiin Insta ILS Oy:n Part-145 huolto-organisaation käyttöön. Sähköisesti täytettävä tarkoittaa sitä, että sen voi täyttää suoraan tietokoneella eikä sitä ole tarpeen tulostaa. Se voidaan myös allekirjoittaa sähköisesti. Tarkastuspöytäkirjan kehittäminen aloitettiin vaatimusmäärittelyllä, joka käytiin läpi huolto-organisaatiossa sekä tulevien laatijoiden että useiden käyttäjien kesken. Vaatimusmäärittelyn perusteella tarkastuspöytäkirjan laadinnassa otettiin huomioon sekä toiveet että laadulliset haasteet. Kun sähköisesti täytettävä tarkastuspöytäkirjapohja oli valmis, käytiin tarkastuspöytäkirja läpi vaatimusmäärittelyn avulla. Sen jälkeen päivitettiin useita yrityksen sisäiseen toimintaan liittyviä ohjeita. Lisäksi huolto-organisaation henkilöstöä perehdytettiin Skypen välityksellä.

Sähköisesti täytettävä tarkastuspöytäkirja laadittiin Microsoft Excel -laskentataulukko-ohjelmistolla. Tarkastuspöytäkirjapohja laadittiin Excelillä, koska sen avulla saatiin toteutettua Excelin solujen lukitukset ja laskentakaavojen automatisointi. Tarkastuspöytäkirja edellytti Excel-solujen lukituksia, koska huoltomekaniikoilla ei saanut olla oikeutta muokata testi- ja mittauskohtia. PDF-tiedostoihin olisi ollut mahdollista laatia testikohdat siten, että vain tietyt kohdat olisivat olleet muokattavissa, mutta tätä oli vuosia aiemmin kokeiltu, ja se oli todettu liian hankalaksi. Tarkastuspöytäkirja kuulosti ensin melko yksinkertaiselta toteuttaa, mutta vastaan tuli useita haastavia tilanteita. Eräs haasteista oli sivunäkymän muotoilu, koska Excelin rivi- ja sarakelevydet yllättäen vaihtelivatkin eri tietokoneilla. Sivun reunoihin jätettiin ylimääräistä tilaa, jonka arvioitiin riittävän useamman testin perusteella. Makrot olisivat voineet olla hyvä keino automatisointiin, mutta niitä ei otettu käyttöön, koska on mahdollista, että ne eivät toimi useita vuosia. Ilmailuteollisuudessa on vaatimuksena säilyttää dokumentit muuttumattomina. Microsoft Word -tarkastuspöytäkirjat haluttiin kuitenkin jättää jatkossakin vaihtoehtoiseksi menetelmäksi. Vanha Word-tarkastuspöytäkirjapohja päivitettiin uudeksi versioiksi siten, että sen muotoilua hieman siistittiin ja pohjaan lisättiin tarkastuspöytäkirjan laatijan ja hyväksyjän sähköiset allekirjoitukset.

Sähköisesti täytettävän tarkastuspöytäkirjan tavoitteena oli vähentää paperitulosteiden määrää, mutta siitä on paljon muutakin hyötyä. Aiemmin mittalaitteen virheet laskettiin mittaustuloksista laskimella. Excelin avulla virhelaskenta voidaan jatkossa automatisoida esimerkiksi erilaisten Excel-funktioiden avulla. Excelissä on myös mahdollista käyttää ehdollista muotoilua eli tarvittaessa voidaan luoda erilaisia huomiovärejä selkeyttämään kirjattavia kohtia. Tarkastuspöytäkirjoja laaditaan jatkossa M-Files-asiakirjahallintajärjestelmässä. M-Filesin avulla saatiin käyttöön sähköiset allekirjoitukset. Tarkastuspöytäkirjat arkistoitiin aiemmin paperisina alkuperäisten allekirjoitusten takia, mutta sähköisten allekirjoitusten myötä paperiarkistoa ei ole tarpeen ylläpitää. Huoltomekaanikojen käytössä M-Filesiä ei kuitenkaan ollut, minkä takia tarkastuspöytäkirja on huollon jälkeen allekirjoitettava Excelin omalla sähköisellä allekirjoituksella. Excelin allekirjoitus käyttää varmenteena S/MIME-varmennetta. Kun huoltomekaanikko allekirjoittaa tarkastuspöytäkirjan, Excel-tiedosto ei ole enää muokattavissa. Vain työn tarkastaja voi lisätä oman allekirjoituksensa. Muokkaus on mahdollista, jos allekirjoituksen poistaa, mutta sen jälkeen mekaanikon on allekirjoitettava tiedosto uudelleen. Lopuksi Excel-tiedosto hyväksytään huolto-organisaation tietojärjestelmässä siten, että muokkaaminen ei ole enää mahdollista eikä allekirjoituksia voi poistaa.

Tarkastuspöytäkirjapohjasta oli tarkoitus tehdä ulkoisesti erilainen kuin vanhasta Wordilla laaditusta tarkastuspöytäkirjapohjasta. Otsikkokenttiä lisättiin, ja ne laadittiin kahdella kielellä, jotta tarkastuspöytäkirjapohjaa voidaan tarvittaessa käyttää englannin kielellä. Uutta tarkastuspöytäkirjaa käytettäessä erillistä kalibrointitodistusta tai tarkastuksen huoltotodistetta ei ole jatkossa tarpeen laatia. Tarkastuspöytäkirjan kansilehti laadittiin siten, että se toimii tarvittaessa joko suoraan kalibrointitodistuksena tai tarkastuksen huoltotodisteena. Ilmailulaitesuollossa erikseen laadittavia kansainvälisiä huoltotodisteita sähköisesti täytettävä tarkastuspöytäkirja ei kuitenkaan korvaa. Näissä tapauksissa tarkastuspöytäkirjan kansilehti toimii tarkastuspöytäkirjan etusivuna.

Excelin yhdelle välilehdelle laadittiin menetelmä mittausepävarmuuden määrittämiselle. Se helpottaa arkistointia, koska erillisiä tiedostoja ei ole tarpeen ylläpitää. Mittausepävarmuuslaskentaa varten laadittiin yksi valmis kopioitavissa oleva tau-

lukkopohja. Taulukkopohjaan määritettiin valmiiksi ehdotuksia epävarmuustekijöistä, jotka ovat helposti muokattavissa. Perinteisestä mittausepävarmuuslaskentataulukosta poiketen, taulukon yhteyteen lisättiin efektiivisten vapausasteiden ja korrelaation laskentamenetelmät. Mittausepävarmuuslaskennasta laadittiin erillinen käyttöohje omalle välilehdelle, jonka tarkoitus on opastaa tekijää valmiin taulukkopohjan käyttämiseen. Käyttöohjeeseen myös yksi valmis laskentaesimerkki (kuva 8). Opinnäytetyön teoriaosuuden tarkoitus on perehdyttää tekijää mittausepävarmuuslaskennan perusteisiin.

Suure $X_i$	Kuvaus, $X_i$	Odotusarvo, $x_i$	Standardiepävarmuus, $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin, $c_i$	Epävarmuus, $u_i(y)$	Vapausasteet $v_i$	Korreloi
$X_{dut}$	Momenttiavaimen lukema	10,00 Nm						
$X_{res}$	Momenttiavaimen resoluutio	0,0 Nm	0,029 %	Tasa B	1	0,029 %	9999	ei
$X_{re}$	Kalibrointilaitteen lukema	10,112 Nm	0,052 %	Normaali A	-1	-0,052 %	4	ei
$X_{md}$	Kalibrointilaitteen korjaus	0,020 Nm	0,075 %	Normaali B	-1	-0,075 %	9999	ei
$X_{rep}$	Uusittavuus	0,0 Nm	0,137 %	Tasa B	1	0,137 %	9999	ei
$X_{od}$	Vääntiön geometrinen vaikutus	0,0 Nm	0,204 %	Tasa B	1	0,204 %	9999	ei
$X_{int}$	Sovituskpl geometrinen vaikutus	0,0 Nm	0,048 %	Tasa B	1	0,048 %	9999	ei
$X_1$	VääntöpiSTEEN vaikutus	0,0 Nm	0,187 %	Tasa B	1	0,187 %	9999	ei
	Momenttiavaimen virhe	-0,13 Nm					$v_{eff} : \infty$	
	Yhdistetty standardiepävarmuus			Normaali	$u_c(y) \pm$	0,327 %	$k = 1$	
	<b>Laajennettu mittausepävarmuus</b>			<b>Normaali</b>	<b><math>U \pm</math></b>	<b>0,65 %</b>	<b><math>k = 2</math></b>	

KUVA 8. Esimerkki mittausepävarmuuden laskentataulukosta (muokattu EA-4/02 2013, 11; SFS 6789-2 2017, 12—29)

## 6 POHDINTA

Sähköisesti täytettävän tarkastuspöytäkirjan tavoitteena oli vähentää paperitulosteiden määrää. Tähän tavoitteeseen on mahdollista päästä, kun pohjia saadaan otettua aktiivisesti käyttöön. Paperitulosteiden määrä vähenee myös sen myötä, että kalibrointitodistuksia ja huoltotodisteita ei ole tarpeen laatia jatkossa erillisenä dokumenttina. Tarkastuspöytäkirjoja ei kuitenkaan päivitetä sähköisesti täytettävään muotoon, jos samalla ei ole muuta syytä päivittää tarkastuspöytäkirjoja. Tästä syystä paperitulosteiden määrän väheneminen ei tapahdu hetkessä. Vaikka sähköisesti täytettävä tarkastuspöytäkirja oli tärkeä kehityskohde, se ei välttämättä sovellu Excel-muodossa kaikille laitteille tai mittausepävarmuuslaskelmille yhtä hyvin. Excel saattaa olla liian kankea, jos on tarpeen tuottaa paljon tekstiä tarkastuspöytäkirjaan. Jos mittauspisteitä on paljon, epävarmuuslaskelmien laatiminen saattaa olla liian työlästä. Excel soveltuu erityisesti sellaisten laitteiden tarkastuspöytäkirjoihin, joissa on esimerkiksi erilaista virhelaskentaa. Toisaalta muutaman sivun mittaisten tarkastuspöytäkirjojen päivitykset ovat yksinkertaisia tehdä, vaikka laskentaa ei olisikaan. Arkistoinnin kannalta on parempi, että mittaus tulokset ja mittausepävarmuusarviointit ovat samassa tiedostossa. Etätöiden lisääntyttyä sähköiset allekirjoitukset osoittautuivat myös erittäin positiiviseksi parannukseksi.

Sähköisesti täytettävä tarkastuspöytäkirjapohja laadittiin työajalla, mutta opinnäytetyön mittausepävarmuuslaskentaan perehdyttiin vapaa-ajalla, jolloin laadittiin myös opinnäytetyön raportti. Opinnäytetyön aihe oli erittäin mielenkiintoinen, koska se toi mahdollisuuden syventyä mittausepävarmuuslaskentaan. Haasteen mittausepävarmuuslaskentaan tuo mittauksen erilaisuus, joten paljon jäi vielä opittavaa. Menetelmä mittausepävarmuuden määrittämiselle laadittiin tarkastuspöytäkirjan yhteyteen. Vaikka tarkastuspöytäkirjaan laadittiin lisäksi mittausepävarmuustaulukon käyttöohje, opinnäytetyön teoriaosuuden tarkoitus on toimia perehdytysmateriaalina. Vaikka mittausepävarmuuslaskennasta löytyy ennestään paljon ohjeita, on hyödyllistä, että perehdytysmateriaali on koostettu yhteen dokumenttiin, jossa on näkemyksiä useista eri lähteistä. Opinnäytetyöstä teki mielenkiintoisen myös se, että opinnäytetyö vaati luovuutta. Sähköisesti täytet-

tävä tarkastuspöytäkirja muodostui lopulta tekijänsä mielikuvan perusteella asetettujen vaatimusten pohjalta. Jos myöhemmin havaitaan korjattavaa, pohjasta voidaan luoda uusi versio. Suuria muutoksia pöytäkirjaan ei ole tarpeen tehdä, koska oikeita sanamuotoja ja erilaisia muotoiluja kokeiltiin eri tavoin ennen lopullista päätöstä.

Koska standardit ovat vain suosituksia, voi ei-akkreditoidussa toiminnassa toiminta olla huomattavasti vapaampaa. Suotta esimerkiksi mittalaitetta kalibroidaan, jos sen merkitys mittauskohteessa on vähäinen. Koska tilanteet vaihtelevat tapauskohtaisesti, ehkä vain mittaustulos riittää kertomaan tarpeeksi mittauksesta ilman mittausepävarmuutta, jos tämän todetaan olevan riittävää toiminnalle. Tärkeää on kuitenkin, että yrityksen ja asiakkaiden välinen yhteisymmärrys toimii, tiedetään tarpeet ja osataan täyttää ne. Lisäksi ymmärretään miten kalibroinnit, mittausepävarmuus ja jäljitettävyys tosiasiallisesti muodostavat keskinäisen yhteyden. Kokemuksen perusteella on kuitenkin todettava, että on luotettavampaa laatia mittausmenetelmä jonkin viimeisimmän tiedon mukaisen standardin perusteella kuin keksiä sitä itse. On muistettava, että standardien ja suositusten tarkoituksena on kuitenkin yhdenmukaistaa toimintaa kansainvälisesti.

## LÄHTEET

Asetus 1321/2014/EU. Komission asetus (EU) ilma-alusten sekä ilmailutuotteiden, osien ja laitteiden jatkuvan lentokelpoisuuden ylläpidosta ja näihin tehtäviin osallistuvien organisaatioiden ja henkilöstön hyväksymisestä. Euroopan unionin virallinen lehti 17.12.2014. Verkkojulkaisu. Luettu 8.9.2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1321&from=FI>

Beamex. n.d. What is calibration? What does metrological calibration mean? Luettu 4.9.2020. <https://www.beamex.com/us/resources/what-is-calibration/>

Bell, S. 2001. Painos 2. Measurement Good Practice Guide. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement. No. 11. Teddington, Middlesex, United Kingdom, National Physical Laboratory. Verkkojulkaisu. Luettu 3.7.2020. [https://www.isobudgets.com/pdf/documents/04\\_NPL\\_MGPG\\_No11.pdf](https://www.isobudgets.com/pdf/documents/04_NPL_MGPG_No11.pdf)

EASA. 2015. 1. painos. Foreign Part-145 approvals – Tools & Equipment, User Guide, Doc # UG.CAO.00132-001. Verkkojulkaisu. Luettu 8.9.2020. <https://www.easa.europa.eu/download/foreign-part-145-approval/Annex%20B/B14.%20UG.CAO.00132%20Tools%20&%20Equipment.pdf>

EA-4/02. 2013. Rev 01. Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. EA European Accreditation. Luettu 3.7.2020. <https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2018/10/ea-4-02-m-rev01-september-2013.pdf>

FINAS 2016a. Akkreditointi. Päivitetty 27.10.2016. Luettu 3.7.2020. <https://www.finas.fi/akkreditointi/Sivut/default.aspx>

FINAS 2016b. Kalibroinnit. Päivitetty 17.2.2016. Luettu 26.6.2020. <https://www.finas.fi/akkreditointi/jaljittavyys/Sivut/Kalibroinnit.aspx>

FINAS 2016c. Metrologiajärjestelmä. Päivitetty 5.2.2016. Luettu 26.6.2020. <https://www.finas.fi/akkreditointi/jaljittavyys/Sivut/Metrologiaj%C3%A4rjestelm%C3%A4.aspx>

FINAS 2018. Akkreditoinnin pätevyysalue. Päivitetty 22.1.2018. Luettu 3.7.2020. <https://www.finas.fi/akkreditointi/Sivut/Akkreditoinnin-p%C3%A4tevyysalue.aspx>

FINAS 2019. Kalibrointilaboratoriot. Päivitetty 13.7.2020. Luettu 14.9.2020. <https://www.finas.fi/akkreditointi/Akkreditointialueet/Sivut/Kalibrointilaboratoriot.aspx>

FINAS n.d. Akkreditoidut toimijat. Luettu 3.7.2020. <https://www.finas.fi/toimijat/Sivut/default.aspx>

Hemminki S., Hiltunen E., Hägg M., Järvenpää E., Kärhä P., Linko L., Saarinen P., Simonen S. 2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet. Verkkojulkaisu. Vantaa: Multiprint Oy. Luettu 14.7.2020. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/2011-J4.pdf>

Hietala P, Ilkka V, Olenius A. n.d. Mittaamisen virheet. Verkkojulkaisu. Luettu 21.8.2020. [http://www04.edu.fi/kaytannonfysiikka/mittaaminen\\_virheet.asp](http://www04.edu.fi/kaytannonfysiikka/mittaaminen_virheet.asp)

Hogan R. 2016. 8 Free Uncertainty Calculator Software You Can Download Now. Päivitetty 28.11.2016. Luettu 27.9.2020. <https://www.isobudgets.com/8-free-uncertainty-calculator-software-you-can-download-now/>

lisakka I. tutkija., Saxholm S. erikoistutkija. 2020. Mittausepävarmuusarvioinnin jatkokurssi. Luento. Jatkokurssi 14.5.2020. VTT-MIKES. Espoo.

ILAC-P14:01. 2013. ILAC Policy for Uncertainty in Calibration. Verkkojulkaisu. Australia: The ILAC Secretariat. Luettu 18.7.2020. <https://ilac.org/publications-and-resources/ilac-policy-series/>

ILAC-G8:09. 2019. Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity. Verkkojulkaisu. Australia: The ILAC Secretariat. Luettu 18.7.2020. <https://ilac.org/publications-and-resources/ilac-guidance-series/>

Insta. n.d. Tietoa meistä. Luettu 26.6.2020. <https://www.insta.fi/tietoa-meista>

JCGM 100. 2008. 1. painos. GUM: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM Bureau International des Poids et Mesures. Verkkojulkaisu. Luettu 3.7.2020. [https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf)

JCGM 200. 2012. 3. painos. VIM3: International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). BIPM Bureau International des Poids et Mesures. Verkkojulkaisu. Luettu 4.9.2020. [https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_200\\_2012.pdf](https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf)

KvantiMOTV. 2004. Korrelaatio ja riippuvuusluvut. Päivitetty 2004-28-01. Luettu 17.7.2020. <https://www.fsd.tuni.fi/menetelmaopetus/korrelaatio/korrelaatio.html>

KvantiMOTV. 2008. Regressioanalyysi. Päivitetty 2008-12-16. Luettu 24.8.2020. <https://www.fsd.tuni.fi/menetelmaopetus/regressio/analyysi.html>

Microsoft. n.d.a. KESKIHAJONTA.S (KESKIHAJONTA.S-funktio). Luettu 17.7.2020. <https://support.microsoft.com/fi-fi/office/keskihajonta-s-keskihajonta-s-funktio-7d69cf97-0c1f-4acf-be27-f3e83904cc23>

Microsoft. n.d.b. KOVARIANSSI.S (KOVARIANSSI.S-funktio). Luettu 17.7.2020. <https://support.microsoft.com/fi-fi/office/kovarianssi-s-kovarianssi-s-funktio-0a539b74-7371-42aa-a18f-1f5320314977>

Mitutoyo. 2018. EDU-15005A, Decision Rules, TAR, and TUR. Luettu 20.7.2020. <https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2018/08/15005A.pdf>

NASA. 2010. 3. painos. NASA-HDBK-8739.19-3. Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods. NASA Measurement Quality Assurance Handbook. Washington DC. Tulostettu 18.7.2020. <https://standards.nasa.gov/safety-quality-reliability-maintainability>

Ojanen-Saloranta M., Pusa A., Riski K. 2017. VTT Technology 286. Vaakojen kalibrintiipas. Verkkojulkaisu. Julkaisija: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Luettu 18.7.2020. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2017/T286.pdf>

QUAM:2012.P1. 2012. 3. Painos. EURACHEM/CITAC Guide, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. EURACHEM/CITAC Working Group. Verkkojulkaisu. Luettu 3.7.2020. [https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012\\_P1.pdf](https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012_P1.pdf)

SFS 10012. 2003. SFS-EN ISO 10012. Mittausten hallintajärjestelmät. Vaatimukset mittausprosesseille ja mittauslaitteistolle. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 23.8.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS 17025. 2017. SFS-EN ISO/IEC 17025. Testaus- ja kalibrointilaboratorioiden pätevyys. Yleiset vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 3.7.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS 6789-2. 2017. SFS-EN ISO 6789-2. Assembly tools for screws and nuts. Hand torque tools. Part 2: Requirements for calibration and determination of measurement uncertainty (ISO 6789-2:2017). Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 21.8.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-OPAS 99. 2010. Kansainvälinen metrologian sanasto (VIM). Perus- ja yleiskäsitteet sekä niihin liittyvät termit. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 26.6.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

Taanila A. 2019. Korrelaatio – lisätietoa. Päivitetty 19.4.2019. Luettu 17.7.2020. <https://tilastoapu.wordpress.com/tag/korrelaation-merkitsevyys/>

Tammertekniikka. 2005. 17. Painos. Tekniikan kaavasto. Porvoo: Bookwell Oy.

UKAS. 2007. 2. Painos. M3003. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. United Kingdom Accreditation Service. Verkkojulkaisu. Luettu 3.7.2020. <https://www.ukas.com/download/publications/publications-relating-to-laboratory-accreditation/M3003-Expression-of-Uncertainty-and-Confidence-in-Measurement-Edition-4-October-2019.pdf>