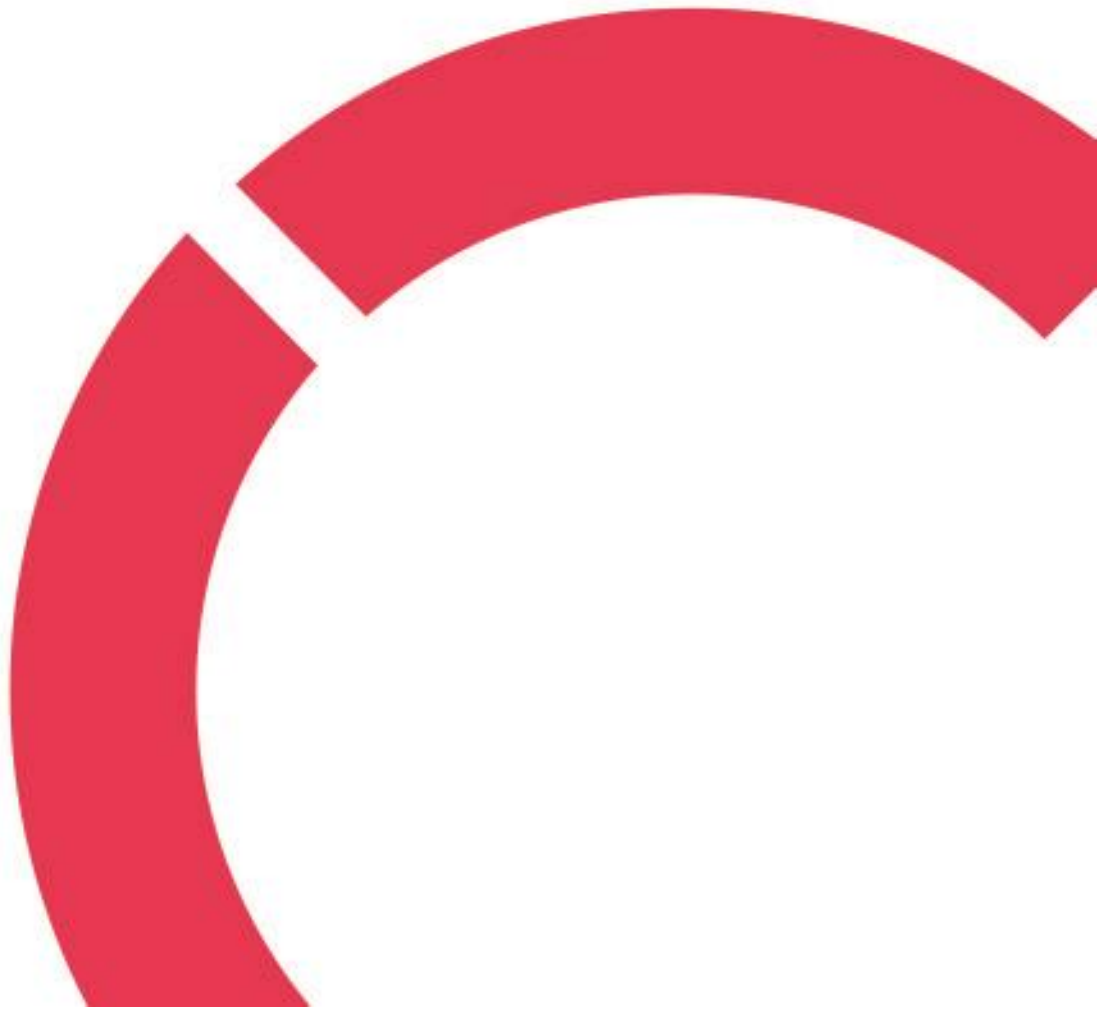


**Mikko Silvola**

## **AUTOVAA'AN MODERNISOINTI**

**Vaakateoria, projektisuunnitelma, huolto ja kalibrointi**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Lokakuu 2022**



## TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Lokakuu 2022	<b>Tekijä/tekijät</b> Mikko Silvola
<b>Koulutus</b> Sähkö- ja automaatiotekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
<b>Työn nimi</b> AUTOVAA'AN MODERNISOINTI. Vaakateoria, projektisuunnitelma, huolto ja kalibrointi		
<b>Työn ohjaaja</b> Hannu Puomio	<b>Sivumäärä</b> 44 + 7	
<b>Työelämäohjaaja</b> Jari Ukonsaari		
<p>Opinnäytetyössä käsitellään vaakatekniikkaa, kalibrointia, mittajälkeä ja autovaa'an modernisointia. Vaakojen kunnossapidon osalta käsitellään yleisimpiä ongelmia ja korjauksia, jotka perustuvat suurelta osin omiin kokemuksiini. Materiaalista valmistui muistikirja teoriasta ja käytännöstä, johon pystytyn palaamaan vaakojen parissa työskennellessä.</p> <p>Työssä käydään läpi erilaiset vaakatyyppit ja niiden toimintaperiaate. Vaakojen kalibrointitoiminnan osalta käsitellään keskeisiä termejä, ohjeistuksia, määräyksiä ja standardeja sekä direktiivejä. Lopuksi käydään läpi kuntoarvion tekeminen ja sen perusteella tehdyt toimenpiteet opinnäytetyön toimeksiantajan SSAB Raahen tehtaan autovaakoihin. Kuntoarviointien pohjalta yhden autovaa'an osalta valmistui projektiohje modernisointia varten.</p>		
<b>Asiasanat</b> autovaaka, investointi, kalibrointi, kunnossapito, massa, mittajälki, mittausepävarmuus, projekti		

**ABSTRACT**

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> October 2022	<b>Author</b> Mikko Silvola
<b>Degree programme</b> Bachelor of electrical engineering		
<b>Name of thesis</b> VEHICLE SCALE MODERNIZATION. Scale theory, maintenance, calibration, and project plan.		
<b>Centria supervisor</b> Hannu Puomio	<b>Pages</b> 44 + 7	
<b>Instructor representing commissioning institution or company</b> Jari Ukonsaari		
<p>This thesis studies scale technology, calibration, traceability and modernization of vehicle scale and weighing terminal. The thesis discusses also the maintenance of the scales regarding the most common problems and solutions, which are largely based on my own work experience. The material was used to make a notebook for myself, about theory and practice, which can be utilized to when working with scales and facing problems.</p> <p>The thesis also discusses different types of scales and their operating principles will also be reviewed. key terms, instructions, the regulations and standards, as well as guidelines for the calibration laboratories of scales. At the end, Thesis examines vehicle scales for a client which are located at SSAB Europe, Raahe. Based on the condition evaluations, project instructions for modernization were prepared for one vehicle scale.</p>		
<p><b>Key words</b> calibration, investment, maintenance, mass, measurement traceability, measurement uncertainty, vehicle scale</p>		

## **KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**

### **A/D muunnin**

Elektroninen laite, joka muuttaa analogisen signaalin kuten jänniteviestin digitaaliseksi.

### **EY- direktiivi**

Euroopan unionin jäsenvaltioille tarkoitettu lainsäädäntöohje.

### **Finas**

Kansallinen akkreditointielin, toteaa päteväksi esimerkiksi kalibrointilaboratorion.

### **Hall resistanssi**

Johtimen yli kehittyneen poikittaisjännitteen ja virran suhde

### **Hystereesi**

Laitteen tai järjestelmän ominaisuus, joka hidastaa tai estää muutoksiin reagoimista tai palautumista alkuperäiseen tilaan.

### **Ilman tiheys**

Massan suhde tilavuuteen kappaleessa, SI-yksikkö  $\text{kg/m}^3$

### **Johtimen nopeus**

Vaellusnopeus hiukkasen liikkeestä sähkövirrassa sähkökentän vaikutuksessa.

### **Josephsonin vakio**

Josephsonin suprajohteita koskevassa ilmiössä syntyvän potentiaalieron suhde mikroaaltosäteilyn taajuuteen.

### **Kalibrointi**

Mittanormaanin ja mittalaitteen tai mittausjärjestelmän näyttämän suureiden välisten arvojen välisen yhteyden toteaminen.

### **Konvektio**

Lämmön virtausten mukana aiheutumaa lämmönsiirtymistä kaasussa tai nesteessä.

### **Lorentzin voima**

Sähkömagneettisen kentän aiheuttama voima varattuun hiukkaseen.

### **Lämpötilakerroin**

Kertoo muutoksen vaikutuksesta lämpötilan muuttuessa yhden asteen.

### **Magneettinen voima**

Varatun partikkelin tiheyden, magneettikentän voimakkuuden ja sähkövarauksen tulo.

### **Magneettivuon tiheys**

Magnetismin tiheys, jota kuvataan suureella tesla.

### **Massa**

Kuvaa kappaleen hitautta voiman vaikutuksessa, SI-järjestelmän mukainen perusyksikkö kilogramma.

### **Paino**

Gravitaatiosta ja taivaankappaleen pyörimisestä kappaleeseen aiheutuva voima, SI-järjestelmän mukainen perusyksikkö newton.

### **Parametrointi**

Ohjelmalle tai komentojonotiedostolle käynnistyksen yhteydessä välitettäviä tietoja.

### **Ominaisresistanssi**

Tietystä aineesta valmistetun jonkin kokoisen kappaleen sähköinen ominaisuus resistiivisyys. SI-yksikkö  $\Omega\text{m}$

### **Planckin vakio**

Kvanttimekaniikan luonnonvakio, jonka avulla voidaan määritellä massa.

### **Poissonin luku**

Materiaalin ominaisuudesta kertova suure, paljonko kappale levenee sitä puristettaessa tai kapenee venytettäessä poikittaisessa suunnassa.

**Putoamiskiihtyvyys**

Taivaankappaleen aiheuttama kiihtyvyys putoaville kappaleille.

**Tukes**

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto

**Wattivaaka**

Toiselta nimeltään Kibblen vaaka, sähkömekaaninen painon mittauslaite.

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 MASSAN TEORIA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Kilon määritelmä .....	4
2.2 Kilogramman määrittäminen mittanormaaliksi Planckin vakion avulla.....	5
<b>3 VAAKOJEN TOIMINTAPERIAATE .....</b>	<b>10</b>
3.1 Tasapainovaaka .....	10
3.2 Magneettikompensoitu vaaka .....	12
3.3 Venymäliuska-anturi .....	13
3.4 Vaakaelektroniikka.....	17
<b>4 VAAKOJEN KUNNOSSAPITO .....</b>	<b>19</b>
4.1 Korjaus ja kunnossapito.....	19
4.2 Kalibrointi ja varmentaminen .....	21
4.3 Vaakojen kalibrointi punnuksilla .....	23
4.3.1 Kalibrointipunnukset.....	23
4.3.2 Kuormaus.....	25
4.3.3 Kalibrointitaajuus .....	26
4.3.4 Mittausepävarmuus .....	27
4.4 Vaakojen virittäminen punnuksilla.....	28
4.5 Varmentaminen.....	28
4.6 Kalibrointitodistus .....	29
<b>5 RAAHEN TEHTAAN AUTOVAAKAJÄRJESTELMÄ (poistettu julkisesta versiosta)</b>	
<b>6 AIHIOKENTÄN AUTOVAA'AN PROJEKTIKOHDE (poistettu julkisesta versiosta)</b>	
<b>7 POHDINTA.....</b>	<b>32</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>33</b>
<b>KUVIOT</b>	
KUVIO 1. Kilon prototyyppien massan muutos .....	5
<b>KUVAT</b>	
KUVA 1. Putoamiskiihtyvyys Suomessa .....	3
KUVA 2. International prototype of the kilogram.....	4
KUVA 3. Kiihtyvyyttä mittaava tila .....	6
KUVA 4. Massaa mittaava tila .....	9
KUVA 5. Perinteisen tasavartisen tasapainovaa'an toimintaperiaate.....	11
KUVA 6. Magneettikompensoidun vaa'an toimintaperiaate.....	12
KUVA 7. Venymäliuska-anturissa puristava voima.....	13
KUVA 8. Wheatstonen silta.....	14
KUVA 9. Venymäliuska-anturi .....	15
KUVA 10. Venymäliuskaan perustuva punnitusanturi.....	16

KUVA 11. Rikkinäinen ruotumattomasta teräksestä valmistettu punnitusanturi .....	17
KUVA 12. Vaakapäite ilman omaa näyttöä .....	18
KUVA 13. 5000 kg suurpunnuksien lastaus autovaa'alle .....	24
KUVA 14. Vaakasilta jaettu neljään osaan.....	24
KUVA 15. Seuraavan varmennusajankohdan ilmaiseva informatiivinen tarra .....	27

## **TAULUKOT**

TAULUKKO 1. Punnusten suurimmat sallitut poikkeamat OIML R111 .....	23
---	----



## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyö käsittelee autovaa'an modernisointiprojektia sekä vaakojen huolto- ja kalibrointitoimintaa SSAB Europe Raahen terästehtaalla. Työpaikkani kalibrointitoiminnan parissa sai minut tutkimaan vaakojen huoltotoimintaa sekä kalibrointia tarkemmin ymmärtääkseni käsitteitä sekä sitä, mistä kalibroinnin mittajälki tulee ja mihin teoriaan tämä kaikki perustuu. Kaikella kalibrointitoiminnalla on mittajälki kansainvälisiin kalibrointinormaaleihin sekä noudatettavat standardit, jolloin kalibroidun mittalaitteen avulla päästään samoihin tuloksiin ympäri maailman.

Huoltotoimintaan perustuvat vikakuvaukset pohjautuvat osittain omaan kokemukseeni ja työkaverien kommentteihin vaakojen kunnossapidosta. Itse kalibrointitoiminnan teoria, mistä mittajälki muodostuu sekä mihin mittausepävarmuuden laskenta perustuu ovat suurelta osin löytämästäni materiaaleista koostettua. Teoriapohjaista kirjallisuutta aiheesta on hyvin vähän. Hyvinä lähteinä aiheen käsittelyyn ovat olleet internetistä löytyneet mittatekniikakeskuksen metrologiaan perustuvat materiaalit, turvallisuus- ja kemikaaliviraston (Tukes) internetsivusto ja varsinkin mittajäljen osalta kilon määrittämisessä kansainvälinen standardointijärjestö Bureau international des poids et mesuresin internetsivustot materiaaleineen. Tämä opinnäytetyö tulee toimimaan muistikirjana itselleni, johon voin palata tarpeen tullen työskennellessäni kalibrointitoiminnan parissa.

Kilon mittanormaanin määrittämisessä tapahtui muutama vuosi sitten suuri muutos, sillä Pariisissa sijaitsevan mittanormaalina toimivan punnuksen massassa oli havaittu pieniä muutoksia siihen tehtyyn kopiaihin verrattuna. Aikojen saatossa epäpuhtaudet vaikuttavat punnuksen massaan, minkä takia kehitettiin tapa, jolla kilo voidaan määrittää luonnonvakioiden avulla ilman fyysistä kilon prototyyppiä Planckin vakion ja wattivaa'an avulla. Suureen tarkkuuteen päästäkseen tarvitaan myös tarkka, isokoinen laite stabiilissa ympäristössä, mutta internetistä löytyy ohjeet jopa legoista rakennettavalle wattivaa'alle pienemmän tarkkuuden tarpeisiin.

Opinnäytetyössäni käyn läpi myös standardeja sekä ohjeita, jotka ovat tärkeitä vaakojen parissa toimivalle metrologiselle toiminnalle. OIML eli International Organization of Legal Metrology on järjestö, joka tuottaa ohjeistuksia kansainvälisesti sekä edistää oikeudellisten kauppaa tukevien ja helpottavien metrologisten menettelyjen yhdenmukaistamista. Käytin opinnäytetyössäni myös järjestön tuottamia ohjeistuksia, joita kalibrointilaboratoriot ympäri maailman noudattavat toiminnassaan.

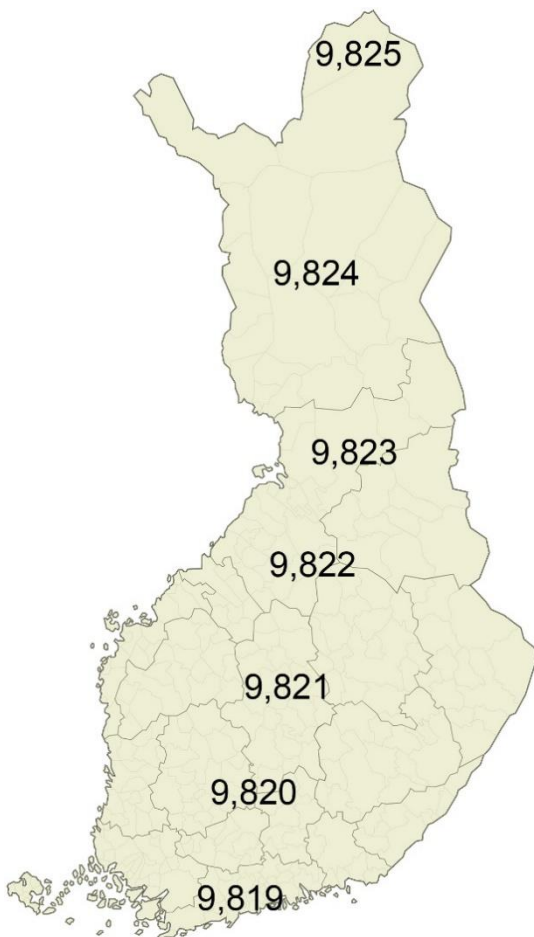
Työssä on lisäksi kartoitettu SSAB Raahen tehtaan autovaakojen nykytilanne ja ongelmat. Kuntokartoituksien takia yhteen vaakaan tehtiin projektisuunnitelma vaa'an modernisoinnista. Autovaa'an modernisoinnissa tarkoituksena on saattaa tekniikaltaan vanha vaaka nykyaikaiseksi, sillä varaosien saatavuus on heikentynyt viimeisinä vuosina. Vaakasillassa on myös ongelmia, lähinnä kuluneisuuden, mutta myös vaakasillan reunojen ahtauden vuoksi. Näistä syistä vaa'an kunnossapito on vaikeutunut varsinkin talvisaikaan. Talvisin sillalla olevan sähköisen lämmitysjärjestelmän vastuksia on rikki, minkä takia vaa'alle muodostuu jäätä. Jää aiheuttaa vaaranpaikan ajoneuvosta punnitusta sekä punnitustositetta suorittamaan poistuville kuljettajille. Vaa'alle kertynyt ylimääräinen materiaali kuten lumi ja jää, joita laitteen automaattinollaus ei poista punnituksesta ovat lisäkulu tapauksessa, jolloin autojen vakioita tyhjätarjainoja punnitaan epäsäännöllisesti.

## 2 MASSAN TEORIA

Maan vetovoima vaikuttaa kappaleeseen yhtä suurella voimalla kuin itse kappale vastakkaissuuntaisella voimalla maahan, tätä jatkuvaa vuorovaikutusta nimitetään gravitaatioksi. Kun kappaleen ja maapallon väliin laitetaan vaaka, se on tukivoimana kappaleen ja maan vetovoiman välissä estäen kappaleen putoamasta maahan (Schlamminger, 2018). Massan määrittäminen perustuu putoamiskiihtyvyyteen ja kappaleeseen vaikuttavaan voimaan:

$$m = F / a \quad (1)$$

jossa  $m$  on kappaleen massa,  $F$  on voima ja  $a$  kappaleen putoamiskiihtyvyys, mikä Ylivieskassa on n.  $9,822 \text{ m/s}^2$ .



KUVA 1. Putoamiskiihtyvyys Suomessa  $\text{m/s}^2$ , mukaillen (Poutanen, Bilker-Koivula, Ruotsalainen 2016)

Käytännössä se tarkoittaa että, että tarkka teollisuusvaaka viritetään Helsingissä, on samalla vaa'alla punnittu kappale hieman raskaampi punnittaessa se Ylivieskassa. Mitä lähempänä maan keskipistettä

kappale sijaitsee, sitä raskaampi kappale on, koska maapallo on navoiltaan hieman litteä ja putoamiskiihtyvyys kasvaa napoja lähestyttäessä.

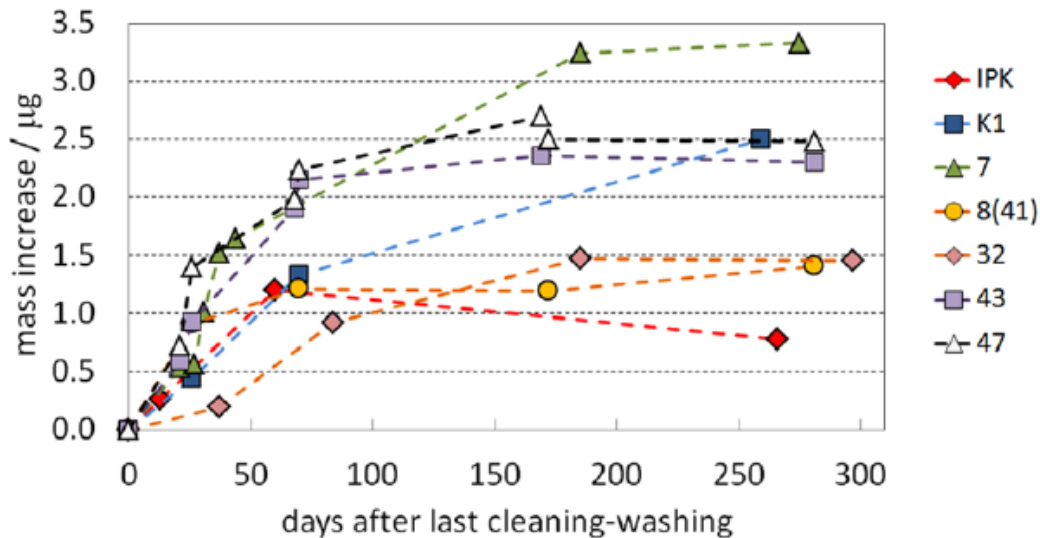
Suomessa putoamiskiihtyvyyttä mittaa esimerkiksi Maanmittauslaitos, joka toimii samalla kansallisena mittanormaalilaboratoriona. Putoamiskiihtyvyyttä mitataan käyttämällä mittalaitteena gravimetriä, jossa itse tulos perustuu Planckin vakion  $h$  kiinteään lukuarvoon  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  Js sekä metrin ja sekunnin määritelmään (VTT 2020).

## 2.1 Kilon määritelmä

Vuodesta 1875 Pariisissa sijainnut platina-iridium seoksesta valmistettu kilogramman mittanormaali (KUVA 2) ei enää ole välttämätön massan määrittämiseen. Nykyään kilon määritelmä perustuu Planckin vakion, sekunnin ja metrin avulla muodostettuun kilogramman määrittämiseen (Bilker-Koivula 2019). Kilon prototyyppi sijaitsee lähellä Pariisia, kansainvälisen Bureau international des poids et mesures standardointijärjestön toimipisteessä. Suomessa Mittatekniikan keskuksella olevan kansallisen kilon mittanormaalin massan mittajälki johtaa siis Pariisiin. Ongelmana tällaisessa prototyyppissä kuitenkin on se, että sen massa muuttuu vuosien saatossa mm. epäpuhtauksien vuoksi.



KUVA 2. International prototype of the kilogram (Bureau international des poids et mesures 2022)



KUVIO 1. Eri kilon prototyyppien massan muutos mikrogrammoina punnuksien pesun jälkeen, IPK on kilon prototyyppi ja kopiot numeroituina (Stock, Barat, Davis. 2015)

General conference on weights and measures (CGPM) päätti kokouksessaan 2018 määrittämisen muuttamisesta luonnonvakioksi ja se toteutettiin toukokuussa 2019. Wattivaa'an (Kibble balance) avulla Planckin vakiota käyttäen kilon määrittäminen perustuu osittain klassisen tasapainovaa'an tyylliseen laitteeseen, magnetismiin sekä virran ja jännitteen tulon eli tehoon, jonka yksikkö Watti on (Schlamminger, 2018).

## 2.2 Kilogramman määrittäminen mittanormaaliksi Planckin vakion avulla

Kilogramma on massan SI yksikkö, joka voidaan määrittellä Kibblen vaa'alla. Vaa'an voi asettaa joko punnusta tai kiihtyvyyttä mittaavaan tilaan. Punnitustilassa Kibblen vaa'alla punnus tasapainotetaan sähkömagneettisen voiman avulla pyöreän kelan sisällä, jonka ylä- sekä alapuolelle on sijoitettu voimakkaat magneetit. Voiman suunta on päinvastainen painovoiman kiihtyvyyden suhteen.

Kiihtyvyyttä mittaava tila perustuu Faradayn induktiolakiin. Kela liikutetaan vertikaalisesti magneetikentässä, jolloin jännite indusoituu kelaan .

Kilogramman määrittämisessä mittanormaaliksi vakion avulla käytettiin hyväksi Albert Einsteinin erityisen suhteellisuusteorian yhtä kaikkien aikojen kuuluisinta yhtälöä, joka ilmaisee energian ja massan välisen yhteyden sekä Planck-Einstein yhtälöä mikä ilmaisee fotonin energian välisen yhteyden massaan. Yhtälö on seuraava:

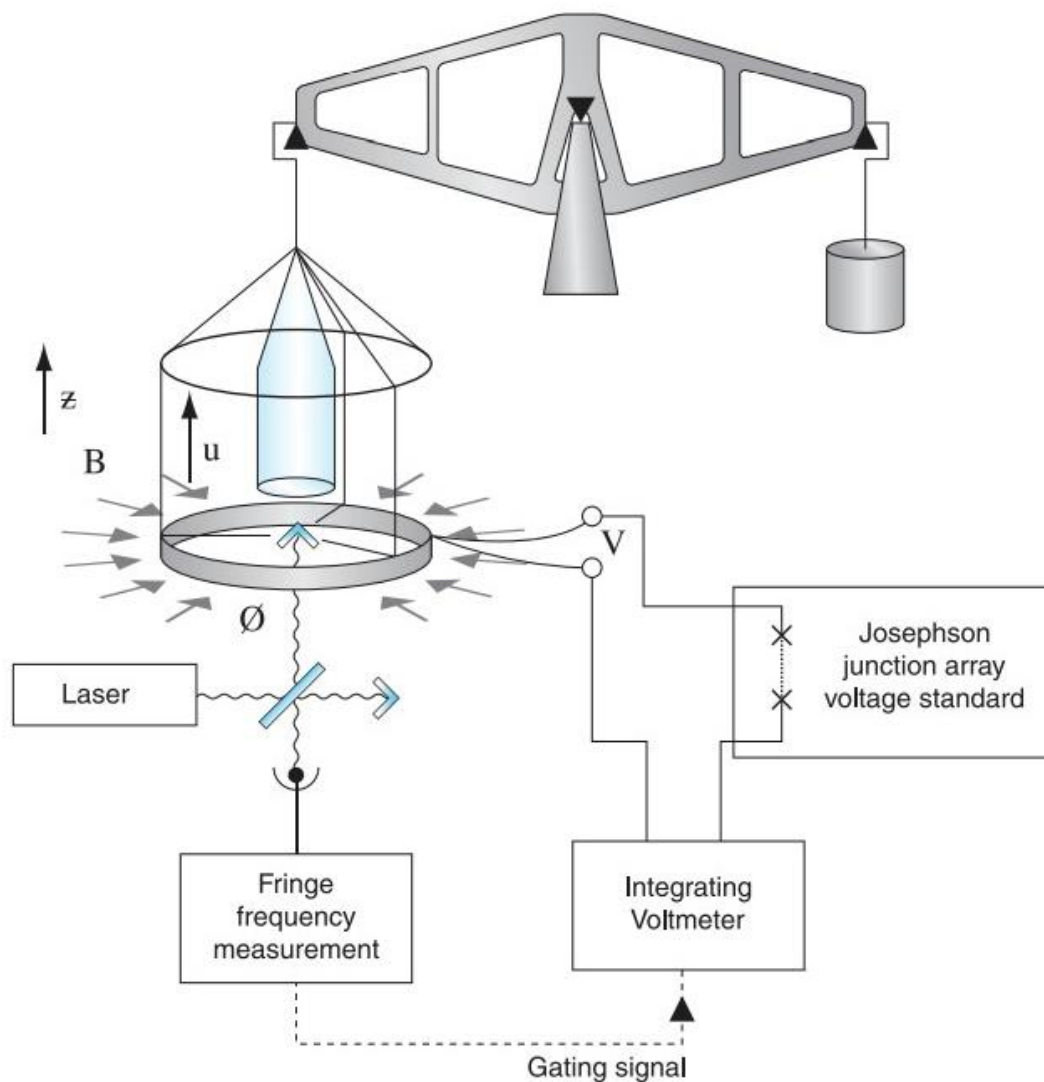
$$E = mc^2 = hf \quad (2)$$

jossa  $E$  on energia,  $m$  massa,  $c$  valonnopeus,  $h$  Planckin vakio ja  $f$  elektromagneettisen säteilyn taajuus. (Bennett, 2018)

Ensin wattivaa'alla täytyy mitata kiihtyvyyttä, joka perustuu Faradayn induktiolakiin. Wattivaa'assa on kaksi kela, jossa oikeanpuoleiseen kelaan johdetaan jatkuvasti muuttuva virta tasaisella nopeudella, mikä saa tasapainovaa'an näköisen laitteen liikkumaan ylös ja alas. Lasersäde yhdistettynä valotunnistimeen mittaa liikkeen kiihtyvyyttä. Virran saadessa varren liikkumaan ylös ja alas vasemmanpuoleiseen kelaan indusoituu jännite. Yhtälö on seuraava.

$$e = lvB \quad (3)$$

jossa  $e$  on jännite,  $l$  johtimen pituus,  $v$  johtimen nopeus ja  $B$  magneettikentän magneettivuon tiheys.



KUVA3. Kiihtyvyyttä mittaava tila (Robinson & Schlamminger 2016)

Punnusta mittaava tila perustuu Lorentzin voimaan, tällöin punnus laitetaan vasemmanpuoleisen varren kelan päällä sijaitsevalle alustalle. Yhtälö on seuraava:

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_B = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (4)$$

jossa  $F$  on voima,  $E$  sähkökentän voimakkuus,  $B$  magneettivuon tiheys,  $q$  hiukkasen sähkövaraus ja  $v$  hiukkasen hetkellinen nopeus.

Magneettikentässä olevaan virtajohtimeen kohdistuva voima pystytään johtamaan Lorentzin voimasta. Massan gravitaatiovoiman vastakkaisuuntainen voima on ylöspäin suuntautuva sähkömagneettinen voima. Varauksen kulkusuunnan ollessa magneettikentän kanssa yhdensuuntainen, on magneettinen voima tällöin nolla. Magneettikentän tärkeä ominaisuus on se, että magneettikenttä ei tee työtä. Voima, joka syntyy vuorovaikutuksesta liikkuvan varauksen kanssa, on aina kohtisuoraan varauksen liikesuuntaa vasten. Siten magneettikenttä ei lisää varauksen kineettistä energiaa. (Jokela, 2006)

Lorenzin voimalle saadaan seuraavanlainen yhtälö:

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} = mg \quad (5)$$

jossa  $I$  on virta,  $l$  langan pituus kelassa,  $B$  magneettivuon tiheys,  $m$  massa ja  $g$  putoamiskiihtyvyys.

Kumoamalla kiihtyvyyttä ja punnusta mittaavien tilojen yhtälöistä yhteiset tekijät  $B$  ja  $L$  ja uudelleenjärjestämällä muuttujat sekä lausekkeet sähköiselle ja mekaaniselle teholle yhtäläistetään, saadaan ratkaisu massalle seuraavasti:

$$eI = mgv \rightarrow m = \frac{eI}{gv} \quad (6)$$

Yhtälö yhdistää mekaanisen tehon sähkötehoon ja siitä saadaan keino ratkaista massa sähköisten suureiden avulla. Ratkaistavaksi jää vielä sähköisten suureiden ja Planckin vakion välinen suhde.

Josephsonin ilmiön avulla saadaan määritettyä elektronin varauksen ja Planckin vakion suhde riittävän tarkasti. Yhtälö on seuraava.

$$U = \frac{h}{2e} f = K_J^{-1} f \quad (7)$$

jossa  $e$  on elektronin varaus,  $h$  Planckin vakio,  $f$  taajuus,  $K_J$  on Josephsonin vakio

Josephsonin ilmiön avulla saadaan potentiaali erot jännitteenä. Ilmiössä suprajohteiden välissä on ohut eristekerros ja tunneloitumisilmiöstä johtuen saadaan aikaan supravirta eristekerroksen yli. Jotta virta saadaan mitattua tarkasti, voidaan mittaukseen käyttää apuna sarjavastusta kelan kanssa. Tarkan jännitteen putoamisen laskemiseen vastuksen yli käytetään Kvantti-Hall-ilmiötä, jonka avulla vastuksen resistanssi saadaan määritettyä erittäin tarkasti (Schlamminger 2018).

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{1}{i} \times \frac{h}{e^2} = \frac{1}{i} R_K \quad (8)$$

jossa  $R_H$  on Hall-resistanssi,  $V_H$  Hall-jännite,  $i$  kokonaisluku, joka yleensä 2 kvantti-Hall resistanssissa,  $R_K$  Von Klitzing vakio

Kvantti-Hall-ilmion avulla pystytään mittaamaan NIST-laboratoriossa  $100\Omega$  tarkkuusvastus  $10^9$  tarkkuudella erittäin pienellä mittauserävarmuudella, mutta tässä opinnäytetyössä ei paneuduta resistanssin määrittämisen metrologiaan. Sen sijaan, että mitattaisiin sähkötehoa seuraavalla kaavalla:

$$P = U \times I \quad (9)$$

jossa  $P$  on teho,  $U$  on jännite ja  $I$  on virta

Virta  $I$  kulkee tarkkaan Kvantti-Hall ilmiön avulla kalibroidun vastuksen läpi mikä aiheuttaa jännitehäviön  $UR$ , jolloin teho saadaan laskettua kaavalla:

$$P = U \times \frac{UR}{R} \quad (10)$$

Molemmat jännitteet on mitattu vertaamalla Josephsonin jännitestandardiin, jolloin niiden arvot voidaan ilmaista taajuutena sekä Josephsonin vakiona. Vastus on mitattu vertaamalla Kvantti-Hall-vastukseen, joten sen arvo voidaan ilmaista termillä  $R_K$ , jolloin saadaan seuraavanlainen kaava

$$P = U \times \frac{UR}{R} = C \times f_1 \times f_2 \times \frac{h}{2e} \times \frac{h}{2e} \times \frac{e^2}{h} = \frac{C \times f_1 \times f_2}{4} \times h \quad (11)$$

jossa  $C$  on tunnettu rationaaliluku, joka yhdistää kaikki tunnetut luvut yhdeksi.

Seuraavaksi voidaankin ratkaista joko kilon massaa varten määritelty Planckin vakio  $h$

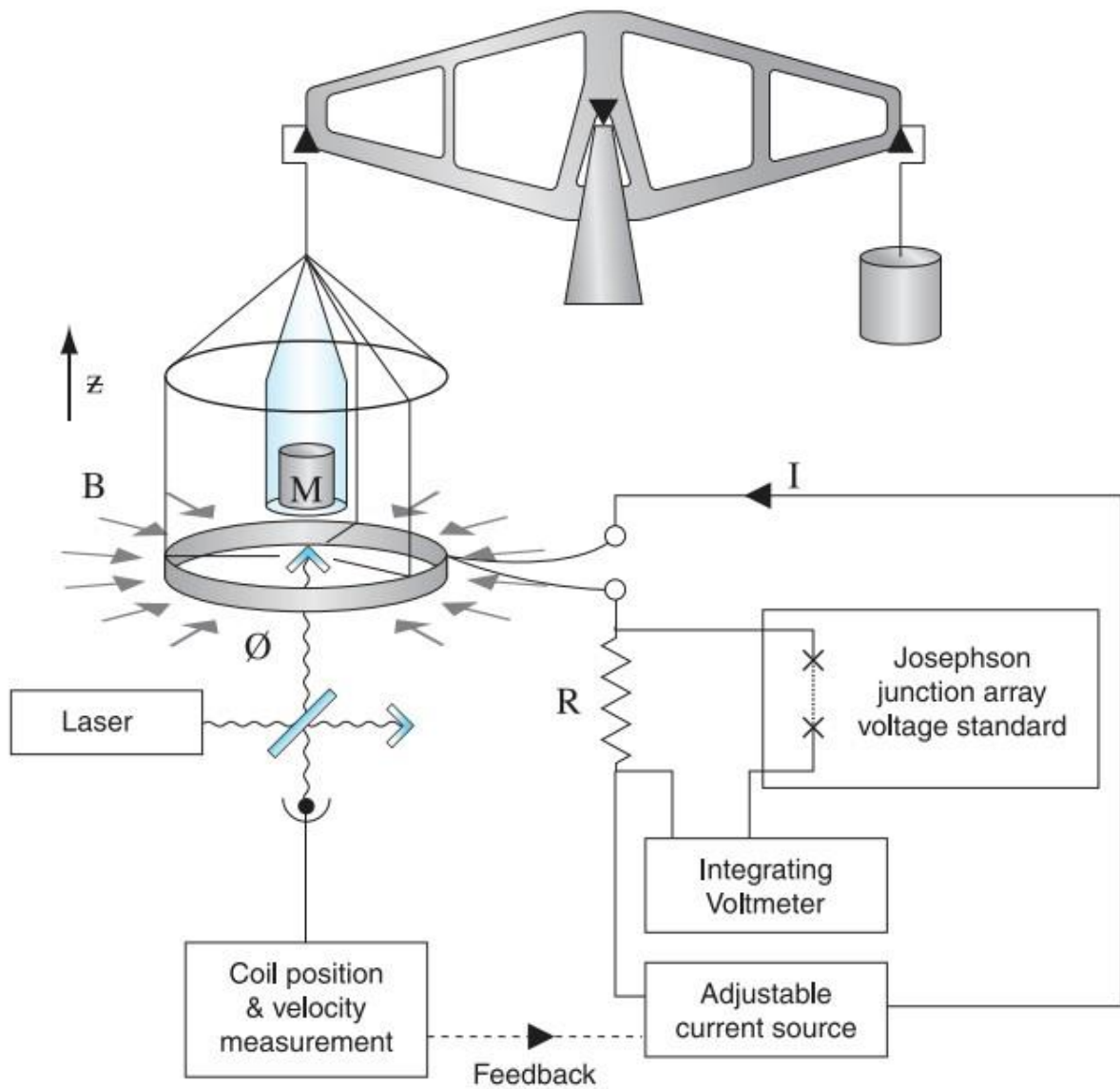
$$h = \frac{4}{C \times f_1 \times f_2} \times m \times g \times v \quad (12)$$

tai kun  $h$  tarkka arvo on määritetty NIST laboratoriossa Pariisissa sijaitsevan kilon prototyypin avulla arvoksi  $h=6.626070150 \times 10^{-34} \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ , tulevaisuudessa punnitaan pelkkää massaa kaavalla

$$m = \frac{C \times f_1 \times f_2}{4} \times \frac{h}{gv} \quad (13)$$

(Schlaminger 2018)





KUVA 4. Massa mittaava tila (Robinson & Schlamminger 2016)

### 3 VAAKOJEN TOIMINTAPERIAATE

Perinteisen tasapainovaa'an lisäksi käytössä on myös nykyaikaisia sähköisiä ratkaisuja. Vaaka-antureina voidaan käyttää pietsosähköisiä, värähtelevä kieli, pressduktori, liikeanturiin perustuvia tai coriolisvoimaan perustuvia antureita. Yleisimpiä pääsääntöisesti käytössä olevia anturityyppejä ovat kuitenkin magneettikompensointiin ja vastusvenymäliuskaan pohjautuvat punnitusanturit.

Sähkömekaanisessa vaa'assa mittausta tapahtuu anturilla tai antureilla, jotka muuttavat kuorman vaikuttavan voiman sähköiseksi signaaliksi. Vaa'assa ei välttämättä ole mekaanisia vipuja niiden perinteisessä merkityksessä, esimerkiksi venymäliuska-antureilla tehdyt vaa'at (VTT. 2020). Massaa mittaava anturi kalibroidaan massalle (kg) ja näyttämä on paikasta riippuvainen, jos sama anturi taas kalibroidaan voimalle (N), ei sijainti vaikuta näyttämään.

Vaakatyyppejä on olemassa useisiin eri käyttötarkoituksiin niin teollisuudessa kuin kotona kuten autovaaka, junavaaka, säiliövaaka, säkitysvaaka, annosteluvaaka, summaava jatkuvatoiminen hihnavaaka tai henkilövaaka. Ei automaattista vaakaa käytettäessä tarvitaan punnitustapahtumaan käyttäjän toimenpiteitä, joita ovat esim. kuorman asettaminen ja poistaminen kuormankannattimelle(vaa'alle) sekä tuloksen havainnointi. Näyttämä voidaan havaita tulostettuna tai näytöltä. Jos tulos menee järjestelmään, se pitää hyväksyä esim. näppäintä painamalla. Automaattinen vaaka taas on laite, joka määrittää massan ilman käyttäjän toimenpiteitä sekä noudattaa laitteelle ominaisia automaattisia prosesseja säätelevää ennalta määriteltyä ohjelmaa.

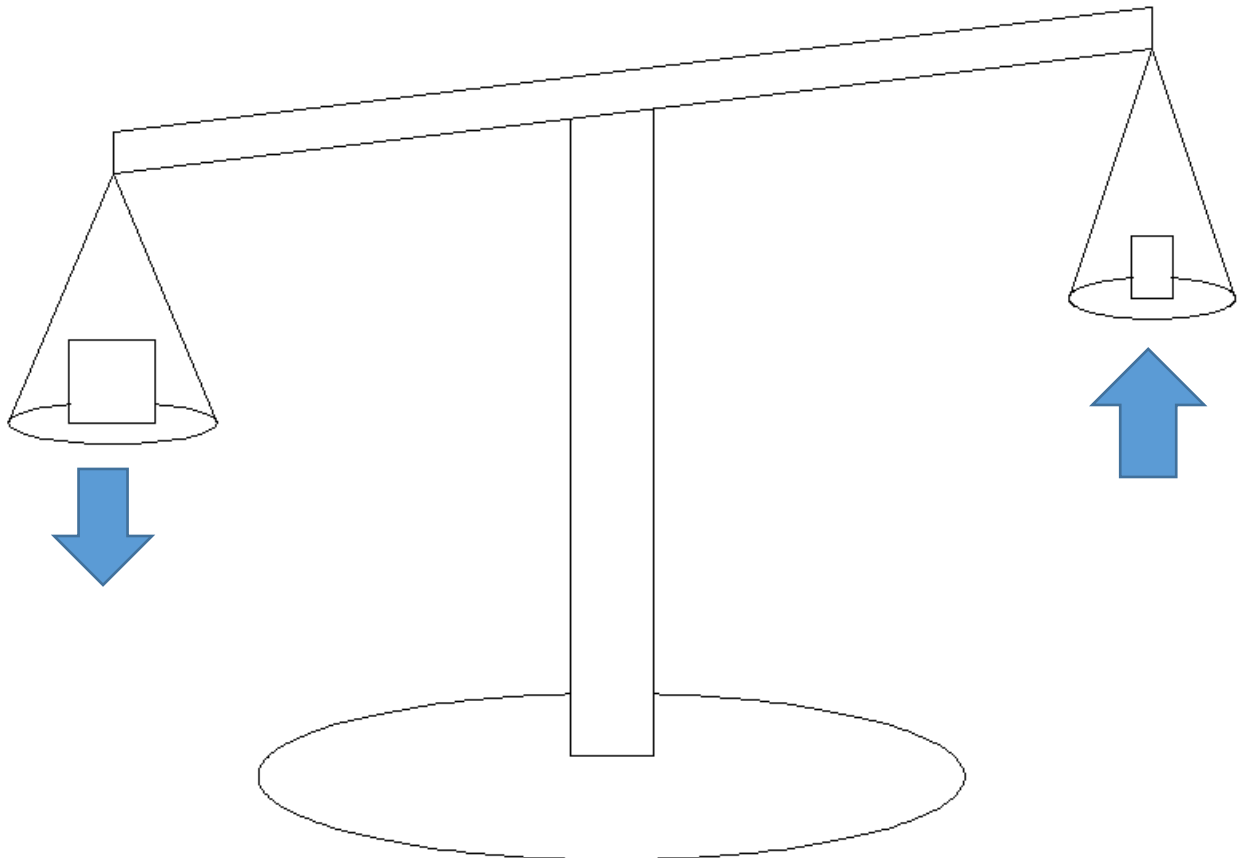
#### 3.1 Tasapainovaaka

Perinteisen tasapainovaa'an toiminta perustuu vaakakuppien suhteeseen, jossa tarkoituksena on saada momenttien summa suhteessa tasapainopisteeseen nolllaksi:

$$(m_1 \times g - \rho_i \times V_1 \times g) \times l_1 = (m_2 \times g - \rho_i \times V_2 \times g) \times l_2 \quad (14)$$

jossa  $m$  on massa,  $g$  on putoamiskiihtyvyys,  $\rho_i$  on ilman tiheys,  $V$  on kuorman tai punnusten tilavuus,  $l$  on vipuvarren pituus.

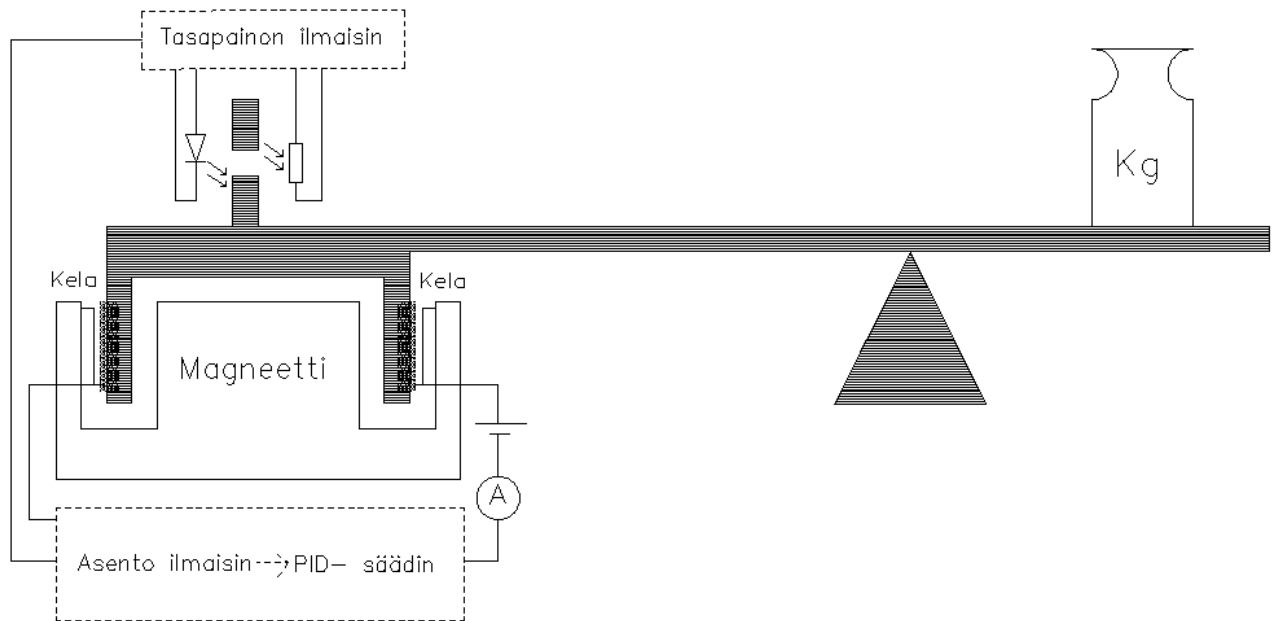
Voimat muodostuvat massojen ja putousliikkeen kiihtyvyyden  $g$  tuloina. Yhtälöstä on nähtävissä, kuinka varsien yhtäsuuruus on keskeinen tekijä vaa'an tarkkuuden kannalta. Viritettäessä vaakaa varsien pituuksien välinen ero suhteellisella mittausepävarmuudella  $10^{-5}$  tulisi olla yhtä suuret samalla tai pienemmällä suhteellisella epävarmuudella. Vaa'an herkkyys riippuu kääntyvien osien painopisteen ja laakerin pystysuorasta välistä. Vaaka pyritään saamaan herkäksi sillä mainittu väli on siis hyvin pieni. Painopisteen ollessa suoraan yläpuolella vaaka on epästabiili. Kuormitus taivuttaa selkävipua ja painopisteen asettelu on uusittava huomattavamman kuormitusmuutoksen yhteydessä. Tavallisessa laboratoriovaa'assa muutaman milligramman eroja voidaan lukea asteikolta. Kahden tonnin kalibrointivaaa'an toistuvuus on kuormauksesta riippuen 50-400mg. Kuormauksen aikana tasapainovaaka on yleensä mekaanisesti lukittuna, etteivät rakenteet vioitu kuormauksen aikana. (Aumala 1998, s. 109-110).



KUVA 5 perinteisen tasavartisen tasapainovaaa'an toimintaperiaate, suurempi massa vaikuttaa varren tasapainoon. mukailen (Aumala 1998,s 102)

### 3.2 Magneettikompensoitu vaaka

Laboratoriovaa'assa saattaa törmätä magneettikompensointiin. Vaa'an toimintaperiaate perustuu sähkömagneettiin, ilmaisimella seurataan vaa'an tasapainoa, kun tasapaino poikkeaa säädin kasvattaa virtaa. Näyttämä muodostetaan käämin virran arvosta.



KUVA 6. Magneettikompensoidun vaa'an toimintaperiaate. (mukaillen Tefnescu 2018)

Magneettikompensoidun vaa'an toiminta perustuu seuraavaan kaavaan:

$$F_m = I \times l \times B \quad (15)$$

missä  $F_m$  on magneettinen voima,  $I$  johtimessa kulkeva virta,  $l$  kentässä olevan johtimen pituus ja  $B$  magneettivuon tiheys

tai johtimen ollessa vinossa kenttäviivoihin nähden:

$$F_m = I \times l \times B \times \sin\alpha \quad (16)$$

(Mäkelä, , Soininen, Tuomola, Öistämö, 2005)

Oikean käden säännön avulla saadaan määritettyä voiman suunta, etusormen osoittaessa sähkövirran ja keskisormen magneettivuon tiheyden suuntaan osoittaa peukalo voiman suuntaan.

### 3.3 Venymäliuska-anturi

Venymäliuska-anturissa voima muutetaan mittaussignaaliksi sen synnyttämän muodonmuutoksen perusteella. Venymäliuskassa sovelletaan langan resistanssin muutosta, jonka langan muodonmuutos aiheuttaa. Resistanssi on:

$$R = \frac{\rho \times l}{A} \quad (17)$$

jossa R on resistanssi,  $\rho$  on lankamateriaalin ominaisresistanssi, l on vastuslangan pituus, A on langan poikkipinta



KUVA 7. Venymäliuska-anturissa puristava voima F vaikuttaa langan muotoon

Kun lanka venyy, voidaan logaritmista derivointia käyttämällä johtaa yhtälö:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dA}{A} \quad (18)$$

Pinta-alan muutos voidaan lausua myös Poisson'in luvun  $\nu$  avulla, jolloin:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu) \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (19)$$

Anturin herkkyys eli venymäkerroin  $g$  määritellään resistanssin ja venymän suhteellisten muutosten osamääränä:

$$g = \frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \quad (20)$$

Venymäkerroin  $g$  on metallilangasta valmistetuilla venymäantureilla noin 2. Puolijohdeantureilla venymäkerroin saattaa olla jopa luokkaa 100.

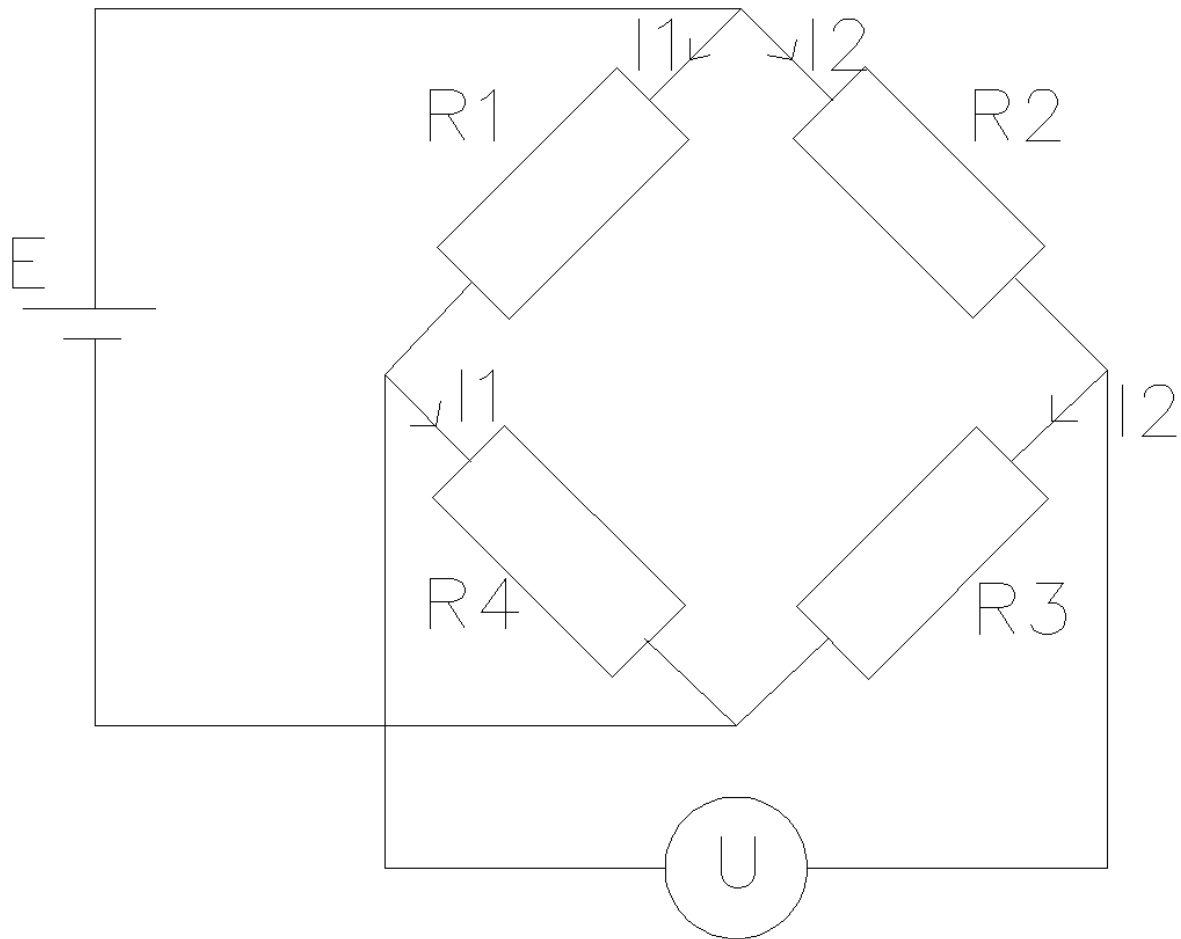
Venymäliuska muuttaa siis vähäisen venymän resistanssimuutokseksi ja liuskoista valmistetaan yleensä 2 tai 4 liuskan yhdistelmiä. Liuskat kiinnitetään kohteeseen liimaamalla. (Aumala 1998, s 103-104)

Liuskan vastus on jossain määrin lämpötilan funktio. Lämpötilan vaikutusta voidaan pienentää laittamalla siltakytkentään kaksi liuskaa, joista vain toiseen vaikuttaa jännitys. Lämpötilan vaikutus molempiin liuskoihin on suunnilleen samanlainen, joten sen vaikutus tulee suurelta osin kompensoiduksi. (Wallin 1994, s 119)

Wheatstonen sillalla on tärkeä merkitys erilaisissa mittauskytkennöissä ja sitä käytetään tarkoissa vastusmittauksissa. Venymäliuska-antureissa puristava voima  $F$  (KUVA 6) aiheuttaa venymäliuskassa resistanssin muutoksen, jolloin jännite-ero jännitteenmittauspisteessä kasvaa (KUVA 7) (Hautala & Peltonen, 2016). Kyseessä on passiivinen anturi, jonka herkkyys ilmaisee ulostulojännitteen nimelliskuormalla voltteja kohden. Uin ollessa tyypillisesti luokka 5-10V on mitattava ulostulojännite luokkaa 2mV/V. Langan venyessä pidemmäksi, se ohenee ja resistanssi kasvaa. Seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \tag{21}$$

jossa  $R$  on resistanssi

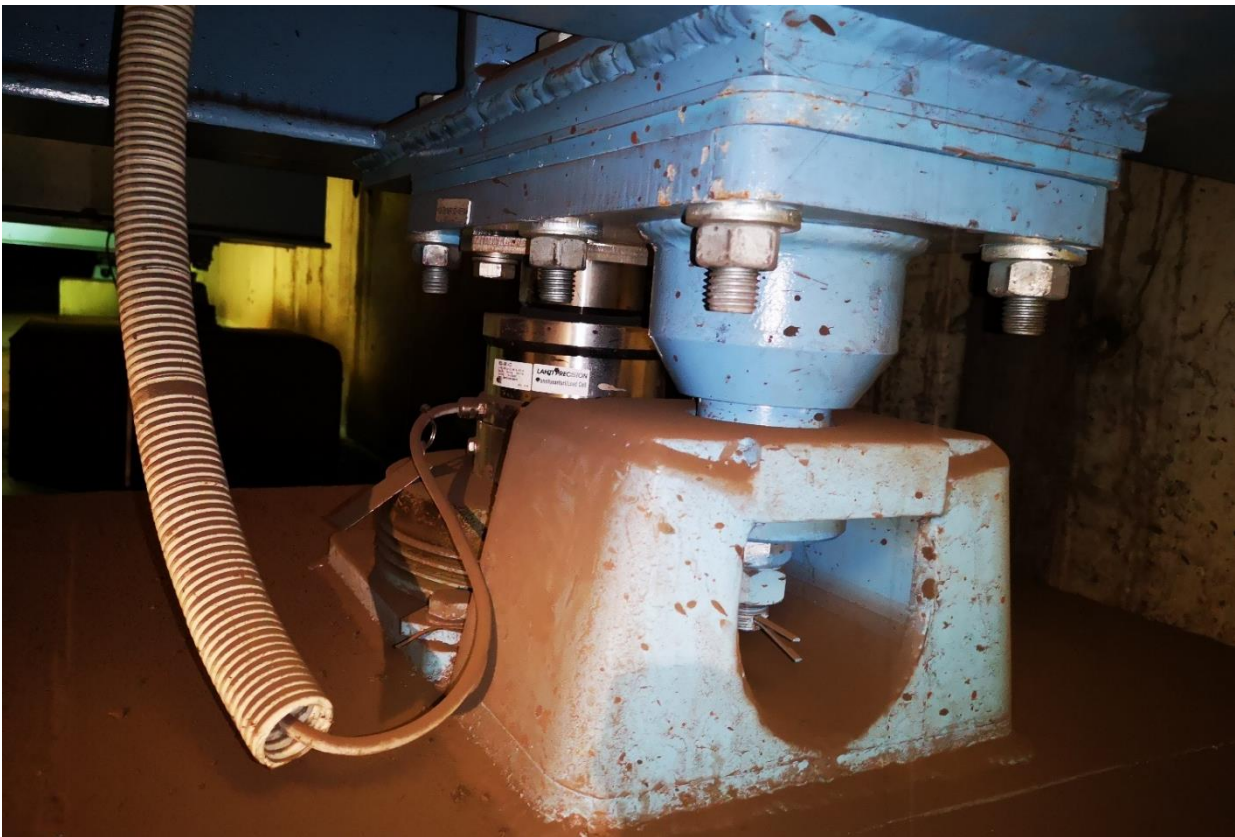


KUVA 8. Wheatstonen silta, (mukaiillen Hautala & Peltonen 2016)

$R1$ :n ja  $R2$ :n ollessa yhtä suuret jännite-ero mittauspisteessä on 0. Sama pätee myös vastuksille  $R3$  ja  $R4$ .  $R1$  arvon muuttuessa mittauspisteessä voidaan mitata jännitehäviötä vastaava jännite-ero ja  $R1$ :n ja  $R2$ :n muuttuessa eri suuntiin mittauspisteiden välille tulee kaksinkertainen arvo.



KUVA 9. Venymäliuska liimattuna kappaleeseen, kappaleen muodon muuttuessa liuska venyy tai puristuu, minkä takia liuskan resistanssi muuttuu.



KUVA 10. Venymäliuskaan perustuva punnitusanturi taka-alalla, etualalla oleva sininen osa on liikkeenrajoitin, joka estää kuormankannattimen eli tässä tapauksessa autovaakasillan liiallisen liikkumisen.



Antureiden teknisissä tiedoissa on määritetty nimelliskuorma, joka ilmaisee: punnitusalueen, nimellisherkyys  $mV/V$  joka ilmaisee anturin syöttöjännitteen ja lähtöjännitteen suhteen, herkkyyden toleranssi, yhdistetty virhe joka sisältää lineaarisuus- ja hystereesivirheen, nollapisteen palautuvuuden ryömintävirheen 30min aikana, nollapisteen lämpötilavirheen nimellis- ja käyttölämpötila-alueella, vähimmäisaskaaleen, minimikäyttöalueen, suurimman käyttökuorman, tulo- ja lähtöresistanssi sekä niiden toleranssi, nollapisteen asetustoleranssi, maksimisyöttöjännite, nimellis- ja käyttölämpötila-alue, referenssilämpötila, varastointilämpötila-alue ja suojausluokitus (Lahti Precision, 2019)



KUVA 11. Rikkinäinen ruostumattomasta teräksestä valmistettu punnitusanturi

### 3.4 Vaakaelektronikka

Anturi tai anturit tarvitsevat toimiakseen myös vaakaelektronikkaa eli ns. vaakapäätteen missä on jännitesyöttö punnitusantureiden Wheatstone sillalle. Antureilta tulevat mittausviestit voidaan kytkeä vaakapäätteestä riippuen, joko yksittäin tai rinnan. Vaakaelektronikkaan yksittäin kytketyissä antureissa etuna painon jakautumisen mittaus yksittäiseltä anturilta sekä viallisen anturin selvittäminen anturikuormien perusteella. Antureiden syöttöjännitettä käytetään mittauksessa referenssijännitteenä. Punnitusantureiden syöttöjännite riippuu käytetystä vaakaelektronikasta ja on esim. luokkaa 5 V vaihto- tai tasajännitettä, antureilta tuleva mittaussignaali on luokkaa 0–15 mV. Viesti muutetaan A/D muuntimella digitaaliseksi viestiksi ja summataan näyttölaitteelle.



KUVA 12 Vaakapääte ilman omaa näyttöä.

Näytöllisellä ja näppäimillä varustetulla vaakapäätteellä voi asetuksia sekä parametointia tehdä myös ilman tietokonetta kun taas näytöttömässä vaakapäätteessä tarvitaan aina tietokone muutoksia varten. Käyttöönnotossa määritellään esimerkiksi anturien määrä ja koko, onko näyttämä kiloja vai tonneja sekä askelarvo. Parametroinnin jälkeen viritetään nolla sekä vahvistus tunnetulla massalla. Vaaka voidaan liittää tarvittaessa prosessiväylään, jossa vaaka tekee esimerkiksi annostelua ja tällöin vaaka voi ohjata annostelevaa laitetta määritettyjen annosteluparametrien mukaan. Vaakapääte voi olla myös lähiverkkoon kytkettynä, jolloin parametointia ja vaakatoimintoja pystytään seuraamaan etäämpänä itse vaakapäätteestä. Vaa'an ollessa varmennettu eli toimiessa hinnanmääritystä varten, tarkastuslaitos sinetöi vaakapäätteen siten, ettei siihen voida tehdä muutoksia tai korjauksia ilman sinettien rikkomista. Yksi vaakaelektronikka voi sisältää myös useita itsenäisiä vaakoja, jolloin pystytään käyttämään myös erilaisia antureita jokaisella vaa'alla. Kaupankäyntiin ja hinnanmääritykseen käytettävän vaa'an on täytettävä Euroopan parlamentin ja neuvoston 2009/23/EY direktiivin mukaisesti tarkkuusluokan III määrittely muista kuin itsetoimivista vaa'oista. (EU-direktiivi, 2009).

## 4 VAAKOJEN KUNNOSSAPITO

Vaakalaitteiden huolto voi liittyä määräaikaistarkastukseen, joka joissain tapauksissa voi olla lakisääteinen, mutta liittyä myös vioista aiheutuviin korjaustoimenpiteisiin. Vaa'an käyttötarkoituksesta vaihdellen korjaustoimenpiteet voivat olla kuluvien osien vaihtoa, mutta suurin osa vaa'issa olevista vioista ovat näyttämän poikkeamia, jotka yleensä liittyvät vaa'an mekaniikkaan. Tässä luvussa olevat toimenpiteet ja toteamukset liittyvät osin omiin kokemuksiin kalibrointitoiminnassa ja tyypillisiin vikoihin, joita olemme kohdanneet työskennellessäni vaakakunnossapitoryhmässä.

### 4.1 Korjaus ja kunnossapito

Vaa'an rakenteisiin kertynyt lika voi johtaa virheelliseen punnitustulokseen vaa'an kantaessa, eli vaaka ei makaa vapaasti anturoinnin päällä. Tällöin esimerkiksi vaa'an alapuolelle kertynyt materiaali koskettaa kuormankannattimeen tai kuorman kannattimen sivuille kertynyt materiaali kantaa kuormankannatinta seinämiin.

Anturin liikkeenrajoittimessa liikevara saattaa olla loppunut mutta myös antureiden ympärille kertyneet epäpuhtaudet voivat vaikuttaa vaa'an näyttämään. Siilovaa'issa joustoyhteisiin on kertynyt vaa'alla punnittavaa materiaalia. Joustoyhde voi olla myös kierossa tai tiukalla, mikä aiheuttaa vertikaalisia tai horisontaalisia voimia vaakaan vaikuttaen punnitustulokseen. Siilovaa'issa merkittäviä poikkeamia punnitukseen voivat aiheuttaa myös erilaiset liitännät kuten siiloon tulevat paineilmaletkut.

Vaa'an ylikuormittaminen saattaa johtaa punnitusanturin rikkoutumiseen, mikä näkyy usein vaa'an virheilmoituksena tai siten, että näyttämä ei ole lähelläkään sitä mitä sen pitäisi olla. Myös hitsausvirta voi aiheuttaa anturin rikkoutumisen. Rakenteissa olevat halkeamat esimerkiksi hitsausaumoissa voivat aiheuttaa punnituksen toistuvuuteen poikkeamaa, jolloin vaaka ei näytä samaa tulosta peräkkäisissä punnituksissa ratkeaman hieman eläessä.

Perustusten pettäessä eivät antureille kohdistuvat voimat ole välttämättä pystysuoria vaan vaikutukset saattavat olla myös saman tapaisia verrattuna rakenteiden halkeamista aiheutuviin virhenäyttämiin eli itse vaa'an toistokykyyn. Rakenteita pitkin johtuva värinä esimerkiksi läheisestä prosessista voi vaikuttaa punnituksen rauhoittumisaikaan tai yleensäkin punnituksen satunnaiseen virhenäyttämään. Värinän

aiheuttamaa vaakalukeman heilumista voidaan vaimentaa suurentamalla vaa'an resoluutiota, mutta resoluution suurentaminen huonontaa myös vaa'an tarkkuutta. Teollisuudessa vikapaikka löytyy useasti myös anturikaapeloinnista, putkitus on tärkeää, jos haluaa suojata kaapelia katkeamiselta tai sulamiselta.

Hihnavaaioissa huonot vaakarullat tai niiden linjaus voivat aiheuttaa poikkeamaa massavirrassa. Antureilta tulevien signaalien ollessa pieniä, mV-tasoisia korostuu myös maadoituksen tärkeys. Huonosti maadoitettu instrumentti tai anturointi voi johtaa virhenäyttämiin EMC:n vaikutuksesta oikeaoppisesti rakennettuna anturikaapelointi kulkee eri hyllyllä kuin vahvavirtakaapelit.

Vaakarakenteisiin kertyneet lumi ja jää kuormittavat kunnossapitoa talvisaikaan. Autovaaioissa sillat ovat usein lämmitettyjä, mikä vähentää talvikunnossapitoa merkittävästi. Tuuli vaikuttaa varsinkin suuriin punnittaviin pinta-aloihin, autovaaioissa usein huomaa kovan tuulen vaikutuksen näyttämän muuttuessa vaa'an ollessa jopa tyhjä mutta tuulen vaikutus on merkittävämpi esimerkiksi korkeissa siiloissa.

Optimaalisessa tilanteessa vaaka tulisi sijoittaa rauhalliseen tilaan, jossa lämpötila on vakaa sekä il-mankosteus alle 60 %. Alustan on oltava riittävän tukeva vaa'an suoruuden varmistamiseksi täydellään kuormalla, kohteessa ei tärinää tai ainakin tärinältä eristetty, paikka ei saisi olla vetoinen koska il-mavirta voi vaikuttaa punnitustulokseen. Herkissä vaaioissa voi konvektio aiheuttaa poikkeamia mit-taustulokseen punnittavan materiaalin ollessa eri lämpöinen kuin vaaka, tällöin lämpötilaero voi ai-heuttaa ilmavirtauksia. Kylmien punnusten pintaan voi myös tiivistyä kosteutta. (Pusa ym. 2017, s. 18).

Punnitusinstrumenteista parametrien talteen otto helpottaa merkittävästi instrumentin rikkoutuessa uu-den laitteen käyttöönottoa. Esimerkiksi vanha varmennusparisto voi johtaa siihen, että sähkökatkon sattuessa ovat parametrit kadoksissa sähköjen palauduttua. Usein punnitussinstrumenttien vikatilanteissa selviää kortinvaihdolla, mutta vika saattaa satunnaisesti kohdistua myös esimerkiksi vaakainstru-mentin tai anturirasian pohjakortille.

Autovaakalaitteissa vika saattaa usein kohdistua kuitintulostukseen tai tietokonevikaan ja tietokoneen vikaantuessa voi ongelmaksi tulla uuden laitteen ohjelmistot sekä yhteensopivuus varalaitteen puuttu-essa. Tästä syystä olisikin hyvä varautua kriittisissä kohteissa siten, että varalaitteistoa on saatavilla omassa varastossa. Näin voidaan välttyä pidemmiltä käyttökatkoksilta.

Usein viat löytyvät nopeasti mutta joskus vaakaviat saattavat olla hyvinkin hankalia löytää varsinkin tapauksissa, joissa virhenäyttämä on satunnaista. Vikatilanteissa tarvittavat työkalut saattavat vaihdella suurista tunkeista tai taljoista tinausvälineisiin sekä yleismittariin. Hyvä ennakkohuolto pidentää vaa'an käyttöikää ja lyhentää tuotannon seisokkeja.

## 4.2 Kalibrointi ja varmentaminen

Määrävälein tehtävällä kalibroinnilla saadaan selville paljonko mittalaite näyttää väärin spesifioituissa olosuhteissa eli kyseessä on suureen mittanormaanin sekä mittalaitteen välinen yhteys. Kalibroinnin tuloksena voidaan mittalaite tarvittaessa virittää näyttämään oikein tai ainakin vaadittujen toleranssien sisäpuolelle. Kalibroinnissa on kyse aukottomasta vertailuketjusta, missä käytettävän mittanormaanin (punnuksen) kalibrointijälki on kansallisissa tai kansainvälisissä mittanormaaleissa. Mittanormaali on siis referenssi, johon mittalaitetta tai sen näyttämää verrataan. Vaakojen osalta kalibrointi suoritetaan käyttämällä tunnettuja konventionaalisia massoja, joita kutsutaan punnuksiksi. Käytettävät punnukset on kalibroitu toisen tahon tarkemman luokan punnuksilla, joiden mittajälki on tarkistettu ketjussa seuraavassa kalibrointilaboratoriossa siten että lopullinen kalibroinnin mittajälki sijaitsee ensimmäisessä kappaleessa kerrotussa kansainvälisessä referenssinormaalissa, jossa kilo on määritelty Planckin vakion avulla.

Määritellyn tarkkuusluokan ylläpito vaatii vaaoilta säännöllistä kalibrointiohjelmaa, joka voi olla vapaaehtoinen toimenpide mutta erityisesti laatustandardit edellyttävät, että tuotteiden spesifikaationmukaisuuteen ja laatuun vaikuttavat mittaukset ovat jäljitettävissä standardien mukaisiin mittanormaaleihin. Kalibroinnissa saadun mittalaitteen näyttämän sekä mittaussuureen välisen yhteyden lisäksi asianmukainen kalibrointi edellyttää myös kalibroinnin mittaasepävarmuuden laskentaa. Vastuussa tapahtumassa on kalibroinnin suorittaja, suorittajan ollessa akkreditoitu kalibrointilaboratorio on asia tällöin myös varmistettu. (Riski & asiantuntijatyöryhmä 1998, s 3-4.)

Akkreditoitun kalibrointilaboratorion toimintajärjestelmä vastaa standardin ISO 9001 mukaiselle toimintajärjestelmälle asetettuja vaatimuksia. Kalibrointien metrologisen jäljitettävyyden tärkeys ja merkittävyys on tunnustettu kansainvälisten alan organisaatioiden ISO, ILAC, ja IAF yhteisessä julkilausumassa. Julkilausuman viesti on että, että mittaus tulosten vertailtavuus ja hyväksyttävyyys varmistetaan ainoastaan mittaustulosten metrologisella jäljitettävyydellä kansainvälisesti hyväksytyihin referensseihin. Julkilausuman ovat allekirjoittaneet metrologian, akkreditoinnin ja standardisoinnin kansainväliset organisaatiot BIPM, OIML, ILAC ja ISO. (FINAS A. 2022.)

Turvallisuus ja kemikaaliviraston (Tukes) yksikkö FINAS toimii kansallisena akkreditointielimenä Suomessa, ja sen toiminnasta on säädetty lailla (920/2005 Laki vaatimustenmukaisuuden arviointipalvelujen pätevyyden toteamisesta). Kaikissa EU-maissa on vain yksi akkreditointielin, jonka täytyy olla EU-jäsenmaissa valtion toimesta järjestetty yleishyödyllinen voittoa tuottamaton palvelu. Akkreditoinnissa on kyse pätevyyden toteamisesta. Akkreditointiprosessissa tehdään akkreditointipäätös, jossa todetaan toimijan pätevyysalueella standardissa kuvattujen vaatimusten täyttyminen. Tällöin kalibrointitulosten oikeellisuus ja vertailukelpoisuus on voitava osoittaa.

Kalibrointi eroaa varmentamisesta siinä, että kalibrointi kertoo poikkeaman ja epävarmuuden laitteen suorituskäytön mukaan, kun taas varmennus kertoo päästäänkö asetettujen virherajojen sisään. Varmennus on ulkopuolisen tekemä, eli asiantuntijalta käyttäjälle tehtävä toimenpide, kun taas kalibrointi on asiantuntijalta asiantuntijalle tehtävä toimenpide. Varmennus ottaa kantaa myös laitteen toimintaedellytyksiin vaaditulla tarkkuudella eli mittauslaite toimii luotettavasti ja laite rakenteeltaan vastaa hyväksyntää. (Riski & asiantuntijatyöryhmä, 1998.)

Metrologiassa noudatettavia ohjeita ja standardeja on todella paljon ja asia voi vaikuttaa todella sekavalta äkkiseltään asiaan tutustuesssa. Vaakojen osalta käytettäviä suosituksia ja standardeja ovat mm.:

- OIML R47 Standard weights for testing of high capacity weighing machines
- OIML R50 Continuous totalizing automatic weighing instruments (belt weighers).
- OIML R51 Automatic catchweighing instruments.
- OIML R52 Hexagonal weights
- OIML R60 Metrological regulation for load cells
- OIML R76 Non-automatic weighing instruments
- OIML R87 Quantity of product in prepackages
- OIML R106 Automatic rail-weighbridges
- OIML R111-1 Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1–2, M2, M2–3 and M3 Part 1: Metrological and technical requirements
- OIML R134 Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads
- SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
- ISO/IEC Guide 98 Guide to the expression of uncertainty in measurement
- SFS-EN 45 501 Metrological aspects of non-automatic weighing instruments
- EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration
- EAL-G12 Traceability of Measuring and Test Equipment to National Standards
- EURAMET Calibration guide no. 18 Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments
- FINAS V1/2021

- T286 vaakojen kalibrointiopas

Toiminnassa noudatettavia lakeja, asetuksia ja direktiivejä mm.:

- Mittauslaitelaki 707/2011
- Valtioneuvoston asetus mittauslaitteista 471/2014
- Valtioneuvoston asetus ei-automaattisista vaaista 1431/2016
- Valtioneuvoston asetus mittauslaitteiden olennaisista vaatimuksista, vaatimustenmukaisuuden osoittamisesta ja teknisistä erityisvaatimuksista 1432/2016
- Mittauslaitedirektiivi 2014/32/EU
- Vaakadirektiivi 2014/31/EU
- Mittayksikködirektiivi 80/181/ETY
- Direktiivi mittauslaitteita ja metrologisia tarkastusmenetelmiä koskevista yleisistä säännöksistä 2009/34/EY

### 4.3 Vaakojen kalibrointi punnuksilla

Vaa'an kalibroinnissa verrataan siis tunnettua konventionaalista massaa vaa'an näyttämään ja tapahtuma sisältää myös mittausepävarmuuden määrittämisen. Kalibrointi kertoo, paljonko vaaka näyttää väärin. Jotta kalibrointi olisi luotettava, sisältää pöytäkirja aina käytettyjen referenssien jäljitettävyyden sekä tapahtuman mittausepävarmuuden. Kalibrointi terminä ei sisällä laitteen virittämistä eli toimenpidettä, jossa vaaka säädetään näyttämään oikein.

Referenssisuureen ja mittalaitteen arvojen välinen yhteys kerrotaan tuloksessa usein arvojen erotuksena, virheenä eli ”vaa'an näyttämä – referenssinormaali = virhe”. Virheen ollessa miinusmerkkinen, näyttää vaaka liian vähän ja virheen ollessa positiivinen näyttää vaaka liikaa. Mittausepävarmuus  $U$  ilmaisee kalibrointitapahtuman epävarmuuden, joka ilmoitetaan yleensä muodossa  $\pm U K=2$ , eli standardiepävarmuus mittaustuloksessa on arvojen  $+U$  ja  $-U$  sisällä 95 % todennäköisyydellä. (Pusa ym. 2017, s 11.)

#### 4.3.1 Kalibrointipunnukset

Käytettävien punnusten tarkkuusluokan määrittelee asetetut tarkkuusvaatimukset, käytettävien punnusten yhteenlaskettu mittausepävarmuus pitää olla pienempi kuin 1/3 kuorman sallitusta virheestä. Eli vaa'an suurimman sallitun virheen ollessa 1 kg, saa punnusten epävarmuus olla 0,33 kg:

$$U_{\text{normaali}} < \frac{\text{Kuorman sallittu virhe}}{3} \quad (22)$$

jossa  $U_{\text{normaali}}$  on käytettävän kalibrointipunnuksen yhteenlaskettu mittausepävarmuus (Pusa, Riski, Ojanen-Saloranta 2017, s. 12).

	Punnusten suurin sallittu poikkeama $\pm$ mg								
Nimellispaino	Luokka E1	Luokka E2	Luokka F1	Luokka F2	Luokka M1	Luokka M1-2	Luokka M2	Luokka M2-3	Luokka M3
5000 kg			25000	80000	250000	500000	800000	1600000	2500000
2000 kg			10000	30000	100000	200000	300000	600000	1000000
1000 kg		1600	5000	16000	50000	100000	160000	300000	500000
500 kg		800	2500	8000	25000	50000	80000	160000	250000
200 kg		300	1000	3000	10000	20000	30000	60000	100000
100 kg		160	500	1600	5000	10000	16000	30000	50000
50 kg	25	80	250	800	2500	5000	8000	16000	25000
20 kg	10	30	100	300	1000		3000		10000
10 kg	5	16	50	160	500		1600		5000
5 kg	2,5	8	25	80	250		800		2500
2 kg	1	3	10	30	100		300		1000
1 kg	0,5	1,6	5	16	50		160		500
500 g	0,25	0,8	2,5	8	25		80		250
200 g	0,1	0,3	1	3	10		30		100
100 g	0,05	0,16	0,5	1,6	5		16		50
50 g	0,03	0,1	0,3	1	3		10		30
20 g	0,025	0,08	0,25	0,8	2,5		8		25
10 g	0,02	0,06	0,2	0,6	2		6		20
5 g	0,016	0,05	0,16	0,5	1,6		5		16
2 g	0,012	0,04	0,12	0,4	1,2		4		12
1 g	0,01	0,03	0,1	0,3	1		3		10
500 mg	0,008	0,025	0,08	0,25	0,8		2,5		
200 mg	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6		2		
100 mg	0,005	0,016	0,05	0,16	0,5		1,6		
50 mg	0,004	0,012	0,04	0,12	0,4				
20 mg	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3				
10 mg	0,003	0,008	0,025	0,08	0,25				
5 mg	0,003	0,006	0,02	0,06	0,2				
2 mg	0,003	0,006	0,02	0,06	0,2				
1 mg	0,003	0,006	0,02	0,06	0,2				

TAULUKKO 1 Punnusten suurimmat sallitut poikkeamat OIML R111 mukailten (Organisation internationale de métrologie 2004, s 12)

Kansainvälisen lakisäätöisen mittaamisen järjestön suosituksen OIML R111 punnusluokat ovat yleisesti käytössä Suomessa, suosituksessa punnusluokkia on 9kpl. Suurin sallittu virhe on M3 luokan punnuksissa ja pienin sallittu virhe E1 luokan punnuksissa. Suositus R111 koskee punnuksia nimellis-massaltaan välillä 1 mg - 50 kg. Suositusten pyrkimys on riittävän tarkat ja stabiilit punnukset vaakojen kalibrointiin ja vakaukseen. OIML R47 antaa virherajat yli 50 kg punnuksille vaa'an askelmäärän



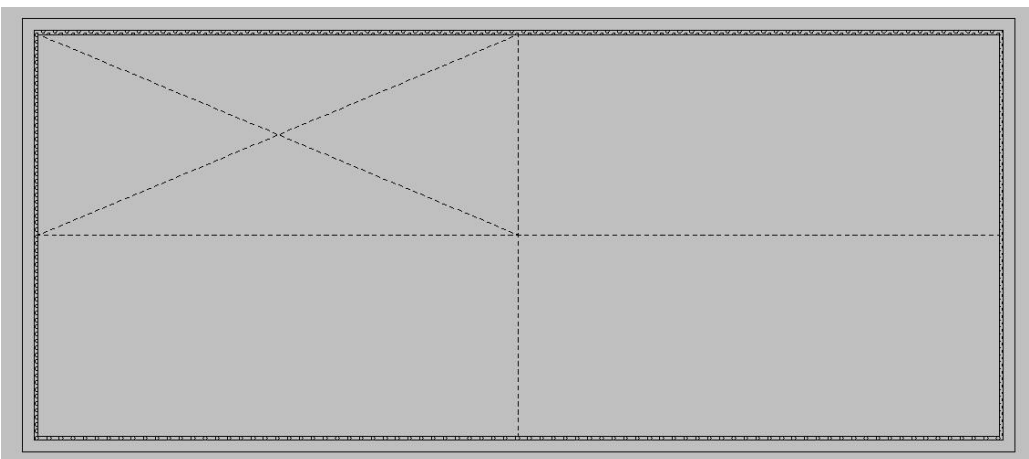
mukaisesti. Näitä virherajoja voidaan käyttää kalibroinneissa punnusten epävarmuuksina. (Riski & asiantuntijatyöryhmä 1998, s 20.)



KUVA13 5000 kg suurpunnuksien lastaus autovaa'alle

#### 4.3.2 Kuormaus

Valmistajan suosituksen mukaisesti ennen kalibrointia vaa'an tulee olla määritetyn ajan päälle kytkettynä ja vaaka nollataan ennen kuormausta. Ensimmäisenä vaa'alle tehdään yleensä epäkeskeisyystesti, kuormankannatin jaetaan neljään osaan ja näiden osien keskellä käytetään, jos mahdollista yhtä suurta punnusta Max/3 eli kolmasosa maksimikuormasta. Kuvassa 12 neljällä vaakasillan nurkissa sijaitsevalla anturilla oleva autovaakasilta on jaettu katkoviivoilla neljään osaan, jokaisen osan keskipisteessä sijaitsee epäkeskeisyystestin punnusten keskipiste.



KUVA14 Vaakasilta jaettu neljään osaan katkoviivoilla sekä epäkeskeisyyspisteen määrittäminen mukailen (Pusa ym. 2017, s 26)

Jokainen nurkkapiste on yksilöity siten, että kalibrointipöytäkirjasta pystyy tunnistamaan, mitä nurkkaa mittaustulos tarkoittaa esimerkiksi merkitsemällä näytön paikan kuvaan tai ilmansuunnat sekä numeroimalla nurkat. (Pusa ym. 2017, s 66.)

Seuraavaksi vaaka kuormataan pienimmästä suurimpaan kuormaan ja vähintään viidessä eri pisteessä kirjataan vaa'an näyttämä lopulliseen kalibrointitodistukseen. Viimeisessä eli toistotestissä katsotaan vaa'an toistokykyä n. 50–100 % maksimista kokoisella kuormalla. Toistotesti samalla kuormalla tehdään kolme kertaa. Virhe ei saa olla suurempi kuin maksimaalinen sallittu virhe ko. kuormalla (Organisation Internationale DE Metrologie Legale 2006, s 31-32).

Joissain tilanteissa, kun vaakaa ei ole mahdollista tarkistaa punnuksilla, voidaan punnittava materiaali tarkistaa toisella tarkemmalla vaa'alla ja käyttää punnittavaa materiaalia referenssinä. Materiaalia olisi hyvä olla vähintään puolet vaa'an maksiminäyttämästä.

Vaa'an virherajat kasvavat kuorman kasvaessa. Varmennetuissa vaa'oissa käytetään seuraavanlaista kaavaa virherajoille:

0d-500d:  $\pm 0,5e$

500d-1000d:  $\pm 1,0e$

1000d-6000d:  $\pm 1,5e$

jossa d on vaa'an askelmäärä ja e on vaa'an askelarvo

### 4.3.3 Kalibrointitaajuus

Kalibroinnin aikaväliin ja seurantamittauksiin vaikuttavat esimerkiksi se, kuinka suuria ongelmia väärät punnitustulokset aiheuttavat, millaiset ovat vaa'an käyttöolosuhteet sekä aikaisemmat kokemukset vaa'an toiminnasta. Varmuutta vaa'an toimintaan lisäävät käyttäjän tekemät seurantamittaukset vakio-punnuksella tapauskohtaisesti esimerkiksi vuoron alussa tai kerran viikossa. (Pusa ym. 2017 s 37). Kalibrointitaajuuteen ei siis ole olemassa tarkkaa ohjeistusta, ellei kyseessä ole lakisääteisesti varmennettu vaaka. Jos ympäristöolosuhteissa tai vaa'assa on tapahtunut muutoksia, on syytä suorittaa tarkistusmittaus, vaikkei kalibroinnin ajankohta olisikaan käsillä.

#### 4.3.4 Mittausepävarmuus

Mittausepävarmuuslaskennassa otetaan huomioon kalibrointitapahtumaan vaikuttavat tekijät, joita voi tulla useista lähteistä kuten referenssin epävarmuus, ympäristö, laitteen näyttämän resoluutio ja mitaaja (Kiviluoma 2019). Kalibroinnin epävarmuutta arvioidaan ISO/IEC Guide 98 sekä EA4/02 periaatteiden mukaisesti. Mittausepävarmuutta voidaan arvioida kahdella eri tavalla. Tyypin A mittausepävarmuuden arviointi perustuu tilastolliseen analyysiin sarjasta mittauksia määritellyissä mittausolosuhteissa. Tyypin B mittausepävarmuus perustuu muihin keinoihin kuin tilastolliseen analyysiin mittauksien sarjasta, kuten aikaisemmat mittaustiedot, valmistajan tekniset tiedot, kokemus ja yleistieto materiaalien sekä instrumenttien toiminnasta, kalibrointi- ja muissa sertifikaateissa olevat tiedot sekä käsi-kirjojen viitetiedot (Accreditation 2022, s 6). Vaaissa myös ilman tiheydellä on merkitystä. Samalla punnuksella voidaan saada eri tulos mittauksessa erilaisella ilman tiheydellä.

Tilaaajan vaatimusten mukaan, otetaan sopivat epävarmuuskomponentit mukaan laskentaan. Punnusten epävarmuus eli  $U_p$  löytyy käytettävien punnusten kalibrointitodistuksesta ja punnusten epävarmuudet lasketaan yhteen. Toistokyky eli  $U_t$  mittaustulosten ääriarvovälin puolikas tai mittausten hajonta.

Hystereesin tuottama epävarmuus eli  $U_h$  voidaan määrittää tekemällä ylös-alaskuormaus ja lasketaan lylös-lalas maksimiarvosta seuraavasti:

$$U_h = \frac{\text{lylös-lalas}}{2 \times \sqrt{3}} \quad (23)$$

jossa l on vaa'an näyttämä

Epäkeskeisyydestä tuleva epävarmuus  $U_e$  seuraavasti:

$$U_e = \frac{|\Delta i|_{MAX}}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

jossa i on itseisarvoltaan suurin epäkeskeisyysvirhe

Digitaalinäytön askelarvosta aiheuttama epävarmuus  $U_d$ , standardiepävarmuus lasketaan nollakuormalla ja tutkittavalla kuormalla tasan jakautuneelle alueelle seuraavasti:

$$U_d = \frac{d}{\sqrt{6}} \quad (25)$$

jossa d on näyttämän askelarvo

Lämpötilasta aiheutuva epävarmuus  $U_{te}$  jos vaakainstrumentille on annettu lämpötilakerroin  $C_{te}$  seuraavasti:

$$\frac{\Delta T \times C_{te} \times m}{\sqrt{12}} \quad (26)$$

Mittausepävarmuuden määrittämisessä käytetään yleensä Gaussin käyrällä  $K=2$  kattavuuskerrointa, arvolla  $K=2$  saadaan n.95 % luottamustaso. Lopuksi lasketaan vaa'an näyttämän laajennettu epävarmuus  $U$

$$U = 2 \times \sqrt{U_p^2 + U_t^2 + U_h^2 + U_e^2 + U_{te}^2 + U_d^2} \quad (27)$$

(Riski & asiantuntijatyöryhmä, 1998, s15-17.)

#### 4.4 Vaakojen virittäminen punnuksilla

Vaaka voi vaatia ajoittaista virittämistä esimerkiksi ympäristöstä aiheutuvien olosuhteiden muutosten vuoksi, vaa'an seurantamittauksen ollessa näyttämien sallituissa rajoissa, ei vaa'an virittäminen ole kuitenkaan välttämätöntä (Pusa ym 2017, s 37). Yleensä vaa'asta viritetään ensin ns. kuollut paino, eli tyhjän vaa'an näyttämä. Virittämällä ensin kuormatun vaa'an, siirtäisi nollapisteen myöhempi viritys kuormatun vaa'an näyttämää.

Yleensä riittää, kun vaaka viritetään nollapisteessä sekä täydellä kuormalla, mutta satunnaisesti tulee tilanteita, jolloin vaaka vaatii ns. monipistevirityksen. Monipistevirityksessä linearisoidaan punnituksen näyttämä esimerkiksi kolmessa eri kuormauspisteessä suoritettavalla virityksellä, tarkistetaan vaa'an ohjeistuksesta monipistevirityksen kuormauspisteet sekä linearisoinnin viritys järjestys. Vaa'an vahvistus viritetään mieluiten täydellä kuormalla, mutta jollei se ole mahdollista, kuorman pitäisi olla 50–100 % täydestä kuormasta.

#### 4.5 Varmentaminen

Lakisääteinen varmentaminen on tarkastuslaitoksen tekemä toimenpide, joka ottaa kantaa laajemmin koko vaa'an toimintaan eikä pelkästään näyttämään kuten kalibrointi. Varmennetun vaa'an avulla myös maallikko saa tehtyä luotettavan punnituksen, varmennettu vaaka löytyy esimerkiksi kaupan hedelmäosastolta missä asiakas pystyy itse tekemään punnituksen vaa'alla, jossa on varmennuksesta kertova tarra kyljessä. Lakisääteinen varmennus tehdään vaa'oilte kolmen vuoden välein. Vaakaa ei tämän

lisäksi tarvitse kalibroida tiheämmin, ellei sillä ole muita vaatimuksia kuten päästökauppaan liittyvät tarkastukset. Vaakaan kiinnitetään suomalainen varmennusmerkki, josta ilmenee vaa'an viimeisin varmennusajankohta. Sinetöintimerkit liimataan niihin kohtiin, joita ei saa muuttaa varmennuksen jälkeen. Sinetin avulla estetään esimerkiksi varmennetun vaa'an virittäminen ilman että sinetti rikotaan. Varmennettuun vaakaan voidaan kiinnittää myös seuraavasta varmennusajankohdasta ilmaiseva tarra. (Tukes 2022.) Jos vaakaa joudutaan virittämään varmennuksen aikana, täytyy vaa'alle tehdä huoltosinetöinti huoltoliikkeen toimesta tai uusi varmennus.



KUVA15 Seuraavan varmennusajankohdan ilmaiseva informatiivinen tarra

#### 4.6 Kalibrointitodistus

Kalibroinnin tuloksena saadaan kalibrointitodistus, josta on ilmentävä standardin SFS-17025 mukaisesti

- mittausepävarmuus
- mittaustuloksiin vaikuttavat kalibrointiolosuhteet
- miten tulokset ovat metrologisesti jäljitettävissä eli käytettyjen normaalien jäljitettävyys
- mittaustulokset ja jos on suoritettu viritys niin tulokset myös virityksen jälkeen
- lausunto vaatimustenmukaisuudesta vaatimusten ja spesifikaatioiden suhteen, jos se on tarkoituksenmukaista
- tarpeelliset tulkinnat ja mielipiteet

Kalibrointitodistus toteaa, täyttyvätkö asetetut kriteerit ja onko mittalaite hyväksytyjen rajojen sisällä. Tapahtuma näyttää kalibrointihetken tilanteen, ei sitä miten laite toimii eri olosuhteissa tai miten se käyttäytyy pidemmällä aikavälillä. Kalibrointitodistus ei ota myöskään kantaa, onko laite soveltuva käyttökohteeseen. Mittausepävarmuudessa käytettäessä kerrointa  $K=2$ , kalibrointitodistuksessa todetaan mittaustuloksen epävarmuuden olevan 95 % luottamustasolla. (Heinonen 2006.)

## 5 POHDINTA

Työssä pyrin tuottamaan dokumentaation, johon voin palata urani varrella vaakojen parissa työskennellessä. Toisena suurena osiona työssä oli autovaa'an modernisointiprojekti. Teoriaosuudessa yhtenä suurena kokonaisuutena on massan mittajäljen alkupiste Planckin vakio. Planckin vakioon perustuvan kilon määritelmän tekninen dokumentaatio on hyvin tieteellistä ja aikaa kului teorian ymmärtämiseen ja selvittämiseen todella paljon. Jälkeenpäin ajateltuna teoriaosuus olisi voinut siltä osin olla käytännöläisempi. Vaakojen kunnossapidossa tyypilliset vikatilanteet sekä vikatilanteiden juurisyyt ylös kirjattuna tähän opinnäytetyöhön auttavat varmasti alkuun vähemmän kokenutta asentajaa. Iso osa vioista on loppujen lopuksi mekaanisia puhuttaessa teollisuuden käytössä olevista vaa'oista. Olosuhteet ovat todella haastavat kun herkän mittalaitteen optimaaliset toimintaolosuhteet ovat yleensä tasalämpöisessä ja puhtaassa ympäristössä, missä myös kosteus ja ilmanpaine pysyy vakiona. Teollisuudessa vaa'an olosuhteet ovat optimaaliset vain harvoin.

Kalibrointitoiminta on yksi suuri kokonaisuus vaakoihin liittyen. Vaikka näyttäisi että vaaka on toiminut pitkään loistavasti, ei vaa'an näyttämään voi välttämättä luottaa tilanteissa, joissa edellisestä kalibroinnista ja mahdollisesta virityksestä on kulunut pitkä aika. Vain luotettava kalibrointi, jossa referenssin mittajälki menee läpi akkreditoitujen kalibrointilaboratorioiden kohti kilon prototyyppiä ja sisältäen mittauksen epävarmuuslaskennan on tae laadusta. Standardit ja niiden noudattaminen pitävät huolen oikeasta toimintamallista. Hinnan määrittämiseen käytettävä mittalaite pitää muistaa varmentaa mittalaitelain mukaisesti, sillä silloin asiakas voi olla varma mittalaitteen näyttämän oikeellisuudesta. Usein mittalaitetta käytettäessä ei tule myöskään mietittyä käytönaikaista mittausepävarmuutta, se on yksi kehityskohde johon kannattaa tarttua. Käytönaikainen mittausepävarmuuslaskenta ottaa huomioon kuinka suuria poikkeamia tulokseen voi tulla pienissä virhetilanteissa tai tärinästä sekä muiden olosuhteitten takia. Laskemalla käytönaikaisen mittausepävarmuuden voidaan osoittaa, onko mittalaitteen tulos tarpeeksi tarkka vaadittuun tarkkuuteen.

Ylläpitoinvestointiprojekti opinnäytetyön viimeisenä suurena osuutena on todella raskas valinta opinnäytetyöksi. Projektien etenemisen hitaus aiheuttaa ongelmia myös opinnäytetyön valmistumisen etenemiselle. Projektissa voi joutua pienen työvaiheen tai hyväksynnän valmistumista odottamaan pitkiäkin aikoja, eikä näin ollen ollut oikea valinta koulusta valmistumisen viime metreillä. Nyt jos tekisin

valintaa opinnäytetyöksi, en ottaisi näin isoa ja hidasta kokonaisuutta vaan pienen osa-alueen. Loppujen lopuksi suurin kiitos kuuluu työryhmälle, joka on projektissa ja vaakojen parissa ollut mukana. Ilman sitä apua ja tukea ei tämäkään opinnäytetyö olisi koskaan valmistunut.

Mittalaitetekniikan kirjallisuutta on todella hankala löytää kirjastoista ja suurin osa dokumentaatiosta löytyikin internetistä alan sivustoilta, ohjeista ja standardeista. Internetistä löytyvät kotimaiset dokumentaatiot ovat usein mittatekniikakeskuksesta lähtöisin ja hyvä niin että dokumentaatiota löytyi eikä sen suhteen jäänyt yksin. Kirjoitusasussa pysyisi paremmin yhteneväisessä mallissa tekemällä opinnäytetyön lyhyessä ajassa. Kirjoittaessani työtä pitkään ja satunnaisesti vaikutti se myös toimintaan, jossa joutui tarkistamaan usein, mistä olen jo kirjoittanut. Jätin kuitenkin yhden pitkän suoran lainauksen tekstiin sen paremman ymmärrettävyyden vuoksi työn tekstin muuten ollessa omin sanoin kirjoitettua. Jälkeenpäin työtä tarkistettaessa huomasin myös itse sellaisia virheitä, joista pystyin toteamaan, etten heti alkuun ollut tutustunut tarpeeksi hyvin opinnäytetyön kirjoitusohjeisiin.



## LÄHTEET

- Accreditation. 2022. european-accreditation. Saatavissa: <https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2018/10/EA-4-02.pdf>. Viitattu 4.4.2022.
- Aumala, O. 1998. Mittaustekniikan perusteet. Kustantaja Otatieto.
- Bennett, J. 2018. Smitshonian instituutti. Saatavissa: <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/reevaluate-kilogram-180970798/>. Viitattu 14.5.2021.
- Bilker-Koivula, M. 2019. Maanmittauslaitos, Kilo sai uuden määritelmän. Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/kilo-sai-uuden-maaritelman>. Viitattu 15.5.2021.
- Bureau international des poids et mesures. 2019. Mise en pratique for the definition of the kilogram in the SI. Saatavissa: <https://www.bipm.org/documents/20126/41489673/SI-App2-kilogram.pdf>. Viitattu: 4.8.2021
- Bureau international des poids et mesures. 2022. International Prototype of the Kilogram (IPK) (CC BY 3.0 IGO). Saatavissa: <https://www.bipm.org/en/mass-metrology/ipk>. Viitattu 18.5.2021.
- EU-direktiivi. 2009. LEX Europa. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0023>. Viitattu 3.5.2022.
- FINAS A. 2022. FINAS Akkreditointipalvelu. Saatavissa: <https://www.finas.fi/Tietoa/Sivut/Tietoa-FINASista.aspx>. Viitattu 27.4.2022.
- FINAS B. - kalibrintilaboratoriot. 2022. Saatavissa: <https://www.finas.fi/akkreditointi/Akkreditointialueet/Sivut/Kalibrintilaboratoriot.aspx>. Viitattu 27.4.2022.
- Hautala, M.& Peltonen, H. 2016. Insinöörin (AMK) fysiikka, osa 1. 8. painos. Lahti: Kustantaja Lahden Teho-Opetus Oy.
- Heinonen, M. 2006. MIKES. Saatavissa: <https://docplayer.fi/10554280-Mita-kalibroitodistus-ker-too.html>. Viitattu 17.3.2022
- Jokela, K. 2006. Säteilyturvakeskus. Saatavissa: [https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6\\_2.pdf/0b4cab0e-026b-4f36-a632-4f8f0efbe05d](https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_2.pdf/0b4cab0e-026b-4f36-a632-4f8f0efbe05d). Viitattu 22.6.2021.
- Kiviluoma, P. 2019. Aalto yliopisto my courses. Saatavissa: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1069307/mod\\_resource/content/11/KON-C3004\\_Mittausepavarmuus\\_ja\\_raportointi\\_2019.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1069307/mod_resource/content/11/KON-C3004_Mittausepavarmuus_ja_raportointi_2019.pdf). Viitattu 6.4.2022.
- Lahti Precision. 2019. lahtiprecision.com. Saatavissa [https://lahtiprecision.com/wp-content/uploads/2019/08/Lahti\\_Precision\\_Punnitusanturi\\_RC2\\_FI.pdf](https://lahtiprecision.com/wp-content/uploads/2019/08/Lahti_Precision_Punnitusanturi_RC2_FI.pdf). Viitattu 22.5.2022.
- Mäkelä, M., Lauri, S., Seppo T., Juhani, Ö. (2005). Tekniikan kaavasto. Tampere: Tammertekniikka.
- Organisation Internationale DE Metrologie Legale. 2006. OIML R 76-1. Saatavissa: [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_r/r076-1-e06.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r076-1-e06.pdf). Viitattu 7.6.6021.

- Organisation internationale de métrologie. 2004. OIML. Saatavissa: [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_r/r111-1-e04.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r111-1-e04.pdf). Viitattu 6.6.2021.
- Poutanen, M., Bilker-Koivula, M., Ruotsalainen, H. 2016. Maanmittauslaitos. Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/fgi/putoamiskiihtyvyyys.pdf>. Viitattu 3.6.2021.
- Pusa, A., Riski, K., Ojanen-Saloranta, M. 2017. VTT Vaakojen kalibrointiopas. Saatavissa: <https://cris.vtt.fi/en/publications/vaakojen-kalibrointiopas>. Viitattu 7.2.2022.
- Riski, K. asiantuntijatyöryhmä. 1998. Mittatekniikan keskus. Saatavissa: <https://docplayer.fi/148544662-Vaakojen-kalibrointi.html>. Viitattu 5.4.2022.
- Robinson, I. A., Schlamminger, S. 2016. IOPScience. The watt or Kibble balance: a technique e Creative Commons Attribution 3.0 licence. Saatavissa: <http://iopscience.iop.org/0026-1394/53/5/A46>. Viitattu 21.11.2021.
- Schlamminger, S. 2018. IOPscience. Saatavissa: <https://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1539-5>. Viitattu 21.11.2021.
- Stock, M., Barat, P., Davis, R. 2015. ResearchGate (CC BY 3.0). Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/274099130\\_Calibration\\_campaign\\_against\\_the\\_international\\_prototype\\_of\\_the\\_kilogram\\_in\\_anticipation\\_of\\_the\\_redefinition\\_of\\_the\\_kilogram\\_part\\_I\\_Comparison\\_of\\_the\\_international\\_prototype\\_with\\_its\\_official\\_copies](https://www.researchgate.net/publication/274099130_Calibration_campaign_against_the_international_prototype_of_the_kilogram_in_anticipation_of_the_redefinition_of_the_kilogram_part_I_Comparison_of_the_international_prototype_with_its_official_copies). Viitattu 25.4.2021.
- Tefnescu, D. M. 2018. IOP Science. Saatavissa: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1065/4/042031/pdf>. Viitattu 20.11.2021.
- Tukes. 2022. Mittauslaitteiden merkinnät. Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/mittauslaitteet/mittauslaitteiden-merkinnat>. Viitattu 18.5.2022.
- VTT. 2020. VTT research. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/si-mittayksikot-suomessa>. Viitattu 9.8.2022.
- Wallin, P. 1996. 5. Sähkömittaustekniikan perusteet. 5. painos. Espoo: Otatieto Oy.