

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma / Automaatio- ja prosessitekniikka

Anssi Pieksemä

PAINEKALIBROINNIN EPÄVARMUUS

Opinnäytetyö 2012

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma

PIEKSEMÄ, ANSSI

Painekalibroinnin epävarmuus

Opinnäytetyö

50 sivua + 2 liitesivu

Työn ohjaaja

Yliopettaja Merja Mäkelä

Toimeksiantaja

Gasum Tekniikka Oy

Marraskuu 2012

Avainsanat

epävarmuuslaskenta, painevaaka, kalibrointi.

Opinnäytetyön tavoitteena oli muuttaa Gasum Tekniikka Oy:n painekalibroinnin toimintamalli. Painekalibroinnissa painekalibraattorit kalibroidaan painevaa'an avulla. Painekalibraattoreiden avulla suoritetaan kentällä tapahtuvia paineen kalibrointeja, kuten painelähtettimien kalibrointeja. Painekalibroinnin tarkoituksena on määrittää painekalibraattorin näyttämän virhe. Kalibroinnissa vertaillaan painereferenssin ja painekalibraattorin näyttämiä eri paineissa. Uudessa toimintamallisissa referenssiarvo lasketaan jokaisessa mittauspisteessä erikseen. Opinnäytetyön toisena tavoitteena oli laatia epävarmuuslaskelma painekalibroinnille.

Alkuosassa käsitellään kaasun paineen mittaamista kaasuputkistoissa, painevaakaa D & H 21000 sekä mittausepävarmuuden määrittelyä. Loppuosassa käsitellään uutta painekalibroinnin toimintamallia ja määritellään painekalibroinnin epävarmuus. Epävarmuuslaskelman kartoittaminen aloitettiin määrittämällä kaikki tulokseen vaikuttavat epävarmuuskomponentit sekä tutustumalla epävarmuuslaskennan perusteisiin. Referenssiarvon laskennan epävarmuuskomponentit tulivat paineenlaskentakaavan tekijöistä. Referenssiarvon laskennan epävarmuus tuli ensin selvittää, jotta voitiin laskea epävarmuus kalibroinnille. Opinnäytetyön päämääränä oli laatia uutta toimintamallia hyödyntävä ja toimiva pöytäkirjapohja kalibroinnille.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin toimiva kalibrointipöytäkirja painekalibroinnille. Excel-pohjainen kalibrointipöytäkirja laskee automaattisesti annettujen mittaustietojen, mittalaitteiden tietojen ja ympäristöolosuhteiden avulla referenssiarvon sekä kalibrointiepävarmuuden.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

PIEKSEMÄ, ANSSI

Uncertainty of Pressure Calibration

Bachelor's Thesis

50 pages + 2 pages of appendices

Supervisor

Merja Mäkelä, Principal Lecturer

Commissioned by

Gasum Tekniikka Oy

November 2012

Keywords

uncertainty calculation, pressure balance, calibration.

The objective of this Bachelor's Thesis work was to change the pressure calibrations operations model. In pressure calibration pressure calibrators are calibrated with pressure balance. Calibrations in the field that are performed with pressure calibrators are calibrations of pressure transmitters. The purpose of the pressure calibration is to estimate pressure calibrator reading error. In pressure calibration, pressure reference and pressure calibrator readings are compared in different pressures. In new operations model reference value is calculated in every measurement point separately. The second objective of the study was formulating the uncertainty calculation for pressure calibration.

The first part outlines gas pressure measurements in pipelines, pressure balance D & H 21000 and estimation of measurement uncertainty. In the remaining part a new operations model for pressure calibration is discussed and uncertainty of calibration is defined. Estimation of the uncertainty calculation was started by estimating all uncertainty components which have an effect on the results and by exploring the basics of uncertainty calculation. Uncertainty components of reference value calculation came from formula of pressure calculation. At first uncertainty of reference value must be estimated in order to calculate uncertainty of calibration. The aim of the study was to draft a practical calibration record template for calibration, which can be used in the new operations model.

The study produced a practical calibration record template. An excel-based calibration record template calculates automatically the reference value and calibration uncertainty by using given measurement data, measuring device information and environment conditions.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	5
2	PAINEEN MITTAUS MAAKAASUVERKOSTOSSA	6
	2.1 Painemittauksen periaatteet	10
	2.2 Direktiivit ja lait	15
3	PAINEVAAKA D & H 21000	17
	3.1 Rakenne ja mittausperiaate	17
	3.2 Paineen laskentakaava	22
	3.3 Painevaa'alla kalibroittavat laitetypit	23
4	MITTAUSEPÄVARMUUS	26
	4.1 Epävarmuuden tyypit	26
	4.2 Mittausepävarmuuden määrittäminen	28
5	PAINEVAA'ALLA KALIBROINTI	29
	5.1 Kalibrointi	30
	5.2 Mäntä – sylinterin-yhdistelmän vaihto ja puhdistus	31
	5.3 Mittausten suorittaminen	32
	5.4 Kalibrointitulosten käsittely	35
6	PAINEKALIBROINNIN EPÄVARMUUSLASKELMA	36
	6.1 Referenssiarvon laskennan epävarmuus	36
	6.2 Kalibroinnin epävarmuus	41
7	YHTEENVETO	48
	LÄHTEET	49
	LIITTEET	

Liite 1. Painekalibrointi-pöytäkirja

1 JOHDANTO

Maakaasua on tuotu Venäjältä Suomeen jo vuodesta 1974. Gasum Tekniikka Oy vastaa konsernin liiketoimintojen kunnossapito- sekä asennustöistä. Kunnossapito- ja asennustöihin kuuluvat mm. siirto- ja jakeluverkoston, lämpölaitosten sekä maakaasuautojen tankkausasemien kunnossapito. Gasum Oy on perustettu vuonna 1994 jatkaamaan Neste Oy:n maakaasuyksikön toimintaa. (Gasum Oy 2012.) Siirtoputkistossa virtaavan kaasun yksi tärkeimmistä mittaussuureista on paine. Kentällä tapahtuviin painemittareiden ja -lähettimien kalibrointiin käytetään painekalibraattoreita. Gasum Tekniikka Oy:n kentällä käyttämät painekalibraattorit kalibroidaan kerran vuodessa ennakkohuolto-ohjelman mukaisesti painevaa'an avulla ja näin varmistutaan luotettavista mittaustuloksista. Painekalibroinnilla tarkoitetaan painekalibraattoreiden kalibrointia. Painekalibroinnissa verrataan painekalibraattorin näyttämää mittanormaalina eli painereferenssinä toimivan painevaa'an näyttämään.

Painekalibroinnin nykyisin käytössä olevassa toiminta- ja laskentamallissa huomioimme korjaukset virittämällä painevaaka siten, että painevaakaan voidaan asettaa paineen tasalukema referenssiarvoksi. Painevaa'an virittäminen suoritetaan asettamalla painevaa'alle punnuksia ja laskemalla korjausarvo kaavalla, mikä huomioi ympäristöolosuhteiden ja vaa'an sisäisen lämpötilan aiheuttamat korjaukset. Nykyisen toimintamallin ongelma johtuu painevaa'an sisäisen lämpötilan noususta ja ympäristöolosuhteiden muutoksista. Painevaa'an sisäinen lämpötila nousee kalibroinnin aikana elektronikan ja moottorin lämpenemisen takia, joten virityksessä käytetty sisäinen lämpötilan arvo ei vastaa todellista lämpötilaa.

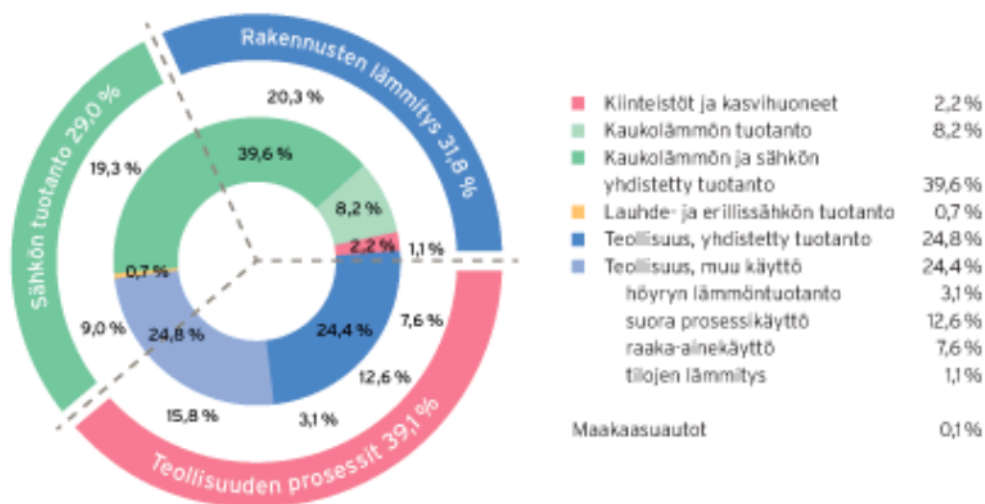
Opinnäytetyön tavoitteena on muuttaa D & H 21000 -painevaa'alla tehdyn painekalibroinnin laskenta- ja toimintamalli. Uudessa toimintamallissa kaikille kalibrointipaineille tullaan laskemaan tarkka paineen arvo referenssiarvoksi. Käytännössä painevaaka viritetään punnuksien avulla tasalukemaan ja vallitsevien ympäristöolosuhteiden sekä painevaa'an sisäisen lämpötilan mukaan lasketaan referenssiarvo jokaisessa mittauspisteessä. Opinnäytetyön toisena tavoitteena on laatia painevaa'alla tehdyille painekalibroinnille epävarmuuslaskelma. Epävarmuuslaskelmaan tulee huomioida kaikki mittauksen epävarmuuteen vaikuttavat asiat. Paineen referenssiarvon laskennasta ja kalibrointitapahtumasta tulee laatia epävarmuustaulukot. Excel-pohjainen kalibrointipöytäkirja tulee myös uudistaa uuden toimintamallin mukaiseksi.

2 PAINEEN MITTAUS MAAKAASUVERKOSTOSSA

Maakaasu on lähes puolet ilmaa kevyempää, väritöntä ja myrkytöntä luonnonkaasua. Maakaasun koostumus voi vaihdella riippuen tuotantopaikasta. Suomeen tuotavasta maakaasusta noin 98 % on metaania, loput 2 % on etaania, propaania, butaania, typpiä ja hiilidioksidia. Suomessa ei ole omia maakaasuvaroja. Maakaasu palaa erittäin puhtaasti. Maakaasu syttyy, kun sitä on ilmassa 5-15 tilavuusprosenttia. Metaanin palamisreaktio on esitetty alla (kaava 1). (Suomen Kaasuyhdistys 2012.)



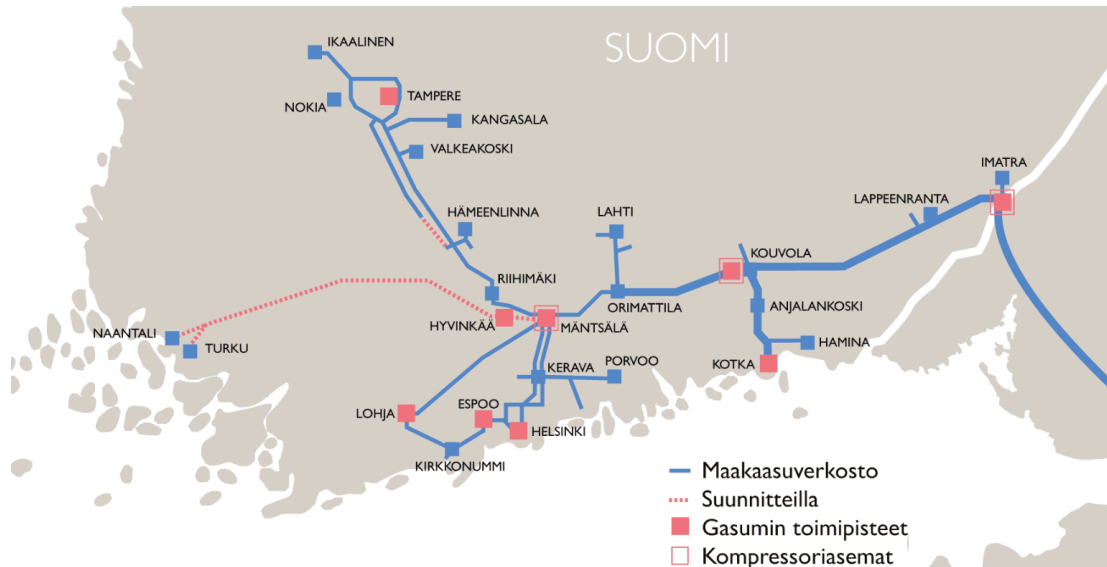
Suomessa maakaasun käyttö on jakaantunut lähinnä kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon sekä teollisuuteen. Suomen primäärienergian kokonaiskulutuksesta maakaasun osuus on noin 11 %. Kaukolämmön tuotannon polttoaineena maakaasun osuus on noin 35-40%. Maakaasun käyttö asuinrakennusten lämmityksessä on vielä suhteellisen vähäistä. (Gasum Oy 2012.)



Kuva 1. Maakaasun käyttäjäryhmät Suomessa vuonna 2011. (Gasum Oy 2012)

Suomen maakaasuverkosto on esitetty alla olevassa kuvassa (kuva 2). Siirtoputkiston varrella on venttiiliasemia, kompressoriasemia sekä paineenvähennysasemia. Siirto-putkissa virtaavan kaasun paine on 30-54 baria. Siirto-putkisto on asennettu 1-2 metrin syvyyteen ja merkitseminen on toteutettu merkintäpylväiden avulla. Venttiiliasemilla voidaan tarvittaessa katkaista maakaasun siirto linjaventtiilien avulla ja tyhjentää putkesta maakaasu ulospuhalluksen avulla. Kompressoriasemat nostavat kaasun painetta

ja lisäävät näin kaasun siirtokapasiteettia. Kompessorit ovat kaasukäyttöisiä turbo-kompressoreita. Paineenvähennysasemien avulla siirtoputkiston paine alennetaan asiakkaalle sopivaksi. Paineenvähennysasemilla mitataan myös asiakkaan kaasun kulutus. (Gasum Oy 2012.)



Kuva 2. Maakaasuverkosto. (Gasum Oy 2012)

Paineen mittausta on yleisimpiä teollisuuden mittauskohteita. Mitä enemmän kaasumolekyylejä suljetaan tilaan, sitä enemmän ne törmäilevät seinämiin. Kaasumolekyylin pinta-alayksikköä kohti tapahtuvista törmäyksien voimasta aiheutuu paine. Molekyylitöntä tilaa kutsutaan tyhjiöksi. Kaasun lämpötilan nousu lisää molekyylin liikettä ja kasvattaa kaasun painetta. (Pihkala 2004, 17.)

Paineen yksikkö SI-järjestelmässä Pascal, Pa. Arkielämän painemittauksissa Pascal on pieni arvo, joten käyttöön on yleisesti otettu epästandardi kerrannainen yksikkö baari (bar). (Pihkala 2004, 18.)

$$100\,000\text{ Pa} = 100\text{ kPa} = 0,1\text{ MPa} = 1\text{ bar} \quad (2)$$

Paineen mittausta hyödynnetään myös monen muun suureen mittauksissa, kuten lämpötilan, tiheyden, pinnankorkeuden, nopeuden, korkeuden, syvyyden, virtauksen tai voiman. (Semenoja 2008, 9.)

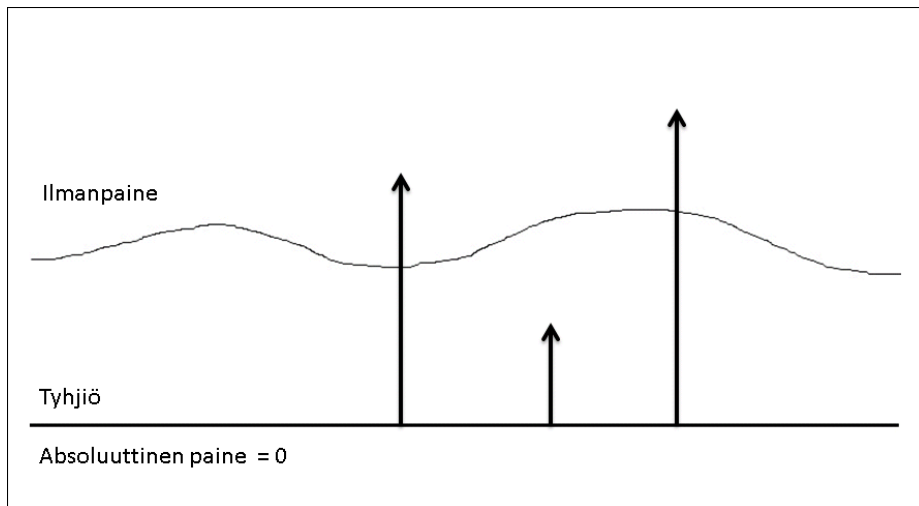
Maakaasuverkoston paineen mittaukset suoritetaan lähinnä painelähettimien avulla ja näin saadaan tieto siirrettyä helposti kaukanakin sijaitseviin kohteisiin. Painelähetti-

mien toimintaperiaate perustuu useimmiten myöhemminkin tässä opinnäytetyössä käsitelyyn venymäliuska-anturiin. Paineenvähennysasemien paineen mittaukset on suoritettu suurimmaksi osin Rosemount 3051 -sarjan painelähetimillä. Paineenvähennysasemilla on myös paikallisia paineen mittauksia. Paineenvähennysasemien painelähetimet kalibroidaan painekalibraattoreiden avulla.

Painekalibraattoreiden painemoduulien toimintaperiaatteissa on siirrytty kapasitiivisista-antureista pietsoresistiivisiin-antureihin. Pienellä paineen muutoksella pietsoresistiivisen-anturin antamaa jännitesignaalia on helpompaa mitata, kuin kapasitiivisen-anturin. (Laurila 2012.)

Absoluuttinen paine

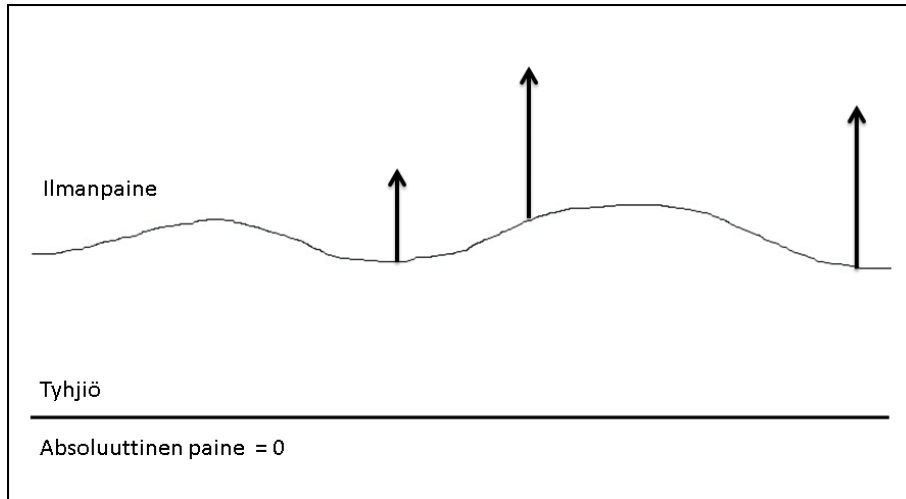
Absoluuttisen paineen vertailupaine on absoluuttinen nollapaine. Absoluuttinen nollapaine on tyhjiö, missä mitään molekyylien törmäilyä ei esiinny. Tarkoissa painemittauksen kohteissa on suositeltavaa käyttää absoluuttipainemittausta. Painemittaukseen ei vaikuta ilmanpaineen vaihtelut. (Pihkala 2004, 19.) Absoluuttipaineille tarkoitettuja mittareita kutsutaan vakuuimittareiksi.



Kuva 3. Absoluuttipaine.

Ylipaine

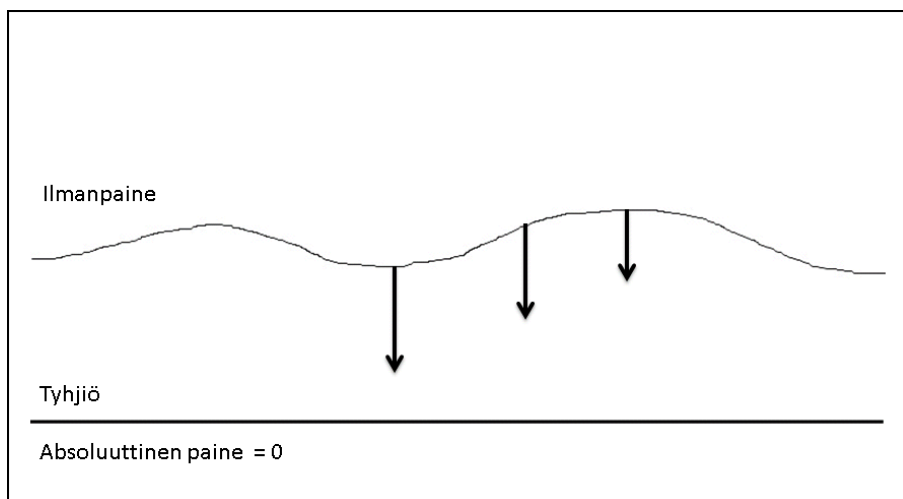
Painemittausta verrataan vallitsevaan ilmanpaineeseen. Lisäämällä ylipaineeseen vallitseva ilmanpaine saadaan absoluuttinen paine. Monet arkielämän painemittaukset ovat ylipainemittauksia, kuten auton rengaspaine.



Kuva 4. Ylipaine.

Alipaine

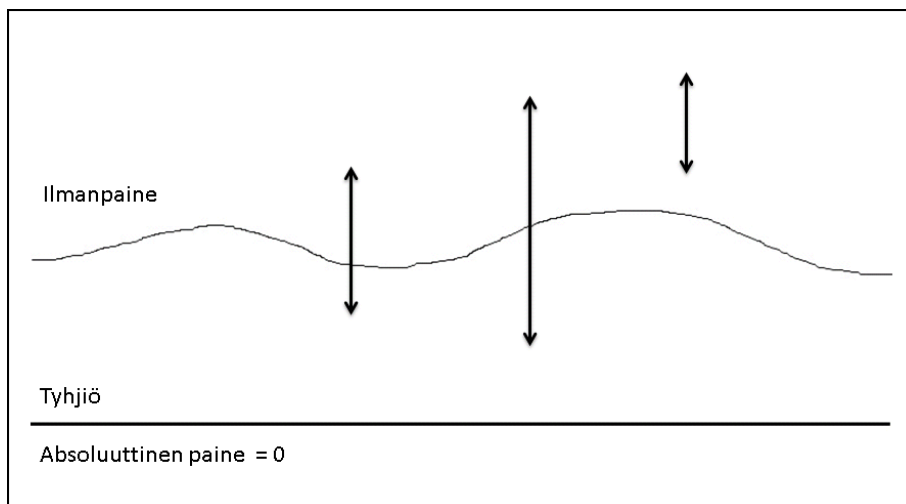
Vertailuarvona käytetään vallitsevaan ilmanpainetta. Mittauksessa kohteen paine on pienempi kuin vallitseva ilmanpaine. Absoluuttipaineeksi alipaine saadaan vähentämällä lukemasta vallitseva ilmanpaine. Alipainemittauksia suoritetaan useasti moottoreiden ja pumppujen imupuolella.



Kuva 5. Alipaine.

Paine-ero

Paine-eron vertailuarvo on jokin muu kuin vallitseva ilmanpaine tai tyhjiö. Vertailuarvoa kutsutaan esim. linjapaineeksi.



Kuva 6. Paine-ero.

Staattinen, dynaaminen ja hydrostaattinen paine

Staattinen paine kohdistuu seinämän pintaan, kun kaasu tai neste kulkee seinämän suuntaisesti tai on levossa. Dynaaminen paine on nesteen tai kaasun virtauksesta aiheutuva poikkeama staattisen paineeseen. Hydrostaattinen paine aiheutuu nesteen omasta massasta ja väliaineeseen kohdistuvasta ulkoisesta paineesta. (Aumala 1998, 123; Pihkala 2004, 20; Semenoja 2008, 53.)

2.1 Painemittauksen periaatteet

Nestetäytteiset anturit

Nestepatsaan synnyttämää hydrostaattista painetta käytetään usein paineen mittaamiseen. Hydrostaattinen paine voidaan laskea alla olevan kaavan avulla nestepatsaan korkeudesta. (Pihkala 2004, 20.)

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho gh \quad (3)$$

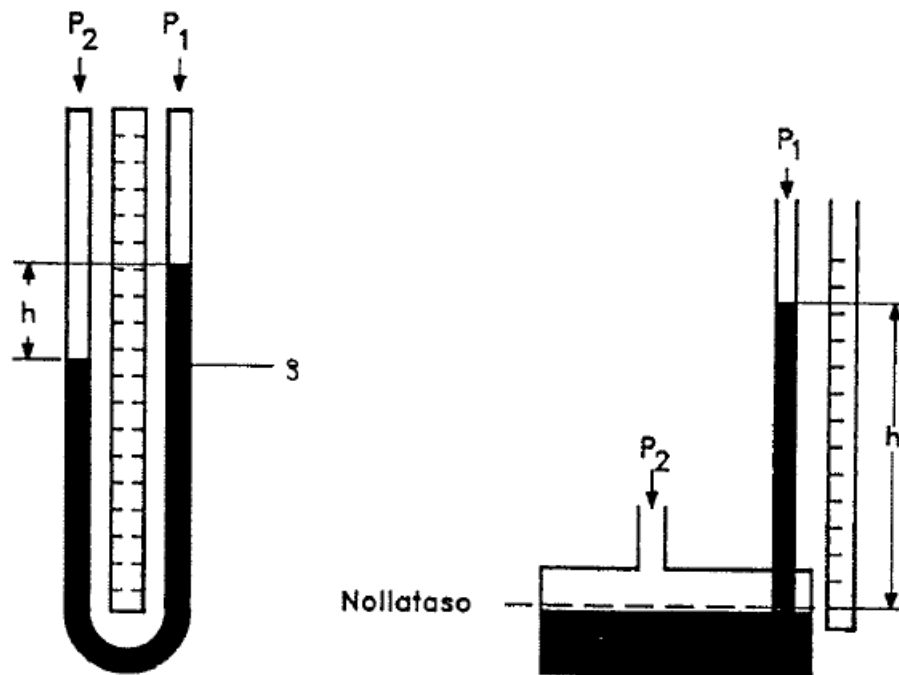
p = hydrostaattinen paine

ρ = nesteen tiheys

$g = \text{paikallinen putoamiskiihtyvyys}$

$h = \text{nesteen korkeus}$

U-putkimanometrit ovat yksinkertaisia paine-eromittareita. Mittari muodostuu U:n muotoisesta putkesta. Putkessa on nestettä, jonka tiheys tunnetaan. Kun paine on sama putken molemmissa haaroissa, asettuvat pinnat p_1 ja p_2 samalle korkeudelle. Kun paine p_1 on suurempi kuin paine p_2 , vastaa korkeusero putken päiden välistä paine-eroa. Nestepatsaiden korkeusero ilmaisee yli- tai alipainetta, kun putken toisessa päässä on ilmanpaine. U-putkimanometriä voidaan käyttää absoluuttipaineen mittaukseen sulkemalla toisen haaran pää ja täyttämällä kokonaan manometrinesteellä. Asettamalla putki vinoon, voidaan parantaa lukematarkkuutta. (Pihkala 2004, 20–22; Räsänen 1994, 12–13.)



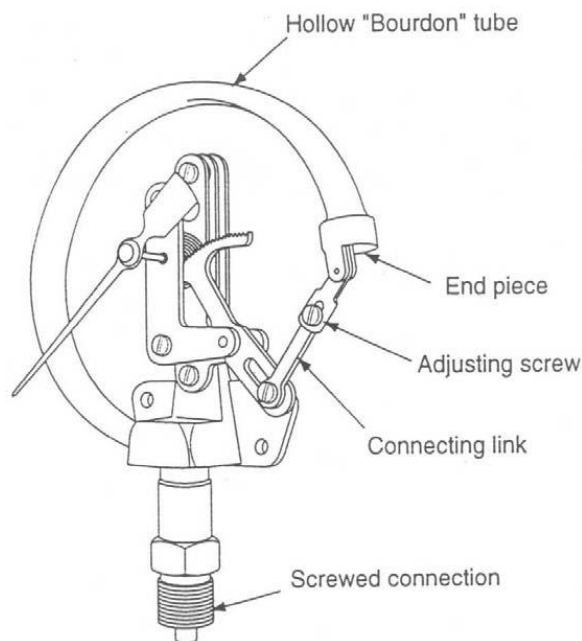
Kuva 7. U-putki- ja yksipatsasmanometri. (Pihkala 2004, 21)

Paine nähdään suoraan nestepatsaan pinnankorkeudesta. Yksikkönä käytetään esimerkiksi elohopeamillimetriä (mmHg) tai vesipatsasmillimetriä (mmH₂O, mmvp). Nestepatsaalla mitattaessa ongelmia aiheuttavat mm. pintajännitys ja lämpötilan muutokset. Mittauksia tehdessä tulee ottaa huomioon käytetyn nesteen tiheyden riippuvuus lämpötilasta ja paineesta. Elohopeaa käytetään usein nestetäytteisissä painemittareissa. Elohopean huonoina puolina on sen myrkyllisyys, joten elohopea kanssa työskennellessä tulee noudattaa varovaisuutta. Elohopean etuihin voidaan lukea aineen suuri ti-

heys, jolloin painetta vastaava nestepatsaan korkeus on paljon pienempi kuin esimerkiksi veden. (Pihkala 2004, 22; Saxholm & Rantanen 2011, 20.)

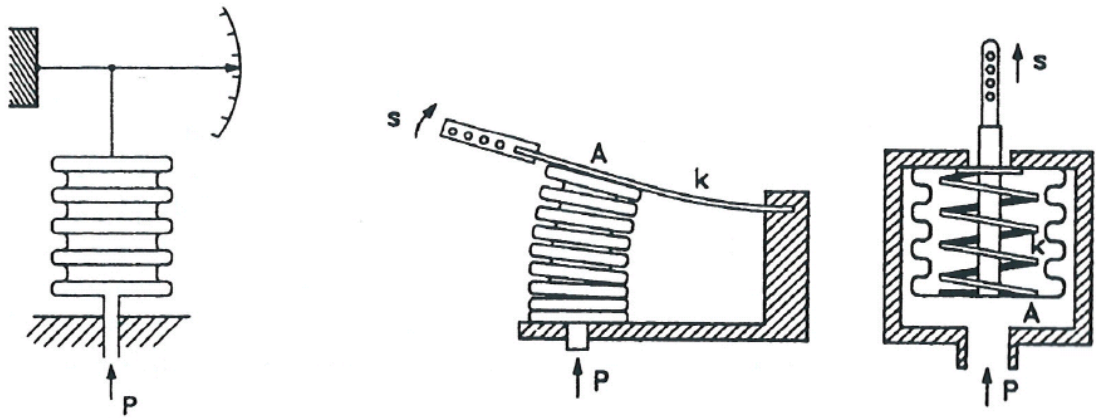
Joustavat elimet

Painemittauksessa paikallisena painemittarina käytetään yleensä bourdon-kaarimittaria. Bourdon-kaaren avulla paine muutetaan liikkeeksi tai voimaksi. Bourdon-kaaren paineputki on kierretty litteä putki, jonka toinen pää on suljettu. Paineen vaikutus putkeen saa putken pullistumaan ja sen poikkileikkaus pyöristyy ja samalla putki suoristuu. Putkeen kohdistuva paine on siis verrannollinen paineeseen. Paineen synnyttämä liike bourdon-kaaressa on pieni, joten liike siirretään ratasvälityksen avulla osoitinkojeelle. Näyttämä voidaan myös kaukosiirtää muuntimien avulla. Aseteltavia rajakytkimiä käyttämällä voidaan saada ylä- ja alarajahälytyksiä. Rajakytkimet avaavat tai sulkevat pneumaattisia tai sähköisiä kytkimiä. (Pihkala 2004, 23–24; Räsänen 1994, 15–16.)



Kuva 8. Bourdon-putki. (Semenoja 2008, 30)

Myös paljeputki on yleinen tapa muuttaa painetta liikkeeksi. Paljeputki on rakenteeltaan ohutseinäinen poimutettu putki. Putken pituuden muutos on verrannollinen paineeseen. Paineliitäntä on putken toisessa päässä. Palkeen jäykkyyttä lisätään erillisen jousen avulla tai voimatasapainoperiaatteella. (Pihkala 2004, 25–27.)



Kuva 9. Vasemmalla on paljeputki ja oikealla paljeantureita. (Pihkala 2004, 25)

Paineen määritelmän mukaisesti, palkeen voima on paineen ja palkeen tehollisen pinta-alan tulo.

$$F = p * A \quad (4)$$

$$F = \text{voima}$$

$$p = \text{paine}$$

$$A = \text{tehollinen pinta - ala}$$

Jousen avulla saatu vastavoima on jousivakion ja jousen liikkeen tulosta.

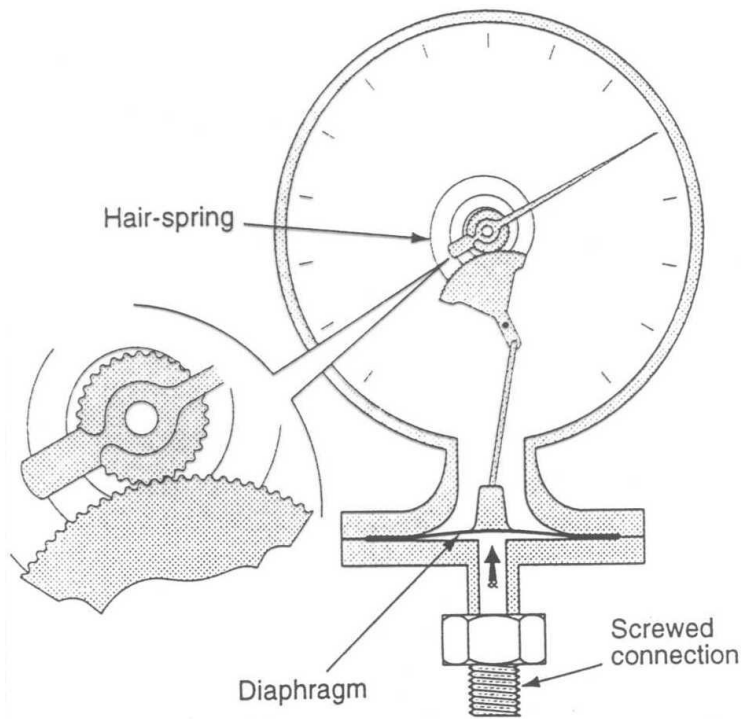
$$F = k * s \quad (5)$$

$$k = \text{jousivakio}$$

$$s = \text{jousen liike}$$

Paineputken ja palkeen avulla paine-eron mittaus voidaan suorittaa antamalla voimien tai elimien liikkeiden vaikuttaa toisiaan vastaan.

Kalvorasia on litteä, ohuesta metallilevystä tehty rasia, joka laajenee paineen vaikutuksesta. Rasian pinta-alan koko vaikuttaa paineen vaikutukseen. Kalvorasian pullistuma on vain muutamia millimetrejä, joten tarvitaan välitysvipumekanismi suurentamaan liikettä osoitinkoneistoon. (Pihkala 2004, 27.)

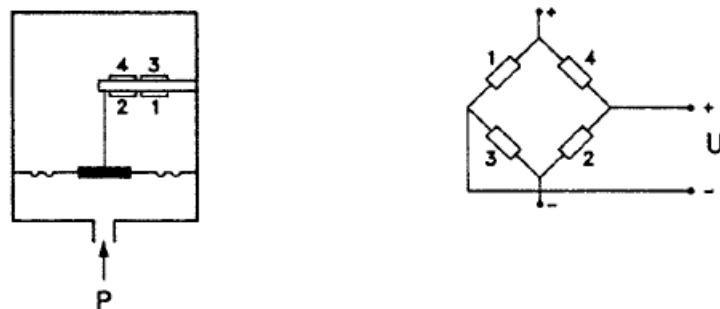


Kuva 10. Kalvorasia. (Semenoja 2008, 30)

Sähköiset menetelmät

Sähköiset menetelmät yleistyvät. Sähköisien menetelmien avulla saadaan mittaustulos siirrettyä mittauskohdeesta helposti kaukana sijaitseviin osoitinlaitteisiin tai tietokoneisiin.

Venymäliuska-anturi on yleisin hydraulikassa ja pneumatiikassa käytetty anturi. Venymäliuska on ohut liuska, johon on kiinnitetty metallilangasta tai foliosta tehty vastus. Paineen kasvaessa liuska ja vastusmateriaali venyvät. Venyminen aiheuttaa resistanssin suurenemisen vastuksessa. (Pihkala 2004, 28–29.)



Kuva 11. Paineen mittaus venymäliuska-periaatteella. (Pihkala 2004, 29)

Puolijohdevenymäliuska-anturinakin tunnetun pietsoresisttiivisen paineanturin resistanssi muuttuu voimakkaasti voiman kohdistuessa siihen. Pietsoresisttiivisen anturin resistanssi muuttuu piihin syntyvän jännityksen vaikutuksesta. Piikalvo joustaa paljon paremmin kuin metallinen kalvo, joten resistanssin muutokset ovat huomattavasti suurempia ja päästään erinomaisiin hystereesi- ja lineaarisuusarvoihin. Puolijohteiden huonoina puolina voidaan pitää herkkyyttä lämpötilan vaikutuksille, joten pietsoresisttiivisen anturin lämpötilan kompensointi vaatii toimenpiteitä. (Pihkala 2004, 29–30.)

Kapasitiivisen paineanturin sisään on rakennettu differentiaalikonkondensaattori. Paineerokammion seinämiin on rakennettu differentiaalikonkondensaattorin kiinteät levyt ja painekammion välissä on joustava kalvo. Eristeenä ja välitysnesteenä käytetään sili-koniöljyä. Kalvon liikkeitä ja kapasitanssin muutokset ovat pieniä, joten tarvitaan lisäelektroniikkaa siirtoviestin tekemiseksi. (Pihkala 2004, 30–31.)

2.2 Direktiivit ja lait

Painemittauksia suoritettaessa painekalibraattoreilla kentällä tulee huomioida ympäristön asettamat vaatimukset, kuten räjähdysvaarallisia tiloissa työskentelyä koskevat ATEX-määräykset. ATEX-määräykset ovat saatavissa Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukesin internet-sivuilta (Tukes 2008). Vuonna 2011 voimaan tulleessa mittauslaitelaissa (707/2011) käsitellään mittauslaitteiden toiminnan sekä mittausmenetelmien- ja tulosten luotettavuutta.

ATEX

Gasum-konsernin maakaasuverkoston mittaus-, paineenvähennys-, tankkaus-, kompressori- ja venttiiliasemilla on räjähdysvaarallisia alueita, jotka käsittävät tietyn alueen kyseenomaisesta kohteesta. Räjähdysvaara aiheutuu pääosin maakaasusta, metanolista tai hajusteaineesta. Räjähdysvaaralliset tilat on jaettu kolmeen eri luokkaan:

- Tilaluokka 0: Räjähdyskelvoinen ilmaseosta esiintyy jatkuvasti ja pitkäkestoisesti. Tilassa on käytettävä laiteluokan 1 laitteita.
- Tilaluokka 1: Räjähdyskelvoinen ilmaseos esiintyy todennäköisesti normaali-käytössä. Tilassa on käytettävä laiteluokkien 1 tai 2 laitteita.

- Tilaluokka 2: Räjähdyskelpoinen ilmaseos ei todennäköisesti esiinny normaalikäytössä, ja mikäli esiintyy, se esiintyy vain harvoin tai lyhytaikaisesti. Tilassa on käytettävä laiteluokkien 1,2 tai 3 laitteita. (Parikka 2006, 1-2.)

Räjähdysvaarallisissa tiloissa tulee käyttää vain sinne sopivia laitteita. Kaikkia laitteita ei ole saatavana Ex-luokiteltuina. Normaalikäytössä luokittelemattomien ja kipinöimättömien työvälineiden (esim. lämpötilahaude, yleismittari, painekalibraattori) käyttö on sallittua seuraavin toimenpitein tilaluokissa 1 ja 2.

- Ennen Ex -luokittelemattoman työvälineen vientiä räjähdysvaaralliseen tilaan tulee varmistua, ettei tilassa ole räjähdyskelpoista seosta kiinteiden tai kannettavien kaasunilmaisimien avulla.
- Ennen Ex -luokittelemattoman työvälineen käytön aloittamista tulee tarkastaa, ettei työskentelypisteessä ole räjähdyskelpoista seosta kannettavan kaasunilmaisimen avulla.
- Ex -luokittelemattoman työvälineen käytön jatkuessa pidempään, tulee työskentelytilan kaasupitoisuutta valvoa jatkuvasti kiinteiden kaasunilmaisimien avulla tai kannettavilla kaasunilmaisimilla puolen tunnin välein mittaamalla. (Parikka 2006, 2-3.)

Mittauslaitelaki

Mittauslaitelain tarkoituksena on turvata mittauslaitteiden toiminnan, mittaustulosten ja mittausmenetelmien luotettavuus. Mittauslaitelaisissa vaaditaan että mittauslaitteen on toimittava luotettavasti. Mittauslaitteen antamien tulosten virheet eivät saa ylittää laitetyypin ominaisuuksien ja käyttötarkoituksen perusteella määräytyviä suurimpia sallittuja virheitä. Mittauslaitteen luotettavuuden varmentaminen ennen käyttöönottoa sisältää laitteen rakenteen ja toiminnan tarkastamisen sekä mittaustulosten vertaamisen soveltuvalla tavalla suurimpiin sallittuihin virherajoihin. (Mittauslaitelaki.)

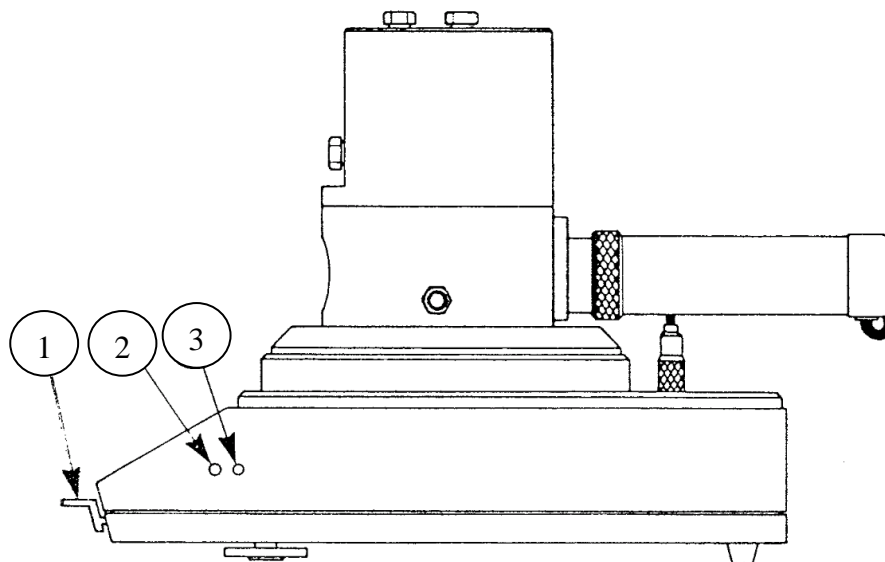
Vastuu mittauslaitteen soveltuvuudesta käyttötarkoitukseen ja käyttöympäristöön on toiminnanharjoittajalla. Toiminnanharjoittaja vastaa myös mittauslaitteen jatkuvasta luotettavasta toiminnasta ja siitä, että mittauslaitteen luotettavuus varmennetaan säädettyinä määräaikoina. Mittauslaitteen luotettava toiminta huollon jälkeen tulee varmentaa. (Mittauslaitelaki.)

3 PAINEVAAKA D & H 21000

D & H 21000 eli Desgranges et Huot 21000 on painevaaka, jota käytetään Gasum Tekniikka Oy:n painekalibroinnissa mittanormaalina eli painereferenssinä. Painevaaka kalibroidaan 3 vuoden välein akkreditoidussa kalibrointilaboratoriossa. Painevaa'an kalibroinnissa määritetään mäntä – sylinteri-yhdistelmän tehollinen pinta-ala sekä kalibroidaan levypunnukset eli massasarja ja sisäinen Pt100-lämpötila-anturi. Painevaaka on jäljitettävissä Suomen kansalliseen metrologian laitokseen eli Mittatekniikan keskuksen.

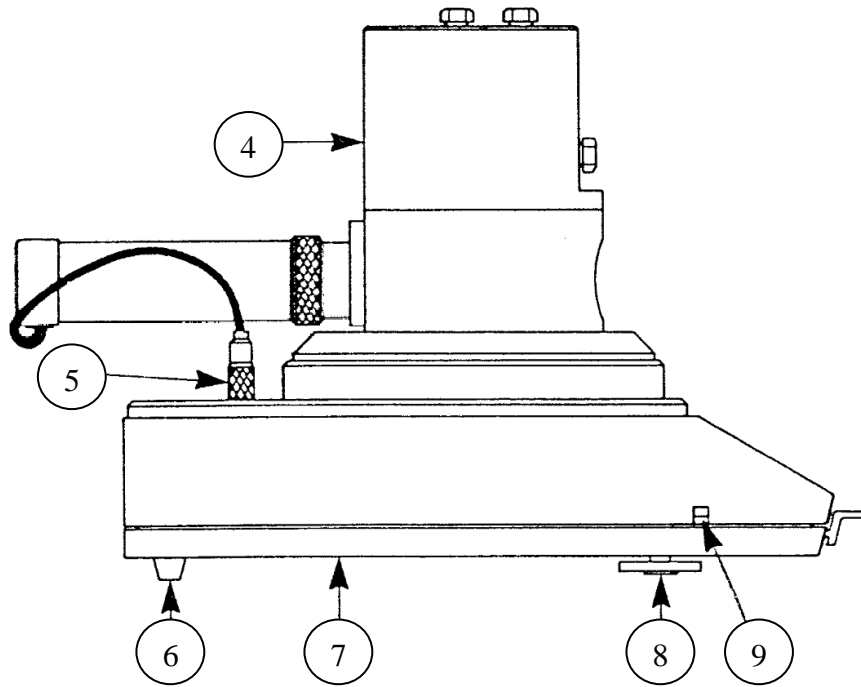
3.1 Rakenne ja mittausperiaate

Alla olevissa kuvissa on esitetty painevaa'an D & H 21000 tärkeimmät komponentit.



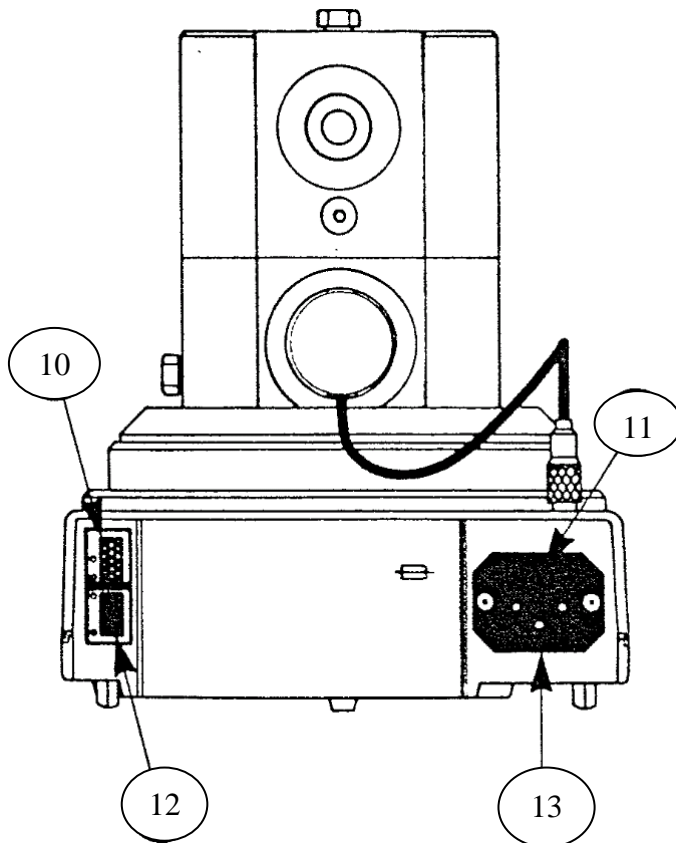
Kuva 12. Painevaa'an vasen puoli. (Desgranges Et Huot 1985, 4)

1. Taaraus ja On-Off-käyttökytkin
2. Potentiometri alueen hienosäätöön
3. Potentiometri alueen karkeasäätöön



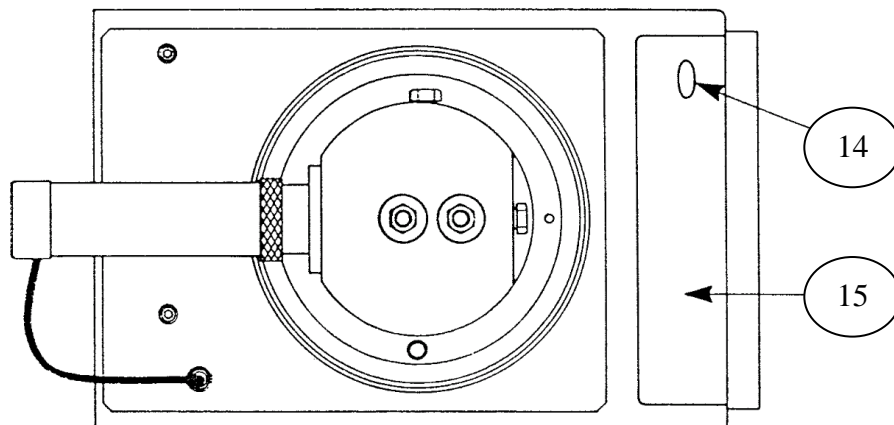
Kuva 13. Painevaa'an oikea puoli. (Desgranges Et Huot 1985, 4)

4. Mittapää
5. Moottorin sähkönsyöttö liitäntä
6. Kiinteä jalka
7. Elektroninen dynamometri
8. Säädettävä jalka
9. Automaattikalibrointi kytkin



Kuva 14. Painevaaka takaa. (Desgranges Et Huot 1985, 4)

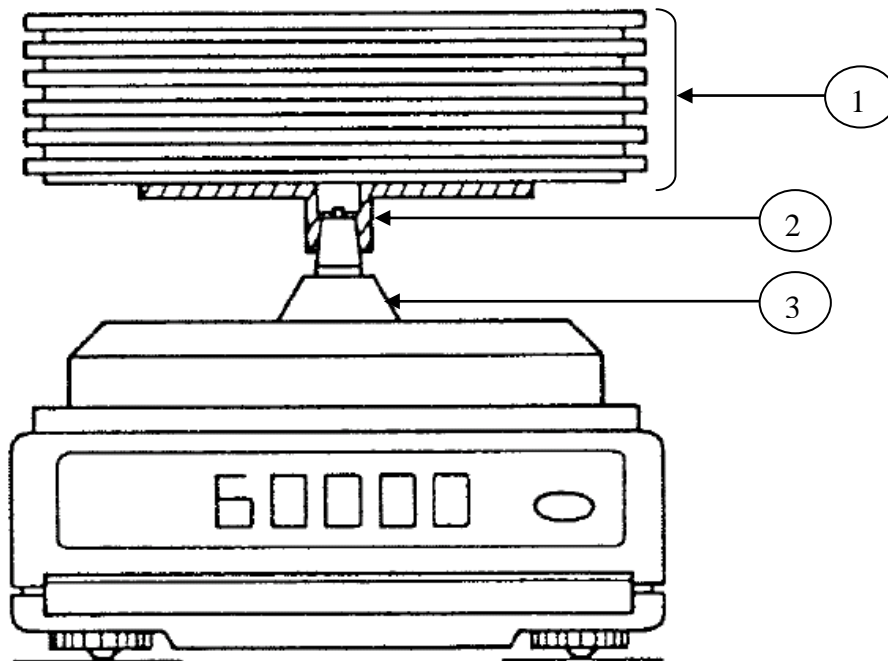
- 10. Tiedonsiirtoliitin lisälaitteelle
- 11. Sulakerasia
- 12. GE 305 pistoke
- 13. Jännitteen syöttöpistoke



Kuva 15. Painevaaka ylhäältä. (Desgranges Et Huot 1985, 4)

- 14. Libelli
- 15. Digitaalinen näyttö

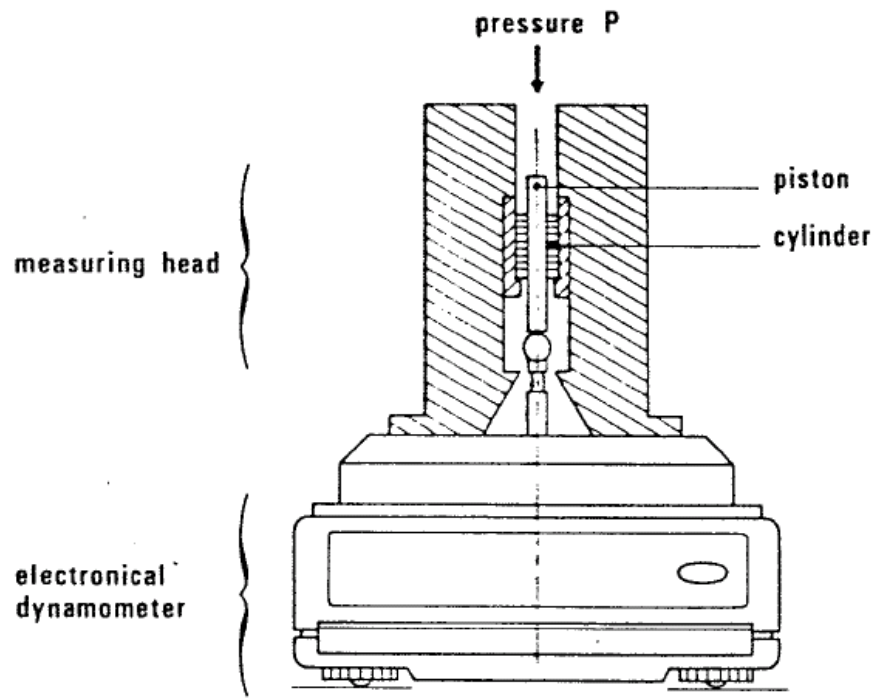
Kuvassa 16 on painevaa'an viritystilanne, jolloin painevaa'alla on kuormana 6 yhden kilogramman painoista levypunnusta. Kun painevaa'an sisällä on pienemmille paineille sopiva pinta-alaltaan suurempi mäntä – sylinteri-yhdistelmä, näyttämän suhde painokuormaan on 1bar/Kg. Näyttämän arvo 60 000 tarkoittaa siis 6 baria, joten yhden digitin arvo on 10 Pa. Jos painevaa'an sisälle on vaihdettu suuremmille paineille sopiva mäntä – sylinteri-yhdistelmä, näyttämän suhde painokuormaan on 10 bar/Kg. Näyttämän arvo 60 000 tarkoittaa siis 60 baria ja 1 digitin arvo on 100 Pa. Käytännössä vaaka viritetään viidellä yhden kilogramman painoisella levypunnuksilla, jolloin kalibrointitodistuksesta katsoen voidaan jättää ”huonoin” levypunnus virityksestä pois. Näyttämä ruuvataan laitteen sivusta löytyvien potentiometrien avulla tasalukemaksi.



Kuva 16. Painevaa'an viritystilanne. (Desgranges Et Huot 1985, 8)

1. Levypunnukset
2. Massalautanen
3. Kytinkappale

Kuva 17 on leikkauskuva mittapäästä. Paine syötetään mittapään yläpäästä kolmi-
tieventtiin kautta, jolloin paine vaikuttaa pystysuunnassa sylinterin sisällä olevaan
mäntään.



Kuva 17. Mittapään leikkauskuva. (Desgranges Et Huot 1985, 1)

Painevaaka'an mittausperiaate perustuu mäntä – sylinteri-yhdistelmän teholliselle pinta-
alalle kohdistuvaan voimaan. Mäntä pyörii mittauksen aikana öljyisessä sylinterissä,
jotta kitka olisi mahdollisimman pieni. Painevaaka soveltuu huonosti pienten painei-
den mittaamiseen. Painevaaka mittaa paine-eroa sylinterin päiden välillä, joten mitta-
ustulos on ylipainetta. Absoluuttipainetta voidaan mitata peittämällä punnukset ja sy-
linterin toinen pää kuvulla ja imemällä tyhjiö kuvun sisälle. Tyhjiön mittaamiseen
käytetään ulkoista paineanturia tai painevaaka'an sisäistä tyhjiöanturia. (Saxholm &
Rantanen 2011.) Gasum Tekniikka Oy:n painevaaka'alla suoritettavat painekalibroinnit
suoritetaan kaikki ylipainemittauksina. Absoluuttipaineantureiden kalibroinnissa käy-
tetään painereferenssinä Druck DPI 145 -painemittarin sisäistä absoluuttipaineanturia,
joka on myös kalibroitu Mittatekniikan keskuksella.

3.2 Paineen laskentakaava

Painevaa'alla mitattaessa käytetään paineen laskentakaavaa. Tarkkoja mittauksia tehdessä, tulee ottaa huomioon useita mittaukseen vaikuttavia tekijöitä. Peruskaavassa paine p on pintaa vasten kohtisuoraan vaikuttava voiman F suhde pinta-alaan A . (Saxholm & Rantanen 2011,17)

$$p = \frac{F}{A} \quad (6)$$

p = paine

F = voima

A = pinta-ala

Voima F on massa m kerrottuna kiihtyvyydellä g .

$$p = \frac{mg}{A} \quad (7)$$

m = massa

g = putoamiskiihtyvyys

Punnuksiin vaikuttava ilman noste tulee ottaa huomioon. Mittauksen aikana lämpötila vaihtelee useasti, joten tehollinen pinta-ala ja lämpötilaero tulee ottaa huomioon. Korkeuserokorjausta varten tulee tietää väliaineen tiheys paineessa sekä ympäröivän ilman tiheys. Öljynpainevaa'an ollessa kyseessä, tulisi vielä ottaa huomioon öljyn pinta-jännitys. (Saxholm & Rantanen 2011, 18-19.)

$$p = \Theta * \frac{mg \left(1 - \frac{\rho_{ilma}}{\rho_{massat}}\right)}{A_{20C} [1 + 2\alpha(T - 20^\circ C)]} + (\rho_{typpi} - \rho_{ilma}) * g \Delta h \quad (8)$$

Θ = männän kaltevuus

A_{20C} = tehollinen pinta-ala

α = materiaalin lämpölaajenemiskerroin

T = lämpötila mittaushetkellä

ρ_{ilma} = ilman tiheys

ρ_{massat} = punnuksien tiheys

ρ_{typpi} = väliaine typen tiheys

h = korkeusero

(Saxholm & Rantanen 2011,19.)

3.3 Painevaa'alla kalibroitavat laitetypit

Gasum Tekniikka Oy:n kentällä käytössä olevia kalibraattoreita on monenlaisia riippuen työn vaatimuksista. Asiakkaiden laskutukseen käytettävien kaasumäärämuuntimien kalibrointiin käytettävät Beamex MC5 -painekalibraattorit kalibroidaan akkreditoitussa kalibrointilaboratoriossa. Muut Gasum Tekniikka Oy:n käytössä olevat painekalibraattorit kalibroidaan mittausasiantuntijan toimesta painevaa'an avulla kerran vuodessa.

Beamex PC105

PC105 on tarkkuuspainekalibraattori laboratorio- ja kenttäkäyttöön. Sisäisessä paineanturissa on viisi kapasitiivista paineentuntoelintä. (Oy Beamex AB 1991,1.) Beamex PC105 -painekalibraattori on käytössä Gasum Tekniikka Oy:n Kouvolan sähköisen kunnossapidon osastolla. PC105-painekalibraattorin avulla kalibroidaan venttiili- ja paineenvähennysasemien painelähtetimet. Myös paineenvähennysasemien painemittarit kalibroidaan kyseisellä laitteella.



Kuva 18. Beamex PC105 -painekalibraattori. (Oy Beamex AB 1991, 1)

Beamex MC5

Beamex MC5 on dokumentoituva monitoimikalibraattori, jonka avulla voidaan mitata painetta, lämpötilaa ja sähköä sisältäen taajuuden. MC5-monitoimikalibraattori kommunikoi HART-kenttälaitteiden kanssa sekä ulkoisten laitteiden, kuten lämpötilahauhteiden ja painesäätimien kanssa. Kalibraattorin sisäisiä painemoduuleita voi olla yhdestä kolmeen kappaletta, joista yksi voi olla barometrinen. (Oy Beamex Ab 2003, 2-5.) Paineanturit ovat toimintaperiaatteeltaan pietsoresisttiivisiä (Laurila 2012).



Kuva 19. Beamex MC5 -painekalibraattori.

WIKA CPH6200

CPH 6200 on kooltaan pieni painekalibraattori, johon liitetään ulkoinen painelähetin painekalibraattorin päädyssä olevaan liittimeen. CPH 6200 -painekalibraattori on käytössä esimerkiksi Gasum Tekniikka Oy:n Hyvinkään kunnossapito-osastolla. Painekalibraattoria käytetään esimerkiksi voimalaitosten kaasunpaineen säädössä.



Kuva 20. WIKAI CPH 6200 -painekalibraattori. (WIKAI 2012)

4 MITTAUSEPÄVARMUUS

Mittauksia tehdessä saadaan mittaustulos, jonka luotettavuuden tietäminen on tärkeää. Mittaustuloksen ja mitattavan arvon ero on mittausvirhe. Mittaustulos on täydellinen vasta, kun mittausepävarmuus ilmoitetaan. Mittausepävarmuus arvioi mittausvirheen suuruutta. Ilman mittausepävarmuuden ilmoittamista mittaustulos on vain arvio. Epävarmuuslaskelmassa määritetään arvot mittauksen virhelähteille ja korjataan ne tulokseen. Laskennassa käytettyjen korjausten epävarmuudet lasketaan neliöllisesti yhteen. Mittausepävarmuuden määrittämisessä tulee huomioida kaikki mittaustulokseen vaikuttaneet osatekijät. (Andersson 1997, 147 – 148; TKK 2007.)

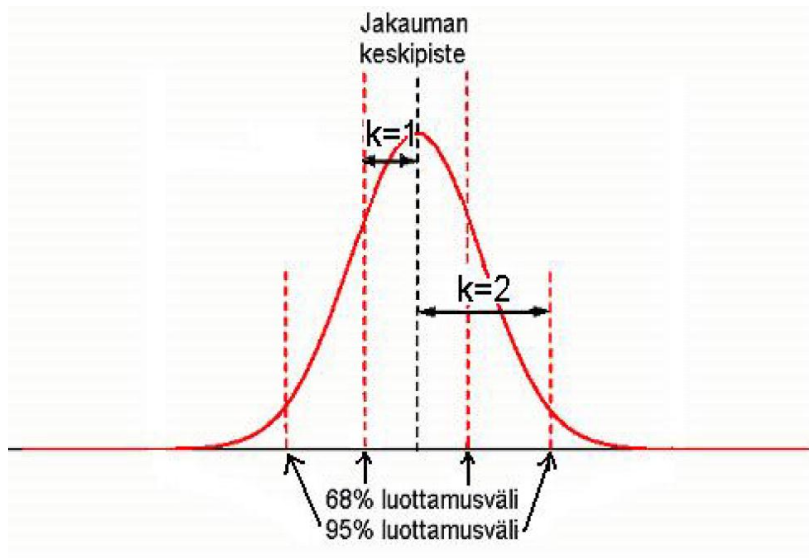
Epävarmuuden laskennassa käytettävät menetelmät perustuvat nykyisin julkaisuun Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). EA-4/02 on akkreditoituille kalibrointilaboratorioille tarkoitettu yksinkertaisempi versio. (Saxholm & Rantanen 2011; TKK 2007.) Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) on saatavana ISO-standardina (ISO 2012).

Painemittareita kalibroitaessa epävarmuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mittanormaanin eli referenssin epävarmuus, kalibroitavan laitteen resoluutio, mittaustulosten hajonta, hystereesi sekä korkeuserokorjaukseen liittyvä epävarmuus. (Saxholm & Rantanen 2011, 25–26.)

Mittausepävarmuus ilmoitetaan mittaustulosten yhteydessä. Mittausepävarmuutta tarvitaan tulosten luotettavuuden arviointiin ja vertailuun. (Semenoja 2009, 8-10.)

4.1 Epävarmuuden tyypit

Jakauma tulee tuntea epävarmuuskomponenteista, jotta saadaan määriteltyä keskihajonta. Epävarmuuskomponentit ovat useimmiten normaali- tai tasajakautuneita. Tyypin A epävarmuus määritellään mittaussuureen toistettujen mittauservojen perusteella. Tyypin A epävarmuudessa yksittäinen mittaosuu 68 %:n todennäköisyydellä välille $\pm\sigma$ kuvan 21 mukaisesti. (TKK 2007.) Sigma eli σ tarkoittaa keskihajontaa. Kaksinkertainen keskihajonta eli 2σ vastaa 95 %:n luottamusväliä. Luottamusvälin tunnuksena käytetään myös kirjainta k.



Kuva 21. Normaalijakauma. (TKK 2007)

Standardiepävarmuus voidaan laskea kaavan 9 mukaisesti käyttämällä keskiarvon keskihajontaa, mikäli mittausrvo saadaan toistettujen mittausten keskiarvona. Kaavassa 9 $s(x_i)$ on mittaustulosten keskihajonta ja n on mittaustulosten lukumäärä. (TKK 2007)

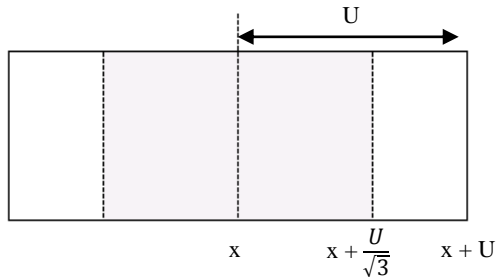
$$u_A(x_i) = \sqrt{\frac{s^2(x_i)}{n}} = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Mikäli mittauksia on vain kaksi, voidaan epävarmuutena käyttää tulosten erotuksen puolikasta (Saxholm 2012). Edellyttäen, että mitatun arvon muut epävarmuuslähteet on huomioitu toisessa epävarmuuslähteessä.

Tyyppin B epävarmuutta ei voida määrittellä tilastollisin menetelmin. Epävarmuuksia aiheuttavia tekijöitä ovat vaikutussuureet, systemaattisen virheen korjauksen epätasällisyys, tuntemattomat systemaattiset virheet ja vaikutussuureet. (TUT 2005.) Epävarmuuden arvot voidaan saada laitteen määrittelystä eli spesifikaatiosta tai kalibrointitodistuksesta. Epävarmuuskomponentit, joiden jakaumaa ei tunneta, voidaan olettaa esimerkiksi tasajakautuneiksi. Useimmat tyyppin B epävarmuuskomponentit voidaan olettaa olevan tasajakautuneita, eli niiden standardiepävarmuus voidaan laskea alla olevan kaavan (kaava 11) mukaisesti.

$$y = x \pm U \quad (10)$$

$$u(y) = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (11)$$



Kuva 22. Tasajakauma.

Kalibrointitodistuksesta saatu epävarmuus on yleisesti ilmoitettu laajennettuna epävarmuutena, joten standardiepävarmuus saadaan jakamalla ilmoitettu epävarmuus kahdella.

4.2 Mittausepävarmuuden määrittäminen

Epävarmuuden määrittely aloitetaan luetteloimalla epävarmuuslähteet. Lasketaan ja arvioidaan epävarmuuskomponenteille standardiepävarmuudet. Lasketaan epävarmuuskomponenttien vaikutukset mittaussuureen epävarmuuteen. Yhdistetty standardiepävarmuus saadaan summaamalla epävarmuuskomponentit neliöllisesti yhteen. Lopuksi kerrotaan yhdistetty standardiepävarmuus kattavuuskertoimella k , ja näin saadaan laajennettu epävarmuus. (TKK 2007.)

Epävarmuuskomponenttien vaikutus mittaustulokseen

Epävarmuuskomponenttien vaikutukset mittaustulokseen eli herkkyyškertoimet ilmaisevat, kuinka paljon mittaustulos muuttuu epävarmuuskomponenttien muutoksen vaikutuksesta. Herkkyyškerroin voidaan määritellä muuttamalla tulosuuretta sen standardiepävarmuuden verran. Herkkyyškerroin on tuloksen muutos suhteessa tekijän suuruuden muutokseen, eli tässä tapauksessa standardiepävarmuuteen. Vaikutus kokonaisepävarmuuteen saadaan kertomalla standardiepävarmuus herkkyyškertoimella. Herkkyyškerroin saadaan myös selville osittaisderivaatan avulla.

$$c_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \quad (12)$$

Yhdistetty epävarmuus

Yhdistetty epävarmuus on kaikkien epävarmuuskomponenttien summa. Jos kaikki epävarmuuskomponentit korreloivat, voidaan komponentit summata suoraan.

$$u(y) = \sqrt{u^2_A + u^2_B + u^2_C} \quad (13)$$

Jos komponentit eivät korreloi toisiaan, tulee ottaa huomioon herkkyyskerroin.

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (14)$$

(Mittausepävarmuuden arviointi ja kalibrointi, 7503020, Luento 11)

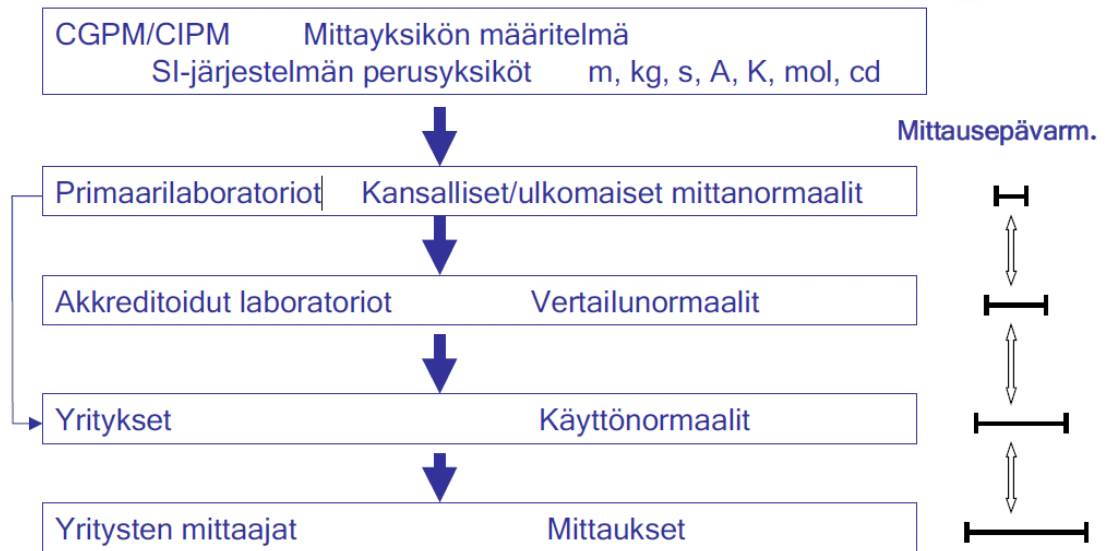
Laajennettu epävarmuus

Laajennettu epävarmuus saadaan kertomalla yhdistetty standardiepävarmuus kattavuuskertoimella. Yleisin kattavuuskertoimen arvo on 2, jolloin epävarmuus vastaa 95 %:n luottamusväliä (kuva 21).

5 PAINEVAA'ALLA KALIBROINTI

Kalibroinnin avulla selvitetään mittarin ja referenssin välinen yhteys. Kalibrointi selvittää siis mittalaitteen virheen. Mittaustulos ilman epävarmuuden määrittämistä on kuitenkin merkityksetön, kuten edellä mittausepävarmuuden määrittämisessä on jo todettu. Jäljitettävyyden perusedellytys on katkeamaton kalibrointien ketju SI-yksikköön. Katkeamaton kalibrointi ketju SI-yksikköön edellyttää, että kaikista kalibroinneista kalibrointitodistukset, mittausmenetelmät ja tulokset on dokumentoitu, mittausepävarmuus on tiedossa ja että kalibroinnin suorittanut kalibrointilaboratorio on pätevä. (Semenoja 2008, 48–49; Semenoja 2009, 3-4.)

Mittausten luotettavuuden perusedellytys on jäljitettävyys ja kalibrointi:



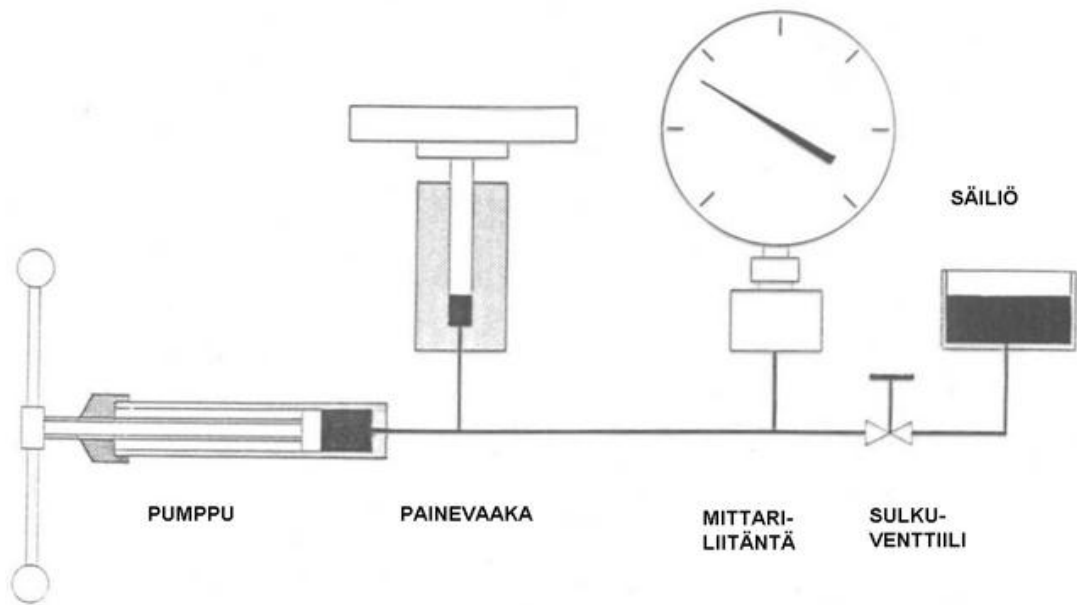
Kuva 23. Jäljitettävyysketju. (Ehder 2005, 9)

Suomessa toimivat akkreditoidut paineen kalibrointilaboratoriot (24.10.2012):

- K004 Inspecta Oy, Testaus
 - K008 Vaisala Oyj, Mittanormaalilaboratorio
 - K009 Finnair Technical Services Oy, Mittalaitetarkastus
 - K013 Ilmavoimien materiaalilaitos, Varikko, Kalibrointilaboratorio
 - K026 Oy Beamex Ab, Kalibrointilaboratorio
 - K055 Inspecta Tarkastus Oy, Mittauslaitteet ja vakaus
- (Akkreditoidut kalibrointilaboratoriot 2012)

5.1 Kalibrointi

Kalibroitavasta alueesta riippuen, tulee painevaa'an sisälle vaihtaa alueelle sopiva mäntä – sylinteri-yhdistelmä. Jos painevaa'an sisällä on valmiina oikea mäntä – sylinteri-yhdistelmä, mutta viimeisestä kalibroinnista on aikaa, tulee suorittaa mäntä – sylinteri-yhdistelmän pudistus ennen kalibrointia. Vaa'assa on kaksi eri painealuetta: 0 – 0.6 MPa ja 0 – 6 MPa. Kummallakin painealueella on oma mäntä – sylinteri-yhdistelmä ($0.1 \frac{MPa}{Kg}$ ja $1 \frac{MPa}{Kg}$). (Villanen 2012.)



Kuva 24. Painekalibroinnin kytkentäkuva. (Semenoja 2008)

5.2 Mäntä – sylinterin-yhdistelmän vaihto ja puhdistus

Mittapää nostetaan pois painevaa'an päältä. Irrotetaan "pressure adjusting block" -liitin mittapään päältä. Avataan öljyn täyttöaukon ja tyhjennysaukon tulpat, jotta saadaan kaadettua öljy pois. Löysätään kolme kuusiokoloruuvia mittapään päältä ja irrotetaan ylä- ja alalohkot toisistaan. Irrottamisessa tulee olla hyvin varovainen, ettei sisällä oleva mäntä pääse putoamaan ja vaurioitumaan.



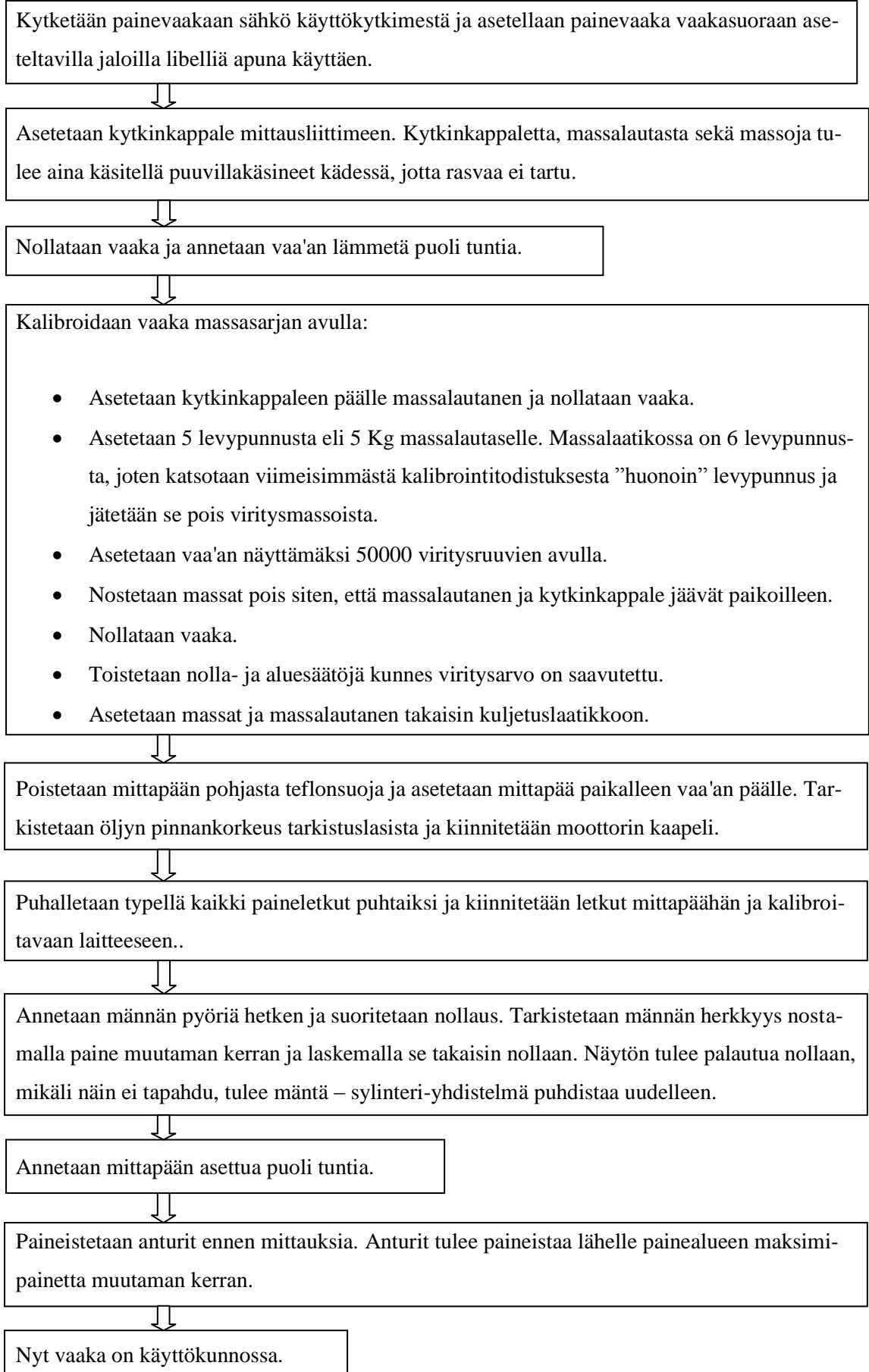
Kuva 25. Mittapään ylä- ja alalohkot.

Kuvassa 25 vasemmalla olevan ylälohkon sisällä näkyy mäntä – sylinteri-yhdistelmä. Nostetaan mäntä pois sylinteristä varoen. Irrotetaan ja vedetään sylinteri pois mittapään sisältä tarkoituksen mukaisen erikoistyökalun avulla. Aina ennen mittapään laittoa on mäntä ja sylinteri puhdistettava. Mäntä ja sylinteri puhdistetaan pudistukseen sopivalla aineella, kuten mini cleaner -suihkeella.

Puhdistuksen jälkeen sylinteri asetetaan mittapään ja kiinnitetään erikoistyökalun avulla. Mäntä kastetaan öljyssä ennen sylinteriin laittoa. Männen sulava liike sylinterissä tulee varmistaa. Kiinnitetään mittapään lohkot toisiinsa ja lisätään öljy. Laitevalmistaja suosittelee NUTO H5 -öljyä käytettäväksi. Öljyn pinnankorkeus tarkistetaan tarkistuslasista. Lopuksi kiinnitetään ”pressure adjusting block” -liitin mittapään yläosaan. (Villanen 2012.)

5.3 Mittausten suorittaminen

Kalibroittavan laitteen tulee olla ennen kalibrointia huoneen lämmössä vähintään 2 tuntia. Asetetaan painevaaka käyttökuntoon seuraavasti:



(Villanen 2012.)

Kun vaaka on käyttökunnossa, voidaan suorittaa kalibrointi:

Avataan mittapään päällä olevan kolmitieventtiilin ulospuhallusventtiili sekä käsipumpun ulospuhallusventtiili, jolloin paine letkuissa tasaantuu ilmanpaineeseen.



Nollataan painevaaka sekä kalibroitava mittalaite.



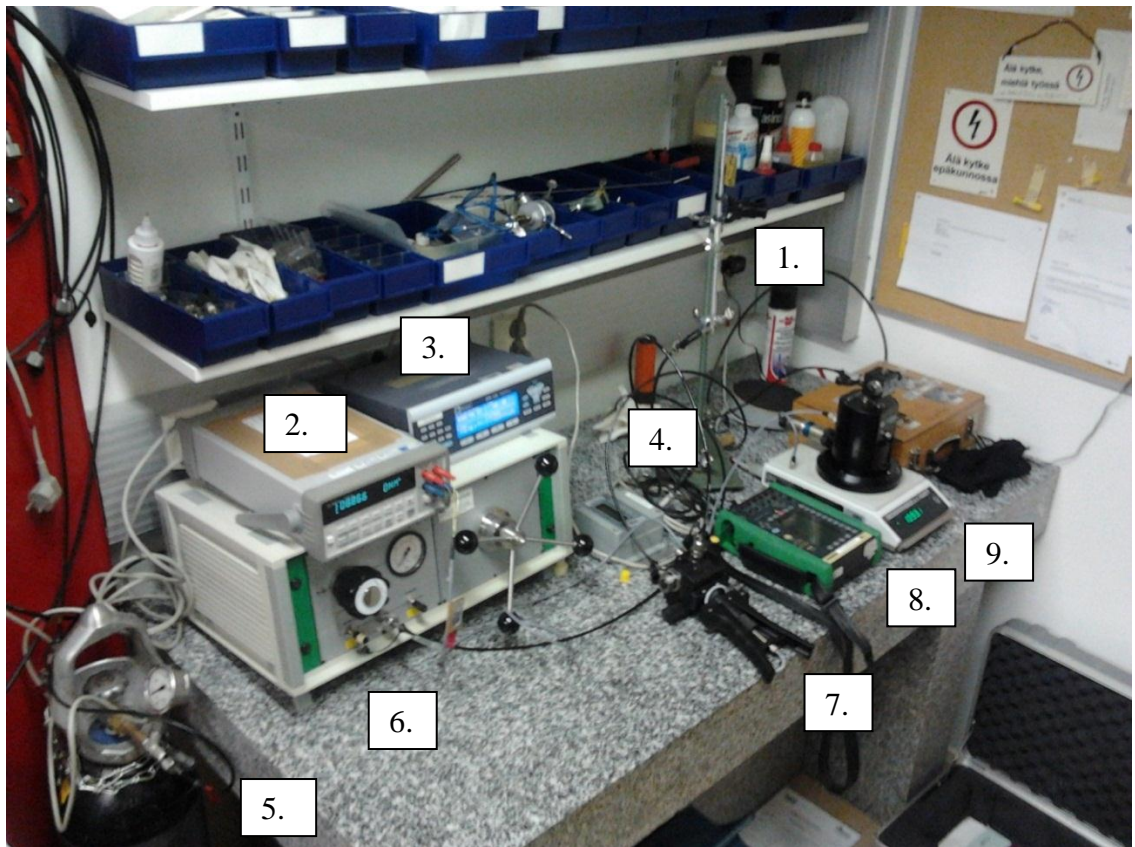
Nollauksen jälkeen puhalletaan typpeä letkuihin ja samanaikaisesti suljetaan venttiilit hitaasti, jotta saadaan ilma pois letkuista. Kirjataan ympäristöolosuhteet pöytäkirjaan.



Nostetaan paine ensimmäiseen mittauspisteeseen. Mittauspistettä lähestyttäessä alhaalta päin, luetaan kalibroitavan mittalaitteen näyttämä kun referenssin eli painevaakan näyttämä kääntyy tasalukemaksi. Ylhäältä päin tullessa tulee mittalaitteen lukema kirjata, kun referenssin arvo kääntyy alle tasalukeman (esim. 20000 → 19999).



Mittaushetkellä luetaan ensin kalibroitavan mittalaitteen näyttämä ja sen jälkeen sisäisen Pt100-anturin vastusarvo.



Kuva 26. Beamex MC5 -monitoimikalibraattorin kalibrointi.

Kalibroinnissa tarvittavat laitteet (kuva 26):

1. Elohopealasilämpömittari ympäristön lämpötilan mittaamiseen
2. Tarkkuusyleismittari painevaa'an sisäisen lämpötilan mittaamiseen
3. Painekalibraattori vallitsevan ilmanpaineen mittaamiseen
4. Kosteus- ja lämpötilalähetin ympäristön suhteellisen kosteuden mittaamiseen
5. Tyypipullo (kalibrointikaasu)
6. Kalibrointikaasun paineen säätö
7. Käsipumppu paineen hienosäätöön
8. Kalibroitava mittalaite
9. Kalibroinnissa painereferenssinä käytettävä painevaaka

5.4 Kalibrointitulosten käsittely

Suoritetusta mittalaitteen kalibroinnista laaditaan kalibrointipöytäkirja tai kalibrointitodistus. Kalibrointitodistuksessa esitetään kalibroinnin tulos ja epävarmuus kalibrointiolosuhteissa, mittanormalin jäljitettävyys, mahdollinen viritys ja sen vaikutus sekä kalibrointiajankohta. Kalibrointitodistus ei kerro laitteen toiminnasta eri olosuhteissa, laitteen käyttäytymisestä pitkällä aikavälillä, laitteen soveltumisesta asiakkaan käyttökohteeseen tai milloin laite tulisi kalibroida uudelleen. (Heinonen 2006, 4-6.) Kalibrointituloksia voidaan hyödyntää käyttämällä kalibroinnin tuloksena saatua virhettä korjauksena mittauksissa.

Gasum Tekniikka Oy:n painekalibroinneissa verrataan kalibroinnin tuloksena saatua virhettä laitevalmistajan ilmoittamaan tarkkuusvaatimukseen. Jos virhe ylittää laitevalmistajan ilmoittaman tarkkuusvaatimuksen, tulee laite virittää. Laite voidaan virittää laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti, jonka jälkeen se tulee kalibroida uudelleen.

Liitteenä 1 on uusi kalibrointipöytäkirja. Kalibrointipöytäkirjaan kirjataan ennen kalibrointia referenssinä käytetyn painevaa'an ja kalibroitavan mittalaitteen tiedot. Ympäristöolosuhteet kirjataan ennen kalibrointia ja kalibroinnin jälkeen. Ympäristön lämpötilan ja ilman tiheyden arvo on ympäristöolosuhteiden arvojen keskiarvo.

6 PAINEKALIBROINNIN EPÄVARMUUSLASKELMA

6.1 Referenssiarvon laskennan epävarmuus

50 bar 5000000 Pa		REFERENSSIPAINEN LASKENTA JA EPÄVARMUUS						Vaikutus kokonais- epävarmuuteen
Suure	Arvo	Yksikkö	Epävarmuus	Jakauma	Standardi epävarmuus	Herkkyys- kerroin		
Θ Männän kaltevuus	1	°	0,3	Tasa	7,91416E-06	5,01E+06	39,62 Pa	
g Paikallinen kiihtyvyys	9,819229	m/s ²	4,00E-06	Tasa	2,3094E-06	5,10E+05	1,18 Pa	
ρ _{ilma} Ilman tiheys	1,17	Kg/m ³	0,011	Tasa	6,35E-03	-6,32E+02	-4,01 Pa	
ρ _{massat} Punnuksien tiheys	7920	Kg/m ³	30	Normaali	15	9,31E-02	1,40 Pa	
A _{20C} Tehollinen pinta-ala	9,805E-06	m ²	9E-10	Normaali	4,58E-10	-5,11E+11	-233,97 Pa	
α Lämpölaajenemiskerroin	0,000009	1/°C	4,50E-07	Tasa	1,29904E-06	-3,02E+07	-39,18 Pa	
T Lämpötila	26,02	°C	0,05	Normaali	2,41E-02	-4,51E+01	-1,09 Pa	
p Laskettu paine	5006261,5	Pa					240,6 Pa	
	50062,61	hPa					2,41 hPa	
	50,063	bar					0,00241 bar	

Taulukko 1. Referenssiarvon laskennan epävarmuustaulukko.

$$p = \Theta * \frac{Ng \left(1 - \frac{\rho_{ilma}}{\rho_{massat}}\right)}{A_{20C} [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(T - 20^\circ C)]} \quad (15)$$

Θ = männän kaltevuus

N = painevaakan näyttämä

g = putoamiskiihtyvyys

ρ_{ilma} = ilman tiheys

ρ_{massat} = punnuksien tiheys

A_{20C} = tehollinen pinta-ala

α = materiaalin lämpölaajenemiskerroin

T = lämpötila mittaushetkellä

Männän kaltevuus.

Painevaaka asetellaan vaakasuoraan mittalaitteessa olevan libellin avulla. Männän kaltevuus ei vaikuta referenssiarvon laskennan tulokseen, vaan se huomioidaan suhteellisen epävarmuutena. Männän kaltevuuden arvo on siis 1. Asettelu tehdään silmämääräisesti, joten epävarmuudeksi voidaan arvioida 0,3°. Kaltevuuden arvo tulee esittää radiaaneina.

$$U(\theta) = 0,3^\circ = \frac{0,3\pi}{180} = 5,24 * 10^{-3} rad \quad (16)$$

Männän kaltevuuden epävarmuus voidaan esittää suhteellisena standardiepävarmuutena suhteessa männän vaikutusalaan (EURAMET 2011, 27).

$$\frac{u_\theta(A_p)}{A_p} = \sin \theta * \frac{U(\theta)}{\sqrt{3}} = \sin(5,24 * 10^{-3}) * \frac{5,24 * 10^{-3} rad}{\sqrt{3}} = 15,8 ppm \quad (17)$$

Paineeseen suhteutettu standardiepävarmuus saadaan jakamalla männän vaikutusalaan suhteutettu standardiepävarmuus kattavuuskertoimella 2 (EURAMET 2011, 29).

$$\frac{u_\theta(p)}{p} = \frac{15,8 ppm}{2} = 7,91 ppm \quad (18)$$

Vaikutus kokonaisepävarmuuteen saadaan kertomalla männän kaltevuuden standardiepävarmuus lasketulla referenssipaineella.

Painevaa'an näyttämä

Kaavassa käytetty N arvo on painevaa'an näyttämän arvo. Käytettäessä suuremmille paineille tarkoitettua mäntä – sylinteri-yhdistelmää, tulee N arvo ilmoittaa 10^6 Pa eli megapascalina (MPa). Käytettäessä pienemmille paineille tarkoitettua mäntä – sylinteri-yhdistelmää, tulee N arvo ilmoittaa 10^5 Pa eli baareina.

Painevaa'an näyttämän epävarmuus on huomioitu kalibroinnin epävarmuuslaskelmasa.

Paikallinen kiihtyvyys

Geodeettisen laitoksen on ilmoittanut 8.5.1987 tehdyn mittauksen perusteella paikalliseksi putoamiskiihtyvyydeksi $9,819229 \frac{m}{s^2}$. Arvon virhe on pienempi kuin $4 * 10^{-6} \frac{m}{s^2}$.

Paikallisen putoamiskiihtyvyyden standardiepävarmuus voidaan laskea käyttämällä hajontana tasajakaumaa.

$$u(g) = \frac{4 * 10^{-6} \frac{m}{s^2}}{\sqrt{3}} = 2,3094 * 10^{-6} \frac{m}{s^2} \quad (19)$$

Ilman tiheys

Ilman tiheys lasketaan Eurametin "EA-10/18 Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments" ilman tiheyden laskentakaavalla (kaava 20). Referenssiarvon laskennassa käytetty ilman tiheyden arvo on ennen kalibrointia lasketun ilman tiheyden arvon ja kalibroinnin jälkeen lasketun ilman tiheyden arvon keskiarvo. Kalibroinnin aikana tapahtuva ilman tiheyden muutos on huomioitu ilman tiheyden epävarmuutena. Ilman tiheys tyypillisissä kalibrointi olosuhteissa (22 °C, 1010hPa, 50 % suhteellinen kosteus)= $1,186 \frac{Kg}{m^3}$.

$$\rho_a = \frac{0,348444 * p - h_r * (0,00252 * T - 0,020582)}{273,15 + T} \quad (20)$$

Aikaisempia kalibrointipöytäkirjoja tarkastellen, voidaan arvioida kalibroinnin aikana vallitsevien ympäristöolosuhteiden maksimimuutokset seuraavasti:

Ympäristön lämpötilan muutos on enintään 2 °C, ilmanpaineen muutos enintään 1 hPa ja suhteellisen kosteuden muutos 2 %.

Ympäristön lämpötila [°C]	Ilmanpaine [hPa]	Suhteellinen kosteus [%]		Ilman tiheys [Kg/m ³]
22	1010	50	=	1,186
20	1010	50	=	1,195
20	1011	50	=	1,197
20	1011	48	=	1,197

Taulukko 2. Ilman tiheyden maksimimuutos.

Taulukon 2 avulla voidaan ilman tiheyden laskennan epävarmuudeksi määrittää $0,011 \frac{Kg}{m^3}$. Standardiepävarmuus voidaan laskea käyttämällä hajontana tasajakaamaa.

$$u(\rho_{ilma}) = \frac{0,011 \frac{Kg}{m^3}}{\sqrt{3}} = 0,00635 \frac{Kg}{m^3} \quad (21)$$

Massojen tiheys

Painevaa'an voimaosan kalibrointiin käytetään viittä levypunnusta. Yhden levypunnuksen massa on 1 kg. Kalibrointitodistuksessa massojen tiheydeksi on ilmoitettu $7920 \frac{Kg}{m^3}$ ja epävarmuudeksi $30 \frac{Kg}{m^3}$ kattavuuskertoimella 2 (k=2). Standardiepävarmuus saadaan jakamalla epävarmuus kahdella.

$$u(\rho_{massat}) = \frac{30 \frac{Kg}{m^3}}{2} = 15 \frac{Kg}{m^3} \quad (22)$$

Vaikutusala

Männän vaikutusala saadaan viimeisestä kalibrointitodistuksesta. Suuremmille paineille tarkoitetun mäntä – sylinteri-yhdistelmän (M-syl.nro.2999) tehollinen pinta-ala on $9,80497 \text{ mm}^2 \pm 0,0009 \text{ mm}^2$ ja pienemmille paineille tarkoitetun mäntä – sylinteri-yhdistelmän (M-syl.nro.3000) tehollinen pinta-ala on $98,0563 \text{ mm}^2 \pm 0,0066 \text{ mm}^2$. Männän vaikutusalan epävarmuus koostuu viimeisessä kalibrointitodistuksessa ilmoitetusta männän vaikutusalan epävarmuudesta ja stabiiliuden seurantatietojen pohjalta arvioituun epävarmuuteen. Kalibrointipöytäkirjassa epävarmuus on ilmoitettu kattavuus kertoimella 2 ($k=2$), joten vaikutusalan standardiepävarmuus saadaan jakamalla kalibrointipöytäkirjan ilmoittama epävarmuus kahdella ja jakaumaksi tulee normaali-jakauma.

$$u(A_{n2999}) = \frac{0,0009 \text{ mm}^2}{2} = 4,5 * 10^{-4} \text{ mm}^2 \quad (23)$$

$$u(A_{n3000}) = \frac{0,0066 \text{ mm}^2}{2} = 3,3 * 10^{-3} \text{ mm}^2 \quad (24)$$

11 vuoden aikana kerättyjen stabiiliuden seurantatietojen avulla näemme, että pinta-alan suurimman ja pienimmän arvon ero mäntä – sylinteri-yhdistelmällä 2999 on $0,0003 \text{ mm}^2$ ja mäntä – sylinteri-yhdistelmällä 3000 on $0,0074 \text{ mm}^2$. Männän vaikutusalueen stabiiliuden epävarmuudeksi voidaan määrittää maksimimuutoksen puolikas. Standardiepävarmuus saadaan tasajakauman hajonnalla.

$$u(A_{h2999}) = \frac{0,00015 \text{ mm}^2}{\sqrt{3}} = 8,66 * 10^{-5} \text{ mm}^2 \quad (25)$$

$$u(A_{h3000}) = \frac{0,0037 \text{ mm}^2}{\sqrt{3}} = 2,14 * 10^{-3} \text{ mm}^2 \quad (26)$$

Männän vaikutusalan yhdistetty standardiepävarmuus saadaan summaamalla tekijät $u(A_n)$ ja $u(A_h)$ neliöllisesti yhteen. Suuremmille paineille tarkoitetun mäntä – sylinteri-yhdistelmän (M-syl.nro.2999) yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi saadaan $4,58 * 10^{-10} \text{ m}^2$. (Kaava 27.)

$$u(A_{20C}) = \sqrt{u^2(A_{n2999}) + u^2(A_{h2999})} = 4,58 * 10^{-10} m^2 \quad (27)$$

Pienemmille paineille tarkoitettun mäntä – sylinteri-yhdistelmän (M-syl.nro.3000) yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi saadaan $3,94 * 10^{-9} m^2$. (Kaava 28.)

$$u(A_{20C}) = \sqrt{u^2(A_{n3000}) + u^2(A_{h3000})} = 3,94 * 10^{-9} m^2 \quad (28)$$

Mäntä – sylinteri-yhdistelmän lämpölaajenemiskerroin

Mäntä ja sylinteri ovat molemmat materiaaliltaan volframikarbidia. Volframikarbidin lämpölaajenemiskerroin on $4,5 * 10^{-6} \frac{1}{K}$.

$$(\alpha_P + \alpha_C) = 9 * 10^{-6} \frac{1}{K} \quad (29)$$

Epävarmuuden on oletettu olevan 5 %. Hajonta oletetaan olevan tasajakauma.

$$U(\alpha_P + \alpha_C) = 9 * 10^{-6} \frac{1}{K} * 0,05 = 4,5 * 10^{-8} \frac{1}{K} \quad (30)$$

$$u(\alpha_P + \alpha_C) = \frac{4,5 * 10^{-8} \frac{1}{K}}{\sqrt{3}} = 2,6 * 10^{-8} \frac{1}{K} \quad (31)$$

Mäntä – sylinteri-yhdistelmän lämpötila

Mäntä – sylinteri-yhdistelmän lämpötilan arvo lasketaan mittaushetkellä sisäisellä Pt100-anturilla mitatusta resistanssiarvosta interpoloimalla. Lämpötilan mittauksen epävarmuuteen vaikuttaa kalibrointitodistuksessa ilmoitettu sisäisen Pt100-anturin epävarmuus ja vastusmittaukseen käytetyn tarkkuusyleismittarin epävarmuus.

Pt100-anturin mittausepävarmuus on ilmoitettu kalibrointitodistuksessa kattavuuskertoimella 2, joten standardiepävarmuus saadaan jakamalla mittausepävarmuus kattavuuskertoimella. Hajonta on normaalijakauma.

$$U(T_{pt}) = 0,04^\circ C \quad (32)$$

$$u(T_{pt}) = \frac{0,04^\circ C}{2} = 0,02^\circ C \quad (33)$$

Tarkkuusyleismittarilla suoritettava resistanssimittaus suoritetaan 4-johdin kytkennällä. Kalibrointitodistuksessa 100 Ω:n kalibrointipisteessä eroa on ollut 0,007 % ja asetelun epävarmuus on ollut 0,002 %.

$$U(T_{tm}) = 100 \Omega * 0,007 \% + 100 \Omega * 0,002 \% = 0,009 \Omega \quad (34)$$

Pt100-anturin kalibrointitodistuksen tuloksien perusteella interpoloimalla, voidaan todeta 0,009 Ω:n epävarmuuden vastaavan 0,0233 °C:n lämpötilaa (kaava 32).

$$U(T_{tm}) = \frac{(25,04-20,04)^{\circ}\text{C}}{(109,49-107,56)\Omega} * 0,009 \Omega = 0,0233^{\circ}\text{C} \quad (35)$$

Standardiepävarmuus voidaan laskea tasajakauman hajonnalla.

$$u(T_{tm}) = \frac{0,0233^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,0135^{\circ}\text{C} \quad (36)$$

Yhdistetään Pt100-anturin ja mittaukseen käytetyn tarkkuusyleismittarin standardiepävarmuudet. Epävarmuus saadaan kertomalla standardiepävarmuus kattavuuskerroimella 2, mikä vastaa 95 %:n luottamusväliä. Hajonnaksi tulee normaalijakauma.

$$u(T) = \sqrt{u^2(T_{pt}) + u^2(T_{tm})} = 0,02413^{\circ}\text{C} \quad (37)$$

$$U(T) = u(T) * k = 0,0483^{\circ}\text{C} \quad (38)$$

6.2 Kalibroinnin epävarmuus

50 Bar		Standardi		Herkkyyserroin	Vaikutus epävarmuuteen	Osuus
Tekijä	Arvo	epävarmuus	Jakauma			
P_{mitt}	50066,50	-0,29	normaali	1	-0,29	1 %
δP_{R1}	0	0,29	tasa	1	0,29	1 %
P_{ref}	50062,55	2,41	normaali	-1	-2,41	87 %
δP_{R2}	0	0,82	tasa	1	0,82	10 %
δP_{hyst}	0	0,00	tasa	1	0,00	0 %
δP_h	-0,67	0,01	tasa	1	0,01	0 %
E_x	3,28 hPa				2,58	hPa

Taulukko 3. Kalibroinnin epävarmuustaulukko.

Epävarmuus taulukossa lasketaan mittauksen virhe ja yhdistetään epävarmuudet.

$$E_x = p_{mitt} + \delta p_{R1} - p_{ref} + \delta p_{R2} + \delta p_{hyst} + \delta p_h \quad (39)$$

E_x = kalibroitavan mittarin virhe

p_{mitt} = kalibroitavan mittarin näyttämä

δp_{R1} = kalibroitavan mittarin resoluutio

p_{ref} = laskettu referenssipaine

δp_{R2} = mittanormaanin näyttämän epävarmuus

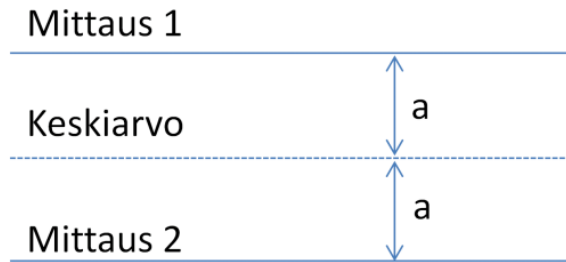
δp_{hyst} = mittauksen hystereesi

δp_h = korkeuserokorjaus

Kalibroitavan mittarin näyttämä

Mittauksia tehdään sekä nousevalla että laskevalla paineella 2 kpl (yhteensä 4 kpl).

Mittaustulos on kahden samansuuntaisen mittaustuloksen keskiarvo. Epävarmuudeksi voidaan määrittellä mittausten erotuksen puolikas. Hajonta on tasajakauma.



Kuva 27. Epävarmuuden määrittäminen.

$$U(p_{mitt}) = \frac{mitt1_{ylös} - mitt2_{ylös}}{2} \quad (40)$$

$$u(p_{mitt}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{U(p_{mitt})}{\sqrt{3}} \quad (41)$$

Kalibroitavan mittarin resoluutiosta johtuva epävarmuus

Kalibroitavan mittarin resoluutio tarkoittaa mittarin erottelukykä. ”Eroittelukyky on pienin mitattavan suureen muutos, joka aiheuttaa havaittavan muutoksen vastaavassa näyttämässä” (SFS 2010, 48). Mitattava arvo voi muuttua resoluution puolikkaan verran molempiin suuntiin vaikuttamatta lukemaan. Jos a on jakovälin puolikas, niin voi-

daan ilmoittaa että lukema on varmasti välillä $x - U$ tai $x + U$ eli $\pm U$ kuvan 22 mukaisesti. Resoluution standardiepävarmuus on:

$$u(\delta P_{R1}) = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{50 \text{ Pa}}{\sqrt{3}} = 28,87 \text{ Pa} = 0,2887 \text{ hPa} \quad (42)$$

Laskettu referenssipaine

Mittaustulos on kahden samaan suuntaan menevän referenssipaineen keskiarvo. Standardiepävarmuutena käytetään referenssipaineen epävarmuuslaskelman standardiepävarmuutta. Koska laskettuja referenssiarvon epävarmuuksia on kaksi, käytetään suurempaa epävarmuuden arvoa.

Mittanormaalın näyttämän epävarmuus

Mittanormaalın näyttämän epävarmuuteen vaikuttavat:

- Resoluutio

Mittanormaalın erottelukyky on 100 Pa. Todellinen arvo voi siis muuttua ± 50 Pa eli epävarmuus on 50 Pa. Standardiepävarmuus saadaan käyttämällä hajontana tasajakaumaa.

$$u_{res} = \frac{50 \text{ Pa}}{\sqrt{3}} = 28,87 \text{ Pa} = 0,289 \text{ hPa} \quad (43)$$

- Nollan asettelu

Nollan asettelun epävarmuuden arvioidaan olevan sama kuin resoluution, joten standardiepävarmuus on myös.

$$u_{nol} = \frac{50 \text{ Pa}}{\sqrt{3}} = 28,87 \text{ Pa} = 0,289 \text{ hPa} \quad (44)$$

- Nollan liukuma

Nollan liukuman epävarmuuden on todettu olevan alle 2 digittiä. Painevaa'an näytön numeron eli digitin arvo on 100 Pa. 2 digittiä on siis 200 Pa. Epävarmuudeksi saadaan ± 100 Pa. Standardiepävarmuus saadaan käyttämällä hajontana tasajakaumaa.

$$u_{liu} = \frac{100 \text{ Pa}}{\sqrt{3}} = 57,74 \text{ Pa} = 0,577 \text{ hPa} \quad (45)$$

- Linearisuuden poikkeama

Virityksen linearisuuden poikkeaman epävarmuuden arvioidaan olevan sama kuin resoluution.

$$u_{lin} = \frac{50 Pa}{\sqrt{3}} = 28,87 Pa = 0,289 hPa \quad (46)$$

- Virityksen epävarmuus

Mittanormaali viritetään 5 levypunnuksella, a' 1 kg.

Virityksen epävarmuuteen vaikuttavat virityksessä käytettyjen levypunnuksien arvot ja epävarmuus sekä mittanormaanin resoluutio.

Virityksessä käytettyjen levypunnusten arvot:

- 1000,013 ± 0,005 g
- 999,995 ± 0,005 g
- 999,997 ± 0,005 g
- 1000,005 ± 0,005 g
- 1000,005 ± 0,005 g

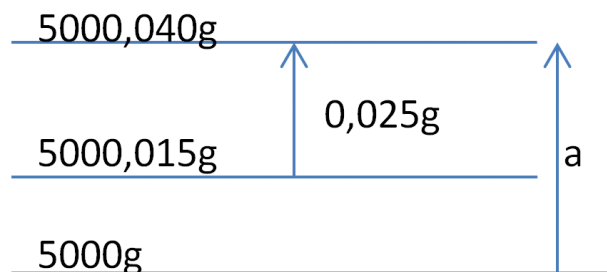
Levypunnusten epävarmuudet on ilmoitettu kalibrointitodistuksessa kattavuuskertoimella 2, joten standardiepävarmuuksiksi ilmoitetut epävarmuudet saadaan jakamalla kahdella. Virityksessä käytetty todellinen massa on siis 5000,015g. Epävarmuuskomponentit korreloivat toisiaan, joten epävarmuuskomponentit voidaan summata sellaisenaan.

$$u = 0,0025 + 0,0025 + 0,0025 + 0,0025 + 0,0025 = 0,0125 g \quad (47)$$

Laajennettu standardiepävarmuus eli epävarmuus saadaan kertomalla standardiepävarmuus kattavuuskertoimella.

$$U = k * u = 2 * 0,0125 g = 0,025 g \quad (48)$$

Virityksessä käytetty todellinen massa on siis $5000,015 \pm 0,025 g$.



Kuva 28. Virityksessä käytettyjen massojen epävarmuus.

Kuvan 28 mukaan voidaan todeta epävarmuudeksi 0,040g.

Käytettäessä 60 barin mäntä – sylinteri-yhdistelmää, vastaa 5g:n massa 500 Pa eli 0,04 g on 4 Pa.

$$u = \frac{4 Pa}{\sqrt{3}} = 2,31 Pa \quad (49)$$

Resoluution standardiepävarmuus on 0,289 hPa, joten yhdistetty virityksen standardiepävarmuus on.

$$u_{vir} = \sqrt{0,0231^2 + 0,289^2} = 0,29 hPa \quad (50)$$

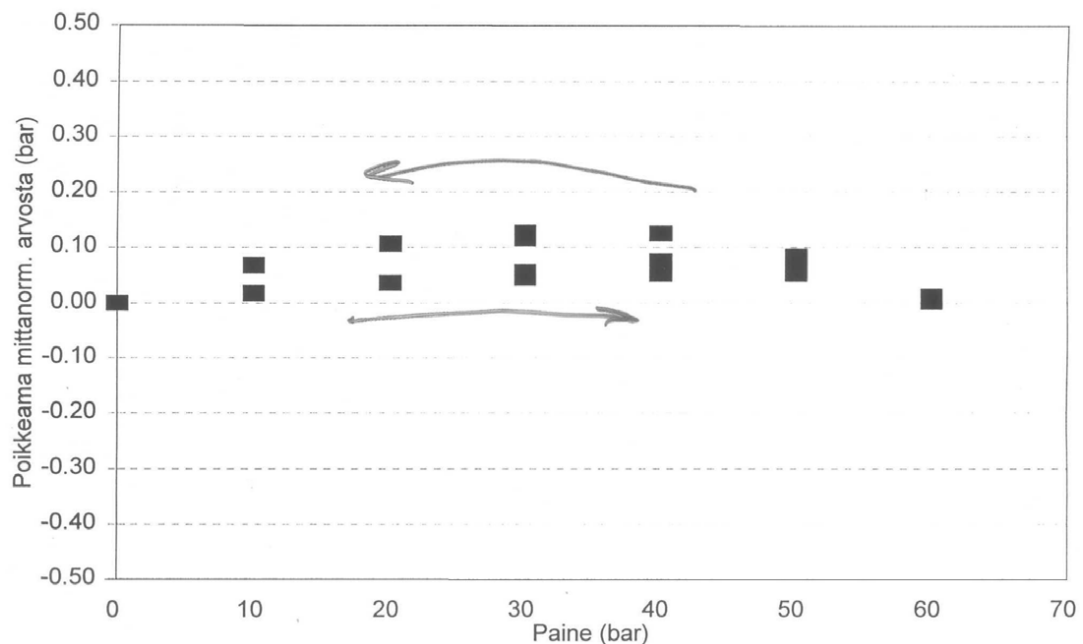
Mittanormaan standardiepävarmuus saadaan summaamalla tekijät neliöllisesti yhteen.

$$u(\delta p_{R2}) = \sqrt{u_{res}^2 + u_{nol}^2 + u_{liu}^2 + u_{lin}^2 + u_{vir}^2} \quad (51)$$

$$u(\delta p_{R2}) = \sqrt{0,289^2 + 0,289^2 + 0,577^2 + 0,289^2 + 0,29^2} = 0,817 hPa$$

Mittauksen hystereesi

Paineen laskevassa ja nousevassa suunnassa saadaan erilaiset mittaustulokset. Käytännössä ei aina välttämättä tiedetä, onko paine laskussa vai nousussa, joten hystereesi tulee huomioida epävarmuudessa. (Semenoja 2008, 51.)



Kuva 29. Hystereesin havainnollistaminen. (Semenoja 2008, 52)

Hystereesi = Laskeva paine (keskiarvo) - Nouseva paine (keskiarvo). Mikäli tulos on negatiivinen, ei hystereesiä ole havaittavissa. Jos hystereesiä on, saadaan epävarmuus jakamalla erotus kahdella kaavan 52 mukaisesti. Hajonta on tasajakauma. (Villanen 2012.)

$$U(\partial P_{hyst}) = \frac{Hystereesi}{2} \quad (52)$$

$$u(\partial P_{hyst}) = \frac{U(\partial P_{hyst})}{\sqrt{3}} \quad (53)$$

Korkeuserokorjaus

Kaasut ovat voimakkaasti kokoonpuristuvia, joten kaasun tiheys riippuu paineesta. Kalibroinnissa käytetään väliaineen tyyppiä. Ennen korkeuserokorjauksen laskemista, tulee tietää typen tiheys valitsevassa paineessa ja lämpötilassa. Typen tiheys NTP-olosuhteissa (0 °C, 1013 hPa) on $1,25 \frac{Kg}{m^3}$. Typen tiheys paineessa voidaan laskea alla olevan kaavan avulla. Lämpötilan arvona käytetään ympäristön lämpötilan keskiarvoa. Paineen arvo saadaan, kun referenssiarvoon lisätään kalibroinnin aikana vallitseva ilmanpaineen keskiarvo.

$$\rho_{kaasu(p,T)} = \rho_{kaasu(1013 \text{ hPa}, 0^\circ\text{C})} * \frac{273,15K}{T} * \frac{P_{abs}}{101325 \text{ Pa}} \quad (54)$$

Typen tiheyden epävarmuus voidaan selvittää kokeilemalla. Oletetaan letkuissa virtaavan typen lämpötilan olevan sama kuin ympäristön. Ympäristön lämpötilan kalibroinnin aikaiseksi maksimimuutokseksi voidaan edellisiä kalibrointipöytäkirjoja tarkastellen ilmoittaa 2°C. Paineen mittauksen epävarmuus saadaan referenssinlaskenta taulukosta. Taulukossa paineenmittauksen epävarmuuden voidaan arvioida olevan alle 1 hPa.

Lämpötila	Ylipaine	Tiheys
22	6000000	69,659
24	6000000	69,190
20	6000000	70,134
24	5999900	69,189
20	5999900	70,133
24	6000100	69,191
20	6000100	70,135

Taulukko 4. Typen tiheys eri olosuhteissa.

Taulukon 4 suurin erotus lähtöarvoon on olosuhteissa 20 °C ja 6000100 Pa. Typen tiheyden epävarmuudeksi voidaan ilmoittaa kaavan 55 mukaisesti $0,5 \frac{Kg}{m^3}$.

$$70,135 \frac{Kg}{m^3} - 69,659 \frac{Kg}{m^3} = 0,476 \frac{Kg}{m^3} \quad (55)$$

Referenssitason ero on enintään 20 cm eli 0,2 m. Alla olevan kaavan 56 avulla voidaan laskea korkeuserokorjaus.

$$\delta P_{\Delta h} = -[h(\rho_{cal} - \rho_{air})g] \quad (56)$$

h	ρ_{cal}	ρ_{air}	g	δP_h
0,2	69,659	1,2	9,819	-134,44
0,2	70,135	1,2	9,819	-135,38

Taulukko 5. Typen tiheyden vaikutus korkeuserokorjaukseen.

Typen tiheyden muutoksen vaikutus korkeuserokorjaukseen taulukon 5 mukaan on 0,936 Pa, joten epävarmuuden voidaan todeta olevan 1 Pa eli 0,01 hPa.

7 YHTEENVETO

Yhteenvetona opinnäytetyöstäni voin todeta, että epävarmuuslaskentaan syventymisestä oli hyötyä niin minulle kuin tutkimuksen toimeksiantajallekin. Epävarmuuslaskennan perusteiden ymmärtämisestä tulee olemaan minulle tulevissa työtehtävissä merkityksellistä hyötyä. Toimeksiantajalle opinnäytetyön antama uusi painekalibroinnin toimintamalli on hyödyllinen ja tulee käyttöön huolto-ohjelmaan heti, kun toimintamalli on testattu ja toiminta varmistettu vertailumittauksilla.

Tärkein yhteistyökumppanini opinnäytetyötä tehdessä oli työnohjaajana toimiva Gasum Tekniikka Oy:n mittausasiantuntija Jukka Villanen. Opinnäytetyön ohessa sain paljon oppia hänen kokemuksestaan sekä ammattitaidosta. Toinen tärkeä yhteistyötahto on ollut Mittatekniikan keskuksen erikoistutkija Sari Saxholm, jolla on laaja tietämys epävarmuuslaskennasta.

Opinnäytetyöprosessissani saavutin asettamani tavoitteet. Opinnäytetyöprosessi tuntui ajoittain haasteelliselta, mutta se lisäsi omaa ammatillista osaamistani merkittävästi. Motivoituminen opinnäytetyön toteuttamiseen oli suuri, sillä aiheeseen perehtymisellä ja tutkimustuloksena tehdyllä kalibrointipöytäkirjalla on merkittävä vaikutus tuleviin työtehtäviini.

LÄHTEET

Akkreditoidut kalibrointilaboratoriot. Termofysikaaliset suureet ja -ominaisuudet. FINAS. Saatavissa: <http://www.finas.fi/frameset.aspx?url=finas.aspx%3fcategoryID=2>. [Viitattu 26.10.2012].

Aumala, O. 1998. Teollisuusprosessien mittaukset. 4. uudistettu painos. Tampere: Klingendahl Paino Oy.

Desgranges Et Huot. 1985. User's manual type 21000 dynamometer.

Ehder, T. 2005. Kemia metrologian opas. Julkaisu J6/2005. Metrologian neuvottelukunta. Saatavissa: http://www.mikes.fi/documents/upload/j6_05_b5_nettiin.pdf. [Viitattu 6.10.2012].

EURAMET, Calibration of Pressure Balances, EURAMET cg-3, Version 1.0. Saatavissa: http://www.euramet.org/fileadmin/docs/Publications/calguides/EURAMET_cg-3__v_1.0_Pressure_Balance_01.pdf. [Viitattu 24.9.2012].

Gasum Oy:n internet-sivut. <http://www.gasum.fi>. [Viitattu 10.10.2012].

Heinonen, M. 2006. Mitä kalibrointitodistus kertoo?. Luotettavuutta päästökauppaan liittyviin mittauksiin MIKES 21.9.2006. Mittatekniikan keskus. Saatavissa: http://www.mikes.fi/documents/upload/luotettavuutta_paastokauppaan_mita_kalibrointitodistus_kertoo.pdf. [Viitattu 24.10.2012].

Kukkaro, J. 2012. Kalibrointiraportoinnin kehittäminen. Opinnäytetyö. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Laurila, H. Sähköpostitiedoksianto 28.11.2012. Pietarsaari: Oy Beamex Ab.

Mittauslaitelaki 17.6.2011/707

Oy Beamex Ab. 1991. Käyttö- ja huolto-ohjekirja painekalibraattori Presscal PC 105.

Oy Beamex Ab. 2003. MC5 Monitoimikalibraattori käyttöohje.

Parikka, T. 2006. ATEX-luokittelemattomien laitteiden käyttö räjähdysvaarallisissa tiloissa. Revisio 10. Gasum Tekniikka Oy:n huolto-ohjeet.

Pihkala, J. 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka. 2. uudistettu painos. Vantaa: Dark Oy.

Riski, K. Vaakojen kalibrointiohje. Julkaisu J6/1998. Mittatekniikan keskus. Saatavissa: http://www.mikes.fi/documents/upload/MIKES_J6_1998.pdf. [Viitattu 9.10.2012].

Räsänen, J. 1994. Automaatiotekniikan mittauksia. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Saxholm, S. Erikoistutkija. Keskustelu 17.9.2012. Espoo: MIKES.

Saxholm, S. & Rantanen, M. Paineen mittaaminen. Julkaisu J1/2011. Mittatekniikan keskus. Saatavissa: http://www.mikes.fi/documents/upload/j1_2011.pdf. [Viitattu 5.9.2012].

Semenoja, S. 2008. Painemittaukset. Mittaustekniikan lisensiaattikurssi. Mittatekniikan keskus. Saatavissa: <http://metrology.tkk.fi/courses/S-108.4010/2008/semenoja.pdf>. [Viitattu 5.10.2012].

SFS-OPAS 99. 2010. Kansainvälinen metrologian sanasto (VIM). Perus- ja yleiskäsitteet sekä niihin liittyvät termit. Helsinki: Suomen standardoimisliitto. 48 s.

Suomen Kaasuyhdistys –internetsivut. Maakaasukäsikirja – Marraskuu 2010. <http://www.maakaasu.fi/kirjat/maakaasukasikirja>. [Viitattu 10.10.2012].

TKK. 2008. Mittausepävarmuus luento. [www- dokumentti]. TKK. Saatavissa: http://metrology.tkk.fi/courses/S-108.1010/Luento7_2006.pdf. [Viitattu 8.9.2012].

Tukes. 2008. ATEX räjähdysvaarallisten tilojen turvallisuus. Turvatekniikan keskus. Tukes-oppaita. Saatavissa: http://www.tukes.fi/tiedostot/vaaralliset_aineet/esitteet_ja_oppaat/atex_rajahdeopas.pdf. [Viitattu 26.11.2012].

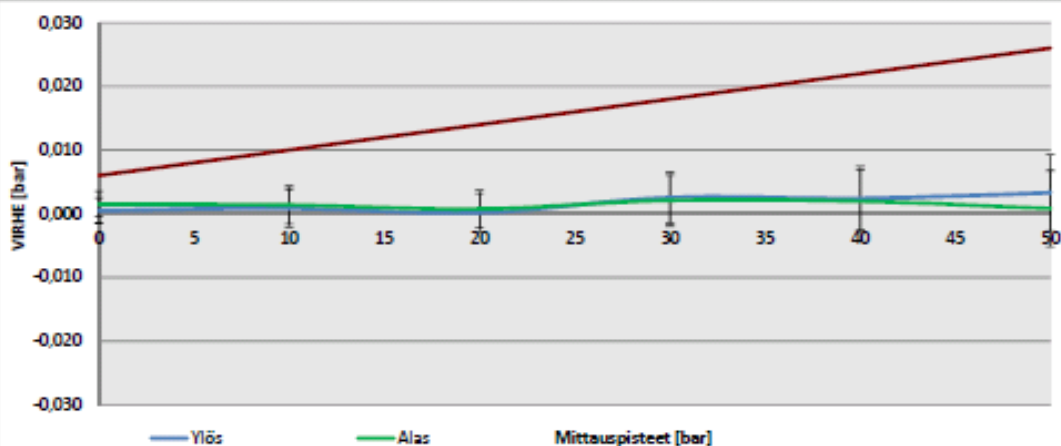
TUT. 2005. Mittausepävarmuuden arviointi ja kalibrointi. Luento 11. Tampere University of Technology. Saatavissa: http://www.mit.tut.fi/7503020/7503020_Luento11.pdf. [Viitattu 1.10.2012].

Villanen, J. 2012. D&H 21000 H64 Painevaa'an käyttöohje. Revisio 20. Gasum Tekniikka Oy:n huolto-ohjeet.

WIKA. 2012. WIKA CPH 6200 tuotetiedot. Saatavissa: http://www.wika.fi/CPH6200_en_co.WIKA. [Viitattu 20.11.2012]

Käytetty mittanormaali:						
Painevaaka					Kalibrointi:	22.12.2011
Valmistaja:	Malli:	Voimamunnin	Massasarja	Mittauselementti	M11P148	
Desgranges et Huot	21000	3769	2289	2999	Mikes	
				(0-60 Bar)		
Väliaine:	1	1 = Typpi	2 = Ilma	Tiheys (1013hPa,0°C):		
Referenssitasoero:	120	mm		1,25 kg/m ³		
Kalibroitava laite:						
Valmistaja:	Beamex		Sarja nro:	20096423		
Tyyppi:	MC-5 IS		Anhuri:	INT60		
Mitta-alue:	0 - 60 Bar		Jakoväli:	1	hPa	
Mittausolosuhteet:						
Suure	Alussa	Lopussa	Keskiarvo	Mittalaite sno.	Kalibroitu	
Ilmanpaine:	997,76	998,11	997,94	PCA0815	13.9.2011 Mikes	
Ymp.lämp:	22,55	23,50	23,0	T5	9.2.2011 Gasum	
Suht.kost:	50,4	46,4	48,4	HTT-R5040019	26.6.2012 Mikes	
Ilman tiheys:	1,170	1,166	1,168			

Mittaustulokset:							
Mittaus piste [bar]	Referenssi paine [bar]	Mitattu paine [bar]	Kork.ero korjaus [bar]	Virhe [bar]	Laajennettu epävarmuus [bar] (k=2)	Tarkkuusvaatimus [bar] (k=2)	
0	0,000	0,001	0,000	0,001	0,002	0,006	OK
10	10,013	10,014	0,000	0,001	0,003	0,010	OK
20	20,025	20,026	0,000	0,000	0,003	0,014	OK
30	30,038	30,041	0,000	0,003	0,004	0,018	OK
40	40,050	40,053	-0,001	0,002	0,005	0,022	OK
50	50,063	50,067	-0,001	0,003	0,006	0,026	OK
50	50,063	50,064	-0,001	0,001	0,006	0,026	OK
40	40,050	40,053	-0,001	0,002	0,005	0,022	OK
30	30,037	30,040	0,000	0,002	0,004	0,018	OK
20	20,025	20,026	0,000	0,001	0,003	0,014	OK
10	10,012	10,014	0,000	0,001	0,003	0,010	OK
0	0,000	0,002	0,000	0,002	0,002	0,006	OK



Huomautuksia:	

D&H 21000 Painevaa'an PT-100 anturin on todennäköisesti päässyt kosteuta, mikä on aiheuttanut nollapisteen siirtymän. Tätä anturilla mitattaessa lasketaan lämpötila lineaarisesti interpoloimalla tämän laskentaaukon avulla. Tätä vaalemsinisellä pohjalla olevat solut kalibrointitodistuksesta saatavien arvojen mukaan.

2. Syyli ylös			
Normaali:	Mitattu	Referenssin lämpötila [°C]	Laskettu Referenssin lämpötila [°C]
Paine bar			
0	0.001	109.94	26.2
10	10.014	109.96	26.3
20	20.026	109.98	26.3
30	30.041	109.99	26.3
40	40.053	110.01	26.4
50	50.067	110.02	26.4

1. Syyli ylös			
Normaali:	Mitattu	Referenssin lämpötila [°C]	Laskettu Referenssin lämpötila [°C]
Paine bar			
0	0.000	109.73	25.7
10	10.013	109.74	25.7
20	20.025	109.76	25.7
30	30.040	109.79	25.8
40	40.053	109.81	25.9
50	50.066	109.83	25.9

Kalibrointilaitos: Mikes	
Kalibrointitodistus nro: M-11T144	
Kalibrointipäivä: 20.12.2011	
Kalibrointilämpötila [°C]	Kalibroitavan anturin näytämä [Ω]
20.04	107.56
25.04	109.49

Edellisiä tuloksista saadaan: 2,591 Ω/°C

Epävarmuuslaskennassa käytettyjä arvoja:	
M-syl. Nro 2999 (60Bar) =	9,80497 ± 0,0009 mm ²
	Stabiilisuus 0,0003 mm ²
	Stabiilisuuden std epävarmuus 8,6603E-11 m ²
Massojen tiheys =	7920 ± 30 Kg/m ³
Palkallinen kiihtyvyys =	9,819229 ± 0,000004 ms ⁻²
1 digit =	100 Pa
Levyppunnukset =	1000,013 ± 0,005 g
	999,995 ± 0,005 g
	999,997 ± 0,005 g
	1000,005 ± 0,005 g
	1000,005 ± 0,005 g

2. Syyli alas			
Normaali:	Mitattu	Referenssin lämpötila [°C]	Laskettu Referenssin lämpötila [°C]
Paine bar			
50	50.064	110.03	26.4
40	40.052	110.04	26.5
30	30.040	110.05	26.5
20	20.026	110.06	26.5
10	10.014	110.07	26.5
0	0.002	110.08	26.6

1. Syyli alas			
Normaali:	Mitattu	Referenssin lämpötila [°C]	Laskettu Referenssin lämpötila [°C]
Paine bar			
50	50.064	109.87	26.0
40	40.053	109.89	26.1
30	30.040	109.90	26.1
20	20.026	109.92	26.2
10	10.014	109.93	26.2
0	0.001	109.94	26.2

Normaali:	Keskiarvot		Laskentur	
	Mitattu paine [bar]	Alas - Ylös [bar]	Ero [bar]	Väliaeneen tiheys Kg/m ³
0	#JAKO!0!	#JAKO!0!	0.000	#ARVO!
10	10.014	0.000	-0.001	1.15
20	20.026	0.000	-0.001	12.54
30	30.041	-0.001	-0.001	23.94
40	40.053	-0.001	-0.001	35.33
50	50.067	-0.003	-0.001	46.72
50	50.064	-0.003	0.000	58.11
40	40.053	-0.001	0.000	46.72
30	30.040	-0.001	0.000	35.33
20	20.026	0.000	0.000	23.94
10	10.014	0.000	0.000	12.54
0	0.002	0.001	0.001	1.15
	#JAKO!0!	#JAKO!0!	0.000	#ARVO!