

# MIKES METROLOGIA

J1/2011



## Paineen mittaus

Sari Saxholm ja Markku Rantanen  
Mittatekniikan keskus

Espoo 2011

Julkaisu J1/2011

## **Paineen mittaus**

Sari Saxholm ja Markku Rantanen

Mittatekniikan keskus

Espoo 2011

---



## Alkusanat

Paineeseen liittyy ennakkoluuloja. Sitä pidetään monesti mitättömänä ja helppona suurena verrattuna SI-järjestelmän perussuureisiin ja niiden toteuttamisessa tarvittaviin wattivaakoihin ja lasereihin. Usein ei tulla ajatelleeksi painetta ja sen merkitystä jokapäiväisessä elämässä: paine on lämpötilan jälkeen teollisuudessa eniten mitattu prosessisuure. Lisäksi tiedot vallitsevasta ilmanpaineesta, verenpaineesta ja auton tai pyörän rengaspaineesta ovat lähes kaikille tuttuja ja tarpeellisia.

Tähän julkaisuun on haluttu kerätä eri lähteissä hajallaan olevaa paineen mittaukseen liittyvää tietoa jäsennellysti yksiin kansiin. On myös haluttu dokumentoida ja tuoda esiin kokemuksen kautta karttunutta tietämystä ja käytännön vihjeitä painemittausten parissa työskentelyyn. Julkaisu sopii erinomaisesti kaikille paineen mittauksesta kiinnostuneille, mutta erityisesti sitä opiskeleville ja sen parissa työskenteleville henkilöille.

Tämä julkaisu käsittelee painetta ja sen mittaamista. Alussa käsitellään painetta yleisellä tasolla ja selvennetään paineeseen liittyvät käsitteet. Tämän jälkeen keskitytään paineen mittaamiseen, mittausrakenteisiin ja mittaustulosten luotettavuuteen.

Paineen mittauksen erityisaluetta, vakuuimittauksia, ei käsitellä tässä julkaisussa, koska tältä alueelta kirjallisuutta on saatavilla hyvin (esim. Jousten, Karl (ed.): Handbook of Vacuum Technology, 914 s., 2008) ja suomenkielinen teoskin on olemassa (Fontell, Maula, Nieminen, Söderlund, Valli, Vehanen, Vulli, Ylilampi: Tyhjiötekniikka, 283 s., 1986).

Julkaisun laatijoista DI Sari Saxholm on MIKESin ylläpitämän paineen kansallisen mittanormaallilaboratorion nykyinen vastuuhenkilö, ja DI Markku Rantanen on hoitanut samaa tehtävää alkaen laboratorion perustamisesta aina eläkkeelle siirtymiseensä asti.

Espoossa maailman metrologiapäivänä 20.5.2011

# Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Paineen yksikkö	5
3 Yli- ja alipaine, absoluuttinen paine	6
Absoluuttinen paine	6
Vallitseva ilmanpaine	7
Ylipaine	7
Alipaine	7
Paine-ero	7
4 Hydrostaattinen paine ja korkeuserokorjaus	8
Korkeuserokorjaus	8
Korkeuserokorjaus ylipainemittauksissa, väliaineena öljy	8
Esimerkki 1	10
Esimerkki 2	11
Korkeuserokorjaus ylipainemittauksissa, väliaineena kaasu	11
Esimerkki 3	12
Korkeuserokorjaus absoluuttipainemittauksissa	14
Korkeuserokorjauksen arvoja	14
5 Paineen mittausmenetelmät ja laitteet	15
Mekaaniseen muodonmuutokseen perustuvat mittarit	16
Painevaa'at	16
Painevaa'an paineen laskentakaava	17
Mäntämanometri	19
Nestepatsaslaitteet	20
Paineen korotus ja alennus	21
6 Paineenmittauslaitteiden kalibrointi	21
Osoitinnäytöllä varustetut painemittarit	23
Numeronäytöllä varustetut painemittarit	24
7 Mittaustulos ja sen luotettavuus	25
Esimerkki 4	27
8 Kalibrointitodistus	31
9 Paineenmittauslaitteen valinta	32
10 Paineen mittauksessa huomioitavia asioita	33
Painemittarin käytönaikaisia virhelähteitä	33
Painevaa'an käytönaikaisia virhelähteitä	34
11 Paine MIKESissä	34
12 Loppusanat	36
13 Kirjallisuutta ja lähteet	36
14 Standardit ja suositukset	36
15 Hakemisto	38

## 1 Johdanto

Paine on lämpötilan jälkeen teollisuudessa eniten mitattu prosessisuure. Teollisuuden automaatioasteen kasvu ja anturitekniikan ja elektroniikan kehitys ovat voimakkaasti lisänneet elektronisten paineantureiden ja -lähettimien käyttöä. Paineen mittausrakenteista on tullut käyttövarmempia samalla kun niiden reaali hinnat ovat jopa laskeneet.

Laatujärjestelmien soveltaminen ja yleisen laatu-tietoisuuden lisääntyminen ovat osaltaan lisänneet painekalibrointien tarvetta. Paineen mittausten merkitystä lisää myös se, että painemittareita ja painelähettämiä käytetään myös muiden suureiden mittaamiseen. Hydrostaattista painetta hyväksi käyttäen voidaan mitata esimerkiksi pinnankorkeutta. Sukeltajan syvyysmittari ja lentokoneen korkeusmittari mittaavat nekin itse asiassa painetta. Hydraulisyylinterin voimaa voidaan mitata paineen avulla, ja virtausmittauksissa hyödynnetään paine-eron mittausta.

Mitattavan paineen vaihtelualue on huomattavan laaja alkaen hiukkaskiihdytinkokeiden  $10^{-9}$  pascalista esimerkiksi jauhemetallurgian yli  $10^9$  pascalin eli 1 GPa:n paineisiin. On selvää, että mittausrakenteet ja niiden toimintaperiaatteet vaihtelevat suuresti mitattavasta painealueesta riippuen.

Suomessa paineen ja useimpien muidenkin suureiden kansallisia mittanormaaleja ylläpitää Mittatekniikan keskus, MIKES ([www.mikes.fi](http://www.mikes.fi)). MIKES suorittaa paineen mittausrakenteiden kalibrointia alkaen absoluuttipainealueen 0,0005 pascalista ja ulottuen 500 MPa (5000 bar) öljynpaineisiin asti. Mittausalue on laaja, sillä suurin paine on tuhat miljardia kertaa pienin paine.

MIKES on mukana kansainvälisessä CIPM MRA -sopimuksessa, jonka perusteella eri maiden kansalliset mittanormaallaboratoriot tunnustavat toistensa antamat mittaus- ja kalibrointitodistukset tasavertaisiksi. Näin MIKES edistää toiminnallaan periaatetta ”kerran mitattu, kaikkialla hyväksytty”. MRA-sopimukseen liittyy olennaisena osana maailmanlaajuinen vertailumittausjärjestelmä ja avoin internet-tietokanta osoitteessa [www.bipm.org](http://www.bipm.org).

## 2 Paineen yksikkö

Paine on aineen nestemäistä ja kaasumaista olomuotoa koskeva suure, joka määritellään pintaa vastaan kohtisuoraan vaikuttavan voiman  $F$  ja saman pinnan alan  $A$  osamääränä:

$$p = F / A \tag{1}$$

missä

$p$	on paine
$F$	on voima ja
$A$	on pinta-ala

Paineen SI-järjestelmän mukainen yksikkö on pascal (Pa). Yksi pascal on paine, jonka yhden newtonin suuruinen voima tasaisesti jakautuneena aiheuttaa yhden neliömetrin pinta-alalle ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ).

Pascal on pieni yksikkö, ja usein käytetäänkin sen kerrannaisia:

1 hPa = 100 Pa  
 1 kPa = 1000 Pa  
 1 MPa = 1 000 000 Pa

Paineen yksikkönä käytetään yleisesti myös SI-järjestelmään kuulumatonta baaria (bar):

1 bar = 100000 Pa = 1000 hPa = 0,1 MPa.

Esimerkiksi auton rengaspaine ilmoitetaan yleensä baareina:  
 2,3 bar (ylipainetta, suhteessa vallitsevaan ilmanpaineeseen)

Vallitsevan ilmanpaineen ilmoittamisessa käytetään useita eri yksiköitä, esimerkiksi:  
 1 bar = 1000 mbar = 1000 hPa = 100 kPa (absoluuttista painetta)

Muita yhä käytössä olevia paineen yksiköitä ovat mm.:

1 mbar = 1 hPa = 100 Pa  
 1 psi = 6894,757... Pa  
 1 mmHg = 1 torr = 133,322... Pa  
 1 kp/cm<sup>2</sup> = 9,80665 × 10<sup>4</sup> Pa

Käteviä muunnoslaskimia voi nykyään ladata ilmaiseksi internetistä.

### 3 Yli- ja alipaine, absoluuttinen paine

Paineen mittaaminen on aina paine-eron mittaamista. Vertailuarvosta riippuen käytetään paineelle erilaisia nimityksiä ja erilaisia mittauslaitteita.

#### Absoluuttinen paine

Vertailuarvona on tyhjiö. Pienille absoluuttipaineille tarkoitettuja mittareita sanotaan vakuuimittareiksi.

## Vallitseva ilmanpaine

Vallitseva ilmanpaine on ilmakehän aiheuttamaa absoluuttista painetta eli vertailuarvona on tyhjiö. Ilmanpaine vaihtelee osana säätilan vaihtelua. Ilmanpaineeseen vaikuttaa myös mittauspaikan korkeus merenpinnasta. Vallitsevan ilmanpaineen mittareita sanotaan barometreiksi.

## Ylipaine

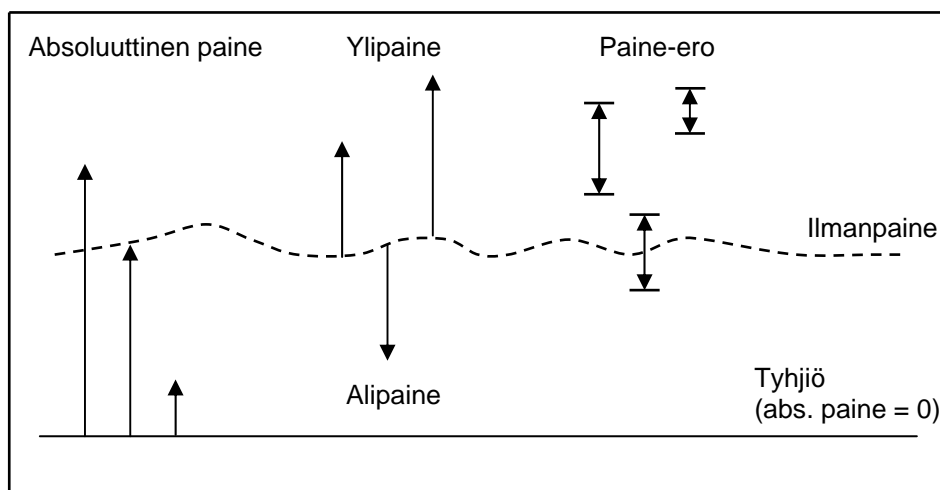
Vertailuarvona on vallitseva ilmanpaine. Esimerkiksi auton rengaspaine on ylipainetta. Ylipaine voidaan muuntaa absoluuttipaineeksi lisäämällä siihen muunnoshetkellä vallitseva ilmanpaine. Jokapäiväisessä kielenkäytössä ”paine” tarkoittaa useimmiten ylipainetta.

## Alipaine

Alipaine on negatiivista ylipainetta, ja vertailuarvona on vallitseva ilmanpaine. Absoluuttipaineeksi muunnettuna alipaine on siten aina vallitsevaa ilmanpainetta pienempi. Alipaine tarkoittaa siis kohteen pienempää painetta verrattuna ympäristöön. Alipainetta mitataan usein esimerkiksi pumppujen imupuolelta ja polttomoottorien imusarjasta. Alipaine aiheuttaa käsitteenä jonkin verran sekaannusta; julkaisun laatijat ovat esimerkiksi usein törmänneet tilanteeseen, jossa kalibrointia tilaava asiakas puhuu alipainemittarista tarkoittaen vakuumimittaria tai pienten absoluuttipaineiden mittaria.

## Paine-ero

Paine-erosta puhutaan erityisesti silloin, kun vertailuarvona on jokin muu paine kuin tyhjiö tai vallitseva ilmanpaine. Vertailuarvoa sanotaan tällöin usein linjapaineeksi



Kuva 1 [1]. Vertailuarvosta riippuen paineelle käytetään erilaisia nimityksiä. .



## 4 Hydrostaattinen paine ja korkeuserokorjaus

Hydrostaattinen paine on nesteen tai kaasun oman painovoiman aiheuttama paine. Hydrostaattinen paine lasketaan kaavalla:

$$p = \rho gh \quad (2)$$

missä

$\rho$	on väliaineen tiheys
$g$	on putoamiskiihtyvyyys
$h$	on korkeus (eli korkeus, syvyys tai korkeusero)

Vaikka hydrostaattisen paineen aiheuttaa väliaineen (neste tai kaasu) oma painovoima, ei sen suuruuteen vaikuta väliaineen tilavuus tai massa, vaan ainoastaan sen tiheys ja korkeus (eli kuinka korkealla tai kuinka syvällä sijaitaan, tai mikä on tarkasteltava korkeusero). Näin ollen esimerkiksi nesteessä kaikki samalla syvyydellä olevat kappaleet ovat yhtä suuren paineen ympäröimänä. Toisaalta taas, jos erimuotoisissa astioissa on samaa nestettä yhtä korkealla, astioiden pohjassa vallitsee yhtä suuri paine. Eli hydrostaattiseen paineeseen ei vaikuta astian muoto.

Hydrostaattinen paine on olemassa kaikkialla painovoimakentän vaikutusalueella, olipa sitten kyseessä putkisto tai painekammio, tai laajempi kokonaisuus, kuten vaikka ilmakehä tai meri.

Hydrostaattisesta paineesta johtuen väliaineen (neste tai kaasu) sisällä vallitsevaan paineeseen vaikuttaa siis aina kaksi tekijää: väliaineeseen kohdistuva ulkoinen paine sekä väliaineen omasta painosta johtuva hydrostaattinen paine. Esimerkiksi, jos väliaine on suljettu sylinteriin, jossa on mäntä, voidaan mäntää painamalla kohdistaa väliaineeseen ulkoinen paine. Sen lisäksi vallitseva ilmanpaine aiheuttaa väliaineeseen ulkoisen paineen. Ja näiden ulkoisten painetekijöiden lisäksi väliaineen oma painovoima aiheuttaa hydrostaattisen paineen.

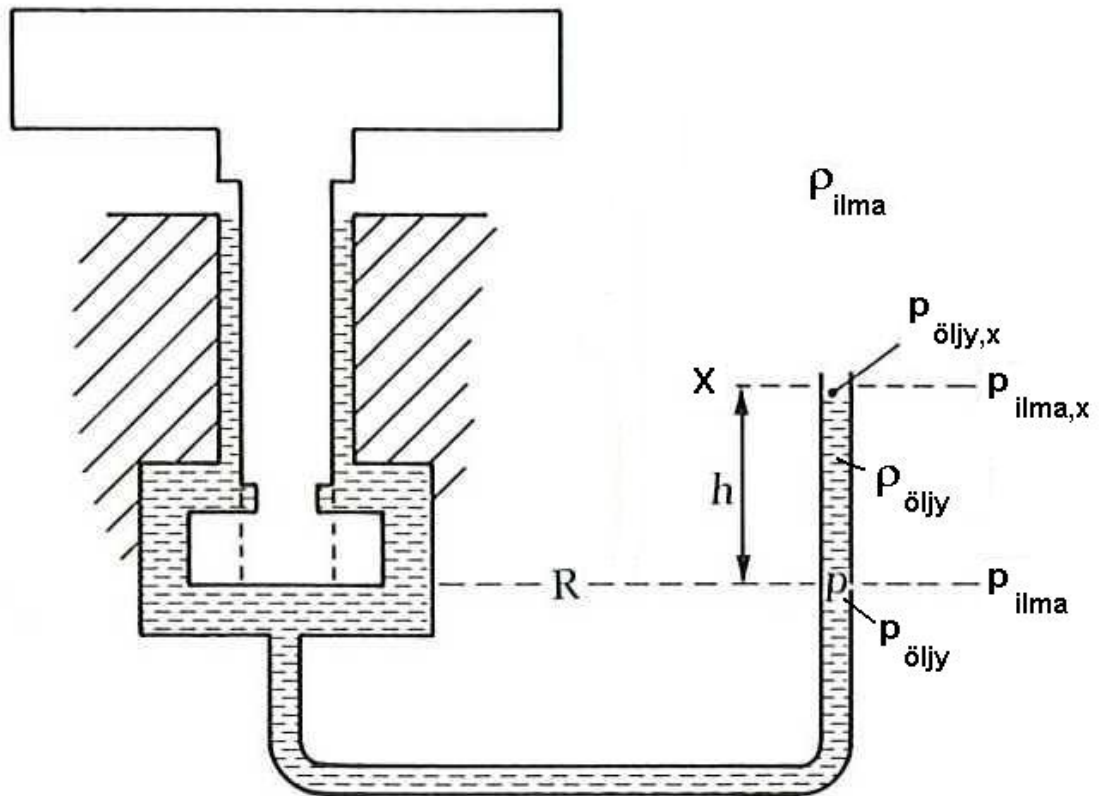
### Korkeuserokorjaus

Hydrostaattinen paine tulee ottaa huomioon mittauksia tehdessä ja laitteita kalibroitaessa. Jos tarkasteltavat laitteet sijaitsevat eri korkeuksilla toisiinsa nähden, niihin vaikuttaa erisuuruinen hydrostaattinen paine. Korkeuserosta johtuva ero hydrostaattisessa paineessa voi olla (korkeuseron suuruudesta ja väliaineen tiheydestä riippuen) sitä luokkaa, että se pitää ottaa huomioon mittaustuloksia laskettaessa. Tätä kutsutaan korkeuserokorjaukseksi. Huomioitavaa on, että korkeusero lasketaan hieman eri tavalla riippuen siitä, onko kyseessä ylipaine- vai absoluuttipainemittaus.

#### Korkeuserokorjaus ylipainemittauksissa, väliaineena öljy

Öljyjä voidaan ajatella yleisesti ottaen kokoonpuristumattomina, jolloin niiden tiheys pysyy suurin piirtein vakiona paineesta riippumatta. Näin ollen myöskään hydrostaattinen korkeuserokorjaus ei käytännössä ole paineesta riippuvainen.

Tarkastellaan kuvan 2 esimerkkitapausta. Väliaineena on öljy ja putkessa on painevaa'an avulla tuotettu paine  $p$ . Lasketaan hydrostaattinen korkeuserokorjaus, eli korkeuserosta johtuva paine-ero tasojen R ja X välillä.



Kuva 2 [2]. Korkeuserosta johtuva paine-ero.

### Kuvassa 2

$p_{\text{öljy}}$	on paine referenssitasolla R
$p_{\text{ilma}}$	on ilmanpaine referenssitasolla R
$p_{\text{öljy},x}$	on paine tasolla X
$p_{\text{ilma},x}$	on ilmanpaine tasolla X
$h$	on tasojen R ja X välinen korkeusero
$\rho_{\text{öljy}}$	on öljyn tiheys
$\rho_{\text{ilma}}$	on ilman tiheys

Paine tasolla R on öljynpainelukema vähennettynä ilmanpainelukemalla samalla tasolla, eli:

$$(p_{\text{öljy}} - p_{\text{ilma}}) \quad (3)$$

Vastaavasti paine tasolla X on öljynpainelukema tällä tasolla vähennettynä ilmanpainelukemalla vastaavalla tasolla, eli:

$$(p_{\text{öljy},x} - p_{\text{ilma},x}) \quad (4)$$

Kun X-taso on  $h$ :n verran R-tasoa ylempänä, on paine tasolla R:

$$p_{\text{öljy}} = p_{\text{öljy},x} + \rho_{\text{öljy}} gh \quad (5)$$

Ja vastaavasti ilmanpaineelle tasolla R:

$$p_{\text{ilma}} = p_{\text{ilma},x} + \rho_{\text{ilma}} gh \quad (6)$$

Tästä seuraa, kaavojen 5 ja 6 avulla, että paine-ero kahden tason, R ja X, välillä on:

$$(p_{\text{öljy}} - p_{\text{ilma}}) - (p_{\text{öljy},x} - p_{\text{ilma},x}) = h(\rho_{\text{öljy}} - \rho_{\text{ilma}})g \quad (7)$$

Näin ollen korkeuserosta johtuva tekijä, eli painelukemaan tarvittava korjaus on:

$$h(\rho_{\text{öljy}} - \rho_{\text{ilma}})g \quad (8)$$

Varustetaan vielä korkeuserokorjauksen kaava miinus-etumerkillä, jotta saadaan mittanormaanin lukemaan tarvittava korjaus valmiiksi oikeanmerkkisenä:

$$- [h(\rho_{\text{öljy}} - \rho_{\text{ilma}})g] \quad (9)$$

Kun sijoitetaan  $h$ :n arvo kaavaan 9 aina sopivalla etumerkillä varustettuna sen mukaisesti, **onko mittari alempana vai ylempänä mittanormaaliin nähden**, saadaan mittanormaanin lukemaan tarvittava korjaus valmiiksi oikeanmerkkisenä. Jos mittari on alempana kuin mittanormaali, on  $h$ :n etumerkki miinus. Vastaavasti  $h$ :n etumerkki on plus, jos mittari on ylempänä kuin mittanormaali .

Koska öljyn tiheys ei riipu paineesta, on korkeuserokorjaus samansuuruinen riippumatta siitä, kuinka isoa tai pientä painetta mitataan. Eli jos öljyn tiheys on  $1000 \text{ kg/m}^3$  ja mitataan painetta pisteessä  $100 \text{ MPa}$ , ja korkeusero kalibroivan laitteen ja mittanormaanin välillä on  $1 \text{ m}$ , on korkeuserosta johtuva korjaus  $9800 \text{ Pa}$ , eli  $98 \text{ ppm}$  eli  $0,01 \%$  painelukemasta. Jos mittauspiste onkin vain  $10 \text{ MPa}$  ja korkeusero on edelleen  $1 \text{ m}$  ja öljyn tiheys on sama, on korkeuserokorjaus edelleen sama  $9800 \text{ Pa}$ , mutta nyt korjauksen suhteellinen osuus painelukemasta onkin jo  $980 \text{ ppm}$  eli  $0,1 \%$ .

### Esimerkki 1

Öljyn tiheys on  $900 \text{ kg/m}^3$ , ilman tiheys on  $1,2 \text{ kg/m}^3$  ja putoamiskiihtyvyyden  $g$  arvo on  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Kalibroitava mittari on  $1 \text{ cm}$  alempana kuin mittanormaali. Kuinka suuri on korkeuserokorjaus?

Vastaus, kaavalla 9 laskien:

$$-[-0,01 \text{ m} \times (900 \text{ kg/m}^3 - 1,2 \text{ kg/m}^3) \times 9,8 \text{ m/s}^2] = 88 \text{ Pa}$$

Eli mittanormaanin lukemaan on *lisättävä* korkeuserosta johtuva korjaus  $88 \text{ Pa}$ . Mittariin kohdistuu siis suurempi hydrostaattinen paine kuin mittanormaaliin, koska mittari sijaitsee alempana.

**Esimerkki 2**

Öljyn tiheys on  $1000 \text{ kg/m}^3$ , ilman tiheys on  $1,2 \text{ kg/m}^3$  ja putoamiskiihtyvyyden  $g$  arvo on  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Kalibroitava mittari on 1 cm ylempänä kuin mittanormaali. Kuinka suuri on korkeuserokorjaus?

Vastaus, kaavalla 9 laskien:

$$-[0,01 \text{ m} \times (1000 \text{ kg/m}^3 - 1,2 \text{ kg/m}^3) \times 9,8 \text{ m/s}^2] = -98 \text{ Pa}$$

Eli mittanormaalin lukemasta on nyt *vähennettävä* korkeuserosta johtuva korjaus 98 Pa, koska nyt kalibroitava mittari sijaitsee ylempänä.

**Korkeuserokorjaus ylipainemittauksissa, väliaineena kaasu**

Kaasut ovat voimakkaasti kokoonpuristuvia ja sen vuoksi kaasujen tiheys riippuu paineesta. Siksi myös korkeuserokorjaus kaasuille on riippuvainen paineesta. Korkeuserokorjauksen periaatteet sinänsä ovat samat kaasuille kuin öljyille, mutta kaasujen ollessa kyseessä pitää ensin laskea kaasun tiheys tarkastelun kohteena olevassa paineessa, ja vasta sitten päästään laskemaan itse korkeuserokorjausta.

Kaasujen tiheys tietyssä paineessa ja tietyssä lämpötilassa voidaan laskea kaasujen yleisen tilanyhtälön avulla, kun tiedetään kyseessä olevan kaasun tiheys normaaliolosuhteissa (Normaaliolosuhteet, NTP:  $p = 1013,25 \text{ hPa}$  ja  $T = 273,15 \text{ K}$  eli  $t = 0 \text{ °C}$ )

Kaasujen yleinen tilanyhtälö on:

$$\frac{pV}{T} = \text{vakio} \quad (10)$$

missä

$p$  on paine  
 $V$  on tilavuus  
 $T$  on lämpötila kelvineinä

Mikä käytännössä tarkoittaa, että:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (11)$$

Kun tiedetään, että tilavuus on:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (12)$$

missä

$m$  on massa  
 $\rho$  on tiheys

voidaan sijoittaa kaava 12 kaavaan 11 ja olettaa, että muutoksessa ainetta ei häviä minnekään, eli massa pysyy samana, saadaan:

$$\frac{p_1}{T_1 \rho_1} = \frac{p_2}{T_2 \rho_2} \quad (13)$$

missä

$p_1$  on normaalipaine (1013,25 hPa)  
 $T_1$  on normaalilämpötila (273,15 K)  
 $\rho_1$  on kaasun tiheys normaaliolosuhteissa  
 $p_2$  on paine muutoksen jälkeen, eli tarkasteltava painepiste  
 $T_2$  on lämpötila muutoksen jälkeen, eli tarkasteltava lämpötila  
 $\rho_2$  on kaasun tiheys muutoksen jälkeen, eli tiheys tarkasteltavassa painepisteessä

Ja edelleen, kaavaa 13 työstämällä, saadaan kaava 14 kaasun tiheyden laskemiseksi tietyssä paineessa ja tietyssä lämpötilassa:

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{T_1}{T_2} \frac{p_2}{p_1} \quad (14)$$

Kaavaan voidaan jo valmiiksi sijoittaa tunnetut arvot, eli normaalipaine ja normaalilämpötila:

$$\rho_{kaasu(p,t)} = \rho_{kaasu(1013 \text{ hPa}, 0^\circ \text{C})} \cdot \frac{273,15 \text{ K}}{T_2} \cdot \frac{p_{2,abs}}{101325 \text{ Pa}} \quad (15)$$

missä

$\rho_{kaasu(1013 \text{ hPa}, 0^\circ \text{C})}$   
on kaasun tiheys normaali-olosuhteissa  
 $T_2$  on lämpötila  
 $p_{2,abs}$  on tarkasteltava paine

Kaavaa 15 käytettäessä on lämpötila  $T_2$  ilmoitettava kelvineinä ja paine  $p_2$  absoluuttipaineena käyttäen yksikkönä pascalia. Ylipainelukemat on siis muunnettava laskentaa varten absoluuttisiksi painelukemiksi lisäämällä lukemaan ilmanpaine.

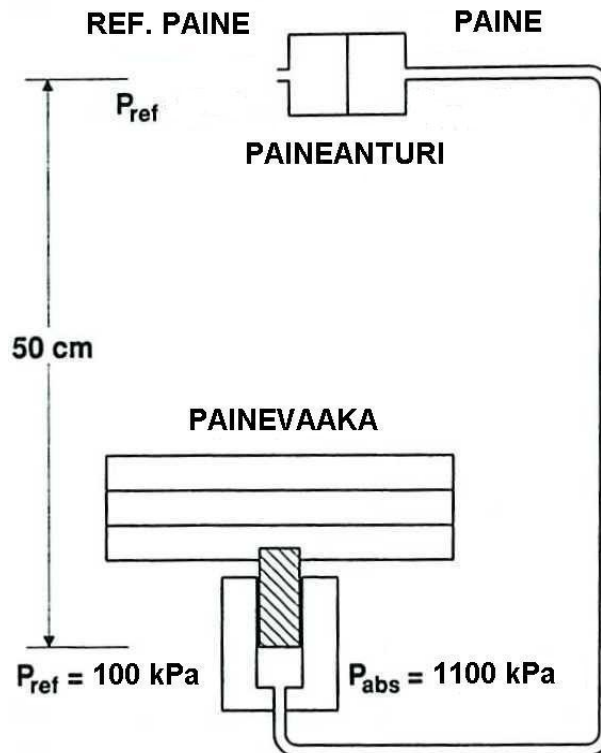
### Esimerkki 3

Tarkastellaan kuvan 3 esimerkkitapausta. Mitattava paine on 1 MPa ylipainetta ja väliaineena käytettävä kaasu on argon. Lasketaan paineanturille tarvittava korkeuserokorjaus, kun mittanormaali on kuvassa 3 olevan tilanteen mukaisesti 50 cm alempana kuin kalibroitava paineanturi.

Aloitetaan laskemalla väliaineen tiheys tarkasteltavassa paineessa, joka siis on 1 MPa ylipainetta. Muunnetaan ylipaine absoluuttipaineeksi lisäämällä vallitseva ilmanpaine, eli

saadaan 1,1 MPa.

Lämpötila mittaushetkellä on 24 °C. Argonin tiheys normaaliolosuhteissa on 1,78 kg/m<sup>3</sup>.



Kuva 3 [3]. Korkeuserosta johtuva paine-ero, kun mittanormaali on alempana kuin kalibroitava paineanturi.

Lasketaan kaavalla 15:

$$\rho_{kaasu(p,t)} = 1,78 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{273,15 \text{ K}}{297,15 \text{ K}} \cdot \frac{1100000 \text{ Pa}}{101325 \text{ Pa}} = 17,77 \text{ kg/m}^3$$

Eli argonin tiheys paineessa 1,1 MPa abs. ja lämpötilassa 24 °C on 17,77 kg/m<sup>3</sup>.

Nyt voidaan laskea korkeuserokorjaus käyttäen samaa kaavaa kuin öljynpaineen esimerkeissäkin. Öljyn tiheyden tilalle kaavaan 9 sijoitetaan juuri edellä laskettu argonin tiheys. Käytetään edelleen ilman tiheydelle arvoa 1,2 kg/m<sup>3</sup> ja g:lle arvoa 9,8 m/s<sup>2</sup> ja lasketaan kaavalla 9:

$$-[0,5 \text{ m} \cdot (17,77 \text{ kg/m}^3 - 1,2 \text{ kg/m}^3) \cdot 9,8 \text{ m/s}^2] = -81 \text{ Pa}$$

Eli mittanormaalien lukemasta on vähennettävä korkeuserosta johtuva 81 Pa.

Kaavaa 15 voidaan käyttää vastaavalla tavalla myös muiden kaasujen (kuten vaikka ilman tai typen) tiheyksien laskemiseen tietyssä paineessa ja lämpötilassa. Tällöin on vain sijoitettava  $\rho_1$ :n eli  $\rho_{kaasu(1013 \text{ hPa}, 0 \text{ °C})}$ :n paikalle kulloinkin kyseessä olevan kaasun

tiheys normaaliolosuhteissa. Ilman tiheys normaaliolosuhteissa on  $1,29 \text{ kg/m}^3$  ja typen  $1,25 \text{ kg/m}^3$ .

### Korkeuserokorjaus absoluuttipainemittauksissa

Absoluuttipainemittauksissa väliaineena on kaasu. Kaasun tiheys lasketaan samalla tavalla kuin ylipainemittauksissa (edellinen kappale) eli kaavalla 15.

Ylipainemittauksissa korkeuseron laskemiseen käytetystä kaavasta 9 jätetään nyt ympäröivän ilman tiheys pois, jolloin se yksinkertaistuu muotoon:

$$- h\rho_{\text{kaasu}}g \quad (16)$$

missä

$h$  on korkeusero

$\rho_{\text{kaasu}}$  on väliaineena käytettävän kaasun tiheys tarkasteltavassa painepisteessä

$g$  on paikallinen putoamiskiikkyvyys

Ympäröivän ilman tiheys jää kaavasta pois, koska absoluuttipainemittaukset tehdään suhteessa tyhjiöön eikä suhteessa vallitsevaan ilmanpaineeseen, kuten ylipainemittaukset. Käytännössä painevaa'alla vertailukohtana oleva tyhjiö pumpataan vakuumikuvun alle ja jäännöspaine mitataan vakuumimittarilla. Jäännös- eli referenssipaineen arvo pitää huomioida tulosten laskennassa.

### Korkeuserokorjauksen arvoja

Seuraavissa taulukoissa on laskettu edellisessä kappaleessa esitetyillä kaavoilla korkeuserokorjauksen arvoja ylipainemittauksissa, kun väliaineena käytetään öljyä, tyypeä tai ilmaa.

Taulukko 1. Korkeuserokorjauksen arvoja ylipainemittauksissa, kun väliaineena on öljy. Laskennassa ympäröivän ilman tiheydelle on käytetty arvoa  $1,2 \text{ kg/m}^3$  ja paikalliselle putoamiskiikkyvyydelle arvoa  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Öljyä pidetään yleisesti ottaen kokoonpuristumattomana, jolloin sen tiheys pysyy suurin piirtein vakiona paineesta riippumatta.

Väliaine	Paine (MPa)	Tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )	Korkeusero (cm)	Korkeusero-korjaus (Pa)	Korkeusero-korjaus (%)
Öljy	100	1000	100	9788,2	0,01
Öljy	100	1000	10	978,8	0,001
Öljy	100	1000	1	97,9	0,0001
Öljy	50	1000	100	9788,2	0,02
Öljy	50	1000	10	978,8	0,002
Öljy	50	1000	1	97,9	0,0002
Öljy	5	1000	100	9788,2	0,2
Öljy	5	1000	10	978,8	0,02
Öljy	5	1000	1	97,9	0,002

Taulukko 2. Korkeuserokorjauksen arvoja ylipainemittauksissa, kun väliaineena on typpi tai ilma. Laskennassa ympäröivän ilman tiheydelle on käytetty arvoa  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , paikalliselle putoamiskiintyvyydelle arvoa  $9,8 \text{ m/s}^2$ , typen tiheydelle NTP arvoa  $1,25 \text{ kg/m}^3$ , ilman tiheydelle NTP arvoa  $1,29 \text{ kg/m}^3$ , lämpötilalle arvoa  $21 \text{ °C}$  ja vallitsevalle ilmanpaineelle arvoa  $1000 \text{ hPa}$ .

Väliaine	Paine, ylipaineena (MPa)	Paine, absoluuttisena (MPa)	Tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )	Korkeusero (cm)	Korkeusero-korjaus (Pa)	Korkeusero-korjaus (suhteessa ylipaineeseen) (%)
Typpi	5	5,1	58,4	100	560,8	0,01
Typpi	5	5,1	58,4	10	56,1	0,001
Typpi	5	5,1	58,4	1	5,6	0,0001
Typpi	0,5	0,6	6,9	100	55,6	0,01
Typpi	0,5	0,6	6,9	10	5,6	0,001
Typpi	0,5	0,6	6,9	1	0,6	0,0001
Typpi	0,05	0,15	1,7	100	5,1	0,01
Typpi	0,05	0,15	1,7	10	0,5	0,001
Typpi	0,05	0,15	1,7	1	0,1	0,0002
Ilma	5	5,1	60,3	100	579,1	0,01
Ilma	5	5,1	60,3	10	57,9	0,001
Ilma	5	5,1	60,3	1	5,8	0,0001
Ilma	0,5	0,6	7,1	100	57,8	0,01
Ilma	0,5	0,6	7,1	10	5,8	0,001
Ilma	0,5	0,6	7,1	1	0,6	0,0001
Ilma	0,05	0,15	1,8	100	5,6	0,01
Ilma	0,05	0,15	1,8	10	0,6	0,001
Ilma	0,05	0,15	1,8	1	0,1	0,0002

## 5 Paineen mittausmenetelmät ja laitteet

Paineen primaarinormaalit ovat yleensä joko painevaakoja, joissa sovelletaan suoraan paineen määritelmää  $p = F / A$  antamalla tunnetun voiman vaikuttaa mäntä-sylinteriyhdistelmän tunnetulle pinta-alalle, tai nestepatsasmanometreja, joissa paine realisoidaan hydrostaattisen paineen avulla.

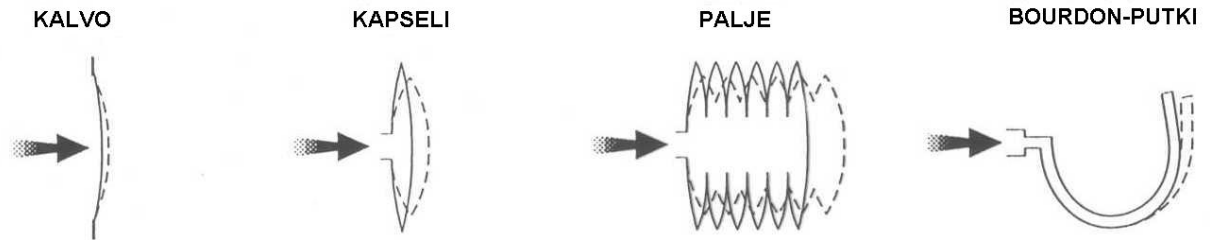
Suomessa paineen kansallisia mittanormaaleja ylläpitää Mittatekniikan keskus. Akkreditoituja paineen kalibrointilaboratorioita on tällä hetkellä viisi. Nämä kaikki laboratoriot käyttävät painevaakoja parhaina mittanormaaleinaan. Painevaakat ovat tarkkoja ja yleensä varmatoimisia mittauslaitteita. Painevaakoja käytettäessä rutiinimittausten automatisointi on kuitenkin vaikeaa.

Painekalibroinnin mittanormaaliksi kelpaa muukin laite kuin painevaaka eli periaatteessa mikä tahansa riittävän stabiiliksi todettu painemittari, jonka epävarmuus tunnetaan. Tarvittavan kalibrointivälineen tyyppi ja ominaisuudet riippuvat halutusta tarkkuustasosta. Muut kuin painevaaka-tyyppiset paineen mittauslaitteet käyttävät yleensä hyväksi elastista muodonmuutosta, joka syntyy mittarin tuntopäähän (esimerkiksi kalvo, rasia, palje tai bourdonkaari) paineen vaikutuksesta.



## Mekaaniseen muodonmuutokseen perustuvat mittarit

Mekaaniseen muodonmuutokseen perustuvat paineenmittauslaitteet toimivat siten, että paineen vaikuttaessa tuntopäähän, se liikkuu. Jotta mittauslaite olisi toimiva ja käyttökelpoinen, on liikkeen eli muodonmuutoksen oltava riittävän pieni, jotta se pysyy materiaalin ominaisuuksien puitteissa elastisella alueella. Toisaalta aiheutuvan muutoksen on oltava niin suuri, että se voidaan havaita riittävällä tavalla. Näistä lähtökohtaisista vaatimuksista johtuen ohuita, joustavia komponentteja käytetään matalille paineille tarkoitetuissa mittauslaitteissa. Paksumpia ja jäykempiä komponentteja tarvitaan laitteissa, joilla mitataan suuria paineita.



Kuva 4 [1]. Paine aiheuttaa muutoksen mittarin tuntopäähän.

Muutoksen eli tuntopäessä aiheutuvan siirtymän havaitsemiseksi on käytössä useita erilaisia tekniikoita mittauslaitteen tyypistä riippuen laidasta laitaan: paineesta riippuvan muodonmuutoksen muuntamiseen paineeksi voidaan käyttää mekaanista tai sähköistä vahvistusta tai hyödyntää vastuksen, kapasitanssin, värähtelytaajuuden tms. riippuvuutta muodonmuutoksesta. Hyvin pienten absoluuttipaineiden alueella, jossa paineen aiheuttamat muodonmuutokset ovat liian pieniä mitattavaksi, käytetään kaasujen ominaisuuksiin perustuvia epäsuoria menetelmiä.

## Painevaa'at

Painevaakojen käyttöalue alkaa noin 1 kPa:sta ja se ulottuu jopa GPa-alueelle eli yli 10 000 baariin.

Painevaa'an toimintaperiaate on suora sovellus paineen määritelmästä. Tasapainotilanteessa mäntä-sylinteriyhdistelmän teholliselle pinta-alalle kohdistuva paine vastaa punnusten ja männän painosta aiheutuvaa voimaa. Mittauksen aikana mäntä pyörii sylinterissä, jotta niiden välinen kitka olisi mahdollisimman pieni.

Perinteinen, ns. tavallinen painevaaka soveltuu huonosti pienten paineiden mittaamiseen. Ehdottoman alarajan paineelle asettaa männän oma paino. Käytännössä männän pyörittämistarve tekee mittaamisen hankalaksi jo silloin, kun kuormana on männän lisäksi vain pieniä punnuksia.

Painevaaka mittaa aina paine-eroa sylinterin päiden välillä. Ylipaineen mittaus ei siksi vaadi mitään erityisjärjestelyjä. Absoluuttipaineen mittaaminen on mahdollista peittämällä sylinterin toinen pää ja punnukset kuvulla, jonka sisälle pumpataan tunnetun suuruinen tyhjiö. Tyhjiö mitataan vaa'an sisäisellä tyhjiömittarilla tai erillisellä anturilla. Tyhjiön mittauksen epävarmuus täytyy huomioida kokonaisuvarmuudessa.

Primaarina mittanormaalina käytettävän painevaa'an männän halkaisija on niin suuri (35 mm-50 mm), että tehollinen pinta-ala voidaan määrittää geometrinen mittausten perusteella. Männän ja sylinterin dimensioiden mittaaminen on vaativa ja aikaa vievä tehtävä. Männän ja sylinterin halkaisijat, suoruudet ja ympyrämäisyydet mitataan kukin eri laitteella. Mitattavien kappaleiden kohdistaminen ja datajoukkojen yhdistäminen mäntä-sylinteriyhdistelmän tehollisen pinta-alan laskemiseksi on haasteellista.

Tavallisten painevaakojen tehollinen pinta-ala määritetään vertaamalla sitä tunnettuun painevaakaan ns. ristiinkellutusmenetelmällä, jossa molemmat painevaa'at saatetaan tasapainoon 5 - 10 eri nimellispaineella ja pinta-alojen suhde lasketaan.



Kuva 5. Painevaakojen ristiinkellutus. Painevaa'at on kytketty samaan paineverkkoon. Tasapainotus suoritetaan pienten säätöpunnusten avulla. Herkät painevaa'at reagoivat jo 10 milligramman muutokseen.

### Painevaa'an paineen laskentakaava

Painevaa'an paineen peruslaskentakaava on hyvin yksinkertainen. Tarkoissa mittauksissa on kuitenkin otettava huomioon useita mittaukseen vaikuttavia tekijöitä. Seuraavassa on käyty läpi laskentakaavan rakentuminen, kun eri tekijöitä otetaan mukaan kaavaan.

Peruskaava:

$$p = \frac{mg}{A} \quad (17)$$

missä

$p$	on paine
$m$	on painevaa'alla olevat massat
$g$	on putoamiskiihtyvyys
$A$	on painevaa'an tehollinen pinta-ala

Ilman noste vaikuttaa painevaa'alla oleviin punnuksiin. Se on otettava huomioon laskentakaavassa:

$$p = \frac{mg(1 - \frac{\rho_{ilma}}{\rho_{massat}})}{A} \quad (18)$$

missä

$\rho_{ilma}$  on ilman tiheys

$\rho_{massat}$  on painevaa'alla olevien punnusten tiheys (Laskennassa on huomioitava, että männällä, punnusten kannattimella ja punnuksilla on usein eri tiheys.)

Tehollinen pinta-ala  $A_{20C}$  on riippuvainen lämpötilasta. Vertailulämpötila on 20 °C. Mittauksen aikana lämpötila usein poikkeaa tästä ja siksi se on mitattava ja lämpötilaero on otettava huomioon laskentakaavassa:

$$p = \frac{mg(1 - \frac{\rho_{ilma}}{\rho_{massat}})}{A_{20C} [1 + 2\alpha(t - 20\text{ °C})]} \quad (19)$$

missä

$\alpha$  on materiaalin lämpötilakerroin

$t$  on lämpötila mittaushetkellä

Painevaa'an mäntä-sylinteriyhdistelmän materiaalien ominaisuuksien vuoksi tehollinen pinta-ala  $A$  riippuu myös paineesta, varsinkin jos paine on iso:

$$p = \frac{mg(1 - \frac{\rho_{ilma}}{\rho_{massat}})}{A_{0,20C} [1 + 2\alpha(t - 20\text{ °C})](1 + \lambda p)} \quad (20)$$

missä

$\lambda$  on paineriippuvuus-kerroin

Jos kyseessä on öljynpainevaaka (kuten isoilla paineilla usein on), öljyn pintajännitys on otettava huomioon:

$$p = \frac{mg(1 - \frac{\rho_{ilma}}{\rho_{massat}}) + \Gamma c}{A_{0,20C} [1 + 2\alpha(t - 20\text{ °C})](1 + \lambda p)} \quad (21)$$

missä

$\Gamma$  on pintajännitys

$c$  on männän ympärysmitta

Korkeuserokorjaus huomioidaan, kuten kappaleessa 4 on esitetty:

$$p = \frac{mg(1 - \frac{\rho_{ilma}}{\rho_{massat}}) + \Gamma c}{A_{0,20C} [1 + 2\alpha(t - 20\text{ °C})](1 + \lambda p)} - [h(\rho_{öljy} - \rho_{ilma})g] \quad (22)$$

missä

- $h$  on korkeusero  
 $\rho_{öljy}$  on väliaineena käytettävän öljyn tiheys  
 $\rho_{ilma}$  on ympäröivän ilman tiheys  
 $g$  on paikallinen putoamiskiihtyvyyys

Jos kyseessä on absoluuttipaineen mittaaminen, on kuvun alle pumpattu tunnetun suuruinen tyhjiö. Tämä kuvun alla oleva mäntään vaikuttava jäännös- eli referenssipaineen arvo on otettava huomioon. Lisäksi pitää muistaa, että ilman noste ei nyt vaikuta punnuksiin ja korkeuseron laskentatapa muuttuu, kuten kappaleessa 4 on esitetty:

$$p = \frac{mg}{A_{0,20C} [1 + 2\alpha(t - 20\text{ °C})](1 + \lambda p)} - (h\rho_{kaasu}g) + p_{ref} \quad (23)$$

missä

- $\rho_{kaasu}$  on väliaineena käytettävän kaasun tiheys tarkasteltavassa painepisteessä  
 $p_{ref}$  on jäännös- eli referenssipaine

## Mäntämanometri

Mäntämanometrin toimintaperiaate on samankaltainen kuin painevaa'an. Tässä ei kuitenkaan käytetä punnuksia vaan mäntään kohdistuva paine mitataan voima-anturin avulla; kun tehollinen pinta-ala tunnetaan, voidaan määrittää paine.

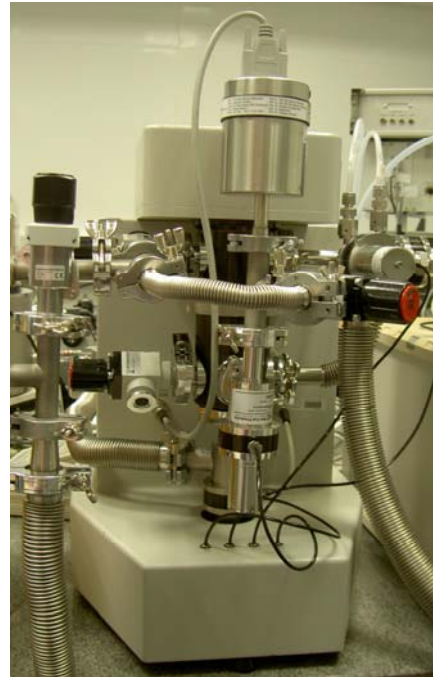
Mäntämanometrin etu tavalliseen painevaakaan verrattuna on se, että mittausalue alkaa periaatteessa nolasta, kun männän paino voidaan taarata pois. Suora absoluuttipaineen mittaaminen on mahdollista pumppaamalla tyhjiö sylinterin toiseen päähän.

Mäntä voi olla pyörivä, kuten perinteisessä painevaa'assakin. Jos pyöritystä ei ole, männän keskittäminen on yleensä hoidettu kaasuvirtauksen eli ns. voiteluvirtauksen avulla.

Pieniäkin ylipaineita on mahdollista mitata mäntämanometrillä. Mittaus on usein käytännössä haastava. Mittaustilaan on kiinnitettävä erityistä huomiota, sillä nopeat ilmanpaineen vaihtelut ja esimerkiksi ilmastoinnin mahdollisesti aiheuttama huojunta vaikuttavat mittaukseen.



Kuva 6. Mäntämanometri



Kuva 7. Nykyaikainen mäntämanometri yli- ja absoluuttipaineen mittaamiseen. Mäntä on yhdistetty voima-anturiin ripustusten avulla.

## Nestepatsaslaitteet

Nestepatsasmanometrien käyttöalue ulottuu muutamasta pascalista noin 1 megapascaliin eli noin 10 baariin. Nestepatsasmanometrin mittaama paine-ero on

$$p = (\rho - \rho_{ilma}) g_l h \quad (24)$$

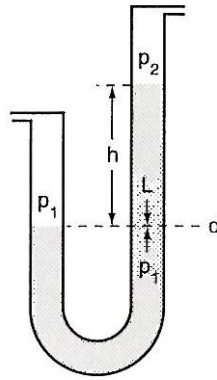
missä

$\rho$	on manometrin täyttönesteen tiheys
$\rho_{ilma}$	on ympäröivän ilman tiheys
$g_l$	on paikallinen putoamiskiihtyvyyys
$h$	on nestepintojen välinen pystysuora etäisyys

Mittauksissa on otettava huomioon, että täyttönesteen tiheys riippuu paineesta ja lämpötilasta.

Parhaissa barometrialueen nestepatsasmanometreissa nesteenä on elohopeaa, putkien halkaisija on suurempi kuin 6 cm, ja nestepintojen välinen etäisyys mitataan laserinterferometrillä tai ultraäänen avulla. Esimerkiksi NIST (National Institute of Standards and Technology) USA:ssa pääsee tällaisella laitteella 100 kPa:n paineella epävarmuuteen, joka on pienempi kuin 0,2 Pa (eli suhteellinen epävarmuus on alle 2 miljoonasosaa).

Nestepatsasmanometrit ovat hankalia käyttää. Ongelmia aiheuttavat mm. pintajännitys ja lämpötilan hallinta. Elohopean tiheys riippuu lämpötilan ohella myös paineesta. Pienempien paineiden nestepatsasmanometreissa käytetään keveämpiä nesteitä kuten silikoni- tai mineraaliöljyjä.



Kuva 8 [1]. Nestepatsasmanometrin toimintaperiaate. Tasolla  $d$  alaspäin vaikuttava paine syntyy tason  $d$  yläpuolella olevan nestepatsaan hydrostaattisesta paineesta plus nestepatsaan yläpuolella vaikuttavasta paineesta  $p_2$ . Tasapainotilanteessa vastakkaisella puolella vallitsee ylöspäin suuntautuva paine  $p_1$ . Jos paine jommallakummalla puolella muuttuu, liikkuu nestepatsas toisella puolella alaspäin ja toisella puolella ylöspäin, kunnes tasapainotila on jälleen saavutettu. Kun ylempi putki on yhteydessä vallitsevaan ilmanpaineeseen, eli  $p_2 =$  vallitseva ilmanpaine, on  $p_1$  ylipainetta. Jos  $p_2$  yhdistetään tyhjiöön, niin  $p_1$  on absoluuttista painetta ja laitteesta tulee barometri.

## Paineen korotus ja alennus

Mitattavan paineen tuottaminen on suhteellisen helppoa silloin, kun väliaineena on öljy. Pienellä pihtimallisella pumpulla saadaan aikaan jopa 20 MPa (200 bar) paine. Öljynpainevaakojen rungoissa on yleensä aina mukana karapumppu, jolla paineiden tuottaminen ja hienosäätö käy käsivoimin. Paineenkorotussylinterin avulla päästään jopa 500 MPa (5000 bar) paineeseen.

Kaasumaisen väliaineen (tavallisesti ilman tai typen) kanssa toimittaessa on painealueesta riippuen useitakin mahdollisuuksia. Pihtimallisella käsipumpulla päästään noin 2 MPa:n (20 bar) paineeseen. Pihtipumpussa on mukana hienosäätötilavuus ja tyhjennysventtiili. Myös kaasujen kanssa voidaan käyttää karapumppu-tyyppisiä säädettäviä tilavuuksia. Suurempiin paineisiin, käytännössä 18 MPa:iin (180 bar), päästään käyttämällä pullokaasua. Pullon paine on tietenkin rajoittava tekijä. Paineenalennusventtiilin lisäksi tarvitaan hienosäätömahdollisuus ja tyhjennysventtiili. Kaasupullostsa saatavaa painetta voidaan korottaa ns. booster-pumpun avulla jopa 80 MPa:iin (800 bar).

## 6 Paineenmittauslaitteiden kalibrointi

Kalibroimalla määritetään mittauslaitteen näyttämän ja mittanormalin välinen yhteys. Käytännössä esimerkiksi painelähtetimen kalibroinnissa voidaan määrittää syötetyn paineen ja ulostulosignaalin välinen yhteys. Kalibroimalla saadaan selville laitteen näyttämään liittyvä virhe, joko suoraan näyttölaitteen lukeman perusteella ja/tai

ulostulosignaalin perusteella. On huomioitavaa, että näiden kahden välillä voi samassa laitteessa olla pieni ero.

Painevaa'an kalibrointiin kuuluu yleensä mäntä-sylinteriyhdistelmän tehollisen pinta-alan määrittäminen ja männän ja punnusten massojen määrittäminen. Tehollinen pinta-ala määritetään tavallisimmin teholliselta pinta-alaltaan tunnettuun toiseen painevaakaan vertaamalla.

Painemittarin kalibroinnin tarkoituksena on usein laitteen käyttökunnon selvittäminen. Tällöin tuloksia usein verrataan painemittaristandardissa (SFS-EN 837-1, katso kappale 14, Standardit ja suositukset) tms. spesifikaatiossa esitettyihin vaatimuksiin. Vaatimukset voivat koskea esimerkiksi maksimivirhettä, hystereesiä tai lineaarisuutta, ja käytettävä kalibrointimenetelmä on valittava näiden suhteen asianmukaisesti siten, että tarvittavat ominaisuudet saadaan selville.

Painemittarin kalibroinnin tavoitteena on siis määrittää mittarin näyttämiin käytön aikana tehtävien korjausten (korjaus on virheen vastaluku) suuruudet tai selvittää, voidaanko mittaria käyttää sellaisenaan vai onko sitä viritettävä. Nämä tavoitteet voivat olla osin päällekkäisiäkin. Kummassakin tapauksessa keskeinen ja ratkaiseva tekijä on mittarin virhe, joka määritellään seuraavasti:

Mittarin virhe = Mittarin näyttämä paine - Mittanormaalin paine

Näin laskettujen virheen arvojen avulla korjataan mittarin näyttämiä käytön aikana. Laskettuun virheeseen liittyy aina epävarmuus.

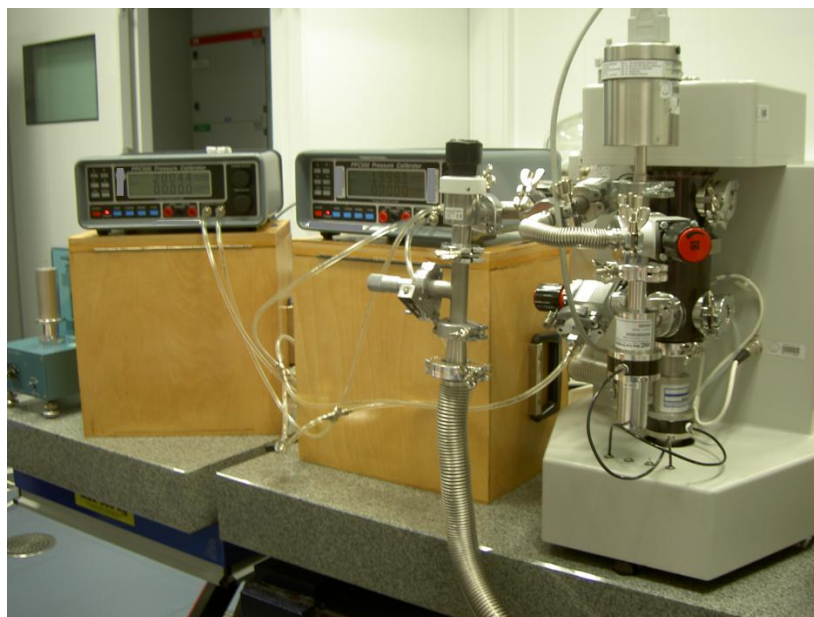
Kalibroimalla siis selvitetään mittausslaitteen virhe. Eli kalibrointi kertoo, kuinka paljon laite näyttää väärin. Tätä tietoa tarvitaan esimerkiksi laitteen toimintakunnon selvittämiseen, spesifikaationmukaisuuden selvittämiseen ja tarvittavien korjausten suuruuden määrittämiseen. **Korjaus on virheen vastaluku.**

Mittausslaitetta voidaan viritellä kalibroimalla saatujen tietojen perusteella. Viritys on erillinen toimenpide, joka voidaan suorittaa vasta kalibroinnin jälkeen. Viritäminen edellyttää yleensä uudelleenkalibrointia.

Kalibroinnin toteuttamiseksi kalibroitava painemittari ja mittanormaali kytketään samaan paineverkkoon, ja kalibroitavan laitteen näyttämää verrataan mittanormaalin näyttämään erisuuruisilla nimellisipaineilla.

Hyvä käytäntö on se, että mittanormaalin epävarmuus on enintään neljäsosa kalibroitavan laitteen odotetusta epävarmuudesta. Paineen kenttäkalibroinneissa käytettävät mittanormaalit (kalibraattorit) ovat useimmiten elektronisia laitteita, joissa paineen mittauksen lisäksi on tiedonkeru ominaisuuksia. Kalibraattorit puolestaan kalibroidaan yleensä laboratorio-oloissa käyttäen mittanormaaleina painevaakoja. Painevaa'assa mittaus palautuu paineen määritelmään (paine on voima jaettuna pinta-alalla).





Kuva 9. Paine-ero mittarit mittanormaalina käytettävän mäntämanometrin rinnalla valmiina kalibrointiin.

Kalibroitava mittari asennetaan käyttöasentoon (asentoon, jossa se normaalistikin käytössä on) mittanormaalnin lähelle ja mahdollisuuksien mukaan sen kanssa samalle korkeudelle, jotta korkeuserosta johtuva hydrostaattinen paine-ero ja näin ollen tarvittava korjaus olisi pieni. Järjestelmässä on oltava paineen hienosäätömahdollisuus ja tyhjennysventtiili.

Vastaventtiilejä (takaiskuventtiilejä), suodattimia tms. ei pitäisi asentaa laitteiden välille. Kun väliaineena käytetään nestettä, on kaasukuplat saatava pois järjestelmästä. Vastaavasti kaasua käytettäessä putkistoon ei saa jäädä nestettä (esim. öljytippoja).

Kalibroitavan laitteen lämpötilan annetaan tasaantua riittävän kauan, herkillä mittareilla laboratoriotason kalibroinneissa mieluiten aina yön yli. Ennen varsinaista mittausta kalibroitavaa laitetta yleensä kuormitetaan asteikon maksimiarvoa vastaavalla paineella 2 - 3 kertaa. Samalla varmistutaan liitosten pitävyydestä. Korkeaan paineeseen liittyvät turvallisuusriskit on hyvä pitää mielessä kalibrointeja tehtäessä. Putkiliitosten tai tiivisteiden pettäessä purkautuva nestesuihku tai kaasu voi olla vaarallinen. Erityisesti on huomioitava, että happimittareihin ei saa joutua öljyä (räjähdysvaara).

## Osoitinnäytöllä varustetut painemittarit

Osoitinnäytöllä eli viisarilla varustetut mekaaniset ns. bourdonkaaripainemittarit ovat yleensä standardin EN 837 mukaisia tyyppi hyväksytyjä tuotteita. Mittareita on useita tarkkuusluokkia, ja mittarin rakennetta, testausta ja sallittua virhettä ja hystereesiä koskevat vaatimukset riippuvat tarkkuusluokasta. Kalibroinnin epävarmuuslaskelmaa koskevia ohjeita ei sisälly standardiin EN 837.

Bourdonkaaripainemittarin kalibroinnin tarkoituksena on yleensä todeta, täyttääkö mittari siihen merkityn tarkkuusluokan vaatimukset. Jos vaatimukset eivät täyty, mittari



poistetaan käytöstä ja mahdollisesti viritetään uudelleen. Tämäntyyppisillä mittareilla ei yleensä käytetä kalibrointitodistuksen tietoja näyttämien korjaamiseen.

Kunkin tarkkuusluokan vaatimuksista keskeisin on sallitun virheen suuruus, joka on sidottu mittarin asteikon maksimiarvoon. Virhe on määritelty mittarin näyttämän paineen ja "oikean" paineen erotukseksi. "Oikeana" paineena pidetään mittanormaalina painetta, jonka epävarmuus saa olla enintään neljäsosa sallitun virheen suuruudesta.

Painemittarin näyttämää verrataan "oikeaan" paineeseen tarkkuusluokasta riippuen 4 - 10 pisteessä sekä paineen nousevassa että laskevassa suunnassa. Vaatimukset täyttävän mittarin virhe ei ylitä sallittua arvoa missään pisteessä. Myöskään laskevassa ja nousevassa suunnassa saatujen näyttämien erotus eli hystereesi ei saa ylittää sallitun virheen arvoa. Painemittaristandardi ei edellytä mittausten toistamista.

Sallituissa rajoissa pysymistä arvioitaessa on mittausepävarmuus otettava huomioon, ja kätevin on ilmoittaa epävarmuus lasketun virheen epävarmuutena. Nousevan suunnan ja laskevan suunnan tulosten epävarmuutta on tarkasteltava erikseen. Jos saman nimellispaineen kaikkia tuloksia käsitellään yhtenä joukkona, kasvaa hajontatermi hystereesin takia epärealistisen suureksi.

## Numeronäytöllä varustetut painemittarit

Numeronäyttöisen painemittarin kalibrointi on pitkälle samansuuntainen kuin osoitinmittarin kalibrointi. Nyt ei kuitenkaan ole kyse samassa määrin standardin mukaisista tyyppihyväksytyistä tuotteista. Toimintaperiaatteet niiden mittauselimissä voivat vaihdella, joten yhteen mittariin liittyviä kokemuksia ei voi suoraan siirtää toiseen. Sallitun virheen suuruus perustuu standardin sijasta valmistajan ilmoitukseen tms., tai sitä ei ole lainkaan esitetty.

Kun painemittari koostuu erillisestä paineanturista ja näyttölaitteesta, ne kalibroidaan yhdessä. Kalibroinnin aikana anturi tulee siis olla kytkettynä samaan näyttölaitteeseen, johon se normaalin käytön aikana on kytketty. Jos näyttölaitteella on useita kanavia, tulee varmistua siitä, että kalibroinnissa käytetään samaa kanavaa kuin muulloinkin on käytössä.

Painemittari voi olla myös paineanturi, johon ei liity erillistä eikä integroitua näyttölaitetta. Tällöin mitataan ulostulosignaalia, useimmiten jännitettä tai virtaa. Ulostulosignaalin perusteella lasketaan painelukema, jota verrataan mittanormaalina tuottamaan paineeseen. Ulostulosignaali voidaan mitata digitaalisella yleismittarilla, jonka resoluutio on riittävä. Huomioitavaa on, että myös yleismittarin tulee tällöin olla kalibroitu.

Jos paineanturiin liittyy näyttölaitte, mutta myös ulostulosignaalia on mahdollista lukea, tulee päättää, kumman perusteella kalibrointi tehdään. Kalibrointia tilatessa tämä tieto pitää ilmoittaa. Vastaavasti kalibroinnin toimittajan tulee tulosten yhteydessä selkeästi ilmoittaa, perustuvatko tulokset näyttämään vai ulostulosignaalista laskettuun painelukemaan. Näyttölaitteen näyttämällä ja ulostulosignaalista lasketulla paineella on usein pieni ero.

Numeronäyttöisen mittarin kalibroinnissa mittausten toistaminen on tärkeämpää kuin mekaanisen mittarin kalibroinnissa. Jos kalibroittavasta mittarista ei ole aikaisempia

kokemuksia, hyvänä käytäntönä voidaan pitää vähintään kahta mittaussykliä, joihin kumpaankin kuuluu sekä nousevaa että laskevaa painetta vastaavia pisteitä. Kalibroinnin tuloksena voidaan ilmoittaa tiettyjä mittarin näyttämiä vastaavat todelliset paineet tai mittarin virhe kussakin pisteessä. Virheen sijasta voidaan ilmoittaa korjaus. Tuloksena voidaan myös mitattuihin pisteisiin sovittaa suora tai korkeamman asteinen käyrä. Sovitusyhtälön perusteella lasketaan arvot pisteille, jotka eivät sisällyneet kalibrointiin (interpolointi ja ekstrapolointi). Ekstrapolointi ei yleensä ole suositeltavaa ja interpolointiinkin kannattaa suhtautua varauksella, sillä mittarin todellista käyttäytymistä kalibrointiin sisällyttämättömissä pisteissä ei voi arvata monimutkaisinkaan sovitussyhtälö. Mittausepävarmuutta tarkasteltaessa tulee muistaa, että sovituksellakin on epävarmuus.

## 7 Mittaustulos ja sen luotettavuus

Mittausepävarmuuden laskeminen on olennainen osa kalibrointia ja mittaustulosten jäljitettävyyttä. Mittausepävarmuus tulee aina ilmoittaa tulosten yhteydessä. Epävarmuuden laskentamenetelmät pohjautuvat nykyisin julkaisuun Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [4]. Sen julkaisi alun perin ISO (International Organization for Standardization) vuonna 1993. GUMin uusin versio on vuodelta 2008 (JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections), joka sisältää vain vähäisiä muutoksia alkuperäiseen. Julkaisu on saatavilla internetissä ([www.bipm.org](http://www.bipm.org) tai [www.oiml.org](http://www.oiml.org)).

Keskeisimmät painemittarin kalibroinnin epävarmuuteen vaikuttavat tekijät ovat:

- mittaustulosten hajonta
- kalibroitavan laitteen resoluutio
- mittanormalin epävarmuus
- korkeuserokorjaukseen liittyvä epävarmuus
- hystereesi

Kun osoitinnäytöllä varustettua mittaria kalibroidaan digitaalinäyttöisen kalibraattorin avulla, voidaan mittarin resoluutioon liittyvä epävarmuus pitää mahdollisimman pienenä käyttämällä paineita, joilla osoitin osuu täsmälleen asteikon viivalle niin, että interpolointia jakoviivojen välillä ei tarvita. Käytännössä tämä tapahtuu niin, että paine säädetään kalibroitavan mittarin perusteella siten, että viisari osuu täsmälleen halutulle asteikkoviivalle. Sen jälkeen mittanormalin näyttämä luetaan digitaaliselta näytöltä. Kalibroidun mittarin käytönaikaisessa epävarmuudessa pitää interpolointiepävarmuuden kuitenkin olla mukana. Tähän vaikuttaa hyvin suuresti käyttäjän kokemus. Karkeasti voidaan sanoa, että aloittelija kykenee tulkitsemaan viisarin asemasta vain sen, onko se kahden asteikkoviivan välissä täsmälleen viivojen puolivälissä vai lähempänä jompaakumpaa viivaa. Kokenut mittaaja jakaa saman välin sujuvasti kymmeneen osaan.

Lähes kaikille painemittarityypeille on ominaista hystereesi, joka liittyy niiden toimintaperiaatteeseen eli elastisen muodonmuutoksen muuntamiseen painelukemaksi. Hystereesi tarkoittaa tässä sitä, että paineen nousevassa suunnassa saadut virheen arvot poikkeavat laskevassa suunnassa saaduista arvoista. Hystereesistä johtuen myös kalibroinnin epävarmuuslaskelma on erilainen tutkittaessa

virheen mahtumista annettuihin rajoihin kuin määritettäessä mittarin käytön aikaista korjauskäyrää.

Kun prosessin painemittari tietyllä hetkellä näyttää jotakin lukemaa, ei yleensä tiedetä, onko paine nousemassa vai laskemassa. Tällaisen tilanteen varalle käyttäjä toivoo saavansa kalibrointitodistuksesta nousevan ja laskevan suunnan virheiden keskiarvon ja siihen liittyvän epävarmuuden. Hystereesi on otettava epävarmuuslaskelmissa huomioon. Jos tulosten hajonta lasketaan erottelematta nousevan ja laskevan suunnan arvoja, saadaan ehkä liian pessimistinen kuva tulosten hajonnasta. Toisinaan spesifikaationmukaisuutta tutkittaessa voidaan epävarmuus laskea erikseen nousevan ja laskevan suunnan virheille.

## Esimerkki 4

Kalibroidaan barometri eli vallitsevaa ilmanpainetta mittaava painemittari. Mittanormaalina käytetään laboratorion referenssibarometriä. Barometrin kalibrointi suoritetaan yleensä absoluuttipainealueella 950 hPa ... 1050 hPa viidessä pisteessä 25 hPa:n välein. Epävarmuusarvio tulee esittää tuloksen yhteydessä jokaisessa painepisteessä. Esimerkkilaskelma on tässä esitetty pisteelle 1000 hPa. Esimerkki noudattaa GUMin [4] periaatteita.

### Vaihe 1

Arvioidaan mittaustuloksiin vaikuttavien tekijöiden suuruusluokat ja tunnistetaan oleellisesti vaikuttavat tekijät.

Oletetaan, että mittaustulokseen vaikuttavat merkittävästi mittarien näyttämät, mittanormaalin kalibrointikorjaus, mittarien resoluutioiden rajallisuus ja kalibroitavan mittarin ja mittanormaalin välinen korkeusero.

*Huom:* Painemittarit kalibroidaan yleensä sekä nousevalla, että laskevalla paineella, jotta myös hystereesi saadaan selville. Hystereesi tulee ottaa huomioon epävarmuustekijänä. Sitä ei kuitenkaan käsitellä tässä esimerkissä.

### Vaihe 2

Määritetään mittaustapahtuman malliyhtälö:

$$E_x = p_x + \delta p_{R1} - (p_{ref} + \delta p_k) + \delta p_{R2} + \delta p_h \quad (25)$$

missä

$E_x$  on kalibroitavan mittarin virhe

$p_x$  on kalibroitavan mittarin näyttämä

$\delta p_{R1}$  on kalibroitavan mittarin resoluution rajallisuudesta aiheutuva epävarmuustekijä

$p_{ref}$  on mittanormaalien näyttämä

$\delta p_k$  on mittanormaalien kalibrointikorjaus

$\delta p_{R2}$  on mittanormaalien resoluution rajallisuudesta aiheutuva epävarmuustekijä

$\delta p_h$  on korkeuserokorjaus

### Vaihe 3

Arvioidaan kunkin tekijän standardiepävarmuus:

**$p_x$  ja  $p_{ref}$**

Mittaus toistettiin neljä kertaa. Mitatut lukemat on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Mitatut lukemat.

Mittauksen numero	Mittanormaanin näyttämä (hPa)	Kalibroitavan näyttämä (hPa)
1	1000,35	1001,5
2	1000,35	1001,4
3	1000,33	1001,5
4	1000,36	1001,3

Kalibroitavan mittarin näyttämien keskiarvo 1001,4 hPa on  $p_x$ .  
Mittanormaanin näyttämien keskiarvo 1000,35 hPa on  $p_{ref}$ .

Standardiepävarmuus saadaan laskemalla keskihajonta kaavalla [4]:

$$u(q) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} [(q_1 - q)^2 + \dots + (q_n - q)^2]} \quad (26)$$

missä

- $n$  on lukemien määrä  
 $q_1 \dots q_n$  on yksittäinen lukema  
 $q$  on kaikkien lukemien keskiarvo

Standardiepävarmuudeksi  $u(p_x)$  saadaan 0,10 hPa.  
Standardiepävarmuudeksi  $u(p_{ref})$  saadaan 0,01 hPa.

*Huom:* Standardiepävarmuuden laskeminen keskihajonnan kaavalla, eli tyypin A menetelmän käyttäminen, ei yleensä ole suositeltavaa, kun toistoja on vähän, ellei todennäköisyysjakaumasta ole jotain muuta tietoa käytettävissä [4]. Painemittausten epävarmuuslaskelmissa tätä tapaa voidaan kuitenkin usein käyttää [5].

#### $\delta p_{R1}$ ja $\delta p_{R2}$

Resoluutiotekijöitä ei voida korjata, joten tekijöiden  $\delta p_{R1}$  ja  $\delta p_{R2}$  arvot mittauksen tulosta laskettaessa ovat nollia. Rajalliset resoluutiot aiheuttavat kuitenkin epävarmuustekijän mittaukseen.

Kalibroitavan mittarin resoluutio on 0,1 hPa, joten mitattava arvo voi muuttua -0,05 hPa ... +0,05 hPa ilman vaikutusta mittarin lukemaan. Näin ollen tiedetään, että lukema on varmasti välillä  $(q - a) \dots (q + a)$  eli  $\pm a$ , missä  $q$  on näyttämien keskiarvo ja  $a$  on 0,05 hPa. Mittanormaanin resoluutio on 0,01 hPa ja sen näyttämä arvo voi muuttua vastaavalla tavalla -0,005 hPa ... +0,005 hPa ilman vaikutusta lukemaan.

Resoluution standardiepävarmuus lasketaan tasajakaumakaavalla [4]:

$$u(q) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

Standardiepävarmuudeksi  $u(\delta p_{R1})$  saadaan 0,03 hPa.  
Standardiepävarmuudeksi  $u(\delta p_{R2})$  saadaan 0,003 hPa.

### $\delta p_k$

Mittanormaanin kalibrointikorjaus saadaan kalibrointitodistuksesta, jolloin tässä esimerkissä oletetaan, että korjauksen  $\delta p_k$  arvo on 0,70 hPa ja sen epävarmuus 0,04 hPa. Epävarmuus on ilmoitettu laajennettuna epävarmuutena kattavuuskertoimella 2, normaalijakaumalla. Standardiepävarmuus saadaan jakamalla laajennettu epävarmuus kattavuuskertoimella.

Standardiepävarmuudeksi  $u(\delta p_k)$  saadaan 0,02 hPa.

### $\delta p_h$

Oletetaan, että kalibroitava mittari ja mittanormaali on asetettu samalle korkeudelle varmasti  $\pm 10$  cm sisälle. Kaavalla 9 laskemalla saadaan, että tämä tarkoittaa paineessa  $\pm 0,01$  Pa. (Katso korkeuserokorjauksen laskeminen kappaleesta 4.)

Resoluution standardiepävarmuus lasketaan tasajakaumakaavalla (27).  
Standardiepävarmuudeksi  $u(\delta p_h)$  saadaan 0,0001 hPa.

### Vaihe 4

Määritetään kunkin tekijän vaikutus kokonaisepävarmuuteen. Vaikutus kokonaisepävarmuuteen saadaan kertomalla yksittäisen mittaukseen vaikuttavan tekijän standardiepävarmuus herkkyyuskertoimella, joka kertoo, kuinka paljon lopullinen mittaustulos muuttuu, kun kyseisen tekijän arvo muuttuu. Herkkyyuskertoimen arvo määritetään kaavalla:

$$c_i = \frac{\partial R}{\partial q} \approx \frac{\Delta R}{\Delta q} \quad (28)$$

missä

$R$  on mittaustulos  
 $q$  on tulokseen vaikuttava tekijä

Herkkyyuskertoimen määrittäminen esimerkiksi tekijälle  $\delta p_k$  on siis

$$c_i = \frac{\partial R}{\partial q} \approx \frac{\Delta R}{\Delta q} = \frac{\Delta E_x}{\Delta \delta p_k} = \frac{E_x' - E_x}{u(\delta p_k)} \quad (29)$$

Sijoitetaan lukuarvot vaiheessa 2 esitettyyn malliyhtälöön:

$$E_x = 1001,43 \text{ hPa} + 0 \text{ hPa} - (1000,35 \text{ hPa} + 0,70 \text{ hPa}) + 0 \text{ hPa} + 0 \text{ hPa} = 0,38 \text{ hPa}$$

Muutetaan yhtälössä yhtä tekijää kerrallaan standardiepävarmuutensa verran.  
Esimerkiksi tekijälle  $\delta p_k$ :

$$E_x' = 1001,43 \text{ hPa} + 0 \text{ hPa} - (1000,35 \text{ hPa} + (0,70 \text{ hPa} + 0,02 \text{ hPa})) + 0 \text{ hPa} + 0 \text{ hPa} \\ = 0,36 \text{ hPa}$$

Sijoitetaan lukuarvot yhtälöön (29):

$$c_{\delta p_k} = \frac{0,36 \text{ hPa} - 0,38 \text{ hPa}}{0,02 \text{ hPa}} = -1$$

Herkkyyskerroin lasketaan vastaavalla tavalla jokaiselle malliyhtälössä mukana olevalle tekijälle.

### **Vaihe 5**

Arvioidaan, vaikuttavatko jotkin tekijät oleellisesti toisiinsa ja tarvittaessa määritetään korrelaatio.

Todetaan, että tässä esimerkissä tekijöiden välillä ei ole oleellista riippuvuutta.

### **Vaihe 6**

Lasketaan yhdistetty standardiepävarmuus kertomalla jokaisen tekijän standardiepävarmuus kyseisellä herkkyyskerroimella ja lasketaan näin saadut arvot neliöllisesti yhteen:

$$u(E_x) = \sqrt{[c_{p_x} u(p_x)]^2 + [c_{\delta p_{R1}} u(\delta p_{R1})]^2 + [c_{p_{ref}} u(p_{ref})]^2 + [c_{\delta p_k} u(\delta p_k)]^2 + [c_{\delta p_{R2}} u(\delta p_{R2})]^2 + [c_{\delta p_h} u(\delta p_h)]^2}$$

Lukuarvot sijoitettuna kaavaan:

$$u(E_x) = \sqrt{[1 \cdot 0,10 \text{ hPa}]^2 + [1 \cdot 0,03 \text{ hPa}]^2 + [-1 \cdot 0,01 \text{ hPa}]^2 + [-1 \cdot 0,02 \text{ hPa}]^2 + [1 \cdot 0,003 \text{ hPa}]^2 + [1 \cdot 0,0001 \text{ hPa}]^2}$$

$$u(E_x) = 0,10 \text{ hPa}$$

### **Vaihe 7**

Lasketaan laajennettu epävarmuus kertomalla standardiepävarmuus kattavuuskertoimen arvolla 2.

$$U(E_x) = 2 \cdot 0,10 \text{ hPa}$$

$$U(E_x) = 0,21 \text{ hPa}$$

### **Vaihe 8**

Lasketaan mittaustulos sijoittamalla lukuarvot malliyhtälöön (25):

$$E_x = 1001,43 \text{ hPa} + 0 \text{ hPa} - (1000,35 \text{ hPa} + 0,70 \text{ hPa}) + 0 \text{ hPa} + 0 \text{ hPa} = 0,38 \text{ hPa}$$

Mittaustuloksena ilmoitetaan kalibroivan mittarin virhe. Tuloksessa ilmoitetaan saman verran desimaaleja kuin mittarin resoluutiassa. Tulos pyöristetään normaalien pyöristyssääntöjen mukaan. Tuloksen yhteydessä ilmoitetaan aina epävarmuus. Epävarmuudelle saatiin lukuarvo *Vaiheessa 7*. Epävarmuus ilmoitetaan samalla määrällä desimaaleja kuin varsinainen tulos ja epävarmuuden arvo pyöristetään yleensä ylöspäin [4].

Lopullinen tulos mittauserpävarmuuksineen on: 0,4 hPa ± 0,3 hPa.

**Huom:**

*Vaiheessa 4* esitetyn herkkyyskertoimen laskennan voi halutessaan ohittaa syöttämällä yksitellen malliyhtälöön kullekin tekijälle standardiepävarmuuden suuruinen muutos. Näin saaduista malliyhtälön tuloksista vähennetään alkuperäinen tulos ja erotukset lasketaan neliöllisesti yhteen kuten *Vaiheessa 6*, mutta nyt siis ilman herkkyyskertoimella kertomista. Esimerkiksi tekijälle  $p_x$  (malliyhtälöllä, kaava 25):

$$E_x' = (1001,43 \text{ hPa} + 0,10 \text{ hPa}) + 0 \text{ hPa} - (1000,35 \text{ hPa} + 0,70 \text{ hPa}) + 0 \text{ hPa} + 0 \text{ hPa} \\ = 0,47 \text{ hPa}$$

$$E_x = 1001,43 \text{ hPa} + 0 \text{ hPa} - (1000,35 \text{ hPa} + 0,70 \text{ hPa}) + 0 \text{ hPa} + 0 \text{ hPa} = 0,38 \text{ hPa}$$

Erotukseksi saadaan siis 0,10 hPa. Jokainen malliyhtälössä oleva tekijä käsitellään samoin. Lopulta saadaan:

$$u(E_x) = \sqrt{[0,10 \text{ hPa}]^2 + [0,03 \text{ hPa}]^2 + [-0,01 \text{ hPa}]^2 + [-0,02 \text{ hPa}]^2 + [0,003 \text{ hPa}]^2} \\ + [0,0001 \text{ hPa}]^2$$

eli yhdistetty standardiepävarmuus on:

$$u(E_x) = 0,10 \text{ hPa}$$

ja siitä edelleen laajennettu epävarmuus ( $k = 2$ ):

$$U(E_x) = 2 \cdot 0,10 \text{ hPa}$$

$$U(E_x) = 0,21 \text{ hPa}$$

Lopullinen tulos mittauserpävarmuuksineen on: 0,4 hPa ± 0,3 hPa.

## 8 Kalibrointitodistus

Kalibrointitulokset esitetään yleensä kalibrointitodistuksessa. Kalibrointituloksen esitystapa voi vaihdella. Tulos voi sisältää pelkästään kalibroivan mittarin yksittäisiä näyttämiä vastaavat virheet tai korjaukset. Kalibroinnin tuloksena voi olla myös



laskentakaava eli sovitusyhtälö, jonka perusteella mikä tahansa kalibroitavan mittarin näyttämä muunnetaan ”oikeaksi”. Sovitusyhtälön käyttö kasvattaa kalibrointituloksen epävarmuutta, mutta on interpoloinnissa usein kätevä etenkin automaattisia laskentaohjelmia tai -taulukoita käytettäessä. Toisaalta mittarin käyttäjän pitää aina ottaa käytönaikaisessa epävarmuudessa huomioon laitteen epälineaarisuus. Sovitusyhtälöä käytettäessä se on jo kalibrointiepävarmuudessa mukana eikä käyttäjän tarvitse sitä enää erikseen lisätä.

Painelähettimen kalibroinnissa määritetään syötetyn paineen ja ulostulosignaalin välinen yhteys. Tulosten esitystavasta riippumatta mittausepävarmuus on ilmoitettava aina tulosten yhteydessä.

Painevaa'alle esitetään kalibrointitodistuksessa yleensä mäntä-sylinteriyhdistelmän tehollinen pinta-ala ja männän ja punnusten massat. Jos tarkkuusvaatimukset eivät ole kovin suuret, painevaa'an kalibroinnin tuloksena voidaan myös ilmoittaa pelkästään tiettyjä punnusyhdistelmiä vastaavat paineen arvot.

Painemittarin kalibroinnin tarkoituksena on usein laitteen käyttökunnon selvittäminen. Tällöin tuloksia usein verrataan painemittaristandardissa tms. spesifikaatiossa esitettyihin vaatimuksiin. Vaatimukset voivat koskea esimerkiksi maksimivirhettä, hystereesiä tai lineaarisuutta, ja käytettävä kalibrointimenetelmä on valittava näiden suhteen asianmukaisesti siten, että tarvittavat ominaisuudet saadaan selville.

Kalibroinnin tulos voidaan esittää myös spesifikaationmukaisuustodistuksena ilman varsinaisia numeroin ilmoitettuja tuloksia. Tällöin spesifikaatio määrittelee myös kalibrointituloksen epävarmuuden. Kalibrointiin liittyvät mittaustulokset epävarmuuslaskelmineen on kuitenkin säilytettävä ja vaadittaessa esitettävä.

## 9 Paineenmittauslaitteen valinta

Paineenmittauslaitteen valintaan kannattaa kiinnittää huomiota. Näin voidaan helpommin saavuttaa haluttu mittausepävarmuustaso, saada luotettavia tuloksia ja tehdä tarkoituksenmukaisia mittauksia, joita voidaan hyödyntää prosessinohjauksessa, laadunvalvonnassa ja päätöksenteossa.

Ensin selvitetään mitä ollaan mittaamassa ja miksi, mihin mittaustulosta käytetään ja minkälainen luotettavuustaso tarvitaan. Oleellista ei ole pyrkiä mahdollisimman pieneen epävarmuuteen vaan aina tarvittavaan tasoon. Tavoiteltavan mittausepävarmuustason valinta on aina tasapainoilua myös kustannusten suhteen: pyritään tekemään hallittu kompromissi mittauksista aiheutuvien kustannusten ja tulosten luotettavuustason välillä.

Mittauslaitteiden ylläpito (esim. kalibroinnit, stabiiliusseurannat ja huollot) vaatii sitä enemmän aikaa ja rahaa, mitä pienempään mittausepävarmuuteen pyritään. Toisaalta kohtuuttoman suuri epävarmuustaso kasvattaa kustannuksia väärin hylkäysten ja hyväksyntöjen kautta. Tällaisia ovat esimerkiksi yksittäisten komponenttien tai lopputuotteiden hyväksyminen tai hylkääminen, josta aiheutuu hävikkiä ja

yhteensopivuusongelmia kokoonpanovaiheessa, prosessiteollisuuden puolella väärät johtopäätökset, jotka johtavat vääriin säätöihin.

Ylläpito on pidettävä mielessä jo laitteen hankintavaiheessa. Kannattaa selvittää, onko laite kalibroitu ja mistä, millä hinnalla ja minkälaisella toimitusajalla kalibrointi on saatavilla.

Mittauslaitteen mittausalue tulee valita siten, että se sopii mahdollisimman hyvin mitattavaan kohteeseen. Mittausaluetta valitessa on huomioitavaa, että usein laite on parhaimmillaan mittausalueensa keskivaiheilla, mutta mittauskyky voi heiketä dramaattisestikin alueen ääripäitä lähestyttäessä. Usein tämä johtaa siihen, että yhdellä mittauslaitteella ei voida kattaa kovinkaan montaa erilaista mittauskohdetta vaan kullekin kohteelle on hankittava oma mittauslaite.

Mittauskohteen ympäristöolosuhteet voivat vaikuttaa mittauslaitteen suorituskykyyn ja elinkaareen. Mikäli käyttöolosuhteet ovat vaativat, on selvitettävä ainakin: mittauslaitteen lämpötilariippuvuus, kosteuden ja värinän sieto sekä mahdollisten sähköisten häiriöiden sieto. Mikäli mittauslaitetta aiotaan liikutella paikasta toiseen, kuljettaa ulkona ja käyttää kenttämittauksissa, tulee muistaa, että laboratoriotason laitteet eivät useinkaan sovellu tällaiseen.

## 10 Paineen mittauksessa huomioitavia asioita

Mittaustulokseen vaikuttaa aina useita tekijöitä ja siksi tulee muistaa, että mittauslaitteen kalibrointitodistuksessa ilmoitettu epävarmuus ei ole sama asia kuin sillä tehtävän mittauksen epävarmuus. Mittarin käytönaikaiseen epävarmuuteen ja mittaustuloksen epävarmuuteen vaikuttavat myös muut tekijät ja mittauslaitteen näyttämä/lukema on vain yksi niistä. Kaikkia tekijöitä ja niiden tarkkoja suuruuksia ei välttämättä tunneta, mutta ne pyritään aina arvioimaan parhaan ammattitaidon mukaisesti. Mittausepävarmuus ilmoitetaan aina tuloksen yhteydessä, sillä mittaustulos ilman käsitystä siihen liittyvästä epävarmuudesta on merkityksetön. Mittausepävarmuutta on käsitelty enemmän kohdassa 7, *Mittaustulos ja sen luotettavuus*.

### Painemittarin käytönaikaisia virhelähteitä

Painemittarin tai -lähettimen kalibrointi ja kalibroinnin yhteydessä todettu spesifikaationmukaisuus ei tietenkään yksin riitä takaamaan oikeaa mittaustulosta tai virheetöntä toimintaa prosessissa. Virheellisiä lukemia voivat aiheuttaa mm:

- putkien tukkeutuminen
- lämpötila poikkeaminen kalibrointilämpötilasta
- virtauksesta johtuva paineenmuutos
- hydrostaattinen paine
- paineiskut
- mekaaninen värinä
- virheellinen vertailupaine

- ajan mittaan tapahtuvat muutokset
- sähköiset häiriöt
- dynaamisen paineen mittaaminen mittarilla, joka on kalibroitu staattisesti
- mittaaja

## Painevaa'an käytönaikaisia virhelähteitä

Painevaaka on toimintaperiaatteeltaan yksinkertainen, toimintavarma ja tarkka mittaustilaite, mutta se ei varsinaisesti sovellu kenttäkäyttöön. Laboratoriossakin sen käyttöön liittyy muutamia virhemahdollisuuksia, joihin lankeamalla päädytään selvästi painevaa'an valmistajan lupaamien epävarmuusrajojen ulkopuolelle.

Esimerkkitapauksena käsitellään öljynpainevaakaa, jonka epävarmuudeksi valmistaja ilmoittaa 0,04 % ( $k = 2$ ) mitatusta paineen arvosta silloin, kun paine luetaan punnuksiin merkityistä painearvoista.

Valmistajan ilmoittama epävarmuus edellyttää, että painearvoon tehdään paikallisen putoamiskiihtyvyyden huomioon ottava korjaus. Oikean korjauksen tekemiseksi on tiedettävä, mille putoamiskiihtyvyyden arvolle vaa'an punnukset on valmistettu. Useimmiten painevaakojen punnukset vastaavat ns. normaalin  $g$ :n arvoa, eli  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ , mutta punnuksia on tehty myös paikallista  $g$ :n arvoa vastaavina. Eteläiselle Suomelle tyypillinen  $g$ :n arvo on noin  $9,82 \text{ m/s}^2$ . Ero normaalin  $g$ :n arvoon on noin 0,14 %. Tästä johtuen painevaa'an paineisiin on tehtävä tämänsuuruinen korjaus silloin, kun punnukset (punnusten painearvot) vastaavat normaalia  $g$ :tä.

Paikallisen putoamiskiihtyvyyden arvon saa selville Geodeettisen laitoksen puoleen kääntymällä.

Painevaa'an ja kalibroitavan mittarin välisestä korkeuserosta aiheutuu hydrostaattinen paine, jonka vaikutus on huomattava silloin, kun mitattava paine on pieni ja väliaineena on öljy tai vesi. Korkeuseron mittausepävarmuus on harvoin pienempi kuin 1 cm. Yhden cm vesipatsaan aiheuttama hydrostaattinen paine on noin 1 mbar. Jos mitattavan paineen suuruus on 2 bar, on korkeuseron mittausepävarmuudesta johtuva virhe 0,05 % eli jo yksinään enemmän kuin valmistajan ilmoittama painevaa'an epävarmuus.

Muutenkin painevaakojen käyttöön toiminta-alueen alarajoilla pitäisi suhtautua varoen. Painevaa'an herkkyys on siellä huonoimmillaan. Samoin männän pyörimissuunnan mahdollinen vaikutus on silloin suurin. Alan kirjallisuudessa esiintyvien tietojen mukaan kaikki vaakatyypit eivät sovellu tarkkoihin mittauksiin painealueella, joka on alle 10 % vaa'an maksimipaineesta.

## 11 Paine MIKESissä

Mittatekniikan keskus (MIKES) varmistaa kansainvälisesti hyväksytyt mittayksiköt ja pätevyyden arviointipalvelut elinkeinoelämän käyttöön. MIKESissä toteutetaan SI-mittayksikköjärjestelmä, tehdään korkeatasoista mittaustieteen tutkimusta sekä

kehitetään mittausten menetelmiä teollisuuden ja yhteiskunnan tarpeisiin. MIKES tarjoaa kalibrointi-, asiantuntija- ja koulutuspalveluita. MIKES-metrologia on tutkimuslaitos, jonka palveluja hyödynnetään laajasti teollisuudessa. Suomen tarkimmat mittaukset ja kalibroinnit tehdään Mittatekniikan keskuksen laboratorioissa. Lisätietoa MIKESin toiminnasta löytyy osoitteesta [www.mikes.fi](http://www.mikes.fi).

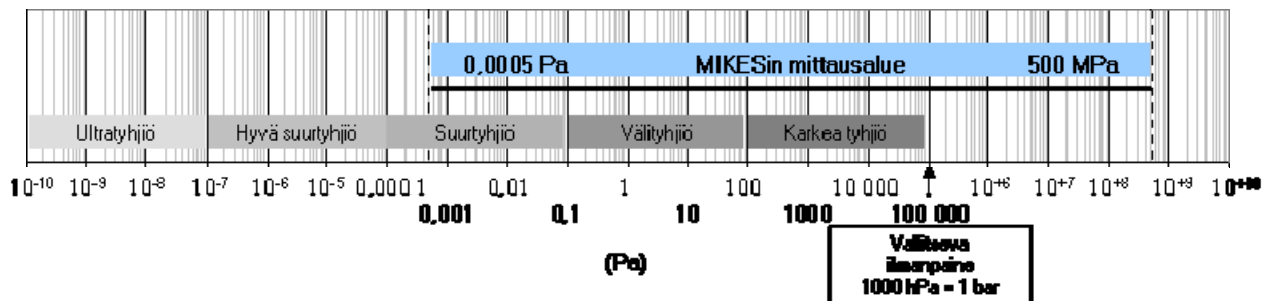
MIKESillä on hyvät valmiudet erilaisten paineen mittaustaitteiden kalibrointiin. Mittausalue on ylipainealueella 0 ... 500 MPa ja absoluuttipainealueella 0,0005 Pa ... 1,75 MPa.

MIKESin parhaat mittanormaalit ovat painevaakoja. Niitä käytetään yli- ja alipainealueen mittauksissa sekä absoluuttisen paineen mittauksissa. Painevaaka-alueen alapuolella käytetään mittanormaaleina kapasitiivisia antureita ja spinning rotor -mittaria. Spinning rotor -mittarilla kalibroidaan tyhjiöalueen kaikkein pienimmät paineet: 0,0005 Pa ... 2 Pa absoluuttista painetta.

Paineen mittausten menetelmät ja -laitteet vaihtelevat paine-alueesta riippuen. Esimerkiksi painevaaka-alueen mittauksissa laajalla toiminta-alueella tarvitaan useita erikokoisia mäntä-sylinteriyhdistelmiä, jotta punnusten määrä pysyisi helposti käsiteltävänä. Esimerkiksi painealueen 1 MPa männän halkaisija on noin 35 mm, mutta alueella 200 MPa ... 500 MPa käytettävän öljytätteisen painevaakan mäntä on lähes neulamainen, halkaisijaltaan vain noin 2 mm. Tällöin tarvitaan 100 kg punnuksia, jotta korkein paine, 500 MPa, voidaan saavuttaa.



Kuva 10. Painevaakojen mäntä-sylinteriyhdistelmiä.



Kuva 11. Painemittauksia tehdään hyvin laajalla alueella, esimerkiksi alkaen hiukkaskiihdytinkokeiden  $10^{-9}$  pascalista jauhemetallurgian yli  $10^9$  pascalin eli 1 GPa:n paineisiin. Mittauslaitteet ja niiden toimintaperiaatteet vaihtelevat suuresti mitattavasta painealueesta riippuen. MIKESin mittausalue 0,5 mPa ... 500 MPa on merkitty kuvaan vaaleansinisellä palkilla.

## 12 Loppusanat

Erilaisia paineen mittaamiseen tarkoitettuja laitteita ja erilaisia paineenmittaussovelluksia ja - tarpeita on lukemattomia erilaisia. Tämän vuoksi on tärkeää kiinnittää huomiota mittauslaitteen asianmukaiseen valintaan aina tapauskohtaisesti. On myös hyvä varmistua siitä, että samoista asioista puhutaan samoilla termeillä, olipa sitten kyseessä keskustelu asiakkaan, laitteen toimittajan tai työkaverin kanssa. Esimerkiksi kalibrointia tilattaessa tai toimitettaessa on tärkeää, että kumpikin osapuoli puhuu samoista asioista.

## 13 Kirjallisuutta ja lähteet

- [1] Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum. The Institute of Measurement and Control. London 1998. 77 s.
- [2] Lewis, S. ja Peggs, G. N.: The Pressure Balance. A Practical Guide to its use. National Physical Laboratory 1992. 82 s.
- [3] Tilford, C. R.: Pressure and Vacuum Measurements. 1992. 67 s.
- [4] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements. ISO, 1995.
- [5] Calibration Guide EURAMET/cg-03/v.01: Calibration of pressure balances. EURAMET TC-M 2011.
- [6] Dadson, R. S., Lewis, S. L. ja Peggs, G. N.: The pressure balance, theory and practice. NPL 1982. 290 s.
- [7] Pavese, F. ja Molinar G.: Modern Gas-Based Temperature and pressure measurements. 1992. 502 s.
- [8] Legras, J.-C.: La mesure des pressions statiques. 1986. 252 s.
- [9] Kansainvälinen metrologian sanasto (VIM). Perus- ja yleiskäsitteet sekä niihin liittyvät termit. SFS-OPAS 99: 2010.

## 14 Standardit ja suositukset

Paineen mittaukseen liittyviä standardeja ja suosituksia ovat mm.:

- SFS-EN 837-1 + AC. Pressure gauges. Part 1: Bourdon tube pressure gauges. Dimensions, metrology, requirements and testing.

- SFS 3880. Suureet ja yksiköt. Paine.
- PSK 3401. Kalibroinnin hankinta ja suorittaminen teollisuudessa. (Lausuntokierroksella, julkaistaan 2011 kesällä)
- OIML R 97. International Recommendation. Barometers.
- OIML R 110. International Recommendation. Pressure balances.
- ISO/TS 3567. Technical Specification. Vacuum gauges - Calibration by direct comparison with a reference gauge.

## 15 Hakemisto

- absoluuttinen paine; 6, 7, 21, 35  
 absoluuttipainemittaus; 8, 14  
 alipaine; 6, 7, 35  
 baari; 6  
 barometri; 7, 21, 27  
 bourdonkaaripainemittari; 23  
 CIPM MRA -sopimus; 5  
 epävarmuus; 15, 16, 20, 22, 24, 25, 26, 27, 31, 32, 33, 34  
 epävarmuuslaskelma; 23, 25, 26, 27, 32  
 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; 25  
 herkkyyskerroin; 27, 31  
 hydrostaattinen paine; 5, 8, 10, 15, 21, 23, 33, 34  
 hystereesi; 22, 23, 24, 25, 26, 27, 32  
 ilmakehä; 7, 8  
 ilmanpaine; 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 19, 21, 27  
 jäännöspaine; 14, 19  
 kalibrointi; 5, 7, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 32, 33, 35, 36, 40  
 kalibrointikorjaus; 27  
 kalibrointitodistus; 5, 24, 26, 27, 31, 32, 33  
 kalibrointitulos; 31, 32  
 kansallinen mittanormaali; 5, 15  
 kansallinen mittanormaallaboratorio; 5  
 kapasitiivinen anturi; 35  
 kitka; 16  
 kokonaisepävarmuus; 16, 27  
 korjaus; 10, 11, 22, 23, 25, 27, 31, 34  
 korkeuserokorjaus; 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 25, 27  
 korrelaatio; 27  
 lineaarisuus; 22, 32  
 linjapaine; 7  
 lukema; 9, 10, 11, 12, 21, 24, 25, 26, 27, 33  
 luotettavuustaso; 32  
 maksimivirhe; 22, 32  
 mittanormaali; 10, 11, 12, 15, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 35  
 mittanormaalin epävarmuus; 22, 25  
 mittari; 5, 7, 10, 11, 15, 16, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 31, 32, 33, 34, 35  
 mittarin virhe; 22, 24, 25, 27  
 mittausepävarmuus; 24, 25, 27, 31, 32, 33, 34  
 mittaustulosten hajonta; 25  
 mäntämanometri; 19, 20, 23  
 nestepatsaslaite; 20  
 nestepatsasmanometri; 15, 20, 21  
 nimellispaine; 17, 22, 24  
 numeronäyttö; 24  
 näyttämä; 21, 22, 24, 25, 27, 32, 33  
 osoitinnäyttö; 23, 25  
 painealue; 5, 21, 27, 34, 35  
 paineanturi; 5, 12, 24  
 paine-ero; 5, 6, 7, 9, 10, 12, 16, 20, 23  
 painekammio; 8  
 painelähetin; 5  
 painemittari; 5, 7, 15, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 32, 33  
 painemittaristandardi; 22, 24, 32  
 paineriippuvuus-kerroin; 18  
 painevaaka; 9, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 32, 34, 35  
 pascal; 6, 12, 20  
 pihtipumppu; 21  
 pintajännitys; 18, 20  
 prosessisuure; 5  
 putoamiskiihtyvyys; 8, 10, 11, 14, 15, 17, 19, 20, 34  
 referenssipaine; 14, 19  
 resoluutio; 24, 25, 27  
 resoluutiotekijä; 27  
 sallittu virhe; 23, 24  
 SI-järjestelmä; 6  
 SI-mittayksikköjärjestelmä; 34  
 sovitussyhtälö; 25, 32  
 spesifikaationmukaisuustodistus; 32  
 spinning rotor -mittari; 35  
 standardi EN 837; 22, 23, 36  
 standardiepävarmuus; 27, 31  
 tilanyhtälö; 11  
 tyhjiö; 6, 7, 14, 16, 19, 21  
 vaihtelualue; 5  
 vakuuimittari; 6, 7, 14  
 vastaventtiili; 23  
 vertailuarvo; 6, 7  
 virhe; 21, 22, 24, 25, 26, 27, 31, 34  
 virittäminen; 22  
 voima-anturi; 19, 20  
 väliaineen tiheys; 8, 12  
 yksikkö; 5, 6, 12, 34, 37  
 ylipaine; 6, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 35  
 ylläpito; 32, 33

## Viimeisimmät julkaisut

- J1/2008 M. Rantanen, S. Semenoja, A. Pitkäkoski, F. Goguel, *Barometric pressure comparisons between MIKES, Vaisala and LNE - Range 5 kPa to 130 kPa*
- J2/2008 T. Weckström, *Pt100-anturin vertailu: kalibrointi ja kertoimen laskeminen*
- J3/2008 S. Sillanpää, *Thermodynamic studies in flow metrology* (Doctoral dissertation)
- J4/2008 K. Riski, *Mass comparison: 6 g microbalance*
- J1/2009 M. Heinonen, J. Järvinen, A. Lassila, A. Manninen (Eds.), *Finnish National Standards Laboratories Biennial Report 2007-2008*
- J2/2009 P. Saarinen, L. Linko, J. Halttunen, K. Hartonen, E. Hiltunen, T. Hovinen, E. Järvenpää, S. Saxholm, S. Simonen, *Arkipäivän metrologiaa*
- J3/2009 A. Kempainen, *Tunnel junction devices for quantum metrology* (Doctoral dissertation)
- J4/2009 M. Rantanen, S. Saxholm, *Intercomparison in barometric pressure, Range 510 hPa to 1100 hPa*
- J5/2009 M. Rantanen, S. Saxholm, J. Leskinen, *Barometric comparison between MIKES and Vaisala*
- J6/2009 M. Rantanen, S. Saxholm, A. Altintas, G., Peterson, R. Pavis, *Negative gauge pressure comparison, Range from -95 kPa to + 95 kPa. EURAMET Project 1131*
- J1/2010 M. Rantanen, S. Saxholm, I. V. Sadkovskaya, A. I. Eikhvald, *Low pressure comparison between MIKES and VNIIM, Range 1 Pa to 1000 Pa absolute*
- J2/2010 S. Saxholm, B. Hemming, V-P. Esala, I. Palosuo, *Standardien hyödyntäminen teollisuuden mittauksissa, Loppuraportti*
- J3/2010 V. Ahtee, *Advanced Applications of Wavelength Tunable Lasers in Metrology and in Fundamental Physic* (Doctoral dissertation)
- J4/2010 M. Rantanen, S. Saxholm, *Intercomparison in gauge pressure 0-25 MPa*
- J1/2011 S. Saxholm, M. Rantanen, *Paineen mittaus*

Tilaukset: Kirsi Tuomisto, puh. 010 6054 436, e-mail [tilaukset@mikes.fi](mailto:tilaukset@mikes.fi).





- PL 9, Tekniikantie 1, 02151 ESPOO
- Puh. 010 6054 000 • Fax 010 6054 299
- [www.mikes.fi](http://www.mikes.fi)