

**UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO  
ODDELEK ZA FIZIKO  
FIZIKALNA MERILNA TEHNIKA**



**Ana Jerala**

**ANALIZA STABILNOSTI  
LETALIŠKIH BAROMETROV**

**Diplomsko delo**

**MENTOR: Jože Rakovec, univ. dipl. meteorol.  
DELOVNI MENTOR: Aleš Razpotnik, univ. dipl. inž.**

**Ljubljana, 2015**



## Izjava o avtorstvu in objavi elektronske oblike diplomskega dela

Podpisana Ana Jerala izjavljam:

- da je diplomsko delo z naslovom Analiza stabilnosti letaliških barometrov rezultat mojega samostojnega dela pod mentorstvom prof. dr. Jožeta Rakovca in somentorstvom g. Aleša Razpotnika,
- da je tiskani izvod dela identičen z elektronskim izvodom,
- da Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani dovoljujem objavo elektronske oblike svojega dela na spletnih straneh Repozitorija univerze v Ljubljani.

Ljubljana, 2015

Podpis:

Handwritten signature of Ana Jerala in black ink.



## **Zahvala**

Iskreno se zahvaljujem mentorju prof. dr. Jožetu Rakovcu in somentorju Alešu Razpotniku za njuno strokovno pomoč ter vodenje tekom pisanja diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi ostalim, ki so mi tako ali drugače pomagali in me podpirali pri izdelavi diplomske naloge ter v času študija.



## **Povzetek**

Atmosferski zračni tlak je posledica sile teže vsega zraka nad neko točko. Z nadmorsko višino se tlak zmanjšuje, saj se masa zraka nad to višino, ki povzroča silo teže, manjša. Povprečje zračnega tlaka na Zemlji pri morski gladini je 1013,25 mbar.

V letalski meteorologiji se za potrebe določanja višine letala podaja tlak na 0,1 mbar, kajti razlika 0,1 mbar pomeni približno 1 m višine. Zato je ključnega pomena, da pri meritvi tlaka na točki pristanka letala in v letalu samem ne pride do razlik, večjih kot je nujno za varen pristanek letala. To se zagotavlja z rednim vzdrževanjem barometrov, katerega bistveni del je kalibracija (umerjanje).

Negotovost meritve vsake merilne naprave se na začetku življenjske dobe relativno hitro spreminja, se z leti umiri in se proti koncu zopet poveča. Z raziskavo dolgotrajne stabilnosti barometrov na naših letališčih smo želeli preveriti ali lahko zaupamo zagotovilom proizvajalcev barometrov.

V analizo smo vzeli tri barometre: delovni etalon iz Umerjevalnega laboratorija na ARSO ter dva barometra, ki se uporabljata na slovenskih letališčih. Za čim natančnejše preverjanje stabilnosti omenjenih naprav smo naše podatke, ki smo jih dobili s kalibracijo združili s podatki kalibracij opravljenih v obdobju najmanj zadnjih petih let.

Rezultati teh večletnih kalibracij, ki so predstavljeni v tej diplomski nalogi, so pokazali, da je ocena stabilnosti merilnikov za zračni tlak, ki se jih uporablja na naših letališčih, v okviru stabilnosti, ki jo podajata proizvajalca – Vaisala in Setra.

## **Ključne besede:**

- zračni tlak
- barometri
- kalibracija
- dolgotrajna stabilnost





## **Abstract**

The atmospheric air pressure is caused by the weight of air above a force point. The pressure decreases with an altitude as the air mass above this altitude, which causes the force of the weight, is reduced. On the Earth the average air pressure at sea level is 1013,25 mbar.

In the aviation meteorology the pressure for the purpose of determining the height of the aircraft is given on very 0,1 mbar. Namely the difference of 0,1 mbar means approximately 1 m of height. Therefore it is crucial that in measuring of the pressure at the point of an aircraft landing and in the inside of an aircraft itself, does not come to disparities, bigger that it is necessary for the safe landing. This is ensured by regular maintenance of which the calibration is an essential part.

The uncertainty of the measurements of each measuring device is changed relatively rapid at the beginning of its lifetime. The measurement accuracy is stabilized over the years and it is increased again towards the end of the lifetime. With the research of a barometer long-term stability on our airports we want to check whether we can trust to the assurances of the barometer producers.

We took three different barometers in the analysis: a standard barometer from "Umerjevalni laboratorij" on ARSO and two barometers which are used on the airports. To verify the stability of these devices as precise as possible we combine our calibration data with the calibration data that were collected in a period of at least last five years.

The results of calibrations that were collected through the years are presented in this Bachelor thesis. They showed us that the evaluation of the stability of the air pressure instruments, which are used on our airports, is within the framework of stability that is given by the manufacturers – Vaisala and Setra.



**Keywords:**

- air pressure
- barometers
- calibration
- long-term stability

**PACS:**

- 06.20.fb
- 92.60.hv



## Kazalo

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>MERILNE NAPRAVE ZA ZRAČNI TLAK</b> .....	<b>18</b>
2.1	ŽIVOSREBRNI BAROMETRI .....	19
2.2	ANEROIDI .....	21
2.3	ELEKTRONSKI BAROMETRI .....	22
2.3.1	<i>Upornost</i> .....	22
2.3.2	<i>Kapacitivnost</i> .....	22
2.3.3	<i>Piezoelektričnost</i> .....	23
2.4	PRETVORNIKI TLAKA V SILO .....	24
<b>3</b>	<b>UMERJEVALNI LABORATORIJ AGENCIJE REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE – ARSO</b> .....	<b>26</b>
3.1	SPLOŠNO O ARSO .....	26
3.2	UMERJEVALNI LABORATORIJ .....	26
3.3	NAČELA DOBRE PRAKSE LABORATORIJA .....	27
3.3.1	<i>Kalibracija</i> .....	29
3.3.2	<i>Histereza</i> .....	34
3.3.3	<i>Sledljivost</i> .....	34
3.4	OPREMA UMERJEVALNEGA LABORATORIJA ZA ZRAČNI TLAK .....	36
<b>4</b>	<b>REFERENČNI ETALON ZA ZRAČNI TLAK</b> .....	<b>37</b>
4.1	POSTOPKI KALIBRACIJE IN UMERJANJA .....	39
4.2	KOLIČINE, UPOŠTEVANE PRI MERITVI Z DPG.....	43
4.3	NEGOTOVOST IN STABILNOST .....	46
4.3.1	<i>Negotovost</i> .....	46
4.3.2	<i>Stabilnost</i> .....	46
<b>5</b>	<b>MERILNIKI ZA TLAK IN MERILNE NAPRAVE V MERILNI MREŽI NA LETALIŠČIH</b> .....	<b>47</b>
5.1	UMERJANJE TREH MERILNIKOV ZA ZRAČNI TLAK .....	50
5.1.1	<i>Postopek obdelave rezultatov kalibracij</i> .....	51
5.1.2	<i>Rezultati odstopanj od idealnega tlaka</i> .....	53
5.2	PRIMERJAVA STABILNOSTI .....	61
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK</b> .....	<b>63</b>
	<b>LITERATURA</b> .....	<b>64</b>



# 1 Uvod

Tema diplomske naloge je umerjanje enega barometra in ugotoviti dolgotrajno stabilnost konkretnih barometrov za merjenje zračnega tlaka, ki se uporabljajo na naših letališčih.

Fizikalno količino, imenovano pritisk, dobimo iz razmerja med ploskovno porazdeljeno silo in površino ploskve, na katero ta sila deluje. Tlak v tekočinah, ki je skalar, pa na primer v zaprti posodi pod batom, na katerega deluje ta sila, določa velikost tega razmerja [1]. Tlak torej lahko vpeljemo kot razmerje med velikostjo (ploskovno porazdeljene) sile  $F$  in površino ploskve  $S$ , na katero ta sila deluje:

$$p = \frac{|\vec{F}|}{S}, \quad (1)$$

kjer je  $p$  tlak,  $\vec{F}$  sila in  $S$  površina, na katero deluje ta sila.

Včasih sta se enakovredno uporabljala oba izraza – zračni pritisk in zračni tlak. Potem so se predvsem zaradi potreb v tehniki strokovnjaki odločili, da pomena pritisk in tlak ločijo. Pritisk kot ploskovno porazdeljena sila je definiran kot fizikalna količina, ki ni določena samo z velikostjo, ampak tudi s smerjo – je vektor. Tlak pa je skalarna količina zato, ker je v mirujoči tekočini posledica neurejenega gibanja molekul plina ali kapljevine s hitrostmi, ki so glede smeri enakomerno porazdeljene. Torej ploskovno porazdeljeni sili na enoto ploskve rečemo pritisk, skalarju pa tlak.

Tlak ni ena od osnovnih fizikalnih količin, ampak je t.i. izpeljana fizikalna količina. Merska enota za tlak, ki jo določa Mednarodni sistem enot (SI - Systéme international d'unités) in standard SIST ISO 31-3, je paskal (Pascal), za oznako pa uporabljamo simbol Pa. Pascal je enak enemu Newtonu na kvadratni meter. Če ga izrazimo v osnovnih enotah, dobimo kilogram na kvadrat sekunde na meter

$$1\text{Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2\text{m}}. \quad (2)$$

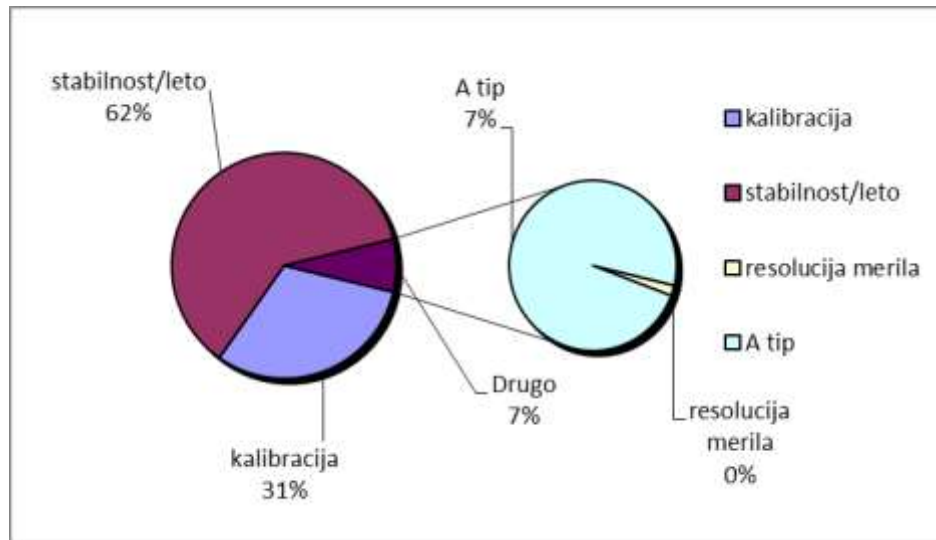
V diplomski nalogi se bom osredotočila na zračni tlak, ki je posledica sile teže vsega zraka nad lokacijo, v kateri ga obravnavamo, kajti Zemlja z gravitacijo in z vrtenjem povzroča silo teže. V meteorologiji je dovoljena in v uporabi tudi stokrat večja enota od Pa – milibar oziroma hektopaskal ( $100 \text{ Pa} = 1 \text{ hPa} = 1 \text{ mbar}$ ,  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ).

Povprečje zračnega tlaka na Zemlji pri morski gladini je 1013,25 mbar oziroma 1013,25 hPa. Z nadmorsko višino se tlak zmanjšuje, saj se masa zraka nad to višino in s tem tudi njena teža manjša. Če bi bila gostota zraka v atmosferi stalna, bi se tlak spreminjal približno linearno, ker pa gostota zraka z višino pada, se tlak zmanjšuje hitreje – približno eksponentno. Na gostoto vplivata tudi temperatura in nekoliko tudi vlažnost zraka. Čim hladnejši je zrak, tem gostejši je, nasprotno pa vlaga v zraku zmanjšuje gostoto [2], saj je vodna para lažja od mešanice plinov suhega dela zraka.

Za potrebe v meteorologiji se zračni tlak meri in podaja na 0,1 mbar, saj tlačne razlike 1 mbar na 100 km horizontalne razdalje poženejo veter reda velikosti 10 m/s. V letalski meteorologiji se za potrebe določanja višine letala tudi podaja tlak na 0,1 mbar natančno, kajti razlika 0,1 mbar pomeni približno 1 m višine. Zato je ključnega pomena, da pri meritvi višine določene preko tlaka, ne pride do napak, večjih kot je nujno za varen pristanek letala. To se zagotavlja z rednim vzdrževanjem barometrov, katerega bistveni del je kalibracija (umerjanje).

Negotovost meritve tlaka zajema poleg negotovosti odčitavanja še negotovost kalibracije in vsaj še oceno stabilnosti merilnega instrumenta v obdobju med dvema kalibracijama.





**Slika 1: Tipična razdelitev prispevkov negotovosti pri merjenju tlaka z barometrom Vaisala PTB220. A-tip negotovosti je del, ki se ga pridobi s statistično obdelavo. Je raztros rezultatov, ki se ga ovrednoti s standardno deviacijo srednje vrednosti.**

Na prvi pogled je iz slike 1, na kateri je graf narejen na podlagi podatkov proizvajalca Vaisala, razvidno, da je prispevek letne stabilnosti največji. Na velikost prispevka kalibracije glede na negotovost merilnika lahko uporabnik vpliva z zahtevo kalibracijskemu laboratoriju, da izvede kalibracijo z boljšo ali slabšo metodo.

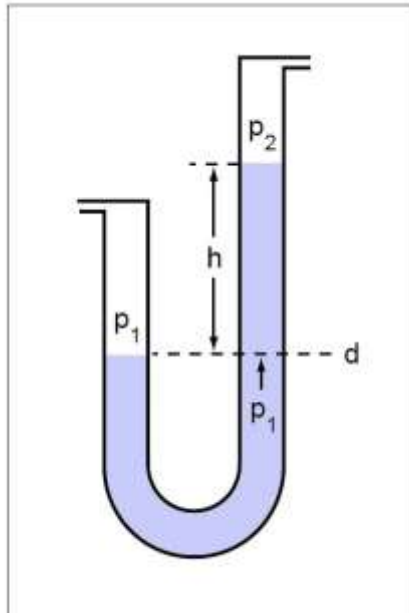
Tudi če se prispevek kalibracije merilnika minimizira in se s tem negotovost zmanjša za eno tretjino, še vedno v igri ostanejo ostali prispevki. Cena kalibracije z manjšanjem zahtevane negotovosti zelo hitro narašča. Za zmanjšanje negotovosti je torej smiselno analizirati največji prispevek in ugotoviti ali se ga da zmanjšati.

Letna stabilnost barometra je povzeta iz podatkov proizvajalca, ki na osnovi obširnih testiranj na velikem številu merilnih naprav enakega tipa določi vrednosti letnih stabilnosti. Pri podajanju teh vrednosti so še nekoliko konservativni, da se zaščitijo pred prevelikim številom reklamacij.

Upoštevati je treba tudi dejstvo, da se negotovost vsake merilne naprave na začetku življenjske dobe relativno hitro spreminja. To spreminjanje se z leti umiri in se proti koncu življenjske dobe zopet poveča. Torej se lahko upravičeno pričakuje, da je stabilnost barometrov v meteorološki mreži večinoma boljša, kot je prikazano v zgornjem primeru.

## 2 Merilne naprave za zračni tlak

Tlak merimo z merilno napravo, ki se na splošno imenuje manometer. Manometri, ki se uporabljajo za merjenje zračnega oziroma atmosferskega tlaka se imenujejo barometri.



**Slika 2:** Pri tekočinskem manometru primerjamo neznan tlak  $p_1$  z znanim tlakom  $p_2$  in prispevkom teže stolpca tekočine z gostoto  $\rho$  na ploskovno enoto  $p_1 = p_2 + \rho \cdot g \cdot h$

Prvi barometer z živim srebrom je naredil italijanski fizik in matematik Evangelista Torricelli v 17. stoletju [3] na podlagi eksperimentov sonarodnjaka Gaspara Bertija. Francoski matematik Blaise Pascal je postavil teorijo o padanju tlaka z nadmorsko višino in jo s meritvami tudi potrdil [4]. Po njem se tudi imenuje enota za tlak – pascal. Koncept barometra z imenom aneroid, ki pomeni "brez tekočine", saj spremembo tlaka za razliko od svojih predhodnikov zazna preko deformacije zaprte komore, je prvi predstavil nemški matematik Gottfried Wilhelm Leibniz okrog leta 1700. Prvi delujoči aneroid pa je naredil šele leta 1843 francoski znanstvenik Lucien Vidie [5].

Na področju merjenja zračnega tlaka se uporablja več merilnih principov barometra. To so:

- živosrebrni barometer
- aneroid
- elektronski barometer (piezoelektrični, kapacitivni...).

## 2.1 Živosrebrni barometri

Standardna naprava za merjenje zračnega tlaka je živosrebrni barometer, ki primerja težo stolpca živega srebra na eni strani vezne posode s težo stolpca vsega zraka od višine meritve do vrha ozračja na drugi strani posode. Zračni tlak (skalar) je enak teži zraka na ploskovno enoto (pritisku), zato lahko z izenačitvijo obeh določimo zračni tlak:

$$p = \rho_{Hg} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3)$$

Tu je  $p$  tlak,  $\rho_{Hg}$  gostota živega srebra,  $g$  težnostni pospešek in  $\Delta h$  razlika gladin živega srebra.

Najpreprostejši živosrebrni barometer je sestavljen iz približno meter (ali vsaj 84 cm) dolge steklene cevi, katere zgornji konec je zaprt, spodnji pa potopljen v posodico, napolnjeno z živim srebrom. Nad tekočino v zaprtem delu cevi je vakuum (oziroma zelo nizek nasičen parni tlak živega srebra). Višina živega srebra v cevi se ustali tako, da se sila teže stolpca živega srebra v cevi uravnoteži s silo teže zraka, ki pritiska na gladino živega srebra v posodici. Višji je zračni tlak, višje je živo srebro v cevi in obratno.

Zračnemu tlaku  $p$  ustreza  $\Delta h$  visok stolpec živega srebra. Vrednost zračnega tlaka je odvisna od vrednosti lokalnega težnostnega pospeška  $g$  in gostote živega srebra  $\rho_{Hg}$ , ki se spreminja s temperaturo  $\rho = \rho(T)$ , zato je v barometer vgrajen tudi termometer, katerega bučka sega v živo srebro barometra.

Standardnemu zračnemu tlaku  $p_0 = 1013,25$  hPa (to je povprečni zračni tlak na Zemlji na morskem nivoju na nadmorski višini 0 m) pri standardnem težnostnem pospešku  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> in temperaturi  $T_0 = 0$  °C, ko je gostota živega srebra  $\rho_{Hg} = 13,534$  kg/m<sup>3</sup>, ustreza višina stolpca izračunana v sledeči enačbi:

$$\Delta h = \frac{p}{\rho_{Hg} \cdot g} = 0,7632 \text{ m} = 763,2 \text{ mm} \quad (4)$$

Z izmerjeno vrednostjo  $\Delta h$  (s pomočjo nonija brez večjih težav merimo na 0,1 mm natančno) pa lahko dobimo tlak  $p$  tako, da višino stolpca  $\Delta h$  pomnožimo s težnostnim pospeškom  $g$  in

gostoto živega srebra  $\rho_{Hg}$ . Če natančno poznamo ti dve vrednosti, je meritev absolutna (ni potrebno nobeno dodatno umerjanje naprave).

Pri končnem rezultatu je poleg gostote živega srebra  $\rho_{Hg}$ , lokalne vrednosti težnostnega pospeška  $g$  in razlike gladin  $\Delta h$  treba upoštevati še temperaturo (vzdolž Hg stolpca, cevi in merilne letve) in z njo povezane raztezke (Hg, stekla, merilne letve, rezervoarja), kapilarni efekt in neenakomernost preseka steklene cevi.

Zaradi strupenosti živega srebra to vrsto barometrov po svetu umikajo iz uporabe; v nekaterih državah so že prepovedani.

Prednosti živosrebrnih barometrov:

- živo srebro je tekoče v širokem temperaturnem razponu (zmrzišče  $-38.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vrelišče  $+356.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- živo srebro je kemično stabilno
- meritev je (ob poznanih pogojih) absolutna.

Slabosti živosrebrnih barometrov:

- živo srebro je zelo strupeno
- velika občutljivost na temperaturo
- primerni samo za laboratorijsko uporabo (občutljiv na temperaturo, nagib, potrebujejo človeško prisotnost za pravilno delovanje)
- težaven transport (prevoz z letalom je prepovedan, ker živo srebro korodira z aluminijem); v primeru napake pri transportu lahko kalibracija postane neveljavna
- omejena resolucija (760 mm)
- kvalitete vakuuma se ne da ovrednotiti
- ne da se nastaviti ničelne točke (predpostavka, da je vakuum v cevi nad živim srebrom 0, je meroslovno nekorektna (skozi steklo barometra sčasoma prehaja zrak in tlak nad živim srebrom z leti raste, izmeriti pa ga ni mogoče); pojavijo se težave pri merjenju tlaka npr. v gorah)
- odčitano višino stolpca je potrebno korigirati zaradi vpliva temperature in težnosti.

## 2.2 Aneroidi

Aneroidi so robustni merilni instrumenti z relativno veliko negotovostjo, zato se uporabljajo le v barografih (barometri, ki grafično zapisujejo časovni potek zračnega tlaka) in altimetrih (višinomeri – instrumenti, ki kažejo trenutno nadmorsko višino).

Sestavljeni so iz majhne bolj ali manj upogljive zaprte kovinske komore, v kateri je stalna količina plina, in vzmeti v njej. Sprememba zračnega tlaka povzroči raztezanje oziroma krčenje komore. Tlak plina v notranjosti in nameščena vzmet poskrbita, da so temperaturno pogojene deformacije sten posode čim manjše, saj jih delno kompenzirata. Premik vzmeti se prek vzvoda prenaša na kazalec, ki kaže trenutni tlak.



Slika 3: Aneroid

Ker aneroid – za razliko od živosrebrnega barometra – ni absolutni instrument, se karakteristike posameznega instrumenta določi s kalibriranjem. (Enako moramo narediti z elektronskimi barometri.)

Prednosti aneroidov:

- robustnost
- prenašanje naokoli.

Slabosti aneroidov:

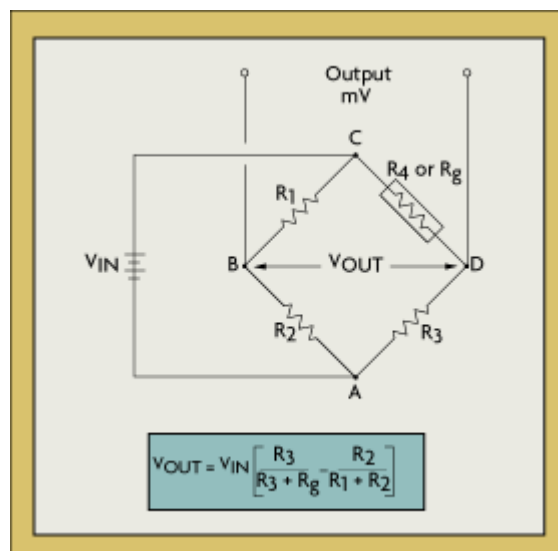
- velika negotovost.

## 2.3 Elektronski barometri

S spreminjanjem tlaka se pri elektronskih barometrih spreminjajo nekatere električne lastnosti materialov, največkrat upornost, kapacitivnost ali piezoelektričnost.

### 2.3.1 Upornost

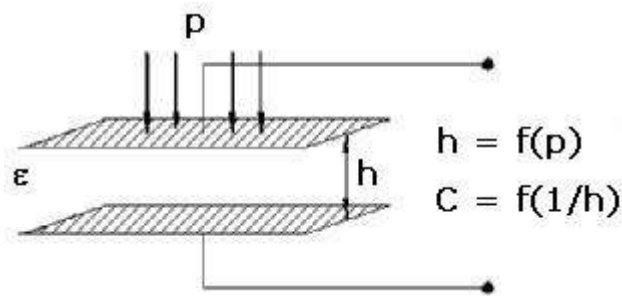
Uporovni senzorji delujejo na način pretvorbe posledic mehanske sile v električni signal. Zaradi sile tlaka  $p$  pride do mehanske deformacije materiala, s tem pa do spremembe preseka električnega vodnika ter posledično do spremembe njegove upornosti  $R$ . Spremembo upora, ki je sorazmerna s silo tlaka  $R = R(p)$ , merijo štiri upori povezani v tokokrog (Wheatstonov mostiček). [6]



Slika 4: Shema tokokroga (Wheatstonov mostiček)

### 2.3.2 Kapacitivnost

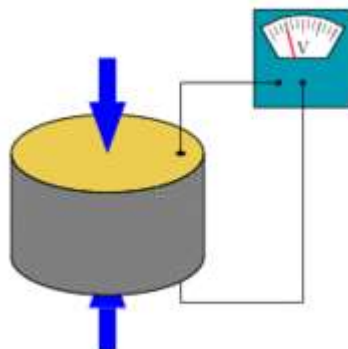
Pri kapacitivnih senzorjih sila zaradi tlaka  $p$ , ki deluje na ploščo kondenzatorja, spremeni razdaljo  $h$  med elektrodama, s tem pa kapaciteto  $C$  kondenzatorja. Sprememba kapacitete ni nujno vedno linearna glede na spremembo tlaka,  $C = f(1/h)$ . [7]



Slika 5: Shema sile tlaka na plošči kondenzatorja

### 2.3.3 Piezoelektričnost

Pri piezoelektričnih senzorjih mehanska obremenitev, ki je posledica sile zaradi tlaka, na piezoelektričnem materialu povzroči spremembo posameznih dipolnih momentov v tem materialu in s tem porazdelitev nabojev na stenah tega materiala. Zaradi spremembe nastalega električnega polja se inducira električna napetost. [8]



Slika 6: Sila tlaka na piezoelektriku

Prednosti elektronskih barometrov:

- visoka resolucija odčitka
- direktno odčitavanje, npr. električne napetosti
- hiter odziv.

Slabosti elektronskih barometrov:

- nelinearnost
- slabša dolgotrajna stabilnost
- občutljivost na preobremenitev.



**Slika 7: Elektronski barometer proizvajalca Ruska**

Zaradi razvoja elektronskih barometrov so njihove pomanjkljivosti v delovanju vedno manjše, zato po kvaliteti že prekašajo živosrebrne, pri katerih v razvoju ni več napredka. Način odčitavanja elektronskih barometrov, ki je ponekod že avtomatiziran, bistveno zmanjšuje subjektivne prispevke negotovosti, ki so zaradi resolucije bistveno manjši kot pri živosrebrnih. Poleg tega je transport elektronskih barometrov veliko enostavnejši, saj pri živosrebrnih lahko povzroči dodatne napake v delovanju. Zato so postali v mreži avtomatskih meteoroloških postaj elektronski barometri nepogrešljivi.

## **2.4 Pretvorniki tlaka v silo**

Pri vseh treh opisanih tipih električnih barometrov (upornih, kapacitivnih, piezoelektričnih) je vzrok za spremembe teh lastnosti sila, ki jo moramo natančno poznati. Pretvorniki tlaka v silo (in obratno) zato spadajo, tako kot živosrebrni barometri, med definicijske instrumente za tlak. To pomeni, da se njihovo delovanje lahko razloži neposredno. Pri pretvornikih ne merimo tlaka, pač pa silo, ki jo povzroča tlak preko sklopa bat/cilinder, kar bo opisano pozneje.

Negotovosti, dosežene s takimi instrumenti, so zelo majhne. Z njimi je moč meriti sile na enoto ploskve in s tem zračni tlak; npr. 1000 hPa z negotovostjo manjšo od 0,05 hPa. Zato se jih uporablja za referenčne etalone.

Prednosti pretvornikov:

- zelo majhna negotovost
- robustnost.



Slabosti pretvornikov:

- zamudno delovanje
- cena.

## **3 Umerjevalni laboratorij Agencije Republike Slovenije za okolje – ARSO**

### **3.1 Splošno o ARSO**

ARSO, Agencija Republike Slovenije za okolje, spada pod okrilje Ministrstva za okolje in prostor Republike Slovenije.

Poglavitne naloge agencije so opazovanje, analiziranje in napovedovanje naravnih pojavov ter procesov v okolju in s tem zmanjševanje naravne ogroženosti ljudi in njihovega premoženja, spremljanje stanja okolja, ohranjanje naravnih virov ter biotske raznovrstnosti. Pomembno je tudi poročanje domači in mednarodni javnosti ter ozaveščanje ljudi o okolju in okoljski problematiki. [9]

Da bi lahko delo na agenciji potekalo strokovno ter učinkovito, je le-ta razdeljena na več uradov glede na vrsto, obseg in povezanost nalog:

- Urad za meteorologijo
- Urad za hidrologijo in stanje okolja
- Urad za varstvo okolja in narave
- Urad za seizmologijo in geologijo
- Urad za upravljanje z vodami
- Urad za splošne zadeve

### **3.2 Umerjevalni laboratorij**

Urad za hidrologijo in stanje okolja skrbi za kakovost zraka in voda ter za vzdrževanje in razvoj merilnih mrež. Pod njihovo okrilje spada tudi Oddelek umerjevalnega laboratorija, ki je namenjen umerjanju različnih merilnih instrumentov za potrebe meteorologije, hidrologije ter kvalitete zraka in vode v mreži merilnih postaj in opazovalnic Agencije RS za okolje in za potrebe slovenskih letališč.

Umerjevalni laboratorij izvaja merilne postopke v skladu z zakonodajo, standardi, predpisi in priporočili. To so predvsem 'Zakon o varstvu okolja' in priporočila mednarodnih organizacij kot sta Svetovna meteorološka organizacija in Mednarodna organizacija za civilni letalski promet. Zato je bila ključnega pomena vzpostavitev sistema kakovosti na področju zagotavljanja tehničnih zmožnosti, kakovosti in mednarodne primerljivosti podatkov.

Laboratorij ima akreditacijo, ki predstavlja dokazljivo usposobljenost za izvajanje kalibracij z negotovostmi, deklariranimi v Prilogi k akreditacijski listini LK-006<sup>1</sup>, pridobljeno za sledeča področja:

- umerjanje merilnika temperature
- umerjanje merilnika zračnega tlaka
- umerjanje merilnika za kakovost zraka
- umerjanje merilnika relativne vlažnosti zraka.

Akreditacija in vzdrževanje etalonske baze Umerjevalnemu laboratoriju omogočata zagotavljanje sledljivosti rezultatov kalibracije do nacionalnega oziroma mednarodnega nivoja.

### **3.3 Načela dobre prakse laboratorija**

Laboratorij pri svojem delovanju upošteva glavne principe meroslovja:

- sledljivost
- ocena in podajanje merilne negotovosti
- prostori in okolje
- nabava
- nadzor, obvladovanje in dokumentiranje vseh področij (poleg tehničnih še osebje in izobraževanje, odnosi s strankami...)

Med temi principi je pri kalibraciji najpomembnejša sledljivost, ugotavljajo in preverjajo pa se tudi histereza, negotovost in stabilnost (glej poglavje 4.3).

---

<sup>1</sup> <http://www.slo-akreditacija.si/lk000/media/lk006.pdf>

EA-4/07 - Traceability of Measuring and Test Equipment to National Standards	EA <sup>2</sup>
ILAC_G2_1994 Traceability of Measurements	ILAC <sup>3</sup>
Guide to the expression of uncertainty in measurement ISO, 1995	ISO <sup>4</sup>
ISO/IEC 17025	ISO
A13 Merilna negotovost	SA <sup>5</sup>
Delovno gradivo SA A11: Laboratoriji splošne zahteve za akreditacijo	SA
OA05 - SODELOVANJE V MEDLABORATORIJSKIH PRIMERJAVAH	SA
OA12 - OBVLADOVANJE OPREME	SA
RvA-T30 - Interlaboratory Comparisons	RvA <sup>6</sup>
EAL-G12 Z TRACEABILITY OF MEASUREMENT	EAL <sup>7</sup>
OIML G 1-100 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement	OIML <sup>8</sup>
OIML G 1-104 Evaluation of measurement data – An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents	OIML

**Tabela 1: V levem stolpcu je napisanih nekaj najpomembnejših dokumentov zunanjega izvora, na katerih temelji delovanje Umerjevalnega laboratorija na ARSO; v desnem stolpcu so kratice organizacij, ki so izdale te dokumente.**

<sup>2</sup> European cooperation for Accreditation

<sup>3</sup> International Laboratory Accreditation Cooperation

<sup>4</sup> International Organization for Standardization

<sup>5</sup> Slovenska Akreditacija

<sup>6</sup> Raad voor Accreditatie

<sup>7</sup> European cooperation for Accreditation of Laboratories

<sup>8</sup> Organisation Internationale de Métrologie Légale

### 3.3.1 Kalibracija

Stabilnost neke naprave lahko preverimo samo s preverjanjem delovanja te naprave skozi več let. Prvi korak je redno izvajanje kalibracij.

Kalibracija je niz operacij za ugotavljanje povezave med vrednostmi, ki jih kaže merilni instrument ali merilni sistem, in dejanskimi vrednostmi merjene veličine [10]. Gre torej za določanje korekcije kakega merilnega instrumenta s pomočjo primerjave z dobrimi etaloni.

Kalibracijske točke so vrednosti tlaka, pri katerih se izvaja umerjanje. Na tej podlagi se ovrednoti korekcija, linearnost, ponovljivost ter histereza umerjenega instrumenta. Izbira kalibracijskih točk je odvisna od deklarirane točnosti umerjenega instrumenta.

Pojem kalibracije se pogosto zamenjuje s pojmom naravnavanja. V osnovi gre za dva različna procesa. Kot rečeno, gre pri kalibraciji za določanje korekcije, pri naravnavanju pa gre za spreminjanje kazanja merilnika tako, da je korekcija čim manjša.

Kalibracija merilnikov za zračni tlak se izvaja pri naraščajočem in padajočem tlaku. Celoten postopek se ponovi trikrat, število merjenih vrednosti in njihov razpored pa je lahko poljuben.

Med kalibracijo je pomembno spremljanje okoliške temperature in tlaka s senzorji, ki stojijo čim bližje merilniku. Pogoji okolja v laboratoriju morajo biti za temperaturo v območju  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ter za vlažnost med 30 % in 70 %.

Za vsako posamezno vrednost ("točko" kalibracije) se zajame po deset odčitkov etalona in umerjenega merilnika.

Za vsako kalibracijsko točko posebej se izračuna povprečno korekcijo merjenca:

$$K_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} (S_j - X_j)}{n} \quad (5)$$

$K_i$	korekcija umerjenega merilnika v i-ti kalibracijski točki
$S_j$	odčitek na referenčnem instrumentu – etalonu (že korigiran glede na razne vplive)
$X_j$	odčitek na umerjenem merilniku (že korigiran glede na razne vplive)
$n$	število odčitkov v eni kalibracijski točki (10)

Če umerjenega merilnika ni možno odčitavati avtomatsko, se v vsaki točki naredi samo dva odčitka in sicer pred odčitavanjem etalona in po njem (pri kalibraciji barografov pa celo samo en odčitek); seveda pazimo, da je tlak stabilen. Kriterij za stabilnost je razlika med največjim in najmanjšim odčitkom od desetih pri eni kalibracijski točki. Ta razlika mora biti za zračni tlak pri tleh manjša od 7 Pa (=0,07 mbar). Ponavljanje odčitkov zajame zelo majhen praktično linearen premik tlaka. Tak način se uporablja pri kalibraciji v tlačni komori, kjer stabilizacija tlaka traja dalj časa. [11] V tem primeru se korekcijo umerjenega merilnika izračuna z enačbo:

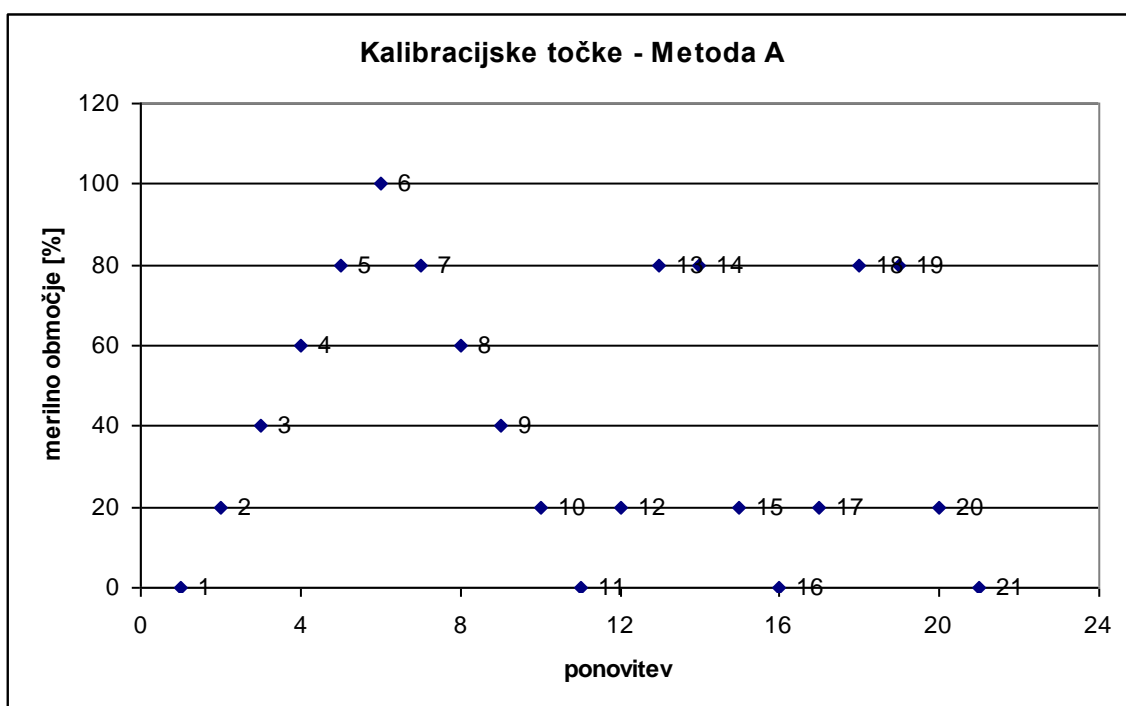
$$K_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} S_j}{n} - \frac{\sum_{k=1}^{k=2} X_k}{k} \quad (6)$$

$K_i$	korekcija umerjenega merilnika v i-ti kalibracijski točki
$S_j$	odčitek na referenčnem instrumentu – etalonu (že korigiran glede na razne vplive)
$X_k$	odčitek na umerjenem merilniku (že korigiran glede na razne vplive)
$n$	število odčitkov na etalonu v eni kalibracijski točki (10)
$k$	število odčitkov na umerjenem merilniku v eni kalibracijski točki (2 oziroma samo 1 pri barografih)

Glede na negotovost merjenja ali zahteve stranke se določi interval med posameznimi tlaki in pri katerih tlakih se kalibracijo ponavlja. Na izbiro je ena od treh metod.

## Metoda A

Uporablja se pri merilnikih z negotovostjo, ki je večja od 1 % celotnega merilnega območja. Za barometer znamke Vaisala, katerega območje je povečini med 500 in 1100 hPa, bi to pomenilo negotovost večjo od 6 hPa, za barometer znamke Setra z območjem od 900 do 1100 hPa pa negotovost nad 2 hPa. Merjeni tlak izračunamo po enačbi  $p = p_{\min} + a \cdot (p_{\max} - p_{\min})$ , kjer črka a označuje odstotek merilnega območja. Pri metodi A v merilnem območju izmerimo 21 kalibracijskih točk.

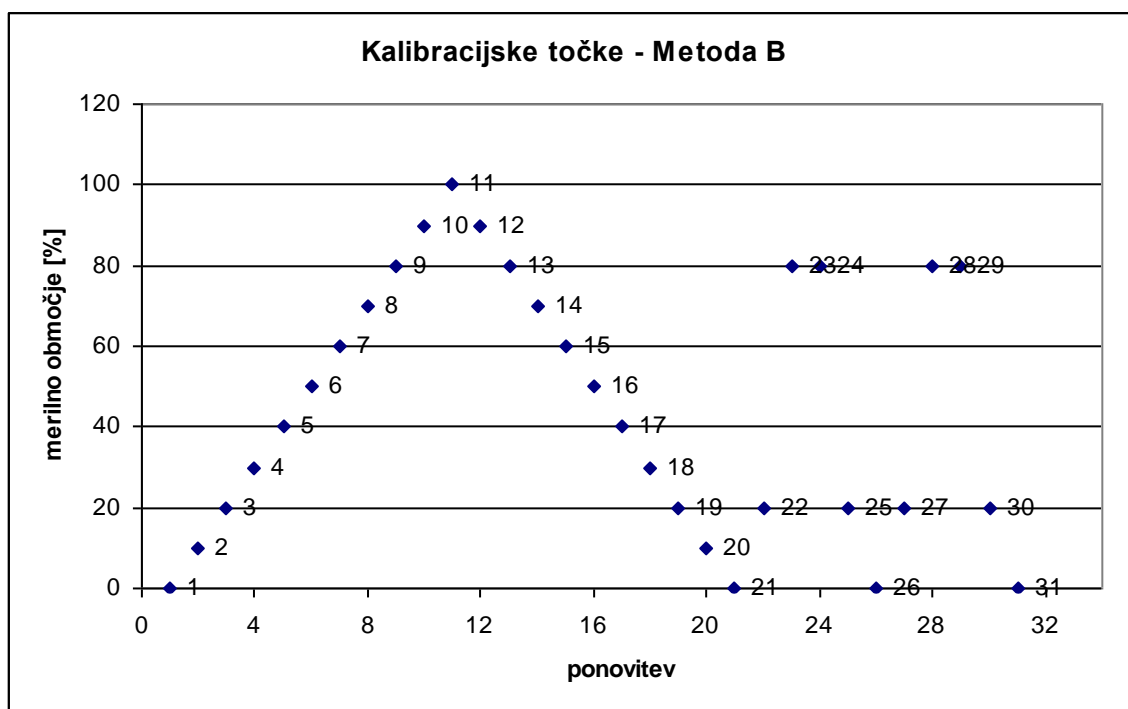


Graf 1: Kalibracijske točke pri metodi A

Pri metodi A se v certifikat napiše deset korekcij (primer:  $K_{20 \text{ nar}} = \frac{K_2 + K_{12} + K_{17}}{3}$ ). Histerezo se izračuna samo pri 20 % in 80 % celotnega merilnega območja. [11]

## Metoda B

Uporablja se pri merilnikih z manjšo negotovostjo - med 0,1 % in 1 % merilnega območja. Za barometer Vaisala je to negotovost med 0,6 in 6 hPa, za barometer Setra pa med 0,2 ter 2 hPa. Kalibracija se naredi pri 31 kalibracijskih točkah.



Graf 2: Kalibracijske točke pri metodi B

Pri metodi B se izračuna dvajset korekcij, ki se jih zapiše v certifikat (primer:

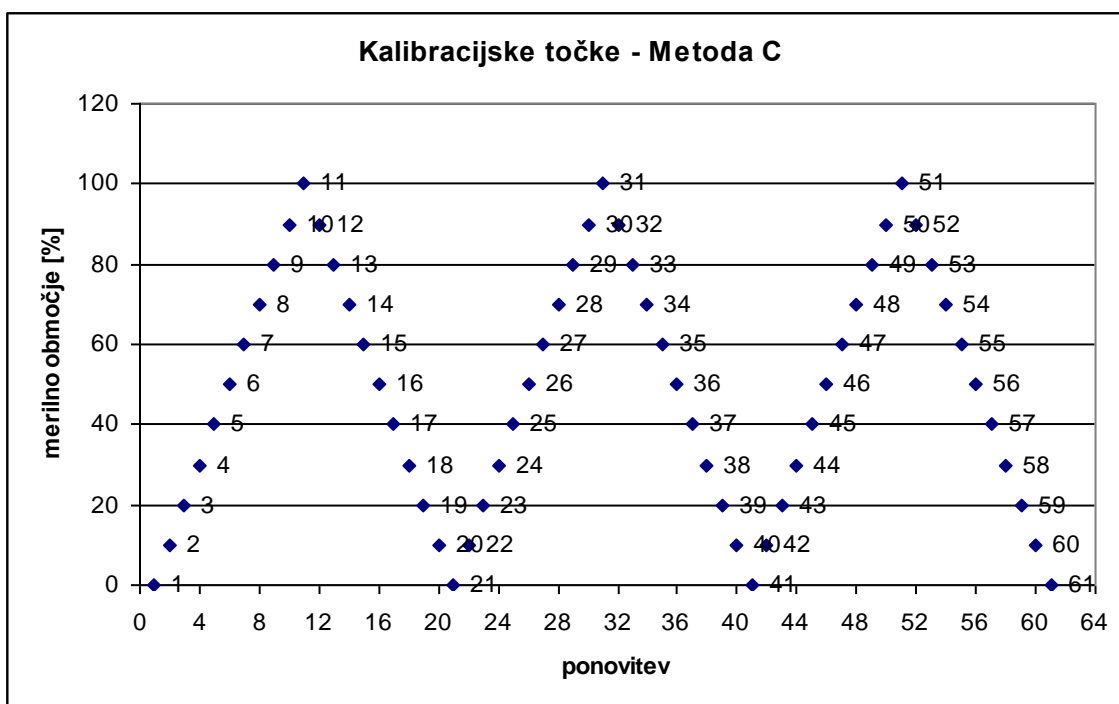
$$K_0 = \frac{K_1 + K_{21} + K_{26} + K_{31}}{4}).$$

Histereza se računa tako kot pri metodi A pri 20 % in 80 % celotnega merilnega območja. [11]



## Metoda C

Uporablja se pri merilnikih z negotovostjo manjšo od 0,1 % celotnega merilnega območja. Za barometer Vaisala to pomeni negotovost manjšo od 0,6 hPa, za barometer Setra pa manjšo od 0,2 hPa. Merilno območje obsega 61 kalibracijskih točk: pri 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 ter 10 % celotnega merilnega območja. To ponovimo trikrat, tako da skupaj opravimo 61 ponovitev.



Graf 3: Kalibracijske točke pri metodi C

Pri tej metodi je v certifikatu podanih dvajset korekcij, ki se jih izračuna za vsak odstotek merilnega območja umerjenega merilnika pri naraščajočem in padajočem tlaku (primer:

$$K_{40 \text{ pad}} = \frac{K_{17} + K_{37} + K_{57}}{3}).$$

Histerezo se izračuna pri vseh merilnih točkah, razen pri najvišjem tlaku ne. [11]

### 3.3.2 Histereza

Histereza umerjenega merilnika je razlika med odčitkom na merjencu pri padajočem tlaku in med odčitkom na merjencu pri rastočem tlaku. Histerezo merjenca se v razširjeni merilni negotovosti upošteva kot prispevek negotovosti merjenca in se jo izračuna kot prikazuje enačba:

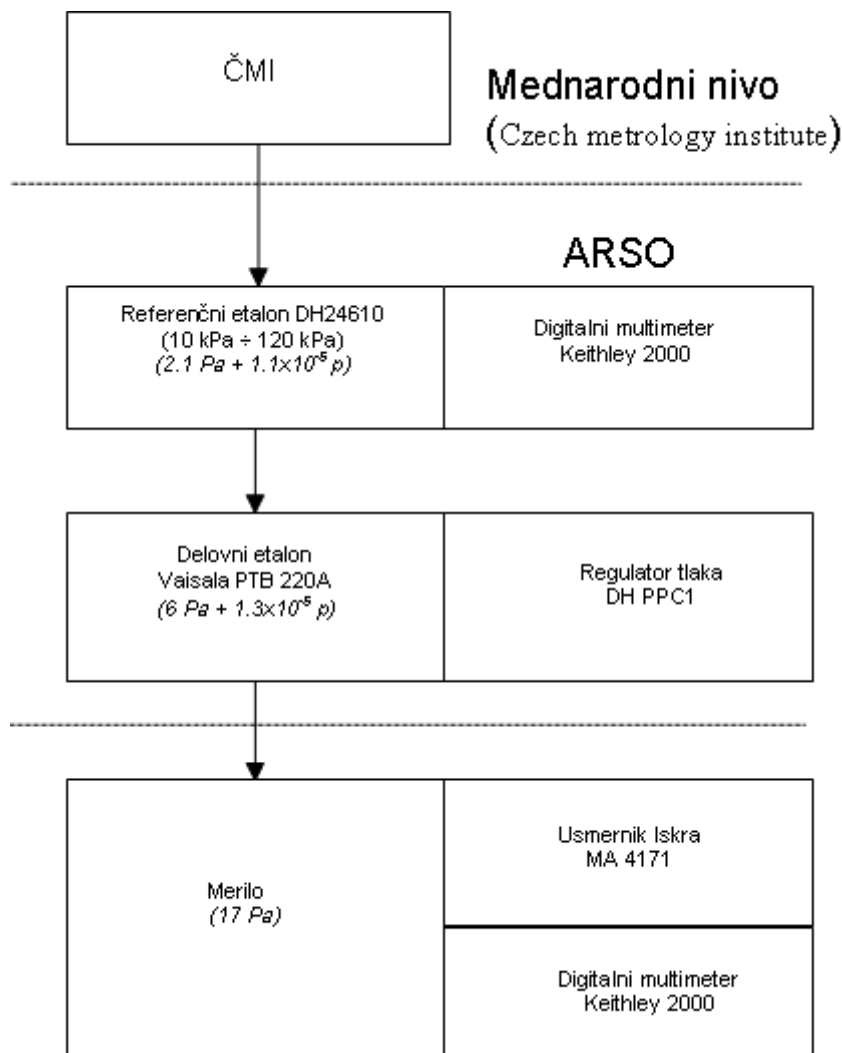
$$h_i = \frac{(K_{id} - K_{ig})}{2} \quad (7)$$

V enačbi je i indeks, ki pomeni odstotek merilnega območja merjenca, g indeks, ki pomeni potek merjenja pri naraščajočem tlaku in d indeks, ki pomeni potek merjenja pri padajočem tlaku. [11]

### 3.3.3 Sledljivost

Sledljivost je lastnost merilnega rezultata ali vrednosti etalona, ki omogoča navezavo na realizacijo SI enot skozi neprekinjeno verigo primerjav, ki imajo dobro opredeljeno negotovost. [10]

V Umerjevalnem laboratoriju ima vsa oprema, ki se uporablja pri kalibracijah (referenčni in delovni etaloni ter naprave za meritev pogojev okolice), zagotovljeno sledljivost na mednarodnem nivoju.



**Slika 8: Shema sledljivosti za zračni tlak: na levi strani slike je prikazana sledljivost naprav od merila do določenega meroslovnega inštituta, na desni strani so napisane naprave, ki se poleg naprav na levi strani uporabljajo pri sami kalibraciji (vrednosti v oklepajih so vrednosti, ki so rezultat analize merilne negotovosti, ki jo laboratorij dosega z dano opremo in navezavo na mednarodni nivo).**

Pri merjenju tlaka poljubnega barometra (na sliki 8 kot merilo), ki je prinesen na ARSO na kalibracijo, se kot delovni etalon uporablja Vaisala PTB220A, kot referenčni etalon pa merilni instrument DH 24610 proizvajalca Desgranges et Huot, ki je na 2 leti kalibriran v akreditiranem laboratoriju v Češkem meroslovnem inštitutu, kar pomeni, da je sledljivost na mednarodnem nivoju zagotovljena.

### **3.4 Oprema umerjevalnega laboratorija za zračni tlak**

Laboratorij ima za zračni tlak etalone in pomožno opremo.

Etaloni:

- merilnik tlaka z utežmi (DH 24610)
- digitalni barometer (Vaisala PTB 220)
- digitalni multimeter (Keithley 2000)

Pomožna oprema:

- regulator tlaka (DH PPC1)
- vakuumska črpalka (Leybold)
- usmernik (Iskra MA4171)
- merilnik temperature in relativne vlažnosti zraka (Vaisala HMP233)

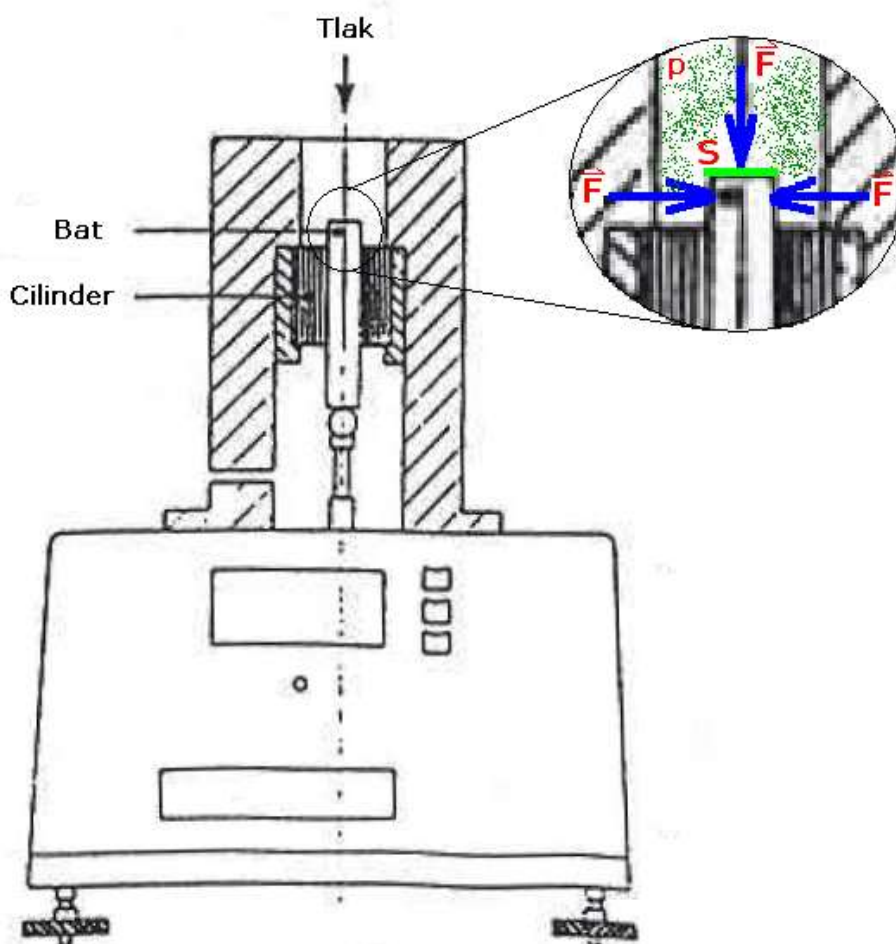
## 4 Referenčni etalon za zračni tlak

Referenčni etalon je etalon, na splošno največje meroslovne kakovosti, ki je na voljo na danem kraju ali v dani organizaciji in je osnova za merjenje na tem mestu [10]. Povedano drugače: z referenčnimi etaloni se zagotavlja sledljivost merjenih veličin na mednarodni nivo.

V Umerjevalnem laboratoriju za tlak na ARSO se za referenčni etalon uporablja merilni instrument DPG »Digital Pressure Standard 24610« proizvajalca »Desgranges&Huot«, ki deluje na principu pretvorbe tlaka v silo.

Sestavljajo ga trije osnovni sklopi:

- komplet šestih uteži po 1 kg
- dinamometer
- merilna glava z batom in cilindrom.



Slika 9: Delovanje dinamometra: tlak  $p$  na bat z znanim presekom  $S$  povzroča silo  $F = pS$ .

Merilna glava pretvarja tlak v silo, ki jo meri dinamometer. Da dobimo rezultanto sil enako nič, deluje v dinamometru za ravnotežje sili tlaka na bat sila, ki povzroči tok, katerega meri dinamometer. Sile in s tem tlake se s pomočjo uteži skalibrira in določi njihovo linearnost.

Bat in cilinder z znanim presekom, ki sta jedro merilne glave, se zelo tesno prilegata (2-4 $\mu$ m), zato je negotovost pretvorbe tlaka v silo zmanjšana na minimum. Zaradi tesnega prileganja mora biti prostor znotraj dinamometra brez nečistoč in vlage. Prašni delci in kondenz lahko povzročijo trenje med batom in cilindrom. Kot medij se uporablja dušik čistosti 99,999%. Zaradi tesnega prileganja med batom in cilindrom pogosto že majhna vsebnost nečistoč ovira vrtenje bata skoraj brez trenja v cilindru, zato je pred vsako uporabo to potrebno preveriti in po potrebi sklop očistiti. Pri delu s tekočino za čiščenje bata in cilindra je potrebna uporaba gumijastih rokavic. Pri sušenju, sestavljanju, montaži in demontaži merilne glave ter pri kalibraciji in kontroli dinamometra z utežmi pa se uporabljajo tekstilne rokavice, da se prepreči prenos nečistoč z rok na dele naprav.

Dinamometer ima v krajšem časovnem obdobju zelo majhen odmik ničle ter spremembo linearnosti. Po več kot enem tednu pa se ta dva parametra občutno spremenita. Takrat je potrebno dinamometer ponovno umeriti: cilinder z batom se zamenja s sklopom, na katerega se postopoma nalaga šest kilogramskih uteži.

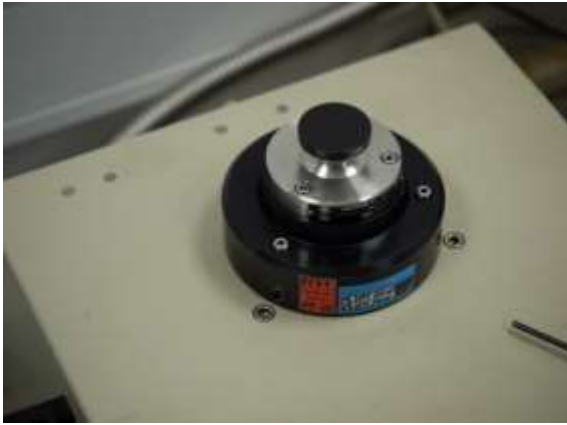
Po umerjanju se na dinamometer spet namesti sistem bata in cilindra, ki sta v ohišju, ki se ga privije na dinamometer. Spoj med ohišjem in dinamometrom je zatesnjen prostor pod batom.

Z vakuumsko črpalko se potem izčrpa zrak nad in pod batom do tlaka, ki je manjši od 2 Pa. S tem, ko je na obeh straneh bata enak tlak, se določi ničla dinamometra, s tem, da je ta tlak blizu nič, pa obenem tlak  $p_0 \approx 0$ . Nazadnje se nad zgornji del bata priključi cev, ki je povezana z merjenim tlakom  $p$  in z umerjenim barometrom.

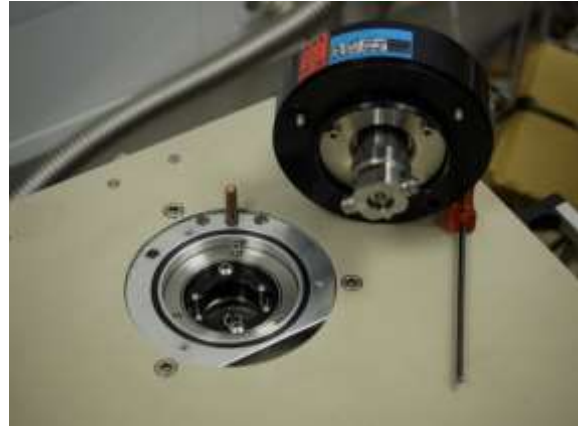
Za zagotavljanje visoke zanesljivosti kalibracije in merjenja pa je potrebno opraviti še celo vrsto postopkov, ki so naštetih v nadaljevanju.

## 4.1 Postopki kalibracije in umerjanja

Po vrsti opravimo sedem zaporednih postopkov.



Slika 10: Sklop bat/cilinder privit na dinamometer



Slika 11: Sklop bat/cilinder odvit iz dinamometra

### 1 Čiščenje sklopa bat/cilinder

Zaradi tesnega prileganja med batom in cilindrom pogosto že majhna vsebnost nečistoč ovira pravilno vrtenje bata v cilindru, zato je pred vsako uporabo potrebno preveriti čistočo sklop. Čistost preverimo tako, da z rokami v zaščitnih rokavicah zavrtimo bat. Če je ustavljanje enakomerno, potem nečistoč ni, sicer sistem očistimo.



Slika 12: Sklop bata in cilindra



Slika 13: Odprtina, v katero se privije sklop

## 2 Počasno enakomerno ogrevanje naprav

Počasno ogrevanje naprav do stanja, ko vsi deli naprave dosežejo neko stalno in isto temperaturo, izniči temperaturne vplive na električno vezje med merilnimi sistemi. Ogrevanje nepretrgano traja najmanj 12 ur.



Slika 14: Podstavek za uteži



Slika 15: Uteži na podstavku

## 3 Naravnavanje dinamometra z utežmi

Najprej meritev sile (ki ustvarja tlak) naredimo brez dodatnih uteži, nato na za to določen podstavek naložimo štiri eno-kilogramske uteži in vsakič izmerimo, kakšno silo kaže dinamometer. Na koncu ponovimo meritev brez uteži: torej pri 0 kg, pri 4 kg in še enkrat pri 0 kg – pri vsaki obremenitvi naredimo 10 ponovitev.



Slika 16: Dinamometer z utežmi



#### 4 Kalibracija dinamometra

Kontrolo dinamometra izvedemo v šestih točkah s pomočjo enokilogramskih uteži (od 1 kg do 6 kg). Kontrola se naredi pri 1 kg, 2 kg, 3 kg, 4 kg, 5 kg, 6 kg, 5 kg, 4 kg, 3 kg, 2 kg, 1 kg. Pri vsaki točki se naredi 10 ponovitev.

#### 5 Počasno enakomerno ogrevanje naprav

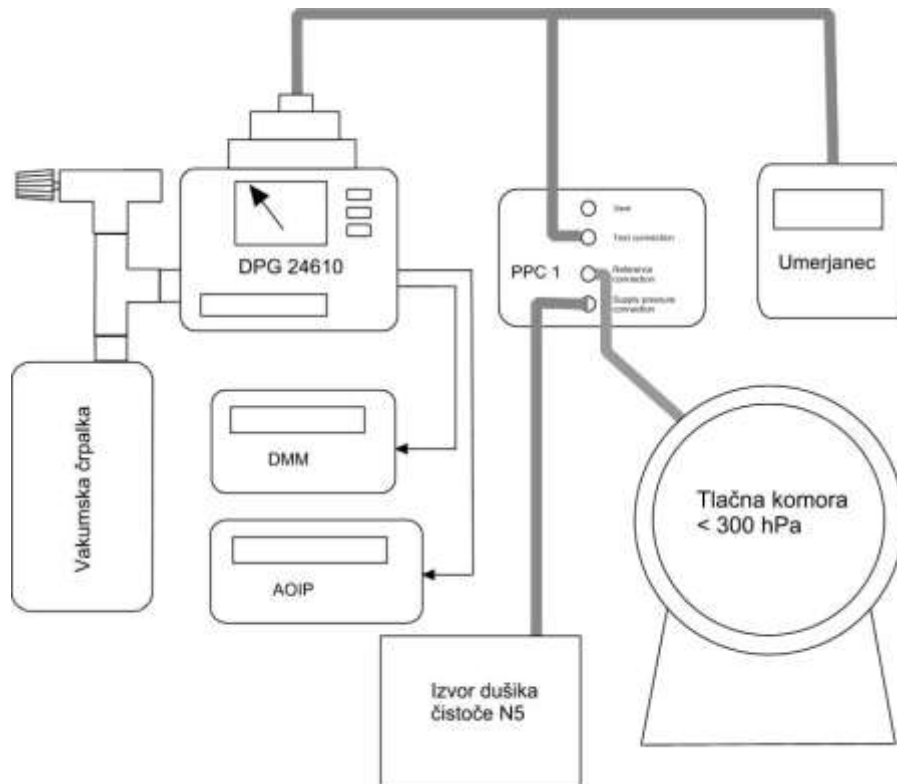
Ponovno počasi ogrejemo vse naprave (neprekinjeno najmanj 8 ur).

#### 6 Naravnavanje ničelnega odmika

Dinamometer se poveže na vakuumsko črpalko, s katero ustvarimo vakuum nad in pod batom  $p_0 \leq 2 \text{ Pa}$ .



Slika 17: Dinamometer vezan z ostalimi napravami



Slika 18: Vezava vseh naprav, ko sta na dinamometer priključena cilinder in bat

## 7 Meritev tlaka v kalibracijskih točkah

Za to meritev se nad bat priključi cev za povezavo z merjenim zračnim tlakom – isti tlak obenem meri tudi umerjeni barometer. Za avtomatično menjavanje kalibracijskih točk skrbi regulator tlaka (DH PPC1), ki je zvezan skupaj z merilnikom tlaka (DH 24610). Vedno se kalibrirata dva barometra naenkrat. Eden od njiju je stalno priključen in ima vlogo t.i. »etalona-priče«. Z njim se ugotavlja pravilnost delovanja celotnega sistema. Če »etalon-priča« kaže tlak kot referenčni etalon in v okviru negotovosti, potem je zelo verjetno, da sistem deluje pravilno.

## 4.2 Količine, upoštevane pri meritvi z DPG

Za merilnik, ki je v uporabi v Umerjevalnem laboratoriju ARSO, se upošteva popravke  $\Delta p$  zaradi tlačnih in temperaturnih raztezkov, zaradi višinskih razlik, nestandardnega težnostnega pospeška, različnih gostot snovi itd., pa tudi nepopolnega vakuuma v cilindru:

$$\Delta p = \Delta p' + \Delta p_{din} + \Delta p_0 \quad (8)$$

Ker sta morda merjenec in etalon na različnih višinah, to povzroči razliko tlaka  $\Delta p' = \rho_N \cdot g_l \cdot h$ . Tu so  $g_l$  lokalni težnostni pospešek v laboratoriju (izmerjen),  $\rho_N$  gostota tlačnega medija (dušika) in  $h$  višinska razlika med referenčnim nivojem etalona in nivojem merjenca.

Sledi tlak  $\Delta p_{din}$ , kot ga odčitamo na dinamometru. Tu se upošteva:

- deformacije (raztezke/skrčitve) zaradi tlaka  $(1 - L \cdot p)$ ,
- deformacije (raztezke/skrčitve) zaradi temperature  $[1 - (\alpha_p + \alpha_c) \cdot (T - 20 \text{ }^\circ\text{C})]$ ,
- koeficient bata in cilindra (pretvorba iz mase uteži v tlak ob upoštevanju površine preseka bata)  $k_n$ ,
- popravek zaradi lokalne vrednosti težnostnega pospeška  $g_l/g_n$ ,
- popravek zaradi različnih gostot merilnih medijev  $((\rho_m - \rho_a)(\rho_m - \rho_{zr}))$ ,
- ter pretvorbo iz enot merilnika na enote tlaka  $N/N_K$ .

Upoštevan pa je tudi popravek zaradi nepopolnega vakuuma v cilindru pod batom  $\Delta p_0$ .

$$\Delta p = \rho_N \cdot g_l \cdot h + (1 - L \cdot p) \cdot [1 - (\alpha_p + \alpha_c) \cdot (T - 20 \text{ }^\circ\text{C})] \cdot \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m - \rho_{zr}} \cdot \frac{g_l}{g_n} \cdot k_n \cdot \frac{N}{N_K} + \Delta p_0 \quad (9)$$

		Oznaka	Opis	Vrednost
$\Delta p'$ morebitne višinske razlike		$g_l$	težnostni pospešek v laboratoriju – izmerjen	9,80615880 ms <sup>-2</sup>
		$\rho_N$	gostota tlačnega medija	
		$h$	višinska razlika med referenčnim nivojem etalona in nivojem merjenca	
$\Delta p_{din}$ meritev	razne mehanske lastnosti	$L$	koeficient deformacije zaradi tlaka	< 0,001 Pa <sup>-1</sup>
		$\alpha_p$	temperaturni koeficient raztezka bata	0,45 10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>
		$\alpha_c$	temperaturni koeficient raztezka cilindra	0,45 10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>
		$T$	temperatura v merilni glavi	
		$\rho_m$	gostota uteži – nerjavno jeklo AISI 304 L	7920 kgm <sup>-3</sup>
		$\rho_a$	gostota zraka ob kalibraciji dinamometra z utežmi (upoštevani parametri: temperatura, relativna vlažnost zraka, tlak)	
		$\rho_{zr}$	standardna gostota zraka - dogovorjena vrednost	1,2 kgm <sup>-3</sup>
	standardna težnost	$g^n$	standardni zemeljski pospešek - dogovorjena vrednost	9,80665 ms <sup>-2</sup>
	pretvorba v enote za tlak	$k_n$	koeficient sklopa bat/cilinder pri 20°C dobljen pri kalibraciji	20,00270 kPakg <sup>-1</sup>
		$N$	številski odčitek na »Digital Pressure Standards 24610«	
$N_K$		nazivni odčitek na dinamometru pri obremenitvi z maso 1 kg	100 000 kg <sup>-1</sup>	
$\Delta p_0$ nepopolni vakuum	$p_0$	preostali tlak pod batom		

**Tabela 2: Prikaz fizikalnih količin uporabljenih v enačbi 9.**

Za merilno območje od 0 do 1200 hPa je vrednost koeficienta deformacije zaradi tlaka ( $L$ ) zanemarljiva. Upoštevana je le pri izračunu negotovosti. Zato se za določanja tlaka enačba poenostavi v:

$$\Delta p = \rho_N \cdot g_l \cdot h + [1 - (\alpha_p + \alpha_c) \cdot (T - 20 \text{ }^\circ\text{C})] \cdot \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m - \rho_{zr}} \cdot \frac{g_l}{g_n} \cdot k_n \cdot \frac{N}{N_K} + \Delta p_0 \quad (10)$$

Končna, prava vrednost tlaka je:

$$p_{pravi} = p_{din} + \Delta p, \quad (11)$$

kjer je  $p_{pravi}$  dejanski, pravi tlak,  $p_{din}$  pa tlak, ki ga izmeri dinamometer.

Koeficient sklopa bat/cilinder pri 20 °C ( $k_n$ ) dobimo pri kalibraciji uteži in celotnega sistema (bat/cilinder, termometer, merilnik vakuum). Izračun naredijo v laboratoriju, v katerem se kalibrira referenčni etalon. Koeficient  $k_n$  predstavlja pretvorbo iz mase oz. teže te mase v tlak pri 20°C in pri standardnih pogojih: pri gostoti zraka 1,2 kgm<sup>-3</sup> in pri težnostnem pospešku  $g_n$ . Preko tega koeficienta je speljan del sledljivosti.

Zemeljski pospešek v laboratoriju ( $g_l$ ) je Geološki zavod Slovenije izmeril 11. 02. 1997.

Temperatura v merilni glavi ( $T$ ) se meri z vgrajeno platinasto uporovno sondo Pt 100 in z digitalnim multimetrom v načinu s štirimi žicami. Temperatura se izračuna po enačbi

$$R = R_0 + \alpha(T - T_0), \quad (12)$$

kjer je  $R_0 = (100,01 \pm 0,02) \Omega$ , upornost sonde pri temperaturi  $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  in  $\alpha = (0,3896 \pm 0,0008) \Omega/\text{K}$  temperaturni koeficient električne upornosti platine. [11]

## **4.3 Negotovost in stabilnost**

### **4.3.1 Negotovost**

Merilna negotovost je parameter, povezan z rezultatom merjenja, ki označuje raztros (disperzijo) vrednosti, ki jih je mogoče upravičeno pripisati merjeni veličini. [10]

K negotovosti meritve štejemo poleg vpliva stabilnosti merilnega instrumenta v obdobju med dvema kalibracijama še samo negotovost kalibracije (nepravilni pogoji okolice, nenatančne vrednosti referenčnih naprav ali konstant, ki se uporabljajo pri izračunih), negotovost odčitavanja itd.

Kot smo lahko videli na sliki 1, v primeru elektronskega barometra prispeva največji delež k negotovosti šibka stabilnost (s časom se lastnosti merilnika spreminjajo); več kot 62 %, negotovost kalibracije vzame dobrih 30 %, vse ostalo pa manj kot 10 %.

### **4.3.2 Stabilnost**

Stabilnost je sposobnost merilnih instrumentov, da ohranijo svoje korekcije skozi daljše časovno obdobje. [12]

Za optimalno delovanje meteoroloških in drugih naprav je zelo pomembno, da se stalno periodično izvajajo njihove kalibracije. S temi se preverja pravilnost delovanja in izloča iz obtoka uporabe tiste naprave, katerih rezultati preveč odstopajo in ni možnosti popravila.

## 5 Merilniki za tlak in merilne naprave v merilni mreži na letališčih

Za vremenska dogajanja so v zračnem tlaku najpomembnejše horizontalne razlike tlaka, saj te povzročajo vetrove. Razlike po vertikali pa opredeljujejo večji ali manjši vzgon ter tudi spremembe tlaka z višino  $p(z)$ . V letalstvu preko meritve zračnega tlaka z aneroidi določajo višino. Ta meritev je standardna kljub raznim novejšim načinom določanja pozicije letal – med drugim tudi zato, ker je aneroid mehanski instrument in zato deluje tudi v primerih, kadar imajo npr. vse električne ali elektronske naprave kakršne koli težave. Res je sicer, da ima altimetrija pri letalih na višinah preko merjenja tlaka neizogibne napake zaradi nepoznavanja temperature v celotni plasti ozračja od morskega nivoja do višine letenja. Zato se uporablja podatek o temperaturi po t.i. standardnem ozračju WMO/ICAO [13] in s tem postanejo te napake za vsa letala enake, kar še vedno omogoča varno razvrščanje v t.i. nivoje letenja [14].

Pri vzletanju in pristajanju pa so letala nizko nad tlemi in ob poznavanju pravega tlaka na nivoju letališča so napake zaradi nestandardne temperature ozračja majhne. Pomembnost poznavanja prave vrednosti tlaka na nivoju letališča je razvidna iz tega, da pri tleh zračni tlak pada za okrog razlike 0,1 mbar/m. To pomeni, da 0,1 mbar napake pri meritvi tlaka na pristajalni stezi pomeni približno 1 m napake pri višini letala. Natančnost barometrov torej med drugim vpliva na varnost pristankov.

Višino piloti izračunajo s pomočjo tlaka, ki jim ga kaže barometer v zračnem plovilu in tlaka na letališču samem, kjer pristajajo. V resnici ni treba "izračunavati", saj imajo višinomeri nastavlljivo skalo višine in z nastavitvijo "tlak na letališču ~ višina nič" višinomer kaže kar relativno višino nad vzletno-pristajalno stezo.

Na letališčih imajo po dva barometra, zato lahko takoj opazijo morebitna medsebojna odstopanja. Ti barometri se kalibrirajo enkrat letno. Zaradi boljšega nadzora se par barometrov ne kalibrira istočasno, ampak je kalibracija enega zamaknjena za pol leta.

Na letališčih so v uporabi barometri različnih proizvajalcev/znamk: Setra, Vaisala, Fluke, Ruska, Mensor in drugi. Na slovenskih letališčih se uporabljata dva tipa barometrov: Setra 370 in Vaisala PTB 220AD.

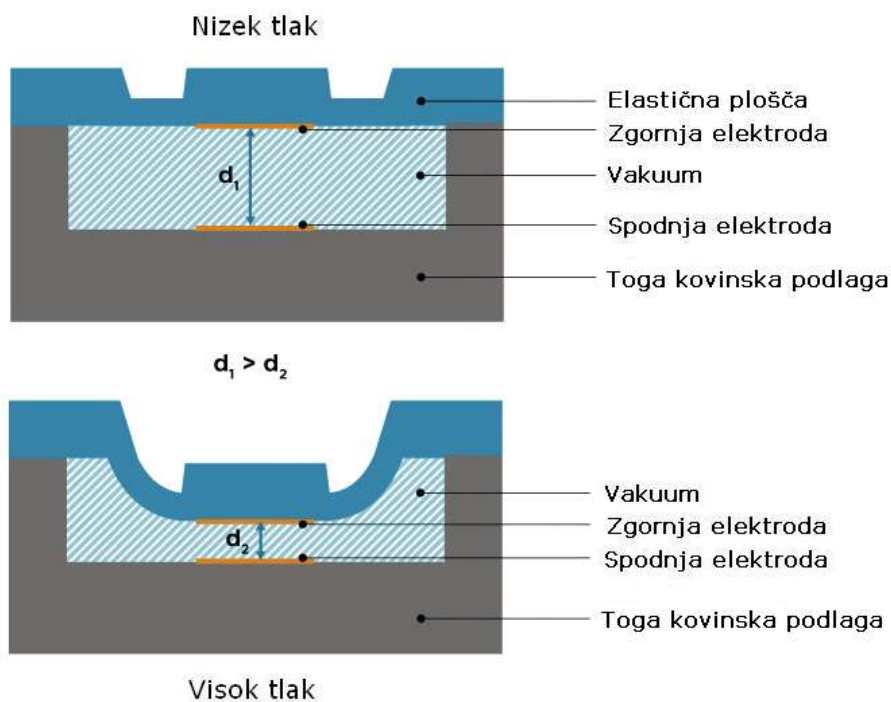


Slika 19: Barometer Setra



Slika 20: Barometer Vaisala

Setra 370 je kapacitivni senzor tlaka, sestavljen iz dveh vzporednih, električno izoliranih kovinskih plošč, ki stojita tesno skupaj. Ena od njiju je pravzaprav membrana, ki se pod vplivom sile tlaka deformira oziroma upogne. S tem povzroči spremembo kapacitivnosti, ki jo membrana tvori z drugo togo kovinsko ploščo senzorja. [15]

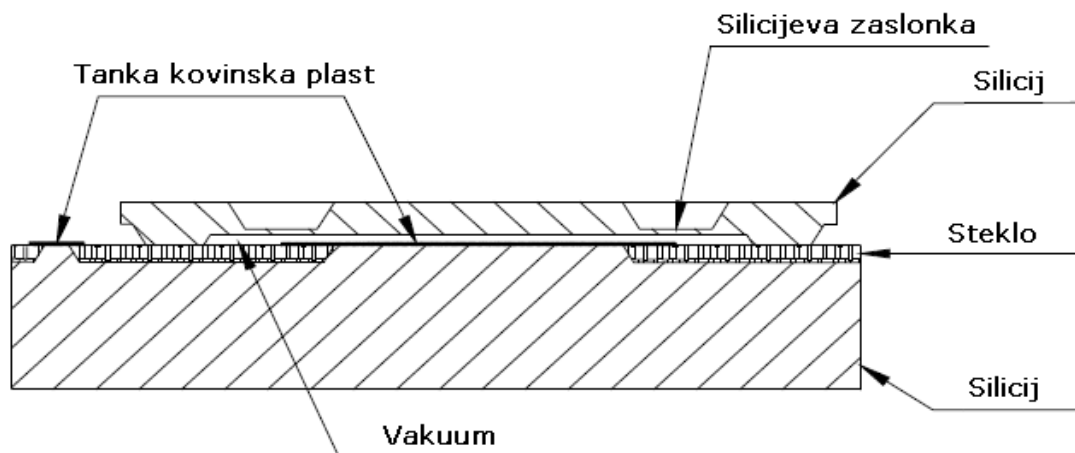


Slika 21: Princip delovanja kapacitivnega senzorja



Vaisala PTB 220AD je tudi kapacitivni merilnik, ki temelji na kapacitivnem principu merjenja tlaka z RC oscilatorjem. Sestavljajo ga kapacitivni senzor tlaka, trije referenčni kondenzatorji ter kapacitivni kompenzacijski senzor.

Multiplekser sekvenčno vklaplja posamezen kondenzator v RC vezju in z mikroprocesorjem generira izhodni signal glede na kapacitivnosti ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  in  $C(p)$  ter  $C_{komp}$ ). Tlačni senzor (»kondenzator«, ki se mu kapacitivnost spreminja:  $C = C(p)$ ) je sestavljen iz dveh plasti silicija v kristalni obliki, med katerima leži plast stekla (slika 22). Tanjša silicijeva plast je »jedkana« na obeh straneh, zato da ustvari enoten prostor z vakuumom in skupaj z na tlak občutljivo silicijevo zgornjo plastjo tvori senzor absolutnega tlaka. Debelejša silicijeva plast je trda osnovna plošča senzorja, ki je prevlečena s steklenim dielektrikom. Tanjša plast je elektrostatično tesno, neprepustno spojena s stekleno ploščo. Tanka kovinska plast je nanescena zato, da deluje kot elektroda kondenzatorja znotraj vakuumskega prostora, druga elektroda pa je na tlak občutljiva silicijeva zaslonka. [16]



Slika 22: Sestava kapacitivnega senzorja Vaisala

Za tlačni senzor je značilen širok dinamičen obseg in to, da se sam nič ne ogreva. Odlična histereza in ponovljive značilnosti so osnovane na prožnosti silicijevega kristala.

Barometra merita dejanski tlak, ki se nato preračuna v QNH in QFE:

**QFE** – je trenutni zračni tlak na nadmorski višini vzletno-pristajalne steze letališča (podan v hPa); ko je letalo na stezi, je tlak nič [14].

**QNH** – je tlak, ki je preračunan na povprečno nadmorsko gladino pri pogojih standardne atmosfere (podan v hPa); ko je letalo na stezi, je ta tlak enak tlaku, ki ustreza nadmorski višini steze [14].

V uporabi sta tudi vrednosti:

**QFF** – je tlak, ki je preračunan na povprečno nadmorsko gladino pri pogojih trenutne temperature zraka na stezi [17].

**QNE** – je tlak, s katerim se računa višina pri pogoju, da je standardni zračni tlak na nadmorski gladini 1013,25 hPa [17].

## **5.1 Umerjanje treh merilnikov za zračni tlak**

Za analizo dolgotrajne stabilnosti smo vzeli 3 naprave za merjenje tlaka. To so delovni etalon ter dva barometra iz operativne merilne mreže:

- VAISALA PTB 220AD – identifikacijska številka Y2630001
- VAISALA PTB 220AD – identifikacijska številka A1710005
- SETRA 370 – identifikacijska številka 547554.

Kalibracije se pri barometru Vaisala v večini primerov izvajajo pri vrednostih tlaka 500, 560, 620, 680, 740, 800, 860, 920, 980, 1040 in 1100 hPa, pri barometru Setra pa pri 800, 830, 860, 890, 920, 950, 980, 1010, 1040, 1070 in 1100 hPa. Včasih se meritve naredijo tudi pri drugih vrednostih tlaka, ali zaradi presoje izvajalca kalibracije ali pa na željo naročnikov kalibracije.

### 5.1.1 Postopek obdelave rezultatov kalibracij

Po opravljeni kalibraciji se na računalniku, ki je vezan na dinamometer, prikažejo korekcije pri naraščajočem in padajočem tlaku. Zaradi večkratnih merjenj pri določenem tlaku med kalibracijo barometra (na primer pri metodi C do 6-krat), smo za lažjo obdelavo podatkov vzeli povprečno vrednost pri vsakem merjenem tlaku, kar je prikazano na primeru v sledeči tabeli 3. »K Gor« pomeni korekcijo pri naraščajočem tlaku, »K Dol« pa korekcijo pri padajočem. Tlak  $p$  je podan v hPa. Znak  $\Sigma$  tu označuje povprečno vrednost korekcije pri določenem tlaku.

Barometer Setra 370 - 547554							
$\Sigma$	Kalibracije	1		2		3	
	Datum kalibracije	21.10.2011		21.10.2011		21.10.2011	
	$p$	K Gor [hPa]	K Dol [hPa]	K Gor [hPa]	K Dol [hPa]	K Gor [hPa]	K Dol [hPa]
-0,04	800		-0,04		-0,03		-0,03
-0,03	830	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	-0,02
-0,04	860	-0,04	-0,05	-0,04	-0,04	-0,03	-0,03
-0,04	890	-0,05	-0,05	-0,04	-0,04	-0,03	-0,04
-0,04	920	-0,04	-0,04	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03
-0,07	950	-0,07	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07	-0,07
-0,05	980	-0,05	-0,06	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05
-0,06	1010	-0,07	-0,07	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06
-0,08	1040	-0,09	-0,08	-0,07	-0,08	-0,07	-0,07
-0,05	1070	-0,05	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
-0,08	1100	-0,09		-0,08		-0,08	

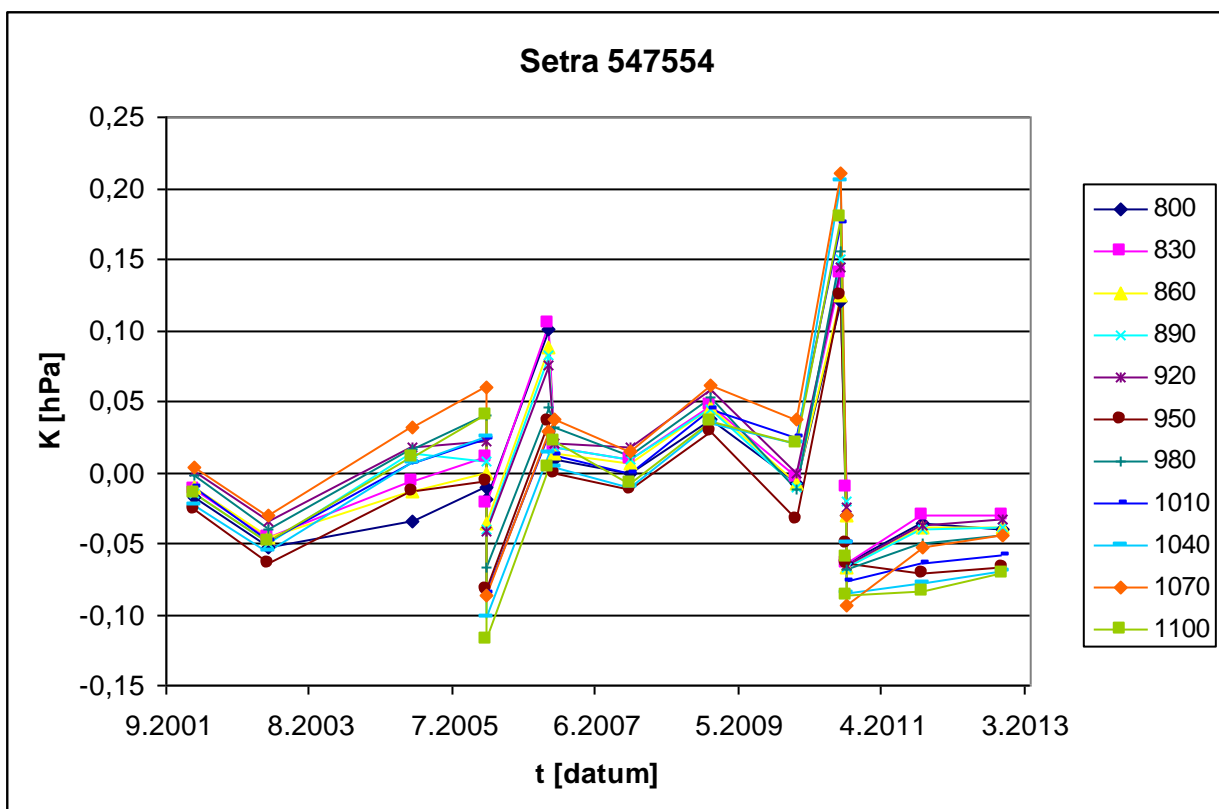
Tabela 3: Meritev pri barometru Setra 370 – 547554 opravljena trikrat v enem dnevu.

Da bi lahko čim natančneje preverili stabilnost dinamometrov, smo naše rezultate opravljenih kalibracij primerjali s podatki kalibracij, ki so bile opravljene v obdobju najmanj zadnjih petih let. Tabela 4 prikazuje zbrane rezultate povprečne vrednosti korekcije pri različnih tlakih.

Barometer Setra 370 - 547554															
datum	9.1.02	21.1.03	10.12.04	14.12.05	22.12.05	27.10.06	3.11.06	8.11.07	9.12.08	19.2.10	29.9.10	7.10.10	26.10.10	21.10.11	6.11.12
tlak															
800	-0,02	-0,05	-0,03	-0,01	-0,02	0,10	0,01	0,00	0,04	-0,01	0,12	-0,03	-0,06	-0,04	-0,04
830	-0,01	-0,05	-0,01	0,01	-0,02	0,10	0,02	0,01	0,05	0,00	0,14	-0,01	-0,06	-0,03	-0,03
860	-0,01	-0,05	-0,01	0,00	-0,04	0,09	0,01	0,01	0,05	-0,01	0,13	-0,03	-0,07	-0,04	-0,04
890	-0,01	-0,05	0,01	0,01	-0,04	0,08	0,02	0,01	0,04	-0,01	0,15	-0,02	-0,07	-0,04	-0,04
920	0,00	-0,03	0,02	0,02	-0,04	0,08	0,02	0,02	0,06	0,00	0,15	-0,03	-0,07	-0,04	-0,03
950	-0,03	-0,06	-0,01	-0,01	-0,08	0,04	0,00	-0,01	0,03	-0,03	0,13	-0,05	-0,06	-0,07	-0,07
980	0,00	-0,04	0,02	0,04	-0,07	0,05	0,03	0,01	0,05	-0,01	0,16	-0,03	-0,07	-0,05	-0,04
1010	-0,01	-0,05	0,01	0,02	-0,08	0,03	0,01	0,00	0,04	0,02	0,18	-0,05	-0,08	-0,06	-0,06
1040	-0,02	-0,06	0,01	0,02	-0,10	0,01	0,00	-0,01	0,04	0,02	0,21	-0,05	-0,09	-0,08	-0,07
1070	0,00	-0,03	0,03	0,06	-0,09	0,03	0,04	0,01	0,06	0,04	0,21	-0,03	-0,09	-0,05	-0,05
1100	-0,01	-0,05	0,01	0,04	-0,12	0,00	0,02	-0,01	0,04	0,02	0,18	-0,06	-0,09	-0,08	-0,07

**Tabela 4: Primer rezultatov kalibracij v letih 2002 do 2012 pri različnih vrednostih tlaka pri barometru Setra 370 – 547554.**

Za lažjo predstavitev smo podatke prikazali v sledečem grafu. Zadnji korekciji sem opravila v okviru te diplomske naloge.



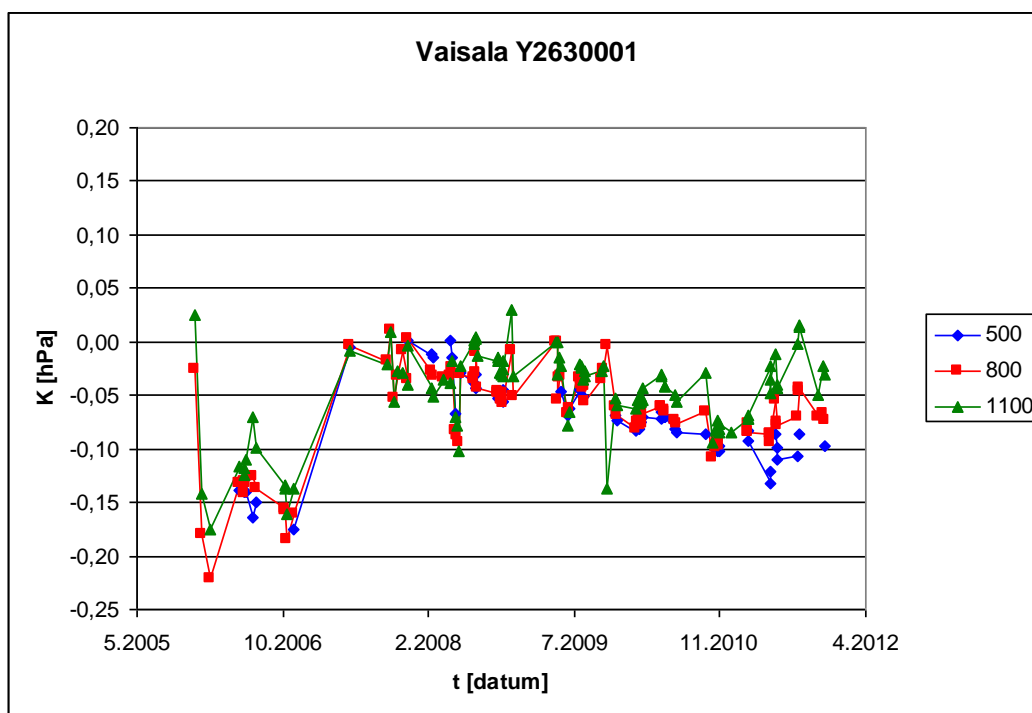
**Graf 4: Primer odstopanj od idealnega tlaka barometra Setra 547554 med leti 2002 in 2012 pri vseh merjenih vrednostih tlaka.**

Zaradi boljšega pregleda končnih rezultatov smo na sledečih grafih, ki prikazujejo odstopanja od idealnega (»pravega«) tlaka glede na čas oziroma datum opravljene kalibracije, izbrali tri vrednosti tlaka, in sicer najmanjšo (Vaisala 500 hPa, Setra 800 hPa), največjo (Vaisala 1100 hPa, Setra 1100 hPa) ter srednjo vrednost (Vaisala 800 hPa, Setra 950 hPa).

## 5.1.2 Rezultati odstopanj od idealnega tlaka

### Vaisala Y2630001

Leta 2006 je bil za delovni etalon pri kalibracijah barometrov z letališč izbran barometer Vaisala, z identifikacijsko številko Y2630001, ki je v obdobju šestih let pokazal izredno zanesljivost.

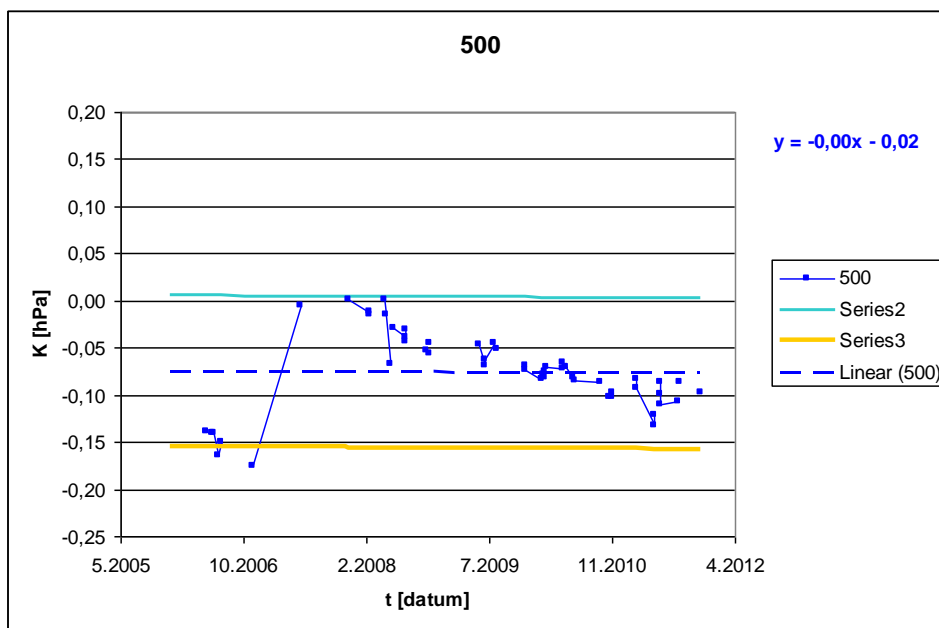


Graf 5: Barometer Vaisala Y2630001 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlakih 500, 800 ter 1100 hPa.

Edina pomembnejša stvar, ki se opazi na grafu 5 v prvih dveh letih uporabe, je začetni večji odmik rezultatov pri vseh treh zajetih tlakih, ki zaenkrat ostaja še nepojasnen (vendar ga na ARSO še preučujejo).

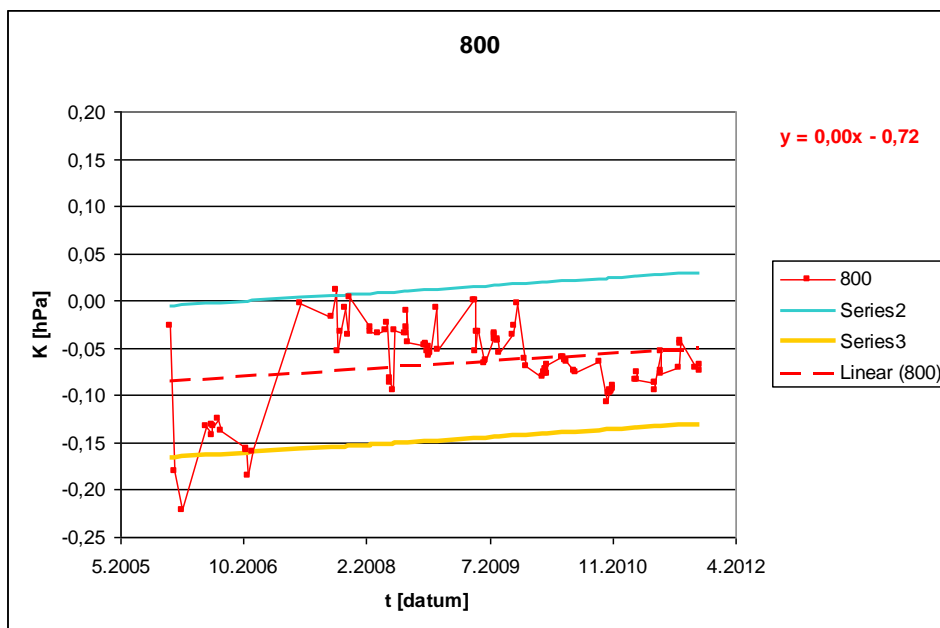
Zaradi boljšega pregleda nad večjo količino podatkov, so narejeni trije grafi za vsako vrednost tlaka posebej.

Srednja črtkana premica označuje trend korekcije posameznega barometra. Zgornja (turkizna) in spodnja (rumena) premica na sledečih grafih pa predstavljata meji področja sprejemljive korekcije. Kadar pridejo rezultati odstopanj preko teh meja (0,08 hPa je akreditirana negotovost kalibracije v umerjevalnem laboratoriju na ARSO), se naredi naravnavanje kalibrirane naprave.



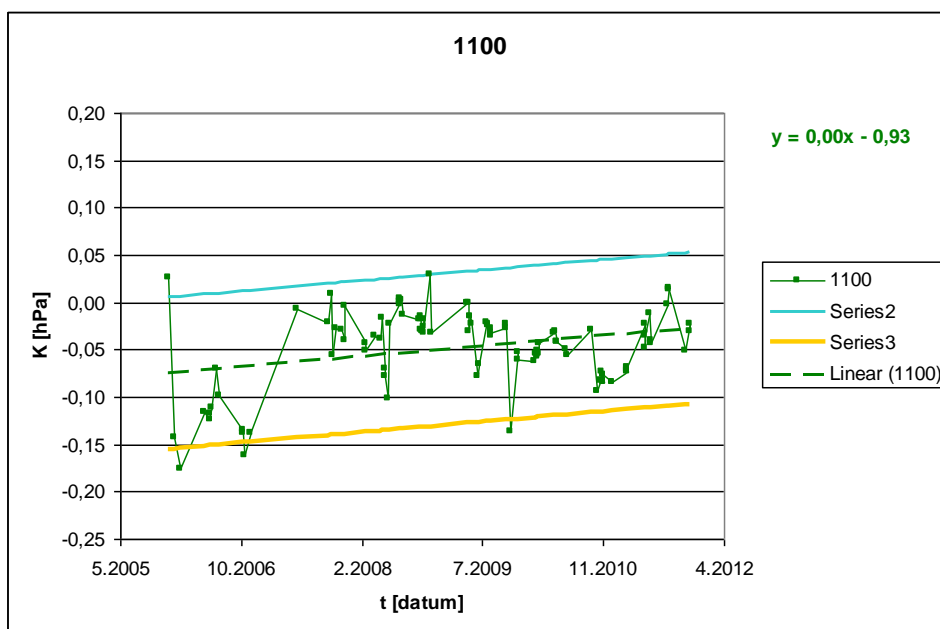
**Graf 6: Barometer Vaisala Y2630001 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlaku 500 hPa.**

Graf 6 prikazuje zbrane meritve pri tlaku 500 hPa. Povprečje meritev, ki je prikazana s prekinjeno črto, je skoraj vodoravna, kar nakazuje stabilnost v vseh letih uporabe.



**Graf 7: Barometer Vaisala Y2630001 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlaku 800 hPa.**

Na grafu 7 so označeni podatki izmerjeni pri tlaku 800 hPa. Razen že znanega začetnega večjega odmika od idealnega tlaka, kjer je bilo potrebno naravnavanje, so kasnejše kalibracije pokazale več stabilnosti naprave. Od leta 2007 so rezultati v območju pod 10 hPa.



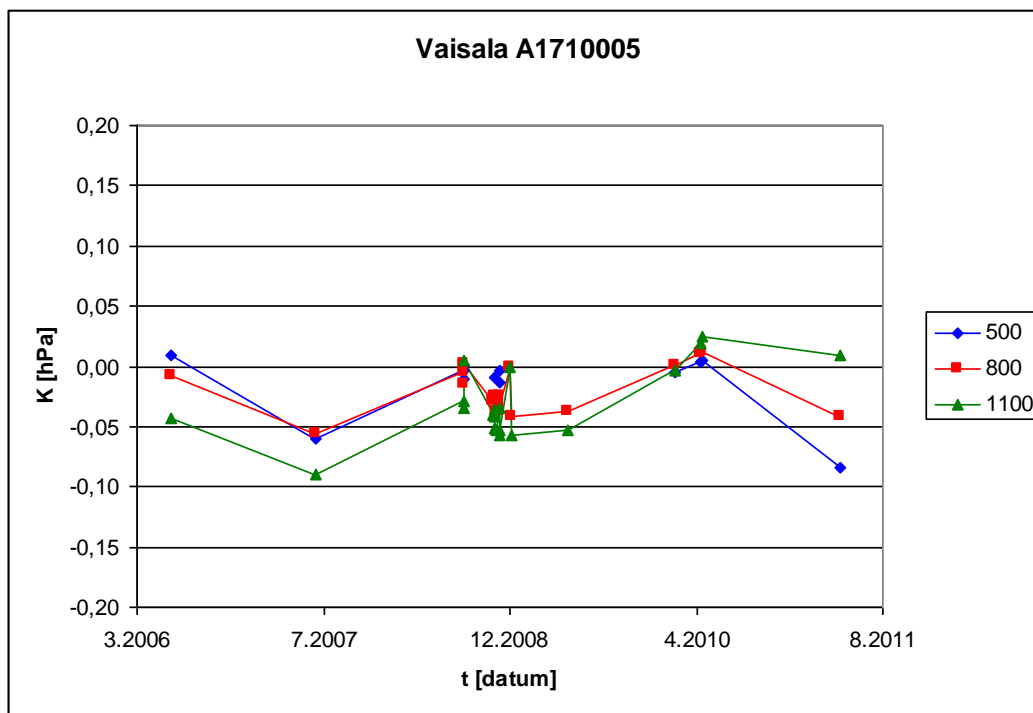
**Graf 8: Barometer Vaisala Y2630001 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlaku 1100 hPa.**

Pri grafu 8 so vidna odstopanja pri tlaku 1100 hPa. Tudi tu je v prvih dveh letih izmerjen večji odmik, a vseeno manjši kot pri 800 hPa. V naslednjih letih je barometer pokazal pričakovano stabilnost.

Tudi rezultati kalibracij barometra Vaisala Y2630001 so v okviru stabilnosti, ki jo podaja proizvajalec.

## Vaisala A1710005

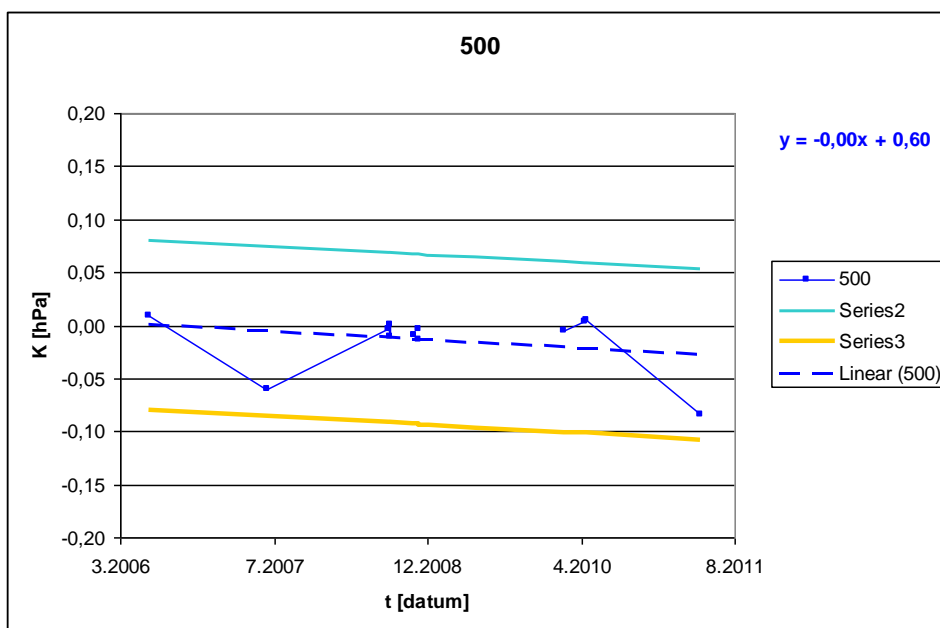
Barometer Vaisala z identifikacijsko številko A1710005 je v uporabi od leta 2006.



**Graf 9: Barometer Vaisala A1710005 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlakih 500, 800 ter 1100 hPa.**

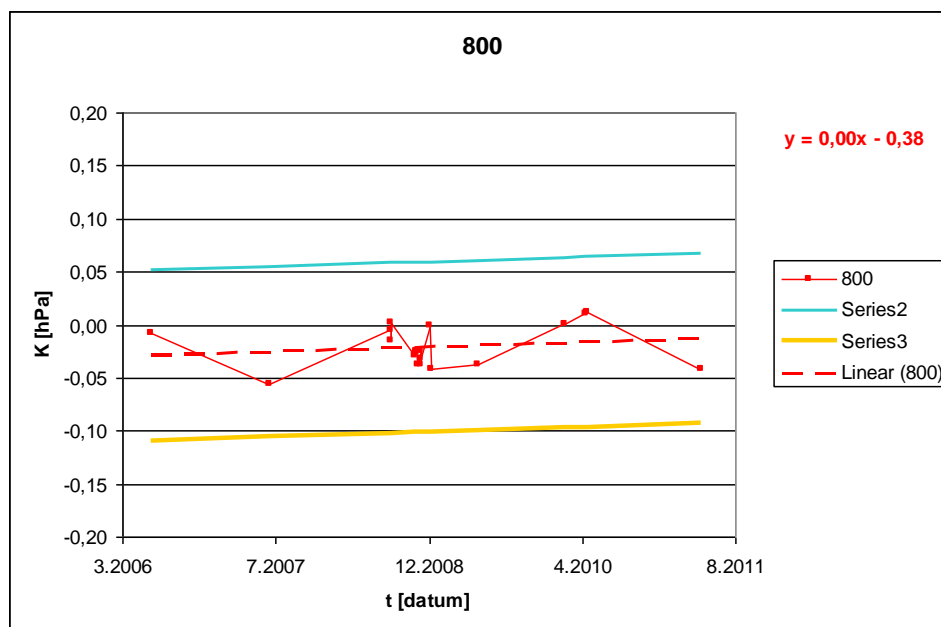
Zaradi boljšega pregleda nad večjo količino podatkov so spet narejeni trije grafi za vsako vrednost tlaka posebej.





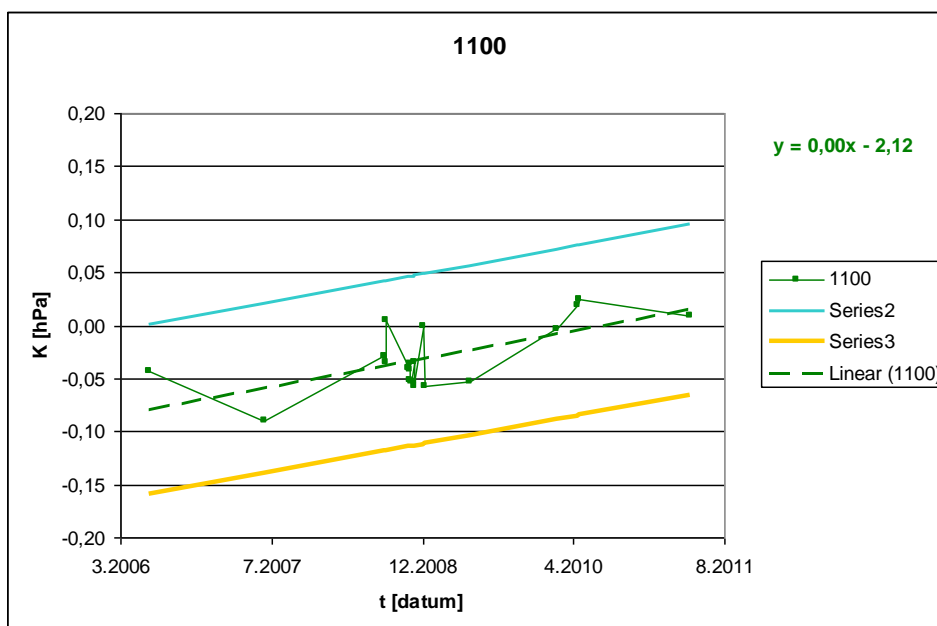
**Graf 10: Barometer Vaisala A1710005 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlaku 500 hPa.**

Na grafu 10 so označene korekcije barometra pri tlaku 500 hPa. Največje odstopanje, ki ne presega 10 Pa, je zabeleženo pri zadnji kalibraciji.



**Graf 11: Barometer Vaisala A1710005 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlaku 800 hPa.**

Graf 11 prikazuje meritev tlaka pri 800 hPa. Barometer se je pri tem tlaku izkazal za zelo zanesljivega. V petih letih kalibracij je razlika med izmerjenimi odstopanji tja do 5 Pa.



**Graf 12: Barometer Vaisala A1710005 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlaku 1100 hPa.**

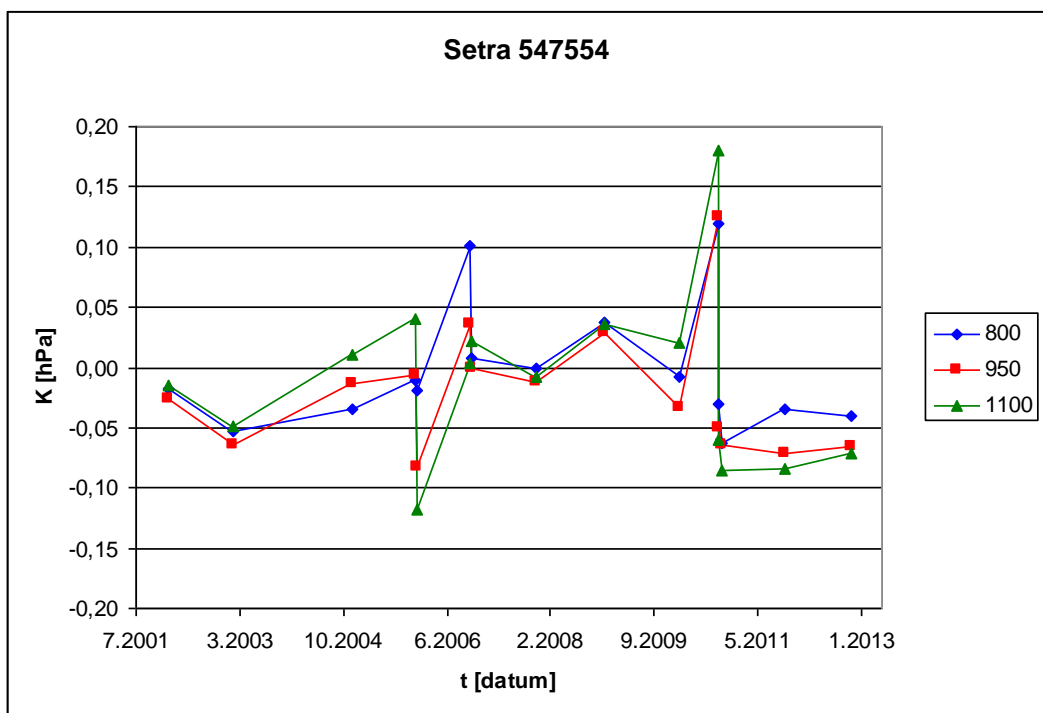
Odstopanja pri tlaku 1100 hPa vidimo na grafu 12. Pri najvišjem merjenem tlaku barometra Vaisala A1710005 je zaslediti nekoliko večje spreminjanje izmerjenega tlaka, ki se skozi leta počasi povečuje, a je še vedno v mejah sprejemljivega.

Rezultati kalibracij barometra Vaisala A1710005 so v okviru stabilnosti, ki jo podaja proizvajalec.

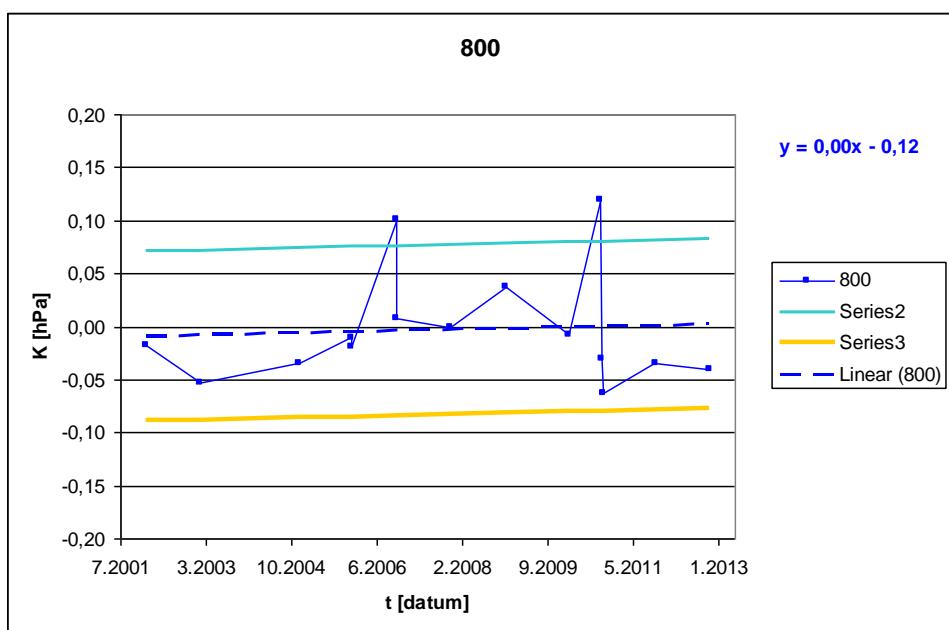
## Setra 547554

Elektronski barometer Setra 370, identifikacijska številka 547554, se na naših letališčih uporablja že od leta 2002.

Pri Setri so bile v analizo vzete vrednosti tlaka 800, 950 in 1100 hPa.

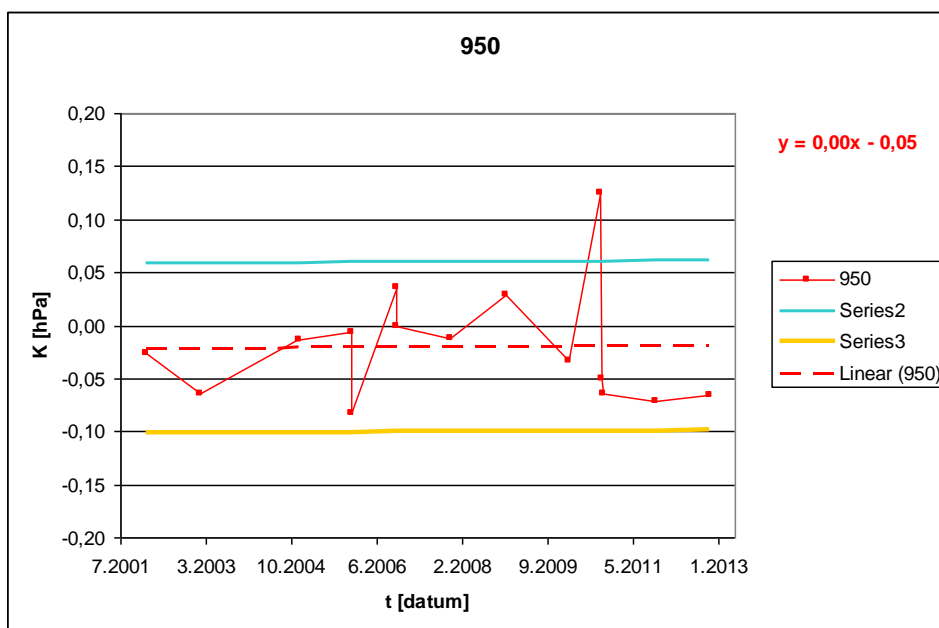


Graf 13: Barometer Setra 547554 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlakih 800, 950 ter 1100 hPa.



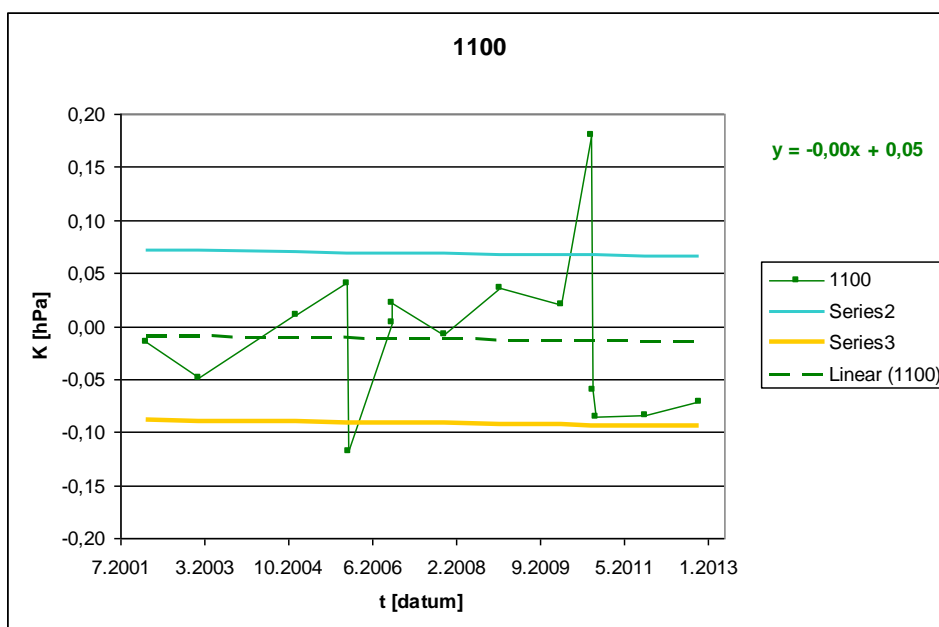
Graf 14: Barometer Setra 547554 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlaku 800 hPa.

Meritve, dobljene iz opravljenih kalibracij pri tlaku 800 hPa, so prikazane na grafu 14. Zbrani podatki ne kažejo prevelikih odstopanj. Na dveh mestih, kjer premica prečka zgornjo mejo sprejemljive korekcije, je bilo opravljeno naravnavanje.



**Graf 15: Barometer Setra 547554 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlaku 950 hPa.**

Na grafu 15 so narisane točke odstopanja od idealnega tlaka pri 950 hPa. Enako kot pri 800 hPa se tudi tu vidijo večja nihanja v meritvah kot pri znamki barometra Vaisala, a je stabilnost glede na dolgo dobo 11 let dobra.



**Graf 16: Barometer Setra 547554 – odstopanje od idealnega tlaka glede na čas pri tlaku 1100 hPa.**

Zelena linija na grafu 16 prikazuje podatke izmerjene pri tlaku 1100 hPa. Odmik od idealnega tlaka je pri tem tlaku največji. Povprečne odmika skozi leta kalibracij je odlično, a rezultati meritev zelo nihajo. Razlika med njimi je skoraj 30 Pa, kar pa ni izven dovoljenega.

Rezultati kalibracij barometra Setra 547554 so še vedno v okviru stabilnosti, ki jo podaja proizvajalec.

## 5.2 Primerjava stabilnosti

Češko podjetje Setra zagotavlja za svoje barometre stabilnost 0,15 hPa na leto. Dolgotrajno stabilnost barometra proizvajalca Setra smo preverili pri barometru Setra 370 z identifikacijsko številko 547554, ki se uporablja pri meritvah zračnega tlaka na slovenskih letališčih. V tabeli 5 vidimo, da je stabilnost, ki smo jo izračunali iz odstopanj od idealnega tlaka pri določenih tlakih pri kalibraciji v obdobju 10 let, veliko manjša od stabilnosti, ki jo podajajo proizvajalci.

	Setra 547554	Setra 370
tlak [hPa]	izmerjena stab. [hPa/leto]	tovarniška stab. [hPa/leto]
800	1,1E-03	± 0,15
950	2,4E-04	
1100	-5,3E-04	

Tabela 5: Primerjava izmerjene in tovarniške stabilnosti pri barometru Setra.

Finsko podjetje Vaisala pa za svoje barometre zagotavlja natančnejšo stabilnost kot podjetje Setra, to je 0,10 hPa na leto. V primerjavo sta bila vzeta dva barometra od proizvajalca Vaisala. Barometer Vaisala PTB 220AD identifikacijska številka A1710005 se uporablja za meritve na naših letališčih, barometer Vaisala PTB 220AD identifikacijska številka Y2630001 pa kot delovni etalon, ki se uporablja pri kalibracijah letaliških barometrov. Tabela 6 nam kaže dobro stabilnost teh dveh barometrov v obdobju šestih let.

	Vaisala A1710005	Vaisala Y2630001	Vaisala PTB 220AD
tlak [hPa]	izmerjena stabilnost [hPa/leto]		tovarniška stab. [hPa/leto]
500	-5,6E-03	-4,7E-04	± 0,1
800	3,3E-03	6,0E-03	
1100	1,9E-02	8,1E-03	

Tabela 6: Primerjava izmerjene in tovarniške stabilnosti pri barometru Vaisala.

## **6 Zaključek**

Varnost na letališčih je izrednega pomena, zato smo želeli z raziskavo dolgotrajne stabilnosti preveriti, ali lahko zaupamo zagotovitom proizvajalcev barometrov.

Rezultati večletnih kalibracij, ki so predstavljeni v tej diplomski nalogi, so pokazali, da je ocena stabilnosti merilnikov za zračni tlak, ki se jih uporablja na naših letališčih, v okviru stabilnosti, ki jo podajata proizvajalca – Vaisala in Setra. Rezultati so bili celo zelo dobri, zato ni pričakovati težav ob rednem vzdrževanju in kalibriranju barometrov.

V raziskavo so bili vzeti trije barometri dveh različnih proizvajalcev. Na podoben način bi lahko v prihodnje preverili še druge barometre, ki se uporabljajo na naših letališčih. Seveda pa bo zanimivo še naprej slediti stabilnosti že preverjenih barometrov, da bi videli, po koliko letih pride do vidnejših odstopanj.

# Literatura

- [1] STRNAD, Janez. 2002. Fizika: Del 1. Ljubljana: DMFA (Matematika – fizika: zbirka univerzitetnih učbenikov in monografij). ISBN 961-212-047-1.
- [2] KLADNIK, Rudolf. 1996. Pot k maturi iz fizike. Ljubljana: DZS. ISBN 86-341-1807-X  
RAKOVEC, Jože. 2000. Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike. Ljubljana: DMFA (Matematika – fizika: zbirka univerzitetnih učbenikov in monografij). ISBN 961-212-111-7.
- [3] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/600149/Evangelista-Torricelli> (zadnji dostop 8. 5. 2015)  
<http://www.famousscientists.org/evangelista-torricelli/> (zadnji dostop 8. 5. 2015)
- [4] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/445406/Blaise-Pascal> (zadnji dostop 8. 5. 2015)  
<http://www.famousscientists.org/blaise-pascal/> (zadnji dostop 8. 5. 2015)
- [5] RAZPOTNIK, Aleš. 2012. Pressure (powerpoint predstavitev).
- [6] <http://www.status.co.uk/an-introduction-to-presure-sensors.html#OneDivOne> (zadnji dostop 8. 5. 2015)
- [7] <http://www.status.co.uk/an-introduction-to-presure-sensors.html#> (zadnji dostop 8. 5. 2015)
- [8] GAUTSCHI, Guustav. 1936. Piezoelectric sensorics: force, strain, pressure, acceleration nad acoustic emission sensors, materials and amplifiers. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 3-540-42259-5.
- [9] <http://www.arso.gov.si/> (zadnji dostop 8. 5. 2015)
- [10] Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja. 1999. Ljubljana : Urad RS za standardizacijo in meroslovje. ISBN 961-6215-06-X.



[11] Tehniško navodilo – Kalibracije tlaka. 2010. (word dokument)

[12] <http://www.toolingu.com/definition-350115-5906-stability.html> (zadnji dostop 8. 5. 2015)

[13] WMO. 2008. Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8). ISBN 978-92-63-100085.

[14] ICAO. 2008. Manual of Aeronautical Meteorological Practice. ISBN 978-92-9231-220-6.

[15] <http://blog.setra.com/introduction-capacitance-based-pressure-transducers/2012/10/10> (zadnji dostop 8. 5. 2015)

[16] VAISALA. 2001. PTB220 series digital barometers: user's guide.

[17] <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=Q> (zadnji dostop 8. 5. 2015)

<http://weatherfaqs.org.uk/book/export/html/174> (zadnji dostop 8. 5. 2015)