

## 4. Metode mjerenja i mjerna tehnika

Za uspješno upravljanje suvremenim (složenim) hidrotehničkim sustavom kao i svakog eksperimenta od izuzetne je važnosti ispravno mjerenje pojedinih fizikalnih veličina koje koje utječu na stanje promatranog procesa. U hidraulici se najčešće prate:

- razine vode
- brzine
- protok
- tlak (sile)
- pronosa suspendiranog i vučenog nanosa
- koncentracije tvari
- toplina

U nastavku će se prikazati neki od instrumenata za mjerenje pojedinih fizikalnih veličina i njihove karakteristike

Prema učestalosti mjerenja razlikujemo:

- kontinuirano: omogućeno je stalno praćenje parametra koji se mjeri i
- diskretno koje predstavlja povremno praćenje hidrotehničke veličine koju promatramo

### 4.1 Mjerenje razine vode

Za mjerenje razine vode se najčešće koriste vodomjerne letve, limnigrafi, mjerna igla, kapacitativna ili otporska sonda, ultrazvučni mjerači razine i te mjerenje razine indirektno preko tlaka.

#### 4.1.1. Vodomjerne letve (vodokaz)

Najjednostavnija i najstarija metoda mjerenja vodostaja je pomoću vodomjerne letve. Točnost očitavanja se kreće od 1 – 4 cm a ovisi o više faktora:

- o savjesti motrioca,
- o stanju (vidljivosti) brojčane skale,
- o mirnoći vodne površine prilikom očitavanja.

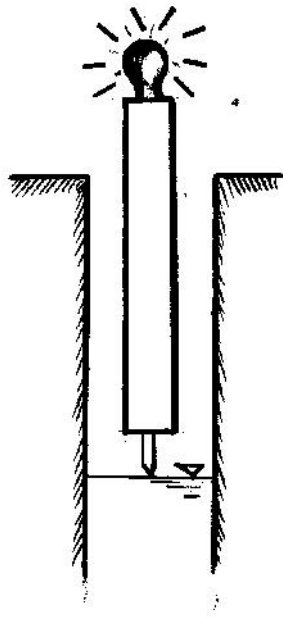
Točnost ovisi u prvom redu o oscilaciji vodostaja (amplitudi) i o učestalosti očitavanju unutar usvojenog vremenskog razdoblja te izračunavanja srednje vrijednosti.



**Slika 4.1::1 Vodokazna letva**

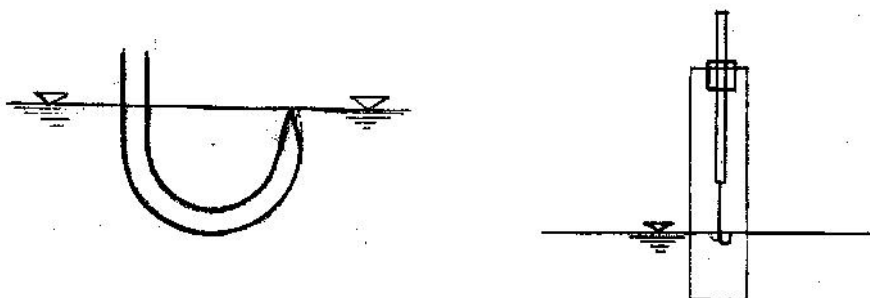
#### **4.1.2. Mjerna igla**

Upotrebljava se najviše za određivanje razine u piezometrima te u laboratorijima. Točnost određivanja vodostaja je 0,3 do 0,5 mm.



**Slika 4.1::2 Mjerna igla**

Laboratorijska mjerna igla služi za određivanje vodostaja na mjernim instrumentima kao što su na primjer Thomson-ov preliv. Točnost određenog vodostaja je 0,1 mm.



Slika 4.1.:3 Mjerna igla

### 4.1.3. „Fučkaljka“

„Fučkaljka“ služi prvenstveno za mjerenje razine podzemne vode u piezometrima. Sastoji se od konopa na mehanizmu za namatanje te instrumenta koji pokazuje trenutak kad se dosegne vodno lice. Prvi instrumenti su imali senzor koji je ličio na fučkaljku koja je u trenutku dosezanja vodnog lica, potjerala zrak u tijelo senzora te je on tada zafučkao. Suvremenije izvedbe imaju senzor koji se zasniva na zatvaranju strujnog kruga, tako da se u trenutku kad senzor dosegne vodno lice zatvori strujni krug te zasvijetli žarulja ili se oglasi zvonce.

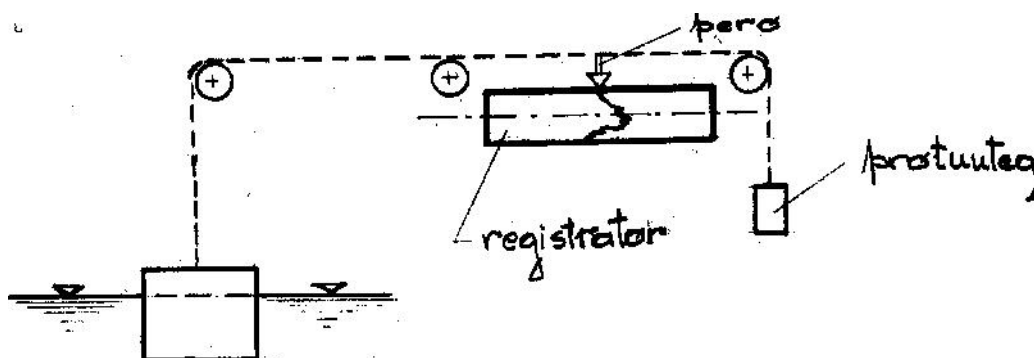


Slika 4.1.:4 Fučkaljka

### 4.1.4 Limnigraf

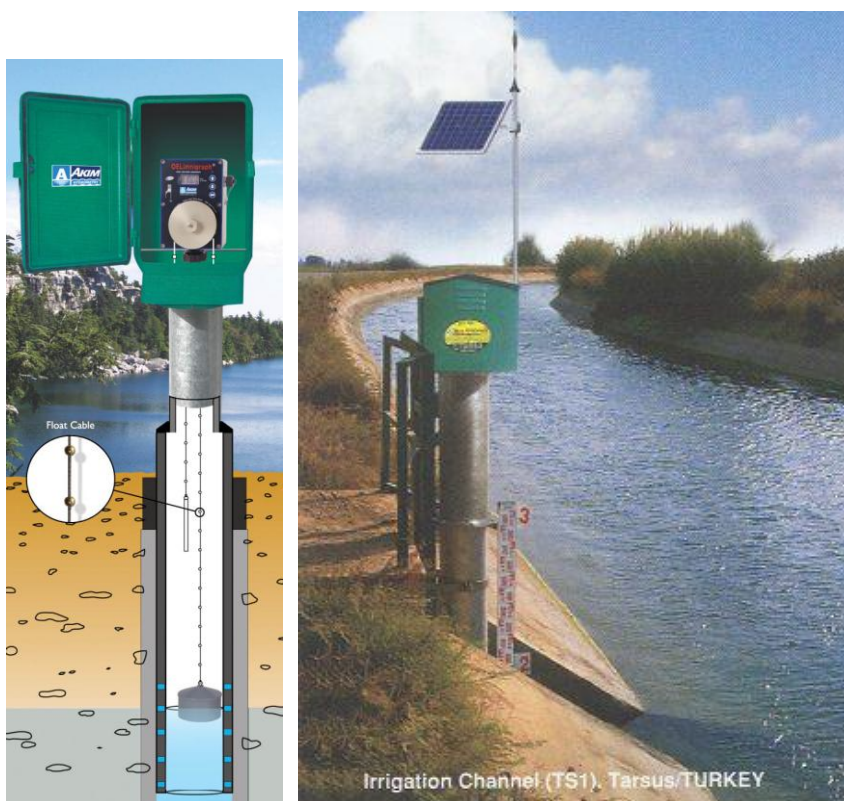
Limnigraf se često koristi za hidrološka mjerenja a može služiti i u laboratorijske svrhe. Limnigrafu služe za kontinuirano mjerenje razine vode te zapisivanje izmjerenih vrijednosti. Po konstrukciji se mogu bitno razlikovati.

*Klasičan tip* se sastoji od plovka, protuutega, spojnog sistema plovka sa perom i registratora (valjka) sa ugrađenim satnim mehanizmom (Slika 4.1::5).



Slika 4.1::5 Princip rada klasičnog limnigrafa

Točnost ovog tipa limnigrafa ovisi o stabilnosti plovka te o veličini trenja u osovinama kolotura spojnog sistema plovak – pero (registrator).

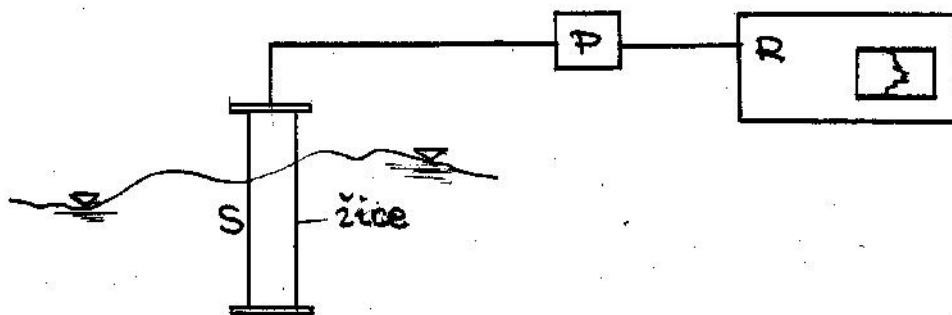


Slika 4.1::6 Klasičan tip limnigrafa s plovkom i protuutegom

Izmjerene vrijednosti vodostaja se zapisuju (pohranjuju u memoriju) ili se putem telekomunikacija prenašaju u centralno mjesto za prikupljanje podataka.

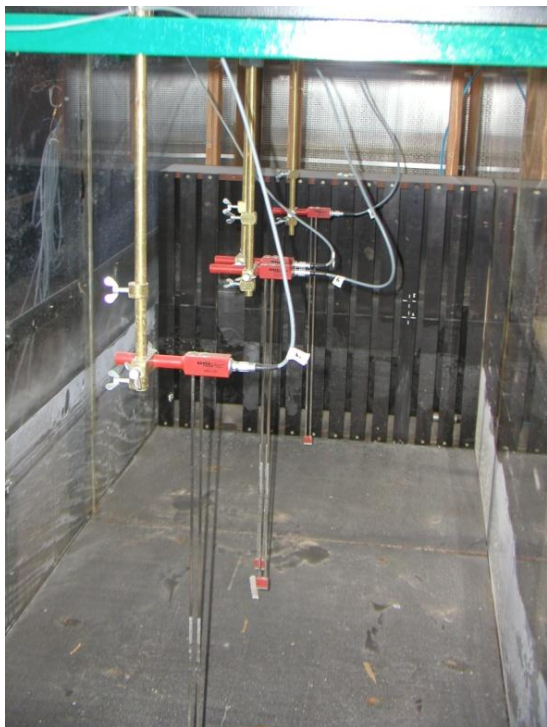
*b) Laboratorijski (elektronski) limnigraf*

se sastoji od sonde (S), pojačala (P) i registratora (R). Prednost mu je da radi gotovo bez inercije.



Slika 4.1::7 Kapacitivna sonda

Kao sonda se obično koriste kapacitivne ili otporske sonde. Ovaj je limnigraf prikladan za mjerenje brzih promjena vodostaja kao što su na primjer za registraciju valova (morskih ili poplavnih).



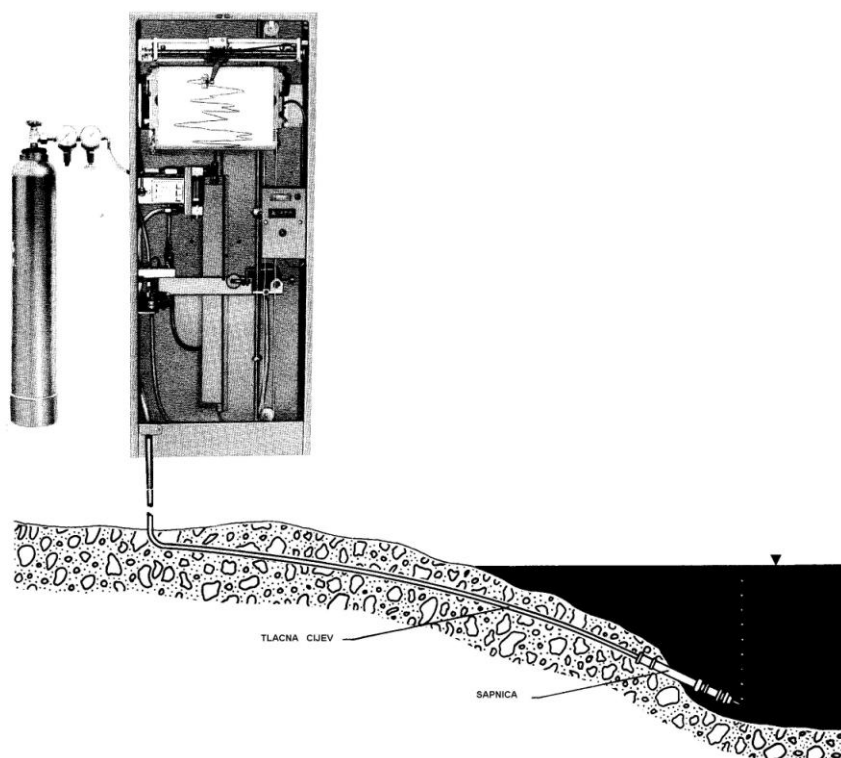
Slika 4.1::8 Kapacitivna sonda ugrađena u žljeb sa generatorom valova

Kapacitivne sonde su prikladne za mjerenja promjena razine vodnog lica na modelima a na gornjoj slici (Slika 4.1::8) su ugrađene u žljeb u kojem je generator valova.

### c) pneumatski limnigraf

Pneumatski limnigraf omogućuje ažurno mjerenje razine u vodotoku sa slobodnim vodnim licem ili razine podzemne vode u piezometru. Često se koristi na mjestima gdje je ugradnja klasičnog limnigrafa neekonomična ili nemoguća.

Princip rada ovog instrumenta se zasniva na upuštanju plina (dušika ili zraka) kroz cijev ispod razine vode. Plin se upušta kroz poseban regulacioni ventil iz posude u kojoj je zaliha komprimiranog plina ili pomoću malog kompresora. Tlak koji se mjeri na regulacionom ventilu odgovara statičkom tlaku iznad ispusta plina i služi za računanje hidrostatskog stupca vode iznad ispusta.



Slika 4.1.:9 Pneumatski limnigraf

Tlačna cijev može biti duljine do 300 m što omogućava niz varijanti ugradnje uređaja.

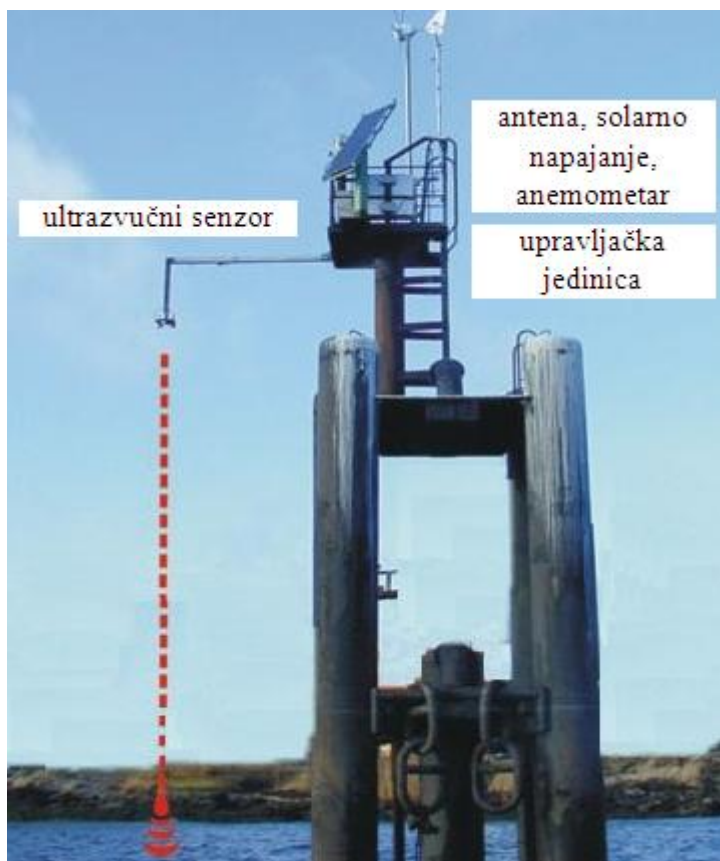
#### 4.1.5 Ultrazvučni mjerač razine

Ultrazvučni mjerač razine se zasniva na emitiranju zvučnog signala koji se reflektira od vodnog lica te se mjeri vrijeme potrebno da zvučni signal prevali put od sonde do vodnog lica i nazad.

Prednost mu je u tome što nema kontakta sa tekućinom pa je pogodan za agresivne tekućine (najčešće se koristi kod uređaja za pročišćavanje otpadnih voda).



Slika 4.1::10 Senzor ultrazvučnog mjerača razine



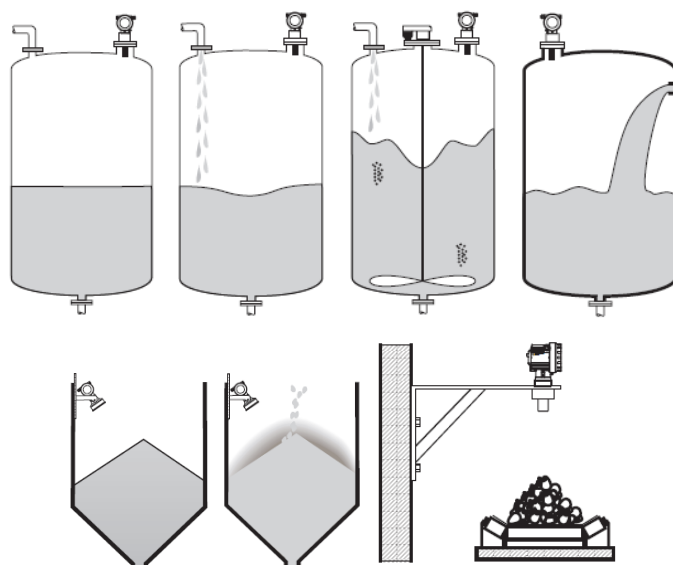
Slika 4.1::11 Ultrazvučni mjerač razine u praksi

Za mjerenje razina tekućine u hidrotehničkom laboratoriju GF-a se uz mjernu iglu koriste ultrazvučni senzori proizvođača Endress+Hauser. Na slici 4.1::12 je prikazan ultrazvučni mjerač razine, model *Prosonic M FMU*.



**Slika 4.1.:12 Ultrazvučni mjerač razine u nastavnom laboratoriju GF-a**

Na sljedećoj slici prikazane su različite mogućnosti praktične primjene ultrazvučnog mjerača razine, kao npr. u otvorenim ili zatvorenim rezervoarima, cisternama, različitim spremnicima s pokretnim vodnim licem, rasutim teretom, itd.

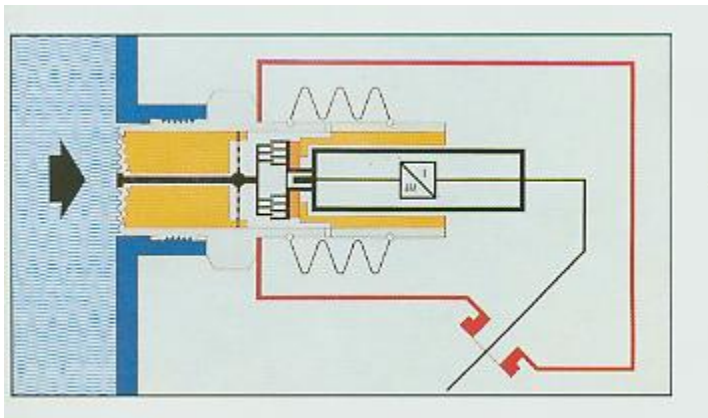
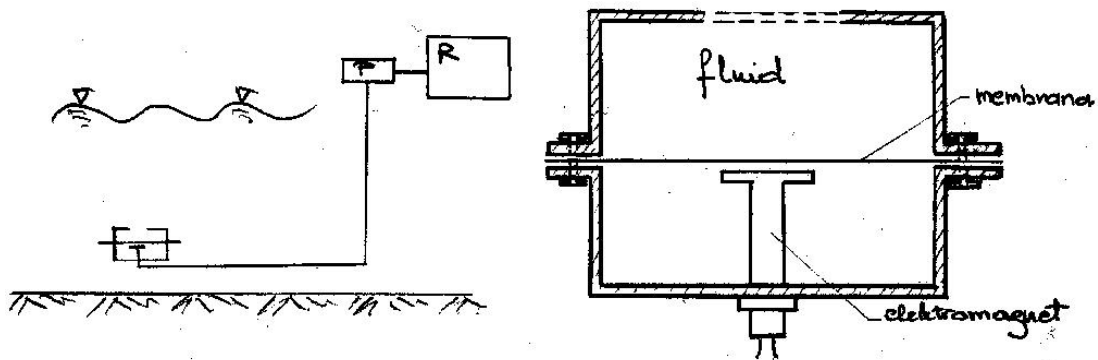


**Slika 4.1.:13 Različite mogućnosti primjene ultrazvučnog mjerača razine**

#### **4.1.6 Limnigraf sa tlačnom sondom**

Mjerenje brzih oscilacija vodostaja može se provesti i pomoću tlakomjera sa membranom. Najviše se upotrebljava za mjerenje morskih valova i pulzacionih vodotoka (mješavine vode i zraka) u laboratoriju.





Slika 4.1::14 Tlakomjer sa membranom za mjerenje razine vode



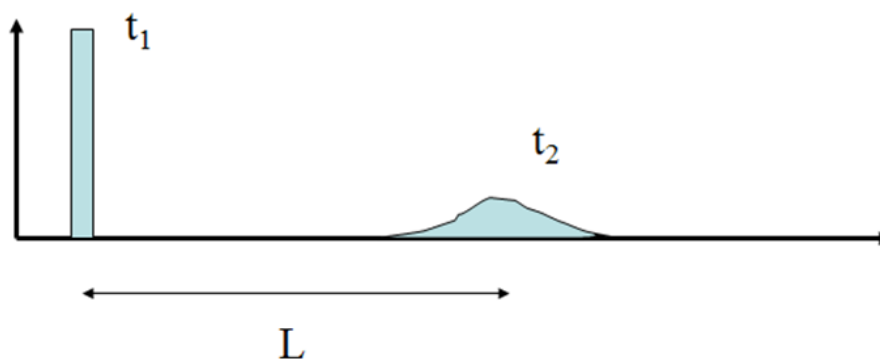
Slika 4.1::15 Limnigraf s tlačnom sondom

Tlačna sonda se uroni u vodotok, a u data logger (računalo) se pohranjuju prikupljeni podaci opromjeni tlaka.

Tlakomjeri su detaljnije opisani u poglavlju o mjerenju tlakova.

## 4.2 Mjerenje brzine

Za mjerenje brzine fluida se najčešće koristi hidrometrijsko krilo koje može biti sa horizontalnom osovinom (Woltman-ovo krilo) ili sa vertikalnom osovinom (Priceovo krilo), Pitot-ova cijev (Pitot-Prandtlova), kalorimetričke metode koje se zasnivaju na odvođenju topline (vruća žica i vrući film) te metode zasnovane na Dopplerovom efektu. Ponekad, u pomanjkanju odgovarajuće mjerne opreme se koristi i metoda mjerenja traserom. Metoda mjerenja brzine traserom se zasniva na stavljanju traseru u tok fluida i mjerenju njegovog napredovanja.



Slika 4.2.:1 Mjerenje brzine toka fluida traserom

Brzina toka se može izračunati pomoću jednadžbe:

$$v = \frac{L}{t_2 - t_1} \quad \dots(4.2.1)$$

### 4.2.1. Hidrometrijsko krilo

Bitni element hidrometrijskog krila je okretni dio (elisa ili vijenac čašica), koji se kada se krilo unese u vodu, okreće pod utjecajem vodene struje. Upotreba hidrometrijskog krila osniva se na pretpostavci da između brzine vodene struje i brzine okretanja ovog okretnog dijela krila postoji određena konstantna ovisnost.



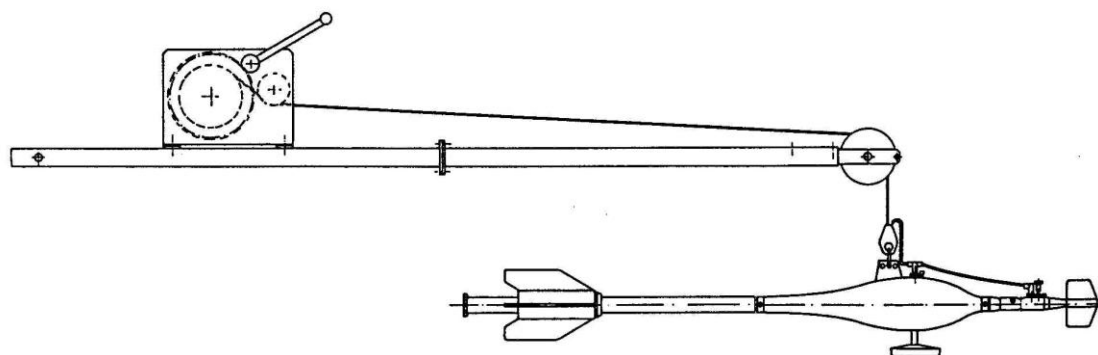
Slika 4.2::2 Hidrometrijsko krilo koje se koristi u laboratorijima i u manjim kanalima

Obzirom na konstrukciju okretnog elementa krila, razlikuju se dva tipa hidrometrijskih krila:

- a) Krilo se elisom koja se okreće oko horizontalne osovine a osovina se pri mjerenju postavlja paralelno sa pravcem vodene struje, i
- b) Krilo sa vijencem čašica koje se okreću oko vertikalne osovine a osovina se pri mjerenju postavlja okomito na vodeni tok.

Prvi tip krila danas u širokoj upotrebi u Europi, Aziji i Africi, konstruirano je R. Woltman (Njemačka) 1795 god. pa se zbog toga često naziva i Woltman-ovo krilo.

Drugi tip, poznat pod imenom Prajsovo krilo, uveo je u Americi 1882 god. W.G. Price, i danas je skoro isključivo u upotrebi u toj zemlji.



Slika 4.2::3 Krilo pričvršćeno na torpedu težine 25 kg

#### Uporedba osobina WOLTMAN-ovog i PRICE-ovog krila

Prajsovo hidrometrijsko krilo je široko primjenjivan, i može se reći, standardni instrument za mjerenje brzina vode u prirodnim tokovima u Sjevernoj Americi, naročito u SAD. S druge

strane, u našoj zemlji, kao uostalom i u čitavoj Europi, u općoj je upotrebi propelerno krilo. Iz ovog razloga nije nekorisno izvršiti jednu opću usporedbu nekih osobina jednog i drugog tipa krila.

- a) Prajsovo krilo je osjetljivije na nepovoljne utjecaje (blizina zida ili drugih krila, pulzacija brzina itd) nego properelno krilo.
- b) Oba krila daju podjednake rezultate u toku sa pravilnim strujanjem. U uvjetima jako izražene turbulencije Prajsovo krilo ima tendenciju da registrira veću brzinu od stvarne, propelerno krilo manju.
- c) Properelno krilo se može upotrebiti za veće brzine
- d) Prajsovo krilo je jednostavnije konstrukcije i robusniji instrument nego propelerno krilo, oštećeni dijelovi se kod ovog krila lakše zamjenjuju a sa njime može rukovati i priučeno osoblje te je iz navedenih razloga ono pogodnije za terenske radove.
- e) Dimenzija efektivnog promjera elise propelernog krila mogu biti znatno manje od Prajsovog krila, što daje prednost prvom krilu prilikom mjerenja brzina vode u blizini zidova cijevi.
- f) Propelerno hidrometrijsko krilo može pri kosom strujanju aproksimativno mjeriti komponentu brzine ( $V \cos \alpha$ ) koja je paralelna osovini krila, dok to nije slučaj sa Prajsovim krilom.

Kao što se iz prethodnog izlaganja vidi, propelerno krilo ima nesumnjivih prednosti nad Prajsovim krilom; to je univerzalniji i savršeniji instrument. Međutim, kad su u pitanju rutinska mjerenja na prirodnim tokovima, teorijske prednosti properelnog krila nemaju praktičnog značaja; za ovakova mjerenja izgleda da je Prajsovo krilo najpogodnije.

S obzirom da se u našoj zemlji za mjerenje proticaja vode koristi skoro isključivo propelerno krilo, u daljnjem izlaganju posvetit će mu se veća pažnja. Prajsovo se češće koristi za mjerenje brzine vjetra.

### Teorija hidrometrijskog krila

Oblik i koncepcija suvremenih tipova hidrometrijskih krila su u prvom redu rezultat dugogodišnjih iskustava do kojih se došlo tokom brojnih mjerenja izvršenih u prirodi pod različitim uvjetima. Eksperimentima i teoretskim razmatranjima poboljšavane su osobine krila, te se time dobilo kako u pogledu dobrog funkcioniranja mehanizma krila pri radu, tako i u točnosti samih mjerenja.

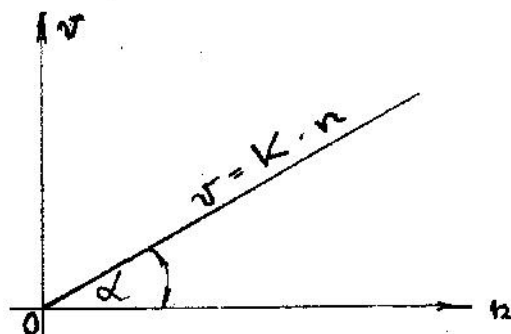
#### *Opća jednadžba hidrometrijskog krila*

U idealnoj tekućini jednadžba idealne elise imala bi oblik:

$$v = K n \quad \dots(4.2.2)$$

gdje je :  $v$  brzina vodene struje u (m/sec)  
 $n$  broj okretaja elise u (sec)  
 $K$  vrijednost geometrijskog koraka elise, kod elisa sa površinama izvedenim u obliku vijka, a kod elise sa drugačije izvedenim površinama, jedan odgovarajući srednji korak.

Ako se jednadžba 4.2.2 predstavi grafički, vrijednost za  $K$  odgovarala bi tangensu kuta pravca koji prolazi iz koordinatnog početka (sl. 4.2.:4).



Slika 4.2.:4 Karakteristika idealnog krila

Međutim, kako se za okretanje elise troši izvjesna energija koja se dobiva na račun kinetičke energije vode, elisa će u odnosu na vodenu struju ponešto zaostajati, odnosno imati nešto manji broj okretaja nego u jednadžbi 4.2.2. Sila kojom vodena struja djeluje na elisu jednaka je produktu iz sekundne mase i razlici gore spomenutih brzina, odnosno proporcionalna produktu  $v$  i  $(v - Kn)$ . Ako se sa  $A$  označi faktor proporcionalnosti koji ovisi od veličine i oblika elise i specifične težine tekućine, onda se okretni moment kojim tekućina djeluje na elisu može izraziti na slijedeći način:

$$M = A \cdot v(v - Kn) \quad \dots (4.2.3)$$

Sile otpora, koje se suprotstavljaju okretanju elise, mogu se podijeliti na hidrauličke i mehaničke otpore.

Hidraulički otpori nastaju uslijed trenja tekućine o površine elise i vrtloženja na ivicama i sastavima elise, zatim uslijed remećenja strujanja oko tijela krila a naročito oko uređaja na koje je krilo pričvršćeno (motka, torpedo). Stvoreni uspor djeluje u granicama obima elise i ponešto povećava njen obim. Kako se na granici uspora mora povećavati brzina vodene struje, i ovaj se utjecaj mora uzeti u obzir.

Može se uzeti da su unaprijed navedeni utjecaji proporcionalni drugom, i djelomično prvom stupnju brzine, te bi se mogli obuhvatiti jednim izrazom na slijedeći način:

$$M_h = v \sum B + v^2 \sum C \quad \dots (4.2.4)$$

gdje je znak "suma" uzet da bi se naglasilo da je u pitanju više utjecaja.

Daljnji hidraulički otpori u unutrašnjosti krila nastaju uslijed trenja tekućine sa rotirajućim djelovima krila. Oni su proporcionalni sa prvim stupnjem broja okretanja  $n$ .

Mehanički otpori sastoje se od otpora trenja u ležištima i od otpora u električnom kontaktnom uređaju. Može se smatrati da je trenje u ležištima, koje djeluje u pravcu aksijalnog pritiska, proporcionalno sa preuzetom energijom, dakle proporcionalno izrazu 4.2.3. Vrijednost sile trenja u ležištima u pravcu radijalnog tlaka sa porastom broja okretaja najprije opada, zatim dostiže svoj minimum, da bi pri daljnjem porastu broja okretaja počela rasti. Otpor u kontaktnoj kutiji utoliko više dolazi do izražaja ukoliko je manji moment inercije elise.

Ako se uzmu u obzir i hidraulički otpori u unutrašnjosti krila, navedeni utjecaji mogu se izraziti:

$$M_m = D \frac{v}{v - a' - k'n} \quad \dots\dots 4.2.5$$

gdje su:  $D$ ,  $a'$  i  $k'$  konstante koje se mogu utvrditi pokusima. Između okretnog momenta i momenta otpora mora postojati ravnoteža. Ovo se može izraziti jednadžbom:

$$A \cdot v - Kn = v \sum B + v^2 \sum C + D \frac{v}{v - a' - k'n} \quad \dots\dots 4.2.6$$

ako se cijeli izraz podijeli sa  $v$  i uredi, dobije se:

$$v = \frac{\sum B}{A - \sum C} + \frac{A \cdot K}{A - \sum C} \cdot n + \frac{D}{A - \sum C} \cdot \frac{1}{v - a' - k'n} \quad \dots\dots 4.2.7$$

ako se uvrsti:

$$\frac{\sum B}{A - \sum C} = a \quad ; \quad \frac{A \cdot K}{A - \sum C} = k \quad ; \quad \frac{D}{A - \sum C} = c^2$$

dobiti će se:

$$v = a + k \cdot n + \frac{c^2}{v - a' - k'n} \quad \dots\dots 4.2.8$$

što predstavlja opću jednadžbu hidrometrijskog krila u implicitnoj formi. Ako se jednadžba 4.2.8 riješi po  $n$  ili  $v$ , imati ćemo:

$$n = \frac{v - a}{2k} + \frac{v - a'}{2k'} + \sqrt{\left(\frac{v - a}{2k} - \frac{v - a'}{2k'}\right)^2 + \frac{c^2}{k \cdot k'}} \quad \dots\dots 4.2.9$$

ili

$$v = \frac{a + kn}{2} + \frac{a' + k'n}{2} + \sqrt{\left(\frac{a + kn}{2} - \frac{a' + k'n}{2}\right)^2 + c^2} \quad \dots\dots 4.2.10$$

jednadžba 4.2.10 je opća jednadžba hidrometrijskog krila u eksplicitnoj formi. Za kasnije analize, jednadžbu 4.2.10 pogodnije je napisati u slijedećem obliku:

$$v = \frac{a+a'}{2} + \frac{k+k'}{2}n + \sqrt{\left(\frac{a-a'}{2} + \frac{k-k'}{2}n\right)^2 + c^2} \quad \dots 4.2.11$$

Jednadžba 4.2.11 sadrži pet međusobno nezavisnih konstanti:  $a$ ,  $a'$ ,  $k$ ,  $k'$ , i  $c$  koji se (jedino i najpouzdanije) mogu odrediti iz krivulje tariranja (baždarenja).

Geometrijsko značenje

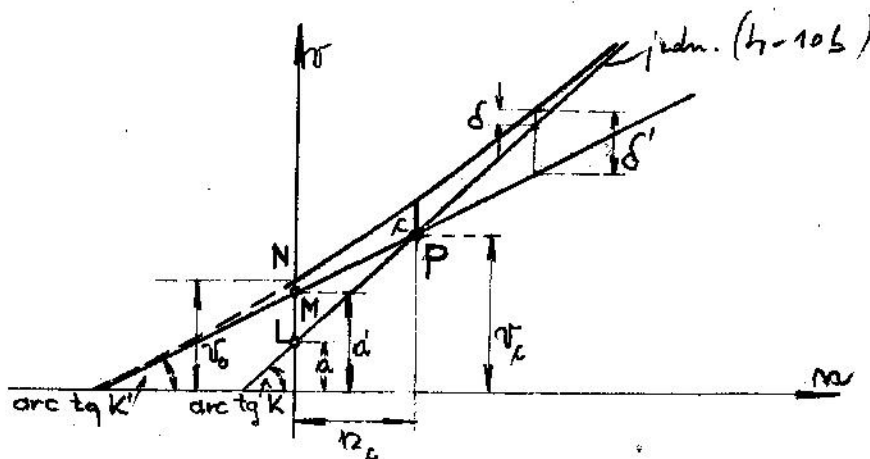
ako se jednadžba 4.2.8 napiše u slijedećem obliku:

$$\sqrt{a-kn} - \sqrt{a'-k'n} = c^2 \quad \dots\dots 4.2.8a$$

te se na jedan koordinatni sistem nanesu vrijednosti za  $n$  kao apcise a za  $v$  kao ordinate, kao što je to učinjeno na slici 4.2.5 vidjeti će se odmah da jednadžba 4.2.8a pretpostavlja hiperbolu sa asimptotama:

$$v = a + kn \quad \dots\dots 4.2.12$$

$$v = a' + k'n \quad \dots\dots 4.2.12a$$



Slika 4.2.5 Geometrijski prikaz opće jednadžbe hidrometrijskog krila

Asimptote sijeku na  $v$  osi veličine  $a$  i  $a'$  i imaju nagib prema apcisi  $k$  odnosno  $k'$ . Srednja točka hiperbole, čija druga grana zbog toga što nema fizikalnog značenja nije nacrtana, odnosno točka presjeka asimptota  $P$ , ima koordinate  $n_c$  i  $v_c$ . Ove vrijednosti se mogu naći iz navedenih jednadžbi eliminirajući naizmjenično  $v$  odnosno  $n$ :

$$n_c = \frac{a'-a}{k-k'} \quad \dots 4.2.13$$

$$v_c = \frac{a'k - ak'}{k-k'} \quad \dots 4.2.14$$

ako se sa  $v_o$  obilježi veličina koju odsjeca krivulja na  $v -$  osi, što bi ustvari predstavljalo teoretsku brzinu pri kojoj se elisa počinje okretati, i u jednadžbi 4.2.8a zamjeni  $n = 0$ , dobije se:

$$c^2 = (v_o - a)^2 - (v_o - a')^2 \quad \dots 4.2.15$$

a iz jednadžbe 4.2.11:

$$v_o = \frac{a+a'}{2} + \sqrt{\left(\frac{a-a'}{2}\right)^2 + c^2} \quad \dots 4.2.16$$

Iz slike 4.2.:5 se jasno vidi da se hiperbola utoliko više približuje asimptotama ukoliko je manji  $c$ . Za  $c = 0$  hiperbola će se potpuno poklopiti sa asimptotama i u tom slučaju će zavisnost  $v = f(n)$  hidrometrijskog krila i teoretski biti izražena sa dva pravca koji se međusobno sijeku, kako se to obično radi pojednostavljenja najčešće čini prilikom praktičnog predstavljanja krivulje baždarenja.

Ako je  $a'$  jednako ili manje od  $a$ , tada će točka presjecanja dvaju pravaca prema jednadžbi 4.2.13 pasti na ordinatnu os, odnosno na njenu lijevu stranu, te u tom slučaju fizičkog značenja ima samo jedan pravac.

Ako se udaljenost krivulje od asimptote, tj. razlike ordinata između krivulje i jedne, odnosno druge asimptote obilježe sa  $\delta$  i  $\delta'$  biti će:

$$\delta = v - a - kn \quad \text{i} \quad \delta' = v - a' - k'n$$

Ako gornje izraze zamjenimo u jednadžbu 4.2.8a ona će dobiti slijedeći oblik:

$$\delta \delta' = c^2 \quad \dots 4.2.17$$

što je analitički izraz za jednu simetričnu hiperbolu sa apscisom, odnosno ordinatom  $\delta$  i  $\delta'$  i polumjerom  $c$ . Praktičnog značaja ima samo razmak krivulje od glavne asimptote, pa je podesno jednadžbu 4.2.8a napisati u slijedećem obliku:

$$\delta \left[ \left( \frac{a-a'}{2} + \frac{k-k'}{2} n \right) - \left( \frac{a-a'}{2} - \frac{k-k'}{2} n \right) \right] = c^2 \quad \dots 4.2.18$$

ako se gornja jednadžba riješi po  $\delta$  dobije se:

$$\delta = \sqrt{\left( \frac{a-a'}{2} - \frac{k-k'}{2} n \right)^2 + c^2} - \left( \frac{a-a'}{2} + \frac{k-k'}{2} n \right) \quad \dots 4.2.19$$

pomoću jednadžbe 4.2.19 mogu se izračunati pojedine točke krivulje hidrometrijskog krila, kada su poznate konstante dobivene baždarenjem krila. Za oblik krivulje hidrometrijskog krila važna je njena početna tangenta, tj. tangenta u točki  $n = 0$ ;  $v = v_o$ . Njena jednadžba je određena s jedne strane spomenutom točkom, s druge nagibom prema  $n -$  osi. Diferenciranjem opće jednadžbe hidrometrijskog krila 4.2.11 za  $n = 0$ , koristeći dalje jednadžbu 4.2.16, dolazi se do jednadžbe početne tangente:

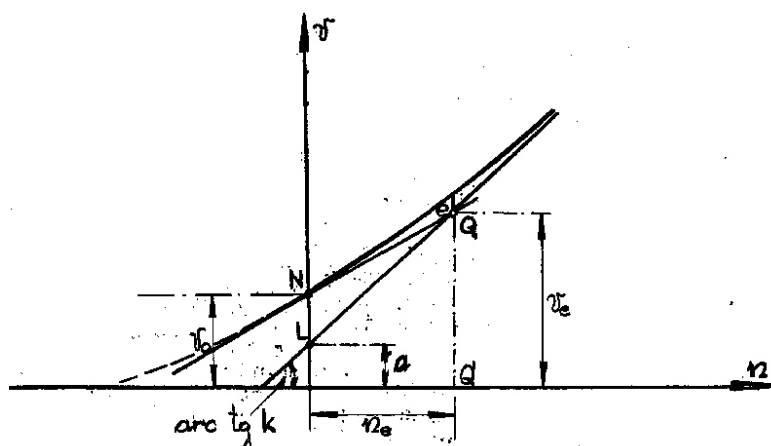


$$v = v_o + \frac{(v_o - a'k + (v_o - a)k')}{(v_o - a'k) + (v_o - a)k'} n \quad \dots 4.2.20$$

koordinate točke presjeka tangente i glavne asimptote  $Q(n_e, v_e)$  mogu se naći eliminiranjem  $v$ , odnosno  $n$ , iz 4.2.20 i 4.2.12a:

$$n_e = \frac{2v_o - a' - a}{k - k'} \quad \dots 4.2.21$$

$$v_e = \frac{2v_o k - a'k - ak'}{k - k'} \quad \dots 4.2.22$$



Slika 4.2.:6 – Krivulja hidrometrijskog krila sa povučenom tangentom u točki  $n = 0$  i  $v = v_o$ .

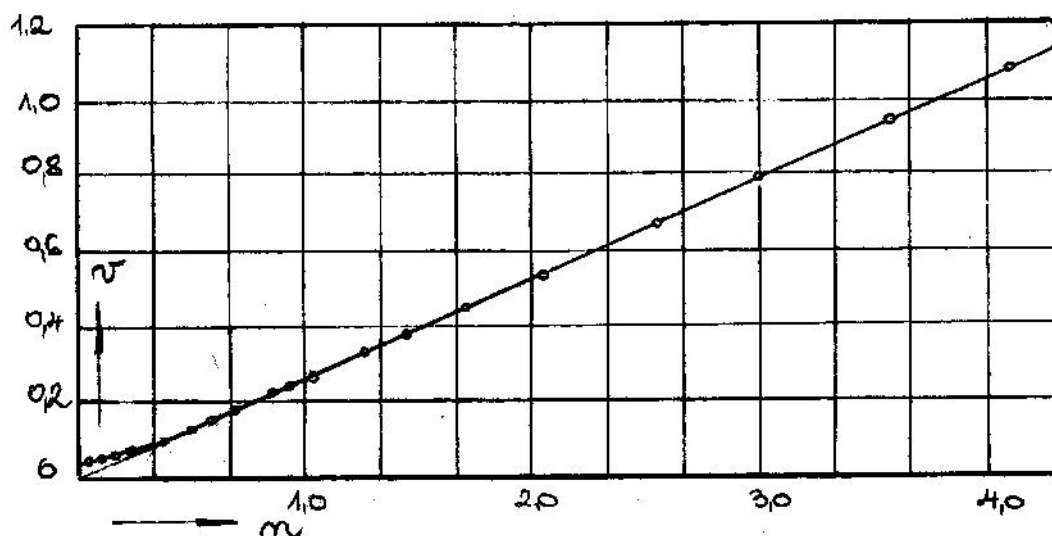
Ako se u jednadžbu 4.2.19 unese vrijednost za  $n_e$ , dobije se razlika koordinata između krivulje i točke presjeka glavne asimptote sa početnom tangentom:

$$e = \sqrt{(v_o - a'k)^2 + c^2} - (v_o - a'k) \quad \dots 4.2.23$$

Ovdje “ $e$ ” ne ovisi od  $k$  i  $k'$  već samo od  $v_o$ ,  $a'$  i  $c$  odnosno, imajući u vidu jednadžbu 4.2.15 samo od  $v_o$ ,  $a'$  i  $a$ . Ako se jednadžba 4.2.23 riješi po  $a'$  i pomoću 4.2.15 eliminira  $c^2$ , biti će:

$$a' = v_o - \frac{e^2}{v_o - a - 2e} \quad \dots 4.2.24$$

Na slici 4.2.:7 je prikazana jedna baždarna krivulja za hidrometrijsko krilo. Kao što se vidi iz slike, krivulja baždarenja predstavljena je jednom veoma blagom hiperbolom. Najveće apsolutno odstupanje između krivulje baždarenja i njenih asimptota je kod točke presjeka asimptote i ono iznosi 15,4 mm/sec što odgovara relativnoj greški od oko 15%. Za brzinu od  $v = 0,2$  m/sec ovo odstupanje je reda 2,5%, dok je za brzinu od 0,3 m/sec relativno odstupanje manje od 1% da bi se za veće brzine praktično svelo na nulu.



Slika 4.2::7 Baždarna krivulja za hidrometrijsko krilo

Ako se u opću jednadžbu hidrometrijskog krila zamjeni vrijednost  $n = 1,0/\text{sec}$ , dobije se  $v = 0,2770 \text{ m/sec}$ .

Faktori koji utječu na točnost pri mjerenju hidrometrijskim krilom

a) Načini pričvršćivanja krila

Prilikom upotrebe hidrometrijskog krila, ono se uvijek mora pričvrstiti na neki držač čiji oblik i dimenzije zavise od uvjeta u kojima se obavljaju mjerenja. Imajući u vidu ovu okolnost, neophodno je poznavati utjecaj sistema za pričvršćenje na rad hidrometrijskog krila, odnosno na vrijednost njegovih konstanti. Ovdje se postavljaju dva osnovna pitanja: 1) u kojoj mjeri utječe držač na vrijednost konstanti hidrometrijskog krila i 2) kolika se greška unosi ako se način fiksiranja krila prilikom mjerenja razlikuje od onog pri kojem je krilo tarirano.

U donjoj tablici dat je pregled relativnih odstupanja krivulja dobivenih tariranjem krila pri raznim načinima pričvršćenja, u odnosu na krivulju koja je rezultat tariranja krila na standardnoj motki (78 x 35).

Brzine m/sec	0,5	1,0	1,5	2,0	4,0	4,5
Motka Ø 20 mm	0	0	0	0		
Torpedo od 25 kg	0	0	0	0	1%	0,67
Torpedo od 75 kg	2,0%	1,0%	0,67	0,5	1,8%	1,2%

Tabela 4.1 Relativne greške za razne načine učvršćivanja krila

Kao što se vidi, za male brzine krivulje dobivene tariranjem krila na motki 78 x 35, okrugloj motki Ø 20 mm i torpedu manjih dimenzija se praktično poklapaju, dok su razlike u domeni većih brzina za ovaj torpedo nešto veća. Međutim razlike krivulje tariranja za krilo na

torpedo od 75 kg, su znatne, glavna konstanta “ $k$ ” krila je u ovim slučaju za skoro 3% veća od kutnog koeficijenta za krilo na motki 78 x 35.

Na osnovu rezultata gore navedenih pokusa, dolazi se do zaključka da uspor uslijed prisustva uređaja za pročišćavanje krila koči elise što se vidi u povećanju vrijednosti glavne konstante  $k$ . korisno je prema tome primjenjivati držače krila što je moguće manjih dimenzija, pogodnih oblika (izbjegavati na primjer okrugle presjeke koji uzrokuju virove i vibracije motke).

#### b) koso strujanje u odnosu na osovinu krila

Kada se pomoću hidrometrijskog krila vrši mjerenje proticaja vode jednog toka, brzine vode mjere se u poprečnom presjeku koji treba biti okomit u odnosu na smjer toka. U jednadžbi krila:

$$v_o = a_o + k_o n \quad \dots 4.2.25$$

brzini vode  $v_o$  će odgovarati broju okretaja elise  $n$ , pod uvjetom da je os krila paralelna sa smjerom strujnica u danoj točki. Ako u izvjesnom dijelu poprečnog presjeka strujnice vode zaklapaju neki kut  $\alpha$  sa okomicom  $N$  na presjek, broj okretaja  $n_\alpha$  biti će manji od broja okretaja  $n$  koji odgovara stvarnoj brzini strujnica  $v_o$ ; vrijednost za  $n_\alpha$  utoliko manja, ukoliko je kut  $\alpha$  veći (slika 4.2.8). Elementarni protok vode kroz površinu  $dA$  mjernog presjeka je:

$$q = dA \cdot v_o \cdot \cos \alpha \quad \dots 4.2.26$$

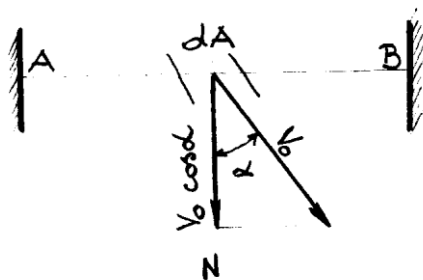
bilo bi dakle poželjno da broj okretaja elise  $n_\alpha$  ima takvu vrijednost da kada se unese u jednadžbu krila daje brzinu:

$$v_\alpha = a_o + k_o \cdot n_\alpha \quad \dots 4.2.27$$

koja je jednaka komponenti  $v_o \cos \alpha$ , odnosno:

$$v_\alpha = v_o \cdot \cos \alpha \quad \dots 4.2.28$$

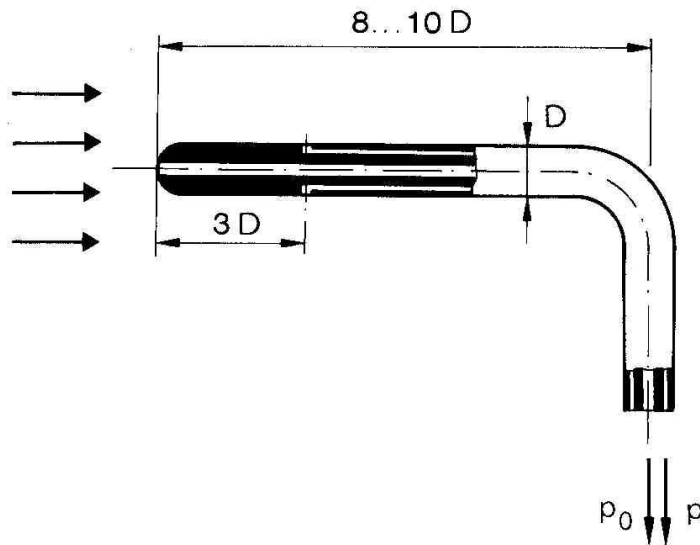
ako bi hidrometrijsko krilo slijedilo “kosinusni zakon” i automatski registriralo komponentu brzine, dobilo bi se mnogo u preciznosti i ekonomičnosti pri mjerenju protjecanja vode. Međutim, pokusima je ustanovljeno da krilo se normalno upotrebljavanim elisama ne slijedi zakon kosinusa i od ovog odstupa u toliko više, u koliko je kut  $\alpha$  veći.



Slika 4.2.:8 Koso strujanje

### 4.2.2 Pitot-ova cijevčica

Brzinu toka fluida može se provoditi mjerenjem dinamičkog tlaka pomoću tlačne cijevi. Još početkom XVIII stoljeću je na taj način mjerio brzinu toka u rijeci Seini francuski inženjer Henri Pitot po kome je i dobila naziv Pitotova cijev.



Slika. 4.2.:1 Princip rada Prandtl-Pitotove cijevi

Pitotova cijev se sastoji od cilindričnog tijela, koje se postavlja okomito na struju protjecajnog fluida (sl. 4.2.:1). Nailaskom toka na tijelo Pitotove cijevi brzina fluida pada na nulu, ali zato će pretvaranjem kinetičke u potencijalnu energiju porasti postojeći statički tlak ( $P_0$ ) za vrijednost  $\Delta p$  te će poprimiti vrijednost  $p$ .

Da bi se mogao izmjeriti hidrodinamička komponenta tlaka  $\Delta p$  u sistemima pod tlakom, na bočnoj strani Prandtl-Pitotove cijevi nalazi se referentni otvor. Priključivanjem diferencijalnog manometra na mjerne priključke se mjeri tlačna razlika  $\Delta p$ , koja je teoretski jednaka dinamičkom tlaku, a određuje se pomoću jednadžbe:

$$\Delta p = k_c \cdot \rho v^2 / 2$$

ovdje su:

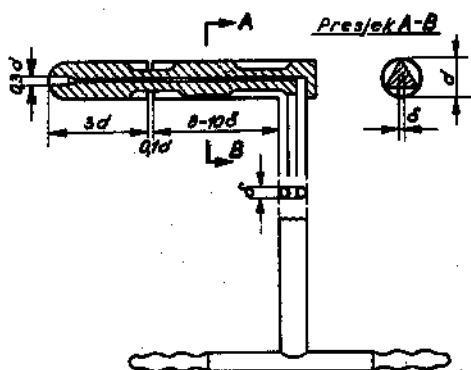
- $v$  = brzina strujanja na mjestu mjernog otvora;
- $\rho$  = gustoća fluida;
- $k_c$  = konstanta Pitotove cijevi.

Uzimajući ovo u obzir, protok se određuje pomoću jednadžbe:

$$Q = k_v \cdot k_c \cdot \pi D^2 / 4 \cdot \sqrt{2\Delta p / \rho}$$

Sa  $k_v = \bar{v} / v$  je označen omjer srednje brzine strujanja fluida kroz cijeli presjek cjevovoda, prema brzini  $v$  na mjestu lokacije mjernog otvora.

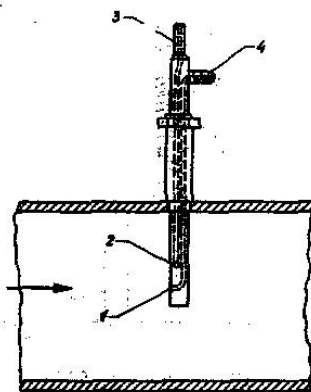
Za laboratorijska mjerenja konstruirana je posebna Pitotova cijev (slika 4.2.:2), promjer tijela cijevi se kreće najčešće od 4 do 12 mm. Osim toga, u praksi se susreću cijevi s polukružnom zaobljenom »udarnom« čeonom površinom s polueliptičnom ili konično izvedenim prednjim dijelom cijevi.



Slika 4.2.:2 Laboratorijska Prandtl - Pitotova cijev

Tlačna razlika koja se stvara na priključnim otvorima Prandtl-Pitotove cijevi kvadratna je funkcija protoka. Relacija je ista kao i kod mjernih prigušnica, samo što su ovdje drugi koeficijenti, a vrijednost tlačne razlike je relativno manja. Tako na primjer kad se mjeri protok zraka čiji je tlak blizu atmosferskom, pri brzini strujanja  $v = 1$  m/s, tlačna je razlika  $\Delta p = 0,68$  mm vodnog stupca, dok je pri brzini od  $v = 5$  m/s,  $\Delta p = 1,7$  mm a pri brzini 10 m/s,  $\Delta p = 6,8$  mm. vodnog stupca.

Industrijske izvedbe Pitotove cijevi daju veću tlačnu razliku od laboratorijskih konstrukcija. Koeficijent  $k_c$  kreće se kod prvih u granicama od 0,7 do 0,8, dok je kod laboratorijskih L-cijevi  $k_c=1$ . Zbog toga se industrijske Pitotove cijevi moraju baždariti, a vrijednost koeficijenta  $k_c$  je definiran od strane proizvođača.



Slika 4.2.:3 Industrijska Prandtl-Pitot-cijev

Upotreba Pitotovih cijevi u industriji je ograničena. Najčešće služe za povremena test-mjerenja protoka.

Ako se želi povećati točnosti mjerenja, potrebno je mjeriti brzinu u svim točkama mjernog presjeka cjevovoda. Obično se mjerni otvor industrijskih Pitotovih cijevi postavlja u os cjevovoda ili na udaljenosti  $1/3 D$  od stjenke cjevovoda. Pri tome se postiže tolerancija od 3 do 5 %. Postavljanjem mjernog otvora L-cijevi na  $0,762 D/2$  od središta mjernog presjeka cjevovoda može se postići toleranciju od 0,5 %.

Točnost mjerenja osjetljiva je na prepreke koje ometaju laminarnost strujanja fluida. Radi toga je pri točnijim mjerenjima ispred mjernog otvora potreban ravan dio cjevovoda u dužini od  $50 D$ . da se tok laminira može se postaviti i laminator.

Danas se Pitotove cijevi koriste za mjerenje brzine kretanja vozila a na slici 4.2::4 je prikazana Pitotova cijevčica ugrađena na Airbus A 380 koja služi za mjerenje brzine kretanja aviona.

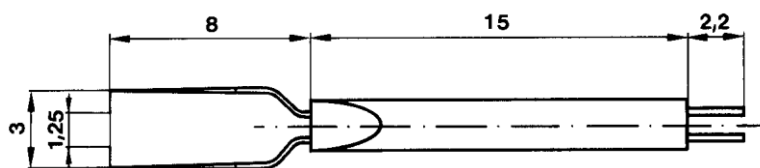


Slika 4.2::4 Pitot-ova cjevčica ugrađena na Airbus A 380

#### 4.2.3 Kalorimetrička mjerila brzina

Kalorimetričko mjerenje brzina (a time i protoka) zasniva se na efektima prijelaza topline sa zagrijanog tijela na protjecajni fluid. Intenzitet tih efekata ovisi o brzini protjecanja datog fluida i količini topline utrošene na zagrijavanje.

Od kalorimetričkih mjerila protoka najčešće se koriste vruća žica (užarena žica) i vrući film. Mjerni element kod vruće žice je tanka ( $2-5\mu\text{m}$ ), električno grijana žica sa otporom promjenjivim u ovisnosti o temperaturi te Winstonov most. Ovaj instrument je prikladan za mjerenje turbulencije zbog svoje male dimenzije. Osim toga se zagrijana na  $150^{\circ}\text{C}$  pod utjecajem fluida koji protječe brzo hladi odnosno brzo reagira.



Slika 4.2.:5 Primjer vruće žice (dimenzije u mm)

Zbog malih dimenzija ne stvara distorziju toka.

Razlikuje se dva principa rada:

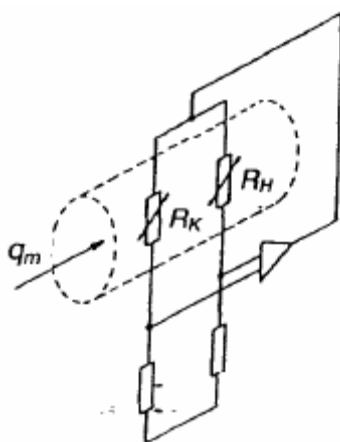
- konstantna temperatura (mijenja se protok struje da bi temperatura bila konstantna)
- konstantan protok struje (hlađenjem se mijenja otpor)

Za mjerenje brzine u vodi i zagađenom zraku je povoljniji film.

Na slici 4.2.:6 je prikazan princip rada anemometra zasnovanog na vrućoj žici. Kad se princip rada zasniva na konstantnoj temperaturi (CTD postupak - eng. Constant Temperature Difference) senzor  $R_K$  mjeri temperaturu protočne tvari, a senzor  $R_H$  se zagrijava tako da je njegova temperatura stalno za istu razliku veća od temperature prvog senzora. Mjera za protok je u ovom slučaju energija potrebna za zagrijavanje drugog senzora, kako bi se temperaturna razlika među sensorima održala konstantnom.

Ovaj tip mjerača protoka predviđen je za protoke između 15 i 950 kg/h, radi s točnošću od  $\pm 4\%$  i uz temperaturu okoline između  $-30^\circ\text{C}$  do  $110^\circ\text{C}$ .

**Princip rada anemometra zasnovanog na konstantnom protoku električne energije (CP postupak -eng. Constant Power)** se zasniva na principu da jedan senzor mjeri temperaturu protočne tvari ( $R_K$  na slici) i služi za kompenzaciju utjecaja temperature, dok se drugi senzor ( $R_H$  na slici) zagrijava protjecanjem struje i zatim hladi s okolnom tvari. Brzina hlađenja ovisi o brzini protočne tvari. Električna energija, koja se u otporniku  $R_H$  pretvara u toplinu, drži se konstantnom. Maseni protok se zatim određuje iz razlike temperature obaju senzora, jer joj je razmjernan. Jačina struje kroz  $R_H$  je konstantna.



Slika 4.2.:6 Princip rada vruće žice

#### 4.2.4 Optička mjerenja

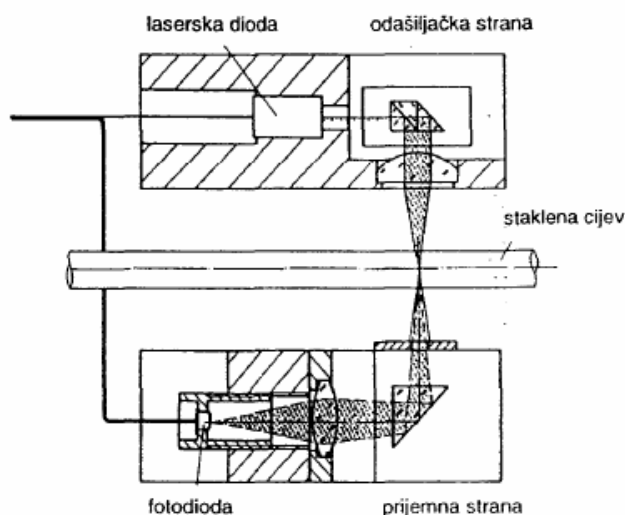
Opisati će se dvije metode za precizno mjerenje brzine protjecanja fluida: mjerenje brzine na temelju Dopplerovog efekta upotrebom laserskog Doppler brzinomjera (Laser Doppler Velocimetry – LDV ili Laser Doppler Anemometer - LDA) i mjerenje brzine fotogramom čestica (Particle Image Velocimetry ili PIV).

Optičke metode, zasnovane na upotrebi koherentnog svjetlosnog izvora (lasera), te kompjutorske opreme za dobivanje i obradu velikog broja podataka, u prednosti su pred klasičnim metodama (Pitotova cijev, prigušnica, mjerna krilca, vruća žica) jer su neinvazivne, tj. ne remete tok umetanjem mjerne sonde. Ovako dobiveni rezultati su vrlo pouzdani i osim toga moguća su mjerenja kompleksnog gibanja u različitim postavama eksperimenta ili zahtjevnijih praktičnih aplikacija. Za uspješnu primjenu optičkih metoda i postupaka za dobivanje podataka o brzini protjecanja potrebna je adekvatna vizualizacija toka. Postupak vizualizacije obuhvaća dvije radnje:

- osvjetljavanje toka jakim svjetlosnim izvorom
- ubacivanje sitnih čestica koje imaju svojstvo da uspješno prate promjene toka tekućine ili plina, dakle da ne izazivaju nikakve poremećaje i da imaju sposobnost reflektiranja svjetla (da bi se omogućio fotografski zapis i daljnja obrada tako dobivenih podataka).

#### LDV postupak mjerenja brzine fluida

LDV mjeri brzinu strujanja fluida u mjernom volumenu (mjernoj točki) u jednom trenutku, tj. određuje se trenutna brzina fluida u jednoj točki. Zasniva se na Dopplerovom efektu promjene valne duljine kao posljedica različitih brzina.

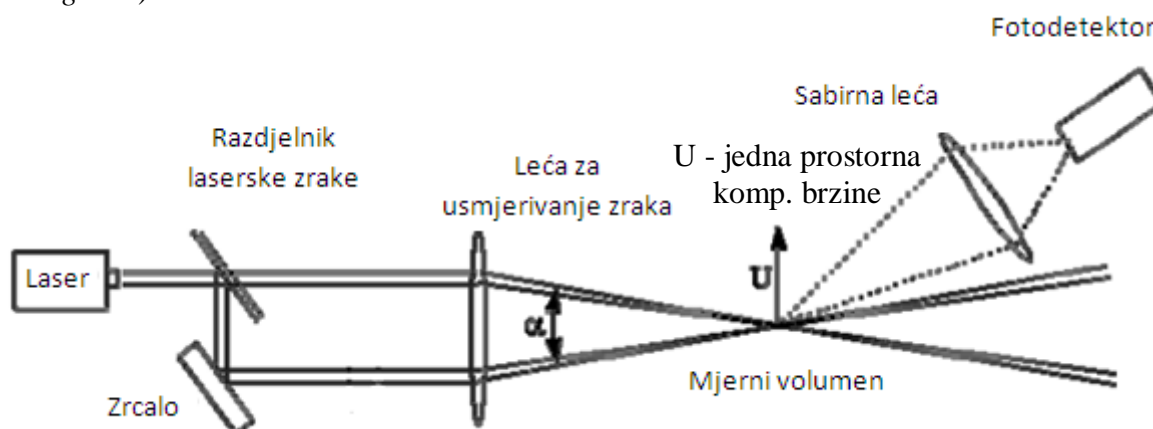


Slika 4.2::7 Princip rada LDV uređaja

Nedostatak je da se LDV-om mogu mjeriti brzine strujanja samo transparentnih medija za zrake laserskog svjetla. Jednokomponentni sustav s dvije laserske zrake (slika 4.2::8) mjeri jednu komponentu brzine, a dvije laserske zrake su istig intenziteta. Iz lasera zraka (eng. *laser beam*) pada na polurefleksni razdjelnik svjetlosne zrake (eng. *beam splitter*) i na njemu



se zraka dijeli na dvije zrake tako što dio svjetlosti prolazi kroz razdjelnik, a dio se reflektira na zrcalo (eng. *mirror*) i usmjerava na leću (eng. *sending lens*) koja zrake svjetlosti fokusira u mjerni volumen. Iz mjernog volumena dio svetlosti se raspršuje i preko sabirne leće (eng. *reciving lens*) i fokusira u fotodetektoru.

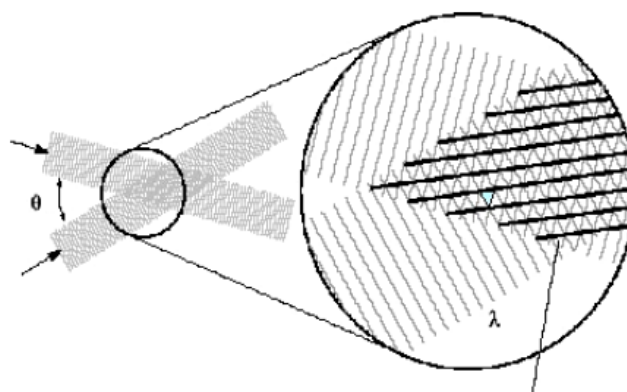


Slika 4.2::8 Shema LDV uređaja s osnovnim elementima

Unutar područja mjernog volumena gdje se sijeku dvije laserske zrake svjetlosti, pojavljuju se svijetle i tamne pruge interferencije. Samo mjerenje brzine strujanja vrši se tako da sitne čestice nošene strujom fluida čiju brzinu mjerimo prolaze kroz svijetle i tamne pruge u mjernom volumenu i dio svjetlosti raspršuju preko sabirne leće na fotodetektor. Frekvencija raspršivanja svjetla koje preko sabirne leće pada na fotodetektor proporcionalna je brzini strujanja fluida unutar mjernog volumena.

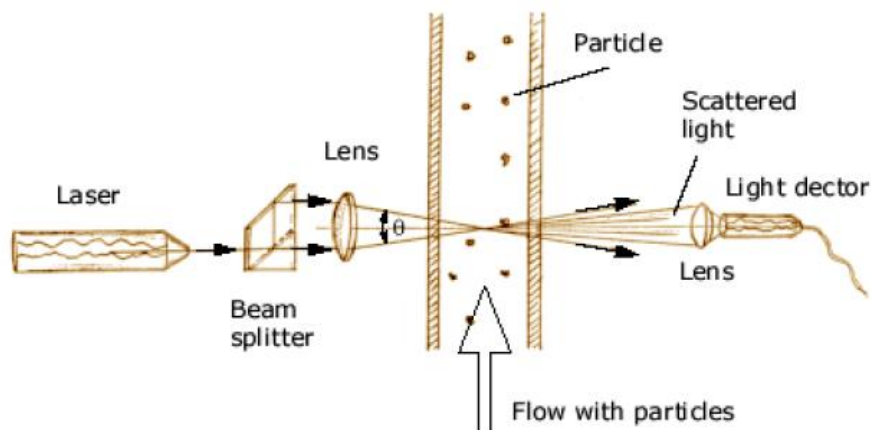
Širina svijetlih i tamnih pruga ovisi o valnoj duljini svjetlosnih zraka  $\lambda$  i kutu  $\theta$  pod kojim se zrake svjetlosti sijeku (slika 4.2::9). Na mjestima gdje valovi obje svjetlosne zrake imaju maksimum i istog su predznaka intenzitet svjetlosnih zraka se superponira i na tim mjestima se pojavljuju svijetle pruge interferencije. Na mjestima gdje valne duljine imaju suprotan predznak pojavljuju se tamne pruge interferencije. Širina svijetlih i tamnih pruga interferencije iznosi:

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta / 2}$$



Slika 4.2::9 Interferencijske pruge koje nastaju presjecanj Interferencijske pruge

Da bi se moglo provesti mjerenje, u fluidu moraju biti prisutne sitne čestice (particles). Važno je napomenuti da čestice moraju biti toliko male da besprijekorno prate struju fluida tj. da njihove inercijalne sile ne utječu na putanju strujanja samog fluida. Čestice se moraju ponašati kao i sam fluid u promjenama smjera i intenziteta gibanja. Dovoljno male čestice smatraju se čestice promjera do  $1\ \mu\text{m}$ . U vodi se takve čestice nalaze prirodno same po sebi, ali se moraju posebno dodavati u struju zraka. Materijal koji se koristi za čestice je lateks (lateks bojila), voda ili ulje (slika 4.2::10).



Slika 4.2::10 Za mjerenje brzine potrebne su čestice koje reflektiraju svjetlost

Svjetlo raspršeno kroz čestice je fokusirano upotrebom sabirne leće na fotodetektor, najčešće na fotomultiplikator (*eng. PhotoMultiplier*) tj. PM cijev. PM cijev se sastoji od komponenata za pojačavanje signala koji su se u LDV pokazali vrlo pogodnima.

Bez obzira na PM cijev, detekcija svjetla raspršenog sa čestice promjera  $1\ \mu\text{m}$  nije jednostavan zadatak, stoga je bitno imati osjećaj za faktore koji utječu na magnitudu mjernog signala kao što su:

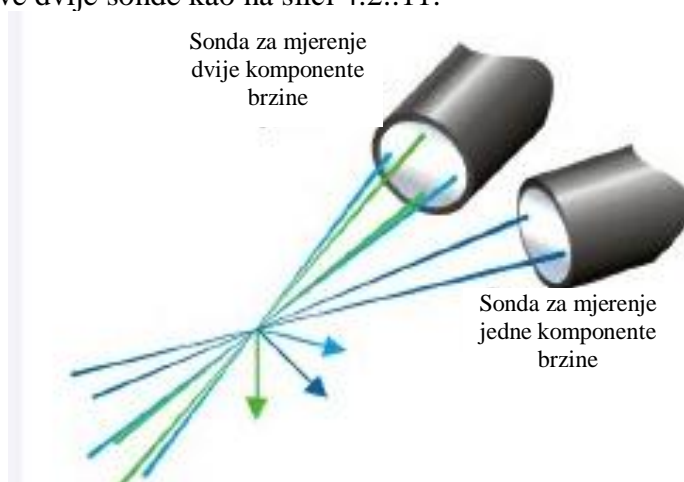
1. *Fokusiranje laserskih zraka.* Laserske se zrake fokusiraju u jako mali promjer. Kao posljedica toga intenzitet svjetlosti u mjernom volumenu je velik, npr. ako laserska zraka ima uobičajenu snagu  $10\ \text{mW}$ , ali fokusiranu u promjer od svega  $0,3\ \text{mm}$ , tada je intenzitet svjetlosti u mjernom volumenu  $0,01/(0,0003)^2 = 10000\ \text{W/m}^2$ .
2. *Optimizacija količine čestica.* Za dobivanje jačeg svjetlosnog signala najbolja je ravnomjerna disperzija mikročestica u struji fluida, tako da je u svakom volumenu u svakom trenutku po jedna mikročestica. Ukoliko ima više prisutnih čestica odjednom u mjernom volumenu, tada najčešće dolazi do poništavanja mjernog signala.
3. *Smjer skupljanja svjetlosnog signala.* Količina svjetlosti rasute preko čestica jako ovisi o usmjerenosti svjetlosnih snopova u odnosu na slučajne zrake svjetlosti. (fizikalno, to je zbog toga jer je veličina čestica usporediva po veličini sa valnom duljinom svjetlosnih zraka).
4. *Prijemna leća:* proporcije raspršenog svjetla koje je fokusirano na fotodetektoru povećavaju se s veličinom leće i smanjuju s kvadratom udaljenosti od mjernog volumena. Stoga se upotrebom većih leća i pozicioniranjem mjernog volumena na manju udaljenost pojačava magnituda prijemnog signala.
5. *Upotreba (male rupice) "pinhole".* Maska s malom rupicom koja je smještena ispred fotodetektora dopušta zrakama svjetla da dolaze kroz rupicu striktno iz fokusiranog

smjera tj. iz kontrolnog volumena na fotodetektor. Time se onemogućuje da zrake svjetla od ostalih aparata ili iz okoline ometaju mjerni signal iz mjernog volumena tj. smanjuje se mogućnost šuma. Ovim načinom se može ograničiti prijem signala na onaj iz samo jednog dijela mjernog volumena.

LDV spada među najtočnija mjerenja brzine i protoka fluida, ali kao i kod svake druge mjerne tehnike postoji mogućnost pogreške. Način nastajanje moguće pogreške kod mjerenja je potrebno poznavati.

LDV osjeti (registrira) brzinu čestice jedino kada prolazi mjernim volumenom. Stoga, pri korištenju LDV uređaja skupi se niz uzoraka brzina, a svaki uzorak je registriran kad čestica prođe mjernim volumenom. Dobiveni skup podataka je pristran - kad je brzina toka veća, više će i čestica proći kroz mjerni volumen, nego u slučaju da je brzina toka mala. Kad jednostavno osrednjimo brzinu toka, dobit ćemo veću srednju brzinu toka nego što je ona stvarno. Procjenjeno odstupanje brzine ulazi u grešku. Ovaj slučaj posebno dolazi do izražaja kod mjerenja brzine strujanja zraka (obično nema mnogo čestica).

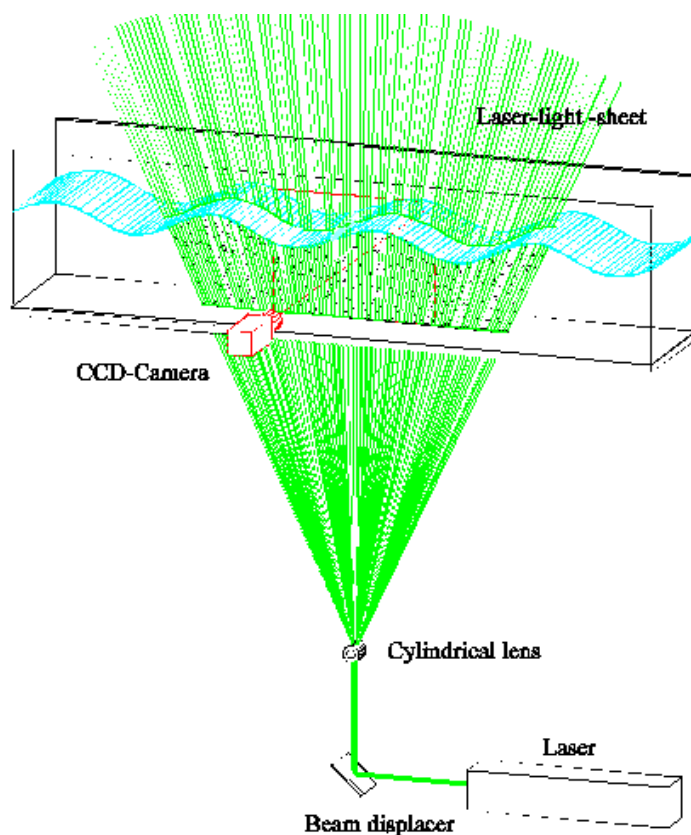
Ako želimo mjeriti dvije ili tri komponente brzine, dodatni parovi laserskih zraka se moraju postaviti u ravninu okomitu na prvi par zraka. Sve se tri komponente brzine mogu mjeriti tako da se postave dvije sonde kao na slici 4.2.:11.



Slika 4.2.11: Mjerenje svih triju komponenti brzine toka fluida

### PIV postupak mjerenja brzine fluida

U PIV postupku laser nema jednaku ulogu kao kod LDV. Naime, laser se ne koristi nužno kao izvor koherentne svjetlosti (jer se može raditi i s jakim bijelom svjetlošću), već kao vremenski kontrolirani izvor snažnih svjetlosnih impulsa. PIV metodom je omogućeno planarno (dvodimenzionalno) ili čak prostorno (trodimenzionalno) mjerenje brzine istovremeno u više točaka (*multi-point measurement*). Laserom se pulsno osvjetljava tok u koji su ubačene čestice mikronske veličine koje odlično odbijaju svjetlost. Fotografiranjem položaja čestica dobiva se zapis o putanji čestice, a daljim metodama digitalne obrade snimaka takav fotografski zapis se kompjutorski obrađuje i iz njega se određuje pomak, a posredno i brzina čestice, odnosno protjecanja.



Slika 4.2::12 Shema PIV uredaja

Laserska zraka se pomoću sustava leća oblikuje u tanki snop konstantne debljine oko 1 mm kojim se planarno osvjetljava tok. Pri mjerenju, laserska zraka se prekida električnim ili mehaničkim putem (ovisno o tipu lasera, te potrebnoj učestalosti prekidanja). S time se dobiva niz jakih svjetlosnih impulsa kojima se osvjetljava tok u namjeri postizanja stroboskopskog efekta. Fotografskim aparatom, postavljenim okomito na smjer protjecanja i na smjer laserskog snopa, snima se tok. Na negativu ostaje zapisan prvobitni položaj čestice, te njen pomaknuti položaj u toku (ili položaji, ovisno o broju svjetlosnih impulsa unutar jedne ekspozicije).

Karakteristične vrijednosti impulsa su slijedeće:

- trajanje laserskog impulsa je nekoliko desetaka nanosekundi
- frekvencija impulsa (odnosno impulsnih paketa), ovisno o mogućnostima fotografskog pribora, je desetak herza
- razmak pojedinih impulsa u paketu je stotinjak mikrosekundi (što odgovara mjerenju brzine do 10 m/s).

Interpretacija fotografskog zapisa, odnosno analiza toka, ovisno o uvjetima snimanja može biti kvalitativna ili kvantitativna. U slučaju kvalitativne interpretacije, za vizualizaciju se koriste veće čestice, obično mjehurići plina, dim ili sitne raspršene kapljice vode ili ulja.

Odgovarajućom ekspozicijom na negativu se dobiva zapis čitave putanje, a ne samo početnih ili krajnjih položaja (*streak photography*).

Za kvantitativnu interpretaciju, prikladnija je upotreba male koncentracije vrlo sitnih čestica za označavanje toka. Dobiveni negativ (fotogram), koji se sastoji od velikog broja snimaka čestica, pod optičkim povećanjem se ispituje videokarnerom dio po dio (cijeli negativ se vodoravno i uspravno razdijeli u nekoliko desetaka "prozora"). Daljnjom obradom treba pronaći "originalne" čestice i njihove partnere, odnosno sliku originala u pomaknutom položaju. S obzirom da je razmak impulsa (vrijeme) poznat, a udaljenost među česticama se odredi algoritmom digitalne obrade snimaka, brzina se izračuna kao:

$$\vec{v} = \frac{M \vec{d}}{t}$$

$\vec{v}$  - vektor brzine

$M$  - optičko povećanje

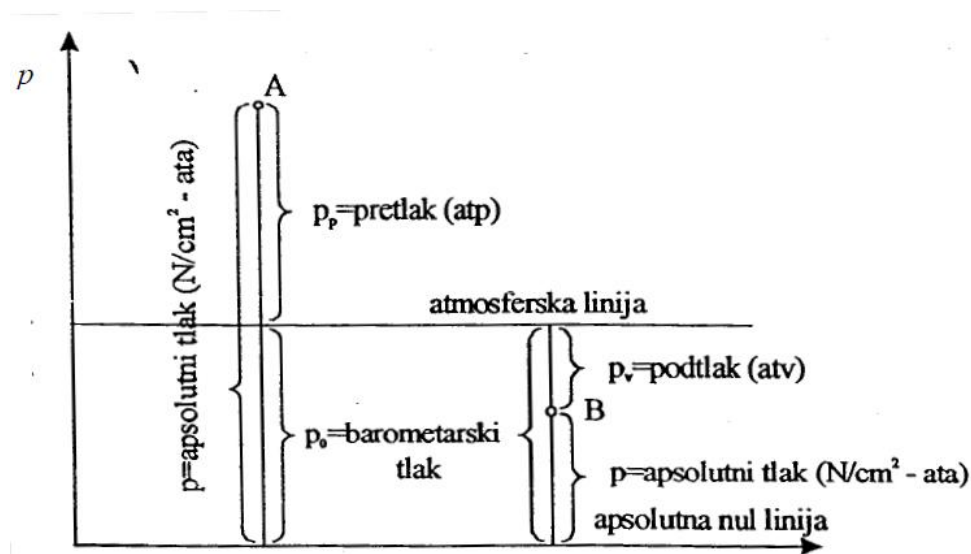
$\vec{d}$  - vektor pomaka sile čestica

$t$  - vrijeme između laserskih impulsa

### 4.3 Mjerenje tlaka

#### Općenito o mjerenju tlaka

Tlak je definiran djelovanjem sile na jedinicu površine. Važno je istaknuti da se tlak može iskazati kao apsolutni ili relativni. Najčešće se iskazuje u odnosu na tlak okoline (atmosferski tlak). Ako je promatrani tlak veći od atmosferskog, njihovu razliku zovemo **pretlak**, a ako je manji njihovu razliku zovemo **podtlakom** (sl. 4.3::1)

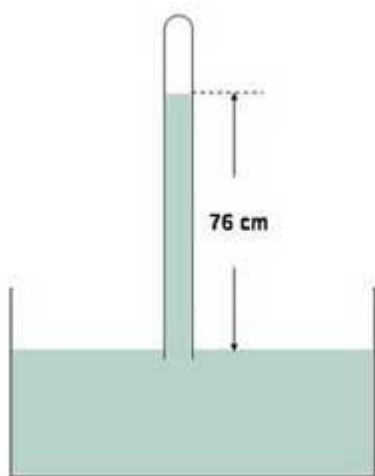


Slika 4.3::1 Shema tlaka

### 4.3.1 Barometri

Namijenjeni su prvenstveno za određivanje tlaka zraka okoline. Konstrukcije barometra mogu biti različite, no najčešće se upotrebljavaju membranski manometar i U – cijev. Kao tekućina za barometre se upotrebljava živa, jer je njezina gustoća tako velika da cijev može biti kratka, a tlak zasićenja živinih para je kod normalnih temperatura, tako malen da ga možemo zanemariti. Zbog toga su barometri vrlo točni.

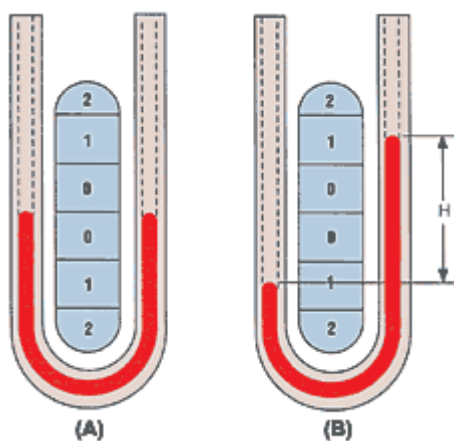
Princip rada barometra je prikazan na slici 4.3::1. Sastoji se od staklene cijevi koja je na vrhu zatvorena, te je donjim krajem otvorena i uronjena u kapljevinu izloženu atmosferskom tlaku. Drugi kraj je zatvoren i potpuno evakuiran ( stopostotni vakuum).



Slika 4.3::1 Princip rada barometra

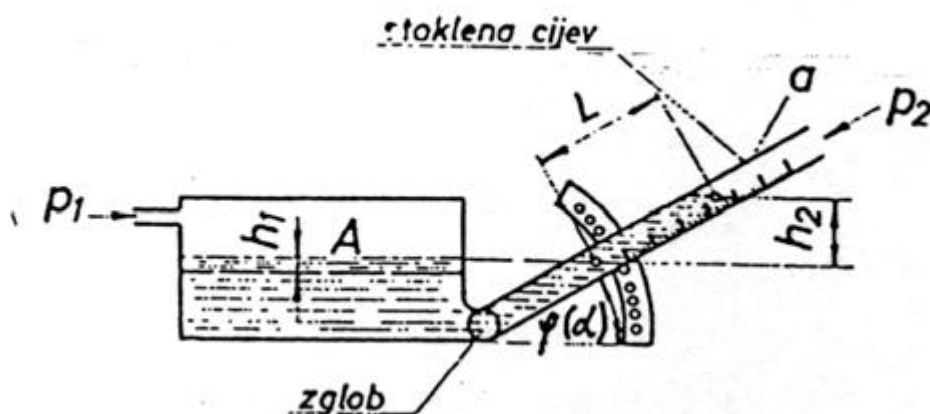
### 4.3.2 Diferencijalni manometar

Diferencijalni manometar služi za mjerenje razlike tlakova između dva mjerna mjesta a princip rada je prikazan na slici 4.3::2. U uvjetima kad je na oba kraja diferencijalnog manometra tlak jednak razine fluida u oba kraka su iste (a). U uvjetima kad postoji razlika tlakova koji se mjere potrebno je očitati razliku razina kapljevinu u oba kraja manometra (b) i preračunati u razliku tlakova.



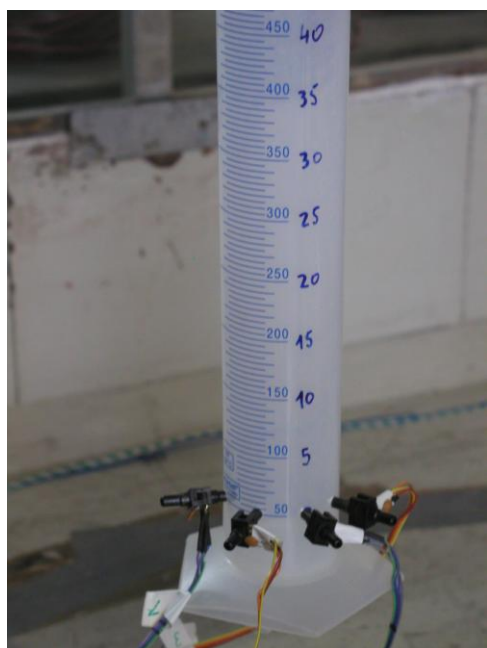
Slika 4.3::2 Princip rada diferencijalnog manometra

Po sličnom principu rade i laboratorijski tlakomjeri. Mikromanometar ili kosocijevni manometar služi kao prijenosni instrument za mjerenje malih razlika tlakova (uzgon u dimnjaku, tlak malih aksijalnih ventilatora i dr.). Koristi se za točnija mjerenja tlaka ili razlike tlaka. Na slici 4.3::3 je prikazan princip rada laboratorijskog mikromanometra. Kod prikazanog kosocijevnog manometra se smanjivanjem kuta  $\alpha$  povećava duljina stupca zaporne tekućine (a time i točnost očitavanja) pri tlaku koji odgovara visini zaporne tekućine  $h$ .



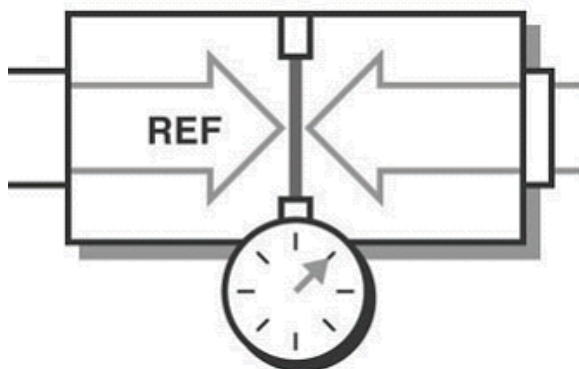
Slika 4.3::3 Mikromanometar

Osim prikazanog najjednostavnijeg diferencijalnog tlakomjera, postoje i niz drugih tlakomjera. Na slici 4.3::4 je prikazano baždarenje laboratorijskih diferencijalnih tlakomjera pri čemu su na tijelo menzure montirani tlakomjeri a visinom stupca vode postiže se odgovarajući naponski odaziv senzora.



Slika 4.3::4 Baždarenje laboratorijskih diferencijalnih tlakomjera

Kalibracija tlakomjera se provodi u pomoć menzure napunjene vodom do određene razine čime se generira aktivni tlak na tlakomjeru, dok se pasivni dio mjerača ostavlja na atmosferskom tlaku (slika 4.3::5).



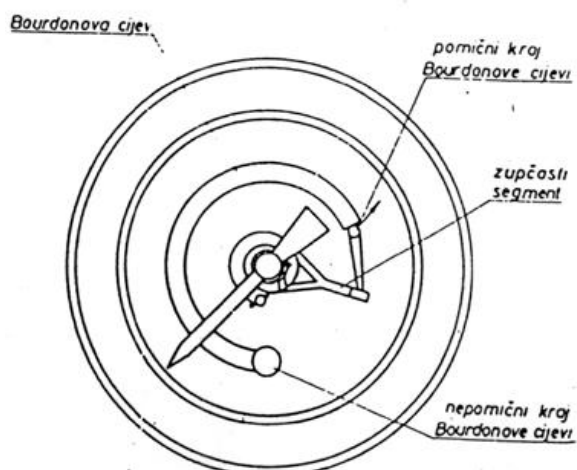
Slika 4.3::5 Princip rada difrencijalnog tlakomjera

Općenito se može reći da su tlakomjeri koji rade na principu razlika hidrostatskog tlaka mjernog fluida (tekućine) kod kojih je poznata gustoća tj. kod kojih se tlak mjeri kao razlika visine stupca mjernog fluida spadaju u najpouzdanije i najpreciznije instrumente za mjerenje tlaka. Mjerna tekućina mora imati svojstva konzistentnosti i formiranja meniskusa pogodnog izgleda da u mjernoj, baždarenoj cjevčici s dovoljnom točnošću možemo očitati vrijednost mjerenog tlaka i da je to očitavanje ponovljivo za isti mjereni tlak. Ovisno o rasponu mjerenja za koji je predviđen manometer stavljaju se mjerne tekućine različitih gustoća. Živa na primjer ima 13,6 puta veću gustoću od vode, što znači da će za isti mjereni tlak nivo stupca vode biti viši za 13,6 puta. Iz toga proizlazi da je za manometre koji rade u manjim mjernim područjima pogodnije koristiti mjerne tekućine manje gustoće. Takvi manometri će biti osjetljiviji i precizniji. Kao mjerna tekućina u navedenim tlakomjerima obično se koristi živa, voda sa aditivima fluorescentne boje koji poboljšavaju konzistentnost, olakšavaju preciznije očitavanje vrijednosti na skali i sa pažljivo određenom specifičnom gustoćom nastale tekućine, a koriste se i posebna stabilna bazna ulja (derivati nafte), sa pažljivo određenom gustoćom, koja imaju odličnu vidljivost meniskusa sa mogućnošću vrlo preciznog očitavanja vrijednosti i sa odličnom konzistentnošću. Za precizno očitavanje bitno je okomito “nišaniti” s obzirom na ravninu mjerne skale iz koje iščitavamo vrijednost da bi minimizirali paralaksnu grešku očitavanja. S tlakomjerima koji rade na opisanom principu može provjeravati točnost ostalih tlakomjera kod baždarenja.

### 4.3.3 Metalni tlakomjer s Burdonovom cijevi

Burdonova cijev je savijena metalna cijev, jednim krajem pričvršćena za kutiju instrumenta, a drugi je kraj slobodan (Slika 4.3::6). Pod djelovanjem tlaka cijev se nastoji ispraviti, pa se gibanje njezina slobodna kraja, pomoću mehanizma, prenosi na kazaljku. Kazaljka pokazuje veličinu tlaka. Ovi tipovi tlakomjera najčešće se koriste za tlakove od 0 do 100 bar i u temperaturnom rasponu od  $-25^{\circ}\text{C}$  do  $80^{\circ}\text{C}$ , iako mogu biti i u užem, preciznijem, području primjene (npr. 0-0.6 bar).

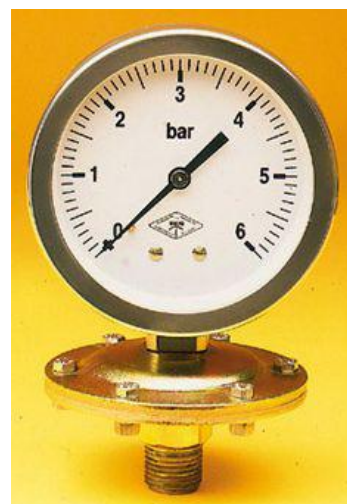
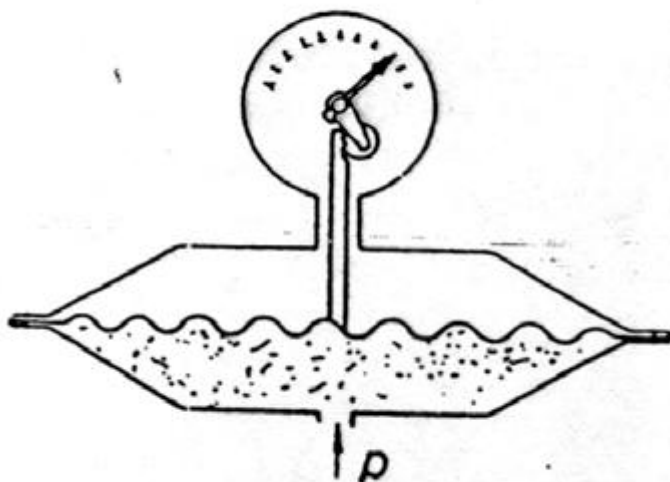




Slika 4.3::6 Tlakomjer s Bourdonovom cijevi

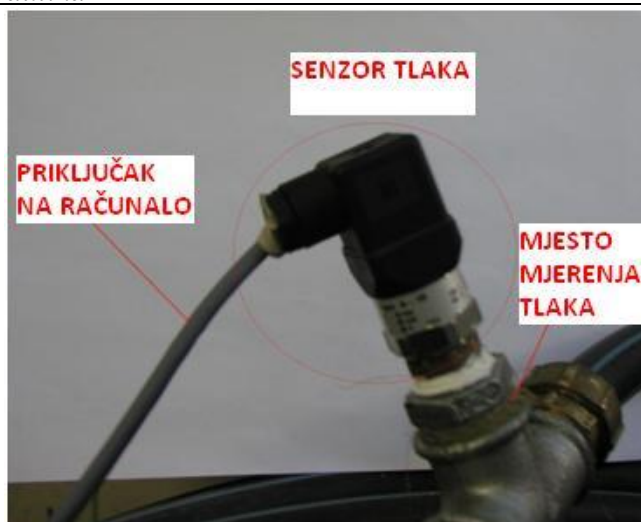
### 4.3.4 Tlakomjer s membranom

Membrana od valovitog lima reagira na tlak. S povećanjem tlaka membrana se rasteže, odiže, a pri smanjenju tlaka zbog elastičnosti se vraća u prvobitni položaj. Ovi instrumenti su za manja područja mjerenja točniji od onih s Burdonovom cijevi.



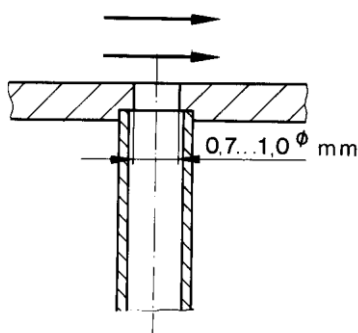
Slika 4.3::7 Tlakomjer s membranom

Za potrebe nastave – mjerenja promjene tlak uslijed vodno udara se u Hidrotehničkom laboratoriju građevinskog fakulteta koristi tlakomjer *Wika -Pressure transmitter model A-10* (Slika 4.3::8).



Slika 4.3::8 Senzor tlaka (Wika- model A-10)

Prilikom mjerenja tlaka u sustavima u kojima postoji strujanje fluida treba voditi brigu i mjernom mjestu na kojem se uzima reprezentativni tlak kako se nebi dio kinetičke energije pretvorio u tlak. Ispravan način ugradnje senzora je prikazan na slici 4.3::9.



Slika 4.3::9 Mjerno mjesto za mjerenje tlaka na stijenci

#### 4.4 Mjerenje protoka

Postoji cijeli niz načina na koji se može mjeriti protok a metoda se najčešće oadbire ovisno o okolnostima u kojima se mjeri protok i o zahtijevanoj točnosti. Mogu se navesti slijedeće metode mjerenja protoka:

- a) volumetrijski (baždarena posuda a može i težinski)
- b) integracija profila brzina
  - otvoreni vodotoci
  - cijevi
- c) blenda (diafragma), sapnica i Venturi
- d) elektromagnetni mjerač protoka (Princip je istražio Faraday 1832)

- provodnik koji prolazi kroz magnetno polje proizvodi elektromotornu silu. Fluidi su elektroprovodni i generiraju struju između elektroda koja je proporcionalna brzini toka kroz provodnik.
  - glavna prednost je da nema gubitaka energije i da je izlazni signal linearan s protokom
  - neprikladan za mjerenje protoka plina zbog mogućnosti pojave mjehurića zraka
- e) ultrazvučni mjerač protoka
- jedan princip je da se mjeri razlika u brzini zvuka uzvodno i nizvodno - razlika je proporcionalna brzini fluida
  - kad je ultrazvučni snop usmjeren u nehomogen fluid, dio energije zvuka (snopa) se reflektira nazad do odašiljača sa drugom frekvencijom. Razlika u frekvenciji je proporcionalna sa brzinom fluida
- f) turbinski mjerač protoka
- veza između protok i broja okretaja rotirajućeg dijela, točnost 1%, mali gubici, za kapljevine i plinove (čistoća vode)
- g) rotarimetar
- ravnoteža mase utega i hidrodinamičke sile vode
  - točnost do 5%
- h) preljevi (oštrobridni ili praktičnog profila)
- pravokutni sa i bez bočne kontrakcije
  - trokutasti (Thomson  $\alpha=90\%$ )
  - Parchallov preljev

#### 4.4.1 Volumetrijsko mjerenja protoka

Volumetrijsko mjerenja protoka je jednostavno ali i relativno točno pa se često koristi za baždarenje drugih instrumenata.

Volumetrijsko mjerenje se zasniva na mjerenju vremena ( $t$ ) da protok ( $Q$ ) koji protiče kroz neki sustav napuni posudu točno poznatih dimenzija odnosno volumena ( $V$ ). Protok je pritom definiran jednačinom:

$$Q = \frac{V}{t}$$

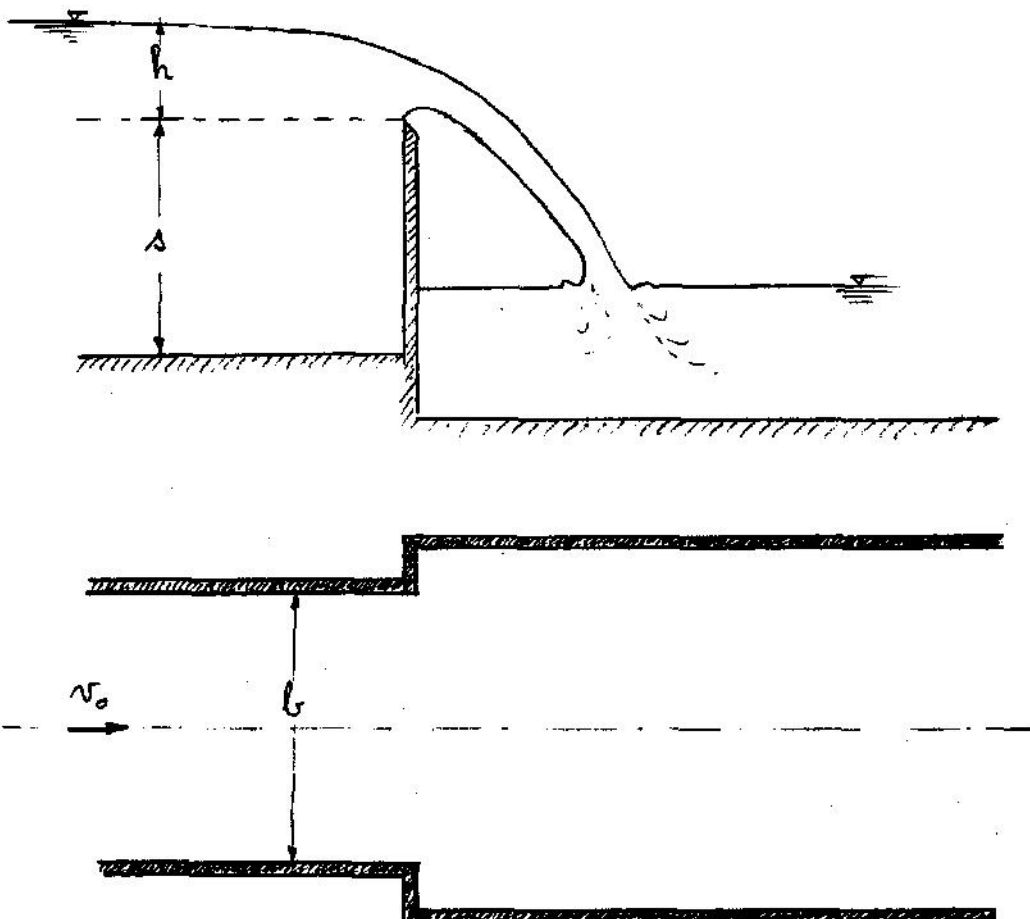
Mane volumetrijskog mjerenja protoka je da se može mjeriti samo stacionaran protok.

#### 4.4.2 Preljevi

Preljevi su relativno jednostavni i točni uređaji za mjerenje protoka. Mana im je da se dio energije toka troši na postizanje potrebne visinske razlike gornje i donje vode, o čemu treba voditi računa.

## 4.4.2.1 BAZIN-ov preljev

Bazinov preljev je oštrobridni preljev bez bočne kontrakcije i služi za mjerenje protoka koje se tokom vremena ne mijenja.



Slika 4.4.:1 Definijska skica Bazinovog preljeva

Za određivanje protoka preko Bazin-ovog preljeva se koristi jednačba:

$$Q = m_o b \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$

gdje je  $m_o$  = koeficijent protoke, a određuje se pomoću jednačbe:

$$m_o = \left( 0,405 + \frac{0,003}{h} \right) \left[ 1 + 0,55 \left( \frac{h}{h+s} \right)^2 \right]$$

baždarenjem u laboratoriju je dokazano da je:

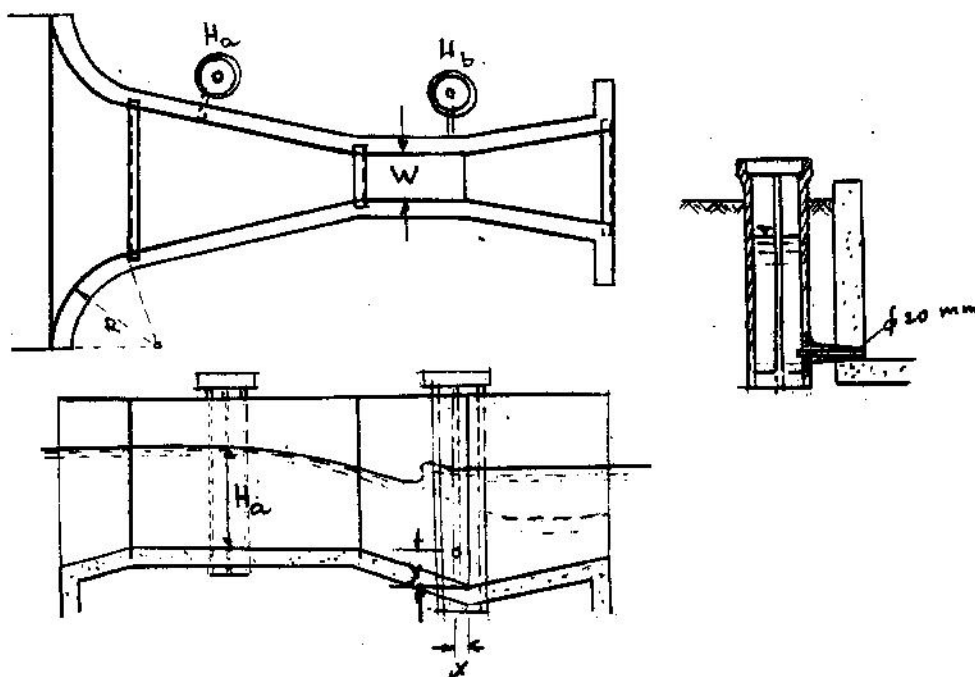
$$100 \frac{\Delta m_o}{m_o} < 1\% \text{ ako su zadovoljeni uvjeti:}$$

$$0,20 < b < 2,0 \text{ m}; \quad 0,2 < s < 2,0 \text{ m}; \quad 0,10 < h < 1,24 \text{ m}$$

Točnost određivanja protoka prema gornjoj jednadžbi ovisi o točnosti pojedinih elemenata koji su sadržani u toj formuli. Kod laboratorijskih uvjeta treba mjeriti debljinu mlaza sa točnošću od 0,5 mm ako želimo da nam  $\Delta Q/Q$  ne prelazi 1,5%.

#### 4.4.2.2 Venturi – kanali tipa “PARSHALL”

Upotrebljava se na vodotocima, izvorima i svim lokacijama gdje nema na raspolaganju dovoljno pada između uzvodnog i nizvodnog vodnog lica.



Slika 4.4.:2 Definijska skica Parshalovog preljeva

Ovaj se tip preljeva se najviše upotrebljeva u SAD a baždario i razvio ga je Parshall (zato je i izraz za protoku u anglosaksonskim mjernim jedinicama). Protoka se određuje po formuli:

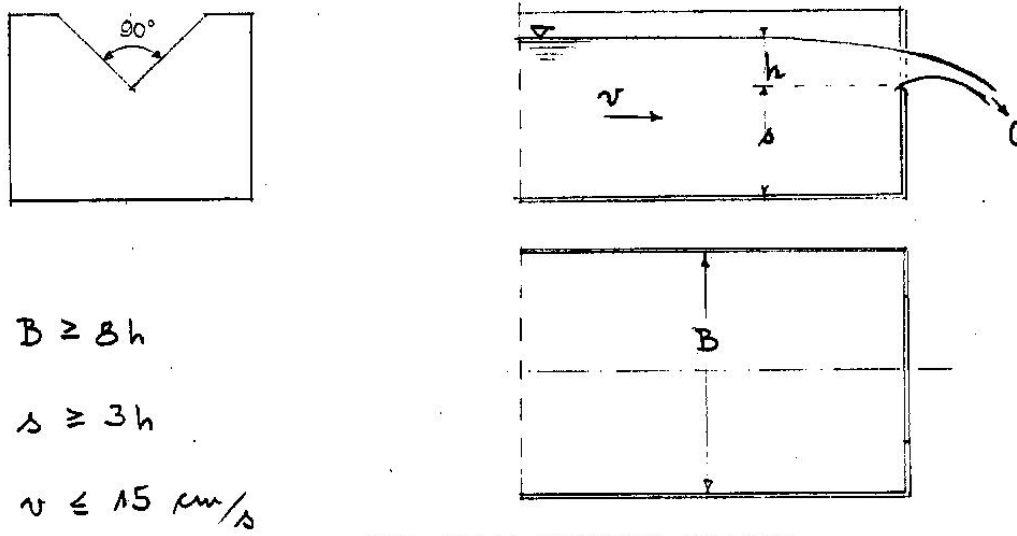
$$Q = 4W \cdot H_a^{1,522W^{0,026}}$$

gdje je:  $Q$  = protok u [ft<sup>3</sup>/s]

$W$  = širina najužeg dijela u [ft] (stope)

Jednadžba vrijedi u granicama:  $1' < W < 8'$  tj.  $0,305 < W < 2,44 \text{ m}$ .

## 4.4.2.3 Thomsonov preljev



$$B \geq 8h$$

$$s \geq 3h$$

$$v \leq 15 \text{ cm/s}$$

Slika 4.4.:3 Definijska skica Thomson-ovog preljeva

Za trokutni preljev prema slici 4.4.:3 vrijedi formula od CONE-a:

$$Q = 0,01467 \cdot h^{2,4805}$$

gdje je:  $Q$  u [l/s] i  $h$  u [cm]

pogreška se određuje prema jednostavnom izrazu:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 2,48 \frac{\Delta h}{h}$$

Ako na primjer u laboratoriju želimo imati točnost  $\Delta Q/Q \leq 1\%$  onda se visina  $h$  treba mjeriti sa točnošću  $\Delta h = 0,1 \text{ mm}$ .

Iz gornje formule slijedi:

$$2,48 \frac{0,01}{h} = 0,01 \Rightarrow h = 2,48 \frac{0,01}{0,01} = 2,5 \text{ cm}$$

$$h \geq 2,5 \text{ cm}$$

Prema tome za  $h \leq 2,5 \text{ cm}$  ne treba se mjeriti sa Thomsonovim-preljevom već volumetrijski.



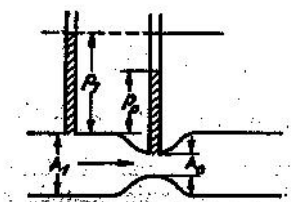
Slika 4.4::4 Thomson-ov preliv u prirodi

#### 4.4.3 Mjerači zasnovani na kontrakciji mlaza

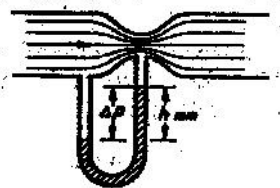
Venturijev vodomjer, blenda i diafragma rade na istom principu mjerenja pada tlaka koji nastaje pri određenom protoku uslijed promjene (suženja) proticajnog presjeka. Kako se za izvod jednadžbe uvijek koristi Bernoulijeva jednadžba i jednadžba kontinuiteta, u ovom poglavlju će biti opisana sva tri mjerila protoka kao i istaknute razlike među njima.

##### 4.4.3.1 Princip rada

U cjevovodu kroz koji protječe neka tekućina, nalazi se suženje (sl. 4.4::5). Primjenom jednadžbe kontinuiteta se može usvojiti da kroz površine  $A_1$  i  $A_0$  presjeka cjevovoda u jedinici vremena protječe ista količina tekućine. Budući da je površina presjeka  $A_0$  manja, brzina tekućine kroz tu površinu je veća. Ovdje se dio potencijalne energije pretvara u kinetičku, a rezultat toga povećanja brzine u suženom dijelu cjevovoda je pad statičkog tlaka. Prije suženja u cjevovodu djeluje tlak  $p_1$ , dok je u suženom dijelu vrijednost tlaka  $p_0$ . Na mjestu najveće brzine statički tlak je najmanji.



Slika 4.4::5. Pad tlaka na suženom dijelu cjevovoda



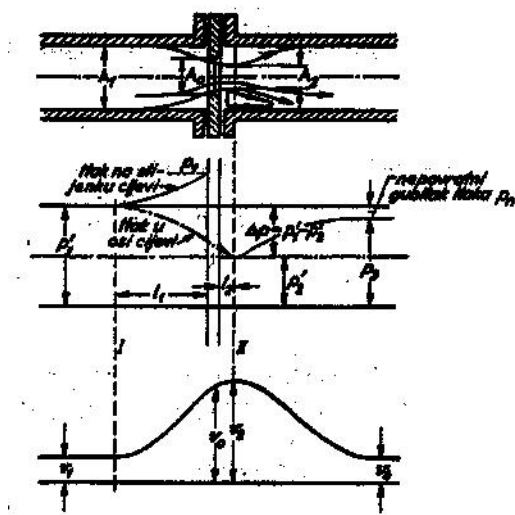
Slika 4.4.:6 Mjerenje diferencijalnog tlaka pomoću diferencijalnog tlakomjera

U praksi umjesto odvojenog mjerenja tlaka  $p_1$  i  $p_o$  pomoću mjerila tlaka, se razlika tlaka može mjeriti pomoću diferencijalnih manometara (Slika 4.4.:6). Na taj način mjeri se samo tlačna razlika  $p_1 - p_o = \Delta p$ , bez obzira na vrijednost statičkog tlaka.

Na istom principu rade i prigušnice i blende pa će se u nastavku veliki dio teksta odnositi na sve navedene tipove vodomjera.

#### 4.4.3.2. Jednadžba protoka kroz blendu

Razmotrimo kretanje nestišljive tekućine kroz prigušnicu, npr. mjerni zaslon (slika 4.4.:7). Prilikom prolaska kroz otvor zaslona brzina tekućine se povećava, a time se povećava i njezina kinetička energija. Prema tome, na mjestu suženja smanjuje se potencijalna energija, odnosno tlak. Kao što se vidi na slici, mlaz tekućine počinje se sužavati nešto prije prolaska kroz otvor zaslona. Radi inercije, to sužavanje mlaza nastavlja se i nakon prolaska kroz otvor zaslona, tako da je najmanja vrijednost presjeka mlaza na određenoj razdaljini iza zaslona ( $A_2$ ). Mlaz se zatim postepeno širi do punog presjeka cjevovoda.



Slika 4.4.:7 Promjena tlaka prilikom protjecanja fluida kroz prigušnicu

Ispred zaslona i iza njega stvaraju se zone s vrtložnim kretanjem tekućine. Iza zaslona stvara se veća vrtložna zona nego ispred njega.

Na slici 4.4.:7 prikazana je promjena tlaka, te promjena srednje brzine prilikom protjecanja fluida kroz blendu. Pri analizi promjene tlaka valja razlikovati tlak na stjenku cjevovoda od onoga u osi cjevovoda.



Kao što se vidi na slici tlak je neravnomjeran i u istoj ravnini presjeka cjevovoda. Neposredno pred zaslonom tlak na stjenku cjevovoda povećava se, jer se na tome mjestu brzina smanjuje. Zbog povećanja brzine u osi cjevovoda tlak se smanjuje.

Ako sa  $v_1$ ,  $v_o$  i  $v_2$  označimo srednje brzine u odgovarajućim površinama presjeka (slika 4.4.:7), iz uvjeta kontinuiteta imamo:

$$A_1 v_1 = A_o v_o = A_2 v_2$$

ili

$$A_o / A_1 = v_1 / v_o \quad A_2 / A_o = v_o / v_2$$

Omjer

$$A_o / A_1 = m$$

nazivamo koeficijentom ili modulom prigušnice, a omjer

$$A_2 / A_o = \mu$$

koeficijentom suženja mlaza. Odatle slijedi:

$$v_1 / v_o = m \quad i \quad v_o / v_2 = \mu,$$

te dobijemo:

$$v_1 = m v_o \quad i \quad v_o = \mu v_2$$

prema tome jednadžbu zapreminskog protoka za nestišljive tekućine možemo napisati u obliku:

$$Q = v_2 A_2,$$

odnosno

$$Q = v_2 \mu A_o$$

polazeći od Bernoulijeve jednadžbe, srednju brzinu  $v_2$  u presjeku  $A_2$  možemo izraziti pomoću jednadžbe:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{2 / \rho (p_1' - p_2')}$$

gdje je  $\rho$  = gustoća fluida.

Zbog praktičnosti tlakove  $p_1'$  i  $p_2'$  ne mjerimo na presjecima  $A_1$  i  $A_2$ , već neposredno na stijenci cjevovoda, u kutovima koje tvori ploča zaslona sa stijenkama cjevovoda. Time je tlačna razlika  $p_1 - p_2$ , koju mjerimo, različita od  $p_1' - p_2'$ . Osim toga i brzina je neravnomjerno raspoređena po presjeku. Ove faktore uzimamo u obzir tako znanim brzinskim koeficijentom  $\zeta$  s kojim množimo desnu stranu gornje jednadžbe.

Sređivanjem se dobiva izraz za protok:

$$Q = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} A_o \sqrt{2 / \rho (p_1 - p_2)}$$

veličina:

$$\frac{\mu \xi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} = \alpha$$

naziva se koeficijent protoka.

Za različite tipove prigušnica koeficijent  $\alpha$  je različit, a određuje se pokusima. Koeficijent  $\alpha$  uzima u obzir neravnomjeran raspored brzina po presjeku mlaza, trenje uz stjenke cjevovoda zbog hrapavosti stjenke i viskoznosti tekućine, mjerenje tlaka na stjenci cjevovoda (a ne u centru cjevovoda), te mjerenje tlaka u  $A_o$  umjesto u  $A_2$ .

Jednadžbu protoka za nestišljive tekućine sada možemo napisati ovako:

$$Q = \alpha A_o \sqrt{2 / \rho (p_1 - p_2)}$$

Koeficijent  $\alpha$ , ovisi o Reynoldsovom broju. Vrijednost Reynoldsovog broja je definirana jednadžbom:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

gdje je:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

pri čemu su:

- $\eta$  dinamička viskoznost,
- $\nu$  kinematska viskoznost,
- $v$  brzina fluida,
- $D$  promjer cijevi,
- $\rho$  gustoća fluida.

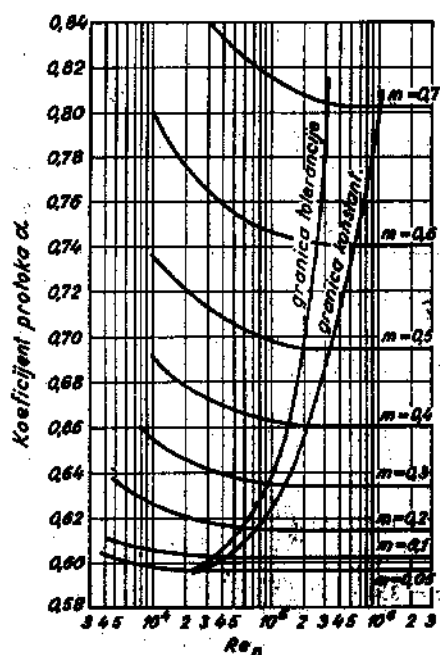
Pošto je vrijednost Reynoldsovog broja određena u odnosu na promjer cjevovoda  $D$ , označit ćemo je sa  $Re_D$  i radi jednostavnosti naznati RE-broj. U američkoj literaturi vrijednost Reynoldsovog broja češće se određuje u odnosu na promjer otvora  $d$  prigušnice i označava se sa  $Re_d$ .

Poznavanje vrijednosti Reynoldsovog broja omogućuje da se rezultati mjerenja, koje smo izveli određenim fluidom i određenom prigušnicom, mogu prenijeti na protjecajni fluid s drugom viskoznošću, ukoliko smo mjerenja izveli geometrijskim sličnim prigušnicama. Teorija o takozvanoj mehaničkoj sličnosti postavlja tri uvjeta:

1. Protoke koje želimo mjeriti moramo izvoditi u geometrijski sličnim tijelima, npr. kroz dvije cijevi okrugla presjeka, ali proizvoljna promjera.
2. Na geometrijski odgovarajućim mjestima oba protjecanja moraju nastati istodobno i jednako usmjerenim brzinama, koje su po vrijednosti u određenom omjeru. Vrijednosti toka omjera je ista na svim mjestima koja leže geometrijski slično.
3. Na svim mjestima koja imaju odgovarajući geometrijski položaj, sile koje nastaju moraju imati isti smjer i moraju biti u uzajamno nepromjenjenom omjeru.

Ako su dva toka geometrijski i kinematički slična, za oba vrijedi isti koeficijent protoka. Kinematsku sličnost imamo ako je u oba primjera  $Re_D$  konstantan, tj. ako je omjer između sile inercije i sile unutrašnjeg trenja jednak.

S određenim  $Re$ -brojem dana je jednosmislena karakteristika neke nekompresibilne tekućine. Ako je  $Re$ -broj malen, znači da su sile unutrašnjeg trenja jake u usporedbi sa silom inercije. Kod velikih  $Re$ -brojeva sile trenja su male u odnosu na silu inercije i radi toga je koeficijent protoka  $\alpha$  neovisan o  $Re$ -broju. Kod malih  $Re$ -brojeva sile trenja dolaze uvijek jače do izražaja, te tako više utječu na  $\alpha$ . Kod dovoljno velikih  $Re$ -brojeva  $\alpha$  je ovisan samo o modulu prigušnice  $m$  što znači, da je za neki dati modul  $m$  koeficijent  $\alpha$  praktički konstantan. Ova neovisnost prestaje ispod neke određene vrijednosti  $Re_D$ . linija koja spaja granične  $Re$ -brojeve, iznad kojih je  $\alpha$  ovisan samo o modulu  $m$ , naziva se granica konstantnosti (slika 4.4::8).

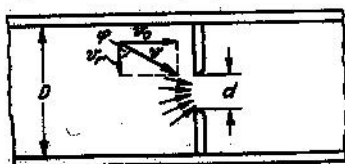


Slika 4.4::8 Koeficijent protoka  $\alpha$ , u ovisnosti o  $Re$ -broju i modulu prigušnice  $m$ , za standardni zaslon

Koeficijent suženja

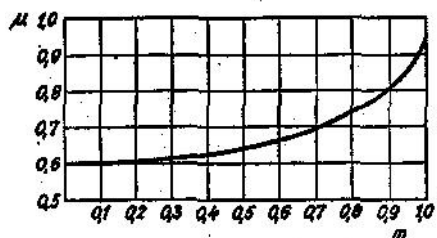
Koeficijent suženja (kontrakcije)  $\mu$  naziva se omjer površine presjeka  $A_2$  prema površini otvora prigušnice  $A_0$ . uvijek je  $\mu < 1$ , pri čemu je za standardnu sapnicu i venturijevu cijev  $\mu = 1$ , a za standardne blende, gdje najveće suženje mlaza protjecajnog medija nastaje iza zaslona,  $\mu = 0,6 \dots 0,7$ .

Ako razmotrimo uvjete kretanja tekućine kroz zaslon (slika 4.4.:9), vidimo da čestice koje se kreću u blizini stjenki cjevovoda skreću prema otvoru zaslona. Pred pločom zaslona nastaje usporenje, pa se dio kinetičke energije pretvara u porast tlaka. To stvara neravnomjernost tlaka u različitim točkama presjeka cjevovoda i to u neposrednoj blizini zaslona. Maksimalan tlak postiže se u kutovima koje obrazuju stijenke s pločom zaslona. Pad tlaka prema osi cijevi izaziva kretanje čestica i zone s višim tlakom prema zoni s nižim tlakom. Čestice se kreću brzinom  $v$ , i to pod kutom  $\varphi$  prema osi cijevi. Kao što se vidi na slici 4.4.:9, brzina  $v$  osim aksijalne komponente  $v_o$  ima i radijalnu komponentu  $v_r$ , a to radijalno usmjeravanje utječe na karakter mlaza koji izlazi iz zaslona.



Slika 4.4.:9 Komponente brzine čestica fluida, prilikom prolaska kroz zaslon

Zbog sila inercije svaka će se čestica kretati u pravcu brzine kojom je prošla kroz zaslon. To izaziva smanjenje presjeka mlaza iza zaslona, uz istovremeno povećanje brzine. Ovo suženje ili kontrakcija mlaza, produžuje se samo na manjim razdaljinama od zaslona. Pod djelovanjem viskoznosti radijalno usmjerene brzine pojedinih čestica počinje se umanjivati i uskoro postaju jednake nuli.



Slika 4.4.:10 Ovisnost koeficijenta suženja o modulu  $m$ , za standardizirane zaslone

Na tom mjestu presjek mlaza dostiže svoj minimum i sve brzine postaju paralelne s osi cijevi. Iza toga mlaz se počinje širiti. Iz gornjeg izlaganja se vidi da stupanj kontrakcije mlaza ovisi o vrijednosti modula  $m$  i broja  $Re$ .

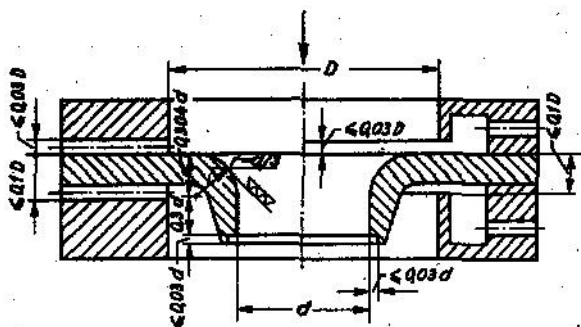
Na slici 4.4.:10 prikazana je ovisnost  $\mu$  od  $m$ . Vidljivo je da se pri vrlo malim vrijednostima modula  $m$  koeficijent  $\mu$  približava vrijednosti  $0,6 \dots 0,61$ . To je točno pod uvjetom da se modul prigušnice  $m = d^2/D^2$  umanjuje na račun povećanja  $D$ , a ne smanjivanja  $d$ . Pokusi

pokazuju da se pri istjecanju tekućine kroz male otvore, promjera manjih od 10 – 20 mm, koeficijent  $\alpha$  počinje povećavati sa smanjivanjem  $d$ .

Što se tiče fizikalnih svojstava toka tekućine (viskoznost, gustoća, brzina), koja su povezana sa  $Re$ -brojem, očigledno je da djelovanje sila inercije mlaza (koje ovise o brzini i gustoći) i sila unutrašnjeg trenja (koja ovise o viskoznosti), djeluju suprotno na suženje mlaza tekućine prilikom njena prolaska kroz zaslon. Sile inercije povećavaju suženje mlaza, a sile unutrašnjeg trenja se tome suprotstavljaju. Iz toga proizlazi da se umanjavanjem  $Re$ -broja, tj. povećanjem utjecaja sila trenja u odnosu na sile inercije, suženje mlaza tekućine smanjuje dotle dok  $\mu$  ne postane = 1, odnosno  $A_2/A_0 = 1$ . Povećanjem  $Re$ -broja, suženje mlaza se povećava, dok se relativni utjecaj sila trenja ne svede na zanemarljivu vrijednost. Pri vrijednosti koeficijenta suženje  $\mu = 0.6...0.61$ , relativni utjecaj djelovanja sila trenja je već veoma malen. Daljnjim povećanjem  $Re$ -broja, ne može se izazvati osjetno smanjenje koeficijenta  $\mu$  i taj koeficijent postaje konstantan.

#### 4.4.3.3 Sapnica

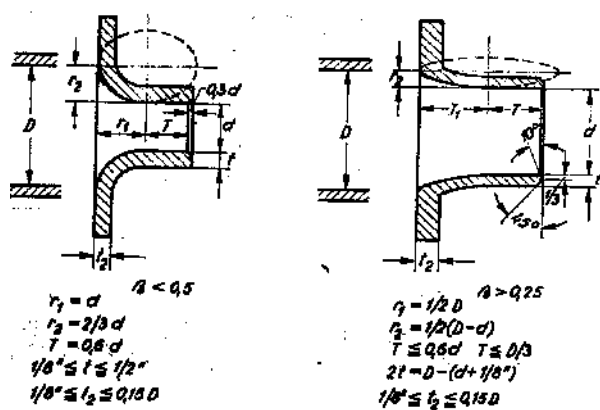
Sapnica se upotrebljava za mjerenje protoka na cjevovodima promjera  $D > 50$  mm i pod uvjetom  $0,05 < m < 0,65$ .



Sl. 4.4.:11 Osnovne mjere za standardiziranu sapnicu

Slika 4.4.:11 prikazuje izradu sapnice na  $m < 0,45$ . Kod modula  $m > 0,45$  ulaznu stranu sapnice treba obraditi sve do promjera  $D$ . Ako u fluidu nema krutih tvari, te nema opasnosti od oštećenja, zaštitni rub nije potreban.

Kod modula  $m > 0,45$  otvor  $d$  se mora obraditi sa tolerancijom od  $\pm 0,001 d$ , a kod modula  $m < 0,45$  s tolerancijom  $\pm 0,05 d$ .



Slika 4.4.:12 Sapnice velikog polumjera zakrivljenosti.

Slika 4.4.:12 prikazuje dugu sapnicu, izrađenu prema propisima ASME. Mjerne sapnice se upotrebljavaju mnogo rjeđe od blendi. Njihova je osnovna prednost što imaju manji nepovratni pad tlaka ( $p_1 - p_3$ ) odnosno gubitak energije je manji. Osim toga veća je i protjecajna količina od one kakva se kod istog promjera i pod istim uvjetima postiže upotrebom blende.

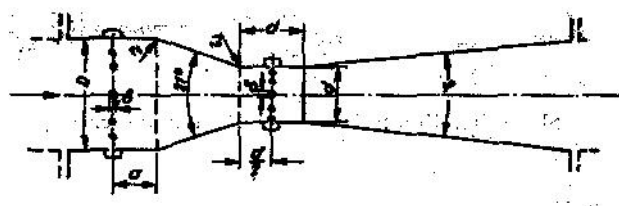
Sapnica se može upotrijebiti za mjerenje protoka lagano muljevitih materijala.

Ono što se zahtjeva od mjerne staze, priključnih provrta i mjernih prirubnica, u osnovi je isto kao i kod standardnih zakona. Ipak, budući da je modul  $m$  za isti protok i isti promjer cjevovoda kod sapnice manji nego kod zaslona, može se upotrijebiti kraća mjerna staza.

#### 4.4.3.4. Venturijeva cijev

Venturijeve cijevi se upotrebljavaju za mjerenja protoka još od 1887.g. Raznolikost konstrukcije Venturijevih cijevi veoma otežavaju standardizaciju proračunskih koeficijenata.

Najveći promjer ulaznog konusa Venturijeve cijevi jednak je promjeru cjevovoda (sl. 4.4.:13), a ulazni konus izvodi se pod kutom  $\varphi = 5$  do  $15^\circ$ .



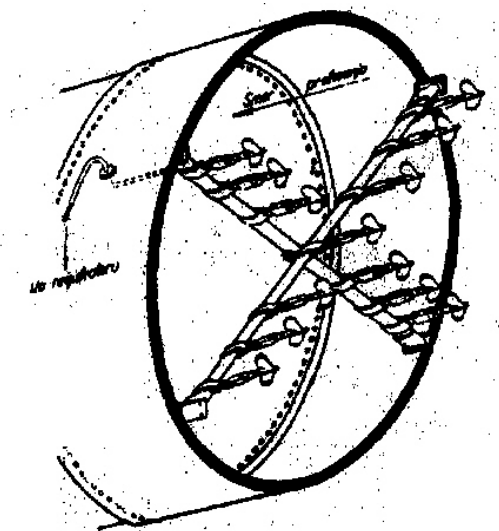
Slika 4.4.:13 Osnovne mjere za izvedbu Venturijeve cijevi

U odnosu na blendu i sapnicu, Venturijeva cijev uzrokuje najmanji napovratni pad tlaka u cjevovodu.

#### 4.4.4 Mjerači protoka zasnovani na mjerenju brzine

Mjerenje protoka na osnovi mjerenja brzine toka fluida spada u osnovne metode mjerenja protoka u cjevovodima i otvorenim kanalima. Ako je poznata površina poprečnog presjeka toka fluida, onda vrijednost brzine toka fluida kroz poprečni presjek potpuno određuje zapreminski protok.

Mjerala protoka koja se zasnivaju na mjerenju brzine toka fluida mogu se svrstati u niz grupa različitih tipova uređaja, čiji se principi rada često potpuno razlikuju.



Slika 4.4.:14 Hidrometrijska krila montirana na “križu” za mjerenje protoka u cijevima pod tlakom

Postoji nekoliko tipova ovih vodomjera, no prema načinu mjerenja možemo ih podijeliti na ona koja mjere brzinu strujanja fluida po cijelom mjernom presjeku toka (poprečni presjek na mjestu mjerenja) i na ona koja mjere brzinu u pojedinim točkama mjernog presjeka.

Mjerenje brzine u pojedinim točkama mjernog presjeka vrši se općenito pri mjerenju protoka u otvorenim kanalima, te u cjevovodima velikog promjera, osobito kada cjevovodi nisu potpuno ispunjeni tekućinom. Za takva mjerenja se najčešće koristi niz malih hidrometrijskih krila, koji zahvaćaju znatno manju površinu od površine mjernog presjeka.

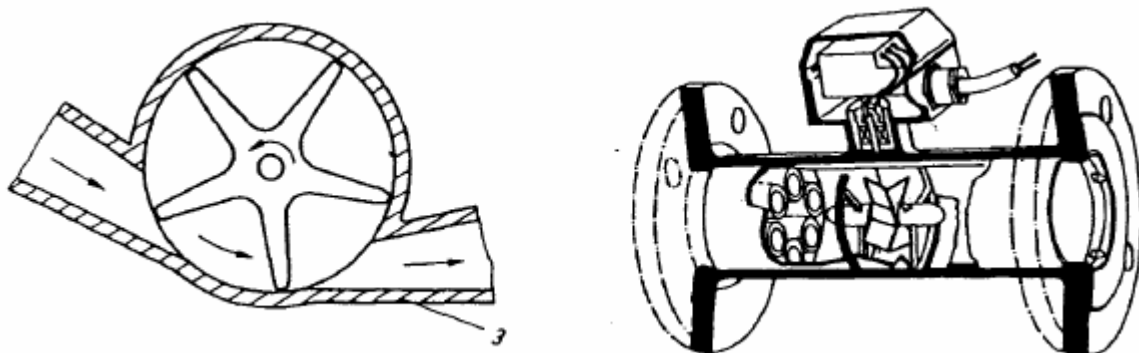
Broj i izbor mjernih točaka na površini mjernog presjeka ovise o određenim uvjetima i očekivanoj točnosti mjerenja. Nakon mjerenja brzine strujanja u određenom broju točaka mjernog presjeka potrebno je izračunati srednju vrijednost brzine za cijelu površinu mjernog presjeka. Množenjem dobivene vrijednosti s površinom mjernog presjeka dobivamo vrijednost protoka.

Pri vrlo brižljivom mjerenju, za tekućine se može postići točnost od 1 do 1,5 %, a za plinove oko 3 %. Ta mjerenja se ponekad izvode tako da se hidrometrijski krilo kreće kroz proticajni (mjerni) presjek.

Ako nije potrebna točnost veća od 5 %, hidrometrijsko krilo se može fiksirati u jednoj točki mjernog presjeka. Kod kružnih mjernih presjeka krilo se postavlja na oko  $0,75 D/2$  od osi.

#### 4.4.5 Mjerno kolo

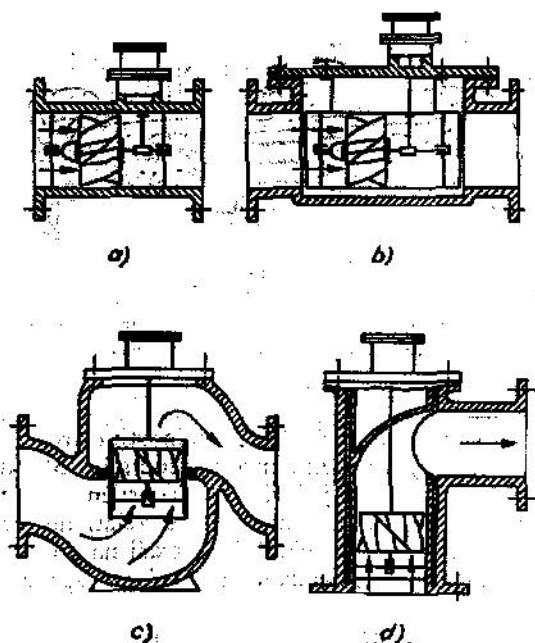
U mjerni instrument se ugradi kolo s krilcima tako da zauzme cijeli protočni presjek. Protok je tada proporcionalan broju okretaja mjernog kola. Tu postoji više različitih rješenja, a najraširanije u upotrebi je turbinsko kolo s mjernim krilcima (Slika 4.4.:15).



Slika 4.4.:15 Vodomer s mjernim krilcima

#### 4.4.6 Turbinski mjeraci protoka

Mjerenje protoka fluida turbinskim ili krilnim vodomjerima svodi se na mjerenje brzine strujanja fluida pomoću mjernog turbinskog rotora ili tzv. Woltmannovog krila.



Slika 4.4.:16 Različite izvedbe klasičnih turbinskih mjerila protoka. Kod izvedbe b), c) i d) čitav mjerni uložak se može zamijeniti



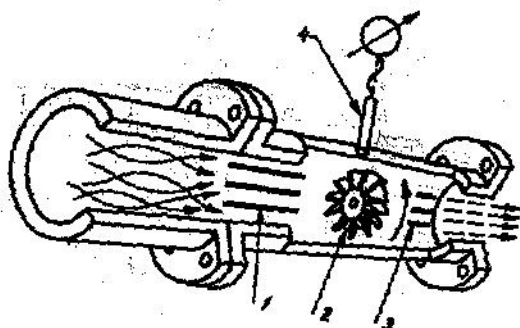
Turbinska mjerila, čiji rotor pokriva cijelu površinu mjernog presjeka, upotrebljavaju se na cjevovodima sve do 1000 mm promjera. Na taj način se istovremeno i neposredno mjeri srednja brzina strujanja kroz cijelu površinu mjernog presjeka. Time se povećava točnost mjerenja.

Na slici 4.4.:16 su prikazani tipični turbinski mjerači protoka. Mjerni rotori izrađeni su obično od sintetičkih materijala, a po potrebi mogu biti i od metala. Prijenos vrtnje rotora na brojilo vrši se mehanički. Kod boljih konstrukcija turbinskih mjerila moguća je zamjena cijelog mjernog mehanizma na licu mjesta.

Poluzatvoreni ventili, koljena i različite armature koje zaditu u proticajni presjek cjevovoda negativno utječu na točnost mjerenja. Radi toga se obično preporučuje ispred turbinskog mjerila formirati ravan dio cjevovoda u dužini od 10 do 15  $D$  (pri čemu je  $D$  promjer cjevovoda) te da na tom dijelu cjevovoda nebi smjelo biti ventila ni drugih armatura.

Utjecaj viskoznosti na točnost turbinskih mjerila protoka toliki je da se za svaku vrijednost viskoznosti mjernog fluida mora dati posebna baždarna krivulja.

Proporcionalan omjer između brzine strujanja fluida i kutne brzine rotora osnova je mjerenja protoka pomoću turbinskih mjerača. Pri tome u idealnom slučaju mjerni rotor ne bi smio trošiti kinetičku energiju fluida. Radi toga je osnovni uvjet točnog mjerenja da se u



Slika 4.4.:17 Shema poprečnog presjeka modernog turbinskog mjerača protoka.

praktičkim okolnostima rotor vrti uz što je moguće manji utrošak energije. Međutim trenje u ležajevima, a još više otpor prijenosnog mehanizma i brojila, uvjetuju da se relativno velika količina energije strujanja fluida utroši na pokretanje cijelog mjernog mehanizma. Posljedica toga je pogrešno mjerenje. Važno je napomenuti da je kod manjih brzina na početku mjernog područja ova pogreška veoma velika. Osim toga, svaki tip turbinskog mjerača ima i određenu minimalnu brzinu kretanja fluida, ispod koje se uopće ne kreće mjerni rotor. Pri većim brzinama strujanja fluida brzina vrtnje odgovara proračunatoj vrijednosti.

Na slici 4.4.:17 prikazan je poprečni presjek tipičnog modernog turbinskog mjerača protoka. Fluid ulazi u turbinski mjerac protoka kroz prohodni nosač (1) ležaja mjernog rotora (2). Taj nosač je konstruiran tako da istovremeno služi usmjerava strujanje fluida prije nego što dođe na mjerni rotor. Na taj način su smanjeni nepoželjni utjecaji turbulentnog kretanja fluida. Lopatice rotora su izrađene od feromagnetskog materijala, a kućište mjerila je od

nemagnetskog materijala. Za određivanje brzine vrtnje rotora služi induktivni generator impulsa (4) učvršćen u kućište.

Protjecanje fluida kroz turbinski mjerac protoka uzrokuje vrtnju rotora. Svakim prolaskom feromagnetske lopatice rotora ispred magneta induktivnog generatora impulsa stvara se jedan naponski izlazni impuls. To znači da nekom određenom protoku fluida kroz mjernu cijev odgovara izlazni signal točno određene frekvencije. Turbinska mjerila baždare se tako da se kroz čitavo mjerno područje određuje broj izlaznih impulsa pri protoku točno određene količine fluida. Na taj način se utvrđuje jedna karakteristična veličina, tzv. koeficijent mjerača  $K$ .

Vrijednost koeficijenta mjerača  $K$  daje se kao posve precizan broj impulsa za dati volumen, npr. broj impulsa po jednom litru.

Da bi se ispravno izabrao turbinski mjerac, potrebno je voditi računa o slijedećem:

- predviđenom području korištenja
- kapacitet mjerača treba tako odabrati da očekivani srednji protok iznosi oko 50 % nazivnog
- viskoznost fluida mora biti definirana za cijelo radno temperaturno područje.

Glavne prednosti turbinskih mjerača protoka:

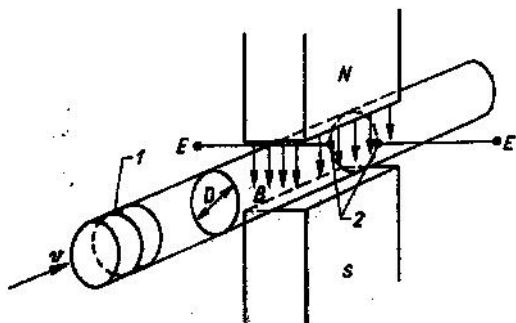
- velika točnost, linearnost i ponovljivost,
- mogućnost digitalnog i analognog izlaza,
- raspon mjernog područja do 150 : 1,
- trajno zadržavanje baždarskih vrijednosti,
- u nekim izvedbama mogućnost zamjene oštećenog rotora rezervnim baždarenim rotorom,
- relativna neosjetljivost na nečistoću fluida,
- male dimenzije za dati kapacitet;
- lako pogonsko održavanje;
- malen pad tlaka.

#### **4.4.7 Indukcioni mjeraci protoka**

Indukcioni ili magnetski mjeraci protoka predstavljaju napredak u tehnici mjerenja protoka, pogotovo za različite viskozne tekućine i paste, celulozne mase, jako agresivne tekućine, vode koja nosi pijesak ili druge krute komade i čestice itd. što se ranije obavljalo s velikim teškoćama i nepouzdanošću.

##### Princip mjerenja

Mjerenje se zasniva na zakonu indukcije, koji je M. Farady objavio još 1831.godine no prva komercijalna indukciona mjerila proizvedena su tek poslije 1959.godine.



Slika 4.4::18 Shema rada induktivnog mjerača protoka

Princip rada indukcionog mjerača prikazan je na slici 4.4::18. Cjevovod kroz koji protječe mjerna tekućina presjecaju poprečno linije magnetskog polja. Mjerna tekućina mora biti električki vodljiva, a zbog boljeg razumijevanja zamislimo da je i podijeljena na niz tankih diskova (1) (slika 4.4::18), čija je ravnina okomita na os cjevovoda. Na taj način protok tekućine kroz cjevovod možemo promatrati kao poprečno kretanje niza elektrovodljivih diskova, koji pri svom kretanju sijeku silnice magnetskog polja, prema zakonu indukcije, u vodiču koji se kreće kroz magnetsko polje inducirat će se električna struja.

Inducirani napon  $E$  proporcionalan je brzini kretanja tekućine, a samim tim i zapreminskoj količini protoka. Indukcioni mjerac prikazan na slici 4.4::18 koristi se istosmjernim homogenom magnetskim poljem. Inducirani napon proporcionalan je protoku

$$U = K \cdot B \cdot v \cdot D$$

gdje je:

$U$  = inducirani napon

$K$  = konstanta instrumenta

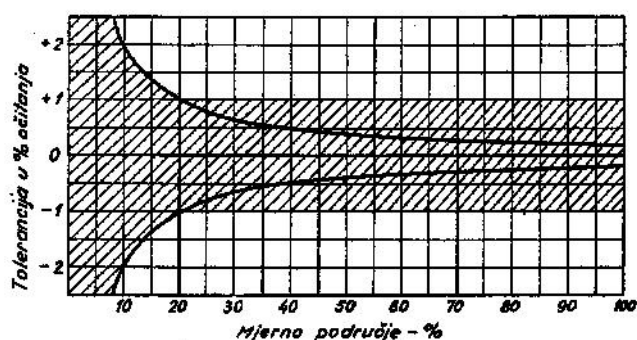
$B$  = jakost magnetskog polja

$v$  = srednja brzina

$D$  = promjer cijevi

Turbulentnost strujanja mjernog fluida ne utječe značajnije na točnost mjerenja. To je za praksu veoma važno, jer nam omogućuje da mjernu cijev ugradimo bilo gdje u cjevovod, bez obzira na različite armature i konfiguraciju cjevovoda.

Indukciono mjerilo protoka vjerno registrira pulzirajuće tokove. Ako je važno vjerno registriranje naročito brzih promjena brzine protoka, valja upotrijebiti mjernu cijev s istosmjernim magnetnim poljem. Greška mjerenja iznosi 0,2 do  $\pm 0,5$  % područja (sl. 4.4::19)



Slika 4.4::19 Prikaz greške mjerenja u ovisnosti o dijelu mjernog područja

S obzirom na tehničke karakteristike, a osobito u pogledu primjene pod najtežim okolnostima, upotreba indukcionih protočnih mjerila postaje sve šira.

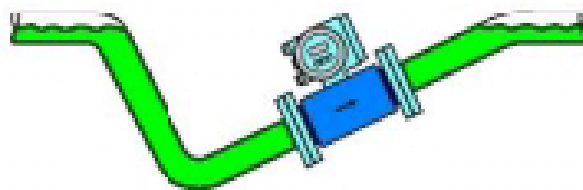
#### Prednosti

- mjerni instrument nije dodatni otpor strujanju tekućine, te nema pada tlaka i nakupljanja suspendiranih čestica iz tekućine,
- moguće je mjeriti sve vrste agresivnih tekućina a kako nema pomičnih dijelova u toku ovaj mjerac se može koristiti za vrlo onečišćene fluide
- mjerenje je neovisno o promjenama tlaka, temperature, viskoznosti i gustoći protjecajne tekućine,
- magnetsko polje prolazi kroz cijelo područje protoka, signal predstavlja srednju vrijednost u cijevi,
- nije potrebna posebna pažnja u vezi s konfiguracijom priključnih cjevovoda,
- mjerna skala je potpuno linearna kroz cijelo mjerno područje,
- postoji mogućnost primjene na nekoliko mjernih područja;
- mogućnost mjerenja protoka u oba smjera;
- veoma brzi odziv.

#### Nedostaci

- nemogućnost mjerenja protoka električki nevidljivih tekućina. To su prije svega nafta i njezini derivati. Određenim dodacima, kada to tehnologija omogućuje i kad nije preskupo, neke nevodljive tekućine mogu se učiniti električki vodljivima.
- relativno visoka cijena.
- relativno velika potrošnja električne energije, što je u zavisnosti od dimenzija 40 do 700 W.

Elektromagnetski mjerac protoka se može ugraditi i na sifon koji se izvodi na postojećoj kanalizacijskoj cijevi tako da se dobiva cijev čiji je profil stalno ispunjen jer elektromagnetski mjerni instrument ne može precizno mjeriti brzinu (protok) u profilu koji nije čitav ispunjen vodom (Slika 4.4::20).



Slika 4.4.:20 Ugradba elektromagnetnog mjerača u sifon

Zbog povoljne cijene i visoke točnosti elektromagnetski mjerac se preporučuje za vrlo male te za vrlo velike promjere cijevi u odvodnji.

#### 4.4.8 Ultrazvučni mjerači protoka

Brzina rasprostiranja zvuka je u određenom fluidu i pod određenim uvjetima konstantna, ako se fluid kreće, tada se, u ovisnosti o smjeru rasprostiranja zvuka, njegova brzina povećava ili smanjuje za vrijednost brzine kretanja toga fluida. Na isti je način i frekvencija zvuka, mjerena pomoću fiksiranog detektora zvuka, funkcija je brzine kretanja fluida.

Koristeći se tim efektom, razrađeno je nekoliko različitih tipova uređaja za mjerenje protoka fluida. Uređaji se zasnivaju na mjerenju utjecaja brzine toka fluida na brzinu rasprostiranja ultrazvuka ili na njegovu frekvenciju.

**Doppler-ov efekt**

<p><b>Izvor se približava promatraču:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- valna duljina se smanjuje</li> <li>- frekvencija raste</li> <li>- promatrač opaža pomak prema</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>PLAVOM</b></p>	<p><b>Izvor se udaljava od promatrača:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- valna duljina se povećava</li> <li>- frekvencija pada</li> <li>- promatrač opaža pomak prema</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>CRVENOM</b></p>
--	---

Slika 4.4.:21 Dopplerov efekt

Mjerenja zasnovana na primjeni brzine zvuka se zasniva na ugradnji dvije, međusobno nasuprot postavljene mjerne sonde u cjevovod (slika 4.4.:22). Razmak među sondama predstavlja put kojim se kreće ultrazvuk. Sonde šalju ultrazvučne signale u oba smjera, naizmjenično. Signal protiv smjera strujanja je negativan, a onaj u smjeru strujanja pozitivan. Prvi se strujanjem usporava, a drugi ubrzava. Javlja se razlika u brzini ultrazvuka koja je proporcionalna brzini strujanja. Razlike brzina ultrazvuka direktno je proporcionalna brzini strujanja i time volumnom protoku.

**Nizvodno:**  
 $td = L / (c + v \cos\Phi)$

**Uzvodno:**  
 $tu = L / (c - v \cos\Phi)$

$t = td - tu$   
 $t = \frac{2 v L \cos\Phi}{(c^2 - v^2 \cos^2\Phi)}$

$t \approx \frac{2 v L \cos\Phi}{c^2}$   
 ( $v \ll c$ )

L – razmak između primopredajnika  
 $t_d$  – vrijeme prolaza nizvodnog impulsa  
 $t_u$  – vrijeme prolaza uzvodnog impulsa

Slika 4.4.:22: Princip mjerenja protoka pomoću ultrazvuka



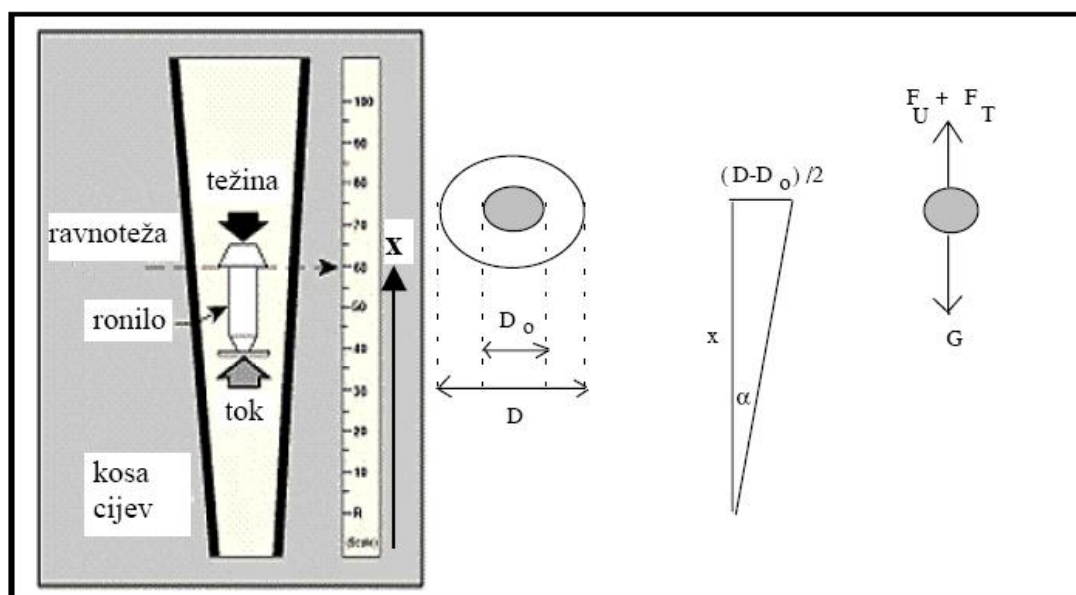
Slika 4.4.:23 Ultrazvučni mjerači ugrađeni na cijevi

#### 4.4.9 Rotametri (mjerenje pomoću lebdećih tijela)

Rotametar je često upotrebljavani uređaj za mjerenje protoka u industriji. Velika zastupljenost rotametara je posljedica jednostavnosti uređaja, široke primjenljivosti s obzirom na mogućnost mjerenja protoka plinova i kapljevina i vrlo veliki mjerni opseg.

Mjerenje rotametrom se također zasniva na povezanosti pada tlaka koji nastaje protjecanjem kroz suženje i protoka tekućine. Za razliku od ugrađenih suženja koja imaju konstantan otvor, kod rotametara je površina suženja promjenljiva. Suženje tvori element (ronilo) koji je uronjen u tekućini koja protječe kroz prozirnu vertikalnu cijev. Ronilo čija je specifična težina veća od specifične težine fluida zauzme položaj koji ovisi o protoku. Većem protoku odgovara položaj ronila na većoj visini, a za vrlo male protoke ronilo pada na dno.

Princip rada se zasniva na izjednačavanju gravitacionih sila i sila otpora oblika. Cijev kroz koju protječe fluid ima promjenljivi radijus, najuži presjek na ulazu u cijev a najširi na izlazu. Tekućina protječe kroz prsten između ronila i cijevi. Položaj ronila je ravnotežni položaj (slika 4.4.:24) definiran težinom ronila ( $G$ ), uzgonom ( $F_U$ ) i silom ( $F_T$ ) kojom tekućina djeluje na ronilo (ova sila je u suprotnom smjeru od sile gravitacije). Protok je definiran položajem ronila ( $x$ ) koji se očitava na skali uz cijev.



Slika 4.4.:24 Shematski prikaz principa mjerenja protoka rotametrom

U ravnotežnom položaju ronila vrijedi jednakost  $F_U + F_T = G$ . Izrazimo sile pomoću parametara:

$$F_U = \rho_T \cdot V_R \cdot g$$

$$F_G = \rho_R \cdot V_R \cdot g$$

$$F_T = f_T \cdot S_R \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_T \cdot v^2$$

$\rho_T$  i  $\rho_R$  su gustoće tekućine i ronila  
 $V_R$  i  $S_R$  su volumen i površina ronila  
 $v$  je srednja brzina tekućine  
 $f_T$  je faktor otpora između tekućine i ronila (sadrži koeficijent otpora oblika i koeficijent otpora trenja,..)  
 $g$  je ubrzanje sile teže

Uvrstimo izraze za sile u jednadžbu ravnoteže:

$$\rho_T \cdot V_R \cdot g + f_T \cdot S_R \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_T \cdot v^2 = \rho_R \cdot V_R \cdot g$$

izrazimo brzinu tekućine:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{g}{f_T} \cdot \frac{V_R}{S_R} \cdot \left( \frac{\rho_R}{\rho_T} - 1 \right)}$$

Volumni protok tekućine je određen produktom površine otvora između ronila i cijevi i srednje brzine tekućine

$$Q = v \cdot S$$

Površinu otvora suženja izračunamo tako da odbijemo od površine veće kružnice (cijevi) površinu manje kružnice (ronila):

$$S = \left( \frac{D}{2} \right)^2 \cdot \pi - \left( \frac{D_0}{2} \right)^2 \cdot \pi$$

Izrazimo relaciju između dijametara i kuta unutrašnje stjenke s vertikalom:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{D - D_0}{2 \cdot x}$$

uvrstimo u izraz za površinu

$$S = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \left[ D_0 + 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot x^2 - D_0^2 \right]$$

Kvadriramo izraz u okrugloj zagradi i zanemarimo iznos kvadrata  $\operatorname{tg}^2(\alpha)$  jer je kut  $\alpha$  vrlo mali po iznosu, te nakon sređivanja izraza dobijemo za površinu suženja

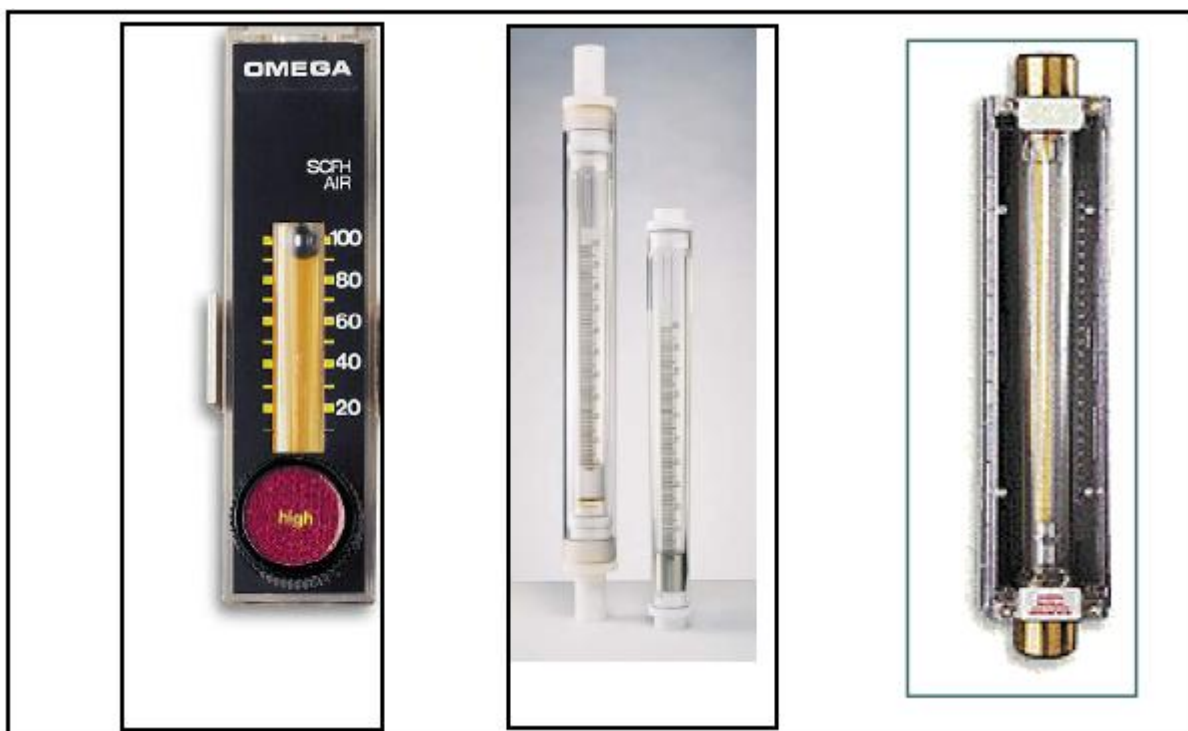
$$S = \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot D_0 \cdot x$$



Nakon uvrštavanja površine u izraz za protok dobije se konačan rezultat:

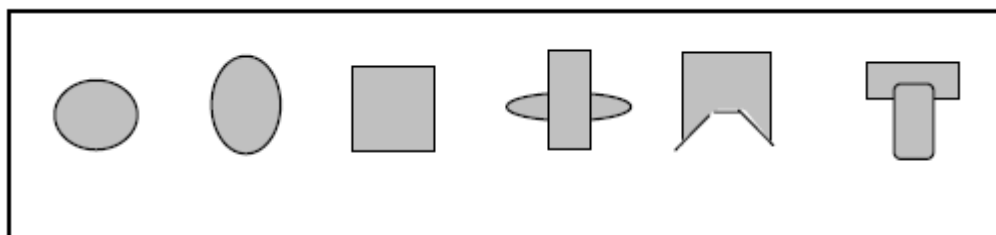
$$Q_v = \pi \cdot t g \alpha \cdot D_0 \cdot x \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{g}{f_T} \cdot \frac{V_R}{S_R} \cdot \left( \frac{\rho_R}{\rho_T} - 1 \right)}$$

Izvedeni rezultat ukazuje kako pojedini parametri utječu na baždarnu karakteristiku. Svojstva tekućine, gustoća i viskozitet, određuju silu uzgona i silu trenja, tako da se baždarna karakteristika jako mijenja promjenom tekućine. Zato je potrebno rotametar uvijek baždariti za odabranu tekućinu, kapljevину ili plin i uz standardne uvjete. Ako se promjeni temperatura ili tlak tekućine mijenjaju se gustoća i viskozitet i time se bitno mijenja karakteristika.



Slika 4.4.:25 Laboratorijski rotametri (A i B); C) industrijski rotametar,

Ronila se izrađuju u različitim oblicima i iz materijala kao što je staklo, metal i plastika. Izborom materijala mijenja se gustoća ronila a oblik bitno utječe na faktor trenja tako da se podešavanjem tih parametara može postići podešavanje mjernog opsega od vrlo malih protoka do velikih protoka koji dolaze u industrijskim pogonima.



Slika 4.4.:26: Različiti oblici ronila za rotametre

## 4.5 Mjerenje sila

Mjerenje sila se najčešće koristi elektrootporni tenzometarski dinamometar koji mjeri deformacije mjernim trakama na štapu ili prstenu opterećenom silama istezanja ili pritiska. Pri konstrukciji dinamometra štap ili prsten trebaju biti tako dimenzionirani da ostanu u elastičnom području. Najvažnija osobina je krutost elastičnog elementa.

Na slici 4.5::1 prikazan je 3D dinamometar koji se koristi u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Postoje različite izvedbe senzora naprezanja, tenzometara (*strain gauge* ili *strain gage*). Senzor naprezanja je priključen na podlogu pomoću odgovarajućeg ljepljivog materijala te tako postaje sastavni dio elementa konstrukcije. Ako dođe do deformacija, senzor se također deformira uzrokujući njene promjene električnog otpora:

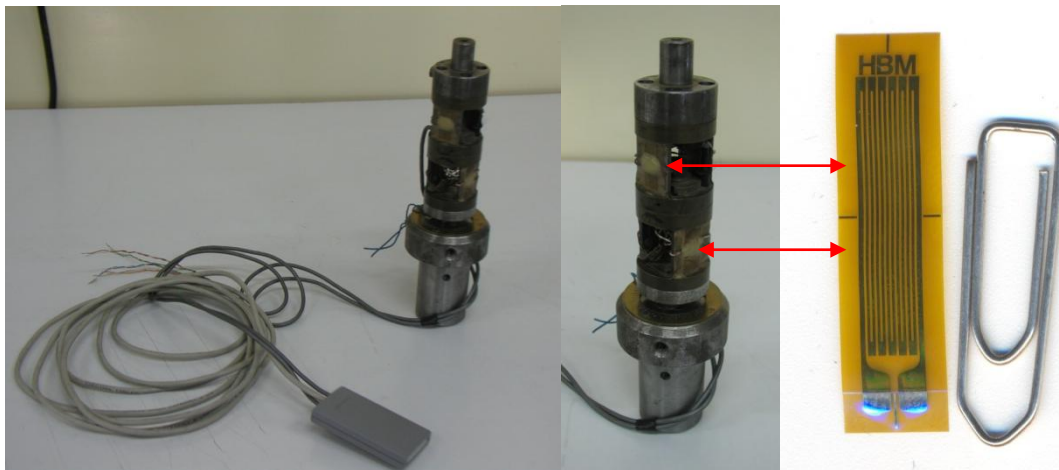
$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R}$$

gdje je:

$\frac{\Delta L}{L}$  .....relativno produljenje (skraćenje)

$K$  .....faktor tenzometra

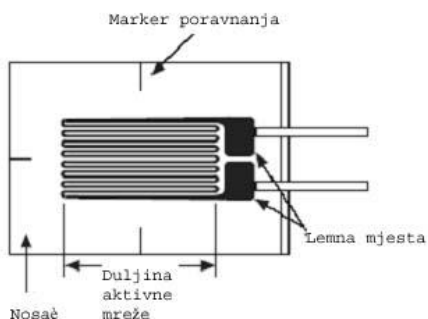
$\frac{\Delta R}{R}$  .....promjena električnog otpora



Slika 4.5::1 Elektrootporni tenzometarski dinamometar

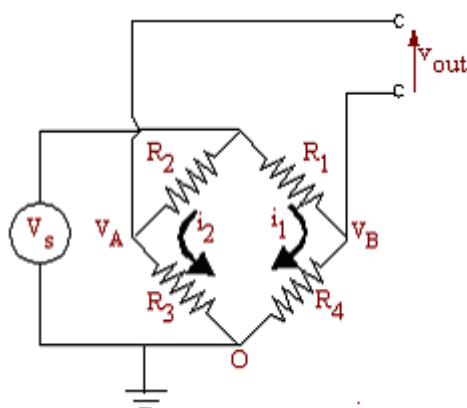
Promjena naprezanja mijenja se električni otpor što se bilježi na računaru. Izmjerene vrijednosti se uspoređuju sa baždarenjem dobivenim te se na taj način određuju sile i momenti na ispitivano tijelo. Izmjerene vrijednosti uspoređuju se sa prethodno baždarenim veličinama.

Najčešće se koriste se  $120\Omega$  i  $350\Omega$  tenzometrijske trake spojene u puni Wheatstone-ov most (Slika 4.5::3).



Slika 4.5::2. Prikaz postavljanja tenzometrijske trake

Kučište dinamometra se obično radi od visokokvalitetnog čelika povišene čvrstoće, na kojem se ljepljeni osam tenzometara spojeno u puni most, s potpunom temperaturnom kompenzacijom.



Slika 4.5::3 Wheatson-ov most

Naponska razlika mjeri se u točkama  $A$  i  $B$  i iznosi:

$$V_{out} = v_A - v_B = i_2 R_3 - i_1 R_4$$

pri čemu su:

- $V_{out}$  napon neuravnoteženja mosta
- $V_i$  naponska stanja u « $i$ » točkama mosta
- $i_i$  struje kroz grane mosta
- $R_i$  otpori grana Winston-ovog mosta

Struje kroz pojedine grane mogu se izračunati preko izraza:

$$i_1 = V_s / (R_1 + R_4)$$

$$i_2 = V_s / (R_3 + R_2)$$

pri čemu je  $V_s$  napon napajanja mosta

Napon na izlazu mosta je:

$$v_{out} / V_s = R_3 / (R_3 + R_2) - R_4 / (R_1 + R_4)$$

Zahtjevani napon napajanja za ovakav električni krug kreće se oko 5-6V, ali taj zahtjev ponekad doseže i 10-15V.

Zbog visoke osjetljivosti kruga treba izbjegavati napajanje preko DC ispravljača jer postoji zagađenje 50 Hz naponskim šumom. Bolje je rješenje upotreba baterija (6V = 4x1,5).



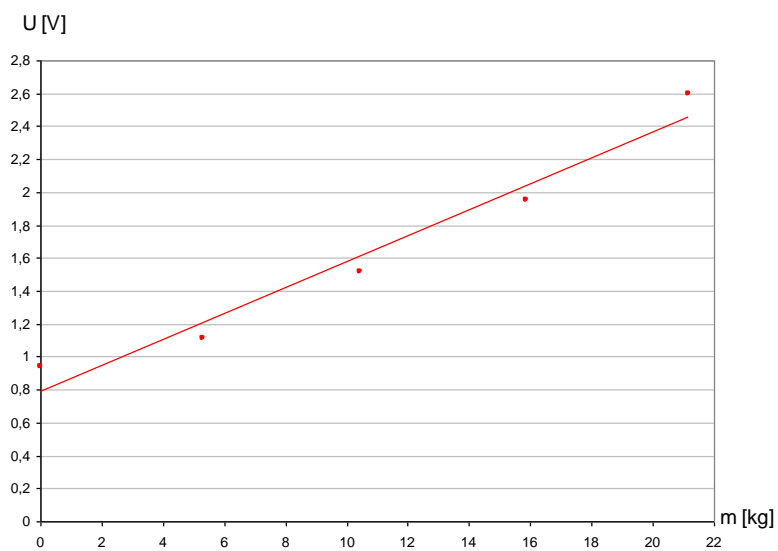
Slika 5.5::4 Dinamometri pripremljeni za ugradnju na model

Baždarenje dinamometara se provodi tako da se model opterećuje sa poznatim etalonskim opterećenjima. Na vrhu barijere se učvrsti sajla koja je preko koluture spojena sa utezima poznate mase (slika 4.5::5). Baždarenjem se provjerava linearnost, histereza, zaostala naprezanja, osjetljivost i drugi dominantni parametri mjernog sustava.



Slika 4.5::5 Baždarenje dinamometara

Kasnijim mjerenjima sva se opterećenja izražavaju relativno u odnosu na etalonsko opterećenje i poznati krak (Slika 4.5::6).



Slika 4.5::6 Dijagram baždarenja dinamometara