



Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet



Merenje protoka u otvorenim tokovima

Merenja u hidrotehnici

4. Vežba

Damjan Ivetić

Miloš Milašinović

Dušan Prodanović



ODABIR MERNE METODE

- Kriterijumi koji diktiraju odabir optimalne metode za merenje Q (Godley, 2002):
 1. **Hidraulički uslovi** – pritisci, brzine, dinamika promena uslova tečenja ...



Npr opšti kanalizacioni sistem
– min/max $Q = 1/1000$

ODABIR MERNE METODE

- Kriterijumi koji diktiraju odabir optimalne metode za merenje Q (Godley, 2002):

2. Fizičke karakteristike vode

„Čista“ voda



Doplerov efekat ne može da se koristi za merenje brzine/protoka

„Prljava“ voda

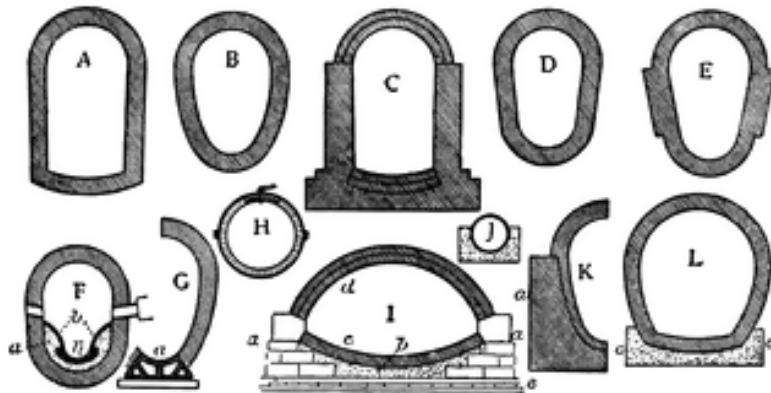


Sa druge strane, zasipanje preliva, taloženje nanosa na predajnik Dopler sonde

ODABIR MERNE METODE

- Kriterijumi koji diktiraju odabir optimalne metode za merenje Q (Godley, 2002):

3. Fizičke karakteristike provodnika



Dimenzije i oblik poprečnog preseka – često limitirajući faktor.

Materijal cevi?

Whitney, W. D. (Ed.). (1891).

4. Zdravstveni uslovi

5. Pored svega potrebno je i ekonomski opravdati izbor ...

MERENJE PROTOKA U OTVORENIM TOKOVIMA

• Merenje protoka Q :

1. Tečenje pod pritiskom

$$A = \text{const}$$



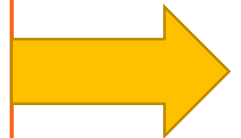
Posledica: Dovoljno je meriti samo brzinu V ili razliku pritiska Δp

2. Otvoreni tokovi

$$A \neq \text{const}$$



Posledica: Mora se ispitati karakter zavisnosti između dubine h i protoka Q



MERENJE PROTOKA U OTVORENIM TOKOVIMA

- Merenje protoka Q :

- 2. Otvoreni tokovi $A \neq const$

- A. Postoji jednoznačna veza $h - Q$

- Merna suženja (Vežba 6)



- Prelici i pragovi

Posledica: Moguće je na osnovu merenja dubine h odrediti Q , ako je poznata $Q(h)$ kriva.

- B. Ne postoji jednoznačna veza $h - Q$

- Svi ostali slučajevi



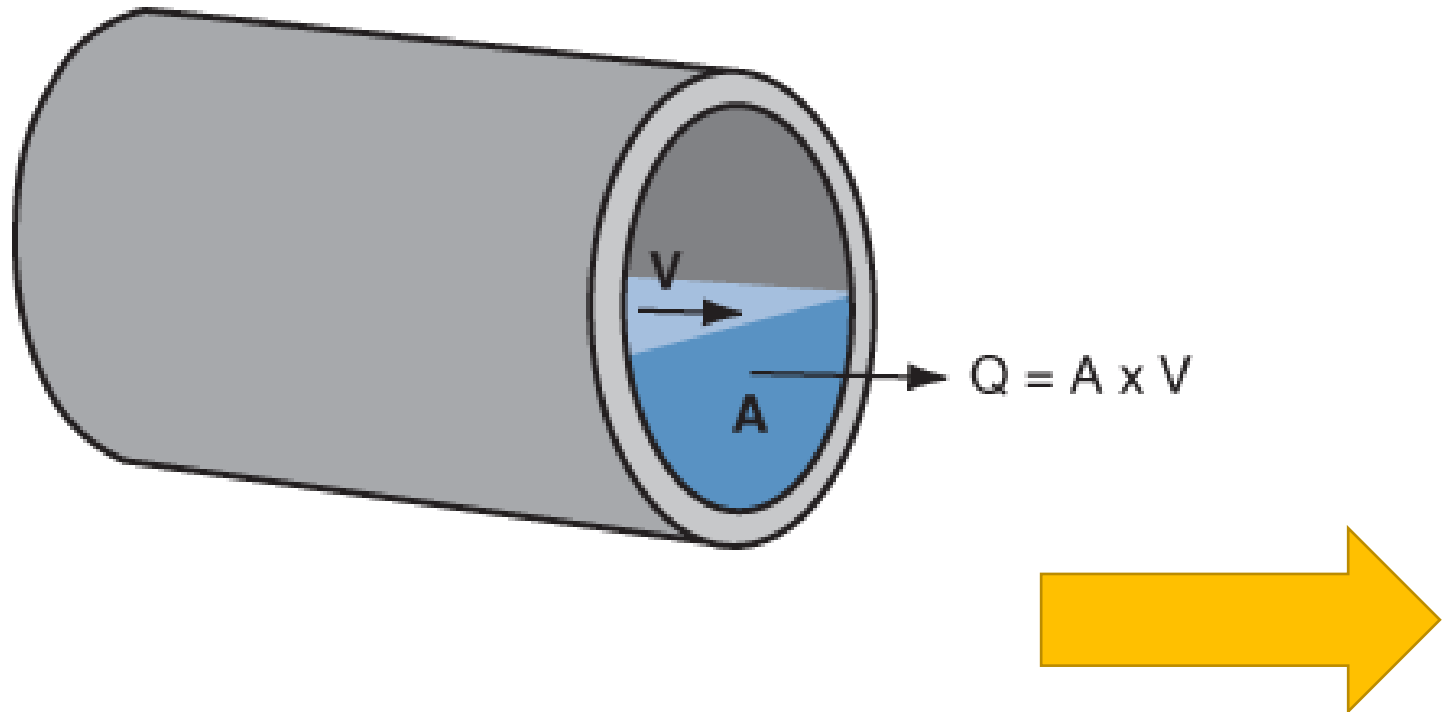
Posledica: Neophodno je paralelno meriti h i V , kako bi se primenio pristup $V - A$.

PRISTUP $V - A$

- **Merenje protoka pristupom $V - A$, podrazumeva paralelno merenje dve veličine:**
 1. **Dubine h** – ukoliko je geometrija proticajnog preseka konstantna (npr betonski kolektor) i unapred poznata, merenjem jedne dubine se može sračunati površina proticajnog preseka A . U suprotnom neophodno su merenja više dubina kako bi se procenila površina A .
 2. **Brzine V** – ključni izazovi u primeni $V - A$ pristupa su odabrati odgovarajuću opremu i adekvatno izmeriti brzinu tečenja V_i u jednoj ili više tačaka (ili vertikalala), na osnovu kojih se može pouzdano odrediti srednja profilska brzina V .

PRISTUP $V - A$

- Merenje protoka pristupom $V - A$, podrazumeva paralelno merenje dve veličine:

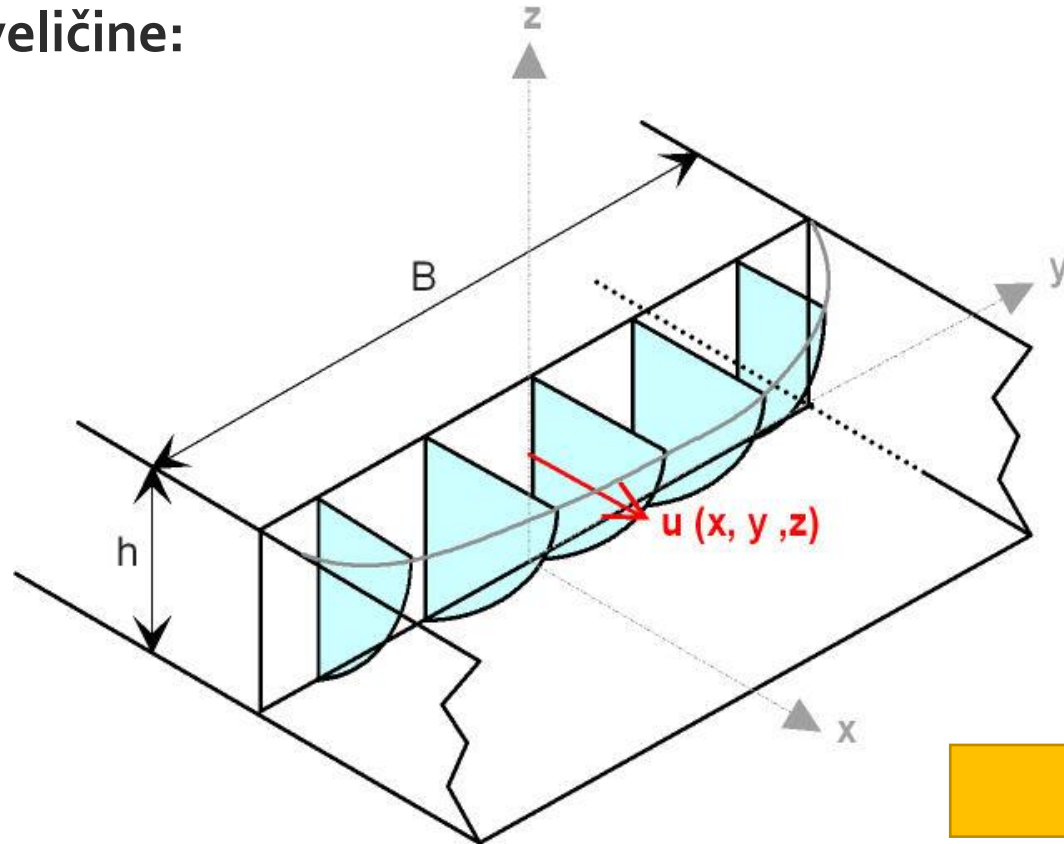


PRISTUP V - A

- Merenje protoka pristupom $V - A$, podrazumeva paralelno merenje dve veličine:

Raspored brzina po proticajnom preseku.

Određivanje srednje profilske brzine je izazovan zadatak!



PRISTUP V - A

1. Integralne metode:
(Retko)

Ceo proticajni presek utiče na
merenje brzine

Posebni EM senzori protoka,
merenje razlike pritiska

2. Polu – integralne metode:
(Često)

Deo proticajnog preseka utiče na
merenje brzine

Dopler senzori, Ultrazvučni
senzori, EM senzori brzine,
Radar,...

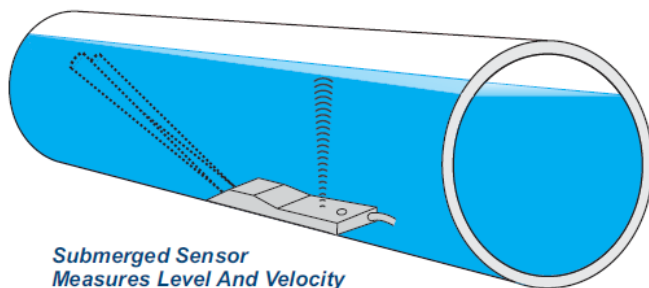
3. Merenje brzine u „tački“:
(Često)

Hidrometrijsko krilo, Pitoova
cev, Dopler senzori (ADV), Laser,
...

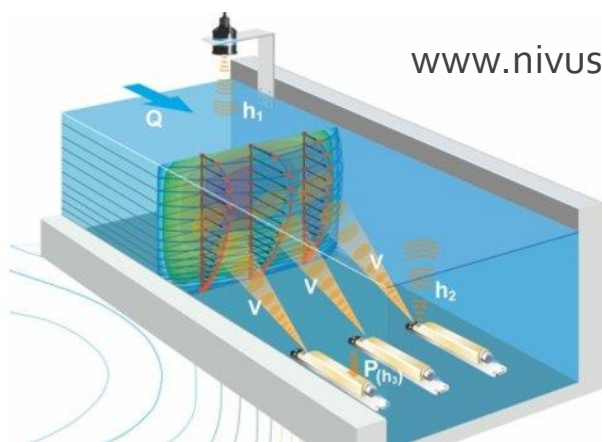
PRISTUP V - A

Dopler senzori

www.fiberman.ca



www.nivus.com



Relativno velika/duboka merna zapremina (zapremina toka koja utiče na izlazni signal),

Mogućnost rada samo u „prljavoj“ vodi,

Nemogućnost rada u slučaju formiranja taloga preko senzora

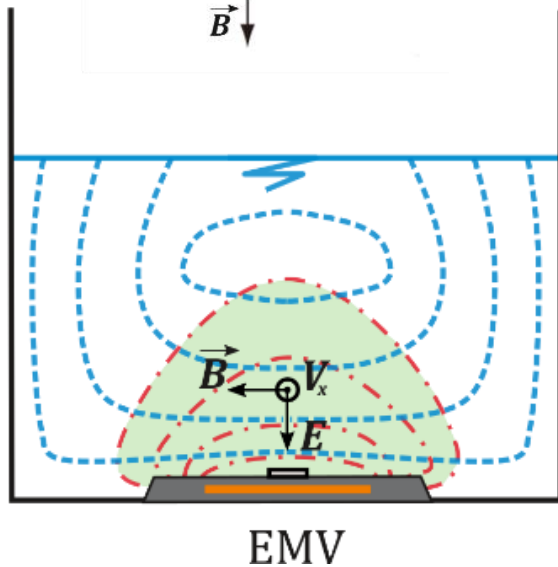
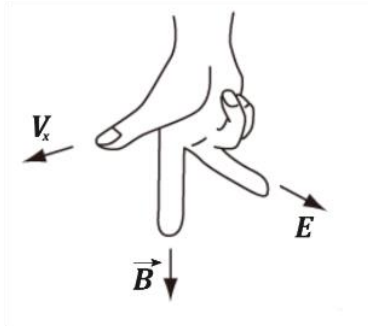
U kanalizacionim sistemima su najpopularniji Dopler senzori (Larrarte et al., 2008)

„Poslednji krik mode“ – preporuka:

<https://www.youtube.com/watch?v=ILiXTCnth1o>

PRISTUP V - A

EM senzori brzine

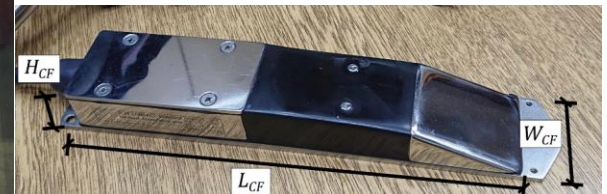
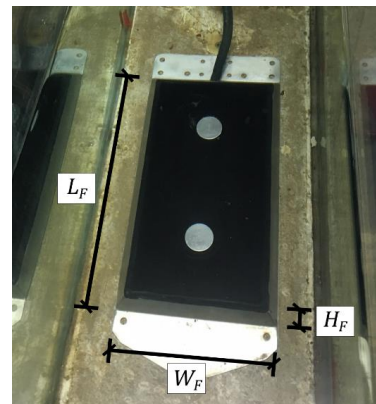


Faradejev zakon indukcije

Mogućnost rada u svim tipovima
provodnih voda

Mogućnost rada u slučaju formiranja
taloga preko senzora

Domaći proizvođač „Svet
Instrumentata“ – Veoma konkurentan
po performansama!



PRISTUP V – A (ONLINE)

Hidrometrijsko krilo



Mehanički uređaj,

Tradicionalan ali ujedno i veoma pouzdan instrument,

Meri se broj obrtaja krila, koji se prevodi u brzinu tečenja,

Kalibracija neophodna... Kao i povremena rekalkibracija.

Kratko uputstvo kako se može raditi sa krilom:

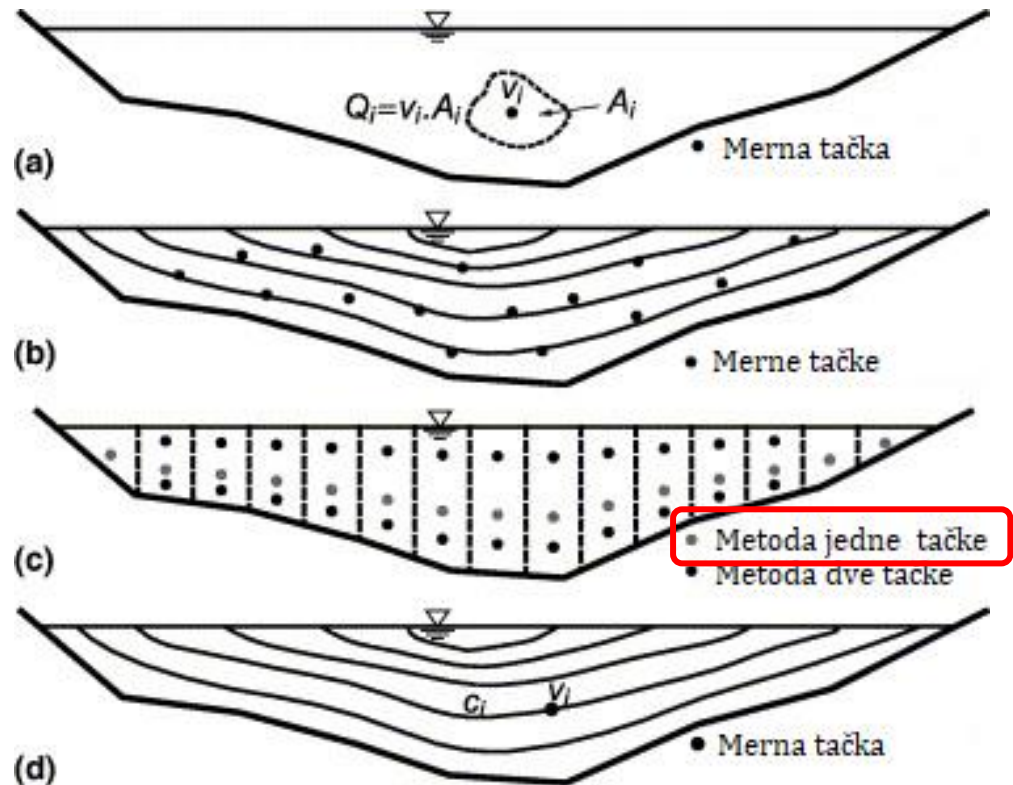
https://www.youtube.com/watch?v=_s5EoT6Puul

PRISTUP V – A (ONLINE)

Hidrometrijsko krilo



Načini određivanja srednje profilske brzine (ipak merimo brzinu u tački samo...):



PRISTUP V – A (ONLINE)

EM krilo (inovativni domaći proizvod –HE Đerdap 2)



KAKO SE DOŠLO DO VAŠIH PODATAKA U VEŽBI

Reka Sušica (opština Valjevo):



KAKO SE DOŠLO DO VAŠIH PODATAKA U VEŽBI

Reka Sušica (opština Valjevo):



KAKO SE DOŠLO DO VAŠIH PODATAKA U VEŽBI

Reka Sušica (opština Valjevo):



PRISTUP $h - Q - \text{MERNI OBJEKTI}$

- **Uslov:** neophodna jednoznačna funkcionalna zavisnost između protoka i dubine $\rightarrow Q = f(h)$
- **Zavisnost 1:** Šezi-Maningova jednačina za jednoliko tečenje

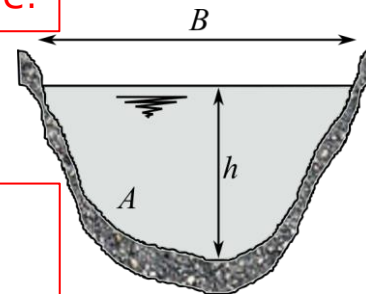
$$Q = \frac{1}{n} \cdot A(h) \cdot R(h)^{2/3} \cdot \sqrt{I_D}$$

Generalno loše rešenje jer se u praksi teško može ostvariti jednoliko tečenje!

- **Zavisnost 2:** Kritični režim $\rightarrow h = h_{kr}$ i $Fr = 1$

$$Fr = \frac{Q^2 \cdot B(h)}{g \cdot A(h)^3} = \frac{V^2}{g \cdot h} = 1$$

Da bi se iskoristila ova funkcionalna zavisnost neophodno je u toku obezbediti pojavu kritičnog režima, tj. kritične dubine!



- **Kako obezbediti h_{kr} ?**



Minimalna specifična energija \rightarrow napraviti prepreku vodi \rightarrow merni objekat

PRISTUP $h - Q - MERNI$ OBJEKTI

- Tipovi mernih objekata

Formiraju kritičnu dubinu

Pragovi

Merna suženja

Slično ali malo drugačije

Prelivi



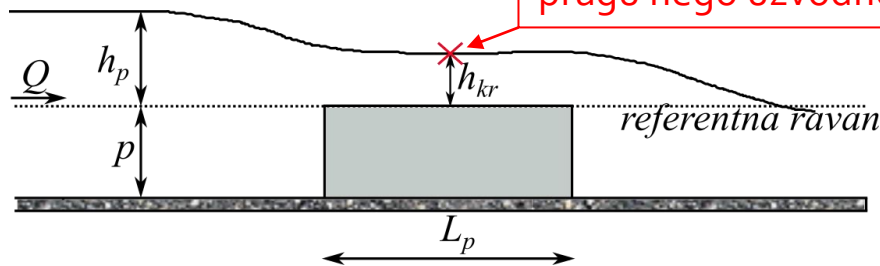
PRISTUP $h - Q - MERNI$ OBJEKTI

- Pragovi
- Ako bi izmerili h_{kr} prema $Fr=1 \rightarrow Q$
- **Problem: ne zna se tačna lokacija kritične dubine** \rightarrow greška pri merenju dubine utiče na protok dobijen preko $Fr=1$
- **Kako rešiti ovaj problem?** \rightarrow uzvodno od praga javlja se miran režim \rightarrow greška pri merenju nivoa manja nego u kritičnom i burnom režimu \rightarrow meriti dubinu negde uzvodno od praga
- **Funkcionalna zavisnost $Q = f(h_{uzv})$ se mora dopuniti e.j-nom**

PRISTUP $h - Q -$ MERNI OBJEKTI

▪ Pragovi

Problem: nepoznata tačna lokacija kontrolnog preseka \rightarrow veća nepouzdanost merenja nivoa na pragu nego uzvodno



$$Fr = \frac{Q^2 \cdot B(h_{kr})}{g \cdot A(h_{kr})^3} = 1$$

Primer: pravougaoni poprečni presek

$$A = B \cdot h$$

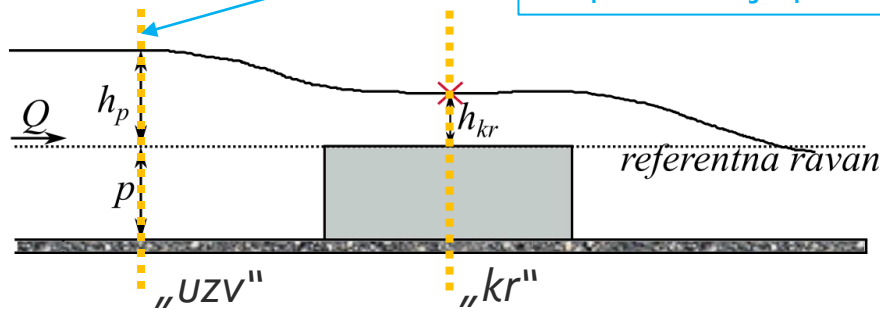
$$Q = B \sqrt{g \cdot h_{kr}^3}$$

Funkcionalna zavisnost $Q = f(h_{kr})$

PRISTUP $h - Q -$ MERNI OBJEKTI

Pragovi

Rešenje: merenje nivoa uzvodno → manja nepouzdanost merenja nivoa → pouzdanija procena protoka



$$Fr = \frac{Q^2 \cdot B(h_{kr})}{g \cdot A(h_{kr})^3} = 1$$

Primer: pravougaoni poprečni presek

$$A = B \cdot h$$

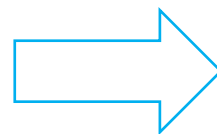
$$Q = B \sqrt{g \cdot h_{kr}^3}$$

Funkcionalna zavisnost $Q = f(h_{kr}) \rightarrow$ nepouzdana

Dopuna zavisnosti na $Q = f(h_p) \rightarrow$ preko e.j od „uzv“ do „kr“

$$h_p + \frac{v_{uzv}^2}{2g} = h_{kr} + \frac{v_{kr}^2}{2g} (1 + \xi_{uzv})$$

$$Fr = \frac{v_{kr}^2}{g \cdot h_{kr}} = 1 \Rightarrow \frac{v_{kr}^2}{g} = h_{kr}$$

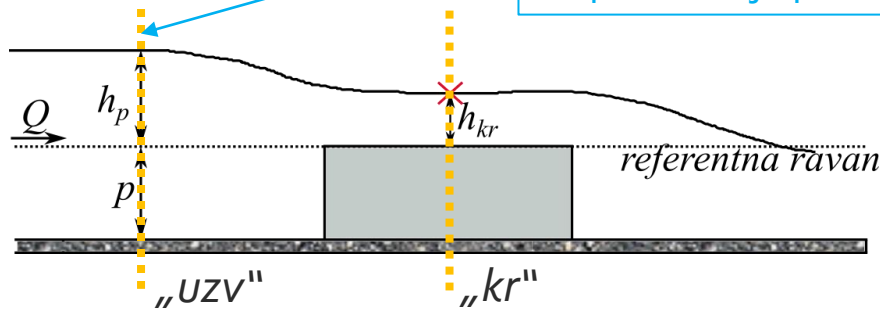


$$h_p + \frac{v_{uzv}^2}{2g} \approx 0 = h_{kr} + \frac{h_{kr}}{2} (1 + \xi_{uzv})$$

PRISTUP $h - Q -$ MERNI OBJEKTI

Pragovi

Rešenje: merenje nivoa uzvodno → manja nepouzdanost merenja nivoa → pouzdanija procena protoka



$$Fr = \frac{Q^2 \cdot B(h_{kr})}{g \cdot A(h_{kr})^3} = 1$$

Primer: pravougaoni poprečni presek

$$A = B \cdot h$$

$$Q = B \sqrt{g \cdot h_{kr}^3}$$

Funkcionalna zavisnost $Q = f(h_{kr}) \rightarrow$ nepouzdana

Dopuna zavisnosti na $Q = f(h_p) \rightarrow$ preko e.j od „uzv“ do „kr“

$$h_{kr} = \frac{2}{3 + \xi_{uzv}} \cdot h_p$$

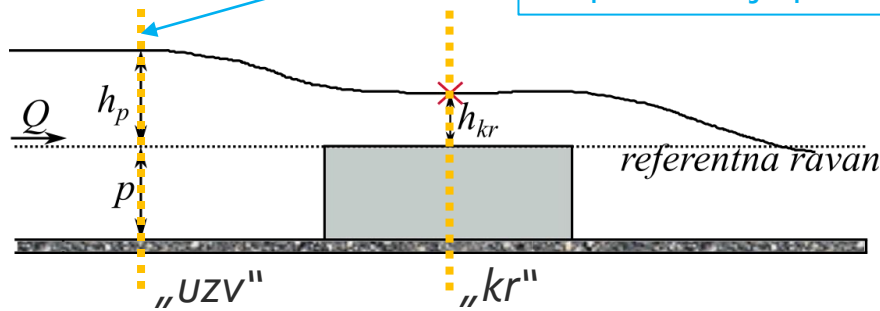
$$Q = \frac{2}{(3 + \xi_{uzv})^{3/2}} \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_p^3}$$

koeficijent m

PRISTUP $h - Q -$ MERNI OBJEKTI

Pragovi

Rešenje: merenje nivoa uzvodno \rightarrow
 manja nepouzdanost merenja nivoa
 \rightarrow pouzdanija procena protoka



$$Fr = \frac{Q^2 \cdot B(h_{kr})}{g \cdot A(h_{kr})^3} = 1$$

Primer: pravougaoni poprečni presek

$$A = B \cdot h$$

$$Q = B \sqrt{g \cdot h_{kr}^3}$$

Funkcionalna zavisnost $Q = f(h_{kr}) \rightarrow$ nepouzdana

Dopuna zavisnosti na $Q = f(h_p) \rightarrow$ preko e.j od „uzv“ do „kr“

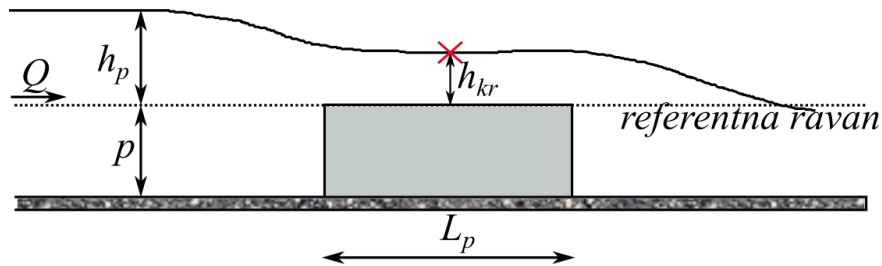
$$h_{kr} = \frac{2}{3 + \xi_{uzv}} \cdot h_p$$

$$Q = m \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_p^3}$$

$m=0.385$ za idealan fluid, za realan manje (zavisi od oblika uzvodne ivice; predmet ispitivanja u vežbi)

PRISTUP $h - Q - M$ – MERNI OBJEKTI

- Pragovi
- Uslovi pri projektovanju

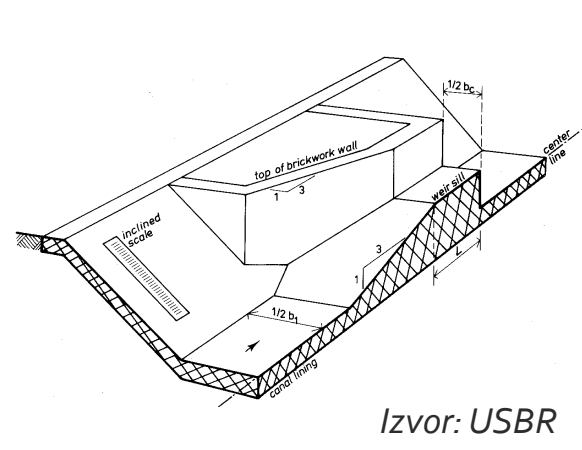


$$p \geq h_p$$

$$3 \cdot h_p < L_p < 5 \cdot h_p$$

PRISTUP $h - Q - MERNI$ OBJEKTI

- Merna suženja
- Funkcionišu po istom principu kao prag
- h_{kr} u suženju ali nepoznata tačna lokacija kritične dubine
- Meri se dubina uzvodno od suženja $\rightarrow Q = f(h_{uzv})$
- Prednost u odnosu na prag \rightarrow bolji pronos nanosa!



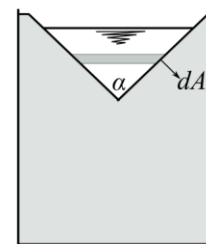
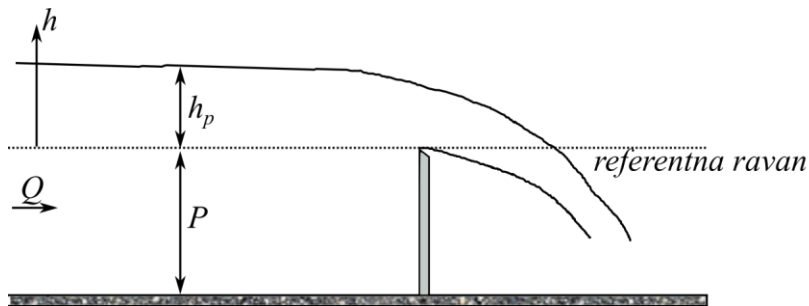
PRISTUP $h - Q -$ MERNI OBJEKTI

- Prelivi
- Ovazdušenje mlaza nakon prelivanja
- Meri se visina prelivnog mlaza $\rightarrow Q = f(h_p)$
- Mana \rightarrow opasnost od zadržavanja nanosa!



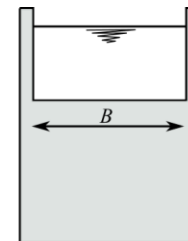
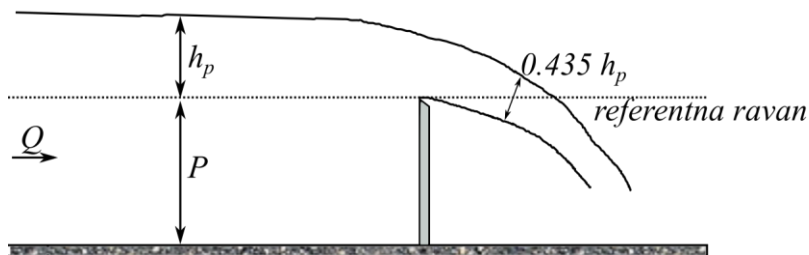
PRISTUP $h - Q - MERNI$ OBJEKTI

- Prelivi



Trougaoni (Tomsonov)

$$Q = \frac{8}{15} \cdot m \cdot \sqrt{2g \cdot h_p^5}$$

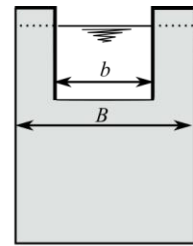
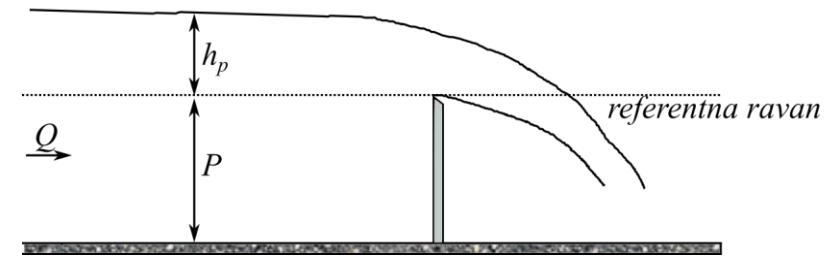


Pravougaoni

$$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2g \cdot h_p^3}$$

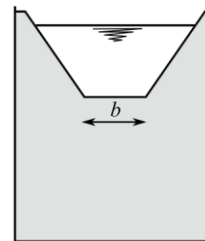
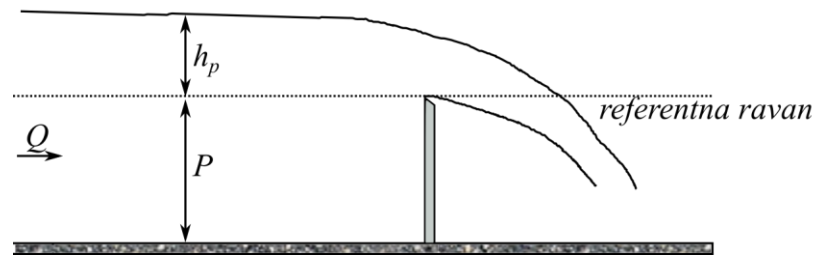
PRISTUP $h - Q -$ MERNI OBJEKTI

▪ Prelivi



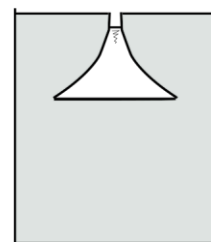
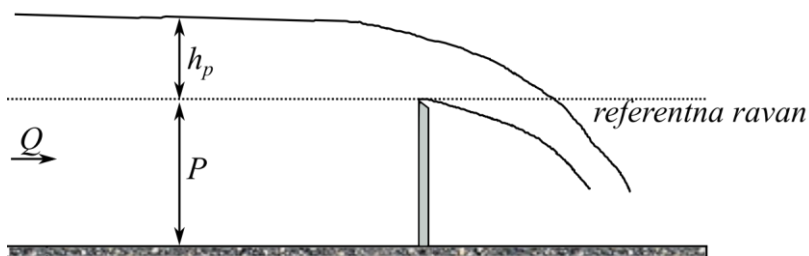
Pravougaoni sa bočnim kontrakcijama

$$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2g \cdot h_p^3}$$
$$m = m\left(\frac{b}{B}, \frac{h_p}{b}\right)$$



Trapezni

$$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2g \cdot h_p^3}$$

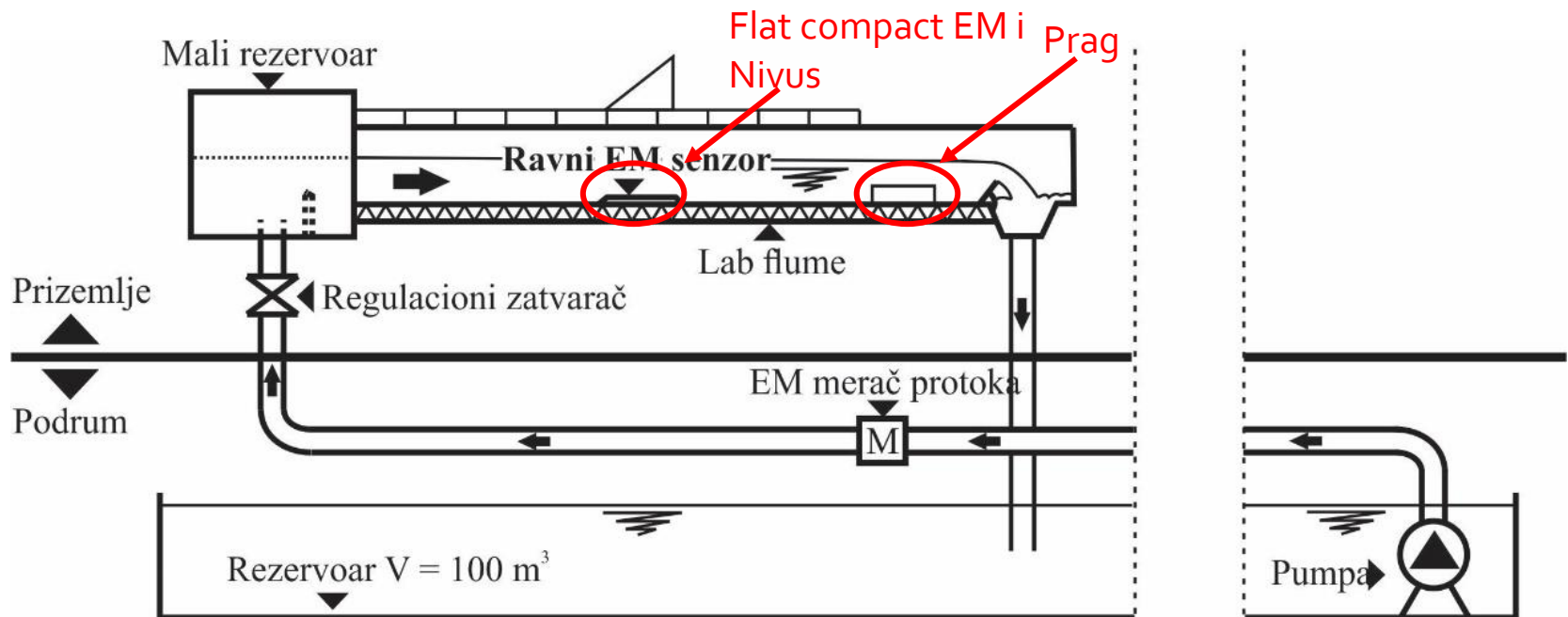


Proporcionalni

$$Q = m \cdot h_p$$

MERENJE PROTOKA – VEŽBA

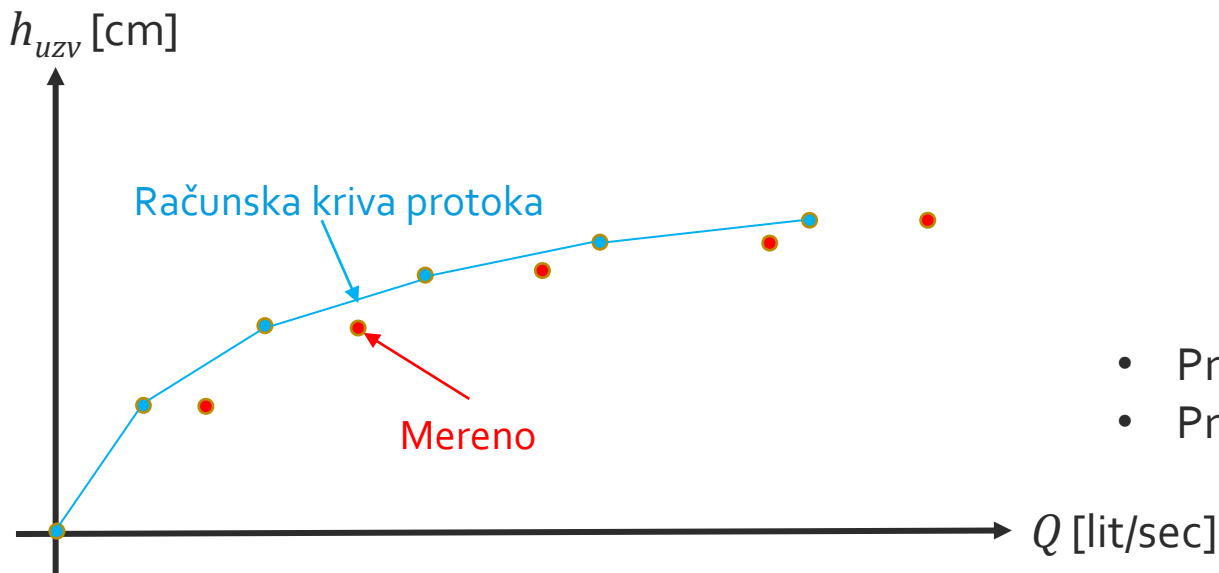
- Odrediti koeficijent preliivanja m i formirati krivu protoka za prag u laboratorijskom kanala
- Postupak: meri se etalonski, Nivus I Flat compact protok



MERENJE PROTOKA – VEŽBA

Obrada rezultata

$$Q = m \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{uzv} - p)^3}$$



- Određivanje koeficijenta m (5 protoka)

m_1
m_2
m_3
m_4
m_5
m_{sr}

- Provera nepotopljeno (3 protoka)
- Provera potopljeno (3 protoka)



Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet



Merenje protoka u otvorenim tokovima

Merenja u hidrotehnici

4. Vežba

Damjan Ivetić

Miloš Milašinović

Dušan Prodanović

