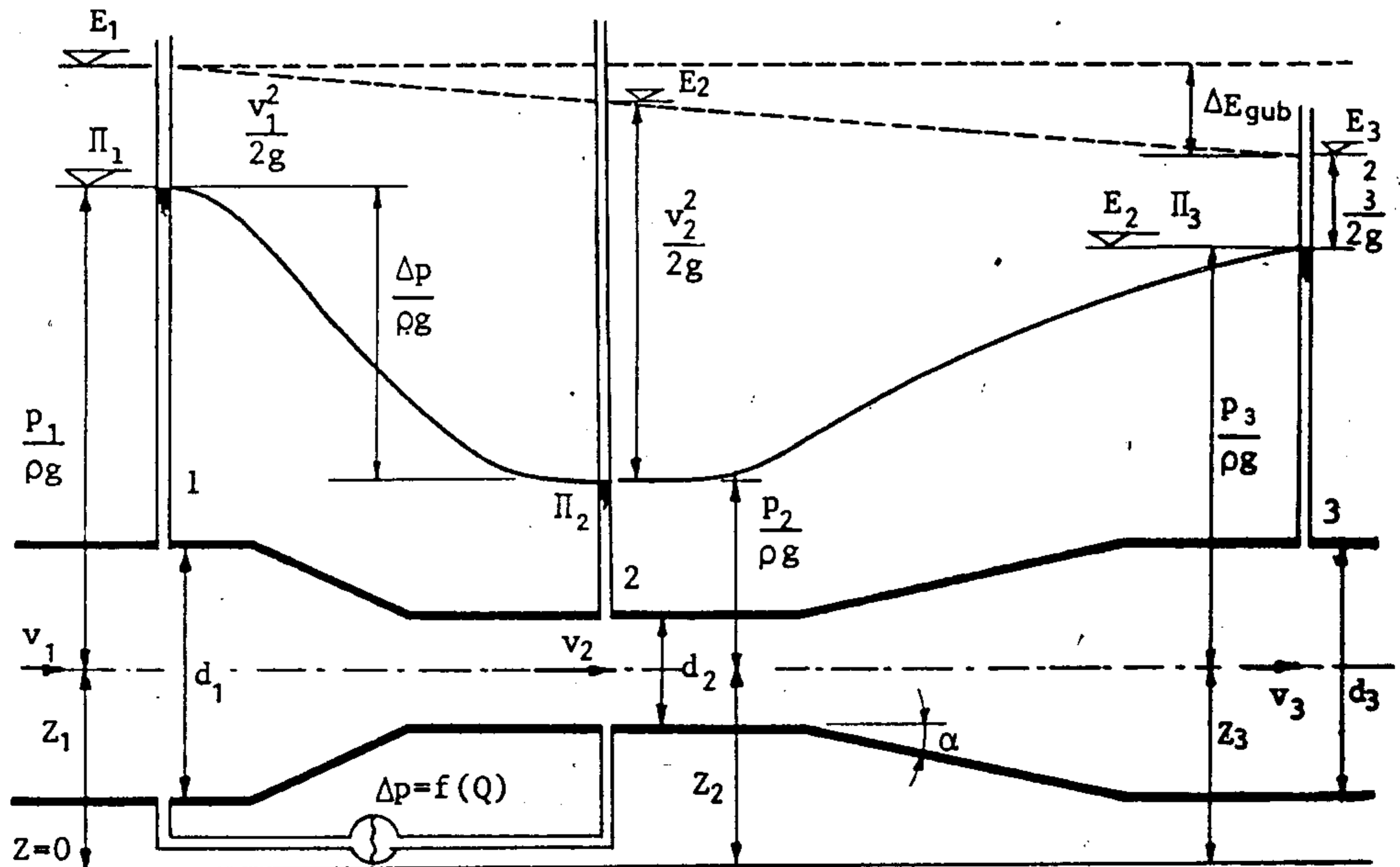


IV 4. MERENJE PROTOKA U CEVIMA POD PRITISKOM

IV 4.1. Uređaji sa lokalnim promenama u toku

Ovaj metod merenja često se koristi jer se bazira na jednostavnom principu merenja razlike pritiska u cevi ispred i u suženom delu (delu gde je prepreka).

U ovu grupu spadaju merači tipa venturi, prigušnice (za koje se koriste i termini blenda i dijafragma), mlaznice i slično.



Slika IV 13. Princip merenja protoka pomoću suženja tipa Venturi

Primena energetske i piježometarske linije u zoni suženja prikazana je šematski na slici IV 13.

Energetska jednačina za tok između preseka 1-1 i 2-2 glasi:

$$\Pi_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \Pi_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta E_{\text{gub}}^{1 \rightarrow 2} \quad \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} = \Delta \Pi \quad (\text{IV } 4)$$

Za slučaj idealnog fluida (gubitak energije zanemarljiv) i kombinacijom sa jednačinom kontinuiteta koja glasi:

$$v_1 \frac{d_1^2 \pi}{4} = v_2 \frac{d_2^2 \pi}{4} \quad \frac{Q^2}{A_1^2 (2g)^2} - \frac{Q^2}{A_2^2 (2g)^2} = \Delta \Pi \quad (\text{IV } 5)$$

dobija se izraz za protok

$$Q_{\text{id}} = \frac{d_2^2 \pi}{4} \frac{1}{\sqrt{1 - (d_2/d_1)^4}} \sqrt{2g \Delta \Pi} \quad (\text{IV } 6)$$

Uvodeći da je kod realnog fluida odnos protoka:

$$\frac{Q}{Q_{\text{id}}} = C_Q \quad (\text{IV } 7)$$

dobija se:

$$Q = C_Q \frac{d_2^2 \pi}{4} \frac{1}{\sqrt{1 - (d_2/d_1)^4}} \sqrt{2g \Delta \Pi} \quad (\text{IV } 8)$$

Razlika piježometarske kote može se izraziti preko razlike pritiska kao:

$$\Delta \Pi = \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 - \left(\frac{P_2}{\rho g} + Z_2 \right) \quad (\text{IV } 9)$$

odnosno

$$\Delta \Pi = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} - \Delta Z = \frac{1}{\rho g} \Delta p - \Delta Z \quad (\text{IV } 10)$$

Za horizontalno postavljenu cev ΔZ jednaka je nuli.

Pošto su za izabrani tip ovakvog vodomera ugrađenog u konkretnu instalaciju vrednosti d_2/d_1 , $Z_2 - Z_1 = \Delta Z$, $d^2 \pi / 4$ konstante, a promenljiva je

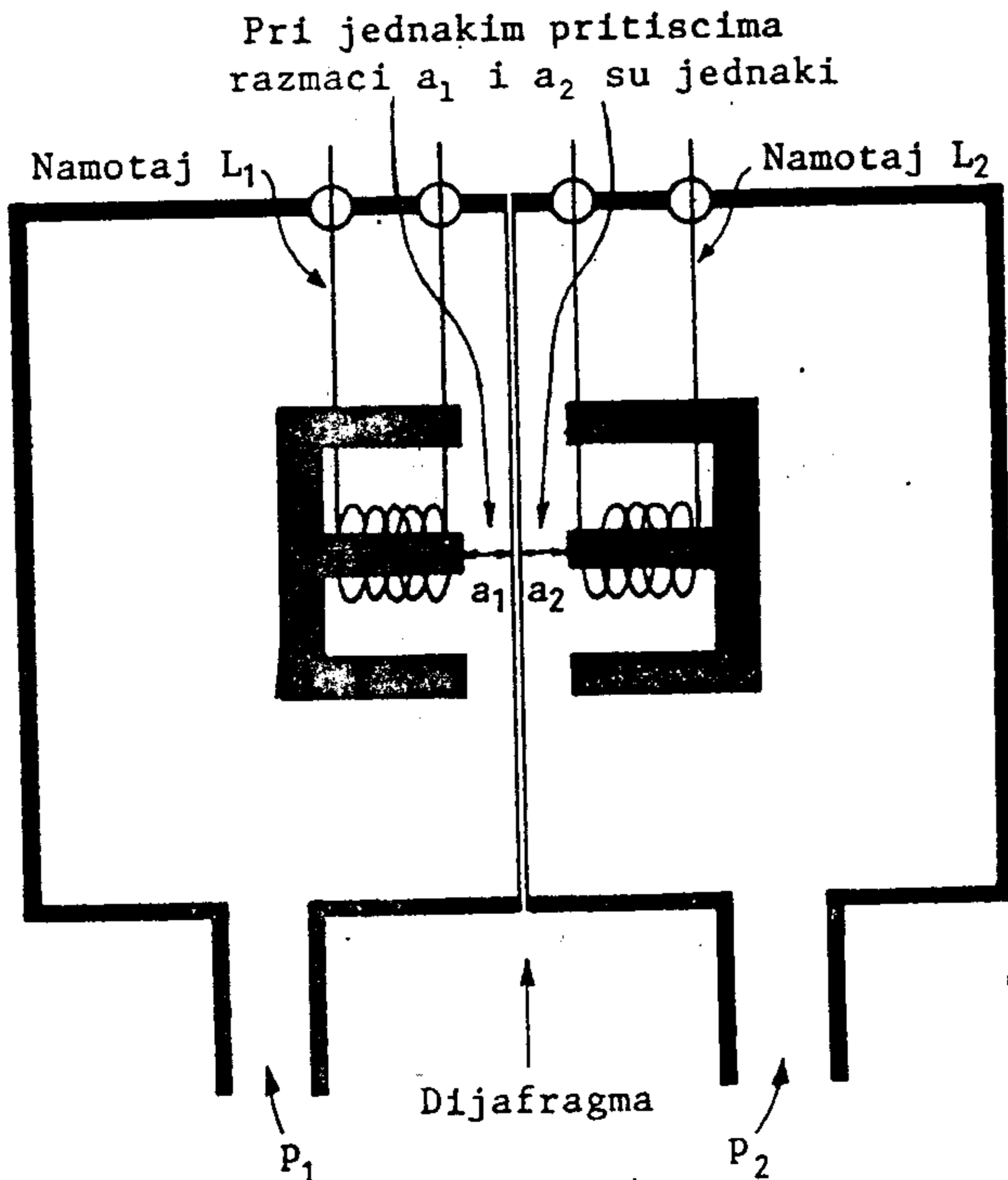
jedino Δp , dobija se konačno da je:

$$Q = f(\Delta p, C_Q) \tag{IV 11}$$

$$C_Q = C_Q(Re) \tag{IV 12}$$

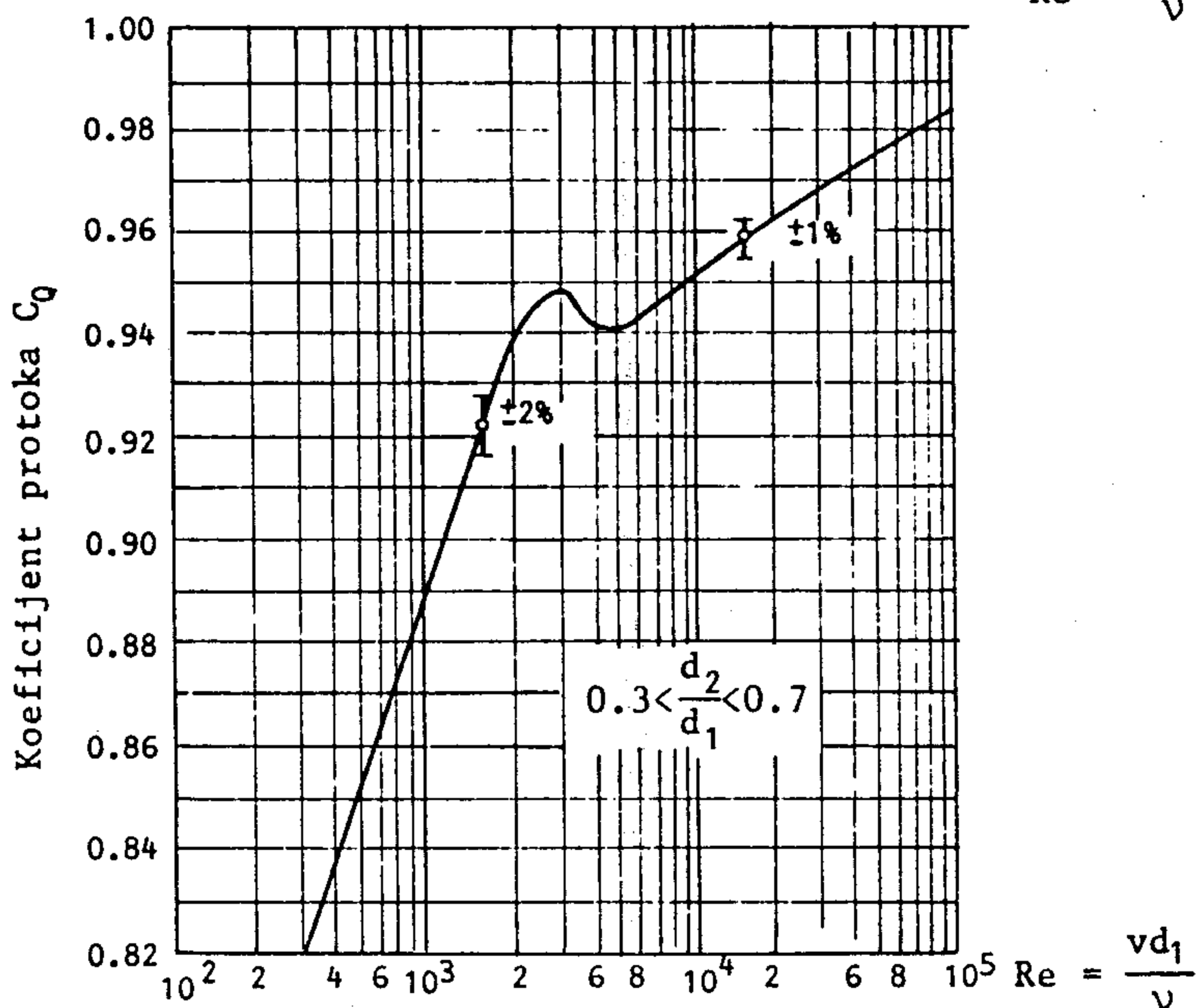
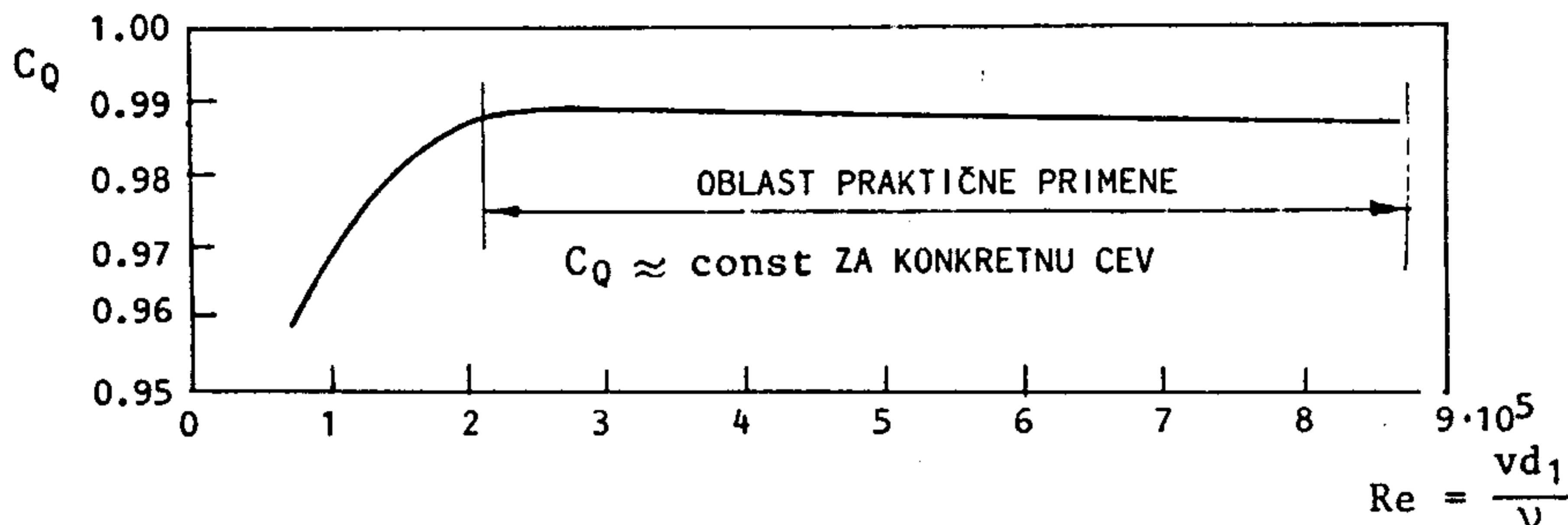
Postavljanjem manometra za merenje razlike pritiska (diferencijalnog manometra) dobija se mogućnost jednostavnog merenja protoka. Korišćenjem diferencijalnog manometra sa električnim izlazom (primer dat na sl. IV 14. je manometar na principu promenljive reluktance) ostvaruje se mogućnost daljinskog prenosa informacija o protoku i eventualnog korišćenja mikroprocesorskog registrovanja i obrade podataka.

Koeficijent protoka C_Q se kao što je rečeno menja u zavisnosti od Reynolds-ovog broja. Za jedan tip Venturijevog suženja ta zavisnost je prikazana na sl. IV 15.



Slika IV 14. Električni diferencijalni manometar na bazi promenljive reluktance

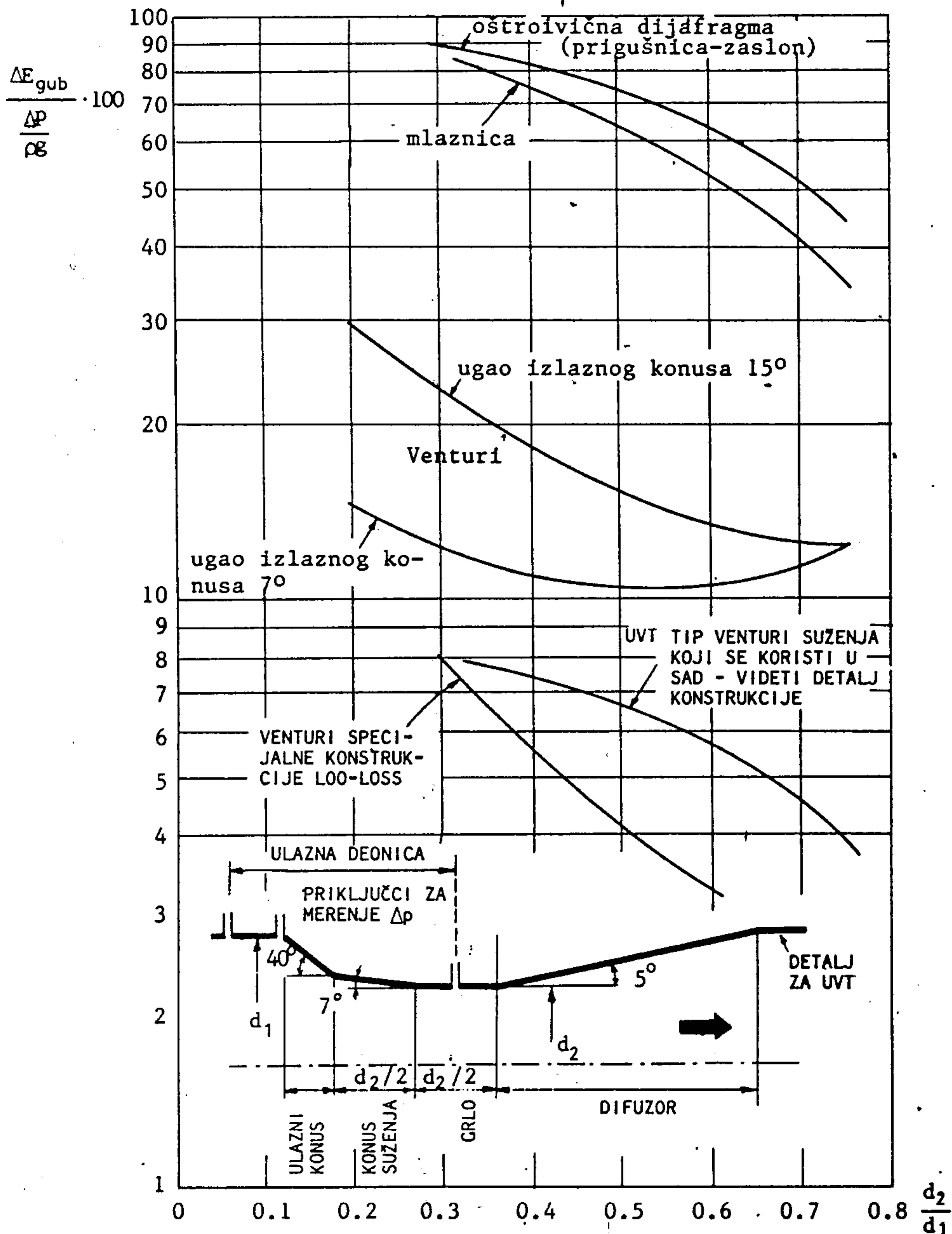
Jedan od nedostataka ovakvih merača protoka je što oni predstavljaju stalno mesto gubitka energije. Na slici IV 16. prikazani su ti gubici preko procenta od razlike pritiska.



Slika IV 15. Zavisnost koeficijenta protoka od Re broja za Venturijev merač protoka

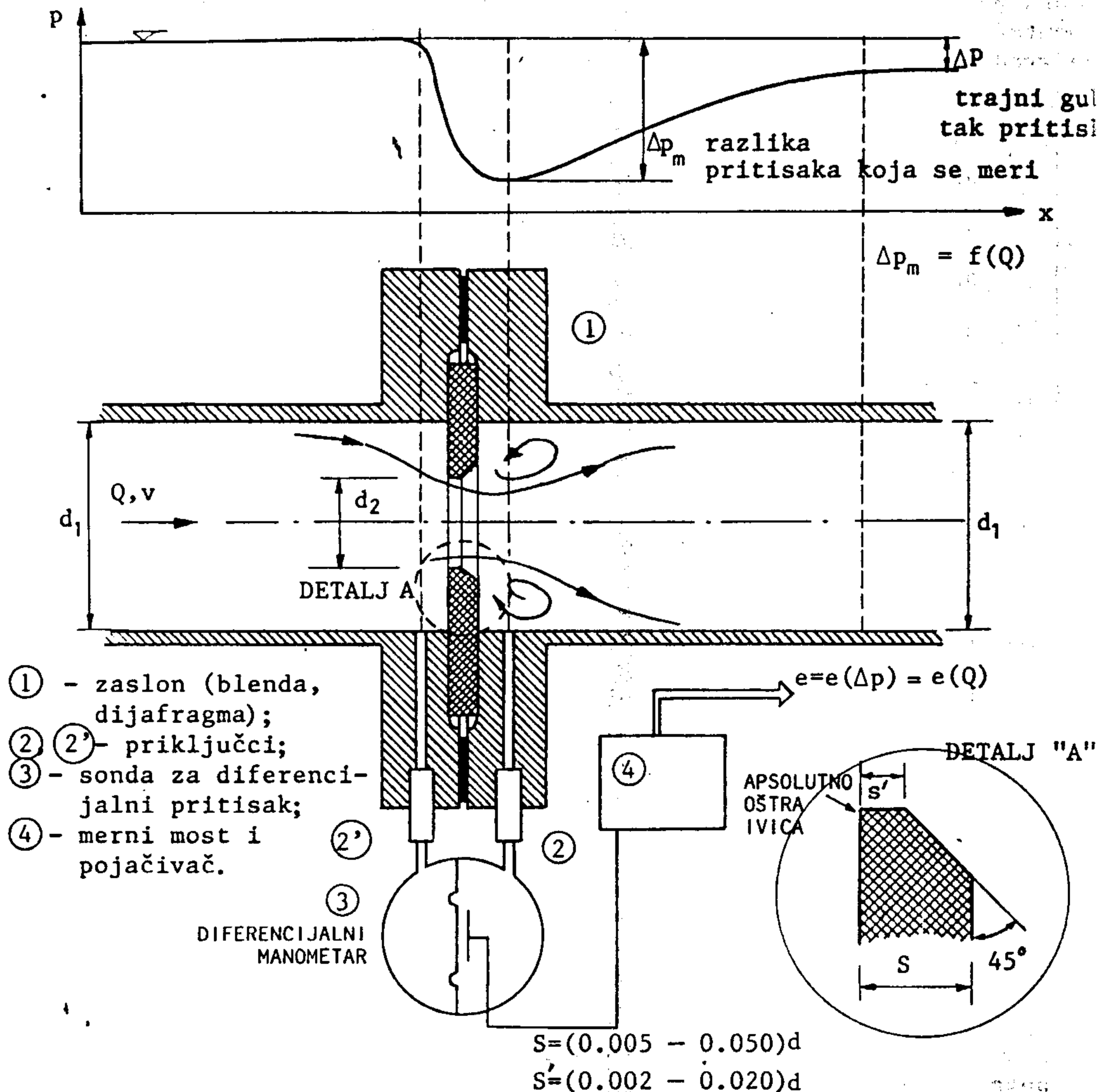
U prethodnom tekstu nešto više pažnje bilo je posvećeno suženju tipa Venturi. Na sličnom principu merenja razlike pritiska u dva poprečna preseka izazvane razlikom brzina (kinetičke energije), postoji veliki broj uređaja od kojih su neki prikazani u nastavku.

U tu grupu uređaja za merenja protoka spadaju i merne prigušnice.



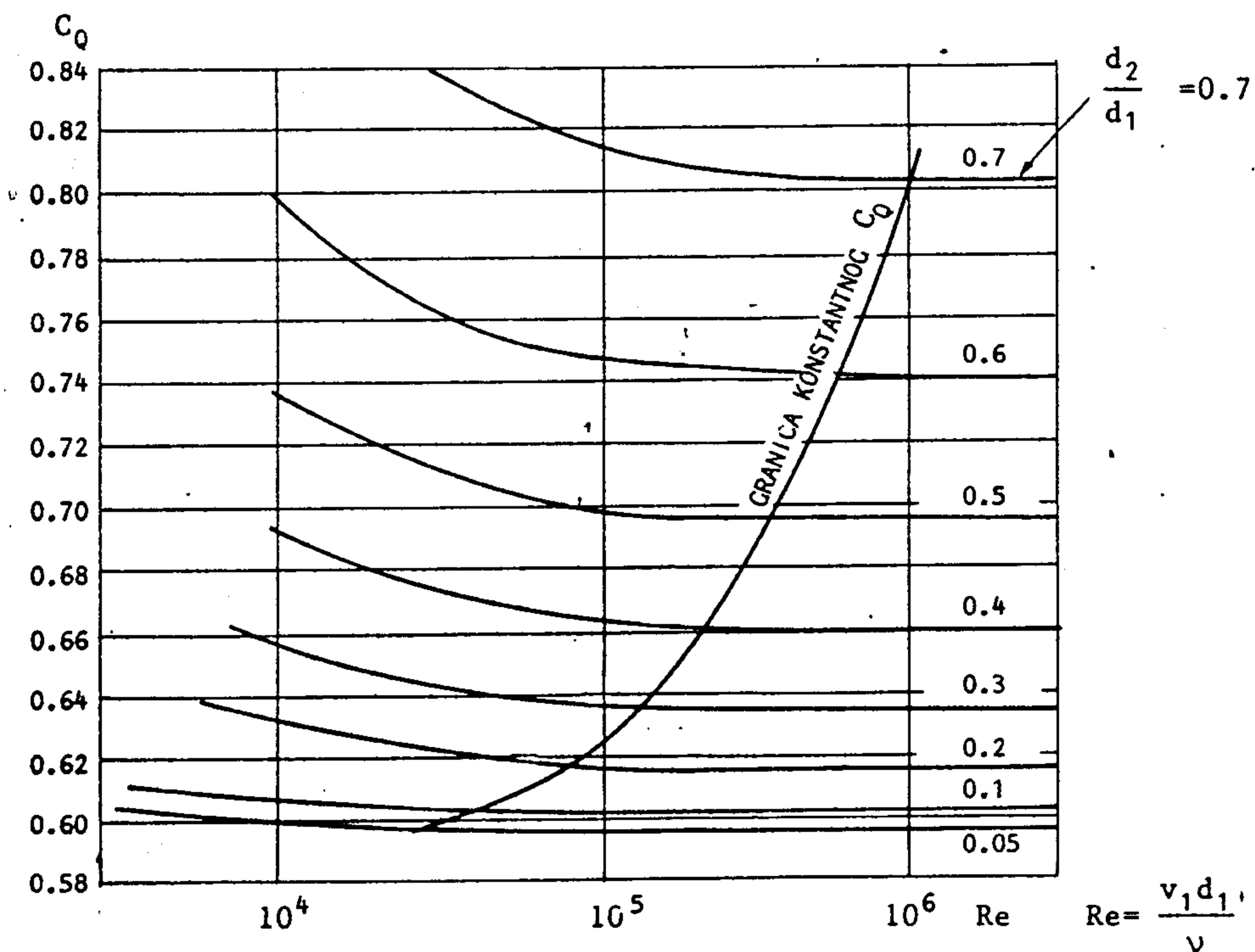
Slika IV 16. Gubitak energije izražen preko procenta od razlike pritiska za merače protoka različitih konstrukcija

Ovde će se ukazati na dve vrste prigušnica koje su najčešće u upotrebi a to su zasloni (za koje se koriste i termini blenda ili dijafragma) i mlaznice. Ovi uređaji su relativno jednostavni i dovoljno tačni za potrebe vodovoda. Pogodni su jer ih vodovodi mogu napraviti u svojim radionicama a lako se montiraju i održavaju. Nedostatak im je što imaju relativno uzan radni opseg i prouzrokuju znatan gubitak energije u sistemu.



Slika IV 17. Merna prigušnica (zaslon, blenda, dijafragma)

Zaslona (blenda, dijafragma) je tipičan predstavnik prigušnica, slika IV 17. To je jedna ploča sa otvorom, kružnim, koji izaziva naglo suženje/proširenje protočnog preseka. Struja se lokalno ubrza, pritisak opada, a dalje nizvodno se širi i ispunjava ceo protočni presek. Pritisak se, međutim, ne vraća na prvobitnu vrednost jer se deo energije gubi u vrtlozima koji se stvaraju u mrtvom prostoru neposredno iza zaslona, videti sliku IV 17. Zaslona treba da bude od dobrog materijala, čelona površina sasvim glatka, a napadna ivica apsolutno oštra. Majstori često greše prilikom izrade zaslona - oni po navici zaoble ("obore") tu ivicu - misleći da je po sredi neka greška na crtežu, pa se zaslona mora pažljivo pregledati pre ugrađivanja. Greška je moguća i prilikom montaže - da se zaslona obrne, pa da konusni deo dođe uzvodno, a ne nizvodno. Tada je pad pritiska osetno manji, a merenja sasvim pogrešna.

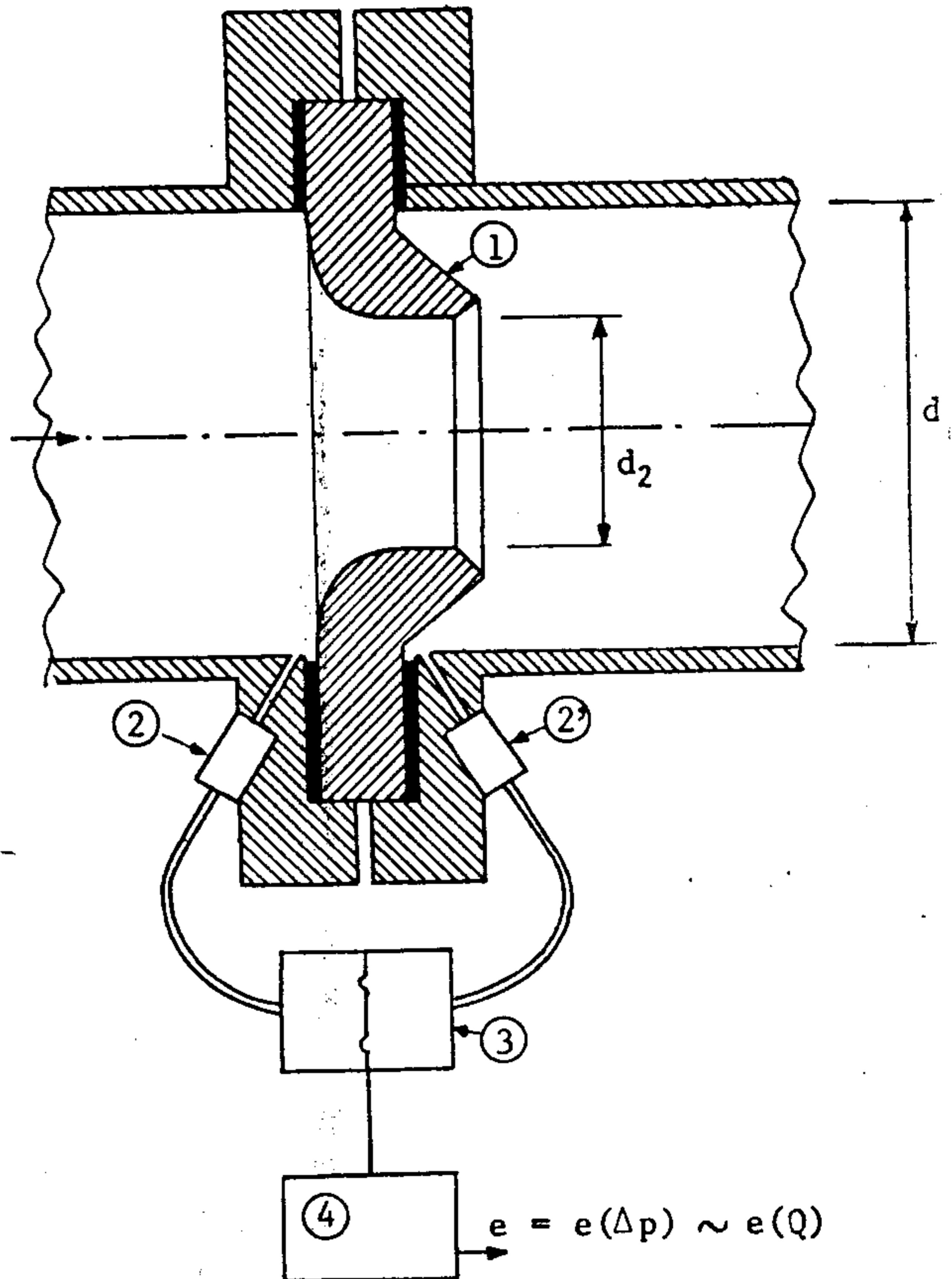


Slika IV 18. Koeficijent protoka C_Q merne prigušnice u zavisnosti od Re broja u cevi

Osnovni podaci za zaslone (mere, načini ugrađivanja, koeficijenti protoka) dati su na našem jeziku u knjigama Vušković (1975) i Čorlukić (1975). Koeficijenti protoka C_Q za zaslona, kao i kod Venturijevog vodmera zavise od lokalnog Reynolds-ovog broja Re , kao što je prikazano na slici IV 18.

Pri malim vrednostima Re broja zaslani su neupotrebljivi zbog male razlike pritiska (koje se teško mere). Za male protoke, ako se ne koriste druge metode, treba koristiti prigušnice malog unutrašnjeg prečnika. Za pojedina merna mesta tako postoje i po tri kompleta zaslona: sa najmanjim otvorom za nisku zimsku potrošnju, sa srednjim otvorom za proleće i jesen, i sa velikim otvorom za visoku letnju potrošnju (D. Kranjčić, Istarski vodovod).

- ① - mlaznica
- ② ②' - priključci
- ③ - sonda (davač) diferencijalnog pritiska
- ④ - pojačivač



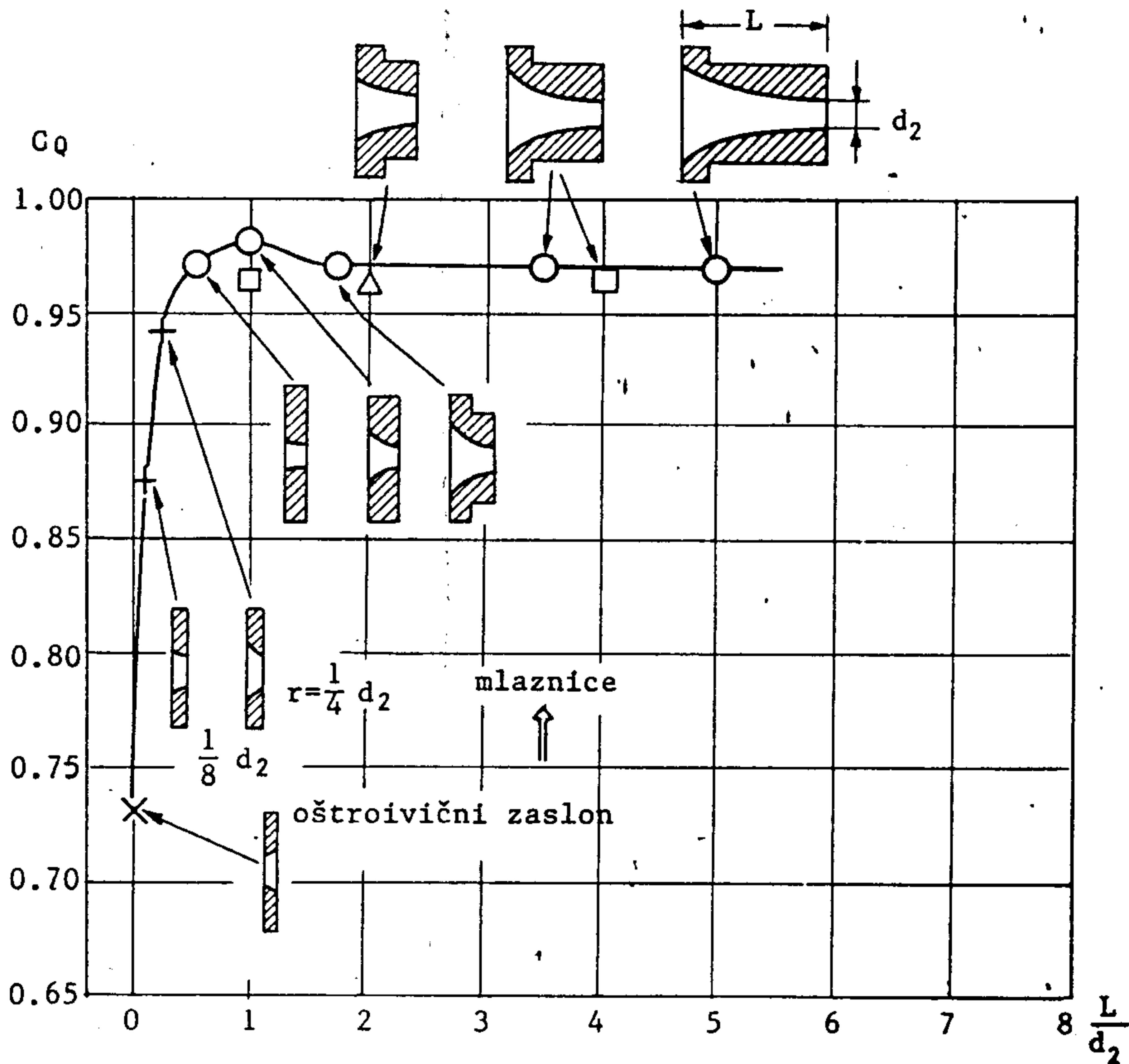
Slika IV 19. Merenje protoka vode pomoću mlaznice

Zaslani se takođe moraju postaviti na mestima gde je strujanje osno simetrično i umireno od eventualnih uzvodnih prepreka (kolena, zatvarača, račve), za najmanje 10 D, i da se daljih 5 D ostavi bez nizvodnih prepreka, promena prečnika i drugih promena.

Ukoliko u vodi ima dosta čvrstih materija, ovakav zaslon, simetričan, nije pogodan jer dolazi do nagomilavanja materijala i zagušenja, već se primenjuju asimetrični - segmentni - zaslani.

Drugi tip prigušnica je mlaznica (sl. IV 19), koja radi na istom principu. Preimućstva tih prigušnica nad običnim zaslonima su nešto manji gubitak energije, a nedostatak to što su skuplje i teže za izradu u običnim radionicama.

Koeficijent protoka C_0 mlaznice zavisi od njene dužine odnosno odnosa dužine i prečnika otvora L/d_1 . Ta zavisnost prikazana je na slici IV 20.



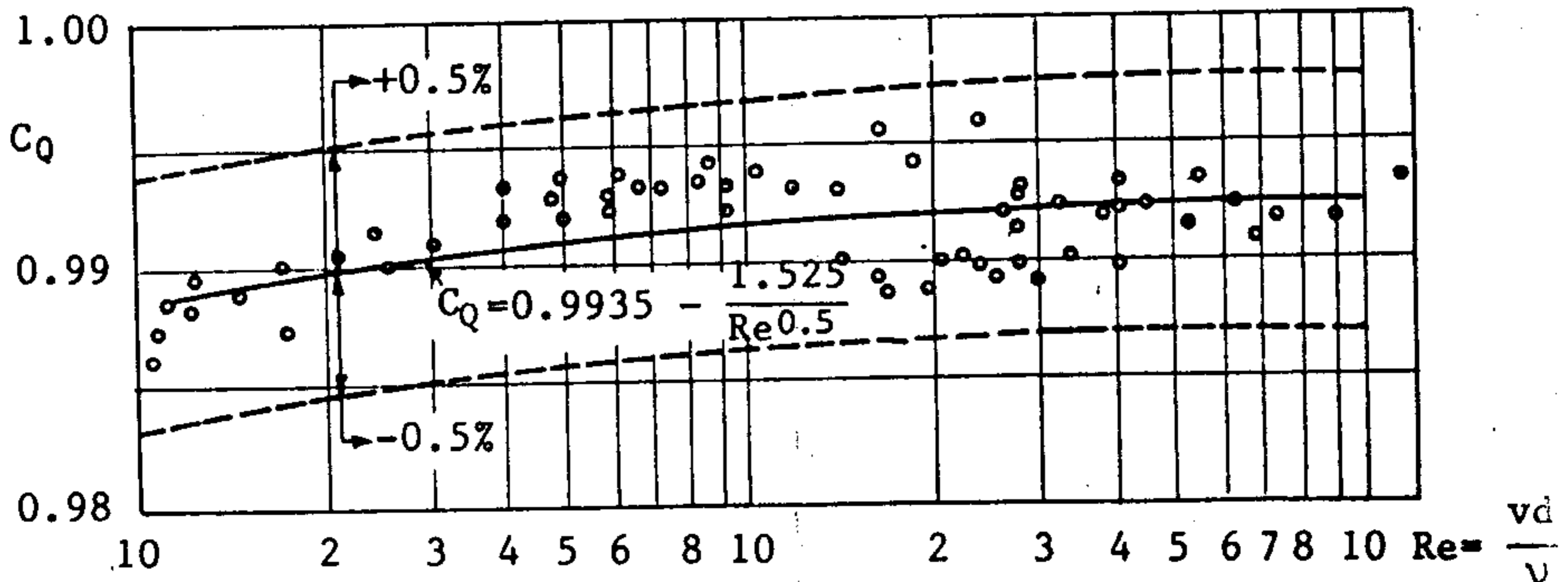
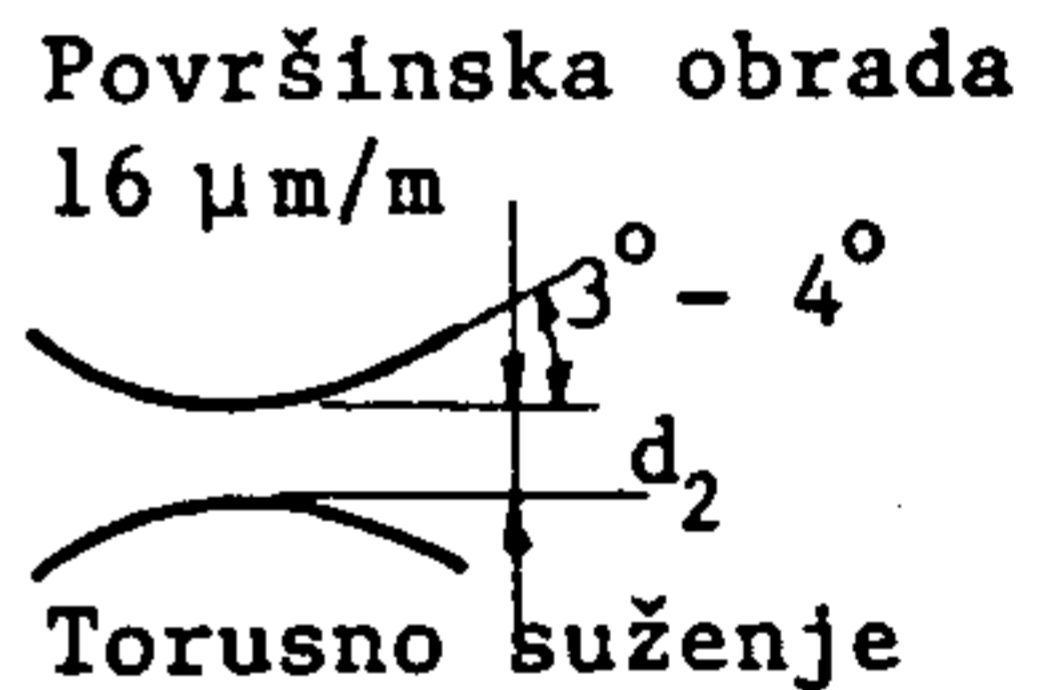
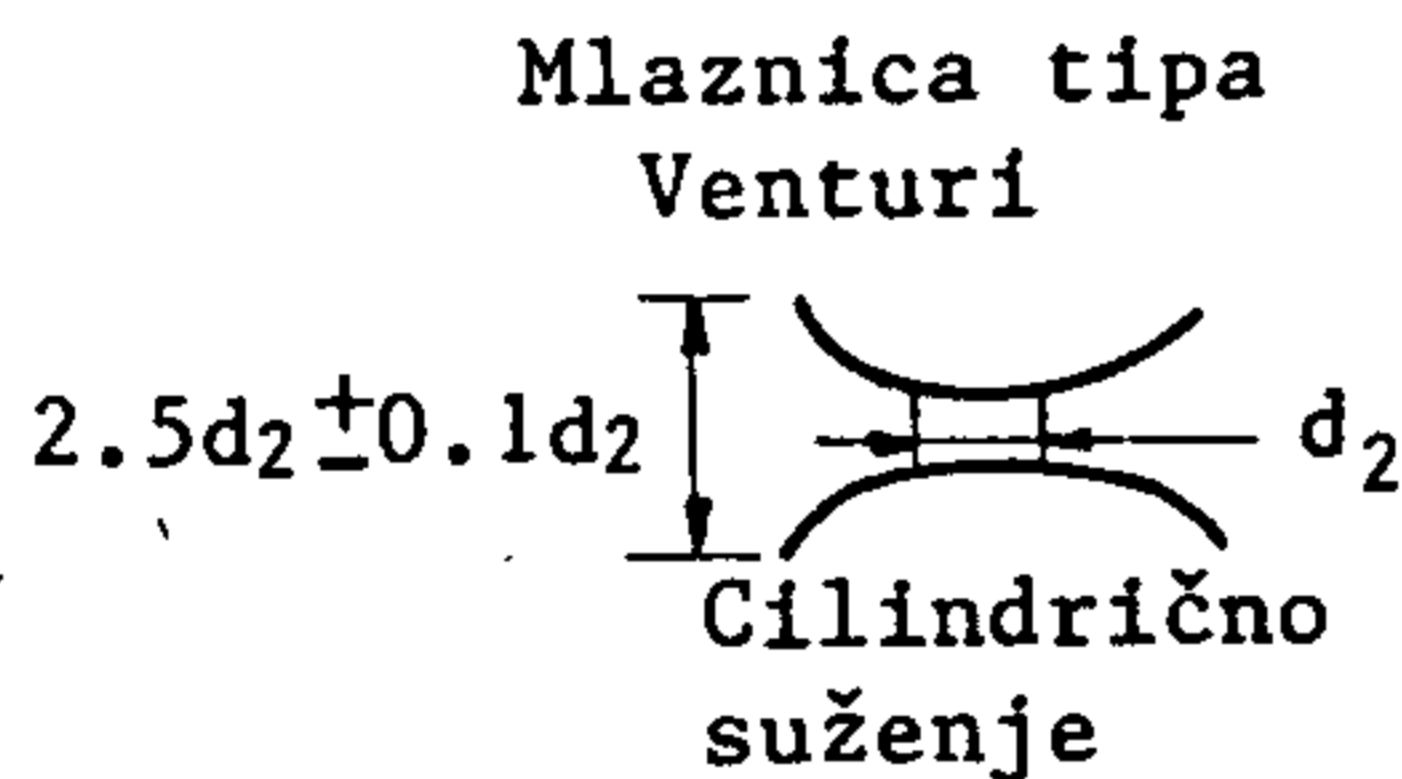
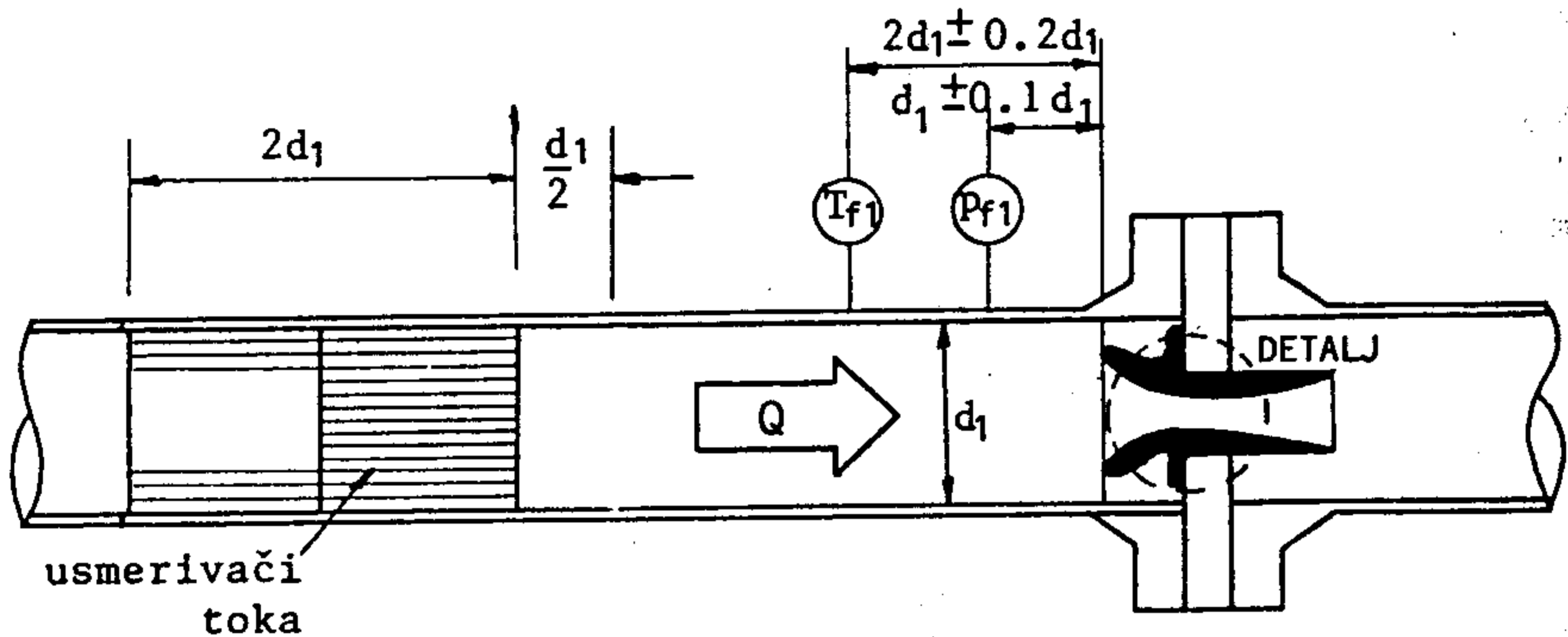
Slika IV 20. Zavisnost koeficijenta protoka C_0 od odnosa dužine i prečnika mlaznica za konstantnu vrednost $d_2/d_1 = 0.18$ i konstantan Reynolds-ov broj.

Osim mlaznica čija je konstrukcija prikazana na sl. IV 19. koriste se i mlaznice sa nizvodnim delom obrađenim u obliku difuzora, čime se smanjuje gubitak energije. Na sl. IV 21. prikazan je način ugrađivanja sa dve varijante konstrukcije mlaznice sa difuzorom. Prikazani tip konstrukcije je u skladu sa ISO standardima. Na istoj slici prikazan je dijagram zavisnosti koeficijenta protoka C_0 od Reynolds-ovog broja.

Korelaciona zavisnost definisana je izrazom:

$$C_Q = 0.9935 - \frac{1.525}{Re^{1/2}} \quad (IV 13)$$

gde je u Re broju karakteristična dužina prečnik suženja d_1 , sa intervalom poverenja od 0.5% prikazanim na istoj slici.



Slika IV 21. Merenje protoka pomoću mlaznice sa difuzorom i zavisnost njenog koeficijenta protoka od Reynolds-ovog broja

Kod svih prethodnih merača protoka informacija se dobija na bazi razlike pritiska. Ta razlika se standardno meri ili pomoću živinog manometra ili pomoću diferencijalnog mehaničkog manometra. Kod mernih mesta gde se, sem lokalnog čitanja, zahteva prenos podataka o protoku na daljinu (na primer do lokalnog centra za prikupljanje podataka), za merenje razlike pritiska koristi se diferencijalni manometar sa električnim izlazom. Primer takvog manometra dat je na slici IV 14.

Značajan nedostatak ovih merenja je to što je opseg merenja (razlika maksimalnog i minimalnog merljivog protoka) dosta uzan i kreće se u odnosu 1:3 (najviše 1:5), jer je razlika pritiska proporcionalna kvadratu brzine. Tačnost se može donekle povećati korišćenjem alternativnih prepreka (već je spomenuta zamena zaslona) ili diferencijalnih manometara za dva različita opsega merenja, što baš nije jednostavno.

Bilo koji od načina da se primenjuje korisno je stvoriti uslove da se merenje protoka može obavljati i stalno ugrađenim kompletnim mernim sistemom i opremom koja se povremeno donosi i koristi na više mernih mesta. Na tim mestima ugrađeni su (ili ostavljena mogućnost da se to lako može uraditi) mehanički delovi mernog sistema (zaslona, mlaznice, itd.). Oprema za merenje razlike pritiska (sonde, pojačivači, pokazni instrumenti, registrator-pisač, uređaj za daljinski prenos podataka, itd.) se u tom slučaju nalazi kod ekipe za terenska merenja koja povremeno obilazi merna mesta i obavlja potrebna merenja.

Kod svih merača sa lokalnim poremećajima u toku predstavljaju promene karakteristika mernog sistema u upotrebi.

Razmotriće se dve vrste promena:

a) promene na mehaničkom delu mernog sistema:

- taloženje na prednjoj i zadnjoj strani suženja koje menja uslove tečenja,
- taloženje na zidovima suženog dela koje menja gubitke energije i geometrijske karakteristike merača,
- abrazija delova prepreke izloženih najvećim brzinama (oštre ivice dijafragme, unutrašnje stranice suženja, itd.).

b) promene na električnom delu mernog sistema:

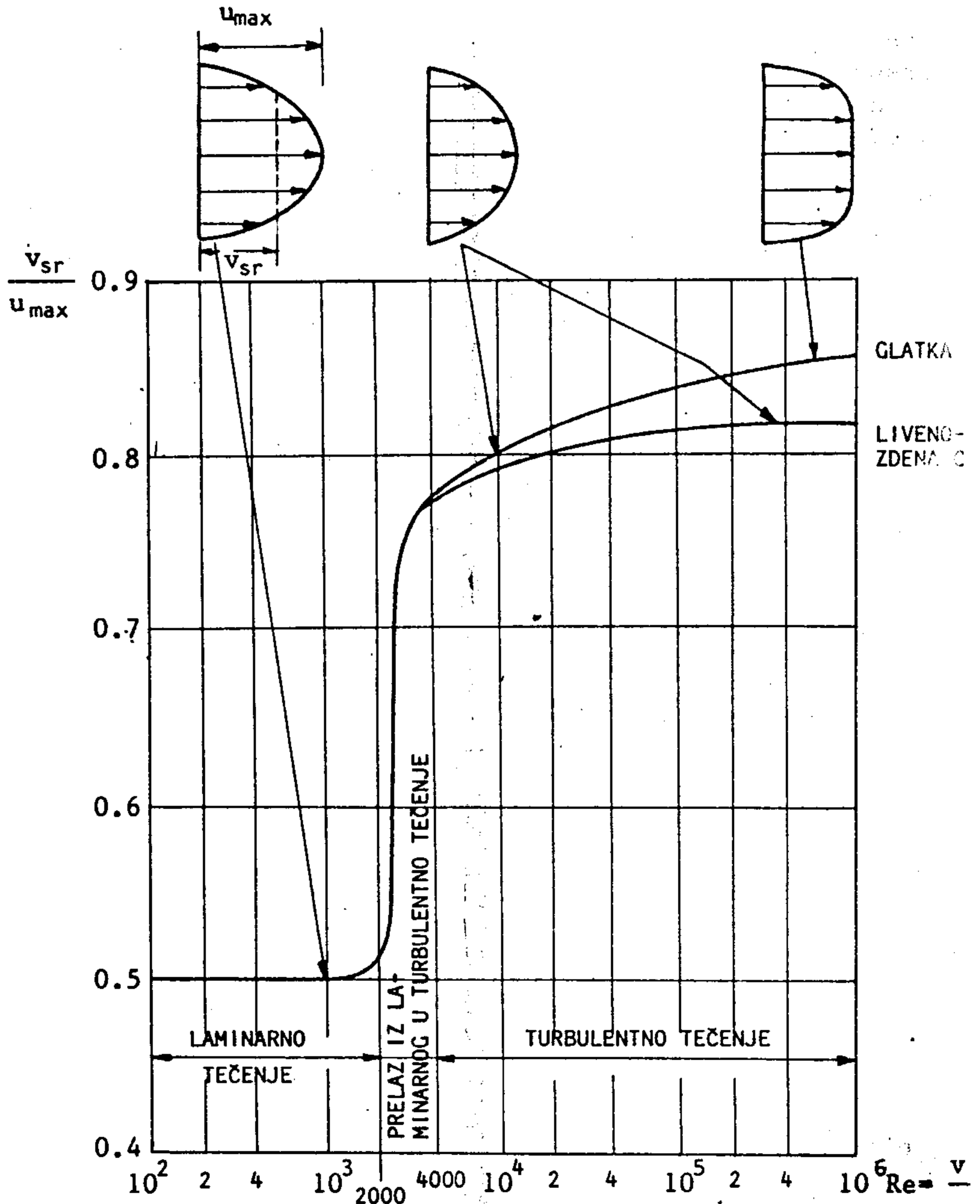
- promene karakteristika komponenata ugrađenih u sistem zbog "starenja",
- promene kalibracione funkcije zbog pomeranja nule ili faktora pojačanja,
- ostale promene.

Promene na mehaničkom delu se teško uočavaju spolja pa je neophodno da se ugrađeni delovi povremeno vade, zbog inspekcije, popravke i eventualne zamene.

Promene na električnim delovima mernog sistema se takođe moraju uočiti i redovno otklanjati.

IV 4.2. Uređaji sa merenjem lokalne vrednosti brzine

Raspored brzina u poprečnom preseku cevi zavisi od režima tečenja (laminarno - turbulentno) a kod turbulentnog tečenja zavisi i od hrapavosti cevi. Pri tome se odnos prosečne brzine za poprečni presek i maksimalne brzine (u osovini cevi) menja na način prikazan na slici IV 22.



Slika IV 22. Odnos prosečne i maksimalne brzine u cevi za različite režime tečenja

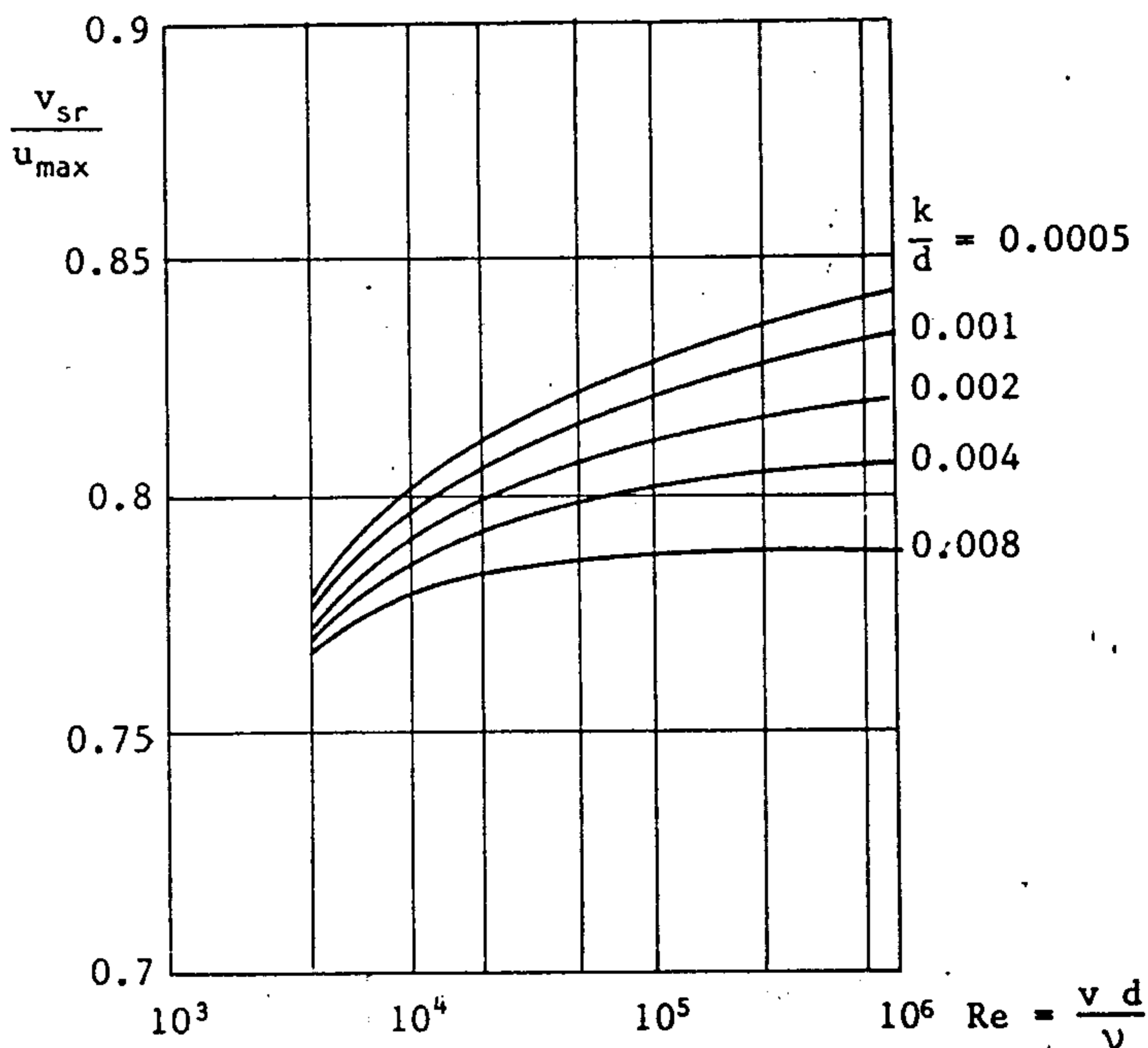
Za hrapave cevi taj odnos u zavisnosti od relativne hrapavosti prikazan je na slici IV 23.

Protok kroz cev određen je ako se poznaje raspored brzina $U = U(r)$ integrirajući brzinu po poprečnom preseku (sl. IV 24).

Prosečna brzina u cevi je

$$v_{sr} = \frac{Q}{A} \quad (\text{IV } 14)$$

Očigledno je da prečnik kružnice r_s , na kojoj je lokalna brzina jednaka prosečnoj, zavisi od rasporeda brzina odnosno od relativne hrapavosti zida cevi i Reynolds-ovog broja. Ta zavisnost prikazana je na slici IV 25.

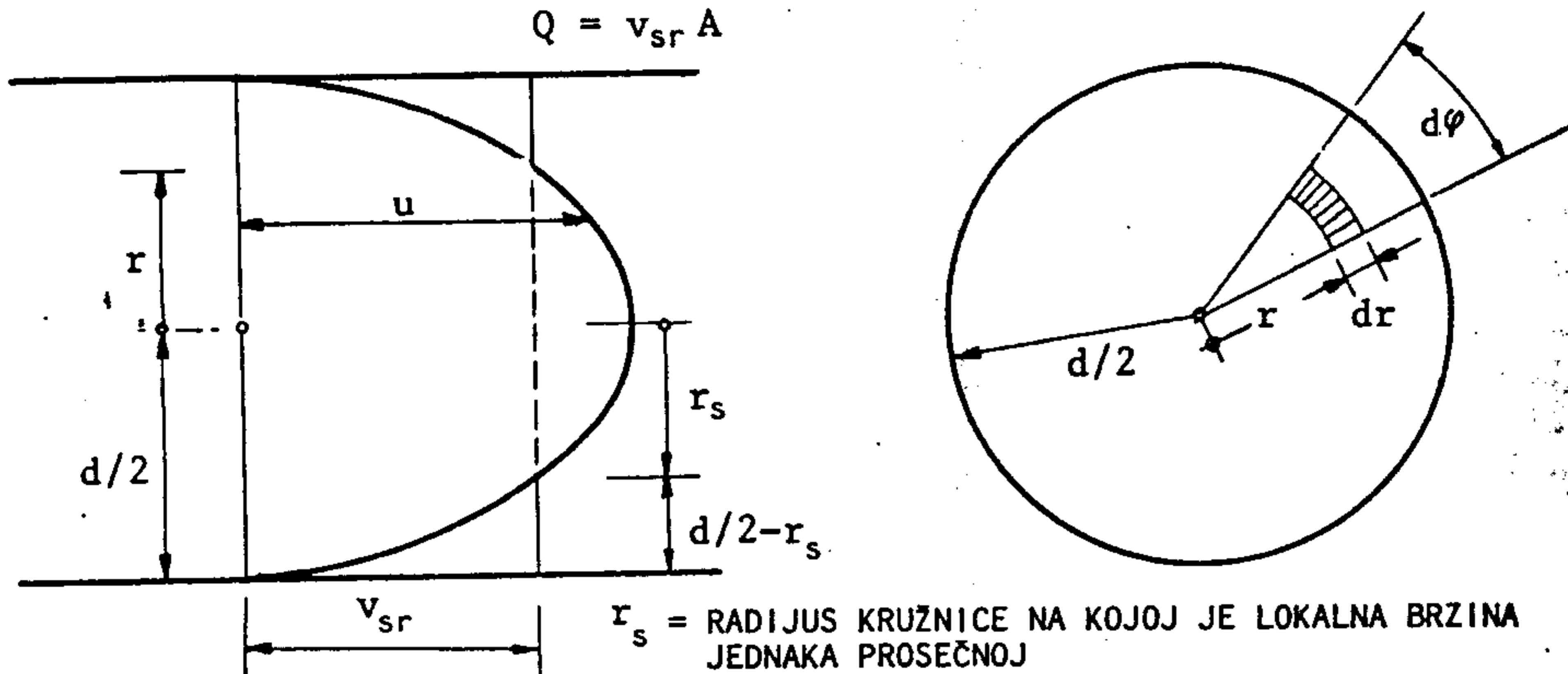


Slika IV 23. Zavisnost odnosa prosečne i maksimalne brzine od relativne hrapavosti cevi

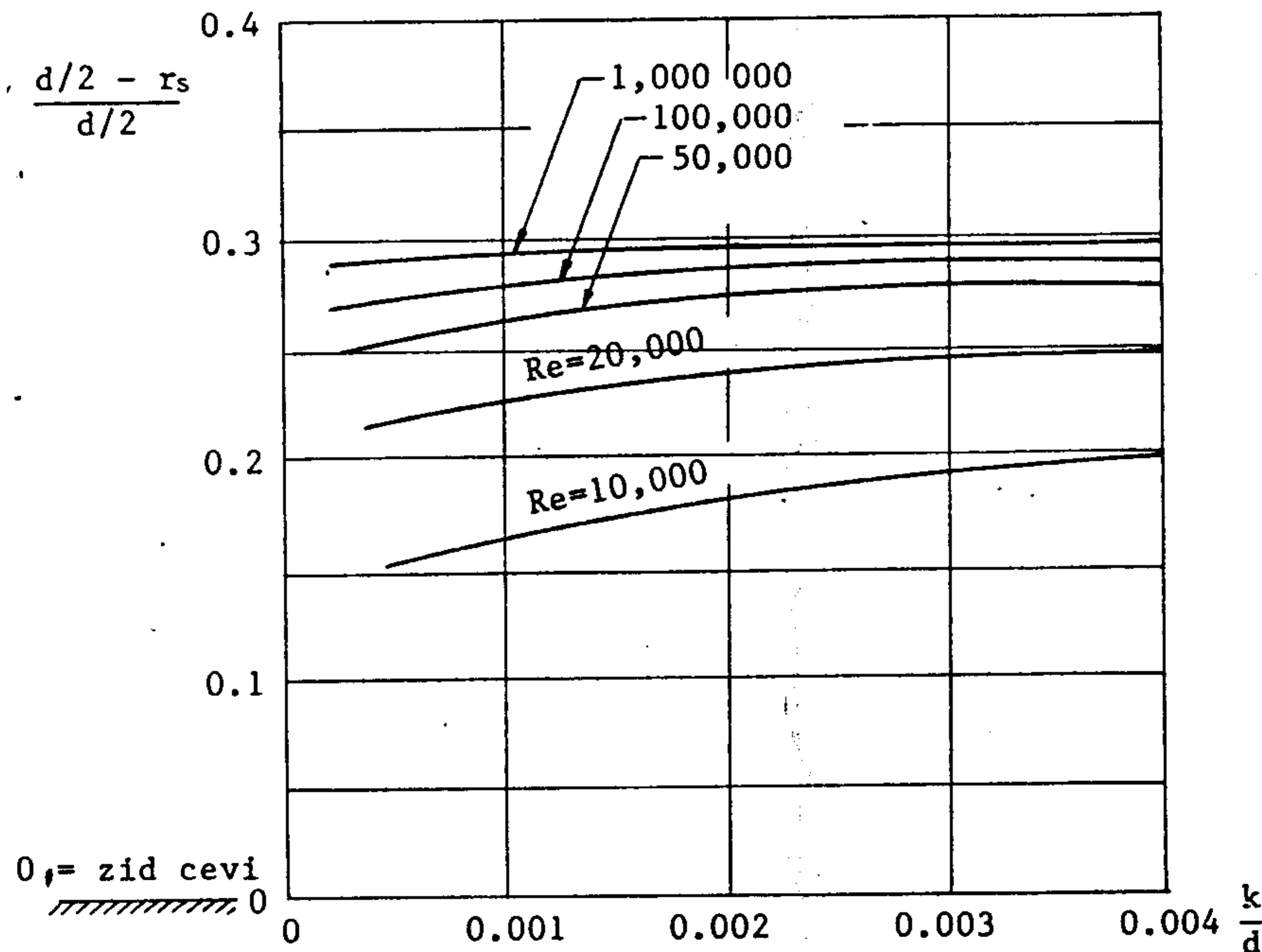
Merači protoka koji se prikazuju u ovom potpoglavlju baziraju se na merenju brzine u jednoj tački. Ukoliko se u konkretnoj cevi poznaje raspored brzine odnosno relativna hrapavost, na prvi pogled je svejedno u kojoj tački se meri brzina:

$$Q = \int_A u dA = \int_0^{2\pi} \int_0^{d/2} u r dr d\varphi$$

$$Q = v_{sr} A$$



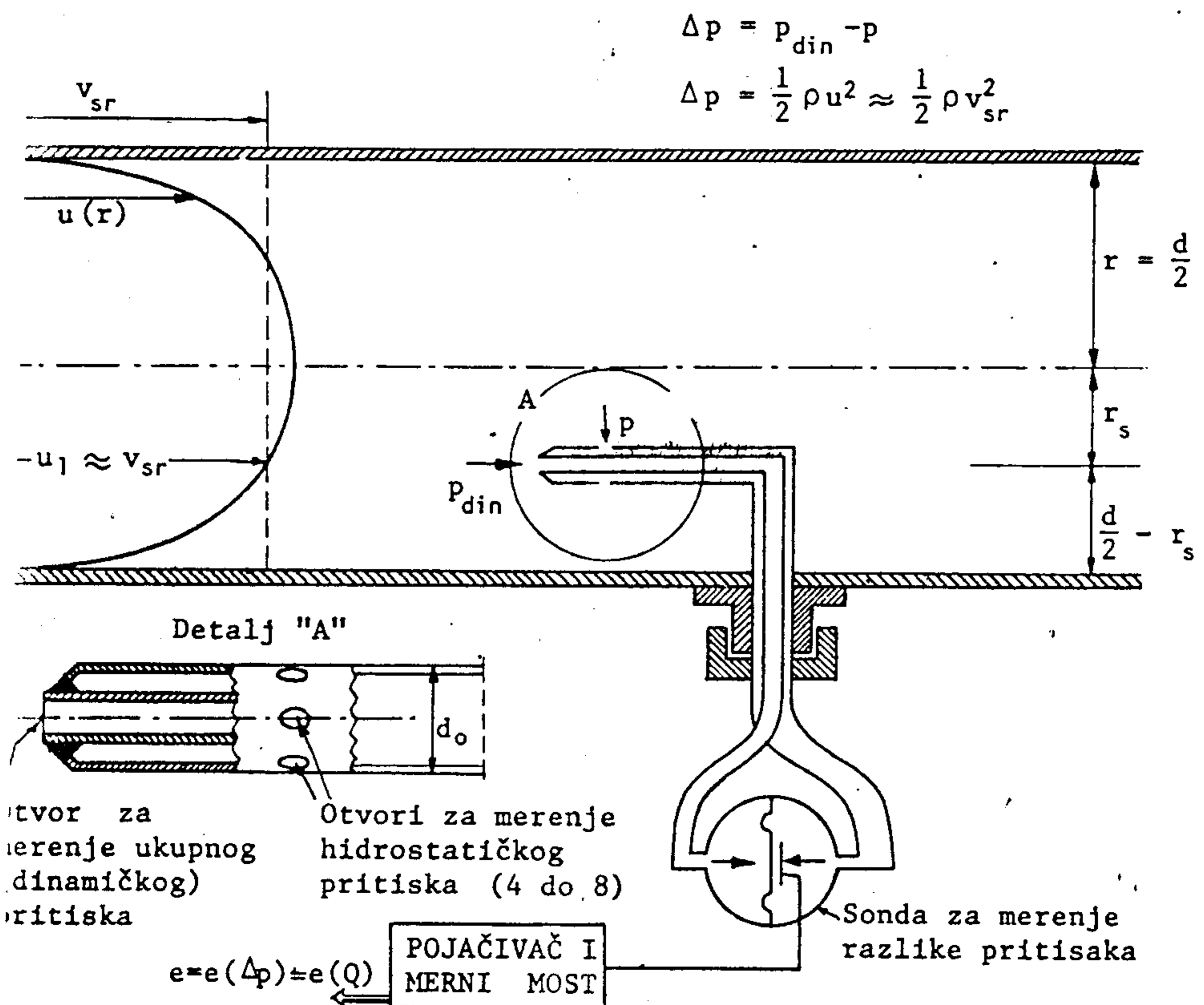
Slika IV 24. Određivanje protoka iz poznatog rasporeda brzina



Slika IV 25. Relativno udaljenje kružnice prosečne brzine od zida kružne cevi u zavisnosti od relativne hrapavosti i Re-broja

Međutim iz dijagrama IV.25. jasno je da u principu odnos između brzine merene u tački i prosečne brzine (a time i protoka) nije konstantan nego se menja sa vrednošću Re broja. Praktična posledica ovoga je da kod merenja protoka ovom metodom nije svejedno u kojoj tački će se postaviti sonda za merenje brzine i da zavisnost protoka od signala dobijenog merenjem brzine u tački jedne cevi ne može sasvim pouzdano da se primeni na drugu cev. Za konkretnu cev jedini pouzdani metod za utvrđivanje te zavisnosti je kalibracija, tj. određivanje veze između brzine u tački i protoka (određenog nekom drugim metodom) za tu konkretnu cev. Kalibraciju treba obavljati kompletnim uređajem, tj. kada je na cev montirana sonda za brzinu i drugi merač protoka.

Tako se u praksi retko radi, nego se koriste zavisnosti' dobijene ispitivanjem na drugim cevima. Kolike se greške pri tom čine zavisi od toga koliko se hrapavost cevi (u koju se uređaj ugrađuje i one za koju je obavljeno ispitivanje) međusobno razlikuje,



Slika IV 26. Merenje protoka pomoću Pitot-ove sonde postavljene na mestu gde je brzina jednaka prosečnoj

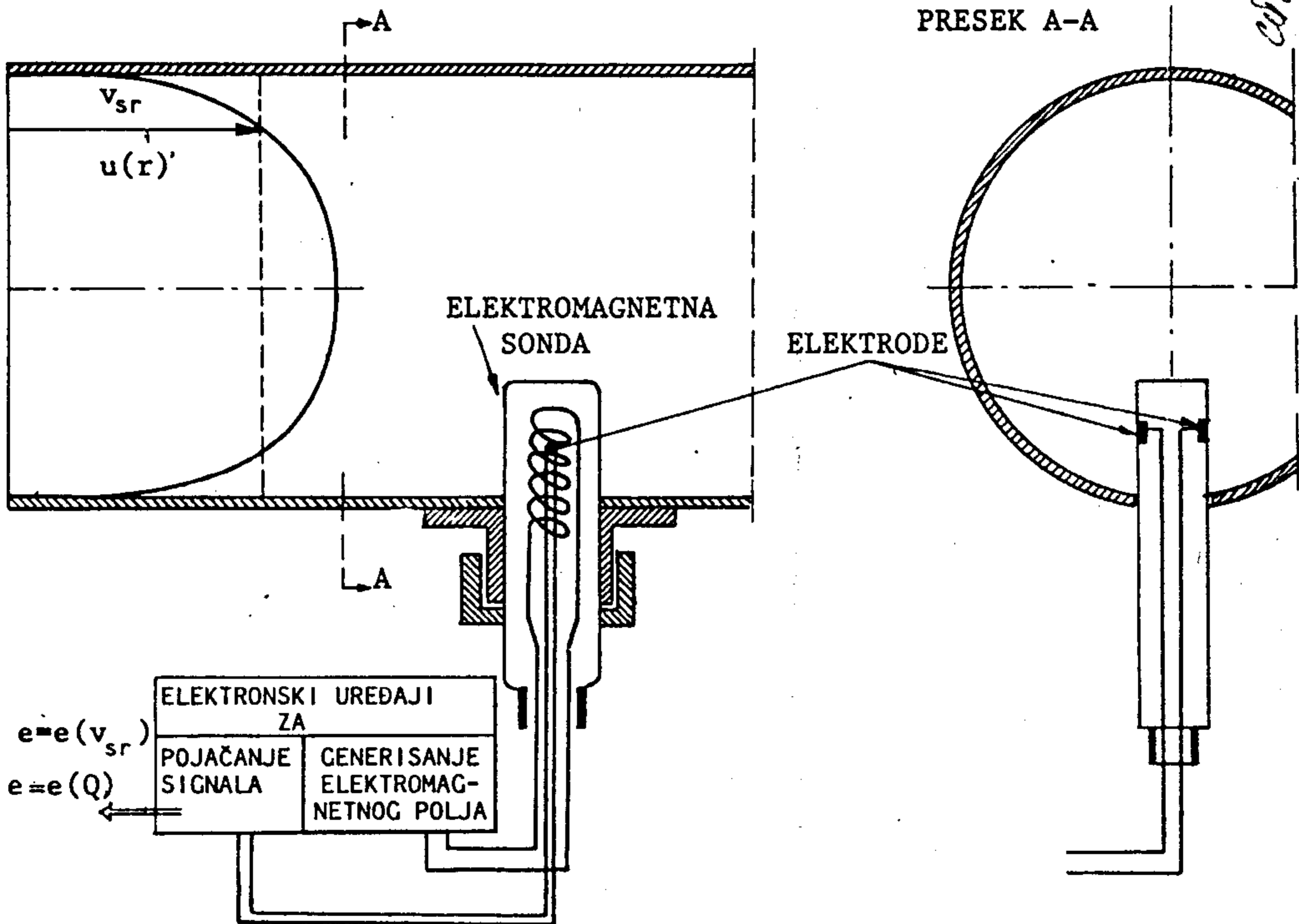
Uobičajeno je da se brzina meri u nekoj tački u blizini zida (na rastojanju od 0,25 do 0,3 poluprečnika). Informacija o brzini pretvorena u električni signal koristi se za dobijanje informacije o protoku a dalji postupak sa signalom proporcionalnom protoku identičan je s postupkom za ostale merene veličine (videti poglavlje IV 10).

Načini merenja lokalne brzine koji se uobičajeno koriste za određivanje protoka su:

a) Pitot-Prandtl-ova cev - meri se razlika u hidrostatickom i dinamičkom pritisku u tački. Ta je razlika (zaustavni pritisak) jednaka:

$$p_{din} - p = \frac{1}{2} \rho u^2 = \Delta p$$

(IV 15)

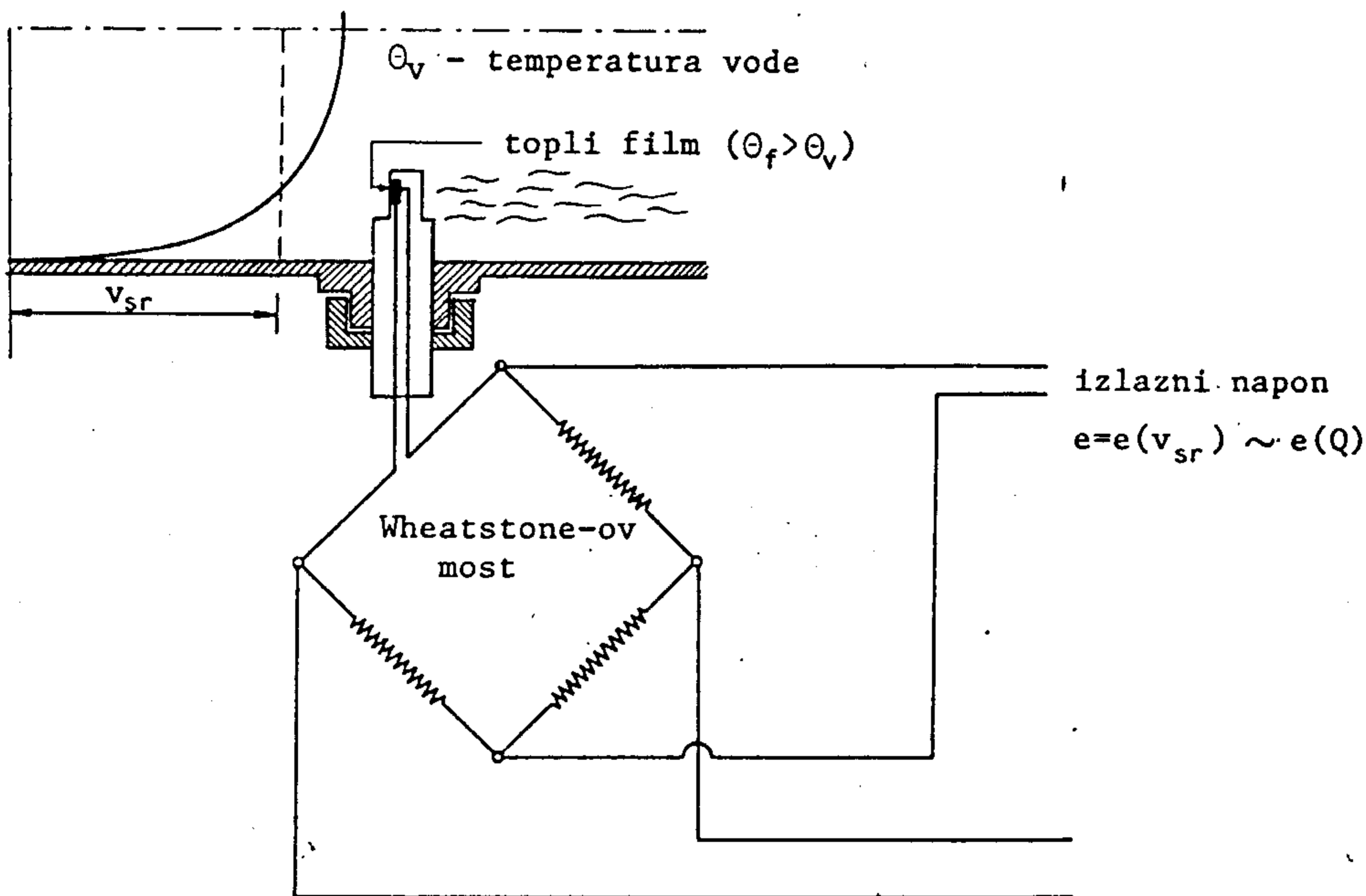


Slika IV 27. Merenje protoka pomoću elektromagnetne sonde

Zaustavni pritisak se meri pomoću centralne cevčice sa otvorom na vrhu sonde, a strujni (hidrostatički) pritisak se meri kroz 4-8 rupice izbušene po omotaču spoljne cevi (slika IV 26).

Strujnice moraju biti paralelne sa osom cevi, a i osa sonde mora biti takođe paralelna sa osom cevi. Greške prilikom montaže sonde mogu da upropaste merenje.

Mana ove sonde je što je osetljiva na greške pri montaži i loše meri brzinu vode ukoliko strujnice nisu kolinearne sa osom cevi. Zato se u praksi sve više koriste sonde usavršenog tipa: dvodimenzionalne (sonde sa tri rupice, trouglasta sonda) i trodimenzionalne (kuglasta, Konradova sonda i dr.), Vušković (1977). Dobra strana ovog uređaja je ta, što vodovod može i sam da pravi ove sonde u sopstvenim radionicama.



Slika. IV 28. Merenje protoka pomoću sonde na principu "toplog filma"

- b) Sonde za merenje lokalne brzine pomoću elektromagnetne indukcije (koristi se i naziv "log sonda")

Kod elektromagnetne sonde se informacija o lokalnoj brzini dobije na osnovu struje indukovane na dvema elektrodama. Elektrode su postavljene na omotaču cilindra u kome su takođe smešteni namotaji za generisanje elektromagnetnog polja (slika IV 27).

Voda koja se kreće kroz generisano elektromagnetno polje na krajevima elektroda generiše elektromotornu silu proporcionalnu jačini magnetnog polja i lokalnoj brzini. Isti princip koristi elektromagnetni merač protoka (videti poglavlje IV 4.3).

c) Sonda za merenje lokalne brzine pomoću toplog filma

Kod ove sonde fluidna struja odvodi toplotu sa elementa koji se zagreva ("topli film"). Meri se izlazni napon ili napon za snabdevanje Vitstonovog (Wheatstone) mosta čija je jedna grana element koji se zagreva (slika IV 28) strujom koja teče kroz tu granu mosta.

d) Lokalna brzina se meri mikrokriplom ili nekim drugim rotirajućim elementom

Koristi se dobro poznati princip da je broj obrtaja rotirajućeg elementa linearno zavisao od lokalne brzine. Merenjem broja obrtaja dobija se informacija o lokalnoj brzini, a time i o protoku. Postoji i još nekoliko metoda za merenje lokalne brzine.

Sve metode merenja koje se baziraju na merenju lokalne brzine elementom koji se postavlja u fluidnu struju osetljivi su na prisustvo nečistoće i delića koji se talože jer menjaju karakteristike sonde. I bez toga sonde je neophodno često vaditi iz struje radi pregleda, održavanja, čišćenja i eventualno popravke i zamene.

I ovde je moguće da merno mesto bude kompletno opremljeno za stalna merenja ili da se opremi merno mesto za povremena merenja. U drugom slučaju na zidu cevi se ostavlja samo mesto za montažu sonde. Sondu donosi ekipa za povremena merenja.

IV 4.3. Elektromagnetni merači

Merenje protoka elektromagnetnim meračem bazira se na Faradejevom zakonu elektromagnetne indukcije. Kada se provodnik dužine l kreće brzinom V kroz elektromagnetno polje (upravno na elektromagnetne linije) na njegovim krajevima indukuje se elektromotorna sila koja je proporcionalna jačini polja, brzini V i dužini l . Slika IV 29. pokazuje šemu generisanja elektromotorne sile u polju bez tečnosti i u polju sa tečnošću. U stvarnosti se umesto žice provodnika pojavljuje provodna tečnost šematski prikazana cilindrom dužine dx .

Elektromotorna sila koja se generiše na elektrodama je:

$$e = cB d v_{sr}$$

(IV 16)

gde je:

B - jednačina elektromagnetnog polja

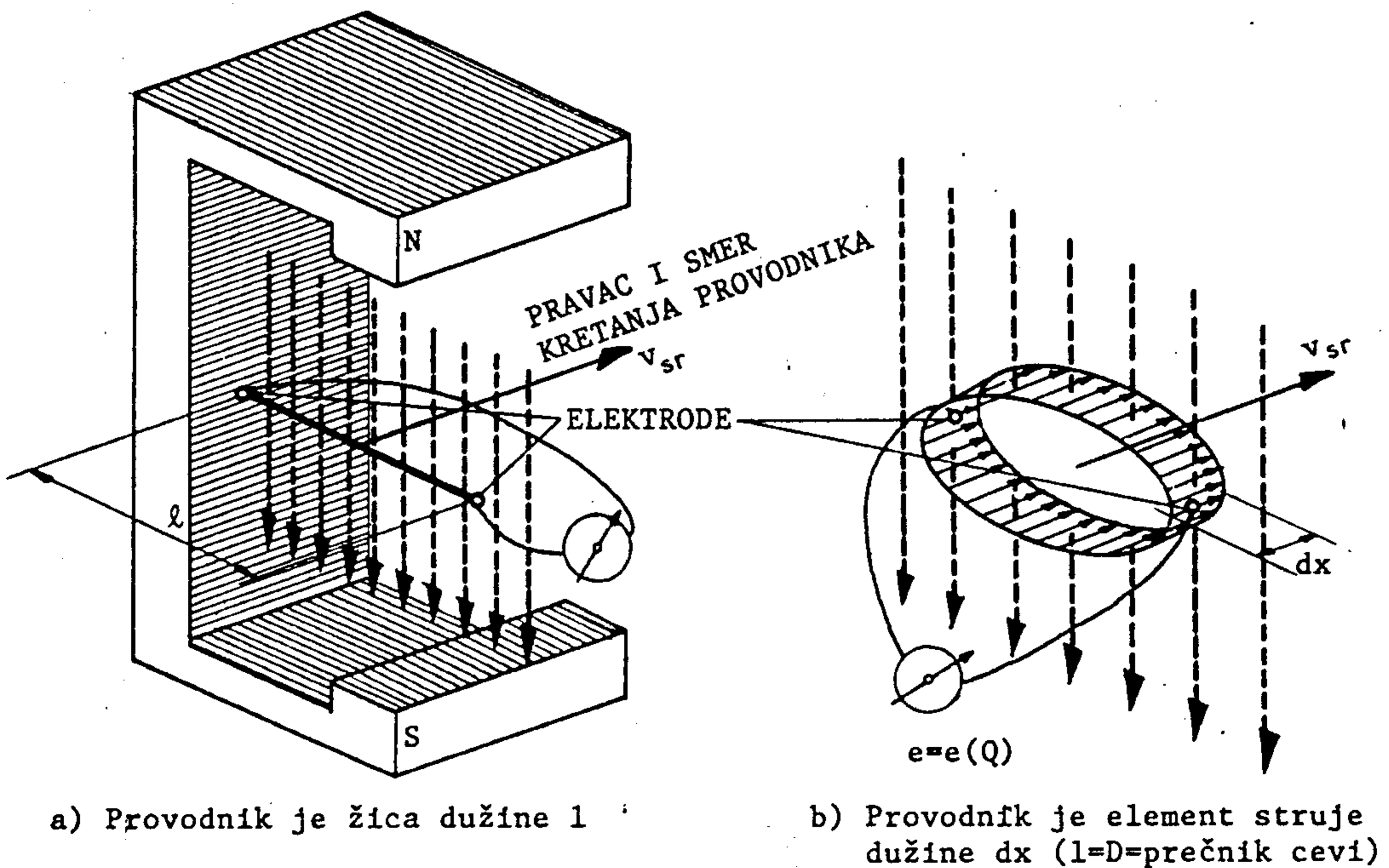
d - prečnik cevi
 c - faktor proporcionalnosti

Kada se srednja brzina zameni protokom $V_{sr} = Q/A$ dobija se

$$e = \frac{4cBdQ}{d^2\pi}, \text{ odnosno} \quad (\text{IV } 17)$$

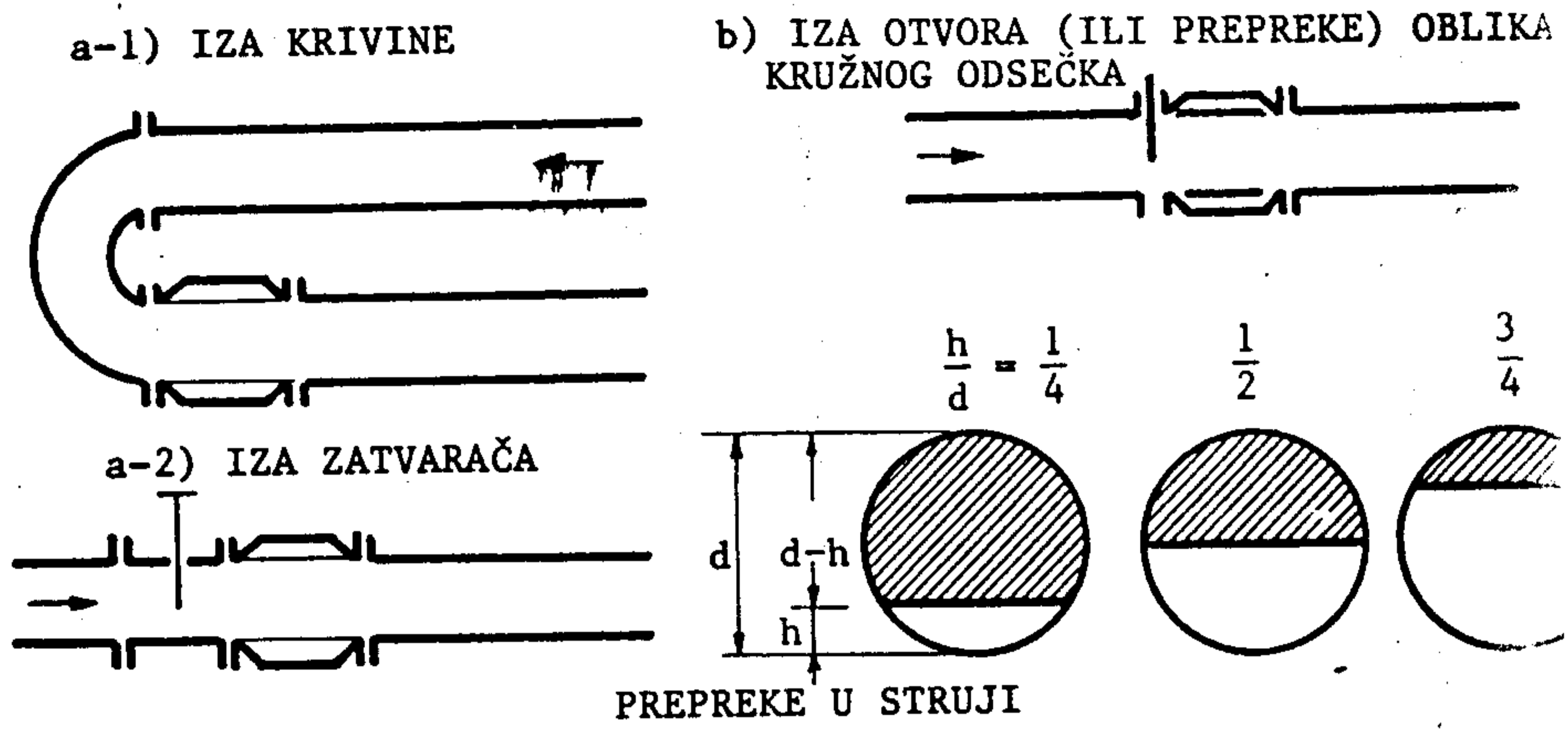
$$Q = \frac{ed\pi}{4Bc} \quad (\text{IV } 18)$$

Unutrašnjost dela cevi (merača) je izolovana a elektromotorna sila uzima se sa provodnih tačkastih elektroda ugrađenih u zid cevi tako da ne predstavljaju prepreku tečenju. Detalji principa rada i konstrukcije dati su u radovima Jovičića (1984) i Stevanović-Čarapina (1984).

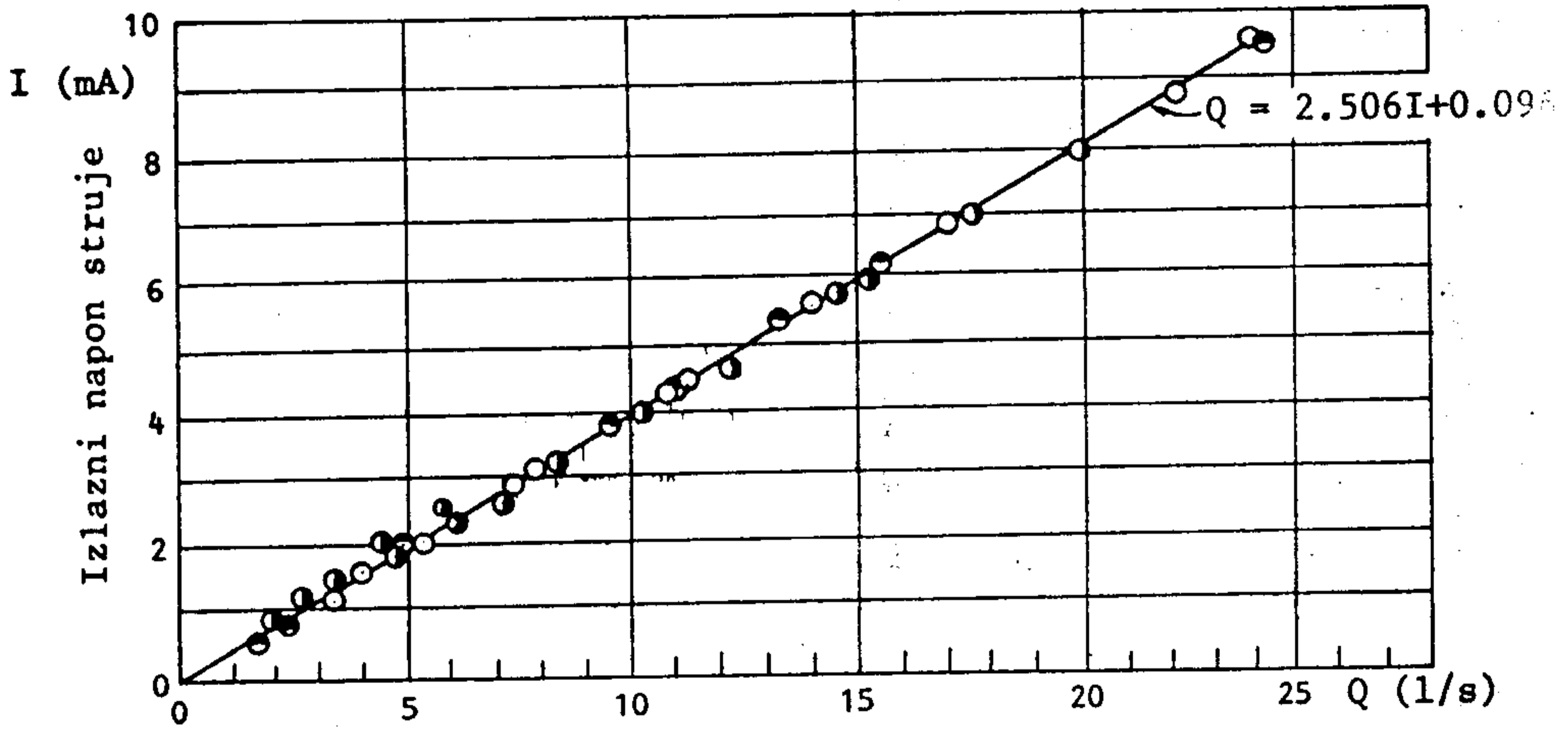


Slika IV 29. Generisanje elektromotorne sile u provodniku koji se kreće kroz elektromagnetno polje

Klasični tipovi elektromagnetnih merača protoka imaju homogeno magnetno polje i za pouzdano merenje neophodno je da je raspored brzina u cevi na mestu merača osnosimetričan.



REZULTATI MERENJA PROTOKA - UTICAJ PREPREKA



- bez prepreke
- prepreka $h/d=1/4$ horizontalna
- prepreka $h/d=1/4$ vertikalna
- prepreka $h/d=3/4$ horizontalna
- prepreka $h/d=1/2$ vertikalna
- prepreka $h/d=3/4$ vertikalna

Slika IV 30-Rezultat merenja protoka elektromagnetnim meračem protoka ugrađenog nizvodno od prepreke

U novije vreme proizvode se merači čije je elektromagnetno polje nehomogeno, koji su manje osetljivi na nesimetričnost polja brzina. Ovi merači imaju veću tačnost merenja. Detalji konstrukcije i principa rada prikazani su u gore pomenutim člancima.

Standardni uslovi ugradnje elektromagnetnih merača protoka zahtevaju, uzvodno od mesta ugradnje merača, pravolinijsku deonicu dužine bar 5 prečnika. U takvim uslovima dobija se linearna zavisnost između protoka i izlaznog električnog signala u vrlo širokom opsegu. Greške pri određivanju protoka su u principu vrlo male i uglavnom zavise od tačnosti merenja protoka uređaja koji se koristi pri baždarenju (kalibraciji) merača. Greška se može smanjiti na ispod 1%. Ispitivanja obavljena u Institutu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Beogradu objavljena u članku Maksimović, Miljković, Đačić, Krtenić (1986) pokazala su da je u slučajevima kada nije moguće obezbediti osnosimetričan raspored brzine uzvodno od merača, moguće još uvek grešku u merenju zadržati u prihvatljivim granicama. Ispitivanja su obavljena za merač ugrađen iza krivine i prepreke oblika zatvarača, (slika IV 30). Greška u merenju može se smanjiti ako se kalibracija merača obavi nakon ugradnje ili u stanici za ispitivanje u istim uslovima u kojima će biti ugrađen. Ipak treba nastojati da se za ugradnju uvek obezbede standardni uslovi a u nestandardnim uslovima merač ugrađivati samo izuzetno kada drugih mogućnosti nema.

Prednost ovih merača je takođe što mogu da mere protok i pri suprotnom smeru tečenja vode sa istom tačnošću i što njihova ugradnja ne izaziva lokalne gubitke energije u cevi.

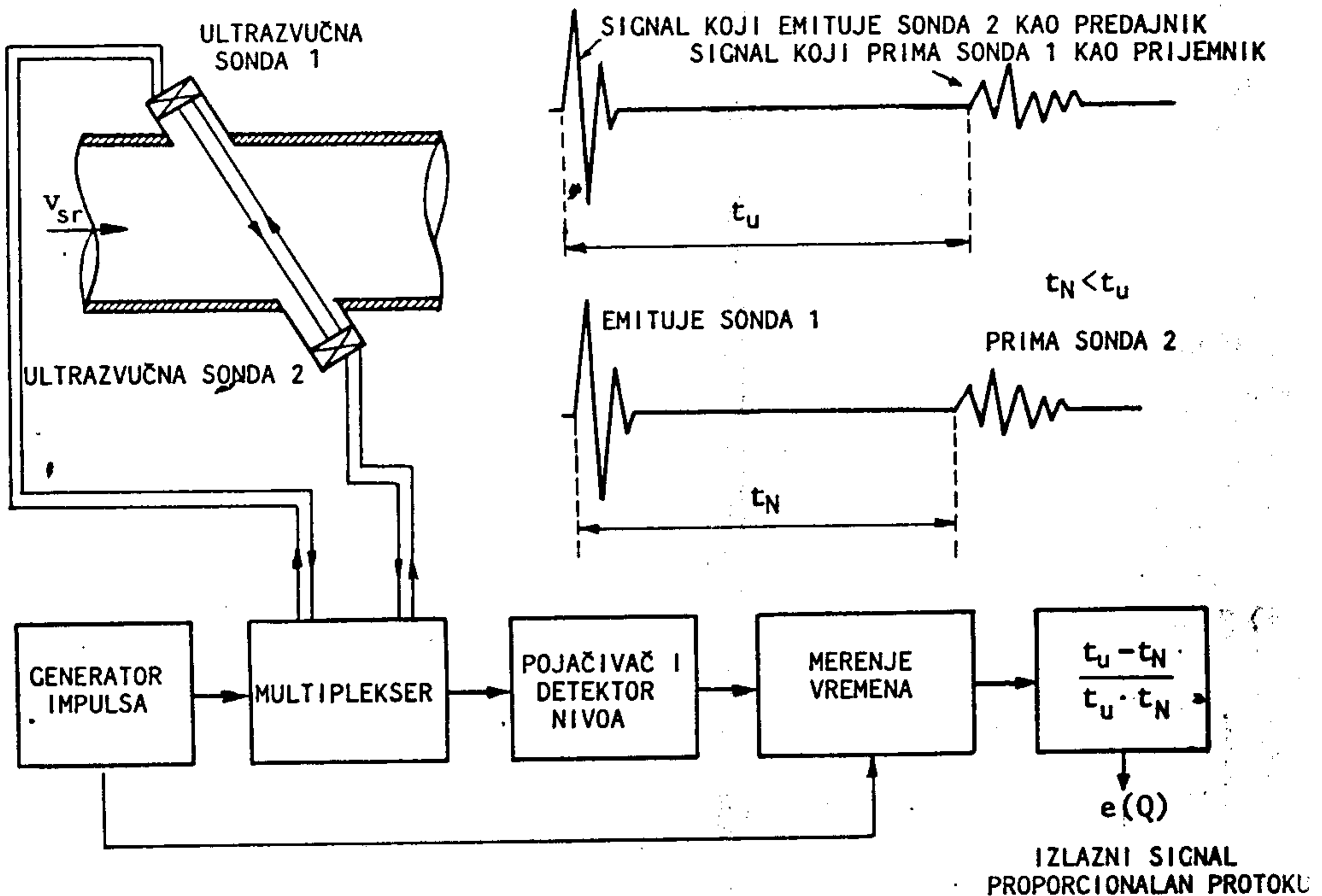
Ovi merači imaju i određene nedostatke; skupi su, za njihovu ugradnju potrebno je obezbediti suvu prostoriju koja se ne sme potopiti (plaviti) i merač se ne sme ugrađivati niti signalni kablovi voditi u blizini drugih energetske kablova, a ako nisu dobro zaštićeni mogu da stradaju od atmosferskih pražnjenja.

Iskustvo autora govori da veliki broj problema koji korisnici imaju sa ovim meračima je uglavnom posledica neodgovarajuće ugradnje i lošeg održavanja. Postoje i obrnuti primeri gde su merači ostali ispravni u upotrebi i nakon dugog niza godina uz uobičajeno održavanje (Vodovod Pančevc). Ipak ovi merači spadaju u grupu najpouzdanijih i dosta se koriste u svetu.

IV 4.4. Ultrazvučni merači protoka

Merači ovog tipa baziraju se na primeni sonde za emitovanje i prijem ultrazvučnog signala koji putuje od jednog do drugog kraja cevi putanjom koja je u odnosu na pravac strujanja - osovinu cevi nagnutu pod nekim uglom. Jedan od mogućih aranžmana prikazan je na sl. IV 31. Dve identične ultrazvučne sonde montirane sa suprotnih strana cevi naizmenično emituju i primaju signal.

Prateća elektronika se koristi za merenje razlike vremena putovanja zvuka u ta dva pravca i njihovog proizvoda. Na osnovu tih podataka dobija se signal proporcionalan sa protokom.



Slika IV 31. Šema rada uređaja za merenje protoka na principu merenja brzine putovanja ultrazvučnog signala

Kod ovog principa merenja sonde 1 i 2 su identične. Kada na primer sonda 1 emituje signal a sonda 2 ga prima, vreme putovanja zvučnog signala (kada bi fluid mirovao) bilo bi jednako brzini zvuka c . Ta brzina zavisi od stišljivosti i gustine tečnosti i ista je i za slučaj kada sonda 2 emituje a sonda 1 prima signal.

Kada se merenje obavlja u sredini gde se fluid kreće istom prosečnom brzinom v (slika IV 32-b) tada brzina putovanja signala u nizvodnom smeru, tj. od sonde 1 ka sondi 2 (slika IV 32-c) iznosi:

$$v_N = c + v_{sr} \cos \theta$$

(IV 19)

a za putovanje uzvodnim smerom (od sonde 2 ka 1 - slika IV 32-d):

$$v_N = c - v_{sr} \cos \theta \quad (\text{IV } 20)$$

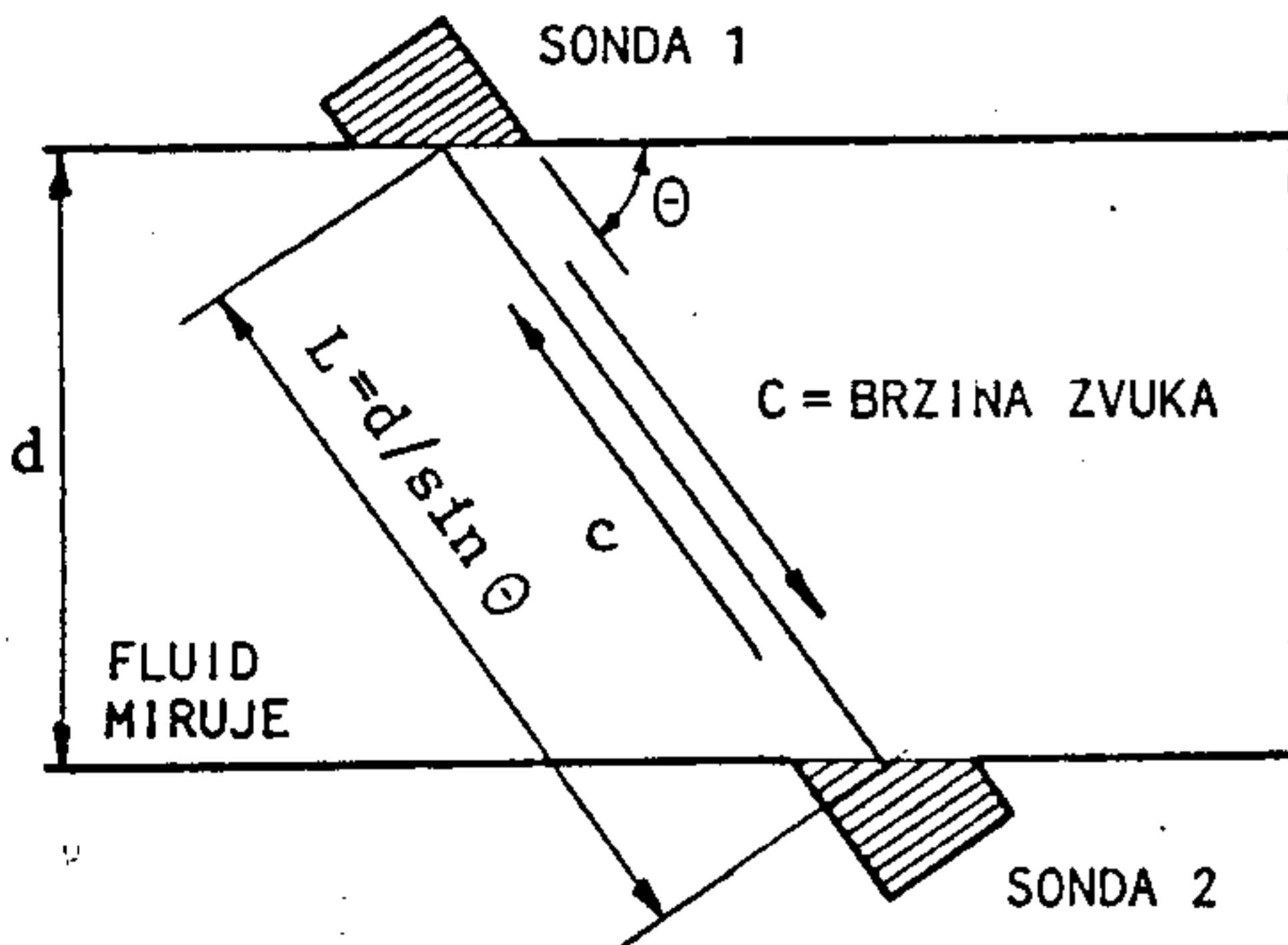
Odgovarajuće vreme putovanja signala (videti sl. IV 31) u nizvodnom smeru iznosi:

$$t_N = \frac{L}{c + v_{sr} \cos \theta} = \frac{d}{\sin \theta (c + v_{sr} \cos \theta)} \quad (\text{IV } 21)$$

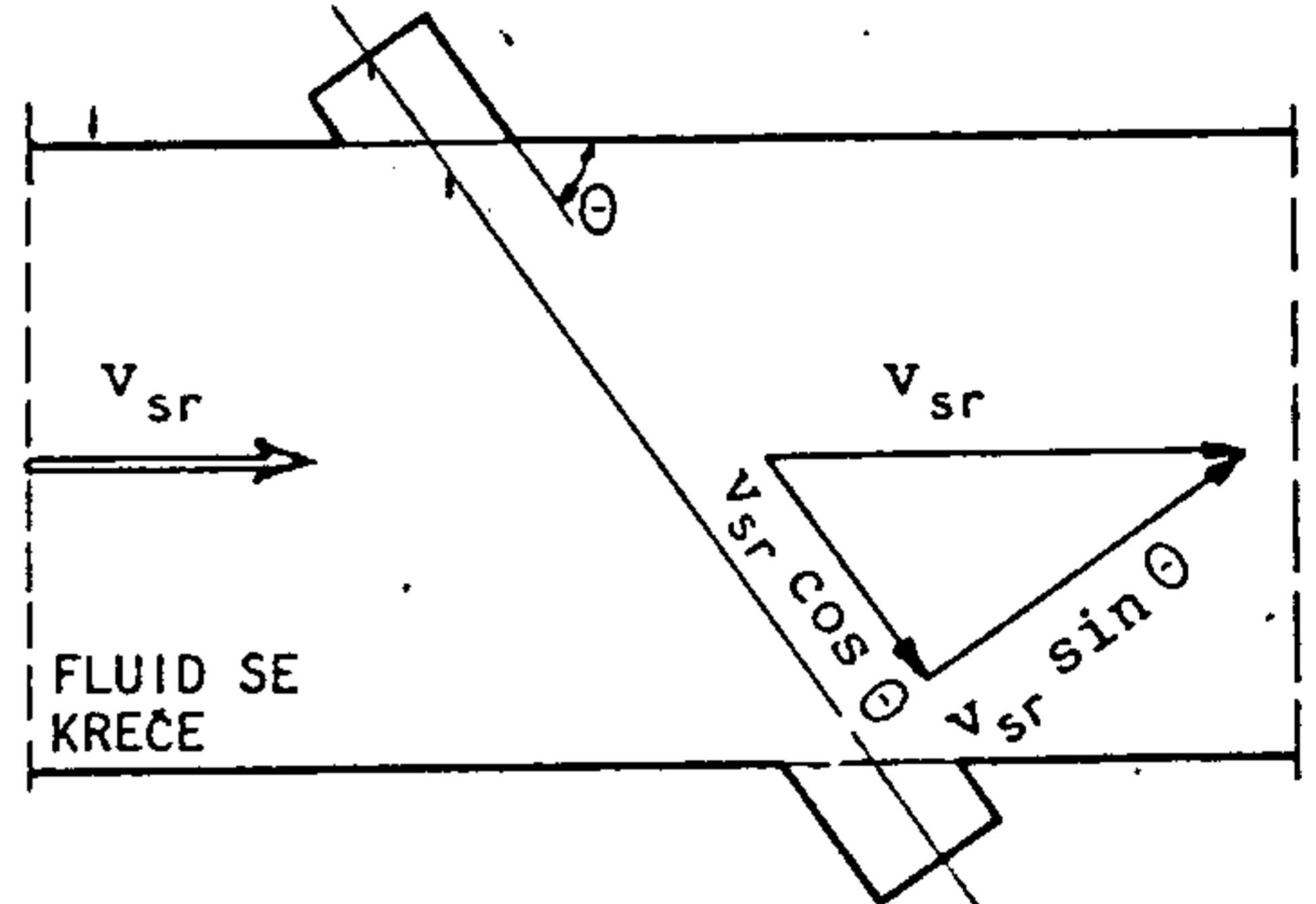
a u uzvodnom smeru

$$t_u = \frac{L}{c - v_{sr} \cos \theta} = \frac{d}{\sin \theta (c - v_{sr} \cos \theta)} \quad (\text{IV } 22)$$

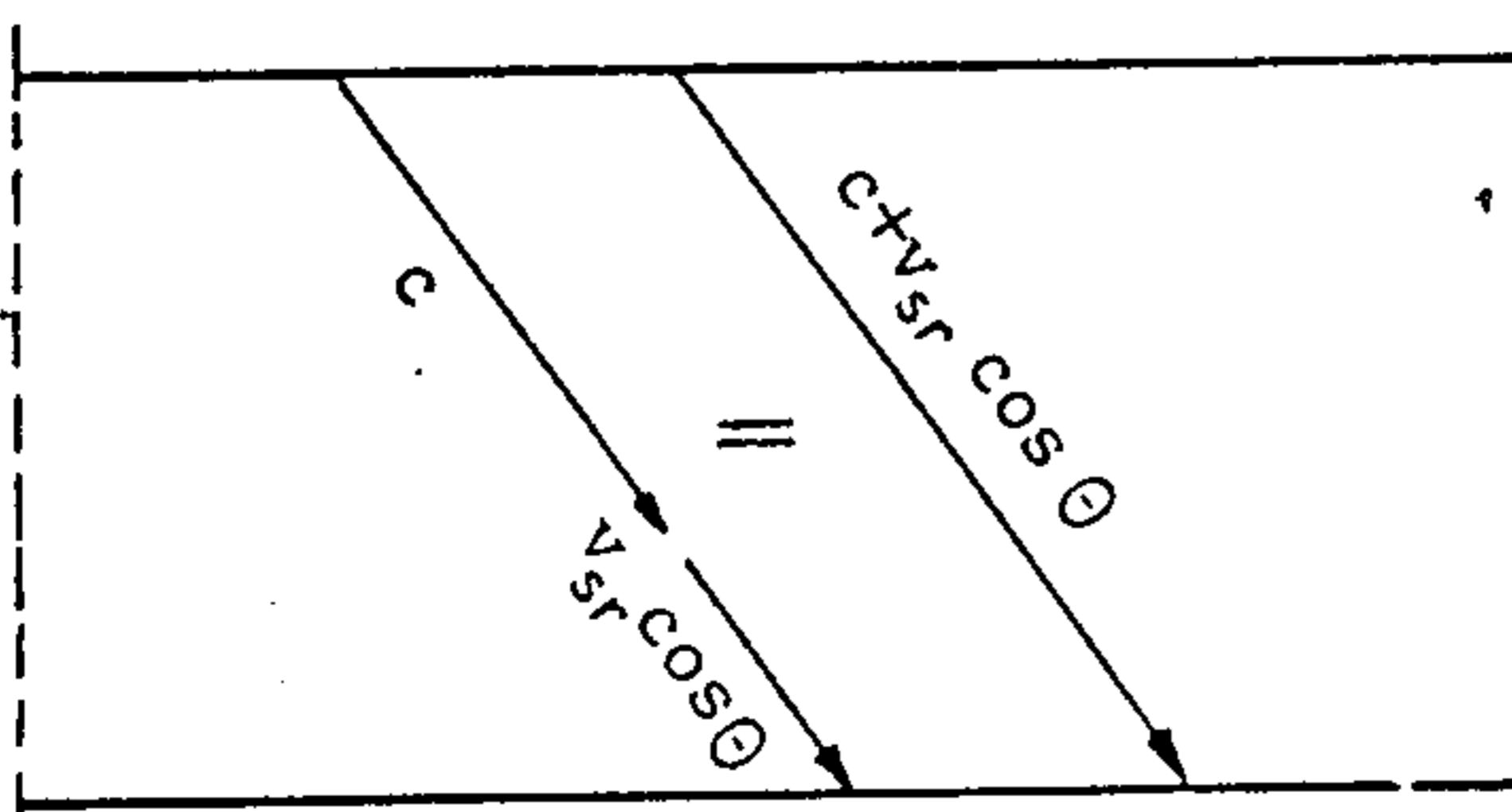
a) FLUID U MIRU



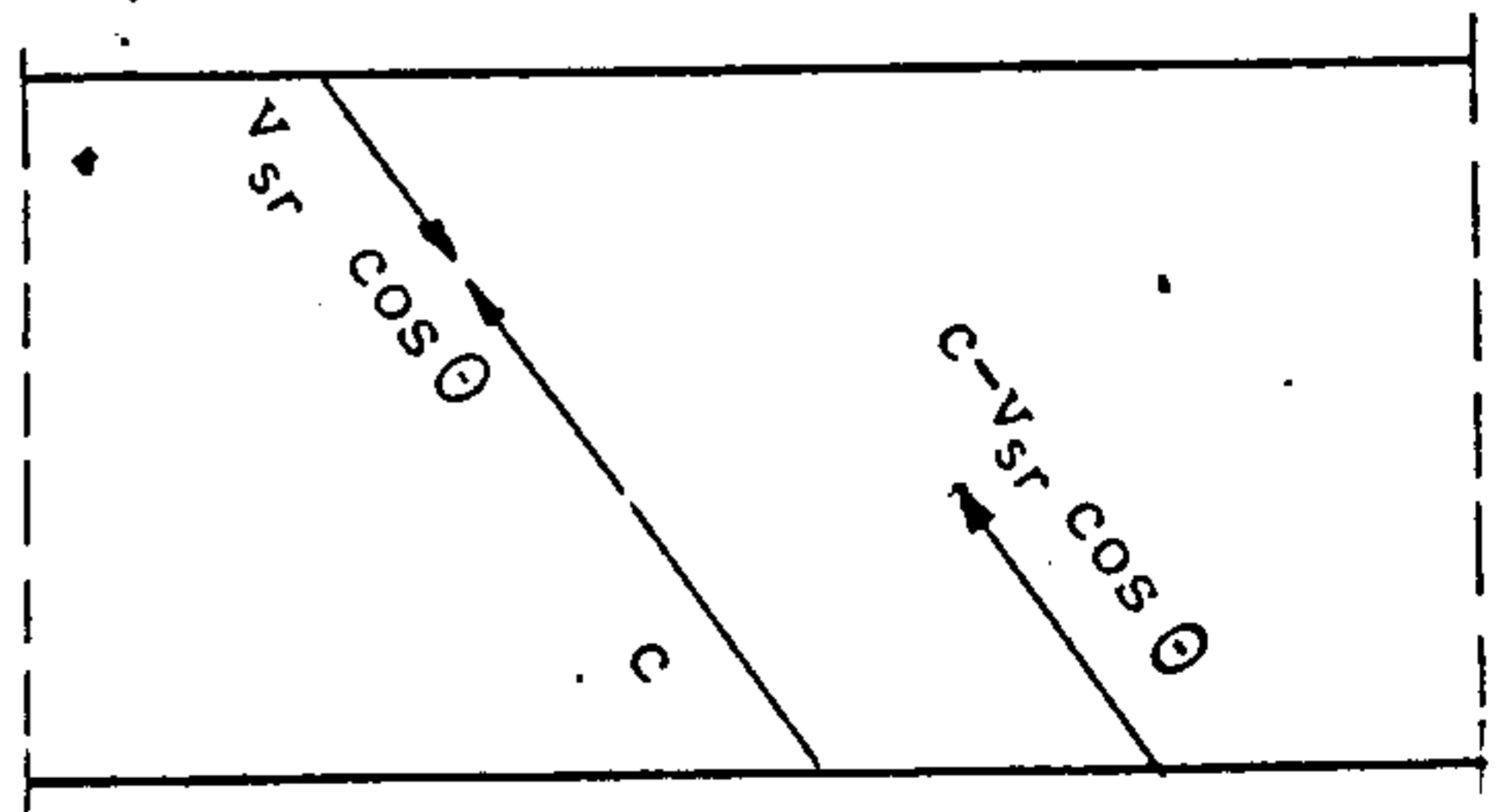
b) POKRETAN FLUID KONSTANTNE BRZINE



c) BRZINA U NIZVODNOM SMERU



d) BRZINA U UZVODNOM SMERU



$$c \gg v_{sr} \cos \theta$$

Slika IV 32. Brzine putovanja ultrazvuka u mirnoj i pokretnoj tečnosti

Član $v^2 \cos^2 \theta$ je mnogo manji od c^2 pa se može zanemariti. Razlika ova dva vremena putovanja uz gornje zanemarenje iznosi:

$$t_u - t_N = \frac{2d \cos \theta}{c^2 \sin \theta} v_{sr} \quad (\text{IV } 23)$$

a proizvod ova dva vremena iznosi:

$$t_u \cdot t_N = \frac{d^2}{c^2 \sin^2 \theta} \quad (\text{IV } 24)$$

Razlika recipročnih vrednosti je

$$\frac{1}{t_N} - \frac{1}{t_u} = \frac{t_u - t_N}{t_N \cdot t_u} \quad (\text{IV } 25)$$

Kad se u gornji izraz zamene odgovarajuće razlike i proizvod dobija se

$$\frac{t_u - t_N}{t_N \cdot t_u} = \frac{2 \sin \theta \cos \theta}{d} v_{sr} \quad (\text{IV } 26)$$

Iz prethodne jednačine se dobija:

$$v_{sr} = \frac{t_u - t_N}{t_u \cdot t_N} \frac{d}{2 \sin \theta \cos \theta} \quad (\text{IV } 27)$$

i pošto je protok Q (sa ovako pretpostavljenim rasporedom brzina)

$$Q = v_{sr} A \quad (\text{IV } 28)$$

dobija se

$$Q = \frac{d^3 \pi}{8} \frac{t_u - t_N}{t_u \cdot t_N} \cdot \frac{1}{\sin \theta \cos \theta} \quad (\text{IV } 29)$$

Kao što se vidi, veza između brzine fluida i količnika razlike i proizvoda vremena je nezavisna od brzine zvuka.

Gornji izrazi su izvedeni za slučaj da je između sonde fluid tekao konstantnom brzinom. Za cevi međutim to nije slučaj jer se brzina u poprečnom preseku, kao što je poznato, menja u zavisnosti od režima tečenja i hrapavosti zida cevi. Za realan raspored brzina u cevi (slika IV 33) odgovarajući izrazi za vremena putovanja su:

$$t_N = \int_0^l \frac{d\xi}{c+u(\xi)\cos\theta} \quad \text{i} \quad t_U = \int_0^l \frac{d\xi}{c-u(\xi)\cos\theta} \quad (\text{IV } 30)$$

U skladu sa tim za ostvareni raspored brzina će se u izrazu za protok Q obaviti odgovarajuće korekcije množeći ga sa C_u kojim se uzimaju u obzir gore pobrojani uticaji.

Stvarni protok Q je

$$Q = C_u \frac{d^3 \pi}{8 \sin\theta \cos\theta} \frac{t_U - t_N}{t_U t_N} \quad (\text{IV } 31)$$

Istraživanja Vignosa (1981) o zavisnosti ovog koeficijenta od Reynolds-ovog broja prikazana su na slici IV 34.

Protok se pomoću ultrazvuka preciznije meri na cevima većeg prečnika i većih brzina, i pogodno je to što se cena uređaja ne menja sa povećanjem prečnika kao što je to slučaj kod drugih metoda (npr. Venturi, elektromagnetni, itd.) zbog povećavanja cene mehaničkog dela merača.

Sem metoda merenja protoka pomoću ultrazvuka prikazanog u prethodnom tekstu, primenjuje se niz drugih metoda kao na primer metod koji se bazira na merenju razlike frekvencija signala u uzvodnom i nizvodnom smeru ("sing around" - engleski termin).

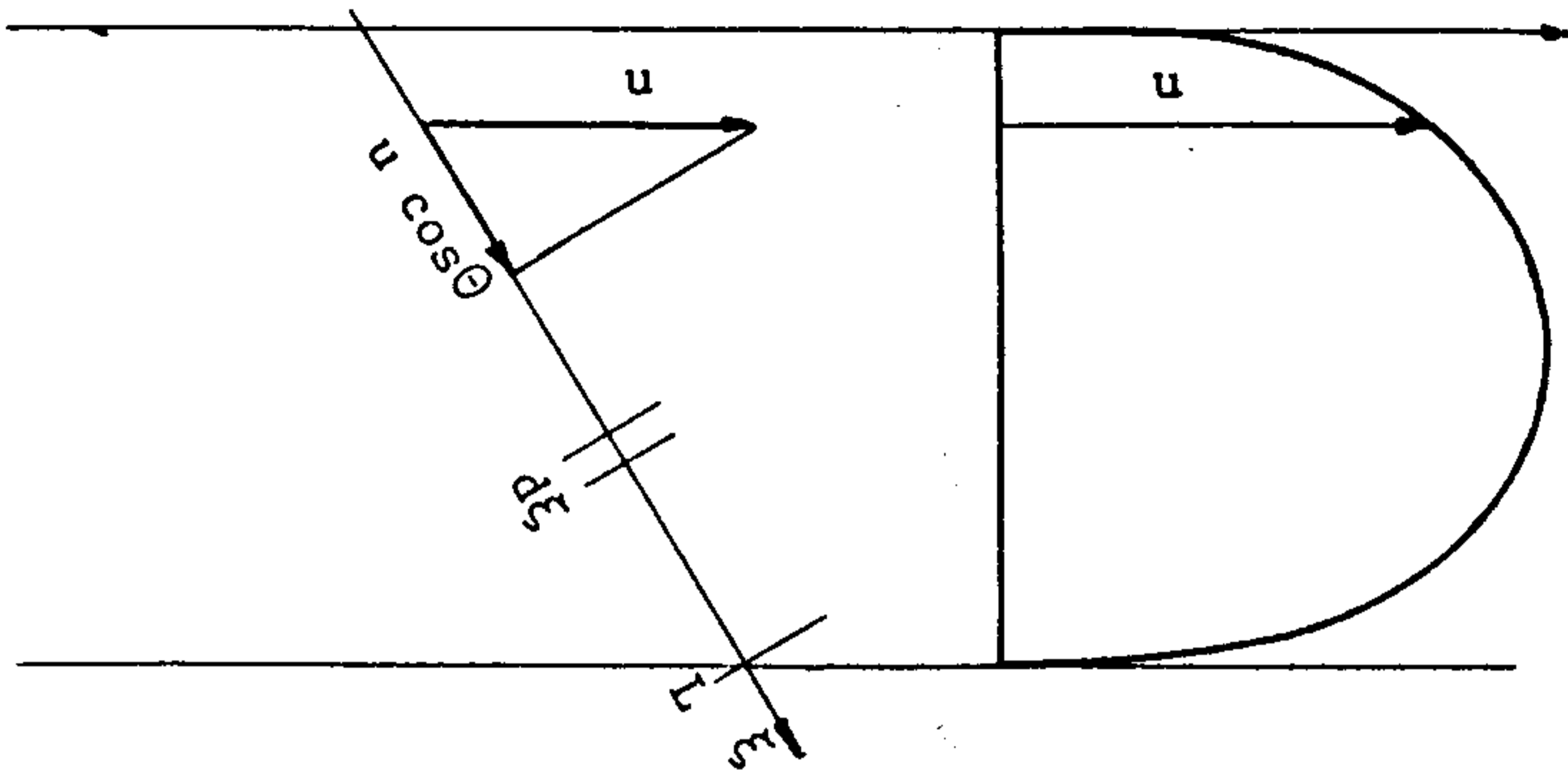
Aranžman prikazan na slici IV 35. je sličan kao prethodni. Kad sonda 1 emituje signal (ultrazvuk) i sonda 2 ga prima, frekvencija koju prima sonda 2 (f_N) razlikovaće se od frekvencije (f_U) kada su uloge izmenjene - sonda 2 emituje a sonda 1 prime signal.

Odgovarajuće frekvencije su:

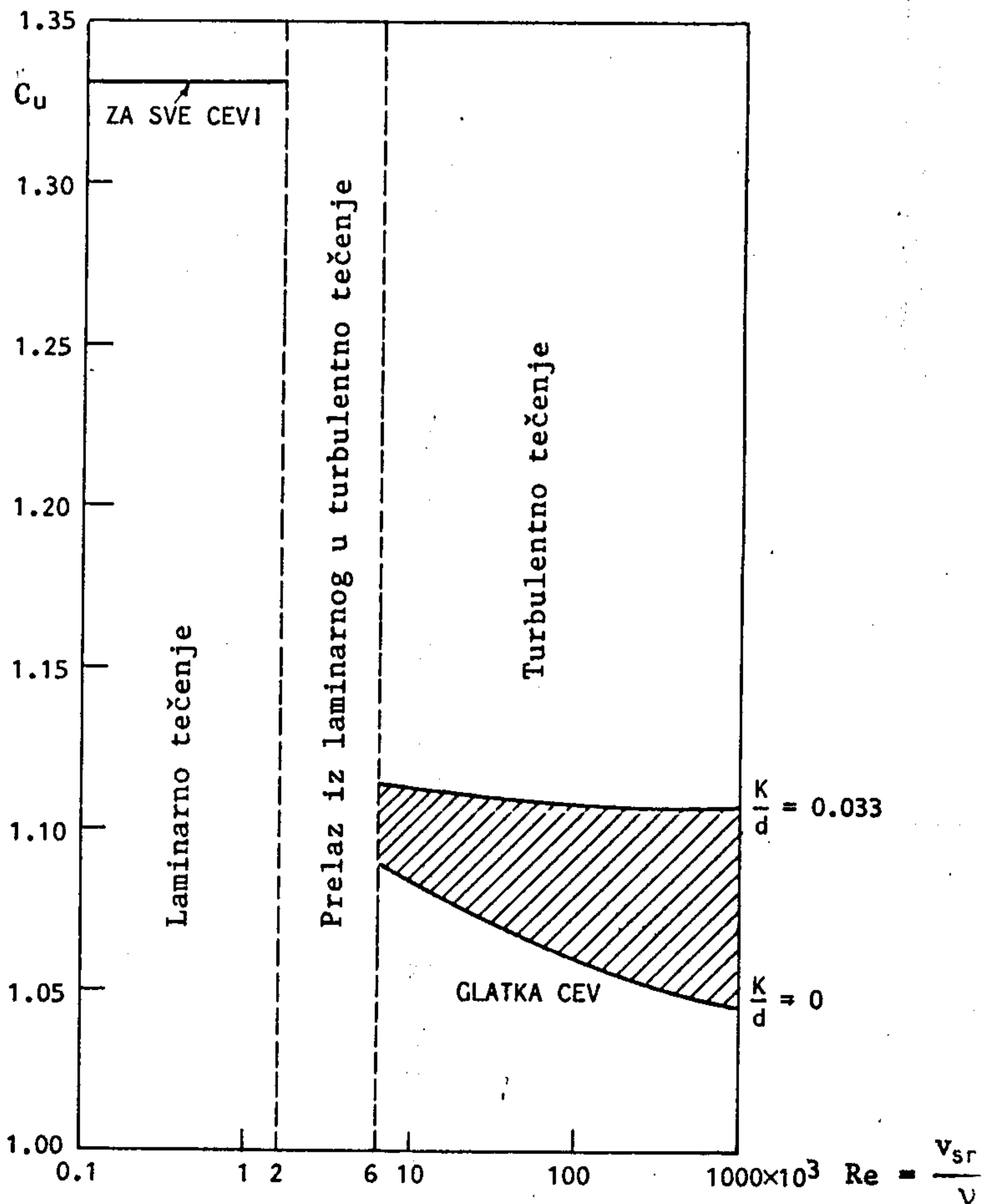
$$f_U = \frac{1}{t_U} \quad f_N = \frac{1}{t_N} \quad (\text{IV } 32)$$

pa će odgovarajući izraz za protok biti:

$$Q = C_u \frac{d^3 \pi}{4 \cos\theta \sin\theta} (f_N - f_U) \quad (\text{IV } 33)$$



Slika IV 33. Realan raspored brzina



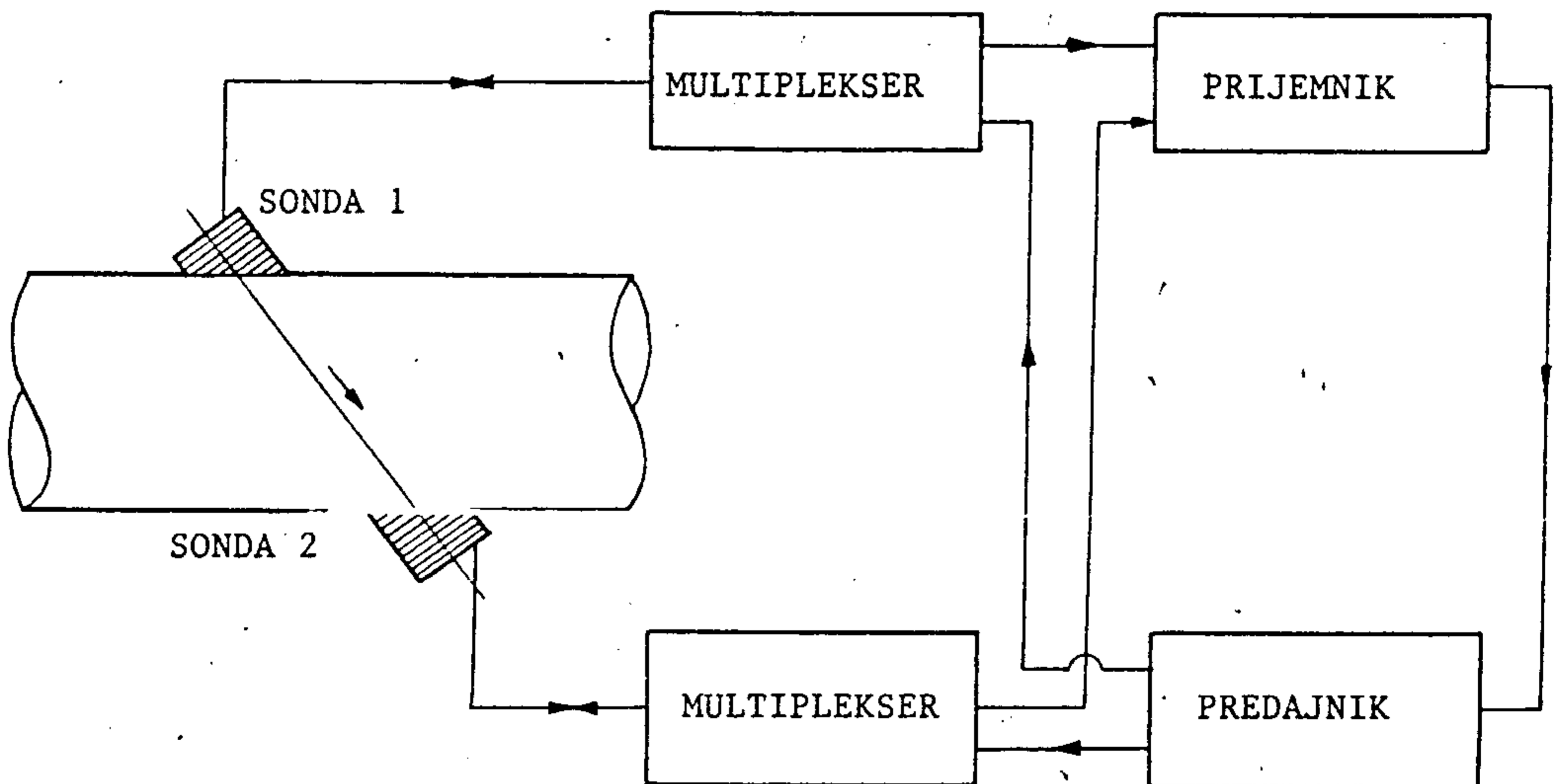
Slika IV 34. Zavisnost koeficijenta C_u od Reynolds-ovog broja

IV 4.5. Merenje protoka pomoću analize korelacija

Ova metoda se bazira na analizi korelacije zavisnosti između prirodnih ili veštački izazvanih poremećaja u toku, koji se mere u dve tačke na označenom rastojanju. Kao poremećaj mogu da se koriste:

- vrtlozi u toku
- ultrazvuk
- termički ili optički šumovi
- promene električne impedanse između dve elektrode
- γ radijacija.

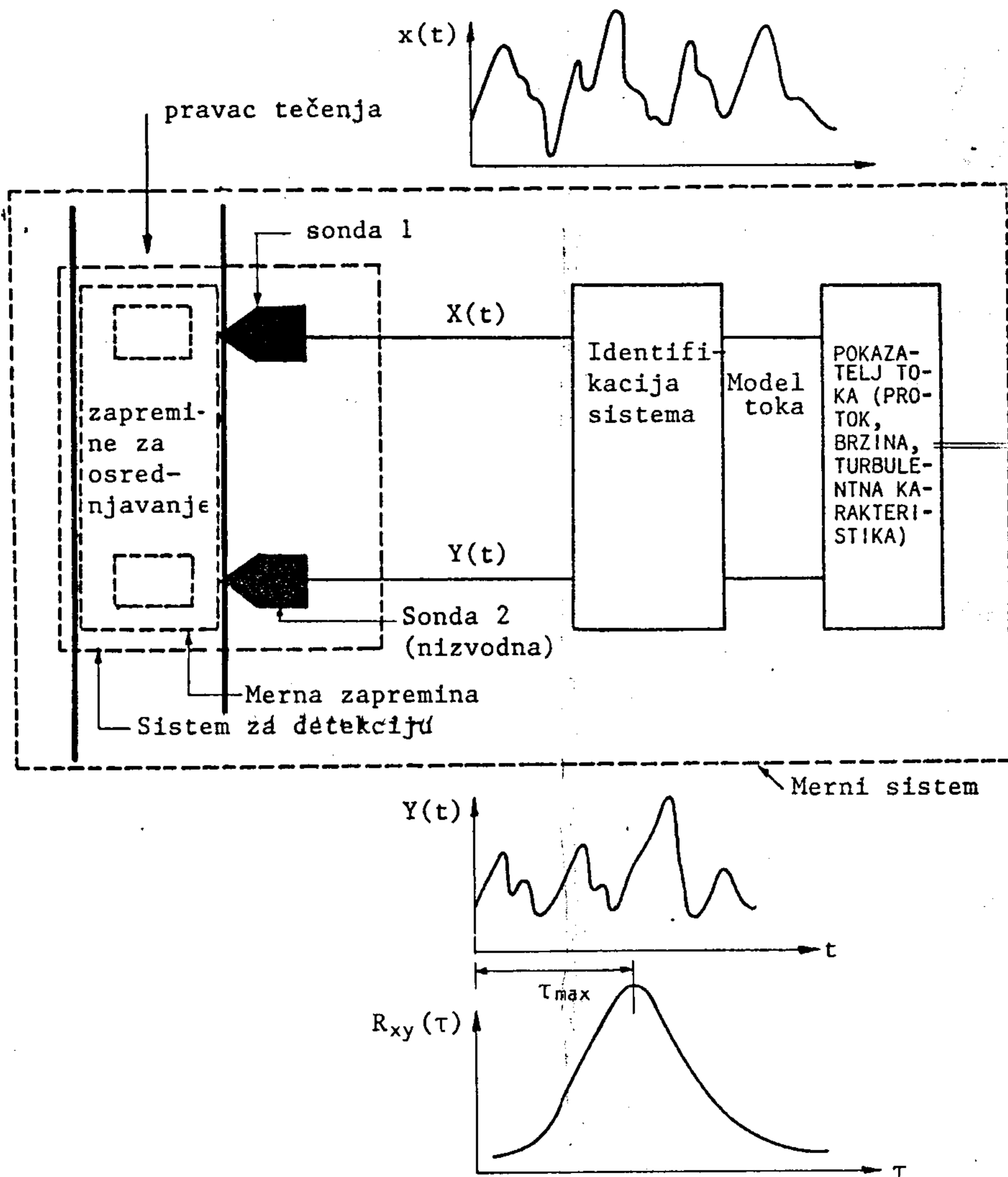
Na sl. IV 36. prikazan je princip merenja. Dve sonde služe za merenje iste veličine u dve tačke.



Slika IV 35. Princip merenja protoka na osnovu merenja razlike frekvencija ultrazvuka

Poremećaj, čije se posledice detektuju tim sensorima, putuje niz suvju brzinom koja je proporcionalna protoku. Izlazni signali iz sonde x i y se koriste za sračunavanje korelacione funkcije:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t-\tau)y(t)dt \quad (IV)$$



Slika IV 36. Princip merenja protoka pomoću analize korelacije

Vremenski interval potreban da korelaciona funkcija dostigne ovaj maksimum (τ_{\max}) se koristi za proračun ekvivalentne brzine toka V_{ekv} .

$$V_{\text{ekv}} = \frac{\ell}{\tau_{\max}} \quad (\text{IV } 35)$$

i protoka

$$Q = C_K \frac{d^2 \pi}{4} \frac{\ell}{\tau_{\max}} \quad (\text{IV } 36)$$

gde se koeficijentom C_K obuhvataju uticaji karakteristika toka, hrpavosti cevi, neravnomernost brzine itd.

Sem za merenje protoka ovaj metod se može koristiti za merenje sledećih veličina:

- turbulentne karakteristike toka,
- lokalne komponente brzine,
- sadržaj i karakteristike čvrste i gasovite faze kod dvofaznih tokova itd.

Detaljnije o ovoj metodi može se naći u članku Kippan-a i Mesch-a (1978).

IV 4.6. Merenje protoka cevima promenljivog preseka

U ovu grupu spada merač tipa "Rotametar" koji se uglavnom koristi za merenje manjih protoka. Kod tog merača u vertikalnu cev (providnu ako se položaj rotirajućeg elementa očitava vizuelno) promenljivog poprečnog preseka (cev je konusna - proširuje se nizvodnim smerom) ugrađuje se rotirajući element. Sile koje deluju na taj element su sopstena težina i potisak (nepromenljive) i sila otpora koja je promenljiva, tj. zavisi od protoka, odnosno lokalne brzine (videti sliku IV 37).

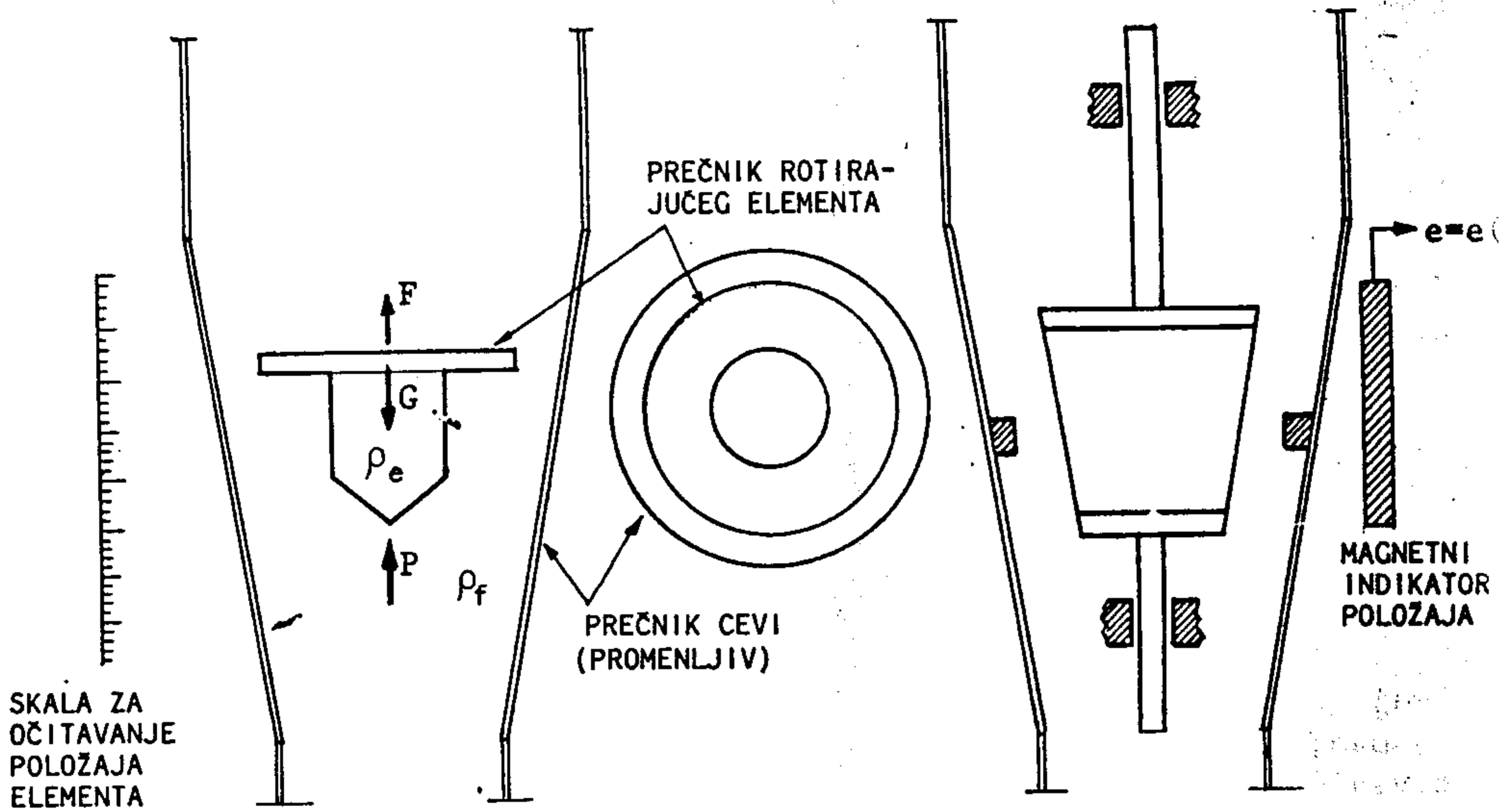
Vrednosti sila su sledeće (prema oznakama sa slike IV 37):

- sopstvena težina

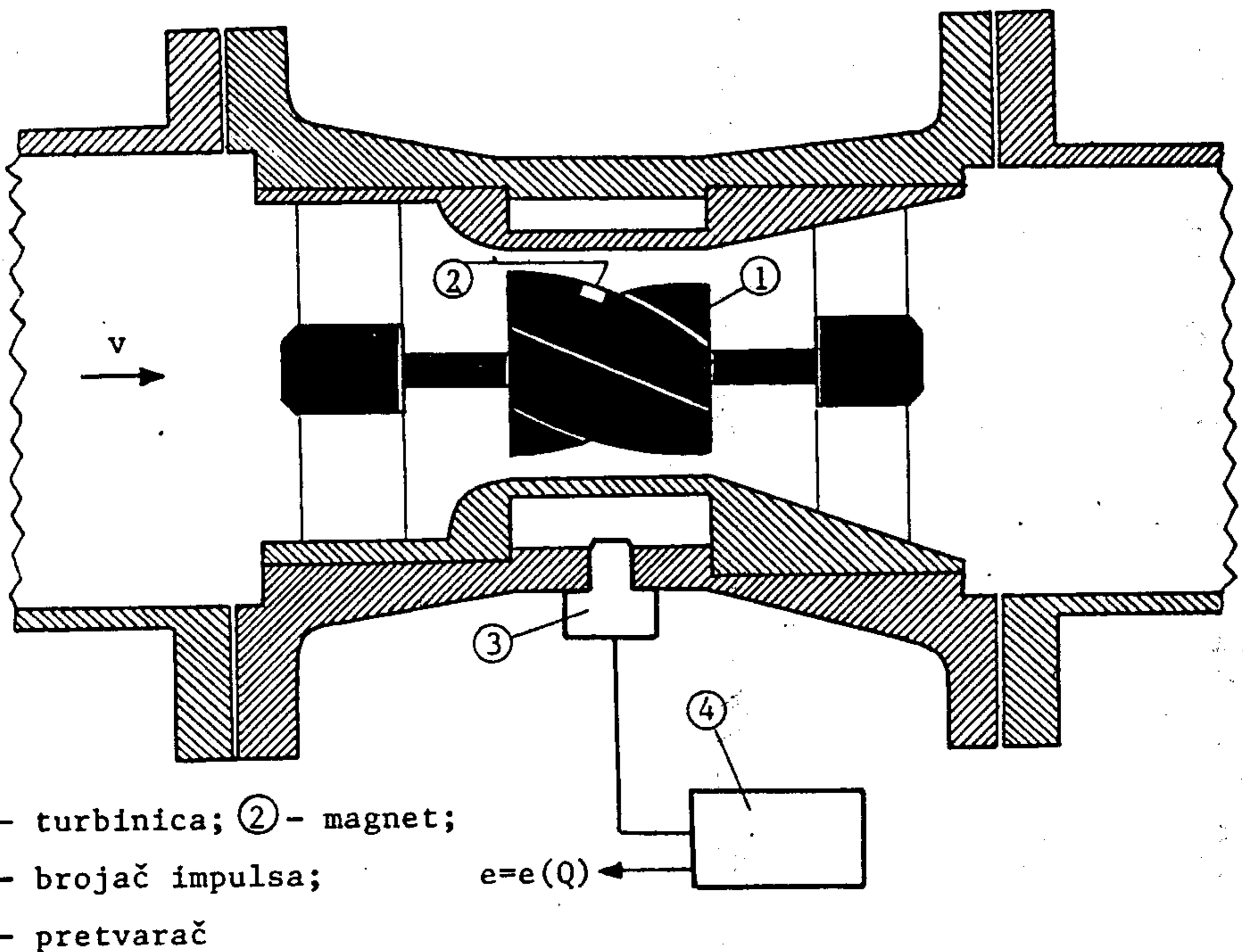
$$G = v_e \rho_e g \quad (\text{IV } 37)$$

- potisak

$$P = v_e \rho_f g \quad (\text{IV } 38)$$



Slika IV 37. Princip merenja protoka pomoću rotametra



Slika IV 38. Turbinski merač protoka

- sila otpora oblika

$$F = C_F \frac{1}{2} \rho_f v_{fa}^2 A_e \quad (\text{IV } 39)$$

Kombinacijom dinamičke jednačine (ravnoteža sile na elemenat) i jednačine kontinuiteta

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

dobija se jednačina za protok

$$Q = C_e \sqrt{\frac{2g v_e}{A_2}} \sqrt{\frac{\rho_e - \rho_f}{\rho_f}} A_2 \quad (\text{IV } 40)$$

Ovaj način određivanja protoka koristi se često u laboratorijama ili na manjim instalacijama postrojenja za prečišćavanje za direktno očitavanje vrednosti protoka.

Za pretvaranje u električni izlaz potrebno je dograditi uređaj za električno očitavanje položaja elementa. Jedna od mogućnosti da se to postigne je prikazan na sl. IV 37. Položaj elementa se određuje magnetnim indikatorom smeštenim pored cevi ili oko konusnog dela cevi.

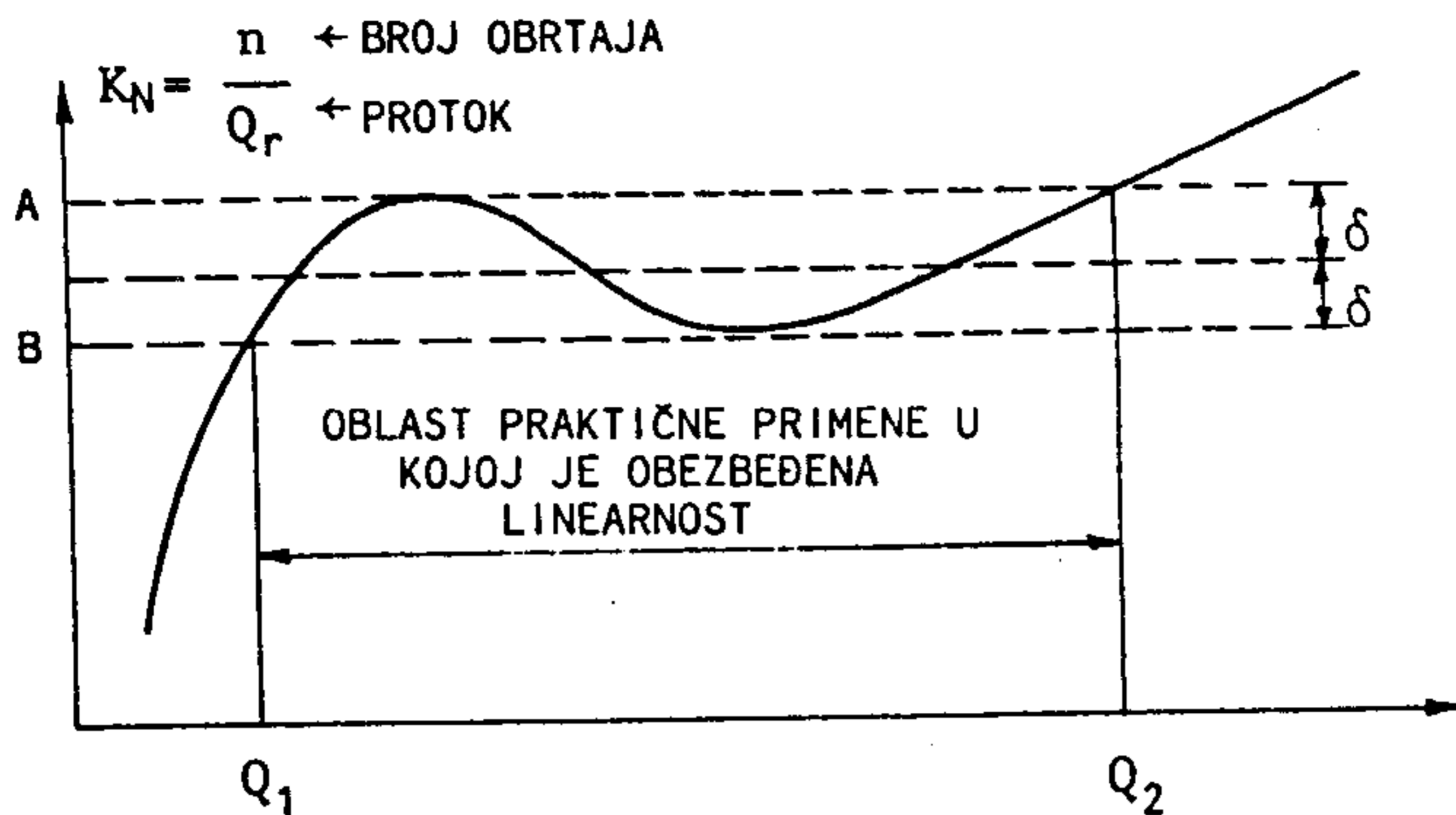
IV 4.7. Turbinski merač protoka

Ovaj merač se, kao kod hidrometrijskog krila, bazira na proporcionalnosti broja obrtaja i protoka. Jedno od mogućih rešenja prikazano je na slici IV 38.

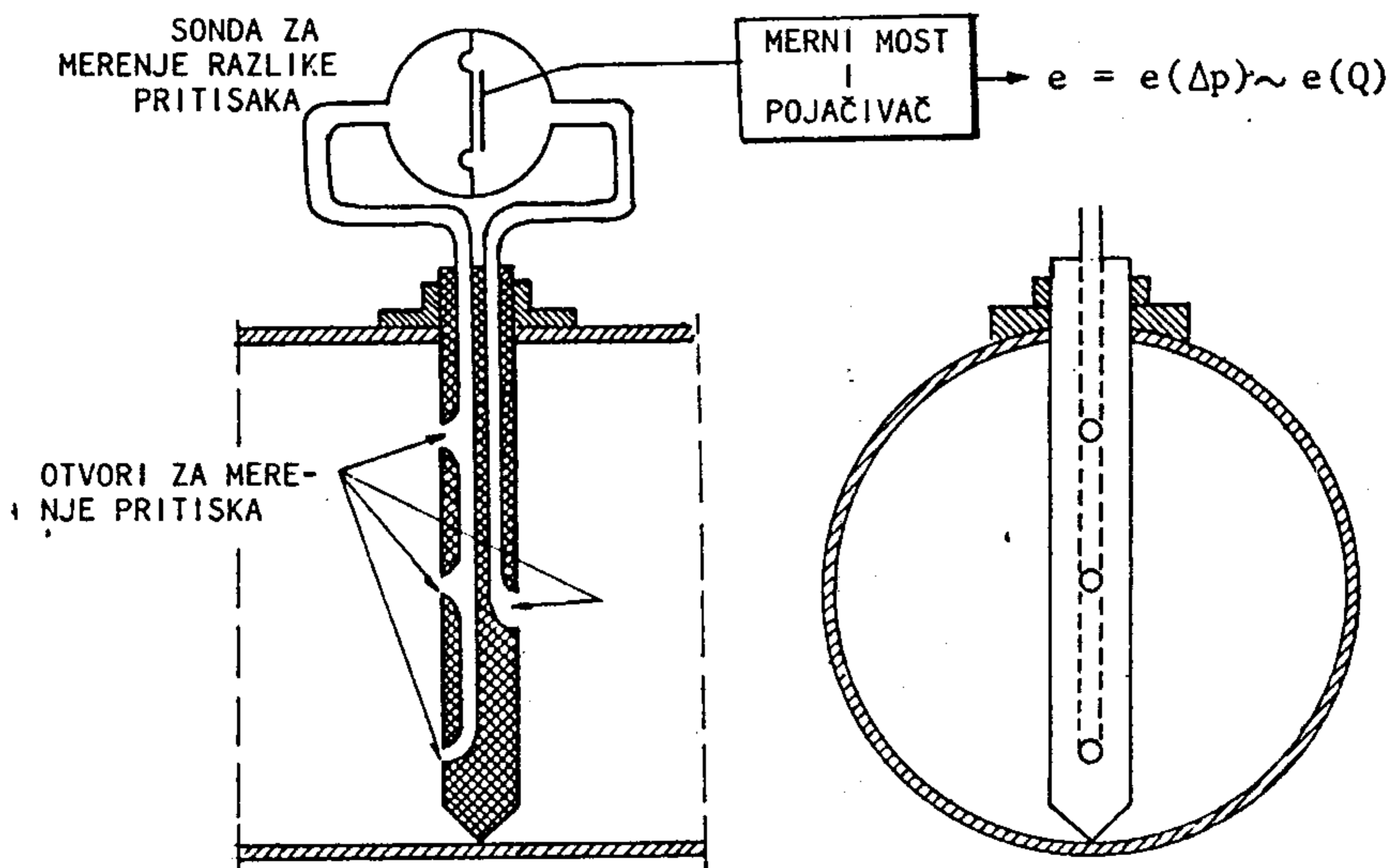
Protok vode pokreće obrtni element - turbinicu koja na sebi ima ugrađen magnet. Prolazak magneta se detektuje i prenosi u pretvarač signala, i dalje na instrument.

Broj impulsa se meri tačno; međutim, brzina obrtanja nije linearno srazmerna protoku vode u celom radnom opsegu. Sasvim mali protoci nisu uopšte u stanju da pokrenu turbinicu, a pri vrlo velikim protocima zavisnost više nije linearna. Zato se ovaj instrument mora baždariti. Tipična kriva baždarenja vidi se na sl. IV 39. Koeficijent K_N - odnos broja obrtaja i protoka koji protiče kroz instrument - za razne vrednosti protoka vode. Vidi se da instrument treba koristiti samo u opsegu $Q_1 < Q < Q_2$, i da je pri tome srednja greška ravna δ .

Mana ovog instrumenta je, između ostalog, što je osetljiv na čvrste deliće koji mogu biti prisutni u vodi, inkrustaciju, itd.



Slika IV 39. Oblast linearnosti turbinskog merača protoka



Slika IV 40. Merač protoka tipa Anubar

IV 4.8. Merač tipa Anubar

Anubar je komercijalni naziv merača koji se bazira na principu merenja razlike pritiska sa prednje i stražnje strane cilindrične prepreke koja se postavlja upravno na osovinu struje, (sl. IV 40).

Otvori sa prednje strane izloženi su dejstvu povećanog pritiska u odnosu na pritisak u neporemećenom stanju zbog zaustavljanja struje. Sa stražnje strane pritisak je smanjen zbog toga što je taj deo prepreke u vrtložnom tragu. Razlika pritiska sa prednje i stražnje strane je približno jednaka:

$$\Delta p \approx (1,3 - 1,4) \frac{1}{2} \rho v_{sr}^2 \quad (IV 41)$$

Ta razlika se meri diferencijalnim manometrom. Kao što se vidi razlika je proporcionalna drugom stepenu protoka. Za pouzdano utvrđivanje kalibracione funkcije sem baždarenja koja obavlja proizvođač, korisno je da se obave merenja i na samom cevovodu gde je merač ugrađen.

Ova sonda je relativno povoljna zbog svoje jednostavne konstrukcije, lako se ugrađuje (čak i naknadno), i malog gubitka energije. Nepovoljno je što se na otvorima brzo inkrustira talog i dolazi do promene karakteristika merača odnosno promene njegove kalibracione funkcije.

IV 4.9. Ostale metode merenja protoka u cevima pod pritiskom

Postoji još veliki broj metoda za merenje protoka u cevima pod pritiskom koji se baziraju na različitim principima. Neke će se pobrojati uz napomenu da će čitav niz ostati nepomenut.

a) Uređaj na principu odvajanja vrtloga

Koriste se metode za merenje brzina u tački merenjem frekvencije odvajanja vrtloga iza nestrujolikih tela. Za dobijanje funkcije protoka koristi se veza između lokalne brzine i izmerene frekvencije.

Dalja procedura je slična kao kod ostalih merača koji su prikazani u podpoglavlju IV 4.2.

b) Uređaji na principu merenja Koriolisovog efekta

Kod ovog metoda na cev većeg prečnika ugrađuje se u horizontalnoj ravni druga cev malog prečnika oblika slova U. Mala cev ima sopstvenu frekvenciju koja zavisi od protoka kroz nju, a taj protok zavisi od protoka kroz glavnu cev. Merenjem sopstvene frekvencije male cevi dobija se informacije o protoku. Metod je relativno pouzdan kada kroz cevi protiče čist fluid, ali su osetljive na inkrustaciju, promenu poprečnog preseka i spoljne vibracije cevovoda.

c) Ostale metode na principu ultrazvuka

Sem već ranije opisanog merača protoka na principu merenja razlike u vremenu putovanja ultrazvuka, postoji niz drugih metoda koje koriste merenje frekvencije, Doppler-ov frekventni pomak itd.

d) Merenje protoka na principu merenja sile otpora pokretne prepreke

Kod ove metode u tok se ugrađuje neka prepreka (disk, konus, polusfera, itd.), oslonjena na pokretu ili elastičnu konstrukciju. Sila otpora proporcionalna je sa brzinom toka (a time protoku) na neki eksponent između jedan i dva. Merenjem pomeranja uz prethodnu kalibraciju dobija se informacija o protoku.

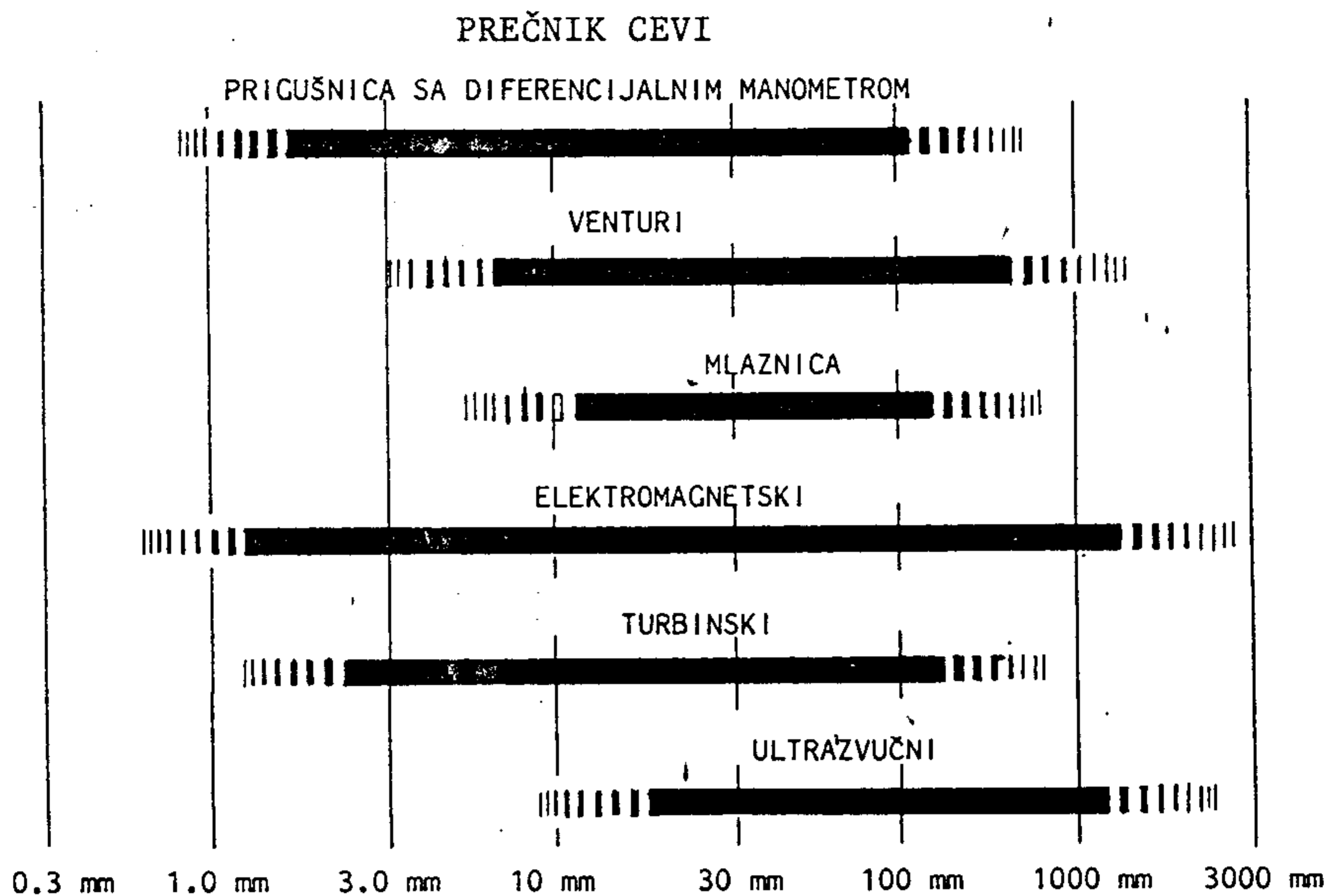
IV 4.10. Faktori koji utiču na izbor merača protoka

Odlučujuću ulogu pri izboru merača protoka treba da igraju sledeći faktori (koji nisu poredani po značaju):

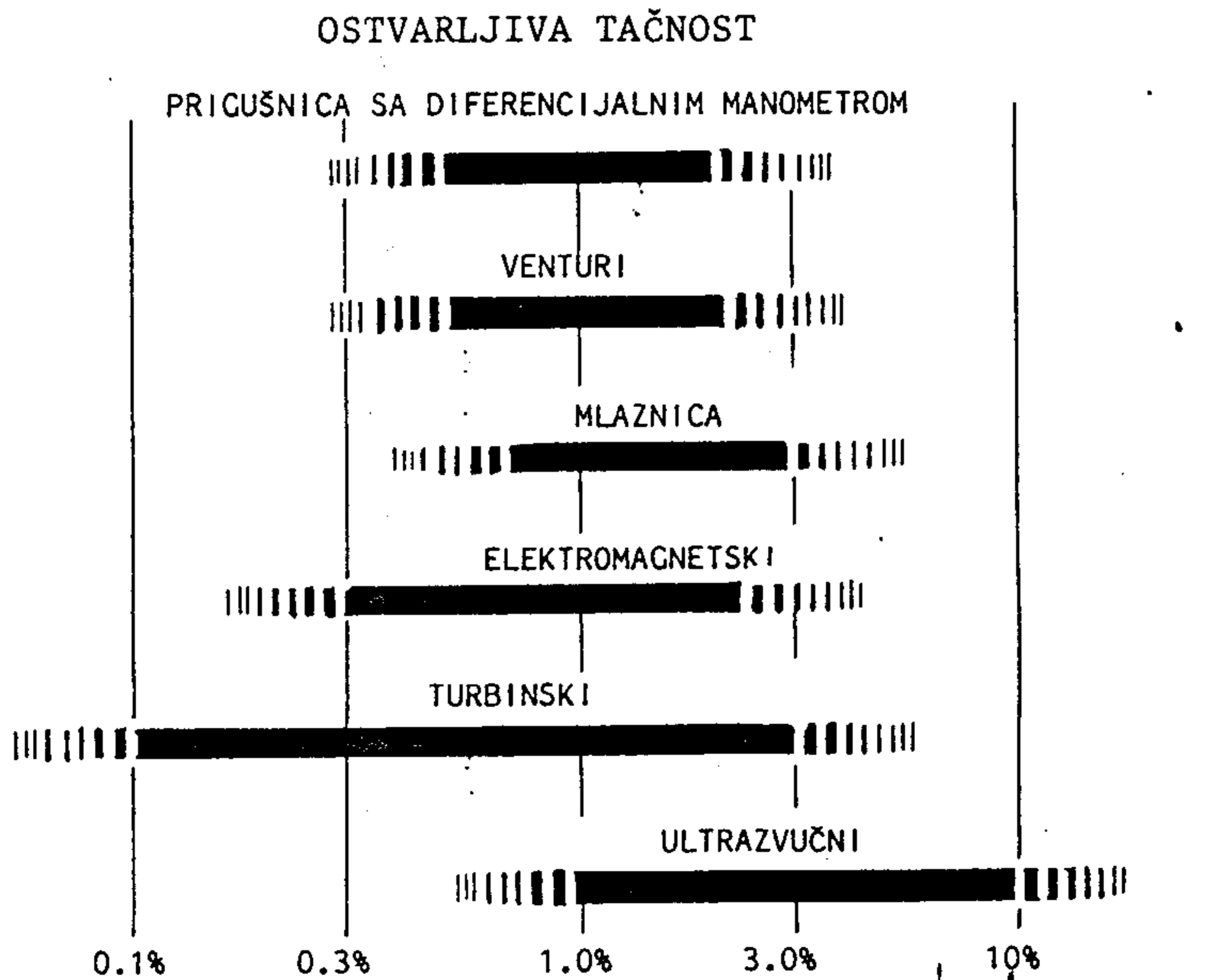
- raspoloživost na tržištu;
- postojanje merača istog tipa u sopstvenoj praksi;
- kompatibilnost sa opremom za registrovanje i obradu podataka i ukla-panje u sistem za daljinsko upravljanje, komandu i kontrolu;
- cena osnovne opreme, rezervnih delova i održavanja;
- tačnost;
- pouzdanost;
- opseg promene protoka;
- energetske gubitke;
- dimenzije cevovoda;
- informisanost projektanta;
- uslovi održavanja i servisiranja.

U vreme pisanja ove knjige merači protoka koji se baziraju na većini od prethodno pomenutih principa mogu se naći na domaćem tržištu. Mada kvalitet, tačnost i pouzdanost nije u svim slučajevima na nivou vodećih svetskih proizvođača ove opreme, neophodno je ukazati na zabludu domaćih investitora i projektanata da će nabavke uvozne opreme moći da kompenzuje loše održavanje i servisiranje zbog čega najčešće ovi uređaji ne rade. Nekritička nabavka neproverene uvozne opreme, nekompatibilne sa postojećom, često može da bude i krupan promašaj.

Poseban problem je što se odluka ili preporuka za nabavku opreme donosi bez dovoljno stručne analize i provere poređenjem sa domaćim alternativama, nego je neretko odlučujući faktor spoljni izgled i dobar dizajn kolor brošure koja opisuje proizvod.



Slika IV 41. Standardne dimenzije nekih merača protoka



Slika IV 42. Ostvarljiva tačnost pojedinih tipova merača protoka

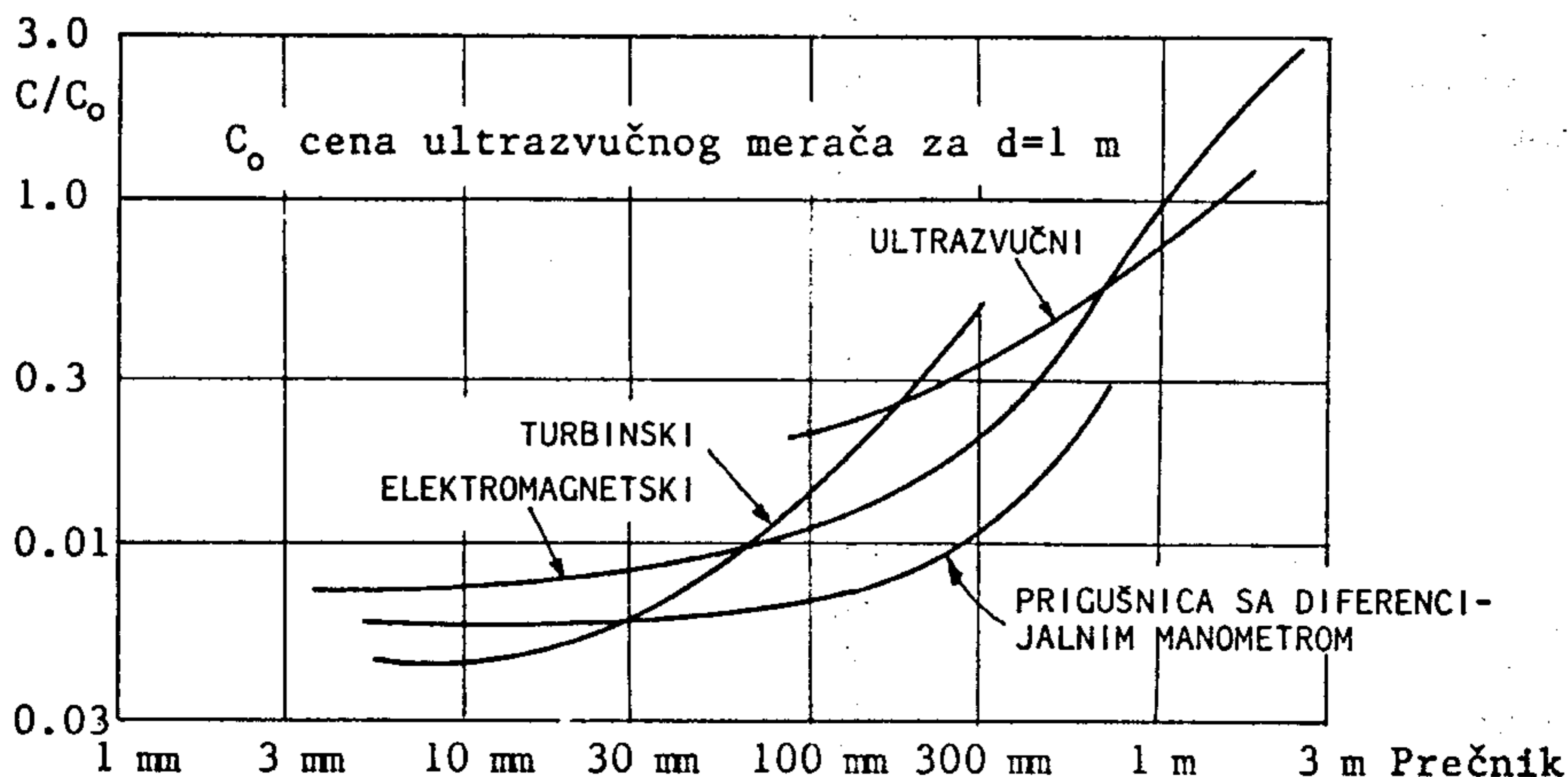
Ukoliko se o merenju protoka (i drugih veličina) u vodovodnom i kanalizacionom sistemu vodi neophodna briga onda izbor i nabavka opreme mora da bude sastavni deo smišljene dugoročne politike i da usledi nakon kritičkog sagledavanja alternativa. Postojeća oprema ukoliko je dobro održavana i redovno servisira može se modernizovati i dalje, koristiti u sistemu sa električnim signalima, na primer klasično Venturijev suženje sa mehaničkim uređajem za očitavanje razlike pritiska može se ukoliko je unutrašnja površina merača neoštećena, opremiti diferencijalnim manometrom (sličnim onom prikazanom na slici IV 14) i odgovarajućim pojačivačem. Time se dobija merač koji se lako uklapa u bilo koji savremen sistem za lokalnu ili daljinsku registraciju podataka, može poslužiti kao izvor informacija za regulaciju, itd.

Merači protoka različitih principa delovanja proizvode se u različitim dimenzijama. Za pouzdano merenje protoka potrebno je u mernom preseku ostvariti brzine u određenom opsegu, pa se često obavlja i lokalno sužavanje cevi do prečnika merača.

Oblasti dimenzija standardnih merača protoka prikazane su na slici IV 41.

U pogledu tačnosti, merači različitih principa delovanja ponašaju se različito. Od pomenutih tipova najveća tačnost može se ostvariti elektromagnetnim i turbinskim meračima dok su ultrazvučni merači u pogledu inferiorniji.

Za konkretne uslove tačnost se značajno može poboljšati pažljivom kalibracijom i ostvarivanjem optimalnih uslova za rad. Na slici IV 42 prikazane su granice u kojima se kreću tačnosti merenja.



Slika IV 43. Odnos cena merača

Neophodno je ipak za svaki konkretni merač obaviti kalibraciju pre isporuke (obaveza proizvođača) a korisno je da se isti proverí nakon ugradnje (kad je to moguće).

Mada o cenama na domaćem tržištu ne može da se sačini pouzdana analiza može se pokušati sa upoređenjem cena na međunarodnom tržištu. Prema analizi sačinjenoj u Engleskoj, ako se za referentnu cenu uzme ultrazvučni merač za prečnik od 1 m, dobiće se odnosi cena kao što su prikazani na slici IV 43.

Prilikom razmatranja cene merača treba uzeti u obzir i gubitke energije koju pojedini od njih izazivaju a i troškove prateće opreme za njihovu montažu. Tako, na primer, da bi se postigle zadovoljavajuće tačnosti merenja Venturijevim meračem, prečnik merača mora da se sa 1200 mm smanji na 700 mm. U cenu tada treba uračunati i cenu reducira na ulaznom i izlaznom delu koji nisu jeftini.

Elektromagnetni i ultrazvučni merači ne remete strujanje i ne izazivaju dopunske gubitke energije.

LITERATURA

- Benedict R.P. (1977), (urednik), Fundamentals of Pressure and Flow Measurements, 2nd Edition J.Wiley Interscience.
- Boreli M. (1968), Bilans podzemnih voda.
- Čorlukić, (1975), Mjerenje protoka fluida, ATM Zagreb, Tehnička knjiga.
- Djonin K., A. Gajić, Z. Predić (1987), Hidraulički problemi i prelazni režimi u tunelskom dovodu Banovo Brdo - Tašmajdan. Zbornik radova Snabdevanje Beograda vodom, SITB i BVK.
- Hajdin G., M. Spasojević (1980), O mernim objektima u zatvorenim provodnicima sa slobodnom površinom vode. Saopštenje sa seminara MEPROKS '80 o merenju proticaja u otvorenim kanalima i sistemima sa slobodnom površinom. Izdanje Institut za hidrotehniku Gradjevinskog fakulteta u Beogradu.
- Ivetić M., Č. Maksimović, M. Radojković (1983), Primer primene matematičkog modela neustaljenog tečenja u mreži sastavljenoj od kanala sa slobodnom površinom i cevi pod pritiskom. Simpozijum o nelinearnim problemima mehanike, Arandelovac, 22-25 septembra.
- Jovičić B. (1984), Princip rada elektromagnetnog merača protoka. Savetovanje Beogradskog vodovoda i kanalizacije o merenju protoka, april.
- Kippan Mesch (1978), Contribution to the book: Measurements for Industrial Process Control.
- Maksimović Č., Lj. Miljković, D. Djačić, M. Krtenić, (1986). Merenje protoka tečnosti elektromagnetnim meračem sa nehomogenim poljem u nestandardnim uslovima, Zbornik radova sa IX Savjetovanja JDHI i Redovnog godišnjeg Savjetovanja JDH, Split.
- Maksimović Č., M. Radojković (1986), Urban Drainage Catchments-Selected Worldwide Rainfall-Runoff Data from Experimental Catchments, Pergamon Press.
- Maksimović Č., M. Radojković, J. Despotović, Z. Radić (1986), Istraživanje procesa oticanja od kiša sa gradskih površina za potrebe projektovanja objekata kišne kanalizacije. II Kongres o vodama Jugoslavije.
- Prodanović D., A. Špoljarić, M. Ivetić, Č. Maksimović (1985), Dynamic characteristics of a pressure measuring system. Proceedings of the International Symposium on Measuring Techniques in Hydraulic Research, Delft 22-24 April, Published by Balkema, Editor A.C.E. Wessels.
- Stanković D. (1987), Fizičko tehnička merenja, izdavač: Tehnička knjiga.
- Stevanović Čarapina H. (1984), Tehnološka i konstruktivna rešenja davaca elektromagnetnih merača protoka. Savetovanje Beogradskog vodovoda i kanalizacije o merenju protoka, april.
- Vignos, (1981), Effect of Velocity Profile on Flow Measurements in Turbulent Regime (Private communication to the book Flow Measurement Engineering Handbook, R.W., Miller, McGraw Hill 1983).
- Vušković I. (1977), Osnove tehnike merenja.