

IV 5. MERENJE PROTOKA U SISTEMIMA SA SLOBODNOM POVRŠINOM VODE

IV 5.1. Opšta razmatranja

Tečenje sa slobodnom površinom vode se češće javlja kod kanalizacionih nego kod vodovodnih sistema, mada ih ima i kod njih (kaptaže, postrojenja za prečišćavanje, rezervoari, prekidne komore, itd.).

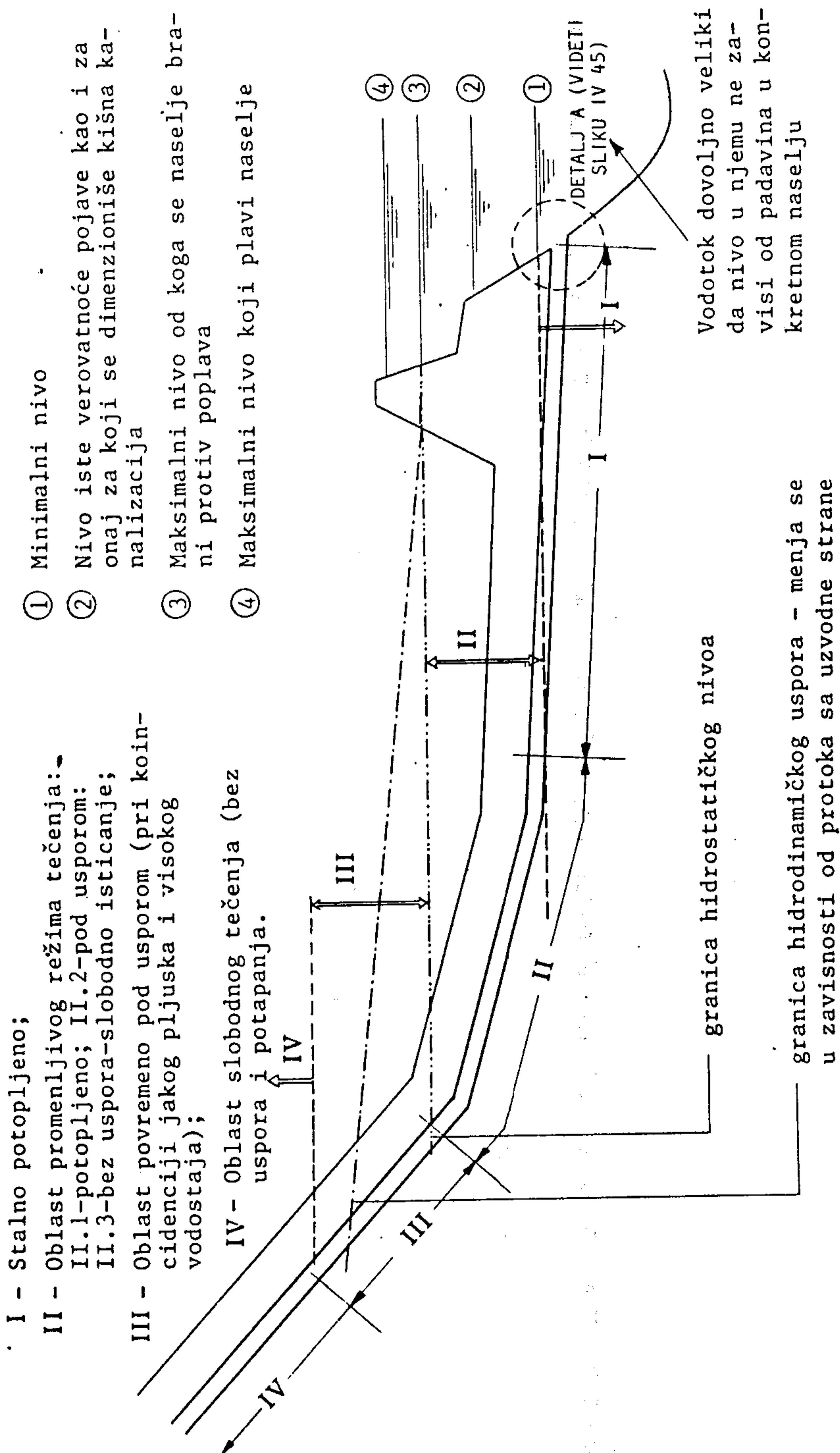
Osnovna razlika između dve vrste tečenja je u tome što se kod tečenja sa slobodnom površinom poprečni presek struje lako menja. Kod tokova u cevima to je onemogućeno čvrstim poprečnim presekom cevi. Ova razlika uslovljava karakter tečenja u cevima i na lokalnim promenama toka a time i način merenja. Tečenja u otvorenim kanalima mogu se podeliti u dve osnovne grupe na:

a) tokove koji ne dolaze pod uspor sa nizvodne strane, nepotopljena isticanja i preliivanja iz bazena za umirenje i druge namene;

b) tokove koji su stalno ili povremeno pod usporom.

Na slici IV 44. šematski su prikazane oblasti u urbanoj sredini koje se razlikuju po uticaju nivoa u recipijentu na režim tečenja u kolektorima.

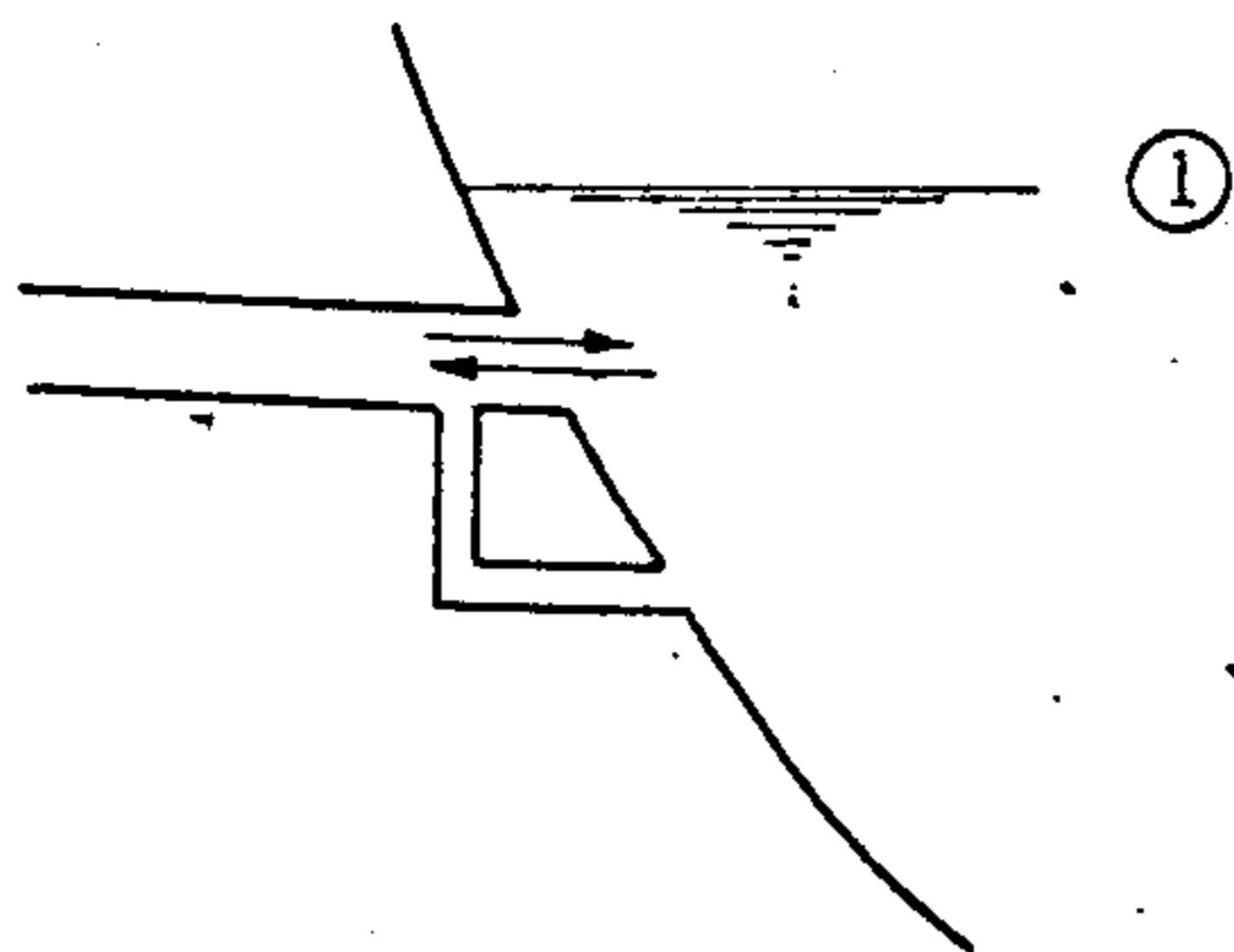
Posmatra se kišna kanalizacija naselja koja je pored vodotoka dovoljno velikog da nivo u njemu ne zavisi od padavina u konkretnom naselju. Hidrološkom analizom raspoloživih podataka o nivoima, određuju se karakteristični nivoi vodotoka:



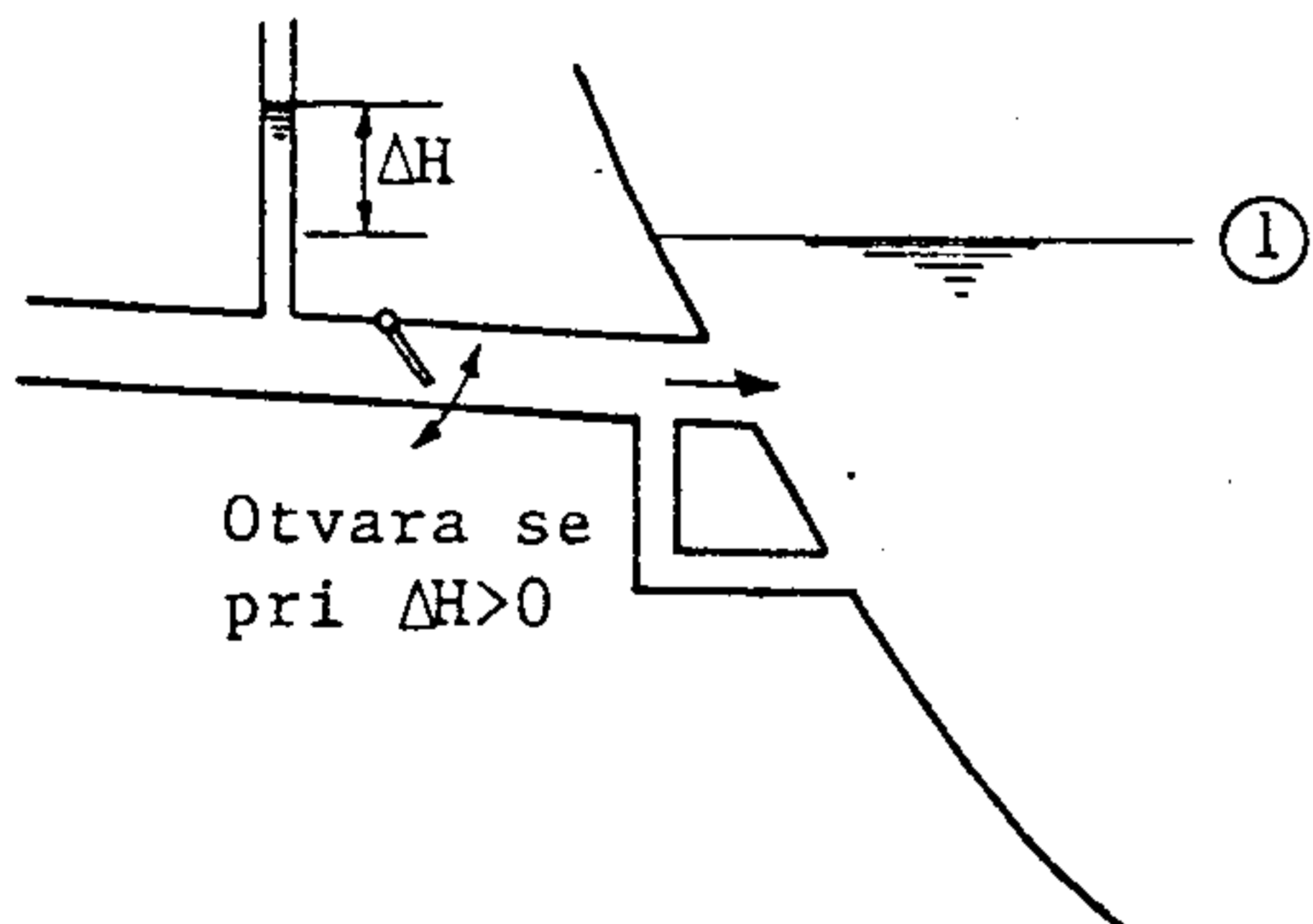
Slika IV 44. Podela urbanih zona prema režimima tečenja u kanalizacionoj mreži

DETALJ "A" - VARIJANTE

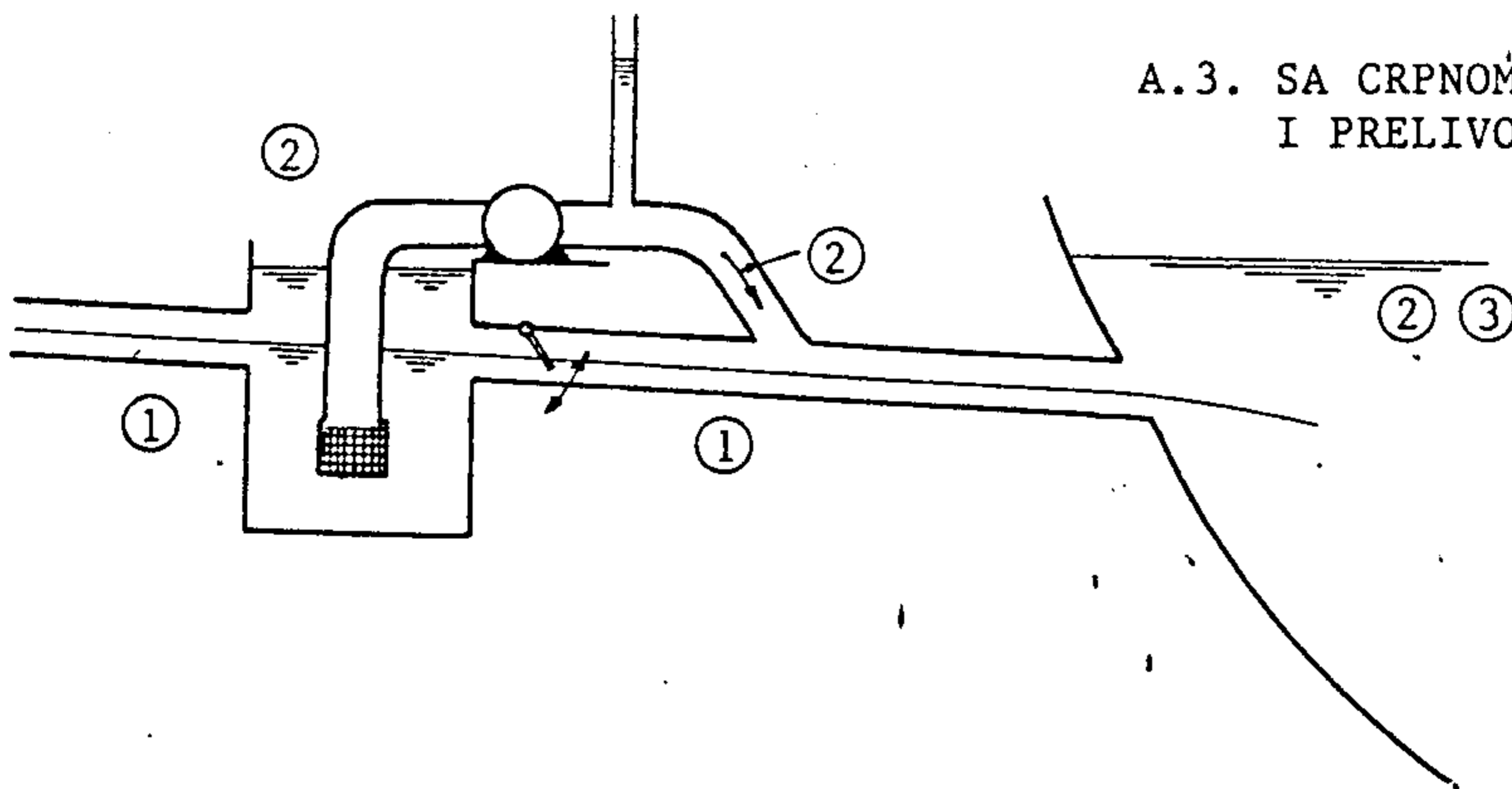
(videti sliku IV 44)



A.1. SLOBODNO ISTICANJE
POTOPLJENO ILI
NEPOTOPLJENO



A.2. SA POVRATNOM KLAPNOM
ILI USTAVOM



A.3. SA CRPNOM STANICOM
I PRELIVOM

Slika IV 45. Varijante ispuštanja kišne vode u vodotok
(detalj A za sliku IV 44)

- 1 - minimalni nivoi određenog povratnog perioda;
- 2 - nivoi povratnog perioda istog kao onaj za koji se dimenzioniše kanalizaciona mreža (2,5 ili 10 godina);
- 3 - nivo za koji se dimenzionišu objekti za zaštitu od poplava (obično više od 20, najčešće 50 do 100 godina);
- 4 - nivoi viši od nivoa 3.

Pri tim nivoima moguća su značajna plavljenja spoljašnim vodama (iz vodotoka) i jačim pljuskovima ukoliko kapaciteti crpnih stanica nisu dovoljno veliki, a ne raspolaže se retenzionim bazenima i drugim objektima za ublažavanje maksimalnih protoka od pljuskova.

Gore opisani nivoi mogu da se propagiraju u mrežu kanalizacije ukoliko to nije sprečeno posebnim objektima, od kojih je najjednostavniji povratna klapna (slika IV 45.A2). Ona omogućava tečenje ka vodotoku, a sprečava ga u suprotnom smeru.

U delu grada I, gde su kanalizacione cevi ispod nivoa 1 u vodotoku, tečenje u mreži je uvek pod pritiskom pa se za merenje protoka može primeniti neki od načina prikazan u poglavlju IV.4, uz vođenje računa da je moguće tečenje u oba smera.

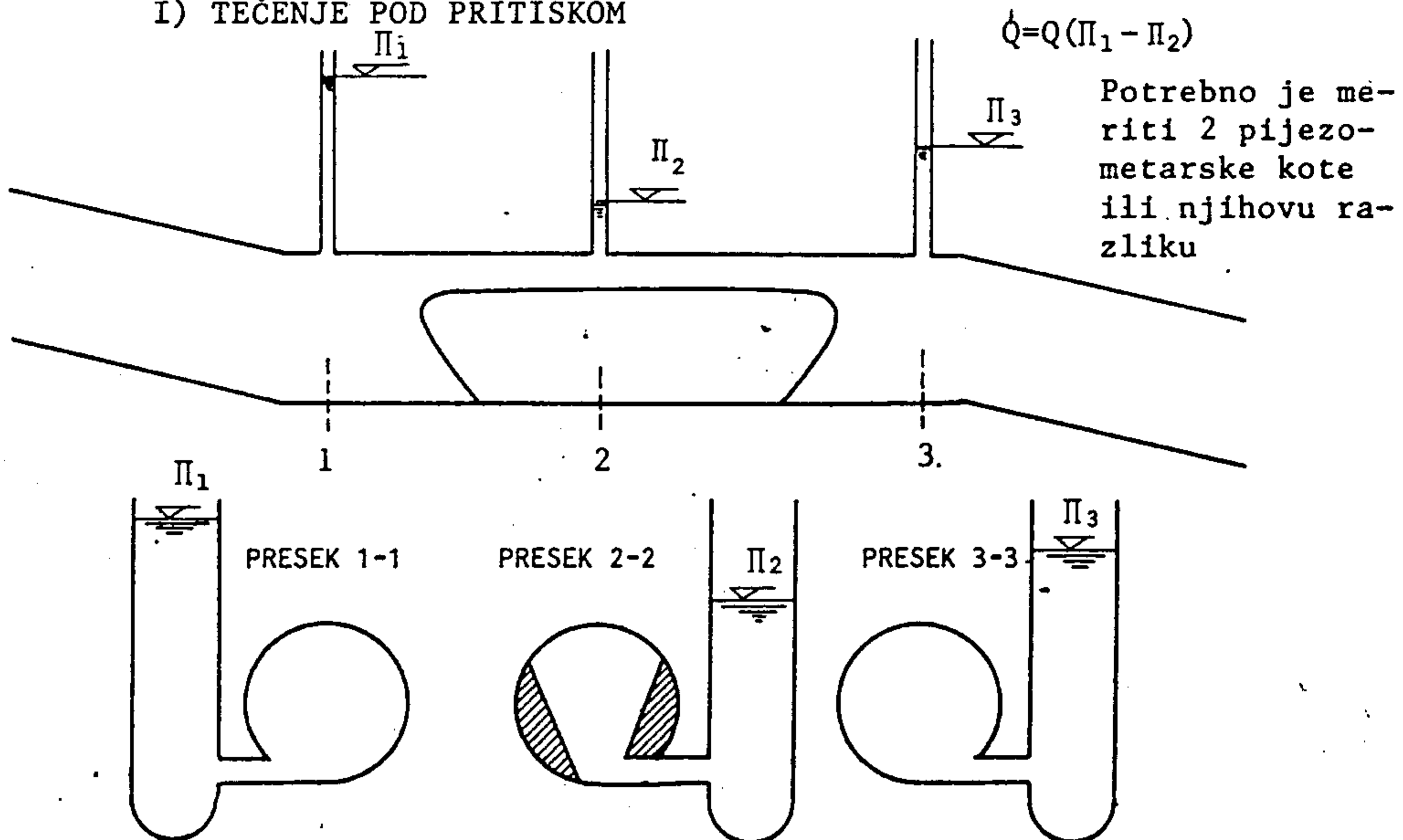
U oblasti II cev je prazna kad nema oticanja od kiše (kišna kanalizacija separacionog sistema), a nivo vode nizak. Kad ima oticanja od kiše, tečenje u cevi je sa slobodnom površinom (slučaj II 3) kad je nivo nizak. Ako je nivo u vodotoku visok tečenje je pod usporom sa slobodnom površinom, ili je pod pritiskom..

Pošto, u cevi tečenje može da bude u svim režimima, merenje protoka je komplikovano. Najčešće se koriste uređaji koji imaju suženje u cevi. U slučaju tečenja pod pritiskom suženje se koristi kao kod Venturijevog merača protoka (videti rad Hajdina i Spasojevića, 1980). Pri tečenju sa slobodnom površinom merač može da radi kao potopljeno ili nepotopljeno suženje (slika IV 46.I).

U oblasti III tok je povremeno pod usporom (samo kad ima oticanja od kiše. Granica između oblasti III i IV nije fiksna nego se pomera u zavisnosti od protoka kroz kolektor. Veći protok, pri ko incidenciji sa visokim nivoom u vodotoku će izazvati uspor na dužoj deonici.

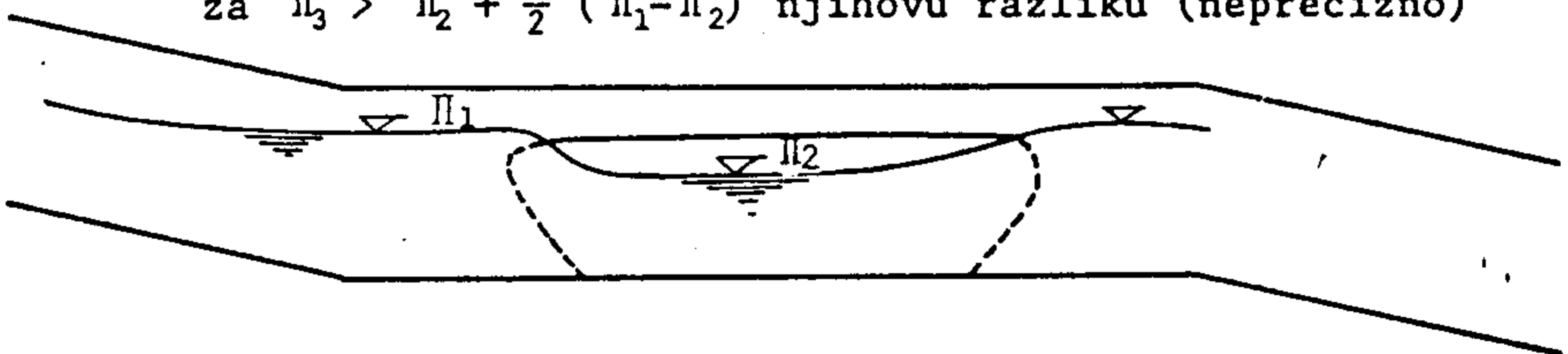
Za merenje protoka u ovoj oblasti se može primeniti merač sa slobodnim nivoom koji može da radi i pri potopljenom tečenju, kao i pri nepotopljenom (slika IV 46.II). Konačno u IV zoni tečenje je stalno bez uspora sa nizvodne strane i može se primenjivati merač sa suženjem kod koga se merenje protoka svodi na merenje jedne dužine, tj. dubine uzvodno od suženja (slika IV 46.III).

I) TEČENJE POD PRITISKOM



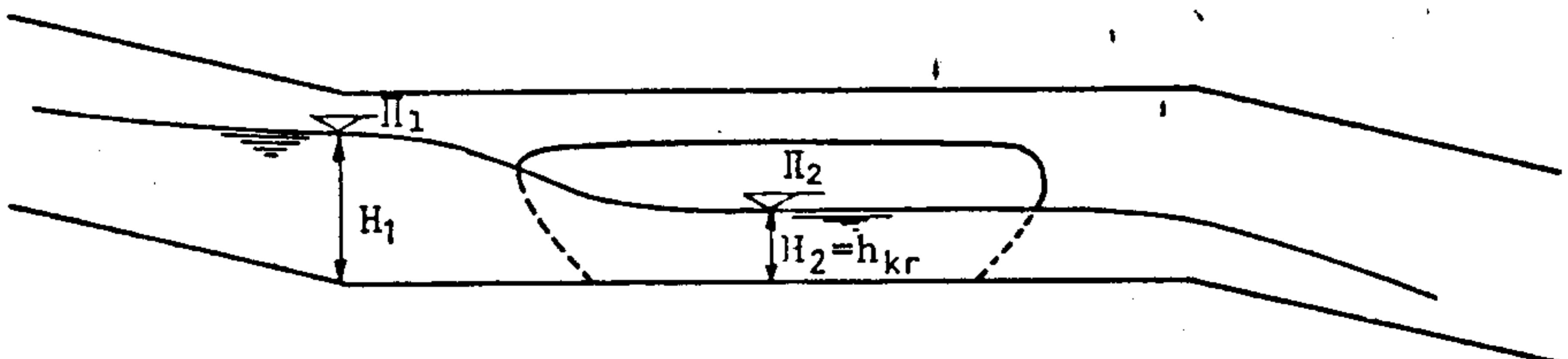
II) TEČENJE SA SLOBODNOM POVRŠINOM POD USPOROM

$Q = Q(\Pi_1, \Pi_3)$ potrebno je meriti 2 dubine odnosno za $\Pi_3 > \Pi_2 + \frac{1}{2}(\Pi_1 - \Pi_2)$ njihovu razliku (neprecizno)



III) NEPOTOPLJENO TEČENJE SA SLOBODNOM POVRŠINOM

$Q = Q(H_1)$ potrebno je meriti samo jednu dubinu



Slika IV 46. Mogućnosti za korišćenje suženja u cevi kao mernog objekta pri različitim režimima tečenja

Kod merenja protoka u otvorenim tokovima mora se voditi računa još i o neustaljenosti tečenja. U kolektorima kišne kanalizacije promene protoka su relativno brze, pa se za razliku od merenja pri ustaljenom tečenju moraju uzeti u obzir i promene usled inercijalnog uticaja - uticaja promene protoka, odnosno nivoa kroz vreme i promene podužnog nagiba vodnog ogledala.

IV 5.2. Određivanje protoka merenjem neporemećenih dubina

Ovaj metod merenja se može primeniti kod tokova sa slobodnom površinom mada ne spada u grupu metoda gde je moguće postići veliku tačnost. Najčešći slučaj u praksi je da se meri samo jedna dubina i na osnovu nje određuje protok. Ovo je dosta nepouzdanost, ali se ipak može primeniti u slučajevima kada:

- ni pri kakvim uslovima struja na mestu merenja nije pod usporom
- neustaljenost toka je blaga pa se može zanemariti
- hrapavost obloge utvrđena neposrednim merenjem protoka i dubina pri različitim dubinama vode nekom drugom metodom (veća tačnost) i pri ustaljenom tečenju.

Podrazumeva se naravno, da je dno kanala fiksno, tj. da nema povremenog zasipanja dna čvrstim sastojcima koje tok nosi i njegovog (povremenog) ispiranja i da se vučeni nanos transportuje bez zadržavanja.

Veza protoka i merene dubine može se u tom slučaju odrediti iz Chezy-Manning-ove jednačine (videti sliku IV 47):

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} \sqrt{I_e}$$

(IV 42)

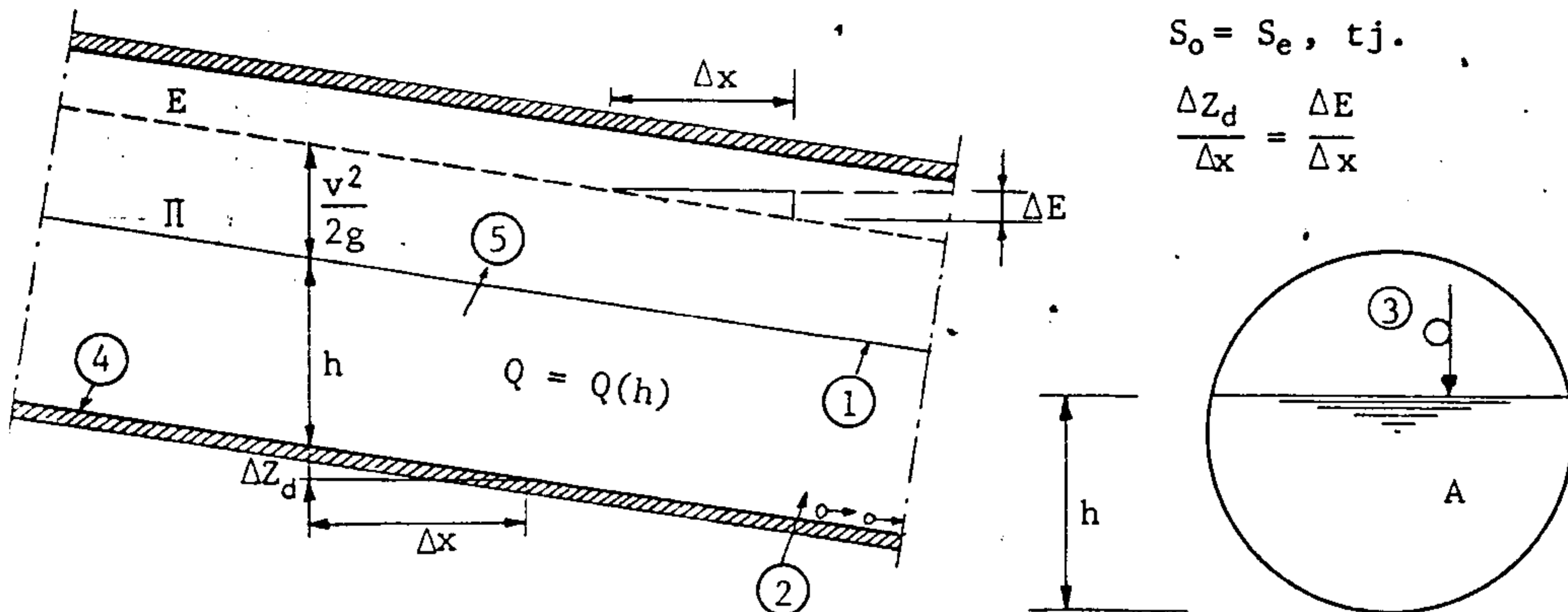
gde su:

- A - površina poprečnog preseka,
- R - hidraulički radijus,
- $I_e = \Delta E / \Delta x$ nagib linije energije koji se kod ustaljenog jednolikog tečenja poklapa sa nagibom dna kanala ($S_0 = S_e$)
- n = Manning-ov koeficijent hrapavosti (dimenzija: $m^{-1/3} s$).

Potrebno je takođe obezbediti uslove da se može povremeno (na primer, jednom godišnje), obaviti kalibracija (tariranje) jednoznačnosti veze.

Kada su svi prethodni uslovi ispunjeni tačnost određivanja protoka zavisice od tačnosti prethodne kalibracije, tj. utvrđivanja veze između protoka i merene dubine (linije protoka). Kada se to radi potrebno je izmeriti ustaljene protoke pri nekoliko različitih dubina i nagiba linije nivoa. Merenje protoka može se obaviti merenjem rasporeda brzina po poprečnom preseku. Pri tome posebni problem je da se to uradi korektno, za slučaj kada u vodi ima primesa (čvrstih, elastičnih, itd.).

Na slici IV 48. prikazan je slučaj nejednolikog tečenja kada neki od prethodno pobrojanih uslova nisu ispunjeni i kada je kao minimum za

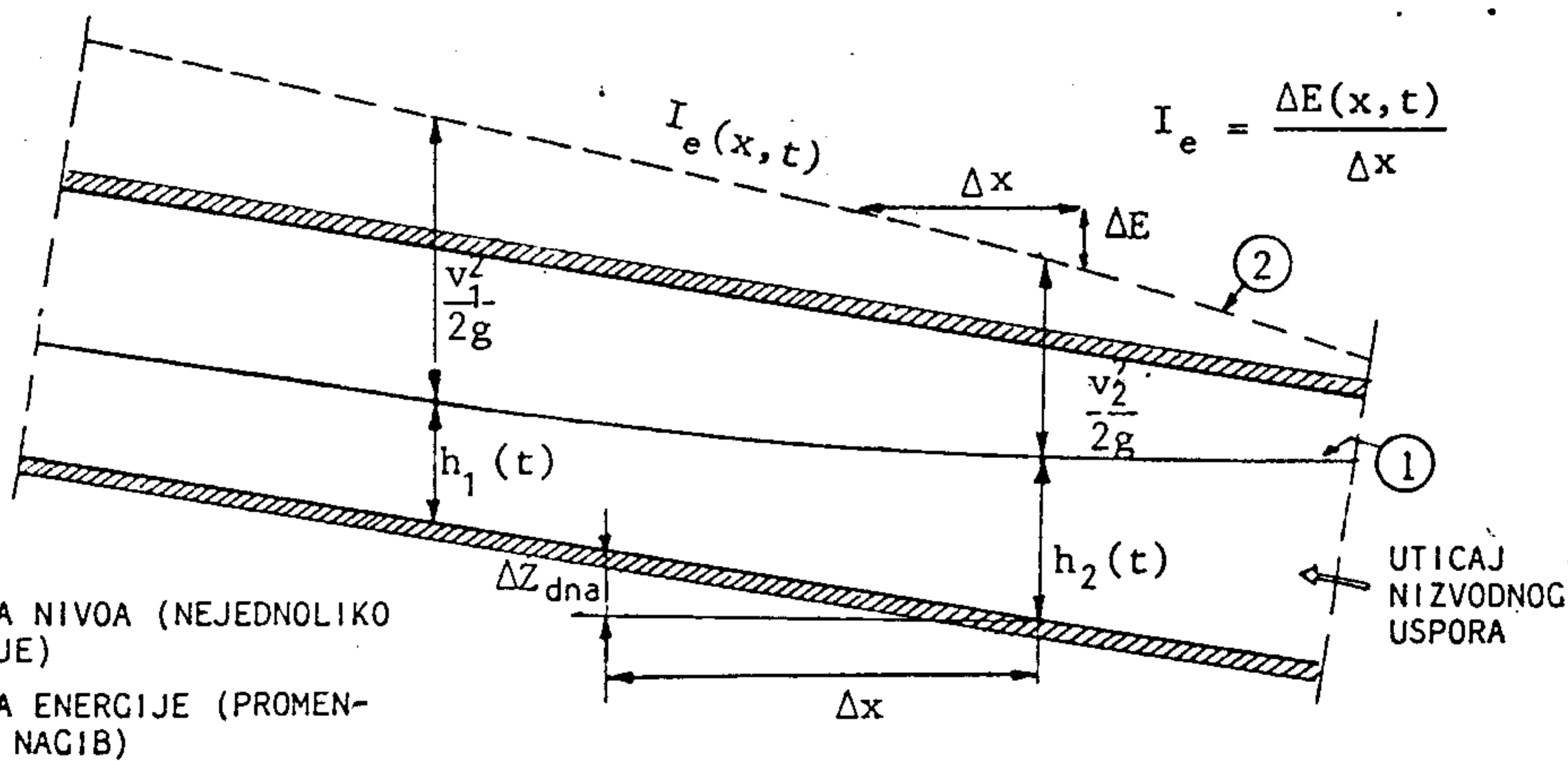


$$S_o = S_e, \text{ tj.}$$

$$\frac{\Delta Z_d}{\Delta x} = \frac{\Delta E}{\Delta x}$$

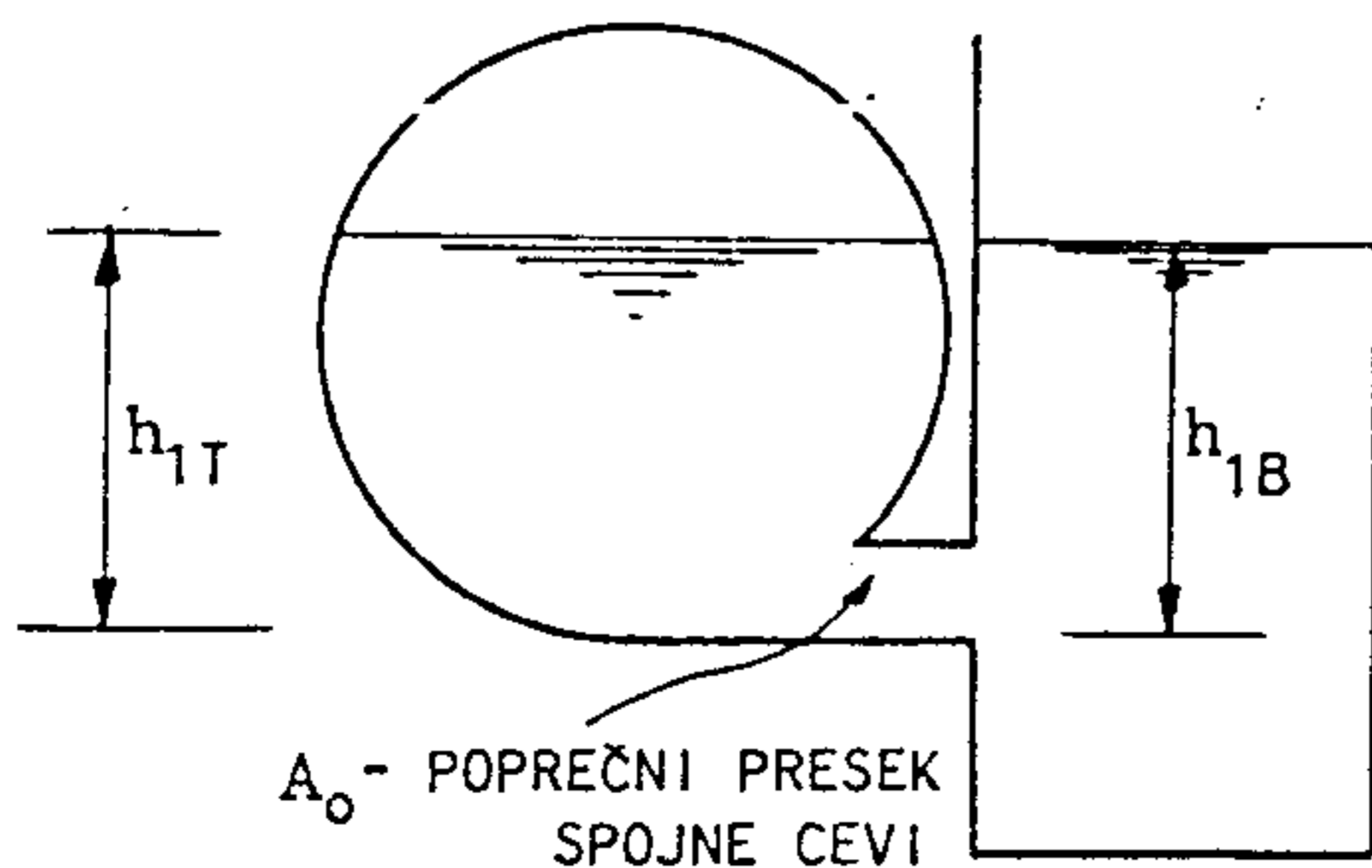
- ① NIVO NIJE POD USPOROM SA DONJE STRANE; ② NA DNU NEMA TALOŽENJA I ODOŠENJA MATERIJALA; ③ DUBINA MOŽE DA SE MERI PRECIZNO; ④ HRAPAVOST OBLOGE ODREĐENA MERENJEM NA KONKRETNOJ CEVI I LOKACIJI; ⑤ UTICAJ NEUSTALJENOSTI ZANEMARLJIV;

Slika IV 47. Uslovi koje treba da ispuni tok i cev da bi se protok mogao određivati na osnovu neporemećene dubine u cevi



$$I_e = \frac{\Delta E(x, t)}{\Delta x}$$

- ① LINIJA NIVOVA (NEJEDNOLIKO TEČENJE)
- ② LINIJA ENERGIJE (PROMENLJIVI NAGIB)



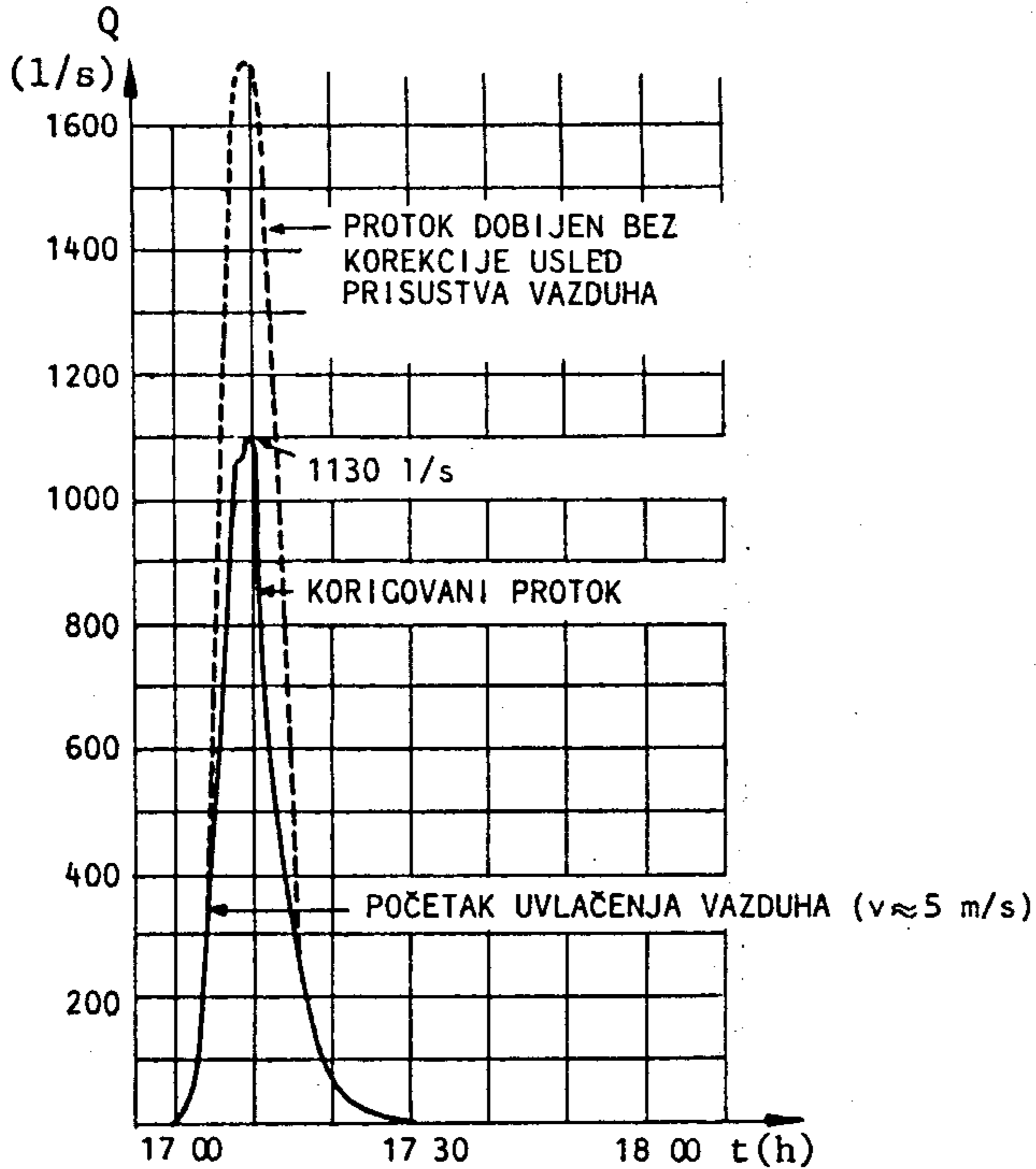
$$Q = Q(h_1, h_2)$$

$h_{1T} \approx h_{1B}$ - ZA SPORE PROMENE

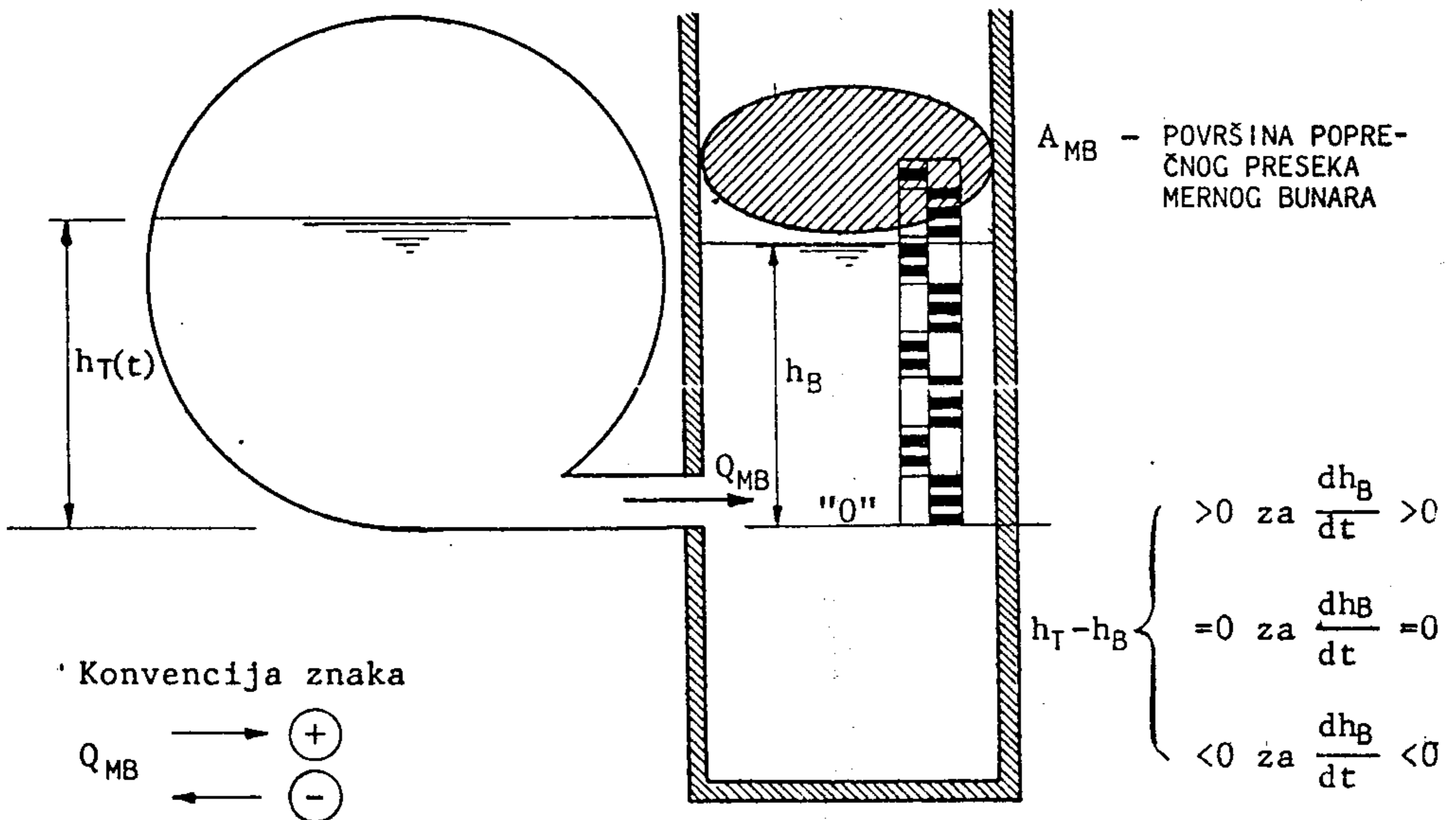
$h_{1T} \gg h_{1B}$ - ZA BRZE PROMENE

A₀ - POPREČNI PRESEK SPOJNE CEVI

Slika IV 48. Određivanje protoka merenjem dve dubine kada se uticaj neustaljenosti i uspora ne može zanemariti



Slika IV 49. Uticaj prisustva vazduha na merenje protoka



određivanje protoka neophodno da se kontinualno mere dve dubine u dva poprečna preseka na poznatom rastojanju. Na osnovu kontinualnog merenja dveju dubina moguće je odrediti i izvode dubine i nagiba linije energije po prostoru i vremenu, na osnovu toga uspostaviti vezu između protoka i merenih dubina iz sledeće jednačine:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} \sqrt{I_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}} \quad (\text{IV } 43)$$

gde je v srednja brzina u poprečnom preseku.

Pri merenju dubine mora se voditi računa da se uzme u obzir i korekcija zbog eventualnog sadržaja vazduha koji može da bude vrlo veliki u cevima sa velikim nagibom.

Primer uticaja sadržaja vazduha na merenje protoka dat je na slici IV 49. Primer je uzet sa eksperimentalnog sliva za kišnu kanalizaciju Friedaker u Cirihu.

Dubina vode pouzdano se meri u mernom bunaru smeštenom pored cevi, pod uslovom da se dno cevi i spojna cev ne zasipaju, a u slučaju kada ta opasnost postoji, da se redovno čiste.

Kod brzih promena nivoa u toku mora se uzeti u obzir i korekcija zbog razlika dubina vode u mernom bunaru i u toku.

Protok između toka i mernog bunara je (videti sliku IV 50)

$$Q_{MB} = C_Q A_0 \sqrt{2g |h_T - h_B|} \cdot \text{sign}(h_T - h_B) \quad (\text{IV } 44)$$

a jednačina kontinuiteta

$$Q_{MB} = A_{MB} \frac{dh_B}{dt} \quad (\text{IV } 45)$$

Bez obzira da li se protok određuje na osnovu merenja jedne ili dve dubine, pogodno je da se merenje obavlja nekom od metoda opisanom u poglavlju IV 8, kojom se dobija električni signal proporcionalan sa dubinom. Obrada dobijenog zapisa, tj. pretvaranje dubine u protok se može obaviti naknadno u kancelariji ili se u uređaj za merenje može ugraditi pločica za generisanje protoka na osnovu unapred definisane linije protoka. U tom slučaju se dobija izlazni signal proporcionalan protoku koji se može lokalno zapisivati ili prenositi na daljinu.

Korekcije uticaja nestacionarnosti se može obaviti naknadno pri obradi hidrograma, a u novije vreme to se može obaviti i lokalno, uz primenu uređaja sa mikroprocesorskom kontrolom.

Za merenje protoka na ovaj način pogodno je na kolektoru za vreme gradnje ostaviti odgovarajuće otvore kako bi se obezbedio pristup radi kalibracije, kontrole zamuljenja i provere ispravnosti rada, uzimanja

uzoraka zbog analize kvaliteta. Za tu svrhu je takođe poželjno da se na tom mestu uradi pristup, a po potrebi urade odgovarajuće skele, koje ne smeju da remete režim tečenja.

Merenje nivoa koje se bazira na principu da se u tok, a ne u merni bunar stavljaju prepreke ili plovak treba izbegavati jer takva prepreka izaziva poremećaj već svojim prisustvom, a posebno kad se na nju nahvataju razni predmeti koje voda nosi, što će se sigurno desiti.

Da bi se sprečilo truljenje i ostali nepoželjni procesi u mernom bunaru, korisno je u isti uvesti čistu vodu i pustiti je da teče sa minimalnim protokom (kap po kap), što je dovoljno da se u bunaru održava čista voda.

IV 5.3. Merenje protoka na prelivima, suženjima i ispustima

Merenje protoka pomoću preliva je klasičan i pouzdan način koji je detaljno opisan u nizu knjiga iz hidraulike, pa se ovde neće posebno razmatrati.

Kod nepotopljenih preliva se podrazumeva da se raspolaže sa denivelacijom dovoljnom da obezbedi nepotopljenost. Gde te denivelacije nema u prirodnim uslovima, njeno obezbeđenje zahteva utrošak energije na pre-pumpavanje, što se često zaboravlja.

Preliv se kao rešenje često primenjuje i za merenje protoka u kanalizacionim kolektorima (videti knjigu: Urban Drainage Catchments, Maksimović, Radojković, 1986). Međutim, analizom raspoloživih podataka uviđa se da se oni često primenjuju a da nisu obezbeđeni uslovi koji garantuju njihovo pravilno funkcionisanje.

Najjednostavniji za analizu je tzv. preliv preko širokog praga kod koga je presek struje pravougaoni (slika IV 51). Uzvodno od praga je mirno tečenje, tj. Frudov (Froude) broj je manji od jedinice. Pri nepotopljenom prelivanju se u nekom preseku na prelivu ostvaruje tzv. kritični režim tečenja. Pri njemu je vrednost Frudovog broja jednaka jedinici.

Za slučaj idealnog fluida (zanemarljivi gubici energije) energetska jednačina primenjena između preseka 1-1 i 2-2 (uz uslov kritične dubine na prelivu) glasi:

$$H_1 + \frac{v_1^2}{2g} = P + h_{kr} + \frac{v_{kr}^2}{2g} \quad (\text{IV } 46)$$

Na prelivu (presek 2-2) je kritična dubina, odnosno Frudov broj jednak jedinici:

$$Fr = \frac{Q^2 B}{gA^3} = 1 \quad \text{odnosno} \quad \frac{Q^2 B}{gh_{kr}^3 B^3} = 1 \quad (\text{IV } 47)$$

Zamenom v sa Q/A u jednačinu IV 46. dobija se:

$$H_p + P + \frac{Q_1^2}{2gB^2H_1^2} = P + h_{kr} + \frac{Q^2}{2gB^2h_{kr}^2} \quad (\text{IV } 48)$$

Označavajući

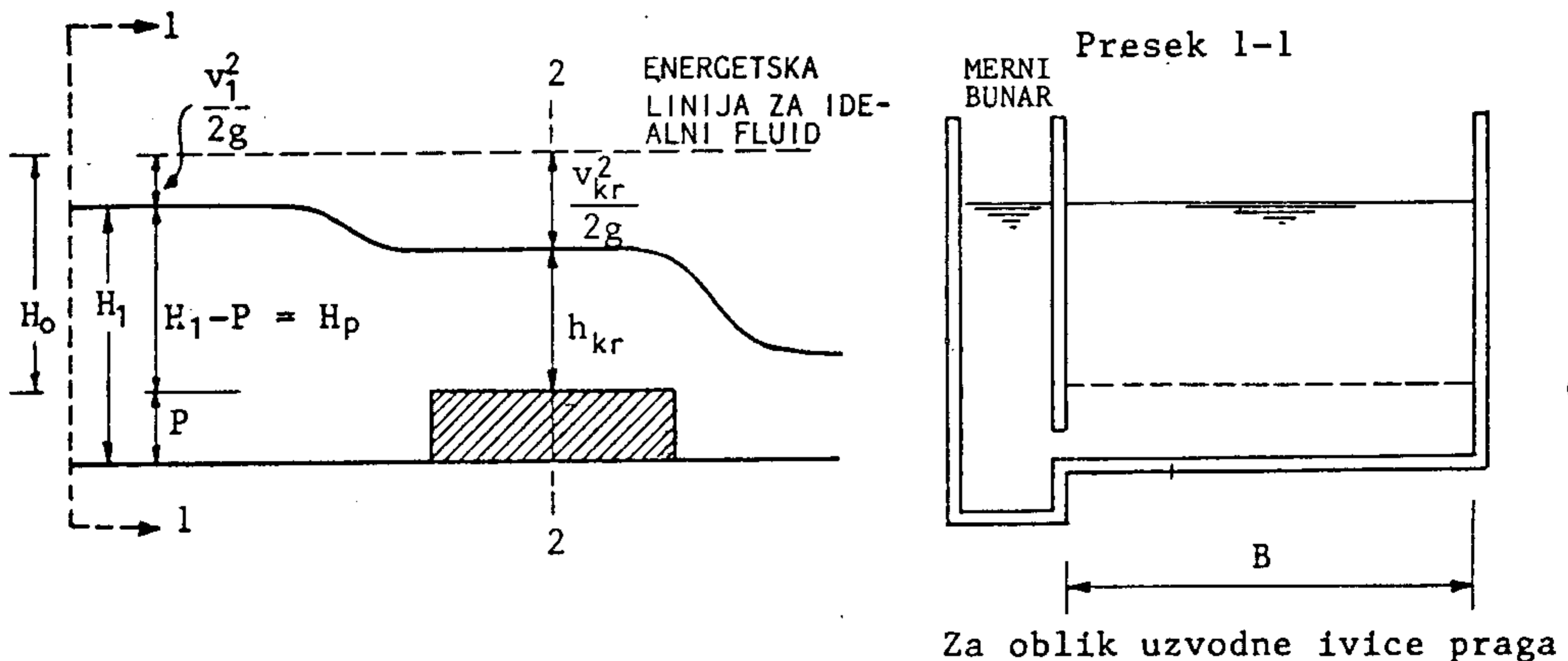
$$H_p + \frac{Q^2}{2gB^2H_1^2} = H_o \quad (\text{IV } 49)$$

i pošto je za pravougaoni kanal

$$\frac{Q^2}{gB^2} = h_{kr}^3 \quad \text{i} \quad \frac{h_{kr}}{2} = \frac{v_{kr}^2}{2g} \quad (\text{IV } 50)$$

dobija se da je za taj slučaj (idealni fluid):

$$Q_{id} = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{2}} B \sqrt{2g H_o^3} \quad (\text{IV } 51)$$



$$Q_{id} = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{2}} B \sqrt{2g H_o^3} = 0.386 B \sqrt{2g H_o^3}$$

$$C_Q \approx 0.82$$

$$C_Q \approx 0.95$$

$$Q_r = C_Q Q_{id}$$

Slika IV 51. Široki prag u pravougaonom kanalu kao merni objekat pri nepotopljenom prelivanju

Za realni fluid je $Q_r = C_0 Q_{id}$.

Za široki prag u pravougaonom kanalu $C_0 \approx 0.83$ do 0.92 .

Za ostale geometrijske oblike kanala uzvodno i u suženju (trougaoni, trapezni, polukružni, složeni) primenjuju se slična razmatranja: Određivanje protoka se svodi na merenje jedne dubine (uzvodno od suženja).

U kanalizacionim kolektorima suženje preseka u boku se često koristi da bi se ostvarili uslovi za merni objekat. Najpogodnije je ako se projekat mernog objekta uradi paralelno sa projektom kolektora kao celine. U tom slučaju objekat se lako uklapa u novoprojektovanu celinu. Ukoliko se, ipak, merač uklapa u postojeće stanje tada je najpogodnije da se isti ostvari adaptacijom kolektora uzvodno od eventualno postojeće kaskade.

Merni objekat treba oblikovati tako da ne predstavlja smetnju tečenju i da ne izaziva taloženje vučenog nanosa.

Detaljan opis metodologije projektovanja ovih mernih uređaja dat je u knjizi MEPROKS 80 (Institut za hidrotehniku, Beograd) i ovde se neće ponavljati.

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).
- Vušковиć I. (1977), Osnove tehnike merenja.