

Hidraulika otvorenih tokova

dr Vesna Đukić
dipl. građ. inž., red. prof.,
Univerziteta u Beogradu
Šumarskog fakulteta

Hidraulika otvorenih tokova

Hidraulika je primenjena nauka i inženjerska disciplina, koja je svoje mesto i potrebu za izučavanjem našla i na Šumarskom fakultetu. *Hidraulika otvorenih tokova* izučava se na Odseku za Ekološki inženjering u zaštiti zemljišnih i vodnih resursa, u VI semestru osnovnih studija, sa fondom časova: 2+2.

Hidraulika uopšteno, a time i *Hidraulika otvorenih tokova*, predstavljaju osnovu od koje se polazi pri planiranju, projektovanju i građenju raznih vodoprivrednih objekata. Znanja iz Hidraulike su neposredno potrebna svima koji se u svojoj praksi susreću sa vodom. Hidraulika bi trebala studentima i mladim inženjerima da pruži znanje, neophodno za rešavanje niza konkretnih praktičnih problema, povezanih sa raznim slučajevima kretanja vode i rešavanje vodoprivrednih problema

Otvoreni tokovi su tokovi koji su sa donje strane ograničeni čvrstom konturom, a gornja površina tečnosti je slobodna, jer je izložena atmosferskom pritisku. U prirodne otvorene tokove spadaju prirodni vodotoci (potoci, rečice i reke). U veštačke vodne tokove spadaju: kanali, cevi koje nisu pod pritiskom, hidrotehnički tuneli i kanalizacione i drenažne cevi.

Literatura

Đukić, V. (2021): Hidraulika, Beograd

Đukić, V. (2021): Praktikum za Hidrauliku

Napomena: U ovoj prezentaciji korišćen je materijal iz knjige: *Hidraulika*, čiji je autor i autor ove prezentacije.

Hidraulika otvorenih tokova - Teorijska nastava:

Sadržaj

- Uvod
- Osnovni pojmovi i fizička svojstva fluida
- Ustaljeno tečenje u otvorenim tokovima
- Osnovne jednačine održanja u otvorenim tokovima (Jednačina kontinuiteta, Jednačina održanja energije i Jednačina održanja količine kretanja).
- Jednoliko tečenje vode u kanalima prizmatične forme
- Nejednoliko tečenje vode u kanalima prizmatične forme
- Linije nivoa na spoju kanala i akumulacije.
- Naglo promenljivo nejednoliko tečenje.
- Tečenje vode u blizini objekata
- Tipovi objekata na kanalima i prirodnim vodotocima.

Sadržaj

- Isticanje vode kroz otvore i ispod ustave.
- Prelivi (Oštroivični prelive, Prelivanje preko širokog praga, Prelivi praktičnog profila).
- Hidraulička analiza spajanja nivoa gornje i donje vode kod hidrotehničkih objekata.
- Strujanje u zoni kaskada.
- Strujanje kroz propuste
- Hidraulička analiza zone mosta.
- Ustaljeno tečenje u vodotocima neprizmatičnog poprečnog preseka
- Osnove rečne hidraulike i transporta nanosa
- Hidraulička analiza zone ušća regulisanih bujičnih vodotoka.
- Poreklo i fizička svojstva rečnog nanosa

Sadržaj

- Hidraulički aspekt erozionih fenomena.
- Pokretanje rečnog nanosa
- Transport nanosa u aluvijalnim i bujičnim vodotocima,
- Proračun pronosa vučenog, suspendovanog i ukupnog nanosa
- Proračun opšte deformacije rečnog korita. Akumulacije i nanos.
- Vodoprivredni i ekološki problemi sedimentacionih procesa (zasipanje kanala i akumulacija nanosom, narušavanje kvaliteta vode).

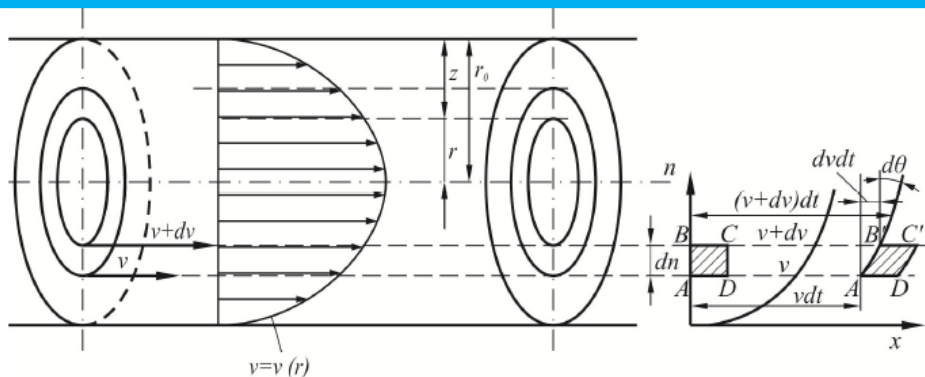
Hidraulika otvorenih tokova - Praktična nastava:

Izrada elaborata praktičnih zadataka i eksperimentalnih merenja u vezi sa problematikom koja se obrađuje u okviru teorijske nastave. Izrada elaborata praktičnih zadataka obuhvata rešavanje različitih problema iz oblasti:

- Jednolikog i Nejednolikog tečenja u otvorenim tokovima,
- Nejednolikog tečenja u blizini vodoprivrednih objekata (ustava, preлива, kaskada, propusta, u zoni mosta).
- Hidrauličke analize spajanja nivoa gornje i donje vode kod hidrotehničkih objekata.
- Rečne hidraulike i transporta nanosa
- Ustaljenog tečenja u prirodnim vodotocima.
- Analize uslova pokretanja vučenog i suspendovanog nanosa
- Proračuna pronosa nanosa.
- Proračuna opšte deformacije rečnog korita.

Osnovni pojmovi i fizička svojstva fluida

- Gustina i specifična težina tečnosti
- Stišljivost
- Temperaturno širenje
- Viskoznost
- Kapilarnost
- Površinski napon

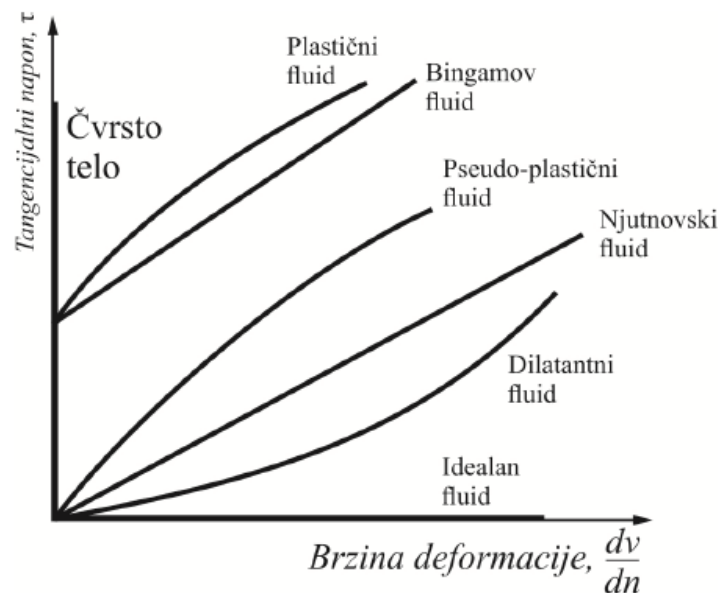


a)

b)

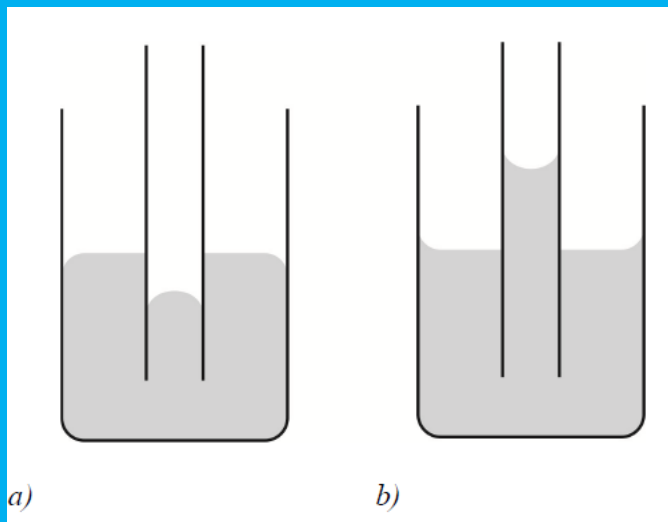
Slika 2.2. Shema za određivanje tangencijalnih napona

Zavisnost između tangencijalnih napona i gradijenta brzine za Njutnovske i Nenjutnovske fluide

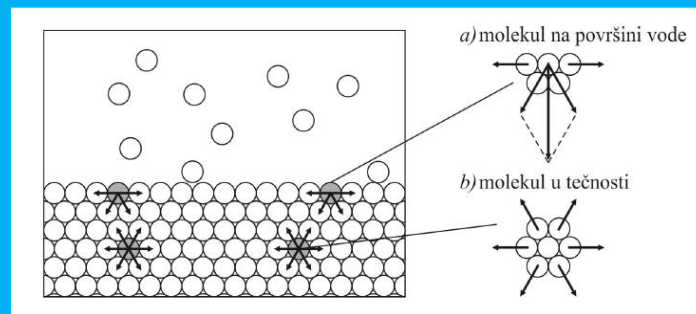


Kapilarnost

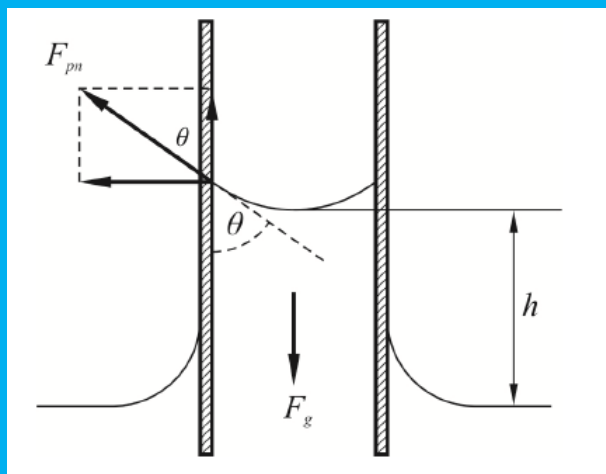
Kapilarnost je pojava podizanja ili spuštanja nivoa tečnosti u cevima malog prečnika, uronjenim jednim krajem u rezervoar tečnosti, pod uticajem kapilarnih sila



Objašnjenje površinskog napona



Slika 2.4. Međumolekularne sile između molekula



Površinski napon je osobina tečnosti, koja teži da smanji svoju slobodnu površinu, zbog čega podseća na zategnutu membranu

Sile površinskog napona u kapilari

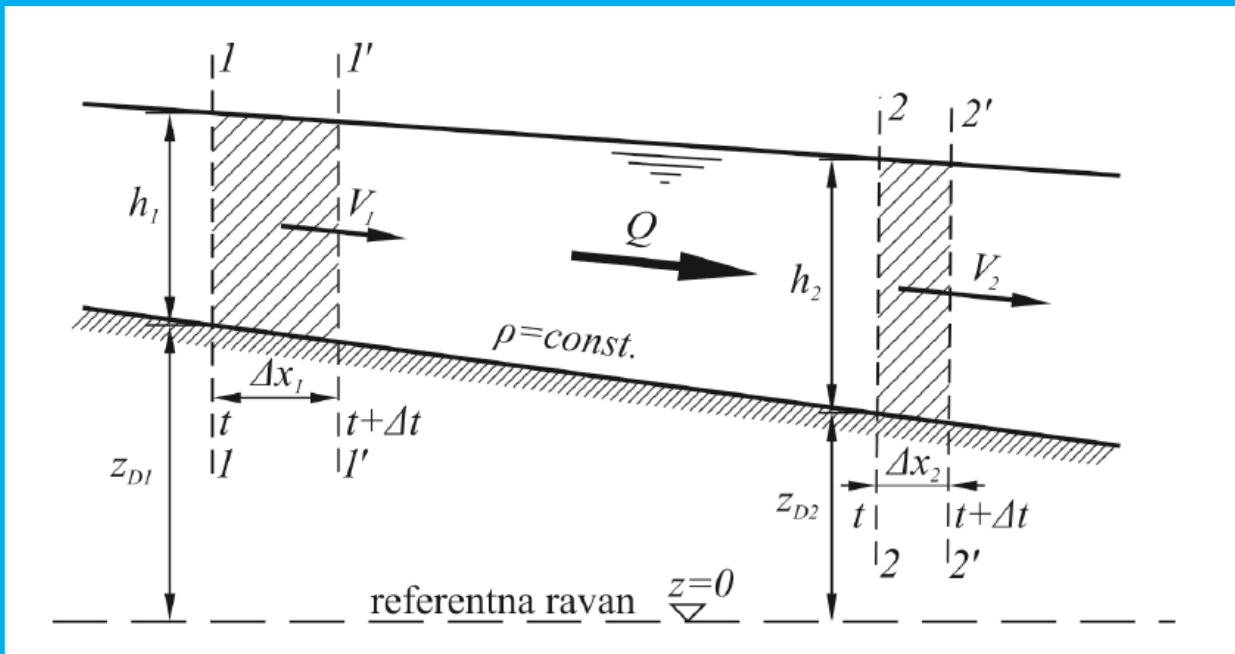
Ustaljeno tečenje u otvorenim tokovima

Tečenje u otvorenim tokovima je, u opštem slučaju, neustaljeno i nejednoliko. Kod otvorenih tokova proticajni presek nije unapred poznat, već je promenljiv, jer su i dubine promenljive. U otvorenim tokovima, pri istom protoku, mogu se uspostaviti različite dubine. Dubina toka, proticaj i nagib dna su uzajamno zavisne veličine.

Osnovne jednačine, koje se koriste pri analizi tečenja u otvorenim tokovima su:

- Jednačina kontinuiteta
- Jednačina održanja energije (Bernulijeva jednačina)
- Jednačina održanja količine

Jednačina kontinuiteta



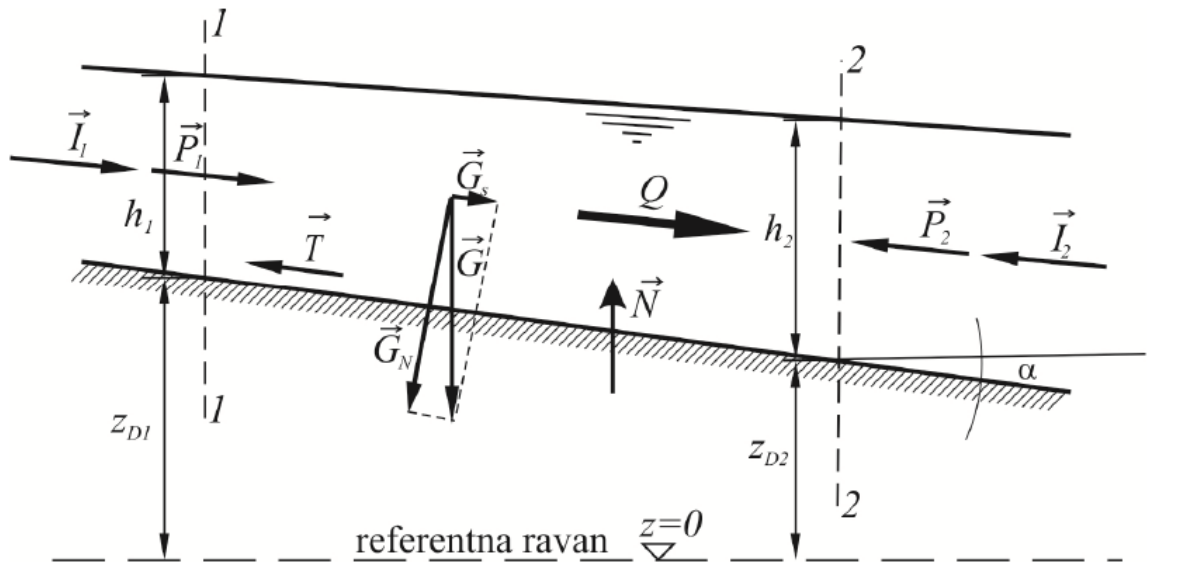
$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

$$Q_1 = Q_2$$

Jednačina kontinuiteta predstavlja primenu zakona o održanju mase. Prema zakonu o održanju mase, masa tečnosti između dva preseka je konstantna i uvek će potpuno ispunjavati prostor koji zauzima, jer je neprekidna.

Jednačina održanja količine kretanja

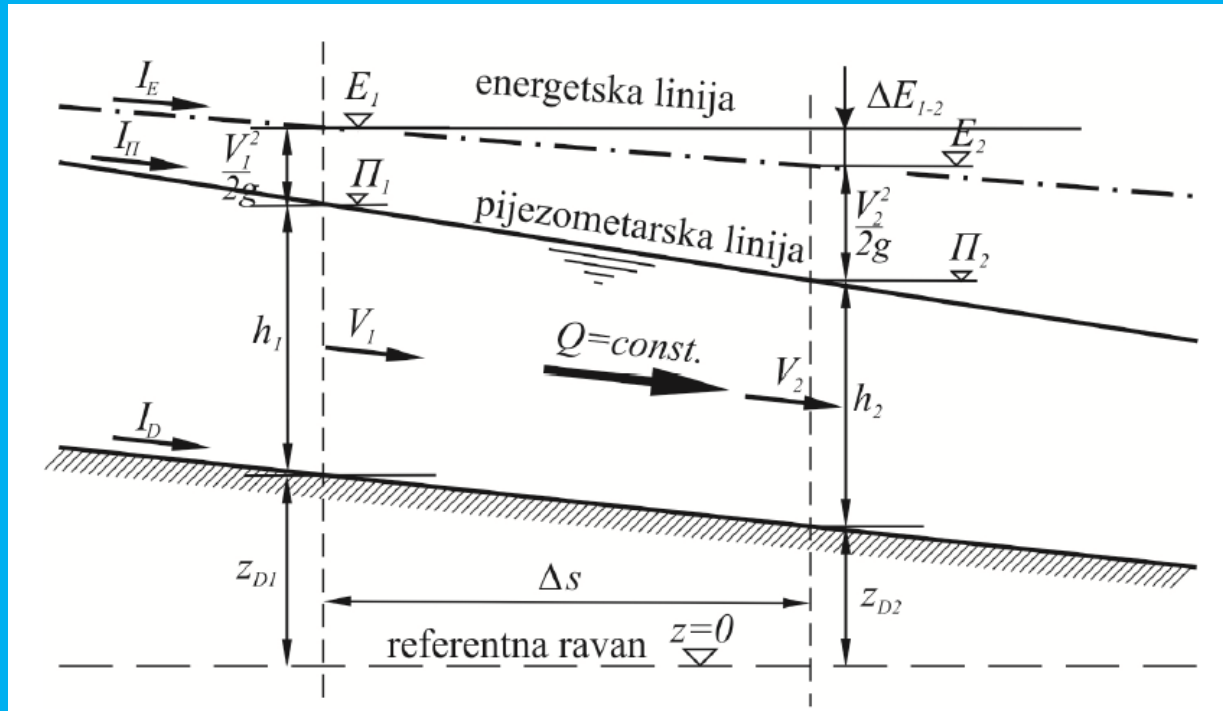
$$\vec{I}_1 + \vec{P}_1 + \vec{G} + \vec{I}_2 + \vec{P}_2 + \vec{T} + \vec{N} = 0$$



Priraštaj količine kretanja posmatrane mase tečnosti u jedinici vremena jednak je rezultanti sila koje deluju na tu masu

Slika 6.3. Realne i fiktivne sile koje deluju na masu između dva preseka nekog otvorenog toka

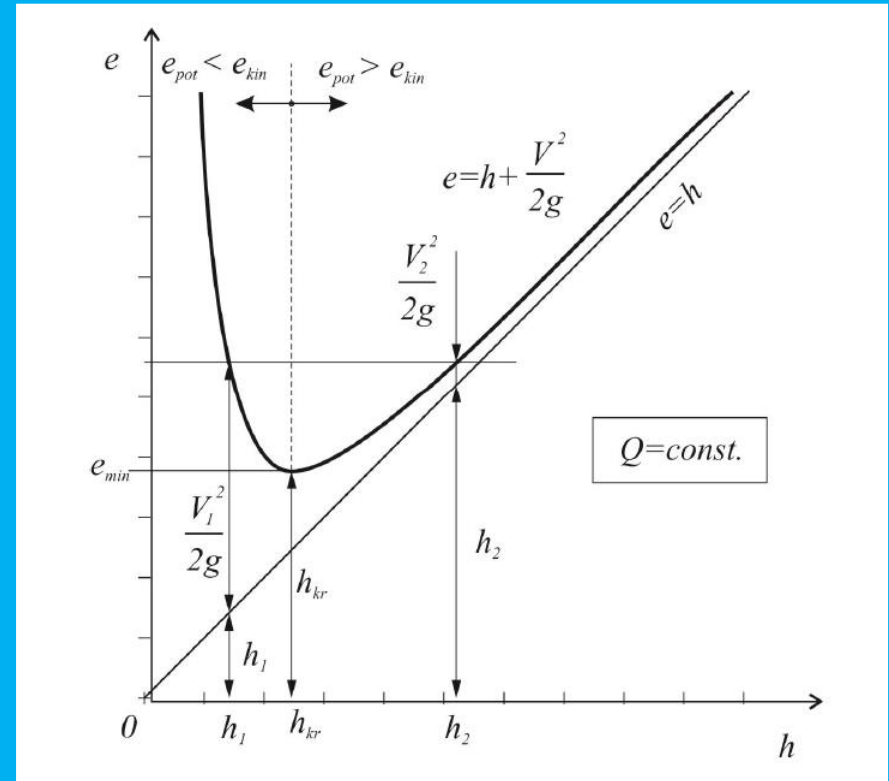
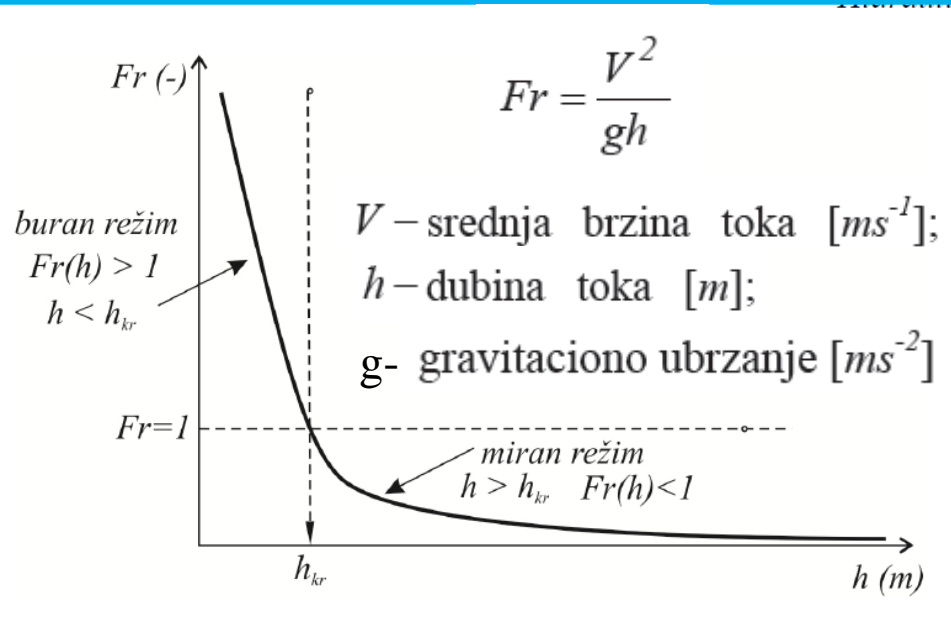
Primena Bernulijeve jednačine između dva preseka toka sa slobodnom površinom



Pri ustaljenom kretanju nestišljive idealne tečnosti zbir potencijalne energije (energija položaja i pritiska) i kinetičke energije duž toka je konstantna veličina

$$z_{D1} + h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_{D2} + h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta E$$

Zavisnost Frudovog broja od dubine *Kriva specifične energije preseka* $Fr = f(h)$ $e = f_1(h)$



Frudov broj je važan parametar, koji ukazuje na značajne razlike u karakteristikama strujanja u otvorenim tokovima

- *miran režim tečenja*: $Fr < 1$; $h > h_{kr}$
- *kritičan režim tečenja*: $Fr = 1$; $h = h_{kr}$;
- *silovit režim tečenja*: $Fr > 1$; $h < h_{kr}$;

Specifična energija toka predstavlja ukupnu energiju toka po jedinici težine Tečnosti u poprečnom preseku korita izmerenu u odnosu na najnižu tačku dna datog poprečnog preseka korita.

Jednoliko tečenje u kanalu. Šezi-Maningova jednačina

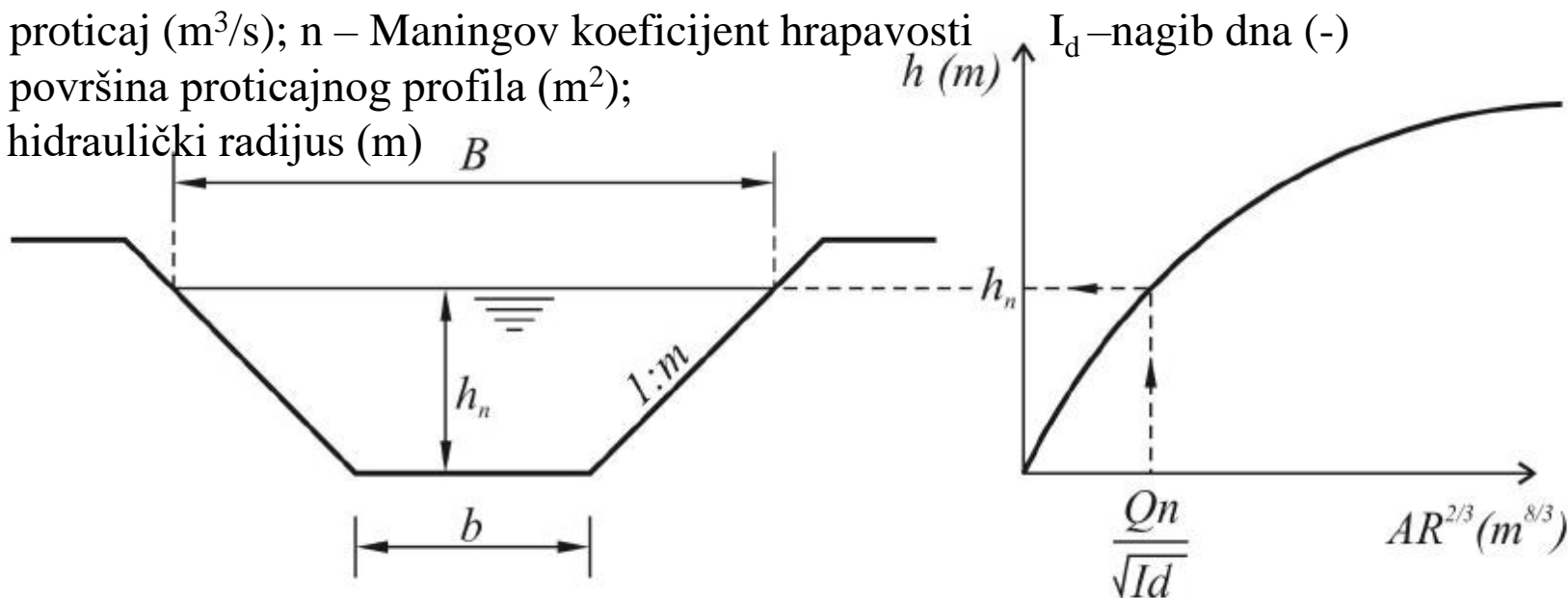
$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} \sqrt{I}$$

Primenom *Šezi-Maningove jednačine* uspostavlja se povezanost između hidrauličkih i geometrijskih karakteristika toka pri *jednolikom tečenju u kanalu*. Konstantna dubina vode u kanalu, koja se uspostavlja pri jednolikom tečenju, naziva se normalna dubina (h_n).

Q- proticaj (m^3/s); n – Maningov koeficijent hrapavosti

A- površina proticajnog profila (m^2);

R- hidraulički radijus (m)



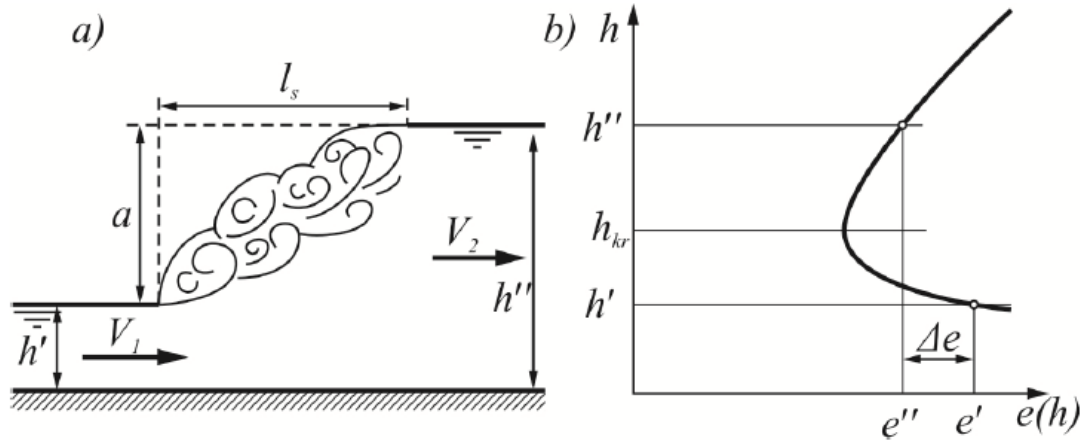
Slika 6.14. Određivanje dubine vode u kanalu grafičkim putem

Tabela 6.1. Vrednosti Maningovog koeficijenta hrapavosti n , $m^{-1/3}s$

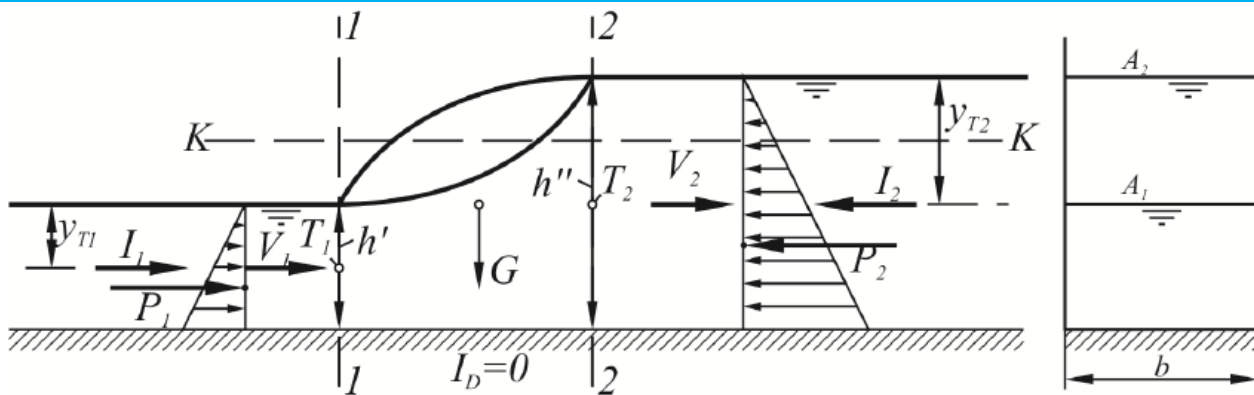
<i>Opis površine</i>	<i>Min.</i>	<i>Sred.</i>	<i>Max.</i>
Kanal u betonu	0,012	0,014	0,016
Obloga od tesanog kamena	0,013	0,014	0,015
Zid od lomljenog kamena u cementu	0,017	0,020	0,025
Suv zid od lomljenog kamena	0,025	0,030	0,035
Zemljani kanali pravilnog oblika	0,017	0,020	0,025
Zemljani kanali iskopani bagerom	0,025	0,030	0,035
Kanali usečeni u steni, pravilnog oblika	0,025	0,030	0,035
Kanali sa zemljanim dnom i kosinama ozidanim kamenom	0,028	0,030	0,035

Maningov koeficijent hrapavosti, n , je empirijski koeficijent, pomoću koga se izražava uticaj hrapavosti dna kanala ili vodotoka, odnosno uticaj trenja, na veličinu brzine i proticaja u toku.

Prikaz hidrauličkog skoka i energetske gubitaka u strukturi toka, preko funkcije $e(h)$

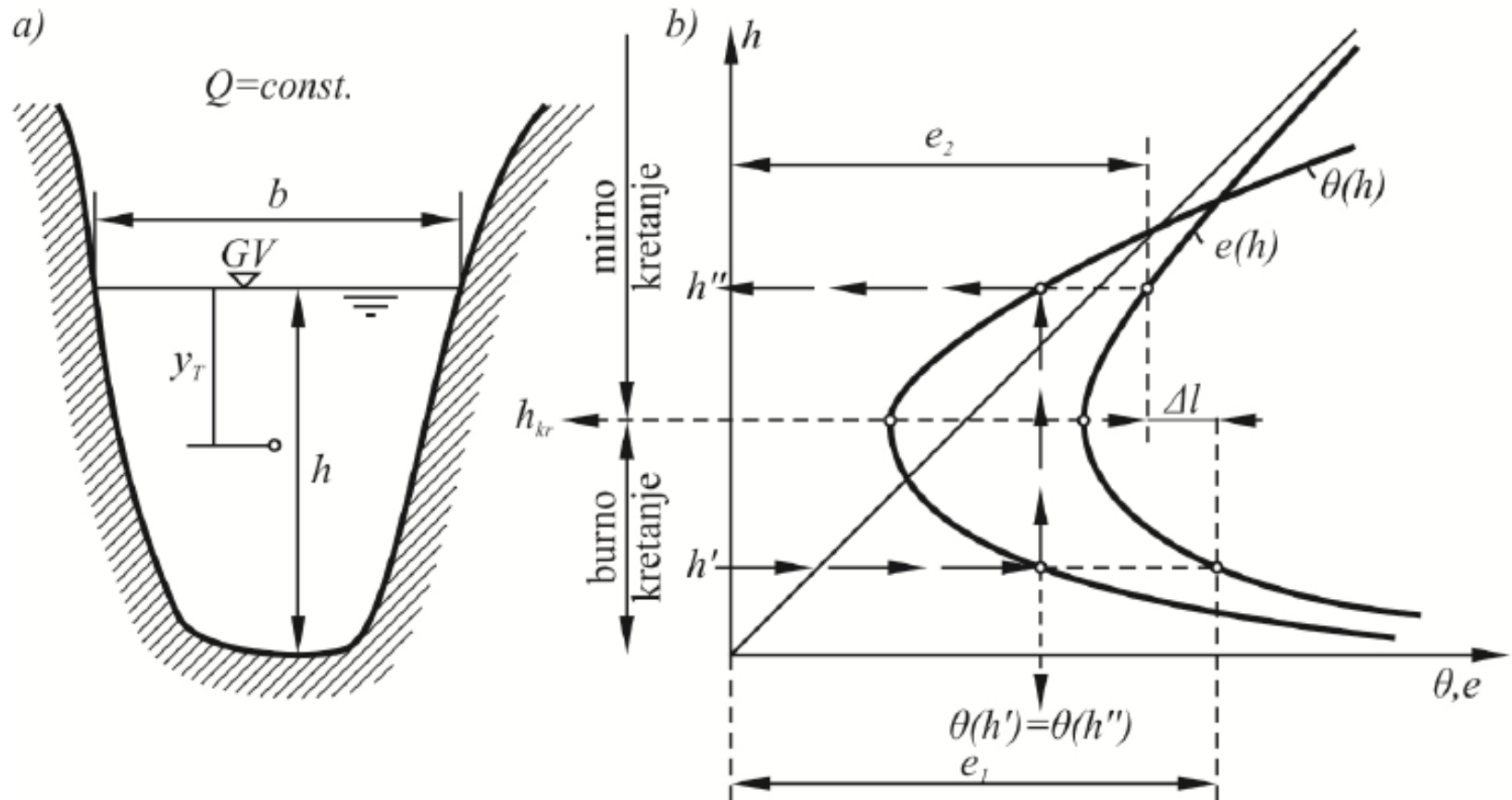


Hidraulički skok je specifična pojava, koja se javlja kod tečenja vode sa slobodnom površinom, na prelazu iz silovitog u miran režim tečenja. Prelaz iz silovitog u miran režim tečenja odvija se naglo i skokovito.

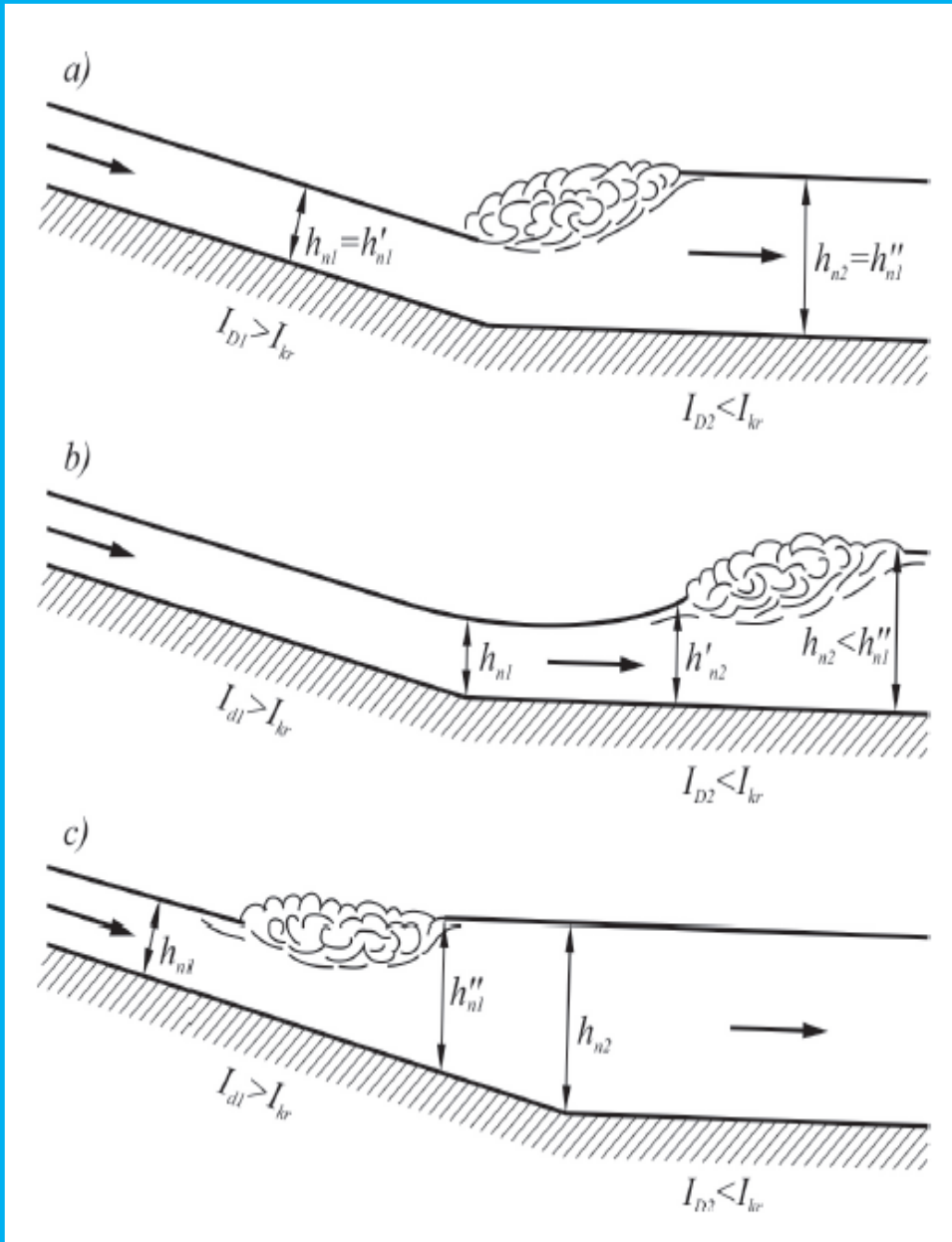


Slika 6.19. Skica uz izvođenje osnovne jednačine hidrauličkog skoka

Dijagram funkcije skoka i specifične energije preseka



Različiti položaji hidrauličkog skoka u kanalu



U kanalu , koji se sastoji od dve deonice različitog nagiba dna, pri čemu je $I_{D1} > I_{kr}$ i $I_{D2} < I_{kr}$, hidraulički skok može se uspostaviti:

- a) na prelomu dna kanala
 - b) u nizvodnoj deonici ili
 - c) u uzvodnoj deonici
- u zavisnosti od odnosa normalnih dubina u kanalu i njihovih konjugovanih dubina.

Nejednoliko tečenje u prizmatičnom kanalu

Jedan od osnovnih zadataka pri analizi tečenja u otvorenim tokovima je da se definišu zakonitosti po kojima se menjaju dubine duž toka. Kako je gornja površina tečnosti izložena atmosferskom pritisku, linija koja povezuje nivoe vode duž vodotoka ili kanala naziva se *linija nivoa*, ili *pijezometarska linija*. Ova kriva se, takođe, naziva i *linija slobodne površine tečnosti*.

Da bi se odredila dubina vode u nekom preseku toka, potrebno je poznavati i *uzvodne i/ili nizvodne granične uslove* i način kako ti granični uslovi utiču na dubine duž toka.

Linije nivoa predstavljaju osnovu za analizu promena različitih hidrodinamičkih parametara duž toka, koji opisuju kretanje tečnosti, kao što su brzine, pritisci, tangencijalni naponi i dr.

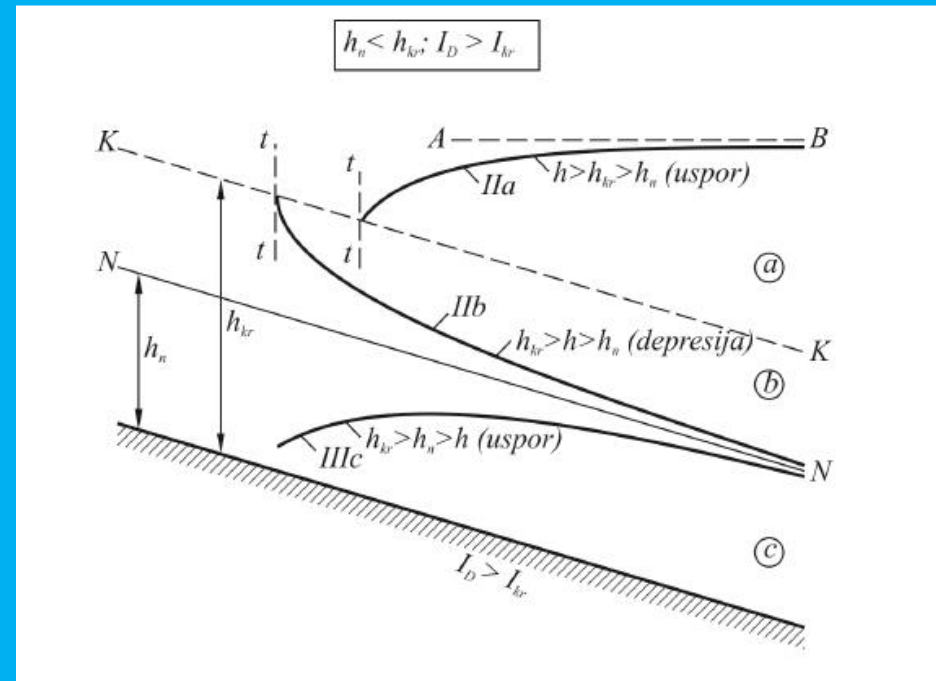
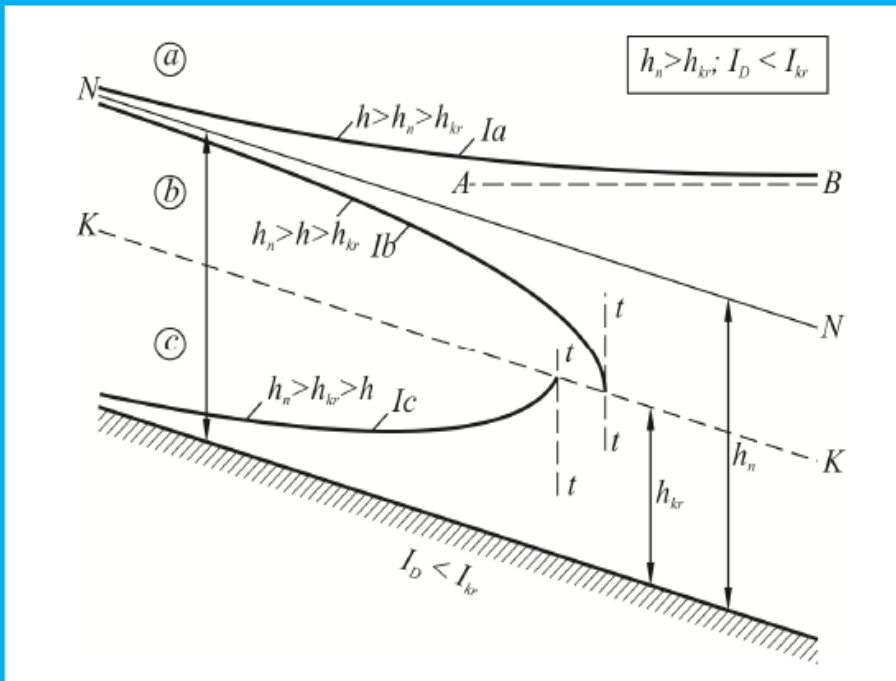
Nejednoliko tečenje u prizmatičnom kanalu

$$\frac{dh}{ds} = \frac{I_D - I_E}{1 - Fr^2}$$

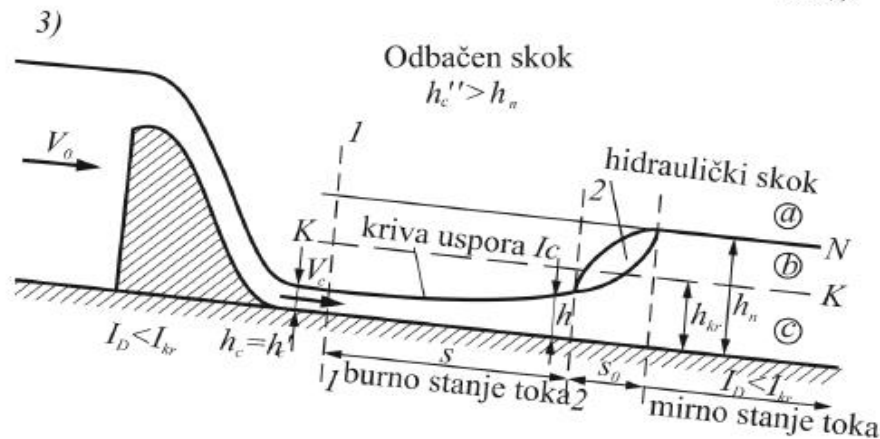
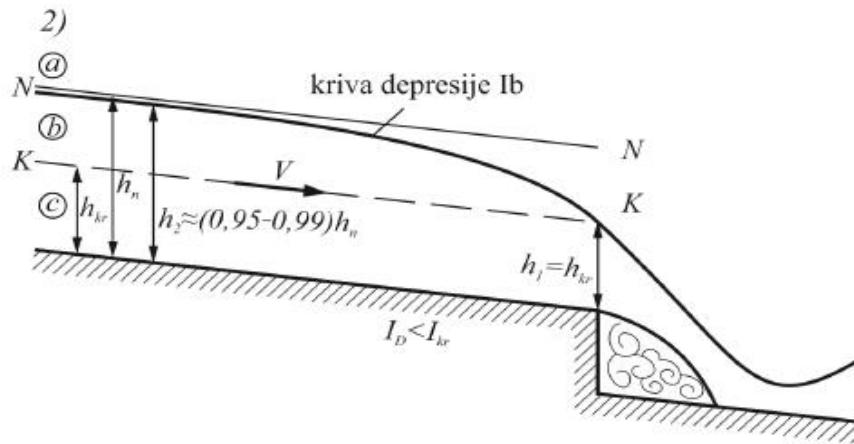
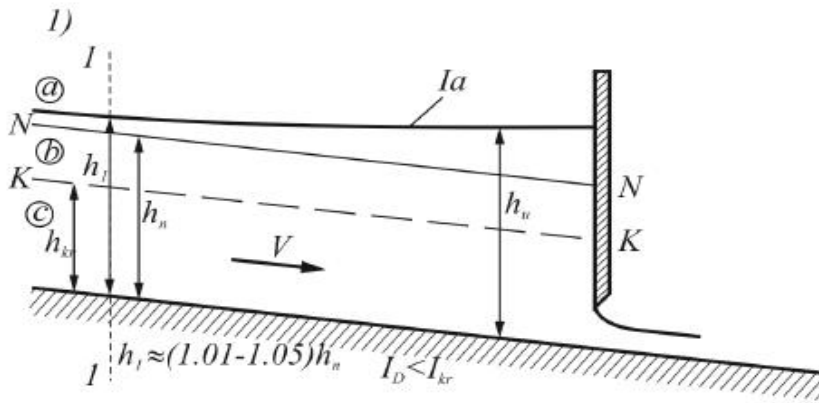
Osnovna diferencijalna jednačina nejednolikog tečenja

Oblici pojedinih krivih slobodne površine u slučaju $I_D < I_{kr}$

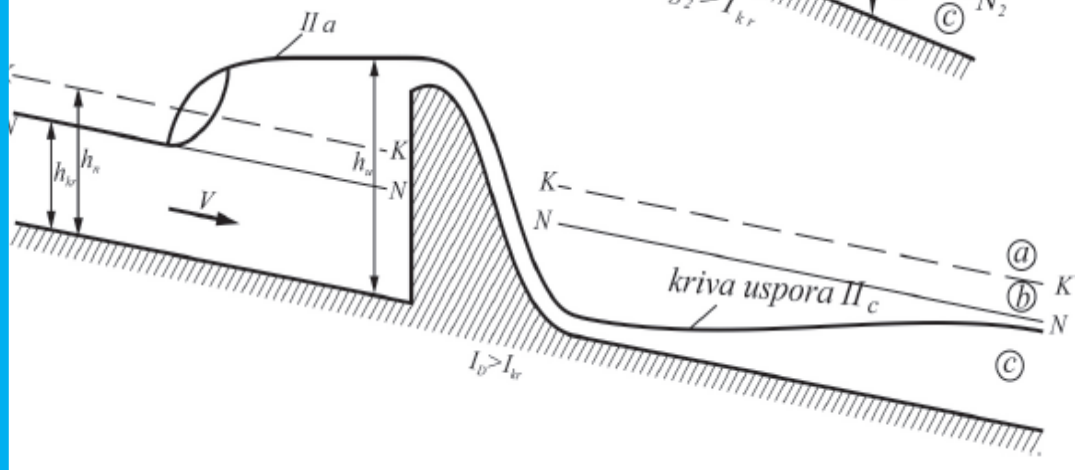
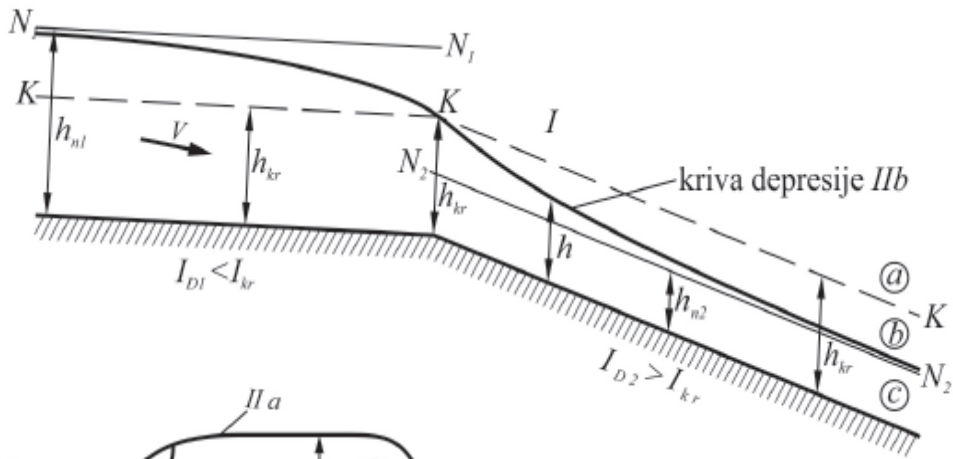
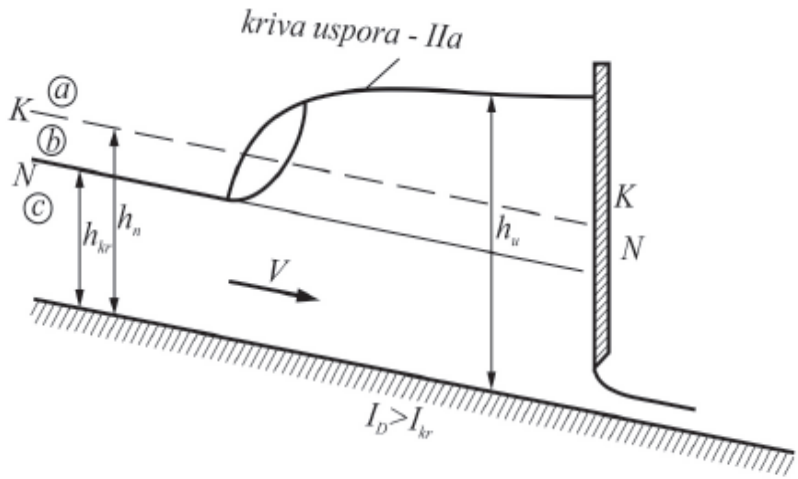
Oblici pojedinih krivih slobodne površine u slučaju $I_D > I_{kr}$

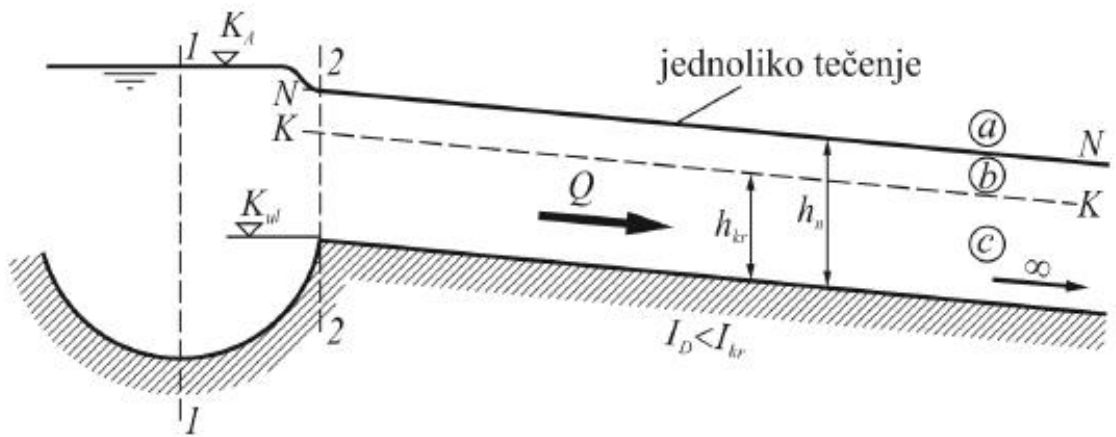


Linije nivoa u blizini objekata u prizmatičnom kanalu nagiba dna $I_D < I_{kr}$



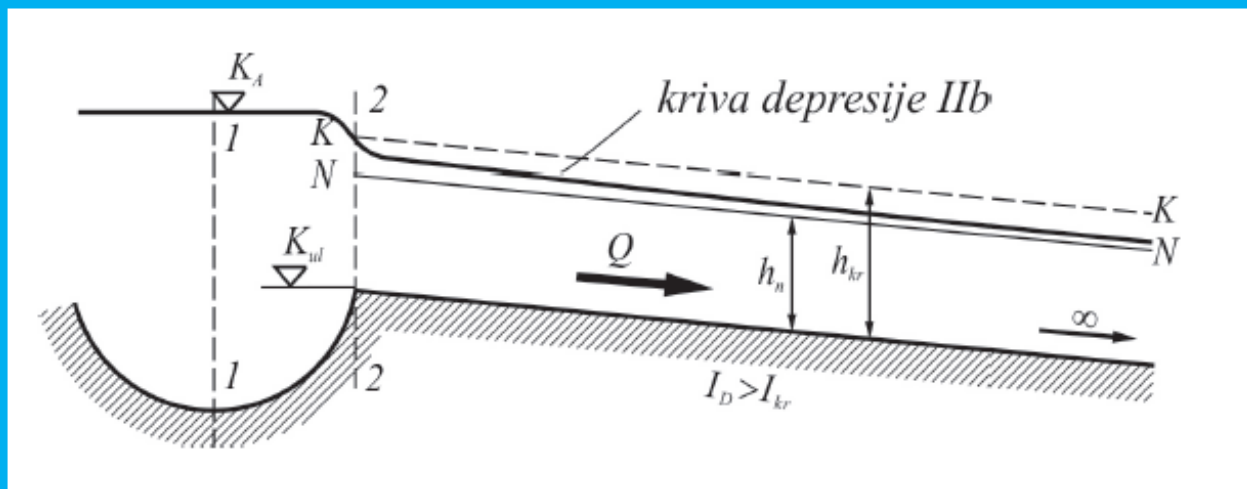
Linije nivoa u blizini objekata u prizmatičnom kanalu nagiba dna
 $I_D > I_{kr}$



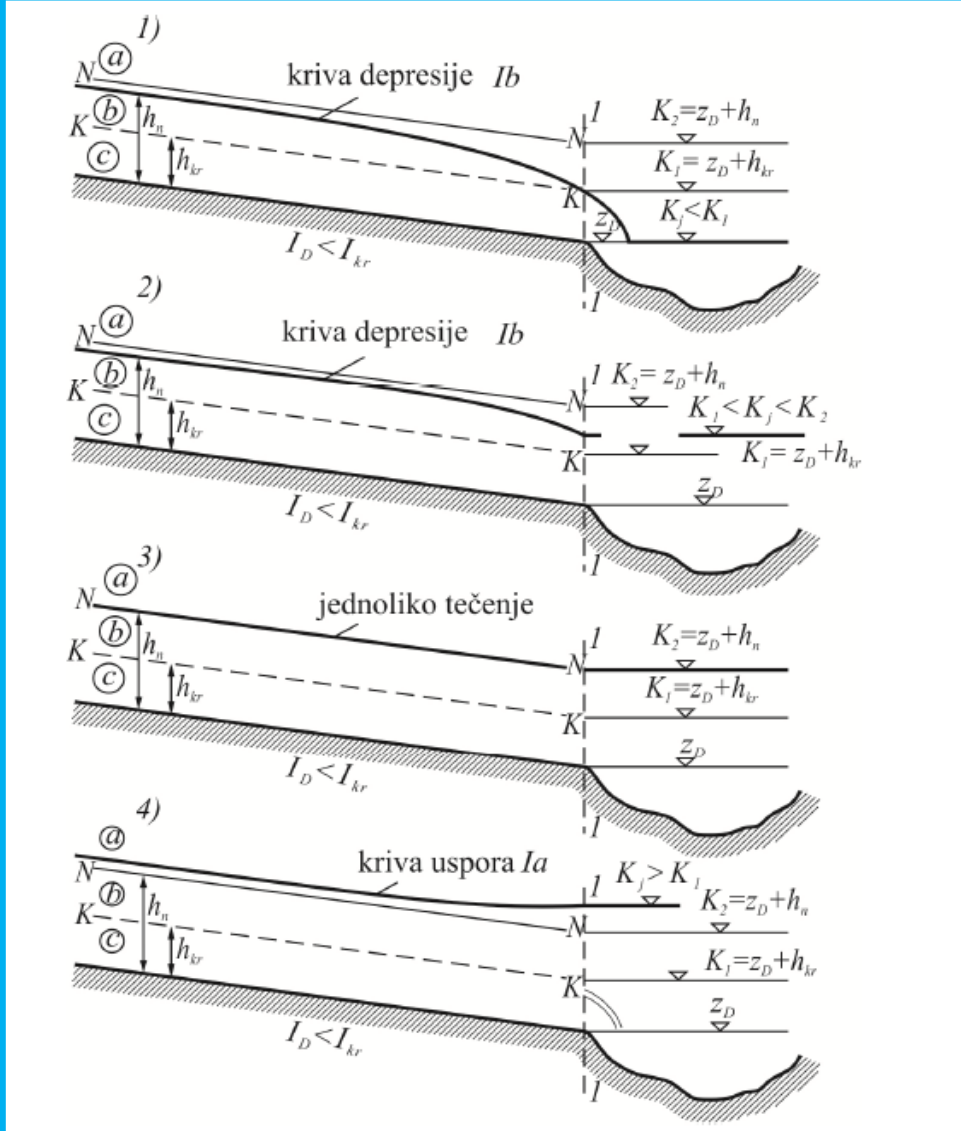


Linija nivoa u kanalu nagiba dna $I_D < I_{kr}$, pri isticanju vode iz jezera u kanal

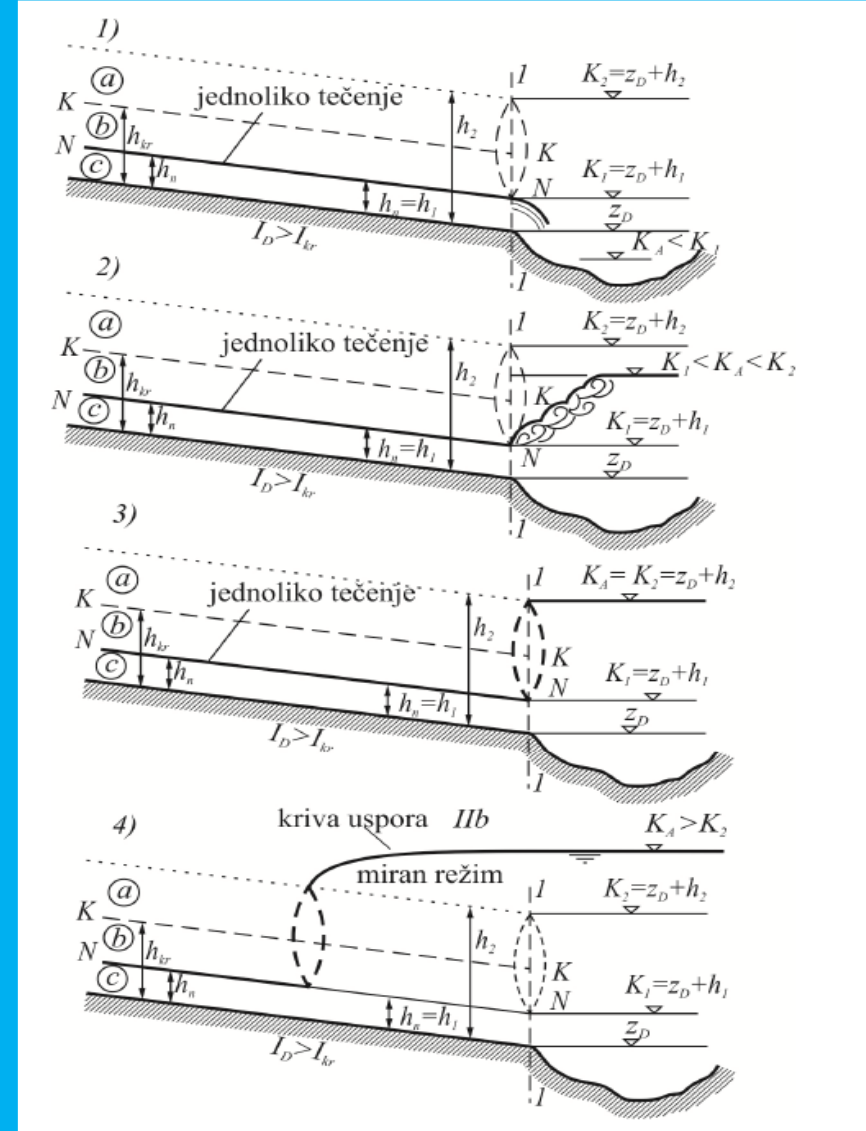
Linija nivoa u kanalu nagiba dna $I_D > I_{kr}$, pri isticanju vode iz jezera u kanal



**Linije isticanja vode iz kanala
u jezero pri nagibu dna
kanala $I_D < I_{kr}$**



**Linije isticanja vode iz
kanala u jezero pri nagibu
dna kanala $I_D > I_{kr}$**

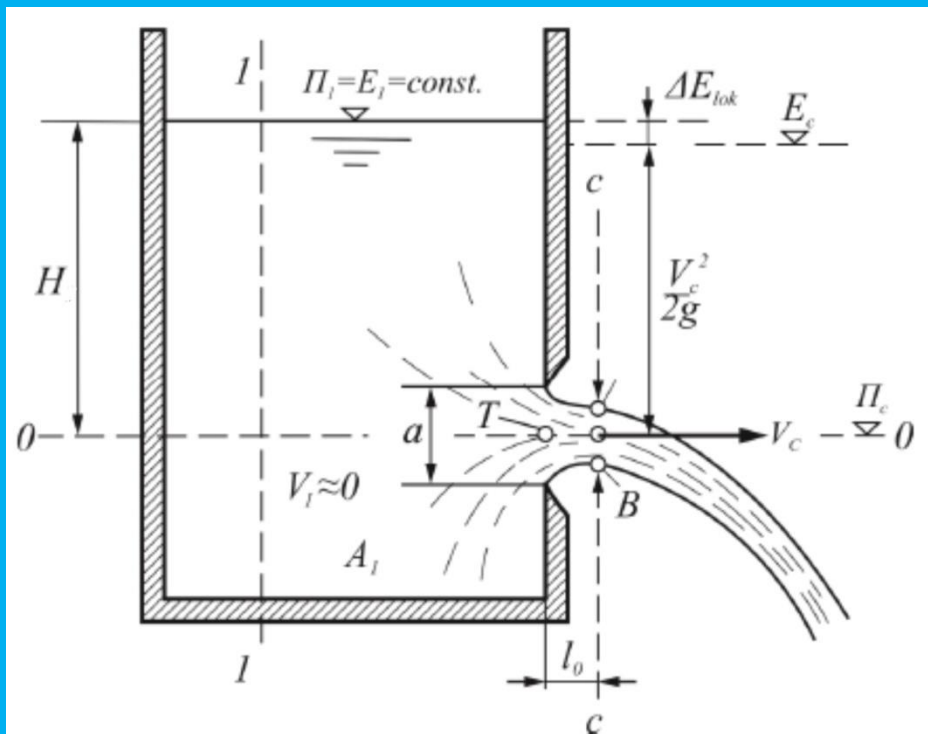


Tečenje vode u blizini objekata

- Isticanje kroz male i velike otvore
- Isticanje ispod ustave
- Tečenje preko preлива
- Kaskade

Objekti u kanalima i rečnim dovode do pojave nejednolikog tečenja u njima. Zajednička karakteristika objekata u kanalu ili rečnom toku (npr. brana, kaskada ili ustava), je što na kratkom odstojanju uzvodno i nizvodno od objekta dolazi do značajnih promena u karakteristikama tečenja. Uzvodno od objekta dolazi do povećanja dubina i smanjenja brzina, a nizvodno od objekata dolazi do smanjenja dubina i povećanja brzina. U zoni objekta, javlja se značajna denivelacija nivoa vode i promene u energetskej strukturi toka. Uzvodno od objekta povećava se potencijalna energija vode, koja se kroz mehanizam prelivanja ili isticanja transformiše u kinetičku energiju nizvodno od objekta.

Isticanje kroz male otvore u atmosferu (nepotopljeno isticanje)

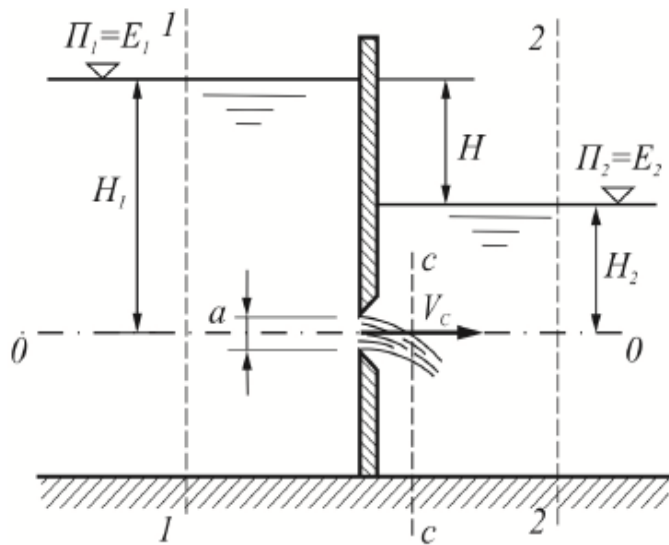


Hidraulička analiza isticanja kroz male otvore zasniva se na primeni Bernulijeve jednačine i jednačine kontinuiteta. Primenom ovih jednačina dobija se protok isticanja:

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2gH}$$

koeficijent protoka:

$$\mu = \varphi \cdot \varepsilon$$



Potopljeno isticanje kroz mali otvor – isticanje kroz otvor u pregradnom zidu, koji se nalazi ispod nivoa tečnosti u oba rezervoara.

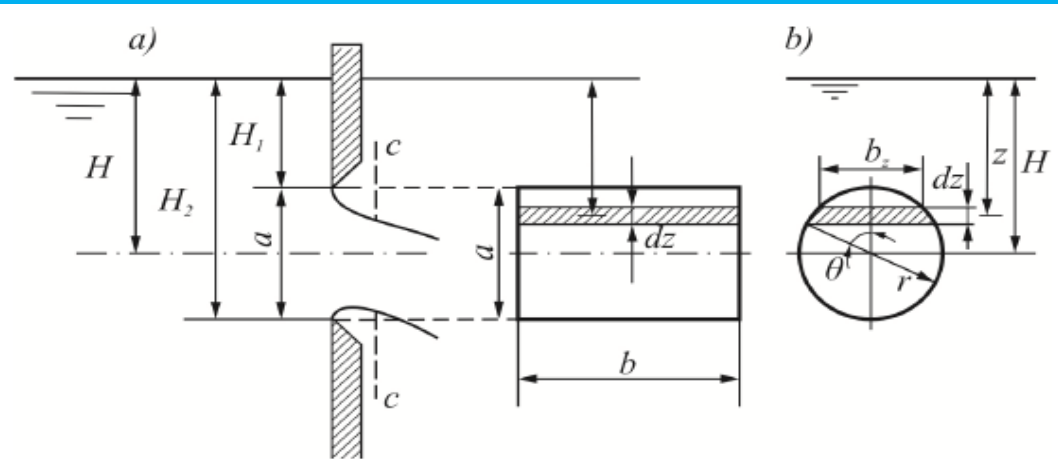
Hidraulička analiza isticanja kroz potopljene otvore zasniva se na primeni Bernulijeve jednačine i Jednačine kontinuiteta.

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2gH}$$

Slika 7.4. Isticanje tečnosti iz malog potopljenog otvora

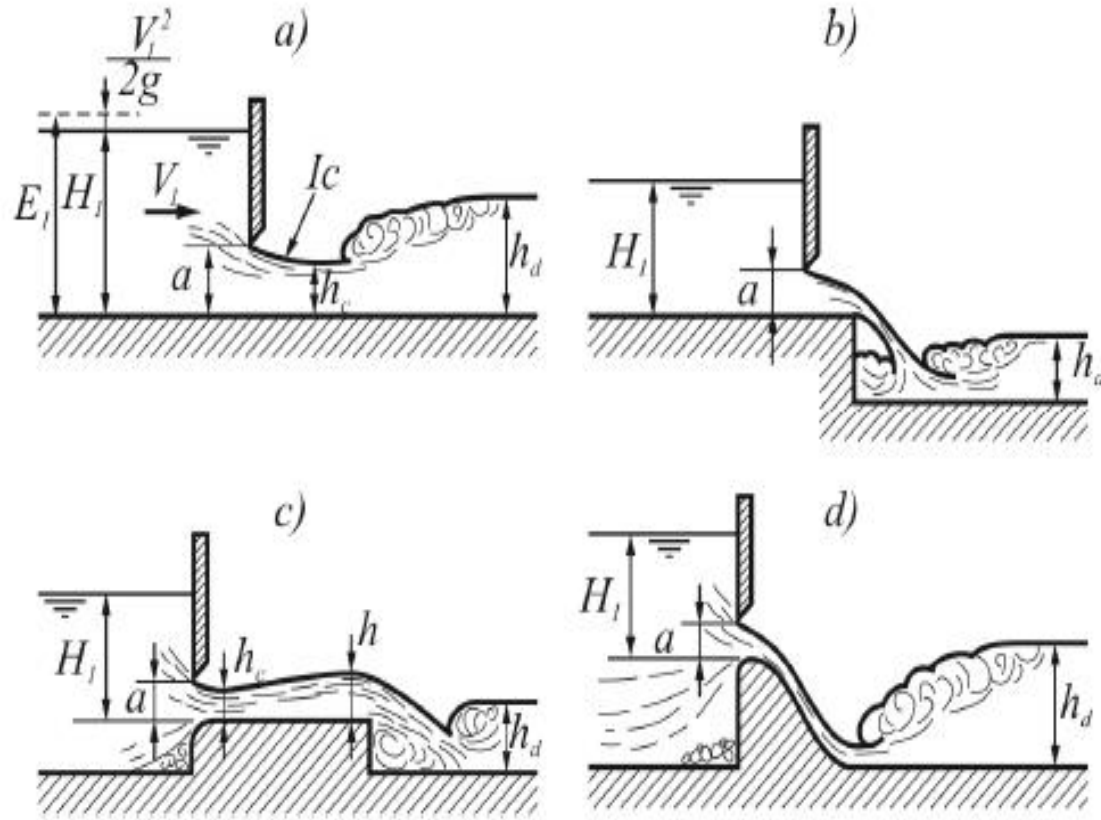
Isticanje kroz veliki otvor

Velikim se naziva otvor kod koga je $H/D < 10$. U ovom slučaju uzimaju se u obzir promene brzine po visini otvora iz koga tečnost ističe, kao i razlike u veličini hidrostatičkog pritiska.



Slika 7.5. Isticanje tečnosti iz velikih otvora

Isticanje ispod ustave



Osnovna funkcija ustava je kontrolisano propuštanje vode na kanalima, rekama i branama.

Hidraulička analiza isticanja ispod ustave zasniva se na primeni Bernulijeve jednačine i Jednačine kontinuiteta.

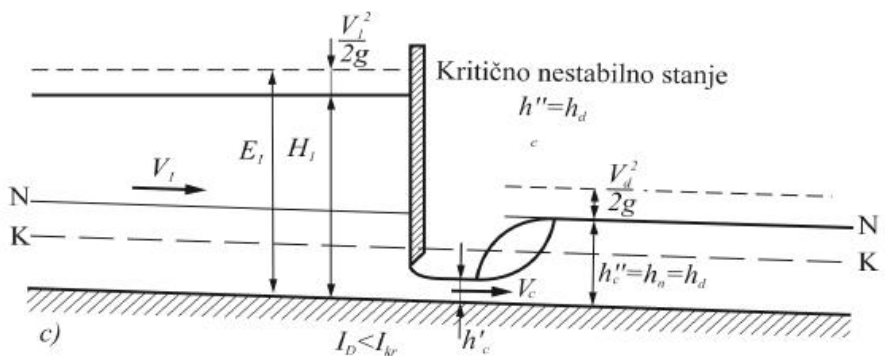
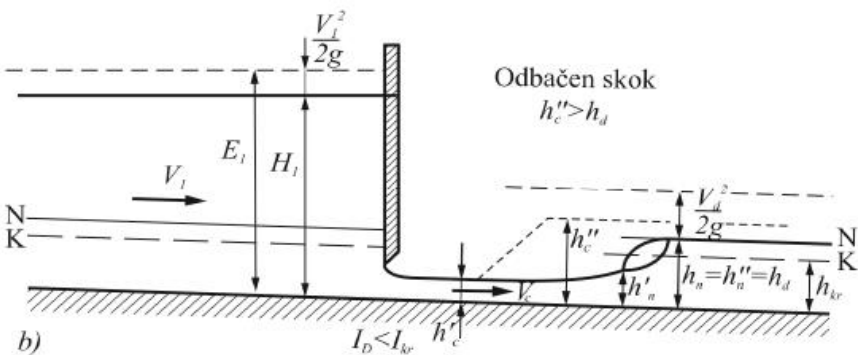
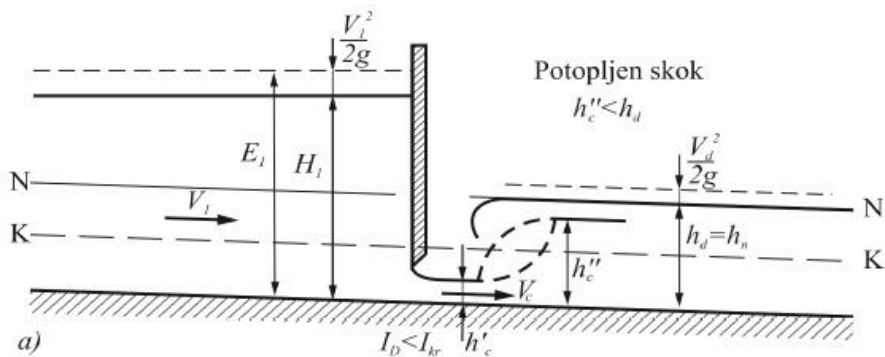
Proticaj ispod ustave:

Različiti položaji ustava u kanalu

$$Q = \mu \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2g \cdot (E_1 - \varepsilon \cdot a)}$$

Položaj hidrauličkog skoka

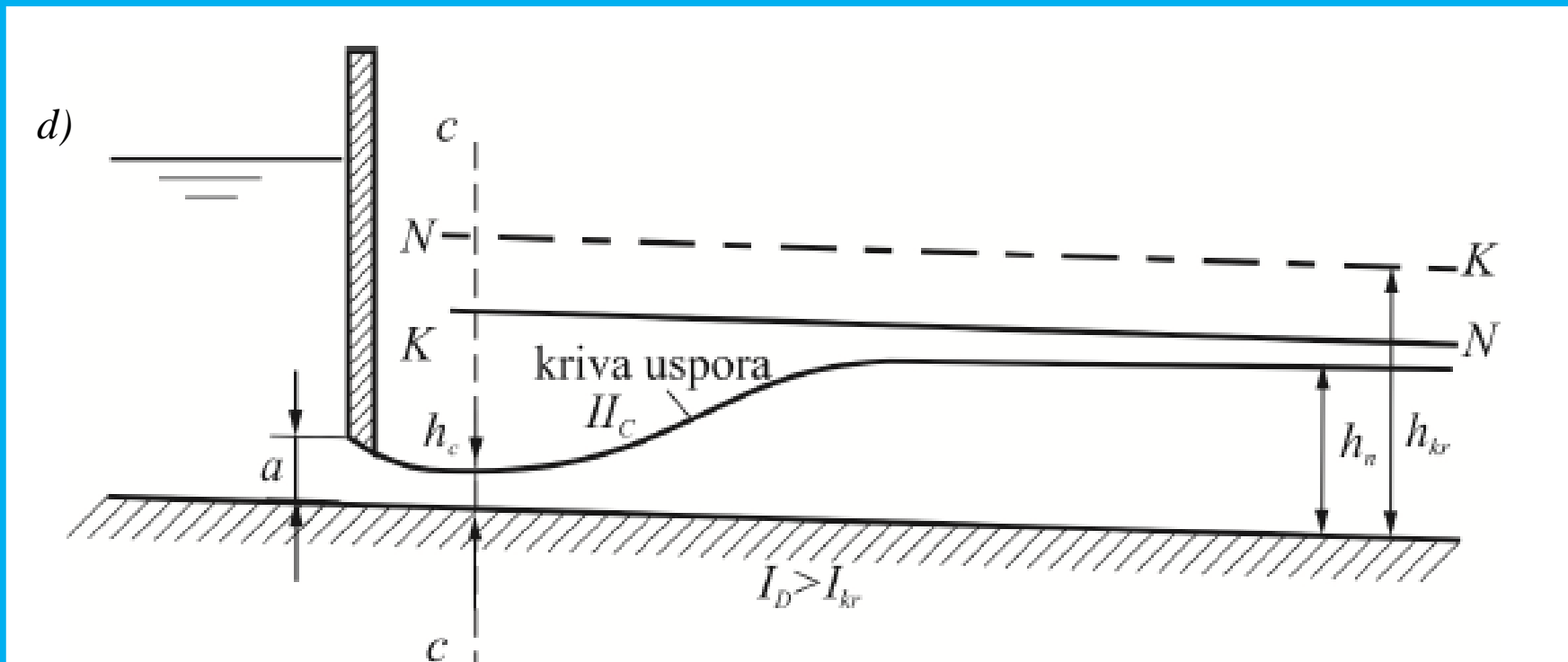
Kada se ustava nalazi na kanalu blagog nagiba dna, nizvodno od ustave odvija se prelaz iz silovitog režima tečenja, neposredno nizvodno od ustave, u miran režim tečenja, koji se uspostavlja na određenoj udaljenosti od ustave, van zone uticaja ustave. Zbog toga se nizvodno od ustave javlja hidraulički skok.



Hidraulički skok nizvodno od objekta može biti:

- *Potopljen hidraulički skok*, kada donja voda potapa hidraulički skok. On će se uspostaviti kada je $h_c'' < h_d$ (a)
- *Odbačen hidraulički skok*, koji se javlja na određenom odstojanju od podnožja brane, pri čemu će u tom slučaju biti: $h_c'' > h_d$ (b)
- *Kritično, nestabilno stanje*, kada se skok javlja na samom podnožju brane. U tom slučaju je $h_c'' = h_d$ (c)

Nepotopljeno isticanje ispod ustave kada je $I_D > I_{kr}$

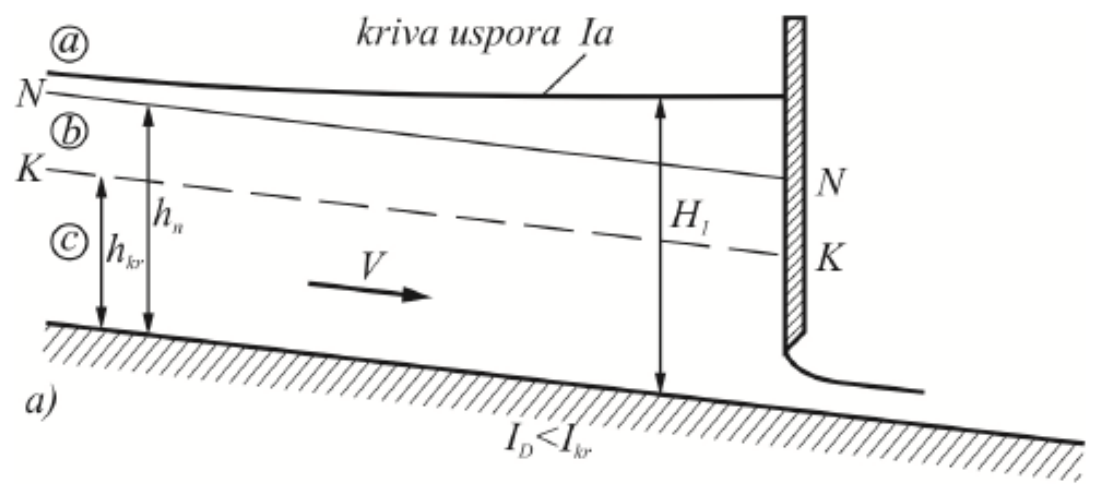


U zavisnosti od nizvodnih hidrauličkih uslova, isticanje ispod ustave može biti: nepotopljeno (slobodno isticanje) i potopljeno.

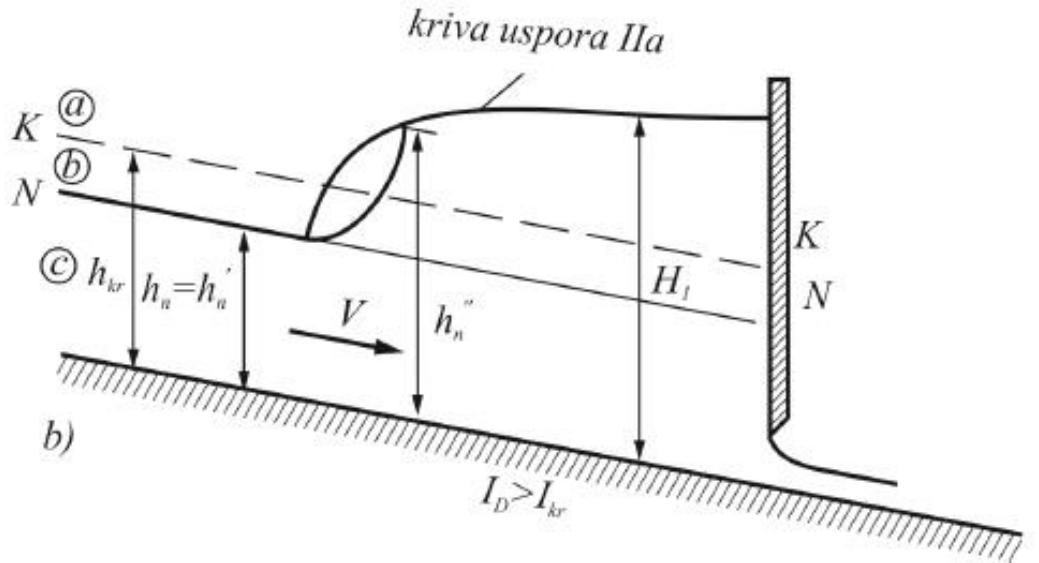
Nepotopljeno isticanje javlja se kada na tok u suženom preseku ne utiče donja voda (slike (b) i (d))

Potopljeno isticanje se javlja ukoliko je sužen presek potopljen nekim slojem vode (slika (a))

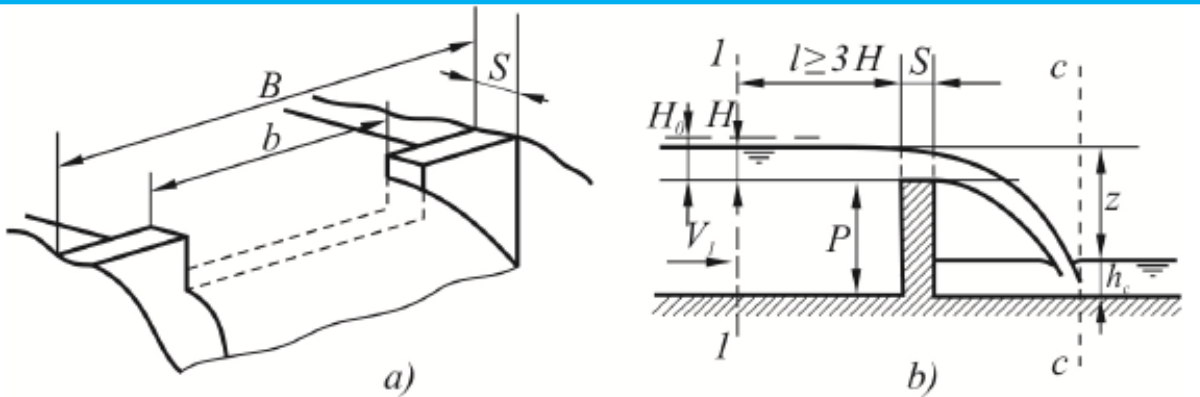
Slika 7.10 a. Linija nivoa uzvodno od ustave za slučaj: $I_D < I_{kr}$



Slika 7.10b. Linija nivoa uzvodno od ustave za slučaj: $I_D > I_{kr}$

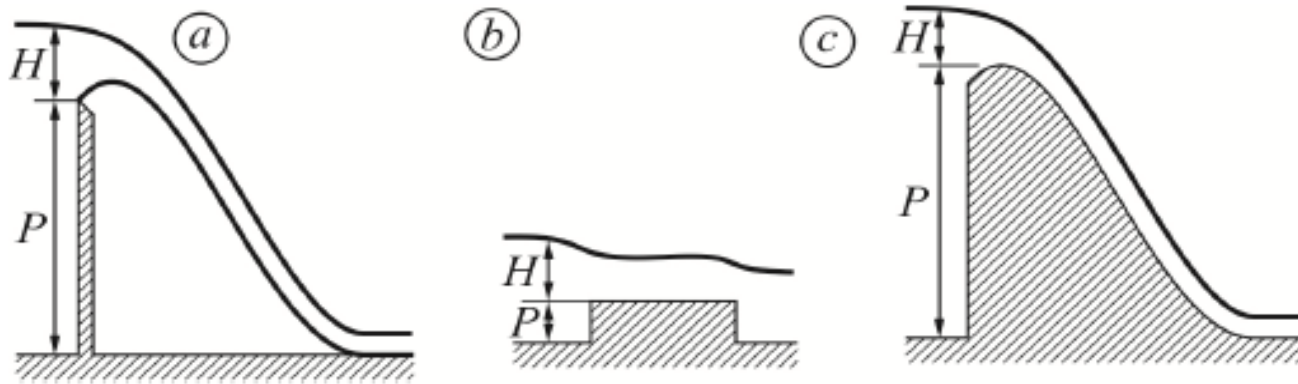


Prelivi



Slika 7.13. Shema preliva

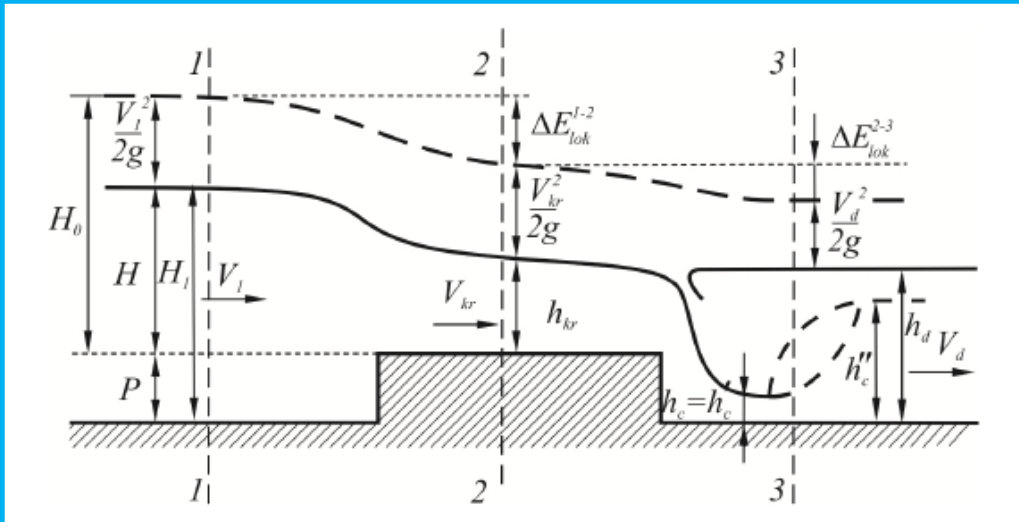
Prelivi su značajni hidrotehnički objekti sa raznovrsnom primenom u vodoprivredi. Svaka pregrada (zid, prag, brana) kroz koju ili preko koje preliva tok vode naziva se prelivom.



Slika 7.15. Podela preliva prema geometrijskom obliku prelivnog objekta

Nepotopljeno prelivanje preko širokog praga

$$Q = mb\sqrt{2g} H_0^{3/2}$$

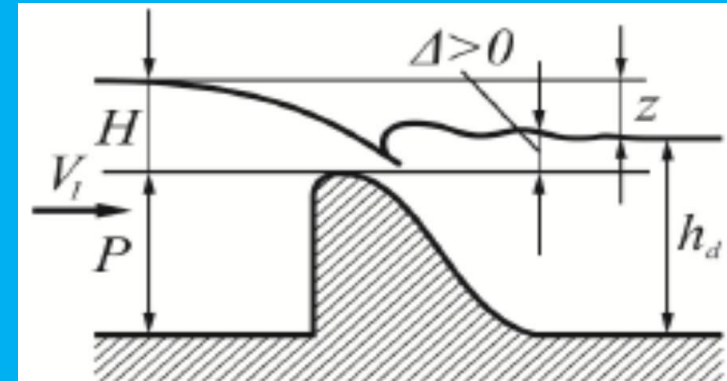
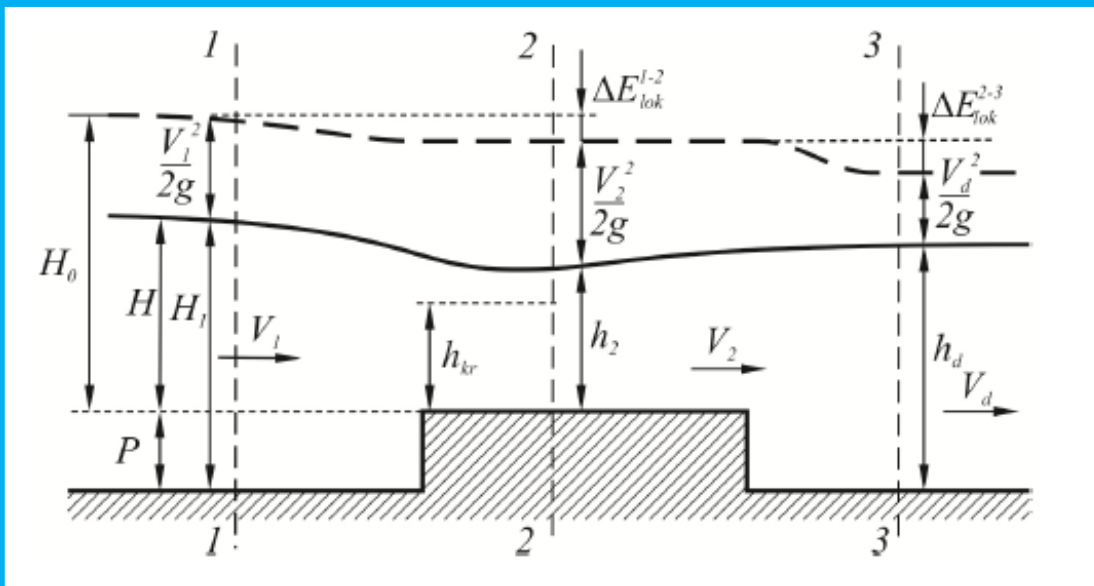


Prema obliku spajanja toka sa donjom vodom prelivi mogu biti:

- a) **nepotopljeni**, kada nivo donje vode ne utiče na oblik prelivnog mlaza i proticaj preko preliva
- b) **potopljeni**, kada se nivo donje vode nalazi iznad krune preliva

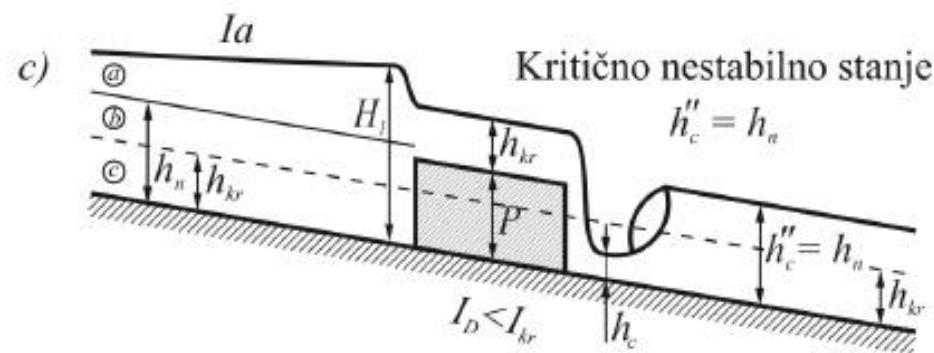
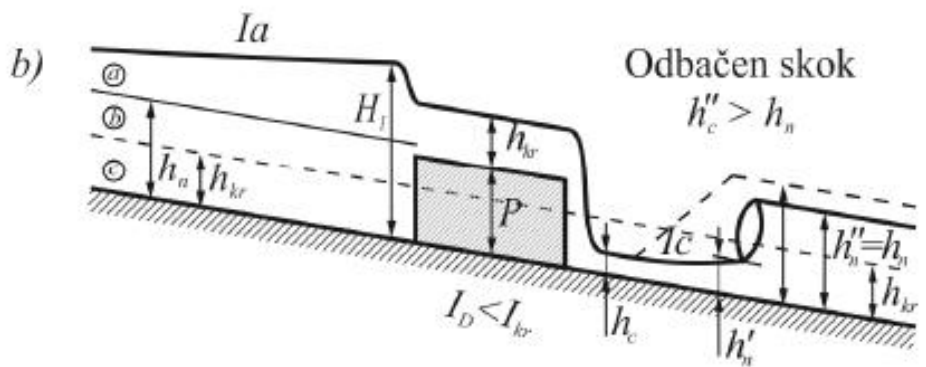
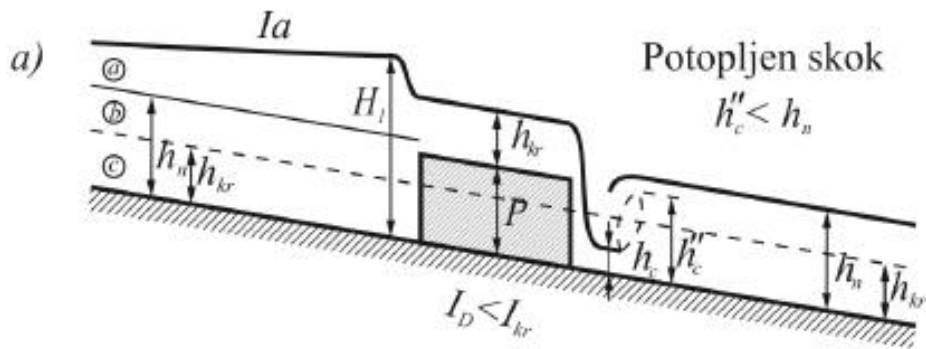
Potopljeno prelivanje preko širokog praga

Potopljeno prelivanje preko preliva praktičnog profila



$$Q = \sigma_p mb\sqrt{2g} H_0^{3/2}$$

Linije nivoa za deonicu sa pragom u kanalu $I_D < I_{kr}$

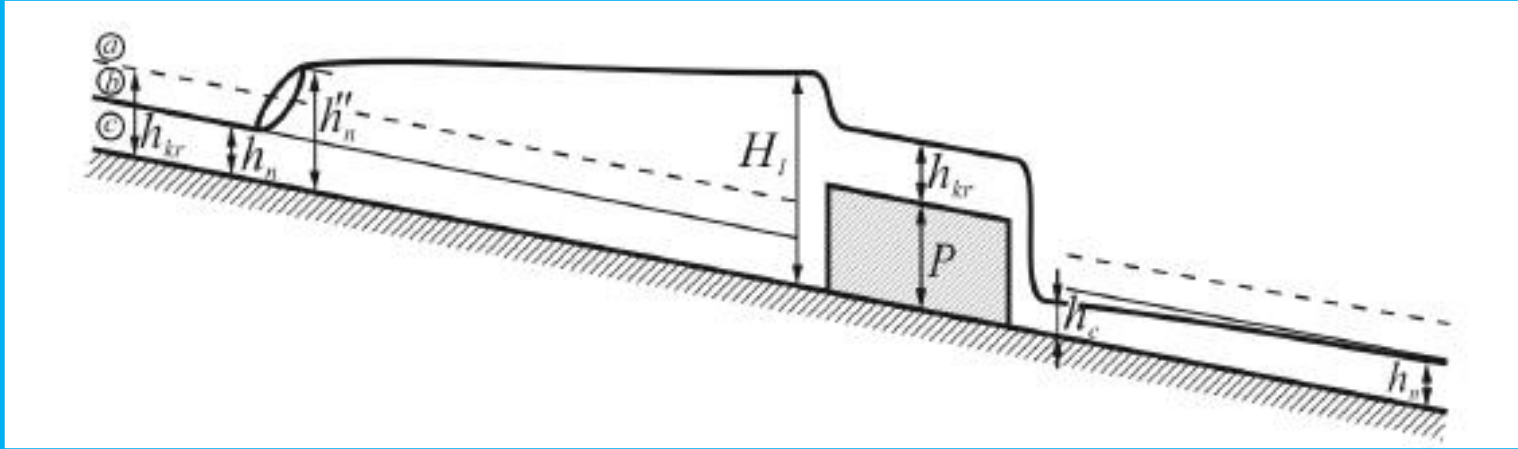


Kod tečenja sa slobodnom površinom, postoji tendencija savladavanja prepreka sa minimumom uložene energije. Pri tečenju vode preko praga, pri nepotopljenom prelivanju, na pragu će se uspostaviti paralelno strujanje se kritičnom dubinom, jer njoj odgovara minimum specifične energije toka.

Hidraulički skok nizvodno od objekta može biti:

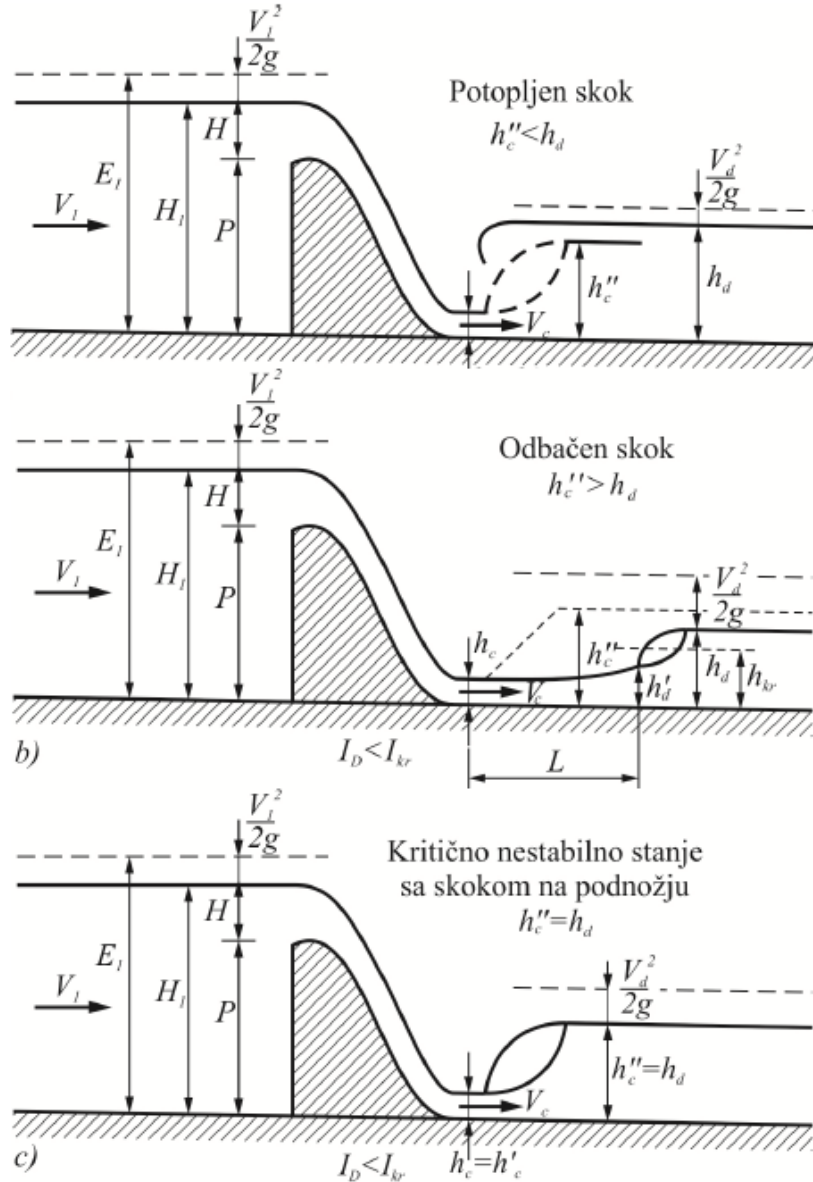
- **Potopljen hidraulički skok**, kada donja voda potapa hidraulički skok. On će se uspostaviti kada je $h_c'' < h_d$ (a)
- **Odbačen hidraulički skok**, koji se javlja na određenom odstojanju od podnožja brane, pri čemu će u tom slučaju biti: $h_c'' > h_d$ (b)
- **Kritično, nestabilno stanje**, kada se skok javlja na samom podnožju brane. U tom slučaju je $h_c'' = h_d$ (c)

Linije nivoa za deonicu sa pragom u kanalu $I_D > I_{kr}$



Kada se prag nalazi u kanalu strmog nagiba dna prelaz iz silovitog režima tečenja u miran režim tečenja, neposredno uzvodno od praga, odvija se preko hidrauličkog skoka, uzvodno od praga.

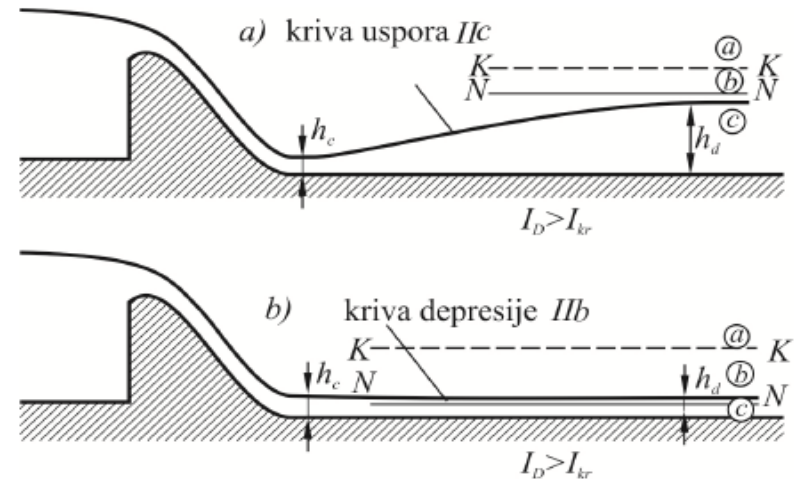
Različiti položaji hidrauličkog skoka u slapištu pri $I_D < I_{kr}$



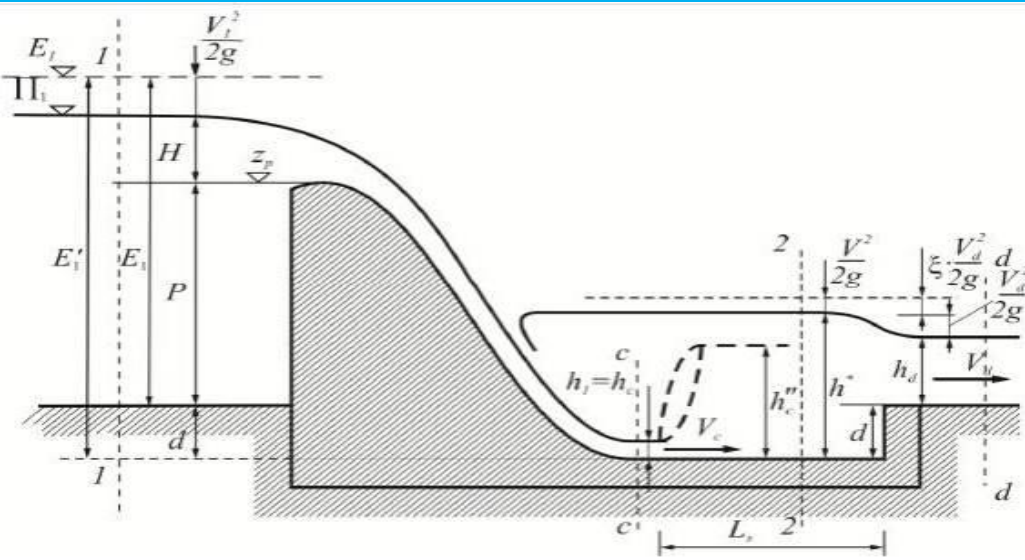
Hidraulički skok nizvodno od objekta može biti:

- **Potopljen hidraulički skok**, kada donja voda potapa hidraulički skok. On će se uspostaviti kada je $h_c'' < h_d$ (a)
- **Odbačen hidraulički skok**, koji se javlja na određenom odstojanju od podnožja brane, pri čemu će u tom slučaju biti: $h_c'' > h_d$ (b)
- **Kritično, nestabilno stanje**, kada se skok javlja na samom podnožju brane. U tom slučaju je $h_c'' = h_d$ (c)

Linije nivoa u blizini preliva praktičnog profila pri $I_D > I_{kr}$



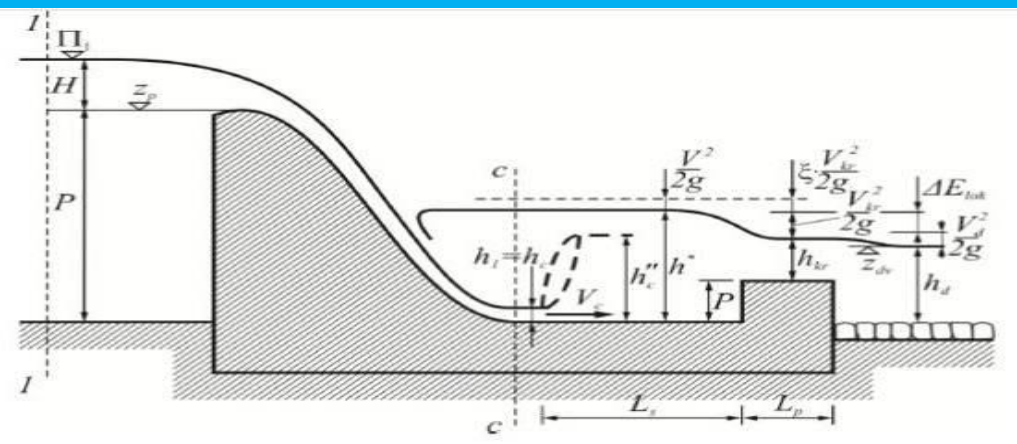
Slapište sa bučnicom



Izgradnjom brane kao uspornog objekta na nekom vodotoku stvara se akumulaciono jezero. Da bi se omogućilo proticanje vode iz jezera u donju vodu nizvodno od brane, potrebno je izgraditi veoma delikatan objekat - **preliv praktičnog profila**. Preliv treba, u hidrauličkom smislu, dimenzionisati tako da je u mogućnosti da propusti i veoma velike poplavne talase manje verovatnoće.

Najpovoljniji način spajanja gornje i donje vode je u vidu **potopljenog hidrauličkog skoka**, sa odgovarajućim koeficijentom sigurnosti. Pri projektovanju prelivnih objekata, nastoji se da se izgradnjom odgovarajuće vrste slapišta, na veštački način, poveća dubina donje vode i, na taj način, da se obezbedi potopljen hidraulički skok, koji omogućava bezbedno gašenje viška kinetičke energije i umirenje vode pre njenog ulaska u nizvodno rečno

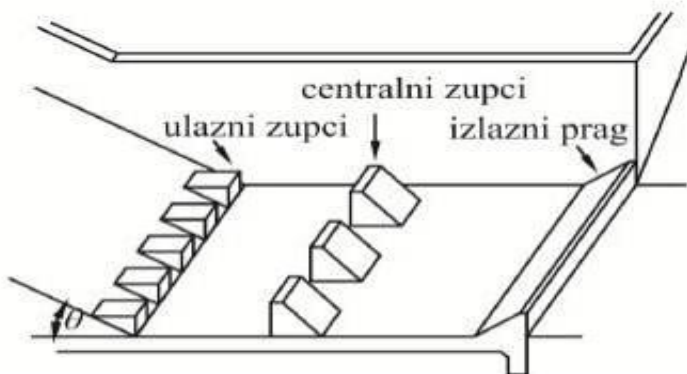
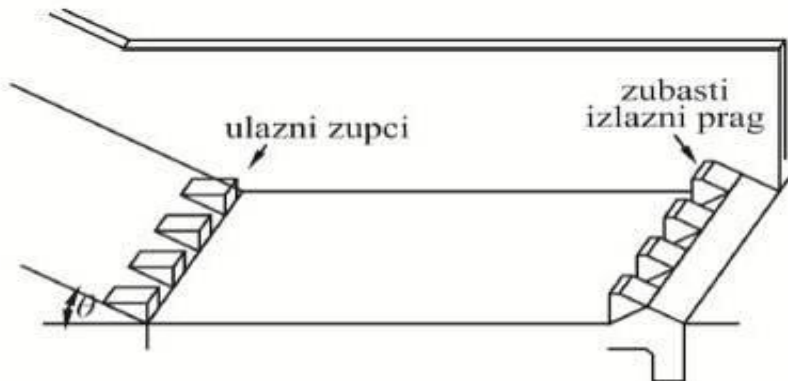
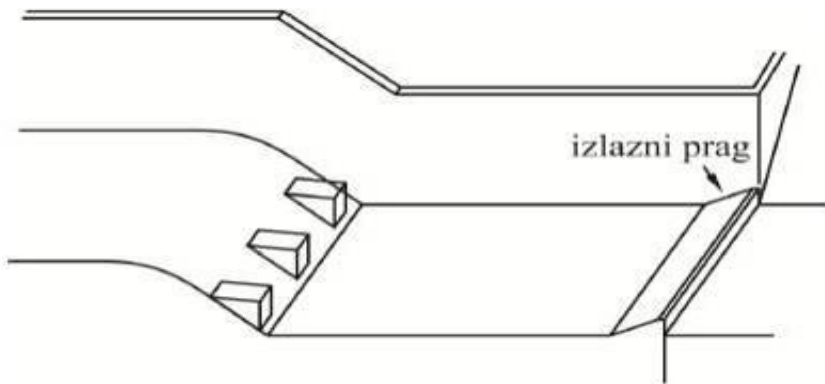
Slapište sa odbojnim zidom



Slapišta sa specijalnim objektima za gašenje energije – gasiteljima energije

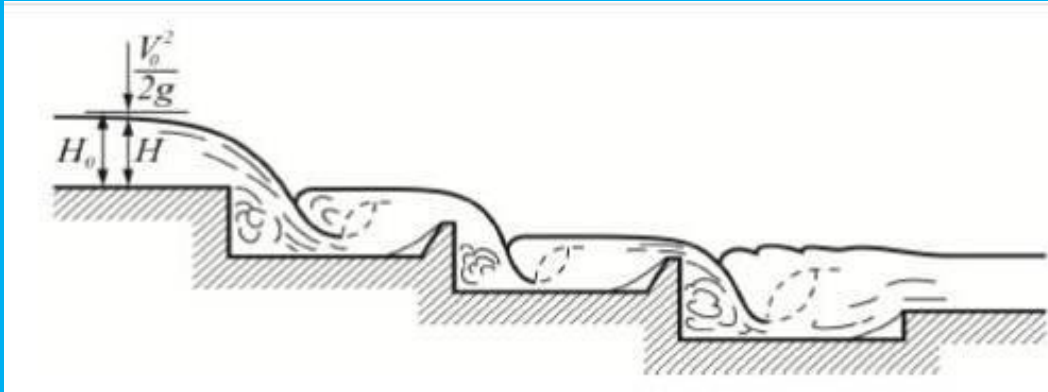
Slapišta sa specijalnim objektima za gašenje energije sastoje se od raznih prepreka i uređaja, koji se grade na putu toka vode.

Specijalni uređaji, koji se grade u donjoj vodi u cilju gašenja energije, smirivanja brzine vode i upuštanja prelivne vode u nizvodni tok sa mirnim režimom nazivaju se *gasitelji energije*

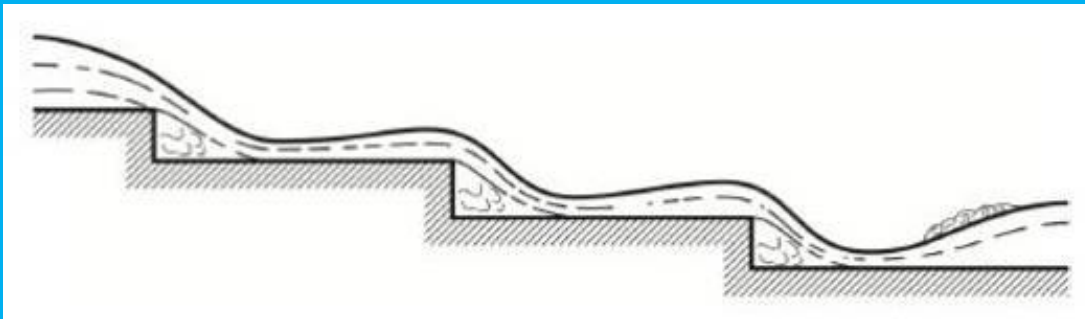


Kaskade

Višestepena kaskada sa slapištem



Višestepena kaskada bez slapišta



Kaskade su objekti koji se grade na delovima korita vodotoka ili kanala sa velikim nagibima i velikim razlikama u visini.

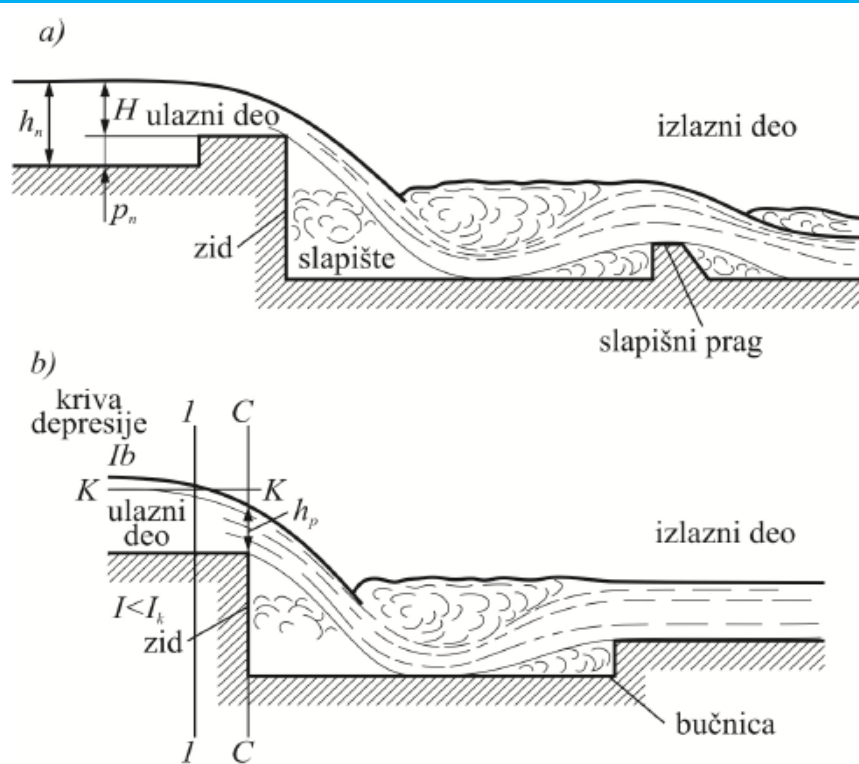
Kaskade su specijalni objekti, koji se grade u cilju smanjenja brzina tečenja u vodotoku ili kanalu, smanjenjem nagiba dna kanala odnosno vodotoka. One se često grade na kanalima u brdovitim terenima.

Elementi kaskade u slapištu

U okviru kaskade razlikuju se sledeći elementi: ulaz, prelivni zid sa koga voda preliva, slapište, izlaz.

Ulazni deo kaskade je preliv sa širokim pragom (koji može da bude sa visinom ili bez visine) ili preliv praktičnog profila.

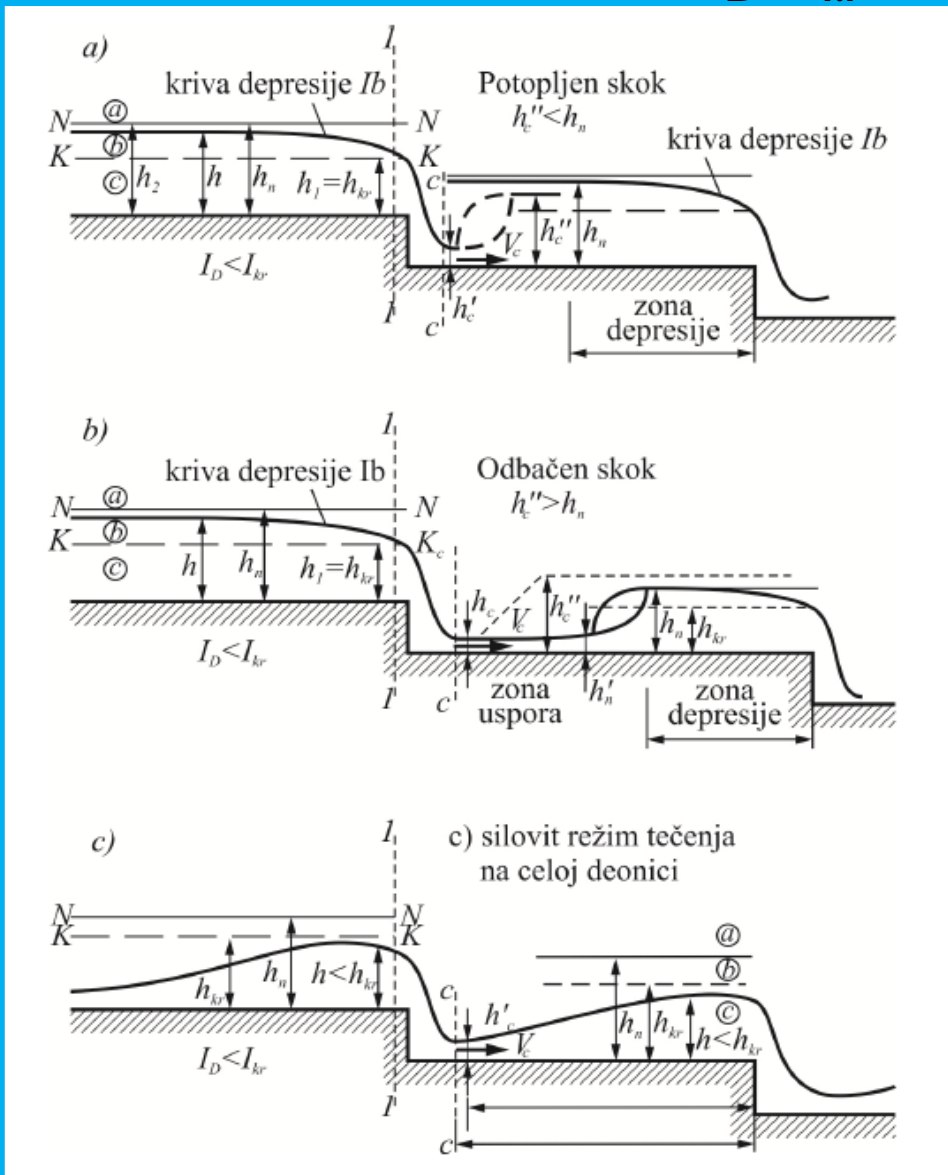
Slapišni deo kaskade ostvaruje se sa vodenim jastukom koji nastaje ili usled slapišnog praga ili usled ukopavanja u teren. Dno slapišta kaskade uvek se učvršćuje, ojačava.



Slika 7.38. Elementi kaskade sa slapištem

Izlazni deo kaskade, koji predstavlja ili udubljenje (kod bučnice) ili slapišni zid, u hidrauličkom smislu treba razmatrati kao preliv i on, obično, predstavlja ili preliv sa širokim pragom ili preliv praktičnog profila

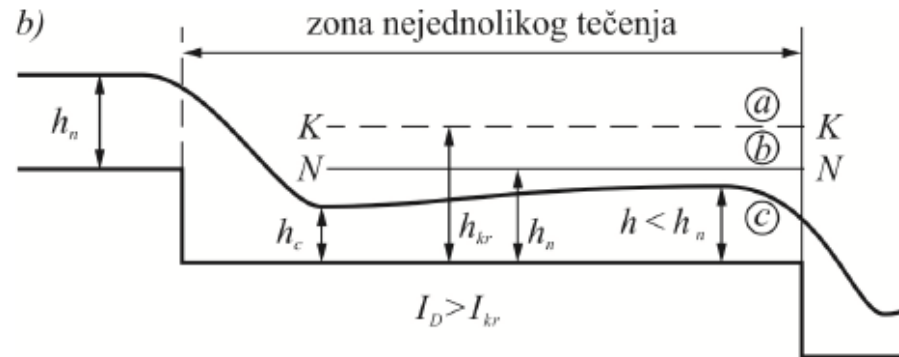
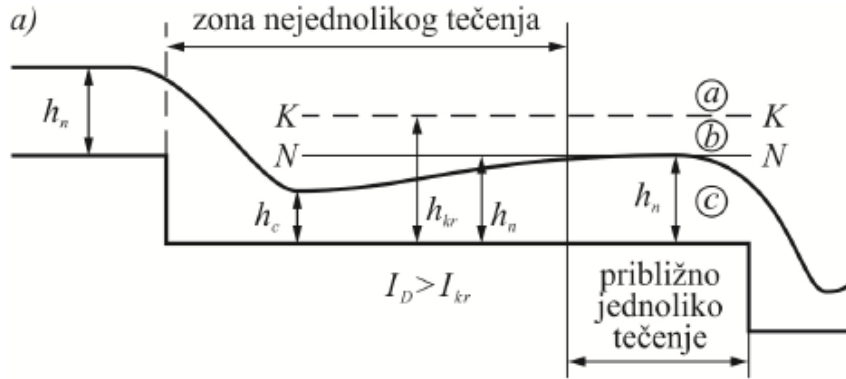
Mogući tipovi linija nivoa za deonicu sa kaskadom, pri $I_D < I_{kr}$



S obzirom da je i nagib dna nizvodne deonice $I_D < I_{kr}$, na nizvodnoj deonici kaskade odvija se prelaz iz silovitog režima u miran režim tečenja, koji se uspostavlja na određenoj udaljenosti od kaskade, van zone uticaja kaskade. Na nizvodnoj deonici kaskade može se javiti **hidraulički skok**. U zavisnosti od odnosa normalne dubine i druge konjugovane dubine hidrauličkog skoka, hidraulički skok može biti **potopljen** ili **odbačen**. Pri većem padu dna i manjoj dužini deonice u celoj nizvodnoj deonici može se formirati linija uspora u silovitom režimu, bez mogućnosti pojave hidrauličkog skoka.

Mogući tipovi linije

nivoa u zoni kaskade pri $I_D > I_{kr}$



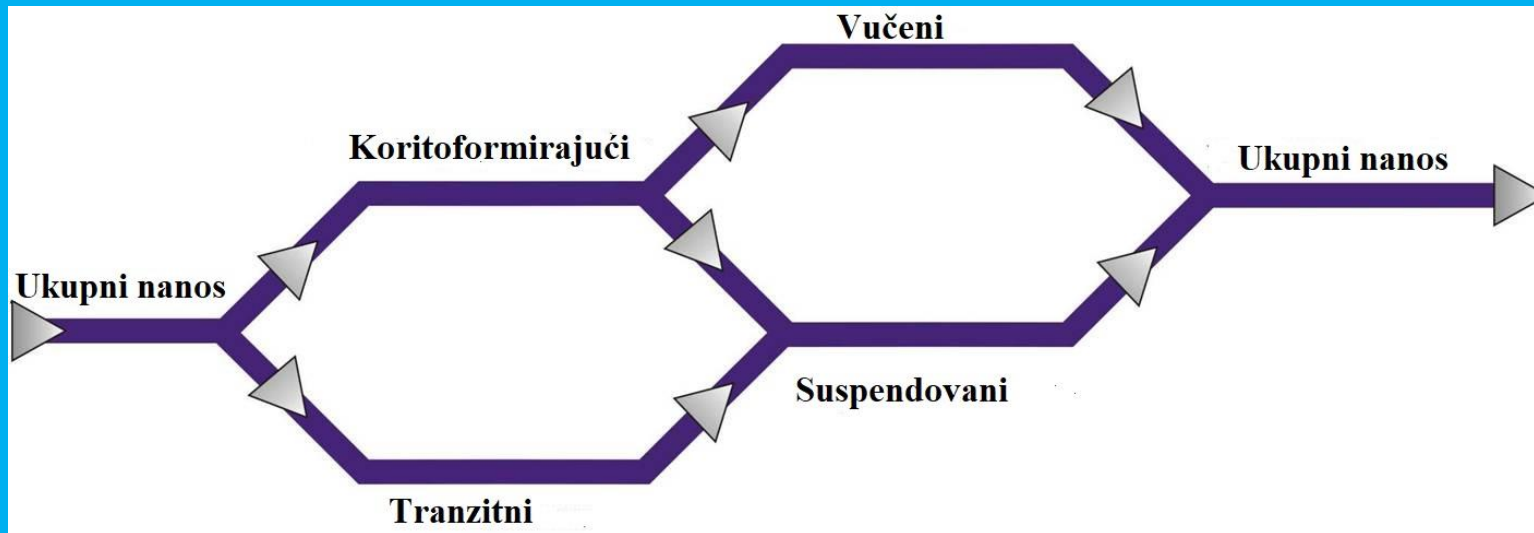
U zavisnosti od razmaka između kaskada, na nizvodnoj deonici kanala mogu se javiti dva slučaja:

a) U slučaju duže deonice između kaskada, u njoj se javlja **zona nejednolikog tečenja** na uzvodnom delu i **zona približno jednolikog tečenja** na nizvodnom delu (sa uspostavljanjem normalne dubine u tom delu)

b) U slučaju kraće deonice između kaskada, javlja se samo **zona nejednolikog tečenja**, tako da je na celoj deonici dubina toka manja od normalne.

Rečna korita prirodnih vodotoka se formiraju tokom dugotrajnih geomorfoloških i morfoloskih procesa, pod uticajem velikog broja prirodnih činilaca.

Podela rečnog nanosa



Koritiformirajući nanos - deo suspendovanog nanosa vodotoka koji se nalazi u razmeni sa materijalom u rečnom dnu, učestvuje u morfološkim procesima

Tranzitni nanos - najsitnije frakcije suspendovanog nanosa prolaze bez interakcije sa dnom; taloži se u akumulacijama.

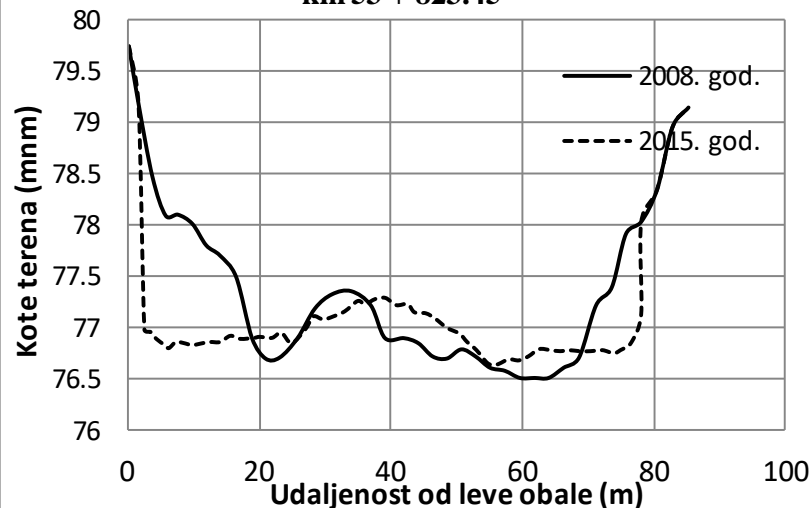
Načini kretanja nanosa

- Krupnije frakcije nanosa (obluci, šljunak i krupan pesak) kreću se po dnu (kotrljanje, saltacije, vučenje) - vučeni nanos
- Finije frakcije (sitan pesak, prašina i glina) su suspendovane u vodi - suspendovani nanos

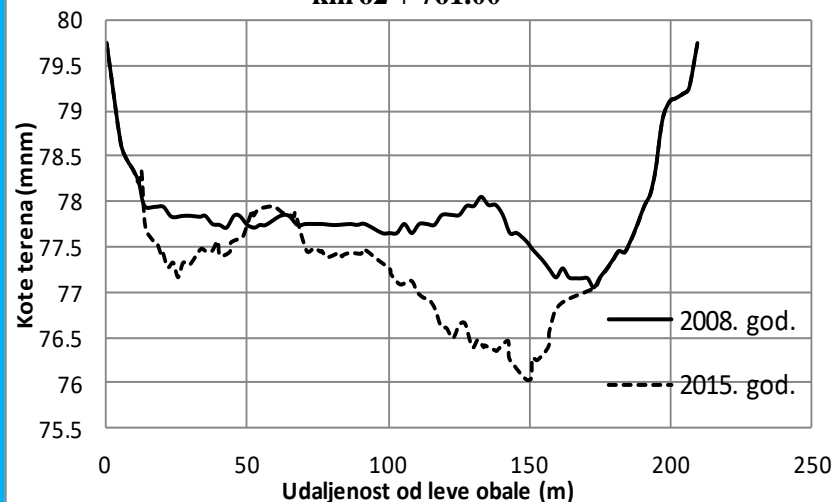


Prikaz uporednih poprečnih profila iz 2008. i 2015. godine (kanali HS Dunav-Tisa-Dunav u Bačkoj)

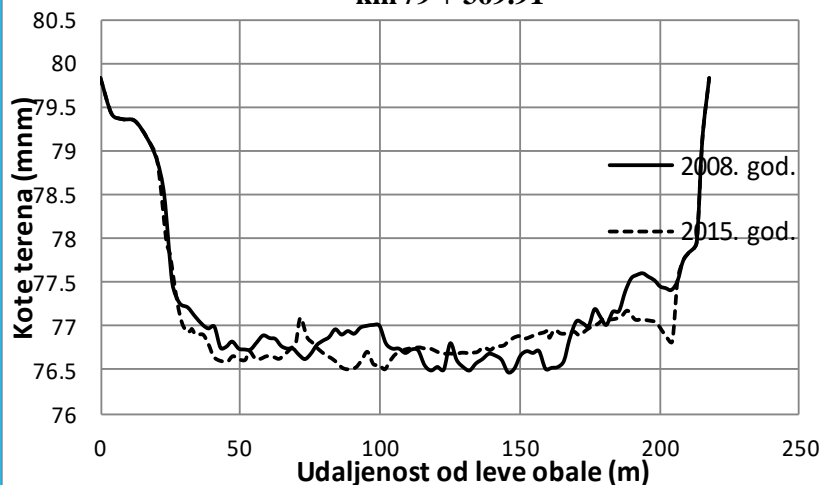
km 53 + 823.45



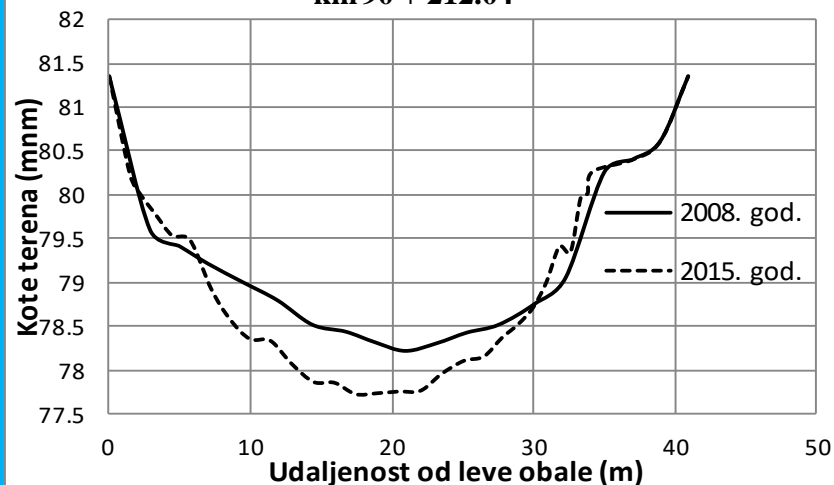
km 62 + 761.00



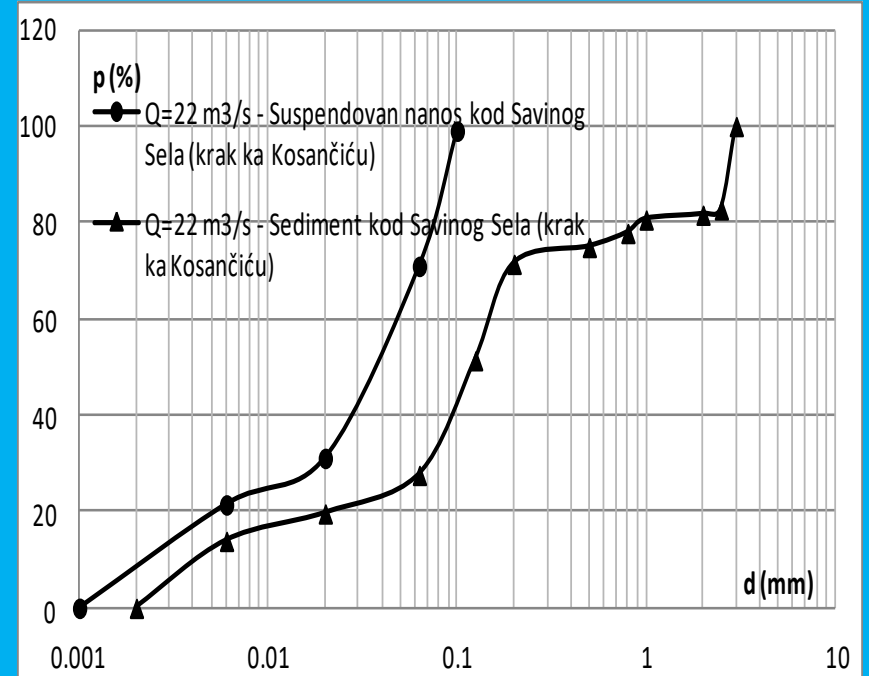
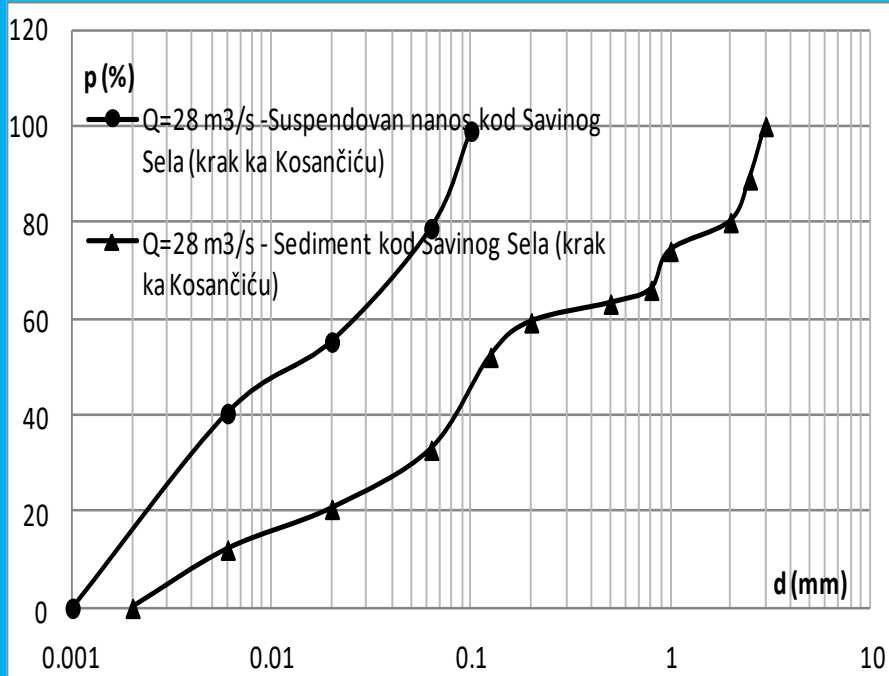
km 79 + 369.91



km 90 + 212.04

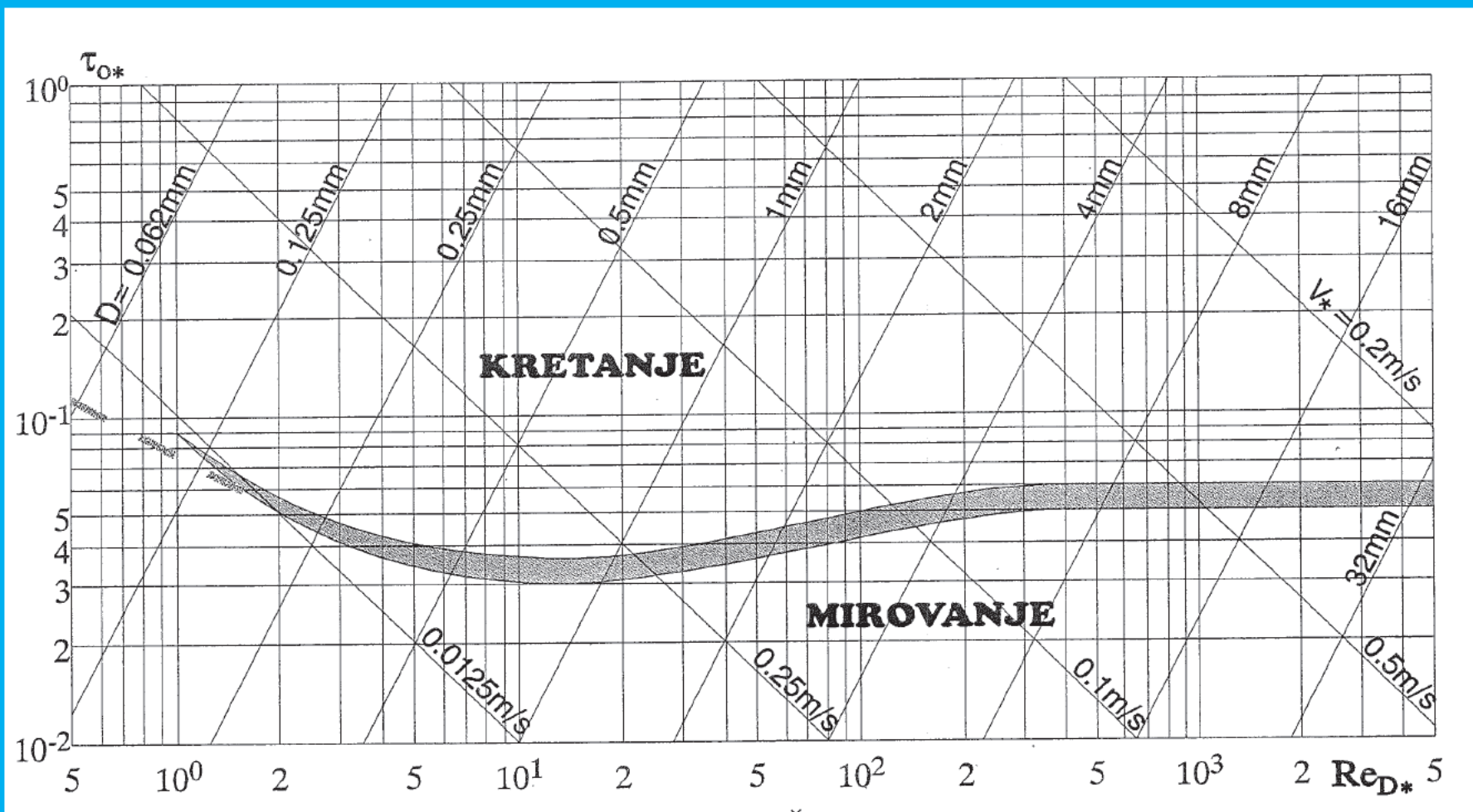


Granulometrijski sastav vučenog i suspendovanog nanosa u kanalima bačkog dela HS Dunav-Tisa-Dunav pri proticajima: $Q = 28 \text{ m}^3/\text{s}$ (a) i $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ (b)

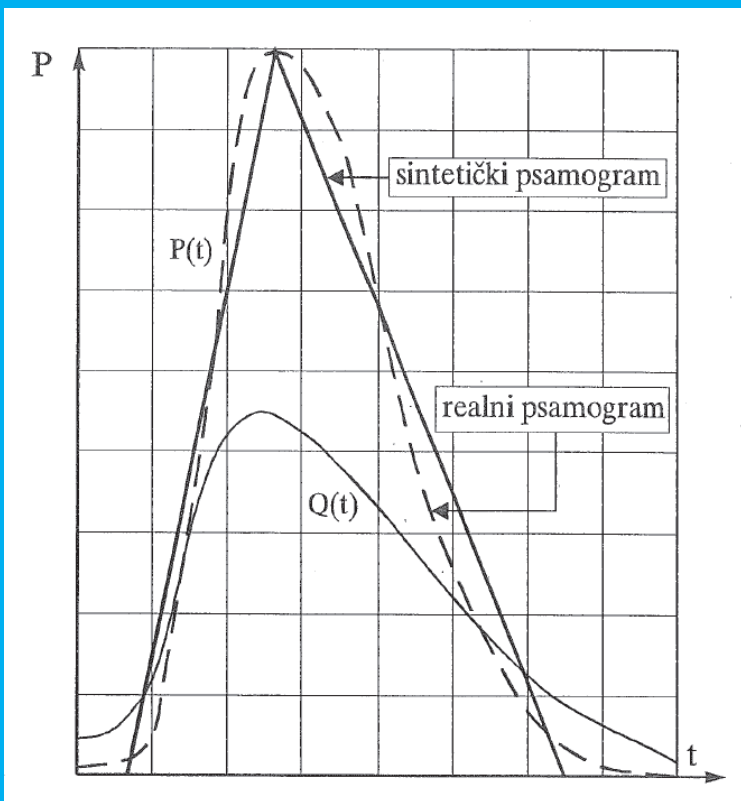


Šildsov dijagram

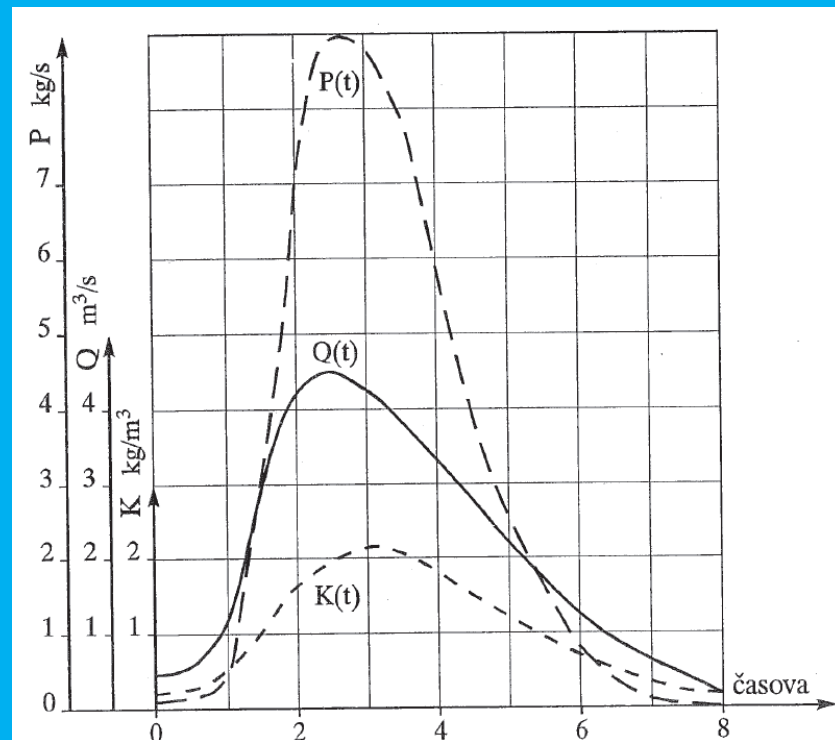
pruža informacije o uslovima pokretanja vučenog nanosa, pri poznatim hidrauličkim karakteristikama toka i karakteristikama nanosa



Sintetički psamogram



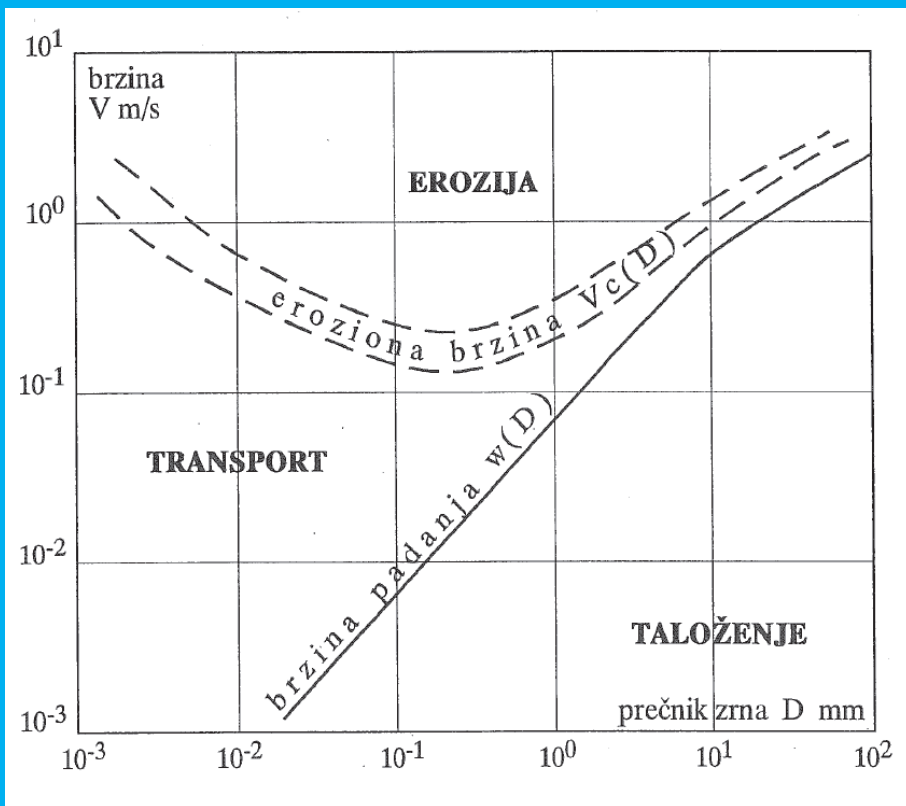
Hronološki dijagram proticaja (Q), koncentracije (K) i pronosa (P) suspendovanog nanosa u jednom bujično talasu



Na osnovu poznatog hidrograma bujičnog talasa bujičnog vodotoka, i poznate empirijske relacije hidrograma i psamograma može se pretpostaviti oblik realnog psamograma, a zatim izvršiti geometrijska šematizacija *sintetičkog psamograma*.

(Izvor: Petković, S. (1992) Odabrana poglavlja Hidraulike otvorenih tokova)

Hidraulički uslovi za eroziju i transport tla



(Izvor: Morgan, R.P.C. (2009) Soil Erosion and Conservation. John Wiley & Sons, Hoboken)

Na slici je prikazana zavisnost kritične brzine strujanja (V_c) od prečnika čestice (D), kao i zavisnost brzine padanja čestica (w) od prečnika (D). U zavisnosti od odnosa ovih veličina, mogu se izdvojiti tri zone:

- **Zona erozije**
- **Zona transporta**
- **Zona taloženja nanosa**