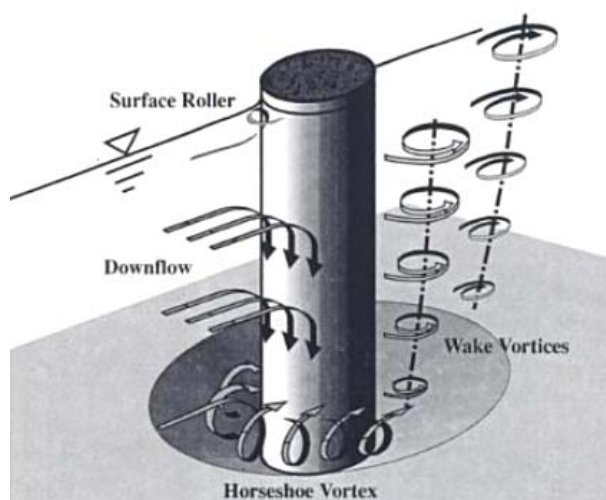


## 5. PRISTUPI PROBLEMU LOKALNE NESTABILNOSTI KORITA

Lokalna erozija u aluvijalnim koritima vodotoka javlja se na mjestima gdje je strujna slika poremećena uslijed utjecaja uronjenog tijela, uglavnom se radi o građevinama. Isto tako se javlja zbog pojave dodatnih strujanja uvjetovanih vanjskim utjecajima, a ne samo utjecajima gravitacijskog tečenja. Prvi slučaj pojavljuje se na primjer kod stupova mostova u koritu, upornjaka, regulacijskih građevina, podvodnih pragova i slično. Drugi slučaj javlja se kada se u tok vode unese dodatna energija, na primjer energija vjetra pa imamo pojavu valova. Dodatna energija može se unijeti u tok vode porivom vijka brodova i generacijom brodskih valova. Pojavu gore navedenih utjecaja moramo predvidjeti, procijeniti posljedice na korito koje mogu izazvati te pojave, te sukladno tome odrediti mjere kako posljedice ne bi ugrozile niti građevinu niti stabilnost korita vodotoka.

### 5.1 Lokalna erozija oko građevina

Građevina u toku vode lokalno smanjuje protjecajni profil, izaziva uspor i sukladno tome remeti strujnu sliku. Strujnice se produljuju i koncentriraju uz čvrstu konturu, zbog čega se povećava brzina i jedinični protok, što sve utječe na lokalno povećanje posmičnih naprežanja. Stvaraju se uvjeti za intenzivnije odnošenje materijala s dna korita, a sve je potpomognuto intenzivnijom turbulencijom. Građevine su predviđene da djelovanja vode na nju ne izazivaju oštećenja, međutim njihova stabilnost može biti ugrožena zbog ispiranja materijala u koritu vodotoka. Sam proces produbljenja korita u zoni utjecaja građevina je konačan, do trenutka uspostave ravnoteže, odnosno kada se izjednače količina nanosa koji ulazi u kavernu i količina nanosa koji se ispire iz kaverne  $(Q_s)_{ulaz} = (Q_s)_{izlaz}$ . Pronos nanosa obrnuto je proporcionalan promjeru zrna nanosa. U postupcima za određivanje dubine kaverne u zoni stupova mostova često ne figurira promjer zrna kao parametar. Autori to tumače činjenicom da se količina nanosa koji ulazi i izlazi iz kaverne mijenja proporcionalno promjeru zrna, a približno je istog reda veličine, pa na dubinu kaverne neće značajno utjecati promjer nanosa.



Slika 5.1 Strujna slika oko stupa mosta

### 5.1.1 Lokalna erozija oko stupova mostova

Najviše istraživanja o fenomenu lokalne erozije provedeno je za potrebe određivanja utjecaja oko stupova mostova. To je i za razumjeti, pogotovo iz razloga što je velik broj mostova pretrpio znatna oštećenja (pa i rušenje) upravo zbog toga utjecaja.

Lokalna erozija oko stupova mostova je samo jedan od elementa koji može ugroziti njihovu stabilnost. Stoga je prilikom analize fenomena potrebno uzeti u obzir sve moguće elemente, te ih kritički sagledati i adekvatno proanalizirati. U nastavku je dana pregledna tablica čimbenika koji utječu na konačnu dubinu erozije kod stupova mosta.

Čimbenici koji utječu na globalnu eroziju		Čimbenici koji utječu na lokalnu eroziju		
GEOMORFOLOŠKI / HIDROLOŠKI		OBILJEŽJA TOKA	MATERIJAL DNA KORITA	GEOMETRIJA MOSTA
Karakteristike sliva	oborine	učestalost poplava	srednja veličina zrna	otvor rasponske konstrukcije
	fizičke karakteristike sliva	hidrogram	neuniformnost zrna	stupovi mosta
	vegetacija	brzine tečenja	kohezija	upornjaci mosta
	karakteristike tla	srednja dubina toka	uslojenost	lokacija s obzirom na zakrivljenost rijeke
Karakteristike rijeke	položaj riječne doline	pronos nanosa	prostorni raspored	mjere zaštite od erozije
	položaj matice	pronos plutajućeg nanosa	uklještenost čestica na dnu	
	hidraulički parametri			
	tlocrtni oblik			
	stabilnost korita			

Tablica 5.I Čimbenici koji utječu na dubinu erozije kod stupova mosta.

Sam fenomen moguće je opisati ukoliko se uzmu u obzir svi utjecajni parametri, odnosno:

$$f(\mu, \rho, g, \bar{v}, h, d, \sigma_g, h_s, b_s, \varphi) = 0 \quad 5.1$$

Gdje su:

$\mu$  – dinamički koeficijent viskoznosti [ $\text{Ns/m}^2$ ]

$\rho$  – gustoća mase vode [ $\text{kg/m}^3$ ]

$g$  – ubrzanje sile teže [ $\text{m/s}^2$ ]

$\bar{v}$  – brzina toka vode [ $\text{m/s}$ ]

$h$  – dubina vode [m]

$d$  – karakteristični promjer zrna nanosa [m]

$\sigma_g$  – standardna devijacija granulometrije

$h_s$  – dubina erozijske kaverne [m]

$b_s$  – efektivna širina stupa [m]

$\varphi$  – kut koji zatvaraju smjer toka vode i horizontalna os stupa

Sukladno dimenzionalnoj analizi, možemo za osnovne fizikalne veličine uzeti gustoću vode, dubinu  $h$  i brzinu toka vode, pa se dobiva da je:

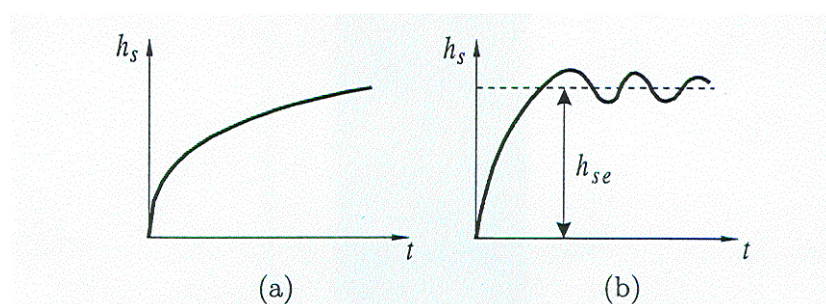
$$f_1(\text{Re}, Fr, \frac{h_s}{h}, \frac{d}{h}, \sigma_g, \frac{b_s}{h}, \varphi) = 0 \quad 5.2$$

Gdje su Reinoldsov i Froudov broj definirani kao:

$$\text{Re} = \frac{\bar{v}h}{\nu} \quad \text{i} \quad 5.3$$

$$Fr = \frac{\bar{v}^2}{gh} \quad 5.4$$

Iz gore navedene jednadžbe mogu se za posebne slučajeve izostaviti pojedini članovi (zanemaruje se njihov utjecaj). Tako se najčešće zanemaruje utjecaj viskoznosti i neuniformnost zrna nanosa. Parametar  $d/h$  se ne uzima u obzir ukoliko se radi slučaju takozvane čiste vode. Naime proces će imati različit karakter ukoliko se radi o fenomenu podlokavanja u vodi koja nije opterećena nanosom i ukoliko se radi o fenomenu gdje se koritom pokreće nanos. Na slici 5.2 je prikazan vremenski tijek promjene dubine kaverne za ta dva slučaja.



Slika 5.2 Vremenski tijek promjene dubine kaverne za vodu neopterećenu nanosom (a) i za vodu opterećenu nanosom (b)

Najjednostavniji slučaj je stup kružnog presjeka promjera  $D$ , ( $b_s=D$ ), pa time iz razmatranja otpada i kut otklona stupa na smjer toka vode, što jednadžbu svodi na oblik:

$$\frac{h_s}{D} = f_2(Fr, \frac{d}{D}, \frac{h}{D}) \quad 5.5$$

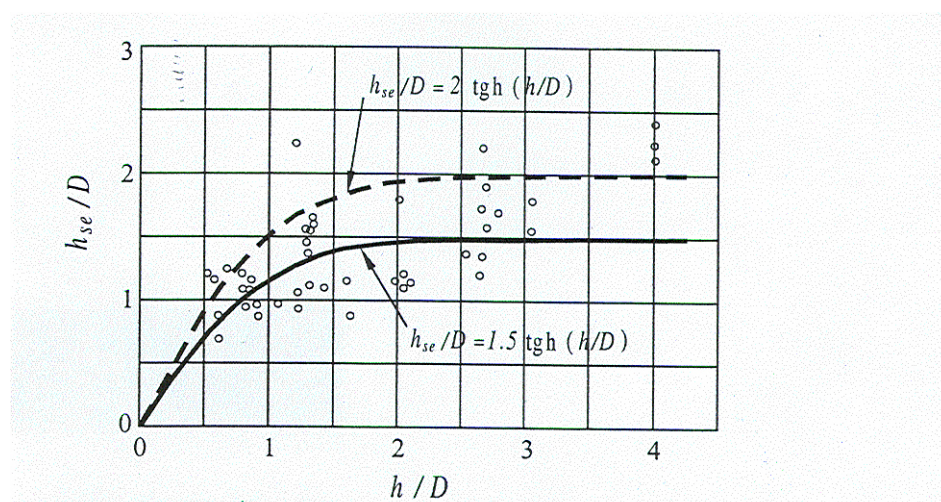
Istraživanja su pokazala da za konačnu dubinu kaverne  $h_{se}$  dominantan utjecaj ima odnos  $h/D$ . Na slici 5.3 je prikazana zavisnost parametara  $h_{se}/D$  i  $h/D$ , gdje se vidi veliki rasap točaka dobivenih na modelskom istraživanju. Ta činjenica ukazuje na to da treba biti vrlo oprezan prilikom korištenja izvedene empirijske zakonitosti:

$$\frac{h_{se}}{D} = 1,5 \operatorname{th} \left( \frac{h}{D} \right) \quad 5.6$$

Preporuka je, zbog sigurnosti koristiti takozvani zakon dvostrukog promjera, odnosno:

$$h_{se} = 2 D \quad 5.7$$

Treba upozoriti da ova jednadžba važi samo za sitnozrni materijal srednjeg promjera do nekoliko cm.



Slika 5.3 Ovisnost parametara  $h_{se}/D$  i  $h/D$ , za stup kružnog poprečnog profila

Općenito, horizontalni presjek stupova mostova ima profil različit od kružnog, pa je stoga i različit učinak na interakciju vode i korita oko stupova. U literaturi je više različitih formula razvijenih na laboratorijskim mjerenjima. Ovisno o tome koje su fizikalne veličine uzete u obzir kao dominantne, autori su dobivali i različite rezultate. Neke od jednadžbi će biti spomenute u nastavku. Općenito, dobiveno je da oblik poprečnog profila kružnog stupa daje 90% vrijednosti dubine kaverne u odnosu na pravokutni profil. Stup sa zašiljenom uzvodnom formom daje pak 80% vrijednosti u odnosu na pravokutni oblik.

Često citiran izraz za određivanje dubine kaverne izveo je Laursen (1962) prema čijem istraživanju vrijedi odnos:

$$\frac{b_s}{h} = 5,5 \frac{h_{se}}{h} \left[ \left( \frac{1}{11,5} \frac{h_{se}}{h} + 1 \right)^{1,69} - 1 \right] \quad 5.8$$

U eksperimentalnim istraživanjima, Laursen je koristio srednji promjer zrna nanosa od 0,46 do 2,2 mm.

Iz navedene jednadžbe, gdje je konačna dubina erozije  $h_{se}$  zadana implicitno, moguće je izvesti i njen eksplicitni oblik:

$$\frac{h_{se}}{b_s} = 1,5 \left( \frac{h}{b_s} \right)^{0,3} \quad 5.9$$

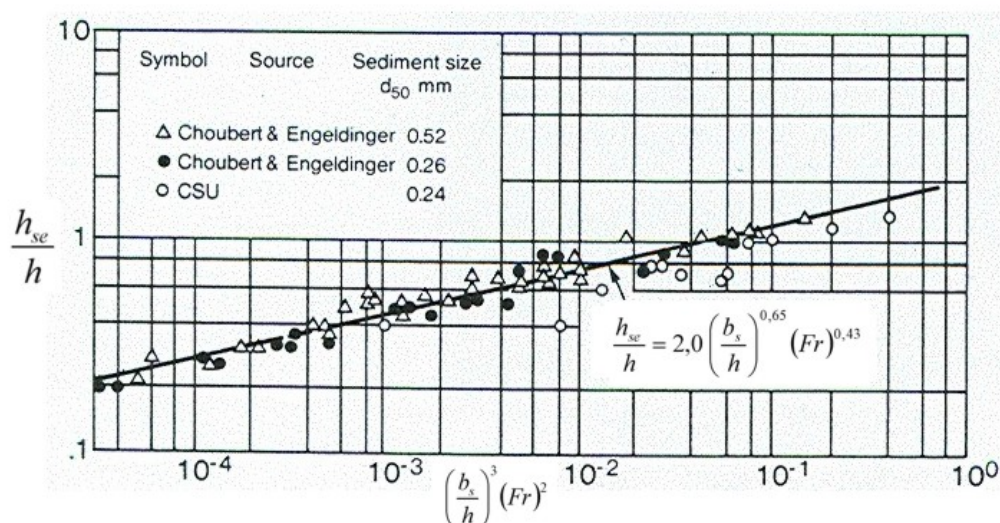
U kasnijim istraživanjima Shen i dr. (1969) uveden je i Froudov broj toka u zavisnost, te je dobiven oblik jednadžbe:

$$\frac{h_{se}}{b_s} = 3,4 (Fr)^{2/3} \left( \frac{h}{b_s} \right)^{1/3} \quad 5.10$$

Prema istraživanjima Colorado State University (1975) dobivena je takozvana CSU formula oblika (slika 5.4):

$$\frac{h_{se}}{h} = 2,2 \left( \frac{b_s}{h} \right)^{0,65} (Fr)^{0,43} \quad 5.11$$

Koeficijent 2,2 koristi se za pravokutne profile stupova, dok mu se vrijednost 2,0 koristi za kružne profile.



Slika 5.4 CSU formula za dubinu erozije za kružni profil stupa (za pravokutni veličinu treba povećati za 10%)

Osim navedenih jednadžbi postoji i niz drugih čija se forma navodi tablično u nastavku:

Melville:	$d_s = K_{yB} \cdot K_I \cdot K_d \cdot K_s \cdot K_\theta \cdot K_G \cdot K_t$	5.12
Larras:	$d_s = 1.05 \cdot K_s \cdot K_\theta \cdot b^{0.75}$	5.13
Laursen:	$d_s = b \cdot 1.34 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.5}$	5.14
Breusers:	$d_s = 1.4 \cdot b$	5.15
Shen <i>et al.</i> :	$d_s = 0.000223 \left(\frac{V \cdot b}{\nu}\right)^{0.619}$	5.16
Coleman:	$\frac{V}{\sqrt{2gd_s}} = 0.6 \left(\frac{V}{b}\right)^{0.9}$	5.17
Ansarijev & Qadar:	$d_s = 0.86 \cdot b_p^3$ za $b_p < 2.2m$ $d_s = 3.6 \cdot b_p^{0.4}$ za $b_p < 2.2m$	5.18
Hancu:	$\frac{d_s}{b} = 2.42 \left(\frac{y}{b}\right)^{1/3} \cdot Fr^{2/3}$	5.19
Jain:	$\frac{d_s}{b} = 1.84 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.3}$	5.20

Gdje su:  $K_{yB}$ ,  $K_I$ ,  $K_d$ ,  $K_s$ ,  $K_\theta$ ,  $K_G$  i  $K_t$  - empirijski parametri,  $V$  = srednja brzina toka,  $y$  = srednja dubina toka,  $d_s$  = srednja veličina zrna u sastavu korita,  $V_c$  = kritična brzina toka za pokretanje čestica dna korita,  $B$  = širina temelja,  $b$  = širina stupa.

Koeficijent odnosa srednje dubine toka i širine stupa  $K_{yB}$  predstavlja utjecaj dubine toka na eroziju u zavisnosti od širine stupa. Za duboke tokove u odnosu na širinu stupa dubina podlokavanja  $d_s$  raste proporcionalno sa dubinom toka, a ne ovisi o širini stupa. Vrijedi i obratno, tj. u relativno plitkim tokovima dubina podlokavanja  $d_s$  raste proporcionalno sa širinom stupa, a neovisna je o dubini toka. Koeficijent utjecaja odnosa dubine toka i veličine stupa dan je izrazima:

$$K_{yB} = 2.4 \cdot b \text{ za } \frac{b}{y} < 0.7$$

$$K_{yB} = 2 \cdot \sqrt{yb} \text{ za } 0.7 < \frac{b}{y} < 5$$

$$K_{yB} = 4.5 \cdot y \text{ za } \frac{b}{y} > 5$$

Koeficijent utjecaja intenziteta toka  $K_I$  predstavlja odnos dubine podlokavanja za određene hidrauličke uvjete i maksimalne dubine podlokavanja koja se javlja kod ekstremnih hidrauličkih uvjeta. Koeficijent utjecaja intenziteta toka je dan izrazom:

$$K_I = \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} \text{ za } \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} < 1$$

$$K_I = 1 \text{ za } \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} \geq 1$$

Za jednoliko graduirana riječna korita na dubina podlokavanja ne utječe veličina zrna materijala ako on nije izrazito krupan. Laboratorijski je utvrđeno da veličina zrna materijala utječe na dubinu podlokavanja u slučaju kada je  $b/d_{50} < 50$ . Koeficijent utjecaja veličine zrna sastava korita dan je izrazom:

$$K_d = 0.57 \cdot \log\left(2.24 \cdot \frac{b}{d_{50}}\right) \text{ za } \frac{b}{d_{50}} \leq 25$$

$$K_d = 1 \text{ za } \frac{b}{d_{50}} > 25$$

Koeficijent utjecaja oblika temelja  $K_s$  na dubinu podlokavanja predstavlja omjer dubine podlokavanja za promatrani oblik stupa u odnosu na neki standardni oblik, tj. kružni.

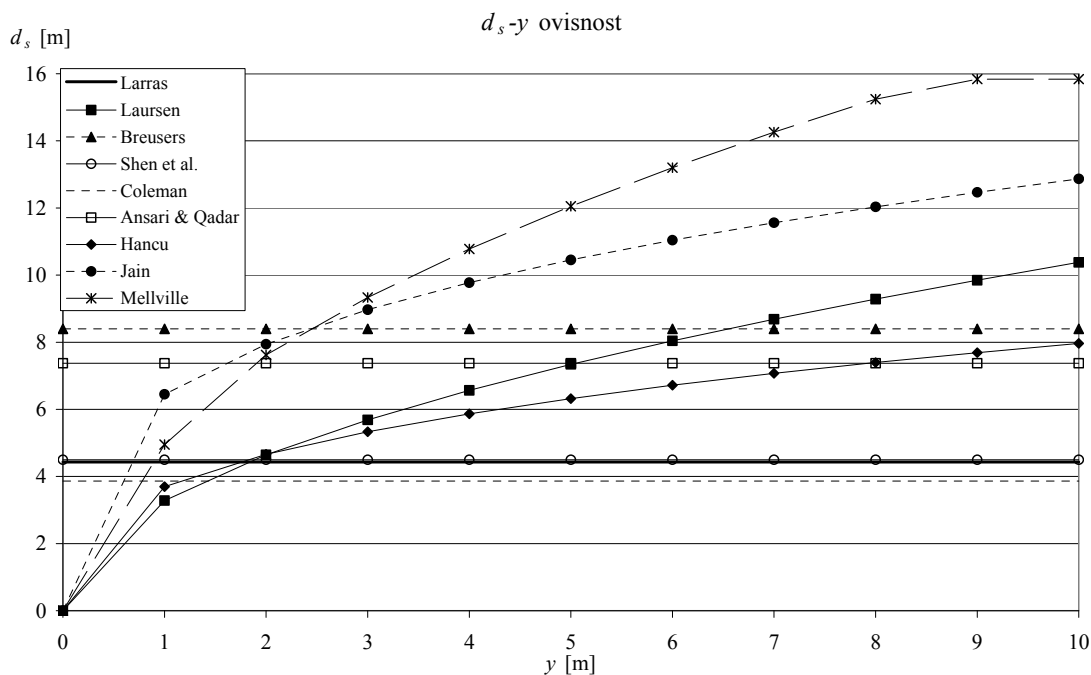
Koeficijent utjecaja otklona stupa od smjera toka  $K_\theta$  je definiran kao odnos dubine podlokavanja stupa postavljenog pod kutom u odnosu na glavni smjer toka i stupa postavljenog paralelno sa glavnim smjerom toka. Koeficijent utjecaja otklona stupa od smjera toka dan je izrazom:

$$K_\theta = \left(\frac{b_p}{b}\right)^{0.65} = \left(\frac{l}{b} \sin \theta + \cos \theta\right)^{0.65}$$

Koeficijent utjecaja oblika geometrije korita  $K_G$  predstavlja odnos lokalnog podlokavanja promatranog stupa i identičnog stupa postavljenog u ekvivalentnom pravokutnom kanalu. Smatra se da na lokalnu eroziju stupa ne utječe oblik geometrije korita ako se za izračun koriste terenski izmjerene veličine srednje brzine toka  $V$  i srednje dubine toka  $y$ .

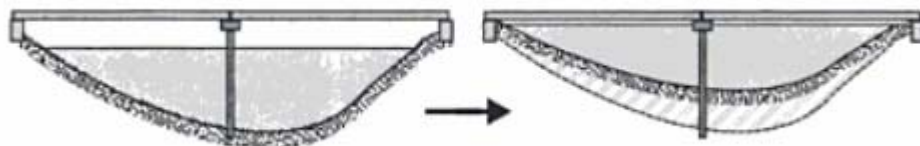
Koeficijent utjecaja vremena  $K_t$  predstavlja odnos lokalnog podlokavanja stupa u vremenu  $t$  i ravnotežne dubine podlokavanja  $d_{se}$ , koja se javlja u vremenu  $t_e$ .

Koliko gornje jednadžbe daju različite rezultate proračuna vidljivo je na slici 5.5

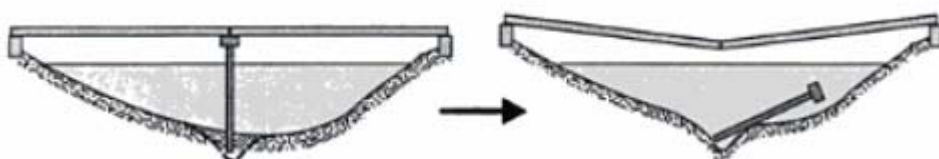


Slika 5.5 Ovisnost dubine podlokavanja  $d_s$  o promjeni dubine vode  $y$  (izmjerena dubina kaverne iznosi cca 5 m, dok je dubina srednje vode cca 6 m).

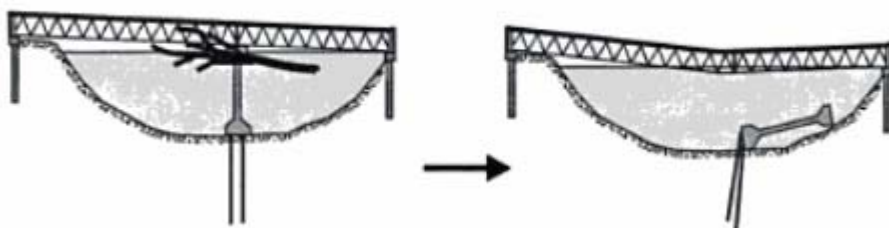
Kada se govori o stabilnosti mostova treba napomenuti da postoje i ostali neizravni utjecaji koji mogu međudjelovanje konstrukcije mosta i riječnog korita staviti izvan spomenutih mehanizama. Neki od mehanizama zbog kojih mostovi mogu otkazati nosivost dani su u nastavno u tablici.



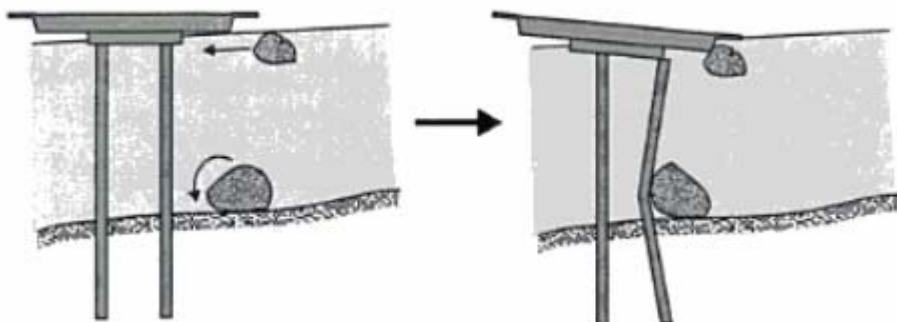
a) Zasipavanje korita može smanjiti protočnost i podići razinu vode i preko rasponske konstrukcije



b) Podlokavanje stupova uslijed različitih vrsta erozije



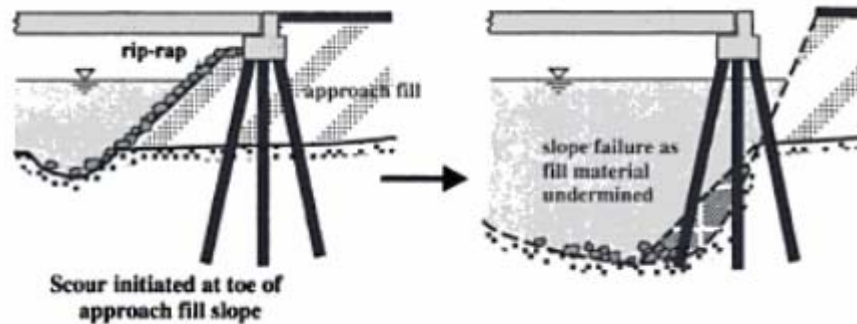
c) Oštećenja uslijed udara plutajućeg nanosa



d) Oštećenja uslijed udara kamena

Slika 5.6 Mogući mehanizmi otkazivanja nosivosti mostova.

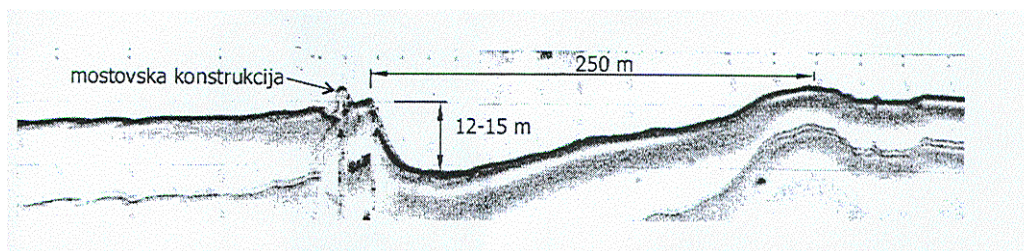




e) Erozija nožice upornjaka

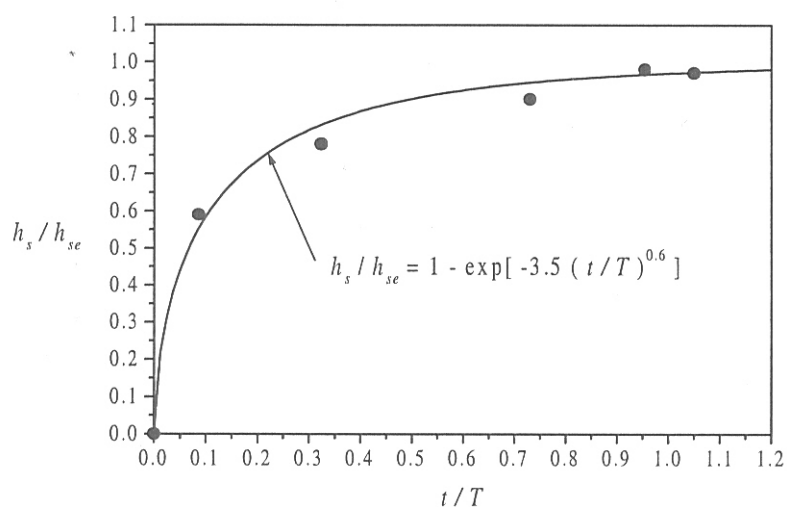
Slika 5.6 nastavak Mogući mehanizmi otkazivanja nosivosti mostova.

Sigurno je da je otkazivanje nosivosti mostova nepoželjno, no ako se ono i desi, moguće je da za sobom povuče niz drugih neželjenih učinaka. Jedan od njih je stvaranje uspora koji može izazvati poplave uzvodno, ali i uzročno-posljedično produbljenje korita nizvodno. Tako je na primjer srušeni takozvani Žeželjev most u Novom Sadu izazvao drastičnu promjenu strujne slike koja je za posljedicu imala izazivanje erozije korita Dunava velikih razmjera. Na slici je prikazan uzdužni profil kaverne nastale iza potopljene konstrukcije mosta.



Slika 5.7 Uzdužni profil kaverne nastale iza potopljene konstrukcije mosta šest mjeseci nakon rušenja.

Vremenski napredak produbljenja erozije prikazan je na slici 5.8.



Slika 5.8 Vremenski napredak produbljenja erozije iz Žeželjevog mosta na Dunavu

### 5.1.2 PROCJENA RIZIKA OD PODLOKAVANJA KOD MOSTOVA

Analizom 143 slučaja gubitka stabilnosti mostova se pokazalo da je najveći broj uzrokovan poplavom (tablica 5.III; Smith 1976.)

U 86 analiziranih rušenja od 1961.g. postotak rušenja uzrokovanih poplavom raste na 55% . Prema analizama uzroka može se zaključiti da je poplava, odnosno djelovanje vode najčešći uzrok gubitka stabilnosti.

<b>Uzrok gubitka stabilnosti mosta</b>	<b>broj havarija</b>	<b>udio [%]</b>
Neprimjerena izvedba konstrukcije ili privremenih radova	12	8
Nepovoljan odabir konstrukcije	5	3
Primjena nepovoljnih materijala ili tehnologije gradnje	22	15
Vjetar	4	3
Potres	11	8
<b>Poplava</b>	<b>70</b>	<b>49</b>
Zamor materijala	4	3
Korozija	1	1
Preopterećenje ili nesreća	14	10
<b>Ukupni broj havarija</b>	<b>143</b>	<b>100</b>

Tablica 5.III Uzrok gubitka stabilnosti mostova

Utjecaj poplave, odnosno vode, odnosi se na ispiranje i podlokavanje konstrukcije, bilo da se radi o stupovima ili upornjacima mostova. Standardne smjernice pri projektiranju mostova za životni vijek od 120 god različite su za pojedine zemlje, pa je tako za UK zaštitu od podlokavanja potrebno dimenzionirati na 200-god vodu, dok je za SAD zaštitu od podlokavanja potrebno dimenzionirati na 100-god veliku vodu.

Ove smjernice su prvotno bile usvojene za građevine projektiranog životnog vijeka od 60 godina, a za tako mali projektni vijek mala je i vjerojatnost pojave ekstremnih uvjeta na slivu.

Ako se ove smjernice primjene na građevine životnog vijeka 120 godina dolazi se do većih vjerojatnosti pojave ekstremnih uvjeta na slivu (100-god poplava 70%, 200-god poplava 45%)

Ako se usvoji pretpostavka da će projektni uvjeti biti premašeni zaštita od podlokavanja će izgubiti funkciju, što za posljedicu ima rušenje mosta. Ponovna izgradnja mosta i vezani troškovi oštećenja koja su posljedica rušenja mosta, zajedno sa troškovima povećanja standarda zaštite od podlokavanja se mogu lako izračunati. S druge strane rizik je definiran kao:

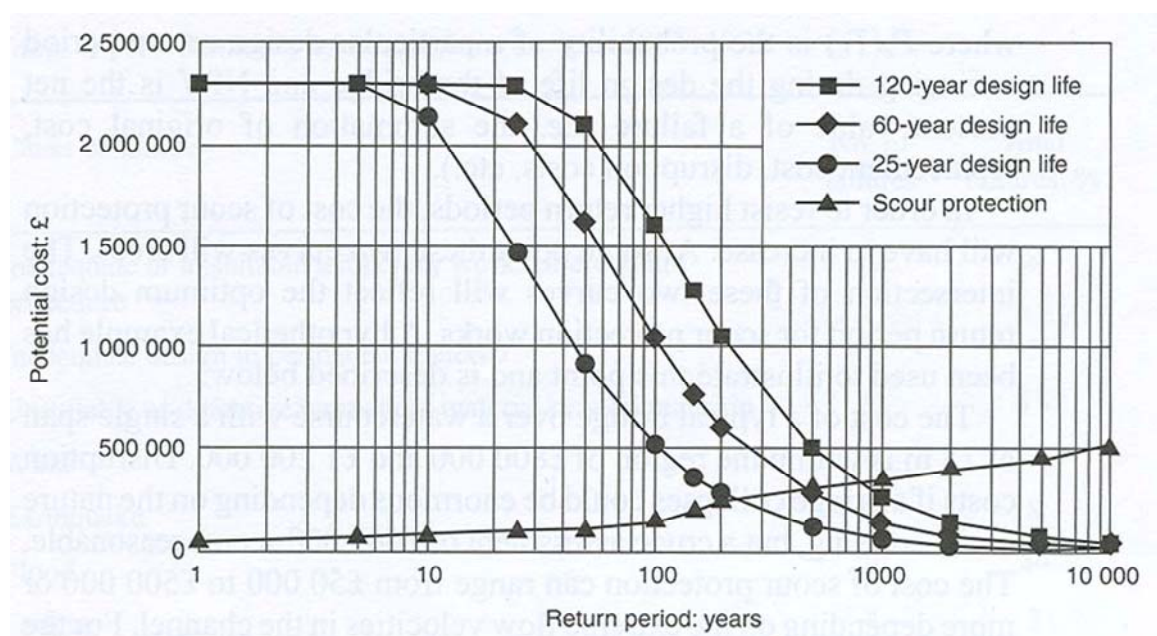
$$Rizik = P_e(PP) \times NSV \quad 5.21$$

gdje su:  $P_e(PP)$  – vjerojatnost pojave određenog projektnog povratnog perioda  
 $NSV$  – neto sadašnja vrijednost troškova gubitka stabilnosti (tj. suma troškova izgradnje, ponovne izgradnje, oštećenja,..)

Povećanje projektnog povratnog perioda uzrokuje povećanje cijene izrade zaštite od podlokavanja, a smanjenje troškova zbog gubitka stabilnosti za ukupni period korištenja objekta.

Sjecište krivulje troškova zaštite od podlokavanja i troškova zbog gubitka stabilnosti predstavlja optimalni projektni povratni period za radove zaštite od podlokavanja (slika 5.9)

Na slici su dane krivulje rizika za tri različite trajnosti, a pokazuje da optimalni projektni povratni period značajno varira od 200-god povratnog perioda za životni vijek konstrukcije od 25 godina do 800-god povratnog perioda za životni vijek konstrukcije od 120 godina.



Slika 5.9 Krivulje troškova zaštite od podlokavanja i troškova zbog gubitka stabilnosti

Pri projektiranju treba razumjeti odnos životnog vijeka konstrukcije i projektnog povratnog perioda. Ako se zanemari, prihvaćeni rizik bi mogao biti manji od stvarno potrebnog!

Vidljivo je da ekonomske posljedice zbog gubitka nosivosti diktiraju razinu sigurnosti koja mora biti prihvaćena. Parametri rizika su međusobno povezani, pa nerazumno povećanje jednog može nepovoljno djelovati na drugi. Na primjer, povećanje projektnog povratnog perioda do te mjere da se potopi kolnička konstrukcija predstavlja takav kriterij pri kojem je uzaludno dimenzioniranje na podlokavanje jer ono tada nije kritično za gubitak stabilnosti.

Svaki projekt zahtijeva zasebnu procjenu projektnog povratnog perioda i razine rizika, a objavljene smjernice mogu poslužiti samo kao prijedlog za početak izračuna!

## 5.2 LOKALNA NESTABILNOST UZROKOVANA VALOVIMA I STRUJAMA

Lokalna nestabilnost korita vodotoka uzrokovana valovima i strujama spada u posebnu kategoriju. Razlog je stoga što uzrok pojave strujanja vode nije gravitacijsko tečenje, kao što je do sada bilo analizirano, već unošenje energije ili plovilima, ili vjetrom. Tako ćemo u grupu problema analiziranih u ovome poglavlju svrstati sljedeće fenomene:

- Valovi generirani kretanjem broda
- Struje inducirane porivom brodskog vijka
- Sekundarni tok vode uzrokovan prolaskom broda
- Valovi generirani vjetrom

Valovi, bez obzira na mehanizam njihovog nastajanja, stvarat će probleme stabilnosti uglavnom na pokosima korita vodotoka. Razlog tomu je činjenica da će brzine čestica vode, zbog dulje trajektorije, pri površini u valnom polju biti veće nego li pri dnu. S druge strane, struje inducirane brodskim vijkom i sekundarni tok vode mogu uzrokovati nestabilnosti i na pokosima i na dnu korita.

### 5.2.1 Opterećenje pokosa strujama uzrokovanim plovilima

Prilikom prolaska plovila vodotokom, pojavit će se niz dodatnih strujanja čestica vode u okviru pojave:

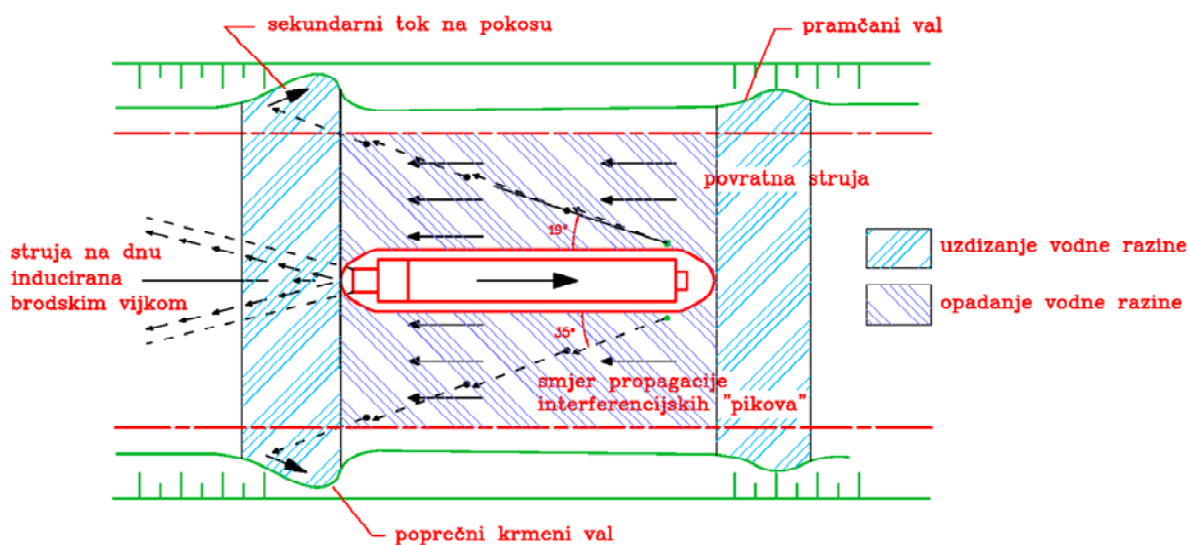
- pramčanog vala,
- poprečnog krmenog vala,
- sekundarnog toka vode i
- pojave struje inducirane brodskim vijkom (porivom).

Na slici 5.10 shematski su prikazane komponente struja vode uzrokovane prolaskom plovila.

Prvenstveno je, za sve inženjerske analize, potrebno odrediti djelovanja uzrokovana prolaskom plovila na korito vodotoka. Za određivanje hidrauličkog opterećenja obale (obaloutvrde) uzrokovano plovilima, potrebno je definirati sljedeće veličine:

- Maksimalni ekscentricitet plovidbe
- Proračunsku maksimalnu brzinu plovidbe
- Mjerodavnu brzinu plovila
- Srednju brzinu povratne struje i srednje sniženje razine vode
- Maksimalnu brzinu povratne struje i maksimalno sniženje razine vode
- Parametre poprečnog krmenog vala
- Parametre pramčanog vala
- Parametre sekundarnog vala
- Brzinu struje na dnu inducirane brodskim vijkom

U nastavku će biti prikazani postupci određivanja gore navedenih parametara.



Slika 5.10 Komponente kretanja vode uslijed kretanja plovila

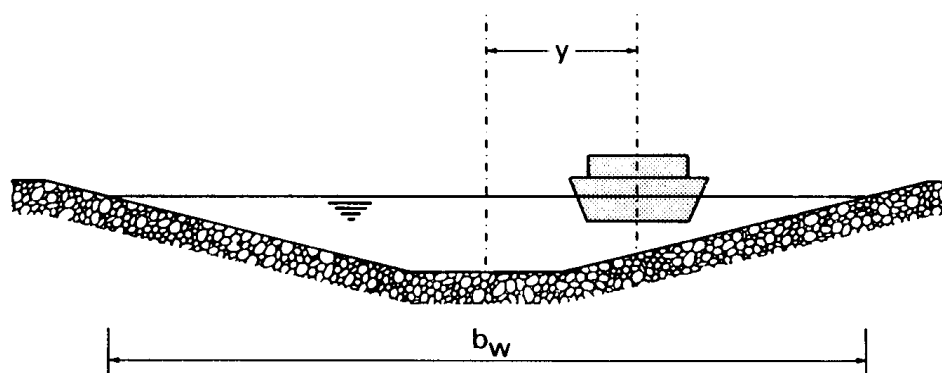
### 5.2.1.1 Maksimalni ekscentricitet plovidbe $y$

Maksimalni ekscentricitet plovidbe određuje se za konkretni plovni gabarit na vodotoku te za konkretno mjerodavno plovilo u rasponu:

$$0 < y < \frac{b_w}{3}$$

gdje je:

$b_w$  - širina vodnog lica korita



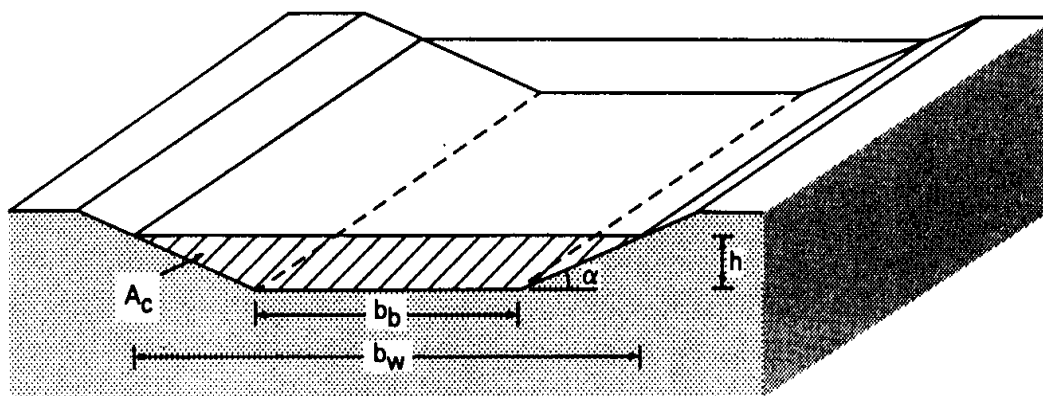
Slika 5.11 Definijska skica za određivanje maksimalnog ekscentriciteta plovidbe

U slučaju ekscentrične plovidbe, površina protočnog presjeka  $A_c$  se mora pri proračunima zamijeniti s vrijednošću  $A_{ci}$  (imaginarna površina protočnog presjeka ) korištenjem sljedećeg izraza:

$$\frac{A_{ci}}{A_c} = 1 - c_2 \frac{y}{b_w - hcot\alpha}$$

Gdje je koeficijent  $c_2$  određen s obzirom na vrstu plovila (plovnog sastava).

potisni sastav	$c_2 = 0,4 \div 0,64$
motorna barža	$c_2 = 1,04 \div 1,28$



Slika 5.12 Definijska skica za određivanje imaginarnog protočnog presjeka

ECMT Class	Typical vessel	
I	Motor vessel: Spits (300t) 39 x 5.1 x 2.4m	
II	Motor vessel: Kempenaar (800t) 55 x 6.6 x 2.5m	
III	Motor vessel: Dortmund - Eems Canal ship (1000t) 67.8 x 8.2 x 2.6m	
IV	Motor vessel : Rhine Herne canal ship (1350t) 85 x 9.5 x 2.8m	Push tow unit : (1700t) 70.5 x 9.5 x 3.2m
V	Motor vessel : Large Rhine vessel (2000t) 95 x 11.5 x 2.7m	Push tow unit : (2250t) 76.5 x 11.4 x 3.2m
VI	Push tow unit : (2 x 2250t) 153 x 11.4 x 3.2m	
	(Also navigable in IV and V)	
	Push tow unit : (2 x 2250t) 76.5 x 22.8 x 3.2m	
	Push tow unit : (4 x 2250t)	
	Push tow unit : (6 x 2250t)	

Slika 5.13 Tipovi plovila i plovnih sastava na unutrašnjim plovnim putovima

### 5.2.1.2 Proračunska maksimalna brzina plovidbe $v_L$

Može se odrediti za poznati presjek kanala iz Schijfove jednadžbe:

$$\frac{v_L}{\sqrt{gh'}} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{A_m}{A_c} + \frac{v_L^2}{2gh'}\right)^{\frac{3}{2}}$$

gdje su:

$$h' = \frac{A_{c_i}}{b_w} - \text{imaginarna dubina vode}$$

$A_{c_i}$  - imaginarna površina protočnog presjeka

$A_m$  - površina poprečnog omočenog presjeka plovila (slika 5.12).

Rješenje Schijfove jednačbe moguće je pronaći pomoću dijagrama na slici 5.14.

### 5.2.1.3 Brzina plovila $v_s$

Općenito, brzina plovila uzima se kao

$$v_s = 0,9v_L$$

### 5.2.1.4 Proračun srednje brzine povratne struje $\bar{u}_r$ i srednjeg sniženja razine vode $\Delta\bar{h}$

Dva su temeljna pristupa teoriji:

- energetski pristup (Schijf)
- pristup momenta (Bouwmeester, Sharp i Fenton)

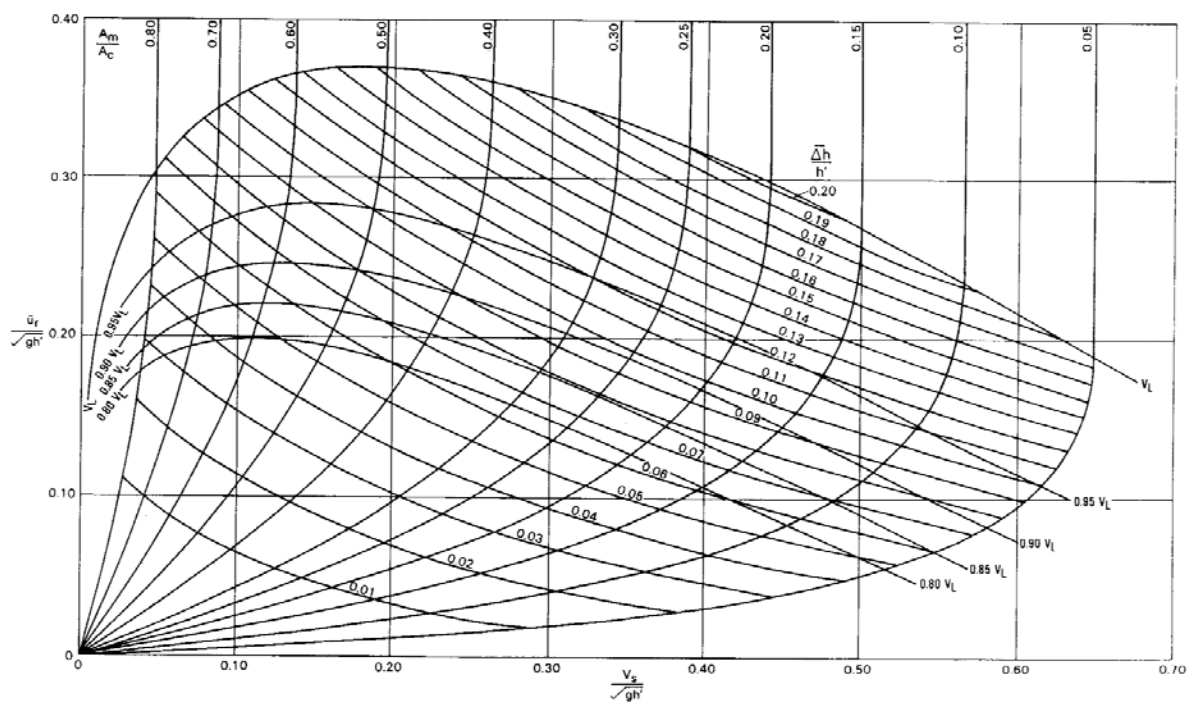
Oba pristupa su upotrebljiva za plovila koja se kreću uzduž osi korita. U skladu s istraživanjima oba pristupa su primjenjiva za područje  $2 < \frac{b_w}{B_s} < 12$ , gdje je  $B_s$  širina plovila.

Postupci Schijf-a te Sharp-a i Fenton-a daju usporedive rezultate. Oba postupka su preporučena posebno za opterećene potisne sastave. Za ostale tipove plovila preporuča se postupak Bouwmeestera.

Za prvu procjenu može se koristiti Schijfov postupak, dok je za detaljnije proračune potrebno konzultirati mjerodavnu istraživačku organizaciju.

Rješenje Schijfove jednačbe moguće je pronaći pomoću dijagrama na slici 5.14.





Slika 5.14 Schijfov dijagram

Gornja slika se može koristiti za rješavanje sljedećih jednadžbi Schijfova energetskog postupka:

$$\Delta \bar{h} = \frac{v_s^2}{2g} \left[ \alpha_1 \left( \frac{A_c}{A_w} \right)^2 - 1 \right]$$

$$A_c v_s = A_w (v_s + \bar{u}_r)$$

$$A_w = b_b (h - \Delta \bar{h}) + m (h - \Delta \bar{h})^2 - A_m$$

gdje je:

$$\alpha_1 = (1,4 \div 0,4) \frac{v_s}{v_L}$$

### 5.2.1.5 Proračun maksimalne brzine povratne struje $\hat{u}_r$ i maksimalnog sniženja razine vode $\Delta \hat{h}$

Maksimalne vrijednosti brzine povratne struje i sniženja razine vode potrebno je odrediti za svaki tip plovila.

#### *i. Potisna jedinica*

$$\Delta \hat{h} = c_3 \Delta \bar{h}$$

$$\hat{u}_r = c_3 \bar{u}_r$$

gdje je:

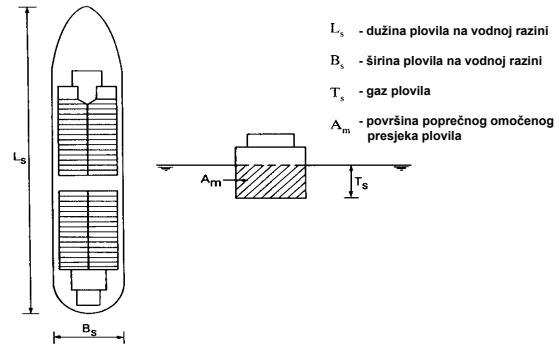
$$c_3 = 1,2 + 5 \cdot 10^{-4} F_h^2 \frac{b_w}{y_t} \frac{L_s^2}{h\sqrt{A_m}}$$

gdje su:

$$F_h = \frac{v_s}{\sqrt{gh}} \quad \text{- Froudeov broj}$$

$$y_t = 0,5b_w - y - 0,5h\cot\alpha \quad \text{- horizontalni razmak između osi plovila i obale}$$

$L_s$  - duljina plovila



Slika 5.15 Geometrija plovila

### ii. Motorne barže

$$\text{za } \frac{b_w}{L_s} > 1,5; \quad \begin{cases} \Delta\hat{h} = \Delta\bar{h} \left( 3 - 4 \frac{A'_c}{A_c} \right) \\ \hat{u}_r = \bar{u}_r \left( 2,5 - 3 \frac{A'_c}{A_c} \right) \end{cases}$$

$$\text{za } \frac{b_w}{L_s} < 1,5; \quad \begin{cases} \Delta\hat{h} = \Delta\bar{h} \left( 2 - 2 \frac{A'_c}{A_c} \right) \\ \hat{u}_r = \bar{u}_r \left( 1,5 - \frac{A'_c}{A_c} \right) \end{cases}$$

gdje su:

$A'_c$  - površina poprečnog presjeka kanala između osi plovila i obale

$\Delta\bar{h}$  i  $\bar{u}_r$  su vrijednosti za plovidbu po sredini plovnog puta

### iii. Tegljač (remorker)

$$\hat{u}_r = -1,33 + 7,86 F_h^{2,33} \left( \frac{A_m b_w}{A_c y_t} \frac{L_s^2}{h\sqrt{A_c}} \right)^{0,17} \geq 0,4 \quad [\text{m/s}]$$

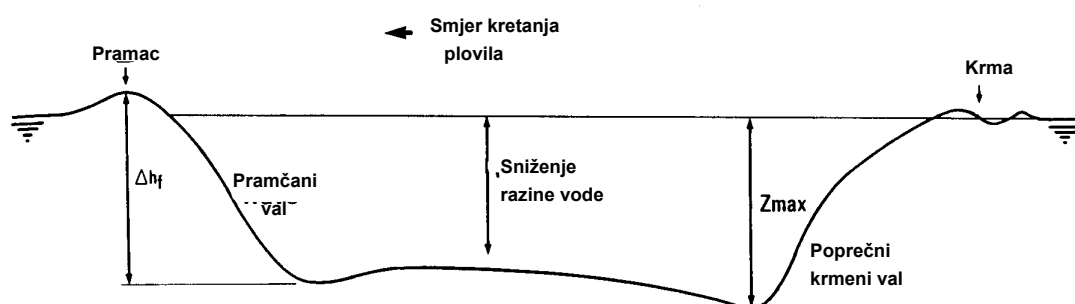
$$\Delta\hat{h} = -0,875 + 6,25 F_h^{2,67} \left( \frac{A_m b_w}{A_c y_t} \frac{L_s^2}{h\sqrt{A_c}} \right)^{0,33} \geq 0,2 \quad [\text{m}]$$

#### 5.2.1.6 Proračun visine poprečnog krmenog vala $z_{max}$

Visina poprečnog krmenog vala može se uzeti:

$$z_{max} = \Delta\hat{h}$$

Strmost ovog vala ovisi o  $z_{max}$ , ali je ograničena vrijednošću između 0,1 i 0,15.



Slika 5.16 Profil granične vodne površine uslijed kretanja plovila

### 5.2.1.7 Proračun visine pramčanog vala $\Delta h_f$

Visina pramčanog vala može se uzeti:

$$\Delta h_f = 0,1\Delta\bar{h} + \Delta\hat{h}$$

Strmost pramčanog vala ovisi o  $\Delta h_f$  i ekscentricitetu plovidbe  $y$  i procjenjuje se kao  $0,03\Delta h_f$ .

### 5.2.1.8 Proračun sekundarnog vala

Sekundarni val nastaje interferencijom valova, a visina pikova na obaloutvrđi se određuje kao

$$H_i = h \left( \frac{s}{h} \right)^{-0,33} F_h^4$$

gdje je  $s$  - udaljenost od boka plovila do obale.

Duljina sekundarnog vala određuje se iz:

$$L_{w_i} = 0,67 \cdot 2\pi \frac{v_s^2}{g}$$

$$\text{za } 6,5 < h < 8,5 \Rightarrow F_h < 0,7$$

Smjer rasprostiranja može se uzeti  $55^\circ$  okomito na obalu.

Sekundarni valovi generirani potisnim sastavima obično nisu određujuće opterećenje.

5.2.1.9 Brzina struje na dnu inducirane brodskim vijkom  $u_b$ 

$$u_b = \alpha_2 u_0 \frac{D_0}{z_b}$$

gdje su:

$u_b$  - brzina struje na dnu

$$u_0 = 1,15 \left( \frac{P_D}{D_0^2} \right)^{0,33} \text{ - osna brzina}$$

$\alpha_2$  - koeficijent koji varira između 0,25 i 0,75 ovisno o tipu broda i obliku kormila

$z_b$  - vertikalni razmak osi vijka i dna

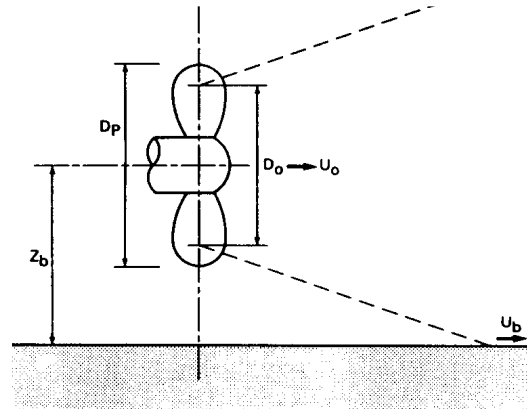
$D_0$  - inicijalni promjer struje vijka

$$D_0 = D_p \text{ - za brodove s vijkom u mlaznici}$$

$$D_0 = 0,7 D_p \text{ - za brodove bez mlaznice}$$

$D_p$  - promjer vijka

$P_D$  - instalirana snaga motora u [kW]



Slika 5.17 Brzina struje iza brodskog vijka

Navedena formula vrijedi za brodove koji kreću sa sidrišta.

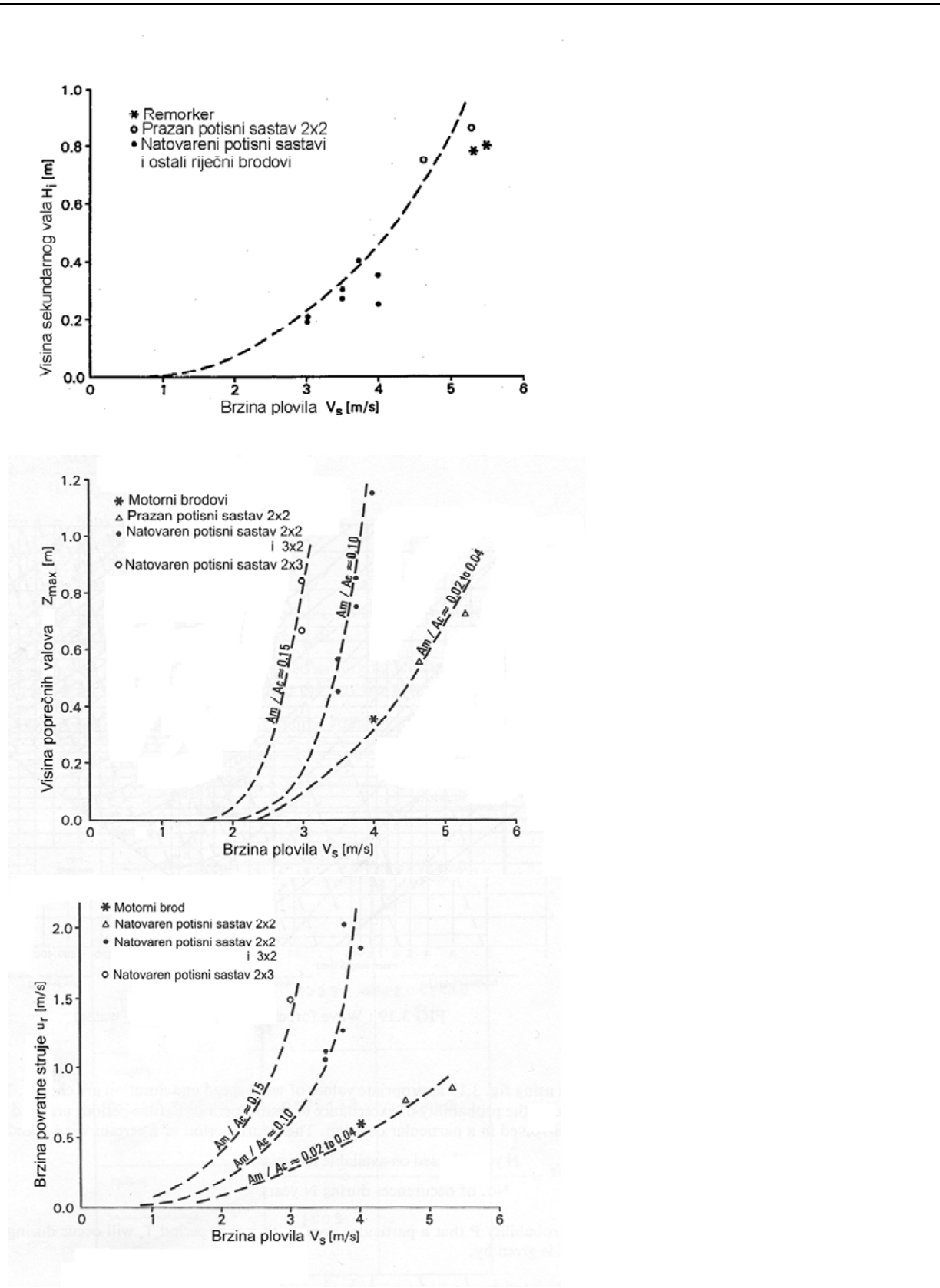
Za brodove na plovnom putu ( $v_s \neq 0$ ), brzina struje na dnu uzrokovane brodskim vijkom je od male važnosti.

U donjoj tablici dana je procjena brzina struje na dnu.

$v_s$ [m/s]	0	1	2
$u_b$ [m/s]	2,5	2,0	1,5

Tablica 5.IV Procjena brzina struje na dnu inducirane brodskim vijkom

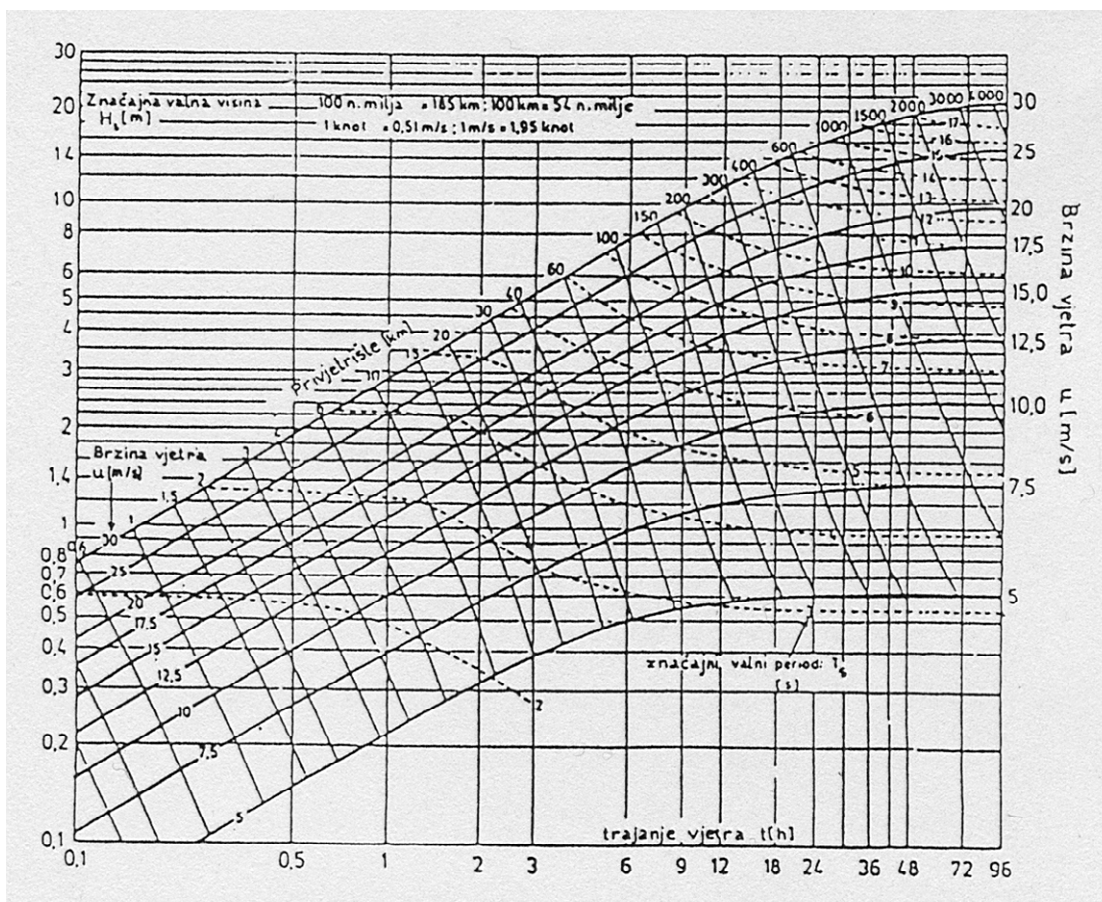
Razina oštećenja je proporcionalna trajanju djelovanja i veličini brzine struje.



Slika 5.18 Mjerenja stvarnih veličina gibanja vode uzrokovanih prolaskom plovila na kanalu Hartel (Nizozemska)

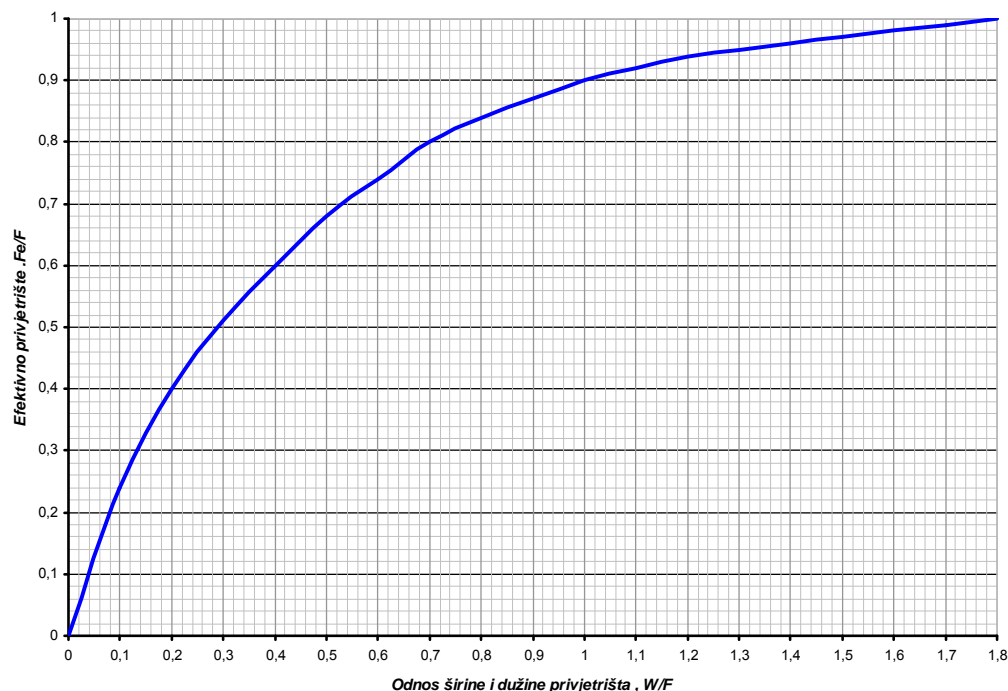
### 5.2.2 Opterećenje pokosa vjetrovnim valovima

Vjetrovni valovi na prirodnim vodotocima, bez obzira na ograničenje privjetrišta mogu doseći parametre nezanemarivog reda veličine. Kao što je poznato, osnovni valni parametri su valna visina  $H$  [m], valni period  $T$  [s] i valna duljina  $L$  [m]. Utjecajni faktori vjetrovnih valova su brzina vjetra (jačina), duljina i oblik privjetrišta, trajanje vjetra i dubina vode. Postoji niz različitih postupaka za određivanje parametara vjetrovnih valova temeljem navedenih utjecajnih faktora. Na slici 5.19 dan je prognostički dijagram za određivanje vjetrovnih parametara.



Slika 5.19 Prognostički dijagram za određivanje parametara vjetrovnih valova

Specifičnost uvjeta generacije vjetrovnih valova u odnosu na uvjete koji se ostvaruju na morima je ograničenje širine privjetrišta. Uglavnom se srećemo s uvjetima kada je odnos širine i duljine privjetrišta manji od jedan. U tim uvjetima potrebno je reducirati duljinu privjetrišta na veličinu takozvane duljine efektivnog privjetrišta, e sa tako dobivenom vrijednosti ulazimo u daljnje analize. Na slici 5.20 dan je graf temeljem kojeg se može odrediti veličina redukcijskog faktora s kojim je potrebno množiti duljinu privjetrišta s obzirom na odnos njegove širine i duljine.



Slika 5.20 Graf za određivanje efektivnog privjetrišta

### 5.2.3 Dimenzioniranje kamene obloge

Nakon određivanja hidrauličkog opterećenja obaloutvrde uzrokovanog plovilima, potrebno ju je dimenzionirati na djelovanje poprečnog krmenog vala, na djelovanje sekundarnog vala, na djelovanje povratne struje i na djelovanje struje na dnu inducirane brodskim vijkom.

Dimenzioniranje obloge ovisi o njenom tipu. Ukoliko se radi o oblozi od kamenog nabačaja, takozvani rip-rap, tada je moguće koristiti obrasce za proračun dane u nastavku.

Za druge tipove obloga postupci su drugačiji i njihov razvoj je uglavnom vezan uz istraživanja proizvođača patentiranih sustava. Tako postoje obrasci za proračune veličine ispunje gabionskih madraca, veličine betonskih blokova (uklještenih i povezanih) itd.

Pod dimenzioniranjem kamene obloge podrazumijeva se:

- odabir mjerodavnog promjera zrna
- određivanje granice granulometrije unutar kojih se treba naći sastav materijala za oblogu
- određivanje debljina obloge

### 5.2.3.1 Odabir mjerodavnog promjera zrna kamene obloge

Nastavno se daju postupci za određivanje mjerodavnog promjera zrna kamene obloge  $D_{n50}$ [m] za različita djelovanja.

Poprečni krmeni val (Laboyrie):

$$D_{n50} \geq \frac{z_{\max}}{1.5(\cot \alpha)^{1/3} \cdot \Delta_m},$$

gdje je :

$$\Delta_m = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

Sekundarni brodski valovi (Verhey i Pilarczyk):

$$D_{n50} \geq \frac{H_i (\cos \beta)^{0.5}}{1.8 \cdot \Delta_m}$$

gdje je  $\beta = 55^\circ$  - kut propagacije vala u odnosu na obalu

Djelovanje povratne struje:

$$D_{n50} \geq \frac{0.7 \cdot \hat{u}_r^2}{g \cdot \Delta_m \cdot k}$$

gdje su:

$$k = \cos \alpha \left( 1 - \frac{\tan^2 \alpha}{\tan^2 \varepsilon_s} \right)^{0.5}$$

$\hat{u}_r$  - maksimalna povratna struja ili maksimalna prirodna struja (ovisno koja je veća), [m/s]

$\varepsilon_s$  - prirodni kut unutrašnjeg trenja kamene obloge

Djelovanje struje broskog vijka:

$$D_{n50} \geq \frac{1.3 \cdot u_b^2}{g \cdot \Delta_m \cdot k}$$



Veličina zrna obloge za vjetrovne valove:

$$d_{n50} \geq \frac{H^{proj} \sqrt{\xi}}{2,25 \cdot \Delta_m}$$

gdje je:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\left( \frac{H^{proj}}{L_o} \right)^{1/2}}$$

### 5.2.3.2 Granulacija kamene obloge

Raspodjela mase kamena određena je s tri karakteristične veličine mase  $W_{100}$ ,  $W_{50}$  i  $W_{15}$ . Masa nazivnog zrna  $W_{50}$  određuje se iz izraza

$$W_{50min} = \rho_s \cdot D_{n50}^3$$

gdje su:

$\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] - gustoća mase kamena,

$W_{50min}$  [kg] - minimalna vrijednost mase nazivnog zrna

Ostale karakteristične veličine mase su određene odnosima:

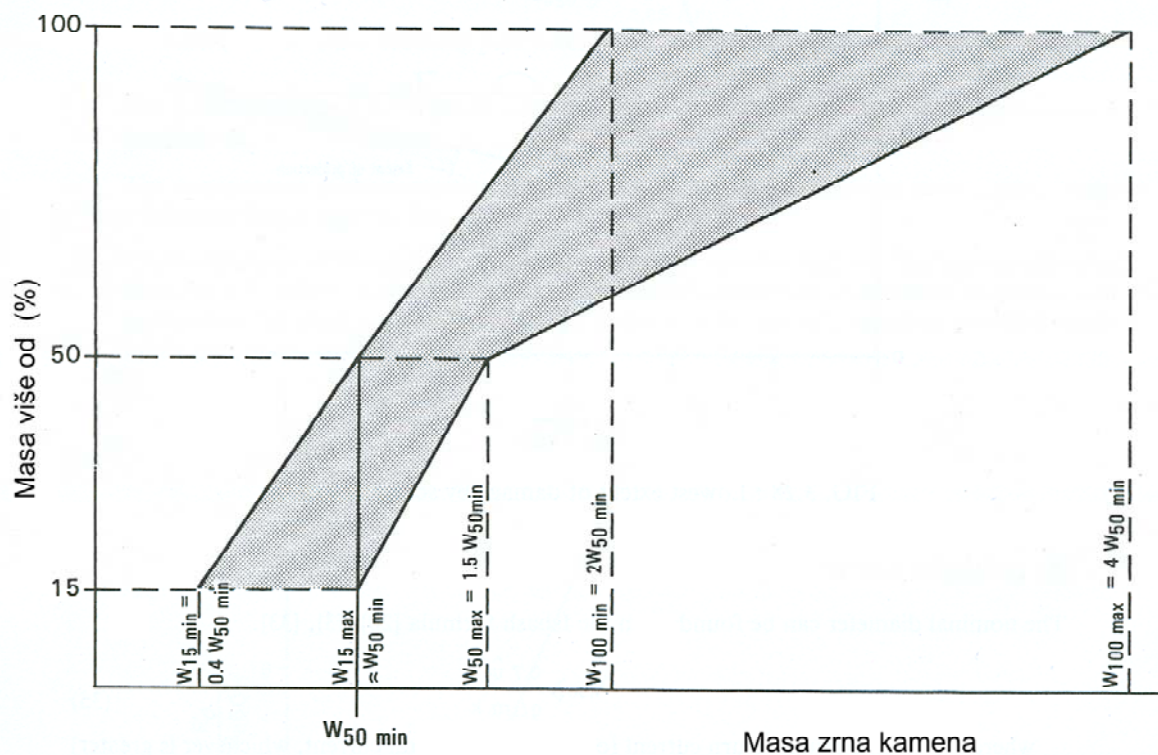
$$W_{50max} = 1.5 \cdot W_{50min}$$

$$W_{100min} = 2 \cdot W_{50min}$$

$$W_{100max} = 4 \cdot W_{50min}$$

$$W_{15min} = 0.4 \cdot W_{50min}$$

$$W_{15max} = W_{50min}$$



Slika 5.21 Područje unutar kojeg treba biti granulometrija kamene obloge

### 5.2.3.3 Odabir debljine kamene obloge

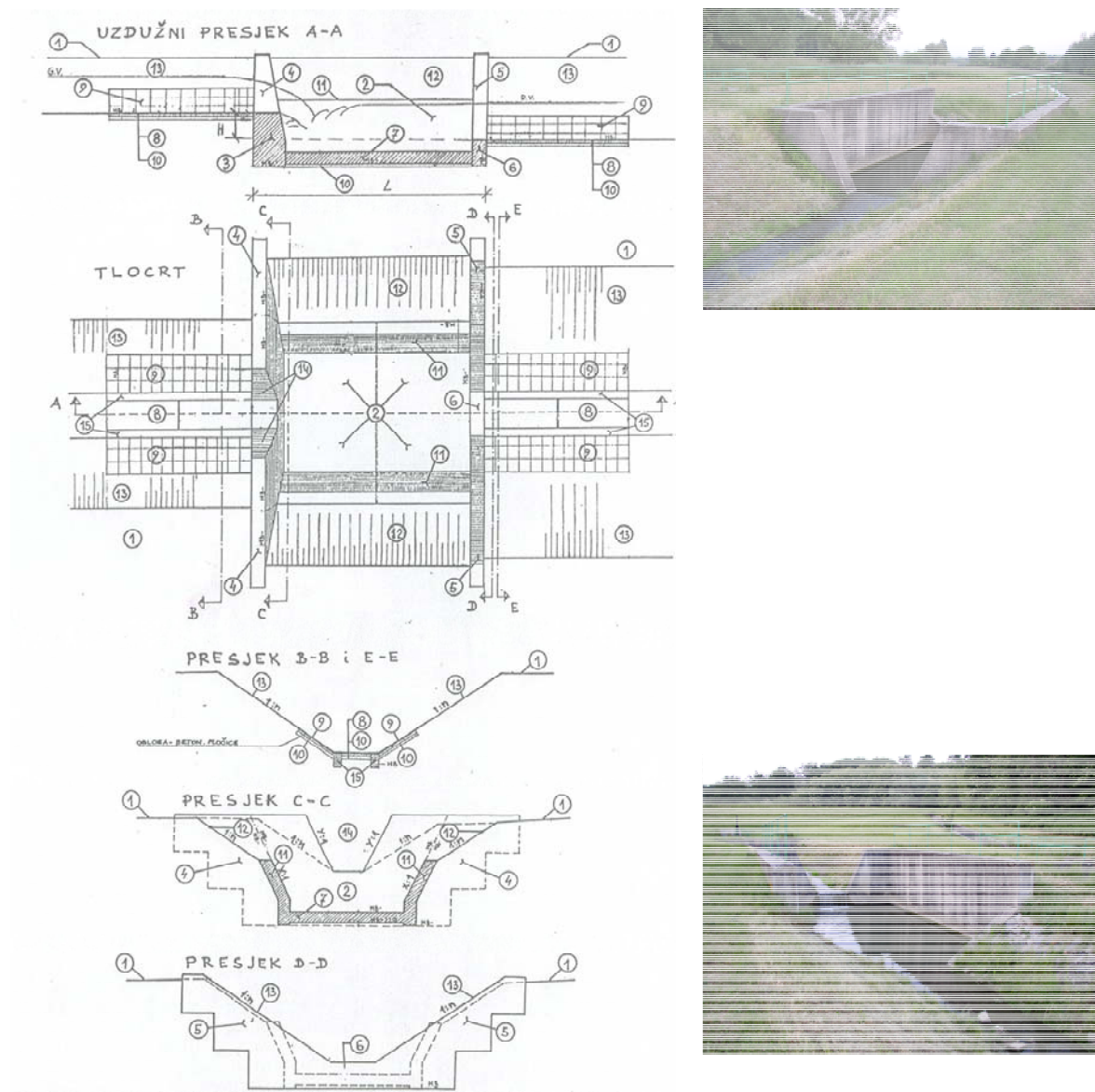
Kamena obloga se uglavnom projektira u dva sloja. Tako da će debljina sloja  $d$  biti vezana uz promjer mjerodavnog zrna  $D_{n50}$ .

$$d = (1,5 \text{ do } 1,8) D_{n50}.$$

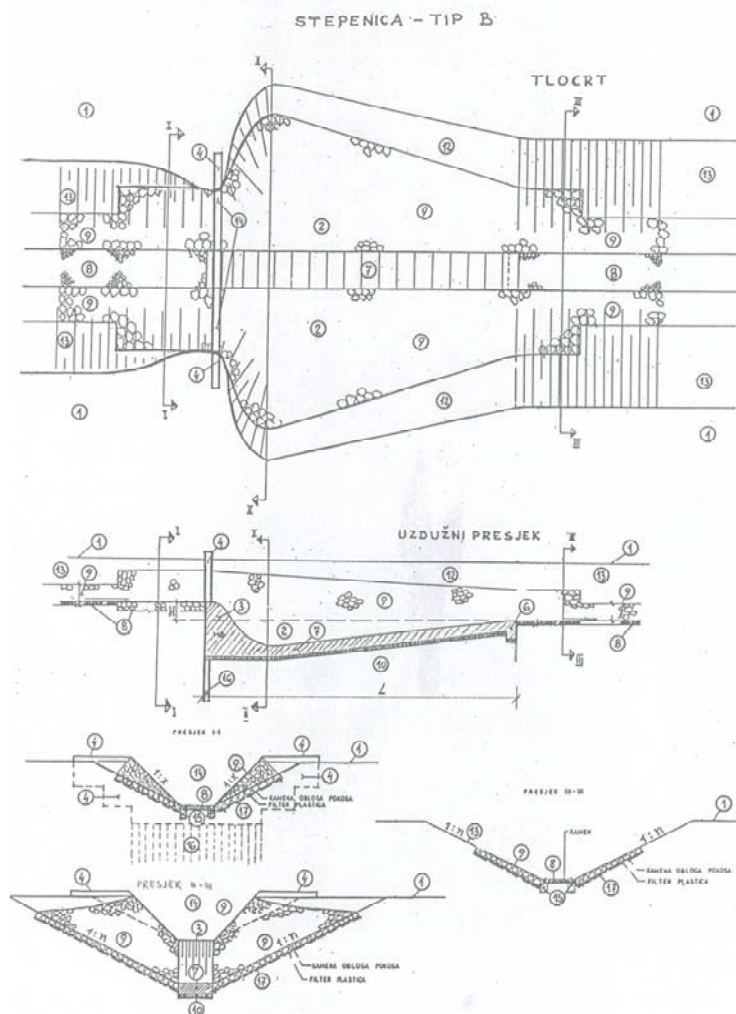
Pri tome treba voditi računa da debljina obloge mora biti veća od promjera najvećeg zrna u granulaciji!

## 6. PROBLEM HIDRAULIKE HIDROTEHNIČKIH STEPENICA

Hidrotehnička stepenica je vodograđevina koja se izvodi na mjestu denivelacije dna vodotoka (koncentracija energetskog pada) u svrhu zaštite njegovog korita od pojačanog erozijskog djelovanja na tome mjestu.



Slika 6.1 Tlocrt, presjeci i fotografije hidrotehničke stepenice



Slika 6.2 Tlocrt, presjeci i fotografija hidrotehničke stepenice kruškolikog oblika

Relativno su učestala oštećenja na objektima koncentracije pada dna, tj. na stepenicama i kaskadama otvorenih kanala i reguliranih prirodnih vodotoka.

Jedan od uzroka oštećenja je pogreška u projektiranju koja proizlazi iz neadekvatnog tretmana kinetičke energije toka na mjestu koncentracije pada.

U projektiranju otvorenih kanala u prirodnim tlama i projektiranju regulacija malih vodotoka primjenjuju se danas dva kriterija dimenzioniranja korita za tokove s nepokretnim dnom. To su kriteriji granične brzine i kriterij dopuštene pokretne (erozijske) sile na dnu.

Kriterij granične brzine definiran je uvjetom da brzina toka ne smije doseći vrijednost granične brzine  $v_{gr}$  kod koje dolazi do pokretanja čestica materijala u kojem se izvodi korito. Drugi kriterij (dopuštene pokretne sile) kaže da pokretna slika toka, određena izrazom  $S = \rho \cdot$

$g \cdot R \cdot I$  i izražena po jedinici omočene površine korita, ne smije dosegnuti vrijednost graničnoga naprezanja materijala  $\tau_0$ , pri kojem dolazi do pokretanja čestica na omočenoj konturi korita. Vrijednosti za  $v_{gr}$  i  $\tau_0$  utvrđene su eksperimentalno i za razne vrste materijala sadržane su u literaturi iz područja hidraulike otvorenih korita.

Prirodni materijal, s izuzetkom stijena i krupnih kamenih zrna, imaju uglavnom male vrijednosti za  $v_{gr}$  i  $\tau_0$ , tako da otvoreni vodotok dimenzioniran po bilo kojem od dva spomenuta kriterija, s koritom u prirodnom materijalu, ima relativno male uzdužne padove i miran režim toka ( $Fr < 1$ ). Ovisno o konfiguraciji terena duž kojeg se ovakav vodotok pruža, često je potrebno da se na manje ili više mjesta duž vodotoka načini koncentracija pada nivelete dna u obliku stepenice. Današnja hidrotehnička praksa poznaje više tipova objekata s kojima se postiže denivelacija dna (mjesto koncentracije pada) sa zadovoljavajućom dispacijom kinetičke energije toka.

Bez obzira na tip objekta koncentracije pada dna vodotoka, karakteristično je da kod svih takvih mjesta dolazi do pojave kritičnog stanja toka ( $Fr = 1$ ) neposredno uzvodno od mjesta koncentracije pada. U rijetkim slučajevima, gdje su uvjeti toka nizvodno od objekta da je cijeli objekt potopljen, formiranje slobodnoga potpunog prelijevanja je zapriječeno visokom razinom donje vode.

U svim slučajevima o kojima je prelijevanje na mjestu koncentracije pada slobodno, formira se, uzvodno od tog mjesta, linija depresije duž koje je tečenje u koritu ubrzano.

Ovoj pojavi potrebno je posvetiti odgovarajuću pažnju s obzirom na to da povećana brzina toka duž poteza depresije premašuje graničnu brzinu  $v_{gr}$ , što dovodi do erozije i oštećenja korita.

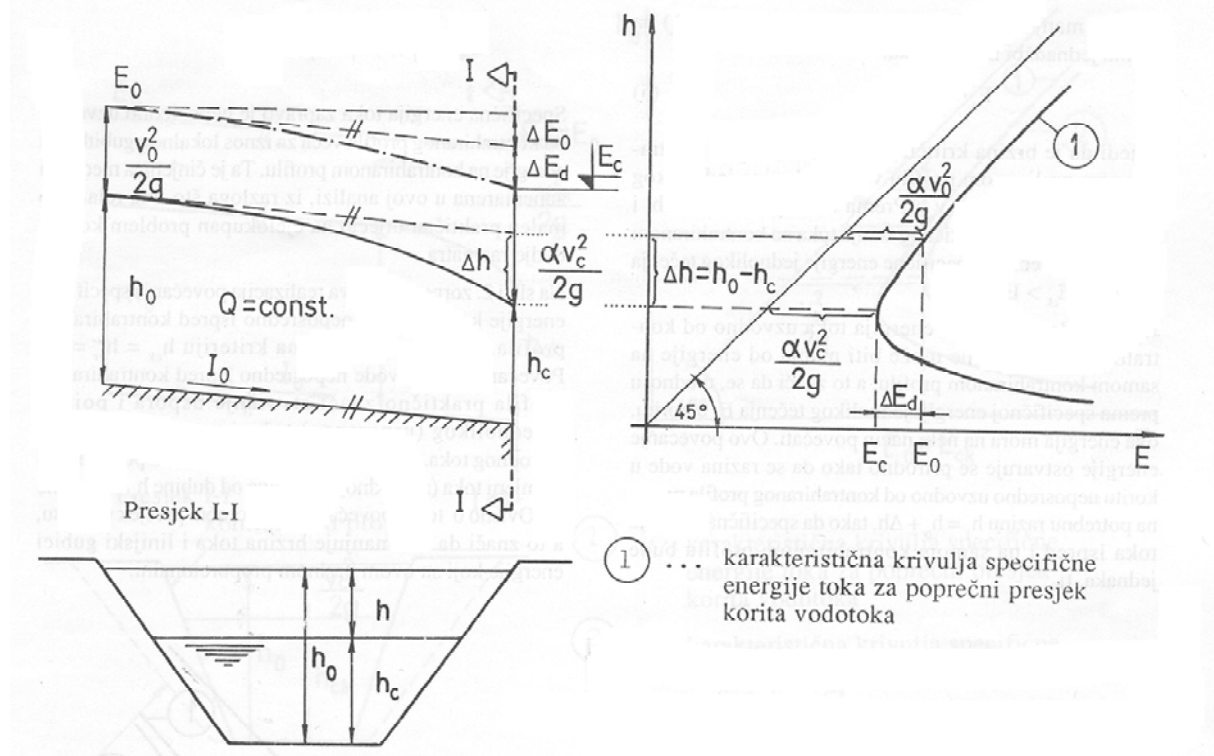
U praksi se rabe dva načina osiguranja korita do ovih oštećenja: (1) zaštita od poteza depresije odgovarajućom oblogom i (2) skraćanjem poteza depresije na minimum kontrakcijom preljevnog profila, tako da se na mjestu koncentracije pada formira veća kritična dubina od one koja bi se formirala na nekontrahiranom profilu. Time se ukupna veličina depresije smanjuje, a duljina linije depresije skraćuje.

U projektiranju otvorenih kanala i regulacija prirodnih vodotoka uobičajeno je da se potrebna kontrakcija preljevnog profila na objektima koncentracije pada nivelete dna proračuna tako da kritična dubina kontrahiranog profila bude jednaka graničnoj dubini toka  $h_{gr}$ , tj. dubini kod koje tečenje u koritu, uz određeni faktor sigurnosti, još ne doseže graničnu brzinu  $v_{gr}$ . Taj kriterij proračuna kontrakcije na vodnim tokovima korita koja su dimenzionirana po kriteriju granične brzine ili dopuštene pokretne sile nije u potpunosti ispravan.

Pri hidrauličkom dimenzioniranju otvorenih korita uglavnom se primjenjuje jednodimenzionalni model proračuna jednolikoga stacionarnog tečenja koje se pojavljuje u slučajevima konstantnog protoka ( $Q = \text{const}$ ) i konstantnih geometrijskih parametara korita, tj. konstantnoga uzdužnog pada i konstantnoga poprečnog presjeka.

$$E_0 = h_0 + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \quad 6.1$$

Specifična energija toka, interpretirana izrazom (6.1), u tom je modelu konstantna veličina. Na mjestu koncentracije pada dna vodotoka ta bi se energija, u slučaju zadržavanja konstantne geometrije korita (bez kontrakcije), smanjila do minimalnog iznosa (slika 6.3), pri kojem dubina ( $h_0$ ) i brzina toka ( $v_0$ ) poprimaju kritične vrijednosti i  $h_c$  i  $v_c$ .



Slika 6.3 Definijska skica stepenice bez kontrakcije

Kritična se dubina može proračunati iz poznatog općeg uvjeta za kritično stanje toka koji glasi:

$$\frac{\alpha Q^2 B}{g F^3} = 1 \quad 6.2$$

Nastavno se uporabom izraza za protok ( $Q = F_c \cdot v_c$ ) može proračunati i kritična brzina, a time je određena i kritična (minimalna) specifična energija toka:

$$E_c = h_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} \quad 6.3$$

Specifična energija jednolikog tečenja u korito reducirat će se dakle na iznos specifične energije kritičnog stanja toka  $E_c$  na mjestu koncentracije pada vodotoka. Fizikalni mehanizam ove redukcije odvija se tako što zbog povećanja brzine tečenja duž poteza depresije dolazi do povećanja linijskih gubitaka. Ukupan iznos redukcije energije bit će  $\Delta E = E_0 - E_c$ . Duljina

poteza depresije i linija vodnog lica (linija depresije) duž tog poteza može se proračunati prema različitim modelima proračuna nejednolikog tečenja.

U današnjoj se projektantskoj praksi kontrakcija preljevnog profila na objektima koncentracije pada dna vodotoka (stepenicama) proračunava prema kriteriju granične dubine toka ( $h_{gr}$ ), tj. dubine pri kojoj brzina toka u koritu još ne dosiže veličinu granične brzine  $v_{gr}$ . Taj kriterij proračuna kontrakcije neprihvatljiv je za vodne tokove korita kojih su dimenzionirana po tom istom kriteriju dopuštene pokretne sile. Razlog je tomu što ovako proračunati kontrahirani profil uzrokuje pojavu uspora uzvodno. Da će ovako proračunati kontrahirani profil uvjetovati pojavu uspora pokazuje se komparacijom potrebne specifične energije toka na kontrahiranom profilu (6.4) i specifične energije jednolikog tečenja u koritu (6.1).

$$E_{ck} = h_{ck} + \frac{\alpha v_{ck}^2}{2g} \quad 6.4$$

Za otvorene vodotoke dimenzionirane po kriteriju granične brzine ili dopuštene pokretne sile dubina je toka u koritu, uz određeni faktor sigurnosti, upravo jednaka graničnoj dubini ( $h_o = h_{gr}$ ), a kako je za kontrahirani preljevni profil proračunom po kriteriju granične dubine  $h_{ck} = h_{gr}$ , to slijedi da je i  $h_o = h_{ck}$ . Nadalje, kontrahirani je protočni presjek dakako manji od protočnog profila ( $F_c < F_o$ ) pa prema jednadžbi kontinuiteta:

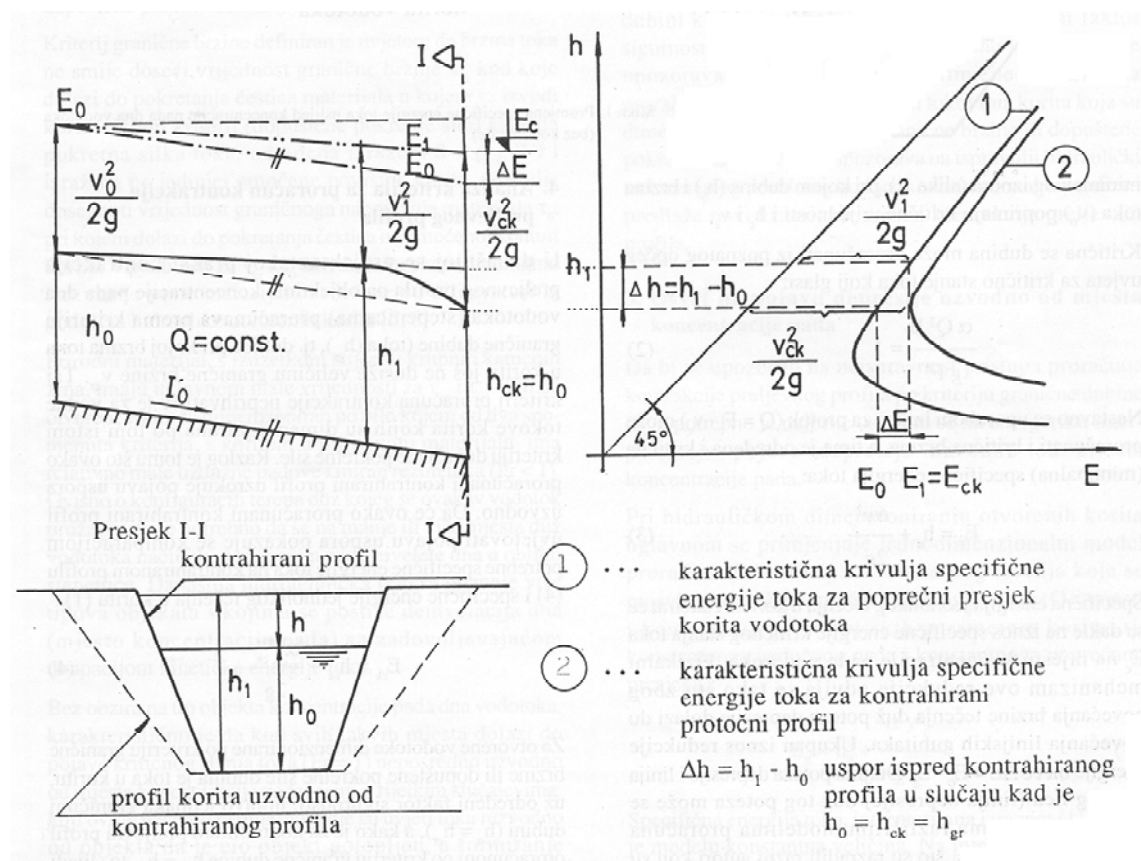
$$F_o \cdot v_o = F_c \cdot v_c \quad 6.5$$

Slijedi da je brzina kritičnog stanja toka  $v_c$  na kontrahiranom preljevnom profilu veća od brzine jednolikog tečenja u koritu ( $v_c > v_o$ ). Prema tome proizlazi da bi i specifična energija kritičnog stanja toka na kontrahiranom profilu bila veća od specifične energije jednolikog tečenja u koritu ( $E_{ck} > E_o$ ).

Jasno je da specifična energija toka uzvodno od kontrahiranog profila ne može biti manja od energije na samom kontrahiranom profilu, a to znači da se, u odnosu prema specifičnoj energiji jednolikog tečenja  $E_o$  u koritu, ova energija mora na neki način povećati. Ovo povećanje energije ostvaruje se prirodno tako da se razina vode u koritu neposredno uzvodno od kontrahiranog profila povisi na potrebnu razinu  $h_1 = h_o + \Delta h$ , tako da specifična energija toka ispred i na samom kontrahiranom profilu bude jednaka, tj.:

$$E_{ck} = E_1; \quad E_1 = h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \quad 6.6$$

Specifična energija toka zapravo je neposredno uzvodno od kontrahiranog profila veća za iznos lokalnog gubitka od energije na kontrahiranom profilu. Ta je činjenica međutim zanemarena u ovoj analizi, iz razloga što ima relativno malen praktičan utjecaj na cjelokupan problem koji se ovdje razmatra.



Slika 6.4 Definicijska skica stepenice s kontrakcijom i usporom

Na slici 6.4 zorno se uočava realizacija povećanja specifične energije koja u koritu neposredno ispred kontrahiranog profila, proračunatog prema kriteriju  $h_{ck} = h_{gr} = h_0$ . Povećanje razine vode neposredno ispred kontrahiranog profila praktično znači stvaranje uspora i pojavu nejednolikog (usporednog) tečenja na dužem potezu uzvodnog toka. Duž ovog poteza dubina toka postupno se u smjeru toka (nizvodno) povećava od dubine  $h_0$  do dubine  $h_1$ . Ovisno o tome povećava se i protočni presjek u koritu, a to znači da se smanjuje brzina toka i linijski gubici energije koji su ovom brzinom proporcionalni.

Povećanjem dubine i smanjenjem linijskih gubitaka duž poteza uspora ostvaruje se neposredno ispred kontrahiranog profila potrebna energetska razina  $E_1 = E_{ck}$ , a formiranje kritičnog stanja toka s dubinom  $h_{ck} = h_0$  na kontrahiranom preljevnom profilu obrazuje se na vrlo kratkom potezu neposredno ispred kontrahiranog profila. Ovo formiranje kritičnog stanja toka analogno je formiranju preljevnog mlaza na preljevima gdje se povećanje kinetičke energije mlaza ostvaruje na račun smanjenja potencijalne energije, tj. sniženja razine vodnog lica. Usporna linija (dužina uspora i razina vodnog lica duž ovog poteza) može se i ovdje proračunati na osnovi matematičkog opisa stacionarnoga nejednolikog strujanja ili prema nekom od modela za proračun usporne linije.

Početni je uvjet proračuna veličina ukupnog uspora neposredno ispred kontrahiranog presjeka, tj.  $\Delta h = h_1 - h_0$ , gdje je  $h$  dubina jednolikog tečenja u koritu, a  $h_1$  određuje se iz uvjeta jednakosti specifične energije kritičnog stanja toka na kontrahiranom profilu i potrebne specifične energije toka u koritu neposredno ispred kontrahiranog presjeka.



Neosporno je dakle da će kod otvorenih korita, dimenzioniranih po kriteriju granične brzine ili dopuštene pokretne sile toka, proračun kontrakcije preljevnom profila po kriteriju granične dubine dati takav kontrahirani profil koji će uvjetovati stvaranje uspora uzvodno od ovog profila.

Sa stajališta stabilnosti dna i pokosa korita ovaj nam uspor ne bi smetao jer uvjetuje manje brzine, odnosno manje pokretne sile toka u koritu. Stoga se u projektantskoj praksi često zanemaruje analiza ovog uspora, što je pogrešno jer se pritom ispuštaju iz vida dvije važne komponente projektiranja elemenata korita, i to:

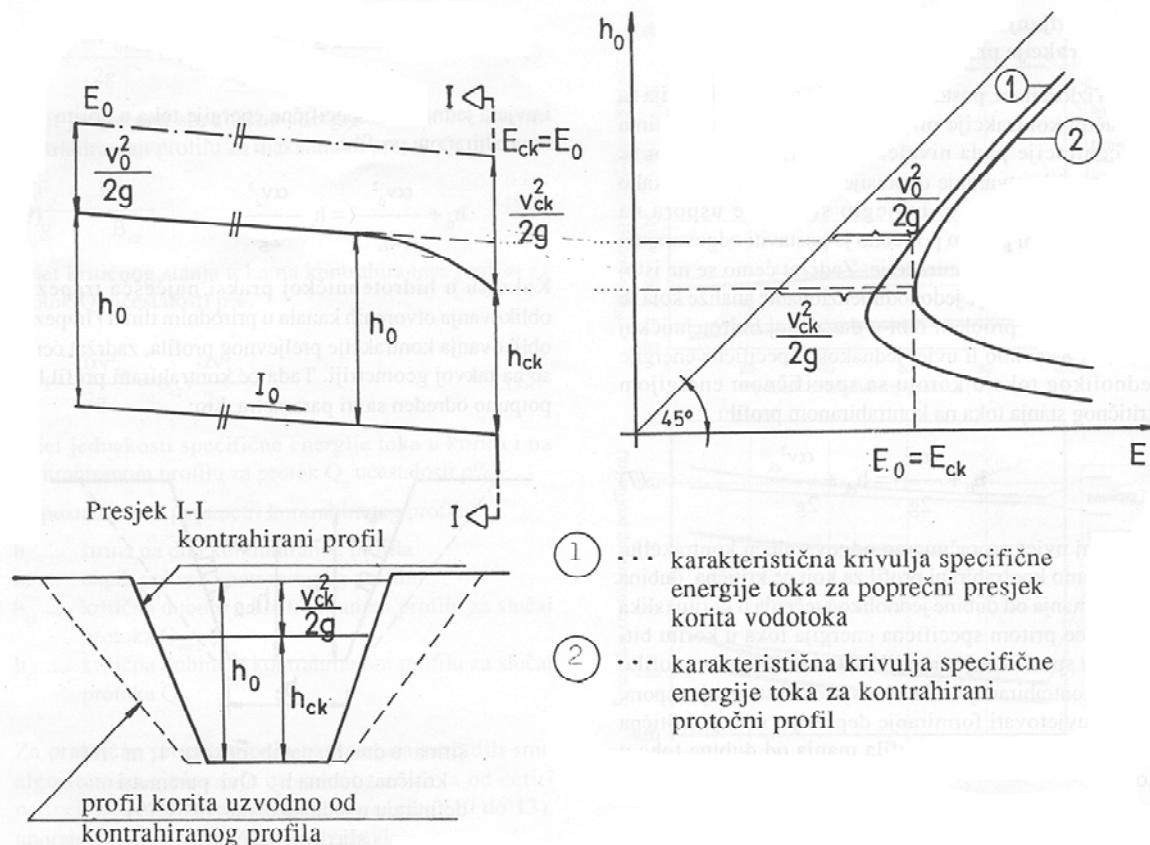
- a) projektna dubina korita duž poteza uspora ne može ostati ista kao za jednoliko tečenje u koritu određeno postojećim padom dna, nego se dubina korita mora povećati ovisno o veličini uspora,

proporcije objekata koncentracije pada dna vodotoka, bez obzira na tip objekta, upravno su proporcionalne sa specifičnom energijom toka na preljevnom profilu, a to znači da se izvedbom kontrahiranoga preljevnom profila koji stvara uspor u koritu zahtijeva i objekt koncentracije pada dna većih dimenzija.

Da bi se onemogućilo stvaranje depresije kontrakcija je svakako potrebna, a da bi se izbjeglo stvaranje uspora na kontrahiranom profilu potrebno je postaviti odgovarajući kriterij proračuna kontrakcije. Zadržat ćemo se na istoj razini aproksimacije jednodimenzionalne analize koja se za razmatrani problem rabi u današnjoj hidrotehničkoj praksi. Postavimo li uvjet jednakosti specifične energije jednolikog toka u koritu sa specifičnom energijom kritičnog stanja toka na kontrahiranom profilu:

$$h_o + \frac{\alpha v_o^2}{2g} = h_{ck} + \frac{\alpha v_{ck}^2}{2g} \quad 6.7$$

Pa za taj uvjet proračunamo odgovarajuću kontrakciju, dobit ćemo kontrahirani profil za koji će kritična dubina  $h_{ck}$  biti manja od dubine jednolikog tečenja u koritu (slika 6.5), ali će pritom specifična energija toka u koritu biti jednaka specifičnoj energiji na kontrahiranom profilu. Takav kontrahirani profil neće uvjetovati stvaranje uspora, niti će uvjetovati formiranje depresije, iako je kritična dubina kontrahiranog profila manja od dubine toka u koritu.



Slika 6.5 Definijska skica stepenice s kontrakcijom i bez uspora

Da se depresija ne može formirati također slijedi iz uvjeta jednakosti specifične energije toka u koritu i energije na kontrahiranom preljevnom profilu, jer bi u slučaju formiranja linije depresije došlo do povećanja brzine toka u koritu, a time i do povećanja linijskih gubitaka energije. A to znači da ne bismo imali jednakost specifične energije toka na kontrahiranom profilu i energije u koritu neposredno ispred ovog profila, što smo uveli kao kriterij proračuna kontrakcije. Prema tome proizlazi da kontrahirani profil, proračunan po tom kriteriju, neće uzrokovati promjenu tečenja u koritu uzvodno od ovog profila, a formiranje kritičnog stanja toka na samom kontrahiranom profilu odvijat će se analogno formiranju preljevnog mlaza na preljevima, transformacijom dijela potencijalne energije presjeka u kinetičku energiju preljevog mlaza i to na vrlo kratkom potezu uzvodnog toka. Na osnovi prethodne analize opravdano je da se kao kriterij proračuna kontrakcije preljevog profila na objektima koncentracije pada dna vodotoka postavi uvjet jednakosti specifične energije toka u koritu i specifične energije toka na kontrahiranom profilu.

Proračun parametra kontrahiranog profila po predloženom kriteriju moguć je uz pomoć jednadžbi uvjeta za kritično stanje toka na kontrahiranom profilu:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{F_c^3}{B_c} \quad 6.8$$

I uvjeta jednakosti specifične energije toka u koritu i na kontrahiranom profilu:

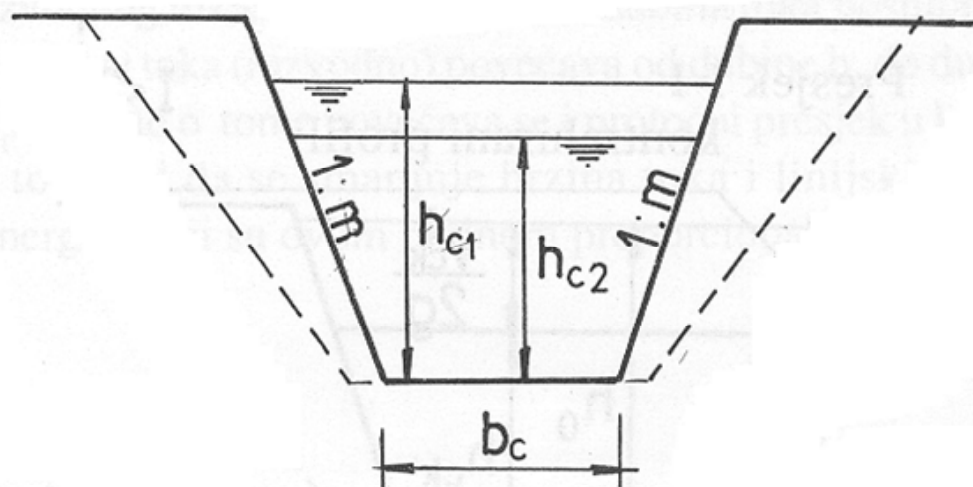
$$h_o + \frac{\alpha v_o^2}{2g} = h_c \frac{\alpha v_c^2}{2g} \quad 6.9$$

Kako su u hidrotehničkoj praksi najčešća trapezna oblikovanja otvorenih kanala u prirodnim tlima i trapezna oblikovanja kontrakcije preljevnog profila, zadržat ćemo se na takvoj geometriji. Tada će kontrahirani profil biti potpuno određen sa tri parametra, i to:

$$F_c = h_c (b + m \cdot h_c) \quad \text{protočnu površinu kontrahiranoga preljevnog profila (m}^2\text{)}$$

$$B_c = b_c + 2 m h_c \quad \text{širinu vodnog lica na kontrahiranom preljevnom profilu (m)}$$

$$v_c = \frac{Q}{F_c} \quad \text{kritičnu brzinu na kontrahiranom preljevnom profilu (m/s).}$$



Slika 6.6 Definicijska skica kontrakcije preljevnog profila

Potrebno je dakle odrediti tri nepoznata parametra kontrahiranog profila trapeznog oblika, a na raspolaganju imamo samo dvije jednačbe za proračun (6.8) i (6.9). Kao dodatni uvjet proračuna kontrakcije može se postaviti uvjet jednakosti specifične energije jednolikog toka u

koritu i kritičnog stanja na preljevnom profilu, osim za  $Q_{\max}$  i za neki drugi protok. Povoljno je da to bude neki protok ( $Q_p$ ) relativno veće učestalosti pojavljivanja ( $p$ ). Tada je:

$$\frac{\alpha Q_{\max}^2}{g} = \frac{F_{cl}^3}{B_{cl}} \quad 6.10$$

uvjet kritičnog stanja toka na kontrahiranom profilu za maksimalni protok  $Q_{\max}$ ,

$$h_{o\max} + \frac{\alpha v_{o\max}^2}{2g} = h_{cl} + \frac{\alpha v_{cl}^2}{2g} \quad 6.11$$

uvjet jednakosti specifične energije toka u koritu i na kontrahiranom profilu za maksimalni protok  $Q_{\max}$ ,

$$\frac{\alpha Q_p^2}{g} = \frac{F_{c2}^3}{B_{c2}} \quad 6.12$$

uvjet kritičnog stanja toka na kontrahiranom profilu za protok  $Q_p$  učestalosti  $p\%$ ,

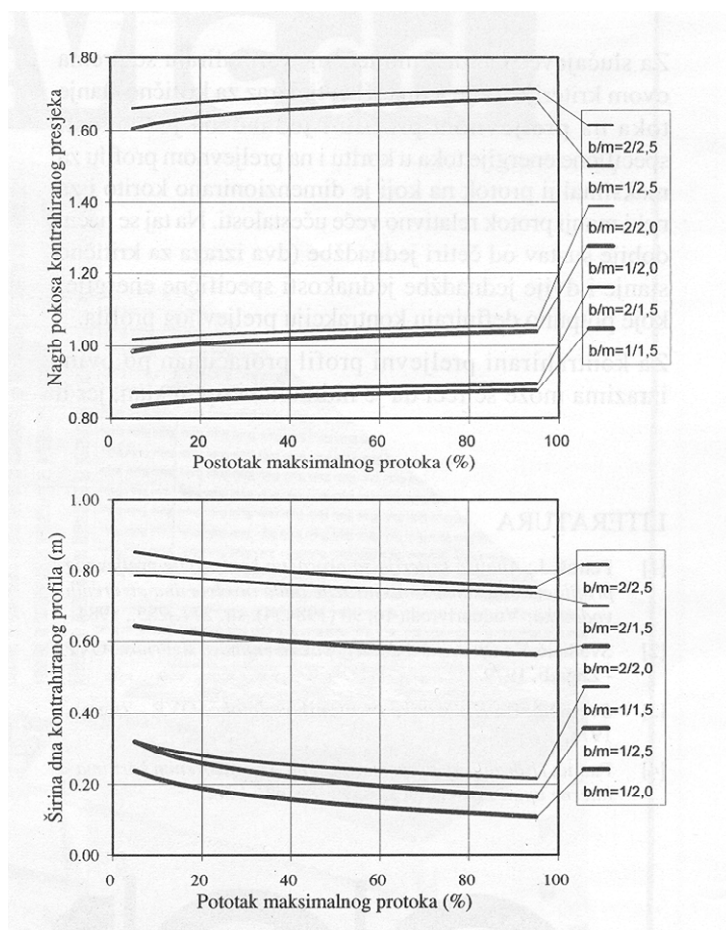
$$h_{op} + \frac{\alpha v_{op}^2}{2g} = h_{c2} + \frac{\alpha v_{c2}^2}{2g} \quad 6.13$$

uvjet jednakosti specifične energije toka u koritu i na kontrahiranom profilu za protok  $Q_p$  učestalosti  $p\%$ .

Nepoznanice su parametri kontrahiranog profila:

- $b_c$  ..... širina na dnu kontrahiranog profila,
- $m$  ..... nagib pokosa kontrahiranog profila,
- $h_{cl}$  .... kritična dubina u kontrahiranom profilu za slučaj protoka  $Q_{\max}$ ,
- $h_{c2}$  .... kritična dubina u kontrahiranom profilu za slučaj protoka  $Q_p$ .

Za proračun ovih parametara potrebno je naći rješenje sustava od četiri nelinearne jednadžbe s četiri nepoznanice! U nastavku su dani rezultati proračuna za hipotetski slučaj sa analizom osjetljivosti rješenja na promjenu veličine protoka  $Q_p$ .



Slika 6.7 Rezultati proračune parametara kontrahiranog profila

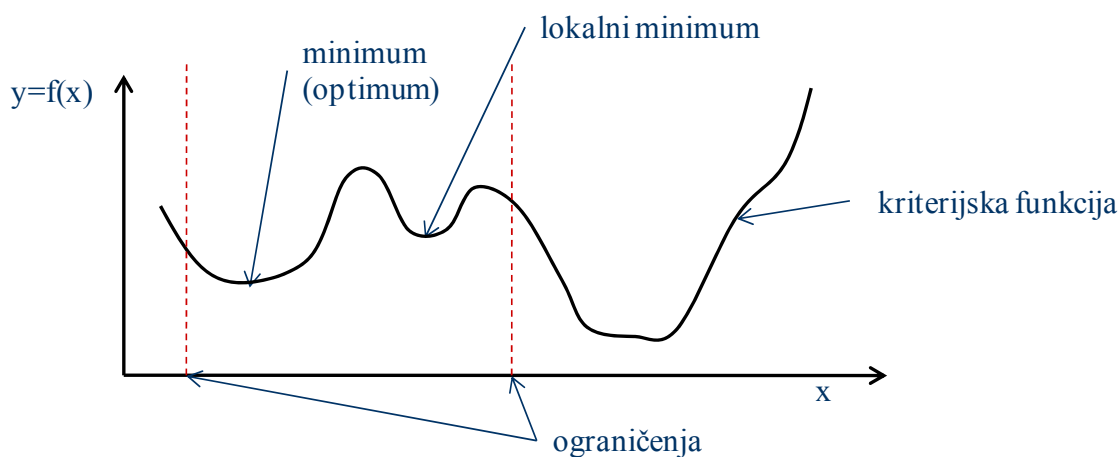
Iz grafičkog prikaza rezultata tog proračuna (slika 5) uočljivo je da vrijednosti parametara kontrakcije  $b_c$  i  $m_c$  bitno ovise o geometrijskim parametrima ( $b_o$  i  $m_o$ ) osnovnog korita, a relativno manje ovise o promjeni protoka u koritu. Ovo navodi na zaključak da je za inženjersko određivanje parametara kontrakcije preljevnog profila dovoljno proračun provesti za jedan par vrijednosti  $Q_{max}$ ,  $Q_p$ .

## 7. ODABIR OPTIMALNOG PROFILA KORITA

U posebnu kategoriju štetnog djelovanja voda može se uvrstiti i uporaba neadekvatnih tehničkih rješenja vezanih uz vodnogospodarske aktivnosti te aplikacija rješenja koja svojim dimenzijama prelaze okvire potrebnih. Stoga je vrlo važno posvetiti veliku pažnju tome problemu kako bi se izbjegla nepotrebno velika ulaganja u izgradnju i održavanje vodnih sustava. Jedan od ispravnih inženjerskih pristupa u fazi osmišljavanja je optimalizacija kako cjelovitih sustava, tako i njegovih elemenata.

### KRITERIJI OPTIMALIZACIJE

Pojednostavljeno rečeno, postupak optimalizacije predstavlja pronalaženje minimuma ili maksimuma ciljne (kriterijske) funkcije uz postavljena ograničenja njenog važenja.



- Kriteriji optimalizacije mogu biti različiti. U hidrotehničkoj praksi je vrlo česta upotreba:
  - hidrauličkih kriterija (obično se traži rješenje s minimumom otpora tečenja) i
  - ekonomskih kriterija po kojim se traži minimalna cijena rješenja.

Primjer hidrauličkog kriterija: minimalni gubici hidrauličkog pada u kanalu trapeznog poprečnog profila

$$\begin{aligned}
 A &= \text{const}, \\
 O &\rightarrow \min \\
 O &= b + 2h \sqrt{1+m^2}
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

Može se deriviranjem jednadžbe omoćenog oboda i izjednačavanjem s nulom doći do odnosa parametara poprečnog trapeznog profila pri kojem će hidraulički gubici tečenja biti minimalni:

$$\frac{b}{h} = 2 \left( \sqrt{1+m^2} - m \right)
 \tag{7.2}$$

Primjer ekonomskog kriterija: Odabir optimalnog profila kanala

Prvenstveno, prije svake analize, potrebno je utvrditi svrhu kanala (odvodnja, oteretni kanal, obodni kanal, dovodni, reguliranje korita manjih vodotoka...) – u okviru zaštite od štetnog djelovanja voda ili korištenja. Također treba odrediti vid koristi koje kanal donosi, da li se radi o direktnim koristima ili spriječenim štetama.

Koristi su uvijek u funkciji protoka koji se provodi kanalima pa je odabir profila pitanje protočnosti i stabilnosti korita!

U praksi se najčešće zanemaruje složeni postupak odabira optimalnog rješenja iz razloga velikog broja utjecajnih parametara.

Dimenzioniranje (odabir profila) obično se provodi na način da se odabere samo jedan tip konstruktivnog rješenja od poznatih u inženjerskoj praksi te da se za takovo rješenje odrede proporcije temeljem pretpostavki stacionarnog tečenja, i eventualno se provjeri stabilnost korita s aspekta fluvijalne erozije.

Takav postupak daje rješenje koje je tehnički ispravno, ali zasigurno nije najekonomičnije (koji puta je daleko od toga).

Potrebno je uvesti tehničko-ekonomski kriterij, što podrazumijeva optimalizaciju tehničkih rješenja po kriteriju minimuma troškova (izgradnje i održavanja).

U nastavku ćemo se osvrnuti na primjer otvorenih korita kojima se ne kreće vučeni nanos.

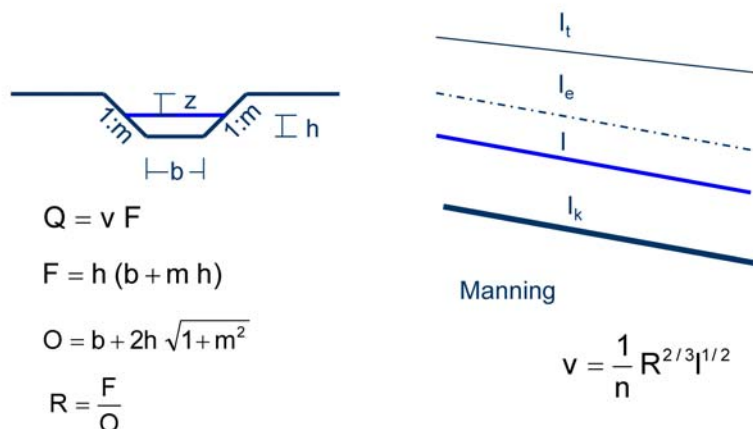
- Tri su osnovna tipa:
  - 
  - Korita bez zaštitne obloge
  - Korita sa zaštitnom oblogom pokosa
  - Korita sa zaštitnom oblogom dna i pokosa

Korita bez zaštitne protočne konture

Kriterijska funkcija verbalno bi trebala glasiti: za otvoreno trapezno korito koje treba imati određenu propusnu moć ( $Q_{proj}$ ) i koje se izvodi u tlu bez zaštitne obloge dna i pokosa potrebno je odrediti profil tako da ukupni godišnji troškovi i evidentne izgubljene vrijednosti budu minimalni a da je korito stabilno na fluvijalnu eroziju.

Da bi se matematički mogla odrediti ova ciljna funkcija potrebno je provesti detaljnu analizu hidrauličkih aspekata tečenja i analizu stabilnosti korita.

Profil trapeznog kanala određen je s tri parametra: širinom dna  $b$ , dubinom  $h$  i nagibom pokosa  $1:m$ .



Za zadani protok  $Q$  moguće je odabrati beskonačno mnogo rješenja profila variranjem četiri parametra: širine dna  $b$ , dubine  $h$ , nagiba pokosa  $1:m$  i uzdužnog pada  $I_k$ .

Kriterij stabilnosti korita na fluvijalnu eroziju određen je veličinom srednjeg posmičnog naprezanja na dnu ( $S_{\max}$ ) i pokosu ( $S'_{\max}$ ):

$$S_{\max} = k_m \rho g h I \quad 7.3$$

$$S'_{\max} = k'_m \rho g h I \quad 7.4$$

I dopuštenih vrijednosti posmičnog naprezanja na dnu ( $t_0$ ) i pokosu ( $t'_0$ ) za različite materijale.

Ciljnu funkciju odredit ćemo zbrajanjem godišnjih troškova izgradnje i održavanja.

Izgradnja kanala svest će se na iskop materijala i planiranje dna i pokosa. Tim troškovima potrebno je i dodati troškove zemljišta koje će biti potrebno otkupiti, a koje će biti u funkciji kanala.

Kada se govori o neobloženim koritima sa stabilnom konturom, tada će zasigurno osim izgradnje kanala biti potrebno izvesti i određen broj građevina koncentracije pada (vodnih stepenica). Prema tome, cijeni izgradnje bit će potrebno dodati i tu stavku.

Godišnji troškovi izgradnje podrazumijevaju godišnji iznos kapitaliziranih troškova izgradnje (anuiteti, amortizacija) objekata (korito + stepenice) promatrano kroz vijek trajanja tih objekata. Njima je potrebno dodati i godišnje troškove održavanja te godišnje troškove otkupa zemljišta.

Ciljna funkcija će tada biti oblika:

$$\begin{aligned}
 & f(h, b, m, z, L, I, C_1, C_2, C_3, C_4) = \\
 & = C_1 \left[ (h+z)(b+m(h+z))L + (b+2m(h+z))(I_t - I) \frac{L^2}{2} + m(I_t - I)^2 \frac{L^3}{3} \right] + \\
 & + C_2 [(I_t - I)L] + C_3 [(b+2m(h+z))L + m(I_t - I)L^2] + \\
 & + C_4 [(2(h+z) + (I_t - I)L)(1+m^2)^{1/2} L] \quad 7.5
 \end{aligned}$$



Gdje su:

$L$  [m] – duljina korita

$I_t$  – uzdužni pad terena u smjeru trase korita

$C_1$  [kn/m<sup>3</sup>/god] – jedinični godišnji trošak izgradnje korita

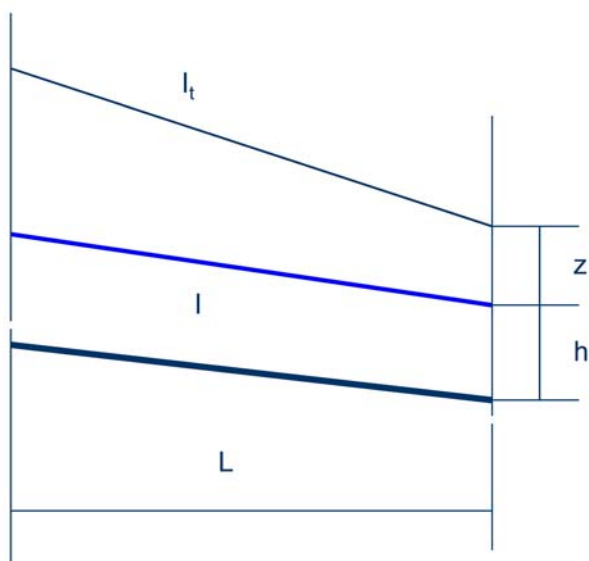
$C_2$  [kn/m/god] – jedinični godišnji trošak stepenice visine 1m

$C_3$  [kn/m<sup>2</sup>/god] – jedinični godišnji trošak otkupa zemljišta

$C_4$  [kn/m<sup>2</sup>/god] – jedinični godišnji trošak održavanja pokosa

$(h+z)(b+m(h+z))L$  -volumen korita za slučaj jednakog pada terena i korita

$(b+2m(h+z))(I_t-I)\frac{L^2}{2} + m(I_t-I)^2\frac{L^3}{3}$  -volumen nefunkcionalnog dijela korita zbog razlike pada terena i korita



Slika 7.1 Uzdužni profil dionice kanala duljine  $L$ , uzdužnog pada dna  $I$  i pada terena u smjeru trase kanala  $I_t$

$(I_t - I)L$  - razlika visine koju je potrebno savladati hidrotehničkim stepenicama

$(b + 2m(h + z))L + m(I_t - I)L^2$  - površina terena koju zauzima korito

$(2(h + z) + (I_t - I)L)(1 + m^2)^{1/2}L$  -ukupna površina pokosa koju treba održavati

Određivanje minimuma ciljne funkcije potrebno je provesti uz poštivanje hidrauličkih zakonitosti toka i poštivanje stabilnosti korita na fluvijalnu eroziju. Raspisivanjem jednadžbi po osnovnim parametrima dobivaju se sljedeći obrasci:

$$h(b + mh) \frac{1}{n} \left[ \frac{h(b + mh)}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \right]^{2/3} I^{1/2} - Q = 0 \quad 7.6$$

$$k_m' \rho ghI - \tau_0' < 0 \quad 7.7$$

Također, dodatno ograničenje bit će nam uvedeno analizom stabilnosti pokosa obale, odnosno nagib pokosa  $m > m_{\min}$ .

Da bi se moglo iznaći rješenje, potrebno je poznavati jedinične cijene  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , i  $C_4$ , uzdužni pad teren  $I_i$ , koeficijent unutrašnjeg trenja materijala, Manningov koeficijent  $n$ , nadvišenje  $z$ , te dopuštena posmična naprezanja  $t_0$ . U optimalizacijskom postupku te se vrijednosti smatraju konstantnim, pa nam ostaje za varirati parametre protočnog profila  $h$ ,  $b$ ,  $m$  i uzdužni pad korita  $I$ .

Problem je sada četverodimenzionalan i do minimuma ciljne funkcije moguće je doći na razne načine, na primjer metodom pretraživanja. Za fiksirane vrijednosti jednog parametara odrede se ostala tri koja daju lokalni minimum ciljne funkcije, te se za razne kombinacije pronade najmanja vrijednost lokalnih minimuma ciljne funkcije.

Navedeno govori o složenosti postupka određivanja optimalnog profila kanala trapeznog korita bez obloge, kao najjednostavnijeg tehničkog rješenja. Sve to za jednu trasu, za jedan zadani protok i za jednu varijantu nekog vodnog sustava.

Bez obzira što se čini vrlo složenim postupkom, danas kada nam alati i sredstva omogućuju brzo iznalaženje rezultata te tu mogućnost treba koristiti.