

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.

Poremećaj strujne slike uslijed utjecaja uronjenog tijela.

- Stupovi mostova u koritu,
- Upornjaci mostova,
- Regulacijske građevine
- Podvodnih pragovi i slično

Dodatna strujanja uvjetovanih vanjskim utjecajima (u tok vode unosi se dodatna energija).

- energija vjetra - pojava 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

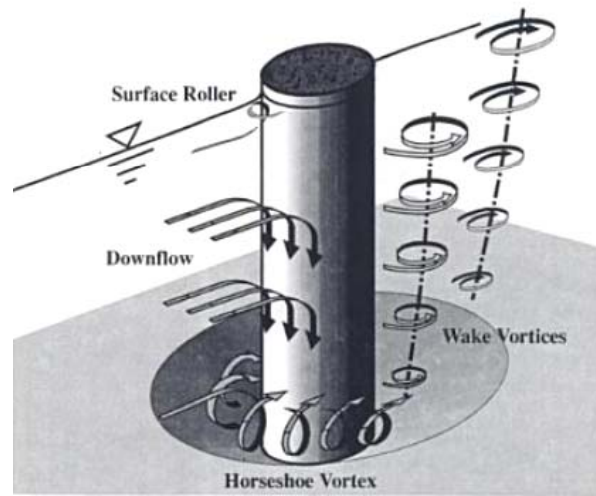
- Građevina u toku vode lokalno smanjuje protjecajni profil, izaziva uspor i sukladno tome remeti strujnu sliku.
- Strujnice se produljuju i koncentriraju uz čvrstu konturu, zbog čega se povećava brzina i jedinični protok, što sve utječe na lokalno povećanje posmičnih naprežanja.
- Stvaraju se uvjeti 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 $(Q_S)_{ulaz}=(Q_S)_{izlaz}$.

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.

- 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.



Strujna slika oko stupa mosta

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 DNE 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			

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:

μ – dinamički koeficijent viskoznosti [Ns/m²]

ρ – gustoća mase vode [kg/m³]

g – ubrzanje sile teže [m/s²]

\bar{v} – brzina toka vode [m/s]

h – dubina vode [m]

d – karakteristični promjer zrna nanosa [m]

σ_g – standardna devijacija granulometrije

h_s – dubina erozijske kaverne [m]

b_s – efektivna širina stupa [m]

φ – 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:

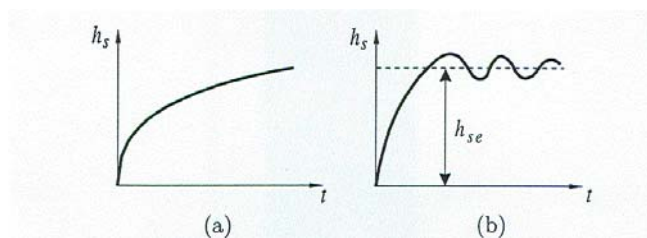
$$f_1(\text{Re}, Fr, \frac{h_s}{h}, \frac{d}{h}, \sigma_g, \frac{b_s}{h}, \varphi) = 0$$

Gdje su Reynoldsov i Froudov broj definirani kao:

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

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

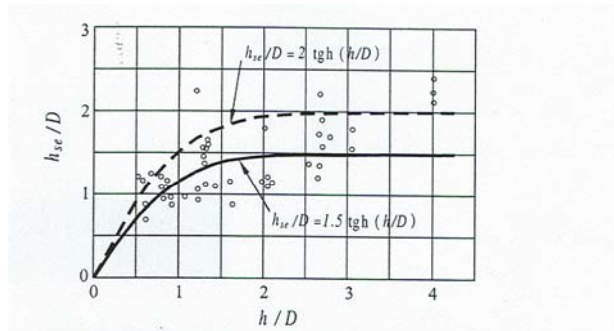
Iz gore navedene jednadžbe mogu se za posebne slučajeve izostaviti pojedini članovi (zanemaruje se njihov utjecaj). Tako se najčešće zanemaruje utjecaj viskoznosti i neuniformnost zrna nanosa. Parametar d/h se ne uzima u obzir ukoliko se radi slučaju takozvane čiste vode. Naime proces će imati različit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



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:

$$\frac{h_s}{D} = f_2\left(Fr, \frac{d}{D}, \frac{h}{D}\right)$$



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

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:

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

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

$$h_{se} = 2 D$$

Ova jednadžba važi samo za sitnozrni materijal srednjeg promjera do nekoliko cm.

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 mjeranjima. Ovisno o tome koje su fizikalne veličine uzete u obzir kao dominantne, autori su dobivali i različite rezultate.

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:

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

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

eksplicitni oblik:

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

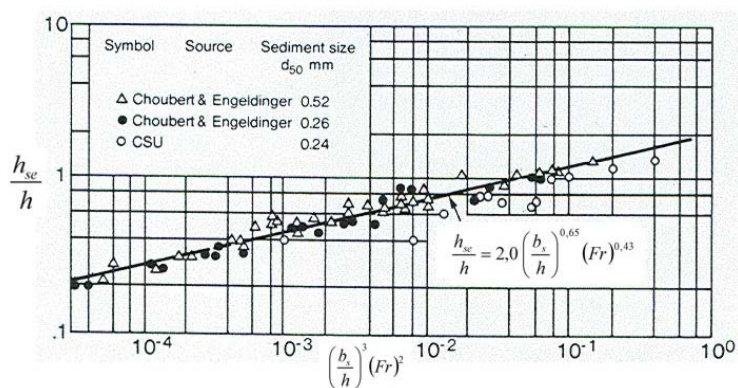
U kasnijim istraživanjima Shen i dr. (1969) uveden je i Froudov broj toka u zavisnost, te je dobiven oblik jednadžbe:

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

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

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

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%)

Melville:	$d_s = K_{y\beta} \cdot K_I \cdot K_d \cdot K_s \cdot K_\theta \cdot K_G \cdot K_t$	5.9
Larras:	$d_s = 1.05 \cdot K_s \cdot K_\theta \cdot b^{0.75}$	5.10
Laursen:	$d_s = b \cdot 1.34 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.5}$	5.11
Breusers:	$d_s = 1.4 \cdot b$	5.12
Shen <i>et al.</i> :	$d_s = 0.000223 \left(\frac{V \cdot b}{\nu}\right)^{0.619}$	5.13
Coleman:	$\frac{V}{\sqrt{2gd_s}} = 0.6 \left(\frac{V}{b}\right)^{0.9}$	5.14
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 $b_p > 2.2m$	5.15
Hancu:	$\frac{d_s}{b} = 2.42 \left(\frac{y}{b}\right)^{1/3} \cdot Fr^{2/3}$	5.16
Jain:	$\frac{d_s}{b} = 1.84 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.3}$	5.17

Gdje su: $K_{y\beta}$, K_I , K_d , K_s , K_θ , 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 $K_{y\beta}$ predstavlja utjecaj dubine toka na eroziju u zavisnosti od širine stupa. Za duboke tokove u odnosu na širinu stupa dubina podlokavanja d raste proporcionalno sa dubinom toka, a ne ovisi o širini stupa. Vrijedi i obratno, tj. u relativno plitkim tokovima dubina podlokavanja d raste proporcionalno sa širinom stupa, a neovisna je o dubini toka. Koeficijent utjecaja odnosa dubine toka i veličine stupa dan je izrazima:

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

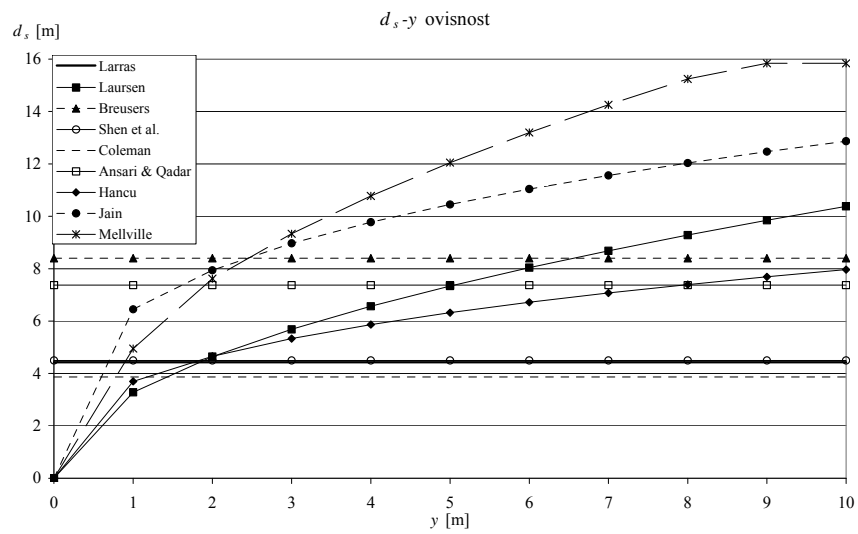
Koeficijent odnosa srednje dubine toka i širine stupa $K_{y\beta}$ predstavlja utjecaj dubine toka na eroziju u zavisnosti od širine stupa. Za duboke tokove u odnosu na širinu stupa dubina podlokavanja d raste proporcionalno sa dubinom toka, a ne ovisi o širini stupa. Vrijedi i obratno, tj. u relativno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

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

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

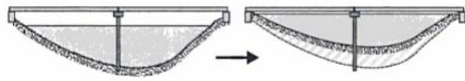
$$K_{y\beta} = 4.5 \cdot y \text{ za } \frac{b}{y} > 5$$

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:

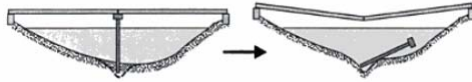


Slika 5.5 Ovisnost dubine podlokavanja d_s o promjeni dubine vode y (izmjerena dubina kaverne iznosi cca 5 m, dok je dubina srednje vode cca 6 m).

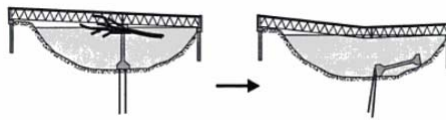
Kada se govori o stabilnosti mostova treba napomenuti da postoje i ostali neizravni utjecaji koji mogu međudjelovanje konstrukcije mosta i riječnog korita staviti izvan spomenutih mehanizama. Neki od mehanizama zbog kojih mostovi mogu otkazati nosivost dani su u nastavno u tablici.



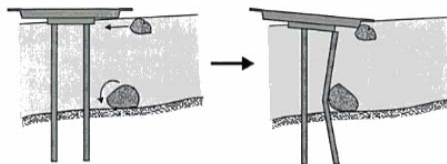
a) Zasipavanje korita može smanjiti protočnost i podići razinu vode i preko rasponske konstrukcije



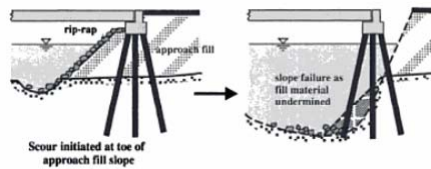
b) Podlokavanje stupova uslijed različitih vrsta erozije



c) Oštećenja uslijed udara plutajućeg nanosa

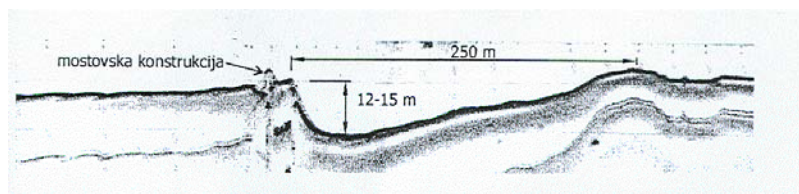


d) Oštećenja uslijed udara kamena

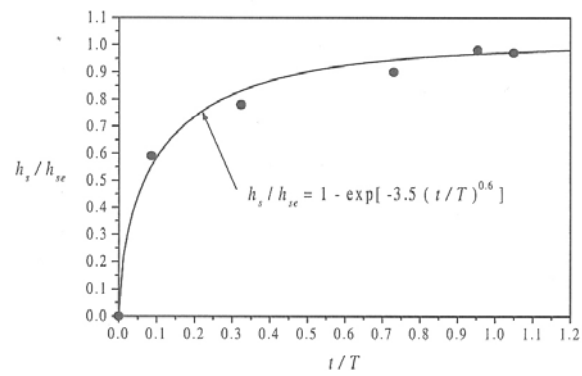


e) Erozija nožice upornjaka

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.



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



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; Smith 1976.)
- U 86 analiziranih rušenja od 1961.g. postotak rušenja uzrokovanih poplavom raste na 55% ⇒ poplava je najčešći uzrok gubitka stabilnosti

Uzrok gubitka stabilnosti mosta	broj havarija	udio [%]
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
Poplava	70	49
Zamor materijala	4	3
Korozija	1	1
Preopterećenje ili nesreća	14	10
Ukupni broj havarija	143	100

procjena rizika od podlokavanja kod mostova

- Standardne smjernice pri projektiranju mostova za životni vijek od 120 god:
 - UK: zaštita od podlokavanja dimenzionirana na 200-god poplavu
 - SAD: zaštita od podlokavanja dimenzionirana na 100-god poplavu
- Ove smjernice su prvotno usvojene za građevine projektiranog životnog vijeka od 60 godina ⇒ mala 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 su projektni uvjeti premašeni
 - ⇓
 - zaštita od podlokavanja će izgubiti funkciju
 - ⇓
 - posljedica: rušenje mosta

procjena rizika od podlokavanja kod mostova

- Ponovna izgradnja mosta i vezani troškovi oštećenja koja su posljedica rušenja mosta, zajedno sa troškovima povećanja standarda zaštite od podlokavanja se mogu lako izračunati

- Rizik je definiran kao:

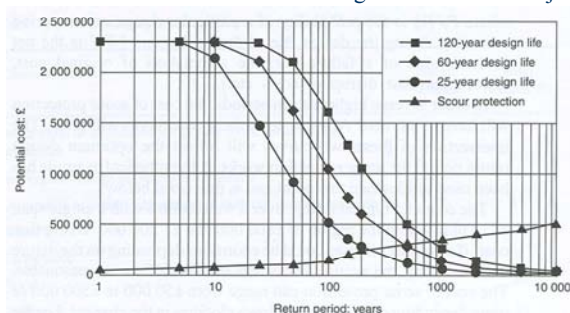
$$\text{Rizik} = P_e(PP) \times NSV$$

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

- Povećanje projektog povratnog perioda uzrokuje povećanje cijene izrade zaštite od podlokavanja, a smanjenje troškova zbog gubitka stabilnosti za ukupni period korištenja objekta
- Sjecište ovih dviju krivulja predstavlja optimalni projektni povratni period za radove zaštite od podlokavanja (slika)

procjena rizika od podlokavanja kod mostova

- Krivulje rizika za tri različite trajnosti pokazuju da optimalni projektni povratni period značajno varira: - 200-god PP za životni vijek 25 god
- 800-god PP za životni vijek 120 god



- Pri projektiranju treba razumjeti odnos životnog vijeka konstrukcije i projektog 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

procjena rizika od podlokavanja kod mostova

- Parametri rizika su međusobno povezani, pa nerazumno povećanje jednog može nepovoljno djelovati na drugi
npr. povećanje projektnog povratnog perioda do te mjere da se potopi kolnička konstrukcija
 - ↳ 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!