



Avtor: mag. Rok Fazarinc

Recenzenta: dr. Gašper Rak, dr. Simon Rusjan

SMERNICA ZA HIDRAVLICNO DIMENZIONIRANJE IN OBLIKOVANJE PRETOČNIH ODPRTIN

MATIČNA SEKCIJA GRADBENIH INŽENIRJEV

SMERNICA ZA HIDRAVLIČNO DIMENZIONIRANJE IN OBLIKOVANJE PRETOČNIH ODPRTIN

Avtor: mag. Rok Fazarinc

Recenzenta: dr. Gašper Rak, dr. Simon Rusjan

Izdala:

**Inženirska zbornica Slovenije
Jarška cesta 10 b, Ljubljana**

Oblika izdaje:

elektronska verzija, dostopno na www.izs.si

Ljubljana, november 2025



Kazalo

1	VSEBINA SMERNICE	4
2	REFERENČNA DOKUMENTACIJA	5
3	POMEN IZRAZOV	6
4	VRSTE PREMOSTITVENIH OBJEKTOV	7
5	PREPUSTI	8
5.1	Delitev prepustov glede na hidrotehnične značilnosti, funkcionalnost in namen	8
5.2	Določitev projektnih pretokov za dimenzioniranje prepustov – hidrologija	8
5.3	Hidravlično dimenzioniranje	10
5.3.1	Vrste toka	11
5.3.2	Metode hidravličnega dimenzioniranja	13
5.4	Morfološka in dinamična analiza območja premoščanja in zaledja premostitve	15
5.5	Usmeritve pri načrtovanju in izvedbi prepustov	15
6	MOSTOVI	21
6.1	Določitev projektnih pretokov za dimenzioniranje prepustov – hidrologija	21
6.2	Hidravlično dimenzioniranje	22
6.3	Varnostne višine	24
6.4	Morfološka in dinamična analiza območja premoščanja in vplivnega območja	27
6.5	Splošna načela pri načrtovanju in gradnji mostov	27

1 Vsebina smernice

V smernici za hidravlično dimenzioniranje in oblikovanje pretočnih odprtih so podana strokovna izhodišča in napotki za načrtovanje, hidravlično dimenzioniranje in oblikovanje pretočnih prere-zov premostitev glede na hidrološke, morfološke in dinamične značilnosti območja umeščanja nove premostitve ali rekonstrukcije obstoječe premostitve. Opisani so potrebni hidrološki vhodni podatki za hidravlično dimenzioniranje in metode hidravličnega dimenzioniranja. Ustreznost pre-mostitev določajo tudi dinamični procesi, katerih posledice so masna gibanja (erozija, premešča-nje plavin in blatni tokovi) ter premeščanje plavja. Dinamični procesi, ki jih je potrebno prepozna-ti, vplivajo predvsem na oblikovanje vtočnih delov in pretočnih prerezov prepustov in mostov.

2 Referenčna dokumentacija, viri

1. **Open channel hydraulics – Chow**; McGraw-Hill, 1973
2. **Handbook of Hydraulic engineering**; Armando Lencastre; Chichester : Ellis Horwood, 1987
3. **Hidravlika**; Franci Steinman; Učbenik; FAGG; 1992
4. **Hydraulic design of highway culverts**; U.S. Department of Transportation; Federal Highway Administration; 2012
5. Trendi povratnih nivojev visokovodnih pretokov (ARSO)

3 Pomen izrazov

Prepusti so premostitveni objekti s svetlim razponom od 0,3 m do 5 m (6 m oziroma 10 m po nekaterih pojmovanjih).

Mostovi so premostitveni objekti s svetlim razponom nad 5 m.

Svetli razpon predstavlja širino med oporniki, ki hkrati določa maksimalno širino vodne gladine znotraj premostitve.

Svetla višina je višina med dnem struge spodnjim robom mostne konstrukcije znotraj objekta.

Varnostna višina h_v je višinska razlika med izračunano gladino pri izbranem ali predpisanem pretoku (na primer Q_{100}) in spodnjim robom premostitvene konstrukcije.

Mirni tok predstavlja tok tekočine (vode) z majhno kinetično energijo (hitrostnim potencialom). Mirni tok je značilne za nižinske vodotoke.

Deroči tok predstavlja tok z veliko kinetično energijo. Deroči tok je značilne za hudourniška območja in doline z vzdolžnimi nakloni nad 1 % (ponekod tudi 0,5 %). Pri načrtovanju premostitvenih objektov je pri tej vrsti toka potrebno upoštevati nivo energije ($v^2/2g$).

Froudovo število (Fr) opisuje režim toka. V mirnem režimu je tok, kadar je $Fr < 1$. V deročem režimu je $Fr > 1$. Mejo med obema vrstama ($Fr = 1$) predstavlja kritična globina (h_{cr}). Pri naravnih vodotokih s tokom v bližini prehodnega območja je značilno izrazito valovanje (turbulenca) in izrazito spreminjanje hitrosti.

4 Vrste premostitvenih objektov

Premostitvene objekte delimo na prepuste in mostove.

Delitev je odvisna od svetlega razpona pretočnega prereza premostitve. Med prepuste razvrščamo premostitvene objekte z razponom do 5 m, objekti z večjim razponom so razvrščeni med mostove.

5 Prepusti

Kot je navedeno v točki 4, so prepusti manjši premostitveni objekti različnih oblik preko manjših vodotokov, strug z občasno vodo in meteornih odvodnikov.

5.1 Delitev prepustov glede na hidrotehnične značilnosti, funkcionalnost in namen:

1. Prepusti za pretok meteornih vod z območja ceste in vkopnih brežin. Se načrtujejo v okviru odvodnjavanja ceste in vkopnih površin. Večinoma so okroglega preseka velikosti do $\varnothing 100$ cm. Minimalni premer okrogle cevi naj bo $\varnothing 40$ cm pri hidravličnih obremenitvah, kje globina vode na vtoku ne doseže polovice premera (20 cm) in 60 cm pri prepustih, kjer ta pogoj ni izpolnjen. Lahko se izbere tudi prepuste drugačnih oblik (ovalni ali parabolični presek).
2. Prepusti za odvodnjavanje depresij z občasno tekočo vodo. Velikost prepusta je odvisna od velikosti s cestnim nasipom zamejenega območja.
3. Prepusti na melioracijskih jarkih z občasno stoječo ali počasi tekočo vodo.
4. Prepusti na poplavnih območjih s stoječo vodo, ki zagotavljajo komunikacijo poplavnih vod in možnosti odtoka ob praznjenju poplavnih območij, vračanju poplavnih vod v vodotok (npr. kadar cesta poteka po večjih poplavnih površinah, znotraj suhih zadrževalnikov ali kraških poljih – Ljubljansko barje).
5. Prepusti s počasi tekočo vodo (inundacijski prepusti) na poplavnih območjih rečnih dolin.
6. Prepusti na naravnih vodotokih:
 - 6.1. Prepusti na položnejših potokih, kadar je tok v mirnem hidravličnem režimu (globina vodnega toka v strugi je večja od kritične globine; $h_v > h_{cr}$). Vzдолžni padec vodotoka je manjši od 0,5 %. Froudovo število v mirnem režimu je $Fr < 1$, večinoma pod 0,5.
 - 6.2. Prepusti na strmih potokih in hudournikih, kadar je tok v prehodnem ali deročem hidravličnem režimu (globina vodnega toka v strugi je približno enaka ali manjša od kritične globine; $h_v \leq h_{cr}$). Tok je izrazito turbulenten. Vzдолžni padec vodotoka je večji od 0,5 % (od 1 % do 100 %). Pri tej vrsti prepustov je Froudovo število $Fr > 1$.

5.2 Določitev projektnih pretokov za dimenzioniranje prepustov – hidrologija

Za hidravlično dimenzioniranje prepustov je potrebno pridobiti ali določiti projektne pretoke. Projektni pretoki se za posamezne vrste prepustov določajo po različnih metodah.

Za prepuste 1. in 2. vrste, ki so namenjeni predvsem pretoku meteorne vode, se vodne količine (pretok) določi po metodah, ki se upoštevajo velikost prispevnega območja, koeficient odtoka in za posamezna območja izračunano intenziteto padavin glede na povratne dobe (Racionalna metoda). Te metode se po navadi uporabljajo pri načrtovanju in dimenzioniranju meteorne odvodne in kjer se upošteva merodajni naliiv s primerno povratno dobo ($n=1$ do $n=0,01$, tudi $n = 0,002$).

$$Q = \varphi * i * F \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Pomen oznak:

Q	pretok [m ³ /s]
φ	koeficient odtoka predstavlja razmerje med količino padavin, ki pade na površino in količino odtoka v časovni enoti
i	intenziteta padavin [mm/s/m ²] ; po navadi je podatek v [l/s/ha]
F	prispevna površina [m ²]

Primerne so tudi metode modeliranja padavinskega odtoka. Izbira povratne dobe naliva je odvisna od potrebne ali želene zaščite ceste (cestnega telesa) pred preplavitvijo. Trajanje naliva je praviloma relativno kratko (5 minutni naliiv). Podatke o nalivih se pridobi na ARSU in so dobljeni na podlagi statističnih analiz opazovanih dežemernih postaj. Odtočni koeficienti so odvisni od značilnosti prispevnih površin. Za cestne površine so vrednosti od $\varphi = 0,8$ do $\varphi = 0,95$, za zelene površine pa od $\varphi = 0,1$ do $\varphi = 0,3$. Koeficient odtoka je odvisen tudi (lahko tudi predvsem) od predhodne namočenosti.

Projektne pretoke vode na melioracijskih jarkih (3. vrsta prepustov) se določi na podlagi analize območja, ki ga jarek odvodnjava. Vodne količine se lahko določijo po kanalizacijskih metodah ali empiričnih hidroloških metodah ali s pomočjo drugih inženirskih analize (enotni hidrogram odtoka).

Primerne so tudi metode modeliranja padavinskega odtoka. Pri določitvi projektnih pretokov se po navadi upoštevajo nizki odtočni koeficienti ($\varphi = 0,1$).

Pri prepustih s stoječo poplavno vodo (4. vrsta) se merodajni pretoki določijo glede na prostornino vode, ki se pretaka skozi prepust in čas pretoka (odtoka). Praviloma so zaradi daljšega časa pretoka količine majhne. Ti prepusti lahko delujejo kot dušilke, ki omogočajo »kontrolno« odtoka in s tem zmanjšujejo konične vrednosti pretokov.

Inundacijski prepusti (5. vrsta) sestavljajo del premostitve, ko cestni nasip prečka večje poplavno območje (ob večjih potokih in rekah s širokimi poplavnimi območji). Ker so del sistema premostitev, je pripadajoč pretok odvisen od hidravličnih značilnosti vodotoka s poplavnimi območji in sistema premostitev. Projektni pretoki za večje vodotoke so praviloma določene na podlagi hidroloških analiz povodja. Hidravlično modeliranje inundacijskih premostitev je zaradi kompleksnosti tokovne slike sorazmerno zahtevno. Rezultati hidravličnih analiz po navadi niso enoznačni.

Prepusti na naravnih vodotokih (6. vrsta). Projektni pretoki se določajo s pomočjo hidrološkega modeliranja.

Ker se prepusti na naravnih vodotokih praviloma načrtujejo na manjših povodjih s prispevno površino $F < 1 \text{ km}^2$ (pogojno do 5 km^2), je za grobo določitev projektnega pretoka Q_{100} možno uporabiti empirične hidrološke enačbe. V praksi je za določitev projektnega pretoka Q_{100} možno uporabiti empirične enačbe (npr. VGI - Pintar, Krebs, Iskovsky).

Na območju R Slovenije je primerna empirična enačba VGI-Pintar.

$$Q_{100} = q_{100} * F^k$$

Pomen oznak in vrednosti:

- Q_{100} pretok s stoletno povratno dobo [m^3/s];
- q_{100} specifični odtok s stoletno povratno [$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$] s povodja velikega 1 km^2 (od $7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ v vzhodni Sloveniji do $14 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ na orografska pregradah zahodne Slovenije in Posočja);
- F velikost prispevnega območja [km^2];
- k koeficient povodja [-], ki je odvisen od oblike povodja, pokrovnosti, nagibov in geološke podlage z vrednostmi od 0,65 do 0,85.

Pri uporabi empiričnih enačb se za določitev pretoka Q_{500} lahko skladno s Poplavnim pravilnikom (2) za potoke in hudournike s površino porečja, ki je manjša od 100 km^2 , uporabi naslednja enačba:

$$Q_{500} = 1,4 * Q_{100}$$

Na podlagi novejših hidroloških študij za porečje obeh Sor in Savinje, ki upoštevajo zadnje poplavne dogodke, razmerje med Q_{500} in Q_{100} lahko presega 1,5.

Vpliv podnebnih sprememb

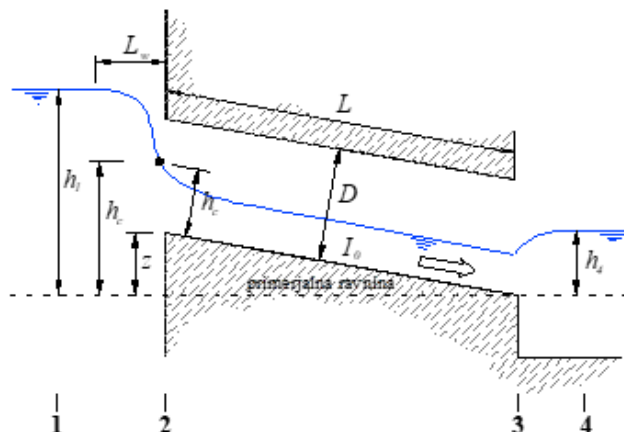
Pri presoji odpornosti prepustov na podnebne spremembe se projektne vodne količine določijo z upoštevanjem relativnega povečanja pretokov visokih vod po scenariju RCP4.5 za obdobje življenjske dobe objekta (do leta 2070 ali 2100). Podatke o relativnem povečanju za posamezne scenarije je pripravil ARSO za vodomerne postaje – merska mesta in so navedeni v publikaciji Trendi povratnih nivojev visokovodnih pretokov (5).

5.3 Hidravlično dimenzioniranje (analiza)

Hidravlično dimenzioniranje prepustov je odvisno od hidravličnih razmer na vtoku v prepust, znotraj prepusta in na iztoku iz prepusta. Glede na hidravlične razmere je določenih 6 osnovnih tipov s hidravličnimi pogoji prilagojenimi enačbami. Na Slikah 1–6 so prikazani osnovni tipi toka skozi prepuste s pripadajočimi enačbami.

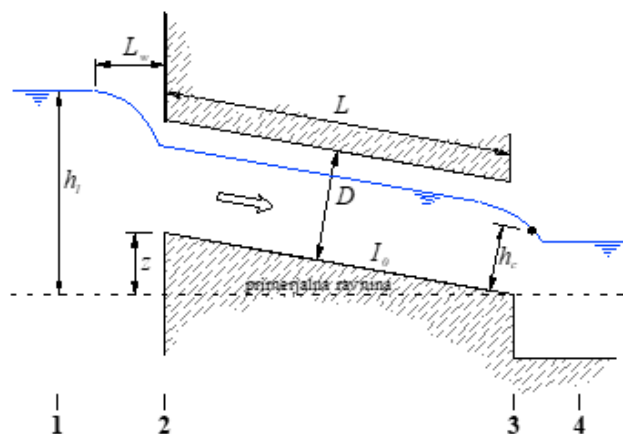
5.3.1 Vrste toka

TIP 1: Kritična globina na vtoku



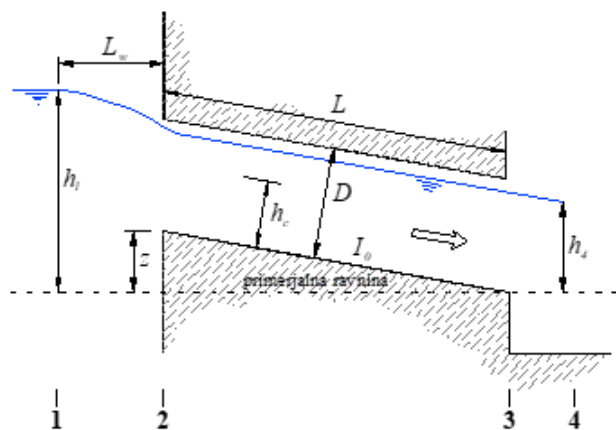
Enačba: $Q = C_D \cdot S_c \cdot \sqrt{2g \cdot \left(h_1 - z + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} - h_c - \Delta h_{1-2} \right)}$

TIP 2: Kritična globina pri iztoku iz prepusta

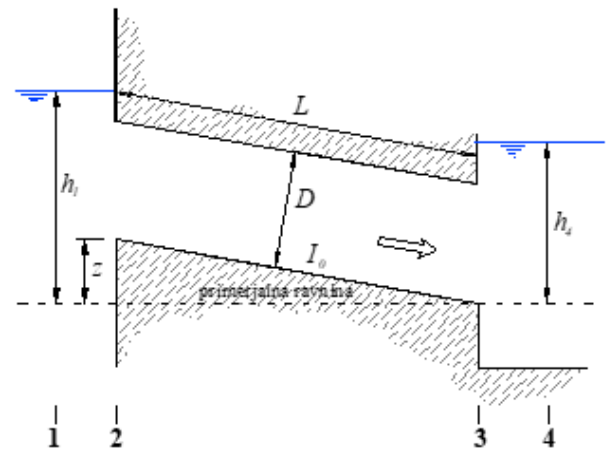


Enačba: $Q = C_D \cdot S_c \cdot \sqrt{2g \cdot \left(h_1 + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} - h_c - \Delta h_{1-2} - \Delta h_{2-3} \right)}$

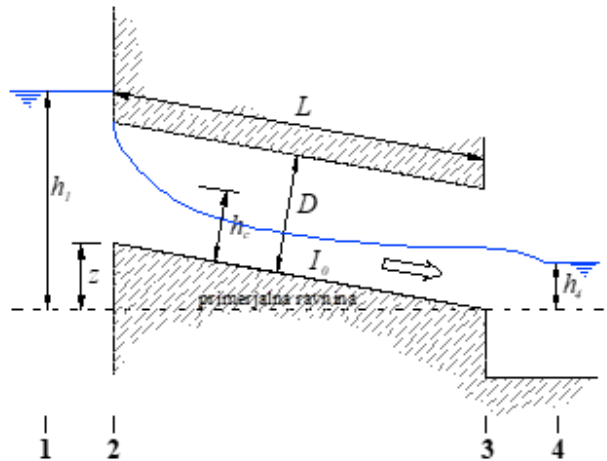
TIP 3: Mirni tok v območju celotnega prepusta



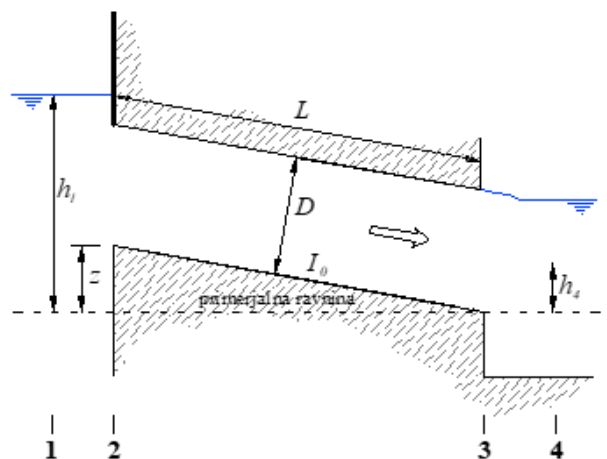
Enačba: $Q = C_D \cdot S_3 \cdot \sqrt{2g \cdot \left(h_1 + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} - h_3 - \Delta h_{1-2} - \Delta h_{2-3} \right)}$

TIP 4: Potopljen iztok iz prepusta

Enačba: $Q = C_D \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot (h_1 - h_4)}{1 + \left(18.08 \cdot C_D^2 \cdot n_g^2 \cdot \frac{L}{R_0^{4\beta}}\right)}}$

TIP 5: Potopljen vtok, deroči tok znotraj prepusta

Enačba: $Q = C_D \cdot S_0 \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 - z)}$

TIP 6: Prost iztok iz prepusta, polni prerez prepusta

Enačba: $Q = C_D \cdot S_0 \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_3 - \Delta h_{2-3})}$

Slike 1 do 6: Značilni hidravlični tipi (vrste) pretoka skozi prepuste

5.3.2 Metode hidravličnega dimenzioniranja

V praksi se analiza izvaja s komercialnimi programskimi paketi. Vendar se zaradi kompleksnosti hidravlične problematike in v izogib nepravilni izbiri računskega pristopa predlaga, da se s klasičnim »peš« računom ugotovi razmere na vtoku, vzdolž prepusta in na iztoku iz prepusta. Nato se hidravlična prevodnost za različne scenarije analizira s hidravličnim modelom. Izračuni se izvajajo z upoštevanjem vseh tipov, ker se z naraščanjem visokovodnega vala pri nestalnem toku navedeni tip toka skozi prepust spreminja. V tem primeru so prehodi med posameznimi tipi zvezni.

Na Slikah 7 in 8 sta prikazana dva primera programskih hidravličnih orodij in sicer HY-8 Culvert Analysisi in HEC-RAS.

HY-8 Analysis Results

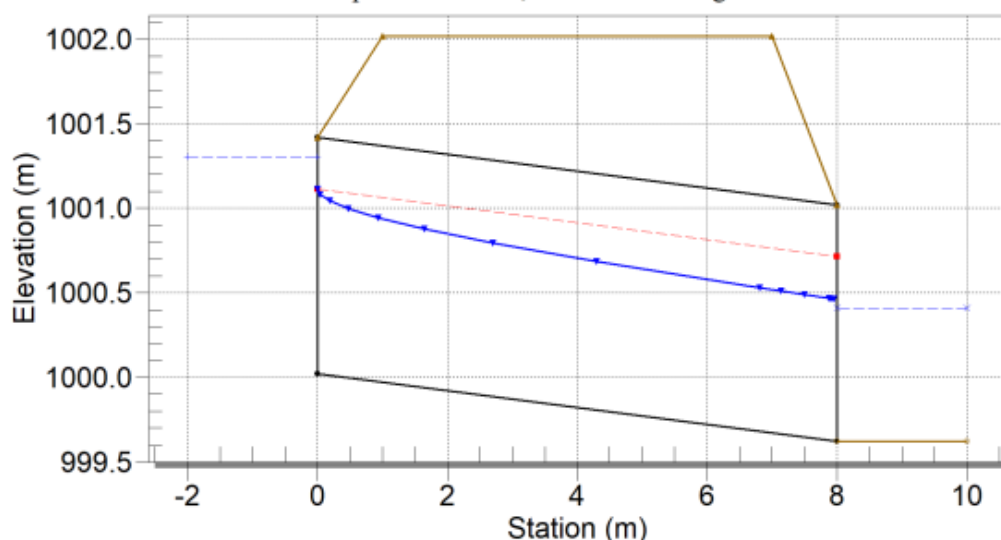
Crossing Summary Table

Culvert Crossing: Prepust 140 x 140

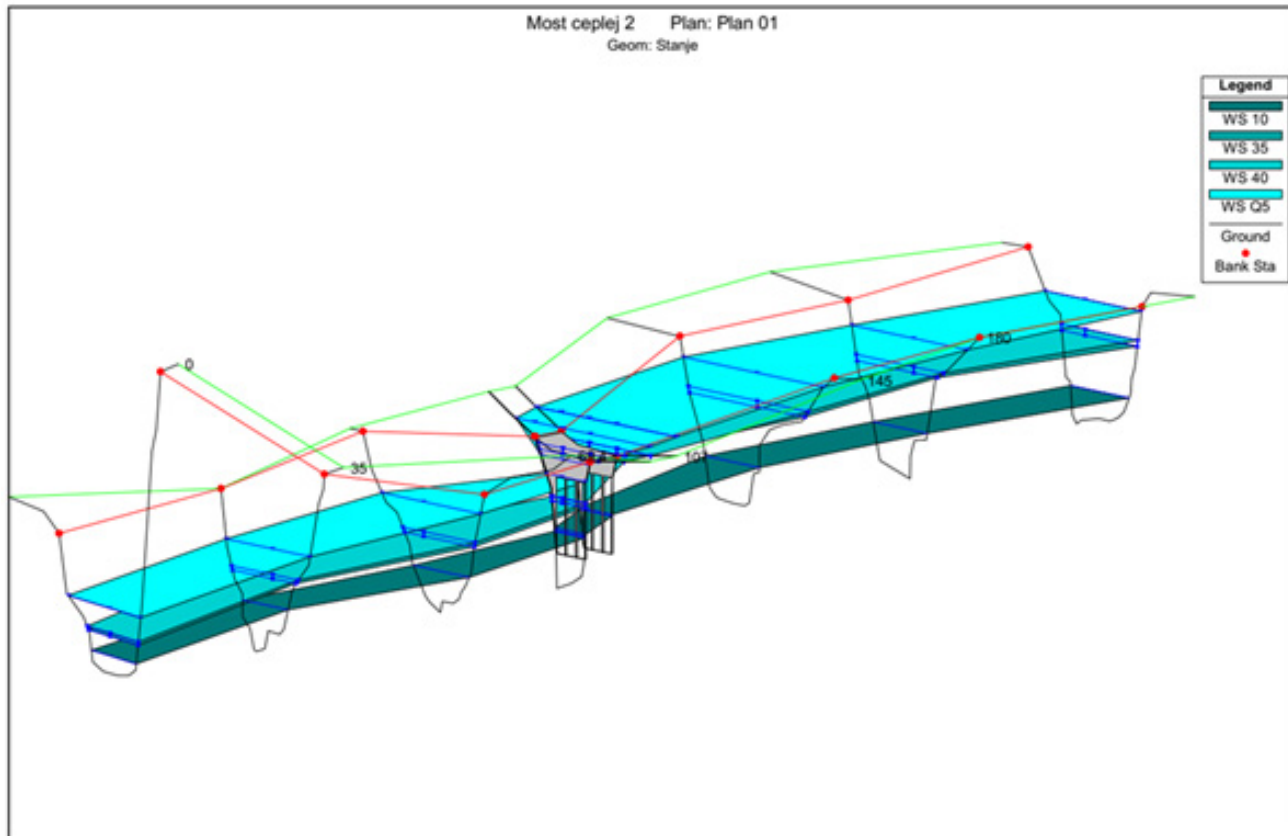
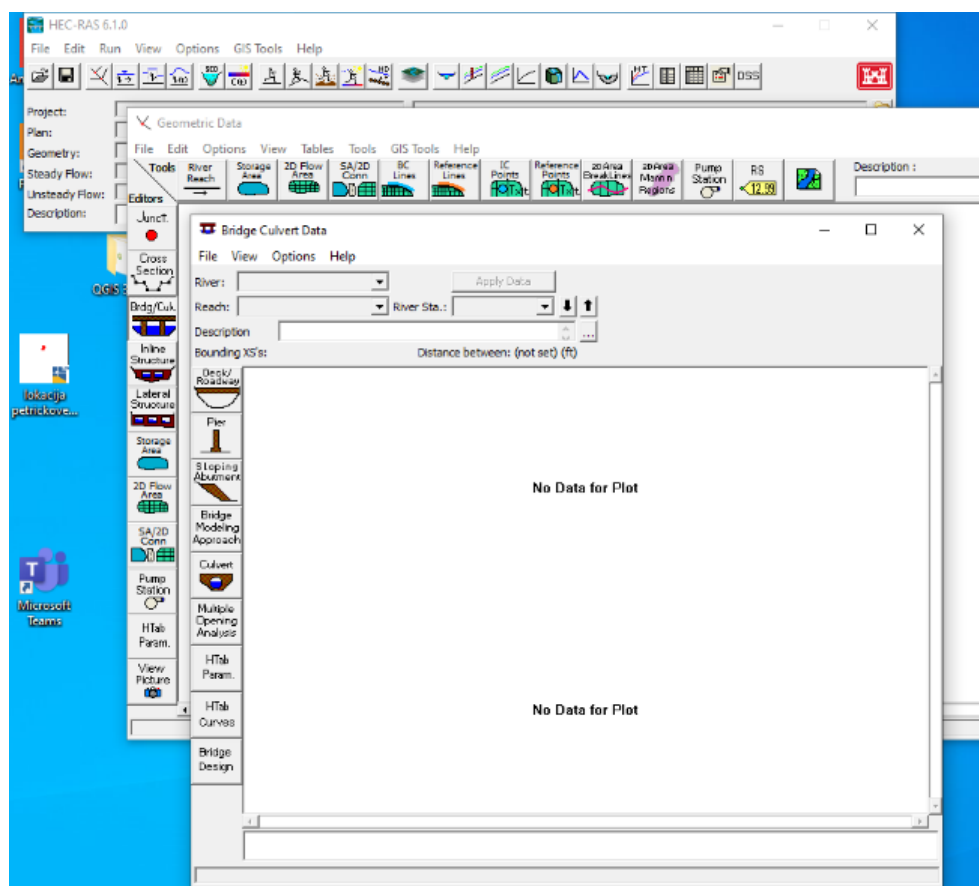
Headwater Elevation (m)	Total Discharge (cms)	Prepust 140 x 140 Discharge (cms)	Roadway Discharge (cms)	Iterations
1000.81	2.50	2.50	0.00	1
1000.89	2.90	2.90	0.00	1
1000.97	3.30	3.30	0.00	1
1001.05	3.70	3.70	0.00	1
1001.13	4.10	4.10	0.00	1
1001.20	4.50	4.50	0.00	1
1001.27	4.90	4.90	0.00	1
1001.28	5.00	5.00	0.00	1
1001.40	5.70	5.70	0.00	1
1001.49	6.10	6.10	0.00	1
1001.58	6.50	6.50	0.00	1
1002.00	7.24	7.24	0.00	Overtopping

Crossing - Prepust 140 x 140, Design Discharge - 5.00 cms

Culvert - Prepust 140 x 140, Culvert Discharge - 5.00 cms



Slika 7: Rezultati analize s programskim orodjem HY-8



Slika 8: Pogovorno okno orodja HEC-RAS

5.4 Morfološka in dinamična analiza območja premoščanja in zaledja

Pri načrtovanju in izvedbi novih ali rekonstrukciji obstoječih prepustov je potrebno analizirati morfološke značilnosti vplivnega območja, relief, pokrovnost, geološke značilnosti območja, lego hribinske podlage, izpostavljenost eroziji, vire in možnosti transporta plavja, morfologijo in strukturne značilnosti struge, ovrednotenje procesov premeščanja plavin, preveritev možnosti nastanka hiperkoncentriranih tokov ali drugih masnih gibanj in podobno.

Analiza se izvede na podlagi terenskih ogledov, kartiranj, zbiranja informacij o preteklih ujmah, ortofoto posnetkov in posnetkov brezpilotnih letalnikov.

Ugotovitve se opiše v tehničnem poročilu, oziroma opisu in ovrednoti z izračuni izračunih.

Pri izračunih se vpliv upošteva z zmanjšanjem pretočnega prereza na območjih prepusta, kjer so hitrosti najmanjše (nad vtokom, znotraj prepusta v primeru pogojev mirnega toka ali pri predimenzioniranem pretočnem prerezu). V naravnih okoljih je na izpostavljenih območjih s hipnimi spremembami velikosti pretočnega prereza (zožitve) in zmanjšanjem vzdolžnega padca pričakovati zamašitev pretočnega prereza na vtoku v prepust.

5.5 Usmeritve pri načrtovanju in izvedbi prepustov

Usmeritve so podane glede na hidravlične, hidrodinamične in morfološke značilnosti in vrste prepustov:

– Vzdolžni naklon prepusta

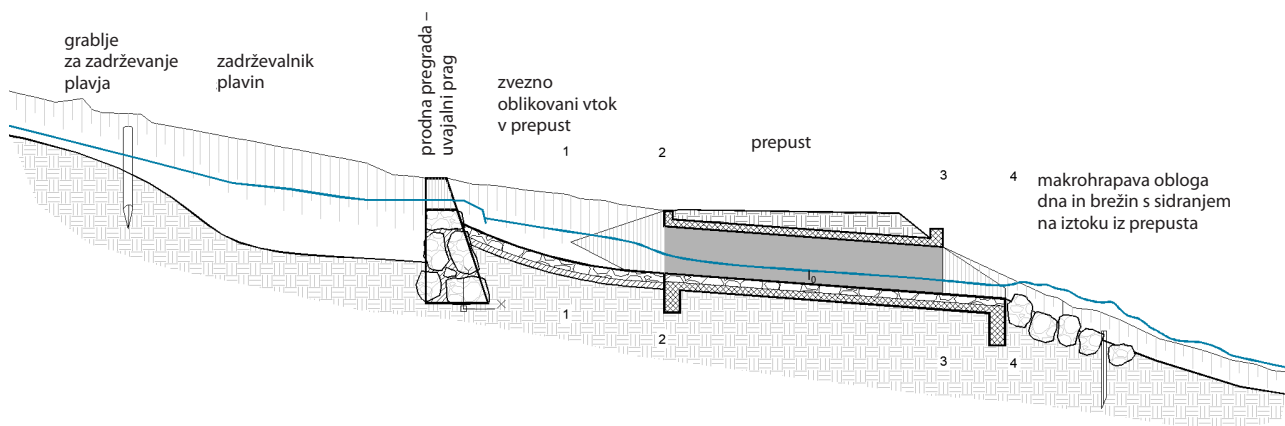
Vzdolžni naklon prepusta neposredno vpliva na hitrosti vodnega toka znotraj prepusta in s tem na pretočnost prepusta pri večini tipov toka, razen pri tipu 4, kjer sta hitrost in pretok odvisna od višinske razlike med dotočno in iztočno stranjo prepusta.

Pri prepustih za odtok meteornih vod (1. vrsta) naj bo, zaradi zagotovitve dovolj velikih hitrosti in posledično vlečne sile, naklon l_0 podoben ali malenkost večji od kritičnega vzdolžnega naklona ($l_0 > l_c$). Mejne vrednosti padca so med 1 % in 2 %.

Vzdolžni naklon pri 2., 3. in 4. vrsti prepustov naj bo prilagojen terenskim značilnostim in vedno v smer odtoka voda.

Pri 5. vrsti prepustov naj bo naklon usmerjen vzporedno s padcem gladine poplavne vode.

Vzdolžni naklon prepusta pri naravnih vodotokih (6. vrsta prepustov) naj bo enak naravnemu padcu struge. Pri zelo strmih strugah v deročem režimu (hudourniki - 6.2) z velikimi vzdolžnimi nakloni naj bo naklon večji od kritičnega ($l_0 > l_c$). S tem se ohranja deroči režim toka.



Slika 9: Značilnosti toka skozi prepust z označbo prereзов
(primer prepusta na hudourniku – 6. vrsta)

– Oblikovanje vtoka (med prerezom 1 in 2 na Sliki 9)

Iz hidravličnih pogojev je razvidno, da je prevodnost prepusta odvisna predvsem od razmer na vtoku. Lokalne izgube na vtoku so v večini primerov prevladujoče.

Glede na vrste prepustov podajamo naslednja priporočila:

Pri meteornih kanalih (1. vrsta) je vtok običajno oblikovan s peskolovom s poglobljenim dnem. Zaradi vtoka skozi požiralnik, prostega pada v peskolov in vtoka v prepust tok večkrat prehaja preko kritične globine in so hidravlične izgube na vtoku praviloma velike. 1. ali 5. tip toka skozi prepust. Ključnega pomena je, da so podslapja v peskolovih čim večja. Če se vtok ne izvaja s peskolovom, naj bo oblikovan z zveznimi prehodi.

Pri 2., 3. in 4. vrsti prepustov zaradi majhnih hitrosti oblika vtoka (in iztoka) nimata bistvenega pomena. Izgube na vtoku so odvisne od oblikovanosti vtočne glave in kril. Zvezno oblikovani prehodi in poševna krila bistveno zmanjšujejo izgube na vtoku. Hipne zožitve, izpostavljene glave prepustov na vtoku bistveno povečujejo hidravlične izgube.

Pri 5. vrsti prepustov (inundacijski prepusti) je zaradi večjih hitrosti potrebno vtočni del oblikovati s poševnimi krili in zveznimi prehodi.

Vtoke v prepuste pri naravnih vodotokih (6. vrsta) je potrebno oblikovati zvezno z daljšim prehodom iz odprtega profila v profil prepusta. Na vtoku v prepust je potrebno ohranjati ali povečati hitrost ter ohraniti smer tokovnic.

Pri prepustih na hudourniških strugah, $l_0 > l_c$ (6.2. vrsta) je potrebno preprečiti prehod toka preko kritične globine (vodni skok). Hitrosti in posledično vlečne sile na območju vtoka in samega prepusta morajo biti zaradi preprečitve odlaganja plavin večje kot v normalnem profilu. Hitrosti vodnega toka se uravnavajo s padcem in širino. Na hudourniških strugah s pričakovanim velikim dotokom rinjenih plavin in plavja (veje, listje) je potrebno pred vtokom izdelati zaplavni objekt (prodno pregrado) za zadrževanje plavin in grablje za lovljenje plavja (Slika 10).



Slika 10: Manjša zaplavna kašna pregrada z grabljami za lovljenje plavja.



Slika 11: Zamašitev prepusta zaradi vpliva zajeze na vtoku in posledično zamašitve s plavinami in plavjem.

– Oblikovanje območja iztoka (med prerezom 3 in 4) in odseka dolvodno

Upoštevanje hidravlične pogoje je potrebno, kjer je možno, zagotoviti hidravlične pogoje, da voda pod iztokom (»spodnja voda«) ne zajezuje iztoka in notranjosti prepusta. S tem ukrepom se prepreči zastajanje plavin in plavja znotraj prepusta in posledično zamašitev.

Pri strmih prepustih z velikimi hitrostmi vodnega toka v deročem hidravličnem režimu je, zaradi večjih hitrosti in posledično večje kinetične energije, na iztoku iz prepustov pričakovati nastanek vodnih skokov in povečano možnost erozije. Predvsem pri prepustih z deročim tokom znotraj prepusta in naravno (neutrjeno) strugo pod prepustom je potrebno predvideti objekte za disipacijo energije (npr. sidrana groba kamnita zložba).



Slika 12: Regresivna erozija zaradi velike kinetične energije na prehodu na naravno pobočje.

– Oblikovanje notranjosti prepusta (med prerezom 2 in 3)

Pri prepustih na naravnih vodotokih in hudourniških strugah je potrebno predvideti oblogo dna, ki bo odporna proti abraziji. Ta je odvisna od hitrosti vodnega toka in deleža trdih delcev (plavin), ki potujejo z vodo.

Z globino prepusta naj se povečuje širina omočenega prereza.

Širina dna znotraj prepusta naj bo vedno manjša od širine dna v naravni strugi ($b_{\text{prep}} \leq 0.8 b_{\text{bnp}}$).

Če so prepusti pohodni zaradi dolžine objekta ali predvidenega vzdrževanja, se predvidi vsaj 0.6 m širok pas 20 cm nad gladino normalne srednje vode (Q_{sn}). Opisan pristop je bil uporabljen pri izgradnji prepustov na AC odsekih med Ljubljano in Celjem, kjer je dolžina prepusta presegla 30 m.

Pri prepustih z velikimi padci $I_0 \gg I_c$ je potrebno predvideti hrapavo dno (lomljenec v betonu).

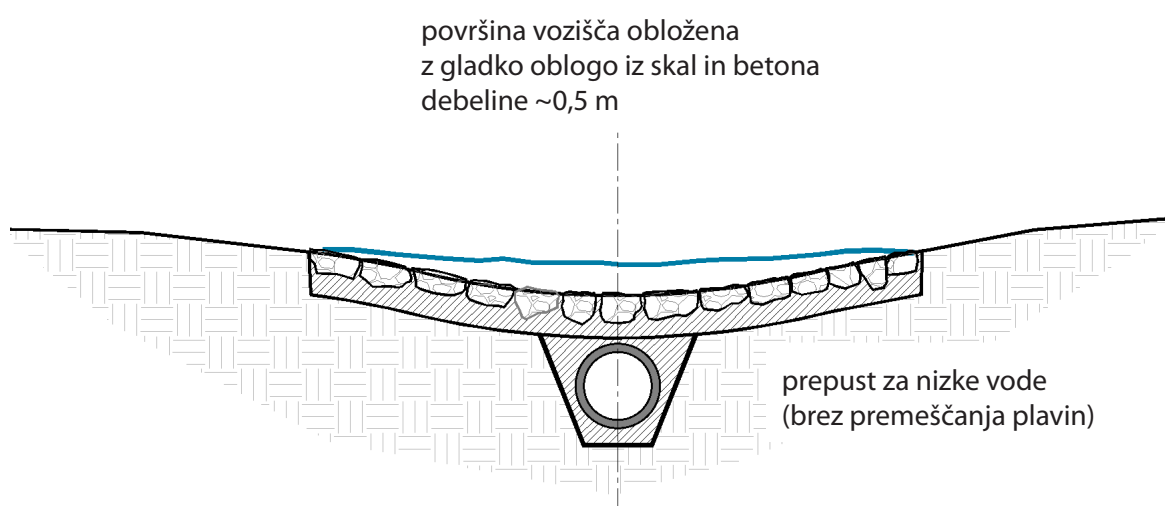
Pri dolgih prepustih z velikimi padci je potrebno upoštevati možnost nastanka oscilacij vodnega toka. Oscilacije nastanejo zaradi različnih hitrosti mejne plasti in gladine vodnega tok nastanejo. Višina valovi je bistveno večja od normalne globine vodnega toka. V teh primerih je potrebno zaradi preprečitve pulzacij tlakov predvideti večji pretočni prerez, večjo hrapavost dna in brežin ter v nekaterih primerih dodatno ozračanje prepusta.

– Splošna načela pri načrtovanju in gradnji prepustov

Uporaba večcevnih prepustov na naravnih vodotokih ni primerna. Večcevni prepusti naj se ne načrtujejo na območjih, kjer hitrosti vodnega toka presegajo 1 m/s, kjer obstaja možnost plavljenja plavja in premeščanja plavin. Večcevni prepusti naj se uporabljajo le kot začasni objekti (za dostope na gradbiščih) ali pogojno za premoščanje vodotokov na območjih s pogostimi poplavami in kjer so prometne komunikacije v času visokih vod prekinjene (kraška polja) in podobno.

Pri prepustih, ki so hidravlično poddimenzionirani ali kjer obstaja možnost zamašitve, je potrebno predvideti možnost prelivanja. Območje prelivanja preko prepusta je potrebno ugotoviti s hidravlično analizo in ustrezno utrditi, da se prepreči (regresivna) erozija nadkritja.

Na hudourniških območjih, kjer lokalne ali gozdne ceste prečkajo hudourniške struge, se poleg prepusta izvedejo povozna prelivna polja (»mulde«), ki so protierozijsko utrjena (obloge iz lomljenca in betona) in oblikovana na način da hkrati omogočajo prevoznost in ohranja vodni tok znotraj pretočnega prereza.



Slika 13: Primer povoznega prelivnega polja (»mulde«) pri prečkanju hudournikov na lokalnih in gozdnih poteh

– Varnostna višina

Pri prepustih za odvod meteornih vod (1. vrsta) naj bo maksimalna polnitev na vtoku $2/3$ višine pretočnega prereza.

Pri 2., 3. in 4. vrsti prepustov varnostna višina ni pogoj, je pa zaželena.

Pri inundacijskih prepustih (5. vrsta) naj bo varnostna višina na vtoku po možnosti enaka energijskemu potencialu vodnega toka ($v^2/2g$). Če je zadovoljiva varnostna višina na glavni premostitvi in če oddaljenost ni prevelika, je lahko inundacijski prepust tudi brez varnostne višine. V tem primeru je verjetnost zamašitve večja.

Pri prepustih na naravnih potokih in hudournikih (6. vrsta) naj bo varnostna višina 0,5 m ali energijski potencial ($v^2/2g$). Pri okroglih prepustih mora biti varnostna višina večja ali enaka polmeru prepusta.

6 Mostovi

Mostovi so premostitveni objekti z razponom večjim od 5 m.

Glede na funkcionalnost in značilnosti medija, ki ga premoščajo, ločimo naslednje vrste mostov:

1. Mostovi preko vodotokov (hudourniška območja, dolinska in nižinska območja, kraška območja);
2. Inundacijski mostovi na poplavnih območjih (območja z občasno počasno tekočo vodo);
3. Posebne vrste mostov (območja plazenja in drugih masnih gibanj).

6.1 Določitev projektnih pretokov za dimenzioniranje prepustov – hidrologija

Za hidravlično dimenzioniranje mostov je potrebno pridobiti podatke o visokih voda vodotoka na vplivnem območju posega. Skladno s predpisi (*Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav z njimi povezane erozije celinskih voda in morja in Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti*) je potrebno določiti vsaj projektne pretoke Q_{10} , Q_{100} in Q_{500} .

Projektni pretoki za navedene povratne dobe se povzamejo po že izdelanih in s strani DRSV potrjenih hidroloških študij ali določijo s pomočjo **hidrološkega modeliranja**.

V nekaterih primerih so potrebne ali zahtevane tudi preveritve hidravlične pretočnosti oziroma odpornosti na pretoke daljših povratnih dob, na vpliv podnebnih sprememb ali ob upoštevanju ponovitve preteklih poplavnih dogodkov.

Pri presoji odpornosti mostov na podnebne spremembe se projektne vodne količine določijo z upoštevanjem relativnega povečanja pretokov visokih vod po scenariju RCP4.5 za obdobje življenjske dobe objekta (do leta 2070 ali 2100). Podatke o relativnem povečanju za posamezne scenarije je pripravil ARSO za vodomerne postaje – merska mesta in so navedeni v publikaciji Trendi povratnih nivojev visokovodnih pretokov (5).

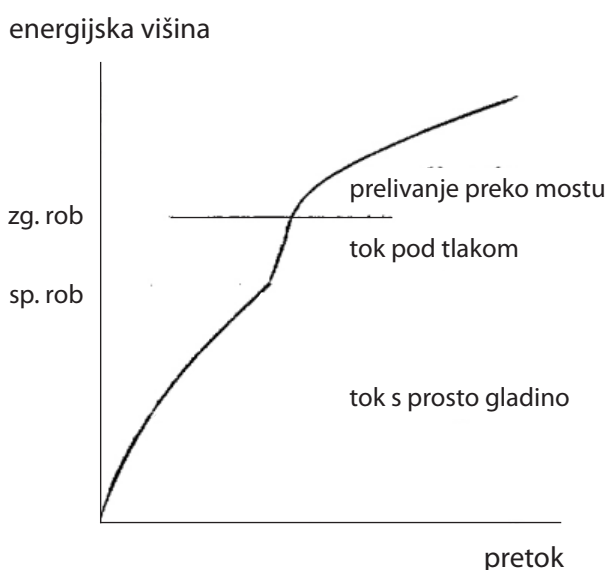
Ker se načrtujejo in izvajajo tudi premostitve s posebnimi hidrološkimi ali hidravličnimi zahtevami, je potrebno pridobiti ustrezna strokovna hidrološka izhodišča oziroma vhodne podatke tudi za te primere (masna gibanja).

6.2 Hidravlično dimenzioniranje

Hidravlično dimenzioniranje se izvaja z uporabo 1D+2D ali polnih 2D hidravličnih modelov na celotnem vplivnem območju premostitve. Pri modeliranju se izvede posamezne dodatne analize konstrukcijskih elementov mostov (oporniki, krila, oblikovanje zgornje konstrukcije) ter ovrednoti vplive morfoloških sprememb (spremembe pretočnega profila zaradi erozije ali odlaganja plavin, vpliv plavja, vpliv ledu in podobno). V nekaterih primerih je potrebna 3D analiza vpliva posameznih delov premostitve. Poleg izračuna gladin in hitrosti na območju premostitve je ključni podatek energija vodnega toka.

Na območjih z gibljivim dnom, kjer je prisotno odlaganje ali erozija rečnega dna, je potrebno izračunati »vlečne sile« (strižne napetosti ob dnu) in analizirati odpornost dna in brežin. Pri tem je potrebno pripraviti kvantitativno oceno navedenih procesov (globina erozije, debelina naplavin in podobno).

Pri analizah premostitve z upoštevanjem pretokov, ki so večji od pretočnosti odprtine, je potrebno upoštevati »sestavljene krivulje« iz treh različnih vrst hidravličnega toka in sicer do izpod spodnjega roba plošče mostne konstrukcije veljajo zakonitosti toka s prosto gladino, na območju mostne plošče (in ograj) veljajo zakonitosti toka pod tlakom, ob prelitju mostne plošče pa zakonitosti toka pod tlakom in preliva.



Slika 14 : Sestavljena pretočna krivulja pri preplavitvi mostne konstrukcije in primer mostu čez Savinjo pri Radmirju po poplavi 4. avgusta 2023

Na območjih, kjer se ob visokih vodah vzpostavijo vzporedni poplavni tokovi, se pri hidravličnem dimenzioniranju upošteva celoten hidravlični prerez (mostna odprtina in poplavno območje). Pri hidravlični presoji je potrebno analizirati vpliv zaraščenosti (razlika med vegetativnim obdobjem in izven tega obdobja). Tudi v teh primerih je potrebno zagotoviti ustrezno varnostno višino (točka 6.3).



Slika 15: Projektno predviden vzporedni poplavni tok

– Hidravlično analiziranje vpliva plavja

Na večini vodotokov je poleg pretoka visokih vod in premeščanja plavin pričakovati tudi plavljenje grmovja, vej, hlodovine in drugih predmetov, ki so lažji od vode (bale). Na mostovih z vmesnimi oporniki je potrebno v izračunih upoštevati odebelitev opornikov zaradi vpliva plavja, kar bistveno zmanjša pretočnost mostne odprtine. Nekateri programski paketi omogočajo vnos podatkov v modul za izračun premostitev. V kolikor se uporabljajo modeli brez te možnosti, je potrebno širino vmesnih opornikov povečati za ocenjeno širino plavja (tudi do 6 m).



Slika 16: Primer vpliva plavja (Trnovčka brv čez Savinjo pri Spodnji Rečici)

– Hidravlično dimenzioniranje pri posebnih vrstah tokov

Pri hidravličnem dimenzioniranju posebnih vrst premostitev je potrebno upoštevati hidravlične zakonitosti medija, ki ga premostitev premošča.

Pri prodonosnih in hiperkoncentriranih tokovih je potrebno določiti mejne zmožnosti premeščanja plavin in na podlagi tega določiti potrebno velikost (in obliko) pretočnega prereza. Pri hiperkoncentriranih tokovih so razmerja med trdnimi delci in vodo bistveno večja kot 1:1 (lahko tudi 10:1).

Pri ne-Newtonskih tekočinah (drobirski in blatni tokovi) je potrebno upoštevati znaten vpliv viskoznosti, mejne strižne trdnosti in disperzivnosti.

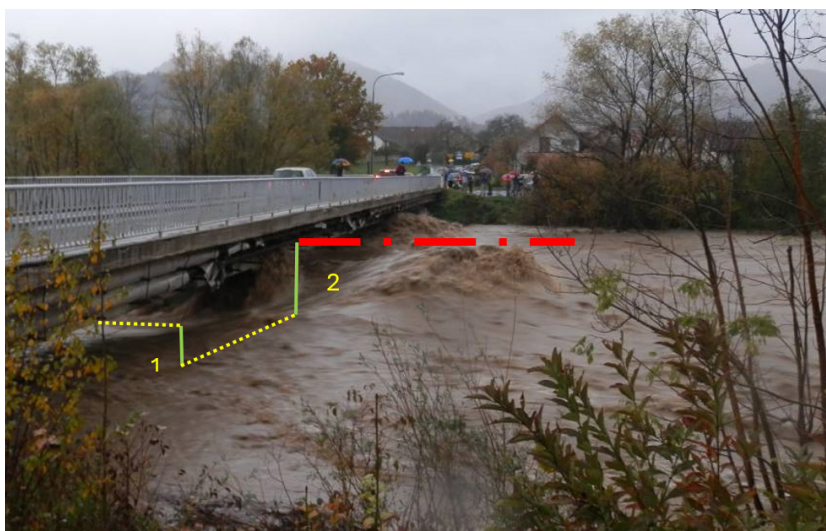
Ker navedeni procesi presegajo meje klasične hidravlike, je za ovrednotenje procesov in dimenzioniranje premostitve sodelovanje ekspertov s področja masnih gibanj (hidrotehnik s specifičnimi znanji in poznavanjem območja obdelave, geologi in podobno).

Na območju premoščanja plazenja se pri določanju dimenzij premostitve upošteva predvsem razmere na terenu s sodelovanjem geološke in geomehanske stroke.

6.3 Varnostne višine h_v

Običajno je s strani DRSV predpisna varnostna višina 0,5 m, pri večjih vodotokih do 1,0 m.

Glede na hidravlične razmere je osnovni pogoj kinetična energija vodotoka na območju premostitve ($v^2/2g$) v matici struge. Pri hitrostih vodnega toka nad 3 m/s je ta vrednost višja od minimalne vrednosti, ki jo predpisuje DRSV.



Slika 17: S številko 1 je označena svetla višina med gladino in spodnjim robom konstrukcije.

S številko 2 je označena približna vrednost kinetične energije $v^2/2g$, ki je bistveno večja od višine, označene s številko 1.

Poleg navedenih hidroloških in hidravličnih pogojev je pri določitvi varnostne višine potrebno upoštevati širino premostitve glede na pretočni profil in možnost plavljenja (veje, debla, drevesa, bale sena in podobno), ki je prav tako odvisna od pretoka in širine rečne struge ob visokih vodah.

Glede na dejanski vpliv podnebnih sprememb (PS) je pri računskem pretoku nujno upoštevati relativno povečanje pretoka skladno z že opisanimi izhodišči.

Na podlagi izkušenj pri načrtovanju ter analiz ob preteklih poplavnih dogodkih naj se pri določitvi varnostne višine upošteva naslednje pogoje:

Varnostna višina h_v (višina med izračunano gladino in spodnjim robom konstrukcije)			
Osnovni pogoj			Dodatni pogoj (presoja odpornosti)
A. Pretok		B. Hitrost vodnega toka	C. Dodatek vpliva podnebnih sprememb
Merodajni pretok (Q100 ali Q500)		Povprečna hitrost vodnega toka	Relativno povečanje pretokov Q100 in Q500
do 500 m ³ /s	0,5 m	$h_{var} = v^2/2g$	Scenarij RCP 4.5, % povečanja pretoka za obdobje vsaj do leta 2070 (oziroma 2100)
nad 500 m ³ /s	Dodatek višine 0,05 m pri povečanju pretoka za vsakih 100 m ³ /s pri pretoku nad 500 m/s		

Preglednica 1: Določitev varnostne višine h_v po dveh osnovnih kriterijih (pretok in hitrost vodnega toka) ter dodatni pogoj, ki upošteva vpliv podnebnih sprememb. Vpliv podnebnih sprememb se upošteva z relativnim povečanjem merodajnega pretoka (Q100 ali Q500) po predpisanem scenariju RCP 4.5

Primerna varnostna višina je višja od vrednosti, ki sta določeni z upoštevanjem osnovnega pogoja A (pretok) ali B (povprečna hitrost).

Vpliv podnebnih sprememb (pogoj C) predstavlja dodaten dvig gladin nad Q100 zaradi povečanja pretokov po izbranem scenariju in za izbrano obdobje. Dodatni dvig gladin je praviloma nižji od izračunane vrednosti varnostne višine po enem ali drugem osnovnem pogoju (A ali B).

– Izbor merodajnega pretoka

Za objekte (mostove in prepuste), ki zagotavljajo osnovno vsakodnevno povezavo, je predlagana izhodiščna povratna doba 100 let. Ta pogoj velja za mostove na državnih regionalnih cestah, občinskih cestah ter lokalnih cestah.

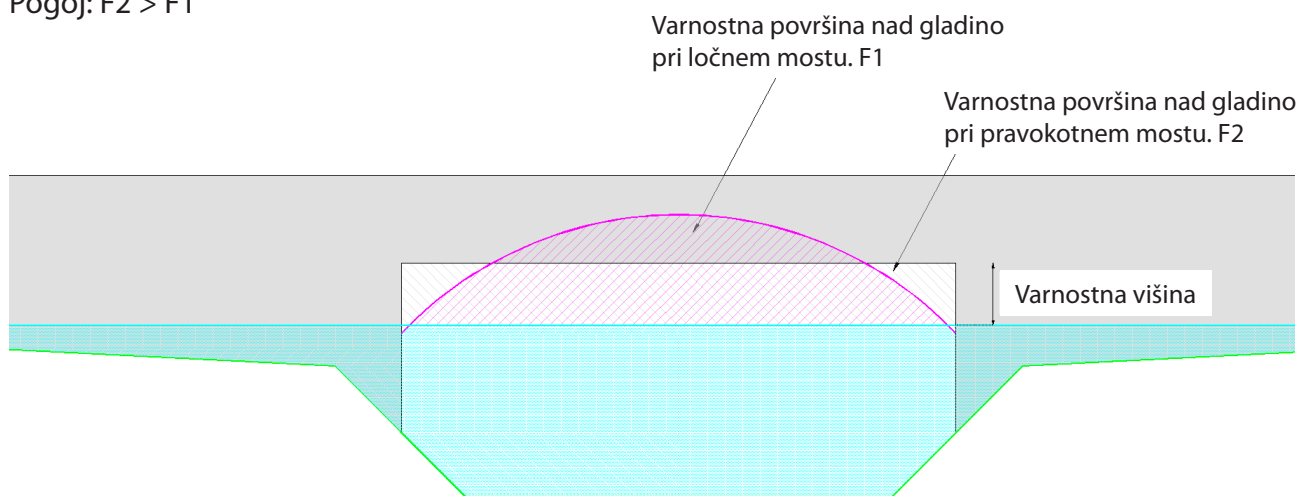
Pri mostovih na državni cestni in železniški mreži, ki morajo biti odporni tudi pri izrednih dogodkih in ki so ključni za delovanje države, je predlagana izhodiščna povratna doba 100 let z dodatkom podnebnih sprememb in z zagotovljeno odpornostjo pri pretokih Q_{500} (gladina pri pretoku Q_{500} naj bo nižja od varnostne višine). Pri pretoku Q_{500} z dodatkom podnebnih sprememb mora biti zagotovljena odpornost objekta, računaska gladina lahko presega varnostno višino h_v . Opisani pogoj naj velja za nove mostove na glavnih cestah v okviru mreže državnih cest ter avtocestno in železniško omrežje.

Ne glede na izbor pretoka in vrsto premostitve se pri vseh premostitvah preveri odpornost na Q_{500} z dodatkom vpliva PS.

Posebni primeri določitve varnostne višine h_v

Pri premostitvah z ločno obliko spodnjega dela premostitvene konstrukcije velikokrat varnostne višine ni možno zagotoviti na robovih na območju krajnih mostnih opornikov. Ker so na teh mestih manjše hitrosti, je potrebna varnostna višina manjša. V teh primerih je potreben pogoj, da je površina med izračunano gladino in spodnjim robom mostne konstrukcije **večja**, kot pri mostu s horizontalnim spodnjim robom konstrukcije.

Pogoj: $F_2 > F_1$



Slika 17: Razlika varnostnih višin in površin med pravokotno in ločno obliko spodnjega roba mostu

6.4 Morfološka in dinamična analiza območja premoščanja in vplivnega območja

Pri načrtovanju in izvedbi novih ali rekonstrukciji obstoječih mostov je potrebno analizirati morfološke značilnosti vplivnega območja mostu, relief, pokrovnost, geološke značilnosti območja, lego hribinske podlage, izpostavljenost eroziji, vire in možnosti transporta plavja, morfologijo in strukturne značilnosti struge, ovrednotenje procesov premeščanja plavin, preveritev možnosti nastanka hiperkoncentriranih tokov ali drugih masnih gibanj in podobno.

Analiza se izvede na podlagi terenskih ogledov, kartiranj, zbiranja informacij o preteklih ujmah (Atlas voda), ortofoto posnetkov in posnetkov brezpilotnih letalnikov.

Ugotovitve se opiše v tehničnem poročilu, oziroma opisu.

6.5 Splošna načela pri načrtovanju in gradnji mostov:

- Pri zasnovi pretočnega prereza je potrebno upoštevati morfološke in dinamične značilnosti vodotoka.
- Širina pretočnega prereza naj bo 2 % do 10 % ožja od normalne (povprečne) širine pretočnega prereza. Ukrep povečuje dinamično pretočnost mostne odprtine zaradi lokalnega povečanja hitrosti.
- Hidravlični vpliv konstrukcije (zaježba) ne sme poslabšati poplavne varnosti na gorvodnem odseku (razen v izjemnih primerih, ko je most načrtovan kot dušilka).
- Upoštevati je potrebno »stanje voda«, ki opredeljuje morfološke in ekološke razmere na območju premostitve. Analizira se vplivni odsek osnovne struge, brežin, zaledje s poplavnimi območji s prehodi med naštetimi elementi. Stanje voda se s posegom ne sme poslabšati.
- Upoštevati povezanosti vodnega in priobalnega prostora prečno in vzdolž reke.
- Ohranjanje naravnih značilnosti rečnega in obrečnega prostora.



Inženirska zbornica Slovenije

Jarška cesta 10/b, 1000 Ljubljana, Slovenija

T: +386 (0)1 547 33 40

E: izs@izs.si / **I:** www.izs.si