

Praćenje morfodinamičkih promjena korita vodotoka u zoni stupova mostova

Autori:

Prof.dr.sc. Neven Kuspilić

Dr.sc. Damir Bekić

Gordon Gilja

Prof.dr.sc. **Neven Kuspilić**, dipl.ing.građ.

Dr.sc. **Damir Bekić**, dipl.ing.građ.

Gordon Gilja, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za hidrotehniku

Kačićeva 26, 10000 Zagreb

I. Uvod

Stabilnost korita vodotoka ovisi o režimu pronosa nanosa. Ako je narušena prirodna ravnoteža u pronosu nanosa, dolazi do produbljivanja korita i urušavanja obala ili pak do zaprečavanja protočnog profila, stvaranja uspora, a nizvodno od uspora područja ubranog tečenja zbog čega pak dolazi do lokalnog produbljivanja 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 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. Pojavu 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. Suvremeni uređaji koji se temelje na satelitskom pozicioniranju i ultrazvučnom mjerenju pomažu nam da bismo mogli prikupiti vrlo kvalitetne informacije za predviđanje stanja stabilnosti korita.

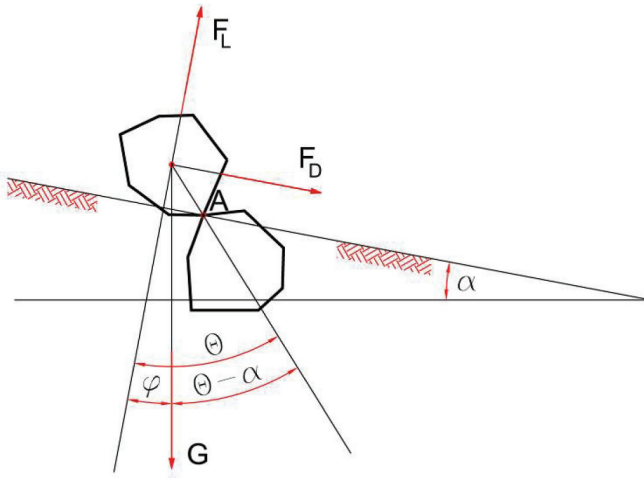
Niz je primjera u praksi o problemima koje je izazvao proces produbljivanja korita. Ovdje ćemo spomenuti jedan koji se dogodio kod nas (naginjanje stupa mosta Sava-Jakuševac) te jedan koji se dogodio u Irskoj (rušenje mosta Malahide zbog narušavanja stabilnosti stupa). Spomenuti željeznički most Sava Jakuševac nalazi se u Zagrebu kod naselja Mičevac. U noći 30. ožujka 2009., za trajanja vodnog vala, došlo je do naginjanja južnog od dva stupa koja se nalaze u koritu Save. Na sreću, iako je teretni vlak koji je prošao preko mosta izazvao znatna oštećenja rasponske konstrukcije, nije došlo do težih posljedica (ljudskih stradanja ili rušenja cijelog mosta u rijeku zajedno s kompozicijom). Drugi primjer je rušenje dijela željezničkog mosta Malahide koji premošćuje Broadmeadows estuarij sjeverno od grada Malahide. Konstrukcija mosta urušila se 21. kolovoza 2009. u 18:25 sati. Stupovi mosta djelomično su temeljeni na građevini praga trapeznog profila izvedenoj od lomljenog kamena, koji je početno izgrađen 1845. godine. Do rušenja je došlo zbog narušavanja stabilnosti preljeva uslijed djelovanja vode.

2. Mehanizmi procesa lokalne i globalne erozije korita

2.1. Mehanizam pokretanja zrna nanosa

Na zrno nanosa djelovat će dvije sile. Jedna je sila kojom voda djeluje na zrno, a druga je sila gravitacije. Čestica će se pokrenuti ako hidrodinamička sila nadvlada silu otpora. Hidrodinamička sila imaće dvije svoje komponente: tzv. vučnu silu F_D koja je usmjerena kao i tok vode i silu hidrodinamičkog uzgona F_L usmjerenu okomito na tok

vode. Komponenta hidrodinamičkog uzgona u analitičkim je postupcima vrlo često izostavljena iz razloga složenosti postupka određivanja njene veličine. Međutim ona je u izravnoj vezi s vučnom silom, tako da je potrebno eksperimentalno odrediti koeficijente koji će u sebi sadržati i učinak hidrodinamičkog uzgona.



Slika 2.1. Shematski prikaz djelovanja sila na zrno nanosa na nagnutom dnu

Fizikalne veličine koje utječu na pokretanje nanosa dijele se u tri grupe. Prva grupa odnosi se na vodu (općenito fluid), druga na nanos (sediment) a treća na one koje zajednički djeluju i na vodu i na nanos.

Tako će na nanos djelovati sljedeće fizikalne veličine:

$$\rho_s, d, q_v \text{ odnosno } \rho_s - \rho, d, q_v,$$

gdje su:

ρ_s - gustoća mase nanosa [kg/m^3],

ρ - gustoća mase vode [kg/m^3],

d - karakteristični promjer zrna nanosa [m],

q_v - jedinični volumni pronos nanosa [m^2/s].

Na vodu će djelovati sljedeće fizikalne veličine:

$$\rho, \mu, q \text{ odnosno } \rho, \nu, \bar{v}, h,$$

gdje su:

μ - dinamički koeficijent viskoznosti [Ns/m²],

ν - kinematički koeficijent viskoznosti [m²/s],

q - jedinični protok [m²/s],

\bar{v} - brzina toka vode [m/s],

h - dubina vode [m]

Djelovanje na vodu i nanos bit će uslijed "g", gdje je g - ubrzanje sile teže [m/s²]. Ako preuzmемо pretpostavku da su navedene fizikalne veličine one koje utječu na proces pokretanja nanosa, možemo ispisati opću jednadžbu za dimenzionalnu analizu:

$$f_1(\rho, \nu, \bar{v}, h, \rho_s - \rho, d, q_v, g) = 0. \quad 2.1$$

Budući da je tečenje u prirodnim vodotocima u području turbulentnog režima i hidraulički hrapavog režima, utjecaj viskoznosti na proces kretanja nanosa može se zanemariti. Isto tako sila trenja kod jednolikog tečenja jednaka je komponenti težine u smjeru toka pa se jedan od tih utjecaja može izostaviti. Konačno jednadžba dobiva sljedeći oblik:

$$f_2\left(\frac{g\Delta d}{\bar{v}^2}, \frac{d}{h}, \frac{q_v}{\bar{v}h}\right) = 0, \quad 2.2$$

gdje je:

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}.$$

Bezdimenzijski članovi gornje jednadžbe predstavljaju osnovu za eksperimentalno određivanje uvjeta pokretanja i pronosa vučenog nanosa.

Osim navedenog oblika, u istraživanjima se koriste i drugačiji. Tako se gotovo redovito, umjesto srednje brzine toka vode \bar{v} , uvodi pripadajuća brzina posmika

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}},$$

gdje je τ_0 [Pa] srednje posmično naprezanje na dnu. Iako se radi o različitim fizikalnim veličinama (brzina i brzina posmika), njihova zamjena u dimenzionalnoj analizi je dopuštena iz razloga što imaju istu dimenziju.

Uvođenjem takvog pristupa, dobiva se drugačiji oblik jednadžbe dimenzionalne analize:

$$f_3 \left(\frac{d\sqrt{\tau_0/\rho}}{v}, \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d}, \frac{q_v}{\sqrt{g\Delta d^3}} \right) = 0 \quad 2.3$$

U toj jednadžbi prvi član predstavlja Reynoldsov broj zrna nanosa, $Re = du/v$, drugi član predstavlja bezdimenzijsko posmično naprezanje i zove se Shieldsov broj ili parametar pokretanja. Treći parametar predstavlja parametar pronosa ili intenzitet pronosa. Veza između navedenih bezdimenzijskih parametara određuje se eksperimentalno te se dobivaju empirijske zakonitosti.

2.2. Deterministički pristup određivanja graničnog stanja pokretanja nanosa

Postoje dva pristupa tome problemu. Jedan se temelji na analizi takozvane granične brzine, a drugi na analizi dopuštenog posmičnog naprežanja.

2.2.1 Pristup granične brzine

Uzmu li se iz jednadžbe 2.2 u razmatranje prva dva člana, dobit ćemo podlogu za daljnje empirijske analize. Prema tome pristupu, brzina tečenja se stavlja u funkcijsku vezu s relativnim promjerom zrna:

$$\frac{g \Delta d}{v^2} = f \left(\frac{d}{h} \right). \quad 2.4$$

Ovu jednadžbu je moguće transformirati u drugi oblik, na način da umjesto srednje brzine toka uvedemo brzinu na dnu v_{gr} koja će početi pokretati nanos. Tu brzinu nazivamo graničnom brzinom, a jednadžba dobiva oblik:

$$\frac{v_{gr}}{\sqrt{g \Delta d}} = f\left(\frac{d}{h}\right). \quad 2.5$$

Brojni su autori istraživali navedeni odnos, pa se u ruskoj literaturi navode razni obrasci:

$$v_{gr} = 4,4 d^{1/3} h^{1/6} \text{ (Shamov),}$$

$$v_{gr} = 0,535 \log\left(\frac{8,8 h}{d}\right) \sqrt{2 g \Delta d} \text{ (Gončarov).}$$

Prema Gončarovu, kritična brzina je definirana kao brzina odvajanja, odnosno najmanja prosječna brzina pri kojoj se zrna nanosa počinju kretati. Pokazalo se da se to događa u trenutku kada se srednja vrijednost fluktuacija vertikalne hidrodinamičke sile izjednači s uronjenom težinom zrna.

Često korišten postupak Neilla (1967.) daje nešto drugačiju relaciju:

$$\frac{v_{gr}^2}{g \Delta d} = 2,5 \left(\frac{d}{h}\right)^{-0,20}. \quad 2.6$$

Prema Pilarczykku:

$$\frac{d_{n50}}{h} = \left(\frac{v_g}{B_1 \sqrt{k' \Psi_{cr} g \Delta m h}} \right)^{2,5}, \quad 2.7$$

gdje su:

B_1 koeficijent intenziteta turbulencije (5-6 jaka turbulencija; 7-8 srednja turbulencija; 9-10 mala turbulencija),

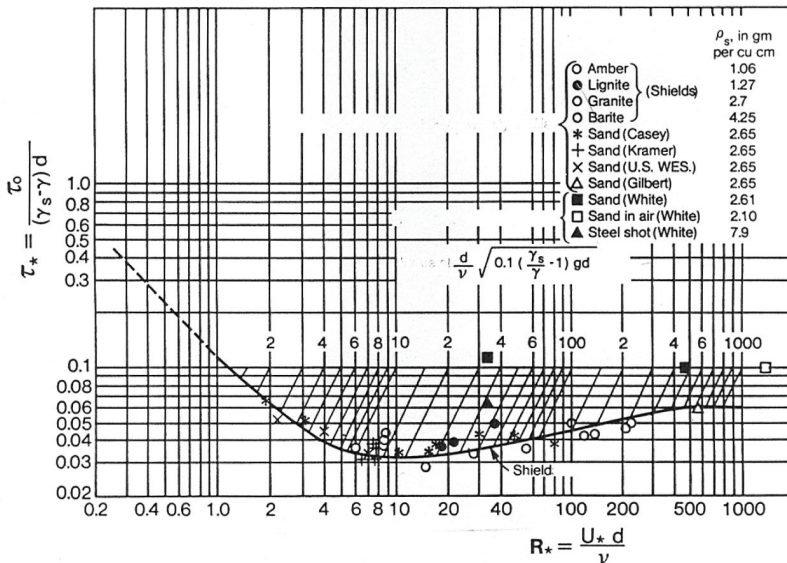
Ψ_{cr} Shieldsov broj – parametar pokretanja (0,03 za nepokretno dno; 0,04 za početak nestabilnosti; 0,06 potpuni razvoj pokretanja nanosa).

2.2.2. Pristup dopuštenog posmičnog naprezanja

Osnova za pristup dopuštenog posmičnog naprezanja za analizu pokretanja nanosa nalazi se u dimenzionalnoj analizi. Ako se iz jednadžbe 2.3 izostavi utjecaj trećega člana, može se postaviti funkcijska zavisnost prva dva člana:

$$\frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d} = f\left(\frac{d\sqrt{\tau_0/\rho}}{\nu}\right). \quad 2.8$$

Jedno od najznačajnijih istraživanja, koje je osnova za niz mnogih istraživanja raznih autora, proveo je Shields te temeljem mjerenja konstruirao dijagram (slika 2.2).



Slika 2.2. Shieldsov dijagram

U kasnijim su istraživanjima Mayer-Peter i Müller dobili da vrijednost Shieldsova parametra u zoni turbulentnog tečenja na hidraulički hrapavom dnu ($R^* > 200$) ima nešto manju vrijednost, odnosno da iznosi 0,047 (a ne 0,06). Otuda i njihov postupak određivanja dopuštenog posmičnog naprezanja prema kojemu je:

$$\tau_0 = 0,047(\rho_s - \rho)gd_s \left[\text{N/m}^2 \right]. \quad 2.9$$

2.3. 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 napreznja. 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 ispiru 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 se ne uključuje 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.

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

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

$$f_4(\mu, \rho, g, \bar{v}, h, d, \sigma_g, h_s, b_s, \varphi) = 0, \quad 2.10$$

gdje su:

μ - dinamički koeficijent viskoznosti [Ns/m^2],

ρ - gustoća mase vode [kg/m^3],

g - ubrzanje sile teže [m/s^2],

\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.

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.

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:

$$\frac{h_s}{D} = f_5 \left(Fr, \frac{d}{D}, \frac{h}{D} \right), \quad 2.11$$

gdje su Reynoldsov i Froudov broj definirani kao:

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

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

Istraživanja su pokazala da za konačnu dubinu kaverne h_{se} dominantan utjecaj ima odnos h/D . Mjerenja na modelskom istraživanju su pokazala da zavisnost parametara h_{se}/D i h/D ima velik rasap točaka. Ta činjenica upućuje na to da treba biti vrlo oprezan primjenjujući izvedenu empirijsku zakonitost:

$$\frac{h_{se}}{D} = 1,5 \operatorname{th} \left(\frac{h}{D} \right). \quad 2.12$$

Preporuka je, radi sigurnosti, primjenjivati takozvani zakon dvostrukog promjera, odnosno:

$$h_{se} = 2 D. \quad 2.13$$

Treba upozoriti na to da ova jednadžba vrijedi samo za sitnozrni materijal srednjeg promjera do nekoliko centimetara.

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. Općenito, dobiveno je da oblik poprečnog profila kružnog stupa daje 90% vrijednosti dubine kaverne u odnosu na pravokutni profil. Stup sa zašiljenim uzvodnim oblikom daje pak 80% vrijednosti u odnosu na pravokutni oblik.

Često citiran izraz za određivanje konačne dubine erozije h_{se} izveo je Laursen (1962.) prema čijem istraživanju vrijedi odnos:

$$\frac{h_{se}}{b_s} = 1,5 \left(\frac{h}{b_s} \right)^{0,3} . \quad 2.14$$

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

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

$$\frac{h_{se}}{b_s} = 3,4(Fr)^{2/3} \left(\frac{h}{b_s} \right)^{1/3} . \quad 2.15$$

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

$$\frac{h_{se}}{h} = 2,2 \left(\frac{b_s}{h} \right)^{0,65} (Fr)^{0,43} . \quad 2.16$$

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

Osim navedenih jednadžbi, postoje i one brojnih drugih autora (Melville, Larras, Breusers, Coleman, Ansari & Qadar, Hancu, Jain , itd.).

2.4. Globalna erozija korita

Kao što je već uvedno bilo rečeno, globalna stabilnost korita vodotoka ovisi o režimu pronosa nanosa. Ako je narušena prirodna ravnoteža u pronosu nanosa u smislu da je prinos nanosa s uzvodnog područja manji od rashoda zbog erozijske sposobnosti vodotoka, dolazi do produbljivanja (degradacije dna) korita. Stoga je za ocjenu stanja potrebno poznavati proces pronosa nanosa.

Nanos predstavlja krutu fazu u proračunima tečenja otvorenih vodotoka. Nanos se dijeli na suspendirani i vučeni nanos. Suspendirani nanos sadrži dvije komponente, a to su komponenta tranzitnog i komponenta koritoformirajućeg nanosa. Tranzitni nanos predstavlja dio krute tvari koja se (u smislu značajnog učinka) ne taloži u koritu vodotoka. Komponenta koritoformirajućeg nanosa u suspendiranom nanosu povremeno se taloži, a povremeno kreće u mješavini s vodom. Vučeni nanos je prema definiciji koritoformirajući.

U nastavku ćemo se osvrnuti na problem kretanja vučenog nanosa, jer njegova dinamika znatno utječe na stabilnost korita. Jednadžbe pronosa nanosa baziraju se na različitim temeljima. Ovdje ćemo spomenuti tri pristupa u rješavanju toga problema.

To su :

1. pristup posmičnog naprezanja (DuBoys, Shields, Einstein, Mayer-Peter Muller, Einstein Brown, Parker i dr.),
2. energetski pristup (Engelund Hansen, Ackers White, Yang),
3. parametarski pristup (Colby).

Podjela jednadžbi za proračune pronosa nanosa dijele se, s obzirom na njihovu praktičnu primjenu, na:

1. jednadžbe pronosa vučenog nanosa (DuBoys, Shields, Einstein, Mayer-Peter Muller, Einstein Brown, Parker i dr.),
2. jednadžbe pronosa suspediranog nanosa (Einstein),
3. jednadžbe pronosa materijala dna (koritoformirajućeg nanosa) (Colby, Engelund Hansen, Ackers White, Yang).

Navedeni autori samo su neki od svih onih koji se javljaju u literaturi, a „svakodnevno“ se pojavljuju nove inačice i novi postupci, što govori o aktualnosti i ne univerzalnosti dosadašnjih rješenja.

Mehanizam kretanja vučenog nanosa u šljunčanim koritima donekle se razlikuje od onoga u koritu s pjeskovitim dnom. Naime, kod šljunčanih korita utjecaj oblika dna nije toliko dominantan, te je hrapavost dna vezana pretežno uz hrapavost površine. Jasno je da hrapavost utječe na profil brzine tečenja, a poznato je da je posmično naprezanje proporcionalno gradijentu horizontalne komponente brzine:

$$\tau_0 = \mu \frac{du}{dz} \left[\text{N/m}^2 \right]. \quad 2.17$$

Gradijent horizontalne komponente brzine (nagib tangente na vertikalni profil brzine) ovisi o hrapavosti dna. Kod šljunčanih korita hrapavost je moguće odrediti u funkciji promjera zrna čestice, za što postoji niz obrazaca raznih autora, a ovdje ćemo citirati obrazac koji je odredio Bray:

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 1,36 \left(\frac{D}{d_{50}} \right)^{0,281}, \quad 2.18$$

gdje je D dubina vode, a f koeficijent hrapavosti prema Darcy-Weisbachovoj formuli:

$$f = \frac{4\tau_0}{\frac{1}{2}\rho v^2}. \quad 2.19$$

Ako u gornju jednadžbu uvedemo izraz za prosječno posmično naprezanje:

$$\tau_0 = \rho g R I, \quad 2.20$$

možemo izvesti da je brzina toka v jednaka:

$$v = \left(\frac{8gRI}{f} \right)^{1/2}. \quad 2.21$$

Za šljunčana korita srednjeg promjera zrna, koji prelazi 16 mm, nanos predstavlja uglavnom vučeni nanos. Razni istraživači za takve su uvjete tražili funkcijsku vezu između Shieldsova broja Ψ i intenziteta pronosa nanosa (drugi i treći član iz jednadžbe 2.3). Parker je (1979.) došao, temeljem istraživanja na seriji od više od 6000 podataka, do odnosa:

$$\Phi = 11,2 \left(\frac{1}{\Psi} - 0,03 \right)^{4/5} \Psi^3, \quad 2.22$$

gdje je

$$\frac{1}{\Psi} = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d} \quad \text{Shieldsov broj, a}$$

$$\Phi = \frac{q_v}{\sqrt{g\Delta d^3}} \quad \text{intenzitet pronosa nanosa.}$$

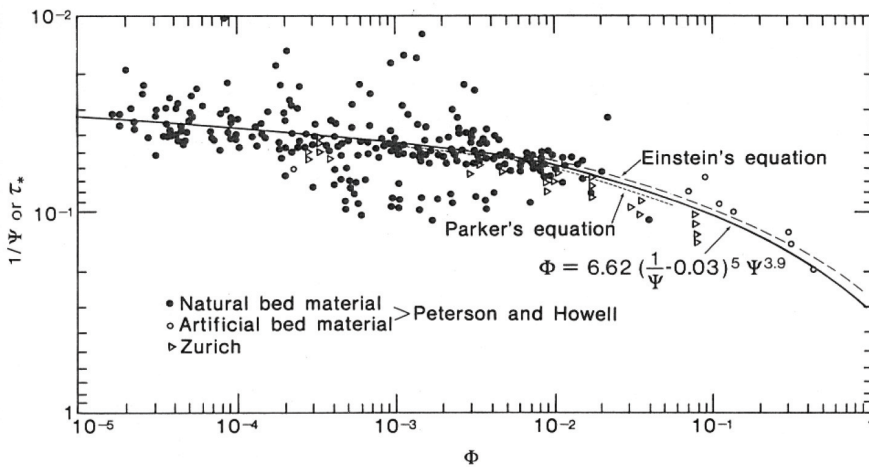
Changova istraživanja, temeljem podataka Meyer-Peterovih mjerenja u Zürichu na srednjem promjeru zrna od 28,6 mm, dala su nešto drugačiji oblik tog odnosa, odnosno:

$$\Phi = 6,62 \left(\frac{1}{\Psi} - 0,03 \right)^5 \Psi^{3,9}. \quad 2.23$$

Grafički predočene spomenute jednadžbe, u usporedbi s mjerenim vrijednostima, prikazane su na slici 2.3.

Treba komentirati da je u oba navedena postupka granična vrijednost Shieldsova parametra pri kojoj dolazi do pokretanja nanosa uzeta 0,03. To znači da na pokretanje nanosa djeluje onaj dio posmičnih naprezanja koji prelazi upravo tu vrijednost, odnosno primijenjen je DuBoysov pristup da je pronos nanosa proporcionalan „višku“ tangencijalnog naprezanja

$$(\tau - \tau_c).$$



Slika 2.3. Zavisnost pronosa vučenog nanosa (Chang)

Prilikom odabira postupka za procjenu pronosa nanosa treba biti vrlo oprezan. Razlog je tomu nepouzdanost i ograničenje s obzirom na to što se ne uzimaju u obzir sve fizikalne veličine i što se upotrebljavaju podaci dobiveni na uskom rasponu vrijednosti. Već sama činjenica da su neki istraživači mjerili na fizikalnim modelima, a neki u laboratoriju, onemogućava nas u međusobnoj usporedbi. Verifikacija postupaka treba biti provedena na mjerenjima u prirodi.

3. Praćenje procesa

Procesi morfoloških, hidrauličkih i hidroloških promjena u koritu prirodnog vodotoka moguće je pratiti primjenom sofisticiranih akustičkih mjerača koji rade na principu Dopplerova efekta. Hidrografska praćenja sastoje se od snimanja batimetrije dionice riječnog korita te hidroloških snimanja profila brzina (i geometrije korita) na kontrolnim profilima. Batimetrija se snima višesnopnim dubinomjerom (multibeam), a profili brzina akustičkim strujomjerom (ADCP).

3.1. Hidrografska snimanja

Suvremena hidrografska snimanja iziskuju uporabu niza međusobno povezanih uređaja koji u realnom vremenu i u apsolutnim prostornim koordinatama daju kao rezultat sliku korita vodotoka i sliku brzina vode u pojedinim točkama. Za snimanje korita koristi se kombinacija višesnopnog (multibeam) dubinomjera i GPS-RTK sustava za njegovo pozicioniranje. Rezultat takvih mjerenja je detaljna topografska slika riječnog

korita omeđenog obalama. Osjetljivi višesnopni dubinomjer otkriva i područja fizički nedostupna i oku nevidljiva i tako pomaže u ocjeni geotehničke stabilnosti tla. Za izmjeru predmetnog područja upotrijebljeni su: višesnopni dubinomjer ODOM ES3 sa TSS DMS 25 senzorom pokreta, CRESCENT VS100 uređaj za određivanje azimuta kretanja, Digibar 1200 uređaj za određivanje brzine zvuka u vodi u realnom vremenu i GPS-RTK sustava za pozicioniranje Trimble R8 GNSS.



Slika 3.1. Višesnopni dubinomjer ODOM ES3M

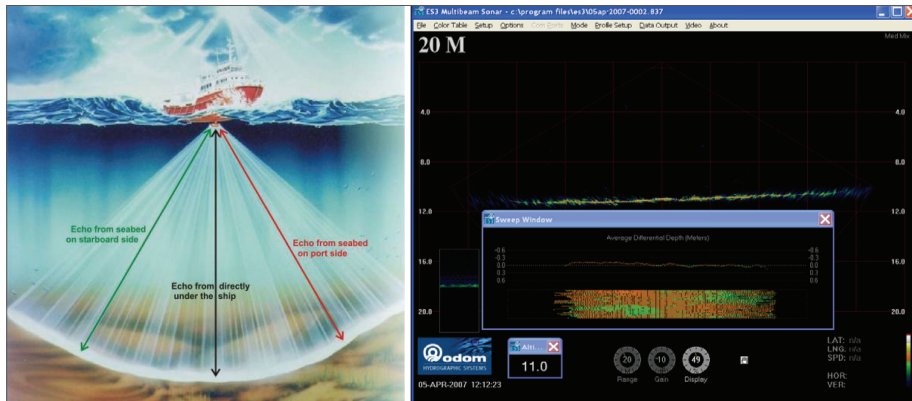
Multibeam ODOM ES3 koristi snop od 420 akustičkih zraka, svaka širine do 3° u smjeru i okomito na smjer putanje plovila, koje se šire vodom u obliku lepeze (Slika 3.2) od uređaja do dna i odašiljući zvučni signal u smjeru okomitom na putanju plovila. Signal se potom odbija od dna i vraća u aktivne senzore primopredajnika koji koriste zvučnu energiju signala, pritom bilježeći podatke o položaju krute granice unutar vodotoka. Rezultat su batimetrijske karte snimljenog područja velike rezolucije. Prijedeni put signala se lako izračuna iz jednadžbe

$$l = v \cdot \left(\frac{t}{2} \right) [\text{m}], \quad 3.1$$

gdje je v brzina zvuka kroz vodu mjerena za svaki odaslani snop zraka pomoću Digibar uređaja. Širina trake zraka koje odašilje multibeam ovisi o dubini vode, s maksimalnom vrijednošću od 80 m pri dubini vode 60 m i kutu snopa od 120° . Zvučni signal se šalje u pravilnim vremenskim razmacima i bilježi kontinuirano u smjeru putanje plovila.

Lokacija se određuje u realnom vremenu preciznim GPS-RTK sustavom, periferno priključenim na multibeam uređaj. Korekcije su također bilježene u realnom vremenu za visinski položaj uređaja, nagibe oko vertikalne i horizontalne osi i otklon kuta putanje od sjevera te pridružene podacima iz primopredajnika preko softverskog paketa Hypack Max 2009 s integriranim Hysweep modulom.

Jedinica primopredajnika smještena u kućištu prilagođenom za bočnu montažu na plovilo opremljena je elektroničkom opremom potrebnom za emitiranje i primanje zrake, procesorima za oblikovanje zrake i detekciju dna, kao i svim sučeljima potrebnim za priključivanje periferne dodatne opreme kao što su senzor gibanja plovila, kompas, GPS i sat. (Slika 3.1)

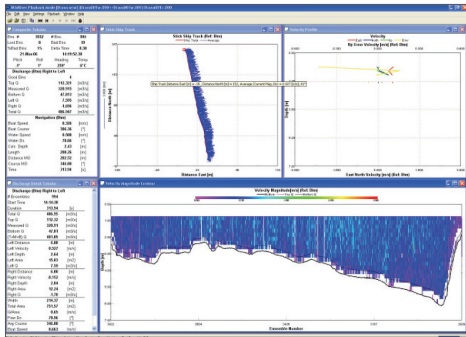


Slika 3.2. Prikaz snopa akustičkih zraka kroz vodeni medij i njihov računalni prikaz u realnom vremenu pri mjerenju

3.2. Hidraulička snimanja

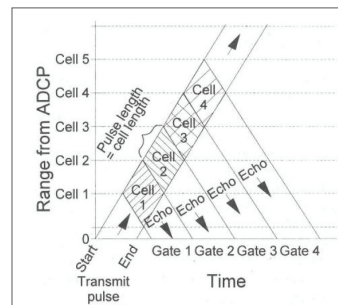
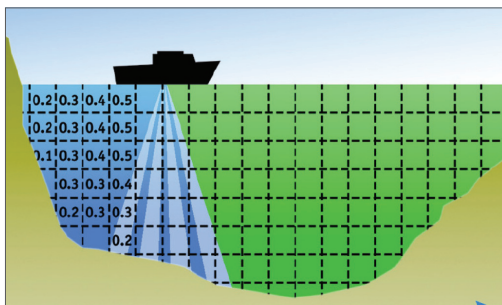
Profili brzina mjere se s čamca (Slika 3.3) uporabom akustičkog strujomjera na bazi Dopplerova efekta, Accoustic Doppler Current Profiter (ADCP). Pri mjerenjima je korišten akustički strujomjer (ADCP) tipa RDI Workhorse Rio Grande, frekvencije 1200 kHz, koji služi za mjerenje prostornog smjera i brzine struja u moru, rijekama ili jezerima. Strujomjer je spojen na brodicu, na njenom bočnom dijelu (Slika 3.3) Za lociranje brodice na kontrolnim profilima i za snimanje točaka dna korišten je RTK GPS uređaj.

ADCP koristi Dopplerov efekt na način da odašilje zvučne signale na određenoj fiksnoj frekvenciji i prima povratni odjek dobiven od raspršivača zvuka (sound scatterers) u vodi. Raspršivači zvuka su bilo koje čestice suspenzije ili planktoni koji raspršuju zvuk natrag prema ADCP-u. Nalaze se svuda u vodi i u prosjeku se kreću istom horizontalnom brzinom kao i voda, što je i najvažnija pretpostavka, jer ADCP zapravo mjeri brzinu tih raspršivača zvuka. U osnovi, ADCP strujomjer opaža promjene u frekvenciji početnog zvučnog signala. Drugim riječima, refleksijom početnog signala od sitnih čestica ili planktona u vodi dobiva se povratna zvučna slika čija je frekvencija razmjerna brzini čestica, uz pretpostavku da čestice putuju istom brzinom kao i voda.



a. Računalno sučelje programa WinRiver
Slika 3.3. Snimanje strujne slike ADCP uređajem

b. Položaj uređaja na plovilu



Slika 3.4. Procesiranje strujne slike po slojevima pomoću ADCP strujmjera

Poprečni profil vodotoka podijeli se na niz ćelija čije se dimenzije unaprijed zadaju. Protok se izračunava preko srednje brzine u svakoj ćeliji. Vertikalni stupac vode dijeli se na niz jednako širokih slojeva (Slika 3.4) Jedinični protok u ćeliji dobiva se množeći površinu jedne ćelije i pripadajuću srednju brzinu u ćeliji. Protok u jednom stupcu dobiva se zbrajajući jedinične protoke u vertikalni. Poprečnim prelaskom preko širine rijeke dobiva se ukupni protok na mjernom profilu. Snimanjem strujne slike poprečno na smjer tečenja, dobiva se cjelokupna trodimenzionalna strujna slika profila, a integriranjem strujne slike po površini protok na mjernom profilu.

4. Most Sava – Jakuševac

4.1. Uvod

Do najvećih oštećenja i narušavanja stabilnosti mostova koji premošćuju rijeke dolazi tijekom poplavnih događaja. Štetna djelovanja na konstrukciju su različita, a najznačajnije je svakako lokalno podlokavanje riječnog korita pri temeljima mosta (erozija temelja upornjaka i stupova). Smatra se da je gubitak stabilnosti mostova zbog erozije posljedica neadekvatnih kriterija pri projektiranju mostova i manjka terenskih ispitivanja stvarne erozije na izgrađenim objektima.

4.1.1. Lokacija

Željeznički most „Jakuševac“, kojim pruga Velika Gorica – Sesvete premošćuje rijeku Savu kod Mičevca, izgrađen je 1968. godine. Rasponska konstrukcija mosta je čelična, ukupne duljine 440 m a širine 9 m. Najveći otvor rasponske konstrukcije mosta je između dva stupa koja se nalaze u koritu rijeke Save, s rasponom od 66 m. Dva masivna stupa temeljena su u samom koritu rijeke Save.

4.1.2. Gubitak stabilnosti rasponske konstrukcije mosta

Dana 30. ožujka 2009. u 22:30 teretni vlak s 26 vagona, koji se kretao iz smjera Zagreba, strojovođa je zaustavio na sredini mosta jer je nailaskom na most primijetio nepravilnosti na pruzi. Naime, došlo je do gubitka stabilnosti nosive konstrukcije, što je za posljedicu imalo deformaciju rasponskog sklopa mosta i kolosijeka (Slika 4.1), te onemogućavanje odvijanja željezničkog prometa. Raščišćavanje kompozicije vlaka je završeno 31. ožujka u 1:15 sati.



Slika 4.1. Most „Jakuševac“ nakon gubitka stabilnosti

4.1.3. Uzroci gubitka stabilnosti

Do naginjanja stupa došlo je zbog superpozicije dva djelovanja: narušavanja globalne stabilnosti korita zbog čega se cijelo korito vodotoka znatno spustilo u odnosu na vrijeme kada je most projektiran i izveden te pojave lokalnog podlokavanja u zoni stupa mosta. Razmjeri tih promjena su sljedeći:

1. dno korita spustilo se od 1966. do 2009. za red veličine 5-6 m,
2. lokalno produbljenje u zoni stupa je 4-5 m,
3. ukupno produbljenje u zoni stupa u odnosu na projektirano dno je oko 10 m!

Degradacija dna korita rijeka (narušavanje globalne stabilnosti korita) u području gornjega toka prirodna je pojava (rijeka Sava na području Jakuševca se nalazi u zoni kraja gornjega toka.). Međutim na gradijent tih promjena uvelike utječe ljudski faktor. Konkretno, na ubrzanje procesa utjecali su sljedeći parametri:

1. usporena prihrana nanosom zbog izgradnje brana i pragova na uzvodnom području;
2. povećanje vučne sile zbog: a. povećanja uzdužnog pada što je posljedica skraćivanja trase vodotoka regulacijskim radovima i b. povećanje dubine vode prilikom prolaska poplavnih valova zbog koncentracije toka u koritu za veliku vodu, bez prirodnih inundacija;
3. eksploatacija šljunka iz rijeke.

Prirodni riječni šljunak, kao mineralna sirovina, ima veliku primjenu u građevinarstvu. U vremenu konjunktura građevinarstva rastu i potrebe za tom sirovinom, a zorna ilustracija količinskih potreba dana je na fotografiji iskopa šljunka u kanalu Sava-Odra (Slika 4.2).

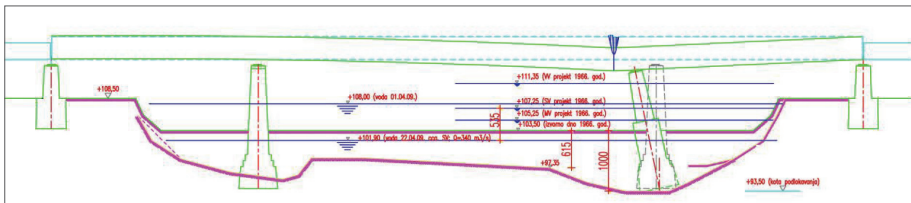


Slika 4.2. Primjeri uzroka i posljedica erozije prirodnih vodotoka

Lokalna erozija u aluvijalnim koritima vodotoka javlja se na mjestima gdje je strujna slika poremećena uslijed utjecaja uronjenog tijela, tj. umjetnim građevinama. Isto tako se javlja zbog dodatnih strujanja uvjetovanih vanjskim utjecajima, a ne samo utjecajima gravitacijskog tečenja. Uzrokovana je utjecajem stupova i upornjaka na riječni tok,

a karakterizira ju pojava podlokavanja neposredno kod stupa ili upornjaka mosta. 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 naprezanja i stvaranju uvjeta za intenzivnije odnošenje materijala s dna korita i oštećenje betonskih ploha izloženih djelovanju toka vode (Slika 4.2).

Zbog već uznapredovale globalne erozije korita, dno rijeke se znatno spustilo u odnosu na razinu u vrijeme projektiranja i izgradnje mosta [13], tj. razina riječnog dna se ukupno spustila za 5 m. Položaj stupova mosta u koritu rijeke je uzrokovao dodatno sniženje korita zbog pojave lokalne erozije u zoni neposredno uz uzvodne stijenke stupova koja je u toj zoni korito produbila još 5 metara (Slika 4.3). Zbog ovog ukupnog podlokavanja, odnosno odnošenja dijela nosivog tla ispod stupova mosta, stabilnost mosta je bila narušena. U trenutku kolapsa mosta vodostaj Save bio je vrlo visok, kao i protok te brzina toka koji su u kombinaciji sa statičkim i dinamičkim opterećenjem uslijed nailaska vlaka doveli do gubitka stabilnosti konstrukcije naginjanjem stupa mosta u kavernu.



Slika 4.3. Utjecaj globalne i lokalne erozije na korito rijeke Save u profilu mosta „Jakuševac“ tijekom 20-godišnjeg razdoblja

4.2. Praćenje morfoloških promjena oko mosta

Tijekom 2009. godine, u razdoblju od travnja do listopada, Građevinski je fakultet u Zagrebu (Zavod za hidrotehniku) u suradnji s Geodetskim fakultetom u Zagrebu (Katedra za hidrografiju), obavio hidrografska snimanja batimetrije rijeke Save. U sklopu praćenja promjena provedene su geodetske i hidrografske izmjere višesnornim dubinomjerom (multibeam). Područje obuhvaćeno hidrografskom izmjerom je površine oko 2 ha, a obuhvaća područje sjeverno i južno od mosta Mičevac u ukupnoj duljini 200 m te obalu i inundacijski pojas rijeke Save.

4.3. Praćenje hidrauličkih parametara toka

U sklopu praćenja promjena hidrauličkih parametara toka na promatranom dijelu obavljena su terenska mjerenja u četiri navrata: 22. travnja, 07. svibnja, 28. rujna i 26. listopada 2009. Pri svakom izlasku na teren obavljena su mjerenja na šest kontrolnih

poprečnih profila, po tri s nizvodne i uzvodne strane mosta. Polje brzine vode na promatranoj dionici i oko stupova mosta dobiveno je snimanjem profila brzina. Na svakom profilu su mjereni sljedeći parametri: profil brzine toka, protočna površina, širina vodnog lica, vodostaj i protok.

4.4. Teorijska procjena dubine podlokavanja

Na dubinu erozije kod stupova mosta utječu brojni čimbenici. Pri proračunu je nužno utvrditi eroziju izazvanu svim mogućim uzrocima, a to znači međusobno povezane utjecaje globalne i lokalne erozije. Superpozicija tih dviju vrsta erozije u konačnici može rezultirati oštećenjem dijela sklopa mosta ili otkazivanja njegove nosivosti. Globalna erozija je dugogodišnji tromi proces, dok maksimalna lokalna erozija nastupa u relativno kratkom vremenu pri uvjetima velikih voda. U nastavku se stoga razmatra lokalna erozija kod južnog stupa mosta u koritu Save (stup S2).

Odnos između dubine podlokavanja d_s i parametara o kojima ovisi može se zapisati kao:

$$d_s = f \left[\begin{array}{l} \text{riječij tok}(\rho, v, V, y, G, g) \text{ sastav korita}(d_{50}, \sigma_g, \rho_s, V_c) \\ \text{geometrija mosta}(B, b), \text{ vrijeme}(t) \end{array} \right],$$

gdje je: ρ = gustoća vode, v = kinematička viskoznost, V = srednja brzina toka, y = srednja dubina toka, G = parametar koji opisuje utjecaj poprečne raspodjele toka i oblika poprečnog presjeka korita, g = ubrzanje gravitacije, d_{50} = srednja veličina zrna u sastavu korita, σ_g = standardna devijacija distribucije čestica u sastavu korita, ρ_s = gustoća sedimenta, V_c = kritična brzina toka za pokretanje čestica dna korita, B = širina temelja, b = širina stupa.

Procjena dubine podlokavanja dana je empirijskim jednadžbama koje su uspostavili razni autori. Za dobivanje kvalitetnije procjene dubine podlokavanja korišteni su postupci prema ovim autorima: Melville, Larras, Laursen, Breusers, Shen, Coleman, Ansari & Qadar, Hancu te Jain. Primijenjeni izrazi prikazani su u nastavku.

Melville:

$$d_s = K_{yB} \cdot K_l \cdot K_d \cdot K_s \cdot K_\theta \cdot K_G \cdot K_t \quad 4.1$$

$$d_s = 1.05 \cdot K_s \cdot K_\theta \cdot b^{0.75} \quad 4.2$$

Laursen:

$$d_s = b \cdot 1.34 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.5} \quad 4.3$$

Breusers:

$$d_s = 1.4 \cdot b \quad 4.4$$

Shen *et al.*:

$$d_s = 0.000223 \left(\frac{V \cdot b}{v} \right)^{0.619} \quad 4.5$$

Coleman:

$$\frac{V}{\sqrt{2gd_s}} = 0.6 \left(\frac{V}{b} \right)^{0.9} \quad 4.6$$

Ansari & Qadar:

$$d_s = 0.86 \cdot b_p^3 \text{ za } b_p < 2.2\text{m} \quad 4.7$$

$$d_s = 3.6 \cdot b_p^{0.4} \text{ za } b_p > 2.2\text{m}$$

Hancu:

$$\frac{d_s}{b} = 2.42 \left(\frac{y}{b} \right)^{1/3} \cdot Fr^{2/3} \quad 4.8$$

Jain:

$$\frac{d_s}{b} = 1.84 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.3} \quad 4.9$$

4.5. Izračun lokalne erozije matematičkim modelom

Za analizu dubine podlokavanja stupova uslijed djelovanja lokalne erozije primijenjen je jednodimenzionalni matematički model HEC-RAS ver 4.0.

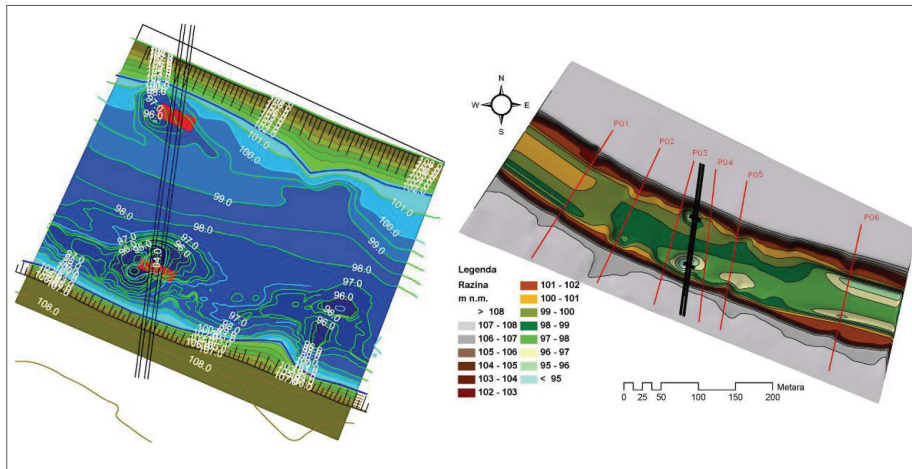
Kao ulaz u model je korištena prethodno snimljena geometrija korita kontrolnih poprečnih profila. Na toj su geometriji izračunani hidraulički parametri toka za snimljene uvjete tečenja od 22. travnja 2009. kako bi se dobio dovoljan broj podataka o parametrima toka u okolici mosta. U model su unesene geometrijske karakteristike kontrolnog profila na kojem se nalazi most, kao i samog mosta. Na temelju oblika mosta i njegove izloženosti toku odabrani su koeficijenti za korištenje u vladajućim jednadžbama.

Rezultati se sastoje samo od predviđanja lokalne erozije, tj. model nije u mogućnosti izračunati sniženje korita uslijed djelovanja globalne erozije. Model izračunava konačnu dubinu podlokavanja stupova mosta uslijed djelovanja lokalne erozije, tj. onu dubinu pri kojoj je količina materijala iz dna koja se erodira iz kaverne jednaka onoj koja u nju ulazi. To znači da nije moguće vremenski promatrati propagaciju erozije na odabranoj građevini.

4.6. Rezultati

4.6.1. Hidrografski snimak batimetrije

Izmjereni podaci o batimetriji korita na promatranoj dionici prikupljeni su i obrađeni Hysweep integriranim modulom za obradu podataka višeslopnog dubinomjera. Podaci prikupljeni na obalnom dijelu GPS-RTK metodom i klasičnim geodetskim mjerenjima totalnom stanicom, obrađeni su u programskom paketu Trimble Business Centre. Za kompozitni prikaz snimljenih podataka u CAD formatu korišten je softverski paket AutoCAD Civil 3D.



Slika 4.4. Snimak batimetrije u području mosta

Kako je sam položaj mosta u zavoju, veće brzine toka su na konkavnoj strani, tj. na strani stupa S2. Zbog toga su jedinični pronos nanosa i erozija dna korita izraženiji na toj strani (Slika 4.3). 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 ($Q_{s, ulaz} = Q_{s, izlaz}$). Vidljivo je da dubina kaverne koja je nastala u zoni stupa (Slika 4.4) premašuje 4 m u odnosu na srednju kotu dna korita kod oba stupa i da je kaverna otprilike jednako formirana. To znači da je u ovoj fazi lokalna erozija dostigla svoj maksimum i da se nalazi u stanju privremene ravnoteže sve dok se cjelokupno korito dodatno ne produbi pod utjecajem globalne erozije.

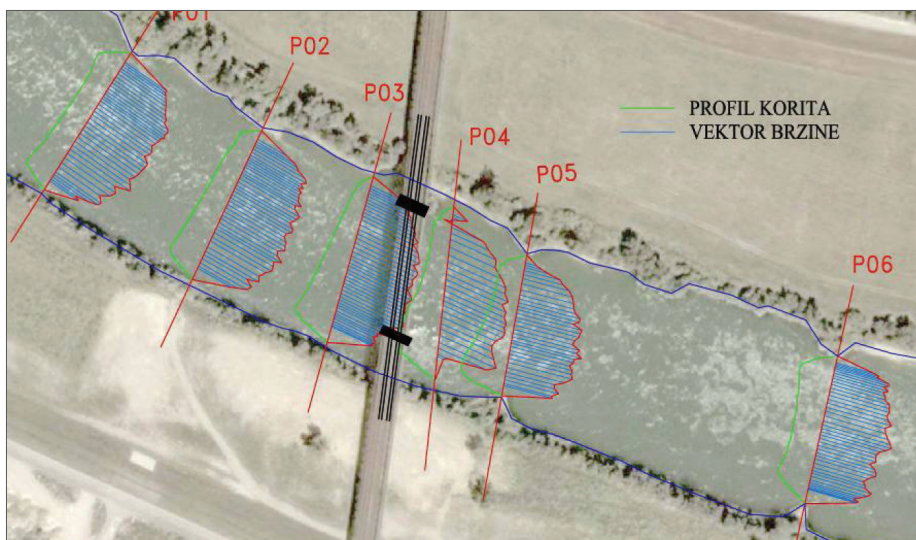
4.6.2. Hidraulički snimak brzine toka

Izmjereni podaci o profilima brzina, trasi brodice, dubini korita, itd. mogu se izravno provjeravati na računalu za vrijeme mjerenja te pohraniti za kasniju obradu. Prilikom mjerenja primijenjen je računalni program WinRiver 1.06. Za vrijeme mjerenja moguće je kontrolirati smjer i iznos brzine, te protok [12].

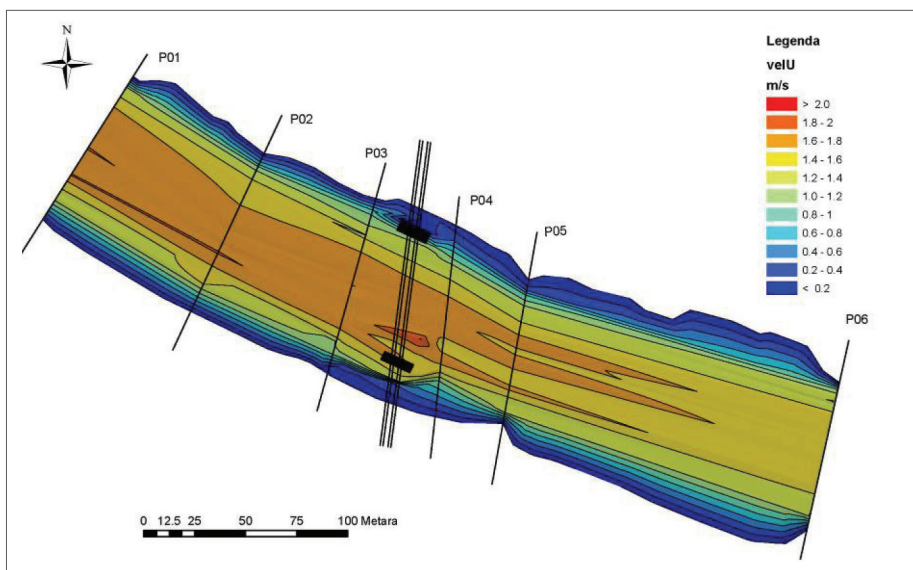
Nakon snimanja na rijeci, prikupljeni podaci obrađeni su primjenom računalnog programa izgrađenog na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, a čime se omogućava prikaz trodimenzionalnog profila brzina, kao i zasebne komponente brzine (u , v , w). U slučaju mjerenja po poprečnom profilu, brzina je osrednjena po prostoru. Jedan način osrednjavanja brzina, ali kod stacionarnih profila, opisali su Mueller & Rehmel [9].

Osrednjavanje po prostoru izvedeno je na način da je nekoliko vertikalnih ensembleova osrednjeno u jedan vertikalni profil. Broj vertikalnih uključeni u osrednjavanje odabran je prema više kriterija. Minimalan broj vertikalnih je 3, a maksimalan 10. Nadalje, kako je veličina ADCP ćelije bila 0,25 m, svaka promjena dubine veća od 0,25 m predstavlja

novo osrednjavanje. Na taj način dobivene su prostorno osrednjene komponente u , v , w u sirovih brzina U , V , W koje su sada pogodne za grafički prikaz. Promjena brzina duž promatrane dionice prikazana je tlocrtom srednjih brzina po dubini vode (Slika 4.5), te poljem brzine toka (Slika 4.6).

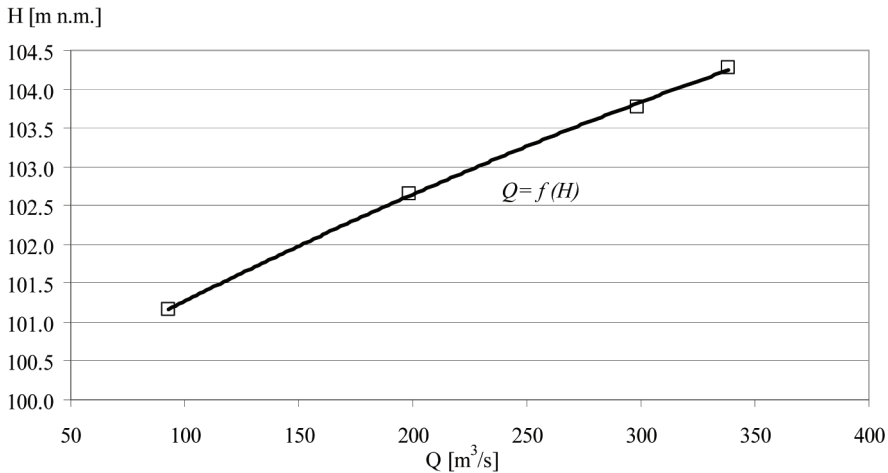


Slika 4.5. Prevaljeni profili brzine na 6 kontrolnih profila



Slika 4.6. Izmjereno polje brzine toka

Za izvedena četiri međusobno nezavisna terenska mjerenja prikazana je shematska krivulja protoka na profilu mosta „Jakuševac“ (Slika 4.7) za raspon protoka između 100 i 350 m³/s.



Slika 4.7. Krivulja protoka dobivena na temelju mjerenja

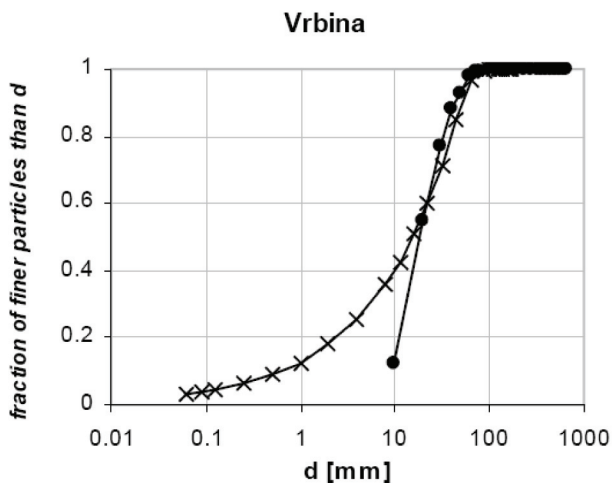
4.6.3. Dubina podlokavanja uslijed lokalne erozije

Za proračun dubine podlokavanja kod južnog stupa u Savi mosta "Jakuševac" korištene su izmjerene hidrološke veličine na samoj promatranoj dionici, te empirijski koeficijenti ovisni o geometriji samog stupa.

Terenskim mjerenjem pomoću akustičkog strujomjera izmjereni su hidrološki i hidraulički parametri potrebni za proračun: srednja dubina toka $y = 2,41$ m, srednja brzina toka $V = 1,5$ m/s (Slika 4.6), površina protočnog profila $A = 190$ m² te širina vodnog lica $B = 82$ m. Iz geodetskog snimka očitani su gabariti stupa mosta (Slika 4.4): širina stupa $b = 6$ m, duljina u smjeru toka $l = 15,8$ m te nagib uzdužne osi stupa u odnosu na glavni smjer struje $\theta = 0^\circ$.

Iz članka [11] preuzeta je granulometrijska krivulja za rijeku Savu. Granulometrijska krivulja je izmjerena u mjestu Vrbina u Sloveniji, neposredno uz granicu s Hrvatskom.

Iz krivulje su očitane vrijednosti srednjeg promjera zrna $d_{50} = 25$ mm i maksimalnog promjera zrna $d_{\max} = 75$ mm (Slika 4.8).



Slika 4.8. Granulometrijska krivulja rijeke Save na lokaciji Vrbina

Iz izmjerenih veličina se može neposredno izračunati Froudeov broj:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot \frac{A}{B}}} = 0,31 \quad 4.10$$

Za potrebe izračunavanja empirijskih jednadžbi treba najprije odrediti vrijednosti empirijskih parametara K_{yB} , K_I , K_d , K_s , K_θ , K_G i K_t :

K_{yB} = koeficijent odnosa srednje dubine toka i širine stupa predstavlja utjecaj dubine toka na eroziju u zavisnosti od širine stupa;

K_I = koeficijent utjecaja intenziteta toka predstavlja odnos dubine podlokavanja za određene hidrauličke uvjete i maksimalne dubine podlokavanja koja se javlja kod ekstremnih hidrauličkih uvjeta;

K_d = koeficijent utjecaja veličine zrna sastava korita;

K_s = koeficijent utjecaja oblika temelja;

K_θ = koeficijent utjecaja otklona stupa od smjera toka;

K_G = koeficijent oblika geometrije korita;

K_t = koeficijent utjecaja vremena predstavlja odnos lokalnog podlokavanja stupa u vremenu t i ravnotežne dubine podlokavanja d_{se} , koja se javlja u vremenu t_c .

S dostupnim mjerenjima i izračunanim svim potrebnim empirijskim parametrima pristupilo se je izračunavanju empirijskih jednadžbi za dubinu podlokavanja d_s te su dobivene sljedeće vrijednosti:

Melville: $d_s = 5,91$ m,

Larras: $d_s = 4,43$ m

Laursen: $d_s = 6,56$ m,

Breusers: $d_s = 8,40$ m

Shen *et al.*: $d_s = 4,50$ m,

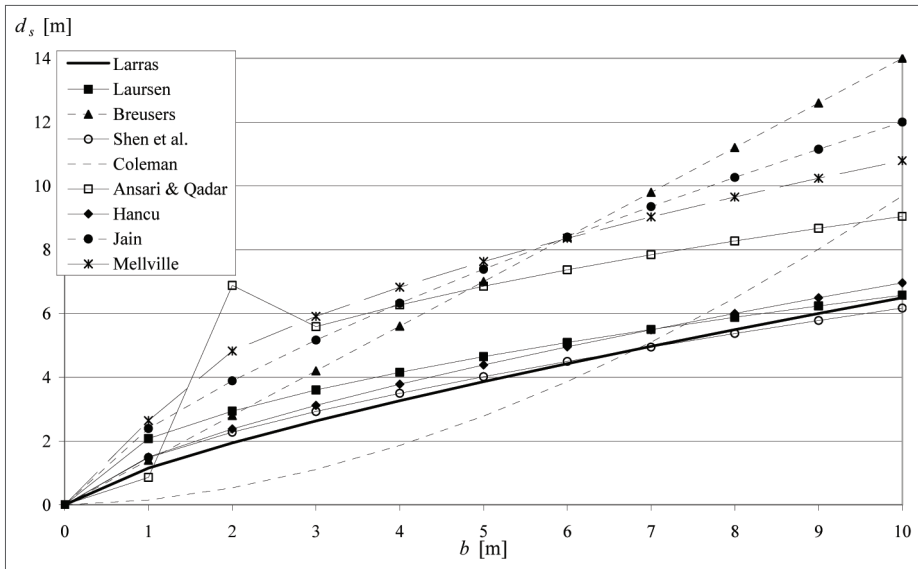
Coleman: $d_s = 3,86$ m,

Ansari & Qadar: $d_s = 7,37$ m,

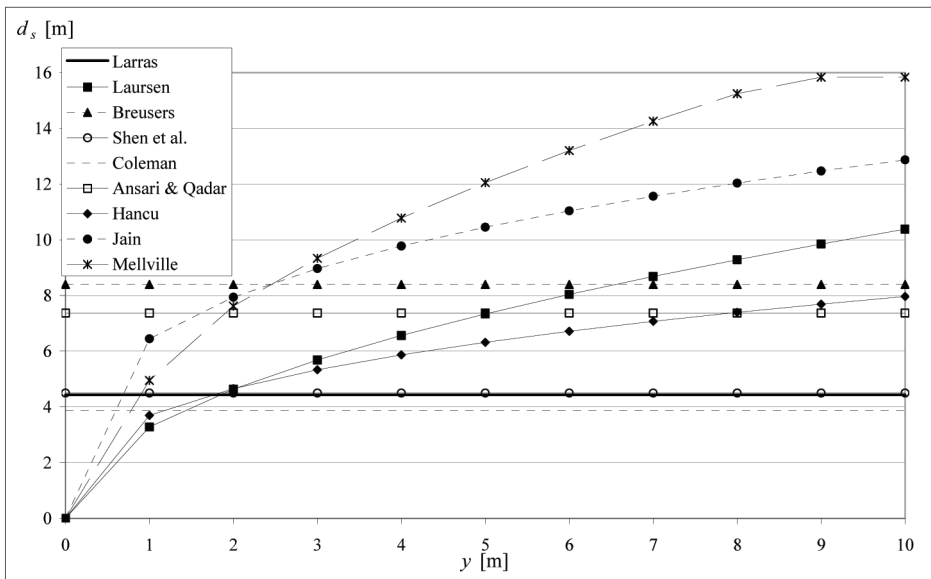
Hancu: $d_s = 4,95$ m,

Jain: $d_s = 8,39$ m.

Za prikazane empirijske jednadžbe provedena je analiza osjetljivosti za dva najvažnija parametra, a to su srednja dubina toka y i širina stupa b (Slika 4.9, Slika 4.10). Vidljivo je da su sve jednadžbe ovisne o širini stupa (Slika 4.9), a i prirast povećanja dubine podlokavanja sa jediničnim povećanjem širine stupa otprilike im je jednak. Ova činjenica ima to veću važnost jer je uslijed erozije dna korita u području profila mosta došlo do otkopavanja kesona, koji je širi od stupa, i samim time povećanja erozijskog potencijala toka na tom mjestu. Iz grafičkog prikaza (Slika 4.10) može se vidjeti da neke jednadžbe uopće ne uzimaju u obzir dubinu toka, nego pretpostavljaju da za određenu širinu stupa postoji dubina podlokavanja koja će biti doseguta bez obzira na uvjete u vodotoku. Vidljivo je da su se jednadžbe grupirale: jedna grupa za stvarne uvjete na promatranoj dionici rijeke Save daje srednju vrijednost dubine podlokavanja $d_s=4,7$ m, a druga $d_s=7,7$ m. Ukupna srednja vrijednost dubine podlokavanja od svih jednadžbi daje vrijednost $d_s=6,0$ m, što odgovara stvarno izmjerenoj dubini kaverne kod južnog stupa mosta „Jakuševac“.



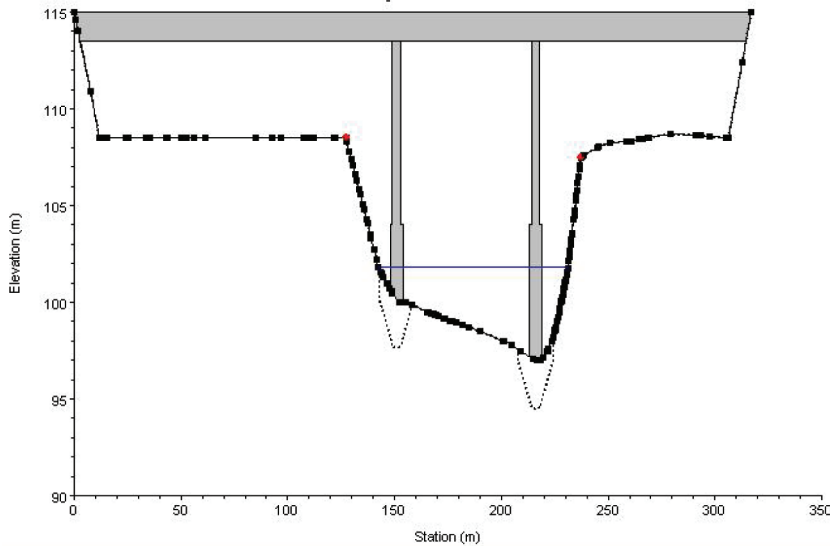
Slika 4.9. Ovisnost dubine podlokavanja d_s o promjeni širine stupa b uz konstantnu dubinu vode



Slika 4.10. Ovisnost dubine podlokavanja d_s o promjeni dubine vode uz konstantnu širinu stupa

4.6.4. Lokalna erozija izračunana softverskim paketom HEC-RAS

Iz rezultata dobivenih jednodimenzionalnim matematičkim modelom HEC-RAS (Slika 4.11) i njihovom usporedbom s izmjerenim stanjem (Slika 4.3) vidljivo je da je kaverna uz stupove nastala djelovanjem lokalne erozije sazrjela, tj. razvila se do svog ravnotežnog stanja.



Slika 4.11. Rezultat proračuna dubine podlokavanja iz matematičkog modela

5. Iskustva iz Irske (Malahide viaduct)

5.1. Uvod

Željeznički most koji premošćuje Broadmeadows estuarij sjeverno od grada Malahide (Slika 5.1) pozicioniran je na podvodnom pragu trapeznog profila, koji je početno izgrađen 1845. godine kao podvodni temeljni nasip stupova mosta. Prag je izveden od lomljenog kamena. Tijekom svoje povijesti, zbog utjecaja slijeganja i erozije, konstrukcija mosta i praga zahtijevali su adaptacijske radove različitih razmjera. Povijesni pregled radova na mostu i pragu prikazan je u radovima [2, 5], gdje su detaljno prikazane metodologije radova te različita poboljšanja i rekonstrukcije tijekom 150 godina duge povijesti mosta.



Slika 5.1. Lokacija željezničkog mosta Malahide

Nakon urušavanja dijela željezničkog mosta Malahide u 18:25 sati, dana 21. kolovoza 2009., UCC Flood Study Group je angažirana od strane Irish Raila na izradi hidrološke, hidrauličke i morfološke studije koja bi osigurala projektne smjernice za rekonstrukciju praga. Dogovoreni su ciljevi studije s inženjerima iz Irish Raila, kako slijedi:

- pomoći pri identifikaciji glavnog uzroka urušavanja mosta;
- pomoći pri oblikovanju trajnog rješenja poboljšanja/rekonstrukcije praga i mosta;
- analizirati hidrološki i hidraulički utjecaj na cijeli Broadmeadows estuarij za slučaj urušavanja i za slučaj rekonstrukcije praga;
- osigurati hidrološke i hidrauličke podloge za Studiju utjecaja na okoliš;
- definirati metodologiju za monitoring erozije i održavanja mosta i praga.

Urušavanje željezničkog mosta posljedica je kombinacije dvaju uzroka: djelomične erozije obloge praga te podrivanja jednog od jedanaest stupova mosta (stupa broj 4). Hidrodinamičke sile plimnog vala odnijele su dio praga širine 25 m, ostavljajući prostor u oblozi praga gdje je pri protoku od 100 m³/s i brzini vode do 5 m/s postojala potencijalna opasnost daljnje erozije i urušavanje ostatka konstrukcije mosta i praga.

5.2. Metodologija

Prvi dio studije uključivao je terenske konzultacije s inženjerima iz Irish Raila i izabranog izvođača radova na izradi akcijskog plana poboljšanja praga. Zatvaranjem pukotine u pragu spriječena je daljnja katastrofalna erozija cijele konstrukcije praga. Drugi dio studije uključivao je hidrotehnički projekt poboljšanja praga, koji bi neupitno bio stabilniji

od povijesnog praga te bi na taj način osigurao pouzdan temelj za stupove mosta u dugoročnom smislu. Hidrotehnički projekt uključivao je projektiranje geometrije i oblika praga (projekt hidraulike) te projektiranje sastava obloge praga i izvođenja radova (projekt konstrukcije). Sve varijante poboljšanja praga testirane su s obzirom na ekološke zahtjeve, jer je Broadmeadows estuarij kao rezervat ptica, flore i faune zaštićeno ekološko i socijalno područje (NHA, SAC i SPA)¹.

Glavni ciljevi hidrotehničkog projekta rekonstrukcije praga bili su osiguranje konstrukcijski stabilnog praga te osiguranje hidrauličkih karakteristika sličnih povijesnom pragu. Osiguranje sličnih hidrauličkih karakteristika iznimno je važno za Broadmeadows estuarij radi njegova zaštićenog i osjetljivog okoliša, gdje su se zahtijevale minimalne izmjene u razinama dna estuarija kao i minimalne izmjene u prostornim i vremenskim karakteristikama plimnog vala. Pomirenje oba glavna cilja bilo je vrlo izazovno pri projektiranju rekonstrukcije praga, jer prvi cilj zahtijeva značajne promjene u obliku i konstrukciji praga, dok drugi cilj postavlja značajna ograničenja pri određivanju oblika novog praga.

5.2.1. Projekt hidraulike praga

Osnovni pristup projektu hidraulike bio je određivanje karakteristika prelijevanja povijesnog praga i njegov utjecaj na razine vode u estuariju za cjelokupni raspon plimnog vala. Karakteristike prelijevanja poboljšanog praga trebaju biti približno iste kao i karakteristike povijesnog praga. Projekt hidraulike praga uključivao je hibridni model kao kombinaciju laboratorijskog i matematičkog modeliranja, te stručnu suradnju s geotehničkim inženjerima i izvođačem radova. Projekt hidraulike izrađen je u fazama.

1. Prikupljanje podataka

Za izradu fizikalnog i matematičkog modela prikupljeni su geometrija praga i mosta, batimetrija estuarija, hidrološki i hidraulički parametri. Terenska snimanja geometrije, batimetrije i vodnih razina estuarija izvršena su kombinacijom RTK-GPS uređaja i ultrazvučnog dubinomjera, a prostorni raspored profila brzina prikupljen je primjenom ADCP-a.

2. Izrada fizikalnog modela

Prikladni hidraulički modeli izrađeni su u hidrauličkom laboratoriju na University Colledge Cork (Irska). Fizikalni modeli izrađeni su za:

- određivanje protočnih karakteristika povijesnog praga,
- određivanje hidrauličkih karakteristika predloženog poboljšanog praga,
- projektiranje obloge poboljšanog praga,
- dobivanje parametara za kalibraciju 2-d matematičkog modela,
- dobivanje uvida u uzroke urušavanja.

¹ National Heritage Area (NHA), Special Areas of Conservation (SAC), Special Protection Areas (SPA)

3. Izrada matematičkog modela

Prikladne simulacije toka izvršene su na Građevinskom fakultetu u Zagrebu primjenom Mike21 numeričkog modela.

4. Proces hibridnog modeliranja

Fizikalni i matematički modeli kalibrirani su i međusobno usklađeni za niz hidroloških scenarija.

5.2.2. Projekt konstrukcije praga

Projekt konstrukcije uključivao je suradnju s geotehničkim inženjerima s obzirom na detaljni projekt stabilnosti zbog djelomično vodopropusnog tijela praga. Određene su karakteristike materijala filtarskih slojeva radi zaštite nožice od ispiranja kod povijesnog praga i poboljšanja praga. Projekt konstrukcije uključivao je i suradnju s izvođačem radova zbog utjecaja morskog ambijenta s oscilirajućim plimnim valovima na mogućnosti izrade određenih dijelova konstrukcije.

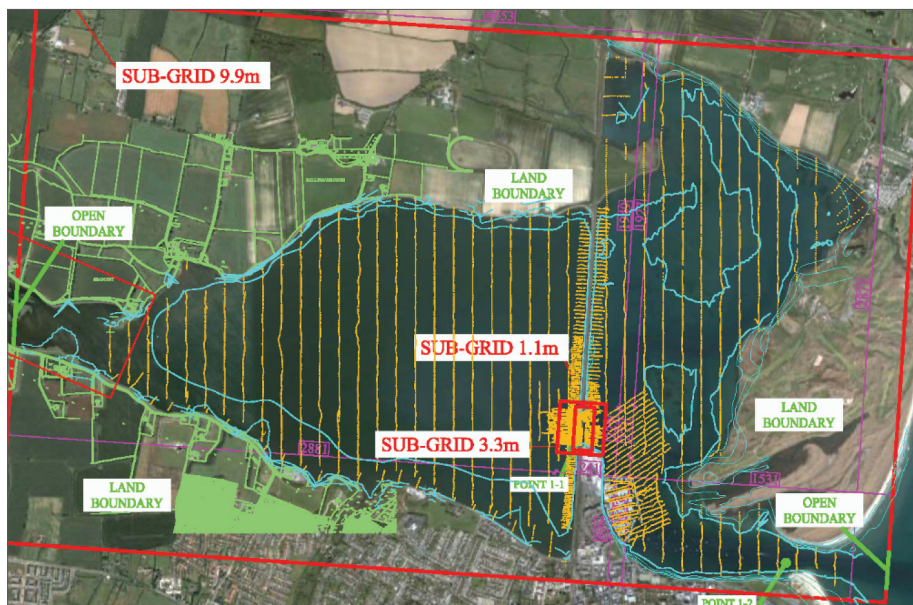
5.3. Prikupljanje podloga

5.3.1. Batimetrija

Djelatnici Građevinskog fakulteta u Zagrebu proveli su terenska snimanja protoka i prostornih profila brzina uporabom ADCP uređaja RioGrande, radne frekvencije 1200 kHz (Slika 5.2). Detaljna terenska snimanja geometrije praga i mosta, batimetrije i vodnih razina estuarija izvršena su kombinacijom RTK-GPS uređaja i ultrazvučnog dubinomjera, čiji su rezultati grafički prikazani (Slika 5.3).



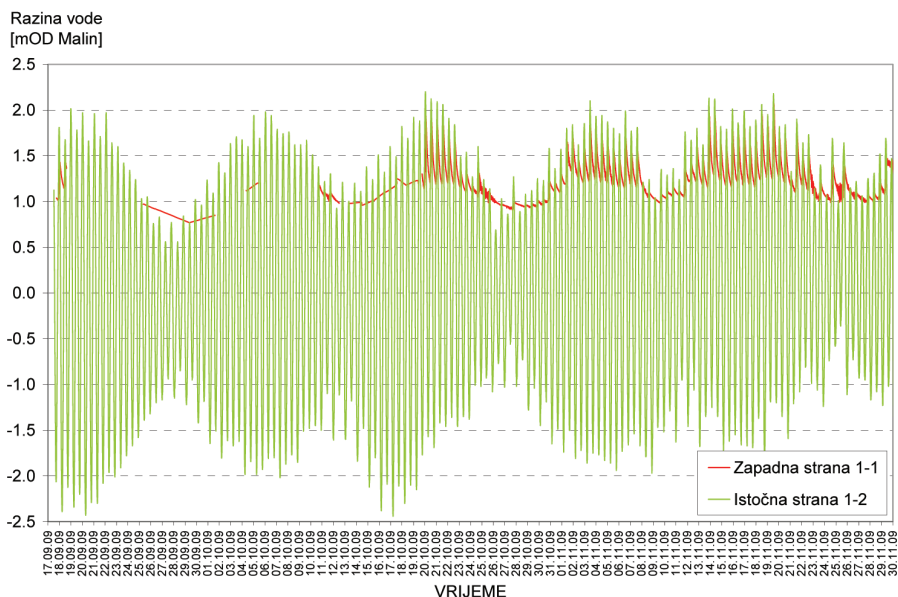
Slika 5.2. Terenska snimanja profila brzina uporabom ADCP-a s čamca



Slika 5.3. Snimak batimetrije Broadmeadows estuarija

5.3.2. Hidrološke i hidrauličke podloge

Protoci rijeke Broadmeadow prikupljeni su kao satne vrijednosti s vodomjerne stanice. Sliv rijeke je oko 110 km² a procijenjeni 50-godišnji protok je 125 m³/s. Izmjereni protoci služili su kao zapadni rubni uvjet kod matematičkog modela. Oscilacije vodnih razina snimane su kontinuirano na dvije lokacije na estuariju (point I-1 i I-2, Slika 5.3). Snimljene razine s točke I-2 služile su kao istočni rubni uvjet, a razine s točke I-1 služile su kod kalibracije i verifikacije matematičkog modela. Vodne razine mjerene su tijekom četiri mjeseca 2009. godine (Slika 5.4).



Slika 5.4. Izmjerene oscilacije vodnih razina u estuariju

5.4. Fizikalni modeli

Geometrijski umanjen model praga u laboratoriju izrađen je uzimajući u obzir Froudeov zakon sličnosti, s obzirom na to da su sile gravitacije i inercije dominantne kod toka preko praga. Detalji izrade modela i uvjeta sličnosti između prirode i umanjenog modela navode se u raznim priručnicima kao što je [6]. Izrađena su dva fizikalna modela u laboratoriju, prostorni 3D fizikalni model i ravninski 2D fizikalni model u vertikalnoj ravnini.

5.4.1. Model I - 3D fizikalni model

Na 3D fizikalnom modelu povijesnog praga dobiveni su podaci o strujnoj slici i rasporedu brzine toka preko praga, koji su služili pri istraživanju uzroka mehanizma urušavanja mosta te za istraživanje stabilnije strukture kod poboljšanja praga. Na modelu povijesnog praga uspostavljena je i protočna krivulja pri silaznom plimnom valu, koja će se reproducirati kod poboljšanja praga kako bi se zadržali isti okolišni uvjeti u Broadmeadows estuariju. Testovi na 3D fizikalnom modelu uključivali su varijaciju protoka te mjerenja pripadnih razina vode i brzina vode na modelu.

Veća prostorna domena bila je potrebna za određivanje karakteristika toka kod povijesnog i projektnog praga. Najvažnija karakteristika za razine vode u Broadmeadows estuariju je odnos visine prelijevanja H_p i protoka Q . Veličina modela trebala je biti dostatna da

osigura pouzdano preslikavanje dolazne strujne slike na prag sa zapadne strane, a s istočne strane dovoljno velika da osigura simulaciju toka tijekom silaznog plimnog vala. Uzimajući u obzir i ograničenja u smislu raspoloživog prostora u laboratoriju i snage crpki, te prethodno navedenih zahtjeva, dobiveno je prikladno mjerilo 3D fizikalnog modela od 1:80. U tom mjerilu mogao se simulirati maksimalni protok u prirodi od 1000 m³/s. Protok u modelu mjeren je preko Thomsonova V praga koji je postavljen između dolaznog spremnika i fizikalnog modela.

5.4.2. Model 2 - 2D fizikalni model

Morfodinamički 2D fizikalni model korišten je u prvom za oblikovanje praga i odabir tipa i dimenzija njegove obloge. Varijante tipa obloge uključivale su uporabu gabionskih madraca i kamenih blokova. Prikladno mjerilo 2D fizikalnog modela od 1:40 omogućilo je korištenje postojećeg žlijeba u UCC laboratoriju, te simulaciju ekstremnim uzlaznih i silaznih plimnih valova. Lokacija ravnine 2D fizikalnog modela podudara se s kontrolnim točkama 2-1 do 2-6 (Slika 5.6).

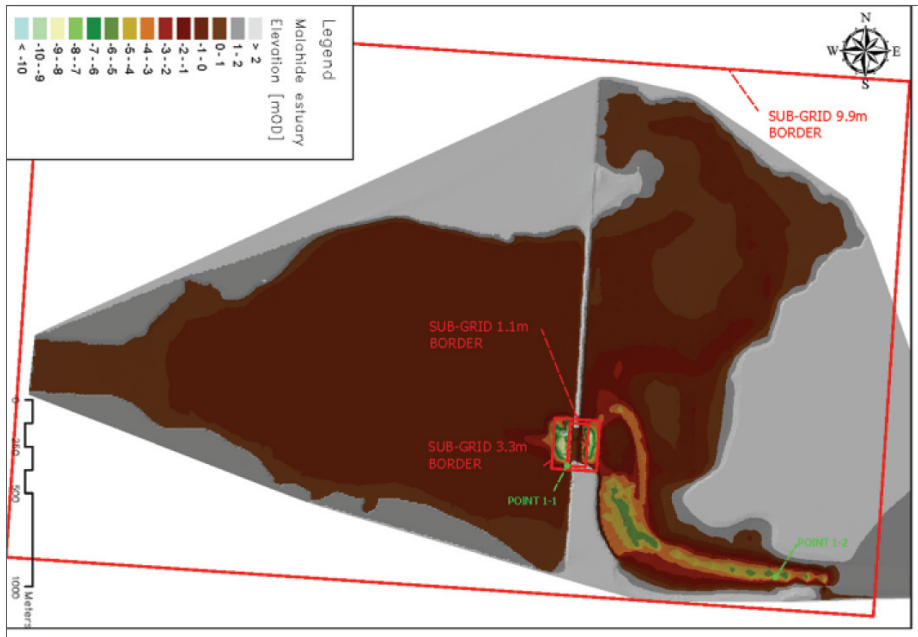
5.5. Matematički model

5.5.1. Geometrija modela

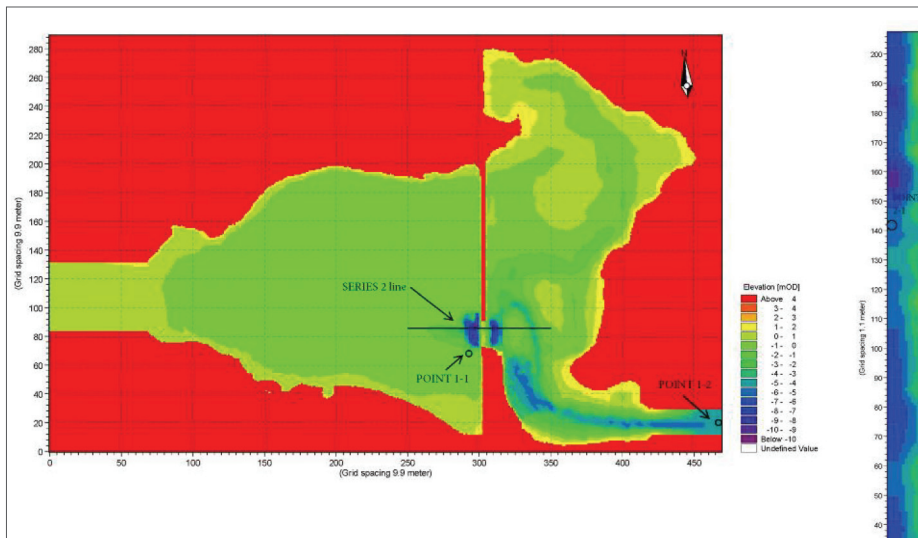
Za istraživanja povijesnog praga i poboljšanog praga korišten je prostorni dvodimenzionalni matematički model Mike21 na bazi konačnih diferencija. Kako bi se uključio utjecaj prirodnog uspora toka u estuariju, izrađen je Mike21 model Broadmeadows estuarija na prostoru veličine 4653×2871 m, koji je obuhvatio područje od ulaza u zaljev na istoku do unutrašnjeg estuarija na zapadu (Slika 5.3). Geometrija modela izrađena je uporabom terenskih snimaka batimetrije vertikalne točnosti 1 cm i karata u mjerilu 1:5000, čime se dobio jedinstveni model terena cijelog estuarija (Slika 5.5).

Domena modela je rotirana tako da su rubne linije modela kolinearne sa središnjom osi mosta. Model ima dvije otvorene granice: zapadnu granicu definiranu preko protoka i istočnu granicu definiranu preko razina vode na ulazu u lagunu. Sile vjetera i Coriolisova sila nisu primijenjene u modelu, pretpostavljajući da je privjetrište prekratko za značajniji utjecaj na dinamiku estuarija.

Cjelokupna domena modela podijeljena je na tri poddomene (Slika 5.5). Većina područja estuarija prezentirana je na diskretizacijskoj mreži horizontalne rezolucije 9,9 m. Rezolucija srednje mreže bila je 3,3 m, a unutrašnje mreže 1,1 m, što je upravo i širina stupova mosta, čime je dobivena konačna domena Mike21 matematičkog modela (Slika 5.6). Turbulentna naprezanja u Mike21 modelu su prezentirana prema Boussinesqovm konceptu naprezanja, a zatvaranje sustava jednadžbi prema Smagorinsky sub-grid scale konceptu.



Slika 5.5. DEM Broadmeadows estuarija



Slika 5.6. Geometrijska domena Mike21 modela

Mike21 model Broadmeadows estuarija kalibriran je i verificiran analizom razina vode, brzine toka i protoka. Razine vode i brzine uspoređene su između rezultata matematičkog modela, mjerenjima na 2D i 3D fizikalnom modelu, i terenskim opažanjima na estuariju. Protoci su uspoređeni između rezultata matematičkog modela i mjerenja na 3D fizikalnom modelu. Kako bi se mogli uspoređivati rezultati fizikalnih modela s rezultatima matematičkog modela, korišteni su isti rubni uvjeti u simulacijama.

5.6. Rezultati istraživanja za povijesni prag

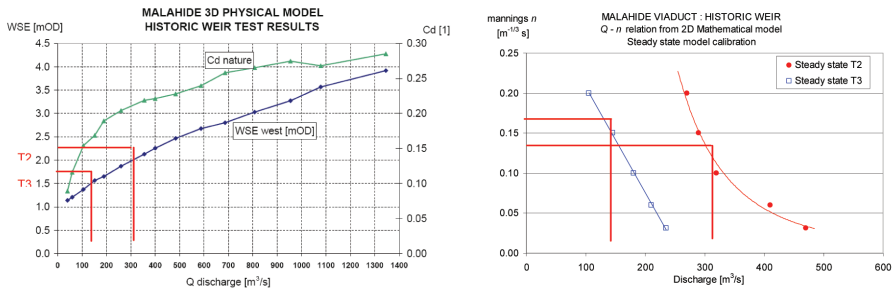
5.6.1. Rezultati 3D fizikalnog modela

Fizikalni 3D model pokazao je vrlo velike brzine toka između stupova mosta koje su prelazile 5 m/s u prirodi, a nalaze se neposredno nizvodno od stupova mosta. Brzine na središnjoj osi mosta bile su nešto niže. Tok preko praga pokazao se izuzetno turbulentan, posebice između stupova mosta gdje se stvorio i vodni skok između stupova 4 i 5. Općeniti je zaključak da su brzine toka prevelike između stupova mostova, a nastanak vodnog skoka povećava nestabilnost zaštitne obloge praga od kamenog nabačaja.

Određena je protočna krivulja preko povijesnog praga koja je služila kao podatak za dobivanje oblika poboljšanja praga. Na Slika 5.7. prikazan je odnos između razine vode u Broadmeadows estuariju u mOD (Malin Head) i protoka prelijevanja Q u m^3/s za povijesni prag. Koeficijent prelijevanja c_d izračunan je i također prikazan. Uočava se naglo smanjenje koeficijenta prelijevanja c_d kod protoka manjih od 200 m^3/s , uslijed relativno male visine prelijevanja. Visina krune praga se mijenja duž praga, a prosječna vrijednost razine krune je oko 0,70 mOD.

5.6.2. Usporedba rezultata 3D fizikalnog i matematičkog modela povijesnog praga

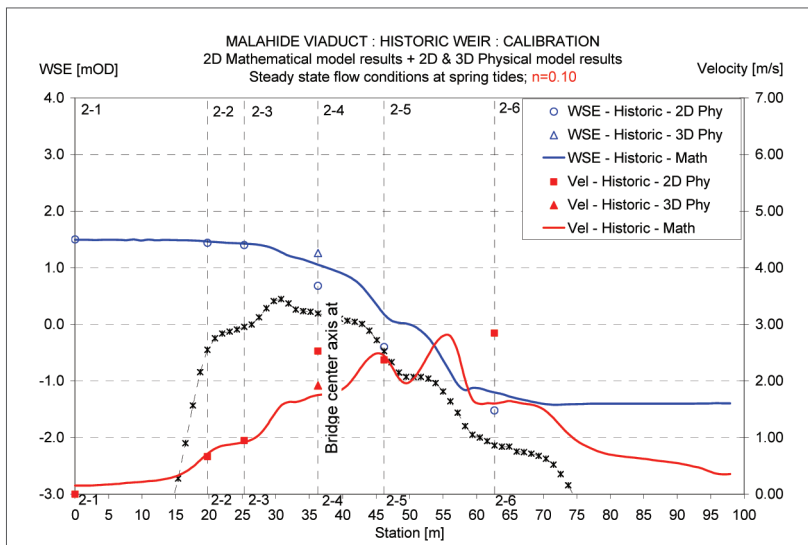
Usporedba veličine protoka preko praga, dobivenog iz matematičkog modela i 3D fizikalnog modela kod stacionarnih rubnih uvjeta, prikazani su na slici 5.7. Stacionarne simulacije izrađene su za slučaj ekstremnih oseka kod razina vode u zapadnom dijelu estuarija na 2,7, 2,0 i 1,5 mOD, a koje su imenovane kao testovi T1, T2 i T3. Iz usporedbe rezultata stacionarnog stanja prelijevanja sa 3D fizikalnog modela i matematičkog modela za razne protoke (Slika 5.7) uočava se da bi vrijednost Manningova koeficijenta hrapavosti kod matematičkog modela trebala biti oko $n = 0,13$.



Slika 5.7. Usporedba dobivenih protoka preljevanja iz 3D fizikalnog i Mike2I modela

5.6.3. Usporedba rezultata 2D i 3D fizikalnog te matematičkog modela povijesnog praga

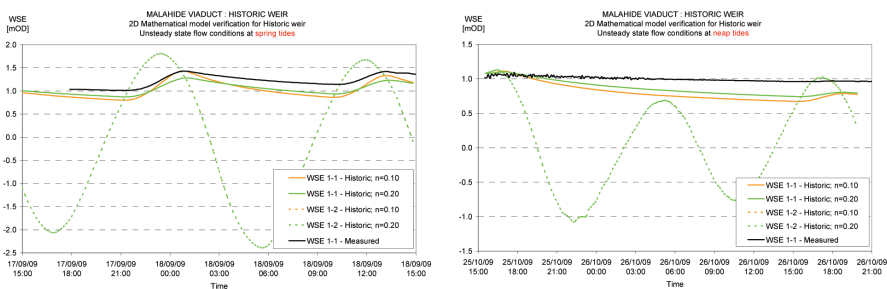
Fizikalni 2D model postavljen je u liniji s kontrolnim točkama 2-0 do 2-6 (Slika 5.7). Uspoređene su dobivene razine i brzine vode duž kontrolnih točaka iz 2D fizikalnog i matematičkog modela za razne stacionarne rubne uvjete. Iz usporedbe rezultata za T3 stacionarni slučaj (Slika 5.8) uočava se relativno dobro poklapanje razina i brzina vode kad je Manningov koeficijent postavljen na $n = 0,10$ na matematičkom modelu.



Slika 5.8. Usporedba dobivenih razina i brzina vode iz 2D i 3D fizikalnog te Mike2I modela

5.6.4. Usporedba terenskih mjerenja i matematičkog modela povijesnog praga

Nakon kalibracije matematičkog modela, odabran je koeficijent hrapavosti modela od $n = 0,10$ te Smagorinski koeficijent od $s = 0,50$, pa je model verificiran pri hidrodinamičkim rubnim uvjetima. Uspoređeni su rezultati vodnih razina na kontrolnoj poziciji I-I iz matematičkog modela s mjerenjima pri oscilacijama "živih" i "mrtvih" morskih mijena (Slika 5.9) tijekom 24-satnog perioda. Uočava se relativno dobro poklapanje rezultata matematičkog modela: kod "živih" mijena razlike su do 0,20 m, a kod "mrtvih" mijena do 0,30 m. Navedene razlike pojavljuju se zbog samih mjerenja razina vode, koja su provedena tek nakon prvotnih radova na zaštiti praga od danjeg urušavanja, odnosno nakon nasipanja krune praga.



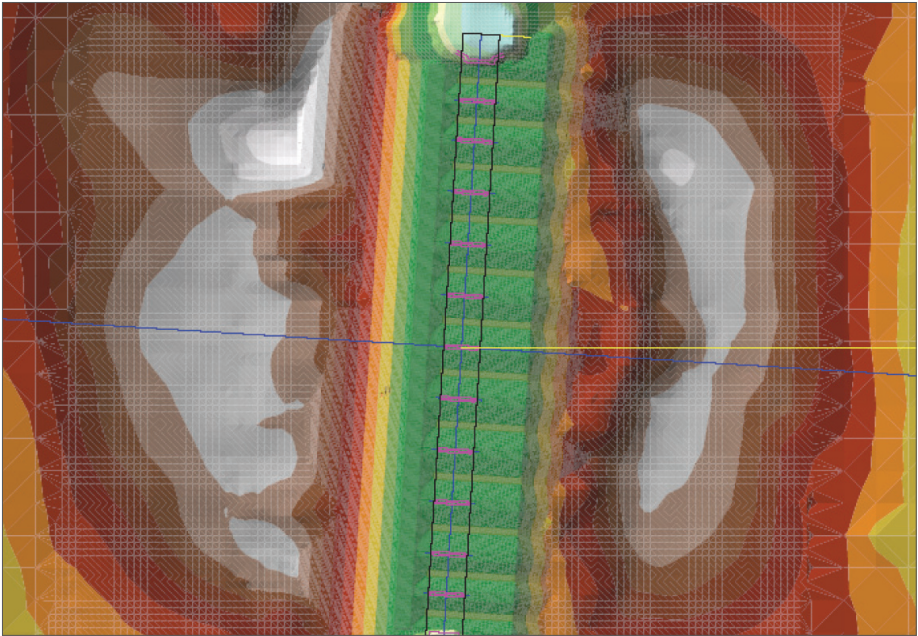
Slika 5.9. Usporedba mjerenih razina vode i Mike2I modela

5.7. Rezultati istraživanja za poboljšanje praga

Prilikom odabira konačnog rješenja oblika praga i zaštitne obloge ispitano je više varijanti oblika praga i veličine zrna obloge. Varijante su uključivale različite duljine, visine i širine krune praga, kao i variranje zapadnog i istočnog pokosa praga. Poboljšanje stabilnosti praga u dugoročnom smislu zahtijeva značajne izmjene oblika praga, ali radi ekoloških zahtjeva, hidrauličke karakteristike praga s obzirom na razine vode u estuariju i protočne količine trebaju ostati nepromijenjene. Varijantna rješenja, kao i konačno rješenje, istraženi su na oba fizikalna modela (2D i 3D modelima) kao i na matematičkom modelu.

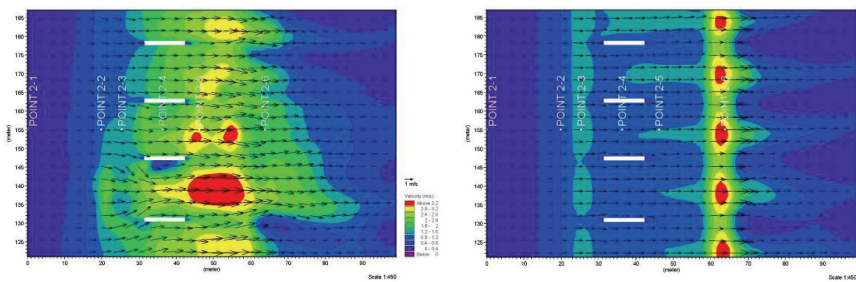
Osnovna ideja o poboljšanju praga bila je da su velike brzine i siloviti režim toka preko postojećeg praga i između stupova mosta imali glavnu ulogu pri urušavanju mosta. Dodatno stvaranje vodnog skoka između stupova mosta, povezano sa znatnom turbulencijom toka i disipacijom energije, pridonijelo je pomicanju kamene obloge praga. Mogućnost daljnje erozije kamene obloge na drugim stupovima vrlo je velika, i posve je neprihvatljiva u smislu dugoročne stabilnosti praga. Rekonstrukcija praga morala je osigurati oblikovanje praga koje će s stvoriti mirni režim toka između stupova mosta s jedne strane, te pomaknuti poziciju vodnog skoka što više istočno od mosta.

Konačan oblik praga pronadjen je unutar hibridnog modela interakcijom fizikalnih i matematičkog modela. Kod poboljšanog praga predložen je niz trapeznih korita između stupova mosta, koji se ponavljaju na svim rasponima stupova (Slika 5.10). Razina dna trapeza je na 0,0 mOD u sredini raspona stupova, koji se diže na +0,5 mOD kod temelja stupova. Razina krune na istočnoj strani je horizontalna na razini od +0,6 mOD.



Slika 5.10. Konačan oblik poboljšanja praga

Brzine toka i strujna slika između stupova kod poboljšanog oblika praga značajno su smanjene i ujednačene (Slika 5.11). Lokacija ubrzanja toka i povećanih hidrodinamičkih sila pomaknuta je gotovo 20 m istočno od stupova mosta.

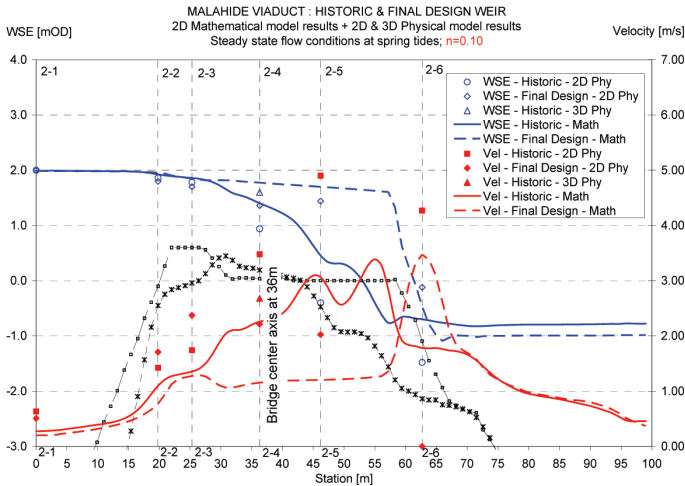


a) povijesni prag

b) poboljšani prag

Slika 5.11. Prostorni raspored strujne slike između stupova

Ujednačenje toka uočljivo je i na usporednim rezultatima 2D i 3D fizikalnog modela te na matematičkom modelu za stacionarno stanje. Brzine vode ujednačene su na približno 1,1 m/s između stupova mosta.



Slika 5.12. Usporedba rezultata modela za povijesni i poboljšani prag

6. Zaključak

Vremenska promjena korita vodotoka u aluviju prirodni je proces. Dinamika njegove promjene uvjetovana je nizom čimbenika. Često se prilikom projektiranja mostova nedovoljno pažnje posvećuje tom fenomenu, što za posljedice može imati narušavanje stabilnosti, pa sve do potpunog rušenja mostova. Za inženjersku procjenu promjena korita treba poznavati fiziku procesa te posjedovati kvalitetne podloge temeljem kojih je moguće izraditi matematičke i/ili fizikalne modele. Nesretna je okolnost da se s vremenom čimbenici koji utječu na proces promjene oblika korita vodotoka mijenjaju, pa se tako i mijenjaju projektni uvjeti za koje je izrađeno tehničko rješenje. Promjenu čimbenika koji utječu na stabilnost korita vodotoka vrlo je teško opaziti, a na njih uglavnom ne možemo utjecati (ili vrlo teško). Stoga je vrlo važno promatrati vremenske promjene na koritu te ocijeniti jesu li to očekivane promjene ili nisu. Današnje suvremene tehnike omogućavaju vrlo kvalitetno i brzo prikupljanje podataka o promjenama u vodotoku, bilo da se radi o geometrijskim promjenama korita ili se radi o promjeni hidrološko – hidrauličkih parametara. U kombinaciji s moćnom računalnom podrškom možemo znatno pouzdanije procijeniti dinamiku morfoloških promjena vodotoka te za svaki pojedini slučaj saznati je li konstrukcija mosta u potencijalnoj opasnosti zbog tih promjena.

Literatura

- [1] Abbott, M.B. et al, Numerical modelling of free-surface flows that are two-dimensional in plan, Proceedings of a symposium on Predictive Ability of Transport Models for Inland and Coastal Waters, Academic Press, 1981.
- [2] Anderson William Malahide Viaduct, The proceeding of the Institution of Civil Engineers of Ireland 1862.
- [3] Bekic, D., Numerical Modelling of Estuary Hydrodynamics, Master's Thesis, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2005.
- [4] Danish Hydraulic Institute, MIKE21 Hydrodynamic module, Scientific Documentation, 2003.
- [5] Doyle Oliver, Mahahide-2 Article (2) IRSS, Vol 20, No 143, Oct 2000.
- [6] Hamill L., Understanding Hydraulics, 2nd Edition, Published by Palgrave 2001.
- [7] IPCC 4th Assessment report, 2007.
- [8] Melville, B.W., Coleman, S.E.; *Bridge scour*, Water Resources Publications, 2000.
- [9] Mueller, D.S. & Rehmel, M.; *Determining Mean Velocity for Stationary Profiles using WinRiver*, Office of Surface Water and Indiana WSC, 2005.
- [10] Natural Environmental Research Council, *Flood Studies Report, Vols 1-V*, NERC, 1975.
- [11] Petan, S., Horvat, A., Padežnik, M., Mikoš, M., Globevnik, L., Brilly, M., *Gravel barsampling along Sava River*, Proceedings of the XXIVth Conference of the Danubian Countries, Bled, Slovenia, 2008.
- [12] RD Instruments; *WinRiver User's Guide International Version*, 2003.
- [13] Samoupravna vodoprivredna interesna zajednica grada Zagreba, *Vodoprivredna Zagreba 1980-1990*, Artjus, 1990.
- [14] Simpson M.; *Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler*, U.S. Geological Survey, Open-File Report 01-01, Sacramento, California, 2001.
- [15] US Army Corps of Engineers, HEC-RAS Applications Guide version 4.0, 2008.
- [16] Yalin, M.S.; *River Mechanics*, Pergamon Press, 1992.
- [17] Tomczak, M. and Godfrey, J.S.: *Regional Oceanography: an Introduction*, Pergamon, Oxford, 1994. Also available at <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/>

