

Utjecaj degradacije korita na sigurnost mostova

Gordon Gilja, Neven Kuspilić, Damir Bekić

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Fra Andrije Kačića Miošića 26, 10000 Zagreb

Sažetak

Svjedoci smo stalnih promjena geometrije korita prirodnih vodotoka, naročito produbljenja uglavnom uzrokovanih antropogenim djelovanjima. Razmjeri tih promjena koji puta prelaze očekivane veličine što stvara probleme na lokacijama izgrađenih mostova. Sigurnost određenih mostova ugrožena je zbog: (1) degradacije korita do razine dna temeljne stope i (2) oštećenja čelične oplata kesona čime se ispunjena kesona od zidanog materijala izlaže direktnom djelovanju toka vode. U ovom radu prikazani su domaći i inozemni primjeri narušavanja stabilnosti mostova analizirani od strane Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Dan je pregled promjena u koritu na nizu mostova u Hrvatskoj i Irskoj te se ukazuje na potencijalne opasnosti u slučaju zanemarivanja toga problema.

Ključne riječi: sigurnost mostova, erozija korita, podlokavanje, stabilnost, primjeri iz prakse

Influence of riverbed degradation on bridge safety

Abstract

We are evidencing continuous change in natural watercourses morphology, especially anthropogenic induced erosion. Rate of these changes sometimes exceeds maximum expected values which in turn causes problems on bridge sites. Existing bridges with piers on caisson foundations in riverbed which are presently fully functional as parts of transport infrastructure are particularly endangered by afore-mentioned changes. According to data collected through own research safety of Croatian bridges is endangered with following scour related problems: (1) riverbed erosion below footing bottom; and (2) impairment of steel caisson body which exposes caisson filling to flow field. This paper analyzes domestic and foreign examples of bridge instabilities caused by riverbed degradation on which Faculty of Civil Engineering (University of Zagreb) was consulted. Overview of morphological changes in riverbed of Croatian and Irish watercourses with bridges is given and potential dangers following problem neglecting are emphasized.

Key words: Bridge safety, riverbed erosion, scour, stability, case study

1 Uvod

Stabilnost korita vodotoka ovisi o režimu pronosa nanosa. Nestabilnost korita je prirodni fenomen koji nastaje kao posljedica procesa erozije i zasipanja koritoformirajućeg materijala, a razvija se postupno pri normalnim uvjetima tečenja ili naglo za vrijeme poplava [1]. Ako je narušena prirodna ravnoteža u pronosu nanosa, dolazi do produbljivanja korita (globalna erozija) i urušavanja obala ili pak do zaprečivanja protočnog profila i lokalnog premještanja matice ili cijelog glavnog korita. Rijeke s velikim pronosom vučenog nanosa su podložnije eroziji i imaju nestabilna korita. Ovaj fenomen se jednako odnosi na pješčana i šljunčana korita [2].

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. Stvaraju se uvjeti za intenzivnije odnošenje materijala s dna korita, a sve je potpomognuto izraženom turbulencijom. Građevine su predviđene da djelovanja vode na nju ne izazivaju oštećenja, međutim njihova stabilnost može biti ugrožena zbog erozije korita vodotoka. Erozija predstavlja snižavanje razine dna riječnog korita koje nastaje uslijed tangencijalnih naprezanja na dnu prouzročenih djelovanjem vodnog toka. Zbog toga dolazi do potkopavanja temelja građevina izgrađenih u samom toku rijeke. Dubina za koju se snizi razina dna korita ispod svog prirodnog stanja naziva se dubina erozije. U aluvijalnim koritima erozija se javlja na mjestima gdje je strujna slika poremećena uslijed utjecaja uronjenog tijela, a uglavnom se radi o građevinama. Tipovi erozije koji se javljaju na dionicama koje premošćuju mostovi su:

- a) globalna erozija
- b) erozija uslijed suženja toka
- c) lokalno podlokavanje

Globalna erozija nastaje neovisno o postojanju mosta i posljedica je snižavanja razine dna uslijed hidrometeoroloških i geomorfoloških promjena i/ili ljudskih aktivnosti na slivu. Može se prema uvjetima nastanka podijeliti na dugoročnu ili kratkoročnu. Kratkoročna globalna erozija se razvija tijekom velike poplave ili između dviju poplava u kratkom razdoblju. Dugoročna globalna erozija se razvija tijekom znatno dužega razdoblja, trajanja nekoliko godina i više, te obuhvaća progresivnu degradaciju korita i bočno izmicanje obala. Za razliku od globalne erozije, erozija uslijed suženja toka i lokalno podlokavanje su direktne posljedice postojanja mosta u profilu rijeke. Lokalno podlokavanje je uzrokovano utjecajem stupova i upornjaka na riječni tok, a karakterizira ga pojava kaverne neposredno kod stupa ili upornjaka mosta.

Erozija korita uslijed suženja toka se javlja kada je prirodni protjecajni profil korita sužen uslijed izgradnje građevine u riječnom koritu. Proces erozije korita uslijed suženja toka može se javiti pod dvjama uvjetima, ovisno o tome koliko je korito pokretno na dionici uzvodno od mosta: (1) u uvjetima pokretnog korita; i (2) u uvjetima čiste vode. Erozija korita uslijed suženja toka u uvjetima pokretnog korita javlja se kada je korito rijeke u pokretu i dolazi do značajnijeg pronosa nanosa u mostovski profil korita s uzvodne dionice. Erozija korita uslijed suženja toka u uvjetima čiste vode javlja se kada je riječno korito stabilno na promatranoj dionici. Kriterij za određivanje stabilnosti korita je granična brzina toka v_{gr} . Ako je v_{gr} veća od srednje brzine toka v , pretpostavlja se da će doći do pojave erozije korita uslijed suženja toka

u uvjetima čiste vode. Ako je $v_{gr} < v$, pretpostavlja se da će doći do pojave erozije korita uslijed suženja toka u uvjetima pokretnog korita.

Lokalno podlokavanje oko stupova mosta javlja se zbog lokalnog ubrzanja čestica vode oko građevine i formiranja vrtloga. Pri procesu podlokavanja formira se kaverna ispod građevine. S povećanjem veličine kaverne dolazi do smanjenja vrtloga, sve dok se ne uspostavi ravnotežno stanje između ulazne i izlazne količine nanosa iz kaverne. Kada se uspostavi ravnotežno stanje, dolazi do prestanka rasta kaverne i ona zadržava svoju konačnu dubinu $D_{S(LS)}$ sve dok ne dođe do drastične promjene u hidrauličkim parametrima tečenja. Najviše istraživanja o fenomenu lokalne erozije provedeno je za potrebe određivanja utjecaja oko stupova mostova. To je i razumljivo, zato što je velik broj mostova pretrpio znatna oštećenja (pa i rušenje) upravo zbog toga utjecaja.

2 Utjecaj mosta na riječni tok

Poznavanje hidraulike u mostovskom profilu korita je nužno kada most koji će biti izgrađen svojim gabaritima zadire u glavno korito ili pregrađuje inundaciju. Kada su elementi mosta smješteni unutar riječnog korita, tj. mostovski otvor je uži od prirodnog korita rijeke, dolazi do suženja prirodnog protjecajnog profila što izaziva uspor i izdizanje razine vode uzvodno u odnosu na prirodno stanje. Stoga dolazi do povećanja brzine tečenja u mostovskom profilu. Često je to povećanje brzine tečenja dovoljno da pokrene čestice materijala iz korita i uzrokuje eroziju u blizini temelja mosta [3]. Izgradnja hidraulički neoblikovanih stupova mosta može uzrokovati poplave uzvodno ili povećati amplitudu prirodnih poplavnih događaja. Do najvećih oštećenja i narušavanja stabilnosti mostova koji premošćuju rijeke dolazi kod poplavnih događaja. Stoga je važno projektirati hidraulički učinkovite građevine i točno izračunati utjecaj uspora na prirodni vodostaj.

3 Mehanizmi otkazivanja stabilnosti uslijed hidrauličkih djelovanja

Erozija korita ima potencijal sudjelovanja u svim slučajevima otkazivanja stabilnosti mosta i vjeruje se da je najčešći uzrok rušenja ili oštećenja mostova poplavni događaj, iako neposredni uzrok mogu biti drugi faktori kao što su tlak vode na rasponsku konstrukciju mosta ili sile uzrokovane plutajućim nanosom [1]. Podaci o rušenju mostova prikupljeni u periodu od 1940. do 2004. godine pokazuju da su prirodne nepogode, udar plovila/vozila i preopterećenje uzroci 82% ukupnog rušenja mostova [4]. Zbog hidrauličkog opterećenja sruši se oko 60 posto mostova [5], [6], [7], [8], [9], [10]. U tablici 1 prikazan je udio pojedinog mehanizma u ukupnom rušenju mostova.

Tablica 1. Pregled mehanizama otkazivanja konstrukcije mosta.

Mehanizam otkazivanja	Broj otkazivanja	Postotak
Hidraulički	1027	58%
Udar plovila/vozila	224	13%
Preopterećenje	220	12%
Požar	52	3%
Potres	19	1%
Dotrajalost	116	7%
Ostalo	111	6%
Ukupno	1769	100%

Djelovanje toka vode najčešće se očituje kroz eroziju korita uz stupove i upornjake te nakupljanje plutajućeg nanosa uz konstrukciju, s tim da brojčano prevladava pojava erozije. Studijom koja je provedena 1973. godine na 383 mosta srušena u poplavama utvrđeno je da je u 25% slučajeva došlo do otkazivanja stabilnosti stupa, a u 72% upornjaka. Opširnija studija iz 1978. godine [3] pokazala je da je otkazivanje stabilnosti stupa jednako učestalo kao i upornjaka, a potvrđuje to i istraživanje Melvilla i Colemana na 31 mostu na Novom Zelandu koje je pokazalo sljedeću učestalost mehanizama otkazivanja stabilnosti [1]:

- erozija uslijed suženja toka i lokalno podlokavanje oko stupa 42%,
- erozija uslijed suženja toka i lokalno podlokavanje oko upornjaka 26%,
- globalna erozija 13%,
- plutajući nanos i zasipanje korita 19%.

Erozija korita je dugotrajan i dinamičan proces, no tijekom trajanja poplava može u kratkom vremenu značajno uznapredovati. Kada se utjecaj izoliranog poplavnog događaja superponira na već postojeću eroziju korita, moguće je naglo snižavanje razine korita ispod stope temelja i otkazivanje stabilnosti konstrukcije. Jedan poplavni događaj može uzrokovati istovremeno otkazivanje stabilnosti velikog broja mostova na vodotoku, pogotovo manjih konstrukcija [5], [11], [12]. Tijekom jedne poplave je tako 1985. godine došlo do rušenja 73 mosta u državama Pennsylvania, Virginia i West Virginia, a 1987. godine u državama New York i New England srušilo se 17 mostova [3].

Najčešći uzrok povećane erozije korita za vrijeme poplava je kontrakcija protočnog profila uslijed izgradnje mosta, a uzrok najveće kontrakcije su nasipi prometnica na inundacijama. Rezultirajuće brzine u mostovskom profilu za vrijeme poplave su stoga znatno veće od granične brzine pokretanja nanosa i dolazi do erozije korita uz temelje. Općenito su stoga više pogođeni manji i stariji mostovi te pločasti propusti. U Lynmouthu je tako za vrijeme jedne poplave 1952. godine srušeno 28 mostova čiji su otvori bili premali za propuštanje poplave rijeke Lyn. Određivanje mjerodavne poplave određenog povratnog perioda na temelju ograničenih povijesnih podataka i uz prisutne klimatske promjene je često vrlo nepouzđano, pogotovo na manjim i bujičnim slivovima. Pokazuje se da velike poplave imaju veću frekvenciju pojave od pretpostavljene. Navedena nepouzđanost obrade podataka odnosi se na područja s relativno umjerenom klimom. U ekstremnim klimatskim uvjetima, kao što je pojava tajfuna, moguća je pojava nepredvidivih hidroloških događaja. Kada je tajfun Fran poharao Kyushu (Japan) 1976.

godine, uzrokovao je 1.95m oborina, što je rezultiralo poplavnim valom koji je srušio 233 mosta. Naknadnom analizom utvrđeno je da su uzroci bili neadekvatan otvor mosta, erozija korita i nakupljanje plutajućeg nanosa [3], [13].

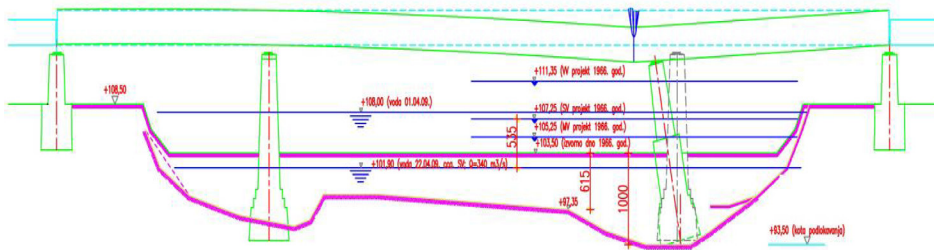
Istraživanje provedeno 1990. godine u Velikoj Britaniji pokazalo je da je 1000 željezničkih mostova u manjoj ili većoj mjeri ugroženo pojavom erozije korita, te ih je potrebno sanirati ili obnoviti [14], dok u Novom Zelandu prosječno godišnje dođe do otkazivanja stabilnosti jednog mosta uslijed erozije korita uz temelje [1]. Važno je naglasiti da nisu samo veliki mostovi ugroženi pojavom erozije. I neadekvatno dimenzionirani mostovi preko malih vodotoka i potoka mogu biti u opasnosti. Primjer je most preko rijeke Crane u Felthamu gdje je srednji godišnji protok od 0.56 m³/s bio dovoljan za uzrokovanje rušenja mosta [15].

4 Primjeri iz Hrvatske i Irske

U nastavku su dani primjeri mostova u Hrvatskoj i Irskoj čiju je analizu izradio Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, a čija je stabilnost ugrožena erozijom korita. Za svaki mehanizam otkazivanja nosivosti uslijed djelovanja erozije prikazan je primjer mosta čija je stabilnost ugrožena.

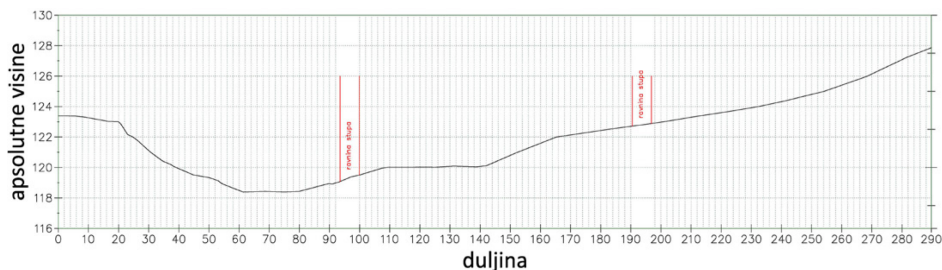
4.1 Mostovi ugroženi globalnom erozijom

Najveći most koji je otkazao uslijed djelovanja erozije korita je željeznički most "Jakuševac", kojim pruga Velika Gorica – Sesvete premošćuje rijeku Savu kod Mičevca, izgrađen 1968. godine. Dana 30. ožujka 2009. u 22:30 došlo je do gubitka stabilnosti nosive konstrukcije pri prelasku teretnog vlaka, što je za posljedicu imalo deformaciju rasponskog sklopa mosta. Degradacija dna korita rijeka u području gornjega toka, kojem pripada i rijeka Sava na području Jakuševca, prirodna je pojava. 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 povećanja uzdužnog pada što je posljedica skraćivanja trase vodotoka regulacijskim radovima i povećanja dubine vode prilikom prolaska poplavnih valova zbog koncentracije toka u koritu za veliku vodu, bez prirodnih inundacija; i (3) eksploatacija šljunka iz rijeke. Zbog već uznapredovale globalne erozije korita, dno rijeke se znatno spustilo u odnosu na razinu u vrijeme projektiranja i izgradnje mosta, tj. razina riječnog dna se ukupno spustila za približno 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 približno 5 metara (slika 1). 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 [16], [17], [18], [19].



Slika 1. Utjecaj globalne i lokalne erozije na korito rijeke Save u profilu mosta "Jakuševac" tijekom 20-godišnjeg razdoblja

Drugi primjer globalne erozije prikazuje most kod kojega je došlo do izmicanja matice prema lijevoj obali (slika 2). Korito se lokalno produbilo uz lijevi stup mosta te se smanjio protočni profil. Usporedbom izvršenih geodetskih mjerenja s dostupnim povijesnim podacima nameće se zaključak da je u okolici mosta došlo do značajnih morfodinamičkih promjena. Glavno korito je procesom meandriranja pomaknuto između stupa S1 i lijeve obale, dok je u projektnim uvjetima bilo smješteno između stupova S1 i S2. Iz morfodinamičkih analiza vidljivo je da u uvjetima srednje vode dolazi do pokretanja materijala iz dna, što znači da je globalna erozija konstantno prisutna na ovoj dionici rijeke.

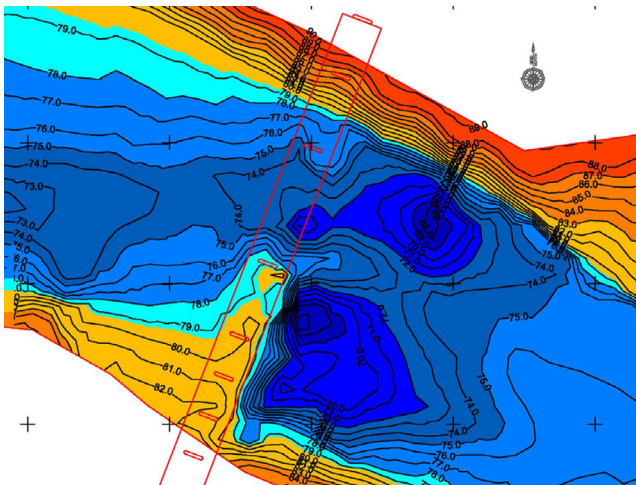


Slika 2. Profil korita u mostovskom profilu.

Iz hidrauličkog modela tečenja utvrđeni su hidrološki i hidraulički parametri toka te se pokazalo da se pri uvjetima srednje vode u mostovskom profilu pojavljuje srednja brzina toka $v = 1.88 \text{ m/s}$, koja je veća od granične brzina za pokretanje srednje čestice iz korita koja iznosi $v_{gr} = 1.47 \text{ m/s}$. U ovakvim uvjetima očekuje se daljnje snižavanje korita i produbljivanje kaverne uz stup S1. Stabilnosti stupa S2 pogoduje njegov položaj uz konveksnu obalu rijeke te ona trenutno nije ugrožena djelovanjem lokalne erozije, ali napredovanje globalne erozije korita bi se u dužem razdoblju moglo negativno odraziti i na njegovu stabilnost. Uznepredovala erozija korita je snizila dno korita u okolici stupa na kotu 119 m n. m., što je 6 m niže od vrha temeljne stope (125 m n. m.). Iz povijesnih podataka vidljivo je da je visina temeljne stope oko 3 m, što bi značilo da ispod temeljne stope više nema čvrstog tla. Nepovoljan položaj i otklon stupa pogoduju produbljivanju korita i nastanku kaverne.

4.2 Mostovi ugroženi erozijom uslijed suženja toka

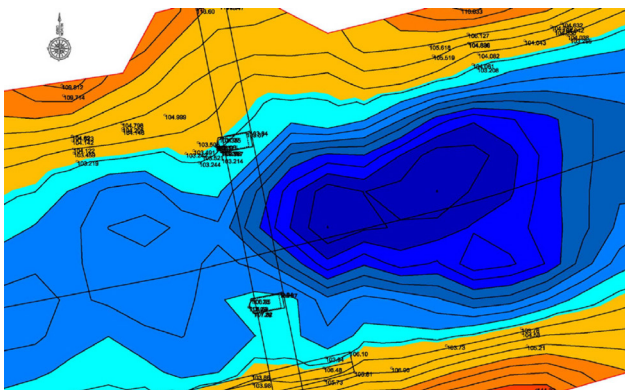
Sljedeći analizirani most ima 5 stupova u glavnom koritu, a kameni nabačaj izveden je u 3 mostovska otvora ostavljajući profil glavnog korita samo između dva stupa. Zbog izvedbe kamenog nabačaja profil korita je značajno sužen ispod mosta te je došlo do erozije korita u odnosu na uzvodnu dionicu. Batimetrija korita u području mosta prikazana je na slici 3, gdje je jasno vidljiva lokacija kamenog nabačaja u zoni stupova i degradacija korita u području glavnog korita.



Slika 3. Geodetski snimak korita u području mosta (smjer toka je slijeva nadesno)

U prirodnim uvjetima korito bi se nalazilo na koti 75 m n. m. kao na dionici nizvodno od mosta, što je vidljivo na geodetskom snimku šireg pojasa korita. Zbog kontrakcije toka kroz mostovske otvore došlo je do povećanja brzine u mostovskom profilu i uz lijevu obalu rijeke neposredno nizvodno od mosta. Povećanje brzine toka popraćeno je snažnim vrtloženjem. Kako je onemogućen rad rijeke u okolici stupova gdje dolazi do poremećaja strujne slike i pojave turbulencije, energija toka je utrošena na nizvodnom dijelu korita, nezaštićenom kamenim nabačajem. Na geodetskom snimku šireg pojasa korita vidljivo je da je lokalno povećanje brzine toka i turbulencije uz lijevu obalu uzrokovalo pojavu odbačene kaverne čije se dno nalazi na koti 68 m n. m. Drugi problem koji uzrokuje kameni nabačaj je taj da kod pojave velikih voda dolazi do prelijevanja preko kamenog nabačaja između stupova. To prelijevanje uzrokuje pojavu hidrauličkog skoka na nizvodnom pokosu kamenog nabačaja. Uslijed pojave vodnog skoka dolazi do pojave pojačane turbulencije i disipacije energije u koritu nizvodno od kamenog nabačaja što je uzrokovalo pojavu kaverne. Zbog složenog polja strujanja na promatranoj dionici ne može se sa sigurnošću utvrditi da li je korito doseglo svoj konačni morfodinamički razvoj niti do koje mjere je moguć daljnji razvoj kaverne.

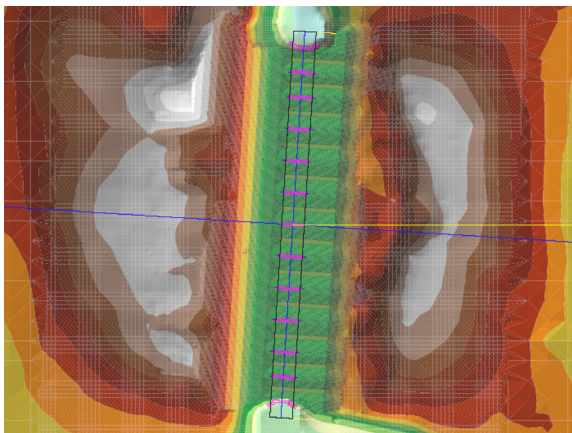
Sljedeći primjer prikazuje most s dva stupa u koritu oko kojih je izveden kameni nabačaj koji sprječava lokalno podlokavanje. Trenutna razina kamenog nabačaja oko oba stupa je 102 m n. m. i proteže se oko stupa u radijusu od 3 m (slika 4). Zbog izvedbe kamenog nabačaja profil korita je značajno sužen ispod mosta te je došlo do erozije korita u odnosu na uzvodnu dionicu.



Slika 4. Geodetski snimak korita u području mosta (smjer toka je slijeva nadesno)

Kako je onemogućen rad rijeke u okolici stupova gdje dolazi do poremećaja strujne slike i pojave turbulencije, energija toka je utrošena na nizvodnom dijelu korita, nezaštićenom kamenim nabačajem. Kako je protočni profil rijeke ispod mosta zapriječen kamenim nabačajem između stupa S1 i lijeve obale te stupa S2 i desne obale, glavčina toka je usmjerena između stupova gdje je i došlo do pojave kaverne. Iz geodetskih snimaka vidljiva je pojava kaverne neposredno nizvodno od ruba kamenog nabačaja čije je dno na koti 94 m n. m. Dubina te kaverne od prirodne razine korita iznosi oko 7 m, a njeni gabariti, duljina 65 m i širina 25 m, upućuju na to da je došlo do superponiranja utjecaja oba stupa na eroziju korita.

Željeznički most koji premošćuje Broadmeadow estuarij sjeverno od grada Malahide 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 stručnoj literaturi, gdje su detaljno prikazane metodologije radova te različita poboljšanja i rekonstrukcije tijekom 150 godina duge povijesti mosta.

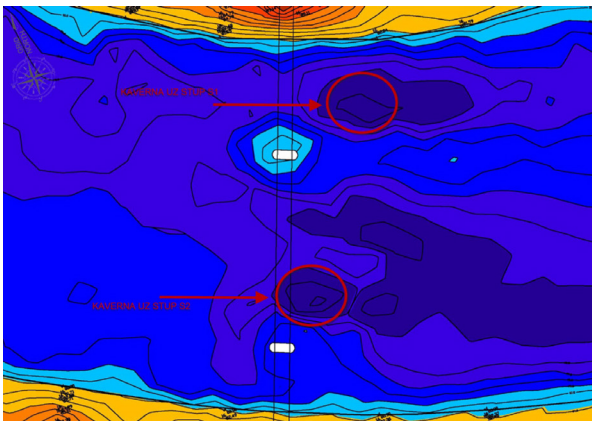


Slika 5. Digitalni reljef praga Malahide

Broadmeadow estuarij je širok 1.7 km na lokaciji mosta, no izgradnjom nasipa za prugu ostavljen je ukupan mostovski otvor u širini od 180 m. Zbog ovako drastičnog suženja estuarija pri nailasku plime i povlačenju oseke na pragu je tečenje prelazilo u burni režim [18], [19], [20]. Pri prolasku praga došlo je do formiranja hidrauličkog skoka i velike disipacije energije koja je erodirala korito neposredno uz nožicu praga s obje strane. Kaverne su se formirale u cijeloj širini praga, a dostigle su dubinu od 10 m (slika 5). Urušavanje željezničkog mosta posljedica je kombinacije dvaju uzroka: djelomične erozije obloge praga te podrivanja jednog od jedanaest stupova mosta. U trenutku otkazivanja mosta hidrodinamičke sile plimnog vala odnijele su dio praga širine 25 m.

4.3 Mostovi ugroženi lokalnim podlokavanjem

Kao zaštita stupova na sljedećem mostu izveden je kameni nabačaj koji je značajno suzio profil korita ispod mosta te je došlo do erozije korita u odnosu na uzvodnu dionicu. Mostovski profil prikazan je na slici (slika 6), gdje je jasno vidljiva lokacija kamenog nabačaja u zoni stupova S1 i S2 i degradacija korita u odnosu na prirodnu kotu od 77 m n. m. Trenutna razina kamenog nabačaja oko stupa S2 je 78.4 m n. m. i proteže se oko stupa u radijusu od 10 m. Kako je onemogućen rad rijeke u okolici stupova gdje dolazi do poremećaja strujne slike i pojave turbulencije, energija toka je utrošena na nizvodnom dijelu korita, nezaštićenom kamenim nabačajem. Iz geodetskih snimaka vidljiva je pojava odbačenih kaverni neposredno iza stupova S1 i S2, uz nizvodne rubove kamenog nabačaja. Dubina ovih kaverni od prirodne razine korita iznosi 3-4 m. Ove dubine su konzistentne s izračunanom dubinom lokalnog podlokavanja $D_{S(LS)}$ koja iznosi 3.8 m. Pretpostavlja se da je podlokavanje doseglo svoju konačnu dubinu za vladajuće hidrološke i hidrauličke uvjete. Iako je prema hidrauličkim analizama vidljivo da su kaverne iza stupova dosegle konačnu dubinu, zabrinjava njihova blizina kamenom nabačaju i njegovom trenutnom stanju jer se kamena obloga s nizvodne strane stupova počela urušavati u kavernu. Naime, količina materijala oko stupa S2 je znatno manja nego oko stupa S1 što je posljedica većih brzina u tom (konkavnom) pojasu.



Slika 6. Geodetski snimak korita u području mosta (smjer toka je slijeva nadesno)

4.4 Mostovi ugroženi abrazivnim djelovanjem vode na konstrukciju

Osim erozije riječnog korita, djelovanje toka se može očitovati i fizikalnim djelovanjima na konstrukciju, kao što su abrazivno djelovanje toka vode, udar plutajućeg nanosa ili djelovanje leda. Podvodni vizualni pregled temelja stupova pokazuje da je konstrukcija pojedinih temelja u kritičnom stanju uslijed pojave takvih djelovanja. Ovo se posebice odnosi na temelje stupova izvedene kesonskom metodom. Kod nas postoji niz mostova koji su građeni krajem 19. i u prvoj polovici 20. stoljeća kada je tehnologija izrade temelja stupova mostova bila korištenjem kesona s čeličnom oplatom. Mnogi od tih mostova su tijekom životnog vijeka doživjeli rekonstrukciju, ali su temelji uglavnom ostali u izvornom obliku. Vodotoci su u međuvremenu promijenili svoja korita, uglavnom u smislu njihove degradacije (sniženja dna), pa je čelična oplata kesona u većoj mjeri izložena djelovanju vode. Uslijed djelovanja vode dolazi do korozije oplata čeličnog kesona, gubitka dijelova limova te abrazije kamenih elemenata temelja koji su ostali bez zaštite. Oštećenjem su najviše zahvaćeni redovi klesanog kamena koji se nalazi u razini srednje vode te je dio vremena pod vodom a dio vremena na suhom. Napredovanjem erozije i ispiranjem morta iz reški stvaraju se uvjeti za odnošenje cijelih blokova kamena te ispiranja ispune kesona. Na primjeru je dan slučaj izmjerene oštećenja najveće dubine 80 cm, a prosječne dubine između 50 i 60 cm. Dimenzije kamenih blokova koji nedostaju su oko 50 x 35 x 30 cm. Slika 7 prikazuje temelj stupa s vidljivim oštećenjem oplata čeličnog kesona i "ispranim" kamenim blokovima.



Slika 7. Nizvodno lice stupa - nedostaje nekoliko kamenih blokova te je uništena oplata čeličnog kesona

5 Zaključak

Promjena geometrije korita vodotoka u aluviju prirodni je proces. Često se prilikom projektiranja mostova taj fenomen se ponekad nedovoljno pažnje posvećuje tom fenomenu zanemaruje, a što za posljedicu može imati narušavanje stabilnosti, pa sve do potpunog rušenja mostovomosta. Usprkos činjenici da većina mostova u mirnodopskim uvjetima stradava od utjecaja vode, tome se problemu ne daje dovoljno pozornosti. Pojava navedenih utjecaja mosta na riječni tok može se predvidjeti, procijeniti posljedice na korito koje mogu izazvati te sukladno tome odrediti mjere kako posljedice ne bi ugrozile niti građevinu niti stabilnost korita vodotoka. Danas je moguće relativno pouzdano procijeniti moguće utjecaje mosta na korito vodotoka a također i potencijalne promjene korita. Za inženjersku procjenu promjena korita primjenjuju se matematički i/ili fizikalni modeli a za koje treba, treba poznavati uz poznavanje fiziku procesa, te posjedovati i prikupiti kvalitetne podloge temeljem kojih je moguće izraditi matematičke i/ili fizikalne modele. Promjenu čimbenika koji utječu na stabilnost korita vodotoka utječe niz čimbenika čije je promjene vrlo je teško opaziti, a na njih i na koje uglavnom ne možemo utjecati (ili vrlo teško). Stoga je vrlo važno promatrati vremenske promjene na koritu te ocijeniti jesu li to očekivane promjene očekivane ili ne 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 pouzdano procijeniti dinamiku morfoloških promjena vodotoka te za svaki pojedini slučaj saznati je li konstrukcija mosta u potencijalnoj opasnosti zbog tih promjena ocijeniti utjecaj tih promjena na sigurnost mosta.

Literatura

- [1] Melville BW, Coleman SE. Bridge Scour. Colorado, USA: Water Resources Publications, LLC; 2000.
- [2] Maddison B. Scour failure of bridges. Proceedings of the Institution Civil Engineers - Forensic Engineering 2012;165:39-52 <http://dx.doi.org/10.1680/feng.2012.165.1.39>.
- [3] Hamill L. Bridge Hydraulics. London, UK: E & FN Spon; 1999.
- [4] Imhof D. Risk assessment of existing bridge structures. Cambridge: University of Cambridge; 2004, p. 216.
- [5] Smith DW. Bridge failures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1; 1976, p. 367-82.
- [6] Brice JC. Assessment of channel stability at bridge sites. Second Bridge Engineering Conference, Vol 2. Washington DC: Transportation Research Board/National Research Council; 1984, p. 163-71.
- [7] WordPress. Bridges 202 - More Depth on the Failure Statistics. 2012.
- [8] Thomas M. An Amazing Bridge Collapse Statistic. 2007.
- [9] Khan MA. State-of-the-Art Bridge and Highway Rehabilitation and Repair Methods: McGraw-Hill Prof Med/Tech; 2010.
- [10] Brice JC. Assessment of channel stability at bridge sites. Transportation Research Record 950, Second Bridge Engineering Conference, Vol 2. Washington DC: Transportation Research Board/National Research Council; 1984, p. 163-71.

- [11] Criswell H. East Devon Floods 10th-11th July, 1968. Exeter: Report to Roads Committee, Devon County Council; 1968.
- [12] George AB. Devon floods and the waterways of bridges. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2, 73; 1982, p. 125-34; discussion, 73, 687-92.
- [13] Holford I. The Guinness Book of Weather Facts and Feats. Enfield, Middlesex: Guinness Superlatives; 1977.
- [14] Watson R. Hundreds of bridges to undergo scour tests. New Civil Engineer 1990;9.
- [15] RAIB. Failure of Bridge RDG1 48 (River Crane) between Whitton and Feltham 14 November 2009. 2010, p. 35.
- [16] Gilja G, Kuspilić N, Bekić D. Impact of morphodynamical changes on the bridge stability: Case study of Jakuševac bridge in Zagreb. In: Zima JMSaP, editor. Current events in hydraulic engineering. Gdansk, Poland: Gdansk University of Technology; 2011, p. 112-22.
- [17] Gilja G, Oskoruš D, Kuspilić N. Erosion of the Sava riverbed in Croatia and its foreseeable consequences. BALWOIS Conference on Water Observation and Information System for Decision Support. Ohrid; 2010, p. 123-4.
- [18] Kuspilić N, Bekić D, Gilja G. Praćenje morfodinamičkih promjena korita vodotoka u zoni stupova mostova. Prometnice - nove tehnologije i materijali. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2010, p. 69-112.
- [19] Kuspilić N, Bekić D, McKeogh E, Gilja G. Monitoring of river channel morphodynamical changes in the zone of bridge piers. Proceedings of the First International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2010). Opatija; 2010.
- [20] Bekić D, Kerin I. Rekonstrukcija željezničkih mostova-iskustva iz Irske. In: Lakušić S, editor. Građenje prometne infrastrukture. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2012, p. 119-56.