

Primljen / Received: 22.10.2013.

Ispravljen / Corrected: 26.12.2013.

Prihvaćen / Accepted: 10.1.2014.

Dostupno online / Available online: 10.2.2014.

# Zidani svođeni mostovi malih raspona prilagođeni suvremenim zahtjevima

## Autori:



Dr.sc. **Alex Kindij**, dipl.ing.građ.  
PB Palmotićeve 45  
[alex.kindij@p45.hr](mailto:alex.kindij@p45.hr)



Doc.dr.sc. **Ana Mandić Ivanković**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za konstrukcije  
[mandicka@grad.hr](mailto:mandicka@grad.hr)



**Marin Vasilj**, dipl.ing.građ.  
PB Palmotićeve 45  
[marin.vasilj@p45.hr](mailto:marin.vasilj@p45.hr)

Stručni rad

**Alex Kindij, Ana Mandić Ivanković, Marin Vasilj**

## Zidani svođeni mostovi malih raspona prilagođeni suvremenim zahtjevima

U radu je dan pregled mehanizama razaranja i oštećenja zidanih svođenih mostova, metoda ispitivanja za utvrđivanje svojstava postojećih konstrukcija te konzervativnih i sofisticiranih metoda ocjenjivanja. Na temelju analiza svođenih mostova malih raspona provedenih trima konzervativnim metodama ocjenjivanja i dodatnih razmatranja učinaka pojačavanja i prilagodbe ovih mostova u njihovom vijeku trajanja suvremenim prometnim zahtjevima, razvijena je izvorna procedura preliminarnog ocjenjivanja koja sadržava tri osnovna koraka: prikupljanje podataka, ocjenjivanje svoda i ocjenjivanje kolničke ploče.

### Ključne riječi:

ocjenjivanje, zidani svođeni most, mali rasponi, betonska kolnička ploča, stvarno prometno opterećenje

Professional paper

**Alex Kindij, Ana Mandić Ivanković, Marin Vasilj**

## Adjustment of small-span masonry arch bridges to present-day demands

An overview of deterioration mechanisms and damage to masonry arch bridges, methods for inspection of existing structures, and conservative and sophisticated assessment methods, is presented in this paper. An original preliminary assessment procedure is developed based on the analysis of small-span masonry arch bridges using three conservative assessment methods, and an additional analysis of strengthening and adjustment of these bridges during their service life to modern traffic demands. The procedure contains three basic steps: data collection, arch assessment, and deck slab assessment.

### Key words:

assessment, masonry arch bridge, small spans, concrete deck slab, real traffic load

Fachbericht

**Alex Kindij, Ana Mandić Ivanković, Marin Vasilj**

## Anpassung von Bogenbrücken aus Mauerwerk kleiner Spannweiten an heutige Anforderungen

In der vorliegenden Arbeit ist für Bogenbrücken aus Mauerwerk ein Überblick der Beschädigungsmechanismen und möglichen Schäden, der entsprechenden Methoden für die Inspektion bestehender Konstruktionen, sowie der konservativen und sophistischen Bewertungsmethoden gegeben. Auf der Analyse von Bogenbrücken aus Mauerwerk kleiner Spannweiten beruhend, durch die Anwendung drei konservativer Bewertungsmethoden und zusätzlicher Analysen möglicher Verstärkungen und Anpassungen an moderne Verkehrsanforderungen im Laufe der Lebensdauer, ist ein originales Verfahren für vorläufige Begutachtungen entwickelt worden. Der Vorgang besteht aus drei Schritten: Datensammlung, Beurteilung des Bogens und Beurteilung der Fahrbahnplatte.

### Schlüsselwörter:

Beurteilung, Bogenbrücken aus Mauerwerk, kleine Spannweite, Betonfahrbahnplatte, realistische Verkehrsbelastung

## 1. Uvod

Zidani svođeni mostovi na koje danas nailazimo nastali su u različitim vremenima, različitim povijesnim situacijama i različitim ambijentalnim prilikama. Ti su mostovi kulturno i povijesno blago te ih valja čuvati i zaštititi od propadanja. Neke od njih bit će potrebno i prilagoditi zahtjevima suvremenog prometa, a neki su upravo ovakvim aktivnostima kroz povijest postali dodatno ugroženi.

Tijekom uporabe mosta javljaju se različite vrste oštećenja na konstrukciji, i to uslijed starenja i propadanja kvalitete materijala, povećanja prometnog opterećenja te utjecaja vanjskih prirodnih čimbenika na građevinu. Kako bi se što točnije moglo ocijeniti stanje mosta te odrediti primjereni način njegovog popravka ili ojačanja potrebno je prije svega poznavati mehanizme razaranja i razumjeti uzroke oštećenja zbog kojih dolazi do propadanja građevine u cjelini ili njezinih pojedinih dijelova. Nadalje, takva oštećenja treba znati na postojećoj građevini uočiti i odgovarajućim metodama ispitivanja utvrditi kakva su svojstva postojeće konstrukcije ta oštećenja uzrokovala.

## 2. Mehanizmi razaranja i oštećenja zidanih svodova

Nijedan građevni materijal ne može konkurirati prirodnom kamenu u pogledu trajnosti što i potvrđuje trajnost kamenih konstrukcija kroz stoljeća pa i tisućljeća [1]. Tijekom povijesti su se ipak pokazale otpornijima one zidane konstrukcije s manje spojeva jer je materijal u spojnicama uvijek lošije kvalitete od samog zidanog elementa, pa se i oštećenja često javljaju u obliku razaranja sljubnica.

Najznačajniji utjecaji na propadanje zidanih konstrukcija jesu:

- *kristalizacija soli* koja u porama zidnog elementa može proizvesti naprezanja koja uzrokuju pucanje kamena, često u praškaste komadiće,
- *otapanje u vodi* na koje su osjetljive neke vrste kamena kao što su karbonatne sedimentne stijene, među koje ponajprije ubrajamo vapnenac ili dolomit te neke pješčenjake i mramor, a pokazalo se kako kišnica u mnogim gradskim područjima sadrži određenu kiselost koja dovodi do ubrzanog propadanja,
- *oštećenja uslijed djelovanja smrzavanja* koja se javljaju pri izloženosti niskim temperaturama i vlažnom okolišu vrsta kamena s većim volumenom pora u koje može ući voda, a rezultiraju odlamanjem zidnih elemenata,
- *biološki činitelji* kao što su korijenje biljaka, vitice bršljana, ptice te mikroorganizmi koji proizvode kiseline i druge kemikalije koje nepovoljno djeluju na karbonatne i silikatne materijale,
- *mehanička oštećenja* kao trošenje kamenih podova ili odlamanja dijelova konstrukcije.

Oštećenja u zidanim svođenim mostovima dijele se na oštećenja temelja i oštećenja same rasponske konstrukcije. Pri tome se ova druga razvrstavaju u dvije podskupine – u jednoj su oštećenja zbog loših svojstava otpornosti prilikom izvođenja same građevine, a u drugoj zbog dugoročnih utjecaja tijekom godina koji mogu u konačnosti smanjiti otpornost glavnih elemenata građevine [2].

### 2.1. Oštećenja temelja

Najveći problem utvrđivanja oštećenja temelja je njihova nedostupnost. Kada rijeke koje prolaze ispod mosta ljeti presuše, najlakše je utvrditi stanje temelja tog mosta. Za ostale mostove, kad je voda tijekom cijele godine, mora se pristupiti podvodnom pregledu. U praksi, prvi korak je pregled i analiza prisutnih simptoma koji su vidljivi na površini građevine, a mogu biti posljedica rotacije ili pomaka temelja. Najčešća oštećenja temelja kod lučnih mostova navode se kako slijedi.

*Oštećenja zbog propadanja elemenata.* Većina starih zidanih mostova izgrađena je pomoću vapnenog morta. Voda nastoji rastapati vapno, pa dolazi do propadanja morta i raspadanja starih elemenata od vapnenog betona, koji se vrlo često koristio na temeljima. Posljedica je takvog djelovanja stvaranje šupljina ili potpuno propadanje dijela temelja. Pomicanje šljunka i pješčenjaka u naplavnim rijekama također može dovesti do oštećenja temelja, stupa i elemenata postolja.

*Korozija metalnih elemenata.* Krajem 19. i početkom 20. stoljeća često su se prilikom gradnje temelja u dubokim koritima rijeka primjenjivali metalni kesoni. U drugim prilikama se kao pouzdana zaštita od vodotoka primjenjivalo žmurje od metalnih elemenata. Tijekom vremena i uz prisutnost vlage, pojavila su se oštećenja od korozije. Materijal koji je prije bio zaštićen sada je izložen propadanju zbog erozivnog djelovanja vode i vjetra. Korozija je rezultirala ozbiljnim oštećenjima koja su vezana za stabilnost građevine i zbog toga ovaj problem treba shvatiti vrlo ozbiljno.

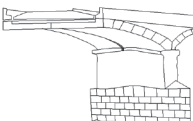

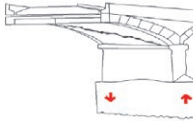



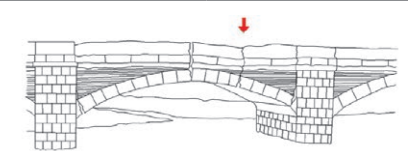
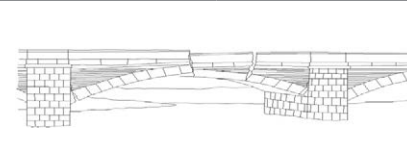
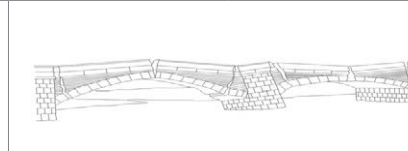
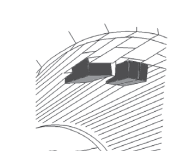
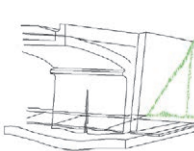



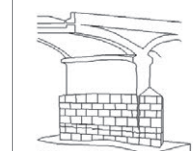
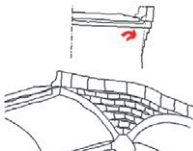
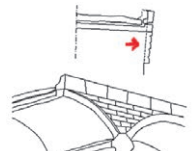
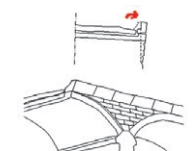


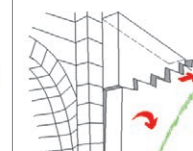
*Oštećenja zbog propadanja temeljnog tla* javljaju se kao posljedica erozije tla oko temelja građevine, a koja se događa prilikom stvaranja horizontalnih vrtloga. Materijal riječnog korita ispire se s obala rijeke vertikalnim komponentama strujanja, podizanjem i guranjem postojeće vode prema naprijed.

Ako su uočena bilo kakva od navedenih oštećenja, treba vizualno pregledati temelj, procijeniti dimenzije i vrstu temelja, ispitati tlo oko temelja, procijeniti uzdužni profil i poprečni presjek riječnog korita te odrediti čišćenje i procjenu općeg stanja rijeke.

### 2.2. Oštećenja uslijed slabe otpornosti rasponske konstrukcije

Pri razmatranju oštećenja svođenih mostova važno je poznavati opterećenja uslijed kojih su nastala te mehanička

Tablica 1. Oštećenja zidanih svođenih mostova uslijed slabe otpornosti rasponske konstrukcije

					
a) Uzdužno raspucavanje svoda	b) Uzdužno raspucavanje između svoda i čeonih zidova	c) Dijagonalno raspucavanje svoda uslijed diferencijalne rotacije stupišta	d) Mehanički slom zida – dominantan tlak	e) Mehanički slom zida – kombinacija tlaka i posmika	f) Mehanički slom – dominantan posmik
					
g) Poprečno raspucavanje-slom uzrokovan otvaranjem zglobova –jednostruki mehanizam		h) Poprečno raspucavanje-slom uzrokovan otvaranjem zglobova i posmikom		i) Poprečno raspucavanje-slom uzrokovan otvaranjem zglobova – višestruki mehanizam	
					
j) Gubitak pojedinih dijelova – ispadanje kamena	k) Vertikalno raspucavanje upornjaka	l) Horizontalno raspucavanje upornjaka	m) Vertikalno raspucavanje stupišta	n) Stepenasto raspucavanje stupišta	o) Vertikalno raspucavanje između stupa i ojačanja
					
p) Izbočavanje čeonih zidova	r) Klizanje čeonih zidova	s) Rotacija bočnih zidova	t) Rotacija i izbočavanje krila	u) Vertikalno raspucavanje na spoju krila i zida	v) Stepenasto raspucavanje krila

svojstva materijala i općenito ponašanje cjelokupne konstrukcije. Najčešće se oštećenja grupiraju prema elementu u kojem se javljaju ali vodeći računa o uzrocima i posljedicama. Tako primjerice razlika slijeganja temelja stupišta može izazvati oštećenja samog stupišta ali i svodova, čeonih zidova ili sustava odvodnje, pa se može zaključiti da uočeno oštećenje na svodu otvara mogućnost da se i u drugim elementima konstrukcije naiđe na probleme.

Najčešća oštećenja zidanih svođenih mostova prema elementu u kojem se susreću (svod, stupišta, upornjaci, čeonih zidova i krila) [2] pregledno su prikazana u tablici 1.

Slijedi kratak opis uzroka i ozbilnosti nekih vrsta oštećenja prikazana je u nastavku.

Uzdužna raspucavanja svoda u sredini (a) posljedica su različitog slijeganja središnjeg i rubnih dijelova temelja stupišta ili poprečnog savijanja i vlačnih uzdužnih sila u svodu. Ovo oštećenje može nastati i kada su tračnice željezničkog mosta nesimetrično raspoređene u poprečnom presjeku. Kod zidanih mostova od opeke, gdje su čeonih zidova monolitno građeni sa svodom, uzdužne pukotine se mogu pojaviti ispod unutarnje strane čeonih zidova, na podgledu svoda (b). Ako takve pukotine nemaju tendenciju daljnjeg širenja, tada se

njihovo nastajanje može pripisati različitim krutostima čeonih zidova (koji djeluju kao visoke grede) i fleksibilnog lučnog svoda, uslijed čega nastaje nekompatibilnost pomaka na njihovim spojevima. Ova oštećenja ne smatraju se ozbiljnima, ali ipak moraju biti pod nadzorom.

Poprečna raspucavanja na podgladu luka najozbiljniji su oblik oštećenja. Te pukotine upućuju na prisutnost vlačnog naprezanja koje, ako se zanemari, dovodi do otvaranja zglobova i otkazivanja luka. Da bi se formirao mehanizam sloma pod djelovanjem pokretnog opterećenja, potrebno je otvaranje četiri zglobova (g). Rijetko je moguća i pojava posmičnog mehanizma, koja je obično posljedica slijeganja temelja (h). Višestruki mehanizam ostvarit će se otvaranjem sedam zglobova (i).

Nametnuti pomaci nastaju kao posljedica gibanja temelja upornjaka i pilota, što uzrokuje njihovo podlokavanje. Ovo djelovanje je najznačajnije i odgovorno je za većinu oštećenja na zidanom svodu. Nejednoliko slijeganje tla ispod temelja stupova i upornjaka uzrokuje različite pomake između različitih dijelova u građevini, što pridonosi razvoju vlačnih naprezanja u temeljima i luku te uzrokuje pojavu pukotina u zidanim elementima. Ovisno o lokaciji i veličini pomaka temelja te o tipu monolitnog ziđa, raspucavanje će imati vertikalni ili kosi smjer (c, k, m, n).

Horizontalna raspucavanja upornjaka (l) česta su kod vrlo plitkih  $f/L < 1/6$  svodova gdje upornjaci nisu u stanju oduprijeti se horizontalnom potisku koji se prenosi sa svoda.

Gubitak pojedinih dijelova uzrokovan je smanjenjem otpornosti ili trajnosnih svojstava konstrukcije, ili i jednim i drugim. Ako je oštećenje nastalo uslijed nedovoljne nosivosti, očitovat će se pomicanjima u petama svoda ili rjeđe smanjenjem nosivosti na uzdužne sile u svodu. Osim toga, takvo oštećenje može nastati uslijed jakog lokalnog udara blizu tjemena svoda kada je nadsloj luka najviše 0,4 m (j).

Mehanički slom uslijed nedovoljne čvrstoće materijala u svodu može se dogoditi pri dominantnoj tlačnoj sili kada su reške zidnih elemenata okomite na tlačnu liniju u obliku pukotina paralelnih sa smjerom tlačnih naprezanja (d). Međudjelovanje savijanja i posmika može, uz slaba svojstva materijala, rezultirati kosim pukotinama (e). Kada je tlačna sila okomita na reške mala, neće se dogoditi slom preko materijala već klizanje između zidnih elemenata (f).

Oštećenja čeonih zidova javljaju se kao izbočenja (p) koja su posljedica povećanog tlaka u ispuni zbog zadržavanja vode te zbog horizontalne komponente pokretnog opterećenja, kao klizanja (r) kada je tlak ispune u kombinaciji s horizontalnom silom od vode, nadsloja i vanjskih djelovanja veći od stabilizirajuće sile vlastite težine svoda pomnožene s koeficijentom trenja u spoju i kao rotacije (s) kada je moment preokretanja od ispune, vode i korisnih opterećenja veći od stabilizirajućeg momenta. Ova oštećenja karakteristična su za mostove s dubokim, ali ne previše širokim svodovima i visokom ispunom iznad tjemena.

Oštećenja krila događaju se u obliku preokretanja i izbočavanja (t) uslijed neprikladnog drenažnog sustava ispune sa začepljenim rupama kroz koje bi trebala curiti voda, što uzrokuje povećanje horizontalnog tlaka na zidove. Nadalje, moguća su i vertikalna raspucavanja (u) na spoju između upornjaka i krila uslijed različitih pomaka elemenata. Zidovi upornjaka spojeni su i sa svodom i čeonim zidovima, a krila imaju na jednoj strani slobodan horizontalan pomak, pogotovo na vrhu.

Zbog diferencijalnog slijeganja u ravnini plohe krila, javljaju se stepenaste pukotine (v). Kada se uoče oštećenja krila, treba provesti ispitivanja temelja i provjeriti moguće pomake, provjeriti tip spoja između upornjaka i zida, ispitati nasip iza zidova te nastojati poboljšati drenažni sustav zidova.

### 2.3. Oštećenja uslijed trajnosnih problema u konstrukciji

Trajnosna oštećenja zidanih svodova posljedica su klimatskih djelovanja, slabljenja svojstva materijala tijekom godina i zanemarivanja održavanja građevina.

Klimatska djelovanja kao što su kiša, mraz, sunčevo zračenje, soli nošene vjetrom očituju se razaranjem površina čeonih zidova, upornjaka, spojnica između elemenata i sl. Stupanj i brzina razaranja ovisi o vrsti materijala, kvaliteti spojnog sredstva i koncentraciji nepovoljnih djelovanja.

Neredovito održavanje građevine pridonosi razvoju vegetacije i propadanju drenažnog sustava što za posljedicu može imati i otkazivanje same konstrukcije. Rast vegetacije uzrokuje propadanje spojnog sredstva čime dolazi do diskontinuiteta zidanih elemenata.

Začepljenje drenažnog sustava uzrokuje nakupljanje vode u ispuni zbog čega dolazi do povećanog tlaka na čeonu zidove i dijelove upornjaka. Zbog povećanja tlaka dolazi do klizanja, izbočavanja i raspucavanja.

### 3. Metode ispitivanja

Kako bi se utvrdila mehanička i fizička svojstva primijenjenih materijala i elemenata svođenog mosta kao što su tlačna i vlačna čvrstoća, radni dijagrami materijala, savojna čvrstoća, vlačna rascjepna čvrstoća, gustoća, poroznost, količina vlage, struktura zrna, mineraloški sastav, potrebno je provesti *razorna ispitivanja* na uzorcima izvađenim iz mosta (probijanjem, struganjem, bušenjem, rezanjem, vađenjem jezgri). Valja naglasiti da se razornim metodama mogu dobiti samo lokalne informacije pa se dobiveni rezultati ne mogu koristiti kao mjerodavni za cijelu građevinu [3], osim ako provedena metoda ne jamči statistički pouzdane rezultate. Manje penetracije u vanjskim zidovima konstrukcije zahtijevaju *polurazorne metode* kao što su boroskopija, ispitivanje pod tanjurastom prešom, površinska mjerenja tvrdoće, izvlačenja, penetracije te analize uzoraka malih promjera. Polurazornim metodama se mogu dobiti isključivo

kvalitativne informacije o stanju zida, koje se zatim koriste kod preliminarnih istraživanja.

*Nerazorne metode* kao što su ispitivanja georadarom, infracrvenom termografijom, mjerenja vodljivosti, i akustične emisije, češće se primjenjuju i detaljnije su opisane u nastavku.

Na zidane se mostove povremeno mogu postaviti nadzorni sustavi u svrhu praćenja razvoja pukotina, progiba, pomaka i vlaženja. Među takve se *nadzorne metode* ubraja i kucanje čekićem, profiliranje laserom, dinamička i statička ispitivanja. Praćenjem širenja ovih deformacija može se spriječiti nastanak ozbiljnijih oštećenja ili, u najgorem slučaju, urušavanja konstrukcije. Nadzorom se također mogu dobiti informacije koje nam mogu pomoći u utvrđivanju stvarnih uzroka koji su doveli do nastanka oštećenja.

### 3.1. Prikladnost nerazornih metoda ispitivanja

Dok se uobičajene razorne metode odnose uglavnom na mehanička svojstva materijala, nerazornim metodama može se dobiti ukupna kvalitativna slika stanja mosta kao i dodatne informacije o stanju njegove unutrašnjosti [4].

Nerazornim metodama otkrivaju se skrivene dimenzije kao što su promjenljiva debljina svoda, unutarnja rebra i bočni zidovi, unutarnje šupljine, geometrija stupišta (puni, slojeviti, ošupljeni), dubina i stanje temelja, razine ispune.

Primjenjuju se kako bi se ispitala vrsta i kvaliteta materijala (vrsta kamena/opeke, morta, materijala ispune) koje se mogu razlikovati na pojedinim dijelovima cjelokupne konstrukcije te kako bi se utvrdila oštećenja u obliku pukotina, šupljina, istrošenih površina, odvajanja prstena, ispiranja ispune, procjeđivanja, oštećenja izolacije.

Nadalje, nerazorne metode se upotrebljavaju kako bi se utvrdile i kontrolirale prethodne intervencije na mostu, prisutnost opterećenja, novi slojevi (debljina, kvaliteta, odvajanje), injektiranja ali i oprema kao što su cijevi te prisutnost metalnih dijelova.

### 3.2. Najčešće primjenjivane metode ispitivanja

Donosi se i daje pregled najčešće primjenjivanih metoda ispitivanja zidanih svođenih mostova, prikazuju osnovna načela, prednosti i nedostaci te prikladnost rezultata [4, 5].

Pri ispitivanju *georadarom* elektromagnetski se impulsi odašilju u materijal i zabilježe prijamnikom. Rezultati omogućuju otkrivanje postojećih šupljina i geometriju unutrašnjosti, kao i prisutnost vlage u unutrašnjosti zida i ispune. Prednosti odnosno nedostaci ove metode jesu:

- visoka dubina prodiranja - omogućuje korisne informacije o skrivenim detaljima iz unutrašnjosti konstrukcije,
- daje ukupni kvalitativni prikaz,
- relativno brz postupak,
- potreban je stručnjak koji će protumačiti očitavanja,
- nije primjenjiva u vodljivom okruženju.

Tablica 2. Prikladnost nekih metoda ispitivanja za ocjenu geometrije, svojstava materijala i oštećenja zidanih svođenih mostova

Metode ispitivanja	Georadar	Akustično ispitivanje	Infracrvena termografija	Boroskopija
<b>Rezultat ispitivanja</b>				
<b>Ocjena geometrije zidanog svođenog mosta</b>				
Debljina svoda				
Geometrija upornjaka				
Geometrija stupa				
Debljina temelja				
Debljina čeonih zidova				
Prisutnost i geometrija unutarnjih zidova				
Prisutnost i geometrija skrivenih elemenata				
Opseg i priroda prethodnih popravaka				
<b>Ocjena svojstava materijala zidanog svođenog mosta</b>				
Vrsta, čvrstoća i stanje zidnih elemenata				
Vrsta, čvrstoća i stanje morta				
Gustoća zida				
Gustoća ispune				
Raspodjela vlažnosti i njen udio u zidu				
Raspodjela vlažnosti i njen udio u ispuni				
Mehanička svojstva ispune				
<b>Ocjena oštećenja zidanog svođenog mosta</b>				
Gubitak ili pomicanje elemenata				
Pukotine na podgledu luka				
Pukotine na nadgledu luka				
Odvajanje čeonih zidova				
Deformacije svoda				
Razdvajanje prstena				
Pogreške, šupljine unutar zida i ispune				
Površinska odvajanja				
Gubitak spojnog materijala				
Trošenje svoda				
Problemi temeljenja				
Legenda:				
	Vrlo korisni podaci, uglavnom kvantitativni i pouzdani			
	Korisni podaci, uglavnom kvalitativni i općenito pouzdani			
	Dopunski podaci, uglavnom kvalitativni i ograničeno pouzdani			
	Ne ostvaruje nikakve korisne podatke			

*Akustičnim ispitivanjem* valovi se odašilju kroz strukturu brzinom proporcionalnom svojstvima ziđa. Rezultati omogućuju otkrivanje šupljina i skrivene geometrije unutrašnjosti, kao i cjelovitost strukture. Prednosti odnosno nedostaci ove metode jesu:

- visoka dubina prodiranja – omogućuje korisne informacije o skrivenim detaljima iz unutrašnjosti konstrukcije,
- daje ukupni kvalitativni prikaz,
- dugotrajan postupak,
- potreban je stručnjak koji će upravljati uređajem i očitavati rezultate.

*Infracrvena termografija* predstavlja očitavanje površinskog zračenja pomoću infracrvene kamere. Rezultati omogućuju pregled šupljina i raslojavanja, daljinsku identifikaciju materijala i otkrivanje vlažnih područja. Prednosti odnosno nedostaci ove metode jesu:

- daje ukupni kvalitativni prikaz,
- daljinska osjetilna metoda bez direktnog doticaja s površinom,
- zbog niske dubine prodiranja dobiju se informacije samo o području do nekoliko centimetara ispod površine,
- potreban je stručnjak koji će protumačiti očitavanja,
- osjetljivost na površinske uvjete.

*Boroskopija* predstavlja ispitivanje u kojem se mala kamera uvlači u bušotinu u strukturi i omogućuje detaljnu analizu konstrukcije duž cijele duljine bušotine. Rezultati omogućuju vizualnu identifikaciju materijala, otkrivanje šupljina i deformacija te kalibraciju ostalih ispitivanja. Prednosti odnosno nedostaci ove metode jesu:

- vjerodostojnost rezultata,
- omogućuje samo informacije o manjem, ograničenom području,
- ova metoda zahtijeva bušenje građevine te saniranje oštećenja nakon završetka ispitivanja.

#### 4. Metode ocjenjivanja

Začetak klasične teorije stabilnosti lučnih mostova nalazimo u radovima Pipparda koji je proučavao dvozglojni luk za koji je utvrdio minimalno opterećenje zadanog položaja koje će luk pretvoriti u mehanizam. Teoriju dalje širi Heyman, prema kojemu potporna krivulja mora postati tangencijalna na podgled ili nadgled na četiri mjesta u kojem trenutku konstrukcija postaje mehanizam [6]. Novija istraživanja [7] temelje se na teoriji krutog bloka koji se smatra osnovom za razumijevanje ponašanja zidanih lukova. Međutim ta teorija ima brojna pojednostavnjenja i pretpostavke što često dovodi do velikih odstupanja rezultata od stvarnog stanja. Realniji rezultati zahtijevaju razmatranje elastoplastičnog ponašanja materijala.

Danas se za ocjenu nosivosti zidanih lučnih mostova primjenjuju različite metode. Metode na strani sigurnosti

(konzervativne metode) često podcjenjuju stvarnu nosivost konstrukcija, što može rezultirati neekonomičnim i nepotrebnim mjerama koje se poduzimaju pri održavanju mosta [8]. Ipak ovim se metodama mogu dobiti osnovne informacije o nosivosti mosta te mogu poslužiti kao referentna točka za sljedeću sofisticiraniju razinu ocjene. S druge strane, sofisticirane metode ocjene obično zahtijevaju dodatne ulazne informacije koje se prikupljaju na samom mjestu istraživanja, što otežava ocjenjivanje te ispitivanja i laboratorijska analiza uzoraka materijala produljuju proces ocjenjivanja. Ove metode upotrebljavaju se u višim razinama postupka ocjenjivanja kako je opisano u radovima [4, 9].

#### 4.1. Konzervativno ocjenjivanje dopuštenog opterećenja

U ovom se potpoglavlju sažeto prikazuju konzervativne metode koje su uspoređene na primjeru mosta u poglavlju 7. Dopusšteno osovinsko opterećenje dvaju paralelnih kotača  $W_A$  prema Pippardovoj elastičnoj metodi [10]:

$$W = \frac{256f_c h d}{L} - 128\rho L h \left( \frac{1}{21} + \frac{h+d}{4a} - \frac{a}{28d} \right); W_A = 2W \quad (1)$$

temelji se na ograničenju tlačne čvrstoće na nadgledu luka u tjemenu pod kombinacijom vlastite težine i uporabnog opterećenja. Luk se pretpostavlja paraboličnog oblika s odnosom raspona i strelice  $L/a = 4$ , djelotvornom širinom  $b = 2h + 30$  cm, djelotvornom debljinom  $h + 15$  cm (debljina ispune plus pola debljine lučnog svoda u tjemenu) i graničnom tlačnom čvrstoćom  $f_c = 1400$  kN/m<sup>2</sup> te graničnom vlačnom čvrstoćom  $f_t = 700$  kN/m<sup>2</sup>. Pretpostavlja se i poprečna raspodjela opterećenja pod kutom 45° te ispuna svoda bez otpornosti, a iste specifične težine kao i lučni svod ( $\rho = 21,44$  kN/m<sup>3</sup>).

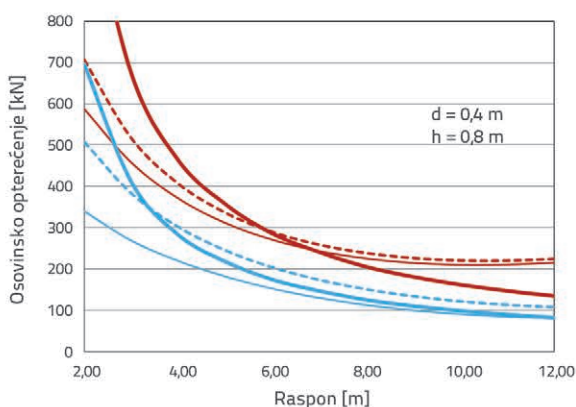
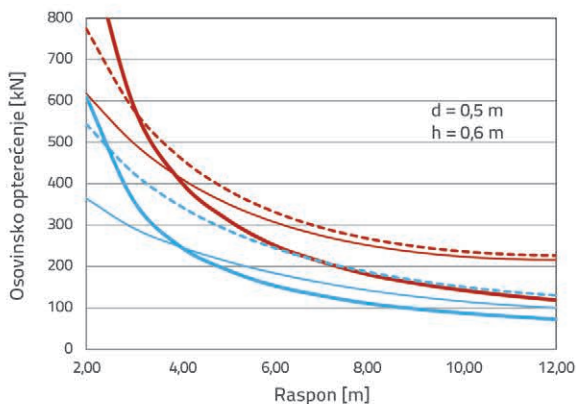
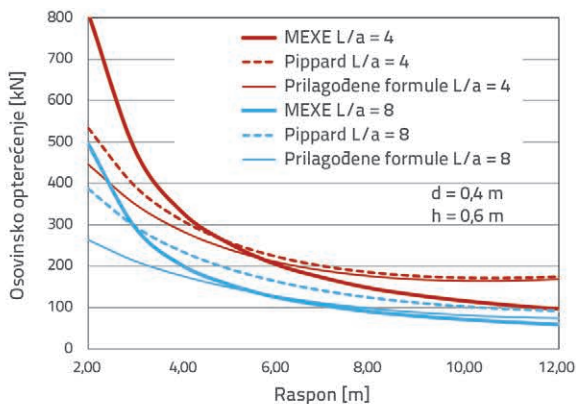
Istraživanjima vojnog inženjerskog instituta (eng. *Military Engineering Experimental Establishment - MEXE*) utvrdilo se da se izraz (1) koji je formiran za idealizirani luk, za zadane vrijednosti graničnih napreznja vrlo dobro podudara s nomogramom ili s izrazom za provizorno osovinsko opterećenje (eng. *provisional axle loading - PAL*) na dvoosovinskom vozilu:

$$PAL = 740(d+h)^2 / L^{1.3} \quad (2)$$

uzimajući u obzir samo raspon luka  $L$  i ukupnu debljinu  $h + d$  u tjemenu, te je ova ideja prihvaćena kao MEXE metoda. U ovom izrazu  $d$  je debljina lučnog svoda u tjemenu, a  $h$  je prosječna debljina ispune u četvrtinskim točkama poprečnog profila ceste, između plohe površine ceste i plohe svoda luka u tjemenu, uključujući slojeve kolničke konstrukcije.

Ova provizorna ocjena se dodatno modificira nizom faktora kojima se uzima u obzir različito ponašanje stvarnog luka u odnosu na idealizirani [11]:

- faktor sploštenosti (eng. *span/rise factor*)  $F_{sr}$ ,
- faktor oblika (eng. *profile factor*)  $F_p$  koji uzima u obzir razliku između stvarnog oblika krivulje luka i parabole te ovisi o strelici luka u četvrtini raspona i u tjemenu,
- faktor materijala (eng. *material factor*)  $F_m$  koji uzima u obzir čvrstoću materijala luka te materijala ispune i njihove dimenzije,
- faktor spojnice (eng. *joint factor*)  $F_j$  kategorizira čvrstoću morta ili nekog drugog veziva te uzima u obzir širinu reški među elementima ziđa,
- faktor stanja (eng. *condition factor*)  $F_{cm}$  opisuje opće stanje luka koje se utvrđuje vizualnim pregledom na temelju objektivne ocjene važnosti različitih pukotina i deformacija.



Slika 1. Razmatranje područja mjerodavnosti pojedine konzervativne metode ocjenjivanja

Ovako se određuje modificirano osovinsko opterećenje (eng. *modified axle loading - MAL*) koje predstavlja dopušteno opterećenje na luk jedne osovine dvoosovinskog vozila bez mogućnosti odizanja bilo koje osovine odnosno kotača:

$$MAL = F_{sr} \cdot F_p \cdot F_m \cdot F_j \cdot F_{cm} \cdot PAL \quad (3)$$

Kako bi se ovaj rezultat prilagodio drugačijim vozilima i mogućoj pojavi odizanja osovina (situacije kada kotači vozila s više osovina mogu djelomično izgubiti kontakt s voznom površinom i preraspodijeliti opterećenje na druge osovine), dodatno se daju faktori osovina (eng. *axial factors*)  $A_f$ .

U radu [12] razvijene su nove jednadžbe (prilagođene formule) za određivanje dopuštenog osovinskog opterećenja na luk koje uzimaju u obzir učinke uzdužnog potiska na energiju deformabilnog tijela, kojima se dobivaju niže vrijednosti nosivosti lukova malih raspona:

$$W = \frac{\frac{256f_c h d}{L} - 128\rho L h \frac{1}{1+\lambda} \left\{ \left( \frac{1}{21} + \frac{h+d}{4a} \right) - \frac{a}{28d} \left[ 1 - 7\lambda - \frac{42(h+d)}{a} \lambda \right] \right\}}{\frac{1}{1+\lambda} \left[ \frac{25}{a} + \frac{42}{d} \left( 1 + \frac{32}{7} \lambda \right) \right]}; \quad (4)$$

$$W_A = 2W; \quad \lambda = \frac{5}{32} \left( \frac{d}{a} \right)^2 \int_0^{\alpha} (\cos \alpha)^4 dx$$

Usporedba rezultata triju postupaka određivanja osovinskog opterećenja za raspone mostova od 2 do 12 metara prikazana je dijagramima na slici 1. Prilagođene formule za manje raspone (tanke pune linije) u odnosu na originalne Pippardove formule (isprekidane linije) daju manje vrijednosti graničnih osovinskih opterećenja i ta je razlika izraženija što je sploštenost mosta veća (veći odnos  $L/a$  prikazan je plavim linijama) i što je debljina samog svoda  $d$  veća u odnosu na debljinu ispune iznad svoda  $h$ . U dodatnoj usporedbi i sa MEXE postupkom (debele pune linije) uz ista svojstva materijala, spojnice i opće stanje mosta, vidljivo je da su za raspone manje od 4,0 m svakako mjerodavne prilagođene formule za male raspone (srednji dijagram, tanke pune linije pokazuju manje vrijednosti graničnog osovinskog opterećenja u odnosu na debele linije). Što je debljina ispune iznad svoda  $h$  veća u odnosu na debljinu samog lučnog svoda  $d$  (srednji dijagram  $h/d = 1,2$ , gornji dijagram  $h/d = 1,5$ , donji dijagram  $h/d = 2,0$ ), to će ove formule postajati mjerodavnima i za sve veće raspone. Ako je još i veći odnos  $L/a$  (veća sploštenost mosta), prilagođene formule za male raspone mogu biti mjerodavne i za još veće raspone (i do 12 m kao što je vidljivo na donjem dijagramu).

Analize provedene ovim istraživanjem pokazuju da je za dobivanje rezultata za pojedinačni most potrebno provesti ocjenjivanje objema metodama (prilagođenim formulama za male raspone i MEXE metodom) te tako utvrditi mjerodavnu vrijednost graničnog osovinskog opterećenja.

## 4.2. Sofisticirane metode

U novije vrijeme sve više se primjenjuju računalni sofisticirani postupci za provjere stabilnosti i nosivosti zidanih lukova. Njih karakterizira velika točnost ali samo uz vrlo brojne i detaljne ulazne podatke. Ti se postupci temelje na metodama konačnih elemenata, diskretnih elemenata i njihovoj kombinaciji [3, 4, 13]. Računalni program RING [6, 7, 14, 15] razvijen je u suradnji s Međunarodnim društvom za željeznice (eng. International Union of Railways, UIC) te je tijekom zadnjih desetljeća u velikoj mjeri potvrđena njegova točnost usporedbom s rezultatima laboratorijskih ispitivanja opterećenja otkazivanja. Program idealizira most kao grupu krutih blokova koji su odijeljeni dodirnim površinama na kojima je moguća pojava klizanja, drobljenja ili njihanja. Materijal ispune iznad lučnog svoda modeliran je tako da pruža pasivni otpor i da omogućava rasprostiranje uporabnog opterećenja. Ovim se programom, primjenjujući matematičku optimizaciju, izravno utvrđuje faktor opterećenja. On će, primijenjen na specifično uporabno opterećenje, voditi ka kritičnom mehanizmu otkazivanja konstrukcije uključujući i prikaz potporne zone koji upućuje na položaj tlačne sile i minimalne količine materijala koji je potreban da je preuzme.

Računalni program Archie-M [6, 16] primjenjuje tradicionalni proračun potporne krivulje u kombinaciji s potisnom zonom za modeliranje konačne čvrstoće drobljenja. Potporna krivulja pronalazi se sustavom s tri zgloba čiji se položaj određuje na temelju pretpostavke minimalne ukupne energije sustava. Osnovna namjena ovog programa je dokazati da se traženo opterećenje može preuzeti, ali njime je moguće i procijeniti opterećenje otkazivanja varirajući faktor opterećenja dok potporna krivulja ne dodirne još jedan rub luka i proizvede četvrti zglob. Poprečno opterećenje od materijala ispune uzima se kao mirni tlak, a od uporabnog opterećenja može se uzeti kao aktivan ili mirni tlak. Udio pasivnog otpora može se dodati kako bi se osiguralo da potporna krivulja ostane unutar luka. Raspodjela uporabnog opterećenja također se uzima u obzir u modelu.

## 5. Dodatna razmatranja

Zidani svođeni mostovi na koje danas nailazimo često su u uporabi niz godina pri čemu bivaju izloženi popravcima, a nerijetko se i prilagođavaju suvremenim zahtjevima povećanog prometnog opterećenja i prometnih širina betoniranjem novih kolničkih ploča, dodavanjem novih kolničkih slojeva i novom opremom.

Osim što pri ocjenjivanju nosivosti svoda treba uzeti u obzir cjelokupno novo dodatno stalno opterećenje i zahtijevano prometno opterećenje te njegovo rasprostiranje kroz sve prisutne slojeve, treba također razmotriti i dodatne učinke ovih promjena. Naime, današnje težine i brzine vozila često mogu izazvati ozbiljne posljedice na konstrukcije mostova uslijed udarca u zaštitne ograde.

Kao što je detaljno objašnjeno u radu [17], na vrijednost sile udara osobito utječe deformacija, odnosno pomak sustava zadržavanja, a to je povezano s krutošću pričvršćenja ograde u rasponski sklop i učincima na samu konstrukciju mosta. Ako se pri održavanju postojećih mostova odabere zaštitna ograda da udar stvarnog vozila ne može konstrukcija mosta podnijeti, treba izraditi projekt ojačanja.

Prosječnu silu od stvarnog vozila koja djeluje okomito na zaštitnu ogradu moguće je odrediti uz poznavanje njegove mase  $m$ , dimenzija ( $c$  se može uzeti kao pola duljine vozila;  $b$  kao pola širine vozila), brzine kretanja  $v$  i kuta udara  $\alpha$ :

$$\bar{F} = m \cdot \bar{a}_n = \frac{m \cdot v \cdot \sin^2 \alpha}{2 \cdot [c \cdot \sin \alpha + b(\cos \alpha - 1) + s_b]} \quad (5)$$

Dodatno  $s_b$  je maksimalni dinamički pomak prometu okrenute površine zaštitne ograde (točnije zbroj bočnog progiba zaštitne ograde i dijela deformiranja vozila), a može se zamijeniti radnom širinom sustava zadržavanja  $W_N$  [17, 18]. Istodobno s horizontalnom silom udara valja uzeti u obzir i djelovanje vertikalne sile od vozila te njihovo pravilno rasprostiranje.

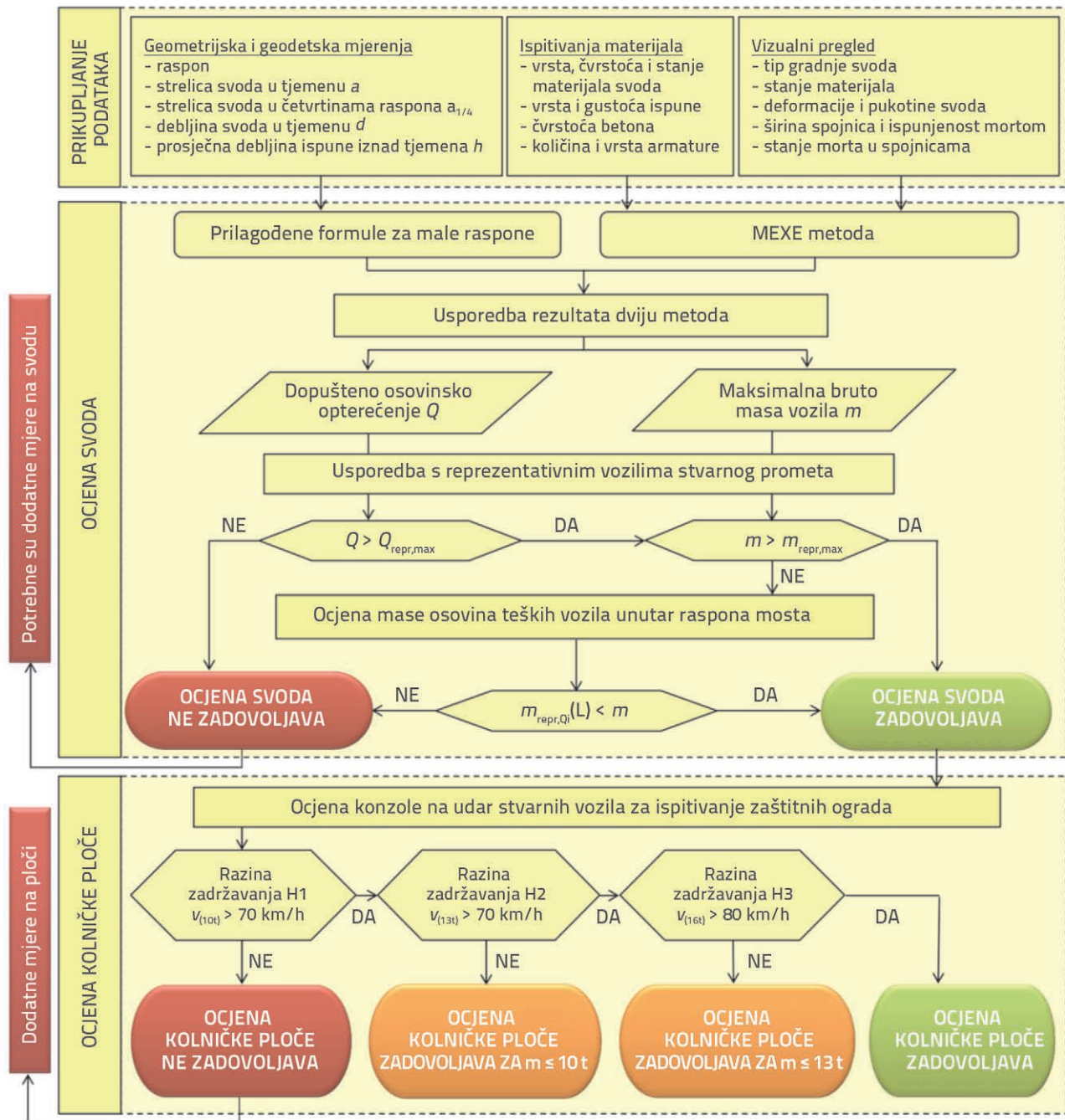
Obrnutim postupkom se za traženu razinu zadržavanja i razinu deformacije zaštitne ograde može utvrditi granična brzina kretanja stvarnog vozila koja bi trebala biti najmanje jednaka uobičajenoj prosječnoj brzini kretanja promatranog vozila. Ako je dobivena granična brzina manja od prosječne brzine stvarnog vozila, treba ili ograničiti brzinu kretanja na mostu ili ocijeniti nosivost kritičnog elementa mosta te po potrebi izvršiti ojačanje.

## 6. Izvorna procedura preliminarnog ocjenjivanja

Na temelju stanja područja u ocjenjivanju zidanih svođenih mostova manjih raspona te dodatnih razmatranja učinaka pojačavanja i prilagodbe takvih mostova suvremenim prometnim zahtjevima tijekom trajanja, razvijena je izvorna procedura preliminarnog ocjenjivanja. Njome se može utvrditi potreba za ojačanjem samog svoda i/ili naknadno betonirane kolničke ploče. Prije svega potrebno je prikupiti podatke o mostu, što podrazumijeva geodetska mjerenja kojim će se dobiti osnovni geometrijski podaci, zatim ispitivanja materijala samog svoda, materijala ispune i betona kolničke ploče te neizostavni vizualni pregled kojim će se utvrditi opće stanje mosta. Slijedi ocjenjivanje svoda i to dvjema konzervativnim metodama: MEXE metodom te Pipardovom metodom koja je prilagođena za mostove malih raspona. Jedna će od tih metoda, ovisno o odnosima geometrijskih parametara mosta, biti mjerodavna i rezultirati dopuštenim osovinskim opterećenjem te najvećom dopuštenom ukupnom masom vozila.

Da bi se utvrdilo ispunjava li svod prometne zahtjeve, ovi se rezultati uspoređuju s osovinskim opterećenjima i ukupnom





Slika 2. Dijagram toka za preliminarno ocjenjivanje zidanih mostova malih raspona s betonskom kolničkom pločom

masom teških vozila koja predstavljaju stvarni promet na danj lokaciji mosta [19, 20].

Ako je dobiveno dopušteno osovinsko opterećenje manje od osovinskog opterećenja nekog od reprezentativnih vozila stvarnog prometa svod nije zadovoljio ocjenu te su potrebne dodatne mjere. Svod treba ojačati ili se treba ograničiti promet. Kad bi se finansijski omogućila dodatna ispitivanja lučnog mosta, svakako se preporučuje daljnje ocjenjivanje sofisticiranim metodama kojima se mogu utvrditi veće mogućnosti nosivosti mosta.

Ako je dobiveno dopušteno osovinsko opterećenje veće od bilo kojeg osovinskog opterećenja reprezentativnih vozila, još uvijek se može dogoditi da ukupna dopuštena masa ne zadovoljava, ali zato je potrebno dodatno razmotriti na kojem osnom razmaku djeluju najteže osovine u odnosu na raspon mosta i tako se može utvrditi je li masa vozila koja direktno opterećuje raspon manja od dopuštene. Ako dobiveno dopušteno osovinsko opterećenje i ukupna masa vozila zadovoljavaju zahtjeve stvarnog prometa, nosivost svoda će se ocijeniti zadovoljavajućom.

No i kada je svod ocijenjen pozitivno, treba provesti daljnje ocjenjivanje kolničke ploče uzimajući u obzir učinke udara stvarnih vozila na zaštitne ograde na mostu. Kako je vidljivo na slici 2., moguća je ocjena da kolnička ploča ne zadovoljava ni najmanju zahtijevanu razinu zadržavanja zaštitnom ogradom H1, da zadovoljava ograničene razine zadržavanja, odnosno da na mostu treba ograničiti pristup vozilima veće mase od graničnih za danu razinu zadržavanja, ili da ocjena kolničke ploče u potpunosti zadovoljava te na mostu nisu potrebne dodatne intervencije.

Primjena ove metode prikazana je na stvarnom mostu u sljedećem poglavlju ovoga rada.

## 7. Primjer ocjenjivanja s komentarima

Zidani lučni most preko tri raspona sagrađen je prije više od sto godina [9, 21]. Izvorna širina mosta bila je 5,85 m. Pedesetih godina prošlog stoljeća most je proširen na 7,0 m sa 15 cm debelom betonskom pločom s konzolnim prijepustom od 50 cm, a desetak godina kasnije na ukupno 9,0 m dodatnom betonskom pločom debljine 16 cm s konzolnim prijepustom od 107,5 cm. Raspon lukova paraboličnog oblika je 8,65 m, a strelica 1,97 m. Naslanjaju se na zidove-stupove promjenljive debljine i upornjake s vertikalnim zidovima i paralelnim krilima.

### 7.1. Stanje mosta na osnovi vizualnog pregleda

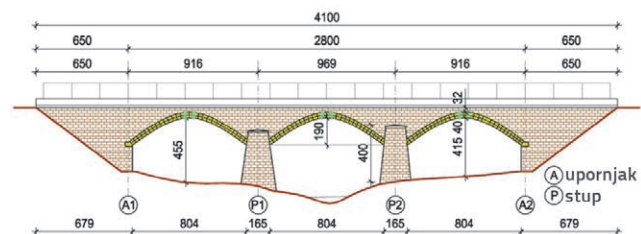
Temelji mosta se nalaze na prikladnom i čvrstom tlu na kojem nema nikakvih znakova slijeganja i erozije. Upornjaci, stupovi i lukovi ne pokazuju vidljive znakove ugrožene nosivosti za današnje prometne zahtjeve. Nema pokazatelja nedostatne debljine luka i čvrstoće materijala kao na slikama d., e. i f. u tablici 1., kao niti znakova iskrivljenosti ili mogućeg odvajanja svoda od ostatka konstrukcije kao na primjer na slici b. u tablici 1. Ujedno ne postoje znakovi propadanja ili pomicanja i ispadanja kamenih blokova unutar svoda kao na slici j. u tablici 1. Crne mrlje uočene na svodovima upozoravaju na problem vlage te prodiranje vode unutar konstrukcije. Usprkos njenoj učestaloj prisutnosti, čini se da voda za sada nije prouzročila nikakva bitna oštećenja konstrukcije.

Pregledom svodova može se zaključiti kako su na njima već prije izvođeni i manji radovi i sitni popravci, što se vjerojatno obavljalo tijekom posljednjeg proširivanja mosta. Pretpostavlja se da je uklonjeno labavo ili trošno spojno sredstvo i zamijenjeno novim materijalom. Manje pukotine su prisutne na pojedinim starim, ali i na novijim reškama, no ne predstavljaju nekakav ozbiljniji problem. Sve pukotine su uglavnom u uzdužnom smjeru, ali ni približno slične onima na slici a) u tablici 1., dok onih u poprečnom smjeru koje bi vodile stanju na slici c) gotovo da i nema.

Pregledom čeonih zidova može se zaključiti da je ziđe u relativno dobrom stanju, osim na jednom mjestu, i to u blizini upornjaka na uzvodnoj strani rijeke gdje je došlo do

mjestimičnog izbočenja jednog dijela površine čeonog zida koji je ujedno i promijenio boju u odnosu na okolno ziđe. Ovo oštećenje odgovara onome na slici p) u tablici 1. Postoji mogućnost da je do ispučanja došlo prilikom jednog od dvaju proširenja ceste radi prilagodbe konstrukcije na nošenje dodatnog tereta, ali moguće je i radi zadržavanja vode u ispuni. Nema nikakvih pokazatelja da je do te pojave došlo nedavno, kao niti da dolazi do njenog daljnjeg napredovanja.

Ostala oštećenja, kako je prikazano u tablici 1. nisu uočena. Dakle, vizualnim pregledom može se ustanoviti da su svi zidani dijelovi mosta u dobrom stanju te da nema naznaka nekih ozbiljnijih oštećenja u bližoj budućnosti.



Slika 3. Primjer zidanog mosta

Most je izgrađen od pravilno posloženog prirodnog kamena. Stupovi su ili u potpunosti izgrađeni od prirodnog kamena ili su samo izvana zidani kamenom, a iznutra ispunjeni materijalom manje kakvoće. Za razliku od stupova, za upornjake se s velikom sigurnošću može ustvrditi da su izvana zidani kamenom, a iznutra ispunjeni materijalom manje kakvoće. Na nizvodnoj strani mosta, na čeonom zidu blizu upornjaka nalazi se mali kružni otvor kroz koji se može zaviriti u unutrašnjost mosta. Tu se jasno vidi količina materijala ispune mosta od pretežno neobrađenog kamenog materijala. Može se pretpostaviti da se cijela ispuna mosta sastoji od istog ili sličnog materijala.

Donja konzolna ploča je u relativno dobrom stanju koje odgovara uobičajenom vijeku trajanja od 60 godina. Mjestimično postoje dijelovi gdje se uočava blagi stupanj oštećenosti ploče, kao i dijelovi na kojima je došlo do promjene boje uslijed djelovanja atmosferičnosti tijekom godina. Oštećenja su minimalna i ne predstavljaju ozbiljan problem za sigurnost konstrukcije.

Za razliku od donjega, konzolni dio gornje ploče u veoma lošem stanju. Na cijeloj dužini mosta mogu se uočiti

područja na kojima je došlo do odvajanja zaštitnog sloja betona, što je prouzročilo vidljivo korodiranje armature duž cijelog konzolnog dijela gornje ploče. To je vjerojatno posljedica malog zaštitnog sloja predviđenog projektom te neprimjerene izvedbe. Uočljive su i brojne pukotine ploče u poprečnom smjeru. Loše stanje konzolnog dijela gornje ploče dovodi u pitanje sigurnost i stabilnost zaštitnih ograda i pješačke staze na mostu, a predviđa se daljnje pogoršanje stanja i dodatno ubrzanje propadanja tog dijela gornje ploče (slike 4. i 5.).



Slika 4. Izbočenje i promjena boje čeonog zida

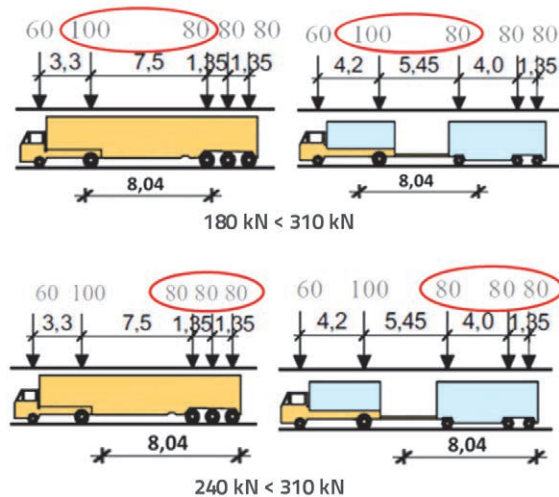


Slika 5. Loše stanje konzola mosta

## 7.2. Ocjenjivanje luka

Ocjenjivanje lučnog zidanog mosta provedeno je trima metodama opisanim u potpoglavlju 4.1., pri čemu su ulazni podaci određeni na temelju dostupne dokumentacije o mostu, geodetskih i geometrijskih mjerenja i procjena o stanju mosta na temelju vizualnog pregleda.

Pippardovom metodom dobiveno je dopušteno osovinsko opterećenje od 187 kN, modificiranom MEXE metodom dopušteno osovinsko opterećenje od 312 kN za jednoosovinsko, od  $156 \times 2 = 312$  kN za dvoosovinsko i  $187 \times 3 = 561$  kN za troosovinsko vozilo, a formulama razvijenim za mostove malih raspona dopušteno osovinsko opterećenje od 177 kN. Maksimalna bruto težina vozila i maksimalno osovinsko opterećenje zaokruženi su na 310 kN odnosno 150 kN [22].



Slika 6. Utjecaj osovinskog razmaka najtežih osovina reprezentativnih vozila tipa 5 (tegljač) i 6 (teretni kamion s prikolicom) pri djelovanju na most raspona manjeg od ukupne duljine vozila

Usporedbom ovih rezultata s reprezentativnim vozilima na hrvatskim cestama [19, 20], sva vozila zadovoljavaju maksimalno dopušteno osovinsko opterećenje, ali tegljači kao tip 5 i kamioni s prikolicom kao tip 6 vozila ne zadovoljavaju ukupnu dopuštenu bruto težinu vozila. Međutim uzme li se u obzir razmak osovina i raspon mosta od 8,4 m, i takvi mostovi zadovoljavaju dopuštenu ukupnu težinu vozila koja ih može direktno opteretiti.

## 7.3. Ocjenjivanje konzole

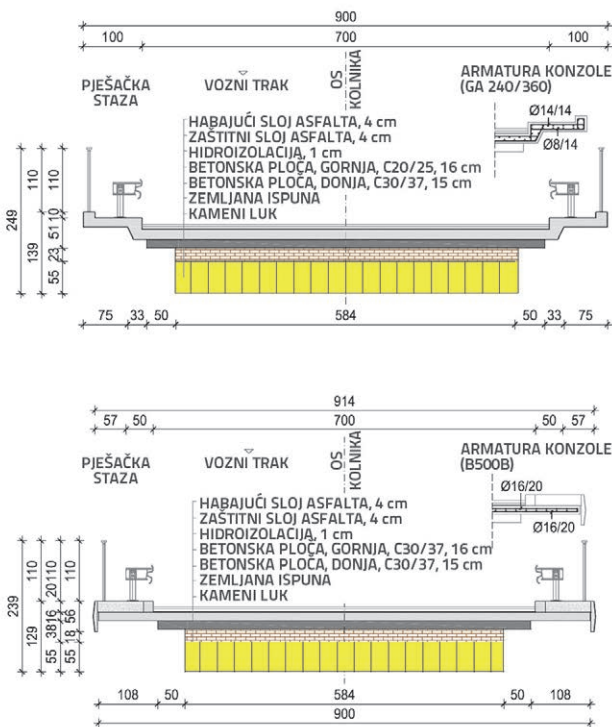
Uslijed vrlo lošega stanja kolničke ploče kojom se most po drugi put proširio, provedeno je dodatno i ocjenjivanje konzole kolničke ploče. Analizirana je izvanredna situacija udara stvarnih vozila mase 10 tona na ogradu tipa H1 i vozila mase 13 tona na ogradu tipa H2.

Na temelju obrnutog postupka [17] za određivanje srednje vrijednosti sile udara za traženu razinu zadržavanja i razinu deformiranja ograde utvrđene su granične brzine vozila [22]. Za vozilo mase 10 tona granična brzina kretanja je 80 km/h, a za vozilo mase 13 tona granična brzina je samo 20 km/h. Učinak vozila veće mase ugrozio bi sigurnost konzole, a time i čitavog mosta. Naime, teža vozila izazvala bi veće djelujuće momente savijanja  $M_{Sd}$  u usporedbi s raspoloživom nosivošću na savijanje  $M_{Rd}$  koja je određena uzimajući u obzir stvarno ugrađenu armaturu u konzolama ploče.

## 7.4. Pregled rezultata i prijedlog sanacije

Konzervativne metode ocjenjivanja zidanog lučnog mosta potvrdile su da je granična masa vozila 31 tona, ali uslijed lošeg stanja betona i raspoložive armature, konzola kolničke ploče ne bi mogla izdržati udar takvog vozila u zaštitnu ogradu.

Stoga se na osnovi ovakvih rezultata ocjenjivanja, predlaže popravak betonske kolničke ploče. Dodatno je postojeća konzola ocijenjena u stalnoj proračunskoj situaciji s novim europskim modelom prometnog opterećenja (jednoosovinsko opterećenje od 120 kN i jednoliko raspodijeljeno pješačko opterećenje od 5 kN/m<sup>2</sup>) te je zaključeno da raspoloživa armatura ne zadovoljava suvremene zahtjeve pouzdanosti. Na temelju normiranih europskih modela prometnog opterećenja i udara stvarnih vozila na zaštitne ograde tipa H1 i H3 predlaže se zamjena konzole i ugradnja nove armature prema slici 7.



Slika 7. Poprečni presjek postojećeg mosta (gore) i prijedlog sanacije kolničke ploče (dolje)

## 8. Zaključak

Nosivost zidanih svođenih mostova treba ocijeniti kako bi se ojačanja provodila samo kada je to za buduću uporabu mosta stvarno i potrebno. Danas je na raspolaganju više metoda, a među njima su i sofisticirani računalni postupci za provjere stabilnosti i nosivosti zidanih lukova. Ovim se postupcima može dobiti velika točnost u ocjenjivanju, ali samo uz vrlo brojne i detaljne ulazne podatke.

U praksi nerijetko nailazimo na primjere da građevinu treba ocijeniti na osnovi vrlo ograničenog broja podataka koji su uz to još rezultat prilično subjektivnih procjena. Stoga će konzervativne metode često biti iznimno važne, poglavito u preliminarnim ocjenama. Naime, iako one često podcjenjuju kapacitet nosivosti luka, mogu dati opće informacije o mostu te biti ishodište za sljedeću razinu ocjenjivanja.

Prije svega treba poznavati mehanizme razaranja i razumjeti uzroke oštećenja zbog kojih dolazi do propadanja te takva oštećenja znati na postojećoj građevini uočiti i odgovarajućim metodama ispitivanja utvrditi kakva su svojstva postojeće konstrukcije uzrokovala. Stoga je u ovome radu dan pregled najčešćih oštećenja i najčešće primjenjivanih metoda ispitivanja zidanih konstrukcija.

Kod zidanih svođenih mostova poput mosta u primjeru, koji je sagrađen prije više od sto godina, vidimo da promjene koje su se na mostu događale uslijed suvremenih prometnih zahtjeva (dvostruko proširenje betonskim kolničkim pločama) mogu dodatno ograničiti njegovu nosivost. Moguće je da dodatni kriteriji kao što je izdržljivost zaštitnih ograda budu presudni u ograničavanju prometa na mostu, odnosno pri donošenju odluka za potrebnim ojačanjima.

U radu je stoga predložena izvorna procedura ocjenjivanja zidanih svođenih mostova manjih raspona koji su tijekom svoje uporabe prilagođavani suvremenim prometnim zahtjevima te je na stvarnom primjeru ocjenjivanje mosta i provedeno. Prije svega potrebno je prikupiti mjerodavne podatke o mostu vizualnim pregledom, geometrijskim i geodetskim mjerenjima te ispitivanjima materijala. Nakon toga slijedi ocjenjivanje svoda dvjema konzervativnim metodama koje mogu biti mjerodavne na manjim rasponima te usporedba dopuštenih osovinskih opterećenja i maksimalnih masa vozila sa zahtjevima stvarnog prometa. Bio luk ocijenjen pozitivno ili ne, u sljedećem koraku treba ocijeniti i kolničku ploču na učinke udara stvarnih vozila u ograde odgovarajuće razine zadržavanja.

Ocjenjivanje luka provodi se modificiranom MEXE metodom za jednoosovinsko, dvoosovinsko i troosovinsko vozilo, te formulama razvijenim za mostove malih raspona, pa je za ocjenjivani most ostvarena maksimalna bruto težina vozila od 310 kN i maksimalno osovinsko opterećenje od 150 kN.

Dodatno je konzola mosta ocijenjena na mogućnost udara vozila u zaštitnu ogradu. Uslijed lošega stanja betonske kolničke ploče za vozilo mase 13 tona, utvrđena je granična brzina kretanja od samo 20 km/h, te je jasno da bi učinak vozila veće mase mogao ugroziti sigurnost mosta. Stoga je zamjena kolničke ploče predložena kao mjera sanacije, pri čemu je novo rješenje potvrđeno proračunom na normirano europsko prometno opterećenje i udare stvarnih vozila na ograde tipa H1 i H3.

## LITERATURA

- [1] Radić, J.: Trajnost konstrukcija 1, Hrvatska sveučilišna naklada, Jadring, Sveučilište u Zagrebu - Građevinski fakultet, Zagreb, 2010.
- [2] Ozaeta García-Catalán, R., Martín-Caro Iamo, J.A.: Catalogue of Damages for Masonry Arch Bridges - Final draft, Improving Assessment, Optimization of Maintenance and Development of Database for Masonry Arch Bridges (UIC project I/03/U/285), Paris, June 2006.
- [3] Orbán, Z.: UIC Project on assessment, inspection and maintenance of masonry arch railway bridges, ARCH'07: 5<sup>th</sup> International Conference on Arch Bridges, pp. 3-12, 2007.
- [4] Orbán, Z., Gutermann, M.: Assessment of masonry arch railway bridges using non-destructive in-situ testing methods, Engineering Structures 31, pp. 2287-2298, 2009.
- [5] Guidelines on non-destructive testing of bridges, BS-103, Government of India, Ministry of railways, August, 2009.
- [6] Audenart, A., Beke, J.: Applicability analysis of 2D-models for masonry arch bridge assessment: Ring, Archie-M and the elasto-plastic model, Wseas transactions on applied and theoretical mechanics, Issue 4, Volume 5, pp. 221-230, 2010.
- [7] Gilbert, M., Melbourne, C.: Rigid-block analysis to masonry arches, Structural Engineering 72, pp. 356-361, 1994.
- [8] Orbán, Z.: Improving Assessment, Optimisation of Maintenance and Development of Database for Masonry Arch Bridges, overview of the Research Project for International Union of Railways (UIC), 2007.
- [9] Kindij, A., Radić, J., Mandić, A.: Masonry arch bridge evaluation, 3rd Chinese-Croatian Joint Colloquium: Sustainable arch bridges, Zagreb, Croatia, pp. 325 - 334, 2011.
- [10] Wang, J., Melbourne, C., Tomor, A.: MEXE method for masonry arch bridge assessment, presentation for the Masonry Arch Bridges Masterclass, University of the West of England, 2010.
- [11] Design manual for roads and bridges. 2001. Volume 3: Highway structures - inspection and maintenance, Section 4: Assessment, BA16/97
- [12] Wang, J., Melbourne, C., Tomor, A.: Development of Pipard's elastic method for the assessment of short span masonry arch bridges, ARCH'10: 6<sup>th</sup> International Conference on Arch Bridges, pp. 490-497, 2010.
- [13] Brencich, A, Gambarotta, L.: Guide to the high level Assessment of Masonry Bridges, prezentacija za UIC Workshop on Masonry Arch Bridges, 9<sup>th</sup> May 2007, Paris, France
- [14] Gilbert, M.: Limit analysis applied to masonry arch bridges: state-of-the-art and recent developments, ARCH'07: 5<sup>th</sup> International Conference on Arch Bridges, pp. 13-28, 2007.
- [15] Limit state: RING Manual, Version 3.0, LimitState Ltd, November 2011.
- [16] Archie-M: Masonry Arch Bridge and Viaduct Assessment Software, Version 2.3.1, User Guide, OBVIS Ltd, United Kingdom 2008.
- [17] Mandić, A., Šavor, Z., Grgić, V.: Zaštitne ograde na mostovima, Građevinar 63 (2011) 12, pp. 1053 - 1160.
- [18] EN 1317-1: Road restraint systems - Part 1: Terminology and general criteria for test methods, European Committee for Standardization, Bruxelles, August 2010.
- [19] Mandić, A., Radić, J., Šavor, Z.: Limit States of Existing Bridges, Proceedings of the Joint IABSE-fib Conference Dubrovnik 2010: Codes in Structural Engineering - Developments and Needs for International Practice, Cavtat, Croatia May 3-5, SECON-CSSE, pp. 1169-1176, 2010.
- [20] Mandić, A., Radić, J., Šavor, Z.: Ocjenjivanje graničnih stanja postojećih mostova, Građevinar 61 (2009) 6, pp. 533 - 545.
- [21] Kindij, A., Radić, J., Mandić, A.: Expert Opinion on Masonry Arch Bridge, 2010.
- [22] Vasilij, M.: Ocjenjivanje zidanih svođenih mostova, diplomski rad. 2011.