

# Postupci ocjenjivanja pouzdanosti postojećih mostova

---

Šavor, Zlatko; Šavor Novak, Marta

Source / Izvornik: **Građevinar, 2015, 67, 557 - 572**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.14256/JCE.1190.2014>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:373624>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



Primljen / Received: 12.12.2014.

Ispravljen / Corrected: 3.6.2015.

Prihvaćen / Accepted: 24.6.2015.

Dostupno online / Available online: 10.7.2015.

# Postupci ocjenjivanja pouzdanosti postojećih mostova

## Autori:



Dr.sc. **Zlatko Šavor**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za konstrukcije  
[savor@grad.hr](mailto:savor@grad.hr)



Dr.sc. **Marta Šavor Novak**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za tehničku mehaniku  
[msavor@grad.hr](mailto:msavor@grad.hr)

Pregledni rad

**Zlatko Šavor, Marta Šavor Novak**

## Postupci ocjenjivanja pouzdanosti postojećih mostova

Budući da su mnogi mostovi u svijetu davno izgrađeni, a iz društvenih i ekonomskih razloga potrebno ih je i dalje upotrebljavati, nužno je provesti ocjenjivanje njihove pouzdanosti. U radu su opisana najnovija istraživanja u svezi s tom danas vrlo aktualnom problematikom. Predložene napredne proračunske metode za ocjenjivanje postojećih mostova u više koraka utemeljene su na probabilističkoj teoriji pouzdanosti, a razmatraju se karakteristična ispitivanja materijala, ocjene stanja i zalihe nosivosti konstrukcijskog sustava i stvarna prometna opterećenja. Dan je pregled inozemnih normi i napravljena njihova usporedba.

### Ključne riječi:

postojeći mostovi, pouzdanost, postupci ocjenjivanja, norme

Subject review

**Zlatko Šavor, Marta Šavor Novak**

## Procedures for Reliability Assessment of Existing Bridges

Many bridges in the world have been built a long time ago and, because of social and economic needs for their continued use, it is necessary to assess their reliability. An overview of recent studies of these now highly topical issues is presented in the paper. Proposed advanced multi-level methods for assessment of existing bridges are based on the probabilistic theory of reliability, and involve typical material testing, assessment of condition and redundancy of structural systems, and study of actual traffic load. A review of foreign codes with their comparison is presented.

### Key words:

existing bridges, reliability, assessment procedures, standards

Übersichtsarbeit

**Zlatko Šavor, Marta Šavor Novak**

## Verfahren zur Beurteilung der Zuverlässigkeit bestehender Brücken

Da weltweit zahlreiche Brücken vor langer Zeit erbaut wurden, aber aus gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Gründen weiterhin benutzt werden, ist die Beurteilung ihrer Zuverlässigkeit notwendig. In dieser Arbeit sind die neusten Untersuchungen zu diesem aktuellen Thema beschrieben. Gegebene fortgeschrittene Berechnungsmethoden zur schrittweisen Beurteilung bestehender Brücken beruhen auf der probabilistischen Zuverlässigkeitstheorie. Verschiedene typische Materialversuche, Beurteilungen des Zustands und der verbleibenden Tragfähigkeit des Tragwerks, sowie die wirkliche Verkehrsbelastung werden betrachtet. Eine Übersicht internationaler Normen ist gegeben und ein Vergleich ist aufgestellt.

### Schlüsselwörter:

bestehende Brücken, Zuverlässigkeit, Beurteilungsverfahren, Normen

## 1. Uvod

Mnogi mostovi u svijetu davno su već izgrađeni, ali iz društvenih i ekonomskih razloga potrebno ih je dalje upotrebljavati, pa je postalo nužno provesti ocjenjivanje njihove pouzdanosti. Ti postojeći mostovi su projektirani i izvedeni u skladu s normama i tehničkim pravilima koja su vrijedila u vrijeme njihove izgradnje i koja ne odgovaraju današnjim bitno strožim zahtjevima. Nazivna prometna opterećenja cestovnih mostova su danas zamjetno veća, a za postojeće željezničke mostove često se traži uvođenje višeg razreda pruge (kategorizacija). Učinci djelovanja tijekom dosadašnjeg uporabnog vijeka, neprikladni detalji, zanemarivanje problema trajnosti i pogreški u izvedbi, te neprikladno održavanje mogu smanjiti "nazivnu" nosivost postojećih mostova. Prednosti su postojećih mostova u odnosu na projekte novih mostova u tome što se geometrijske izmjere, svojstva materijala, neka opterećenja, ponašanje konstrukcije, stupanj dotrajavanja i slično mogu izmjeriti odnosno provjeriti na samom mostu.

Sadašnje norme (eurokodovi) za proračun novih mostova utemeljene su na konzervativnim pretpostavkama u svezi s veličinom djelovanja i njihovim konstrukcijskim odzivom na ta djelovanja. Pri proračunu novog mosta treba provjeriti da je konstrukcija sposobna za određenu namjeravanu uporabu tijekom proračunskog uporabnog vijeka (50 godina za mostove uobičajenih dimenzija ili obične važnosti, odnosno 100 godina za mostove velikih dimenzija ili velike važnosti - HRN EN 1990/NA [1]), što implicira ispunjenje posebnih zahtjeva na trajnost, a osim toga poredbeno razdoblje za proračunska djelovanja vezano je na proračunski uporabni vijek. Takvi se zahtjevi, implicitni ili eksplicitni, ne mogu primijeniti na za postojeće mostove. Iako sadašnje norme za nove konstrukcije omogućuju gradnju sigurnih i ekonomičnih mostova, njihova primjena pri ocjenjivanju postojećih mostova može pokazati da mnoge od tih mostova treba ojačati ili čak zamijeniti. No, izravni troškovi i troškovi investitora za poboljšanje ili zamjenu pojedinog postojećeg mosta općenito su vrlo visoki, a troškovi poboljšanja svih mostova na nekom prometnom pravcu su preveliki. Zbog toga je pri ocjenjivanju postojećih mostova potrebno ponovno razmotriti i po mogućnosti ublažiti proračunske zahtjeve na strani veće sigurnosti, koji su zbog pojednostavnjenja uneseni u eurokodove, što se može postići:

- smanjenjem ciljanih vrijednosti indeksa pouzdanosti za postojeće mostove u usporedbi s novim mostovima
- primjenom naprednih proračunskih postupaka i metoda ocjenjivanja u usporedbi s pojednostavnjenim proračunskim postupcima na strani sigurnosti koji se upotrebljavaju pri proračunu novih mostova
- obnovom (ažuriranjem) modela prometnog opterećenja utemeljenom na specifičnim podacima za određeni most i umanjenim razdobljima uporabe
- prikupljanjem dodatnih podataka o svojstvima materijala mosta i njegovom odzivu na upotrijebljena djelovanja s pomoću monitoringa konstrukcije
- provedbom pokusnih opterećenja za točniju ocjenu nosivosti mosta.

Primjena takvih naprednih probabilističkih postupaka pokazala je da u mnogim slučajevima neki most koji nije zadovoljio uvriježene provjere sigurnosti zapravo može sigurno preuzeti realna uporabna opterećenja, a da nije potrebno njegovo ojačanje ili zamjena [2-4].

Učinkovito i ekonomično održavanje, sanacije, rekonstrukcije ili ako je potrebno zamjene konstrukcija mostova može se ostvariti jedino ocjenjivanjem pouzdanosti postojećih mostova, utemeljenom na detaljnim ispitivanjima. Bitne razlike pri ocjenjivanju postojećih mostova u odnosu na proračun novih mostova jesu veći troškovi ojačanja, složeniji proračun, mogućnost ispitivanja i pregleda te mogućnost smanjenja poredbenog razdoblja (kraći preostali uporabni vijek).

U zadnjih tridesetak godina uloženi su intenzivni istraživački napori u razvijanju novih postupaka za ocjenjivanje, obnovu i upravljanje postojećim mostovima. Objavljene su osnovna norma za probabilističko modeliranje [5], norma ISO-2394 [6] koja daje osnovna načela pouzdanosti konstrukcija, norma ISO-13822 [7] koja daje osnove proračuna pri ocjenjivanju postojećih konstrukcija, kao i RILEM-ovi dokumenti za probabilističko ocjenjivanje postojećih konstrukcija [8]. Relativno nedavno završeni su i europski istraživački projekti, kao npr. BRIME [9], COST345 [10], F08a [11] i SB-LRA [12-14], koji su doveli do razvitka smjernica za sadašnje postupke ocjenjivanja pouzdanosti postojećih mostova. U skladu s Lindovim postulatom [15], tj. da sadašnja praksa (eurokodovi) omogućuje dovoljno sigurne i ekonomične građevine, u svim tim projektima može se utvrditi:

- da se veliki indeksi pouzdanosti upotrebljavaju uvijek kada se pouzdanost može relativno jeftino osigurati
- da pri pojavi krhkog sloma zahtjevi na pouzdanost rastu
- da se zahtjevi pouzdanosti smanjuju gdje je prisutno dotrajavanje ili zamor i tako se slom, ako se dogodi, događa kasnije
- da su zahtjevi pouzdanosti često veći za (važne) detalje [6, 7].

U nekim zemljama, npr. Austriji [16], Kanadi [17], Nizozemskoj [18], nordijskim zemljama [19], Njemačkoj [20, 21], SAD [22], Švicarskoj [23] i Velikoj Britaniji [24], odobrene su nove norme i priručnici koji služe za ocjenjivanje postojećih mostova. Takve norme u Hrvatskoj ne postoje te inženjeri u praksi za ocjenjivanje postojećih mostova najčešće upotrebljavaju današnje norme za nove mostove što dovodi do nepotrebnih i skupih sanacija i rekonstrukcija. Zbog toga je u radu dan prijedlog smjernica za izradu hrvatske norme za ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova, da bi se reguliralo to ekonomski i društveno izuzetno važno područje.

## 2. Postupak ocjenjivanja postojećih mostova u više koraka (razina)

Ocjenjivanje pouzdanosti nekog postojećeg mosta za određivanje nosivosti, ocjenu sposobnosti da preuzme povećana opterećenja ili za produženje uporabnog vijeka

općenito je prilagodljivi proračunski postupak u više koraka (razina), koji omogućuje poboljšanje početne inženjerske procjene o njegovom sadašnjem i budućem stanju i ponašanju [25].

Naknadni proračun se na početnoj prvoj razini provodi upotrebom standardnih postupaka prema trenutačno vrijedećim normama (eurokodovi), kao za nove mostove. Ako most ispunjava početnu razinu ocjenjivanja, nisu potrebni dodatni proračuni ili mjere i most smije ostati u upotrebi, bez daljnjih provjera.

Mostovi koji ne ispunjavaju početne proračunske provjere provjeravaju se postupcima srednjih razina, koji su najčešće i dalje poluprobabilistički, obično s propisanim smanjenim parcijalnim koeficijentima za djelovanja  $\gamma_f$  i uz uzimanje u obzir rezultata detaljnijih pregleda i ispitivanja za dobivanje boljih procjena nosivosti pri proračunu otpornosti. Prednosti su tih postupaka ekonomičan proračun i jednostavna primjena, i u mnogim slučajevima mogu biti dovoljni za potvrdu ili opovrgavanje rezultata početnih razina ocjenjivanja.

Napredni postupci viših razina obuhvaćaju razmatranje sigurnosti na razini osnovnog konstrukcijskog sustava, "paralelnih" konstrukcijskih sustava koji omogućuju zamjenske putove prijenosa sila i kriterija robusnosti, te izravnu upotrebu metoda analize pouzdanosti. Osnovni koncept je taj da razmatrani postojeći most ne mora ispuniti sve zahtjeve normi za proračun novih mostova, ali opća razina pouzdanosti definirana u tim normama mora biti zadržana. Upotrebljava se probabilistička ocjena u kojoj se razmatra konkretan postojeći most. Drugim riječima, definira se "norma" koja se odnosi na razmatrani postojeći most i za modele opterećenja i za modele otpornosti. Pri proračunu su prometna djelovanja utemeljena na stvarnom prometu, a otpornosti su dobivene izravnim razmatranjem rezultata detaljnog ispitivanja mosta (ispitivanje materijala, npr. izmjerena srednja tlačna čvrstoća betona i standardna devijacija) i nije potrebno preračunavanje značajki materijala na proračunske vrijednosti.

U načelu se proračunsko ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova provodi samo za granično stanje nosivosti, a ne i uporabljivosti, jer se to stanje smatra provjerenim odgovarajućim pregledima stanja konstrukcije. No, ako je uporabna funkcija konstrukcije promijenjena, primjerice ako na konstrukciju mosta djeluju veća prometna opterećenja, treba provjeriti i uporabljivost, proračunom utemeljenim na ažuriranim djelovanjima i parametrima uporabljivosti, primjenjujući uobičajeni format provjere (eurokodovi).

### 3. Ocjenjivanje utemeljeno na vjerojatnosti i ciljane razine pouzdanosti

#### 3.1. Općenito

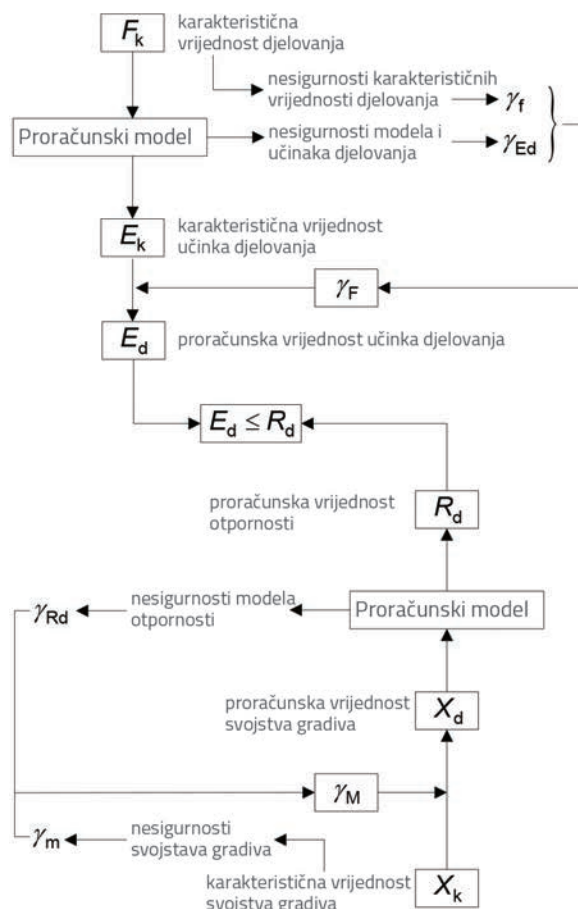
U zemljama članicama EU osnovna norma za proračun novih konstrukcija mostova je Eurokod (HRN EN 1990) [26], utemeljen na konceptu graničnih stanja i upotrebi metode

parcijalnih koeficijenata (MPK). U izradi norme upotrijebljena su probabilistička modelska pravila navedena u [5, 8]. Predložene vrijednosti parcijalnih koeficijenata za djelovanja  $\gamma_f$  i koeficijenata kombinacije  $\psi$  određene su na osnovi dugogodišnje tradicije građenja i kalibracije statističkim vrednovanjem eksperimentalnih podataka i terenskih opažanja primjenom probabilističke teorije pouzdanosti. Opći izraz provjere graničnog stanja nosivosti određen je poznatim izrazom:

$$R_k / \gamma_M \geq \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

Proračunski koncept za granično stanje nosivosti pri linearnoelastičnom proračunu prikazan je na slici 1.

Parcijalni koeficijenti za ocjenjivanje postojećih mostova trebaju se jednako tako kalibrirati upotrijebivši postupke utemeljene na vjerojatnosti, uz MPK format provjere, sličan izrazu (1). Pri tome je, za razliku od proračuna novih mostova, parcijalni koeficijent  $\gamma_R$  kalibriran za različite vrijednosti indeksa pouzdanosti ovisno o razmatranom graničnom stanju uz razmatranje razine duktilnosti i posljedica sloma nekog elementa na konstrukcijski sustav.



Slika 1. Proračunski koncept za granično stanje nosivosti pri linearnoelastičnom proračunu

Iako se pri ocjenjivanju postojećih mostova za kalibraciju parcijalnih koeficijenata upotrebljavaju metode kao pri proračunu novih mostova, parcijalni koeficijenti su manji zbog manjih ciljanih razina pouzdanosti i kraćeg uporabnog vijeka (Kanada [17], Nizozemska [18], nordijske zemlje [19], SAD [22]) ili zbog uklanjanja nesigurnosti u tim koeficijentima uz zadržavanje jednake razine pouzdanosti (Austrija [16], Njemačka [20], Švicarska [23], Velika Britanija [24]). Razlike u razini pouzdanosti mogu se opravdati analizom troškova i koristi. Viša razina pouzdanosti za nove mostove zahtijeva samo veće troškove materijala, dok su ostali troškovi, uključujući projektiranje i izvedbu, gotovo nepromijenjeni. S druge strane, mnoge bi postojeće mostove zbog više razine pouzdanosti trebalo zamijeniti, što bi osim troškova materijala i izvedbe novog mosta uzrokovalo i velike direktne troškove rušenja i uklanjanja, te najčešće veće indirektno troškove zbog remećenja prometa, prometnih gužvi i s time povezanih troškova korisnika, ekonomskih gubitaka i utjecaja na okoliš. Niže razine pouzdanosti i kraći uporabni vijek mogu se opravdati samo ako su uvjetovani redovnim pregledima i održavanjem i ako postoje pozitivna iskustva o ponašanju mostova ocijenjenih upotrebljavajući nižu ciljano razinu pouzdanosti.

### 3.2. Ocjenjivanje utemeljeno na vjerojatnosti

Ako most ne ispunjava uobičajene provjere utemeljene na MPK konceptu, može se upotrijebiti izravna probabilistička metoda kako bi se osiguralo da elementi konstrukcije mosta ispunjavaju propisani kriterij:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \geq \beta_{\text{target}} \quad (2)$$

gdje je  $\beta_{\text{target}}$  ciljni indeks pouzdanosti, koji ovisi o razmatranom graničnom stanju i posljedicama sloma jednog elementa na cijeloj konstrukcijski sustav,  $\Phi^{-1}$  je inverzna funkcija kumulativne normirane normalne raspodjele, a  $P_f$  je vjerojatnost sloma za promatrani oblik sloma unutar primjerenoga poredbenog razdoblja. Ta je vrijednost  $P_f$  određena izrazom:

$$P_f = P(Z = R - S < 0) \quad (3)$$

gdje je  $Z$  funkcija graničnog stanja, a  $R$  i  $S$  su generalizirane otpornosti i učinci djelovanja. Indeks pouzdanosti  $\beta$  može se približno proračunati metodom pouzdanosti prvog reda (FORM) ili Monte Carlo simulacijom.

Prednost upotrebe izravne analize pouzdanosti u usporedbi s upotrebom parcijalnih koeficijenata kalibriranih s pomoću probabilističke teorije pouzdanosti jest u tome da provjere u skladu s normama utemeljenim na parcijalnim koeficijentima ispunjavaju ili nadmašuju ciljane razine pouzdanosti, dok se izravnom analizom pouzdanosti provjerava da li određeni razmatrani most sa svim svojim značajkama i vjerojatnim vrstama sloma ispunjava ciljano razinu pouzdanosti (vjerojatnost sloma).

No, te metode pouzdanosti su približne i rezultati bitno ovise o pretpostavkama u svezi s funkcijama raspodjele otpornosti i djelovanja te o složenosti funkcije razmatranog graničnog stanja. Zato je nakon provedbe ocjenjivanja razine sigurnosti s pomoću usporedbe dobivenih indeksa pouzdanosti s njihovim ciljanim vrijednostima, nužno napraviti i naknadno ocjenjivanje, koje sadrži detaljnu analizu osjetljivosti i usporedbu s rezultatima dobivenim prethodnim ocjenjivanjem.

### 3.3. Ciljane razine pouzdanosti

Odabir ciljanog indeksa pouzdanosti za ocjenjivanje općenito ovisi o posebnostima razmatranog mosta, kao što su uzrok i vrsta sloma, posljedice sloma, troškovi sigurnosnih mjera koje treba poduzeti da se smanji rizik od sloma, i jednako tako o gospodarskim i društvenim uvjetima i uvjetima okoliša. Sve te čimbenike nije moguće jednostavno razmotriti pa se za standardne mostove ciljni indeksi pouzdanosti određuju unaprijed, utemeljeni na iskustvu stručnjaka, na političkim, društvenim i gospodarskim ograničenjima, izvedbenoj praksi i kontrolama kvalitete u nekoj zemlji, na učincima djelovanja okoliša na dotrajavanje mostova i na podacima o ponašanju mostova u prošlosti. Vrste sloma mogu se tako klasificirati kao:

- duktilni slom s rezervom kapaciteta čvrstoće zbog očvršćivanja,
- duktilni slom bez rezerve kapaciteta i
- krhki slom.

U skladu s prije navedenim, konstrukcijski dijelovi kod kojih može do sloma doći bez upozorenja moraju biti proračunani za veću razinu pouzdanosti od onih kod kojih se prije sloma pojavljuje neka vrsta upozorenja koja omogućuje da se poduzmu odgovarajuće mjere za izbjegavanje ozbiljnih posljedica. Primjer takvog pristupa prema zahtjevima u normi nordijskih zemalja naveden je u tablici 1. [19].

Tablica 1. Indeksi pouzdanosti  $\beta$  pridružene vrijednosti vjerojatnosti sloma  $P_f$  za granična stanja nosivosti i jednogodišnje poredbeno razdoblje [19]

| Razred posljedica<br>(Razred pouzdanosti) | Vrsta sloma  |  |                                      |
|---|--|--|--------------------------------------|
|   | Vrsta sloma I<br>Duktilni slom s rezervom kapaciteta | Vrsta sloma II<br>Duktilni slom bez rezerve kapaciteta | Vrsta sloma III<br>Krhki slom        |
| CC1 (RC1)                                 | $\beta \geq 3,09 (P_f \leq 10^{-3})$                 | $\beta \geq 3,71 (P_f \leq 10^{-4})$                   | $\beta \geq 4,26 (P_f \leq 10^{-5})$ |
| CC2 (RC2)                                 | $\beta \geq 3,71 (P_f \leq 10^{-4})$                 | $\beta \geq 4,26 (P_f \leq 10^{-5})$                   | $\beta \geq 4,75 (P_f \leq 10^{-6})$ |
| CC3 (RC3)                                 | $\beta \geq 4,26 (P_f \leq 10^{-5})$                 | $\beta \geq 4,75 (P_f \leq 10^{-6})$                   | $\beta \geq 5,20 (P_f \leq 10^{-7})$ |

Tablica 2. Vrijednosti indeksa pouzdanosti  $\beta$  i pridružene vrijednosti vjerojatnosti sloma  $P_f$  za granična stanja nosivosti, dopunjena tablica B.2 [26]

| Razred pouzdanosti<br>(Razred posljedica) | Najmanje vrijednosti $\beta$            |   |
|---|---|---|
|   | Poredbeno razdoblje 1 godina            | Poredbeno razdoblje 50 godina                   |
| RC1 (CC1)                                 | $\beta \geq 4,2$ ( $P_f \leq 10^{-5}$ ) | $\beta \geq 3,3$ ( $P_f \leq 5 \cdot 10^{-4}$ ) |
| RC2 (CC2)                                 | $\beta \geq 4,7$ ( $P_f \leq 10^{-6}$ ) | $\beta \geq 3,8$ ( $P_f \leq 10^{-4}$ )         |
| RC3 (CC3)                                 | $\beta \geq 5,2$ ( $P_f \leq 10^{-7}$ ) | $\beta \geq 4,3$ ( $P_f \leq 10^{-5}$ )         |

Tablica 3. Ciljani indeks pouzdanosti  $\beta$  i pridružene vjerojatnosti sloma  $P_f$  za granična stanja nosivosti i jednogodišnje poredbeno razdoblje [5]

| Relativni troškovi intervencija<br>(sanacijskih mjera) | Posljedice sloma                        |   |   |
|--|---|---|---|
|  | Male                                    | Srednje (umjerene)                              | Ozbiljne  |
| Veliki   | $\beta = 3,1$ ( $P_f \approx 10^{-3}$ ) | $\beta = 3,3$ ( $P_f \approx 5 \cdot 10^{-4}$ ) | $\beta = 3,7$ ( $P_f \approx 10^{-4}$ )         |
| Uobičajeni (srednji)                                   | $\beta = 3,7$ ( $P_f \approx 10^{-4}$ ) | $\beta = 4,2$ ( $P_f \approx 10^{-5}$ )         | $\beta = 4,4$ ( $P_f \approx 5 \cdot 10^{-5}$ ) |
| Mali   | $\beta = 4,2$ ( $P_f \approx 10^{-5}$ ) | $\beta = 4,4$ ( $P_f \approx 5 \cdot 10^{-5}$ ) | $\beta = 4,7$ ( $P_f \approx 10^{-6}$ )         |

Usporedbom vrijednosti faktora pouzdanosti  $\beta$  iz tablice 1. s vrijednostima iz Eurokoda [26], navedenim u tablici 2., može se potvrditi da su norme za nove konstrukcije konzervativne i da implicitno pokrivaju sve vrste sloma.

Ciljane vrijednosti indeksa pouzdanosti  $\beta$  i pridružene vjerojatnosti sloma  $P_f$  za granično stanje nosivosti i jednogodišnje poredbeno razdoblje u ovisnosti o relativnim troškovima sigurnosnih mjera i posljedica sloma u skladu s JCSS *Probabilistic Model Code* [5], navedene su u tablici 3.

### 3.4. Definiranje zaliha nosivosti i robusnosti konstrukcijskih sustava

Konstrukcije mostova su sustavi međusobno povezanih elemenata pa uobičajeni postupak provjere pouzdanosti kritičnog elementa pomoću linearnoelastične analize ne mora dati ispravnu ocjenu stvarne sigurnosti konstrukcijskog sustava mosta. Samo se nelinearnom analizom koja može pratiti djelomični ili potpuni slom svakog elementa konstrukcije mosta i razmotriti preraspodjelu učinaka djelovanja unutar konstrukcijskog sustava kada neki element dosegne nelinearno područje ili slom, može odrediti razina stvarne postojeće pouzdanosti.

Uobičajeni proračun novih konstrukcija se najčešće provodi na razini elementa, a zbog pojednostavnjenja se ne razmatra zaliha nosivosti konstrukcijskog sustava mosta (engl. *redundancy*). Razlikuju se tri vrste zalihe nosivosti: zaliha nosivosti zbog višestrukih (tri ili više) putova prijenosa sila, konstrukcijska zaliha nosivosti pri statički neodređenim kontinuiranim konstrukcijskim sustavima čime je omogućena preraspodjela sila, i unutarnja zaliha nosivosti gdje neki element mosta sadrži tri ili više elemenata koji su mehanički spojeni tako da se formiraju višestruki nezavisni putovi prijenosa sila. Postojeće mostove čiji konstrukcijski sustavi posjeduju zalihu nosivosti nepravredno se diskreditira ako se ju ne razmotri. "Paralelni" konstrukcijski

sustavi, gdje su pojedini elementi spojeni paralelno u odnosu na njihovu funkciju, posjeduju zalihu nosivosti. Do sloma cijelog sustava dolazi samo kad dođe do sloma više elemenata. Statički neodređeni sustavi su paralelni sustavi ako su elementi dovoljno duktilni. Ako "paralelni" sustav sadrži i idealno krhke elemente, može doći do sloma kao kod "serijskog" sustava. Vjerojatnost sloma takvog sustava može se izračunati s pomoću "sjecišta" graničnih stanja svih elemenata sustava.

"Serijski" konstrukcijski sustavi, gdje su elementi spojeni u seriju u odnosu na njihovu funkciju, nemaju zalihu nosivosti. Slom pojedinog elementa izaziva slom čitavog sustava ("najslabija karika"). Statički određeni sustavi su serijski sustavi. Ako su elementi krhki, konstrukcijski sustav se ruši krhkim slomom, a ako su duktilni, prekomjernim popuštanjem. Vjerojatnost sloma može se izračunati s pomoću "skupnosti" graničnih stanja svih elemenata. Za provjeru pouzdanosti takvih konstrukcijskih sustava dovoljna je naravno linearnoelastična analiza.

Robusnost je, prema definiciji, sposobnost nosivog sustava da neće biti oštećen događanjima kao što su eksplozija, udar i posljedice ljudskih pogrešaka do mjere koja je nerazmjerna izvornom uzroku, odnosno sposobnost da se odupre oštećenju, ali zadrži svoju osnovnu važnu funkciju [1]. Robusnost nužno ne eliminira ili umanjuje poznate rizike, a njena osnovna vrijednost je da umanjuje rizike od nepoznatih uzroka i omogući ograničenje dosega lokalnog sloma za neutvrđena izvanredna djelovanja. Ocjenjivanje konstrukcije mosta u odnosu na robusnost izravno se spominje samo u švicarskoj normi [23]. Zahtijeva se da se ispituju posljedice oštećenja zbog izvanrednih djelovanja ili djelovanja okoliša na nosivost i stabilnost konstrukcije s mogućim rizicima i prikladnim scenarijima sloma.

### 3.5. Stvarna prometna opterećenja na mostu

Vrijednosti prometnih opterećenja mostova u skladu s normom HRN EN 1991-2 [27] predstavljaju najveća očekivana



opterećenja za dugo poredbeno razdoblje (1000 godina za cestovne mostove).

Podaci iz Europe [28, 29] i Sjeverne Amerike [30] upućuju na velika odstupanja u opterećenjima cestovnih mostova, ovisno o gospodarstvu i drugim značajkama pojedine države ili regije. Prometna opterećenja željezničkih mostova definirana su na razini cijele Europe [27] i uključuju i realne vlakove pa je tu razredbu opterećenja lakše provesti [31]. Osim toga, treba razmotriti i da je uporabni vijek nekog postojećeg mosta obično zamjetno kraći nego proračunski uporabni vijek.

Razvidno je dakle da za napredno ocjenjivanje viših razina treba provesti mjerenja stvarnog prometnog opterećenja na mostu jer su u mnogim slučajevima ta opterećenja osnovni izvor nesigurnosti i time mjerodavne varijable za probabilističko ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova.

Stvarno prometno opterećenje na mostovima mjeri se sustavom vaganja vozila u pokretu, tzv. *weigh-in-motion* (WIM) mjerenjima kod cestovnih [32] i željezničkih mostova [33]. Kod čeličnih mostova mjerenja deformacija kritičnih detalja mogu zamijeniti ili dopuniti WIM mjerenja. U Hrvatskoj godišnje publikacije "Brojanje prometa na cestama Republike Hrvatske" [34] sadrže mnoge korisne podatke, uključujući postotak teških vozila na hrvatskim cestama, ali ne i njihovu ukupnu težinu i raspored opterećenja. Samo u podacima za 2002. godinu spominje se da je na nekim lokacijama triju državnih cesta počelo testiranje rada WIM sustava, no rezultati nažalost nisu poznati.

## 4. Pregled normi za ocjenjivanje postojećih mostova

### 4.1. Općenito

Ako u nekoj zemlji ne postoje norme za ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova, inženjeri konstruktori upotrijebit će norme za proračun novih mostova. To može dovesti do krivih odluka i time do neekonomičnog, znatno skupljeg održavanja postojećih mostova, te su mnoge zemlje takve norme i donijele.

Nastavno se navode osnovne značajke odabranih inozemnih normi za ocjenjivanje pouzdanosti, od kojih se kanadska norma [17], američka norma [22], nizozemska norma [18] i njemačka smjernica [20] odnose samo na cestovne mostove, austrijska norma ONR 24008 [16] vrijedi za ocjenjivanje postojećih

cestovnih i željezničkih mostova, a švicarske norme niza SIA 269 [23] obuhvaćaju cijelo područje građevinskih konstrukcija, uključujući cestovne i željezničke mostove.

### 4.2. Norme utemeljene na smanjenim indeksima pouzdanosti

Koncepti za ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova, dani u 2. i 3. poglavlju, najdosljednije su provedeni u kanadskoj normi CAN/CSA-S6-06 [17], američkoj normi MBE [22] i nizozemskoj normi NEN 8700 [18]. Utemeljene su na probabilističkom kriteriju sigurnosti ljudi, ekonomskim aspektima i smanjenom preostalom uporabnom vijeku [35-39]. Najveća dopuštena godišnja vjerojatnost za gubitak ljudskih života usvojena je u skladu s normom ISO 2394 [6].

#### 4.2.1. Kanadska norma CAN/CSA-S6-06

U kanadskoj normi [17] preporučena prilagođena najmanja ciljana vrijednost indeksa pouzdanosti  $\beta$  definirana je izrazom:

$$\beta = 3,75 - (\Delta_c + \Delta_s + \Delta_l + \Delta_r) \geq 2,0 \quad (4)$$

gdje je:

$\Delta_c$  - faktor prilagodbe za ponašanje pojedinog elementa (0,0 za slom bez upozorenja, 0,25 za slom sa slabim upozorenjem ili bez upozorenja, ali sa zadržavanjem kapaciteta nakon sloma, 0,5 za postupni slom s upozorenjem)

$\Delta_s$  - faktor prilagodbe za ponašanje konstrukcijskog sustava (0,0 ako slom jednog elementa dovodi do rušenja, 0,25 ako slom jednog elementa vjerojatno ne dovodi do potpunog rušenja, 0,5 ako slom jednog elementa uzrokuje samo lokalni slom)

$\Delta_l$  - faktor prilagodbe za razinu pregleda (-0,25 ako element nije moguće pregledati, 0,0 ako je redovito pregledavan, 0,25 ako je kritični element pregledao ocjenjivač)

$\Delta_r$  - faktor prilagodbe za kategoriju rizika (0,0 za sve vrste prometa osim kontroliranog teškog tereta, 0,5 za prijelaz kontroliranog teškog tereta).

Postupak ocjenjivanja započinje s identifikacijom najvjerojatnijih oblika sloma i određivanjem odgovarajućih indeksa pouzdanosti

Tablica 4. Maksimalni parcijalni koeficijenti za stalno i prometno opterećenje pri ocjenjivanju [40]

| Opterećenje           | Simbol        | Ciljani indeks pouzdanosti $\beta$ |      |      |      |      |       |      |
|-----------------------|---------------|------------------------------------|------|------|------|------|-------|------|
|                       |               | 2,50                               | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | 3,75* | 4,00 |
| Stalno opterećenje D1 | $\alpha_{D1}$ | 1,05                               | 1,06 | 1,07 | 1,08 | 1,09 | 1,10  | 1,11 |
| Stalno opterećenje D2 | $\alpha_{D2}$ | 1,10                               | 1,12 | 1,14 | 1,16 | 1,18 | 1,20  | 1,22 |
| Stalno opterećenje D3 | $\alpha_{D3}$ | 1,25                               | 1,30 | 1,35 | 1,40 | 1,45 | 1,50  | 1,55 |
| Prometno opterećenje  | $\alpha_L$    | 1,35                               | 1,42 | 1,49 | 1,56 | 1,63 | 1,70  | 1,77 |

D1 - predgotovljeni elementi i beton na mjestu gradnje, osim kolničkih ploča; D2 - kolničke ploče betonirane na mjestu gradnje; D3 - bitumenski zastor pretpostavljene uobičajene debljine 90 mm.  
\*Ciljani indeks pouzdanosti i pripadajući koeficijenti sigurnosti upotrebljavaju se i za proračun novih mostova.

$\beta$ , koji se odnose na svaki pojedini oblik sloma, razmatrajući ponašanje konstrukcijskog elementa, sustava i razinu pregleda (izraz (4)), [40].

Umjesto primjene izravnih provjera pouzdanosti daje se prilagodba parcijalnih koeficijenata sigurnosti, utemeljena na ciljanom indeksu pouzdanosti, navedena u tablici 4. Ocjenjivanje se provodi upotrebljavajući format sličan onom u Eurokodu, ali prilagođen tako da se dobiju parametri ocjene opterećenja, tj. množitelj dominantnog promjenjivog djelovanja  $F$  (potreban da se izazove slom):

$$F = \frac{UR_r - \sum \alpha_D D - \sum \alpha_A A}{\alpha_L L(1+I)} \quad (5)$$

U izrazu (5)  $R_r$  je proračunska otpornost,  $D$  je stalno opterećenje,  $A$  su ostala promjenjiva djelovanja,  $L$  je dominantno promjenjivo djelovanje (npr. prometno opterećenje),  $I$  je dinamički faktor,  $U$  je faktor prilagodbe otpornosti, a  $\alpha_D$ ,  $\alpha_A$  i  $\alpha_L$  su pridruženi parcijalni koeficijenti za navedena djelovanja.

Faktor prilagodbe proračunske otpornosti  $U$  dan je u normi [17] za različite konstrukcijske elemente i granična stanja, razmatrajući varijaciju između stvarne otpornosti elementa dobivene ispitivanjima i otpornosti proračunane pojednostavnjenim metodama u normi. Proračunska otpornost  $R_r$  izračunava se upotrebom nazivnih vrijednosti parametara čvrstoće materijala, preuzetih s crteža ili povijesnih podataka, pomnoženih s koeficijentima otpornosti materijala, kao što se upotrebljavaju pri proračunu novih mostova, danih u tablici 5.

Tablica 5. Usvojeni koeficijenti otpornosti materijala pri ocjenjivanju pouzdanosti [40]

| Materijal i kritični oblik sloma                | Koeficijent otpornosti materijala |
|---|-----------------------------------|
| Beton   | $\Phi_c = 0,75$ (1/1,33)          |
| Čelik za armiranje                              | $\Phi_s = 0,90$ (1/1,11)          |
| Čelik za prednapinjanje                         | $\Phi_p = 0,95$ (1/1,05)          |
| Konstrukcijski čelik (savijanje, posmik i vlak) | $\Phi_s = 0,95$ (1/1,05)          |
| Konstrukcijski čelik (tlak i torzija)           | $\Phi_s = 0,90$ (1/1,11)          |

#### 4.2.2. Američka norma MBE

U američkoj normi MBE [22] upotrebljavaju se slična, na pouzdanosti utemeljena, načela ocjenjivanja pouzdanosti i postupak ocjenjivanja opterećenja kao u kanadskoj normi CAN/CSA-S6-06 [17]. Norma je utemeljena na velikom broju istraživanja i prikupljanja podataka o opterećenjima i otpornostima postojećih mostova. Pouzdanost je određena s pomoću Monte Carlo simulacija utemeljenih na bazi podataka o 145 tipičnih američkih mostova [41]. Za svaki razmatrani most napravljeno je milijun Monte Carlo simulacija [42]. Dobiveni indeksi pouzdanosti nezavisni su od metodologije ocjenjivanja jer predstavljaju stvarnu svojstvenu pouzdanost. Ocjenjivanje opterećenja temelji se na smanjenim parcijalnim

koeficijentima i skupu "dopuštenih" teških vozila koja su manje mase od onih koja se upotrebljavaju pri proračunu novih mostova. Rezultati ocjenjivanja odražavaju nosivost mosta za prometno opterećenje u njegovom sadašnjem stanju pa je nužno prethodno napraviti detaljni pregled mosta [43]. Postupak ocjenjivanja se mora napraviti za sve nove mostove, obnovljene ili sanirane mostove i postojeće mostove, a rezultate spremi u osobnu iskaznicu razmatranog mosta u banci podataka. Ocjenjivanje treba ponoviti uvijek ako je došlo do bilo kakvih promjena stanja konstrukcije, kao što su oštećenja ili propadanje, promjena vlastite težine zbog obnavljanja zastora, promjena prometnih uvjeta, promjena propisa i sl.

Pri ocjenjivanju se upotrebljavaju dvije razine pouzdanosti, ovisno o uporabnom vijeku. Pri početnom ocjenjivanju upotrebljava se ciljani indeks pouzdanosti  $\beta_{\text{target}} = 3,5$  kao pri proračunu novih mostova za proračunski uporabni vijek od 75 godina, a pri višim razinama ocjenjivanja ciljani indeks pouzdanosti  $\beta_{\text{target}} = 2,5$  za petogodišnji uporabni vijek [43] što odgovara istovjetnom vremenskom intervalu u kojem se moraju napraviti detaljni pregledi i ocjenjivanje američkih mostova.

Umjesto uobičajene provjere graničnog stanja nosivosti dane izrazom (1), određuje se faktor ocjene  $RF$  koji odgovara množitelju prometnog djelovanja  $F$  u izrazu (5). Ako je  $RF$  manji od 1,0, provjera nije ispunjena. Faktor ocjene  $RF$  dan je izrazom:

$$RF = \frac{\Phi_c \Phi_s \Phi R_n - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_p)(P)}{(\gamma_{LL})(LL + IM)} \quad (6)$$

gdje su  $R_n$  proračunska nazivna otpornost,  $DC$  učinak stalne težine konstrukcijskih dijelova i spojeva,  $DW$  učinak stalne težine zastora i opreme mosta,  $P$  učinak ostalih stalnih djelovanja (sekundarni učinci zbog prednapinjanja pri kontinuiranim konstrukcijama, zaostala naprezanja zbog postupka izvedbe),  $LL$  učinak prometnog opterećenja,  $IM$  dodatak za dinamički učinak,  $\gamma_{DC}$ ,  $\gamma_{DW}$ ,  $\gamma_p$  i  $\gamma_{LL}$  parcijalni koeficijenti za odnosna djelovanja u skladu s normom [44],  $\Phi_c$  faktor stanja,  $\Phi_s$  faktor konstrukcijskog sustava, a  $\Phi$  faktor otpornosti u skladu s normom [44].

Stvarno stanje mosta u trenutku ocjenjivanja procijenjeno temeljem izvršenih pregleda mosta i sadržano u nacionalnoj bazi podataka National Bridge Inventory (NBI) uzima se u obzir s pomoću faktora stanja  $\Phi_c$ . Ocjenjivanje stanja mosta provodi ovlaštenu inspektor i svakom elementu mosta pridružuje vrijednost 0 - 9. Treba naglasiti da ocjenjivanje stanja mosta samo upozorava na propadanje ili oštećenje pojedinih konstrukcijskih elemenata mosta, ali ne može izravno dati nosivost mosta. Faktor stanja  $\Phi_c$  za dobro ili zadovoljavajuće stanje konstrukcije (ocjena 6 ili više) iznosi 1,0, pri ocjeni 5 iznosi 0,95, a za slabo stanje konstrukcije (ocjena 4 ili niže) 0,85.

Faktor konstrukcijskog sustava  $\Phi_s$  odnosi se na razinu zalihe nosivosti cjelovitog rasponskog sklopa i ima raspon vrijednosti 0,85 - 1,0. Veće razine pouzdanosti zahtijevaju se za elemente



konstrukcijskih sustava bez zalihe nosivosti u odnosu na slične konstrukcijske sustave sa zalihom nosivosti. Cilj je ostvarenje ujednačene razine pouzdanosti konstrukcijskog sustava, a ne ujednačene razine pouzdanosti pojedinih elemenata. Faktor  $\Phi_s$  općenito ovisi o broju plastičnih zglobova koji konstrukciju pretvaraju u mehanizam. Za čelične mostove  $\Phi_s$  ovisi o broju glavnih nosača, njihovom razmaku i o tome jesu li zavareni ili spojeni zakovicama, a za prednapete betonske mostove čak i o broju natega u jednom hrptu. Za provjeru posmika vrijednost  $\Phi_s$  iznosi 1,0.

Faktor stanja  $\Phi_c$  i faktor sustava  $\Phi_s$  upotrebljavaju se samo pri provjeri graničnog stanja nosivosti, a umnožak  $\Phi_c \Phi_s$  treba biti jednak ili veći od 0,85. Gdje je taj umnožak veći od 0,85, indeks pouzdanosti  $\beta$  je veći od 2,5.

Ocjena pouzdanosti provodi se u četiri razine. Na početnoj prvoj razini upotrebljava se nazivno prometno opterećenje s parcijalnim koeficijentom  $\gamma_{LL} = 1,75$  uz indeks pouzdanosti  $\beta = 3,5$ . Pri proračunu druge razine upotrebljava se uporabno prometno opterećenje, koje je jednako nazivnom, ali s indeksom pouzdanosti  $\beta = 2,5$ , što daje parcijalni koeficijent  $\gamma_{LL} = 1,35$ . Pri proračunu treće razine uz indeks pouzdanosti  $\beta = 2,5$  upotrebljavaju se "dopuštena" specifikirana teška vozila, a parcijalni koeficijent  $\gamma_{LL}$  ovisi o prosječnom dnevnom prometu tih vozila. Ako je taj promet nepoznat ili nadmašuje 5000 vozila za uobičajena komercijalna vozila, parcijalni koeficijent iznosi  $\gamma_{LL} = 1,80$ , a za posebna vučna vozila  $\gamma_{LL} = 1,60$ . Ako prosječni dnevni promet teških vozila iznosi  $< 100$ , za uobičajena komercijalna vozila parcijalni koeficijent iznosi  $\gamma_{LL} = 1,40$ , a za posebna vučna vozila  $\gamma_{LL} = 1,15$ . Posebno se razmatraju izvanredna vozila za koja je potrebno ishoditi dopuštenje za prometovanje. Proračun svake sljedeće razine nije potrebno napraviti ako je  $RF$  za razmatranu nižu razinu veći od 1,0. Ako je faktor ocjene  $RF$  manji od 1,0, i pri proračunu treće razine smiju se upotrijebiti

napredne analitičke metode i druge procjene, koje nisu posebno specificirane.

#### 4.2.3. Nizozemska norma NEN 8700

U nizozemskoj normi [18] indeks pouzdanosti za ocjenjivanje postojećih mostova smije se smanjiti do najviše  $\beta_u = \beta_{new} - \Delta\beta_u$ , ispod koje razine su postojeći mostovi neprikladni za upotrebu (engl. *unfit for use*) i trebaju se odmah poduzeti hitne mjere, a temeljem grube ekonomske optimizacije postojećih konstrukcija je usvojeno  $\Delta\beta_u = 1,5$ .

Dodatno je uvedena još jedna razina pouzdanosti  $\beta_{repair}$ , za koju vrijedi  $\beta_u < \beta_{repair} < \beta_{new}$ . U pravilu, postojeće konstrukcije bez bitnih nedostataka mogu ispuniti tu smanjenu razinu pouzdanosti. Na taj je način spriječeno da sve konstrukcije, koje su prema prijašnjim normama bile sigurne i koje su se dokazale u praksi, odjednom moraju biti ojačane ili zamijenjene. Kao ciljana vrijednost predloženo je  $\beta_{repair} = \beta_{new} - \Delta\beta_{repair}$ , gdje je  $\Delta\beta_{repair} = 0,5$ . Razmatranjem maksimalne godišnje vjerojatnosti sloma dobiveni su indeksi pouzdanosti  $\beta$  za nove i postojeće građevine u ovisnosti o razredu posljedica (tablica 6.) [37, 39].

Naknadni proračun kojim se provodi ocjenjivanje postojećih cestovnih mostova prema [18] ima četiri razine (koraka) [39].

Proračun prve razine utemeljen je na prilagođenim parcijalnim koeficijentima koji se za definirana poredbena razdoblja mogu izvesti na temelju vrijednosti  $\beta$ . U [37] su tako primjenom probabilističkih metoda izvedeni parcijalni koeficijenti za stalno i prometno opterećenje, upotrebljavajući funkcije raspodjele za prometno opterećenje dobiveno vaganjem vozila u pokretu (WIM) na reprezentativnoj nizozemskoj autocesti za preostali uporabni vijek od 15 godina (tablica 7.) [37, 38].

U proračunu druge razine dodatno se razmatra stvarna upotreba mosta koja se može razlikovati od projektirane. Za proračun

Tablica 6. Indeksi pouzdanosti  $\beta$  za nove i postojeće mostove [37]

| Razred posljedica | Poredbeno razdoblje (broj godina) | Novo (eng. <i>new</i> ) | Popravak ( <i>repair</i> ) | Neprikladni za upotrebu (eng. <i>unfit for use</i> ) |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------|--|
|                   |                                   | $\beta_{new}$           | $\beta_{repair}$           | $\beta_u$  |
| CC1               | 15                                | 3,3                     | 2,8                        | 1,8  |
| CC2               | 15                                | 3,8                     | 3,3                        | 2,5*   |
| CC3               | 15                                | 4,3                     | 3,8                        | 3,3*   |

\* mjerodavna je maksimalna godišnja vjerojatnost sloma (sigurnost ljudi)

Tablica 7. Prilagođeni parcijalni koeficijenti za mostove za stalno i prometno opterećenje u ovisnosti o razredu posljedica (veliki udjel stalne težine) [37]

| Razredba                | Poredbeno razdoblje (broj godina) | Parcijalni koeficijenti   |            |                           |            |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|
|                         |                                   | Razred posljedica 2 (CC2) |            | Razred posljedica 3 (CC3) |            |
|                         |                                   | $\gamma_G$                | $\gamma_Q$ | $\gamma_G$                | $\gamma_Q$ |
| Novo                    | 100                               | 1,30                      | 1,35       | 1,40                      | 1,50       |
| Popravak                | 15                                | 1,25                      | 1,20       | 1,30                      | 1,30       |
| Neprikladni za upotrebu | 15                                | 1,10                      | 1,10       | 1,25                      | 1,25       |

treće razine potrebna su mjerenja prometa jer treba razmotriti stvarni promet na mostu. Proračun četvrte razine utemeljen je na potpunom probablističkom pristupu.

### 4.3. Norme utemeljene na zadržanim indeksima pouzdanosti

U austrijskoj normi ONR 24008 [16], švicarskim normama niza SIA 269 [23] i njemačkoj smjernici [20] ocjenjivanje pouzdanosti mostova početne prve razine provodi se upotrebom standardnih postupaka prema normama koje vrijede za nove mostove.

Mostovi koji ne ispunjavaju početne proračunske provjere provjeravaju se poluprobablističkim postupkom druge razine, uz upotrebu smanjenih parcijalnih koeficijenata za stalno djelovanje  $\gamma_c = 1,20$  i težinama određenim iz stvarnih izmjera mosta, uz razmatranje rezultata detaljnijih pregleda i ispitivanja za ažuriranje poprečnih presjeka i svojstava materijala. Parcijalni koeficijenti za promjenjiva djelovanja  $\gamma_q$  i koeficijenti kombinacije  $\psi$  zadržavaju se jednaki kao pri proračunu novih mostova (osim u njemačkoj smjernici [20]). Prometno opterećenje cestovnih mostova u njemačkoj normi [45] i švicarskoj normi [46] nema opterećenja dvostrukom osovinom  $TS$  u trećem voznom traku, ali je zato upotrijebljen parcijalni koeficijent  $\gamma_q = 1,5$ .

Naknadni proračuni viših razina su probablistički, no pojednosti o upotrijebljenoj razini pouzdanosti dane su samo u švicarskoj normi, kao što je navedeno u daljnjem tekstu.

#### 4.3.1. Austrijska norma ONR 24008

U austrijskoj normi [16] naknadni proračun treće razine ima cilj utvrditi optimalni odnos između troškova i pouzdanosti konkretnog postojećeg mosta i smanjiti troškove za održavanje

i obnovu. Osnovni koncept je taj da razmatrani postojeći most ne mora ispuniti sve zahtjeve trenutačno vrijedećih normi za proračun novih mostova, ali opća razina pouzdanosti definirana u tim normama mora biti zadržana. Upotrebljava se probablistička ocjena u kojoj se razmatra konkretan postojeći most.

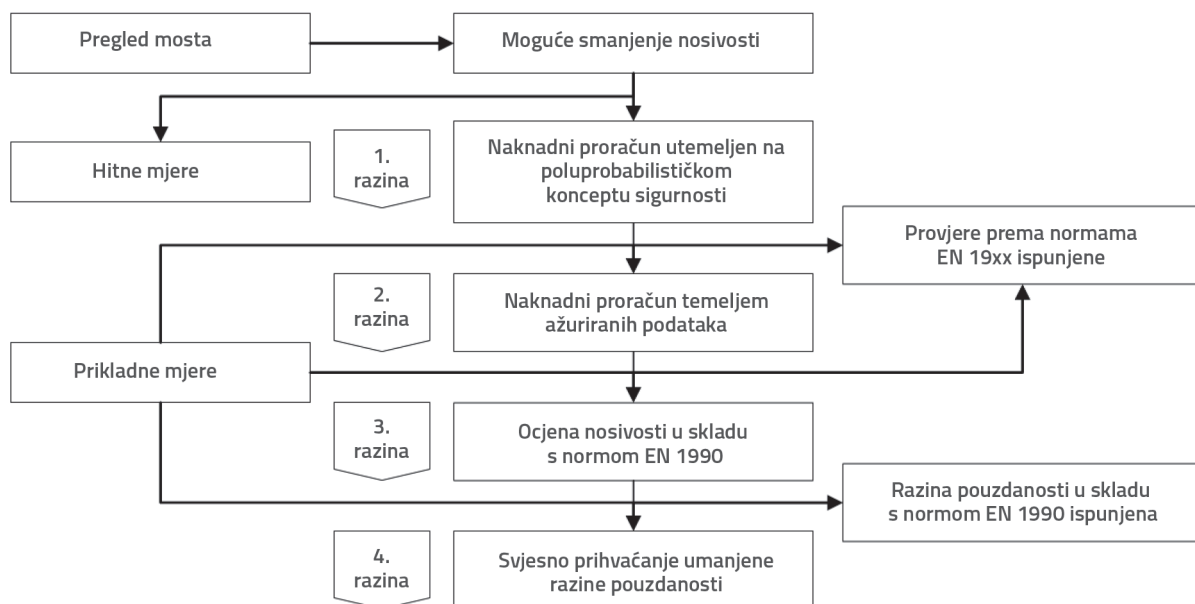
U naknadnom proračunu najviše četvrte razine svjesno se prihvaća smanjena razina pouzdanosti, utemeljena na detaljnim objašnjenjima i odgovarajućim zamjenskim mjerama.

Opći tijek ocjenjivanja pouzdanosti postojećih mostova prikazan je na slici 2.

#### 4.3.2. Švicarska norma SIA 269

Švicarske norme za ocjenjivanje postojećih građevina niza 269 [23] imaju strukturu kao eurokodovi. Osnovna norma opisuju osnovna načela i postupke za razmatranje postojećih građevina. Dopunjena je nizom normi u kojima se razmatraju specifične pojedinosti. Norma SIA 269/1 sadrži ažurirane (obnovljene) modele djelovanja i učinaka djelovanja, a norme SIA 269/2 do SIA 269/6 (SIA 269/2 armirani beton, SIA 269/3 čelik, SIA 269/4 spregnute konstrukcije, SIA 269/5 drvo i SIA 269/6 zidane konstrukcije) daju podatke za ažuriranje materijala, konstrukcijskih parametara i modela, koji vrijede za razne vrste konstrukcija, poglavito u svezi s materijalom i konstrukcijskim sustavima koji su se nekad upotrebljavali. Norma SIA 269/7 pokriva geotehničke aspekte specifične za postojeće građevine, a norma SIA 269/8 (zasad je izdana samo prednorma) odnosi se na seizmičko inženjerstvo postojećih građevina.

Pri ocjenjivanju ili planiranju mjera održavanja treba odrediti preostali uporabni vijek i uporabne uvjete. Ocjena stanja postojećeg mosta od osnovne je važnosti za identifikaciju sadašnjih i mogućih nedostataka. Procjena preostalog

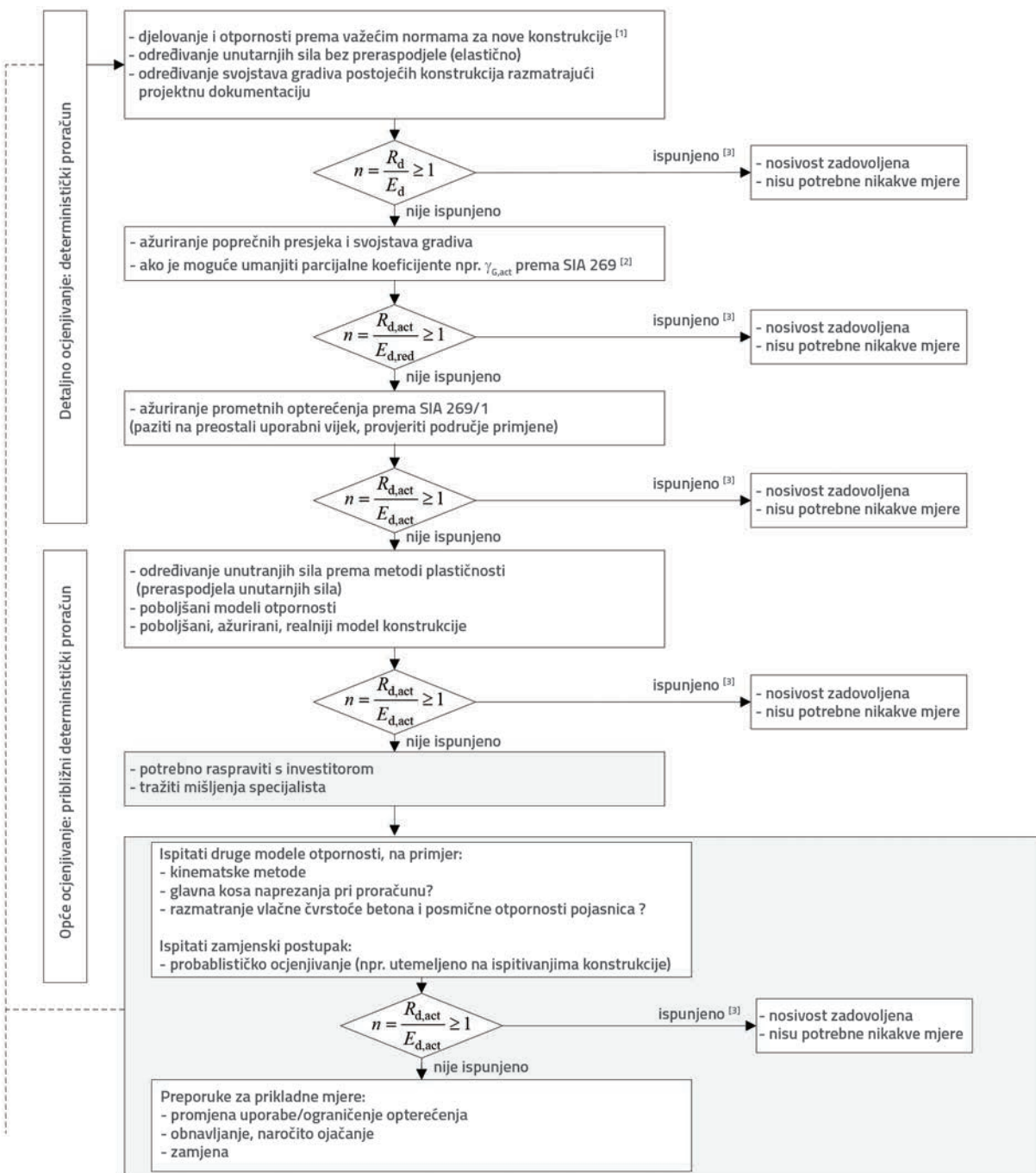


Slika 2. Opći tijek proračuna ocjenjivanja prema normi ONR 24008 [47]

uporabnog vijeka, utemeljena na stanju mosta, služi za planiranje mjera za poboljšanje trajnosti, koje se mogu postići popravcima ili usporavanjem procesa propadanja. Pri tome je važno razlikovati konstrukcijske nedostatke i pitanja trajnosti jer vremenski okvir za sanacijske mjere može biti produžen. Propadanje mostova je uglavnom uzrokovano vodom i kloridima, pa je najvažnije ispitati stanje hidroizolacije i razinu

prodiranja klorida. Za procjenu konstrukcije od presudne su važnosti sadašnja svojstva materijala, pa osim vizualnih pregleda treba provesti odgovarajuća laboratorijska ispitivanja kako bi se ispravno moglo ocijeniti stanje i procijeniti procese daljnjeg propadanja.

Sigurnost konstrukcije smatra se odgovarajućom ako je proračunom provjerena zahtijevana razina pouzdanosti konstrukcije ili ako



<sup>[1]</sup> razmatrajući važeće norme i pravilnike

<sup>[2]</sup> u skladu sa SIA 269 parcijalni koeficijent  $\gamma_{G,act} = 1,20$  umjesto  $\gamma_G = 1,35$  uz uvjet da su stalna djelovanja ažurirana u skladu sa SIA 269/1

<sup>[3]</sup> izvanredna djelovanja (udar, potres) razmotriti sa smanjenim vrijednostima u skladu s normom

Slika 3. Tijek postupka ocjenjivanja prema SIA 269 [48]

se mogućnost sloma konstrukcije drži pod nadzorom pomoću dodatnih ili hitnih sigurnosnih mjera. Dodatne sigurnosne mjere jesu ograničenje upotrebe i preostalog uporabnog vijeka, ograničenje prometnih opterećenja, pojačani pregledi konstrukcije i sl. Hitne sigurnosne mjere jesu ograničenje upotrebe, podupiranje konstrukcije, pojačani nadzor, zatvaranje mosta za promet, evakuacija ugroženih ljudi i sl.

Opći tijek ocjenjivanja pouzdanosti postojećih mostova prikazan je na slici 3. [48]. Indeks "act" odnosi se na ažurirane podatke. Provjera prikladnosti sigurnosnih mjera pri održavanju definirana je s pomoću učinkovitosti mjera, koja se ocjenjuje s koeficijentom  $EF_M$ , definiranim izrazom:

$$EF_M = \frac{\Delta R_M}{SC_M} \quad (7)$$

gdje je  $\Delta R_M$  smanjenje rizika zbog mjera održavanja, a  $SC_M$  su troškovi ispunjenja zahtjeva sigurnosti. Sigurnosna mjera pri održavanju je prikladna ako je  $EF_M \geq 1,0$ , a obično neprikladna ako je  $EF_M < 1,0$ . Posljedice sloma su izražene kao odnos  $\rho$  izravnih troškova  $C_f$  u slučaju sloma prema troškovima  $C_w$ , koji su potrebni da bi se građevina obnovila nakon sloma  $\rho = C_f / C_w$ . Ciljana vrijednost o tome ovisnog indeksa pouzdanosti  $\beta_0$  dana je u tablici 8. za jednogodišnje poredbeno razdoblje. Vrijednosti  $\beta_0$  jednake su kao one u tablici 3.

Norma SIA 269/1 regulira ažuriranje reprezentativnih vrijednosti djelovanja. U tablici 9. prikazane su vrijednosti faktora prilagodbe prometnog opterećenja na cestovnim mostovima, ovisne o vrsti, rasponu i poprečnom presjeku, koje se upotrebljavaju za mostove s dvosmjernim prometom širine 6-9 m i za dvotračne mostove na autocestama širine 9-12 m.

Ažurirani modeli prometa za željezničke mostove u normi SIA 269/1 preuzeti su iz europske norme EN 15528 [31] u skladu s kategorizacijom europskih željezničkih pruga.

Ako se naknadnim proračunima svih razina ne može dobiti dovoljna razina pouzdanosti, može se provesti tzv. empirijska analiza. Pri toj analizi smije se očekivati dovoljna razina pouzdanosti ako su ispunjeni svi sljedeći uvjeti:

- detaljnim pregledima nisu utvrđena oštećenja i nedostaci koji smanjuju nosivost,
- konstrukcija se tijekom duljeg razdoblja upotrebe zadovoljavajuće ponašala,
- postoje slična iskustva s ponašanjem usporedivih konstrukcija,
- nisu predviđene promjene upotrebe u preostalom uporabnom vijeku i
- rizik sloma konstrukcije i njegove posljedice su prihvatljivi.

Ako je očekivana dovoljna razina pouzdanosti utemeljena na empirijskoj analizi, treba provesti dodatne sigurnosne mjere.

### 4.3.3. Njemačka smjernica

Uz njemačku smjernicu za ocjenjivanje postojećih cestovnih mostova [23] njemački je Savezni zavod za cestogradnju BAST izdao i više pratećih dokumenata, B 83 [49] koji objašnjava koncepciju naknadnog proračuna, B 89 [50] koji daje podatke o naknadnom proračunu betonskih mostova za ocjenjivanje nosivosti postojećih građevina i B 82 [51] koji pojašnjava modele prometa za naknadni proračun postojećih cestovnih mostova. Detaljno objašnjenje svih odredbi smjernice navedeno je i u [52]. Za provjere graničnih stanja nosivosti druge i treće razine određeni su parcijalni koeficijenti  $\gamma_{G,set} = 1,0$  za djelovanja od popuštanja oslonaca,  $\gamma_G = 1,35$  i  $\psi_G = 0,8$  za djelovanje promjene temperature i  $\gamma_{G,cs} = 1,0$  za djelovanje skupljanja betona. Pri tome se sile prisile dobivene linearno elastičnim proračunom od djelovanja promjene temperature i popuštanja oslonaca smiju

Tablica 8. Ciljane vrijednosti indeksa pouzdanosti  $\beta_0$  za jednogodišnje poredbeno razdoblje [23]

| Učinkovitost mjera $EF_M$         | Posljedice sloma                      |   |   |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---|---|
|                                   | Male<br>$\rho < 2$                    | Srednje (umjerene)<br>$2 < \rho < 5$          | Ozbiljne<br>$5 < \rho < 10$                   |
| Mala: $EF_M < 0,5$                | $\beta_0 = 3,1 (P_f \approx 10^{-3})$ | $\beta_0 = 3,3 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-4})$ | $\beta_0 = 3,7 (P_f \approx 10^{-4})$         |
| Srednja: $0,5 \leq EF_M \leq 2,0$ | $\beta_0 = 3,7 (P_f \approx 10^{-4})$ | $\beta_0 = 4,2 (P_f \approx 10^{-5})$         | $\beta_0 = 4,4 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-5})$ |
| Velika: $EF_M > 2,0$              | $\beta_0 = 4,2 (P_f \approx 10^{-5})$ | $\beta_0 = 4,4 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-5})$ | $\beta_0 = 4,7 (P_f \approx 10^{-5})$         |

Tablica 9. Faktori prilagodbe za opterećenje LM1 cestovnih mostova [23]

| Vrsta konstrukcije mosta                         | Raspon [m]   | $\alpha_{q1,act}$ | $\alpha_{q2,act}$ | $\alpha_{q1,act} \alpha_{q1,act}$ |
|--|--------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Grede  | sanduk       | 0,70              | 0,50              | 0,50                              |
|  | dva hrpta    |                   |                   |                                   |
|  | više hrptova |                   |                   |                                   |
| Ploče  | ploče        | 10 – 30           |                   |                                   |
| Pločasti mostovi i ostale vrste mostova<br>< 5,3 |              | 5,3 – 10          | 0,60              | 0,40                              |
|  |              | < 5,3             | 0,50              | 0,40                              |

Tablica 10. Usporedba indeksa pouzdanosti, poredbenih razdoblja i parcijalnih koeficijenata za djelovanja prema razmatranim normama pri proračunima novih i postojećih cestovnih mostova za granično stanje nosivosti

| Norma                         | Indeks pouzdanosti $\beta$ |                  | Proračunski uporabni vijek (godina) |                | Parcijalni koeficijenti sigurnosti za djelovanja $\gamma$ |                   |                     |                   |
|-------------------------------|----------------------------|------------------|-------------------------------------|----------------|---|-------------------|---------------------|-------------------|
|                               | novi                       | postojeći        | novi                                | postojeći      | Stalno $\gamma_{G1} (\gamma_{G2})$                        |                   | Prometno $\gamma_Q$ |                   |
|                               |                            |                  |                                     |                | novi  | postojeći         | novi                | postojeći         |
| CAN/CSA-S6-06 [17]            | 3,75                       | 2,50             | 100                                 | 5              | 1,20 (1,50)   | 1,10 (1,25)       | 1,70                | 1,35              |
| MBE [22]                      | 3,50                       | 2,50             | 75                                  | 5              | 1,25 (1,50)   | 1,25 (1,50)       | 1,75                | 1,35              |
| NEN 8700 [18]                 | 4,3 <sup>a</sup>           | 3,3 <sup>b</sup> | 100                                 | 15             | 1,40  | 1,25 <sup>b</sup> | 1,50                | 1,25 <sup>b</sup> |
| ONR 24008 [16]                | 4,3 <sup>a</sup>           | 4,3 <sup>a</sup> | 100                                 | – <sup>c</sup> | 1,35  | 1,20              | 1,35                | 1,35              |
| SIA 269 [23]                  | 4,3 <sup>a</sup>           | 4,3 <sup>a</sup> | 100                                 | – <sup>c</sup> | 1,35  | 1,20              | 1,50                | 1,50              |
| Nachrechnungs Richtlinie [20] | 4,3 <sup>a</sup>           | 4,3 <sup>a</sup> | 100                                 | – <sup>c</sup> | 1,35  | 1,20 <sup>d</sup> | 1,50                | 1,50              |

<sup>a</sup> za razred posljedica CC3 i poredbeno razdoblje 50 godina  
<sup>b</sup> za mostove neprikladne za upotrebu  
<sup>c</sup> nije dano  
<sup>d</sup> samo za konstrukcijski beton; za konstrukcijski čelik i ostala djelovanja  $\gamma_G = 1,35$

umanjiti na 40 % ako se ne provodi točniji proračun. Parcijalni koeficijent za stalna djelovanja na čelične mostove nije umanjen ( $\gamma_G = 1,35$ ), a kod spregnutih mostova za djelovanje stalne težine čeličnih dijelova iznosi  $\gamma_G = 1,35$ , a za djelovanje stalne težine betonske ploče  $\gamma_G = 1,20$ .

Naknadnim proračunom treće razine razmatraju se rezultati mjerenja dobiveni provođenjem pokusnog opterećenja u području uporabnih opterećenja i odnose se na deformiranja konstrukcije na kritičnim mjestima i mjerenje deformacija na odabranim konstrukcijskim dijelovima. Tim mjerenjima obuhvaća se stvarno ponašanje konstrukcije pri uporabnom opterećenju i dobivaju upute za realniji opis ponašanja konstrukcije. No taj proračun smije služiti samo za kalibraciju upotrijebljenih proračunskih modela, ali se zbog složenosti proračuna i naročito utroška rada smije upotrijebiti samo u posebnim slučajevima i u dogovoru s nadležnim vlastima.

Naknadni proračun najviše četvrte razine obuhvaća znanstvene metode za provjeru dovoljne nosivosti konstrukcije, primjerice posebne geometrijski i materijalno nelinearne postupke. Provjera dovoljne nosivosti može se, ako uredba, provesti i izravnim utvrđivanjem proračunske vjerojatnosti sloma s pomoću probablističkih metoda. Smije se kombinirati s drugom i trećem razinom, no upotrebljava se samo u posebnim slučajevima i u dogovoru s nadležnim vlastima.

Mostovi se klasificiraju u skladu s rezultatima naknadnih proračuna u tri razreda A, B i C. U razred A svrstavaju se mostovi kod kojih je početnim proračunom prve razine provjereno da su zahtjevi nosivosti i uporabljivosti ispunjeni bez ograničenja, u razred B mostovi kod kojih proračunima ocjenjivanja viših razina nisu dobivena nikakva ograničenja upotrebe, a u razred C svrstavaju se mostovi kod kojih su proračunima svih razina dobivena ograničenja upotrebe.

Ako je most svrstan u razred C, treba poduzeti odgovarajuće mjere ograničavanja prometa, kao na primjer definiranje najmanjeg dopuštenog razmaka između teških vozila u koloni i prometnom zastoju, zabranu pretjecanja za teška vozila,

ograničenje težine teških vozila, ograničenje brzine i ograničenje osovinskih opterećenja.

#### 4.4. Usporedba normi za ocjenjivanje postojećih mostova

Većina navedenih normi odnosi se samo na cestovne mostove, osim [16, 23] koji obuhvaćaju i željezničke mostove. Uglavnom se razmatraju samo rasponski sklopovi, a upute o proračunu ležajeva, donjeg ustroja i temeljenja navode se samo načelno. Za ocjenu pouzdanosti postojećih mostova mjerodavna je provjera graničnog stanja nosivosti, a granično stanje uporabljivosti treba provjeriti samo u iznimnim slučajevima. Indeks pouzdanosti  $\beta$  izravno je naveden samo u [17, 18, 22]. Proračunska otpornost u svim normama usvojena je jednaka kao pri proračunu novih mostova, osim u američkoj normi MBE [22], gdje se proračunska otpornost smanjuje ovisno o faktoru stanja (ocjena temeljem pregleda) i faktoru konstrukcijskog sustava (zaliha nosivosti), ali ukupno najviše 15 %. Usporedba ciljanih indeksa pouzdanosti  $\beta$ , poredbenog razdoblja i parcijalnih koeficijenata za djelovanja u skladu s razmatranim normama pri proračunima novih i postojećih cestovnih mostova za granično stanje nosivosti prikazana je u tablici 10.

Može se zaključiti da korelacija između ciljanog indeksa pouzdanosti  $\beta$  i odabranih parcijalnih koeficijenata za djelovanja  $\gamma$  pri proračunu postojećih mostova, iako su pri kalibraciji upotrijebljene jednake metode pouzdanosti, ovisi o normi određene zemlje jer je utemeljena na normi te zemlje za proračun novih mostova. Sjevernoameričke i europske norme za proračun novih mostova bitno se razlikuju. U europskim normama [16, 20, 23] pri proračunima druge razine smanjuju se samo parcijalni koeficijenti za stalna djelovanja (samo ako su dimenzije izmjerene na građevini), a u američkoj normi [22] samo parcijalni koeficijenti za prometno opterećenje. Osim toga, postojeći mostovi se u sjevernoameričkim normama provjeravaju samo za stalna djelovanja i prevladavajuće promjenjivo djelovanje (prometno opterećenje), a u europskim normama i za sva ostala promjenjiva djelovanja.

Dostupne norme za proračun postojećih željezničkih mostova samo su SIA 269 i ONR 24008. Načelno su upotrijebljena jednaka pravila kao pri proračunu cestovnih mostova, no veća je pažnja naravno posvećena problemu zamora odnosno zamjenski ocjenjivanju preostalog uporabnog vijeka. Zanimljivo je spomenuti da su već u njemačkoj normi za željezničke mostove iz 1925. godine [53] dane posebne odredbe za proračun postojećih mostova.

## 5. Prijedlog smjernica o izradi hrvatske norme za ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova

U Hrvatskoj zasad ne postoji norma za ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova. S obzirom na to, inženjeri za ocjenjivanje

postojećih mostova najčešće u praksi upotrebljavaju današnje norme za nove mostove, što dovodi do nepotrebnih i skupih sanacija i rekonstrukcija. Sve su to opravdani razlozi da se što prije izradi hrvatska norma kao propis za ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova. Ovdje se daje prijedlog za takvu normu.

Sve razmatrane norme za ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova sadrže postupak ocjenjivanja u više razina te se takav postupak predlaže i za upotrebu u Hrvatskoj. Prijedlog smjernica za izradu hrvatske norme najvećim je dijelom utemeljen na austrijskoj normi [16]. To je jedina norma koja obuhvaća postojeće cestovne i željezničke mostove, a proračun novih mostova se provodi u skladu s eurokodovima.

Proračun početne prve razine treba napraviti upotrebom standardnih postupaka prema sadašnjim normama koje

Tablica 11. Parcijalni koeficijenti za djelovanja pri proračunu cestovnih mostova druge razine

| Parcijalni koeficijenti za cestovne mostove |   |                   | Napomena   |
|---|---|-------------------|--|
| Stalna djelovanja $\gamma_G$                | Vlastita težina konstrukcije  | 1,20 <sup>a</sup> | Opterećenje treba odrediti temeljem stvarnih dimenzija izmjerenih na građevini.<br>Ako proračun nije utemeljen stvarnim dimenzijama izmjerenim na građevini, treba upotrijebiti parcijalne koeficijente u skladu s normom HRN EN 1990 [1]. |
|   | Težina opreme (zastor, rubnjaci, hodnici i sl.)   | 1,20 <sup>a</sup> |  |
| Promjenjiva djelovanja                      | Prometna opterećenja, osim definiranih teških vozila s detaljnim rasporedom osovinskih opterećenja, jedno djelovanje $\gamma_{Q,1}$ | 1,35              |  |
|   | Definirana teška vozila s detaljnim rasporedom osovinskih opterećenja   | 1,20              |  |
|   | Više istovremenih djelovanja $\gamma_{Q,i}$   | – <sup>b</sup>    |  |

<sup>a</sup> pri povoljnom učinku: 1,0  
<sup>b</sup> proračun u skladu s normom HRN EN 1990 [1], uzimajući u obzir vrijednosti faktora  $\psi$ .

Tablica 12. Parcijalni koeficijenti za djelovanja pri proračunu željezničkih mostova druge razine

| Parcijalni koeficijenti za željezničke mostove   |   |                   | Napomena   |
|--|---|-------------------|--|
| Stalna djelovanja $\gamma_G$   | Trajno djeluju  | 1,20 <sup>a</sup> | Za određivanje opterećenja upotrebljavaju se stvarne dimenzije izmjerene na građevini.                             |
|  | Ne djeluju trajno, dijelovi koji izvorno ne pripadaju konstrukciji (npr. zastor)                                      | 1,30 <sup>a</sup> | Proračun je utemeljen na stvarnoj izmjerenoj debljini zastora i mora se osigurati da se ta debljina neće povećati. |
| Prometna djelovanja od prometnih opterećenja željezničkih vozila $\gamma_{Q1} = \gamma_{Q1}$ | Modeli opterećenja SW, konkretne lokomotive i vagoni (izvagani)   | 1,20              |  |
|  | Modeli opterećenja za klasifikaciju pruga (realni vlakovi), ostala vozila i vagoni                                    | 1,45              |  |
| Promjenjiva dodatna djelovanja $\gamma_{Q_i}$  | Djelovanje zbog vuče, kočenja, djelovanje vjetra, toplinska djelovanja, bočni udar i preostala promjenjiva djelovanja | 1,10              |  |
| Promjenjivo dodatno djelovanje kao prevladavajuće djelovanje $\gamma_{Q_1}$                  |   | 1,30              |  |

<sup>a</sup> pri povoljnom učinku: 1,0



vrijede pri proračunu novih mostova. Pri proračunu druge razine smiju se upotrijebiti smanjeni parcijalni koeficijenti za stalna djelovanja utemeljeni na detaljnim ispitivanjima stvarnih dimenzija (tablice 11. i 12.). Prometno opterećenje treba usvojiti u skladu s važećom normom HRN EN 1991-2 [54] jer ne postoje pouzdani podaci o realnom prometu. Otpornost treba biti utemeljena na ažuriranim izmjerenim značajkama materijala, a treba razmotriti sva eventualna oštećenja i druge utvrđene konstrukcijske nedostatke. Pri proračunu nosivosti na posmik, koja je kod postojećih mostova često mjerodavna, smiju se upotrijebiti napredne metode u skladu s fib 2010 [55].

Za proračun treće razine predlaže se upotreba metode pouzdanosti prvog reda u skladu s dodatkom C norme HRN EN 1990 [1]. Provjera je ispunjena ako je proračunani indeks pouzdanosti  $\beta$  za razmatranu konstrukciju jednak ili veći od zahtijevane najmanje vrijednosti  $\beta$  u skladu s normom HRN EN 1990. Provedbom proračuna prethodne druge razine utvrđuje se mjerodavno granično stanje. Zatim slijedi modeliranje tog graničnog stanja uzimajući u obzir promjenjive (razasute) veličine djelovanja i otpornosti, kao i nesigurnosti modela. Statističke parametre raspodjele (srednja vrijednost, standardna devijacija i/ili koeficijent varijacije) načelno treba proračunati u skladu s JCSS Model Code [5]. Da bi se provjerila vjerodostojnost rezultata, treba, osim usporedbe s rezultatima proračuna druge razine, napraviti i naknadno ocjenjivanje koje obuhvaća analizu osjetljivosti i parametarske studije. S pomoću analize osjetljivosti može se utvrditi koje slučajne varijable najviše utječu na pouzdanost. Parametarske studije omogućuju određivanje učinka promjene srednje vrijednosti neke slučajne varijable na pouzdanost konstrukcije npr. smanjenje srednje čvrstoće betona zbog starenja materijala.

Ako proračuni prve, druge i treće razine nisu dali zadovoljavajući rezultat, u posebnim slučajevima se pri probabilističkom proračunu četvrte razine iznimno može dopustiti smanjenje razine pouzdanosti zahtijevane u normi HRN EN 1990 [1]. Posebni slučajevi obuhvaćaju konstrukcije mostova za koje je nepobitno utvrđeno da posjeduju veliku zalihu nosivosti i konstrukcije koje su se besprijekorno ponašale, a kod kojih se može očekivati slom s upozorenjem. Za takvo razmatranje mora se priložiti detaljno pojašnjenje i moraju se provesti prikladne zamjenske mjere, kao na primjer stalni nadzor ili česti pregledi mosta.

## 6. Zaključak

U posljednje vrijeme znanstvena su istraživanja u svezi s pouzdanosti mostova usmjerena na postojeće mostove. Ocjenjivanje nekog postojećeg mosta treba provesti zbog utvrđenih oštećenja, adaptacija ili ojačanja nosive konstrukcije mosta, prometovanja izvanrednih vozila, zahtjeva za uvođenjem viših razreda željezničke pruge (kategorizacija željezničkih mostova), zbog utvrđenih konstrukcijskih nedostataka, nakon izvanrednih događaja ili zbog novih spoznaja u svezi s nosivosti.

Postupak ocjenjivanja tih mostova je mnogo složeniji nego proračun novih mostova jer iz ekonomskih razloga treba aktivirati postojeće zalihe nosivosti u svezi s djelovanjem, otpornošću i upotrijebljenim konceptom sigurnosti, kako bi se proračunom moglo provjeriti jesu li i dalje sposobni za upotrebu. Zalihe u svezi s djelovanjem obuhvaćaju razmatranje realnih vozila uz odgovarajući dinamički faktor umjesto normiranih vozila i kompenzacijske mjere koje se upotrebljavaju ako je proračunom ocjenjivanja dobiveno ograničenje upotrebe, kao što su propisivanje definiranih voznih trakova (prometovanje po sredini mosta), ograničenja težine teških vozila, brzine i osovinskih opterećenja te propisivanje najmanjeg dopuštenog razmaka između teških vozila u koloni i prometnom zastoju. Zalihe u svezi s otpornošću sadrže utvrđivanje stvarnih svojstava materijala konstrukcije mosta i upotrebu naprednih realnijih (točnijih) elastoplastičnih proračunskih modela umjesto uobičajenih elastičnih proračunskih modela. U radu je dan pregled najnovijih istraživanja u kojima su prikazani napredni postupci za uključivanje karakterističnih ispitivanja materijala i opterećenja, stvarnih prometnih opterećenja i učinka konstrukcijskih sustava s mogućnošću preraspodjele u probabilistički okvir za ocjenjivanje postojećih mostova, utemeljeni na vjerojatnosti i smanjenim ciljanim razinama pouzdanosti. Postupak ocjenjivanja se provodi u više koraka (razina). Ako most ispunjava početnu razinu ocjenjivanja, dodatne provjere nisu potrebne.

U radu je također pregled bitnih značajki reprezentativnih inozemnih normi za ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova. Izloženi koncepti su najdosljednije provedeni u kanadskoj normi [17], gdje je prihvaćen smanjeni indeks pouzdanosti  $\beta$ , utemeljen na smanjenom preostalom uporabnom vijeku, ponašanju konstrukcijskih elemenata i konstrukcijskog sustava, razini pregleda i kategoriji rizika. U nizozemskoj normi [18] modificirani parcijalni koeficijenti sigurnosti za naknadni proračun postojećih mostova su određeni pri jednakom postupanju sa stohastičkim veličinama na strani djelovanja i na strani otpornosti na temelju izvedenih prilagođenih indeksa pouzdanosti  $\beta$ . U normama zemalja na koje se tradicionalno oslanjamo [16, 20, 23] proračun ocjenjivanja se provodi uz bitno načelo zadržavanja jednake razine pouzdanosti kao kod proračuna novih mostova, temeljem uklanjanja nesigurnosti u parcijalnim koeficijentima s pomoću detaljnih ispitivanja izmjera i značajki materijala mosta i utvrđivanja stvarnog prometa na mostu. Proračun ocjenjivanja mostova početne razine provodi se upotrebom standardnih poluprobabilističkih postupaka prema normama koje vrijede za nove mostove. Osnovni podaci za više razine ocjenjivanja uključuju ažuriranje poprečnih presjeka i svojstava materijala konstrukcije mosta, utemeljeno na detaljnim pregledima, i ažuriranje prometnih opterećenja utemeljeno na prikladnim mjerenjima prometa. Prema tome se mostovi koji ne ispunjavaju početne proračunske provjere provjeravaju poluprobabilističkim postupkom druge razine, uz upotrebu smanjenih parcijalnih koeficijenata utemeljenih

na tim podacima. Tim postupkom se najčešće mogu ispuniti zadani zahtjevi nosivosti. Proračuni viših razina ocjenjivanja su probabilistički, pa rezultati bitno ovise o kvalitetnim statističkim podacima za funkcije raspodjele djelovanja i otpornosti te o složenosti funkcije razmatranog graničnog stanja. Zato treba nužno napraviti i detaljnu analizu osjetljivosti i usporedbu s prethodnim rezultatima. Primjena takvih naprednih postupaka pokazala je da u mnogim slučajevima jedan most koji nije zadovoljio uvriježene provjere sigurnosti zapravo može sigurno preuzeti upotrijebljena opterećenja, a da nije potrebno njegovo ojačanje ili zamjena.

Detaljniji prikaz osnovnih značajki reprezentativnih inozemnih normi za ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova nalazi se u radu [56].

Budući da takva norma u Hrvatskoj ne postoji, u radu je dan prijedlog smjernica za razmatranje tog ekonomski i društveno izuzetno važnog područja. Predlaže se norma za ocjenjivanje postojećih mostova u više razina, uz zadržavanje jednake razine pouzdanosti kao pri proračunu novih mostova, najvećim dijelom utemeljena na austrijskoj normi [16]. Smanjenje te razine pouzdanosti dopušta se samo iznimno na najvišoj, tj. četvrtoj razini uz obveznu primjenu prikladnih zamjenskih mjera.

## LITERATURA

- [1] HRN EN 1990:2011, *Eurokod - Osnove projektiranja konstrukcija*, Nacionalni dodatak, HZN, Zagreb, 2011.
- [2] Enevoldsen, I.: Experience with Probabilistic-based Assessment of Bridges, *Struct. Eng. Int.*, 2001; 11(4): 251-260, <http://dx.doi.org/10.2749/101686601780346814>
- [3] Lauridsen, J., Jensen, J.S., Enevoldsen, I.: Bridge owner's benefits from probabilistic approaches, *Struct. Infrastruct. Eng.*, 2007; 3(4): 281-302, <http://dx.doi.org/10.1080/15732470500365570>
- [4] O'Connor, A., Pedersen, C., Enevoldsen, I.: Probability-Based Assessment and Optimised Maintenance Management of a Large Riveted Truss Railway Bridge, *Struct. Eng. Int.*, 2009; 19(4): 375-382, <http://dx.doi.org/10.2749/101686609789847136>
- [5] JCSS: *Probabilistic Model Code*, Joint Committee of Structural Safety, Zürich, 2001.
- [6] ISO-2394: *General Principles on Reliability of Structures*, International Organization for Standardization, Geneva, 1998.
- [7] ISO-13822: *Basis for Design of Structures - Assessment of Existing Structures*, International Organization for Standardization, Geneva, 2010.
- [8] Diamantidis, D.: *Probabilistic Assessment of Existing Structures*, JCSS - Joint Committee of Structural Safety, RILEM, 2001.
- [9] BRIME: *Guidelines for Assessing Load Carrying Capacity - Deliverable D10*, Bridge Management in Europe - IV FP, Brussels, 2001.
- [10] COST 345: *Procedures Required for Assessing Highway Structures - Numerical Techniques for Safety and Serviceability Assessment*, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, Brussels, 2004.
- [11] Rücker, W., Hille, F., Rohrmann, R.: *FO8a Guideline for the Assessment of Existing Structures*, SAMCO Final Report, 2006.
- [12] SB-LRA: *Guideline for Load and Resistance Assessment of Railway Bridges - Advice on the Use Advance Methods*, Sustainable Bridges - VI FP, Brussels, 2007.
- [13] Casas, J.R., Brühwiler, E., Herwig, A., Cervenka, J., Holm, G., Wiśniewski, D.: Capacity assessment of European railway bridges - Limit states and safety formats, *Sustainable Bridges - Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2007: pp. 231-242.
- [14] Jensen, J.S., Casas, J.R., Karoumi, R., Plos, M., Cremona, Ch., Melbourne, C.: *Guideline for load and resistance assessment of existing European railway bridges*, *Sustainable Bridges - Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2007: 221-230.
- [15] Lind, N.C.: *Formulation of Probabilistic Design*, *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, 1977; Vol. 103, EM2: 273-284.
- [16] Austrian Standards: ON Richtlinie 24008 - *Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahn- und Strassenbrücken*, 2014.
- [17] CAN/CSA-S6-06: *Canadian Highway Bridges Design Code*, Canadian Standards Association, 2006.
- [18] Nederlands Normalisatie Instituut: NEN 8700 (nl) - *Assessment of existing structures in case of reconstruction and disapproval - basic rules*, 2011.
- [19] NKB: *Recommendations for Loading and Safety Regulations for Structural Design*, Nordic Committee for Building Structures, Report No. 35, 1978 & Report No. 55, 1987.
- [20] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung - Abteilung Strassenbau, *Richtlinie zur Nachrechnung von Strassenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)*, 2011.
- [21] DB Netze: *Richtlinie 805 - Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken*, 4. Aktualisierung, 2008.
- [22] AASHTO *Manual for Bridge Evaluation*, 2<sup>nd</sup> edn (MBE), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2011.
- [23] SIA 269 - 269/8: *Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken*, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein, 2011.
- [24] Highways Agency: *Design Manual for Roads and Bridges*, Highway Structures: Inspection and Maintenance - Assessment, Vol. 3, Sec. 4, UK, 2006.
- [25] Schneider, J.: *Introduction to Safety and Reliability of Structures*, SED 5 IABSE, 2006.
- [26] HRN EN 1990:2011, *Eurokod - Osnove projektiranja konstrukcija*, HZN, Zagreb, 2011.
- [27] HRN EN 1991-2:2012, *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - 2. dio: Prometna opterećenja mostova*, HZN, Zagreb, 2012.

- [28] ARCHES-D08: *Recommendations on the Use of Results of Monitoring on Bridge Safety and Maintenance*, Assessment and Rehabilitation of Central European Highway Structures - VI FP, Brussels, 2009.
- [29] Getachew, A., O'Brien, E.J.: Simplified site-specific traffic road models for bridge assessment, *Struct. Infrastruct. Eng.* 2007, 3(4): pp. 281–302, <http://dx.doi.org/10.1080/15732470500424245>
- [30] Sivakumar, B., Ghosn, M., Moses, F.: *Protocols for Collecting and Using Traffic Data in Bridge Design*, NCHRP Report 683, Washington, DC: Transportation Research Board, 2011.
- [31] HRN EN 15528:2013, *Oprema za željeznice - Kategorije pruge za određivanje sučelja između granica opterećenja željezničkih vozila i infrastrukture*, HZN, Zagreb, 2013.
- [32] O'Brien, E.J., Enright, B.: Using Weigh-In-Motion Data to Determine Aggressiveness of Traffic for Bridge Loading, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2013, 18(3): pp. 232–239, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000368](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000368)
- [33] Liljencrantz, A., Karoumi, R., Olofsson, P.: Implementing bridge weigh-in-motion for railway traffic, *Comput. Struct.*, 2007, 85(1-2): pp. 80–88, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2006.08.056>
- [34] *Brojanje prometa na cestama Republike Hrvatske*, Hrvatske ceste d.o.o., Zagreb, 1999–2013.
- [35] Allen, D.E.: Safety Criteria for the Evaluation of Existing Structures, *Proceedings IABSE Colloquium on Remaining Structural Capacity*, Copenhagen, Denmark, 1993: 77–84.
- [36] Diamantidis, D., Bazzuro, P.: Safety acceptance for existing structures, *Special Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication*, Stanford University, USA, March 2007.
- [37] Steenbergen, R.D.J.M., Vrouwenvelder, A.C.W.M.: Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges, *HERON*, 2010; 55(2): 123–139.
- [38] Vrouwenvelder, A.C.W.M., Scholten, N.P.M.: Assessment Criteria for Existing Structures, *Struct. Eng. Int.*, 2010; 20(1): pp. 62–65, <http://dx.doi.org/10.2749/101686610791555595>
- [39] Maljaars, J., Steenbergen, R., Abspoel, L.: Safety Assessment of Existing Highway Bridges and Viaducts, *Struct. Eng. Int.*, 2011; 21(1): pp. 112–120.
- [40] Wiśniewski, D.F., Casas, J.R., Ghosn, M.: Codes for Safety Assessment of Existing Bridges - Current State and Further Development, *Struct. Eng. Int.*, 2012; 22(4): pp. 552–560, <http://dx.doi.org/10.2749/101686612X13363929517857>
- [41] Mertz, D.R.: *Load Rating by Load and Resistance Factor Evaluation Method*, NCHRP Project 20-07 Task 122 final report, National Cooperative Highway Research Program, 2005.
- [42] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: *Steel Bridge Design Handbook - Load Rating of Steel Bridges*, Publication No. FHWA-IF-12-052 - Vol.18.
- [43] Gao, L.: Load Rating Highway Bridges in the United States: The State of Practice, *Struct. Eng. Int.*, 2013; 23(3): pp. 327–331, <http://dx.doi.org/10.2749/101686613X13439149157119>
- [44] *AASHTO LFRD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2012.
- [45] DIN-Fachbericht 101: *Einwirkungen auf Brücken*, Deutsches Institut für Normung, 2009.
- [46] SIA 261: *Einwirkungen auf Tragwerke*, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein, 2003.
- [47] Petraschek, T., Horvatits, J.: *ONR 24008 - Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahn- und Strassenbrücken*, ÖBB-Infrastruktur.
- [48] Bundesamt für Strassen ASTRA: *Überprüfung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke*, Schweizerische Eidgenossenschaft, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2012.
- [49] Bundesanstalt für Strassenwesen, Konzeption zur Nachrechnung bestehender Strassenbrücken, *Brücken- und Ingenieurbau: BAST Bericht B 83*, Bergisch Gladbach, 2011.
- [50] Bundesanstalt für Strassenwesen, Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke: *BAST Bericht B 89*, Bergisch Gladbach, 2012.
- [51] Bundesanstalt für Strassenwesen, Verkehrsmodelle für die Nachrechnung von Strassenbrücken im Bestand: *BAST Bericht B 82*, Bergisch Gladbach, 2011.
- [52] Marzahn, G., Maurer, R., Zilch, K., Dunkelberg, D., Kolodziejczuk, A.: Die Nachrechnung von bestehender Strassenbrücken aus Beton, *Beton-Kalender 2013*: pp. 272–344.
- [53] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft: *Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken*, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1925.
- [54] HRN EN 1991-2:2012, *Eurokod 1 - Djelovanja na konstrukcije - 2. dio: Prometna opterećenja mostova*.
- [55] fib CEB-FIP: *Model Code for Concrete Structures 2010*, Ernst & Sohn, 2013.
- [56] Šavor, Z., Šavor Novak, M.: Ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova, *EU fondovi i projekti prometne infrastrukture*, Sedmi Dani prometnica, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu Zavod za prometnice, Zagreb, 2014: pp. 291–323.