

IGRA USTVARJALNOSTI
teorija in praksa urejanja prostora

CREATIVITY GAME
Theory and Practice of Spatial Planning

PKP2 PROGRAMME PROJECT: ASSESSMENT OF
STEEL RAILWAY BRIDGES CONDITION AND REVIEW
OF METHODOLOGIES FOR ASSESSMENT OF
REMAINING LIFETIME

Gašper Šmid, Gašper Rus, Samo Saje, Martin Klun,

Jernej Nejc Lombar, Jan Ratej

University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Slovenia

Znanstvena revija, št. 3 / leto 2015
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za arhitekturo in
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Ljubljana, 2015

Scientific journal, no. 3 / Year 2015
University of Ljubljana
Faculty of Architecture and
Faculty of Civil and Geodetic Engineering
Ljubljana, 2015

Naslov revije: Title of the Journal:

IGRA USTVARJALNOSTI
teorija in praksa urejanja prostora

THE CREATIVITY GAME
Theory and Practice of Spatial Planning

Urednici: Alenka Fikfak, Alma Zavodnik Lamovšek

Editors: Alenka Fikfak, Alma Zavodnik Lamovšek

Uredniki tematskega dela: Cristian Suau,
Saja Kosanovič, Carmelo Zappulla

Thematic section editors: Cristian Suau,
Saja Kosanovič, Carmelo Zappulla

Oblikovanje in naslovnica: Gašper Mrak
Lektoriranje: Mojca Vilfan
Prevod: Mojca Vilfan

Design and Title page: Gašper Mrak
Slovene text proofread by: Mojca Vilfan
Translation: Mojca Vilfan

Klasifikacija: (UDK) Renata Stella Čop, (DOI) Teja Koler Povh

Classification: (UDK) Renata Stella Čop, (DOI) Teja Koler Povh

Založila in izdala: Univerza v Ljubljani,
Fakulteta za arhitekturo in
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Published by: University of Ljubljana,
Faculty of Architecture and
Faculty of Civil and Geodetic Engineering

Spletna stran revije:
<http://www.iu-cg.org/>

Journal's Web Page:
<http://www.iu-cg.org/>

Spletna stran številke
<http://www.iu-cg.org/paper/2015/iu03.html>

Current Issue Link
<http://www.iu-cg.org/paper/2015/cg03.html>

ISSN 2350-3637

ISSN 2350-3637

Univerza v Ljubljani
Fakulteta *za arhitekturo*



Univerza v Ljubljani
Fakulteta *za gradbeništvo in geodezijo*



Gašper Šmid, Gašper Rus, Samo Saje, Martin Klun, Jernej Nejc Lombar, Jan Ratej: PROJEKT PROGRAMA PKP2: Ocena stanja železniških jeklenih mostov s pregledom metodologij za oceno preostale življenjske dobe

PKP2 PROGRAMME PROJECT: Assessment of steel railway bridges condition and review of methodologies for assessment of remaining lifetime.

DOI: 10.15292/IU-CG.2015.03.100-105 ■ UDK: 624.014.2: 625.1 ■ 1.04 Strokovni članek / Professional Article ■ SUBMITTED: September 2015 / PUBLISHED: October 2015

Avtorji projekta: Rus Gašper, Saje Samo, Šmid Gašper, Klun Martin, Lombar Jernej Nejc, Ratej Jan, Weiss Simon, Demšar Nejc, Cvenkel Gašper, Cvenkel Anže
Pedagoški mentorji: doc. dr. Franc Sinur (FGG), doc. dr. Primož Može (FGG), izr. prof. dr. Jernej Klemenc (FS), prof. dr. Marko Nagode (FS)
Delovna mentorja: dr. Leon Hladnik (Razpon d.o.o.), Gregor Gruden (IMK)

IZVLEČEK

Obravnavana je problematika slovenskega železniškega infrastrukturnega omrežja, kjer smo se osredotočili na analizo jeklenih železniških mostov in oceno njihove preostale življenjske dobe. Analizo smo opravili na podlagi vhodnih podatkov, pridobljenih s strani podjetja Slovenske železnice d.o.o., ki so zajemali geometrijske podatke mostov in podatke o prometnih obremenitvah. Slednji so nam služili za računsko analizo, saj je pri oceni preostale življenjske dobe jeklenih železniških mostov ključno utrujanje jekla, ki je povezano s cikli obremenjevanja. Vzpostavili smo spletno bazo, v kateri so dostopni osnovni podatki o mostovih ter pri nekaterih fotografije, lokacija in dokumenti v digitalni obliki. Metodologijo za oceno preostale življenjske dobe smo uporabili za most čez Savo pri Litiji. Izkazalo se je, da so rezultati zelo občutljivi na vhodne parametre. Preostalo življenjsko dobo mostov je težko izraziti v časovnih enotah, saj je fenomen utrujanja kompleksen in odvisen predvsem od količine pretovora (število vlakov, masa in število vagonov ter lokomotiv itd.) poleg tega tudi od velikosti obstoječih razpok na jeklenih elementih mostov, ki so zanesljivo prisotne. Rezultati uporabljenih metodologij so pomembni predvsem iz vidika primerjalne ocene varnosti med posameznimi mostovi.

KLJUČNE BESEDE

utrujanje, preostala življenjska doba, železniška infrastruktura, jeklen železniški most, prometne obremenitve, trajnost in palmgren-minerjevo pravilo

ABSTRACT

The issues of Slovenian railway infrastructure system are discussed. We focused on analyzing steel railway bridges and evaluation of their life expectancy. We gathered the input data from the company Slovenske železnice d.o.o. They include data like geometry and annual traffic loads. Latter we used in computational analysis. In evaluation of life expectancy of steel railway bridges, the fatigue of construction material has crucial affect. It is connected with loads cycles. We established web data base, where basic bridge data, photographs, location and digitalized documentation can be found. We used the methodology for life expectancy assessment for the bridge over Sava river near Litija. As it turns out, the results are sensitive for input parameters. Life expectancy of bridges is difficult to express in a time unit because the fatigue is a complex phenomenon. It is also dependent from the amount of loading (the number of trains, mass and the number of wagons, locomotives, etc.) and the size of cracks on steel construction elements. The results of used methodology are important for comparison of risk assessment between individual bridges.

KEY-WORDS

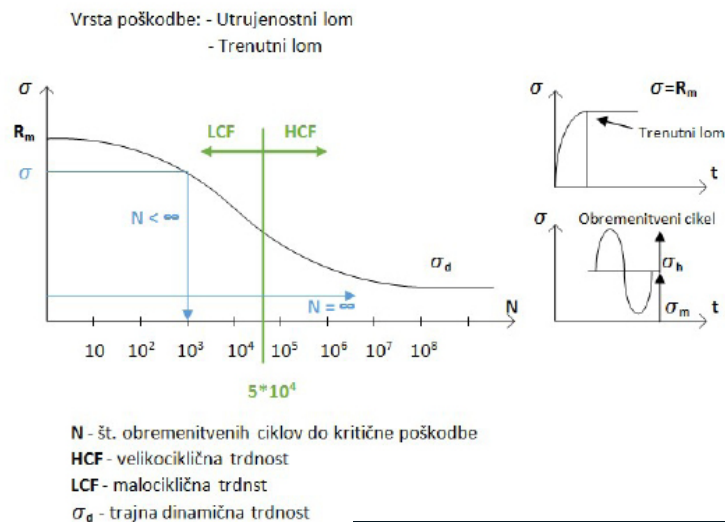
Fatigue, Life expectancy, Railway infrastructure, Steel railway bridge, Traffic load, Durability, Palmgren – miners rule

1. Predstavitev problematike in namen projekta

V Sloveniji je trenutno 1.226 km železniških prog, od tega 896 km enotirnih in 330 km dvotirnih. Vse pogosteje se odpira vprašanje o dejanski varnosti starih jeklenih mostov v Sloveniji. Prvi jekleni kovičeni železniški mostovi so bili zgrajeni konec 19. stoletja ter v začetku 20. stoletja. Najstarejši most je bil zgrajen že davnega leta 1860. Povprečna starost vseh železniških mostov v Sloveniji je 81 let. Nekateri mostovi se torej sedaj že približujejo svojemu stotemu letu obstoja medtem, ko je 60 mostov takšnih, da njihova starost presega 100 let. Mnogi so prestali več faz popravil in preživeli dve svetovni vojni, med katerima so bili verjetno izpostavljeni tudi preobremenitvam. Zahteve za projektiranje so bile v času načrtovanja teh mostov drugačne kot so danes, zato mostovi obratujejo pod ostrejšimi pogoji. Prometna obremenitev in letno število obremenitvenih ciklov se iz leta v leto povečuje, saj količina tovora na železniških progah raste, kar posledično vodi k vedno večjemu številu težkih tovornih vlakov v prometnih tokovih. Ta trend se bo zaradi okoljevarstvene politike nadaljeval. Uredba (EU) št. 1315/2013 navaja, da naj bi bila na jedrnem omrežju do leta 2030 zagotovljena minimalna hitrost tovornih vlakov 100 km/h, osna obremenitev vsaj 22,5 ton in dolžina vlakov 740 m. Tem kriterijem obstoječa železniška infrastruktura v Sloveniji žal ne ustreza. Namen projekta je torej reševanje aktualne infrastrukturne problematike Slovenije, ki ima velik vpliv na gospodarstvo in razvoj države. To smo poskušali doseči z oceno stanja obstoječih jeklenih mostov z oceno preostale življenjske dobe na slovenskem železniškem omrežju. Ta ocena namreč predstavlja prvi in osnovni korak za zagotavljanje primarnih zahtev. Primarne zahteve pri mostovih so varnost, uporabnost in trajnost, vse pa so pogojene z obremenitvami, katerim so izpostavljeni. Povečane obremenitve in večje število tovornih vlakov danes vplivajo na preostalo življenjsko dobo mostov, ki je pogojena predvsem z utrujanjem materiala tj. jeklenih nosilnih elementov. S pomočjo dobljenih podatkov smo tvorili bazo podatkov za izbran nabor mostov, v katero je možno dostopati na spletni strani: <http://pokreativnipoti.fgg.uni-lj.si>. Spletno stran smo ustvarili tudi z željo osvestiti slovensko javnost in predvsem upravljalca slovenskih železniških prog in lastnike mostov o problemu dotrajanosti železniških jeklenih mostov. Navsezadnje pa ponujamo vsem subjektom, ki načrtujejo, gradijo, vzdržujejo in upravljajo z železniško infrastrukturo, osnovne oziroma izhodiščne podatke za analizo mostov in tudi orodje za identifikacijo najbolj kritičnih mostov oziroma njihovih delov.

2. Teoretično ozadje

Utrujanje materiala je pomemben naraven proces pri katerem opazujemo



Slika 1: Prikaz osnovnih pojmov obratovalne trdnosti.

spreminjanje lastnosti materiala pod vplivom zunanje obremenitve v določenem časovnem obdobju. Pri utrujanju začetne razpoke, ki so prisotne na površini ne glede na material, počasi rastejo. Rast razpoke napreduje počasi do kritičnega trenutka, ko se začne razpoka z eksponentno hitrostjo odpirati, kar se konča s krhkim prelomom materiala oziroma nosilnega elementa. Pri konstruiranju nas običajno zanima časovno obdobje v katerem bo nastal lom materiala. Z drugimi besedami nas zanima število obremenitvenih ciklov, ki jih bo material prenesel brez poškodb. Glede na to ločimo visoko in nizko ciklično trdnost. Angleško: High Cycle Fatigue (HCF) in Low Cycle Fatigue (LCF). (Slika 1)

Življenjska doba posameznega elementa konstrukcije, spoja dveh elementov ali celotne konstrukcije, ki je izpostavljena cikličnim obremenitvam je definirana kot število ciklov konstantne amplitude, ki jih bo konstrukcija zdržala do kritične poškodbe. Kritična poškodba je lahko definirana kot porušitev konstrukcije ali elementa, padec elastičnega modula, padec napetosti ali kritična velikost razpoke. Ključni parametri so: amplitude napetosti, ki se pojavijo na kritičnem mestu (najvišja σ_{max} , najnižja σ_{min} napetost in sprememba napetosti $\Delta\sigma$ - slika 1); geometrija (oblike prerezov elementov, koncentracije napetosti zaradi sprememb geometrije, napake in napetosti v zvarih, zarezni učinek); materialne karakteristike (ustrezna odpornost proti krhkemu lomu - žilavost, meja tečenja materiala). Poleg tega so vplivi okolja

Univerza v Ljubljani



»Projekt delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada. Projekt se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007–2013, 1. razvojne prioritete »Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti« ter prednostne usmeritve 1.3. »Štipendijske sheme«, v okviru potrjene operacije »Po kreativni poti do praktičnega znanja«.

(izpostavljenost koroziji) pomembni parametri, ki posledično znižujejo življenjsko dobo.

2. Baza podatkov

Spletna baza podatkov je pregledno urejena zbirka železniških mostov v Sloveniji, kjer so shranjeni razpoložljivi splošni podatki o mostovih (Preglednica 1). Obenem omogoča samodejno vodenje statistike o mostovih. Za nekatere mostove smo iz arhivov pridobili razpoložljivo projektno dokumentacijo katero smo digitalizirali. Spletna baza se bo v prihodnje lahko dopolnjevala. Vneseni podatki so na voljo različnim subjektom, ki načrtujejo, gradijo, vzdržujejo ali upravljajo železniško infrastrukturo v Sloveniji.

Preglednica 1: Splošni podatki o mostovih

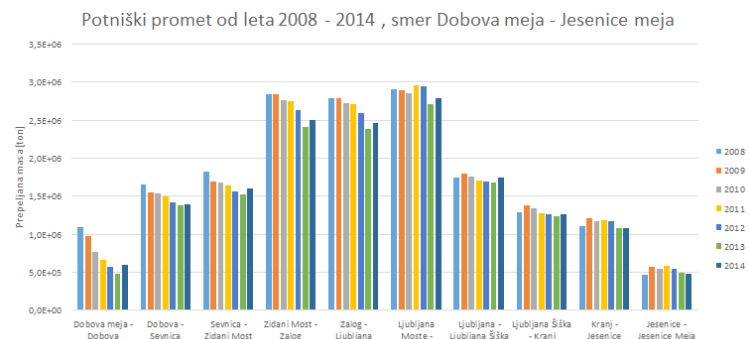
SVP (sekcija za vzdrževanje prog)	Objekt križanja	Svetla razpetina po poljih	Leto gradnje
št. proge	Statična razpetina po poljih	Leto morebitne rekonstrukcije oziroma sanacije	Glavna/regionalna proga
Stacionaža	Tip objekta	Material prekladne konstrukcije	Svetla razpetina vseh pol
Statični sistem	Vrsta križanja	Stanje projektov obstoječega stanja	Vrsta konstrukcije

Za vsako območje sekcije za vzdrževanje prog (SVP) se na spletni strani nahajajo tudi diagrami obremenitev, kjer so prikazane obremenitve v tonah za posamezno leto. Diagrami so izdelani posebej za potniški, tovorni in skupni promet za posamezni progovni odsek (Slika 2).

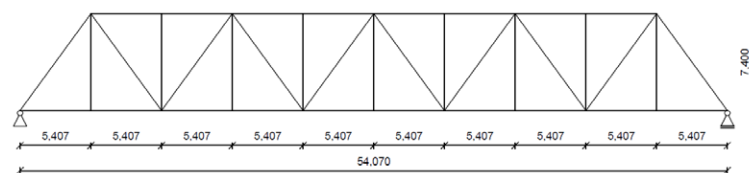
4. Obravnavani most in analiza nosilne konstrukcije

V okviru projekta smo analizirali most, ki se nahaja na glavni progi Zidani most – Ljubljana (levi tir) na stacionaži km 538+019,00. Most je bil zgrajen leta 1964 in do danes še ni bil rekonstruiran. Sestavljen je iz treh paličnih prostoležečih konstrukcij razpetin 53,09 m + 54,07 m + 53,09 m. Širina mostu znaša 5,0 m, višina mostu pa 7,4 m. Most je enotiren z odprtim voziščem. V nadaljevanju obravnavamo samo sredinski del premostitvene konstrukcije z najdaljšim razponom (Slika 3).

Konstrukcijo sestavljata dva robna prostoležeča palična nosilca razpetine 54,07 m in višine 7,40 m. Zgornji pasovi so iz varjenega škatlastega prereza, spodnji pasovi pa so sestavljeni iz dveh »T« profilov, ki sta mestoma med seboj povezana. Tlačno obremenjene diagonale so iz varjenega škatlastega prereza, ostale pa iz varjenega »k« prereza. Vertikale so prav tako iz varjenega »k« prereza. Krajni diagonali tvorita skupaj s prvo prečko zgornjega



Slika 2: Prikaz primera obremenitev za tovorni promet smer Dobova meja – Jesenice meja.



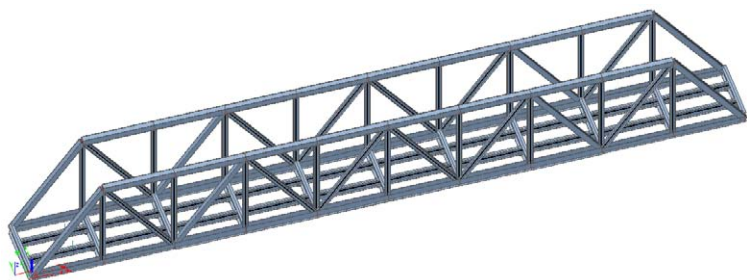
Slika 3: Osnovna geometrija obravnavanega paličnega nosilca (kote so v metrih).

vetrnega povezja čelni portal, ki je statično gledano dvočlenski okvir. Brano sestavljajo vzdolžniki in prečniki iz varjenih »k« profilov. Prečniki so prostoležeči, vzdolžniki pa kontinuirni nosilci. Uporabljen material mostne nosilne konstrukcije je kvalitete S235. (Slika 4)

Tekom projekta smo izdelali več računskih modelov v programu Scia Engineer. Sprva smo modelirali glavni palični nosilec v ravnini. Za nanos vertikalne obtežbe smo uporabili fiktivni nosilec, ki je bil z glavnim paličnim nosilcem preko vertikalnih vešal v vzdolžnih členkasto povezan. Pri tem



Slika 4: Terenski prikaz obravnavanega mostu.



Slika 5: 3D prikaz računskega modela mostu.

modelu smo v vseh vozliščih preprečili izven-ravninski pomik, hkrati pa smo fiktivni nosilec zaradi stabilnosti ustrezno podprli. Brano smo modelirali ločeno z dvodimenzionalnim modelom. Preverili smo tudi spreminjanje notranjih statičnih količin pri različnih načinih podpiranja brane ter ugotovili, da se rezultati razlikujejo glede na način podpiranja.

Zaradi potrebe po naprednejšem ter natančnejšem modelu smo v nadaljevanju izdelali prostorski računski model konstrukcije. Tako smo lahko pri analizi zajeli nekatere vplive, ki jih ni moč obravnavati z dvodimenzionalnim modelom. Pri trodimenzionalnem modelu (Slika 5) zgornjega in spodnjega zavetrovanja nismo modelirali, saj je vpliv le-teh zanemarljiv pri upoštevanju le vertikalne pomične obtežbe. Zgornje in spodnje zavetrovanje služita za prenos horizontalnih obremenitev (veter, potres, obremenitve vlakov) in za zagotavljanje stabilnosti zgornjega pasu vertikalnega paličnega nosilca.

Pri računskem modelu smo obravnavali samo vertikalne pomične obtežbe, ki predstavljajo obremenitve vlakov na obravnavano mostno konstrukcijo. Stalna obtežba ter vse horizontalne obtežbe nas pri analizi niso zanimale, saj le-te nimajo vpliva na utrujanje materiala. Pri fenomenu utrujanja obravnavamo le spremembo napetosti v elementih, ta pa se pojavi zaradi obtežbe vlaka.

Na konstrukciji smo najprej določili obtežno pot po kateri se premika pomična obtežba. Obtežna pot je določena po vzdolžnikih preko cele konstrukcije. Med analizo se po obtežni poti premikata dve vzporedni sili. Za potrebe izračuna ovojníc smo definirali obtežne sheme po UIC 71 in mešane obtežne sheme (EC Mix) v skladu s standardom SIST EN 1991-2, dodatek 2.

Analiza podajnosti brane je zanimiva, saj se je v preteklosti vzdolžnike in prečnike dimenzioniralo na podlagi drugačnih računskih modelov kot se to počne danes. Današnja programska oprema omogoča naprednejšo oziroma natančnejšo analizo z uporabo trodimenzionalnega modela konstrukcije. S tem zajamemo medsebojne vplive različnih delov konstrukcije. V sklopu projekta smo izvedli analize s tremi računskimi modeli:

- prostorski računski model,
- model, kjer je brana podprta z nepomičnimi členkastimi podporami in
- model, kjer je vzdolžnik podprt z nepomičnimi členkastimi podporami.

5. Pregled metod za oceno preostale življenjske dobe mostu

Življenjsko dobo mostu smo računali z dvema metodama. Pri predhodnem vrednotenju smo uporabili metodo iz UIC 71. Pri podrobni preiskavi smo akumulacijo poškodb zajeli po Palmgren-Miner-jevimi pravili. V izračunih smo upoštevali, da znaša ekvivalentna konstantna amplituda napetosti pri 2 milijonih ciklov 71 MPa, kot veleva standard EC3, Del 1.9 za kovičene spoje.

5.1 Prva faza: Predhodno vrednotenje

V prvi fazi smo most analizirali z upoštevanjem parametrov, ki veljajo za nov most in z uporabo vseh veljavnih standardov. Mejne nosilnosti mostu nismo analizirali, ker se nosilnost v povprečni življenjski dobi mostov splošno ni izkazala za težavno. Osredotočili smo se na analizo utrujanja. Rezultati analize so pokazali kritične nosilne elemente mostu in kritične detajle. Izvedba analize je zahtevala podroben pregled razpoložljive projektne dokumentacije. Spodnji izraz nam poda oceno stopnje varnosti glede na utrujanje obravnavanega detajla mostu.

$$\mu_{fat} = \frac{\Delta\sigma_c \cdot Y_{MF}}{Y_{FF} \cdot \Delta\sigma_{R,S}} = \frac{\Delta\sigma_c}{Y_{FF} \cdot Y_{MF} \cdot \Delta\sigma_{R,S}}$$

μ_{fat} : stopnja varnosti zaradi utrujanja

Y_{FF} : delni varnostni faktor za amplitudo napetosti $\Delta\sigma_c$

$\Delta\sigma_{R,S}$: ekvivalentna konstantna amplituda napetosti pri $2 \cdot 10^6$ ciklov

$\Delta\sigma_c$: odpornost na utrujanje detajla pri $2 \cdot 10^6$ ciklov (kategorija detajla)

Y_{MF} : parcialni varnostni faktor za odpornost proti utrujanju $\Delta\sigma_c$

Za $\mu_{fat} \geq 1$ je varnost na mejno stanje utrujanja elementa oziroma detajla zadostna, $\mu_{fat} < 1$ pa pove le to, da detajl ni varen. V tem primeru mora biti varnost zaradi utrujanja preverjena z natančnejšo metodo. Na podlagi določitve teh faktorjev varnosti je mogoče narediti seznam prednostnih nalog za nadaljnjo, bolj temeljito preiskavo. Ko imamo znane tiste kritične elemente konstrukcije (tisti deli, ki imajo faktor μ_{fat} manjši od ena), lahko z izračunom ocenimo preostalo življenjsko dobo zaradi utrujanja. Podatek o kritičnih elementih konstrukcije je pomemben za nadaljnje korake v analizi določitve preostale življenjske dobe, kakor tudi za nadaljnjo presojo potrebnih tehničnih, sanacijskih ali drugih ukrepov (omejitve hitrosti vlakov, teže tovora, števila prevozov...).

Spodaj (Preglednica 2) so prikazani rezultati za tri najbolj kritične elemente mostne konstrukcije. Pri upoštevanju letnega pretovora 25 milijonov ton ter materialnega varnostnega faktorja 1,35 smo ugotovili, da je življenjska doba na podlagi teh izračunov pri dveh elementih že potekla. Pretovor smo v drugem izračunu reducirali ter ga približali dejanskemu letnemu pretovoru zadnjih nekaj let. Poleg tega pa smo v drugem izračunu zmanjšali materialni varnostni faktor z namenom, da dobimo realnejše rezultate. Ugotovimo, da kljub realnejšem letnem pretovoru in zmanjšanju materialnega faktorja, še vedno nismo dobili pozitivne preostale življenjske dobe, zato smo prešli na naslednjo fazo.

Preglednica 2: Rezultati računa preostale življenjske dobe v prvi fazi z UIC71.

UIC 71 po EC									
Upoštevanje 25 Mton/leto, materialni varnostni faktor 1.35 (nov most), referenčna trdnost utrujanja pri 2 milijonih ciklov je 71 Mpa									
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ	μ_{ec}		
ELEMENT VZ5 NAD PODPORO	$\varphi = 1,196$	1,03	1	1,04	1	1,0712	1,10	Prostala živ. doba	69,0 let
ELEMENT VZ3 V POLJU	$\varphi = 1,196$	1,03	1	0,87	1	0,8961	0,44	Prostala živ. doba	Potekla let
ELEMENT P3 V POLJU	$\varphi = 1,306$	0,85	1	0,87	1	0,7395	0,67	Prostala živ. doba	Potekla let
Upoštevanje 15 Mton/leto, materialni varnostni faktor 1.00 (obstoječi most), referenčna trdnost utrujanja pri 2 milijonih ciklov je 71 Mpa									
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ	μ_{ec}		
ELEMENT VZ5 NAD PODPORO	$\varphi = 1,196$	1,03	0,90	1,04	1,00	0,96	1,66	Prostala živ. doba	69,0 let
ELEMENT VZ3 V POLJU	$\varphi = 1,196$	1,03	0,9	0,87	1	0,80649	0,66	Prostala živ. doba	Potekla let
ELEMENT P3 V POLJU	$\varphi = 1,306$	0,85	0,9	0,87	1	0,66555	1,01	Prostala živ. doba	0,0 let

5.2 Druga faza: Podrobna preiskava

V drugi fazi smo most podrobneje analizirali. Izračunali smo kopičenje oziroma akumulacijo poškodb. Za določitev ocene življenjske dobe smo uporabili linearni Palmgren-Miner-jev zakon, ki ga opišemo s spodnjim izrazom.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

n_i : Število ciklov, ki se zgodijo na območju razpona napetosti, čini iz spektra napetosti

N_i : število ciklov, ki ustreza določeni trdnosti utrujanja pri razponu napetosti v območju $\Delta\sigma_i$

V prvem koraku druge faze smo poskušali upoštevati dejanske obremenitve v življenjski dobi mostu. Obtežba predstavlja največjo negotovost v primerjavi z drugimi dejavniki. Sheme prometnih obtežb za železniške mostove po SIST EN 1991-2, ki smo jih uporabili v prvi fazi, temeljijo na pričakovanem obsegu prometa v prihodnosti ter na težah in hitrostih sodobnih lokomotiv in vagonov (tovornih in potniških). Na žalost smo uspeli pridobiti podatke le za preteklih nekaj let. Na te podatke smo se oprli tudi pri napovedi prometnih obremenitev v prihodnosti.

Pri drugem koraku druge faze računski modeli običajno vsebujejo določene poenostavitve glede na dejansko konstrukcijo. Te poenostavitve običajno nimajo bistvenega vpliva na izračun globalnega odziva konstrukcije in na izračun napetosti v prerezih. Pri analizi lokalnega obnašanja detajlov (npr. spojev) pa imajo velik vpliv koncentracije napetosti, začetna poškodovanost in rast razpok, ki v izračunu niso zajeti. Prav tako se lahko velik vpliv pokaže pri lokalni prerazporeditvi obtežbe. Poleg tega v konstrukciji nastajajo napetosti zaradi nihanja (sekundarne napetosti), vibracije, deformacije iz ravnine. Ti učinki se pri statični analizi upoštevajo preko različnih faktorjev

na obtežbo. Analize mostu na treh različnih modelih so pokazale odstopanja med rezultati posameznih računskih modelov, ki pomembno vplivajo na pojav utrujanja, na globalen odziv konstrukcije pa praktično nimajo vpliva. V nekaterih primerih smo opazili tudi do 40% razlike pri izračunu sprememb napetosti, kar pomeni za faktor 2,7 nižjo preostalo življenjsko dobo.

Če preko izraza za Palmgren-Miner-jev zakon škode dobimo vrednost večjo kot 1, je potrebno upoštevati resne posledice okvare oziroma porušitve. Lahko se izvede tudi strokovni pregled konstrukcije na terenu. Na koncu te faze je zelo pomembno, da napišemo poročilo, ki vsebuje identifikacijo kritičnih elementov oziroma delov konstrukcije, povzetek izračunov ter končne sklepe.

Podobno kot v prvi fazi smo sprva v izračunu upoštevali 25 milijonov ton letnega pretovora, kot določa standard EC3 1.9. Rezultati izračuna kažejo, da je življenjska doba mostu že potekla. V drugem izračunu pa smo upoštevali 15 milijonov ton letnega pretovora, kar je realnejši vhodni podatek in ugotovili, da ocenjena preostala življenjske doba znaša še dobrih 30 let (Preglednica 3).

6. Zaključek

Življenjsko dobo smo računali najprej z grobimi, nato pa z vedno realnejšimi ocenami. Najprej smo življenjsko dobo v grobem izračunali po standardu UIC 71 za vse elemente, kasneje pa smo preverjali le tri najbolj kritične elemente po Palmgren-Minerjevem pravilu. Če se z uporabo grobih metod izkaže, da je življenjska doba mostu že potekla, potem sledi še natančnejša analiza mostu. V kolikor se izkaže, da je tudi po natančnejših metodah ocenjena življenjska doba nekega elementa že potekla, je potrebno opraviti pregled mostu oziroma kritičnega elementa na terenu.

MINERJEVO PRAVILO o linearni akumulaciji poškodb (ob predpostavki, da en vlak povzroči en cikel v obravnavanem elementu)

Preglednica 3: Rezultati izračuna preostale življenjske dobe v drugi fazi.

Upoštevanje 25 Mton/leto, faktor koncentracije napetosti k=1.0, referenčna trdnost utrujanja pri 2 milijonih ciklov je 71 Mpa			
ELEMENT VZ5 NAD PODPORO	$\varphi = 1,196$	$\Sigma k = 1$	Prostala živ. doba 2173,1 let
ELEMENT VZ3 V POLJU	$\varphi = 1,196$	$\Sigma k = 1$	Prostala živ. doba -0,8 let
ELEMENT P3 V POLJU	$\varphi = 1,306$	$\Sigma k = 1$	Prostala živ. doba 161,9 let
Upoštevanje 15 Mton/leto, referenčna trdnost utrujanja pri 2 milijonih ciklov je 71 Mpa			
ELEMENT VZ5 NAD PODPORO	$\varphi = 1,196$	$\Sigma k = 1$	Prostala živ. doba 3648,0 let
ELEMENT VZ3 V POLJU	$\varphi = 1,196$	$\Sigma k = 1$	Prostala živ. doba 32,4 let
ELEMENT P3 V POLJU	$\varphi = 1,306$	$\Sigma k = 1$	Prostala živ. doba 303,1 let

Račune smo pri vsaki metodi vodili tako, da smo najprej vzeli zelo konservativne vhodne podatke, nato pa smo za izračun skušali pridobiti čim realnejše vhodne podatke. Najprej smo za oceno utrujanja uporabili metodo UIC 71, ki je nekoliko enostavnejša in smo z njo na varni strani. V vseh izračunih smo upoštevali konstanten letni pretovor za vsa leta uporabe mostu. Da bi lahko naredili realnejšo in bolj zanesljivo oceno preostale življenjske dobe, bi morali imeti podatke o letnem pretovoru za vsa pretekla leta. Tako bi lahko pravilno upoštevali vso zgodovino obremenjevanja mostu, ki nam bi pripomogla k zanesljivejši oceni preostale življenjske dobe. Prav tako, pa bi na podlagi teh podatkov lažje ocenili trend povečevanja letnega pretovora v prihodnje, ki je prav tako ključen pri izračunu preostale življenjske dobe. Ugotovili smo, da nam predpostavka, ki v izračunu preostale življenjske dobe upošteva en cikel spremembe napetosti pri prevozu enega vlaka ne poda natančnih rezultatov oziroma poda različne rezultate kot pri primerih kjer smo v izračunu upoštevali vse cikle pri prevozu vlaka. Predpostavka, ki upošteva vse cikle realnejše opisuje napetostno stanje v prerezu. V našem primeru torej ugotovimo, da je neprimerno upoštevati samo en cikel v izračunu, saj so rezultati zelo različni od rezultatov po metodi, ki upošteva vse cikle.

Na podlagi rezultatov, ki smo jih dobili z izračuni ne moremo točno napovedati, koliko znaša dejanska preostala življenjska doba. So pa dober pokazatelj najbolj kritičnih elementov, ki jim je pri pregledu na terenu potrebno posvetiti večjo pozornost. Življenjsko dobo se lahko natančneje napove le s pregledom na terenu, ko je znana razpokanost nekega elementa.

Kot smo že omenili je v Sloveniji ogromno število starih mostov, katerih življenjska doba se počasi izteka. Zaradi vse večjih obremenitev železniške infrastrukture se bo stanje mostov še poslabšalo, evropskih smernic na tem področju pa bo postale še bolj nedosegljive.