

dr. Mirko Kosič, univ. dipl. inž. grad.
mirko.kosic@zag.si



Doron Hekič, mag. inž. grad.
doron.hekic@fgg.uni-lj.si
doron.hekic@zag.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, Ljubljana



dr. Andrej Anžlin, univ. dipl. inž. grad.
andrej.anzlin@zag.si

Zavod za gradbeništvo Slovenije,
Odsek za mostove in inženirske objekte,
Dimičeva ulica 12, Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 625.1:69.059.4

NAPOVED PREOSTALE ŽIVLJENJSKE DOBE JEKLENEGA ŽELEŽNIŠKEGA MOSTU NA UTRUJANJE NA PODLAGI IZMERJENEGA ODZIVA REMAINING FATIGUE-LIFE PREDICTION OF A STEEL RAILWAY BRIDGE BASED ON MEASURED RESPONSE

Povzetek

V zadnjem času smo priča vse višjim zahtevam za železniško infrastrukturo, ki jih kot posledica prehoda na zeleno mobilnost spodbuja politika Evropske unije. Povečano število vlakov in dovoljenih osnih pritiskov lahko poveča problematiko visokocikličnega utrujanja materiala na jeklenih mostovih. Zato je pri izračunu življenjske dobe obstoječih mostov ključno poznavanje realne obtežbe in realnega odziva pod prometno obtežbo. V ta namen smo v okviru evropskega projekta Assets4rail razvili metodologijo za izboljšanje napovedi preostale življenjske dobe na utrujanje na podlagi izmerjenega odziva, ki jo v prispevku prikažemo na primeru jeklenega železniškega mosta. Rezultate meritev odziva smo uporabili za ročno in avtomatsko kalibracijo numeričnega modela, pri čemer smo za ročno kalibracijo upoštevali inženirsko presojo, za samodejno kalibracijo pa tri različne nelinearne optimizacijske algoritme. Na podlagi kategorije detajla in števila ciklov smo izbrali pet najbolj neugodnih konstrukcijskih detajlov, za katere smo izračunali preostalo življenjsko dobo glede na utrujanje. Rezultati študije so pokazali, da smo s kalibracijo numeričnega modela na izmerjeni odziv lahko podaljšali življenjsko dobo obravnavanega mostu za vsaj 30 let.

Ključne besede: visokociklično utrujanje, preostala življenjska doba, kalibracija, izmerjeni odziv, spremljanje konstrukcijskega stanja, jekleni most

Summary

The transition to green mobility promoted by the European Union policy is increasing the demands for railway infrastructure. The increased number of trains and allowed axial load can accelerate high-cycle fatigue issues in steel bridges. Therefore, determining the remaining fatigue life of existing bridges is critical and requires an understanding of the actual loads and responses under real traffic. A methodology to improve fatigue-life prediction based on measured response was developed within the European project Assets4rail project. This article demonstrates this in a case study of a steel railway bridge. The results of the response measurements were used for manual and automatic calibration of the numerical model, where the manual calibration was based on engineering judgment, while the automatic calibration was based on three different nonlinear optimization algorithms. Considering the detail category and the number of cycles, the five most unfavourable construction details were selected and evaluated in terms of their remaining fatigue life. The study showed that calibrating the numerical model based on the measured response resulted in extended service life of the bridge by at least 30 years.

Key words: high-cycle fatigue, remaining fatigue life, calibration, measured response, structural health monitoring, steel bridge

1 UVOD

Železniška infrastruktura lahko v primerjavi z drugimi načini transporta predstavlja okolju bolj prijazen in zmožljiv način transportiranja blaga. Evropska unija zato izdaja smernice in uredbe, npr. EU št. 1315/2013 (Uredba TEN-T) ([EC EU, 2013], [EC EU, 2021]), ki vsebujejo nove, višje zahteve za železniško infrastrukturo [Zemljič, 2022]. Na ta način se bo lahko Evropa bolje pripravila na neizogibno soočenje s stalnim povečevanjem količine pretovorjenega blaga preko železniških povezav. Strategija Evropske unije za prehod na zeleno mobilnost [EC EU, 2020] med drugim predvideva razširitev uporabe potniškega železniškega prometa s podvojitvijo hitrih železniških povezav do leta 2030 in podvojitve tovnega železniškega prometa do leta 2050. Take potrebe po povečani zmožljivosti železniške infrastrukture predstavljajo velik izziv, še zlasti za starejše premostitvene objekte, ki so bili načrtovani ob drugačnih predpostavkah in manjših prometnih obremenitvah.

Železniški premostitveni objekti so izpostavljeni procesu visokocikličnega utrujanja, ki ga povzročajo ponavljajoče ciklične obremenitve. Načrtovanje večjih zmožljivosti infrastrukture, poleg povečanja osnih pritiskov vlakov, npr. osna obremenitev 25 ton kot dodatna prednostna naloga za razvoj železniške infrastrukture [Zemljič, 2022], pomembno vpliva na povečanje letnega števila vlakov. Take spremembe lahko pospešijo visokociklično utrujanje materiala, ki vodi do nastanka nepovratnih poškodb. Te lahko rezultirajo v predčasno odpoved nosilnega elementa konstrukcije in tako je treba promet omejiti ali celo popolnoma zapreti, kar predstavlja znatne neposredne in posredne gospodarske izgube. V izogib temu mostove redno vizualno pregledujemo. Bolj celovit in sodoben pristop k temu predstavlja vzpostavitev spremljanja konstrukcijskega stanja nosilne konstrukcije (angl. »structural health monitoring« oz. »SHM«), ki s kombinacijo meritev dejanskega odziva in sodobnih pristopov numeričnega modeliranja omogoča odkritje morebitnih problematičnih mest in nevarnih poškodb, še preden bi le-te negativno vplivale na varnost mostu.

Ena izmed zanimivih rešitev za spremljanje konstrukcijskega stanja mostov predstavlja sistem za tehtanje vozil med vožnjo (angl. »bridge weigh-in-motion« oz. »B-WIM«). Po kalibraciji sistema lahko s pomočjo senzorjev, nameščenih na mostu, merimo teže vozil. Tako lahko spremljamo odziv (npr. specifične deformacije med prehodom vozila) kot tudi obtežbo na mostu. To omogoča kalibracijo numeričnih modelov, v primeru dolgotrajnih meritev pa tudi razvoj novih prometnih obtežnih shem na izbranem odseku. Na ta način lahko bolj realno ocenimo preostalo življenjsko dobo mostu na utrujanje, kar upravljavcem infrastrukture predstavlja dodatno informacijo za obravnavanje problematičnih objektov in s tem povezano prednostno planiranje stroškov rednega in investicijskega vzdrževanja.

V tem prispevku je predstavljen primer izračuna preostale življenjske dobe jeklenega železniškega mostu na utrujanje na podlagi izmerjenega odziva. Na izbranem mostu smo v okviru evropskega projekta Assets4Rail [Horizon 2020, 2023] opravili obsežne terenske meritve, s pomočjo katerih smo kalibrirali numerični model. Cilj prispevka je prikazati, kako s podatki spremljanja konstrukcijskega stanja mostu izboljšamo (ne nujno povečamo) napoved preostale življenjske dobe mostu.

2 PREDSTAVITEV MOSTU IN IZVEDENIH MERITEV

2.1 Opis mostu in kritičnih detajlov

V sklopu projekta Asset4Rail [Horizon 2020, 2023] smo izvedli pilotno validiranje metodologije za izboljšanje napovedi preostale življenjske dobe železniških mostov [Anžlin, 2020]. Upravljavac nam je na razpolago ponudil železniški most v Avstriji (glej slike 1 in 2). Gre za jekleni palični most, zgrajen leta 1990, ki ima 10 simetričnih segmentov in skupni razpon 41,67 m. Tirnice so na most nameščene preko lesenih pragov. Prometna obtežba se preko njih prenaša na vzdolžne sekundarne nosilce (angl. »longitudinal beam«, oznaka LB), ki potekajo kontinuirano med sekundarnimi prečnimi nosilci (angl. »transverse beam«, oznaka TB). Sekundarni nosilci so z dodatnimi pločevinami in prednapetimi vijaki povezani na spodnji pas palične konstrukcije (angl. »bottom chord«, oznaka BC). Paličje je tvorjeno s povezavo diagonal z zgornji pasom (angl. »upper chord«, oznaka UC) preko prednapetih vijačenih spojev. Notranje diagonale (angl. »internal diagonal«, oznaka ITD) so I-prereza, medtem ko imajo zunanje diagonale (angl. »external diagonal«, oznaka ETD) škatlasti prečni prerez. Na krajnih opornikih je most podprt prostoležeče z jeklenimi ležišči.

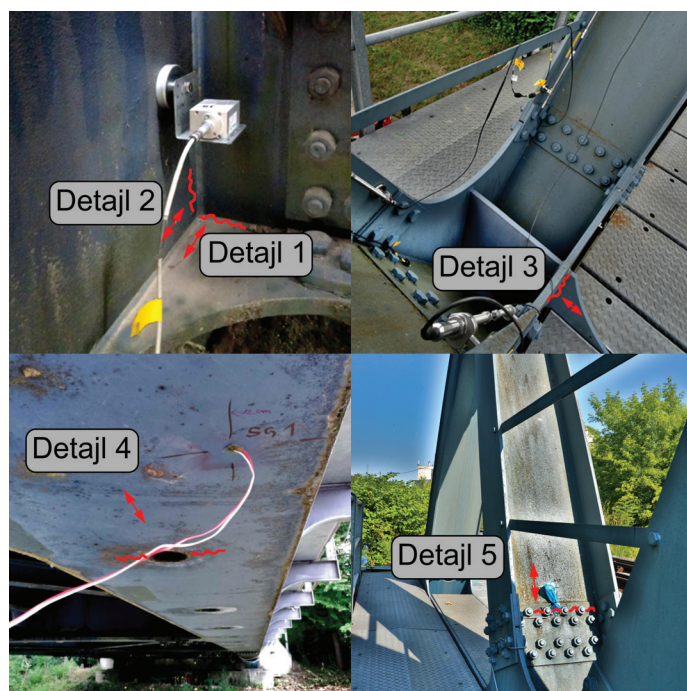


Slika 1. Stranski pogled na jekleni železniški most.

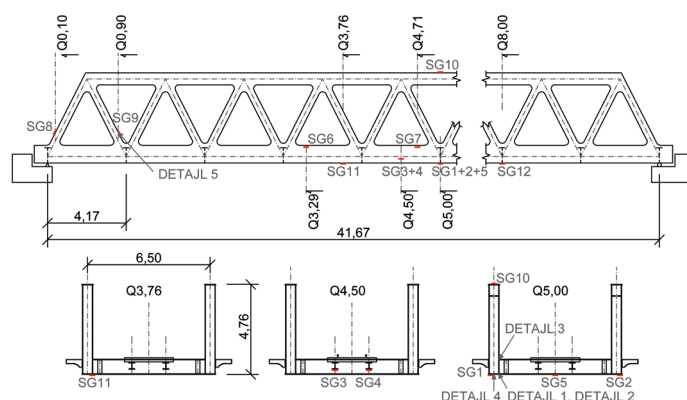


Slika 2. Pogled na spodnji del prekladne konstrukcije jeklenega železniškega mostu.

Na razpolago smo imeli zgolj nekaj delavniških načrtov. Tako ni bilo mogoče ugotoviti projektne obtežbe in predpostavk projektiranja. Na podlagi detajlov spojev smo sklepali, da je bila pri projektiranju problematika utrujanja naslovljena. S stališča utrujanja so bili uporabljeni bolj ugodni spoji s prednapetimi vijaki, s katerimi se izognemo koncentracijam napetosti in zaostalim napetostim zaradi varjenja na gradbišču. Glede na izvedene detajle smo sklepali, da most ne bo izkazoval izrazitih problemov zaradi utrujanja, vendar smo za potrebe validacije in demonstracije metodologije obravnavali pet karakterističnih detajlov. Obravnavani detajli so prikazani na sliki 3. Natančnejši položaj detajlov je razviden s slike 4, ki prikazuje karakteristične prečne prezeze mostu in lokacije senzorjev za meritev specifičnih deformacij. Slednji bodo natančneje obravnavani v poglavju 2.2.



Slika 3. Obravnavani detajli 1, 2, 3, 4 in 5 za kontrolno utrujanje v prečnem prerezu mostu Q5,00 in Q0,90.



Slika 4. Prikaz lokacije merilnih lističev (oznake SG) za meritev specifičnih deformacij na vzdolžnem pogledu in treh prečnih prerezih Q3,76, Q4,50 in Q5,00. Dimenzije konstrukcije so prikazane v metrih.

Za kontrolo utrujanja smo izbrali sklop detajlov na stičišču spodnjega pasu paličja in prečnika na sredi razpona mostu (prerez Q5,00 na sliki 4) in spoj prve natezne diagonale s spodnjim pasom (prerez Q0,90 na sliki 4). Z detajloma 1 in 2 smo obravnavali poškodbo zaradi utrujanja spodnjega pasu paličja zaradi koncentracije napetosti ob zvarih prečnika na glavni nosilec. Detajl 3 upošteva poškodbo zaradi utrujanja ob zvaru ojačitve prečnega nosilca z glavnim nosilcem, medtem ko detajl 4 obravnava koncentracijo napetosti na spodnjem pasu glavnih nosilcev ob luknjah za odvodnjavanje. Za detajl 5 smo upoštevali simetričen vijačeni spoj prve natezne diagonale mostu. Ta se je po preliminarinih analizah izkazal za najbolj obremenjenega. Spoja sekundarnega vzdolžnega nosilca s prečnikom nismo natančneje obravnavali, saj smo na podlagi preliminarne analize ugotovili [Anžlin, 2020], da je manj kritičen od spoja prečnika z glavnim nosilcem (detajl 3).

Nosilnost posameznih detajlov na utrujanje smo definirali z izbiro ustrezne kategorije detajlov v skladu s preglednico 8.4 iz SIST EN 1993-1-9 [SIST, 2005]. Izbrane kategorije detajlov so prikazane v preglednici 1.

Detajl	Opis	Kategorija
1, 2	Spodnji pas, vpliv zvara prečnega nosilca	80
3	Prečni nosilec, vpliv zvara ojačitve	36
4	Spodnji pas, vpliv lukenj za odvodnjavanje	90
5	Diagonala, vpliv spoja s prednapetimi vijaki	112

Preglednica 1. Izbrane kategorije detajlov za kontrolno utrujanje.

2.2 Izvedene terenske meritve

Obsežne terenske meritve vključujejo meritve specifičnih deformacij pri prehodu vlakovne kompozicije in meritve vibracij konstrukcije s pomočjo pospeškometrov. Meritve specifičnih deformacij smo izvedli ob t. i. mehki obremenilni preizkušnji (angl. »soft load testing«). Ta se v nasprotju s klasično obremenilno preizkušnjo izvede pri tekočem prometu in ne potrebuje zapore. V ta namen je bila uporabljena kalibracijska vlakovna kompozicija znane teže, ki je bila sestavljena iz dvoosne lokomotive, dveh štiriosnih vagonov in enega dvoosnega vagona. Meritve specifičnih deformacij smo izvedli z 12 merilnimi lističi (angl. »strain gauge«, oznaka SG), ki smo jih namestili na vse glavne nosilne elemente, kot je razvidno na sliki 4.

Kalibracijske vožnje v okviru mehke obremenilne preizkušnje so obsegale 118 prehodov vlakovne kompozicije znanih osnih pritiskov in medosnih razdalj. Hitrosti prehodov so se gibale od nekaj km/h do 40 km/h. Na podlagi opravljenih meritev smo izvedli tudi kalibracijo sistema tehtanja med vožnjo po sistemu B-WIM.

Na mostu smo opravili meritve tudi pri obremenitvi z dvema elektromehanskima vzbujevalnikoma, ki sta na most vnašala harmonično nihanje v različnem razponu frekvenc (slika 5). Dinamični odziv mostu smo izmerili z uporabo pospeškometrov. V tem prispevku smo za kalibracijo numeričnega modela uporabili prvih 10 nihajnih oblik mostu iz poročila projekta

Assets4Rail [Anžlin, 2020]. Le-te so bile določene z obdelavo meritev dinamičnega odziva s postopkom obratovalne modalne analize [Brincker, 2015].



Slika 5. Lokaciji vzbujevalnikov za meritev dinamičnega odziva.

2.3 Rezultati terenskih meritev

2.3.1 Meritve psevdostatičnega odziva

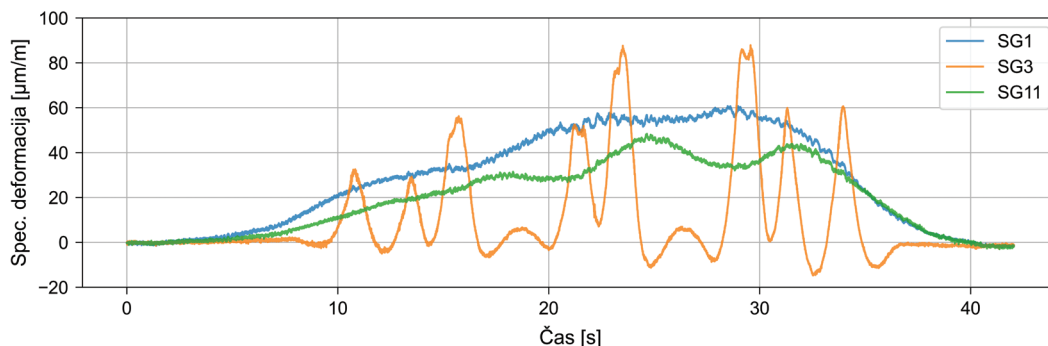
Pri vsakem prehodu vlakovne kompozicije smo v izbranih senzorjih beležili časovno spreminjanje specifičnih deformacij. Primer izmerjenega odziva pri počasnem prehodu kalibracijske vlakovne kompozicije (hitrost prehoda 5 km/h) za senzorja

SG1 in SG11 na glavnih nosilcih in senzor SG3 na sekundarnem vzdolžnem nosilcu je prikazan na sliki 6. Zaradi počasne hitrosti prehoda meritev predstavlja psevdostatični odziv mostu. Ob predpostavki konstantne hitrosti prehoda vlakovne kompozicije smo za potrebe kalibracije numeričnega modela meritve pretvorili iz časovne v krajevno domeno. Položaj vlaka je bil v našem primeru definiran s položajem prve osi vlakovne kompozicije glede na začetek mostu. Primer krajevnega odziva za senzorja SG1 in SG11 na glavnih nosilcih in senzor SG3 na sekundarnem vzdolžnem nosilcu je prikazan na sliki 7.

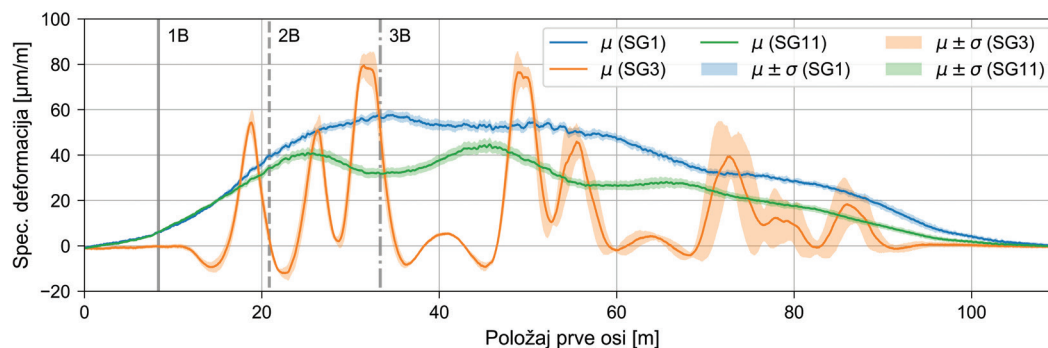
Za kalibracijo numeričnega modela na izmerjeni odziv smo iz skupine 118 prehodov izbrali podmnožico 9 počasnih prehodov vlakovne kompozicije, ki ponazarjajo psevdostatični odziv konstrukcije. Upoštevali smo vožnje s čim bolj enakomerno hitrostjo, s čimer smo zmanjšali morebitno nenatančnost pretvorbe signalov iz časovne v krajevno domeno. Za vhodni podatek za kalibracijo numeričnega smo upoštevali povprečne specifične deformacije iz podmnožice 9 izbranih prehodov

Položaj	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG8	SG9	SG10	SG11	SG12
1B	6,2	6,4	-0,3	-0,6	-2,9	-15,1	10,6	-4,3	6,0	-2,1
2B	39,9	40,6	3,3	4,3	46,6	-46,7	38,9	-32,1	34,3	-1,2
3B	56,9	59,8	52,1	46,3	103,7	-43,1	35,5	-47,5	31,8	45,6

Preglednica 2. Povprečne vrednosti specifičnih deformacij [$\mu\text{m/m}$] za kalibracijo modela na psevdostatični odziv.



Slika 6. Časovni odziv za senzorja na glavnem nosilcu (SG1 in SG11) in senzor na sekundarnem vzdolžnem nosilcu (SG3) pri počasnem prehodu vlakovne kompozicije (hitrost 5 km/h).

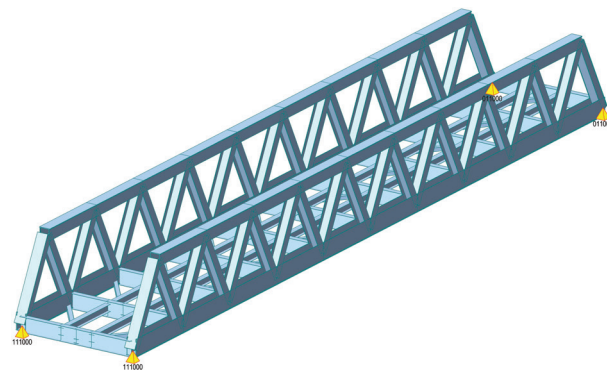


Slika 7. Prikaz statistike krajevnega odziva (povprečje μ in raztros σ) za senzorja na glavnem nosilcu (SG1 in SG11) in senzor na sekundarnem vzdolžnem nosilcu (SG3) za počasne prehode vlakovne kompozicije ter položaje vlakov (oznake 1B, 2B in 3B), uporabljenih za kalibracijo numeričnega modela.

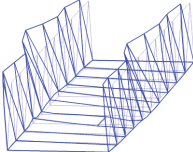
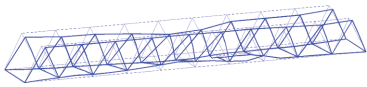
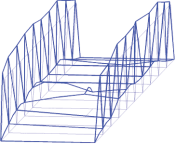
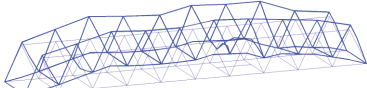
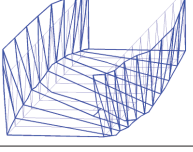
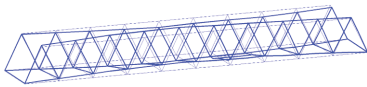
(slika 7). Odstopanje med izračunanim in izmerjenim odzivom smo primerjali za tri položaje vlakovne kompozicije, ki so na sliki 7 označeni z 1B, 2B in 3B. Povprečne vrednosti specifičnih deformacij za kalibracijo modela na psevdostatični odziv so povzete v preglednici 2.

2.3.2 Meritve dinamičnega odziva

Na podlagi meritev dinamičnega odziva je bilo za most določenih prvih 10 lastnih frekvenc in nihajnih oblik [Anžlin, 2020]. Prve tri najbolj karakteristične nihajne oblike mostu s pripadajočimi lastnimi frekvencami so prikazane v preglednici 3. Za kalibracijo numeričnega modela smo upoštevali samo lastne frekvence. Ujemanje nihajnih oblik smo ocenili kvalitativno.



Slika 8. Začetni numerični model v programu midas Civil.

Lastna frekvenca [Hz]	Nihajna oblika		
	Opis	Pogled 1	Pogled 2
3,43	1. nihajna oblika, prečno nihanje zgornjega pasu		
5,40	2. nihajna oblika, upogibno nihanje		
7,66	3. nihajna oblika, torzijsko nihanje		

Preglednica 3. Prikaz prvih treh nihajnih oblik mostu s pripadajočimi lastnimi frekvencami (povzeto po [Anžlin, 2020]).

3 METODOLOGIJA

3.1 Numerično modeliranje

Za modeliranje mostu smo uporabili linijski numerični model. Začetni numerični model smo izdelali v programu midas Civil [MIDAS, 2023]. Geometrijo mostu in karakteristične prečne prezeze smo določili na podlagi razpoložljive projektne dokumentacije. V začetni numerični model smo vključili samo glavne nosilne elemente. Sekundarnih elementov, npr. prago in tirnic, nismo modelirali. Numerični model v programu midas Civil je prikazan na sliki 8.

Za lažjo parametrizacijo modela smo numerični model iz programa midas Civil uvozili v programsko okolje Python3 [Python, 2023]. V ta namen smo uporabili knjižnico OpenSeesPy [Zhu, 2021], ki predstavlja tolmača Python3 (angl. »interpreter«) za program za analizo konstrukcij OpenSees [OpenSees, 2021]. Za potrebe uvoza modela smo razvili sklop funkcij Python, ki preberejo numerični model iz programa midas

Civil in v novem okolju generirajo ekvivalenten model. Prednost tega orodja je, da poleg numerične zmogljivosti omogoča popolno parametrizacijo modela in uporabo zmogljivih optimizacijskih algoritmov (knjižnica SciPy »minimize« [SciPy, 2023]). Vse študije v tem prispevku so rezultat analiz OpenSeesPy.

3.2 Kalibracije numeričnega modela na izmerjeni odziv

Kalibracija numeričnega modela v širšem smislu sledi postopku, ki so ga predlagali [Schlune, 2009], in predvideva tri osnovne korake:

- ročna kalibracija numeričnega modela na podlagi inženirske presoje;
- samodejna kalibracija modela na podlagi nelinearne optimizacije;
- ovrednotenje numeričnega modela.

Prvi korak kalibracije predstavlja empirično dopolnjevanje in spreminjanje numeričnega modela na podlagi primerjave z izmerjenim odzivom. Primer ročne kalibracije modela je npr.

vkjučitev modeliranja nekonstrukcijskih elementov (npr. železniških pragov in tirnic), če se izkaže, da le-te bistveno vplivajo na odziv mostu. Pogosto v tem koraku upoštevamo dejanske (srednje) karakteristike materialov namesto karakterističnih vrednosti, ki se običajno uporabijo pri projektiranju.

Drugi korak kalibracije je samodejna kalibracija numeričnega modela na podlagi nelinearne optimizacije izbranih spremenljivk modela. Cilj tega koraka je določitev optimalne kombinacije vhodnih spremenljivk, ki privedejo do najboljšega ujemanja z izmerjenim odzivom. Najboljše ujemanje med izračunanim in izmerjenim odzivom merimo s t. i. namensko funkcijo (oznaka J), ki jo znotraj optimizacijskega postopka minimiziramo. Za definicijo namenske funkcije obstaja več možnosti. V okviru te študije smo namensko funkcijo definirali sledeče:

$$J = \sum_i \frac{(z_n(i) - z_e(i))^2}{\sigma_e(i)^2}, \quad (1)$$

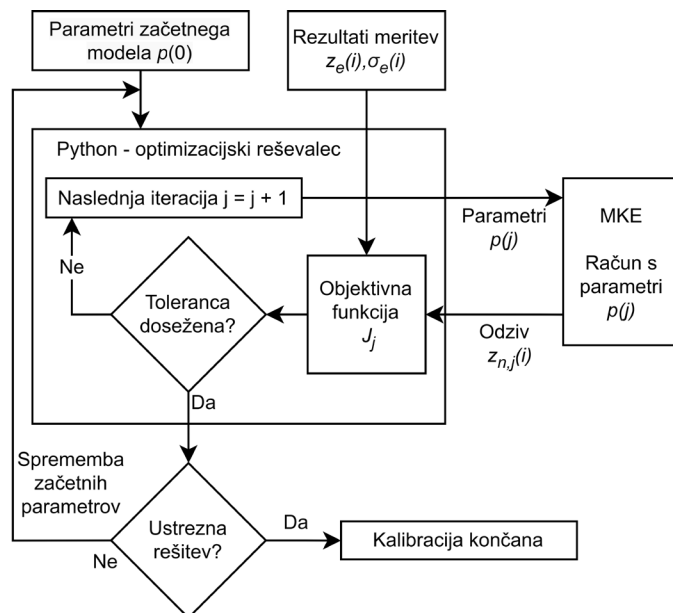
kjer je $z_n(i)$ izračunani odziv iz numeričnega modela, $z_e(i)$ je izmerjeni odziv in $\sigma_e(i)$ je standardna deviacija i -te meritve (senzorja). Normalizacija odstopanj glede na standardno deviacijo meritve služi za zmanjšanje vpliva meritev, za katere je značilna večja negotovost.

Namensko funkcijo smo določili na podlagi različnih fizikalnih količin. Tako smo npr. za kalibracijo na podlagi dinamičnega odziva definirali namensko funkcijo J_e , v kateri smo upoštevali prvih 10 izračunanih in izmerjenih lastnih frekvenc. Pri tej optimizaciji smo torej obravnavali 10 različnih parametrov. Poleg tega smo kalibracijo modela opravili tudi na podlagi psevdostatičnega odziva pri prehodu kalibracijske vlakovne kompozicije. V ta namen smo vpeljali namensko funkcijo J_e , ki je določena na podlagi razlike med izračunanimi in izmerjenimi specifičnimi deformacijami za 10 izbranih senzorjev. Upoštevali smo tri pozicije vlakovne kompozicije (glej poglavje 2.3.1), kar skupaj predstavlja optimizacijo za 30 različnih parametrov. Dodatno smo analizirali tudi kombinirano namensko funkcijo (J_{e+e}), kjer smo hkrati optimizirali lastne frekvence in specifične deformacije. Namensko funkcijo smo določili kot utežen seštevek J_e in J_e , pri čemer smo namenski funkciji za specifične deformacije empirično pripisali večjo težo (75 % celotne vrednosti namenske funkcije začetnega modela), saj so te direktno povezane s spremembo napetosti za račun utrujanja. Tako formulirana optimizacija je bila najbolj obsežna, saj smo na koncu obravnavali 40 različnih parametrov.

Učinkovitost nelinearne optimizacije smo preverjali z več optimizacijskimi algoritmi, npr. SLSQP, L-BFGS-B in TNC, ki so na voljo v optimizacijski SciPy-knjižnici »minimize« [SciPy, 2023]. V okviru prikazane študije so predstavljeni le rezultati algoritma SLSQP, saj so bili rezultati pri ostalih dveh algoritmičnih podobni. Metoda SLSQP [Kraft, 1988] omogoča definicijo območja vrednosti vhodnih spremenljivk (angl. »bound-constrained optimization«), s katerim zagotovimo, da so vrednosti spremenljivk numeričnega modela znotraj pričakovanih meja.

Postopek samodejne optimizacije je prikazan na sliki 9. V prvem koraku najprej izberemo začetne približke za izbrane spremenljivke ($p(0)$) in območje, znotraj katerega iščemo optimalno rešitev problema. Optimizacijski algoritem nato samodejno spreminja vhodne spremenljivke numeričnega modela ($p(j)$), požene izračun numeričnega modela in določi

novi vrednost namenske funkcije. Postopek se nadaljuje, dokler optimizacijski algoritem ne doseže izbrane tolerance. Sledi evalvacija numeričnega modela in določitev parametrov kalibriranega modela. V primeru, da izbrana rešitev ni inženirsko sprejemljiva, se postopek optimizacije ponovi.



Slika 9. Postopek za samodejno kalibracijo.

Izbiro vhodnih spremenljivk za kalibracijo numeričnega modela smo opravili na podlagi predhodne analize občutljivosti. Osredotočili smo se na parametre modela z največjim vplivom na odziv. Izbranih 6 vhodnih spremenljivk, skupaj z območjem, znotraj katerega se išče rešitev optimizacijskega problema, je prikazanih v preglednici 4. Za določitev sprejemljivega intervala spremenljivk smo uporabili priporočila iz literature in inženirsko presojo. Variacijo elastičnega modula in mase smo upoštevali na nivoju celotne konstrukcije (spremenljivki f_E in f_{mass}), medtem ko smo variacijo togosti elementov, tj. geometrijskih karakteristik prečnih prereзов ($A, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$), upoštevali

Spremenljivka	Oznaka	Interval spremenljivke
Elastični modul jekla	$2,1 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2 \cdot f_E$	$f_E \in [0,99; 1,01]$
Masa	$Izračunana \cdot f_{mass}$	$f_{mass} \in [0,95; 1,05]$
$A, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$ elementov ETD	Nominalna $\cdot f_{K,ETD}$	$f_{K,ETD} \in [0,96; 1,04]$
$A, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$ elementov UC	Nominalna $\cdot f_{K,UC}$	$f_{K,UC} \in [0,96; 1,04]$
$A, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$ elementov BC	Nominalna $\cdot f_{K,BC}$	$f_{K,BC} \in [0,96; 1,04]$
$A, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$ elementov ITD	Nominalna $\cdot f_{K,ITD}$	$f_{K,ITD} \in [0,96; 1,04]$

Preglednica 4. Izbrane spremenljivke in upoštevan interval vrednosti za kalibracijo numeričnega modela.

po posameznih konstrukcijskih sklopih (ETD, UC, BC, ITD). Variacija togosti prečnih nosilcev (TB) in sekundarnih vzdolžnih nosilcev (LB) se je na podlagi analize občutljivosti izkazala za manj pomembno, zato teh spremenljivk nismo upoštevali za kalibracijo numeričnega modela.

3.3 Ocena preostale življenjske dobe na utrujanje

Preostalo življenjsko dobo na utrujanje izbranih detajlov smo ocenili s postopkom iz aneksa A standarda SIST EN 1993-1-9 [SIST, 2005]. Ocena temelji na izračunu projektne letne akumulirane poškodbe izbranega detajla po Palmgren-Minerjevi linearni metodi:

$$D_{d,1} = \sum_i^n \frac{n_{Ei,1}}{N_{Ri}} \quad (2)$$

kjer je $n_{Ei,1}$ letno število ciklov z razliko napetosti $\gamma_{ff} \Delta \sigma_i$ in N_{Ri} je vzdržljivost (v ciklih), določena iz faktorirane krivulje trdnosti utrujanja $\Delta \sigma_c / \gamma_{mf} \cdot N_{Rc}$ pri razliki napetosti $\gamma_{ff} \Delta \sigma_c$.

Krivulje trdnosti utrujanja smo privzeli iz SIST EN 1993-1-9 [SIST, 2005] v skladu s kategorijami detajlov iz preglednice 1 (glej poglavje 2.1). Za delni varnostni faktor za razliko napetosti smo skladu s SIST-EN-1993-2 [SIST, 2007] upoštevali $\gamma_{ff}=1,0$, medtem ko smo delni varnostni faktor za odpornost proti utrujanju privzeli $\gamma_{mf}=1,35$ po preglednici 3.1 iz SIST EN 1993-2 [SIST, 2007]. Vrednost γ_{mf} ustreza pristopu, ki ne dopušča nastanka velikih poškodb, in velikim posledicam porušitve detajla.

Za čim boljše oceno preostale življenjske dobe obstoječe konstrukcije na utrujanje potrebujemo podatke o preteklih (zgodovino ciklov) in prihodnjih (napoved ciklov) prometnih obremenitvah. Poškodbe zaradi utrujanja analogno ločimo na vrednost skupne akumulirane poškodbe preteklega in prihodnjega obratovalnega režima. Ko je vsota enaka 1,0, govorimo o porušitvi zaradi utrujanja:

$$D_d = \sum_r^{Nr} T_{SL,r} D_{d,1,r} + T_{RFL,d} D_{d,1,f} = 1,0, \quad (3)$$

kjer indeks r prestavlja r -ti pretekli obratovalni režim s trajanjem $T_{SL,r}$ let, Nr je število preteklih režimov in $D_{d,1,r}$ je letna akumulacija poškodbe za r -ti režim. Preostalo projektno življenjsko dobo na utrujanje $T_{RFL,d}$ tako določimo s preureditvijo enačbe (3):

$$T_{RFL,d} = \frac{1,0 - \sum_r^{Nr} T_{SL,r} D_{d,1,r}}{D_{d,1,f}}, \quad (4)$$

kjer je $D_{d,1,f}$ letna akumulacija poškodbe za prihodnji obratovalni režim. V tej študiji smo predpostavili enak prometni režim v preteklem in prihodnjem obratovalnem obdobju. Tako se enačba (4) poenostavi:

$$T_{RFL,d} = \frac{1}{D_{d,1,1}} - T_{SL,1} = \frac{1}{D_{d,1}} - T_{SL}, \quad (5)$$

pri čemer lahko indeks obratovalnega režima opustimo zaradi krajšega zapisa.

Obremenitve (spremembe napetosti) v obravnavanih detajlih smo določili z analizo odziva mostu na prometno obtežbo iz aneksa D standarda SIST EN 1991-2 [SIST, 2004]. Za kontrolo utrujanja standard glede na tipologijo prometa definira tri

prometne režime, in sicer standardni, lahek in težek promet. Vsak ima določene različne vlakovne kompozicije, ki vsebujejo podatke o medosnih razdaljah, osnih pritiskih in letnim številom vlakov ter količino letno pretvorjenega blaga.

Kriteriji za uporabo statične in dinamične analize so navedeni v točki 6.4.4. standarda SIST EN 1991-2 [SIST, 2004]. Ker obravnavani most izpolnjuje kriterije za poenostavljeno statično analizo, smo obremenitve v obravnavanih detajlih pomnožili z dinamičnim faktorjem za prometno obtežbo φ . Ta se v skladu z aneksom D standarda SIST EN 1991-2 [SIST, 2004] določi kot:

$$\varphi = 1 + 0,5(\varphi' + 0,5\varphi'') \quad (6)$$

Za oceno utrujanja in hitrosti vlakov manj od 200 km/h se faktorja φ' in φ'' določita z naslednjima poenostavljenima izrazoma:

$$\varphi' = \frac{K}{1 - K + K^4}, \quad (7)$$

$$\varphi'' = 0,56 e^{-\frac{L^2}{100}}, \quad (8)$$

kjer je:

$$K = \frac{v}{160} \quad \text{za } L \leq 20 \text{ m}, \quad (9)$$

$$K = \frac{v}{47,16 L^{0,408}} \quad \text{za } L > 20 \text{ m}. \quad (10)$$

Koeficient K je odvisen od maksimalne dovoljene hitrosti vlakov na progi (v) in vplivne dolžine elementa (L), ki se določi v skladu s točko 6.4.5.3 iz SIST EN 1991-2 [SIST, 2004]. Vplivna dolžina je odvisna od obravnavanega elementa, zato je v splošnem dinamični faktor različen za različne detaje.

Za uporabo enačbe (2) je treba iz izračunanega odziva izračunati ekvivalentno število ciklov z razliko napetosti $\Delta \sigma_i$. V ta namen smo uporabili metodo Rainflow Counting [Sunder, 1984], ki izračuna spekter razlik napetosti, s pomočjo katerega lahko določimo zvezo med $\Delta \sigma_i$ in n_i . Letno število ciklov $n_{Ei,1}$ za razliko napetosti $\Delta \sigma_i$ smo izračunali kot produkt števila ciklov zaradi prehoda posameznega vlaka in letnega števila vlakov:

$$n_{Ei,1} = \sum_t^{N_t} N_{tr,t} n_{i,t}, \quad (11)$$

kjer indeks t prestavlja vlak iz skupine N_t vlakov za izbran prometni režim (npr. standardni, lahek in težek promet), $N_{tr,t}$ je letno število vlakov tipa t in $n_{i,t}$ je ekvivalentno število ciklov $\Delta \sigma_i$ pri prehodu enega vlaka tipa t . Ocenjene vrednosti $n_{Ei,1}$ se nato upoštevajo v enačbi (1) za oceno letne akumulacije poškodbe, ki se nato uporabi za oceno preostale življenjske dobe na utrujanje z enačbo (4) ali (5).

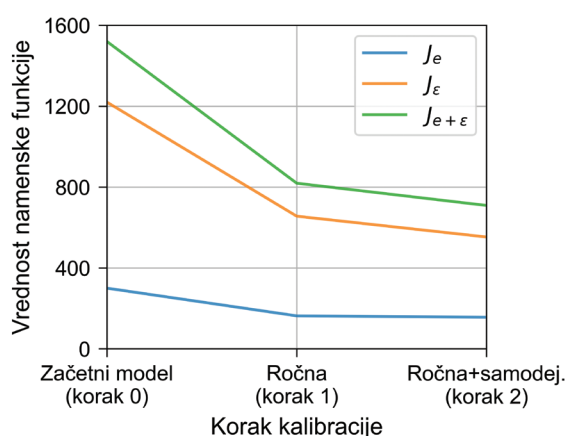
4 REZULTATI

4.1 Kalibracija numeričnega modela

Rezultati kalibracije numeričnega modela so vrednosti spremenljivk, ki privedejo do najboljšega ujemanja med napovedjo numeričnega modela in meritvami. Ujemanje rezultatov merimo z vrednostjo namenske funkcije, kjer manjša vrednost predstavlja boljše ujemanje med odzivom numeričnega modela in meritvami.

Na sliki 10 je prikazano spreminjanje vrednosti namenskih funkcij v posameznih korakih kalibracije. V prvem koraku smo opravili ročno kalibracijo numeričnega modela, pri kateri smo, v želji po izboljšanju ujemanja odziva numeričnega modela in meritev, vpeljali naslednje spremembe:

- neposredno smo modelirali pragove in tirnice, s čimer smo zagotovili natančnejšo simulacijo prenosa prometne obtežbe na mostno konstrukcijo;
- na podlagi analize vpliva robnega pogoja na koncu tirnice smo upoštevali, da so tirnice na koncih mostu polno vpete, s čimer smo bolj natančno modelirali tirnico, ki poteka kontinuirano čez most do tirne grede pred mostom;
- z dodajanjem vertikalnih togih elementov pri podporah glavnih nosilcev smo upoštevali bolj natančno lokacijo podpor, tj. na spodnji pasnici glavnih nosilcev in ne v težiščni osi.



Slika 10. Vrednosti namenskih funkcij v posameznih korakih kalibracije numeričnega modela.

Kot je razvidno s slike 10, smo z ročno kalibracijo dosegli najbolj občutno izboljšanje numeričnega modela, saj so se vrednosti vseh treh namenskih funkcij zmanjšale za kar 45 %. Največji učinek je imelo neposredno modeliranje pragov in tirnic. Tako ugotavljamo, da lahko nekonstrukcijski elementi, čeprav jih pri projektiranju pogosto ne upoštevamo, pomembno vplivajo na izmerjeni odziv nosilne konstrukcije.

V zadnjem koraku smo s samodejno kalibracijo numeričnega modela še dodatno zmanjšali vrednosti namenskih funkcij (slika 10). V primeru namenskih funkcij, določenih na podlagi specifičnih deformacij (J_e) in kombinirane namenske funkcije ($J_{e+\epsilon}$), so se vrednosti namenskih funkcij zmanjšale za dodatnih 15 %. Za J_e je bilo zmanjšanje nekoliko manjše. Skupno zmanjšanje vrednosti namenskih funkcij je glede na začetni model znašalo najmanj 48 %.

Iz preglednice 5 je razvidno, kako optimizacija za različne tipe odziva vpliva na vrednost namenske funkcije in končne vrednosti spremenljivk kalibriranega modela. Te so različne za optimizacijo na različne formulacije namenske funkcije. Tako na primer kalibracija na podlagi lastnih frekvenc in specifičnih deformacij privede do nasprotujočih rezultatov, kar je najverjetneje posledica omejitev numeričnega modela. Pri interpretaciji rezultatov je zato pomembna inženirska presoja.

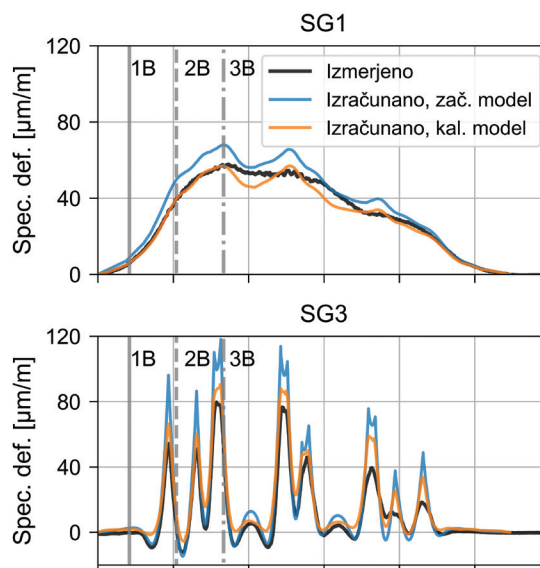
Namenska funkcija	Vrednosti namenskih funkcij		Končne vrednosti spremenljivk					
	J_{init}	J_{fin}	f_E	f_{mass}	$f_{K,ETD}$	$f_{K,UC}$	$f_{K,BC}$	$f_{K,ITD}$
J_e	163	150	0,99	1,00	1,04	1,04	0,96	1,04
J_ϵ	656	551	1,01	1,00	0,96	1,04	1,01	1,04
$J_{e+\epsilon}$	819	709	1,01	1,02	0,96	1,04	0,98	1,04

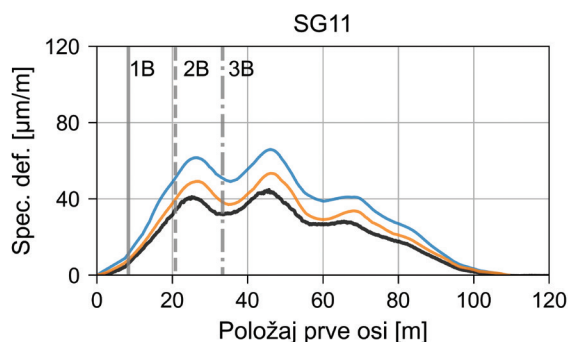
Preglednica 5. Začetne in končne vrednosti namenskih funkcij in končne vrednosti spremenljivk kalibriranega modela.

Za napoved preostale življenjske dobe na utrujanje je pomembna natančna napoved spremembe napetosti, ki je direktno povezana s spremembo specifične deformacije. S tega stališča je za namen naše študije kalibracija na specifične deformacije bolj relevantna kot kalibracija na lastne frekvence. Slednja je bila uporabljena zato, da bi kalibriran numerični model odražal tudi dobro ujemanje z globalnim odzivom, ki ga modalni parametri bolje opišejo. Kompromis je uporaba kombinirane namenske funkcije, ki omogoča upoštevanje obeh tipov podatkov. Z ustrezno definicijo uteži pa lahko zagotovimo, da je pri kalibraciji večja teža upoštevana pri količini z večjim pomenom za končni cilj. Za najbolj relevantno smo upoštevali kalibracijo na podlagi kombinirane namenske funkcije, na podlagi katere smo definirali končne vrednosti spremenljivk kalibriranega modela. Vsi rezultati v nadaljevanju so bili tako določeni z uporabo kombinirane namenske funkcije.

4.2 Primerjava odziva začetnega in kalibriranega modela

Primerjavo odziva začetnega in kalibriranega modela z meritvami smo izvedli tako za specifične deformacije kot tudi za lastne frekvence. Na sliki 11 je prikazana primerjava izmerjenih in izračunanih specifičnih deformacij z začetnim in kalibriranim modelom za primer dveh senzorjev. Senzorja SG1 in SG11 sta locirana na spodnjem robu spodnjega pasa (BC) na sredini razpona, senzor SG3 pa je lociran na vzdolžnem sekundarnem nosilcu (LB).





Slika 11. Primerjava izmerjenih in izračunanih specifičnih deformacij v senzorjih na glavnem nosilcu (SG1 in SG11) in senzorju na sekundarnem vzdolžnem nosilcu (SG3) z začetnim in kalibriranim numeričnim modelom za J_{e+e} .

Kot je razvidno s slike 11, je začetni model precenil deformacije v obravnavanih senzorjih, kar je bil trend tudi pri ostalih senzorjih, ki jih zaradi omejitve obsega ne prikazujemo. Kalibrirani numerični model je bistveno zmanjšal odstopanje v primerjavi z izmerjenim odzivom. Za večino obravnavanih senzorjev je bilo odstopanje specifičnih deformacij manjše od 20 %. V modelu je sicer glede na meritve prisotne še nekaj skrite rezerve, ki pa je kljub kalibraciji modela nismo zmogli odpraviti. To je razvidno v primeru senzorjev SG3 in SG11 na sliki 11. Pri tem poudarjamo kompleksnost zastavljenega optimizacijskega problema, saj je bilo število kalibriranih parametrov zajetno, tj., želeli smo poiskati 6 spremenljivk numeričnega modela, ki za 40 različnih parametrov odziva (10 lastnih frekvenc in 30 vrednosti specifičnih deformacij) privede do najmanjše razlike med izračunanim in izmerjenim odzivom.

V preglednici 6 je prikazana primerjava izmerjenih in izračunanih lastnih frekvenc z začetnim in kalibriranim modelom. Kot je razvidno iz preglednice, smo s procesom kalibra-

Nihajna oblika	Izmerjena frekvenca [Hz]	Izračunana frekvenca [Hz]	
		Začetni model	Kalibrirani model
1	3,43	3,63	3,69
2	5,40	5,39	5,67
3	7,66	7,24	7,33
4	9,99	9,74	9,80
5	12,19	11,98	12,05
6	12,97	12,41	12,52
7	14,20	14,49	14,56
8	15,96	14,86	16,04
9	16,83	16,36	16,73
10	21,95	19,28	20,75

Preglednica 6. Primerjava izmerjenih in izračunanih lastnih frekvenc z začetnim in kalibriranim modelom za J_{e+e} .

cije lahko bistveno zmanjšali napako pri napovedi lastnih frekvenc. Največje odstopanje med meritvijo in napovedjo modela se je zmanjšalo z 12 % na 7 %, medtem ko se je povprečno odstopanje zmanjšalo iz -3 % na skoraj 0 %. Poudariti velja, da je v procesu kalibracije prišlo do povečanja napake pri napovedi prvih dveh lastnih frekvenc. To je posledica optimizacije velikega števila lastnih frekvenc in izbrane utežitve kombinirane namenske funkcije, kjer smo večjo vlogo pripisali deformacijam, ki so za kontrolo utrujanja bolj pomembne.

4.3 Primerjava preostale življenjske dobe na utrujanje na podlagi začetnega in kalibriranega modela

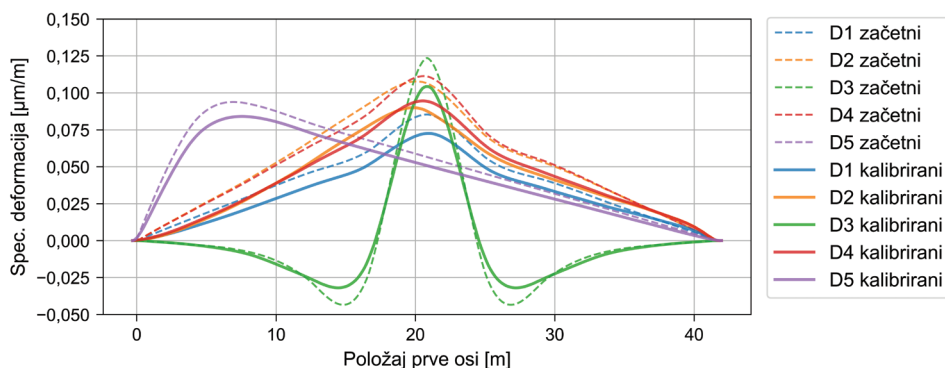
V tem poglavju prikazujemo primerjavo ocene preostale življenjske dobe na utrujanje na podlagi začetnega in kalibriranega modela. Na ta način želimo demonstrirati prispevek meritev dejanskega odziva. Ker za most nismo imeli na razpolago dejanskih podatkov o preteklem in prihodnjem prometu, smo za potrebe študije predpostavili enotni prometni režim za celotno obratovalno obdobje. Oceno preostale življenjske dobe na utrujanje smo tako izvedli po enačbi (5). Za oceno vpliva različnih prometnih obtežb smo v analizi upoštevali dva prometna režima, in sicer standardni promet in težki tovorni promet v skladu z aneksom D standarda SIST EN 1991-2 [SIST, 2004].

Za lažjo interpretacijo prispevka kalibracije numeričnega modela na oceno utrujanja na sliki 12 najprej prikazujemo primerjavo vplivnic specifičnih deformacij obravnavanih detajlov, ki služijo kot vhodni podatek za izračun razlike napetosti v kritičnih detajlih pri prehodu vlakovne kompozicije. Izračun temelji na principu superpozicije, pri čemer smo predpostavili linearni odziv konstrukcije. Transformacijo iz specifičnih deformacij v napetosti smo izvedli z upoštevanjem elastičnega modula jekla 210 GPa.

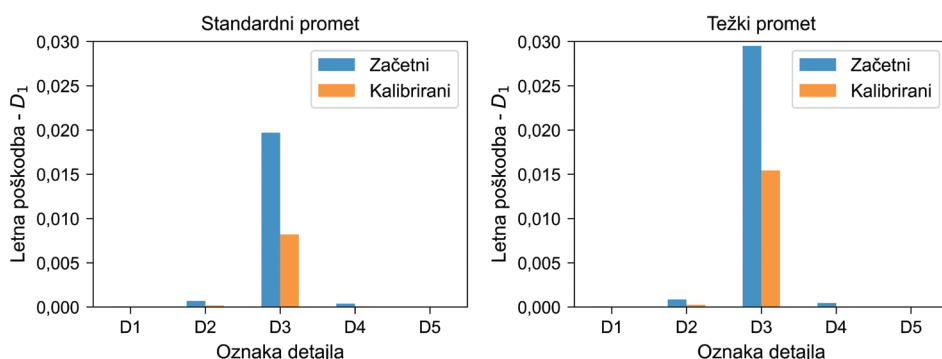
S slike 12 je razvidno, da kalibrirani numerični model izkazuje manjšo spremembo specifičnih deformacij od začetnega numeričnega modela. Glede na navedeno je pričakovati, da bo tudi sprememba napetosti v obravnavanih detajlih manjša, kar predstavlja ugoden učinek na oceno preostale življenjske dobe na utrujanje.

Na sliki 13 je prikazana primerjava letnih akumuliranih poškodb za izbrane detajle z uporabo začetnega in kalibriranega modela ter dveh prometnih režimov. Na levi strani so prikazani rezultati za standardni promet, medtem ko so na desni strani prikazani rezultati za težek tovorni promet.

Pri oceni utrujanja bistveno izstopa detajl 3 (slika 13), za katerega je značilna največja letna akumulacija poškodbe utrujanja. Rezultat je posledica nizke odpornosti proti utrujanju v primerjavi s preostalimi detajli, kar je razvidno tudi iz primerjave kategorije detajlov v preglednici 1. Akumulacija letne poškodbe v ostalih detajlih je bistveno manjša. Detajl 3 zato predstavlja kritični detajl za oceno preostale življenjske dobe mostu.



Slika 12. Primerjava vplivnic specifičnih deformacij v obravnavanih detajlih za začetni in kalibrirani numerični model za $J_{e+e'}$



Slika 13. Primerjava letne akumulirane poškodbe za izbrane detajle z upoštevanjem začetnega in kalibriranega numeričnega modela za standardni (levo) in težki tovorni promet (desno).

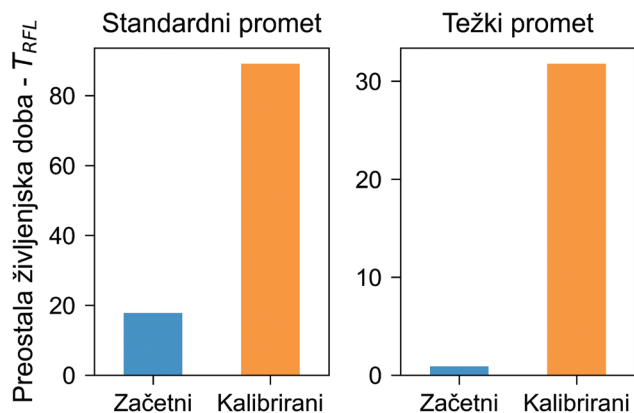
Standardni promet pričakovano privede do manjše letne akumulacije poškodbe kot težki tovorni promet. Pomemben rezultat prikazane študije je, da smo s kalibriranim modelom dosegli od 50 % do 60 % manjšo akumulacijo poškodbe v detajlu 3. Rezultat je posledica manjše precenjenosti spremembe napetosti v detajlu zaradi kalibracije numeričnega modela na izmerjeni odziv.

Na sliki 14 prikazujemo primerjavo preostale življenjske dobe na utrujanje za začetni in kalibrirani numerični model za dva prometna režima. Z uporabo začetnega modela smo za standardni promet ocenili preostalo življenjsko dobo 17 let. Z izvedbo terenskih meritev in kalibracijo numeričnega modela na izmerjeni odziv je preostala življenjska doba znašala 89 let. Podobno velja tudi v primeru težkega tovornega prometa, kjer je preostala življenjska doba z začetnim modelom znašala zgolj eno leto, medtem ko smo z uporabo kalibriranega modela računsko preostalo življenjsko dobo povečali na 32 let.

V danem primeru zaradi izvedenih meritev in kalibracije ne bi predpisali dodatnih intervencijskih ukrepov. Za most predlagamo nadaljnje opravljanje obdobjnih pregledov s poudarkom na identificiranih kritičnih detajlih.

5 SKLEP

V tem članku smo za jekleni železniški most v Avstriji pokazali, kako lahko s pomočjo kalibracije numeričnega modela na izmerjeni odziv bistveno izboljšamo oceno preostale življenjske dobe mostu na utrujanje. Kalibracija temelji na psevdostatističnih meritvah specifičnih deformacij ob prehodu vlakovne kompozicije znane teže in nihajnih časih konstrukcije, določenih s pomočjo meritev dinamičnega odziva ob vsiljenem nihanju vzbujevalnikov. Kalibracija numeričnega modela je potekala v dveh korakih. Po preliminarni vzpostavitvi modela



Slika 14. Primerjava preostale življenjske dobe na utrujanje za začetni in kalibrirani numerični model in dva prometna režima, levo standardni promet in desno težki tovorni promet.

(začetni model) smo opravili ročno kalibracijo na podlagi inženirske presoje. Na ta način smo bistveno izboljšali ujemanje med izračunanim in izmerjenim odzivom. Za izbrani most smo vrednosti namenskih funkcij, s katerimi merimo ujemanje med numeričnim modelom in meritvami, zmanjšali za skoraj 50 %. Modeliranje pragov in tirnic se je izkazalo kot najpomembnejši vidik ročne kalibracije. Ugotavljamo, da imajo lahko nekonstrukcijski elementi, ki jih v fazi projektiranja pogosto zanemarimo, pomemben vpliv na odziv mostu pri realni obtežbi.

V drugem koraku smo izvedli samodejno kalibracijo vhodnih spremenljivk modela nelinearno optimizacijo. Na ta način smo še dodatno izboljšali ujemanje med izračunanim in izmerjenim odzivom. V primerjavi z ročno kalibracijo se je vrednost namenskih funkcij sicer manj občutno zmanjšala, vendar še vedno za dodatnih 5 % do 15 %. Ugotovili smo, da je samodejna kalibracija učinkovito orodje zlasti za fino kalibracijo modela. Pri tem je predhodna ročna evalvacija ključna, da se prepričamo, če model zadovoljivo opiše vse relevantne fizikalne fenomene.

V študiji smo pokazali, da so rezultati samodejne kalibracije lahko odvisni od izbire namenske funkcije. Kalibraciji na podlagi lastnih frekvenc in specifičnih deformacij pri prometni obtežbi sta privedli do različnih rešitev optimizacijskega problema, zato je pri analizi rezultatov pomembna kritična inženirska presoja. Končne vrednosti slučajnih spremenljivk modela smo določili z optimizacijo na podlagi kombinirane namenske funkcije, kjer smo upoštevali odstopanje tako lastnih frekvenc kot tudi specifičnih deformacij, pri čemer smo večjo utež pripisali ujemanju specifičnih deformacij. Ujemanje le-teh je za oceno utrujanja pomembnejše, saj je sprememba napetosti v kritičnih detajlih linearno odvisna od spremembe specifične deformacije.

Pozitivne učinke meritev odziva mostu za oceno preostale življenjske dobe na utrujanje smo prikazali s primerjavo rezultatov za začetni in končni, tj. kalibrirani numerični model konstrukcije. Preostalo življenjsko dobo na utrujanje izbranih detajlov smo ocenili s postopkom iz aneksa A standarda SIST EN 1993-1-9 [SIST, 2005]. Ker za most nismo imeli na voljo natančnih prometnih podatkov, smo oceno utrujanja izvedli za dva prometna režima: standardni promet in težki tovorni promet iz aneksa D standarda SIST EN 1991-2 [SIST, 2004].

Z uporabo kalibriranega modela smo dokazali precej daljšo preostalo življenjsko dobo mostu na utrujanje kot z začetnim modelom. Ta znaša dodatnih 72 let za standardni promet in 31 let za težki promet, kar pomeni vsaj 5-kratno podaljšanje v primerjavi z oceno dobljeno z začetnim modelom. V obravnavanem primeru za most ne bi predpisali dodatnih intervencijskih ukrepov, temveč le nadaljnje izvajanje obdobjnih pregledov s poudarkom na identificiranih kritičnih detajlih.

V primeru, da bi za most določili premajhno ali celo negativno preostalo življenjsko dobo ali pa bi bila pri pregledu mostu zaznana razpoka, bi za most predpisali izvedbo na-

tančnejše analize [Helmerich, 2007]. Prvi ukrep bi bila izvedba detajlnega pregleda, na osnovi katerega bi bolj celostno načrtovali nadaljnje aktivnosti. Sledilo bi projektiranje in vzpostavitev permanentnega spremljanja konstrukcijskega stanja. V kombinaciji z vzpostavitev sistema tehtanja vozil med vožnjo, bi natančnejše spremljali dejanske prometne obtežbe na objektu in na ta način iskali dodatne skrite rezerve. Komplementarno bi skrite rezerve poskušali poiskati tudi na strani odpornosti. Opravili bi destruktivne in nedestruktivne preiskave materialov ter za oceno odpornosti na utrujanje uporabili natančnejše metode (npr. mehaniko loma), ki omogočajo upoštevanje pričakovanega razvoja bodočih ali že nastalih razpok. Na podlagi posodobljenih podatkov bi sledila ponovna analiza preostale življenjske dobe, ki bi služila kot podlaga za načrtovanje obsega in nujnosti izvedbe sanacijskih ukrepov.

Opravljen študija prikazuje velik pomen meritev dejanskega odziva za oceno preostale življenjske dobe jeklenega mostu na utrujanje, zato lahko podobne študije upravljavcem infrastrukture omogočajo alternativne in bolj ekonomične pristope reševanja problematike utrujanja. V zaključku naše analize želimo poudariti, da smo zaradi pomanjkanja podatkov o dejanski zgodovini obremenjevanja mostu uporabili podatke iz standarda Evrokod. Tako bi ob morebitnem popolnem poznavanju teh podatkov lahko prišli do natančnejše ocene preostale življenjske dobe, bodisi krajše bodisi daljše od ocenjene. Vsekakor lahko izračunane preostale življenjske dobe posameznih elementov uporabimo za medsebojno primerjavo ali za primerjavo med posameznimi mostnimi konstrukcijami glede na stopnjo ogroženosti zaradi utrujanja. Negativnosti, povezane z zgodovino obremenjevanja, lahko bistveno zmanjšamo z vzpostavitev (mostnega) sistema tehtanja vlakovnih kompozicij med vožnjo že ob izgradnji mostov. Slednje bi omogočilo natančnejše napovedovanje preostale življenjske dobe na utrujanje.

6 ZAHVALA

Študija je nastala v okviru projekta Shift2Rail »Measuring, monitoring and data handling for railway assets; bridges, tunnels, tracks and safety systems« - Assets4Rail, ki ga je finančno podprla Evropska komisija v okviru programa H2020 (pogodba št.: 826250). Raziskovalno delo avtorjev je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna (programska skupina P2-0273 in infrastrukturni program IO-032). Avtorji se na tem mestu vsem financerjem iskreno zahvaljujemo.

7 LITERATURA

Anžlin, A., Hekič, D., Kalin, J., Kosič, M., Ralbovsky, M., Lachinger, S., Assets4rail deliverable D3.3: Improved fatigue consumption assessment through structural and on-board monitoring, 2020.

Brincker, R., Ventura, C., Introduction to Operational Modal Analysis. Wiley Online Library, 2015.

EC EU, Evropska komisija, Uredba (EU) št. 1315/2013 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 11. decembra 2013 o smernicah Unije za razvoj vseevropskega prometnega omrežja in razveljavitvi Sklepa št. 661/2010/EU, 2013.

EC EU, Evropska Komisija, Sporočilo komisije Evropskemu parlamentu, Svetu, Evropskemu ekonomsko-socialnemu odboru in Odboru regij – Strategija za trajnostno in pametno mobilnost - usmerjanje evropskega prometa na pravo pot za prihodnost, 2020.

EC EU, Evropska komisija, Predlog uredbe EU parlamenta in Sveta o smernicah Unije za razvoj vseevropskega prometnega omrežja, spremembi Uredbe (EU) 2021/1153 in Uredbe (EU) št. 913/2010 ter razveljavitvi Uredbe (EU) št. 1315/2013, 2021.

Helmerich, R., Kühn, B., Nussbaumer, A., Assessment of existing steel structures. A guideline for estimation of the remaining fatigue life, Structure and Infrastructure Engineering, 3(3), 245–255, <https://doi.org/10.1080/15732470500365562>, 2007.

Horizon 2020 evropski projekt »Measuring, monitoring and data handling for railway assets; bridges, tunnels, tracks and safety systems« – Assets4Rail (pogodba št. 826250), Spletna stran evropskega projekta Assets4Rail - <http://www.assets4rail.eu>, datum vpogleda 27.1.2023, 2023.

Kraft, D., A Software Package for Sequential Quadratic Programming, Poročilo DFVLR-FB 88-26, Institut für Dynamik der Flugsysteme, Weissling, 1988.

MIDAS, MIDAS Information Technology Co., Ltd., MIDAS Civil, v1.2., Spletna stran programske opreme MIDAS - <https://www.midasoft.com/bridge-library/civil/products/midascivil>, datum vpogleda 27.1.2023, 2020.

OpenSees, Open system for earthquake engineering simulation – version 3.3.0, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Spletna stran pro-

gramske opreme OpenSees - <https://opensees.berkeley.edu>, datum vpogleda 27.1.2023, 2021.

Scipy, Optimizacijska knjižnica Scipy minimize, Spletna stran knjižnice Scipy minimize - <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.minimize.html>, datum vpogleda 27.1.2023, 2023.

Python, Spletna stran programskega jezika Python3 - <https://www.python.org>, datum vpogleda 27.1.2023, 2023.

Schlune, H., Plos, M., Gylltoft, K., Improved bridge evaluation through finite element model updating using static and dynamic measurements, Engineering Structures, 31(7), 1477–1485, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.011>, 2009.

SIST, SIST EN 1991-2. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 2. del: Prometna obtežba mostov, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2004.

SIST, SIST EN 1993-2. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 2. del: Mostovi, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2007.

SIST, SIST EN 1993-1-9. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-9. del: Utrujanje, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005.

Sunder, R., Seetharam, S. A., Bhaskaran, T. A., Cycle counting for fatigue crack growth analysis, International Journal of Fatigue, 6(3), 147–156, [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0142-1123\(84\)90032-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0142-1123(84)90032-X), 1984.

Zemljič, F., Nove, višje zahteve za železniško infrastrukturo po predlogu spremembe Uredbe TEN-T (pp. 1-7). 15. slovenski kongres o prometu in prometni infrastrukturi: Portorož, 26.-28. oktober 2022, 2022.

Zhu, M., The OpenSeesPy Library – version 3.3.0, Spletna stran knjižnice OpenSeesPy - <https://openseespydoc.readthedocs.io/en/latest>, datum vpogleda 27.1.2023, 2021.