

O PROBLEMATIKI BETONSKIH ŽELEZNIŠKIH PRAGOV V SLOVENIJI

ON THE ISSUES OF CONCRETE RAILWAY SLEEPERS IN SLOVENIA

izr. prof. dr. Stane Božičnik, univ. dipl. ekon.

stane.bozicnik@um.si

doc. dr. Mojmir Uranjek, univ. dipl. inž. grad.

mojmir.uranjek@um.si

prof. dr. Andrej Štrukelj, univ. dipl. inž. grad.

andrej.strukelj@um.si

doc. dr. Iztok Peruš, univ. dipl. inž. grad.

iztok.perus@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,

prometno inženirstvo in arhitekturo

Smetanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK 519.87+625.1(497.4)

Povzetek | Na železniški infrastrukturi v Sloveniji se, predvsem na kraškem območju, spoprijemamo s pojavom plavajočih pragov. Za izboljšanje stanja v okviru CRP-projekta opravljamo raziskave, ki nam omogočajo boljše razumevanje tega pojava. V prispevku so predstavljeni rezultati že opravljenih raziskav. Z meritvami in matematičnimi simulacijami smo ugotovili, da je za učinkovit matematičen opis pojava potreben dinamični matematični model. Dinamični učinki namreč izrazito neugodno vplivajo na degradacijo tolčenca, ki prej ali slej privede do plavajočega praga. Izboljšanje obnašanja betonskega praga je možno z novimi sodobnimi materiali (vezivi in polnili) ob ustrezni kvantifikaciji pojava. V ta namen smo razvili tudi empirični model degradacije tolčenca, ki temelji na vizualni ekspertni oceni in ga je mogoče s predlaganim empiričnim izrazom povezati z rezultati testa micro-Deval.

Ključne besede: betonski železniški prag, plavajoči prag, degradacija tolčenca, empirični model degradacije tolčenca

Summary | On the railway infrastructure in Slovenia, especially in the karst terrain, we are facing the phenomenon of floating sleepers. In order to improve the situation, we are conducting a research, within Targeted Research Project, that enables us to better understand the related phenomena. This paper presents the results of research already carried out. Through field measurements and mathematical simulations, we have found that a dynamic mathematical model is required for effective mathematical description of the phenomenon. Dynamic effects have a markedly unfavorable impact on the degradation of the track ballast, which sooner or later leads to a floating sleeper. The behavior of the concrete sleeper can be improved by using new modern materials (binders and fillers) with adequate quantification of the phenomenon. To this end, we have also developed an empirical model of ballast degradation, based on visual expert judgment, which can be linked to the results of the micro-Deval test with the proposed empirical expression.

Key words: concrete railway sleeper, floating sleeper, ballast degradation, empirical model of ballast degradation

1 • UVOD

V okviru ciljnega raziskovalnega projekta Razvoj inovativnega železniškega praga izvajamo na FGPA UM v sodelovanju s Zavodom za gradbeništvo Slovenije raziskave pojavov, povezanih z obnašanjem betonskih železniških pragov. Razumevanje teh pojavov in njihov učinkoviti matematični opis nam omogoča iskanje ustreznih inženirskih rešitev za izboljšanje obnašanja, večjo trajnost in učinkovitejše vzdrževanje pragov ter razvoj inovativnih pragov z boljšimi karakteristikami od obsto-

ZDA se od konca 19. stoletja uporabljajo betonski pragovi, od preloma 20. stoletja pa jih uporabljamo tudi v Evropi. Danes so oboji v uporabi po vsem svetu. Eden ključnih problemov betonskih železniških pragov v Sloveniji pa tudi marsikje drugod po svetu je relativno slaba kakovost tolčenca tirne grede, kadar ga sestavljajo dolomiti in/ali apnenci. Na kraškem območju lahko vzdolž železniške proge pogosto opazimo krajše segmente z izrazito degradacijo tolčenca (slika 1), ki je

betonske pragove, relativno slabo kvantitativno opisan v znanstveni in strokovni literaturi. Pojav je namreč posledica kombinacije neugodnih vzrokov, od katerih je osnovni sprememba togosti tirne grede in/ali planuma, ker pa gre za dinamični pojav, je celoten odziv odvisen še od časovno spremenljive zunanje obtežbe, sodelujočih mas (tolčenca, planuma in polprostora pod tirno progo) in dušenja celotnega sistema.

V tem prispevku so na kratko opisani nekateri bistveni problemi, s katerimi se spoprijemamo pri razvoju inovativnega železniškega praga pri reševanju problematike betonskih železniških pragov v Sloveniji. V prvem delu



Slika 1 • Plavajoči pragovi na dveh odsekih železniške proge Divača–Koper.

ječih. V tem prispevku so opisane raziskave, ki se ukvarjajo predvsem z razumevanjem pojava plavajočih pragov in s tem povezanimi problemi, zato se na veljavne standarde nismo posebej sklicevali. Pomembno pa je opozoriti, da je pri projektiranju, gradnji in vzdrževanju treba upoštevati pogoje standardov CEN - EN 13230-1 (CEN, 2016a) in CEN - EN 13230-2 (CEN, 2016b) ter UIC Kodeksa 713 E (UIC, 2004), ki definirajo kriterije in postopke kontrole za materiale, betonske pragove in pritrdilni material.

Leseni železniški pragovi so v uporabi že vse od pojava železniškega transporta. V

povezana s pojavom t. i. plavajočih pragov (angl. *floating sleepers*) ((Huang, 2009), (Indraratna, 2018)). S konstrukcijskega stališča je pojav povezan s spremembo togosti tirne grede in sodelujočega polprostora.

Pri rednih kontrolah in meritvah, ki jih izvaja upravljavec železniške infrastrukture, se v splošnem ugotavljajo parametri, povezani z geometrijskimi karakteristikami. Parametri, ki so povezani z materialnimi karakteristikami, in parametri odziva pa se večinoma ugotavljajo le posredno, in še to v zelo omejenem obsegu. To je tudi eden izmed razlogov, da je pojav plavajočih pragov, ki je značilen za

so na kratko predstavljene zahtevne eksperimentalne meritve na terenu na dveh krajših odsekih železniške proge Divača–Koper z namenom pridobitve podatkov za pripravo matematičnih modelov obnašanja tirne grede, predvsem pragov, in kvaliteten računskih simulacij pojavov degradacije tolčenca. Sledi prikaz rezultatov testiranja novih veziv kot potencialnih materialov za izdelavo inovativnih železniških pragov. Opisan in predlagan je tudi empirični model za degradacijo tolčenca na osnovi ekspertne ocene in eksperimentalnih meritev micro-Deval. V zadnjem delu je na kratko predstavljen tudi ekonomski vidik razvoja in uvajanja novih betonskih pragov.

2 • EKSPERIMENTALNE MERITVE NA TERENU

Degradacija tolčenca ter statične in dinamične veličine (npr. pomiki, hitrosti in pospeški) pod obremenitvijo so v veliki meri odvisni od debeline tirne grede, velikosti osne obremenitve, spodnjega ustroja proge (s tamponskim slojem in brez tamponskega

sloja), vrste elastičnih podložk pri pritrditvi ipd. Neposrednega vpliva vseh naštetih parametrov in njihovih kombinacij ne bo mogoče eksperimentalno izmeriti/ovrednotiti. Zato razvijamo matematični model, ki nam bo omogočal opis pojava preko znanih mehan-

skih parametrov. Te pa, verjamemo, bomo lahko kvantificirali eksperimentalno v laboratoriju ali preko opazovanja njihovega vpliva na odziv pri numeričnih simulacijah. Prav tako nam lahko meritve in primerjava odziva na dveh tipičnih merskih mestih (dobrem in slabem, tj. mestu z degradiranim tolčencem) dajejo osnovne informacije, kako in zakaj se odzivi razlikujejo in zakaj se stanje sčasoma še poslabšuje.



Slika 2 • Meritve pomikov na nekritičnem merskem mestu MM1 in že delno kritičnem merskem mestu MM2.

Na železniški progi G60 Divača–cepišče Prešnica smo izbrali dve merski mesti. Obe mesti sta v premi, s čimer smo (v prvi fazi) izločili vpliv krivine na odziv. Mersko mesto MM1 na stacionaži 8242 m predstavlja intaktno območje brez poškodb, medtem ko se na merskem mestu MM2 na stacionaži 8187 m prisotne prve poškodbe, obrušenje in degradacija tolčenca in ga zato karakteriziramo kot delno kritično mesto. Na območju MM2 so se v preteklosti pojavljala kritična stanja tolčen-

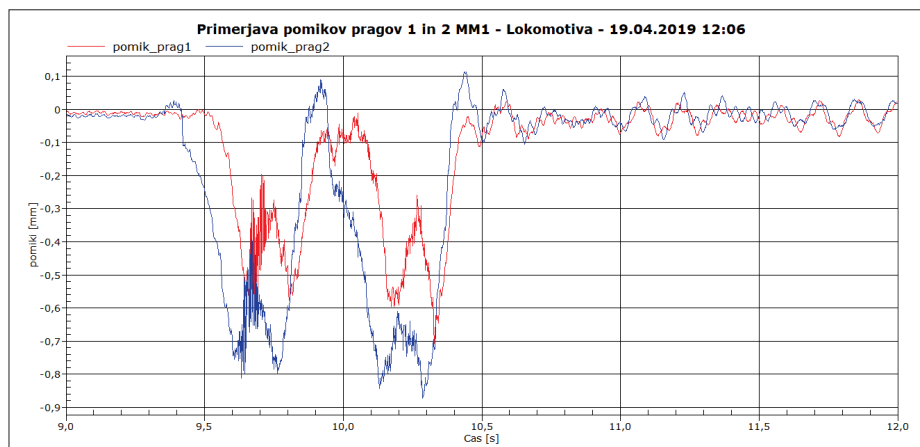
zaradi narave dela, terenskih pogojev in vseh nezanesljivosti pri meritvah ter nezanesljivosti mehanskih in materialnih parametrov lokacij na eni strani ter omejene opreme na drugi strani zelo skrbno načrtovati protokol eksperimentalnih meritev in zajem podatkov.

Rezultati meritev pomikov pri prehodu lokomotive za obe merski mesti so prikazani na slikah 3 in 4. Slika 3 prikazuje pomike pri sinhroni meritvi dveh sosednjih betonskih pragov na nekritičnem merskem mestu MM1.

0,9 mm pri pragu 1 in okoli 0,7 mm pri pragu 2. Dobljeni rezultati so v skladu s predpisi in pričakovanimi lastnostmi tirnic, pragov in tolčenca, ki zagotavljajo udobno vožnjo in ustrezno podajnost/togost tirne grede.

Zaradi omejitev opreme ni bilo možnosti opazovanja odziva na vseh izbranih merskih mestih pri isti vlakovni kompoziciji. Kljub vsemu pa je možno v kombinaciji s podatki merilne tehnike dobiti kvalitativni in kvantitativni vpogled v obnašanje in razlike med različnimi merskimi mesti z analizo prehodov drugih podobnih vlakovnih kompozicij. Tako slika 4 prikazuje pomike pri prehodu dveh povezanih lokomotiv pri sinhroni meritvi na dveh sosednjih pragovih (betonski in leseni) delno kritičnega merskega mesta MM2. Odziva betonskega in lesenega praga se pričakovano razlikujeta. Iz odziva betonskega praga lahko vidimo, da gre za prehod dveh štiriosnih lokomotiv, saj so jasno vidne povišane vrednosti (konice) pomikov ob prehodu vsake izmed osi ter poudarjene visokofrekvenčne vibracije praga pri vsakem prihodu osi na lokacijo praga. Maksimalna vrednost pomika znaša 6 mm, kar je bistveno več kot na lokaciji »dobrega« merskega mesta MM1 (povprečen faktor povečanja pomikov znaša skoraj 8!). Pri lesenem pragu, na praktično isti lokaciji, dobimo v primerjavi z betonskim bolj zvezen odziv, manj je visokofrekvenčnih vibracij, pomiki pa so več kot za 50 % manjši. Redukcija pomikov je posledica delnega vtiskovanja tolčenca v naležno površino praga, kar je ena izmed zelo ugodnih lastnosti spodnje površine lesenega praga v primerjavi z betonskim.

Očitno je, da se togost tirne grede z degradacijo tolčenca bistveno zmanjša. Ob tem

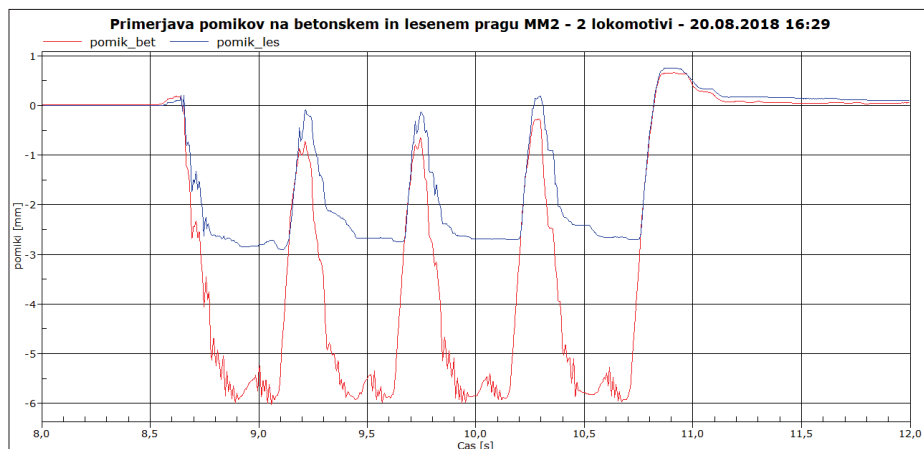


Slika 3 • Meritve pomikov na nekritičnem merskem mestu MM1 na dveh sosednjih betonskih pragovih.

ca in pragov, mesta pa so že sanirana, pri čemer so bili betonski pragovi nadomeščeni z lesenimi.

Na obeh izbranih merskih mestih MM1 in MM2 smo z induktivnimi merilniki pomikov merili odzivne parametre pragov pri prehodu vlakovnih kompozicij in nato s kasnejšo analizo vrednotili razlike med obema območjema. Slika 2 prikazuje situacijo meritev na obeh merskih mestih. Velja omeniti, da je bilo treba

Odziv obeh pragov pri prehodu lokomotive je podoben. Razvidno je, da gre za prehod štiriosne lokomotive, pri čemer razlike v dobljenih vrednostih lahko pripišemo lokalnim značilnostim tirne grede. Absolutne vrednosti pomikov enega in drugega praga kot tudi razlike med njima so majhne, pri čemer velja ponovno opozoriti, da gre za rezultate meritev pragov na »dobrem« (nekritičnem) mestu. Velikostni red maksimalnih pomikov je okoli



Slika 4 • Meritve pomikov na delno nekritičnem merskem mestu MM2 na dveh sosednjih pragovih (betonskem in lesenem).

je treba poudariti, da je, čeprav so na merskem mestu MM2 opazni šele začetni znaki degradacije tolčenca, togost že bistveno zmanjšana v primerjavi z »dobro« lokacijo. Rezultati pripadajočih hitrosti in pospeškov, ki

tukaj zaradi omejitve prostora niso prikazani, prav tako kažejo na bistveno poslabšanje dinamičnih karakteristik. Rezultati preliminarne matematičnih modelov kažejo, da gre pri pojavu za primer kratkotrajne udarne ob-

težbe, približno simetrične, trikotne oblike. Že maksimalne vrednosti dinamičnega faktorja približka enojnega simetričnega sunka presegajo dovoljeno in v predpisih za projektiranje je upoštevano vrednost dinamičnega faktorja 1,2, približek kratkotrajne udarne obtežbe dvojne simetrične trikotne oblike (lokomotiva) pa ga še bistveno poveča. Dinamični učinki izrazito neugodno vplivajo na degradacijo tolčenca. Na lokacijah, kjer je opazna začetna degradacija tolčenca, v mnogo primerih pride zelo hitro (v času enega ali največ dveh mesecev) do izrazite degradacije, ko je potrebna takojšnja sanacija (glej tudi poglavje *Empirični model degradacije tolčenca*). Hitrost degradacije je odvisna od materialnih in konstrukcijskih parametrov na lokaciji, katerih identifikacija še poteka.

Primerjava odziva betonskih in lesenih pragov kaže ugodnejši odziv lesenega praga, kar je pomemben kazalnik pri izbiri materialov in snovanju detajlov novih pragov.

3 • TESTIRANJE MEHANSKIH LASTNOSTI SODOBNIH VEZIV

Sodobni gradbeni materiali in veziva, sodobne tehnologije ter znanstvene raziskave s sodobnimi pristopi lahko ponudijo rešitve za izdelavo novih betonskih pragov. V ta namen so avtorji v laboratoriju Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij na UL FGG za potrebe v tem prispevku predstavljenega problema opravili preizkuse mehanskih lastnosti posebnih veziv s komercialnim imenom *Syscoflex* ((Syscoflex 2019a), (Syscoflex 2019b)). Za ta veziva smo predvideli, da imajo fizikalne lastnosti, ki bi posamično, v kombinaciji s polnilom ali agregatom in/ali v različnih konstrukcijskih izvedenkah, lahko omogočile želeno obnašanje nove generacije betonskih železniških pragov. Med večjimi števili veziv *Syscoflex* z različnimi lastnostmi smo se odločili za štiri, ki imajo poleg zelenih lastnosti tudi lastnosti, ki ustrezajo zahtevam pri izdelavi in sanaciji betonskih železniških pragov. Lahko bi bila uporabna tudi pri zaščitah različnih betonskih konstrukcijskih in nekonstrukcijskih elementov inženirskih objektov in stavb.

Za vsa štiri veziva smo izbrali vodocementa razmerja (V/C), ki so ustrezala povprečnim priporočenim vrednostim proizvajalca. V na-

daljevanju navajamo testna imena vseh štirih veziv, njihove oznake za namene raziskave in V/C-razmerja. Utežni deleži so omogočili napolnitev enega kalupa s tremi prizmami dimenzij 4 x 4 x 16 cm. Mešanje je potekalo v dveh fazah in je skupaj trajalo 5 minut, pri čemer je vsaka od faz trajala po 2 minuti in pol. Prva faza je ustrezala počasnemu mešanju, druga pa hitremu mešanju.

Preizkušana so bila naslednja veziva:

- SysCoflex-1 (oznaka MIX 1: V/C = 0.25) – dve mešanji, po eno mešanje za vsak kalup,
- SysCoflex-2 (oznaka MIX 2: V/C = 0.19) – eno mešanje za dva kalupa,
- SysCoflex-3 (oznaka MIX 3: V/C = 0.175) – eno mešanje za dva kalupa,
- SysCoflex-4 (oznaka MIX 4: V/C = 0.30) – eno mešanje za dva kalupa,
- SysCoflex-1 z glinoporom kot polnilom (oznaka MIX 5: V/C = 0.25).¹

Eksperimentalna raziskava je potekala v treh fazah. Prva faza je ustrezala pripravi zgoraj opisanih mešanic in njihovi vgradnji v kalupe (slika 5). Druga faza je ustrezala razkalupljenju (po tridnevnem strjevanju) in pripravi

tako dobljenih prizmic na dodatno 25-dnevno strjevanje pod laboratorijskimi pogoji. Pri tem smo polovico prizmic (MIX 1–MIX 4) hranili v običajnih pogojih, drugo polovico prizmic pa smo potopili v vodo. V tretji fazi smo, po 28 dneh strjevanja, prizmice preizkusili in določili pomembnejše mehanske lastnosti, kot so elastični modul in upogibna trdnost (slika 6) ter tlačna trdnost. Neodvisno od priprave vzorcev smo z rentgensko difrakcijsko analizo določili tudi kemično sestavo veziv.

Dobljeni rezultati eksperimentalnih raziskav specialnih veziv *Syscoflex* kažejo, da vzorci veziv v splošnem dosegajo vrednosti, ki jih navaja proizvajalec. Razlike so največje pri tlačni trdnosti – vrednosti v dveh primerih precej presegajo navedene, v dveh primerih pa so vrednosti v povprečju nekoliko manjše od navedenih. Glede na to, da točne sestave preiskovanih materialov ne poznamo, smo upoštevali dva protokola nege vzorcev, pri čemer je prišlo do pomembnih razlik med vzorci, negovanimi v vodi, in vzorci, negovanimi v laboratorijskih pogojih. Vzorci, negovani v vodi, dosegajo manjše vrednosti upogibnih trdnosti v primerjavi z vzorci, sušenimi na zraku pri normalnih laboratorijskih pogojih. Po drugi strani pa prvi v povprečju za več kot 30 % presegajo tlačne trdnosti drugih. Dobljeni rezultati kažejo na pomembnost izbranega

¹ Enaka mešanica veziva kot pri MIX 1, le da je dodano polnilo – vlažni glinopor. Gre za primer mešanja veziva z agregatom, vendar ne v smislu običajnega mešanja z agregatom po presejalni krivulji, ampak v smislu dodajanja polnila, ki zmanjša porabo veziva, pri čemer naj se kar najbolje ohrani deklarirane mehanske lastnosti veziva.



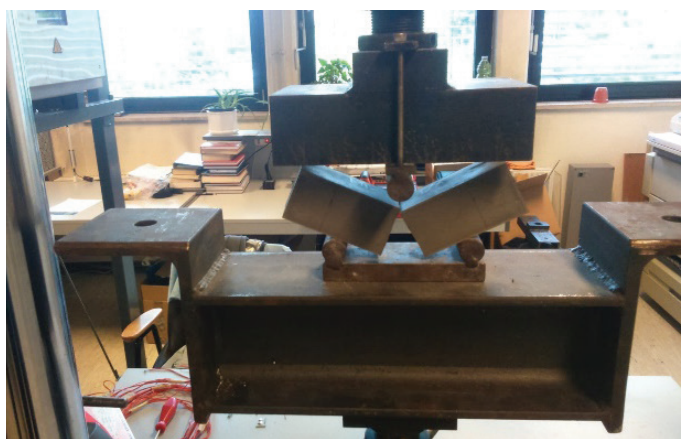
Slika 5 • Priprava kalupov (levo) in vgrajena mešanica MIX 5 (desno) na Katedri za preskušanje materialov in konstrukcij na UL FGG.

protokola nege in vpliv le-tega na mehanske lastnosti preskušancev. Ugotavljamo, da bi z ustrezno nego vzorcev (in posledično konstrukcijskih elementov) lahko v splošnem izboljšali njihove mehanske lastnosti oz. brez večjih težav dosegali zahtevane standarde.

Poudariti je treba, da se opisani rezultati nanašajo le na veziva, in ne na mešanice veziv in agregata. Preliminarne raziskave mešanic (z

vzorca. V nadaljnjih raziskavah bi bilo treba proučiti, katera so ustrezna polnila, ki bi zmanjšala porabo veziva, vseeno pa bi zagotovila ustrezne mehanske lastnosti elementa, narejenega iz mešanice veziva in polnila/agregata. Kritično je predvsem zmanjšanje tlačne trdnosti, ki pa se lahko, kot kažejo rezultati negovanja vzorcev v vlažnem in mokrem okolju, pomembno reducira.

nosti, ki bodo najbolj ustrezale standardom za železniške betonske pragove. Optimizacija bi morala vključevati tudi izbiro oz. določitev najboljših pogojev nege. Ena izmed možnosti za izboljšanje lastnosti betonskih pragov se kaže v izdelavi in uporabi dvoslojnih pragov, pri čemer bi bil spodnji del praga izdelan izključno iz specialnih veziv, katerih odlične elastične lastnosti so bile potrjene v opisanih



Slika 6 • Določanje »dinamičnega« elastičnega modula z GindoSonicom (levo) in določanje upogibne trdnosti (desno).

normnim peskom in perlitom) kažejo, da ostaja elastični modul približno enak kot v primeru veziva, bistveno pa se zmanjša tlačna trdnost

Dobljeni rezultati kažejo, da bi bilo mogoče optimirati mešanice specialnih veziv in različnih polnil za doseganje mehanskih last-

eksperimentih. Zgornji, večinski del praga pa bi se izdelal klasično tako kot pri uporabi trenutne tehnologije.

4 • EMPIRIČNI MODEL DEGRADACIJE TOLČENCA

Tolčenec v Sloveniji mora ustrezati navodilom za kakovost ((UI, 1995), (UI, 1996)). Kot smo ugotovili v uvodnem poglavju, je za primere plavajočih pragov na železniških progah v Sloveniji značilna močna degradacija tolčenca, ki je povezana (tudi) s preostalo življenjsko dobo betonskih pragov (You, 2019).

V povezavi s tem pojavom različni avtorji predlagajo nove teste za določitev stanja tolčenca (Lama, 2011) in programske rešitve na podlagi na znanju oprti (ekspertnih) sistemov (Chiachioa, 2019). Pojavljajo se tudi predlogi za avtomatizirano računalniško oceno degradacije tolčenca (Guo, 2019), pri

čemer pa do praktične uporabe še ni prišlo. Zato v okviru projekta razvijamo lastni model, ki temelji na zbranih podatkih s slovenskih železniških prog.

Subjektivno stopnjo degradacije tolčenca smo želeli objektivno povezati s stanjem na posamičnih železniških odsekih in rezultati meritev obrabe z napravo micro-Deval. Subjektivno stopnjo degradacije tolčenca je mogoče dobiti s pregledom stanja, ki ga



Slika 7 • Naprava Micro-Deval (levo) in vzorec, pripravljen na testiranje (desno) na ZAG Slovenije.

opravi več ocenjevalcev na terenu, objektivno stanje obrabe pa nam lahko da standardna izvedba testa micro-Deval z meritvami vmesnih stanj. Na ta način lahko ob pred-

Najprej je na terenu zbrane vzorce tolčenca z različnih degradiranih lokacij na železniški progi dvanajst ocenjevalcev s pomočjo doseženega konsenza razvrstilo po obrabi od

V analizi smo upoštevali rezultate vseh dvanajstih ocenjevalcev. Izračunali smo povprečno vrednost, mediano in druge statistične parametre ocene stopnje degradacije tolčenca pri različnem številu obratov valja v napravi micro-Deval. Po postopku metode najmanjših kvadratov smo za povprečno vrednost in mediano stopnje obrabe na 10-stopenjski lestvici določili koeficienta relativno enostavnega funkcijskega nastavka v obliki

$$y = a \ln(x) + b \quad (1).$$

V izrazu je y stopnja obrabe in x število obratov valja naprave micro-Deval. Na sliki 8 polne črte predstavljajo rezultate meritev, črčkane črte pa pripadajoče funkcije, ki opisujejo matematično soodvisnost med spremenljivkami. Povprečna obraba (po^*) na sliki 8 je normirana obraba, izračunana po izrazu

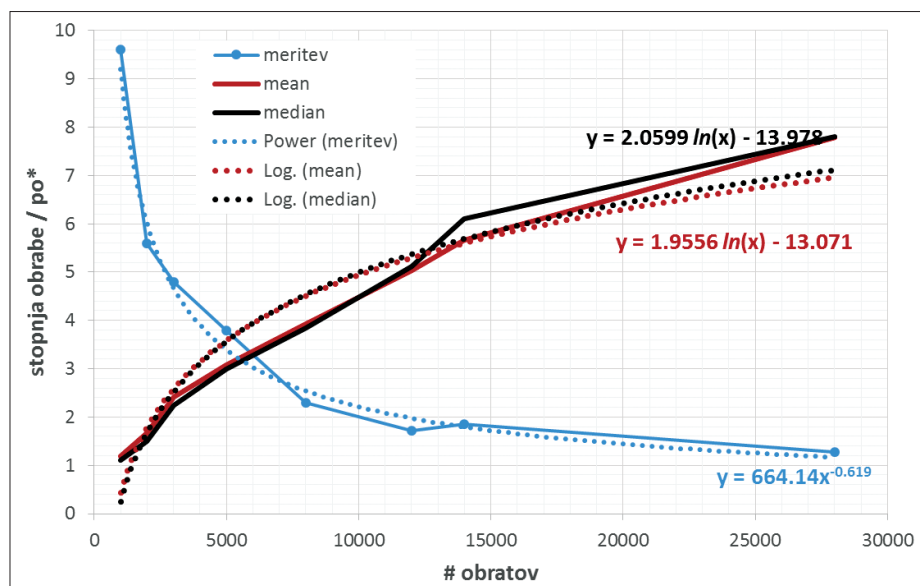
$$po^* = \frac{\text{obraba [g]}}{\# \text{ obratov}} \cdot 100 \quad (2).$$

V izrazu je obraba (g) izmerjena obraba (teža finih, prašnih in odkrušenih delcev v gramih) in $\#$ obratov, število obratov med prejšnjo in trenutno meritvijo. Funkcijski nastavek za to zvezo ima obliko

$$y = a x^b \quad (3).$$

Na osnovi dobljenih rezultatov in analize, prikazanih na sliki 8, lahko zaključimo naslednje:

- Največjo obrabo (po^*) je mogoče opaziti v začetnih ciklih (modra krivulja), ko degradacijo tolčenca na terenu šele zaznavamo. S slike je razvidno, da se skoraj 70 % obrabe zgodi pri prvih 5000 obratih, preostalih 30 % pa se zgodi v naslednjih 23.000 obratih.

Slika 8 • Empirični model za zvezo med obrati v napravi micro-Deval (# obratov na horizontalni osi) in obrabo, izraženo s stopnjo degradacije tolčenca (stopnja obrabe in po^* na vertikalni osi).

postavki, da obstaja porazdelitvena funkcija (angl. pdf) ocene stopnje obrabe tolčenca, poiščemo matematično zvezo v obliki empirične funkcije, ki povezuje dejansko obrabo pri različnem številu ciklov (obratov v napravi micro-Deval – glej sliko 7) s srednjo vrednostjo oz. matematičnim upanjem ocen več ocenjevalcev.

Na Zavodu za gradbeništvo (ZAG) smo v ta namen opravili relativno enostaven, vendar časovno in logistično zahteven eksperiment.

intaktnega vzorca do najbolj obrabljenega. Ta lestvica je služila za pomoč pri oceni obrabe vzorca, vzetega pri različnem številu obratov iz naprave micro-Deval. Pri tem ocenjevalci niso vedeli niti, ali gre pri vsakem ocenjevanju za obrabo pri večjem številu obratov, kot pri prejšnjem niti za dejansko število obratov. Izvajalci analize tako dobljenih podatkov niso poznali niti lestvice niti posameznih ocenjevalcev. Z vsemi temi ukrepi smo želeli narediti eksperiment čim bolj objektivni.

- Razlika med mediano in povprečno vrednostjo je minimalna (rdeča in črna krivulja, polni črti); nekoliko večje odstopanje je pri 14.000 obratih. Če ob vseh nezanesljivostih rezultatov in modelov razliko zanemarimo, lahko predpostavimo in za opis pojava uporabimo normalno porazdelitveno funkcijo, pri kateri povprečna vrednost in mediana sovpadata.
- Enostavna funkcijska zveza za povprečno vrednost stopnje obrabe je primerna za

praktično uporabo. Na osnovi vizualnih ocen ocenjevalcev/ekspertov lahko s pomočjo funkcijske zveze enostavno povežemo stopnjo degradacije tolčenca in število obratov naprave micro-Deval (ki vsebuje tudi časovno komponento).

- Za vsakdanjo praktično uporabo bi bilo treba določiti najmanjše število ocenjevalcev stopnje degradacije tolčenca na terenu za zadostno/sprejemljivo natančnost ocene.

- V raziskavi so bili uporabljeni vzorci tolčenca s približno enako mineraloško sestavo in mehanskimi karakteristikami. V tem prispevku predlagani izraz za srednjo vrednost stopnje degradacije tolčenca po enačbi (1) je zato primeren le za železniške proge s tolčencem podobnih karakteristik.

5 • EKONOMSKI VIDIK

Pri oceni tržnega potenciala in oceni možnih prihrankov smo izhajali iz naslednjih predpostavk:

- proizvodna cena novega železniškega praga ne bo bistveno odstopala od obstoječih cen železniških pragov,
- obseg in struktura stroškov za vzdrževanje železniške infrastrukture v Sloveniji bo v povprečju, tudi v prihodnje, vrednostno na ravni povprečja zadnjih nekaj let.

V strukturi vseh stroškov vzdrževanja železniške infrastrukture v Sloveniji, ki znaša

28 mio. EUR letno, znašajo stroški dela 18 mio. EUR (ki se vodijo na letni ravni kot enotna stroškovna postavka), stroški »materiala« znašajo okoli 5 mio. EUR in stroški storitev zunanjih izvajalcev prav tako okoli 5 mio. EUR.

Z analizo razpoložljivih natančnejših podatkov *Pisarne vzdrževanja železniške infrastrukture Ljubljana* smo izvedli simulacijski izračun, ki je upošteval vse kalkulacijske elemente možnih prihrankov na področju vzdrževanja železniške infrastrukture. Pod pogojem, da

bi uvedli nov železniški prag z zelenimi in predvidenimi lastnostmi, znaša izračunani prihranek 14,13 % celotnih letnih stroškov vzdrževanja železniške infrastrukture na segmentu železniške infrastrukture, ki ga pokriva ta pisarna.

Na osnovi simulacijskega izračuna in na osnovi ekspertnih ocen lahko za celotno Slovenijo ocenimo, da bi lahko z novim železniškim pragom prihranili med 13 % in 15 % stroškov vzdrževanja železniške infrastrukture ob pogoju, da bi imel železniški prag pričakovane lastnosti. To konkretno pomeni skupni prihranek na letni ravni med 3,6 in 4,2 mio. EUR.

6 • SKLEP

Pri sodobnih betonskih železniških pragovih, ki imajo v splošnem daljšo življenjsko dobo in so bolj ekonomični v primerjavi z lesenimi, se v Sloveniji, predvsem na kraškem terenu, spoprijemamo s problemom plavajočih pragov. Da bi izboljšali stanje v okviru CRP-projekta *Razvoj inovativnega železniškega praga* opravljamo raziskave, ki nam omogočajo boljše razumevanje tega pojava, njegovo kvantifikacijo in posledično razvoj ustreznega betonskega železniškega praga. Ugotovitve lahko strnemo:

- Rezultati meritev pomikov na dobri mestih (kjer ni degradacije tolčenca) kažejo, da se pri običajni obtežbi pri betonskih pragovih pojavljajo absolutni majhni pomiki, ki ustrezajo pričakovanemu odzivu.
- Na mestih z začetno degradacijo tolčenca so pomiki po absolutnih vrednostih že bistveno večji (dosegajo faktorje do 8 v primerjavi s pragovi na »dobrih« mestih). Leseni pragovi na takšnih mestih imajo

ugodnejši odziv, ki se kažejo v manjših doseženih pomikih in so brez visokofrekvenčnih vibracij.

- Dinamični učinki izrazito neugodno vplivajo na degradacijo tolčenca in jih ne moremo zanemariti. Matematični opis pojava degradacije tolčenca mora temeljiti na dinamičnem modelu.
- Kot ena izmed možnosti zmanjšanja vpliva dinamičnih učinkov se kaže uporaba sodobnih veziv, lahko kot samostojnih materialov, lahko v kombinaciji s polnili ali v različnih konstrukcijskih izvedenkah. Preliminarne raziskave kažejo, da bi s skrbno načrtovanimi protokoli nege in kombinacijami teh veziv z različnimi polnili lahko dosegli osnovne zahtevane mehanske karakteristike ob istočasno ugodnih karakteristikah odziva (npr. nekoliko manjša togost kot pri obstoječih betonskih pragovih, vtiskovanje tolčenca v naležno površino praga).

- Meritev degradacije tolčenca s testom micro-Deval z vmesnimi prekinitvami je pokazala, da se večina obrabe zgodi v začetnih ciklih, pri čemer je degradacijo pogosto relativno težko opaziti.
- Za namen kvantifikacije degradacije tolčenca v okviru opisanega projekta razvijamo lasten empiričen model, ki temelji na vizualni ekspertni oceni. Objektivna ocena degradacije temelji na povprečni oceni več ekspertov, v prispevku predlagana enačba pa tako določeno oceno povezuje z obrabo testa micro-Deval, ki nadalje omogoča oceno obrabe in posledično tudi napoved časovnega poteka degradacije. Zadnje raziskave še potekajo.

7 • ZAHVALA

Avtorji prispevka se zahvaljujejo Ministrstvu za infrastrukturo RS in Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) za financiranje CRP-projekta *Razvoj inovativnega železniškega praga*, v okviru

katerega so bile opravljene predstavljene raziskave. Zahvala gre tudi članom Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij na UL FGG, ki so nam velikodušno ponudili pomoč pri izvedbi raziskav specialnih veziv, in

partnerju pri projektu, Zavodu za gradbeništvo Slovenije, ki nam je s svojimi ocenjevalci eksperti, ki sicer ne sodelujejo pri projektu, omogočil učinkovito izvedbo eksperimenta za določitev stopnje degradacije tolčenca. Jerneju Kukovici gre zahvala za pomoč pri pridobivanju podatkov za ekonomsko vrednotenje/upravičenost uvajanja novega železniškega praga v Sloveniji.

8 • LITERATURA

- CEN - EN 13230-1:2016, Railway applications — Track — Concrete sleepers and bearers —Part 1: General requirements, 1 May, 2016a.
- CEN - EN 13230-2:2016, Railway applications — Track — Concrete sleepers and bearers — Part 2: Prestressed monoblock sleepers, 1 November, 2016b.
- Chiachíoa, J., Chiachíoa, M., Prescottta, D., Andrews, J., A knowledge-based prognostics framework for railway track geometry degradation, Reliability Engineering and System Safety 181, 127–141, 2019.
- Guo, Y., Markine, V., Zhang, X., Qiang, W., Jing, G., Image analysis for morphology, rheology and degradation study of railway ballast: A review, Transportation Geotechnics 18, 173-211, 2019.
- Huang, H., Tutumluer, E., Dombrow, W., Laboratory characterization of fouled railroad ballast behavior. Journal of the Transportation Research Board, No. 2117, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., pp. 93–101, 2009.
- Indraratna, B., Ngo, T., Ballast Railroad Design: SMART-UOW Approach, CRC Press, Taylor&Francis Group, 158 p, 2018.
- Lama, H. F., Wong, M. T., Railway Ballast Diagnose through Impact Hammer Test, Procedia Engineering 14, 185–194, 2011.
- Syscoflex 1 - Spletna stran proizvajalca Syscoflex, <https://syscofox.com/page/2/>, 11. 09. 2019.
- Syscoflex 2 - Tehnična dokumentacija proizvajalca Syscoflex za vezivo SysCo-scass-elast, <https://syscofox.files.wordpress.com/2017/06/scass-elast-syscofox.pdf>, 11. 09. 2019.
- You, R., Kaewunruen, S., Evaluation of remaining fatigue life of concrete sleeper based on field loading conditions, Engineering Failure Analysis 105, 70–86, 2019.
- UIC-Kodex 713 E:2004, Bemessung von Monoblockschielen aus Beton, November 2004.
- Ul, Uradni list št. 39/1995, (1851), Navodilo za kakovost in nadzor kakovosti tolčenca za gramozno gredo železniških tirov, 1995.
- Ul, Uradni list št. 75/1996, (4011), Navodilo o spremembah navodila za kakovost in nadzor kakovosti tolčenca za gramozno gredo železniških tirov, 1996.