

Primljen / Received: 22.9.2014.

Ispravljen / Corrected: 18.12.2014.

Prihvaćen / Accepted: 30.12.2014.

Dostupno online / Available online: 10.1.2015.

# Analiza nosivosti betonskih pragova za skretnice i križišta pri statičkom i dinamičkom opterećenju

## Autori:



Doktorand, **Enes Curić**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Nišu  
Građevinsko-arhitektonski fakultet  
[enescuric@live.com](mailto:enescuric@live.com)



Prof.dr.sc. **Dragoljub Drenić**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Nišu  
Građevinsko-arhitektonski fakultet  
[ddrenic@gaf.ni.ac.rs](mailto:ddrenic@gaf.ni.ac.rs)



Prof.dr.sc. **Zoran Grdić**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Nišu  
Građevinsko-arhitektonski fakultet  
[zoran.grdic@gaf.ni.ac.rs](mailto:zoran.grdic@gaf.ni.ac.rs)

Stručni rad

**Enes Curić, Dragoljub Drenić, Zoran Grdić**

## Analiza nosivosti betonskih pragova za skretnice i križišta pri statičkom i dinamičkom opterećenju

Obavezna ispitivanja prednapetih betonskih pragova za skretnice i križišta jesu ispitivanja nosivosti pragova pri statičkom opterećenju i opterećenju na zamor. U radu je prikazano obavezno statičko ispitivanje prema normi EN13230-4:2009 i dinamičko ispitivanje pragova za skretnice i križišta koje nije propisano, nego se provodi isključivo na zahtjev kupca. Na osnovi rezultata statičkog ispitivanja ispunjen je kriterij za pozitivnu ocjenu u skladu s normom. Pri dinamičkom ispitivanju su korištene odrednice EN13230-2:2009, uz odstupanja u broju ciklusa opterećenja.

### Ključne riječi:

željeznica, skretnice, križišta, prednapeti betonski prag, statičko i dinamičko ispitivanje

Professional paper

**Enes Curić, Dragoljub Drenić, Zoran Grdić**

## Analysis of carrying capacity of concrete sleepers for switches and crossings under static and dynamic load

The testing of bearing capacity under static and fatigue loading is mandatory in case of prestressed concrete sleepers for switches and crossings. The authors present the static testing required according to EN13230-4:2009, and the optional dynamic testing of sleepers for switches and crossings, which is conducted at the customer's request only. The criterion for positive evaluation in accordance with the standard is met based on static test results. The determinants from EN13230-2: 2009, with deviations in the number of load cycles, are applied during dynamic testing.

### Key words:

railway, switches, crossings, prestressed concrete sleeper, static and dynamic testing

Fachbericht

**Enes Curić, Dragoljub Drenić, Zoran Grdić**

## Analyse der Tragfähigkeit von Betonschwellen für Weichen und Kreuzungen unter statischer und dynamischer Belastung

Erforderliche Prüfungen von Spannbetonschwellen für Weichen und Kreuzungen umfassen die Prüfung der Tragfähigkeit unter statischer Belastung sowie unter Ermüdungsbelastung. In dieser Arbeit werden Bahnschwellen für Weichen und Kreuzungen betreffende statische Prüfungen, die der Norm EN13230-4: 2009 folgend obligatorisch sind, und dynamische Prüfungen, die nicht vorgeschrieben sind, sondern ausschließlich auf Wunsch des Kunden durchgeführt werden, dargestellt. Auf den Ergebnissen der statischen Versuche beruhend, sind die Bedingungen für eine positive Bewertung im Sinne der Norm erfüllt. Für dynamische Prüfungen sind die Richtlinien EN13230-2:2009 angewandt worden, unter Abweichungen bezüglich der Lastwechselanzahl.

### Schlüsselwörter:

Eisenbahn, Weichen, Kreuzungen, Spannbetonschwellen, statische und dynamische Prüfung

## 1. Uvod

Prednapeti betonski željeznički pragovi imaju visoki kapacitet nosivosti što, uz osiguranje ravnomjernije raspodjele i prenošenja opterećenja na podlogu, u konačnici znači ugodnija vožnja. To omogućuje veća masa kao i vertikalna i bočna stabilnost betonskih pragova [1, 2]. Primjena novih vrsta pragova umjesto drvenih [3], kako za kolosijeke u pravcu tako i za skretnice i križišta, za većinu suvremenih željezničkih pruga na kojima se odvija promet velikim brzinama, postaje nužnost. Jedno od rješenja svakako su betonski pragovi te je potrebno utvrditi njihovu otpornost na statička i, posebno na udarna dinamička opterećenja [4]. U tvornici betona u Stalaču (Srbija), poslije praga za kolosijeke u pravcu [6], usvojena je na osnovu projektne dokumentacije [5] tehnologija i proizvedeni su skretnički pragovi duljine  $L = 2600$  do  $4700$  mm s maksimalnim osovinskim opterećenjem od  $250$  kN i za brzine od  $200$  km/h, a sve prema europskim normama EN13230-1:2009 [7], EN13230-2:2009 [8] i EN13230-4:2009 [9]. Osim kontrole proizvodnog procesa, norme predviđaju i kontrolu ostvarene kvalitete prednapetih betonskih pragova i u tom se cilju provode ispitivanja radi kontrole projekta i rutinska ispitivanja radi održanja kvalitete. Obavezna ispitivanja radi dokaza projekta pragova za skretnice i križišta jesu ispitivanja ponašanja pragova pri statičkom opterećenju i opterećenju na zamor. Međutim, dinamičko ispitivanje pragova za skretnice i križišta nije propisano normom EN13230-4:2009 [9], jer se odnosi na skretničke pragove koji se ispituju isključivo na zahtjev kupca, prema normi EN13230-2:2009 [8]. Statičko i dinamičko ispitivanje skretničkih pragova, bez ispitivanja na zamor, provedeno je u laboratoriju Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Nišu, početkom 2014. godine [11].

## 2. Statičko ispitivanje prednapetih betonskih skretničkih pragova

Statičko ispitivanje je provedeno uz uporabu klasične preše za nanošenje i mjerenje sile, i to za pozitivni i negativni moment savijanja za presjek u sredini raspona (u normalnom i obrnutom položaju), prema normi EN13230-4:2009 [9], a za presjek na mjestu nalijeganja tračnice, prema normi EN13230-2:2009 [8]. Na jednom pragu može se obavljati samo jedno ispitivanje [9]. Za statičko ispitivanje je potrebno najmanje 12 pragova: 6 pragova za presjek na mjestu oslanjanja tračnice, za presjek u sredini praga u normalnom položaju 3 praga i za isti presjek u obrnutom položaju također 3 praga. Ispitivani pragovi su proizvedeni u periodu od 1. rujna 2013. do 25. prosinca 2013. Zbog različitih duljina pragova za skretnice i križišta, za reprezentativne uzorke su odabrani pragovi duljine 2,6, 3,4 i 4,0 m.

### 2.1. Opterećenje na mjestu oslanjanja tračnice

Računska početna sila za fazu ispitivanja presjeka skretničkoga praga za pozitivan moment na mjestu nalijeganja tračnice izračunana je prema normi EN13230-2:2009 [8]:

$$F_{br0} = \frac{M_{gr}}{L_r - 0,1} = 4 \cdot \frac{16,59}{0,6 - 0,1} = 132,64 \text{ kN}$$

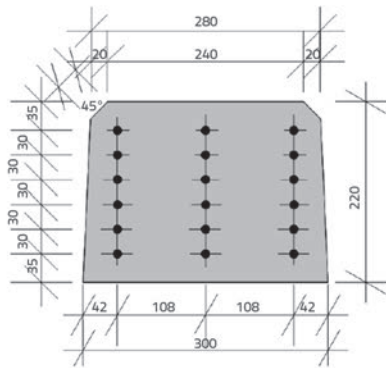
$L_r$  - projektirani razmak osi oslonaca nalijeganja praga pri ispitivanju presjeka ispod tračnice

Ispunjenost kriterija za pozitivnu ocjenu ispitivanih skretničkih pragova za dani presjek:

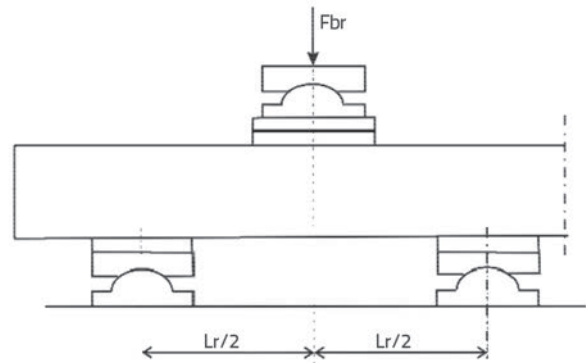
- svi dobiveni rezultati ispitivanja pokazuju da je kvaliteta pragova ujednačena,
- srednja vrijednost sile  $F_{br}$  iznosi  $210,8 \text{ kN} > F_{br0} = 132,5 \text{ kN}$ ,

Tablica 1. Rezultati statičkog ispitivanja skretničkoga praga za presjek na mjestu nalijeganja tračnice

Sila ispitivanja [kN]		OPTEREĆENJE NA MJESTU NALIJEKANJA TRAČNICE (pozitivni projektni moment na mjestu nalijeganja tračnice, ispitivanje: 8.2.2014.)						Prosječne vrijednosti koeficijenata sigurnosti $k_{bxs, sr}$	Minimalne dopuštene vrijednosti koeficijenata sigurnosti $k_{bxs, doz}$
		SP-I/1 L = 2,6 m	SP-I/2 L = 3,4 m	SP-I/3 L = 4,0 m	SP-II/1 L = 2,6 m	SP-5 L = 3,4 m	SP-6 L = 4,0 m		
STATIČKO ISPITIVANJE	$F_{br0}$	132,50	132,50	132,50	132,50	132,50	132,50		
	$F_{br}$	195,00	205,00	225,00	185,00	215,00	240,00		
	$F_{br0,05}$	365,00	380,00	360,00		365,00	345,00		
	$F_{br0,5}$	405,00		460,00	380,00	460,00			
	$F_{brB}$	614,00	650,00	480,00	450,00	550,00	530,00		
	$k_{b15} = F_{br0,05} / F_{br0}$	2,75	2,86	2,86	2,60	2,75	2,60		
$k_{b25} = F_{brB} / F_{br0}$	4,64	4,90	3,62	3,39	4,15	4,0	4,116	>2,50	
$F_{br0}$	- početno pozitivno opterećenje ispitivanja skretničkoga praga [kN],			$F_{brB}$	- opterećenje na mjestu oslanjanja tračnice koje se uslijed loma ne može više povećavati [kN],				
$F_{br}$	- intenzitet opterećenja pri kome se javlja prva pukotina na donjoj površini praga [kN],			$k_{bxs}$	- statički koeficijenti sigurnosti				
$F_{br0,05}$	- pozitivno opterećenje pri kome se javlja i zadržava pukotina širine 0,05 mm [kN],			$k_{bxs, sr}$	- prosječni statički koeficijenti sigurnosti				



Slika 1. Poprečni presjek skretničkoga praga



Slika 2. Shema nanošenja opterećenja [8]

- srednje vrijednosti statičkih koeficijenata  $k_{b_{15, sr}}$  i  $k_{b_{25, sr}}$  znatno su veće od minimalno dopuštenih koeficijenata sigurnosti, pa postaje jasno zašto normom nije zahtijevano ovo ispitivanje.

## 2.2. Opterećenje u sredini raspona

### 2.2.1. Prag u normalnom položaju i pozitivan moment

Kad se ispituje pozitivni i negativni moment, izračun početne sile za fazu ispitivanja presjeka skretničkoga praga za pozitivan i negativan moment u sredini raspona praga mora biti u skladu s normom EN13230-1:2009 [7], a provodi se prema normi EN13230-4:2009 [9]. Radi provjere i usporedbe dobivenih

vrijednosti momenata, napravljen je izračun i prema [8]. Potvrđeno je podudaranje rezultata:

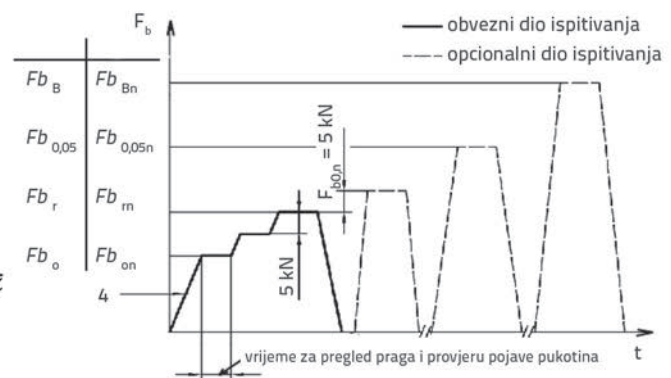
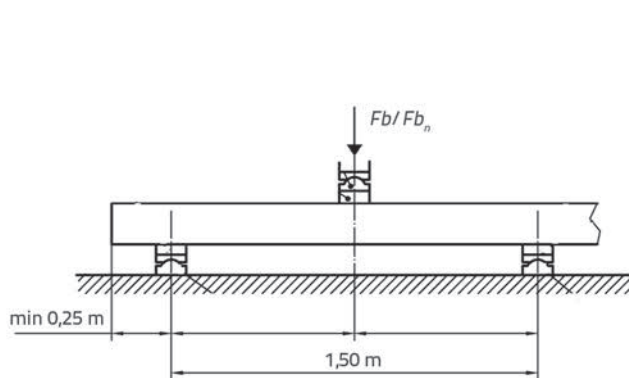
$$F_{b0} = \frac{M}{0,35} = \frac{19,90}{0,35} = 56,86 \text{ kN}; \quad F_{b0} = \frac{M_{dr}}{L_c - 0,1} = 4 \frac{19,90}{1,5 - 0,1} = 56,86 \text{ kN}$$

Srednja vrijednost sile  $F_{br}$  je zadovoljila zahtjev postavljen normom [9]:

$$F_{br, sr} = 73,3 \text{ kN} > F_{b0} = 56,86 \text{ kN}$$

Koeficijent  $k_{bn}$  određuje naručitelj, a računa se na sljedeći način:

$$k_{bn} < F_{br, sr} / F_{b0} = 111,67 / 56,86 = 1,96$$



Slika 3. Shema i vremenski tok nanošenja opterećenja za pozitivni i negativni moment [9]

Tablica 2. Rezultati statičkog ispitivanja skretničkoga praga za pozitivni moment

Sila ispitivanja [kN]	POZITIVNI PROJEKTI MOMENT prag u normalnom položaju - opterećenje je u sredini raspona praga		
	L = 2,60 m (15.2.2014.)	L = 3,40 m (15.2.2014.)	L = 4,00 m (15.2.2014.)
$F_{b0, n}$	5,00	5,00	5,00
$F_{b0}$	56,86	56,86	56,86
$F_{br}$	75,00	70,00	75,00
$F_{bb}$	115,00	120,00	100,00
$F_{br} > F_{b0}$	75,00 > 56,85	70,00 > 56,85	75,00 > 56,8

$F_{b0, n}$  - korak prirasta sile pri ispitivanju od  $F_{b0}$  do  $F_{bb}$ .

Tablica 3. Rezultati statičkog ispitivanja skretničkoga praga za presjek u sredini raspona

Sila ispitivanja [kN]	NEGATIVNI PROJEKTNI MOMENT prag u obrnutom položaju - opterećenje je u sredini raspona praga		
	L = 4,00 m (15.2.2014.)	L = 3,40 m (15.2.2014.)	L = 2,60 m (15.2.2014.)
$F_{bon}$	114,00	114,00	114,00
$F_{brn}$	117,00	116,50	118,00
$F_{bbn}$	125,00	119,00	125,00
$F_{brn} > F_{bon}$	117,00 > 114,00	116,50 > 114,00	118,00 > 114,00
$F_{bon}$ - početno negativno opterećenje ispitivanja skretničkoga praga [kN], $F_{brn}$ - opterećenje koje izaziva prvu pukotinu na gornjoj površini skretničkoga praga [kN],		$F_{bbn}$ - opterećenje koje se ne može povećati uslijed loma gornje površine praga [kN], Srednja vrijednost sile $F_{brn, sr} = 117,2 \text{ kN} > F_{bon} = 114,0 \text{ kN}$	

### 2.2.2. Prag u obrnutom položaju, negativan moment

Računska početna sila za fazu ispitivanja presjeka skretničkoga praga za negativan moment u sredini raspona praga (tablica 3.), izračunato prema [9, 8], radi usporedbe i kontrole iznosi:

$$F_{bon} = \frac{M_n}{0,35} = \frac{39,90}{0,35} = 114,0 \text{ kN}; \quad F_{brn} = \frac{M_{dn}}{L_c - 0,1} = 4 \cdot \frac{39,90}{1,5 - 0,1} = 114,0 \text{ kN}$$

Važno je istaknuti da za skretničke pragove, prema [9], nisu propisane vrijednosti izraza za izračunavanje negativnog momenta u sredini praga ( $M_n$ ) već se primjenjuju izrazi koji se odnose na prag za prugu u pravcu [8]. To ne može biti ispravno jer nije u redu da je  $F_{bro} = 132,64 \text{ kN} > F_{bon} = 114 \text{ kN}$ .

### 2.2.3. Utjecaj statičkog opterećenja na skretničke pragove

Na temelju detaljne analize rezultata statičkog ispitivanja, proširenog u odnosu na zahtjev norme [9], zaključak je da ispitivani pragovi za skretnice i križišta zadovoljavaju postavljene kriterije o pozitivnom ponašanju ispitivanih pragova podvrgnutih statičkom opterećenju.

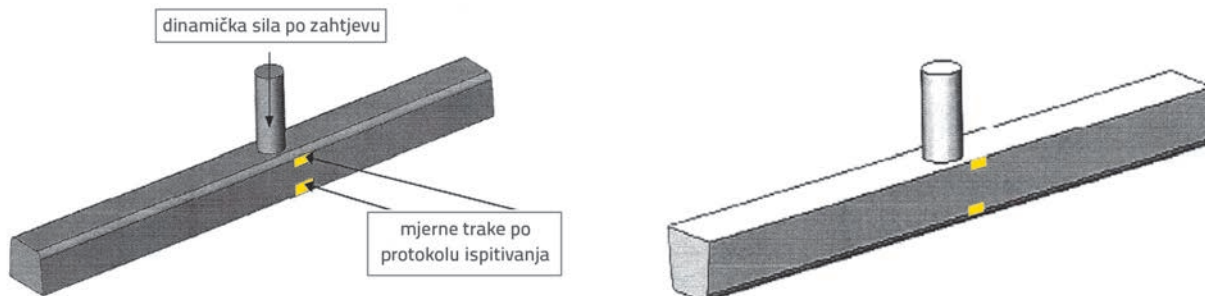
## 3. Ispitivanje prednapetih betonskih skretničkih pragova na dinamičko opterećenje

Normom [9] zahtijeva se ispitivanje na statičko opterećenje i ispitivanje na zamor, a dinamičko ispitivanje skretničkih pragova

provodi se na zahtjev naručitelja prema programu ispitivanja koji naručitelj dostavlja, u skladu s normom [8]. Dinamičko ispitivanje podrazumijeva ispitivanje ponašanja uzoraka pod opterećenjem koji može biti od minimalne sile do sile koja izaziva lom, u tri ciklusa (normom [8] je predviđeno 5000 ciklusa), frekvencije 2 do 5 Hz, poslije čega se provodi rasterećenje. Minimalnu silu određuje projektant i iznosi 50 kN za pozitivno opterećenje i 5 kN za negativno opterećenje praga. Tijek ispitivanja pozitivnog opterećenja na mjestu nalijeganja tračnice definiran je normom za ispitivanje betonskih pragova [8], a tijek ispitivanja u sredini raspona praga (za negativni i pozitivni moment, u normalnom i obrnutom položaju) određuje se normom koju je postavio voditelj ispitivanja. Odstupanje od norme [8] određenih 5000 ciklusa opterećenja ovisi o zahtjevu naručitelja jer dinamičko ispitivanje nije obavezno [9]. Bez obzira na odstupanje, dobivaju se vrijednosti sila pri kojima se pojavljuju karakteristične pukotine i određuju se vrijednosti dinamičkih koeficijenata sigurnosti  $k_{1d}$  i  $k_{2d}$ , što daje određenu sigurnost proizvođaču da može nastaviti s proizvodnjom i pripremiti pragove za ispitivanje na zamor.

Na slikama 4.a i 4.b prikazani su načini povezivanja mjernih traka prema zahtjevu projektanta. Mjerne trake se lijepe na predviđena mjesta, po dvije na površini svakog od ispitivanih pragova, u gornjem i donjem pojasu po jedna, i označene su s MT(n).

Da bi se provjerila zbijenost betona i postignuta čvrstoća betona prednapetih betonskih skretničkih pragova, usporedno je s dinamičkim ispitivanjem, na tri praga različitih duljina, provedeno i mjerenje ultrazvukom. Ovom nerazornom metodom



Slika 4. Skretnički prag: a) u normalnom položaju; b) u obrnutom položaju

Tablica 4. Rezultati mjerenja ultrazvukom na skretničkim pragovima

PRAG	$t_1$ [μsec]	$t_2$ [μsec]	$t_3$ [μsec]	$V_1$ [m/s]	$V_2$ [m/s]	$V_3$ [m/s]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]	$E_{d1}$ [GPa]	$E_{d2}$ [GPa]	$E_{d3}$ [GPa]
SP-1a	2890	1104	2810	260	260	260	61,8	61,8	61,8	39,5	39,2	37,4
SP-2a	1447	1104	2810	606	260	260	62,5	61,8	61,8	39,1	38,8	37,9
SP-4a	3250	3490	3150	260	658	189	61,2	59,5	62,5	38,3	38,4	40,20



Slika 5. Prikaz dinamičkog ispitivanja praga: a) način oslanjanja praga; b) postupak opterećivanja praga

omogućeno je približno utvrđivanje ujednačenosti kvalitete pragova. Izmjerene čvrstoće betona iznad su vrijednosti koja je predviđena projektom (tablica 4.).

Nakon postavljanja mjernih traka na mjesta predviđena protokolom, provedeno je dinamičko ispitivanje. Svaki ispitivani uzorak je opterećen silom preko postavljenog sustava za raspodjelu sile, a prag je oslonjen preko prihvatnog nosača (slika 5.a). Hidraulični cilindar ostvaruje silu preko mjernog senzora sile C6 500 kN proizvođača Hotinger Baldwin Messtechnik (HBM) na računaru Apple McIntosh 520c pomoću računalnog programa BEAM ver 3.1 od istog proizvođača. Usporedno sa silom, računalo bilježi i relativne deformacije u pragu, izmjerene postavljenim mjernim trakama. Kao rezultat ispitivanja, dobiveni su grafikoni zavisnosti sile i relativne

deformacije u vremenu. Zbog velikog broja dobivenih grafikona, u radu će se prikazati samo ilustrativni primjeri.

### 3.1. Rezultati i grafički prikaz rezultata ispitivanja

#### 3.1.1. Opterećenje na mjestu nalijeganja tračnice

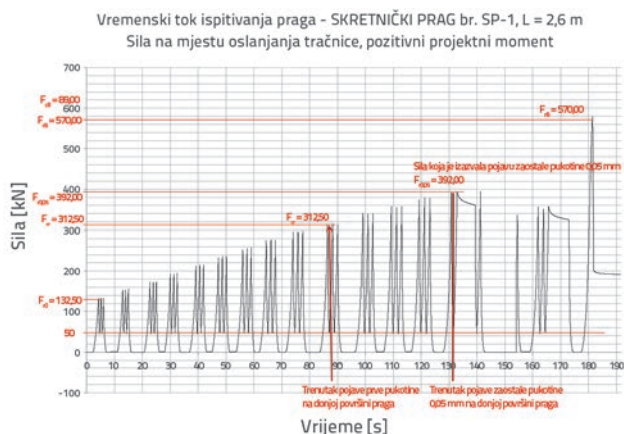
Dinamičko ispitivanje pragova za skretnice i križišta na mjestu nalijeganja tračnice provedeno je na šest pragova, pri čemu su dobiveni dijagrami vremenskog toka sa zabilježenim karakterističnim silama i njihovim prirastom u vremenu, kad su se pojavile pukotine definirane normom. Na slici 6. prikazan je karakteristični primjer dinamičkog ispitivanja do loma, a na slici 7. dijagram ispitivanja reprezentativnog praga.



Slika 6. Lom pri dinamičkom ispitivanju reprezentativnog praga L = 4,0 m pri najvećoj sili  $F_{rb} = 570$  kN

Tablica 5. Rezultati dinamičkog ispitivanja skretničkog praga za opterećenje na mjestu nalijeganja tračnice

SILA	Skretnički prag SP-1a (L = 2,60 m)	Skretnički prag SP-1b (L = 2,60 m)	Skretnički prag SP-2a (L = 3,40 m)	Skretnički prag SP-2b (L = 3,40 m)	Skretnički prag SP-4a (L = 4,00 m)	Skretnički prag SP-4b (L = 4,00 m)	Prosječne vrijednosti dinamičkog koeficijenta sigurnosti $k_{d, sr}$	Minimalne dopuštene vrijednosti dinamičkog koeficijenta sigurnosti $k_{d, doz}$
$F_{r0}$	132,50	132,50	132,50	132,50	132,50	132,50		
$F_{rr}$	312,50	312,50	312,00	312,00	332,50	339,00		
$F_{r0,05}$	392,00	358,00	352,00	338,00	332,50	339,00		
$F_{r0,5}$					532,00			
$F_{rB}$	570,00	550,00	570,00	480,00	600,00	550,00		
$k_{1d}$	2,95	2,70	2,65	2,55	2,51	2,55	<b>2,65</b>	<b>&gt; 1,50</b>
$k_{2d}$	4,30	4,15	4,30	3,62	4,52	4,15	<b>4,17</b>	<b>&gt; 2,20</b>



Slika 7. Vremenski tok dinamičkog ispitivanja reprezentativnog praga s karakterističnim silama i prirastom u vremenu

Rezultati dinamičkog ispitivanja praga za pozitivni projektni moment jasno pokazuju da su dobivene vrijednosti prosječnih dinamičkih udarnih koeficijenata sigurnosti  $k_{1d, sr}$  i  $k_{2d, sr}$  znatno iznad maksimalno dopuštenih vrijednosti i pritom pokazuju da duljina pragova nema bitnu ulogu u distribuciji sile na mjestu djelovanja tračnice. Vrijednost sile  $F_{r0,5}$  je uvećana u odnosu na granično stanje  $F_{rB}$  pri statičkom ispitivanju, što jasno upućuje na djelovanje uvećanja nosivosti presjeka pri dinamičkom opterećenju.

### 3.1.2. Opterećenje u sredini praga, obrnuti položaj praga

Normama [8, 9] nije predviđeno dinamičko ispitivanje presjeka u sredini praga za negativni projektni moment. Ispitivanje je provedeno (slika 8.) na osnovi zasebne analogije, s ciljem da se utvrdi razlog za njegovo izostavljanje iz norme. Ispitana su dva praga, oznake pragova: SP-3 i SP-5, kako je vidljivo u tablici 6., a vremenski tok dinamičkog ispitivanja praga SP-3 prikazan je na slici 9.

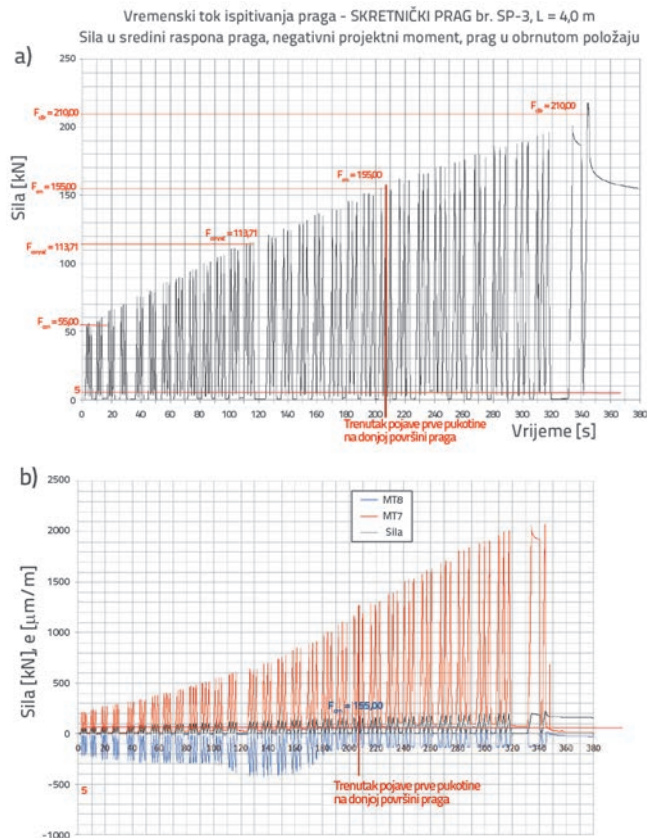
Tablica 6. Rezultati dinamičkog ispitivanja skretničkoga praga, obrnuti položaj praga

SILA	Skretnički prag SP-3 (L = 4,00 m)	Skretnički prag SP-5 (L = 2,60 m)
$F_{con, n}$	5,00	5,00
$F_{con}$	55,00 (113,71)	55,00 (113,71)
$F_{crn}$	155,00	215,00
$F_{cBn}$	210,00	262,00
$F_{crn} = F_{con, r} > F_{con}$	155,00 > 113,71	215,00 > 113,71

$F_{c0n}$  - početni intenzitet opterećenja koje djeluje u sredini praga, na donjoj površini praga, za negativni moment savijanja (prag u obrnutom položaju) [kN]  
 $F_{crn}$  - intenzitet opterećenja pri kome se javlja prva pukotina na gornjoj površini, u sredini praga, a to opterećenje djeluje u sredini praga, na donjoj površini praga, za negativni moment savijanja (prag u obrnutom položaju) [kN]  
 $F_{cBn}$  - intenzitet opterećenja koje se ne može više povećavati, a koje djeluje u sredini praga, na donjoj površini praga, za negativni moment savijanja (prag u obrnutom položaju) [kN]



Slika 8. Lom pri dinamičkom ispitivanju skretničkoga praga SP-3 pri  $F_{cBn} = 210$  kN



Slika 9. Vremenski tok ispitivanja praga pri dinamičkom ispitivanju skretničkog praga SP-3: a) sila i vrijeme; b) sila, relativna deformacija i vrijeme

### 3.1.3. Opterećenje u sredini praga, normalni položaj praga

S obzirom na to da ni ovo ispitivanje nije predviđeno normom, ono je provedeno na osnovi zasebne analogije. Skretnički

prag SP-8 (L= 2,60 m) jedini je uzorak na kojemu je obavljeno dinamičko ispitivanje presjeka u sredini raspona praga za pozitivni projektni moment, prag u normalnom položaju (tablica 7.). Opterećenje je bilo u sredini raspona praga, kako je vidljivo na slici 10.

Tablica 7. Rezultati dinamičkog ispitivanja skretničkoga praga, normalni položaj praga

SILA	Skretnički prag SP-8 (L = 2,60 m)
$F_{co,n}$	5,0
$F_{co}$	27,50 (56,86)
$F_{cr}$	117,5
$F_{cb}$	248,0
$F_{r,0,05}$	162,5
$F_{cr} = F_{co,r} > F_{co}$	117,50 > 56,86

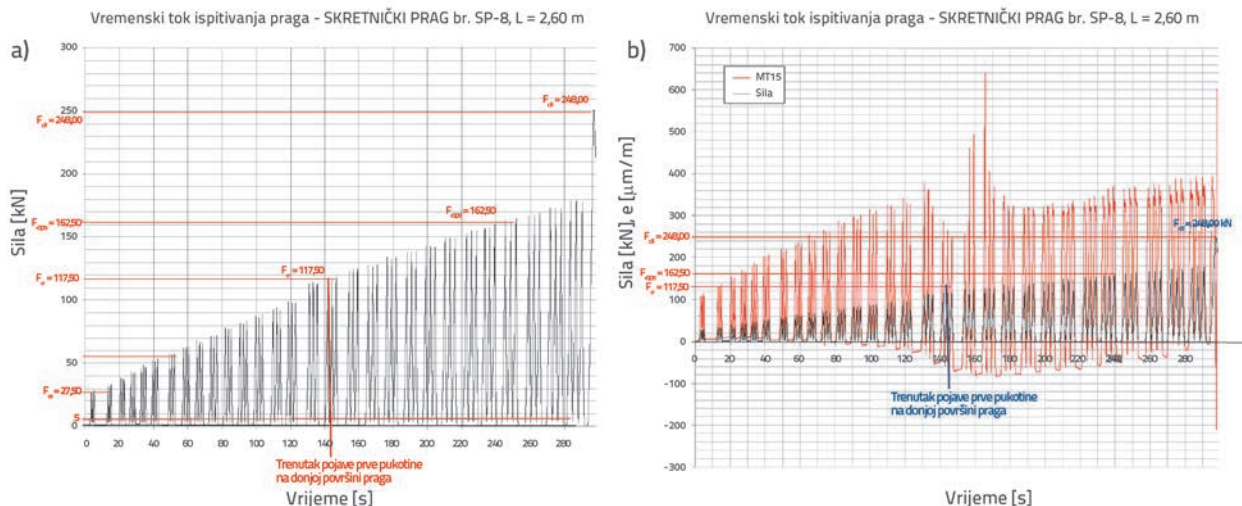
$F_{co}$  - početni intenzitet opterećenja koje djeluje u sredini praga, na gornjoj površini praga, za pozitivni moment savijanja (prag u normalnom položaju) [kN]

$F_{cr}$  - intenzitet opterećenja pri kome se javlja prva pukotina na donjoj površini, u sredini praga, a to opterećenje djeluje u sredini praga, na gornjoj površini praga, za pozitivni moment savijanja (prag u normalnom položaju) [kN]

$F_{cb}$  - intenzitet opterećenja koje se ne može više povećavati a koje djeluje u sredini praga, na gornjoj površini praga, za pozitivni moment savijanja (prag u normalnom položaju) [kN].



Slika 10. Lom pri dinamičkom ispitivanju skretničkoga praga SP-8 pri maksimalnoj sili  $F_{cb} = 248$  kN



Slika 11. Vremenski tok dinamičkog ispitivanja skretničkoga praga SP-8: a) sila i vrijeme; b) sila, relativna deformacija i vrijeme (sila je u sredini raspona praga, prag u normalnom položaju)

Vremenski tok dinamičkog ispitivanja praga SP-8 prikazan je na slici 11.

### 3.1.4. Diskusija o provedenom dinamičkom ispitivanju

Dinamičko ispitivanje je normom predviđeno kao neobavezno, a preporučuje se provoditi na zahtjev krajnjeg korisnika. Zabilježeni rezultati su potvrdili razloge zbog kojih norme ne propisuju obvezu dinamičkog ispitivanja jer su dobiveni dinamički udarni koeficijenti sigurnosti, u odnosu na maksimalne dopuštene vrijednosti, veći od odnosa statičkih koeficijenata sigurnosti prema maksimalno dopuštem statičkim koeficijentima sigurnosti. Jasno je da pri dinamičkom cikličnom opterećenju dolazi do djelovanja povećanja nosivosti prednapetih betonskih pragova.

## 4. Zaključak

Na osnovi propisanog i proširenog statičkog ispitivanja prednapetih betonskih pragova za skretnice i križišta postaje

potpuno jasno zašto norma EN 13230-4 ne propisuje ispitivanje na mjestu oslanjanja tračnice. Srednje vrijednosti statičkih koeficijenata  $k_{b1s,sr}$  i  $k_{b2s,sr}$  znatno su veće od minimalno dopuštenih koeficijenata sigurnosti. Za presjek u sredini raspona, u normalnom i obrnutom položaju praga, rezultati pokazuju ispunjenje svih postavljenih kriterija normom EN 13230-4 za pozitivnu ocjenu ispitivanih pragova. Poslije obavljenog dinamičkog ispitivanja prednapetih betonskih pragova za skretnice i križišta, dobiveni rezultati pokazuju da postoji velika rezerva u kapacitetu nosivosti presjeka što znači da se postojeća rezerva može iskoristiti ili za preuzimanje većeg osovinskog opterećenja ili za racionalizaciju presjeka, i to na predviđenom planu geometrije skretničkoga praga i ukupne sile prednapinjanja skretničkih pragova.

Pragovi za skretnice i križišta, ispitivani na utjecaje statičkog i dinamičkog opterećenja, u potpunosti su zadovoljili kriterije postavljene normama EN13230-1 i EN13230-4, s navedenim odstupanjima u odnosu na način ispitivanja naveden u normi EN13230-2.

## LITERATURA

- [1] Taherinezhad, J., Sofi, M., Mendis, P.A., Ngo, T.: *A Review of Behaviour of Prestressed Concrete Sleepers*, Electronic Journal of Structural Engineering 13(1), 2013.
- [2] Dahlberg, T.: *Modelling of the Dynamic Behaviour of in Situ Concrete Railway Sleepers*, Journal of Rail and Rapid Transit, 222 (4), 2008.
- [3] Manalo, A., Aravinthan, T., Karunasena, W., Ticoalu, A.: *A Review of Alternative Materials for Replacing Existing Timber Sleepers*, Composite Structures 92 (3), pp. 603–611., 2010.
- [4] Popovic, Z., Radovic, V.: *Analysis of cracking on running surface of rails*, GRAĐEVINAR 65 (2013) 3, pp. 251–259.
- [5] *Glavni projekat prednapregnutog betonskog skretničkoga praga L=2600-4700 mm*, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, Niš, 2012.
- [6] Curić, E., Drenić, D., Vacev, T.: *Prikaz proračuna prednapregnutog betonskog željezničkog praga tipa B70*, Novi Sad, PHIDAC, 2010.
- [7] EN13230-1:2009 - Railway applications- Track - Concrete sleepers and bearers - Part 1: General requirements.
- [8] EN13230-2:2009- Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 2: Prestressed monoblock sleepers.
- [9] EN13230-4:2009 - Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 4: Prestressed bearers for switches and crossings.
- [10] Kaewunruen, S., Remennikov, A.: *Experimental and Numerical Studies of Railway Prestressed Concrete Sleepers Under Static and Impact Loads*, University of Wollongong, 2007.
- [11] *Izveštaj o ispitivanju prednapregnutih betonskih pragova za skretnice i ukrštaje na uticaj statičkog i dinamičkog opterećenja - opciono ispitivanje*, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, Niš, travanj 2014.