

POSTOPNO NARIVANJE MOSTOV – ZNAČILNOSTI IN VPLIV VSILJENEGA DEFORMIRANJA

INCREMENTAL LAUNCHING METHOD – CHARACTERISTICS AND INFLUENCE OF IMPOSED DEFORMATION

dr. Viktor Markelj, univ. dipl. inž. grad.

viktor.markelj@ponting.si

Jernej Maher, univ. dipl. inž. grad.

jerne.j.maher@ponting.si

Ponting, d. o. o., in Univerza v Mariboru FGPA Maribor

ZNANSTVENI ČLANEK

UDK 624.012.46:624.074.1

Povzetek | Prispevek prikazuje raziskavo značilnih parametrov izvedenih cestnih mostov, grajenih s tehnologijo postopnega narivanja, ki so bili načrtovani v projektantskem biroju Ponting iz Maribora. Iz baze podatkov, ki obsega 27 cestnih objektov, zgrajenih v zadnjih 20 letih, je bila narejena statistična analiza značilnih parametrov in njihovih medsebojnih relacij. Poudarek je bil na značilnostih betonske prekladne konstrukcije, ki se nariva. Posebej so bile analizirane vitkosti konstrukcij, stopnja prednapetja, geometrijske karakteristike prečnega prereza prednapete betonske grede in količina vgrajenih kablov. V drugem delu prispevka je predstavljen vpliv deformiranja konstrukcije v vsiljeno geometrijo na napetostno stanje v konstrukciji ob upoštevanju osnovnih načel gradbene mehanike. Pri tem je upoštevana elastičnost betonske gredne konstrukcije, ki se lahko delno deformira iz oblike, v kateri je bila narejena. Opisana je možnost uporabe te metode v dejanski praksi gradnje mostov po tehnologiji postopnega narivanja.

Ključne besede: mostovi, tehnologija, postopno narivanje, prednapenjanje

Summary | The paper presents the research of characteristic parameters of road bridges built by incremental launching method, designed by the team of engineers from Ponting Maribor. From the database, which contains 27 road structures built in the past 20 years, statistical analysis of characteristic parameters and their mutual relations was performed. The focus of the analysis was on the characteristics of a launched concrete deck. Particularly the structural slenderness, the degree of prestressing, characteristics of the cross-section of prestressed concrete girder and the amount of installed cables were analysed. In the second part the paper presents the influence of deformed structure into the imposed geometry on the stress state of the structure, taking into account the basic principles of structural mechanics. This takes into account the elasticity of the concrete girder structure, which may be partially deformed from the form in which it was made. The possibility of using this method in the actual practice of building bridges by incremental launching method is also described.

Key words: bridges, construction method, incremental launching, prestressing

1 • UVOD

Tehnologija postopnega narivanja (TPN) je v zadnjem obdobju postala zelo priljubljen način gradnje betonskih mostov. Prednosti te tehnologije so neodvisnost od ovire,

hitrost, majhna tveganja pri gradnji, kvaliteta in robustnost konstrukcije ter ne nazadnje tudi ekonomičnost gradnje. Največja pomanjkljivost te tehnologije je njena odvisnost od ge-

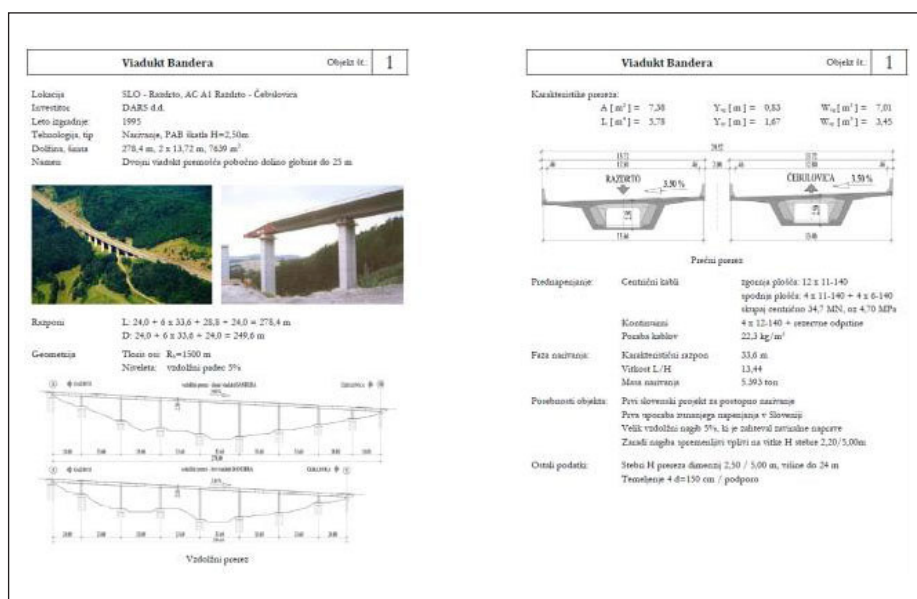
ometrijskih pogojev, saj je gradnja enostavno izvedljiva le v konstantnih parametrih zakrivljenosti.

V tem prispevku so prikazani rezultati analize cestnih mostov, zgrajenih s tehnologijo postopnega narivanja, ki so bili narejeni v projektantski skupini inženirskega biroja Ponting (preglednica 1).

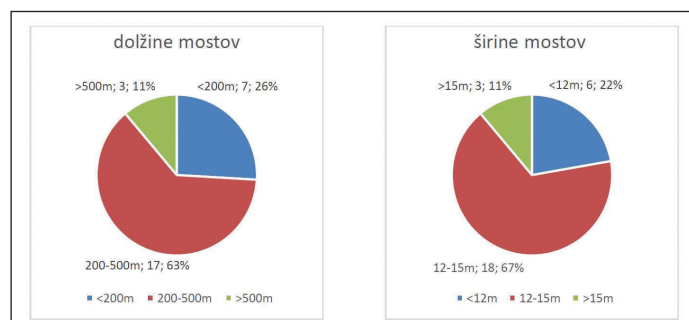
št.	objekt	končan leto	odg. projektant	L m	dolžina m	širina m	površina m ²	en/dva n	A skupni m ²
1	Viadukt BANDERA	1995	V. Markelj	33,6	278,4	13,72	3.820	2	7.639
2	Viadukt LEŠNICA Ormož	1998	V. Markelj	34	324	10,82	3.506	1	3.506
3	Viadukt RIBNIK	1999	M. Pipenbaher	37,5	358	10,11/10,71	3.727	2	7.668
4	Viadukt ZLOKARJE	2000	V. Markelj	45	207	12,93	2.677	2	5.353
5	Viadukt 6-2 GLINŠČICA	2000	M. Pipenbaher	38	236	13,99	3.302	2	6.603
6	Viadukt MLAKE	2001	M. Pipenbaher	33	316	13,89/14,69	4.525	2	9.050
7	Most čez MURO	2003	V. Markelj	40/80	833	13,91	11.587	2	23.174
8	Viadukt Tržiška Bistrica	2003	M. Pipenbaher	40	420	14,71/14,86	6.258	2	12.516
9	Viadukt BIVJE	2004	M. Pipenbaher	42/70	574	14,79/13,44	8.017	2	16.034
10	Most DOBRA	2003	V. Markelj, PZI	51	215	13,42	2.832	2	5.664
11	Viadukt STRAŽA	2007	M. Pipenbaher	34,5	228,5	12,60/14,25	2.846	2	5.691
12	Viadukt MIMARJE	2007	M. Pipenbaher	50	181,3	12,70/13,55	2.379	2	4.758
13	Viadukt KUPETINCI	2008	M. Štern	40	344	11,84	4.154	2	8.308
14	Viadukt 6-2 GRABE	2007	D. Rožič	35	254	11,87	3.015	2	6.106
15	Viadukt LEŠNICA sever	2007	V. Markelj	72,5	186,5	13,94	2.600	1	2.600
16	Viadukt BONIFIKA	2008	M. Pipenbaher	37,5	547,5	14,47	7.925	1	7.925
17	Viadukt LJUBNO sever	2007	V. Markelj	33	316	14,69	4.642	1	4.642
18	Viadukt DOBRUŠA	2008	M. Štern	58	324	14,80/14,95	4.820	2	9.639
19	Nadvoz 4-2 SLIVNICA	2008	D. Rožič, PGD	30	286	11,65	3.332	1	3.332
20	Viadukt 6-6 VODOLE V	2009	D. Rožič	33	302,5	15,31/13,96	4.631	2	6.999
21	Viadukt 6-1 PINCE	2008	M. Štern	40	180	13,34	2.401	2	4.893
22	Nadvoz LIPA ŠTORE	2008	V. Markelj	29,5	187,5	9,60	1.824	1	1.824
23	Viadukt HAJDINA	2009	M. Štern	32,4	278,7	14,10	3.930	2	7.860
24	Viadukt LEŠNICA jug	2011	V. Markelj	72,5	182,5	14,10	2.573	1	2.573
25	Viadukt LJUBNO jug	2011	T. Weingerl	45	115	15,05	1.731	1	1.731
26	Ada bridge - side spans	2012	V. Markelj, TEH	80/108	361	45,00	16.245	1	16.245
27	Nadvoz HAJDINA	2015	R. Mlakar	40	158	12,90	2.038	1	2.038
POVPREČJE					303,5	14,6	4.494		7.268
SKUPAJ					13.725				196.258

Preglednica 1 • Izvedeni mostovi po metodi TPN inženirskega biroja Ponting, d. o. o.

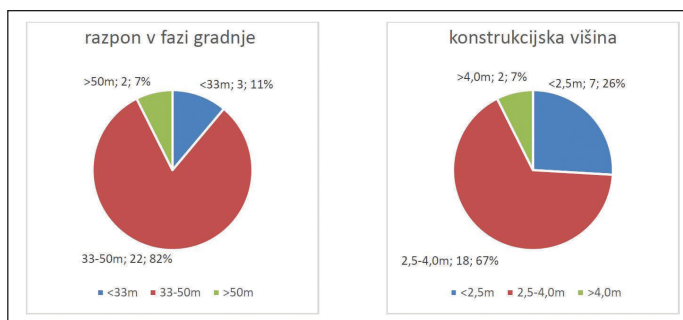
V bazi podatkov je bilo zajetih 27 cestnih mostov, zgrajenih s tehnologijo postopnega narivanja, od tega 17 dvojnih (62 %) in 10 enojnih objektov (38 %). Povprečna dolžina objektov znaša 303 m, povprečna širina pa 14,6 m. Skupna dolžina konstrukcij je 13.725 m, skupno pa imajo površino skoraj 200.000 m². Baza podatkov za posamezen objekt, poleg osnovnih podatkov o imenu, naročniku, lokaciji in letu izvedbe, zajema še podatke o statičnem sistemu, razponih, dolžini in širini objekta, osnovne podatke o geometriji ceste (podatki za os in niveleto), karakteristike prečnega prereza, podatke o kablji za prednapenjanje in posebnosti objekta. Podatkovni blok je dopolnjen s skico vzdolžnega in prečnega prereza ter fotografijo izvedenega objekta. Vsak od 27 objektov je opisan na dveh A4-straneh, kot je prikazano na sliki 1. Celotna baza podatkov je dodana kot priloga disertacije avtorja članka (Markelj, 2016).



Slika 1 • Posnetek lista iz baze podatkov za tipični most.



Slika 2 • Deleži mostov glede na dolžino in širino



Slika 3 • Deleži mostov glede na karakteristični razpon in konstrukcijsko višino.

Razporeditev po osnovnih karakteristikah je prikazana z diagrami na slikah 2 in 3. Značilne dolžine so med 200 in 500 m, največ mostov je širine med 12 in 15 m, značilno območje razponov v fazi narivanja znaša med 33 in 50 m, najbolj pogoste konstrukcijske višine so med 2,5 in 4,0 m. Podatki ustrezajo

značilnim vrednostim, ki jih za TPN navaja literatura ((Göhler, 2000), (Rosignoli, 2014)), torej lahko predpostavimo, da bodo tudi analize iz te baze karakteristične. Rezultati, dobljeni z analizo 27 cestnih mostov, so nam služili kot izhodišče za nadaljnje delo. Opravljena je bila analiza vpliva deformacij

na napetostno stanje v konstrukcijah zaradi narivanja v vsiljeno geometrijo ob upoštevanju osnovnih načel gradbene mehanike. Za študijo so uporabljene relacije, pridobljene iz statistične analize v prvem delu in obdelane za realne vrednosti niveletnih sprememb za cestne, avtocestne in železniške mostove.

2 • REZULTATI ANALIZE ZNAČILNIH PARAMETROV IZVEDENIH OBJEKTOV

Obdelane značilne vrednosti pomembnejših parametrov in njihova medsebojna odvisnost lahko služijo za primerjalno analizo z drugimi izvedenimi mostovi kot pomoč pri zasnovi in študiju novih projektov pri cenovnih primerjavah, študiji izvedljivosti in podobno. Zaradi boljše primerljivosti in optimalnejšega določanja relacij med parametri je bil iz primerjalne analize takoj izločen objekt št. 25, Lešnica Jug, ker gre za sovprežno konstrukcijo in ne za PAB-konstrukcijo. V nekaterih prim-

erjavah pa smo iz analize izločili še objekt št. 24, Viadukt Hajdina, pri katerem gre za narivanje PAB-plošče prek začasnih pomožnih podpor.

2.1 »Vitkost« konstrukcije

Pri tehnologiji postopnega narivanja je najznačilnejši parameter razmerje med karakterističnim razponom L v fazi narivanja in konstrukcijsko višino prereza H , ki ga lahko imenujemo tudi vitkost prekladne konstrukcije L/H . Za gospodarno uporabo gradnje po TPN

se navajajo vitkosti med 12 in 15 (Rosignoli, 2014), torej:

$$12 \leq \frac{L}{H} \leq 15. \quad (1)$$

Na izbiro koncepta objekta in njegove konstrukcije ne vplivajo samo izbor tehnologije ali optimalni tehnološki parametri, ampak še več drugih robnih pogojev. Zaradi tega se dejanske vrednosti samo približujejo gospodarno optimalnim razmerjem ($H=L/14$), kar je dobro razvidno iz diagrama na sliki 4. Manjša odstopanja se regulirajo z ustrezno stopnjo prednapenjanja. Večja odstopanja od priporočenih vrednosti so sicer mogoča,

vendar so zato potrebni dodatni ukrepi, kot so začasne podpore ali posebni tehnološki ukrepi (začasni pilon s prednapeto zatego, obojestransko narivanje v srednji večji razpon ipd.).

Velike vitkosti v fazi gradnje, predvsem na območju konzole, lahko povzročajo tudi velike tehnološko izvedbene težave, zaradi velikih deformacij (povesov in zasukov).

2.2 Centrična prednapetost

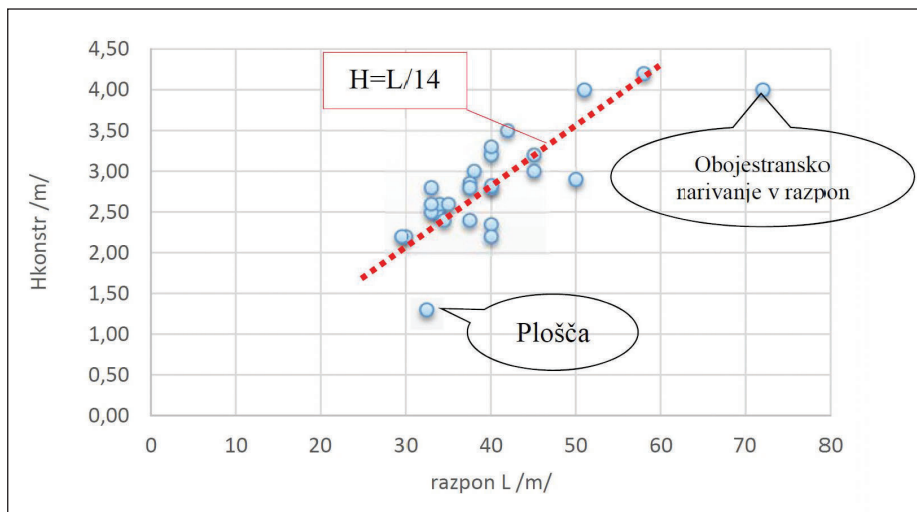
Napetosti v prerezu PAB-konstrukcije, ki se nariva, so odvisne od zasnove prednapenjanja. Večina raziskanih konstrukcij je imela dve skupini kablov za prednapenjanje. Prva skupina so ravni kabli, ki ustvarjajo približno centrično napetost v konstrukciji. Ti kabli so namenjeni fazi narivanja, ko prerezi konstrukcije prehajajo iz območja negativnih v območje pozitivnih momentov in nasprotno. Napetosti v prekladni konstrukciji zaradi lastne teže in drugih vplivov tvorijo ovojnico, ki jo pokrivamo s t. i. centričnimi kabli. Običajno s temi kabli zagotavljamo od 3,0 do 4,0 MPa centrične napetosti (slika 5).

Druga skupina kablov so ukrivljeni kabli, ki jih namestimo po končanem narivanju in jih navadno imenujemo kabli za fazo uporabe. V nekaj izvedenih primerih smo to skupino kablov opustili in povečali skupino ravnih kablov v spodnji plošči, ki na spodnjem robu povzročajo malce večje tlačne napetosti kot na zgornjem. Ta poseg je precej poenostavil in pospešil dokončanje objektov. V tem primeru bi ravni kabli morali vnašati večje centrične oz. malce ekscentrične tlačne napetosti v vrednosti od 5,0 do 7,0 MPa (slika 5).

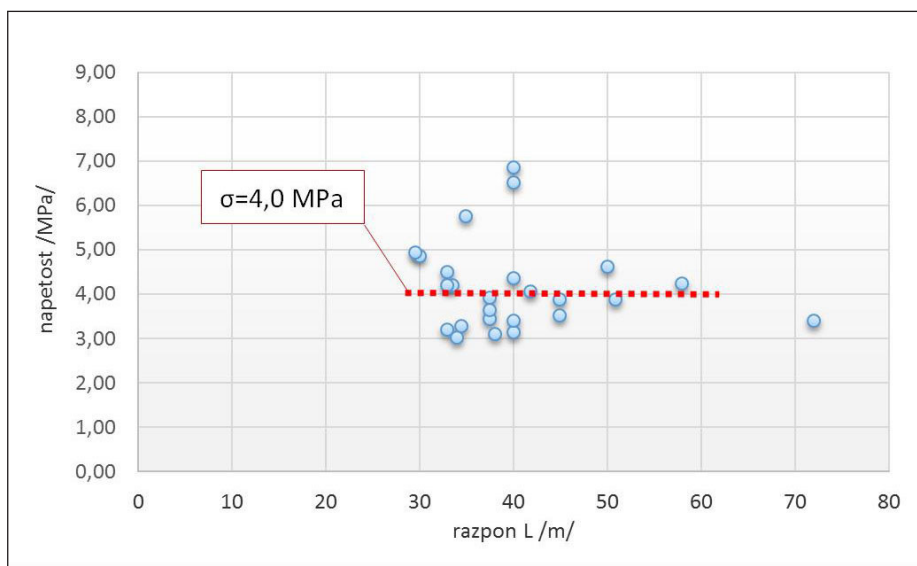
2.3 Karakteristike prerezov

Prečni prerez, ki se uporablja za konstrukcije pri TPN, je najpogostejše škatlaste oblike (slika 6). Drugi mostni prečni prerezi, kot je polna plošča ali rebra, niso primerni in se pri TPN uporabljajo zelo redko. V tej točki je prikazana analiza odvisnosti karakterističnih geometrijskih lastnosti škatlastega prečnega prereza od najbolj značilnega parametra, to je konstrukcijske višine H . Prikazane so odvisnosti za velikost prečnega prereza A_w , vztrajnostnega momenta I_z ter odpornostnih momentov za zgornji rob W_{zg} in spodnji rob W_{sp} .

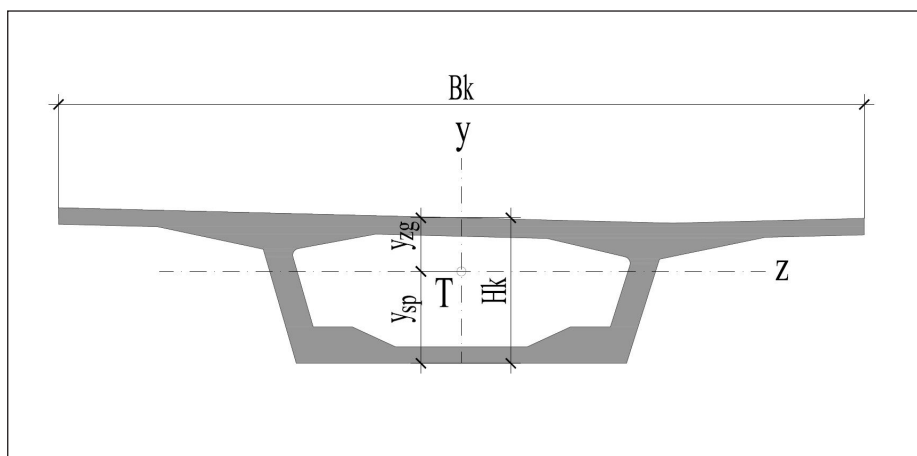
Analiza površine prečnih prerezov kaže precejšnjo razpršenost, saj prerez ni odvisen le od konstrukcijske višine, ki je povezana z razponom, ampak še bolj od širine vozišča. Baza objektov vsebuje objekte od širine 9,60 m do kar 45,00 m. Če izločimo ekstreme, dobimo množico petindvajsetih objektov s



Slika 4 • Porazdelitev objektov glede na razmerje med višino prereza in razponom.



Slika 5 • Centrična prednapetost v fazi narivanja v odvisnosti od razpona.



Slika 6 • Tipična oblika škatlastega prečnega prereza PAB za mostne konstrukcije.

širino med 10,11 m in 15,31 m ter povprečno širino 14,30 m.

Odvisnost površine prečnega prereza A_x od konstrukcijske višine H je prikazana na diagramu (slika 7), trend odvisnosti pa lahko podamo z izrazom:

$$A_x = 1,6 \cdot H + 3,6 \quad (2),$$

pri čemer sta

H – konstrukcijska višina škatlastega prereza (m) in

A_x – površina prečnega prereza (m^2).

Vztrajnostni moment v odvisnosti od H narašča potenčno med drugo in tretjo stopnjo (slika 8), in sicer:

$$I_z = 0,55 \cdot H^{2,67} \quad (3),$$

pri čemer sta

H – konstrukcijska višina škatlastega prereza (m) in

I_z – vztrajnostni moment prečnega prereza (m^4).

Odpornostni moment W za zgornji in spodnji rob konstrukcije je sicer definiran z razmerjem I_z in odklikom robov od težišča, torej z y_{zg} in y_{sp} , tukaj pa je prikazan kot funkcija konstrukcijske višine H mostne zgornje konstrukcije škatlaste oblike (slika 9 in slika 10).

$$W_{zg} = 1,50 \cdot H^{1,67} \quad (4),$$

$$W_{sp} = 0,88 \cdot H^{1,67} \quad (5),$$

pri čemer sta

H – konstrukcijska višina škatlastega prereza (m) in

W – odpornostni moment prečnega prereza (m^3).

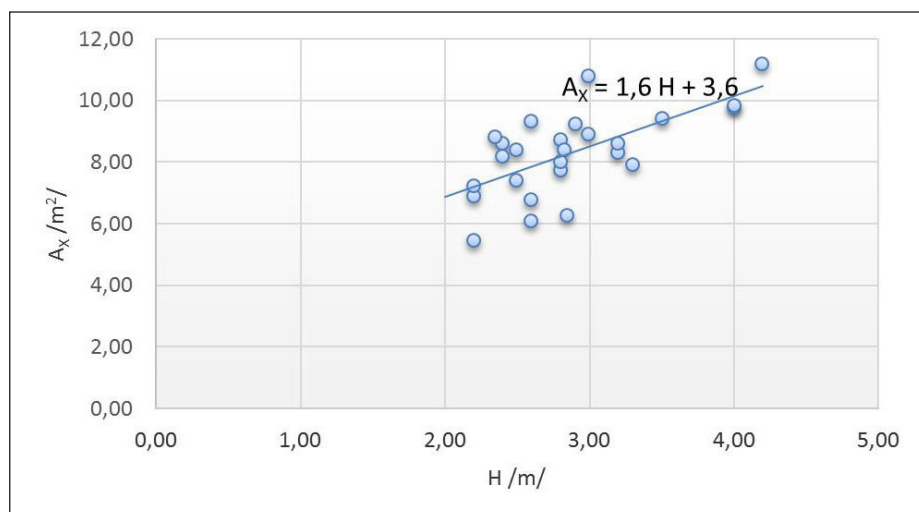
Zelo pomembna geometrijska značilnost vsakega prečnega prereza je lega težišča. Značilni betonski škatlasti prerezi izkazujejo podobno lego težišča (slika 11) kar se da zelo koristno uporabiti za hitre analize, na primer izračun robnih napetosti. Odvisnost je naslednja:

$$y_{zg} = 0,365 \cdot H \quad (6),$$

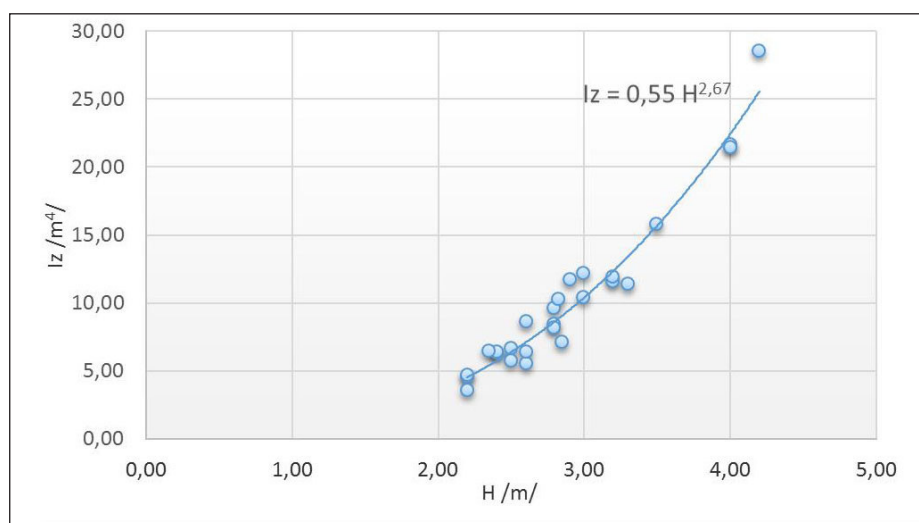
pri čemer sta

H – konstrukcijska višina škatlastega prereza (m) in

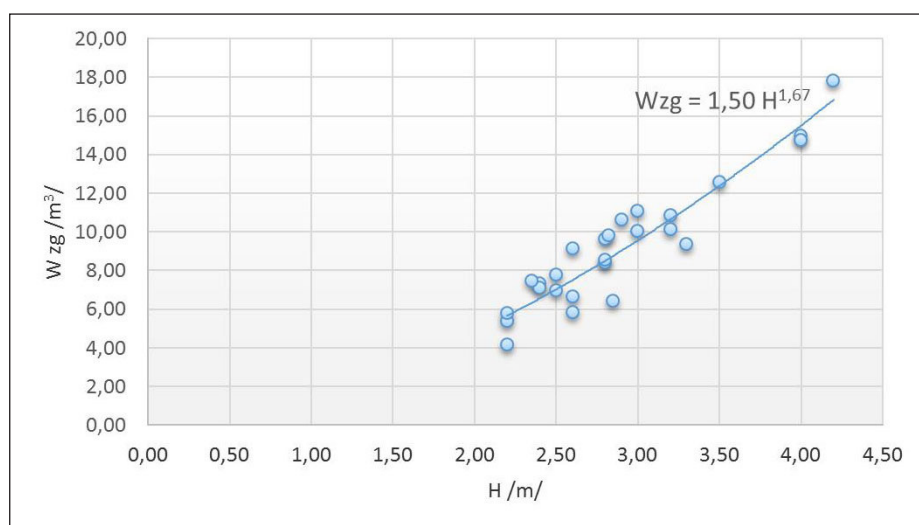
y_{zg} – oddaljenost težišča prečnega prereza od zgornjega roba (m).



Slika 7 • Površina prečnega prereza A_x v odvisnosti od konstrukcijske višine H .



Slika 8 • Vztrajnostni moment prečnega prereza I_z v odvisnosti od konstrukcijske višine H .



Slika 9 • Odpornostni moment prečnega prereza W_{zg} v odvisnosti od H .

2.4 Količina vgrajenih kablov

Količina vgrajenih kablov za prednapenjanje je eden izmed glavnih parametrov, ki vplivajo na gospodarnost gradnje. Običajno je definirana kot masa kablov na površino mostu, torej v enoti kg/m^2 . Na diagramu je prikazana poraba kablov v odvisnosti od razpona L (slika 12). Trendna linija ustreza poenostavljeni enačbi:

$$K = 0,5 \cdot L + 5 \quad (7),$$

pri čemer sta

L – karakteristični razpon (m) in

K – poraba vgrajenih kablov za prednapenjanje (kg/m^2).

Še bolj značilna kot razpetina sama je vitkost konstrukcije L/H . Kako vitkost povečuje porabo kablov za prednapenjanje, izkazuje razmerje na diagramu (slika 13). Če izločimo nekarakteristični objekt (ploščati objekt, št. 23), dobimo zelo zanimivo razmerje med porabo kablov in vitkostjo:

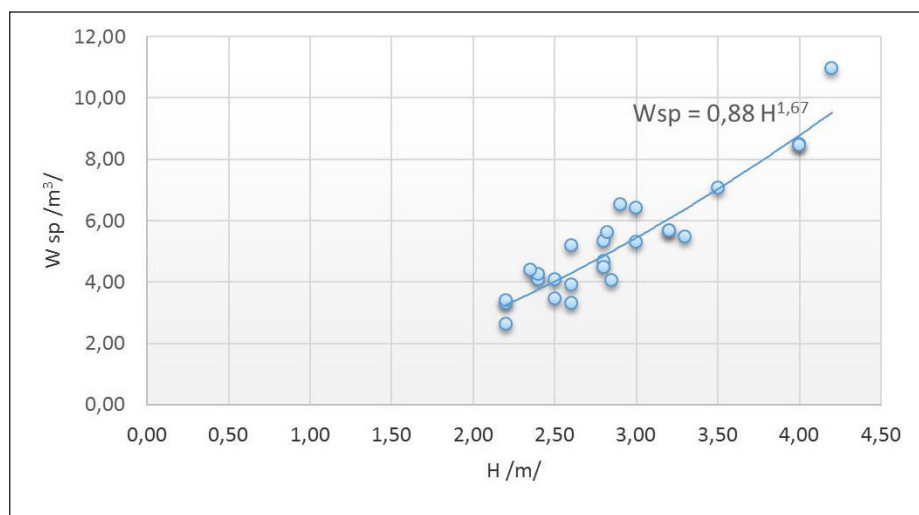
$$K = 2 \cdot \frac{L}{H} - 5 \quad (8),$$

pri čemer so:

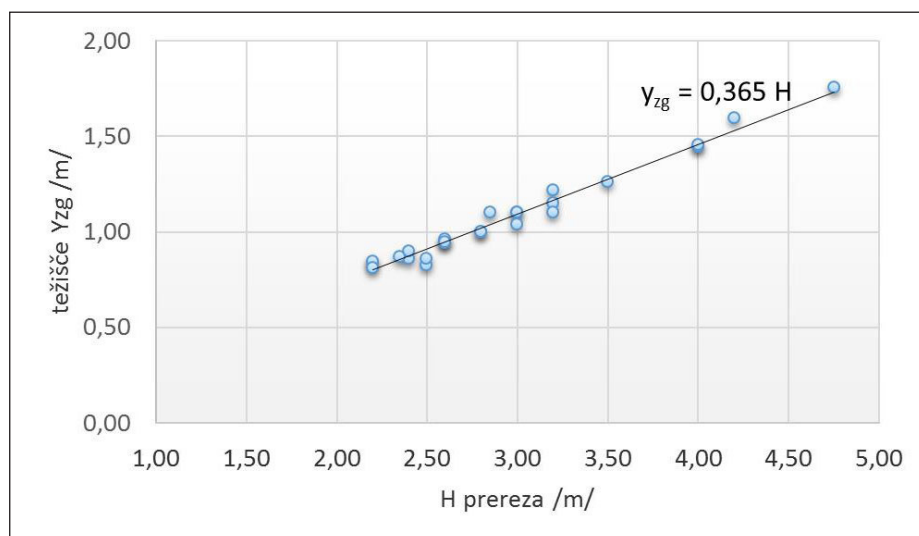
L – karakteristični razpon (m),

H – konstrukcijska višina (m) in

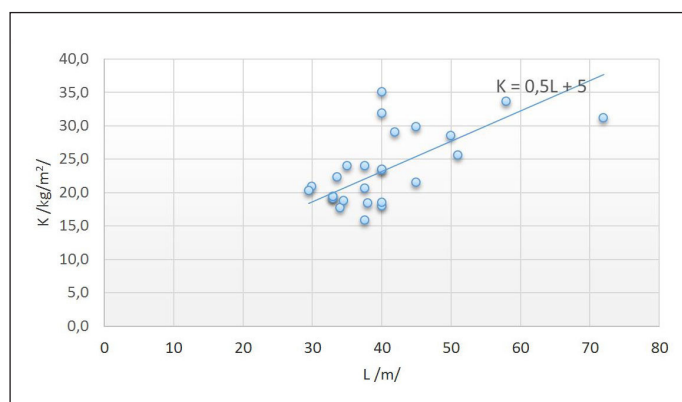
K – poraba prednapetih kablov (kg/m^2).



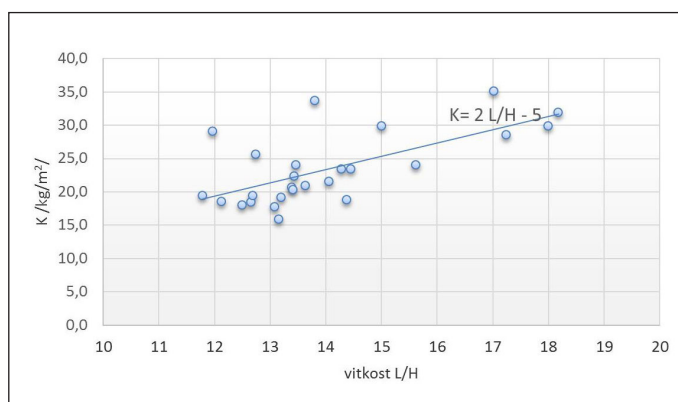
Slika 10 • Odpornostni moment prečnega prereza W_{sp} v odvisnosti od H .



Slika 11 • Lega težišča škatlastih prerezov PAB-konstrukcij v odvisnosti od konstrukcijske višine H .



Slika 12 • Poraba kablov K v odvisnosti od razpona L .



Slika 13 • Diagram porabe kablov K v odvisnosti od vitkosti L/H .

3 • VPLIV PRISILNEGA DEFORMIRANJA NA NAPETOSTNO STANJE

3.1 Geometrijske omejitve TPN

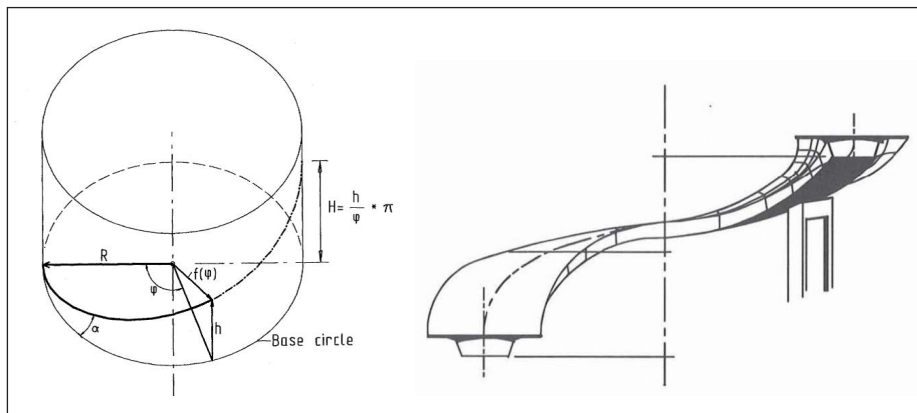
Da se segmenti lahko izvajajo v delavnici na istem mestu in nato s predhodno izdelanimi segmenti prek stebrov potujejo naprej na svoje končno mesto, mora geometrija osi mostu izpolnjevati določene kriterije. Geometrijske možnosti, ki omogočajo narivanje, so povzete po literaturi (AFGC, 1999), ki navaja naslednje možnosti:

1. tlorisno ravna os s konstantnim vzdolžnim naklonom,
2. tlorisno ravna os in niveleta v zaokrožitvi ($RV = \text{konst.}$),
3. tlorisno krožnica ($RH = \text{konst.}$) in ničelni naklon,
4. tlorisno krožnica ($RH = \text{konst.}$) in konstantni naklon (vijačnica),
5. krožnica v katerikoli nagnjeni ravnini.

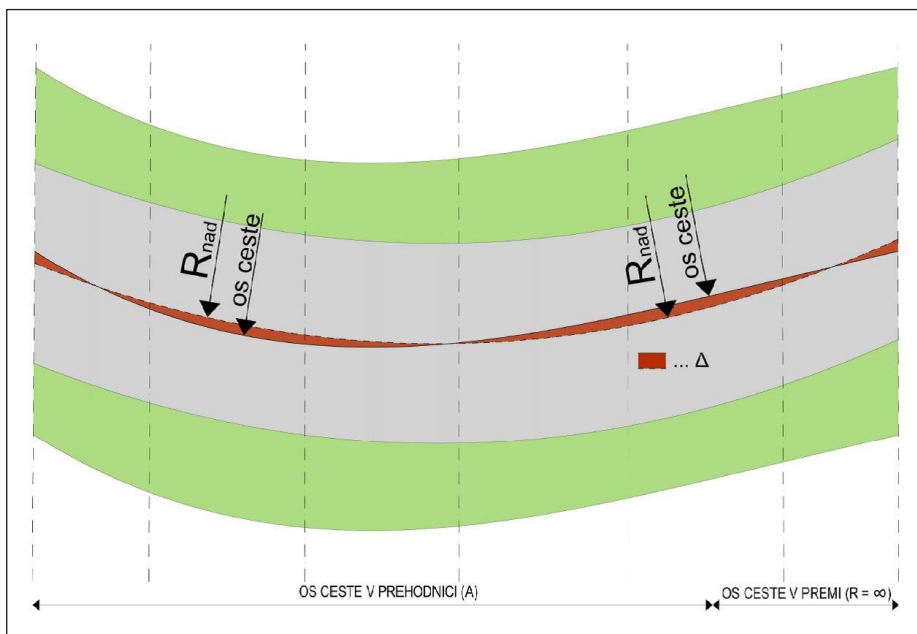
Primer 1 pri narivanju zahteva translatorsko vzdolžno premikanje nosilca. Primera 2 in 3 zahtevata krožno gibanje, le da je v primeru 2 os vrtenja horizontalna, v primeru 3 pa vertikalna. Če imamo ob tlorisnem radiju še konstanten vertikalni nagib, linija preide v obliko vijačnice, kar predstavlja primer 4 (slika 14). V primeru istočasnega horizontalnega in vertikalnega radija moramo narivati po poševni ravnini z nagnjeno normalo vrtenja (primer 5). V tem primeru zaznamo odstopanje od tlorisnega radija, ki ga uporabljajo pri načrtovanju cest, kar je treba upoštevati z ustreznim zamikom stebrov ali vsaj ležišč. Tloris nagnjene krožnice ima namreč obliko elipse. Prav tako nastanejo odstopanja v prečnem nagibu prereza oz. prečnem nagibu ležišč v fazi narivanja. Pri zelo velikih radijih so ta odstopanja majhna in zanemarljiva, pri majhnih radijih ali velikih dolžinah objektov pa lahko postanejo odstopanja neobvladljiva.

Odstopanje v tlorisu praviloma rešujemo s spreminjajočo se dolžino konzol, saj je dovolj, da je v konstantni ukrivljenosti ($R = \text{konst.}$ ali $R = \infty$) samo spodnji del škatle, ki potuje po drsnih ležiščih. Splošno cestno os, ki je lahko sestavljena iz kombinacij preme, prehodnic in radijev, nadomestimo s konstantnim nadomestnim radijem po celotni dolžini narivanja (slika 15).

Višinski položaj prometnice v odvisnosti od vzdolžne lege imenujemo niveleta ali pa kar vzdolžni profil prometnice. Vodenje nivelete ceste ali železnice se v splošnem izvaja z zaporedjem različnih nagibov, vzponov (+) ali padcev (-), z vmesno vertikalno zaokrožitvijo.



Slika 14 • Geometrija vijačnice in videz konstrukcije, levo iz (Göhler, 2000), desno iz (AFGC, 1999).



Slika 15 • Nadomestni radij omogoča izvedbo ceste z manjšim odstopanjem realne osi.

Velikost te zaokrožitve je odvisna od največje projektne hitrosti za obravnavano prometnico, pri cestah pa še od tipa zaokrožitve, torej ali je zaokrožitev konkavne ali konveksne oblike. Pravila za vodenje cest so zajeta v Pravilniku o projektiranju cest (UL RS 91, 2005), medtem ko so za železnice pravila za niveleta osi tirov zapisana v Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog (UL RS 92, 2010).

Lego zgornjega roba konstrukcije torej določa niveleta, medtem ko geometrijo spodnjega roba konstrukcije, po katerem konstrukcijo premikamo, določajo pogoji, ki omogočajo narivanje. To pomeni, da mora biti višinska

lega spodnjega roba v konstantnem nagibu ali v konstantni zakrivljenosti.

Problem različne geometrije spodnjega in zgornjega roba konstrukcije je mogoče obravnavati na več načinov, kar je prikazano na sliki 16. Najprej s spremenljivo višino konstrukcije, kot je prikazano na sliki 16a in v literaturi (Göhler, 2000). Manjša odstopanja nam dopušča način z elastičnim deformiranjem konstrukcije, ki je prikazan na sliki 16b in je analiziran v nadaljevanju članka. Na sliki 16c pa je prikazana nova metoda gradnje, ki omogoča narivanje konstrukcije v poljubni geometriji nivelete s pomočjo začasne pod-

konstrukcije v obliki AB-podstavka, kar je predstavljeno v disertaciji avtorja članka (Markelj, 2016).

V nadaljevanju prispevka je narejena analiza dopustnega prisilnega deformiranja od zabetonirane linije objekta. Iz te začetne oblike, ki še nima obremenitev od vsiljenih deformacij, smo elastično konstrukcijo prisilno deformirali v konkavni ali konveksni radij ter poizkušali ugotoviti sprejemljive vrednosti ukrivljenosti pri uporabi te metode.

Vsiljeno deformiranje je lahko tudi nenamerno, in sicer kot posledica napak pri načrtovanju geometrije ali napak pri izvedbi objekta in delavnice segmentov. Tudi v tem primeru si lahko za oceno velikosti vsiljenih napetosti pomagamo z diagrami, ki so prikazani v naslednjih poglavjih.

3.2 Vplivi prisilnega deformiranja od začetne oblike

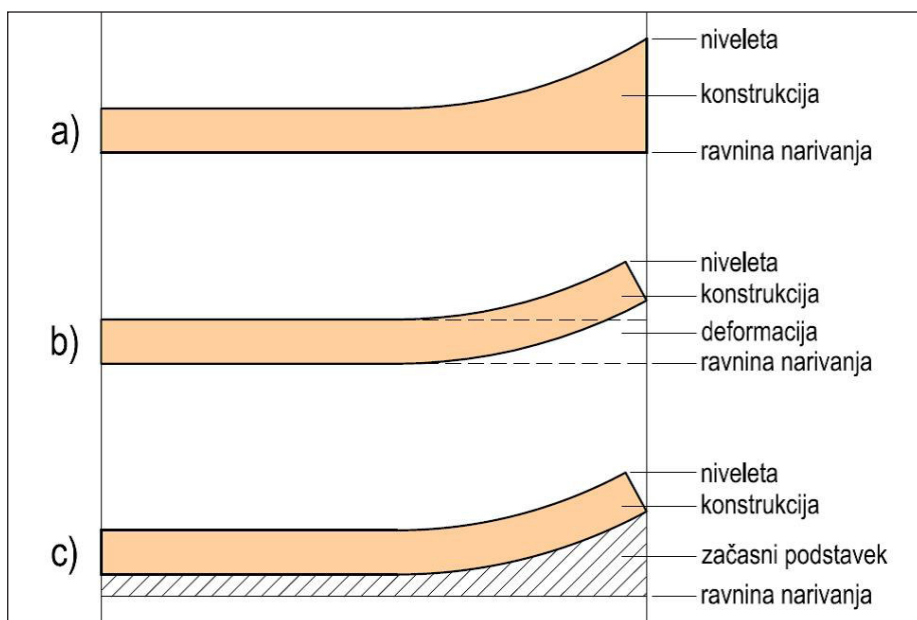
Da lahko most izdelamo po tehnologiji postopnega narivanja, mora biti njegova os v vzdolžnem prerezu (niveleta) v celotnem delu v konstantnem nagibu (vzponu ali padcu) ali pa v celotnem delu v konstantnem radiju (konveksnem ali konkavnem). Kombinacija preme in radija ali kombinacija različnih radijev teoretično ni mogoča. Če pa se zavedamo, da so gradbene konstrukcije do neke mere podajne, lahko to njihovo lastnost izkoristimo in v kontroliranem obsegu odstopamo od tega pravila, kar pa v konstrukcije prinaša določene vplive.

Izhodiščna (začetna) oblika je lahko ravna ($R = \infty$) ali pa zakrivljena v radiju R_w , zato ni posebej obravnavan primer, ko iz radija preidemo v premo, saj je primer ekvivalenten. Če linijski nosilec s togostjo EI_z z upogibno dvojico M ukrivimo (tako imenovani čisti upogib – slika 17a), dobimo znano relacijo iz mehanike konstrukcij (Bedenik, 2012):

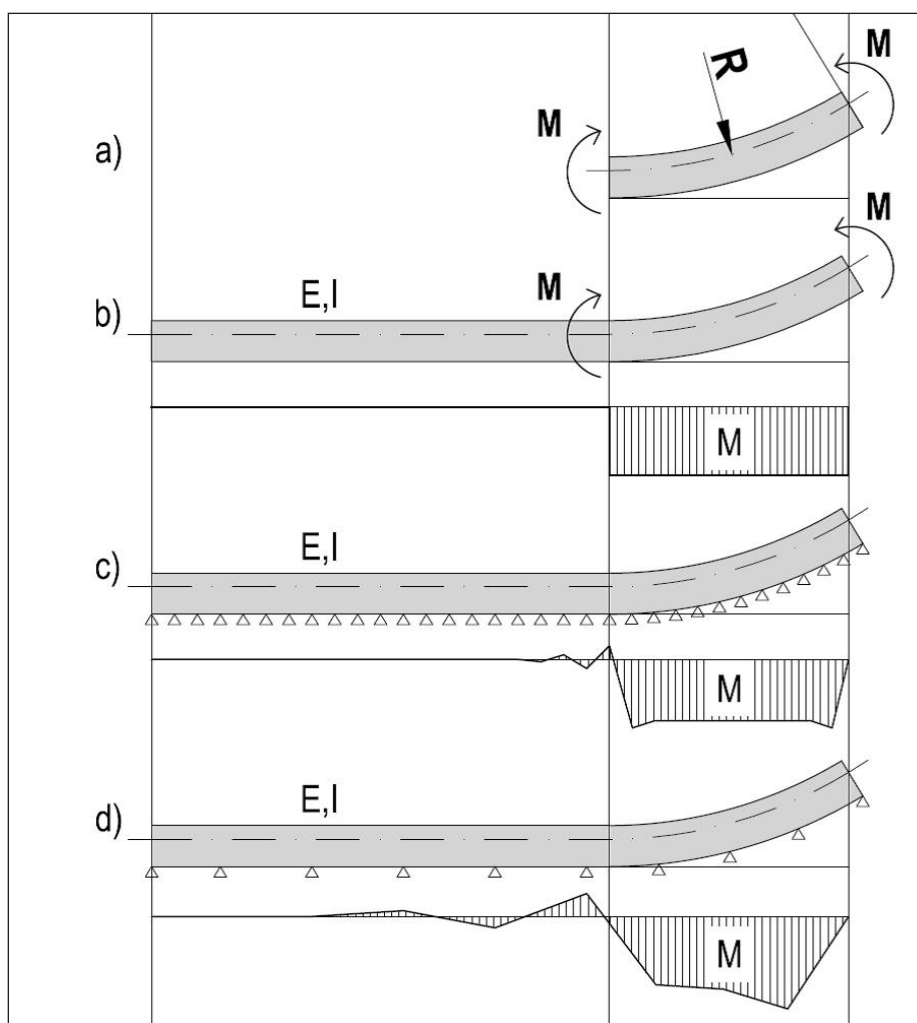
$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI_z} \quad (9)$$

V našem primeru se ukrivljenost povzroči z dviganjem ali spuščanjem konstrukcije na ležiščih, torej s spremembo reakcij, ne pa z dvojico sil na koncih. Diagram upogibnih momentov je podoben konstantnemu poteku samo v primeru zelo dolgih konstrukcij (slika 17b).

Realni robni pogoji potek diagrama spremenijo. Na skici (slika 17c) je prikazan potek upogibnih momentov v primeru relativno gosto razporejenih podpor (ali zelo dolgega nosilca), na skici (slika 17d) pa za primer vsiljene deformacije prek samo nekaj podpor.



Slika 16 • Odstopanje med teoretično linijo narivanja in dejansko niveleto.



Slika 17 • Različni vplivi deformacije nosilca

Vendar v vseh primerih velikostni red vplivov ostaja enak, tako da lahko za oceno vrednosti vplivov upoštevamo enačbo (9) oziroma njeno izpeljanko:

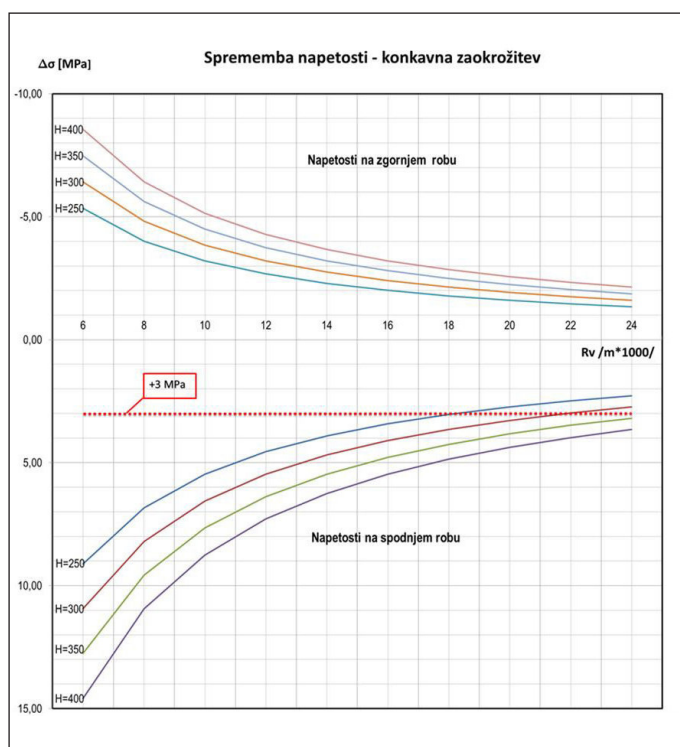
$$M = \frac{E \cdot I_z}{R} \quad (10)$$

$$\Delta\sigma_{zg} = \frac{M}{W_{zg}} \quad (11)$$

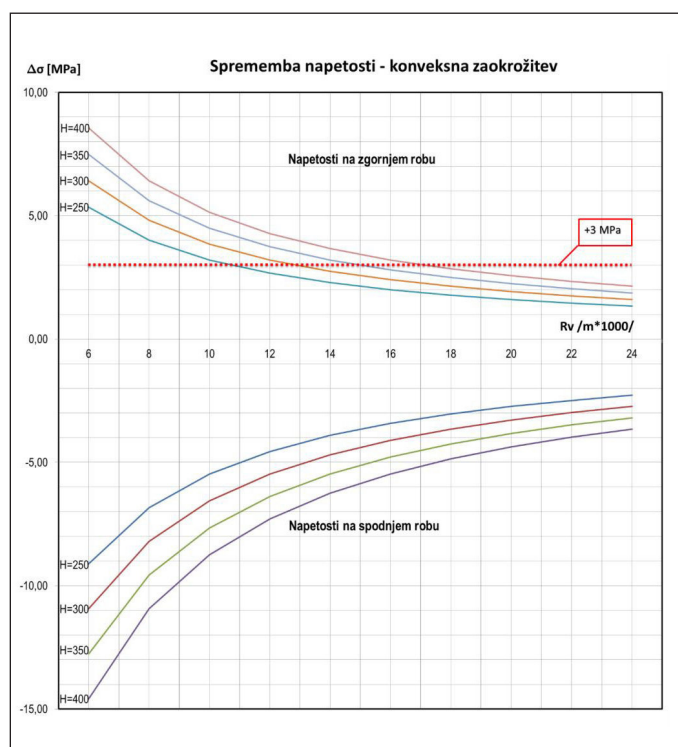
$$\Delta\sigma_{sp} = \frac{M}{W_{sp}} \quad (12)$$

H (m)	A (m ²)	I _z (m ⁴)	W _{sp} (m ³)	W _{zg} (m ³)
2,50	7,60	6,35	4,06	6,93
3,00	8,40	10,33	5,51	9,39
3,50	9,20	15,60	7,13	12,15
4,00	10,00	22,28	8,91	15,19

Preglednica 2 • Karakteristike prerezov, izračunane po izrazih, dobljenih s statistično analizo izvedenih objektov.



Slika 18 • Sprememba napetosti pri prisilnem deformiranju za konkavne zaokrožitve.



Slika 19 • Sprememba napetosti pri prisilnem deformiranju za konveksne zaokrožitve.

Oziroma skupne napetosti v konstrukciji v fazi postopnega narivanja:

$$\sigma_{zg} = -\frac{N_k}{A_x} - \frac{\sum M_i}{W_{zg}} \quad (13)$$

$$\sigma_{sp} = -\frac{N_k}{A_x} + \frac{\sum M_i}{W_{sp}} \quad (14)$$

Pri čemer sta

N_k – sila celotnega centričnega napenjanja in $\sum M_i$ – vsota vseh upogibnih vplivov med narivanjem (lastna teža, uporabna obtežba, dT, toleranca izvedbe in vsiljene deformacije). Iz analize izvedenih objektov je bilo ugotovljeno, da znašajo običajne vrednosti napetosti zaradi centričnega napetja v fazi postopnega

narivanja od 4 MPa do 6 MPa. Praksa je pokazala, da je mogoče z dodatnimi kabli nadoknaditi ali začasno dopustiti dodatne natezne napetosti v vrednosti vsaj 3 MPa, v posebnih primerih pa tudi več. Dodatne tlačne napetosti na nasprotnem robu navadno niso problematične. Vsiljene napetosti se sčasoma zaradi reoloških pojavov zmanjšajo na skoraj polovico začetnih vsiljenih napetosti.

V diagramih na slikah 18 in 19 so podani rezultati spremembe napetosti $\Delta\sigma$ za naslednje vrednosti parametrov:

konstrukcijske višine škatle $H = 2,5$ m, $H = 3,0$ m, $H = 3,5$ m in $H = 4,0$ m; konveksne ali konkavne zaokrožitve v razponu polmerov od 6000 m do 24000 m;

konstantni elastični modul betona $E_c = 35.000$ MPa.

Razpon konstrukcijskih višin je bil izbran v območju običajne uporabe TPN, to so škatlaste konstrukcije višine od 2,5 m do 4,0 m. Območje velikosti radijev pa glede na s pravilniki predpisane minimalne radije zaokrožitve za ceste (GC, HC in AC) in železnice.

Če določimo statistične vrednosti geometrijskih karakteristik prerezov A_x , I_z , W_{zg} in W_{sp} z enačbami iz prejšnjega poglavja (2), (3), (4) in (5), dobimo vrednosti v preglednici 2.

Za različne višine tipičnega škatlastega prereza in prisilno deformiranje v različno velike vertikalne zaokrožitve R_v (konkavne ali kon-

veksne oblike) dobimo na robovih konstrukcije spremembo vzdolžne napetosti, kot sledi iz diagramov (sliki 18 in 19).

Za dobljene rezultate smo naredili kontrolno primerjavo med fiktivnimi enako širokimi škatlami različnih višin (od 2,5 m do 4,0 m) še z računalniškim programom za analizo konstrukcij (Sofistik). Dobili smo identične diagrame, čeprav so se karakteristike prereza

(A_w , I_z , W_{zg} in W_{sp}) razlikovale od statistično obdelanih. Razlog je v tem, da pri izvrednotenju enostavnih enačb do konca ostanejo samo še geometrijska razmerja, ki določajo specifične deformacije po obeh robovih konstrukcije (lega težišča) in modul elastičnosti.

Če vpeljemo še približno relacijo za lego težišča, ki velja za običajne škatlaste mostne prereze ($y_{zg} \approx H/3$) in smo jo navedli v

prejšnjem poglavju, dobimo praktično poenostavitev za hitro analizo dodatnih napetosti v konstrukciji zaradi vsiljenih deformacij.

$$\Delta\sigma_{zg} = \frac{M}{W_{zg}} = \frac{E \cdot I_z}{R \cdot W_{zg}} = \frac{E \cdot y_{zg}}{R} \approx \frac{1}{3} E \frac{H}{R} \quad (15)$$

$$\Delta\sigma_{sp} = \frac{M}{W_{sp}} = \frac{E \cdot I_z}{R \cdot W_{sp}} = \frac{E \cdot y_{sp}}{R} \approx \frac{2}{3} E \frac{H}{R} \quad (16)$$

(15) in (16), je za spremembo napetosti pri prisilnem vodenju osi konstrukcije odločilno razmerje med težiščno razdaljo robov (y_{zg} in y_{sp}) in radijem prisilnega krivljenja oziroma med višino prereza H in radijem R . Večji obseg uporabe vsiljenega deformiranja za mostne škatlaste konstrukcije je možen, ko prisilno vodenje povzroča natege na zgornjem robu (konveksne zaokrožitve), kjer so napetosti približno dvakrat manjše kot na spodnjem robu.

Za vertikalne zaokrožitve z velikimi radiji na avtocestah in hitrih cestah (AC in HC) so vsiljene geometrije možne in izvedljive, prav tako pri novozgrajenih železniških mostovih. Za vertikalne zaokrožitve z manjšim radijem (GC in LC) uporaba ni primerna. Metoda vsiljene deformacije prav tako ni uporabna pri manjših lokalnih spremembah nivelete, kot so na primer nadvišanja geometrije v posamičnih večjih razponih.

4 • SKLEP

Vzpostavljena je bila baza podatkov za 27 izvedenih cestnih mostov, zgrajenih s TPN, za katere je bila projektna dokumentacija izdelana v Inženirskem biroju Ponting, d. o. o., iz Maribora. Iz primerjalne analize pomembnejših karakterističnih parametrov objektov so bili statistično narejeni uporabni zaključki za teorijo in prakso gradnje mostov. Geometrijske karakteristike prečnih prevez različnih objektov imajo nekatere podobnosti, ki jih lahko strnemo na skupni imenovalac konstrukcijske višine prereza H z enačbami od (2) do (6). Betonski škatlasti prečni prezezi cestnih objektov imajo podobno lego težišča, nekje pri $H/3$ ($y_{zg} = 0,365 H$) od zgornjega roba (6). Vgrajeno količino kablov za prednapenjanje lahko ocenjujemo glede na

tipičen razpon z izrazom (7) ali pa glede na vitkost prekladne konstrukcije L/H z izrazom (8).

Vsako odstopanje od priporočenih vitkosti v fazi gradnje ima za posledico izjemno povečano porabo kablov za prednapenjanje, hkrati pa lahko vodi do povečanih pomikov in zasukov, ki lahko povzročajo velike težave med gradnjo. Z analizo geometrije osi (tlorisne karakteristike in niveleta) izvedenih objektov je dokazano tudi, da je s TPN mogoče uspešno izvesti tudi objekte, ki nimajo zahtevanih osnovnih geometrijskih značilnosti za to tehnologijo.

V drugem delu prispevka je bila analizirana možnost prisilnega deformiranja konstrukcije od začetne oblike. Kot je razvidno iz enačb

5 • LITERATURA

- AFGC, Association Francaise de Genie Civil, Guide des ponts pousses, Presses de l'école national des Ponts et chaussées, Paris, 1999.
- Bedenik, B., Statika konstrukcij, Maribor, Fakulteta za gradbeništvo, 2012.
- Göhler, B., Pearson, B., Incrementally launched Bridges Design and Construction, Berlin, Ernst&Sohn, 2000.
- Markelj, V., Inovativne metode pri gradnji mostov po tehnologiji postopnega narivanja, Disertacija, Univerza v Mariboru, FGPA, Maribor, 2016.
- Rosignoli, M., Bridge Launching, London, Thomas Telford, 2014.
- UL RS 91, Pravilnik o projektiranju cest, Ljubljana, Uradni list, 2005.
- UL RS 92, Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, Ljubljana, Uradni list RS, 2010.