

dr. Viktor Markelj, univ. dipl. inž. grad.
viktor.markelj@ponting.si



Jernej Maher, univ. dipl. inž. grad.
jernej.maher@ponting.si
Ponting, d. o. o., Strossmayerjeva 28, 2000 Maribor
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor



Strokovni članek
UDK/UDC: 624.21.037:656.2(497.4Pesnica)

VIADUKT PESNICA – INOVACIJE V ŽELEZNIŠKI INFRASTRUKTURI

PESNICA VIADUCT – INNOVATIONS IN RAILWAY INFRASTRUCTURE

Povzetek

Prispevek opisuje železniški viadukt Pesnica – od koncepta, analize, izgradnje do uporabe. Dvotirni viadukt je z dolžino 912,60 m najdaljši železniški viadukt v Sloveniji. Preko viadukta poteka tir na togi podlagi z neprekinjenim zvarjenim tirom brez tirnih dilatacij. Viadukt je zasnovan kot armiranobetonska prednapeta integralna konstrukcija, ki sestoji iz 32 polj povprečne dolžine po 28 m. Ob zanimivi zgodovini ima nov viadukt tudi inovativno tehnično zasnovo, saj je koncipiran kot integralna konstrukcija brez ležišč. Posamezni, 112 m dolgi okvirni segmenti so med seboj povezani preko razcepljenih stebrov, ki omogočajo medsebojno dilatiranje okvirjev. V prispevku sta opisani tudi analiza viadukta s posebnostmi in obremenilna preizkušnja viadukta v zaključku.

Ključne besede: železniški viadukt, prednapeti beton, integralna konstrukcija, analiza, tir na togi podlagi

Summary

The article describes the Pesnica railway viaduct – from concept, analysis, construction to service. The 912.60-metre-long double-track viaduct is the longest railway viaduct in Slovenia. A slab track, featuring a continuous welded rail without track expansion joints, is laid over it. The viaduct is designed as a reinforced concrete prestressed integral structure, consisting of 32 spans, each with an average length of 28 m. In addition to its interesting history, the new viaduct also boasts with an innovative technical design conceived as an integral structure without structural bearings. Each of the 112 m long frame segments is connected by split columns, facilitating mutual dilatation of the frames. The article also describes the analysis of the viaduct with specific features and the load test at the end.

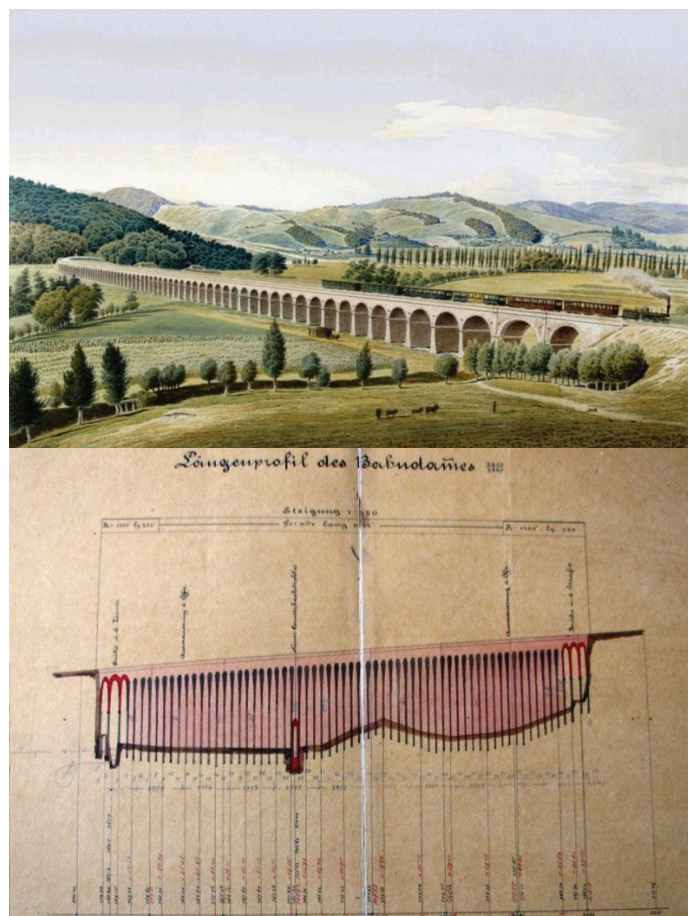
Key words: railway viaduct, pre-stressed concrete, integral structure, analysis, slab track

1 UVOD

V Sloveniji še nismo gradili večjih železniških premostitvenih objektov, ampak le manjše, v okviru izvedbe izvenribovskih križanj, ali pa kot obnova obstoječih železniških objektov. V zadnjem času pa so bili zgrajeni ali so v gradnji kar štirje večji železniški objekti, in sicer trije enotirni viadukti na drugem tiru Divača-Koper (viadukti Glinščica, Gabrovica in Vinjan) ter dvotirni viadukt Pesnica na železniški progi Maribor-Šentilj, ki bo predstavljen v prispevku in je tudi najdaljši med vsemi.

Novi odsek poteka poleg obstoječe proge Dunaj-Trst, ki ima na tej lokaciji še posebej zanimivo zgodovino. Obstoječa enotirna proga je potekala po nasipu, kjer je bil prvotno leta 1864 zgrajen viadukt dolžine 649 m, s čimer je bil takrat najdaljši viadukt na t. i. južni železnici (slika 1). Viadukt, zgrajen pod vodstvom avstrijskega inženirja Carla von Ghega, je imel 64 obokov iz kamna in opeke, temeljen pa je bil na lesenih kolih. Domnevno zaradi posedanja in slabe kvalitete opeke je viadukt začel propadati. Po letu 1860 so ga začeli zasipavati in ga, razen nujnih razponov, v celoti zasipali [Wikipedia, 2022].

Nasip, po katerem poteka obstoječa enotirna proga, je visok do 15 m in ima težave s stabilnostjo, saj so se že pojavljali zdrsi in potrebne sanacije nasipa. Težave so tudi s starim predorom, zato je naročnik na tem odseku izbral v celoti novo traso za progno.



Slika 1. Nekdanji železniški viadukt čez dolino Pesnice iz leta 1846 (akvarel in vzdolžni profil) [Wikipedia, 2022].

Celoten projekt obsega 3,73 km dvotirne železniške proge, od tega 1530 m v železniškem predoru, dobrih 900 m pa na viaduktu. Pogodbena vrednost za odsek je na izvajalskem razpisu leta 2019, vključno z gornjim ustrojem proge (tir na togi podlagi, vozna mreža, signalno varnostne naprave), znašala 101 mio. EUR z DDV. Od tega so gradbena dela za viadukt, brez tirnih naprav in vozne mreže, znašala približno 12 mio. EUR. Končna cena viadukta s podražitvami in DDV je znašala 14,8 mio. EUR.

Osnovni podatki projekta so razvidni iz preglednice 1.

Investitor, Naročnik	Republika Slovenija, Direkcija RS za infrastrukturo – DRSI
Projekt	»Gradnja odseka železniške proge Maribor-Šentilj-d.m. od km 595+870 do km 599+600 glavne ŽP št. 30 Zidani Most-Šentilj-d.m.«
Skupina izvajalcev	JV Pomgrad, d. d., Kolektor Koling, d. o. o., SŽ-ŽGP Ljubljana, d. d., GH-Holding, d. o. o., Gorenjska gradbena družba, d. d.
Naziv objekta	Železniški viadukt PESNICA
Izvajalec viadukta	POMGRAD, d. d., Murska Sobota Podporni odri Pomgrad in PERI izvajalec prednapenjanja Freyssinet Adria SI, d. o. o.
Projektant	Inženirski biro PONTING, d. o. o., Maribor, vse faze načrtovanja [Ponting, 2015-2022]
Inženir	DRI upravljanje investicij, d. o. o., Ljubljana

Preglednica 1. Osnovni podatki o projektu.

2 PROBLEMATIKA PREMOŠČANJA

2.1 Namen viadukta in opis lokacije

Železniška proga na višini 18 m z viaduktom premošča ravno, občasno poplavno dolino, ki jo je nasula in izoblikovala reka Pesnica (slika 2). Celotna dolina širine okoli 1 km je kmetijsko območje, urejeno v njive, in leži na nadmorski višini med 250 m in 260 m. Tla so slabo nosilna, sestavljena iz glinasto meljnih zemljin različne gnetnosti, od židke in lahke konsistence do zemljin trdne konsistence. Vmes se pojavljajo še drobni peski različne sestave, od zelo rahle do rahle gostotne sestave. Podtalna voda se pojavlja praktično do vrha. Nosilni sloj laporovca se nahaja na globini 16 m, ob robovih doline pa se nosilna osnova dvigne do 4 m pod površje.

Viadukt je namenjen elektrificirani dvotirni železniški progi, ki pa bo v prvi fazi izvedena kot enotirna. Računska hitrost vožnje je 120 km/h, kategorija nosilnosti proge pa znaša D4. Objekt poleg kmetijske doline premošča še avtocesto A1 Ljubljana-Šentilj, glavno cesto Pesnica-Lenart, reko Pesnico, pritok Cirknica ter lokalne ceste.



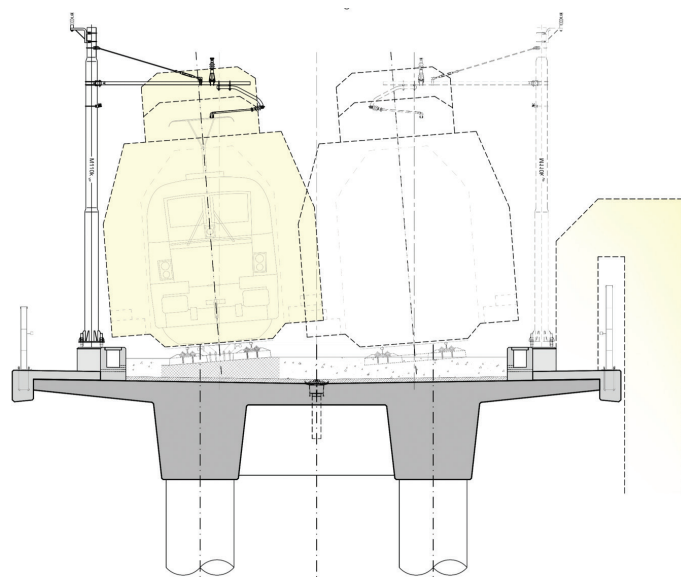
Slika 2. Obstoječa proga na nasipu in novi potek proge jugo-vzhodno od obstoječe.

2.2 Geometrijski elementi proge in objekta

Viadukt je dolžine dobrih 900 m, od česar se 380 m osi nahaja v premi, v prehodnici $L=145$ m ter v radiju $R = 850$ m (v dolžini 380 m), nadvišanje zunanjega tira v radiju znaša 120 mm. Niveleta proge je v konstantnem vzdolžnem padcu $i = 9,125$ ‰. Zaradi bližine postaje Pesnica se razmak med tiri na viaduktu spreminja, in sicer od 4,20 m na začetku do 4,60 m na koncu viadukta. Zaradi tehnoloških razlogov gradnje je viadukt konstantne širine.

2 x prostor za pritrditev ograje PHO	2 x 0,35	0,70 m
2 x hodnik (vključno s temeljem vozne mreže)	2 x 1,73	3,46 m
2 x kanaleta (svetla odprtina 30/40cm)	2 x 0,60	1,20 m
Prostor za dva tira	2,20 + 4,60 + 2,20	9,00 m
Skupna širina viadukta	2,68 + 9,00 + 2,68	14,36 m

Preglednica 2. Sestava prometnega profila na objektu.



Slika 3. Karakteristični prečni prerez viadukta.

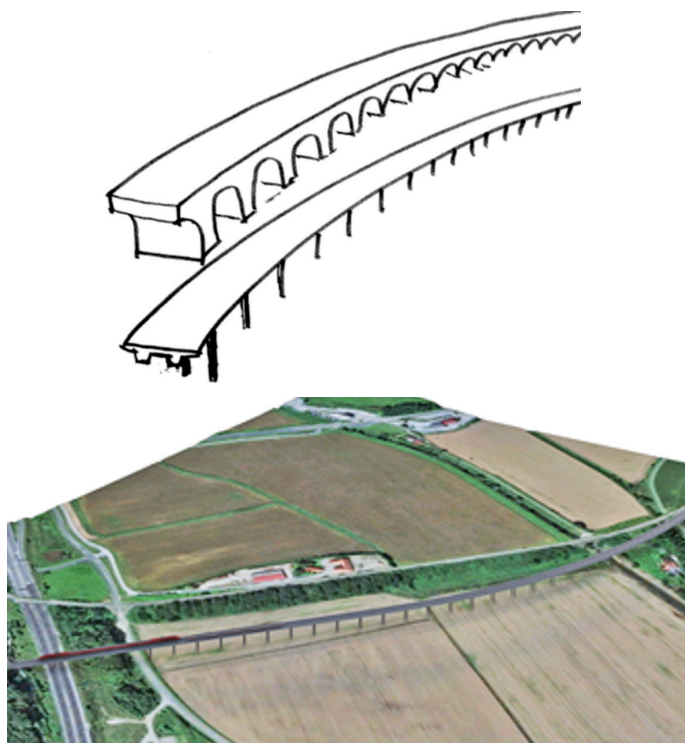
Viadukt ima na obeh straneh hodnik, ki služi morebitni evakuaciji potnikov ter revizijskim namenom. Hodnik je širine 1,73 m, na mestih vpetja (temelja) vozne mreže pa ima lokalno širino 1,18 m, kar omogoča pregled objekta s posebnim vozičkom. Skupna širina viadukta znaša 14,36 m (preglednica 2 in slika 3).

3 KONCEPT

V zadnjem desetletju je bilo izvedenih nekaj zanimivih realizacij na novih železniških povezavah v Nemčiji. Omeniti je treba zelo zanimivi izvedbi viadukta Gänsebachthalbrücke [Schenkel, 2010] in Stöbnitztalbrücke [Jung, 2010], ki oba potekata preko nizkih dolin in sta zasnovana kot integralna viadukta brez ležišč. Osnovni cilj take zasnove je narediti varen in trajen objekt, ki je hkrati zelo gospodaren, kar pomeni z nizko začetno investicijo ter majhnimi stroški za vzdrževanje. Pri integralnem konceptu nosilne konstrukcije odpadeta vgradnja in vzdrževanje ležišč, kar je lahko precej velik strošek.

Posebnost navedenih dolgih železniških objektov je členjenost na krajše integralne segmente, kar omogoča izvedbo tirov brez posebnih tirnih dilatacij, torej uporabo neprekinjenega zavarjenega tira. Tir brez tirnih dilatacij je cenejši za izgradnjo in vzdrževanje, je bolj trajen, povzroča manjše emisije hrupa, z manjšim rizikom iztirjanja vlaka pa je tudi bolj varna rešitev ([Marx, 2011], [Freystein, 2011]).

Zaradi relativno nizke lege nad dolino smo lahko sledili oblikovanju nekdanjega zasipanega viadukta iz 19. stoletja, to je z enakovrednimi krajšimi razponi, vendar v moderni transparentni maniri (slika 4).



Slika 4. Koncept oblikovanja sledi inženirskemu minimalizmu (skica in 3D-render).

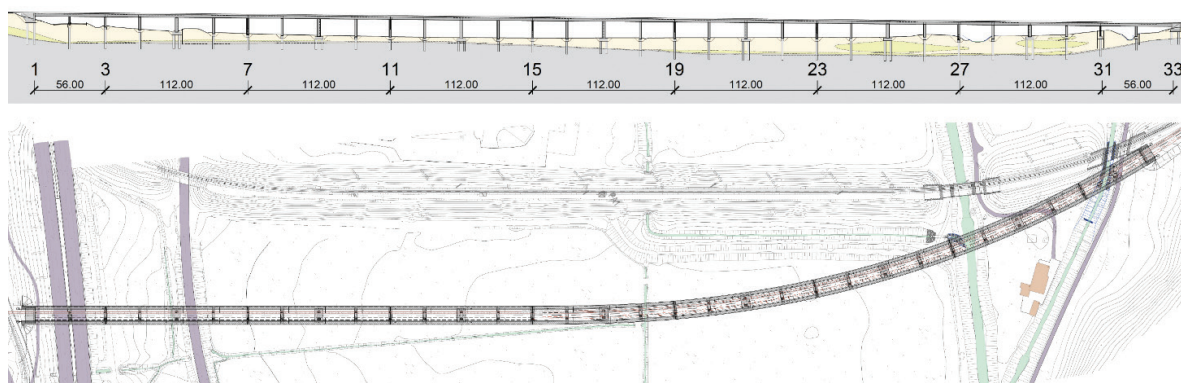
3.1 Konstrukcija

Viadukt je skupne dolžine 912,60 m ter konstantne širine 14,36 m ter ima 32 razponov povprečne dolžine 28 m. Statična dolžina 896 m med krajnimi osmi je razdeljena na devet delov, na 7 vmesnih okvirjev dolžine po 112 m ter dva krajna polovična okvirja dolžine 56 m (slika 5). To daje naslednje statične razpone:

$$56 \text{ m } (2 \times 28 \text{ m}) + 7 \times 112 \text{ m } (27 \text{ m} + 29 \text{ m} + 29 \text{ m} + 27 \text{ m}) + 56 \text{ m } (2 \times 28 \text{ m}) = 896 \text{ m}$$

ki sta spodaj vpeta v pilotno blazino in temeljena z dvema vrstama pilotov $2 \times 3 = 6$ pilotov $\varnothing 150$ cm. Ta tip podpore prenaša večji del vzdolžne zavorne sile.

- Tip B: vmesna podpora 2 x ϕ 160 cm, ki je podajno temeljena na eni vrsti 4 pilotov ϕ 150 cm.
- Tip C: podpora na konstrukcijski dilataciji je v bistvu pre-rezan okrogli steber ϕ 160 cm, ki ima manjšo togost ter na vrhu omogoča toplotne dilatacije v obe smeri. Na videz je podpora tipa C podobna podpori tipa B.



Slika 5. Vzдолžni prerez in tloris – objekt je členjen na 9 delov.

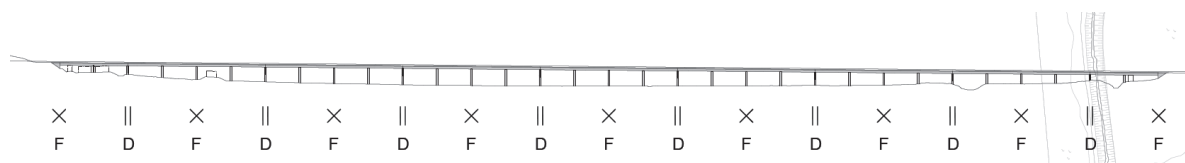
Prva in zadnja dva razpona ($2 \times 28 \text{ m} = 56 \text{ m}$) sta monolitno povezana z obema krajnima opornikoma, ki predstavljata fiksno nepomično točko s preходом na teren. Z nepomično točko na oporniku se izognemo kombinaciji potencialnih rizikov, v tem primeru vzdolžnemu dilatiranju (horizontalne deformacije) in posedanju terena izza opornika (vertikalne deformacije).

Členjenje viadukta je prikazano na sliki 6. Vsak tipični vmesni okvir dolžine 112 m ima svoj center pomikov (fiksno točko) v sredini pod centralno, bolj togo podporo (A). Ostale podpore tipa B in C so zasnovane tako, da lahko prevzemajo deformacije zaradi temperature in reologije (slika 7).

Celotno temeljenje je predvideno kot globoko na pilotih premera 150 cm. Podpore tipa A so temeljene na skupini pilotov v dveh vrstah (2x3 piloti), s čimer dobimo togo vpeto podporo. Ostale podpore tipa B in C pa so temeljene na eni vrsti pilotov (1 x 4 piloti), da dobimo vzdolžno bolj podajno podporo, ki se lahko prilagaja temperaturnim spremembam. Podpore in temeljenje so zasnovani tako, da so povprečne togosti ene zavorne v razmerju $C+B+A+B+C=9\%+18\%+46\%+18\%+9\%=100\%$. To pomeni, da srednja toga podpora tipa A prevzame skoraj polovico horizontalne sile (Z ali S).

3.3 Prednapenjanje

Pri dolгих viaduktih je običajna tehnologija segmentna gradnja po poljih, pri čemer se opaži in zabetonira eno polje s previ-



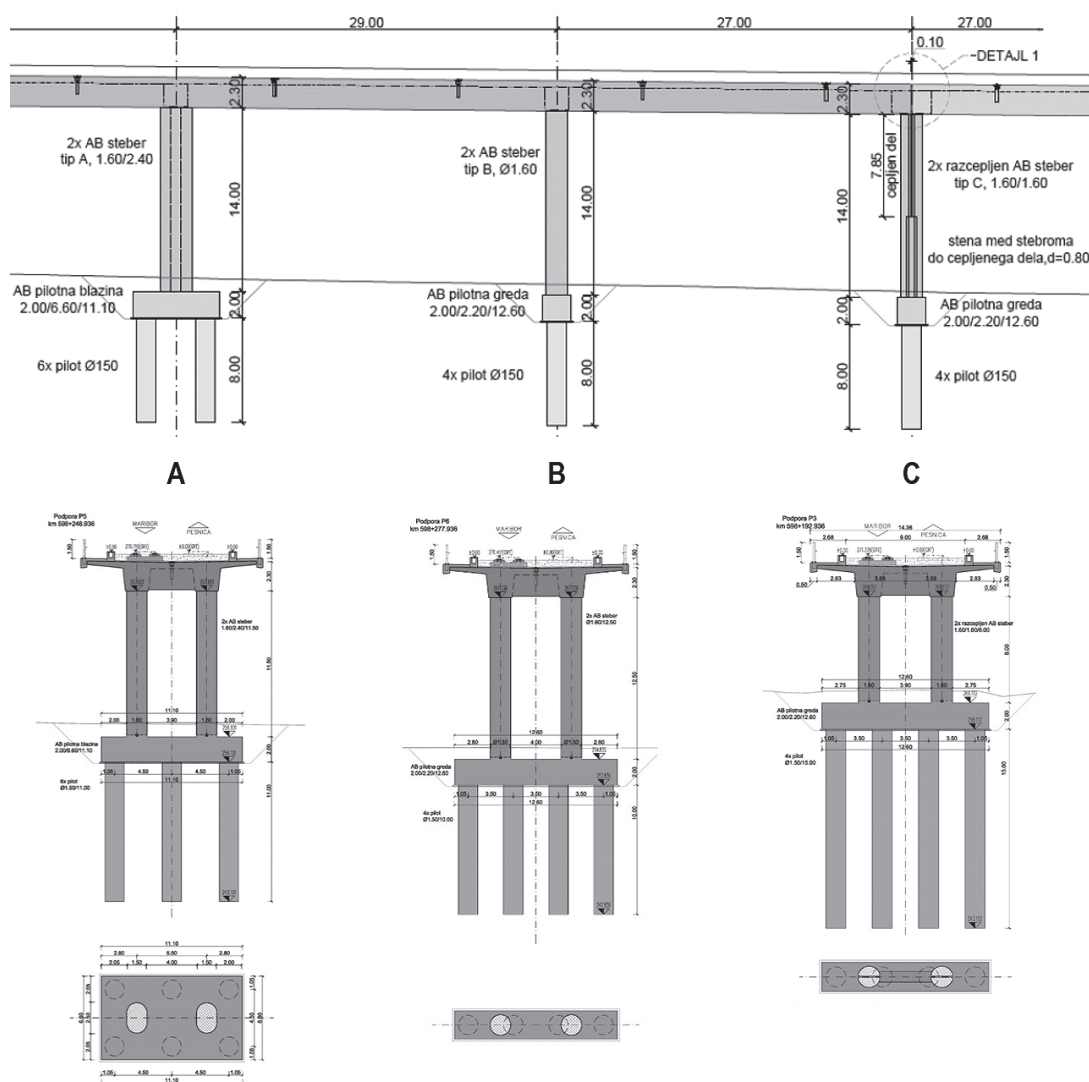
Slika 6. Členjenje viadukta (F = fiksna točka, D = dilatiranje – sproščanje okvirjev).

3.2 Podporna konstrukcija in temeljenje

Elementi podporne konstrukcije, vse vmesne podpore in oba opornika so integralno povezani z zgornjo konstrukcijo. Vmesne podpore so sestavljene iz stebrov okroglega prereza ali ovalnega prereza in jih lahko razdelimo na 3 tipe (slika 7):

- Tip A: centralna podpora okvirja (center pomikov) je sestavljena iz dveh ovalnih stebrov dimenzij 160 cm / 240 cm.

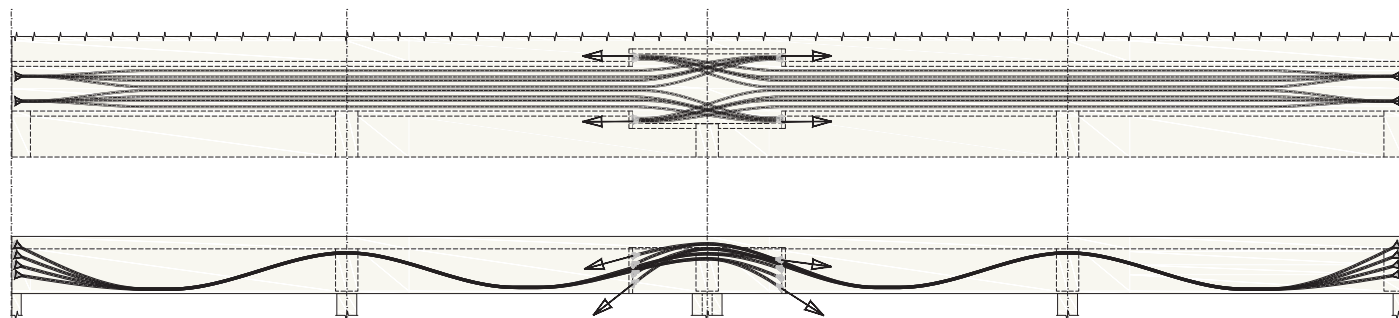
som, sledi prednapenjanje tega segmenta in nato ponavljanje postopka. Pri zasnovi z integralnimi okvirji nastopi problem kvalitetne izvedbe vogala končnega okvirja, saj prednapenjanje zahteva svoj prostor in slabi sam vogal. Zato smo vpeljali nov način napenjanja okvirjev, in sicer iz sredine okvirja. V vogalih okvirja so vgrajene potopljene pasivne glave, ki ne motijo poteka armature v vogalih. Aktivne napenjalne glave pa se nahajajo na območju sredinske podpore (slika 8), kjer se kabli



Slika 7. Trije različni tipi podpor: tip A daje togost okvirju, tip B vmesna podpora in tip C razcepljena podpora, ki podpira dva sosednja okvirja.

preklopijo, kar ustreza tudi obliki diagrama upogibnih momentov. To je inovacija v primerjavi izvedenim referenčnim železniškim viaduktom ([Schenkel, 2010], [Jung, 2010]) ter pomeni povečanje kvalitete gradnje in s tem povečanje predvidene trajnosti objekta.

V vsakem od obeh reber zgornje konstrukcije je vgrajenih po 8 kablov 19 x 15,7 mm, dolžine 62 m, ki smo jih napenjali s silo 3800 kN. Vsi kabli so bili sistema Freyssinet in vgrajeni v plastične PEHD-cevi ter elektroizolirani.



Slika 8. Inovativna shema prednapenjanja okvirjev omogoča kvalitetno izvedbo členjenih stebrov.

4 ANALIZA

4.1 Računske metode za železniške objekte

Osnovne predpostavke, ki jih je bilo treba upoštevati pri določitvi obtežb in vrsti analize, so bile, da bo na viaduktu potekala elektrificirana dvotirna železniška proga (v prvi fazi enotirna), da znaša računsko hitrost vožnje 120 km/h ter kategorija nosilnosti proge D4.

Za potrebe izvedbe računskih analiz objektov, namenjenih železniškemu prometu, se lahko uporabljajo za izračune obremenitev konstrukcije, deformacij (pomiki, zasuki) ter pospeškov različni postopki, in sicer:

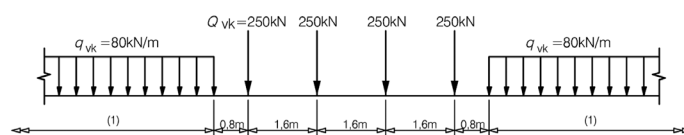
- izvedba statične analize konstrukcije ob upoštevanju obtežnih shem iz SIST EN 1991-2 [SIST, 2004], kjer se izračunane količine povečajo z dinamičnim faktorjem,
- izvedba dinamične analize v skladu s SIST EN 1991-2, poglavje 6.4.6 [SIST, 2004].

Obstaja tudi možnost pretvorbe dinamičnega problema v statičnega. To je možno narediti s pomočjo uporabe dinamičnih faktorjev, pri čemer analiza temelji na osnovi dejanskih kompozicij vlakov. Na podlagi tega je mogoče določiti spremembo notranjih statičnih količin v časovnem zaporedju.

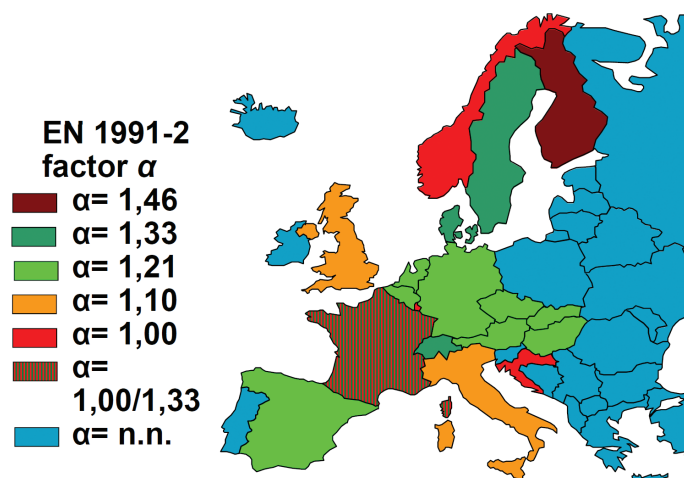
Za analizo je najenostavnejša statična analiza z uporabo dinamičnih faktorjev, ki pa je možna le v primeru, da ni nevarnosti za pojav resonančnega nihanja. Kot pomoč za določitev, ali je potrebna dinamična analiza, se lahko uporablja diagram 6.9 iz SIST EN 1991-2 [SIST, 2004]. Pri izračunu dinamičnih faktorjev Φ , s katerimi se povečajo statični učinki vplivov zaradi obtežnih shem LM71, SW/0 in SW/2, je treba upoštevati nivo vzdrževanja ter dolžino L_{ϕ} , na katero vplivajo tip konstrukcijskega elementa, material elementa ter statični sistem.

4.2 Obtežba

Analiza železniških objektov je zaradi kompleksnosti definiranja in podajanja obtežb mnogo zahtevnejša kot analiza preostalih objektov. Za analizo viadukta Pesnica so bile upoštevane vse merodajne obtežne sheme v skladu z veljavnimi standardi (LM71, SW/0 in SW/2).



Slika 9. Obtežni model LM 71 [SIST, 2004].



Slika 10. Upoštevanje faktorja razreda obtežbe α v Evropi [Tschumi, 2012].

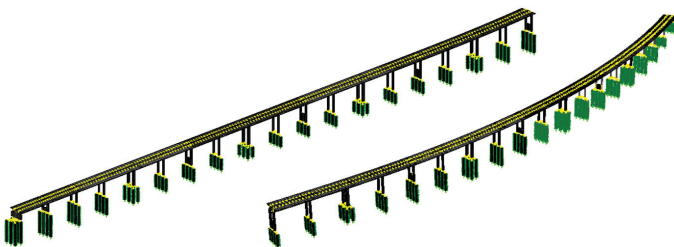
number of tracks on structure			Groups of loads			Vertical forces			Horizontal forces			Comment	
			Reference EN 1991-2			6.3.2/6.3.3	6.3.3	6.3.4	6.5.3	6.5.1	6.5.2		
1	2	≥ 3	number of tracks loaded	Load Group ⁽⁸⁾	Loaded track	LM 71 ⁽¹⁾ SW/0 ^{(1), (2)} HSLM ⁽⁶⁾⁽⁷⁾	SW/2 ^{(1),(3)}	Unloaded train	Traction, Braking ⁽¹⁾	Centrifugal force ⁽¹⁾	Nosing force ⁽¹⁾		
			1	gr11	T ₁	1			1 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾	Max. vertical 1 with max. longitudinal	
			1	gr 12	T ₁	1			0,5 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾	Max. vertical 2 with max. transverse	
			1	gr 13	T ₁	1 ⁽⁴⁾			1	0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾	Max. longitudinal	
			1	gr 14	T ₁	1 ⁽⁴⁾			0,5 ⁽⁵⁾	1	1	Max. lateral	
			1	gr 15	T ₁				1		1 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾	Lateral stability with “unloaded train”
			1	gr 16	T ₁			1		1 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾	SW/2 with max. longitudinal
			1	gr 17	T ₁			1		0,5 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾	SW/2 with max. transverse
			2	gr 21	T ₁ T ₂	1 1			1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	Max. vertical 1 with max longitudinal	
			2	gr 22	T ₁ T ₂	1 1			0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	Max. vertical 2 with max. transverse	
			2	gr 23	T ₁ T ₂	1 ⁽⁴⁾ 1 ⁽⁴⁾			1 1	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	Max. longitudinal	
			2	gr 24	T ₁ T ₂	1 ⁽⁴⁾ 1 ⁽⁴⁾			0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	1 1	1 1	Max. lateral	
			2	gr 26	T ₁ T ₂			1		1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	SW/2 with max. longitudinal
			2	gr 27	T ₁ T ₂			1		0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	SW/2 with max. transverse
			≥3	gr 31	T ₁			0.75			0.75 ⁽⁵⁾	0.75 ⁽⁵⁾	0.75 ⁽⁵⁾

Preglednica 3. Skupine obtežb železniškega prometa [SIST, 2004].

Seveda se je ob vertikalnih vplivih upošteval tudi vpliv pripadajočih horizontalnih sil (pospeševanje in zaviranje, centrifugalna sila in bočni udar). Dodatno težavo za analizo konstrukcije je predstavljala dvotirnost proge, ki znatno poveča možne obtežne situacije, ki so podane v tabeli v nadaljevanju. Ob tem je treba v programu ustrezno upoštevati možno ekscentričnost obtežb ter raznos le-teh v prečni in vzdolžni smeri. Dodatno je bil ob dinamičnemu faktorju Φ v analizi upoštevan tudi faktor razreda obtežbe $\alpha=1,21$, s katerim je treba povečati karakteristične vplive. Faktor razreda obtežbe α je namenjen obvladovanju dolgoročnega rizika povečanja obtežb pri tovoru na mednarodnih progah.

4.3 Opis globalnega modela

Pri modeliranju smo naredili primerjavo med dvema modeloma [SOFiSTiK, 2018], in sicer smo konstrukcijo zmodelirali samo z enim nosilcem ter kot »branasto« konstrukcijo, kjer smo vzdolžna nosilca povezali s prečniki na ustreznem rastru. Ta model smo kasneje uporabili za končno analizo. Zaradi težav pri analizi (uporaba modula namenjenega prometni obtežbi) smo konstrukcijo za potrebe statične analize razdelili na dva dela, in sicer ravni segmenti 1 do 5 in zakrivljeni segmenti 5 do 9.



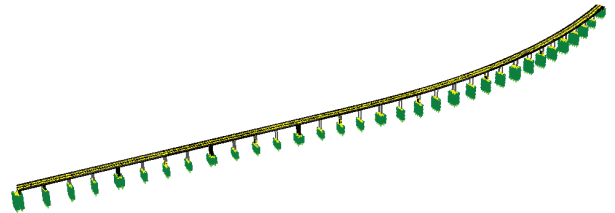
Slika 11. Ravni in zakrivljeni model konstrukcije za statično analizo.

V nadaljevanju so opisane tudi nekatere posebnosti pri analizi, do katerih je prišlo po izbiri izvajalca objekta. V fazi projektiranja je prišlo do nekaterih sprememb glede faznosti gradnje objekta. Za takšne viadukte je običajna gradnja po segmentih. Prvotna rešitev je predvidevala gradnjo posameznega tipičnega 112 m odseka prekladne konstrukcije v 4 delih. Na podlagi razvoja rešitve med projektantom in izvajalcem pa je prišlo do spremembe, ki je predvidevala betonažo celotnega segmenta v eni fazi ter prednapenjanje kablov iz sredine. S tem smo se izognili delovnim stikom pri gradnji posameznih segmentov, ne prihaja do oslabitev vogalov okvirjev, hkrati pa omogoča poljuben vrstni red betoniranja in pospešitev izdelave segmentov. Ob pričetku gradnje pa se je preverila tudi možnost, da se prvotno prednapne samo del kablov, ki so potrebni zaradi lastne teže konstrukcije, kasneje po razopazovanju pa še preostali del. Tako da so se prvotno napeli 3 kabli na sidrišče, kasneje pa preostanek, kar je poenostavilo in pospešilo gradnjo.

Eden od posebnosti gradnje ter analize objekta je bil prvi segment viadukta, ki poteka nad avtocesto. Prvotna rešitev je predvidevala celotno betonažo v eni fazi, vendar je kasneje prišlo do delitve tega segmenta na dva dela. Pozornost je bila namenjena temu, da smo določili maksimalno možno število kablov, ki se lahko napnejo v prvi fazi (4 kabli). Želja je bila, da

je število kablov, ki jih je treba zaščititi in varovati pred končno betonažo, čim manjše. Analiza je pokazala tudi, da je pri prednapenjanju krajnih segmentov, ki so monolitno povezani z opornikom, smiselno prednapeti kable, preden se izvedejo bočne stene opornika. Na ta način je bila togost podpore manjša ter smo znižali parazitni vpliv napenjanja kablov, ki je negativno vplival na konstrukcijo.

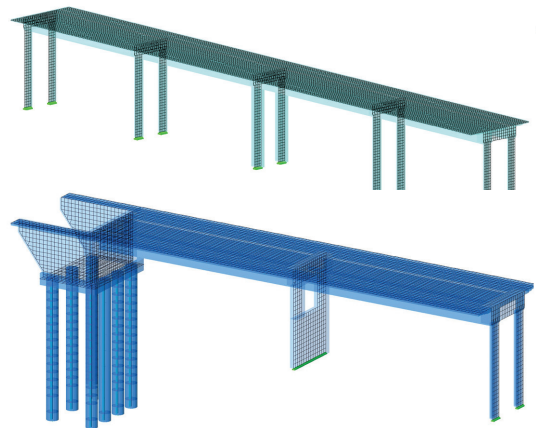
Za potrebe potresne analize se je uporabil model, kjer je bila zmodelirana konstrukcija v celotni dolžini objekta (slika 12).



Slika 12. Model za dinamično (potresno) analizo konstrukcije.

4.4 Opravljene analize za viadukt Pesnica

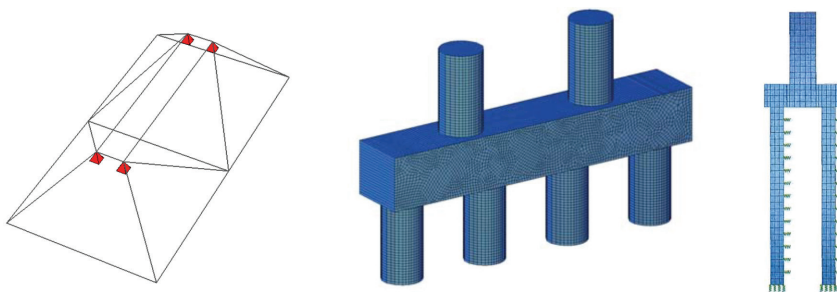
Ob analizi konstrukcije na globalnem modelu smo opravili še številne druge kontrole, ki so navedene v nadaljevanju. Na sliki 13 sta prikazana modela za analizo prečne smeri in opornikov. Tukaj velja izpostaviti merodajna obtežna primera iztirjanja vlaka ter obtežni primer, ki predvideva redne vzdrževalne preglede s pomočjo vozička.



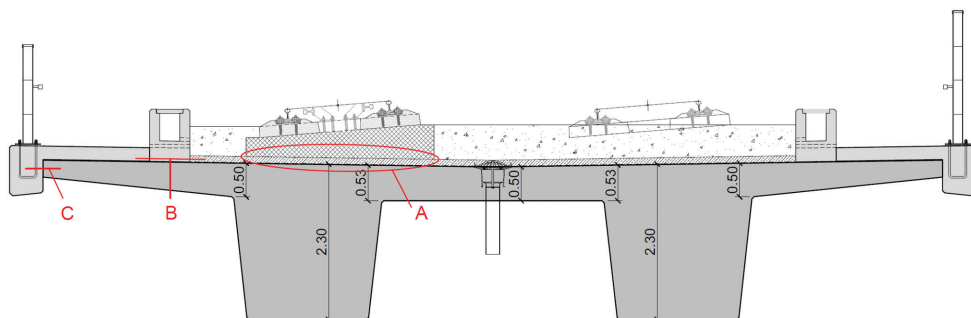
Slika 13. Modela za analizo prečne smeri in opornikov.

Za potrebe analize so se uporabili tudi številni lokalni modeli. Na slikah v nadaljevanju so prikazani različni modeli za analizo pilotnih blazin. Uporabili so se modeli iz ploskovnih elementov, hkrati pa se je kontrola naredila s pomočjo paličnih elementov v skladu z modeli »strut- and-tie« (slika 14).

Izvedena je bila tudi kontrola strižnih povezav ter sidranj v skladu s shemo v nadaljevanju, pri čemer se je opravila analiza strižne povezave in tira na togi podlagi (območje A), analiza povezave podložnega betona s preklado preko hodnika konstrukcije (območje B) ter kontrola sidranja preko robnega venca v prekladno konstrukcijo (območje C) (slika 15).



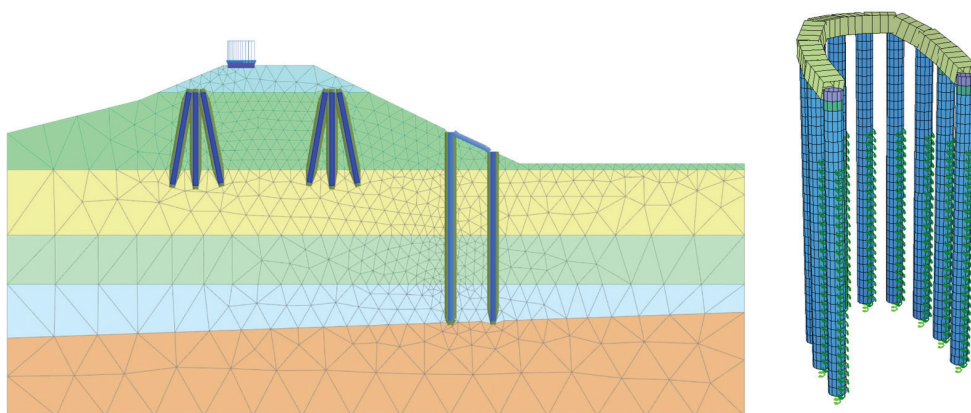
Slika 14. Različni modeli za analizo pilotnih blazin.



Slika 15. Shema s prikazom območij za izračun strižnih povezav in sidranj.

Dodatno se je izvedlo dimenzioniranje AB-konstrukcij opreme objekta. Narejena je bila analiza temeljev vozne mreže. Za temelje tipa M68kvp in M110kvp je bila izračunana armatura, ki je potrebna za sidranje drogov vozne mreže. Ob tem so bile izvedene še kontrole hodnikov na območju sidrnih plošč (enojna in dvojna sidrna plošča) ter dodatne analize konzol za morebitne vplive pozitivnih momentov na območju sidranja temeljev vozne mreže.

do ponovne kontrole varovanja gradbenih jam. Pridobljeni so bili natančnejši podatki o sestavi tal obstoječega železniškega nasipa ter karakteristike posameznih slojev le-tega in podatki o izvedeni sanaciji brežine iz leta 1994 na območju podpor 30 in 31, ki je bila izvedena s pomočjo metode JET grouting. Na osnovi novih podlog so se lahko pripravile optimizirane projektantske rešitve varovanja gradbenih jam (slika 16).



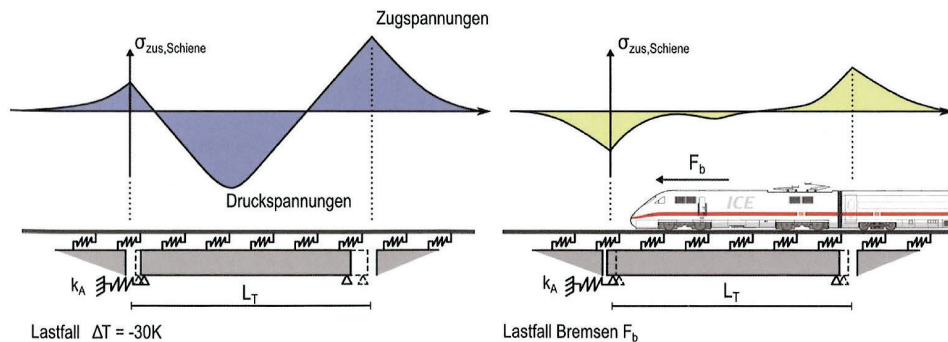
Slika 16. Modela iz programov Plaxis [Plaxis 2D Ultimate, 2021] in Sofistik [SOFiSTiK, 2018] za analizo varovanja gradbenih jam v osi 30.

Za potrebe nemotene izvedbe podpor viadukta je bila narejena tudi analiza varovanja gradbenih jam ter železniškega nasipa, saj se viadukt z vzhodne strani približa obstoječemu železniškemu nasipu v oseh 30 do 33. V fazi izgradnje objekta je prišlo na podlagi dodatno pridobljenih podatkov glede geotehničnih razmer na lokaciji podpor v oseh 30–33

4.5 Interakcija tirov s konstrukcijo

V sklopu analize viadukta Pesnica je bila opravljena tudi analiza interakcije tirov s konstrukcijo. Posebnost dolgega viadukta je v členjenosti na krajše integralne segmente, zaradi česar je bila možna uporaba tirov brez posebnih tirnih dilatacij (ne-

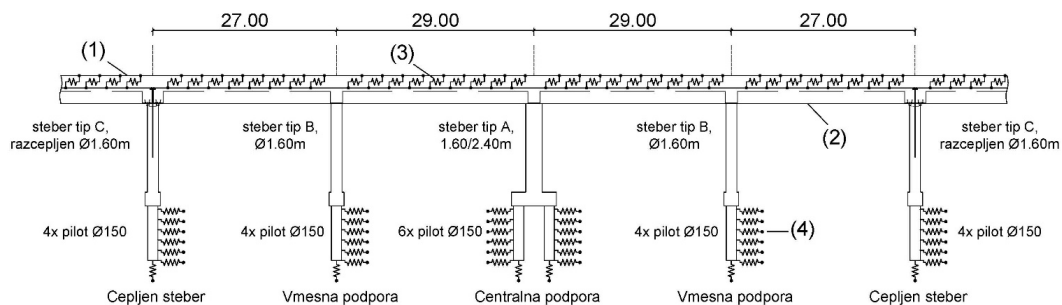
prekinjen zavarjen tir). Interakcija je posledica povezave med tirom in konstrukcijo, zaradi česar pride do sovpliva enega elementa na drugega. Na območju podajnih stebrov pride do spremembe napetosti v tirih zaradi obtežnih primerov zaviranja ali pospeševanja ter temperaturnih vplivov in reologije, ki delujejo na konstrukciji (slika 17). Pri analizi je pomembno, ali gre za progo s tirno gredo na tolčencu ali za tir na togi podlagi (betonski plošči). V prvem primeru je tako dovoljena sprememba napetosti v tirih višja, saj je merodajna stabilnost proge in ne napetosti v tirih ([DB, 2018], [UIC, 2001]).



Slika 17. Napetosti v neprekinjenem tiru kot posledica interakcije tirov in konstrukcije zaradi vpliva spremembe temperature in zavorne sile, povzeto po [Krontal, 2014].

Model za analizo je bil narejen v skladu s shemo, podano v standardu EN 1991-2, poglavje 6.5.4.4 [SIST, 2004], pri čemer je shema, aplicirana na naš viadukt, prikazana na sliki 18. Izračun je bil izveden z metodo končnih elementov, kjer so se globalnemu računskemu modelu mostne konstrukcije dodali še tiri, ki so na zgornjo konstrukcijo povezani preko nelinearnih vzmeti ter preko togih povezav (slika 18, detajl, prikazan na sliki 19).

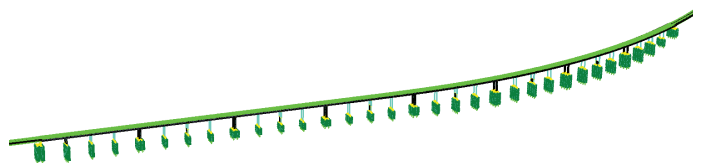
kjer lahko izbiramo osnovno ali zmanjšano togost in odpornost proti zdrsu. V primeru obteženega tira sta osnovna in zmanjšana togost enaki, in sicer 60,0 kN/m', medtem ko v primeru neobteženega tira znaša osnovna togost vzmeti 33,8 kN/m' ter reducirana togost 20,0 kN/m'. Vzmeti z zmanjšano togostjo so se upoštevale v analizi na celotnem območju viadukta.



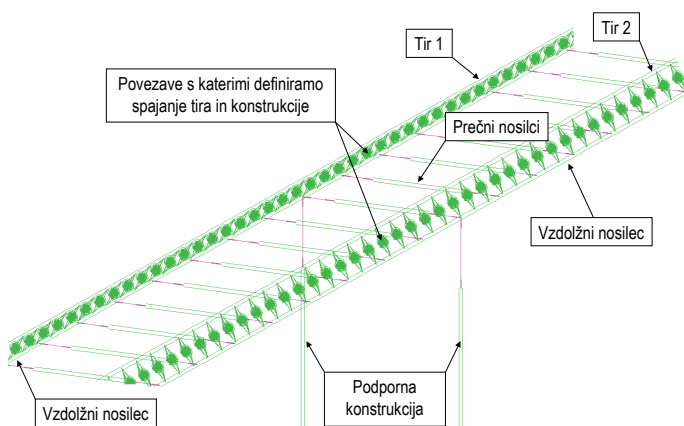
Slika 18. Shema modela za analizo interakcije tirov s konstrukcijo, pri čemer pomeni: (1) tir, (2) prekladna konstrukcija, (3) nelinearne vzmeti, ki simulirajo spoj tirov in konstrukcije, ter (4) vzmeti, ki simulirajo togost podporne konstrukcije.

Za izračun interakcije tirov in konstrukcije viadukta je bil izdelan celoten model z dovolj velikim vplivnim območjem tudi zunaj objekta. Pri tem je treba upoštevati ustrezen prehod med objektom in nasipom ter hkrati med tirom na togi podlagi in klasičnim tirom. Načrt tirov in tirnih naprav je izdelal SŽ – projektivno podjetje Ljubljana v sodelovanju s FCP Dunaj.

Spodnja konstrukcija je bila modelirana na enak način kot pri osnovni statični analizi, z upoštevanjem dejanske geometrije konstrukcije in dejanskimi karakteristikami uporabljenih materialov. Pri modeliranju zemljine so bili podatki povzeti po geološko-geomehanskem poročilu.



Slika 19. Model konstrukcije za analizo interakcije.



Slika 20. Detajl računskega modela za interakcijo.

Pri kontroli interakcije konstrukcije in tirov je treba dokazati, da so maksimalne napetosti v tirih zaradi spremenljivih vplivov pod mejo dopustnih in znašajo za $TTP \pm 92,0$ MPa. Nekatere smerne dovoljujejo mejo ± 112 MPa (v primeru neupoštevanja vertikalne železniške obtežbe ± 92 MPa). Ob že navedenih deformacijskih omejitvah je treba omejiti tudi deformacije, in sicer če izhajajo iz rotacij zaradi vertikalne obtežbe na 8 mm. Omejene so tudi horizontalne deformacije, in sicer na 5,0 mm v primeru tira brez dilatacije. V primeru, da so dokazane mejne napetosti, teh deformacij ni treba dokazovati. Relativne vertikalne deformacije v analizi niso bile merodajne zaradi integralnosti objekta.

Za analizo interakcije smo upoštevali temperaturno spremembo mostne konstrukcije, kjer se upošteva maksimalna razlika med mostno konstrukcijo in tiri. Hkrati se je upoštevala tudi neenakomerna temperaturna obtežba. Ob temperaturni obtežbi sta bili merodajni še sili zaviranja ter pospeševanja s pripadajočo vertikalno prometno obtežbo. Vpliv reologije je bil v analizi zanemarljiv, saj se je večina reologije izvršila že pred izvedbo zgornjega ustroja in tako deformacije zaradi reologije ne vplivajo na napetosti v tirih. Upoštevana so bila vsa možna projektna stanja, in sicer eno- in dvotirno progo ter glede na dolžino aplicirane obtežbe, ki je bila omejena glede na dopustne vrednosti sile zaviranja oziroma pospeševanja. Za merodajno kombinacijo pri analizi se je izkazala kombinacija segrevanje mostne konstrukcije in zaviranje na območju segmentov 5, 6 in 7, in to v primeru, ko je na objektu le en tir ($\sigma_{max} = 90,7$ MPa < 92,0 MPa).

5 IZVEDBENI PROJEKT IN GRADNJA

Izvajalec Pomgrad je podpisal pogodbo za izvedbene projekte in gradnjo leta 2020. Gradnja konstrukcije je potekala od konca leta 2020 do konca 2022. Izvedba zgornjega ustroja železnice in odprtje proge sta bila v letu 2023.

V nadaljevanju so navedene nekatere posebnosti pri izvedbi viadukta Pesnica.

- Zaščita gradbenih jam s podkvasto oblikovano pilotno steno za podpore viadukta, ki so posegale v nasip ob obstoječi železniški progi.
- Izvedba razcepljenih stebrov, ki omogočajo dilatiranje viadukta pod progo. Ti stebri imajo zelo kompleksno obliko in vsebujejo zelo velike količine armature, predvsem na zgornjem

vogalu. Na tem mestu se sidrajo tudi kabli z nedostopnimi sidrišči. Zato smo napravili testni steber v naravni velikosti, kjer se je preverila izvedljivost tega zahtevnega detajla (slika 21).

- Betoniranje tipičnih, 112 m dolgih odsekov prekladne konstrukcije je bilo zahtevno predvsem zaradi velike količine vgrajenega betona 1560 m³ v eni fazi. Za vgradnjo betona na prvem segmentu je izvajalec s skupino 50 ljudi, 21 avtomesalci (hruške za beton) s 193 dostavami betona in s 3 črpalkami za beton potreboval 14 ur. Še posebej zahtevno je bilo zagotavljati zahtevano kvaliteto C45/55 v vročem obdobju leta. Priprava odra, opaža, armature in kablov za segment 8 je prikazana na sliki 22, betonaža pa na sliki 23. Zaradi hitrosti izvajanja se je polovica viadukta izvedla z odrom v lasti podjetja Pomgrad, druga polovica pa z najetim odrom podjetja Peri.
- Napenjanje tipičnih, 112 m dolgih segmentov iz sredine. V prečnem prerezu viadukta je vgrajenih $2 \times 8 = 16$ kablov K19 z napenjalno silo 3800 kN. Zaradi preklapov kablov nad srednjo podporo je bilo treba enostransko napeti 32 kablov. To se je izvajalo v dveh fazah. Najprej po 2×6 kablov po enem tednu, kar je omogočilo hitro razopaženje konstrukcije, kasneje pa še preostalih 2×10 kablov v starosti treh tednov.
- Izvedba viadukta preko avtoceste je terjala izmenično zaporo zelo prometne AC. Vsako polje preko avtoceste se je zabetoniralo posebej, kar je zahtevalo posebne postopke pri napenjanju kablov. Posebne rešitve so bile tudi zaradi poševnega križanja AC in železnice.
- Integralni koncept kodolnih železniških viaduktov je novost, zato preiskav o dolgoročnem obnašanju takih objektov ni prav veliko. Zato smo med členjene dele okvirjev dodali hidravlične udarne blažilce (shock transmittor unit - STU), po 2 kosa STU nosilnosti 2500 kN med vsako zavorno enoto (slika 24). Hidravlične naprave STU prenašajo hitre potresne in zavorne sile na več enot, medtem ko počasne temperaturne in reološke deformacije potekajo neovirano. Na ta način smo zmanjšali dinamične vplive utrujanja na močno armirane vogale okvirja in ostale integralne povezave ter s tem povečali odpornost in trajnost konstrukcije, kar je bistvena lastnost infrastrukturnih objektov.



Slika 21. Testni steber in izveden steber z razcepljenim delom višine 8 m.



Slika 22. Priprava na betoniranje segmenta 1560 m³ v enem taktu.



Slika 23. Zaključek betoniranja predzadnjega takta.



Slika 24. Hidravlični udarni blažilec (STU).

6 ZAKLJUČEN OBJEKT IN IZVEDBA OBREMENILNE PREIZKUŠNJE

Konstrukcija viadukta je bila zaključena konec leta 2022. Po predvidenem časovnem načrtu celotnega odseka proge je bil zgornji ustroj zaključen v avgustu 2023. Pred dokončno predajo objekta v uporabo je bila v soboto, 12. 8. 2023, opravljena obremenilna preizkušnja, v sklopu katere so poskušali simulirati obremenitev železniškega prometa in izmeriti odziv konstrukcije. Za statično in dinamično breme sta se uporabili dve povezani lokomotivi, vsaka mase po 110 ton (slika 25).

V skladu s pričakovanji je prekladna konstrukcija dovolj toga, da se bile amplitude odziva zelo majhne, in sicer so maksimalne deformacije v razponu konstrukcije znašale 1,4 mm, kar je nekoliko manj od predvidevanj na podlagi analiz.



Slika 25. Obremenilna preizkušnja viadukta z dvema lokomotivama, vsaka po 110 ton mase.

7 SKLEP

Najpomembnejša faza nastanka vsakega premostitvenega objekta je zasnova, ki bistveno vpliva na kvaliteto objekta, ki jo določajo varnost, uporabnost, estetika, vključitev v okolje, trajnost in gospodarnost (slike 26, 27 in 28).

Tudi pri dolгих železniških objektih je mogoče uporabiti koncepte integralnih konstrukcij brez ležišč, kar lahko pomeni veliko prednost pri gospodarni gradnji. Pri ustreznem konceptu členjenja viadukta se lahko izvede neprekinjen zavarjeni tir brez tirnih dilatacij, kar je velik prispevek k varnosti prometa in varovanju okolja pred hrupom. Sam koncept objekta je treba tudi računsko dokazati, pri čemer se je treba zavedati, da se analiza železniških objektov znatno razlikuje od analize objektov, ki so namenjeni cestnemu prometu ali pa pešcem in kolesarjem tako glede računskih metod, obtežb kot tudi dodatnih dokazov glede uporabnosti. Posebej velike razlike so pri velikosti horizontalnih obtežb ter pri omejevanju pomikov in rotacij konstrukcije.

Za odporno in trajno konstrukcijo je potrebna kvalitetna gradnja z zagotovljeno skladnostjo z izvedbenimi načrti kakor tudi kvalitetni vgrajeni materiali in certificirani produkti. Le tako bo ob kvalitetnem vzdrževanju objekt dočakal tudi predvideno življenjsko dobo.

Dvotirni železniški viadukt Pesnica se ponaša s kar nekaj presežki, inovacijami ter vpeljanimi izboljšavami:

- z dolžino 912,6 m je najdaljši železniški objekt v Sloveniji,
- je prvi integralni členjeni objekt v celoti brez konstrukcijskih ležišč,
- je prvi železniški premostitveni objekt pri nas z neprekinjenim tirom na togi podlagi,
- je prvi železniški objekt z vgrajenimi hidravličnimi udarnimi blažilci in
- je najbolj gospodarna gradnja železniškega premostitvenega objekta, ocenjeno na površino ali dolžino objekta, še posebej pa na dolžino proge, ki jo nosi.



Slika 26. Končana konstrukcija od spodaj (levo) in pogled na del objekta v krivini (desno).



Slika 27. Vključevanje objekta v okolje – pogled od zgoraj.



Slika 28. Vključevanje objekta v okolje – pogled z glavne ceste Maribor–Lenart.

8 LITERATURA

DB, smernica DB - Bemessungsgrundlagen für die Feste Fahrbahn auf Brücken, 804.5402, Deutsche Bahn Services Technische Dienste GmbH, 2018.

Freystein, H., Entwicklungen und Tendenzen im Eisenbahnbrückenbau, Der Prüflingenieur 38, 23-40, 2011.

Jung, R., Marx S., Schenjel M., Stockmann R., Entwurf und Ausführungsplanung der Stöbnitztalbrücke Eine lagerlose Eisenbahnbrücke im Zuge der Neubaustrecke Erfurt-Leipzig/Halle, Beton- und Stahlbetonbau 105(9), strani 81-88, 2010.

Krontal, L., Zum Entwurf von Eisenbahnbrücken, Structurae Eisenbahnbrücken, ISBN:978-3-433-03097-4, 1-10, Ernst&Sohn, 2014.

Marx, S., Seidl G., Integral Railway Bridges in Germany, Structural Engineering International, 2011/3, 332-336, 2011.

Plaxis 2D Ultimate, Plaxis bv P.O. Box 572, 2600 AN Delft, 2021.

Ponting, d. o. o., projektna dokumentacija IDZ, IDP, PGD in PZI Viadukta Pesnica, 2015-2022.

Schenkel, M., Goldack, A., Schlaich, J., Kraft, S., Die Gänsebachtalbrücke, eine integrale Talbrücke der DB AG auf der Neubaustrecke Erfurt-Leipzig/Halle, Beton- und Stahlbetonbau 105(9), 590-598, DOI: 10.1002/best.201000034, 2010.

SOFISTIK, SOFISTIK AG, Flataustr. 14, 90411 Nurnberg, 2018.

UIC, UIC Code 774-3, Track/Bridge Interaction, Recommendations for calculations, International Union of Railways, strani 1-76, 2001.

SIST, SIST EN 1991-2:2004, Evrokod 1: Osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije – 2. del: Prometna obtežba mostov, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2004.

Tschumi, M., Railway Bridges, Seminar 'Bridge Design with Eurocodes', JRC-Ispra, 2012.

Wikipedia, spletna stran portala Wikipedija - https://sl.wikipedia.org/wiki/Pesniški_viadukt, Wikimedia Foundation Inc., 2022.