

Ispitivanje mosta i numerička analiza utjecaja rubnih uvjeta

Trogrlić, Andrea

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:624242>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Andrea Trogrlić

**ISPITIVANJE MOSTA I NUMERIČKA ANALIZA
UTJECAJA RUBNIH UVJETA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Andrea Trogrlić

**ISPITIVANJE MOSTA I NUMERIČKA ANALIZA
UTJECAJA RUBNIH UVJETA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Domagoj Damjanović

Komentor: dr. sc. Janko Koščak

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Andrea Trogrlić

**LOAD TESTING OF A BRIDGE AND
NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE
OF BOUNDARY CONDITIONS**

MASTER THESIS

Supervisor: prof. dr. sc. Domagoj Damjanović

Co-Supervisor: dr. sc. Janko Koščak

Zagreb, 2024.

ZAHVALE

Zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Domagoju Damjanoviću koji je kroz svoja predavanja tijekom studija i svojim savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada prenio znanje koje je bilo ključno za njegovu realizaciju. Također, zahvaljujem svom komentoru dr. sc. Janku Koščaku koji me vodio kroz izradu rada te čija je pomoć i suradnja značajno olakšala proces pisanja i doprinijela kvaliteti.

Zahvaljujem svim kolegama i prijateljima koji su bili uz mene kroz smijeh i suze tijekom studiranja; učinili su ovo iskustvo nezaboravnim.

Veliko hvala cijeloj mojoj obitelji na podršci koja iz prve ruke poznaje sve izazove s kojima sam se suočavala i koja je uvijek vjerovala u mene.

Za kraj, najviše želim zahvaliti tati Borisu koji je bio moj mentor, profesor i prijatelj tijekom cijelog studija.

SAŽETAK

Tema ovog rada je numerička analiza utjecaja rubnih uvjeta ovisnih o načinu oslanjanja rasponskih nosača armiranobetonskog cestovnog nadvožnjaka. Analiza je provedena na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem mosta (statičko i dinamičko ispitivanje mosta probnim opterećenjem).

Analizirane su različite statičke sheme nosača (tri proste grede i kontinuirani nosač preko tri polja). Također, analizirani su različiti načini oslanjanja glavnih rasponskih nosača na naglavnu gredu (preko idealnih oslonaca i simulacijom elastomernih ležajeva).

Za provedbu numeričkih analiza (MKE) izrađen je numerički – proračunski model konstrukcije. Model konstrukcije je diskretiziran 1D (grede i stupovi) i 2D konačnim elementima (ploča).

Zadana su stalna i promjenjiva djelovanja u statičkoj analizi te stalna djelovanja u dinamičkoj analizi.

Pod djelovanjem probnog opterećenja uspoređeni su progibi izmjereni tijekom ispitivanja nadvožnjaka s progibima dobivenim numeričkim analizama za statičko djelovanje, dok su u dinamičkoj analizi uspoređeni dinamički odgovori konstrukcije i numeričkog modela.

Usporedbom dobivenih numeričkih rezultata s eksperimentalnim rezultatima donesen je zaključak o izboru statičke sheme koja najbolje opisuje stvarno ponašanje konstrukcije, odnosno daje najmanje odstupanje od eksperimentalnih rezultata.

Ključne riječi: nadvožnjak; rubni uvjeti; probno opterećenje; statička analiza; dinamička analiza; elastomerni ležaj

SUMMARY

The topic of this thesis is the numerical analysis of the influence of boundary conditions depending on the support configuration of span girders in overpasses. The analysis is based on results obtained from the load testing of the bridge.

Various static schemes of the girders were analyzed (three simply supported beams and a three-span continuous girder). Additionally, different support configurations for the main span girders, hinged to the cap beam, were analyzed (ideal support and elastomeric support).

A numerical – computational model of the structure was developed to carry out numerical analyses (FEM). The structure was discretized using 1D (beams and columns) and 2D finite elements (slab).

Constant and variable loads were applied in the static analysis, while constant loads were applied in the dynamic analysis.

Under the influence of a test load, the deflections measured during the overpass test were compared with the deflections obtained from numerical analyses for static loading, while in the dynamic analysis, the dynamic responses of the structure and numerical model were compared.

By comparing the numerical results with experimental data, a conclusion was drawn regarding the choice of the static scheme that best describes the actual behavior of the structure, i.e., which gives the least deviation from the experimental results.

Key words: overpass; boundary conditions; test load; static analysis; dynamic analysis; elastomeric support

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	1
2. OSNOVNI PODACI O GRAĐEVINI.....	3
2.1. Tehnički opis građevine	3
2.2. Smještaj objekta	4
2.3. Konstrukcija nadvožnjaka	5
2.3.1. Rasponski sklop.....	5
2.3.2. Donji ustroj.....	6
2.3.3. Građiva	7
2.3.4. Oprema.....	8
2.3.5. Građenje i tehnologija.....	9
3. REGULATIVA VEZANA UZ PROBNA OPTEREĆENJA MOSTOVA.....	10
3.1. Ispitivanje mostova probnim opterećenjem (HRN U.M1.046:1984).....	10
3.1.1. Predmet norme.....	10
3.1.2. Vrste probnih opterećenja	10
3.1.3. Postupak ispitivanja.....	11
3.1.4. Ocjena rezultata ispitivanja probnog opterećenja.....	13
3.1.5. Izvještaj o ispitivanju mosta probnim opterećenjem.....	14
3.2. Španjolska regulativa za ispitivanje mostova probnim opterećenjem.....	14
3.2.1. Opseg primjene.....	14
3.2.2. Projekt ispitivanja.....	15
3.2.3. Statičko ispitivanje	17
3.2.4. Provedba ispitivanja	18
3.2.5. Dinamičko ispitivanje.....	19
3.2.6. Izvještaj o ispitivanju	20
4. PROVEDBA ISPITIVANJA - OBRADA, PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA .	21
4.1. Podaci o probnom opterećenju.....	21
4.2. Faze ispitivanja.....	23

4.2.1.	Statičko ispitivanje.....	23
4.2.2.	Dinamičko ispitivanje.....	24
4.3.	Rezultati ispitivanja.....	24
4.3.1.	Rezultati statičkog ispitivanja.....	24
4.3.2.	Rezultati dinamičkog ispitivanja.....	26
5.	NUMERIČKI MODEL KONSTRUKCIJE.....	31
5.1.	Opis numeričkog modela.....	31
5.1.1.	Geometrijska svojstva i kinematički rubni uvjeti.....	31
5.1.2.	Djelovanja.....	33
5.1.2.1.	Osnovna djelovanja.....	33
5.1.2.2.	Efikasnost probnog opterećenja.....	35
5.2.	Statički i dinamički proračun.....	42
5.2.1.	Statički proračun.....	42
5.2.2.	Dinamički proračun.....	44
6.	ANALIZA UTJECAJA RAZLIČITIH RUBNIH UVJETA.....	48
7.	USPOREDBA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA S NUMERIČKOM ANALIZOM.....	57
7.1.	Usporedba rezultata statičkog ispitivanja.....	57
7.2.	Usporedba rezultata dinamičkog ispitivanja.....	60
8.	ZAKLJUČAK O PONAŠANJU KONTRUKCIJE NA TEMELJU PRIKAZANIH REZULTATA	66
	POPIS LITERATURE.....	67
	POPIS SLIKA.....	68
	POPIS TABLICA.....	71

1. UVOD

Predmet ovog diplomskog rada je statičko i dinamičko ispitivanje mosta koji se sastoji od predgotovljenih prednapetih glavnih nosača spregnutih s AB pločom te numerička analiza utjecaja rubnih uvjeta, odnosno načina oslanjanja glavnih rasponskih nosača.

Motivacija za izbor ove teme je stjecanje kompetencija iz područja ispitivanja konstrukcija, ponašanja mostova spregnutih presjeka te numeričkih analiza inženjerskih konstrukcija.

Tema je značajna zbog utvrđivanja utjecaja različitih rubnih uvjeta na ponašanje konstrukcije (progiba i unutarnjih sila), a u ovom slučaju – mosta spregnutog presjeka.

Utjecaj rubnih uvjeta odnosi se na rasponsku konstrukciju, u smislu statičkog sustava i načina oslanjanja glavnih rasponskih nosača na naglavnu gredu.

Razmatrano je ponašanje glavne rasponske konstrukcije za dvije statičke sheme:

- (1) Sustav prostih greda (tri proste grede slobodno oslonjene na naglavnu gredu)
- (2) Kontinuirani nosač preko tri polja (kontinuitet ostvaren kolničkom pločom)

Prema načinu oslanjanja glavnih rasponskih nosača na naglavnu gredu analizirani su sljedeći slučajevi:

- (1) Oslanjanje nosača preko idealnih oslonaca
- (2) Oslanjanje nosača preko simuliranih elastomernih ležajeva

Za dobivanje odgovora konstrukcije (progiba glavnih nosača i dinamičkih svojstava) zadano je probno opterećenje preko različitih kombinacija teretnih vozila na kolničkoj ploči.

Na temelju analize konstrukcije s različitim rubnim uvjetima i usporedbom s izmjerenim vrijednostima, utvrdit će se koji proračunski model najbolje opisuje realnu konstrukciju.

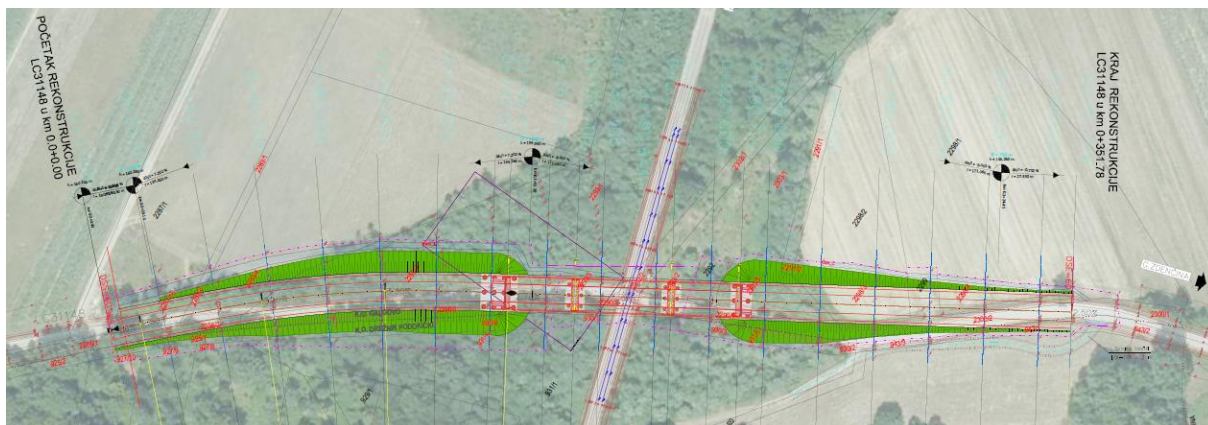
Osnovna literatura za izradu ovog diplomskog rada su

- GLAVNI PROJEKT NADVOŽNJAKA „PAVUČNJAK“ - IZMJENA I DOPUNA, INŽENJERSKI PROJEKTNI ZAVOD d.d. Zagreb, ZOP: EUROPEAID/131104/SER/HR M202-GP-HLK-17, broj projekta: RIN121-OP01ST-RE-01-13 – IZMJ1, glavni projektant: IVICA KIŠAN, struč.spec.ing.aedif., projektant: MARIJAN GALINEC, dipl.ing.građ., Zagreb, kolovoz 2023.
- PROGRAM ISPITIVANJA – nadvožnjak PAVUČNJAK, SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, GRAĐEVINSKI FAKULTET, Zavod za tehničku mehaniku, LABORATORIJ ZA ISPITIVANJE KONSTRUKCIJA, Voditelj ispitivanja: izv. prof. dr. sc. Marko Bartolac, Zagreb, 21. ožujka 2024. godine
- IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU – nadvožnjak PAVUČNJAK, SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, GRAĐEVINSKI FAKULTET, Zavod za tehničku mehaniku, LABORATORIJ ZA ISPITIVANJE KONSTRUKCIJA, Voditelj ispitivanja: dr. sc. Janko Koščak, mag. ing. aedif., Zagreb, 29. travnja 2024. godine

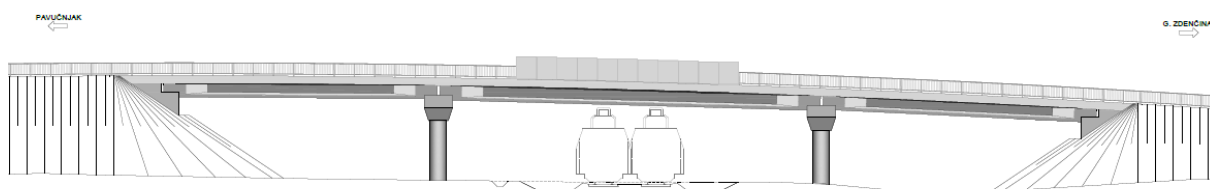
2. OSNOVNI PODACI O GRAĐEVINI

2.1. Tehnički opis građevine

Nadvožnjak Pavučnjak izgrađen je u sklopu projekta „Rekonstrukcija postojećeg i izgradnja drugog kolosijeka na dionici Hrvatski Leskovac - Karlovac na glavnoj željezničkoj pruzi za međunarodni promet, M202 Zagreb Gk – Rijeka“.



Slika 1. Nadvožnjak „Pavučnjak, situacija [3]

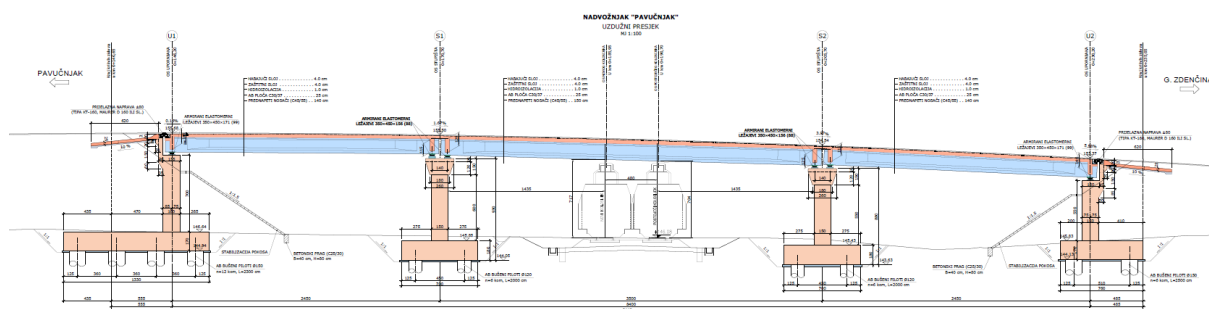


Slika 2. Nadvožnjak „Pavučnjak, pogled [3]

2.2. Smještaj objekta

Novi nadvožnjak iznad pruge, na cesti LC 31148, koji je zamijenio postojeći na istoj lokaciji, sastoji se od tri otvora (24,5 + 35,0 + 24,5 mjereno od osi upornjaka i stupa), ukupne je dužine 84,0 m mjereno od osi do osi upornjaka, a 94,4 m uključivo i krila upornjaka. Konstrukcija je roštiljna od betonskih prednapetih nosača visine $h=150$ cm za veći raspon, te 140 cm za manji raspon.

Početak nadvožnjaka je u km 0+140,65, završetak u km 0+235,05 lokalne ceste. Niveleta ceste je u konveksnoj krivini radijusa $R=1480$ m.

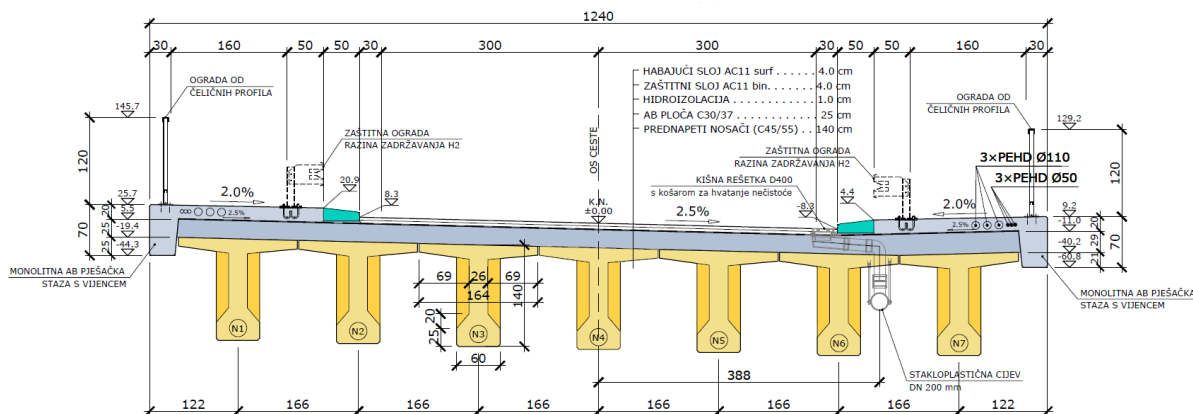


Slika 3. Nadvožnjak „Pavučnjak“, uzdužni presjek [3]

Poprečni nagib kolnika duž cijelog objekta iznosi 2,50% prema desno.

Kolnik se sastoji od dva prometna traka širine 300 cm (lijevog i desnog) i rubnih širine 30 cm, što daje ukupnu širina kolnika od 660 cm.

S obje strane kolnika su rubnjaci širine 50 cm, te hodnici na kojima je pješačka staza širine 160 cm, zaštitna odbojna ograda i ograda za pješake. Pješačka staza ima nagib prema kolniku od 2,0%. Ukupna širina nadvožnjaka, mjerena preko vijenaca, je 12,40 m. [3]



Slika 4. Nadvožnjak „Pavučnjak“, poprečni presjek [3]

2.3. Konstrukcija nadvožnjaka

2.3.1. Rasponski sklop

Nadvožnjak je polumontažna prednapeta betonska konstrukcija, slobodno oslonjena preko tri raspona (24,5 + 35,0 + 24,5 m). Sastoji se od roštiljno povezanih prednapetih montažnih nosača, koji su za vertikalno opterećenje statički određeni sustavi tipa slobodno oslonjenih greda. Montažni nosači monolitiziraju se „in situ“ betoniranom kolničkom pločom i poprečnim nosačima. Rasponski sklop se oslanja na elastomerne ležajeve na stupovima i upornjacima koji su postavljeni ispod uzdužnih nosača. Kontinuitetnim pločama se osigurava veza između susjednih raspona koje osiguravaju kontinuitet kod prelaska vozila.

Uzdužni nosači su predgotovljeni i naknadno prednapeti. Izrađeni su iz betona razreda čvrstoće C45/55 i armirani čelikom kvalitete B500B a prednapeti su čelikom kvalitete Y1600/1860. Raspon nosača tipa 1 je 23,80 m, a visina 140 cm dok je raspon nosača tipa 2 33,60 m, a visina 150 cm. Poprečni presjek je „I“ oblika sa gornjom pojasnicom širine 164 cm i hrptom debljine 26 cm. Nosač je postavljen tako da mu je hrbat u prostoru vertikalno, a pojasnica u nagibu kolničke površine.

Sprezanjem kolničke ploče postiglo se zajedničko djelovanje cijelog presjeka. Kolnička ploča je debljine 25 cm i izrađena je od betona razreda čvrstoće C30/37 te je armirana armaturnim rebrastim čelikom kvalitete B500B. Sprezanje uzdužnih nosača i kolničke ploče ostvareno je armaturom, koja je s tom svrhom ugrađena dijelom van presjeka predgotovljenog nosača i trenjem betona na njihovu kontaktu.

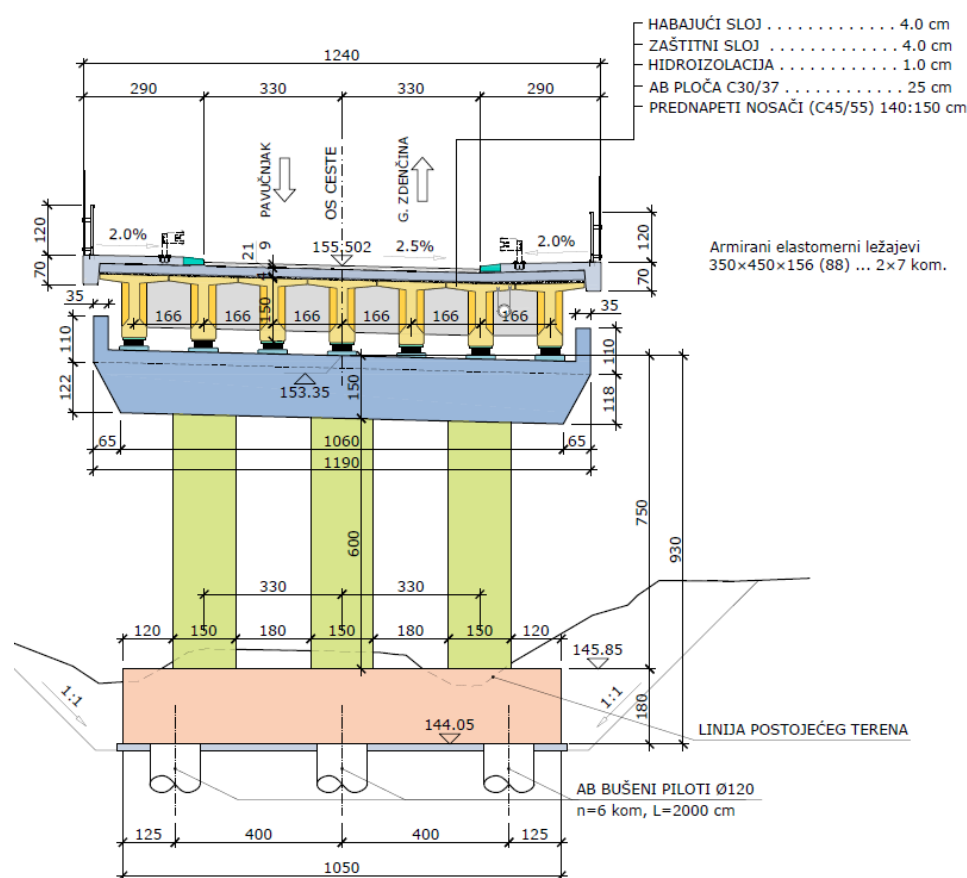
Za osiguranje kontinuiteta prijelaza vozila, iznad stupa, izvedene su kontinuitetne ploče od betona razreda C30/37 i armirane su armaturnim rebrastim čelikom kvalitete B500B. Kontinuitetne ploče debljine su 21 cm, a duge su 150 cm

Poprečni nosači nalaze se nad upornjacima i stupovima u liniji ležaja, kako bi se povećala krutost rasponske konstrukcije u poprečnom smjeru. Poprečni nosači su debljine 40 cm dok je visina u krajnjim rasponima 115 cm a u srednjem rasponu 125 cm. Izvedeni su od betona C30/37 i armirani armaturnim rebrastim čelikom kvalitete B500B. [3]

2.3.2. Donji ustroj

Rasponski se sklop preko elastomernih ležajeva oslanja na upornjake i stupišta.

Stupišta se sastoje od pilota, naglavne ploče pilota, tijela stupišta i naglavne grede. Tijela stupišta su kružnih poprečnih presjeka promjera $\varnothing 150$ cm na međusobnom osnom razmaku od 330 cm. Na vrhu tijela stupa izvode se masivne naglavne grede iz betona razreda C30/37 čija duljina iznosi 11,90 m a širina im je 2,60 m pri vrhu, odnosno 180 cm pri dnu naglavnice. Naglavnica je visoka 150 cm, zakošena je na krajevima, te ima maske debljine 35 cm. Naglavnica se armira nenapetom armaturom B500B i izvodi monolitno.



Slika 5. Nadvožnjak „Pavučnjak, poprečni presjek na stupištu [3]

Izvedeni su klasični upornjaci od betona C30/37. Debljina prednjih zidova upornjaka je 160 cm (U1), odnosno 150 cm (U2), a krilnih zidova je 80 cm (U1), odnosno 60 cm (U2). Na prsni zid upornjaka debljine 40 cm smještena je prijelazna naprava, te je na njemu izvedena istaka na koju se oslanja prijelazna ploča. Prijelazne ploče (C25/30) su duge 6,20 m i debele 25 cm.

Betonirane su na sloju mršavog betona (C12/15) koji je izveden na dobro zbijenom nasipu u uzdužnom nagibu 10% od upornjaka.

U skladu s geotehničkim projektom temeljenje svih stupišta i upornjaka izvedeno je na armiranobetonskim pilotima betona razreda C30/37. Promjer pilota upornjaka je $\varnothing 150$ cm, a stupišta $\varnothing 120$ cm. Piloti upornjaka U1 su duljine 23 m, oba stupišta 20 m, a upornjaka U2 25 m. Na glavama pilota stupišta izvedene su naglavne ploče koje se nalaze ispod razine sraslog terena i izvode se horizontalno. Naglavne ploče izvedene su od betona razreda čvrstoće C30/37 i armirane su čelikom B500B. Nagibi pokosa građevnih jama su 1:1. [3]

2.3.3. Gradiva

Tablica 1.: Razredi betona elemenata konstrukcije [3]

Razred tlačne čvrstoće	Element konstrukcije
C12/15	Podložni beton
C30/37	Piloti Temeljne ploče upornjaka Upornjaci Naglavne ploče pilota stupišta Tijelo stupišta Naglavne grede stupišta Ležajne istake Kolnička ploča Poprečni nosači Pješačka staza s vijencem
C25/30	Prijelazna ploča
C40/50	Rubnjak
C45/55	Prednapeti uzdužni nosač

2.3.4. Oprema

Kolnički zastor rasponske konstrukcije izveden je u dva sloja. Zaštitni sloj je izveden od asfaltbetona (AC11 bin 45/80-65 AG4 M2) debljine 4,0 cm, a habajući sloj od asfaltbetona (AC 11 sufr 50/70 AG3 M3) debljine 4,0 cm tako da je ukupna debljina zastora 8,0 cm.

Iznad upornjaka U1 i U2 nalaze se vodonepropusne prijelazne naprave od čeličnih profila s gumenom dilatacijskom trakom između.

Uzdužni se nosači preko ležajeva oslanjaju na naglavne grede. Odabrani su usidreni armirani elastomerni ležajevi pravokutnog tlocrtnog oblika (tip C(2)). Tlocrtne dimenzije ležajeva su određene prema zahtijevanoj nosivosti, a visina im je definirana maksimalnim horizontalnim pomacima.

Tablica 2.: Elastomerni ležajevi: dimenzije, dopuštena nosivost i dopušteni pomak [3]

Položaj	Dimenzije [mm]	Dopuštena nosivost [kN]	Dopušteni pomak [mm]
Upornjak U1	350×450×171	2360	61,1
Stupište S1	350×450×156	2360	57,1
Stupište S2	350×450×156	2360	57,1
Upornjak U2	350×450×171	2360	61,1

Hodnici i vijenci izvedeni su monolitno od betona C30/37. Oba hodnika imaju funkciju pješačke staze i širina im je 240 cm (50 cm prostora predviđenog za postavljanje zaštitne ograde + 160 cm pješačka staza + 30 cm prostora za ugradnju pješačke ograde). U obje staze položene su PEHD cijevi 3×Φ110 + 3×Φ50 namijenjene prelasku instalacija.

Na objektu se nalazi ograda od čeličnih profila s vertikalnom štapnom ispunom. Visina ograde je 120 cm. Stupovi su izrađeni od pravokutnih cijevi, rukohvat i donja prečka od U profila, a ispuna od L profila. Razmak stupaca je 1,85 m. Svi elementi ograde su međusobno su zavareni i izvode se od čelika kvalitete S235.

S niže strane kolnika, uz sam rub, postavljene su tipske kišne rešetke, u ravnini plohe kolnika. Kišne rešetke ugrađene su za vrijeme betoniranja kolničke ploče nadvožnjaka. Izvedene su kišne rešetke za ugradnju u mostove, s vertikalnim ili bočnim izljevnom otvorom Ø160 mm.

Upornjaci su zatrpani nasipom od nevezanog kamenog materijala. Procjedna voda se drenira PVC drenažnim cijevima $\Phi 160$ mm postavljenim na betonski kanalić C12/15 minimalnog uzdužnog nagiba 0,5%.

Prijelazne ploče (C25/30) duge su 6.2 m i protežu se po cijeloj širini kolnika. Betonirani su u uzdužnom nagibu 10% od upornjaka na sloju mršavog betona (C12/15) izvedenog na dobro zbijenom nasipu (nasipni klin). Debljina im je 25 cm. Armirane su rebrastom armaturom B500B. [3]

2.3.5. Građenje i tehnologija

Svi elementi donjeg ustroja (piloti, temelji, upornjaci, stupišta i zidovi) izvedeni su monolitnim betonom na licu mjesta, dok je rasponski sklop izveden polumontažnom tehnologijom s predgotovljenim uzdužnim nosačima. Kolnička ploča betonirana je na licu mjesta, a potom su izrađene monolitne pješačke staze.

3. REGULATIVA VEZANA UZ PROBNA OPTEREĆENJA MOSTOVA

Tijekom proteklih godina doneseni su novi tehnički propisi za sve tipove nosećih konstrukcija koje se koriste u građevinarstvu. Kao sastavni dio novih propisa u građevinarstvu usvojene su dvije norme koje se odnose na ispitivanje konstrukcija, a koje su bile sastavni dio starih propisa prenesenih iz JUS standarda. Jedna od normi je HRN U.M1.047:1987 „Ispitivanje konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem i ispitivanje do loma“, a druga norma je HRN U.M1.046:1984, „Ispitivanje mostova probnim opterećenjem“. U nastavku će se prikazati samo norma U.M1.046:1984 obzirom da je tema diplomskog rada ispitivanje nadvožnjaka.

3.1. Ispitivanje mostova probnim opterećenjem (HRN U.M1.046:1984)

3.1.1. Predmet norme

Ovom normom [6] određuju se vrste probnih opterećenja, postupak ispitivanja te ocjena rezultata ispitivanja cestovnih i željezničkih mostova izrađenih od armiranog i prednapetog betona, kao i čeličnih i spregnutih mostova. Norma također propisuje način ispitivanja mostova pri statičkom i dinamičkom opterećenju, s naglaskom na usklađenost s projektom, kvalitetu izvedenih radova u odnosu na projektne zahtjeve, podobnost mosta za preuzimanje predviđenih opterećenja te trajnost konstrukcija koje su već u uporabi, što podrazumijeva periodičnu provjeru. Međutim, ova norma ne obuhvaća procjenu sigurnosti mosta u smislu mogućeg sloma ili drugih graničnih stanja konstrukcije.

3.1.2. Vrste probnih opterećenja

- Prema učestalosti ispitivanja:
 - a) redovito – prije puštanja mosta u promet
 - b) kontrolno – tijekom eksploatacije mosta
- Prema veličini tereta:
 - a) normalno
 - b) posebno – primjenjuje se u slučajevima kada:
 - kada nisu ispunjeni svi projektne zahtjevi u pogledu dimenzija, nosivosti temeljnog tla ili kvalitete ugrađenih materijala;

- kada postoje sumnje u pogledu spojeva ili drugih kvaliteta mostne konstrukcije;
- kada konstrukcija ne zadovoljava ni nakon ponovljenog probnog opterećenja
- c) izuzetno – primjenjuje se u slučajevima kada:
 - kada postoji zahtjev za opterećenje mosta koje premašuje predviđene projektne vrijednosti (npr. za prijelaz specijalnih tereta)
 - rezultati opterećenja vrijede jednokratno i odnose se samo na to specifično opterećenje mosta
- Prema prirodi opterećenja:
 - a) statičko:
 - obavezna za sve cestovne mostove s rasponom $L \geq 15$ metara i za sve željezničke mostove s rasponom $L \geq 10$ metara
 - za mostove s posebnim izuzetnim opterećenjima, statičko probno opterećenje se provodi bez obzira na veličinu raspona
 - b) dinamičko:
 - obavezno za iste mostove kao i statičko, a za mostove s izuzetnim probnim opterećenjem treba zadovoljiti posebne zahtjeve
- Prema trajanju opterećenja:
 - a) kratkotrajna
 - b) dugotrajna

3.1.3. Postupak ispitivanja

Probna opterećenja izvode se na potpuno završenom mostu, a za dinamičko ispitivanje potrebno je da budu potpuno dovršeni i prilazi mostu. Tijekom ispitivanja, na mostu ne smije biti nikakvih radova. Ispitivanje se može provesti tek nakon što se utvrdi da dimenzije elemenata i kvaliteta ugrađenih materijala odgovaraju projektnim specifikacijama, a starost betona glavne nosive konstrukcije mora biti najmanje 28 dana.

Prije izvođenja ispitivanja probnim opterećenjem potrebno je:

- pregledati projektну dokumentaciju
- izraditi program ispitivanja kojim se određuju veličina i raspored tereta po fazama, proračun očekivanih progiba i deformacija, raspored mjernih mjesta te organizacijska shema ispitivanja
- pregledati dokumentaciju o kvaliteti materijala,
- provesti makroskopski pregled mosta

Ovisno o kategoriji probnog opterećenja, veličina tereta mora biti takva da se u mjerodavnom karakterističnom presjeku postigne sljedeća efikasnost U :

- za normalno probno opterećenje: $0,5 \leq U \leq 1,0$,
- za posebno probno opterećenje: $1,0 \leq U \leq 1,1$,
- za izuzetno probno opterećenje: $1,1 \leq U \leq (1,3 - L / 1000)$

Efikasnost probnog opterećenja U određuje se prema izrazu:

$$U = \frac{V_{stat}}{V_n \cdot \varphi} \quad (1)$$

gdje je:

V_{stat} – teorijska vrijednost u promatranom presjeku uslijed statičkog probnog opterećenja,

V_n – teorijska vrijednost u istom presjeku uslijed projektnog pokretnog opterećenja bez dinamičkog koeficijenta uvećanja,

φ – dinamički koeficijent prema projektu

Za cestovne mostove, vrijedi izraz (1) bez dinamičkog koeficijenta φ , budući da se on primjenjuje isključivo za željezničke mostove. Teorijske vrijednosti najčešće obuhvaćaju momente savijanja u polju i na ležaju, ali mogu se analizirati i poprečne i uzdužne sile, posebno u slučaju ovješanih ili visećih mostova. Također, efikasnost se može (osim preko momenta savijanja, poprečne i uzdužne sile) iskazati i preko naprezanja ili progiba

Tijekom statičkog ispitivanja mosta, obavezno je mjerenje vertikalnog pomaka u sredini svakog raspona mosta, pomaka oslonaca, deformacija na mjestima očekivanih ekstremnih utjecaja, trajnih progiba i deformacija nakon rasterećenja, te promatranje pojave pukotina. Dopunska mjerenja kutova zaokreta, horizontalnih pomaka te pomaka ležajnih konstrukcija i temelja moraju se izvršiti ukoliko se to zahtijeva programom ispitivanja.

Za dinamičko ispitivanje, mjere se vertikalni pomaci u sredini odabranih raspona prilikom prelaska tereta i brzina kojom teret prelazi preko mosta. Ako se programom ispitivanja zahtijeva, potrebno je provesti dodatna mjerenja – deformacija na mjestima očekivanih ekstremnih utjecaja, poprečnih i uzdužnih pomaka u sredini odabranih raspona te ostalih dinamičkih parametara konstrukcije [5].

3.1.4. Ocjena rezultata ispitivanja probnog opterećenja

Most se smatra tehnički ispravnom konstrukcijom ako su ispunjeni sljedeći uvjeti:

- izmjereni progibi i pomaci su manji ili jednaki teorijskim vrijednostima
- izmjereni trajni progibi nakon rasterećenja su manji od: 15% najvećih izmjerenih progiba na istom mjestu - za čelične i spregnute mostove, 20% najvećih izmjerenih progiba na istom mjestu - za mostove od prednapetog betona, 25% najvećih izmjerenih progiba na istom mjestu - za mostove od armiranog betona
- izmjerena širina pukotina kod armirano-betonskih mostova je manja od dopuštene prema važećim propisima za armirani beton
- veličina izmjerenih progiba ne utječe na funkcionalnost ili estetski izgled konstrukcije
- dinamičko ponašanje mosta pod probnim opterećenjem ocjenjuje se kao zadovoljavajuće

Dinamičko ponašanje mosta smatra se zadovoljavajućim ako su ispunjeni sljedeći uvjeti:

- periodi slobodnih oscilacija nalaze se unutar granica teorijskih vrijednosti
- dinamički koeficijent je unutar granica predviđenih projektom
- vibracije mosta ne izazivaju neugodan osjećaj kod korisnika, poput podrhtavanja, rezonancije ili određenog omjera amplitude i frekvencije koji bi mogao uzrokovati nelagodu

Ako navedeni uvjeti pri statičkom opterećenju nisu ispunjeni, a trajni progibi su prekoračeni do 25% u odnosu na gore navedenih uvjeta, potrebno je ponovno provesti probno opterećenje mosta.

Pri ponovljenom opterećenju, trajni progibi ne smiju prekoračiti:

- 7,5% izmjerenih pod opterećenjem za čelične mostove,
- 10% izmjerenih za mostove od prednapetog betona,
- 12,5% izmjerenih za mostove od armiranog betona.

Svi ostali uvjeti gore navedeni moraju pritom biti zadovoljeni.

Ako trajni progibi i dalje prelaze dopuštene granice ili ostali uvjeti gore navedeni nisu ispunjeni, konstrukcija mora biti ponovno analizirana te se moraju predložiti odgovarajuće korektivne mjere.

3.1.5. Izvještaj o ispitivanju mosta probnim opterećenjem

O ispitivanju mosta probnim opterećenjem, organizacija koja je izvršila ispitivanje sastavlja izvještaj, koji može biti:

- a) Privremeni izvještaj: sadrži osnovne podatke o ispitivanju i zaključak o podobnosti mosta za preuzimanje projektom predviđenih opterećenja
- b) Konačni izvještaj: uključuje osnovne podatke o ispitivanju, usporedne teoretske proračune, analizu rezultata i zaključak o podobnosti mosta za preuzimanje projektom predviđenih opterećenja

3.2. Španjolska regulativa za ispitivanje mostova probnim opterećenjem

Španjolska regulativa za ispitivanje mostova temelji se na dokumentu "Upute za ispitivanje cestovnih mostova" (španj. Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera) [7].

Motivacija za usporedbu španjolske i hrvatske regulative za ispitivanje mostova probnim opterećenjem vezana je za moj studijski boravak na Universitat Politècnica de Catalunya u Barceloni (studentska razmjena u Erasmus + programu), kao i za buduću stručnu praksu u tvrtki JVVA Structural u Madridu.

3.2.1. Opseg primjene

Sadržaj ovog dokumenta [7] odnosi se na objekte prolaza za ceste i pješačke staze. Ispitivanja probnim opterećenjem na mostovima s različitim namjenama, kao što su cestovni i željeznički mostovi te akvadukti, zahtijevaju drugačije upute koje nisu obuhvaćene ovim dokumentom.

U slučaju novo izgrađenih mostova, statičko ispitivanje opterećenja je obavezno prema važećoj "Uputi o radnjama koje treba uzeti u obzir pri projektiranju cestovnih mostova" (španj. "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera") koja u svom poglavlju 5 navodi sljedeće: "Svaki most projektiran u skladu s ovom Uputom mora biti podvrgnut ispitivanju probnim opterećenjem prije nego što se stavi u upotrebu, u skladu s onim što je navedeno u obveznom dodatku koji će biti uključen u svaki projekt. Takva ispitivanja mogu biti statička ili dinamička. Statička ispitivanja će uvijek biti obavezna, dok će dinamička ispitivanja biti obavezna za one konstrukcije kod kojih je potrebno provjeriti da li vibracije koje se mogu pojaviti neće utjecati na funkcionalnost objekta."

Obveza ispitivanja probnim opterećenja odnosi se na mostove čiji rasponi imaju dužinu jednaku ili veću od 12 metara. Za raspon ispod 12 metara, projektant može odlučiti o potrebi ispitivanja u skladu s karakteristikama ili okolnostima nosive konstrukcije.

Što se tiče dinamičkih ispitivanja probnim opterećenjem, "Uputa o armiranobetonskim konstrukcijama (španj. "Instrucción de hormigón estructural")" naglašava njihovu obveznost u slučaju mostova s rasponima većim od 60 metara, ili kod onih čiji dizajn je neuobičajen ili se koriste novi materijali, kao i kod pješačkih staza i zona prometa gdje se predviđa da vibracije mogu uzrokovati smetnje korisnicima. Ovi kriteriji također će se primjenjivati kada se radi o metalnim ili mješovitim konstrukcijama.

Općenito, također će biti potrebno izvesti ispitivanje probnim opterećenjem nakon izvođenja važnih radova proširenja i/ili obnavljanja konstrukcije.

3.2.2. Projekt ispitivanja

Projekt ispitivanja mora biti uključen u projekt objekta te je odgovornost projektanta da ga izradi. Projekt ispitivanja treba sadržavati sljedeće dokumente:

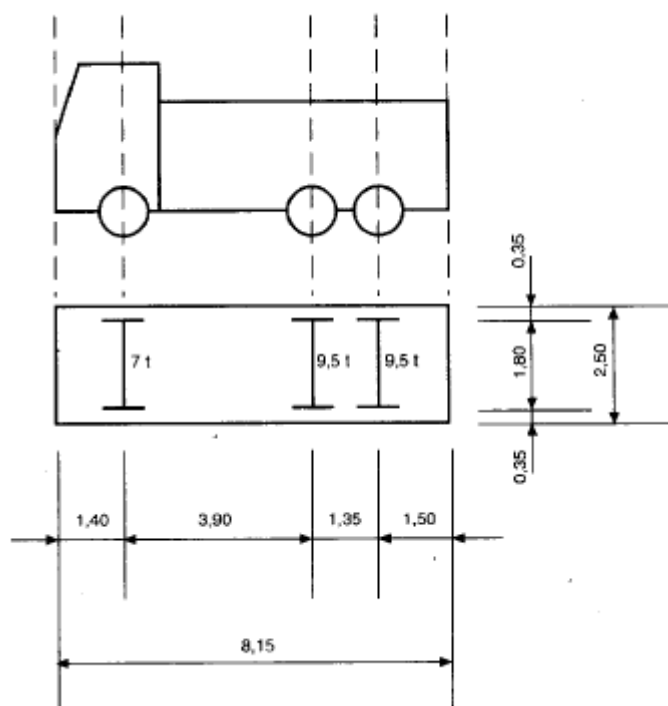
- Izvještaj: Dokument koji detaljno opisuje plan ispitivanja, ciljeve, procedure i metode koje će se primijeniti.
- Planovi: Grafički prikazi koji prikazuju dizajn ispitivanja, uključujući lokaciju točaka za opterećenje i mjerenje.
- Tehničke specifikacije: Tehničke odredbe o izvođenju ispitivanja, korištenoj opremi i uvjetima koje treba ispuniti.
- Proračun: Procjena troškova povezanih s izvođenjem ispitivanja.

Informacije koje trebaju biti definirane u projektu ispitivanja:

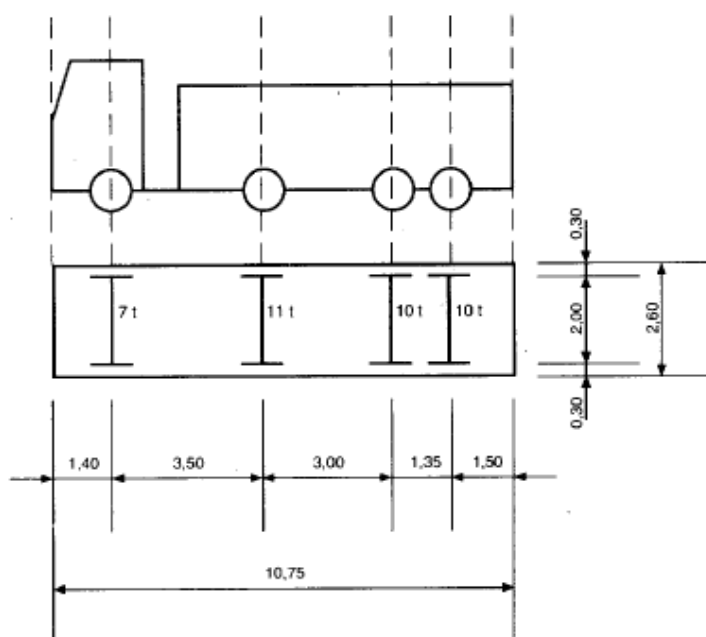
- Opterećenja: Specifikacija vrste i broja vozila za opterećenje, njihova raspodjela na konstrukciji i stanja opterećenja koja će se primijeniti.
- Instrumenti: Detaljan opis uređaja i tehnika mjerenja koje će se koristiti, kao i njihova lokacija na konstrukciji.
- Pomoćna sredstva: Opis svih dodatnih alata i opreme potrebne za izvođenje ispitivanja.
- Ekonomska procjena: Uključiti detaljnu procjenu troškova povezanih s procesom ispitivanja.
- Teorijske vrijednosti: Postaviti očekivane vrijednosti za eksperimentalna mjerenja i za otvaranje pukotina, na temelju dizajna i specifikacija projekta.

U iznimnim slučajevima, i samo ako je to adekvatno objašnjeno, projekt ispitivanja može sadržavati različite kriterije prihvaćanja od onih koji su navedeni u ovom dokumentu.

Ako u trenutku izrade projekta ispitivanja nisu poznate točne karakteristike vozila za opterećenje, treba koristiti jedan od dva tipa vozila navedena u dokumentu. (Slika 6 i Slika 7)



Slika 6. Kamion s 3 osovine – 26 t [7]



Slika 7. Kamion s 4 osovine – 38 t [7]

Sva vozila korištena u ispitivanju trebaju biti što ujednačenija u pogledu oblika, težine i dimenzija. Kako bi se postigao željeni nivo opterećenja, preporučuje se korištenje kamiona s maksimalno dozvoljenom težinom (Slika 6 i Slika 7) uz promjenu samo broja i relativnog položaja vozila.

U slučaju da projekt konstrukcije bude izmijenjen prije izgradnje, ili ako vozila za opterećenje budu različita od predviđenih, ili ako se uoče značajna odstupanja u karakteristikama materijala u odnosu na ono što je predviđeno projektom, bit će potrebno ponovno izraditi ili prilagoditi projekt ispitivanja kako bi se osiguralo da se održe odgovarajući uvjeti i zahtjevi građevine.

3.2.3. Statičko ispitivanje

Opći zahtjevi za mjerenje su:

- Savijanje: Potrebno je mjeriti savijanje u svim središtima raspona.
- Slijeganje: Potrebno je mjeriti slijeganje na točkama oslonca. Mjerenje slijeganja može se izostaviti ako se smatra da neće imati značaj u odnosu na fleksiju.

Broj točaka mjerenja u svakoj sekciji ovisit će o širini ploče i tipu konstrukcije:

- Sekcije u obliku kvadrata: Preporučuje se više točaka mjerenja, ovisno o predviđenoj torzijskoj reakciji konstrukcije.
- Ploče s gredama: Preporučuje se najmanje tri točke mjerenja – jedna u srednjoj gredi i po jedna na svakoj od rubnih greda.
- Metalne ili mješovite konstrukcije: Kod specijalnih tipova konstrukcija, ili ako autor projekta smatra potrebnim, preporučuje se mjerenje deformacija u čeličnim dijelovima na najvažnijim sekcijama objekta.

Uređaji za mjerenje koji se koriste trebaju imati točnost:

- Umjeravanje: Uređaji trebaju biti pravilno umjereni.
- Osjetljivost: Minimalna osjetljivost treba biti oko 5% od najmanjih očekivanih vrijednosti u značajnim točkama mjerenja.
- Opseg mjerenja: Treba biti najmanje 50% veći od maksimalnih očekivanih vrijednosti tih veličina.

Preporučuje se da instrumenti omogućuju automatsko bilježenje mjerenja i njihovu vizualizaciju u realnom vremenu. Za takva mjerenja koriste se sustavi za prikupljanje podataka na koje spajamo induktivna osjetila. Ova značajka je obavezna za mostove s rasponom većim od 60 metara.

3.2.4. Provedba ispitivanja

Za test opterećenja koristit će se vozilo za opterećenje koje se sastoji od kamiona, a broj i karakteristike bit će definirani u projektu ispitivanja. Nivo opterećenja koji će se postići tijekom testa treba biti reprezentativan za stvarna opterećenja kojima će konstrukcija biti izložena.

Smatra se prikladnim postići nivo opterećenja koji odgovara periodu povratka od približno 5 godina. U skladu s tim, preporučuje se da opterećenja uzrokovana stvarnim vozilom za opterećenje budu oko 60% teoretskih vrijednosti koje proizlaze iz vozila za opterećenje definiranog u "Upute o akcijama koje treba uzeti u obzir u projektiranju cesta i mostova" (španj. "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera") usvajajući karakteristične vrijednosti bez povećanja. Ni u kojem slučaju opterećenja uzrokovana stvarnim vozilom za opterećenje ne smiju prijeći 70% teorijskih opterećenja.

Prije početka testa, potrebno je provesti provjeru težine svakog vozila pomoću vage, osiguravajući da njegova stvarna težina ne odstupa više od 5% od one predviđene u programu ispitivanja. Zapisi s vaga moraju se predati projektantu, koji će to evidentirati u izvješću.

Pozicija svih vozila u svakom stanju opterećenja mora se unaprijed označiti na ploči, kako bi njihovo postavljanje bilo dovoljno precizno.

U slučaju pješačkih mostova, ravnomjerno opterećivanje može se postići pomoću koncentriranih opterećenja koja će u konstrukciji izazvati iznose ekvivalentne onima izračunatog preopterećenja.

Ako se ispitivanje provodi prije izvođenja nekih od ne konstruktivnih jedinica koje čine dio dodatnog stalnog opterećenja, njihova se težina može postići povećanjem opterećenja testa ili dodavanjem dodatnog opterećenja kako bi se omogućila stabilizacija.

Kretanje vozila u bilo kojoj fazi procesa opterećenja mora se odvijati s potrebnom sporosti kako bi se izbjegli neželjeni dinamički učinci te će biti organizirano na način da ne uzrokuje napore veće od predviđenih na drugim dijelovima konstrukcije.

Potrebno je potpuno rasterećenje konstrukcije prije primjene svakog novog stanja opterećenja. Samo u slučaju mostova s zglobno oslonjenim rasponima, različita stanja opterećenja mogu se ostvariti pomicanjem vozila za opterećenje s jednog raspona na drugi.

3.2.5. Dinamičko ispitivanje

Projekt ispitivanja probnim opterećenjem trebao bi definirati koji će se dinamički parametri odrediti tijekom ispitivanja, kao i teorijske vrijednosti koje se za njih predviđaju. Uobičajeno je dobiti vlastite oblike titraja i veličinu prigušenja kao dinamičke karakteristike konstrukcije, te ubrzanja i dinamički koeficijent kao odgovor konstrukcije na vanjsku pobudu.

Za izvođenje ispitivanja, most mora biti potpuno završen zbog utjecaja mase konstrukcije na njezin dinamički odgovor, osim ako se ne želi procijeniti ponašanje konstrukcije u međufazi izgradnje.

Izvor pobude je kamion s teretom koji će prelaziti preko mosta različitim brzinama:

- Spora brzina: 5 – 15 km/h (kvazi-statičko ispitivanje)
- Srednja brzina: između 30 i 40 km/h
- Brza brzina: > 60 km/h (ako uvjeti na gradilištu to dopuštaju)

Kamion s teretom u pravilu će se sastojati od jednog kamiona koji se kreće konstantnom brzinom duž uzdužne osi mosta. Ako se želi uzrokovati rotacija, vozilo će prolaziti uz jedan od rubova ploče mosta.

Ako se želi procijeniti razina udobnosti u područjima mosta namijenjenim pješacima, kamion s teretom bit će sastavljen od broja kamiona koji odgovara broju prometnih traka na kolniku, krećući se konstantnom brzinom duž ploče mosta u jednom smjeru.

Za određivanje vlastitih frekvencija i koeficijenta prigušenja može se postaviti prepreka poprečno na smjer kretanja kamiona na kolniku, ako se smatra potrebnim za povećanje vibracija tijekom ispitivanja.

U posebnim slučajevima, pobuda se može stvoriti pomoću mehaničkih ili hidrauličkih elemenata, naglim otpuštanjem težine, kočanjem itd.

Konačno, u slučaju pješačkih staza, izvor pobude koji se koristi za bilježenje ubrzanja bit će grupa ljudi koja će se uzastopno kretati, hodajući i trčeći, u paralelnom smjeru duž ploče. Grupa će se sastojati od jedne osobe, prosječne težine, po svakom metru širine staze.

3.2.6. Izvještaj o ispitivanju

Nakon završetka ispitivanja probnim opterećenjem, sastavit će se Izvještaj o ispitivanju, koji će sadržavati sljedeće točke:

- Datum, vrijeme početka i završetka te prisutni sudionici ispitivanja
- Reference na projekt konstrukcije i ispitivanja probnim opterećenjem
- Opis objekta i njegovo stanje prije ispitivanja
- Detaljan opis korištenih vozila i različitih stanja opterećenja
- Opis mjerenih veličina, opreme za prikupljanje podataka te broj i položaj mjernih točaka
- Informacije o tijeku ispitivanja (vrijeme početka svakog stanja opterećenja, vrijeme između opterećenja i rasterećenja, broj koraka itd.)
- Zapisi izmjerenih veličina tijekom ispitivanja
- Usporedba s teoretski predviđenim vrijednostima i ocjena ispunjavanja kriterija prihvaćanja
- Zapažene zanimljivosti iz inspekcija objekta prije, tijekom ili nakon ispitivanja
- Ostalo: fotografska dokumentacija, meteorološki uvjeti, referentne točke za niveliranje, incidenti itd.

Izvještaj će biti sastavljen i potpisan od strane inženjera koji je vodio ispitivanje.

4. PROVEDBA ISPITIVANJA - OBRADA, PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

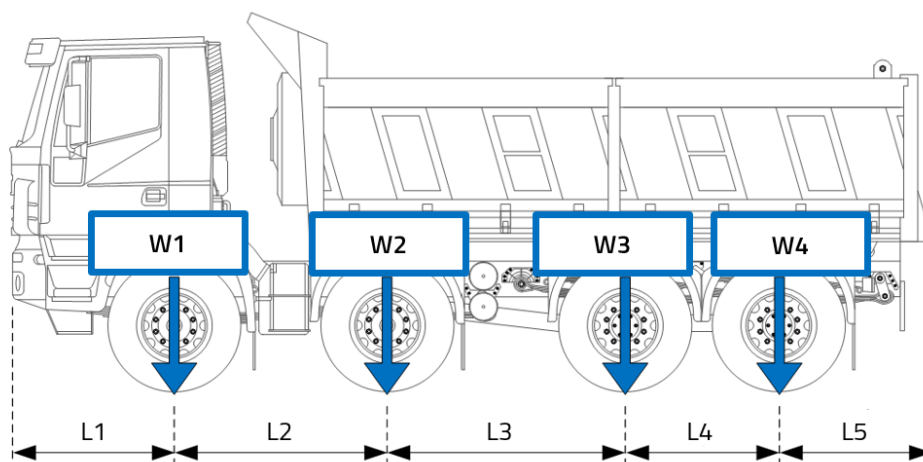
U skladu s važećom regulativom HRN U.M1.046:1984 [6] provedeno je probno ispitivanje navedenog nadvožnjaka statičkim i dinamičkim opterećenjem. U skladu s normom, prema učestalosti ispitivanja prije puštanja nadvožnjaka u promet izvršilo se redovno probno opterećenje, prema veličini tereta normalno probno opterećenje, a prema trajanju kratkotrajno opterećenje. Probim opterećenjem se provjerava ponašanje objekta pri statičkom i dinamičkom prometnom opterećenju zbog:

- usklađenosti s projektom,
- usklađenosti kvalitete radova sa zahtjevom u projektu,
- podobnosti preuzimanja projektiranog opterećenja

Ispitivanje je obavljeno pri sunčanom vremenu (temperatura zraka: od 9° do 13°C).

4.1. Podaci o probnom opterećenju

Probno ispitivanje nadvožnjaka obavljeno je pomoću 4 kamiona. Težine osovina prikazane u Tablici 3 odgovaraju težinama korištenim za numerički proračun (izračun efikasnosti probnog opterećenja i usporedba računskih i izmjerenih rezultata). Unutar numeričkog modela, svaki je kotač kamiona modeliran kao plošno opterećenje s površinom od 0,4 × 0,4 m (ista se površina kotača pretpostavlja u statičkom proračunu prema Eurokod-u Modelu 1) na poprečnom razmaku od 2,0 m [4].



Slika 8. Shematski prikaz kamiona s 4 osovine s označenim opterećenjem i međuosovinskim razmacima [2]

Međuosovinski razmaci, osovinska opterećenja i površinska težina po kotaču na površini nalijeganja 40x40 cm za svaki kamion korišten prilikom probnog opterećenja je prikazana u Tablici 3.

Tablica 3.: Podaci o kamionima: međuosovinski razmaci, osovinska opterećenja, površinska težina po kotaču [2]

Vozilo	L1	L2	L3	L4	L5	W1 [kN]	W2 [kN]	W3 [kN]	W4 [kN]
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	w1 [kN/m ²]	w2 [kN/m ²]	w3 [kN/m ²]	w4 [kN/m ²]
KA 700 JP	1.5	1.8	2.5	1.4	1.4	82	82	123	123
MAN TGS 35 - 440						256.25	256.25	384.38	384.38
ZG 8242 GZ	1.5	1.5	2.6	1.4	1.4	77.8	77.8	116.7	116.7
MAN 35 - 364						243.13	243.13	364.69	364.69
KA 884 HL	1.5	1.75	2.5	1.35	1.5	76.7	76.7	115.1	115.1
MERCEDES ACTROS 3241						239.69	239.69	359.69	359.69
KA 445 JO	1.5	1.7	2.8	1.4	1.3	78.8	78.8	118.2	118.2
MERCEDES ACTROS 3244						246.3	246.3	369.4	369.4

Oznake:

Li – razmak osovina

Wi – težina osovina

wi – površinska težina po kotaču na površini nalijeganja 40x40 cm

Raspored opterećenja po osovinama u omjeru (3+4)/(1+2) = 6/4 je pretpostavljen za potrebe statičkog proračuna i prikazan je u Tablici 4.

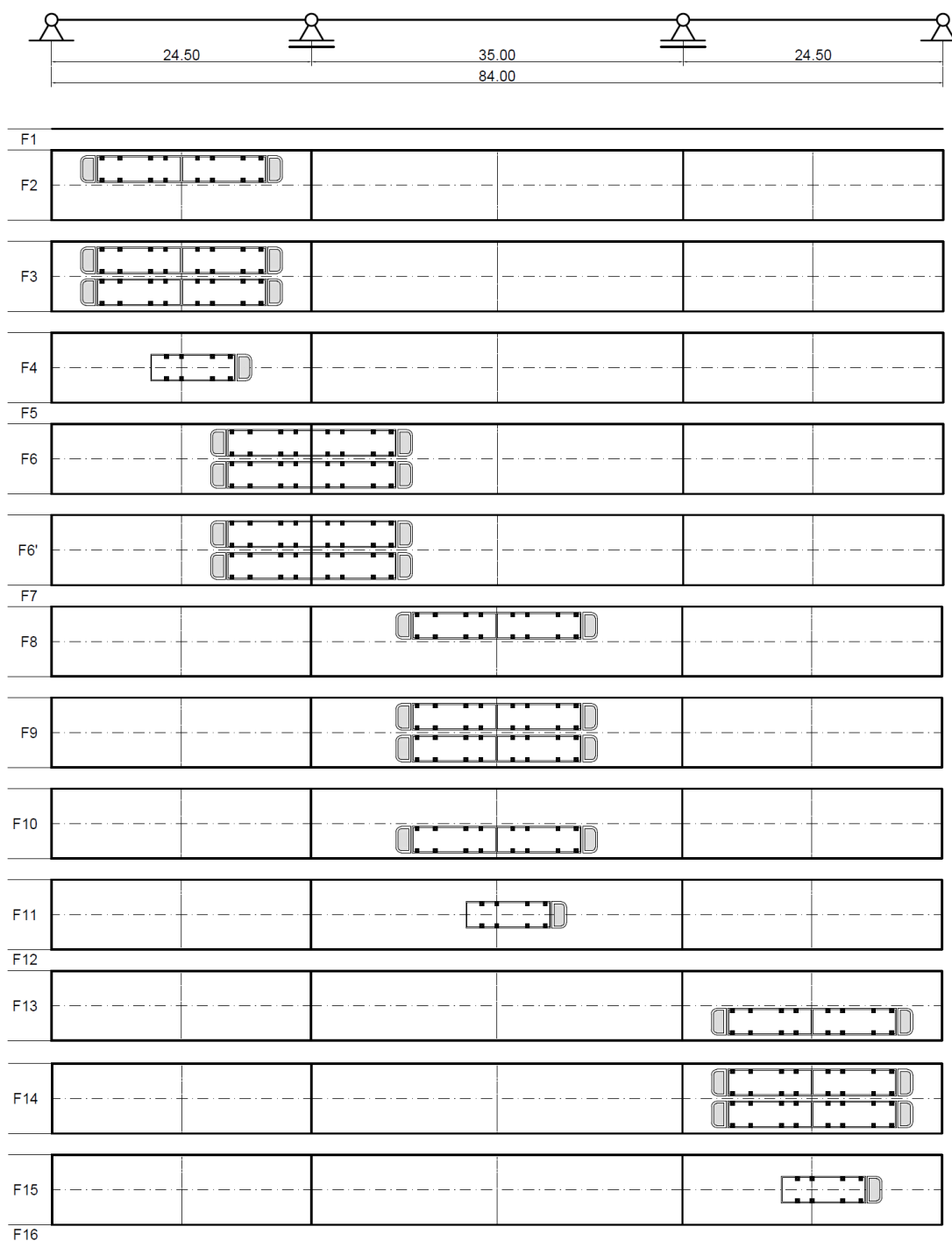
Tablica 4.: Srednje vrijednosti težina kamiona [2]

Registarska oznaka	Proizvođač i tip kamiona	Težina osovina [kN]		Ukupna težina [kN]
		1 + 2	3 + 4	
ZG 8242 GZ	MAN 35 - 364	155,6	233,4	389,0
KA 700 JP	MAN TGS 35 - 440	164,0	246,0	410,0
KA 445 JO	Mercedes ACTROS 3244	157,6	236,4	394,0
KA 884 HL	Mercedes ACTROS 3241	153,5	230,2	383,7
Srednja vrijednost:		165,1	247,7	394,2

4.2. Faze ispitivanja

4.2.1. Statičko ispitivanje

Statičko ispitivanje provodi se u fazama sa simetričnim opterećenjem od jednog ili četiri kamiona u sredini raspona te asimetričnim opterećenjem od dva kamiona.



Slika 9. Shematski prikaz faza probnog opterećenja, statičko djelovanje

Simetrično opterećenje s četiri kamiona postavlja se kako bi se izmjerili maksimalni pomaci svakog pojedinog raspona, dok se faze s jednim kamionom koriste za određivanje statičkog pomaka koji će biti potreban za kasniji izračun dinamičkog koeficijenta. Nesimetrično opterećenje koristi kako bi se odredilo torzijsko ponašanje rasponske konstrukcije i poprečna prerađioba opterećenja.

4.2.2. Dinamičko ispitivanje

Faze dinamičkog ispitivanja sastoje se od prolaska jednog kamiona preko mosta različitim brzinama u svrhu mjerenja inkrementa dinamičkog pomaka koji se koristi za određivanje dinamičkih koeficijenata. Povećanjem brzine dolazi do porasta dinamičkog pomaka sve dok brzina prolaska kamiona nije toliko velika da ne stigne doći do progiba mosta pa vrijednost dinamičkog pomaka počinje opadati. Uobičajeno, ispitivanje se provodi maksimalno do brzine od 100 km/h, iz razloga što je pri većim brzinama zapis dinamičkog pomaka u vremenu neprecizan. [1]

Tablica 5.: Faze dinamičkog ispitivanja mosta [2]

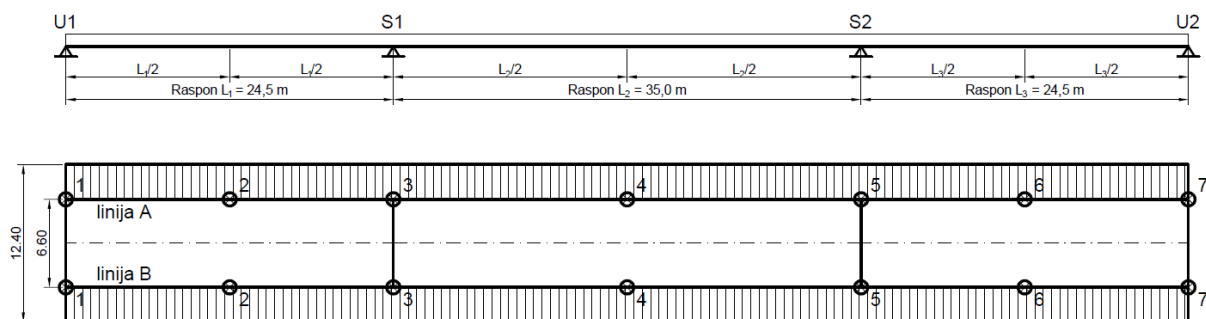
Naziv faze	Opis faze
DIN 20	Prolaz jednog kamiona (reg. oznaka: KA 445 J0) preko rasponske konstrukcije brzinom od 20 km/h, smjer: $U_1 \rightarrow U_2$
DIN 40	Prolaz jednog kamiona (reg. oznaka: KA 445 J0) preko rasponske konstrukcije brzinom od 40 km/h, smjer: $U_1 \rightarrow U_2$
DIN 60	Prolaz jednog kamiona (reg. oznaka: KA 445 J0) preko rasponske konstrukcije brzinom od 60 km/h, smjer: $U_1 \rightarrow U_2$

4.3. Rezultati ispitivanja

4.3.1. Rezultati statičkog ispitivanja

Statičko ispitivanje rasponske konstrukcije vijadukta obuhvaća mjerenje vertikalnih pomaka na unaprijed definiranim točkama konstrukcije. Tijekom probnog opterećenja, vertikalni pomaci su mjereni na ukupno 14 točaka smještenih duž dviju linija (7 točaka duž linije A i 7

točaka duž linije B). Mjerna mjesta su postavljena u srediinama raspona i iznad oslonaca, kako je prikazano na Slici 10.



Slika 10. Shema mjernih mjesta za mjerenje vertikalnih pomaka kod statičkog ispitivanja [2]

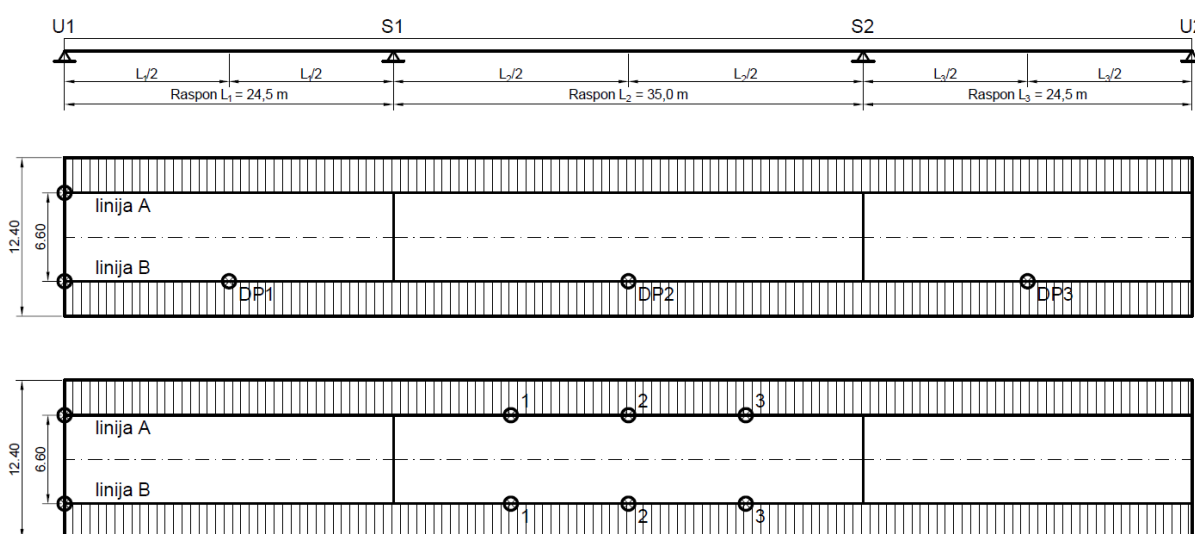
Maksimalni izmjereni progibi te zaostali progibi pri svim fazama opterećenja sa 2 ili 4 kamiona u polovicama raspona prikazani su u Tablici 6.

Tablica 6.: Rezultati statičkog ispitivanja mosta [2]

Faza opterećenja	Mjerno mjesto	Izmjereni progib w_e [mm]	Zaostali progib w_t [mm]	Odnos w_t/w_e [%]
Faza 2 – 2k u 2A	2A	2,6	-	-
Raspon 1	2B	1,2	-	-
Faza 3 – 4k u 2	2A	3,7	0,2	5,4
Raspon 1	2B	3,6	0,3	8,3
Faza 8 – 2k u 4A	4A	5,7	-	-
Raspon 2	4B	3,1	-	-
Faza 9 – 4k u 4	4A	8,6	0,2	2,3
Raspon 2	4B	9,0	0,3	3,3
Faza 10 – 2k u 4B	4A	3,1	-	-
Raspon 2	4B	6,0	-	-
Faza 13 – 2k u 6B	6A	1,0	-	-
Raspon 3	6B	2,6	-	-
Faza 14 – 4k u 6	6A	3,5	0,2	5,7
Raspon 3	6B	3,6	0,1	2,8

4.3.2. Rezultati dinamičkog ispitivanja

Dinamičko ispitivanje provedeno je radi određivanja ponašanja konstrukcije pri dinamičkom djelovanju prometnog opterećenja kamionima na konstrukciju i određivanja dinamičkih parametara konstrukcije. Ispitivanje je obavljeno prolascima kamiona brzinama od 20 km/h, 40 km/h i 60 km/h tijekom kojih je mjereno inkrement dinamičkog pomaka u sredinama svih raspona. U svrhu određivanja osnovnih dinamičkih parametara konstrukcije (vlastitih frekvencija, koeficijenata prigušenja i oblika titranja) mjerene su akceleracije na šest mjernih mjesta unutar drugog raspona. Shema mjernih mjesta za određivanje dinamičkog pomaka, dinamičkih parametara i modalnih oblika prikazana je na Slici 11.



Slika 11. Shema mjernih mjesta za mjerenje parametara kod dinamičkog ispitivanja [2]

Iz vremenskih zapisa mjerenja dinamičkih pomaka određene su maksimalne vrijednosti dinamičkih koeficijenata φ prema izrazu:

$$\varphi = \frac{\Delta y + y_{st}}{y_{st}}$$

u kojem je:

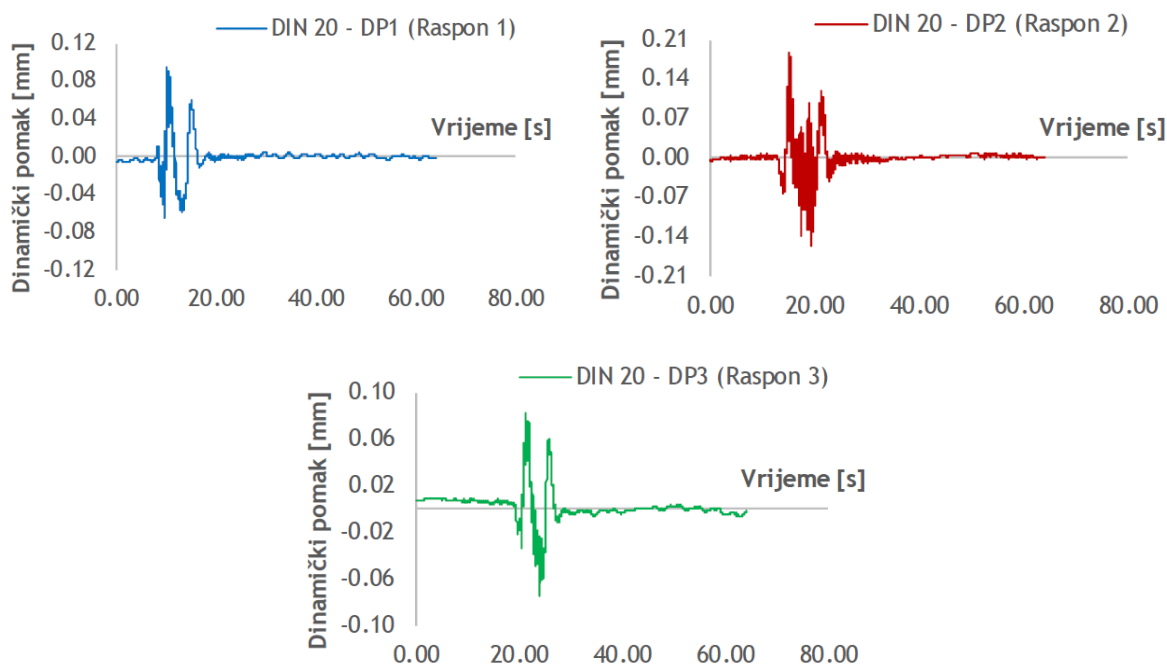
Δy - mjerena vrijednost inkrementa dinamičkog pomaka pri prolasku kamiona

y_{st} - vrijednost vertikalnog pomaka određena pri statičkom opterećenju s jednim kamionom u sredini raspona

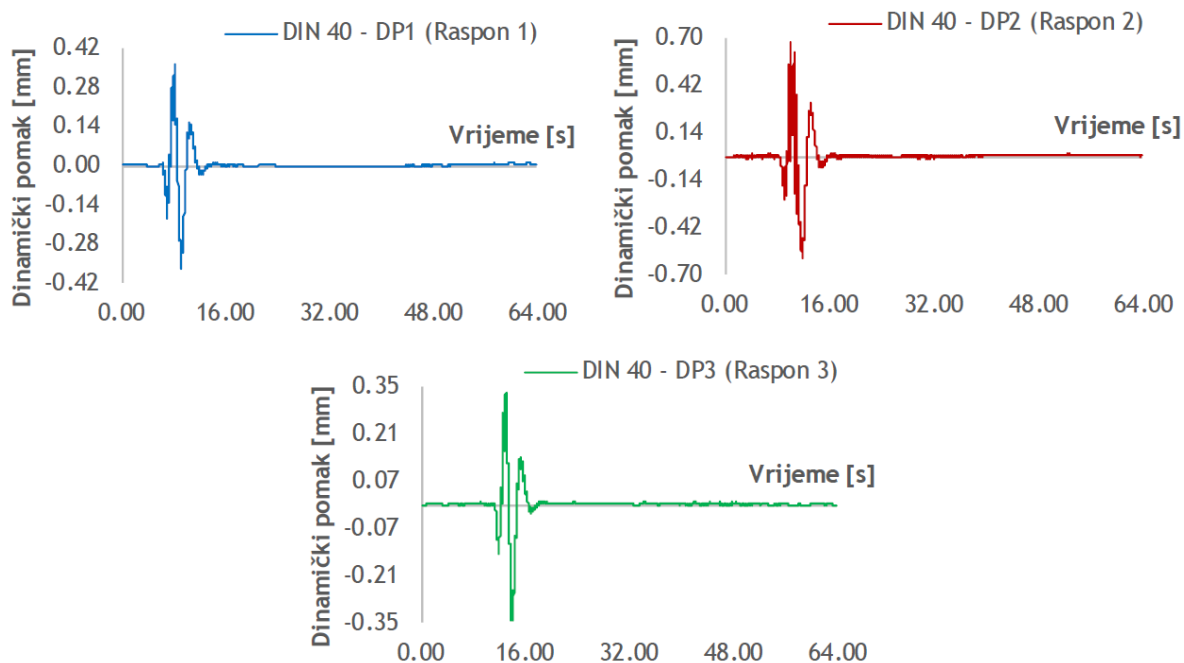
U Tablici 7 prikazani su vremenski zapisi mjerenja vertikalnih dinamičkih pomaka u sredini svih raspona pri prolascima kamiona od 20 km/h, 40 km/h i 60 km/h koji su korišteni za određivanje dinamičkih koeficijenata.

Tablica 7.: Rezultati dinamičkog ispitivanja mosta [2]

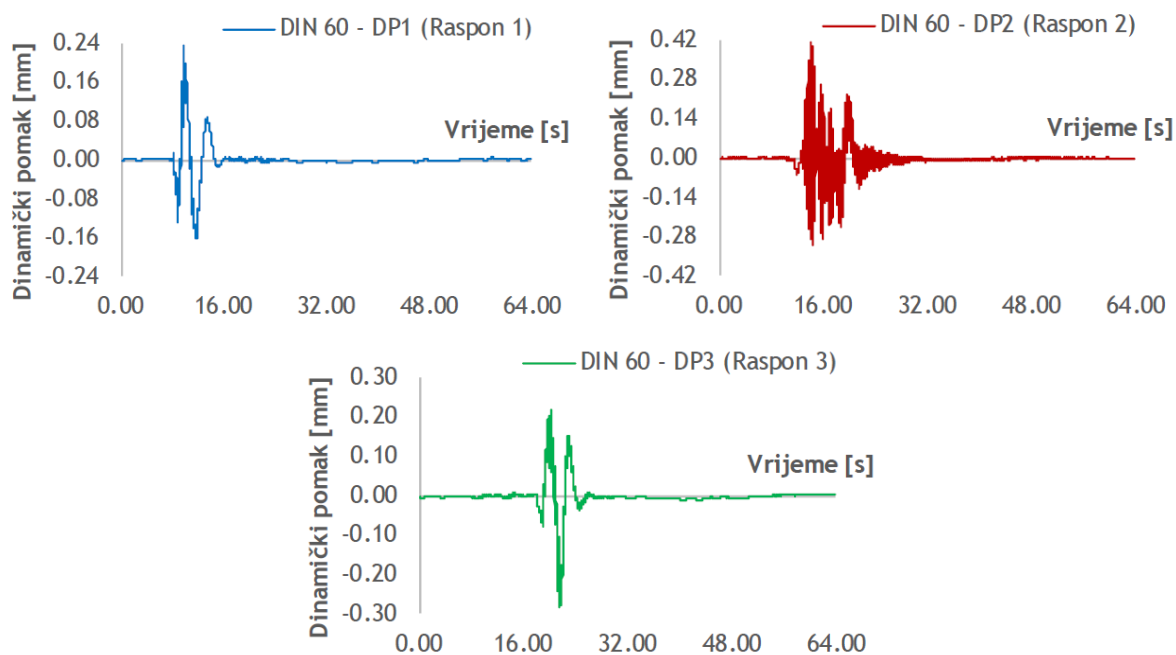
Faza ispitivanja	Brzina [km/h]	Mjerno mjesto (raspon)	Inkrement dinamičkog pomaka Δy [mm]	Dinamičko koeficijent
DIN 20	20	DP1 (Raspon 1)	0,080	1,089
		DP2 (Raspon 2)	0,174	1,067
		DP3 (Raspon 3)	0,079	1,072
DIN 40	40	DP1 (Raspon 1)	0,367	1,408
		DP2 (Raspon 2)	0,638	1,246
		DP3 (Raspon 3)	0,340	1,309
DIN 60	60	DP1 (Raspon 1)	0,199	1,221
		DP2 (Raspon 2)	0,361	1,139
		DP3 (Raspon 3)	0,249	1,227



Slika 12. Zapis dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko mosta brzinom od 20 km/h – Faza dinamičkog ispitivanja DIN 20 [2]



Slika 13. Zapis dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko mosta brzinom od 40 km/h – Faza dinamičkog ispitivanja DIN 40 [2]

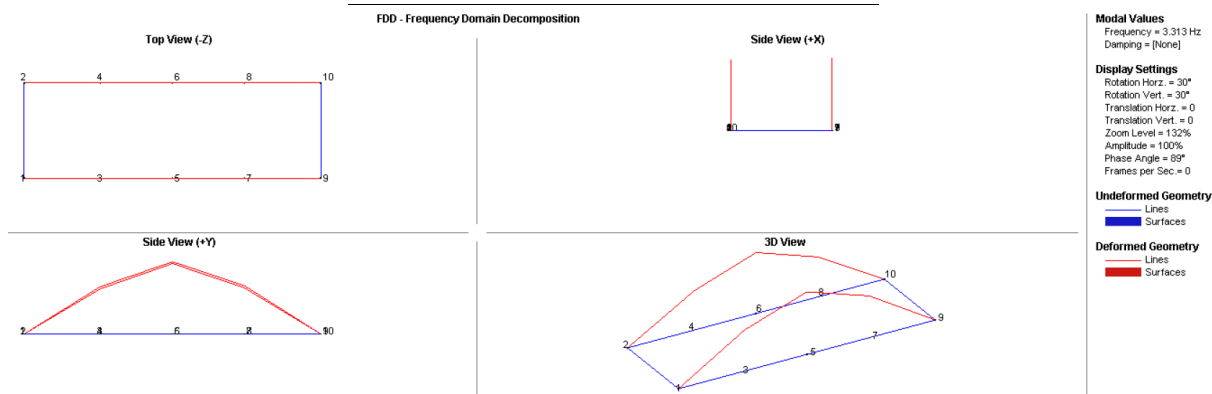


Slika 14. Zapis dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko mosta brzinom od 60 km/h – Faza dinamičkog ispitivanja DIN 60 [2]

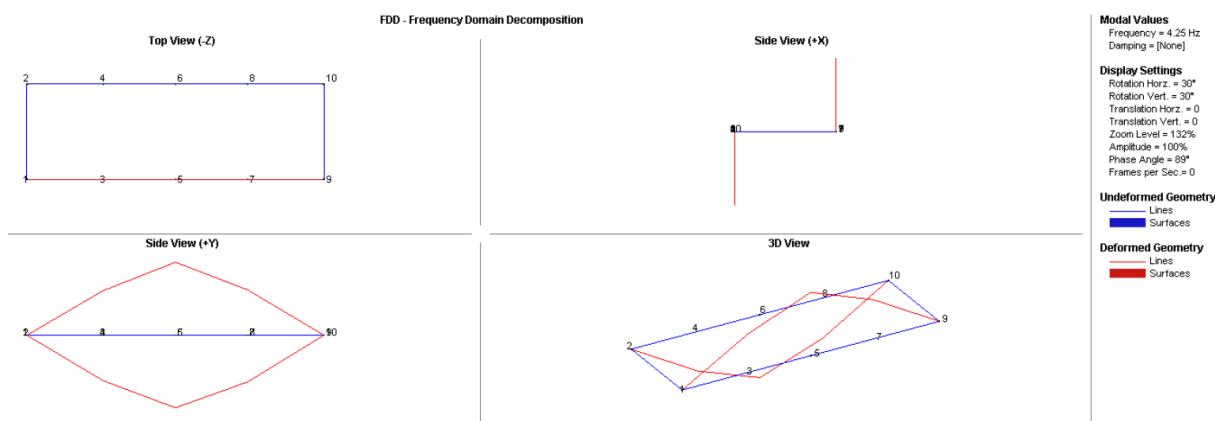
Analizom zapisa singularnih vrijednosti matrica autospektralnih gustoća izdvojene su vrijednosti osnovnih vlastitih frekvencija titranja i vrijednosti koeficijenata prigušenja konstrukcije koje su prikazane u Tablici 8 [8].

Tablica 8.: Izmjerene vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja [2]

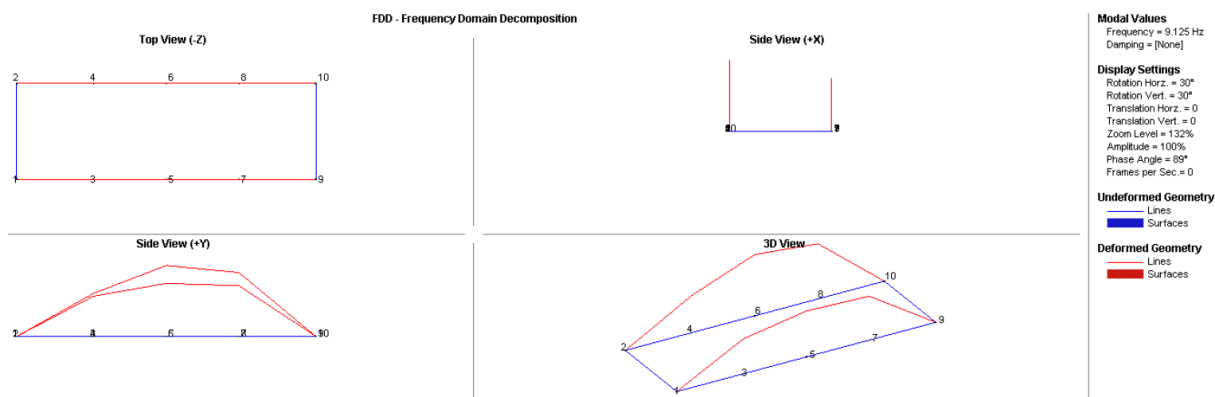
Izmjerena frekvencija [Hz]	Izmjereni koeficijent prigušenja [%]
$3,31 \pm 0,00$	$1,44 \pm 0,22$
$4,25 \pm 0,00$	$1,47 \pm 0,42$
$9,13 \pm 0,06$	$2,9 \pm 1,37$
$11,69 \pm 0,01$	$2,63 \pm 0,12$
$23,5 \pm 0,03$	$1,39 \pm 0,74$



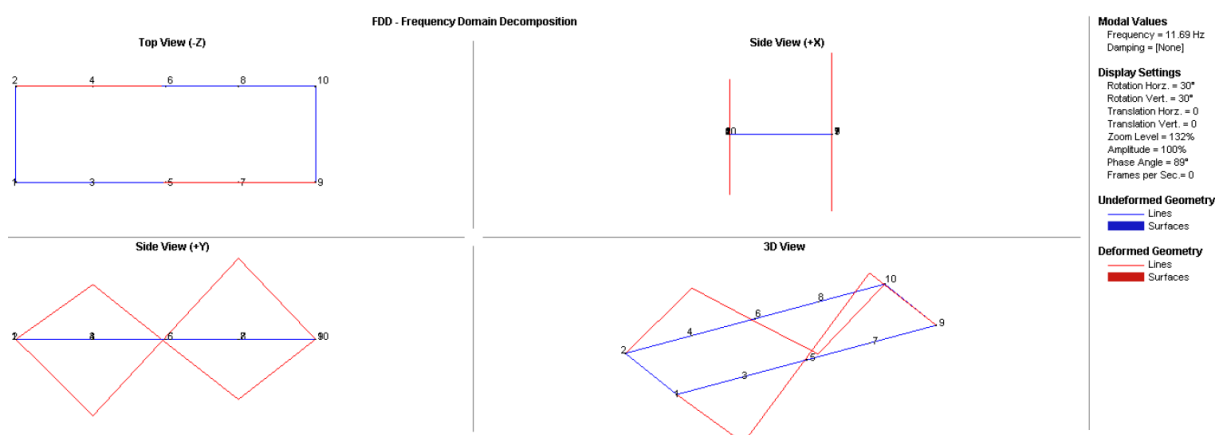
Slika 15. Eksperimentalno određeni vlastiti oblik titranja s pripadajućom vlastitom frekvencijom od 3,31 Hz [2]



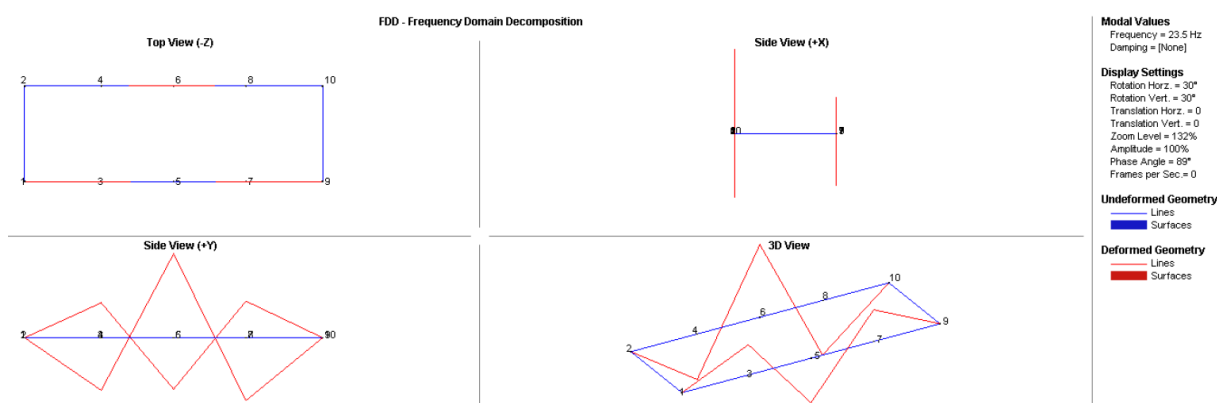
Slika 16. Eksperimentalno određeni vlastiti oblik titranja s pripadajućom vlastitom frekvencijom od 4,25 Hz [2]



Slika 17. Eksperimentalno određeni vlastiti oblik titranja s pripadajućom vlastitom frekvencijom od 9,13 Hz [2]



Slika 18. Eksperimentalno određeni vlastiti oblik titranja s pripadajućom vlastitom frekvencijom od 11,69 Hz [2]



Slika 19. Eksperimentalno određeni vlastiti oblik titranja s pripadajućom vlastitom frekvencijom od 23,5 Hz [2]

5. NUMERIČKI MODEL KONSTRUKCIJE

Za proračun predmetne konstrukcije izrađen je proračunski model i proveden proračun metodom konačnih elemenata, pomoću programa SCIA ENGINEERING 21 [9].

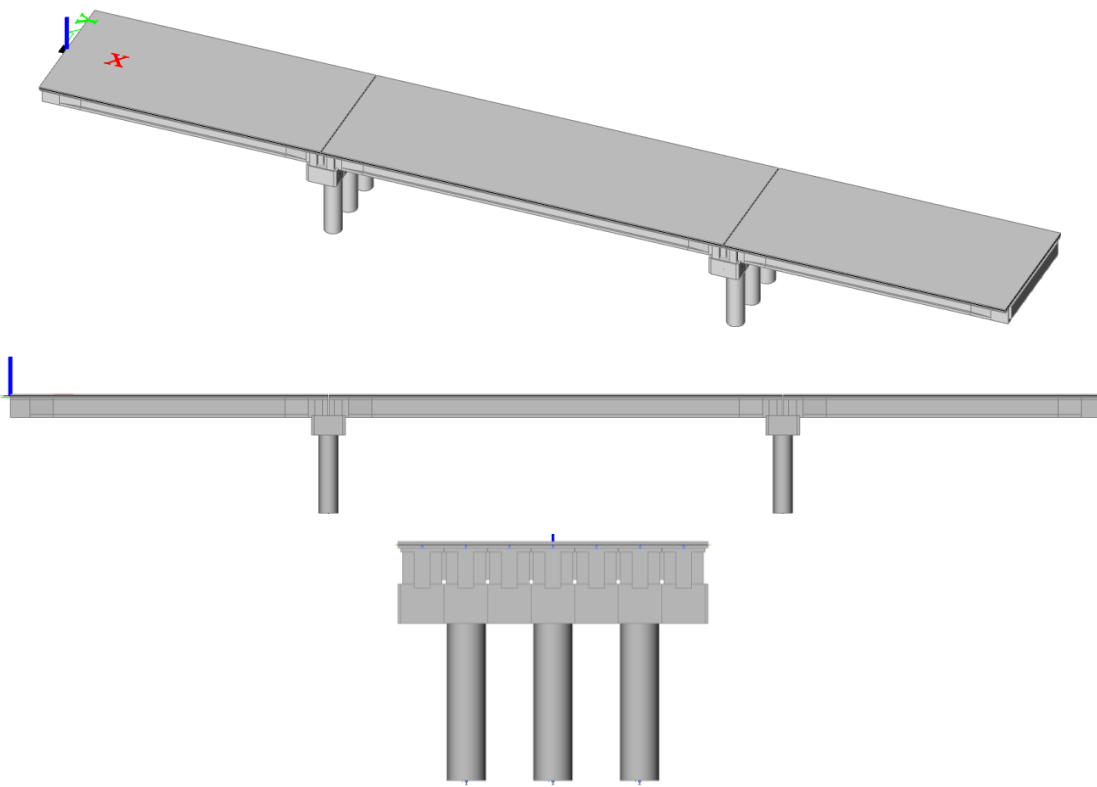
5.1. Opis numeričkog modela

5.1.1. Geometrijska svojstva i kinematički rubni uvjeti

Globalna geometrija proračunskog modela, kao i dimenzije poprečnih presjeka, zasnovani su na nacrtima nadvožnjaka iz literature [3].

Ploče su modelirane 2D konačnim elementima, 3-čvornim i 4-čvornim, sa 6 stupnjeva slobode po čvoru. Grede i stupovi su modelirani 1-D grednim konačnim elementima, 2-čvornim, sa 6 stupnjeva slobode po čvoru.

Na Slici 20 je prikazan proračunski model konstrukcije.



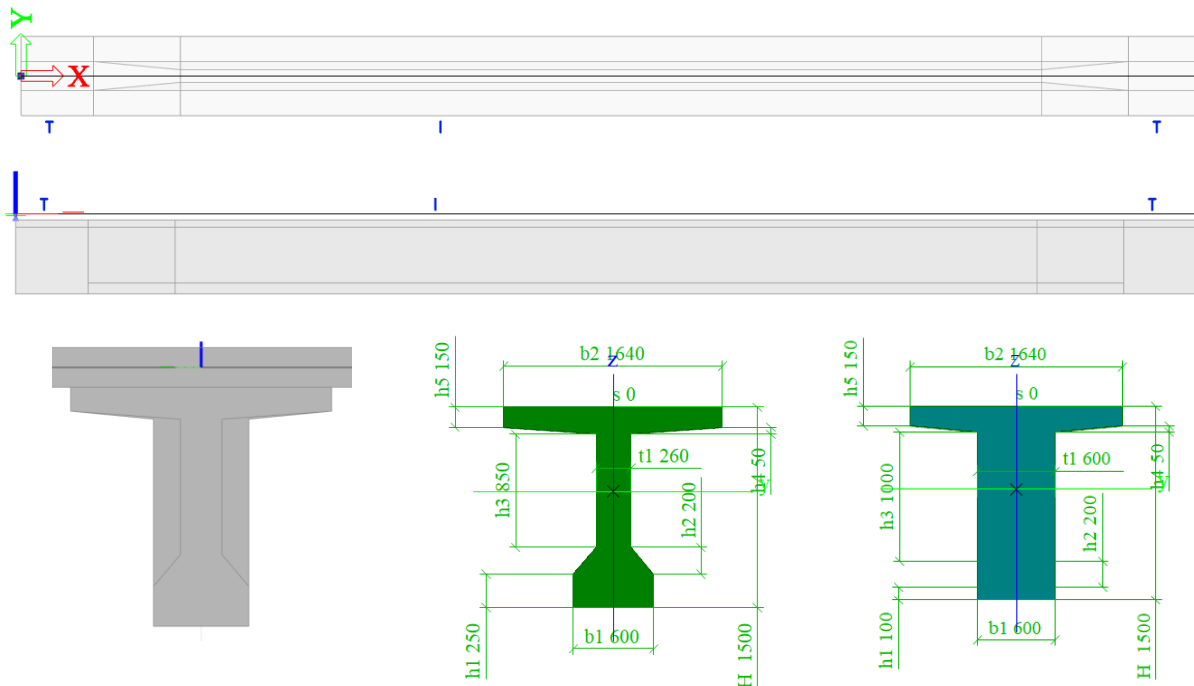
Slika 20. Proračunski model konstrukcije

Karakterističan glavni nosač rasponske konstrukcije je prikazan na Slici 21. Nosači su statičkog sustava proste grede, raspona 24,45+34,90+24,45 m.

Nosač je I-poprečni presjek u sredini raspona, a na krajevima je T-presjek. Visina nosača je $h=140$ cm za manji, a $h=150$ cm za veći raspon.

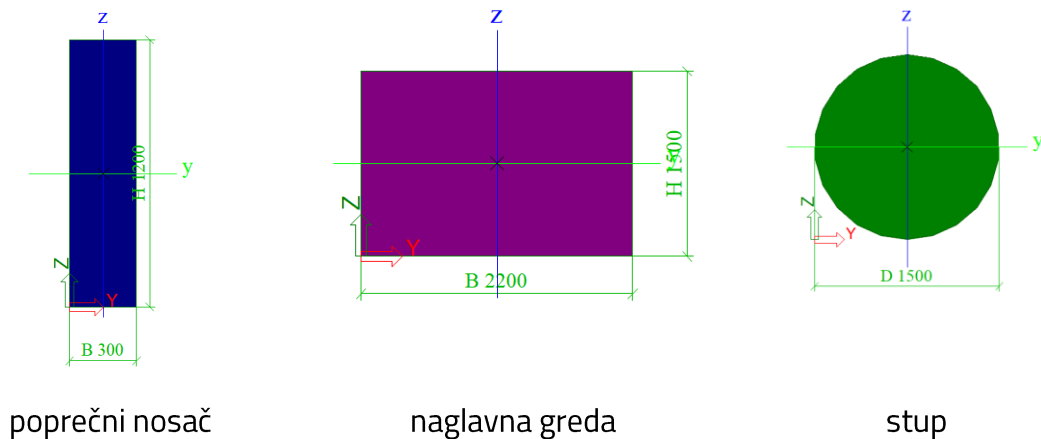
Nosači su na naglavne grede oslonjeni preko fiktivnih elemenata, kojima se sila s osi nosača (ležajni čvor) prenosi na os naglavne grede.

U numeričkom smislu, glavni nosači su spregnuti s tlačnom pločom putem fiktivnih elemenata pomoću naredbe "ribbed slab".



Slika 21. Karakterističan glavni nosač rasponske konstrukcije (tlocrt, nacrt, poprečni presjek)

Poprečni presjeci poprečnog nosača, naglavne grede i stupovi su prikazani na Slici 22.



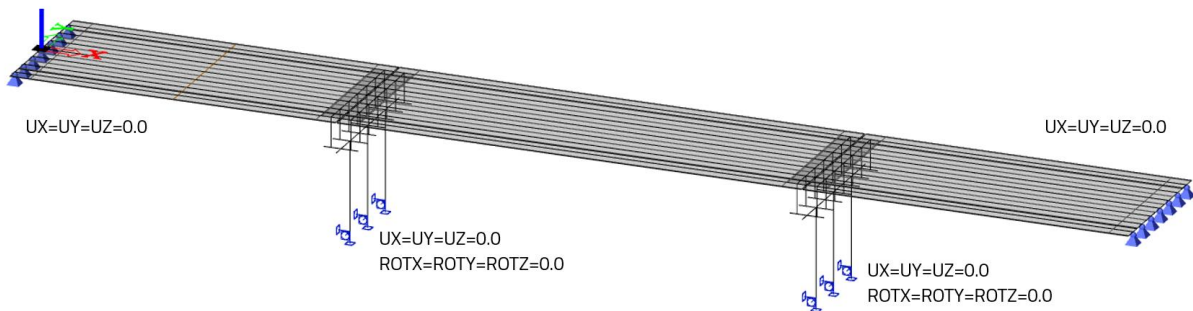
poprečni nosač

naglavna greda

stup

Slika 22. Poprečni presjeci

U čvorovima proračunskog modela su zadani rubni uvjeti (ležajevi) kako je prikazano na Slici 23.



Oznake: UX, UY, UZ – translacijski pomaci; ROTX, ROTY, ROTZ – zaokreti

Slika 23. Rubni uvjeti (ležajevi) na proračunskom modelu

5.1.2. Djelovanja

Na proračunskom modelu su zadana osnovna djelovanja (stalna i promjenjiva) prema iznosima kako je navedeno u Glavnom projektu konstrukcije [3].

Rezultati su prikazani za kombinacije osnovnih djelovanja i anvelope kombinacija.

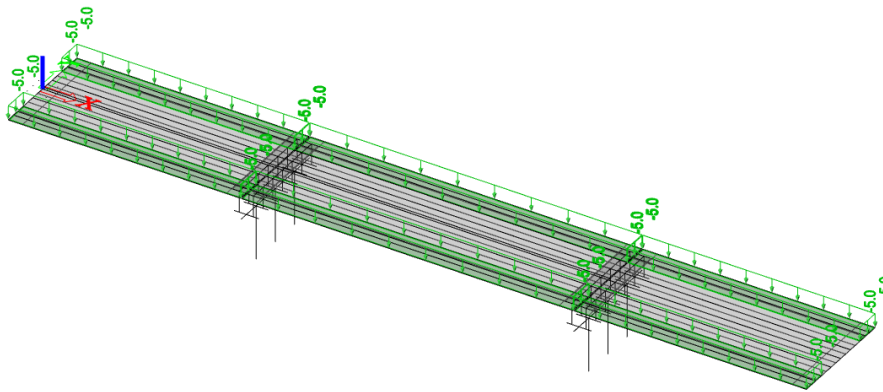
5.1.2.1. Osnovna djelovanja

Osnovna djelovanja su prikazana u Tablici 9.

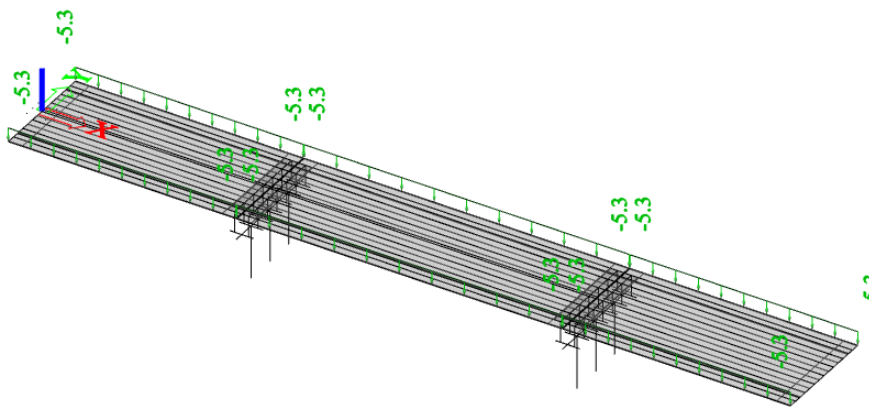
Tablica 9.: Izmjerene vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja

Djelovanje	Oznaka	Opis
Stalno djelovanje	G0	Vlastita težina elementa konstrukcija zadana preko specifične težine betona $\gamma_c=25$ kN/m ³ i poprečnih presjeka nosača
Dodatno stalno djelovanje	Gi	Težina ostalih elementa konstrukcije: pješaka staza, vijenac, ograda, zaštitan ograda i asfaltni zastor. Zadano je kao linijsko ili plošno opterećenje.
Promjenjiva djelovanja	Qi	Opterećenje vozilima za ispitivanje konstrukcije zadano je kao serija sila na površini 40x40 cm.

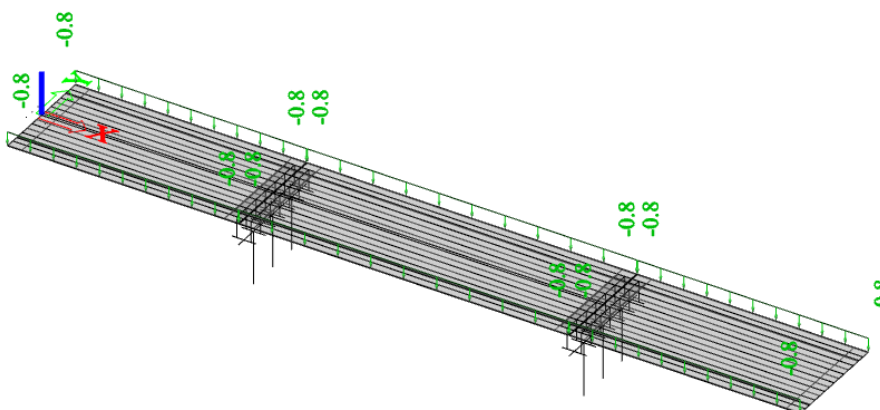
Na sljedećim slikama su prikazana dodatna stalna djelovanja.



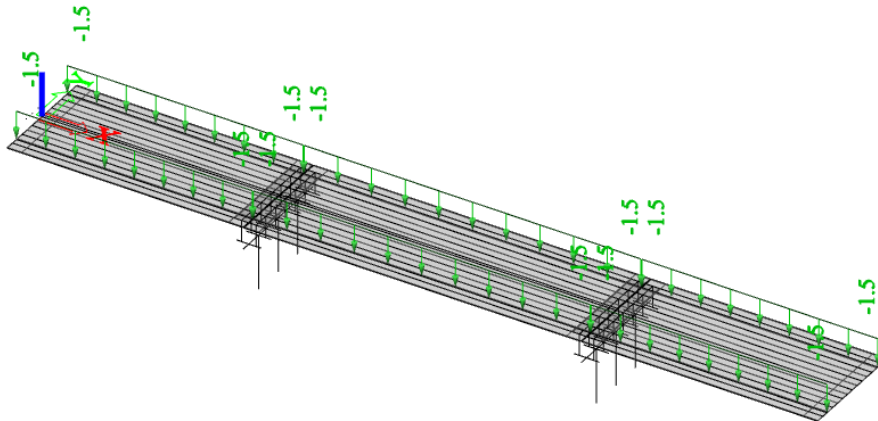
Slika 24. Dodatno stalno djelovanje - pješačka staza (G1)



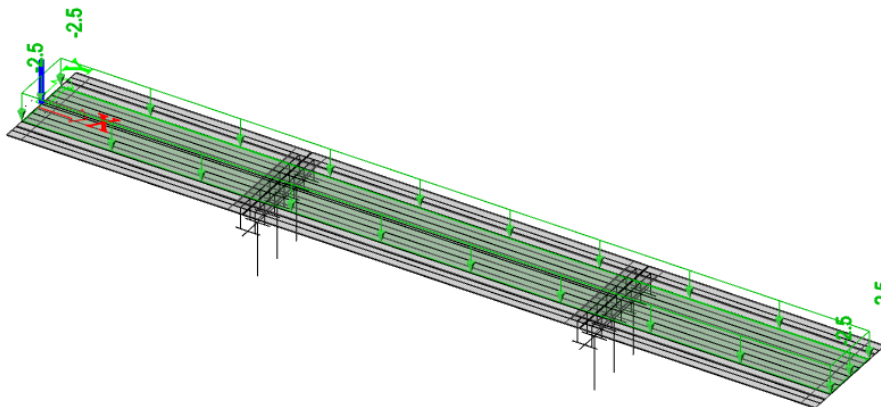
Slika 25. Dodatno stalno djelovanje - vijenac (G2)



Slika 26. Dodatno stalno djelovanje - ograda za pješake (G3)



Slika 27. Dodatno stalno djelovanje - odbojna ograda (G4)



Slika 28. Dodatno stalno djelovanje - asfaltni zastor (G5)

5.1.2.2. Efikasnost probnog opterećenja

Teret je postavljan tako da se učinak probnog opterećenja što je moguće više približi učinku pokretnog opterećenja primijenjenog u statičkom proračunu objekta.

Efikasnost probnog opterećenja se prema HRN U.M1.046:1984 [6] određuje prema izrazu

$$U = V_{\text{stat}} / V_n \quad (2)$$

U navedenom je izrazu:

V_{stat} - maksimalna računaska vrijednost momenta savijanja, poprečnih ili uzdužnih sila od probnog opterećenja

V_n - maksimalna računaska vrijednost momenta savijanja, poprečnih ili uzdužnih sila iz statičkog proračuna objekta od prometnog opterećenja prema Eurocode-u [4]

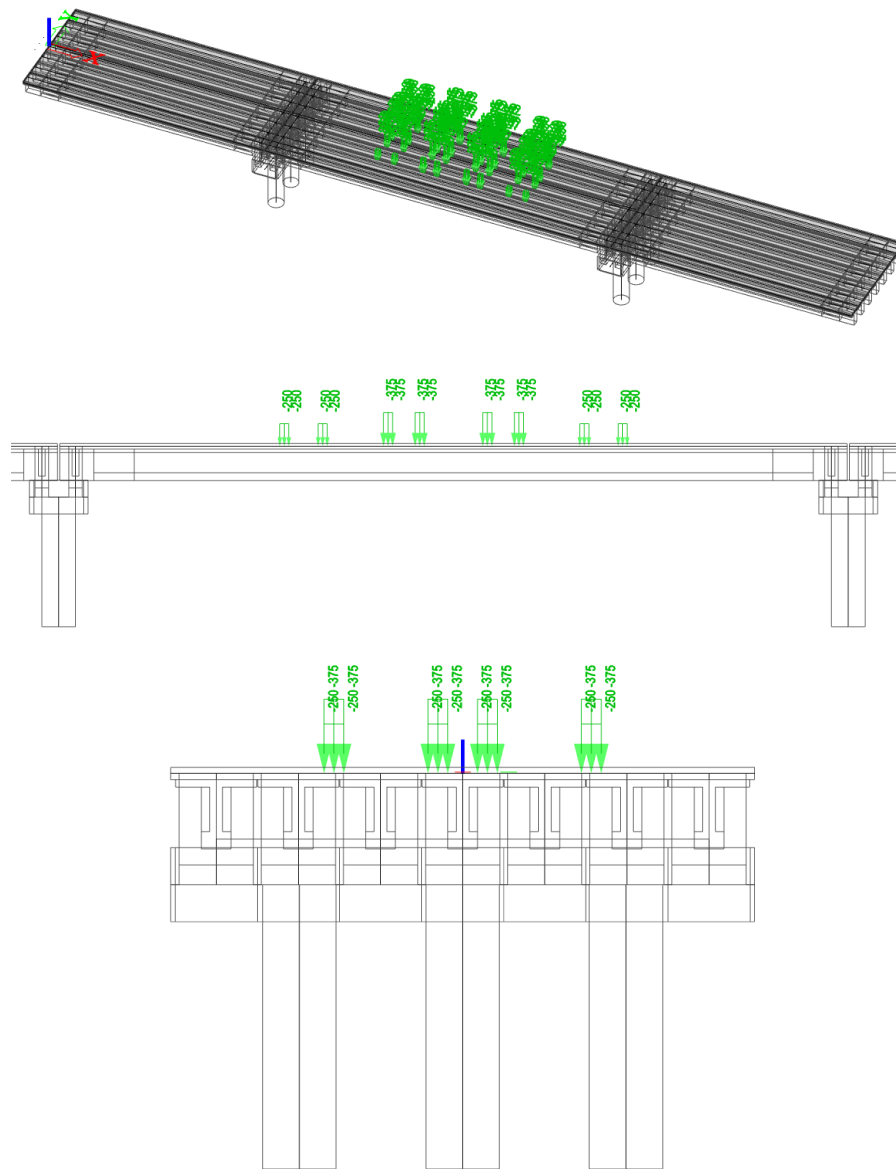
S obzirom da je riječ o normalnom probnom opterećenju potrebno je zadovoljiti uvjet:

$$0,5 \leq U \leq 1,0 \quad (3)$$

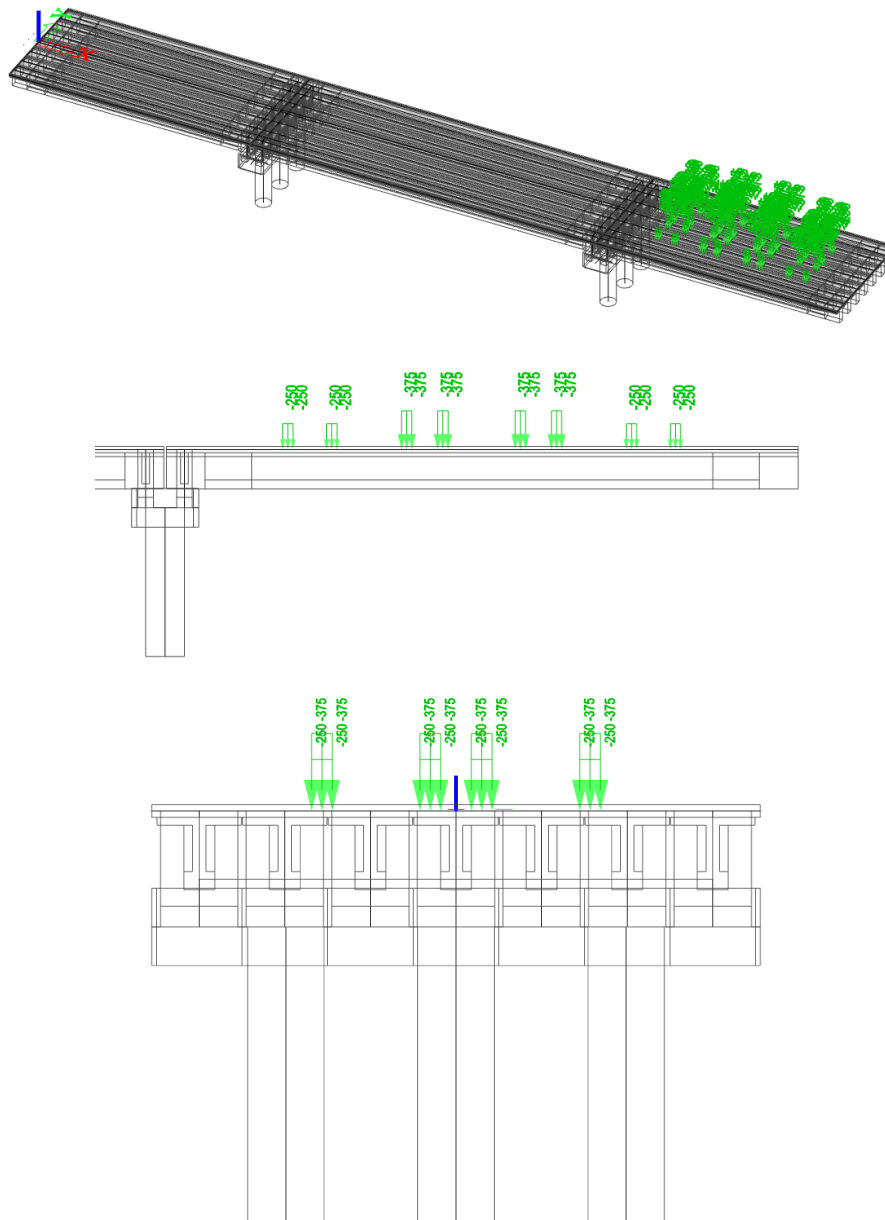
Probno opterećenje predstavlja 4 kamiona s 4 osovine u svakom rasponu. Raspored opterećenja i pripadajući iznosi momenata savijanja u sredinama raspona prikazani su na sljedećim slikama.



Slika 29. Probno opterećenje – 4K R1

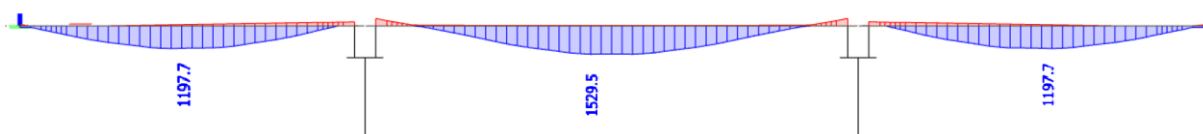


Slika 30. Probno opterećenje - 4K R2



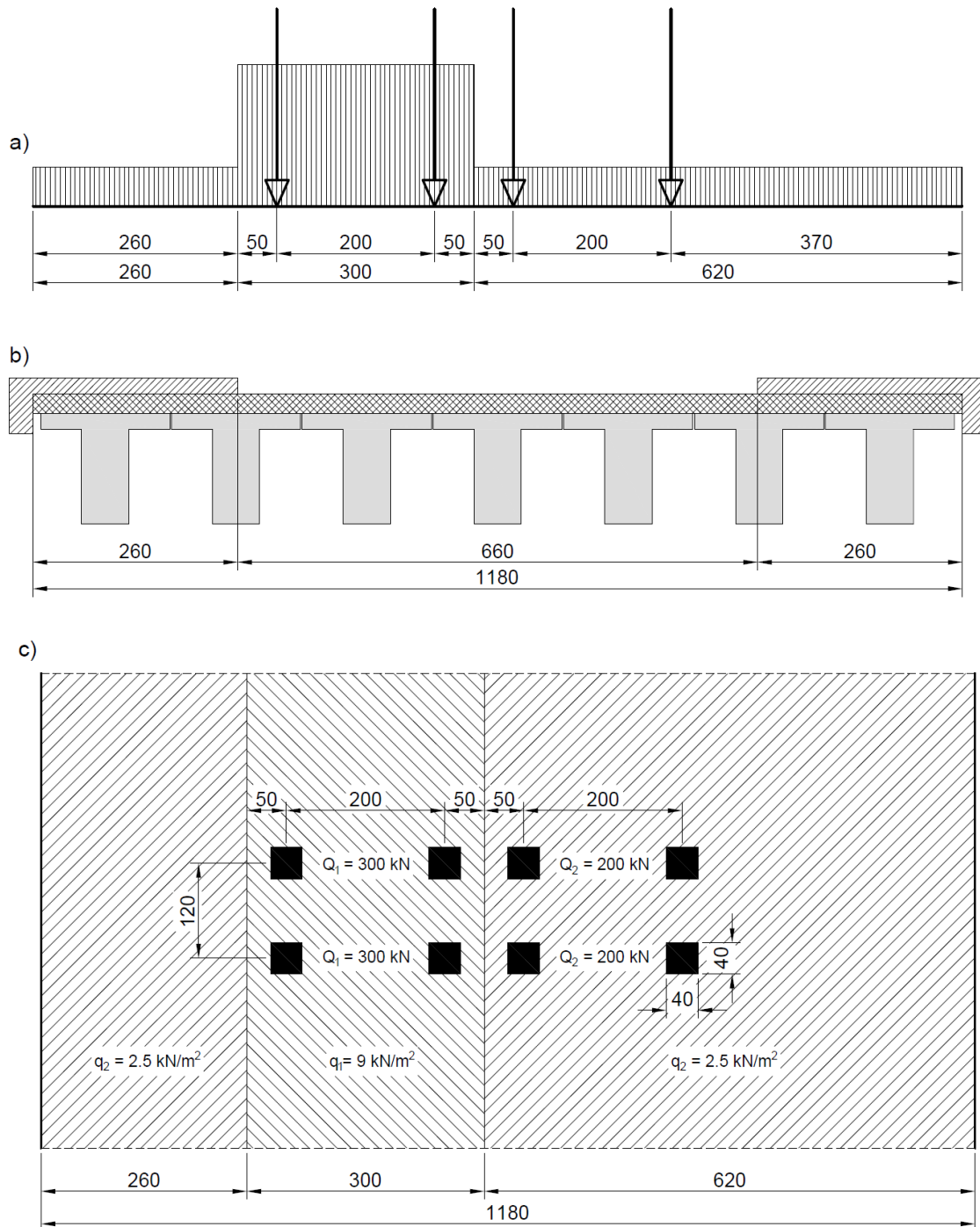
Slika 31. Probno opterećenje - 4K R3

Rezultat proračuna za probno opterećenje (anvelopa momenata savijanja djelovanja 4K R1, 4K R2 i 4K R3) je prikazan na Slici 32.



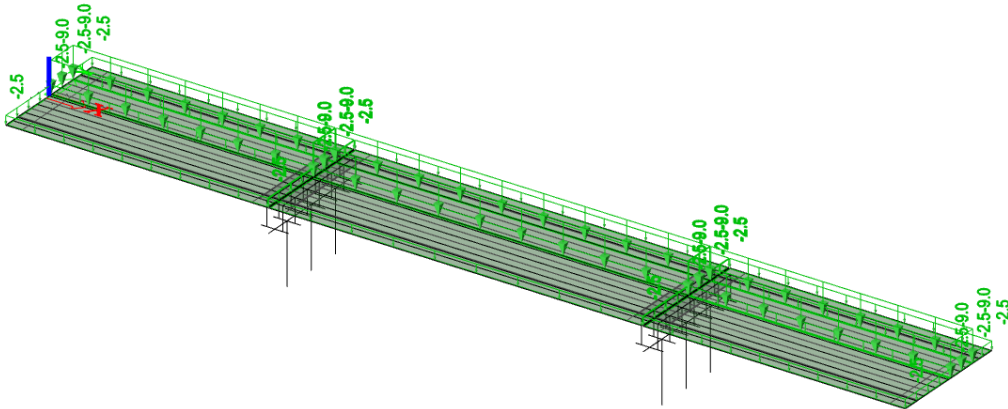
Slika 32. Dijagram momenata savijanja za probno opterećenje (anvelopa momenata savijanja djelovanja 4K R1, 4K R2 i 4K R3)

Opterećenje prema EC-u (Model 1) [4] predstavlja kombinaciju kontinuiranog i koncentriranog opterećenja koja zajedno pokrivaju utjecaj osobnih automobila i teških teretnih vozila. Nakon određivanja broja prometnih traka prema širini kolnika, svaki trak se opterećuje s dva osovinska tereta, dok se preostala površina opterećuje samo kontinuiranim opterećenjem. Vrijednost osovinskog tereta i kontinuiranog opterećenja, koji su raspoređeni u skladu sa šahovskim uzorkom, definirana je Eurokod-om [4], a raspored opterećenja prikazan je na Slici 33.



Slika 33. Rubni uvjeti (ležajevi) na proračunskom modelu [4]

Na Slici 34 i Slici 35 je prikazana raspodjela kontinuiranog i koncentriranog opterećenja prema EC Model 1.

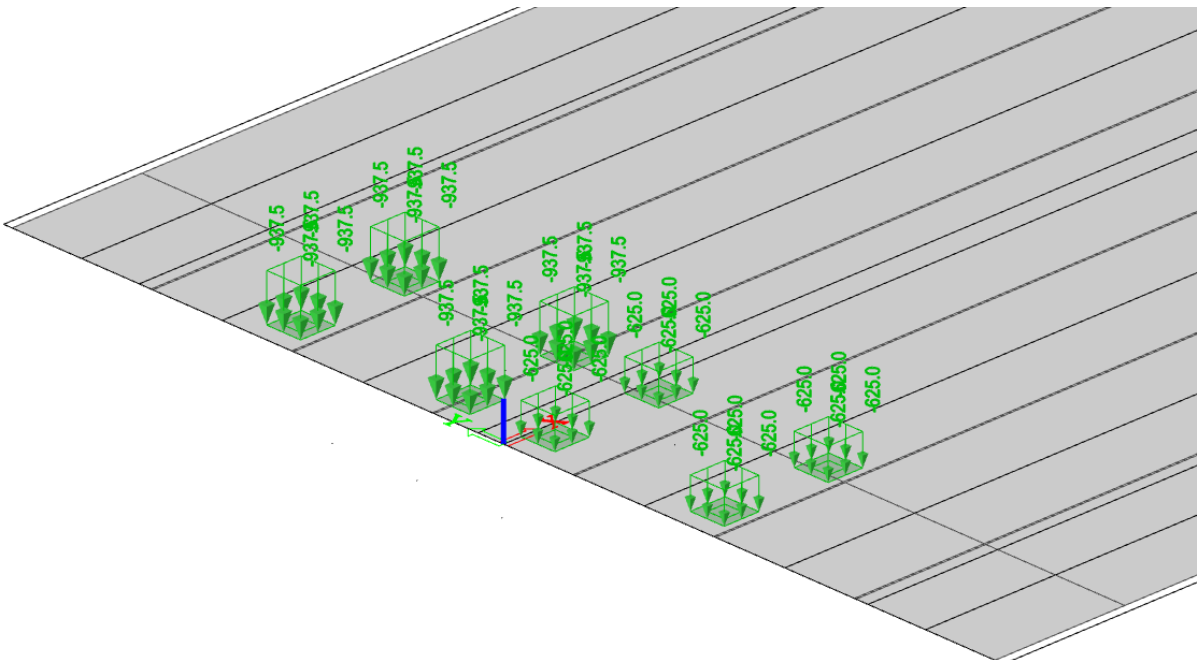


Slika 34. Kontinuirano opterećenje prema EC Model 1 [4]

Koncentrirano zadaje se u intenzitetu aritmetičke sredine ukupne težine vozila izračunate kako je prikazano u Tablici 10.

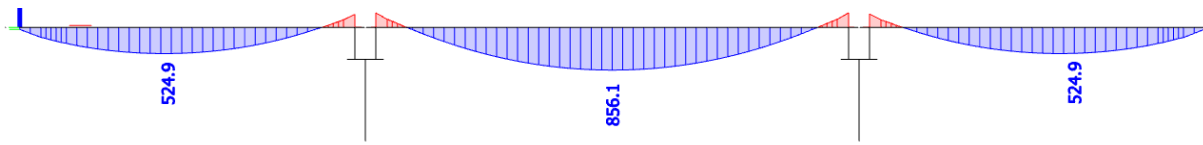
Na ploči proračunskog modela se zadaje kao plošno opterećenje na površini 40 x 40 cm.

U uzdužnom smislu opterećenje je nanoseno s korakom od 1,0 m preko cijelog mosta.

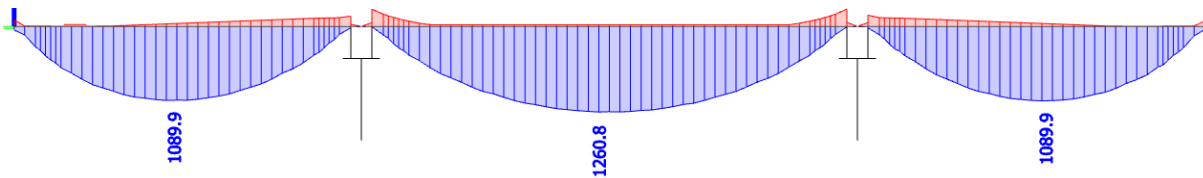


Slika 35. Kontinuirano opterećenje prema EC Model 1 [4]

Dijagrami momenata savijanja od opterećenja EC-Model 1 prikazani su na slikama.



Slika 36. Dijagram momenata savijanja od opterećenja EC-Model 1 (kontinuirano)



Slika 37. Dijagram momenata savijanja od opterećenja EC-Model 1 (koncentrirano)

Efikasnost probnog opterećenja izračunata je u Tablici 10.

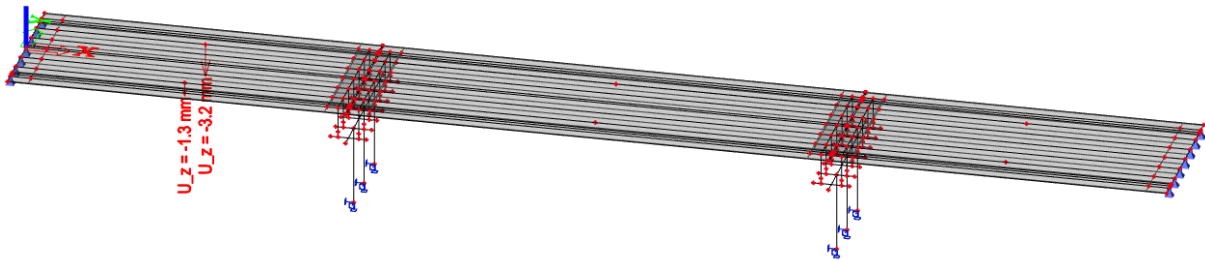
Tablica 10.: Efikasnost probnog opterećenja

Lokacija	Ekstremna vrijednost momenta savijanja [kNm]				U – efikasnost probnog opterećenja [%]
	Probno opterećenje	Proračunsko opterećenje (EC Model 1)			
		Kontinuirano	Koncentrirano	$\Sigma (EC_q + EC_F)$	
Raspon 1	1180,3	524,9	1089,9	1614,8	73,1
Raspon 2	1471,6	856,1	1260,8	2116,9	69,5
Raspon 3	1180,3	524,9	1089,9	1614,8	73,1

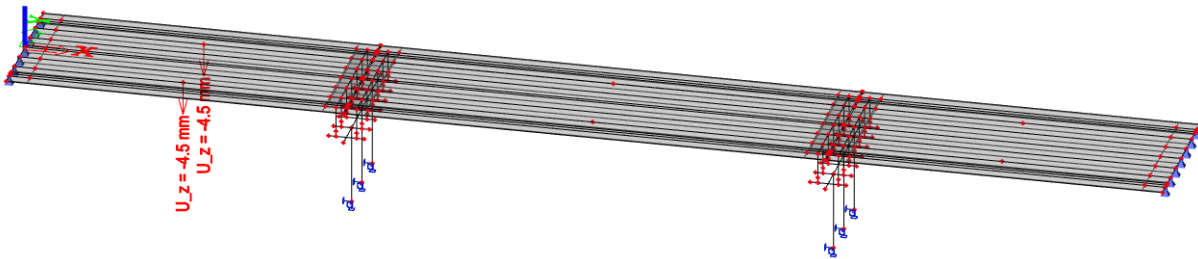
5.2. Statički i dinamički proračun

5.2.1. Statički proračun

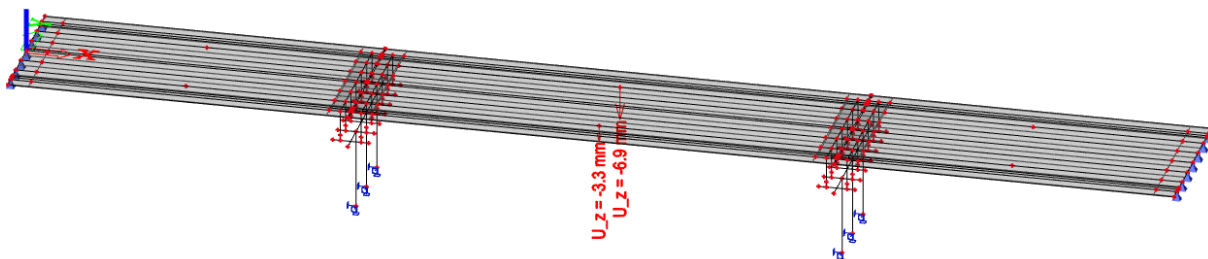
Statički proračun se provodi za opterećenja po fazama. Sukladno Izvešću [2], kao rezultat proračuna prikazuju se proračunski progibi za faze opterećenja 2, 3, 8, 9, 10, 13 i 14, u mjernim točkama, koje su označene na sljedećim slikama.



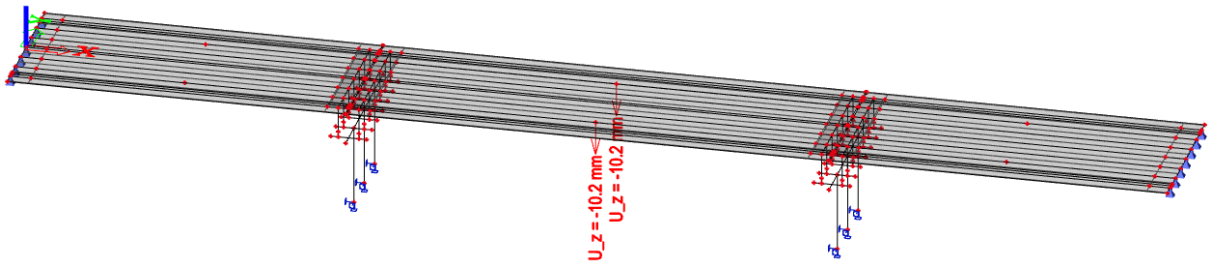
Slika 38. Progibi u mjernim točkama 2A i 2B - faza opterećenja 2 (2k u 2A)



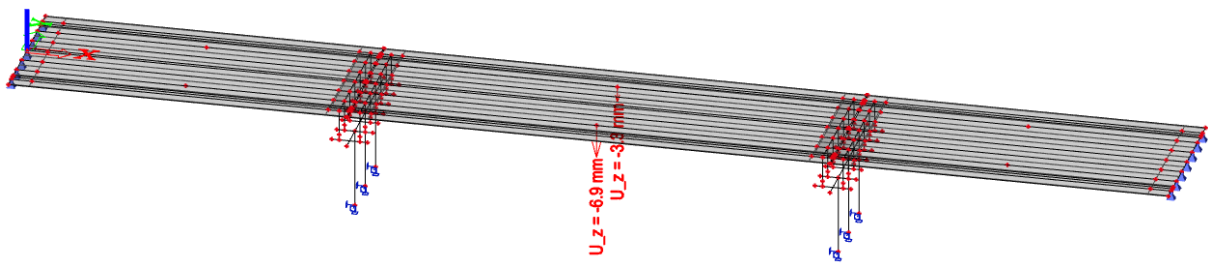
Slika 39. Progibi u mjernim točkama 2A i 2B - faza opterećenja 3 (4k u 2)



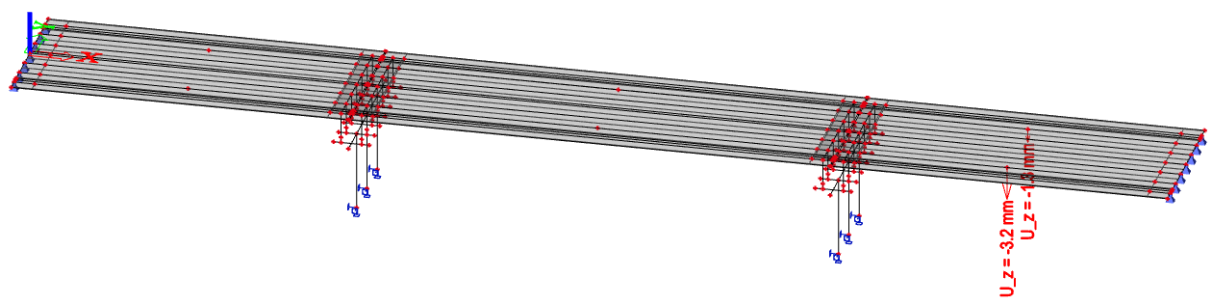
Slika 40. Progibi u mjernim točkama 4A i 4B - faza opterećenja 8 (2k u 4A)



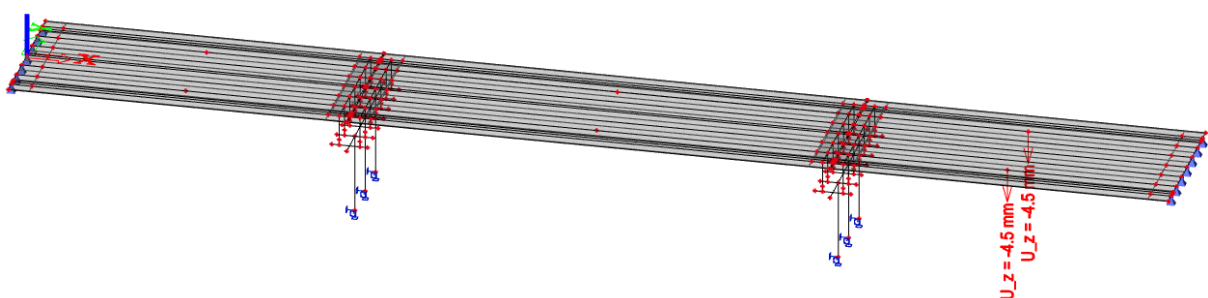
Slika 41. Progibi u mjernim točkama 4A i 4B - faza opterećenja 9 (4k u 4)



Slika 42. Progibi u mjernim točkama 4A i 4B - faza opterećenja 10 (2k u 4B)



Slika 43. Progibi u mjernim točkama 6A i 6B - faza opterećenja 13 (2k u 6B)



Slika 44. Progibi u mjernim točkama 6A i 6B - faza opterećenja 14 (4K u 6)

5.2.2. Dinamički proračun

U dinamičkoj analizi dobiveni su vlastiti oblici osciliranja i frekvencije titranja za zadane mase na proračunskom modelu kako slijedi:

masa **M0** - vlastita težina konstrukcije

masa **M1** - reviziona staza: $0,19 \cdot 25,0 = 4,75 \text{ kN/m}^2$ (484,2 kg/m²)

$m_1 = 484,2 \cdot 2,6 = 12,35 \text{ kN/m}$ 1259 kg/m

masa **M2** - vijenac: $0,7 \cdot 0,3 \cdot 25,0 = 5,25 \text{ kN/m}$ 535,2 kg/m

masa **M3** – ograda za pješake: 0,8 kN/m 81,5 kg/m

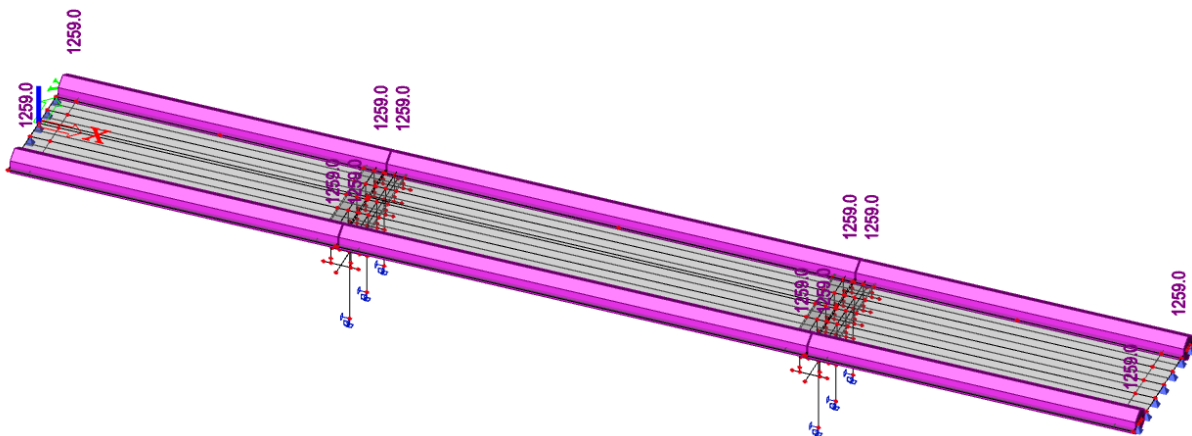
masa **M4** - odbojna ograda: 1,50 kN/m 152,9 kg/m²

masa **M5** - asfaltni zastor i hidroizolacija: $0,09 \cdot 25,0 + 0,50 = 2,75 \text{ kN/m}^2$ (280,3 kg/m²)

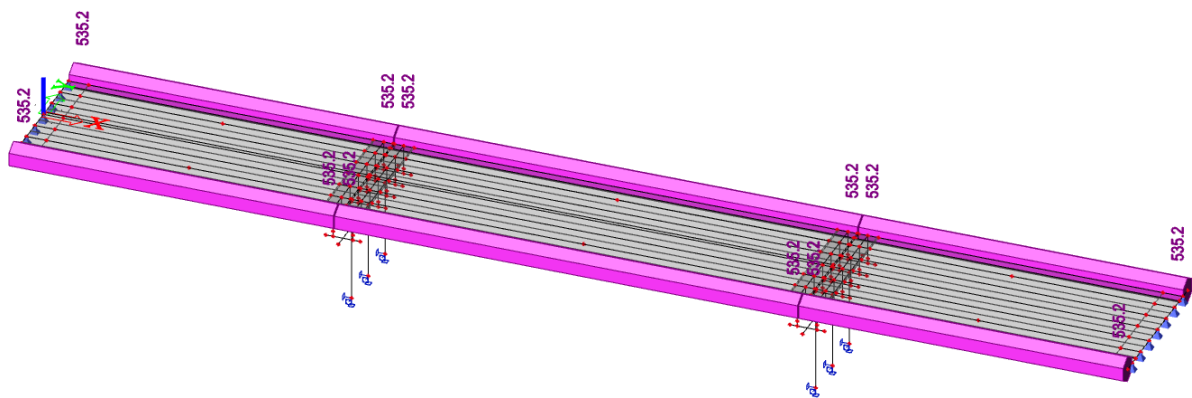
svedeno na širinu rasponske ploče proračunskog modela:

$m_1 = 280,3 \cdot 6,6 / 11,8 =$ 156,8 kg/m²

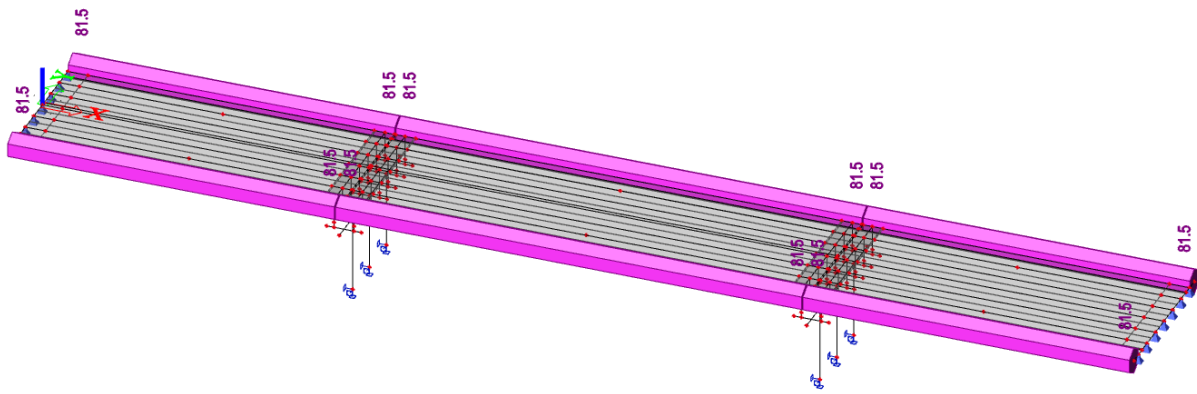
Kombinacija masa za dinamičku analizu glasi: $M_{uk} = 1,0 \cdot (M_0 + M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5)$



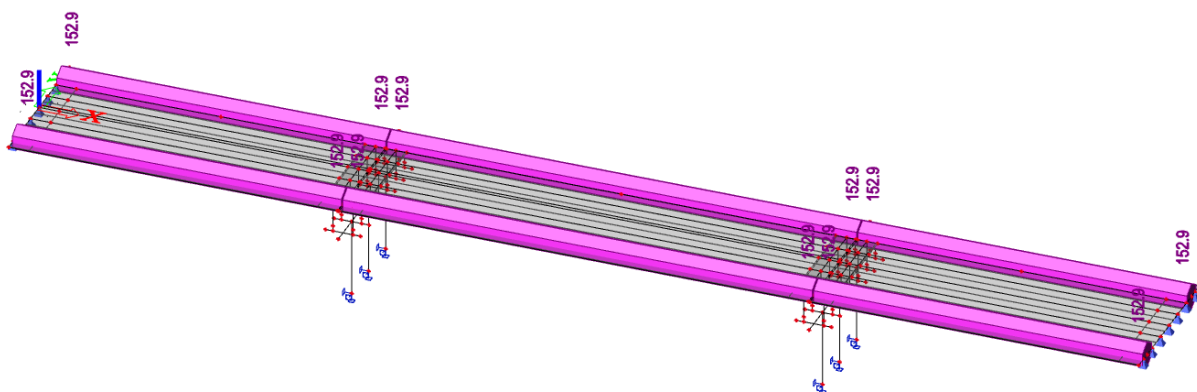
Slika 45. Plošne mase za osnovno djelovanje G1 (pješačka staza)



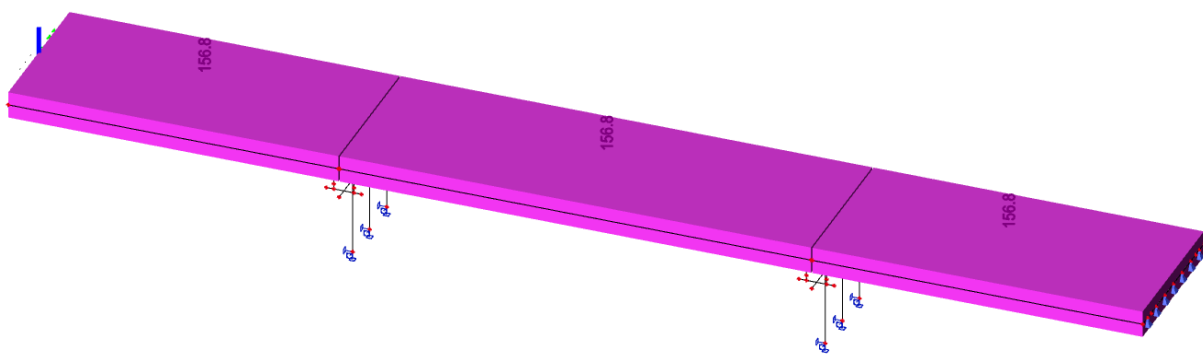
Slika 46. Plošne mase za osnovno djelovanje G2 (vijenac)



Slika 47. Plošne mase za osnovno djelovanje G3 (ograda za pješake)

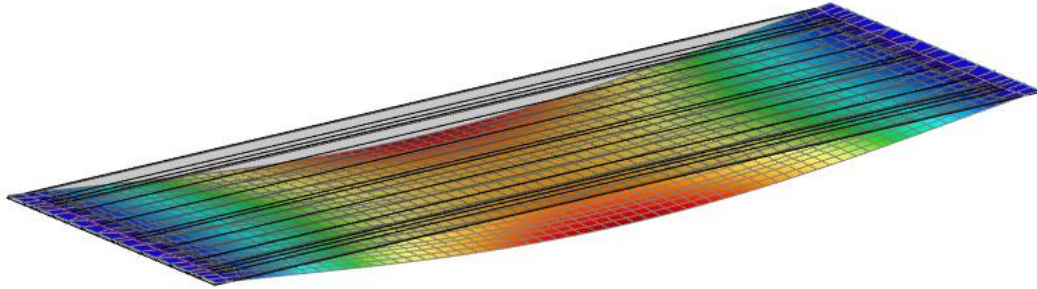


Slika 48. Plošne mase za osnovno djelovanje G4 (odbojna ograda)

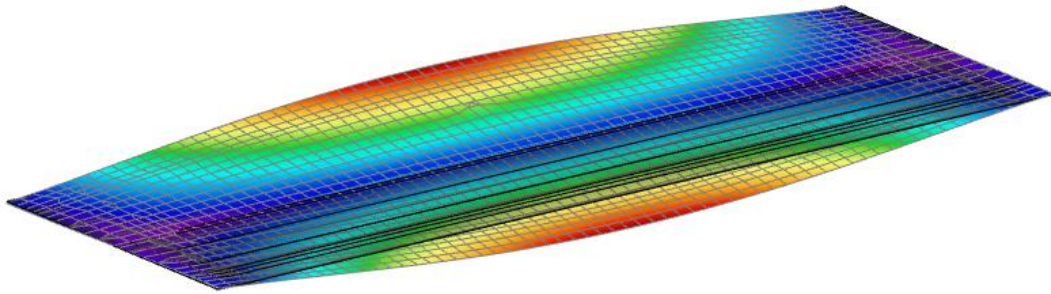


Slika 49. Plošne mase za osnovno djelovanje G5 (asfaltni zastor i hidroizolacija)

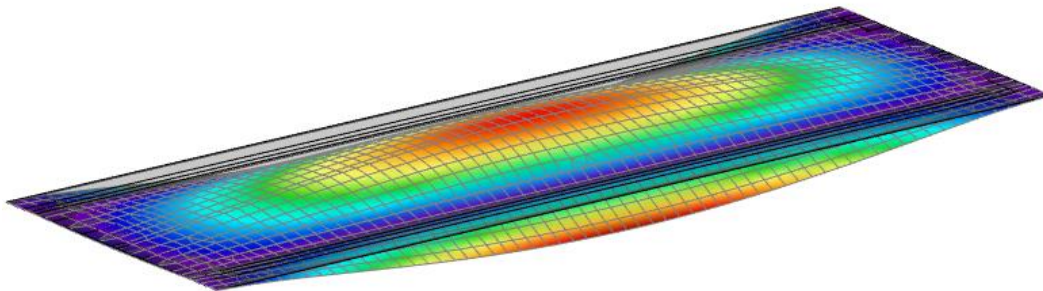
Dobiveni su vlastiti oblici osciliranja i frekvencije titranja kako je prikazano na sljedećim slikama.



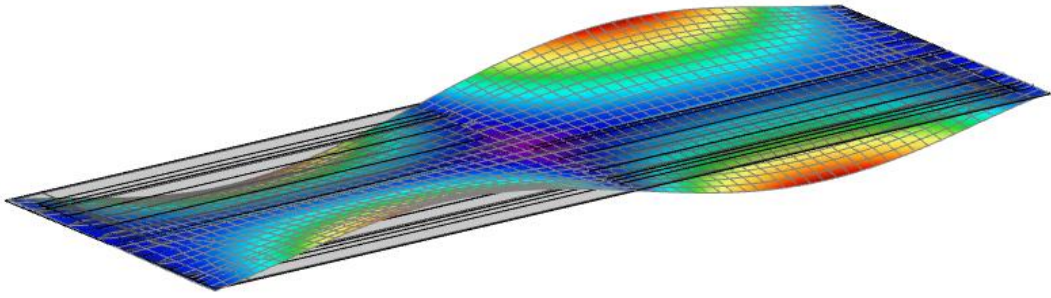
Slika 50. Vlastiti oblik osciliranja, $f = 2,80$ Hz



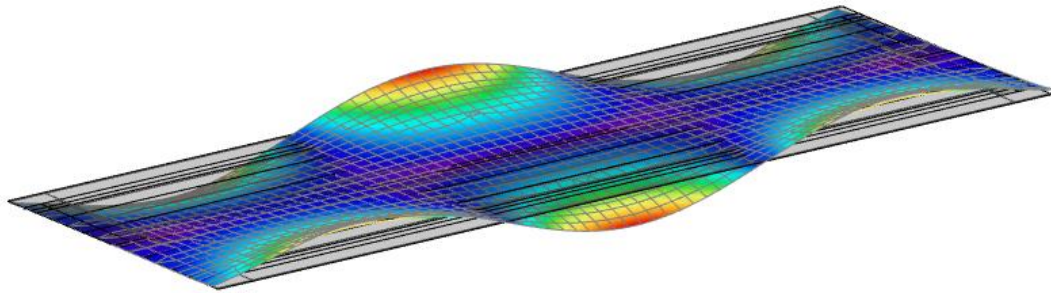
Slika 51. Vlastiti oblik osciliranja, $f = 3,16$ Hz



Slika 52. Vlastiti oblik osciliranja, $f = 6,22$ Hz



Slika 53. Vlastiti oblik osciliranja, $f = 9,46$ Hz



Slika 54. Vlastiti oblik osciliranja, $f = 18,02$ Hz

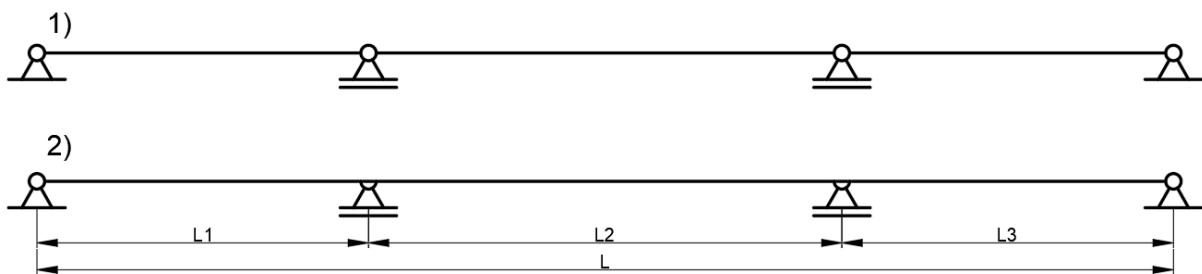
6. ANALIZA UTJECAJA RAZLIČITIH RUBNIH UVJETA

U ovom radu se analizira utjecaj rubnih uvjeta na ponašanje glavne rasponske konstrukcije. Pri tome se odabiru različiti statički sustavi i zadaju različiti načini oslanjanja glavne rasponske konstrukcije na naglavne grede.

Za ovu analizu se biraju sljedeći statički sustavi:

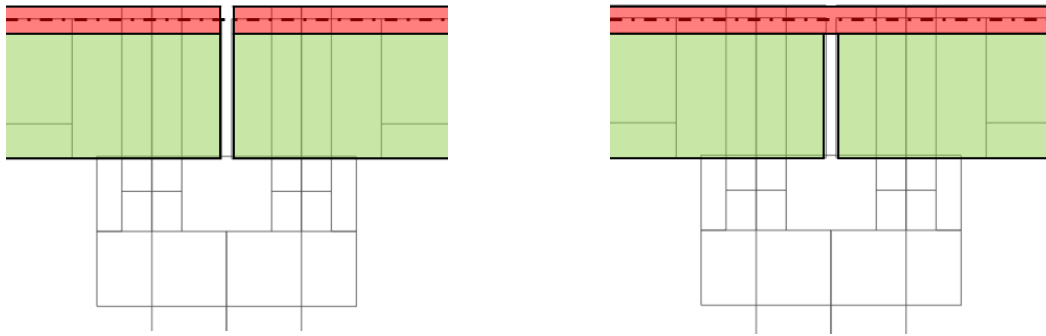
- (1) Niz prostih greda (tri proste grede slobodno oslonjene na naglavnu gredu)
- (2) Kontinuirani nosač preko tri polja (kontinuitet ostvaren kolničkom pločom)

kako je prikazano na sljedećim slikama.



Slika 55. Statička shema prostih greda i kontinuiranog nosača preko tri polja: 1) niz prostih greda;
2) kontinuirani nosač

U slučaju kada je statički sustav niz prostih greda, kolničke ploče i glavne grede nisu povezane među poljima. U slučaju kada je statički sustav „kontinuirani nosač“, kolnička ploča ima kontinuitet preko oslonaca dok glavne grede nisu povezane, što je shematski prikazano na Slici 56.



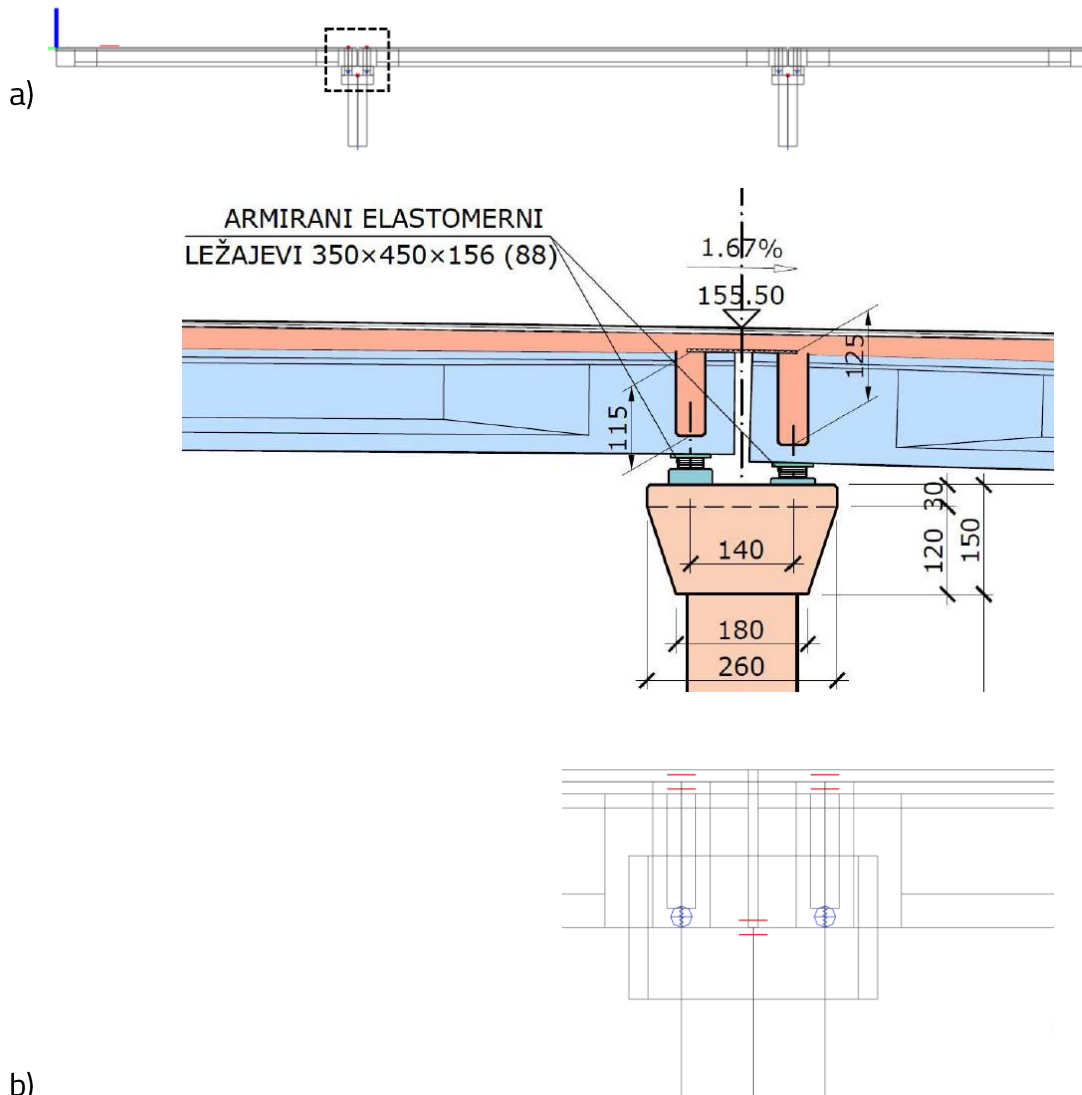
Slika 56. Shematski prikaz kontinuiteta glavnih rasponskih nosača: a) bez kontinuiteta -sustav niza prostih greda; b) kontinuitet na mjestu kolničke ploče - kontinuirani nosač

Različiti načini oslanjanja glavnih rasponskih nosača, daju različite veličine progiba nosača u polju, a zbog spriječenog ili slobodnog horizontalnog pomaka na mjestu oslanjanja nosača na naglavnu gredu.

Prema načinu oslanjanja glavnih rasponskih nosača na naglavnu gredu analizirani su sljedeći slučajevi:

- (1) Oslanjanje glavnog rasponskog nosača na naglavnu gredu preko idealnih oslonaca
- (2) Oslanjanje glavnog rasponskog nosača na naglavnu gredu preko simuliranih elastomernih ležajeva

Slučaj (1) ostvaren je preko nepomičnog ležaja u kojem su zaokreti oslobođeni i pomaci spriječeni, a slučaj (2) modeliranjem opruge s odgovarajućom vertikalnom i horizontalnom krutosti.



Slika 57. Detalj oslanjanja rasponske konstrukcije na naglavnu gredu: a) oznaka detalja; b) shema detalja

Elastomerni ležajevi modeliraju se u proračunskom modelu pomoću opruga odgovarajućih krutosti.

Vertikalna krutost dobivena je preko sljedećih izraza [10]:

$$k_v = \frac{E_c \cdot A'}{\sum t_i}$$

gdje je:

E_c - modul pritiska za materijal uz promjenu volumena

A' - efektivna površina ležaja (površina čeličnih ploča)

t_i – debljina i-tog elastomernog sloja

Modul pritiska za materijal uz promjenu volumena dobiva se iz izraza:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{5 \cdot G \cdot S^2} + \frac{1}{E_b}$$

gdje je:

S - faktor oblika za efektivnu površinu elastomera

Modul posmika $G = 1 \text{ MPa}$

Modul kompresije $E_b = 2000 \text{ MPa}$

Za armirane elastomerne ležajeve faktor oblika S za svaki pojedini sloj elastomera glasi

$$S = \frac{a' \cdot b'}{2 \cdot (a' + b') \cdot t_e}$$

a' - efektivna širina ležaja

b' - efektivna duljina ležaja

t_e - efektivna debljina pojedinog elastomernog sloja prilikom stlačivanja (za armirane elastomerne ležajeve vrijedi $t_e = t_i$)

Horizontalna krutost dobiva se iz izraza [10]:

$$k_p = \frac{G \cdot A}{T_q}$$

gdje je:

A - ukupna površina ležaja

T_q - ukupna debljina elastomera u posmiku uključujući gornji i donji pokrovni sloj ($T_q = 8$

Uvrštavanjem vrijednosti dimenzija elastomernog ležaja [mm]

350 x 450 x 156

$t_i = 11 \text{ mm}$

$T_q = 8 \cdot t_i$

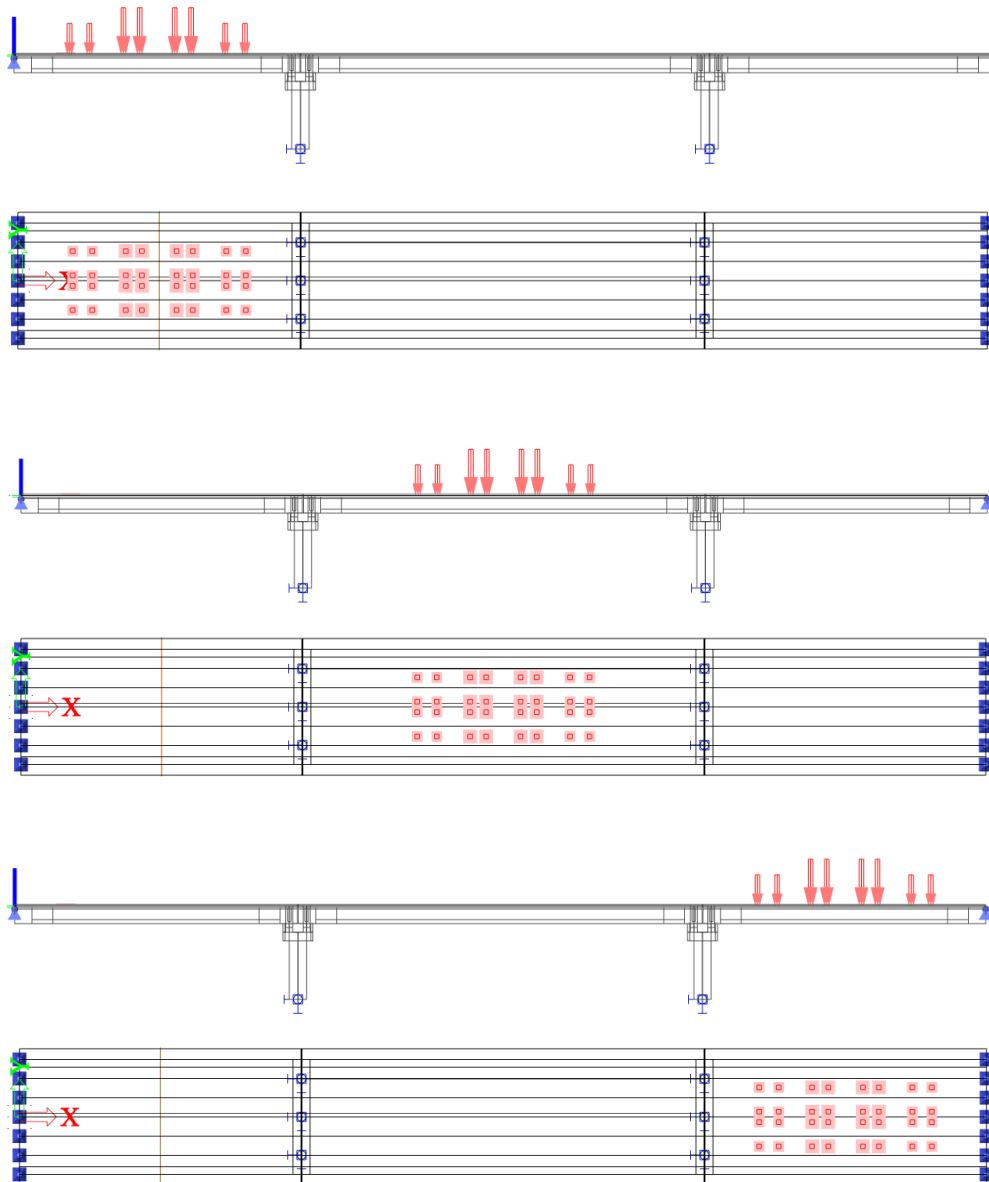
u gore navedene izraze, dobiju se iznosi vertikalne i horizontalne krutosti elastomernog ležaja.

$k_v = 543 \text{ 150 N/mm}$

$k_p = 1789 \text{ N/mm}$

Elastomerni ležajevi modeliraju se kao opruge s gore izračunatom vertikalnom i horizontalnom krutosti.

Za prethodno odabrane različite statičke sustave te različite načine oslanjanja glavne rasponske konstrukcije na naglavne grede proveden je proračun progiba za opterećenje od četiri kamiona u svakom polju, kako je prikazano na Slici 58.



Slika 58. Shema opterećenja četiri kamiona po poljima

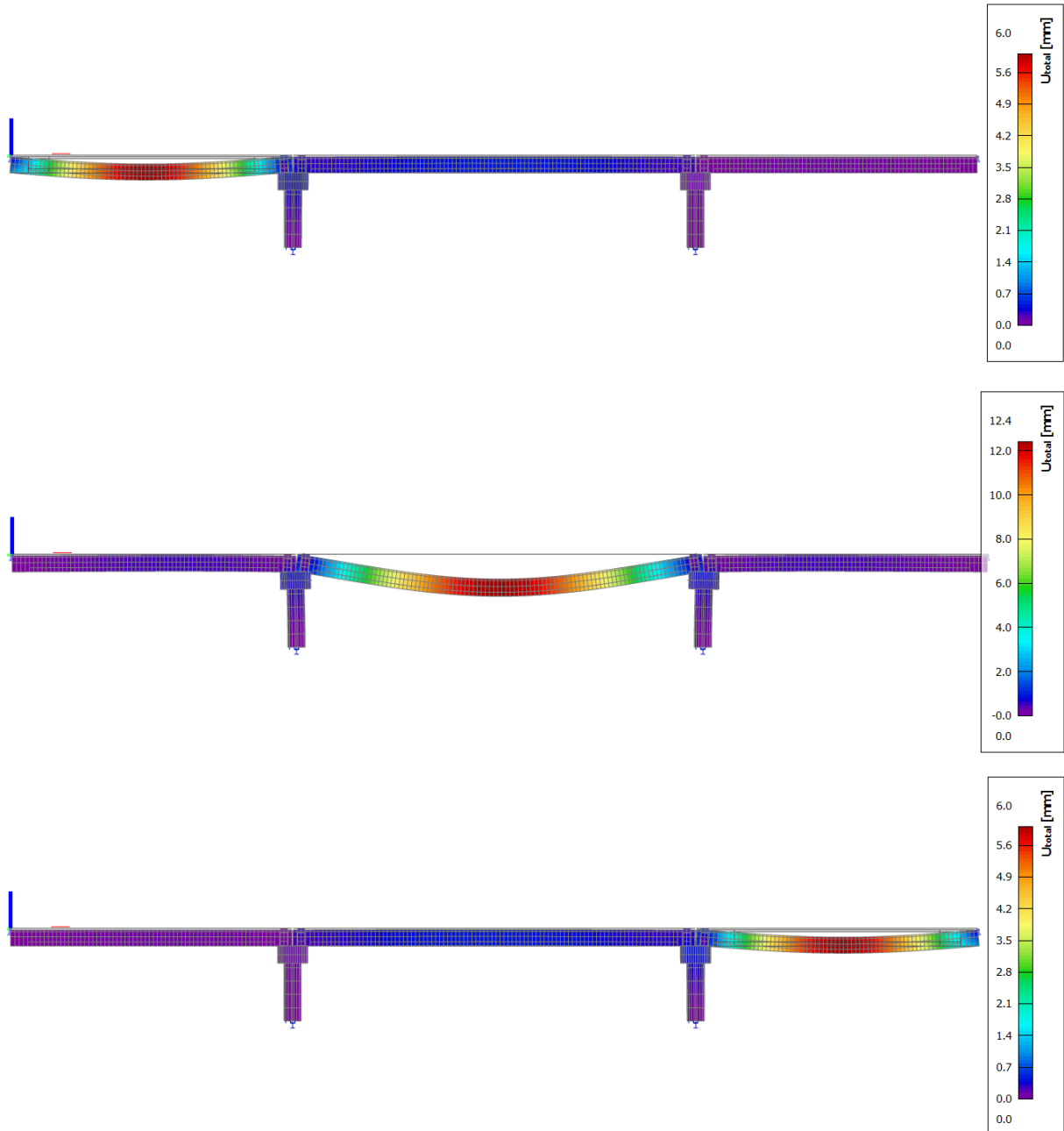
Na sljedećim slikama prikazane su deformacije glavnih rasponskih nosača i najveći progibi za različite statičke sheme i slučajeve oslanjanja, odnosno za različite rubne uvjete:

slučaj 1: niz od tri proste grede na krutim ležajevima

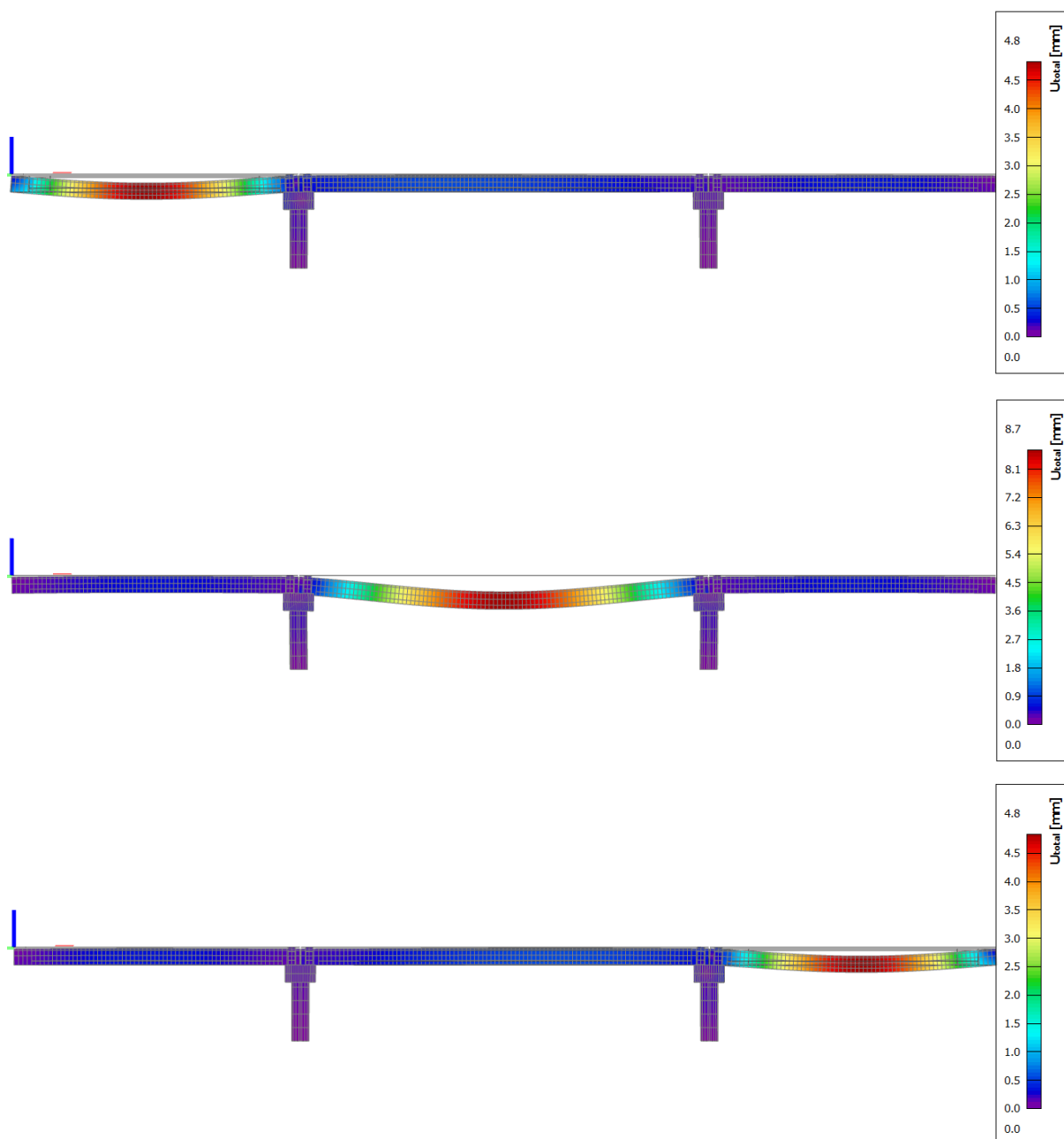
slučaj 2: kontinuirani nosač na krutim ležajevima

slučaj 3: niz od tri proste grede na elastomernim ležajevima

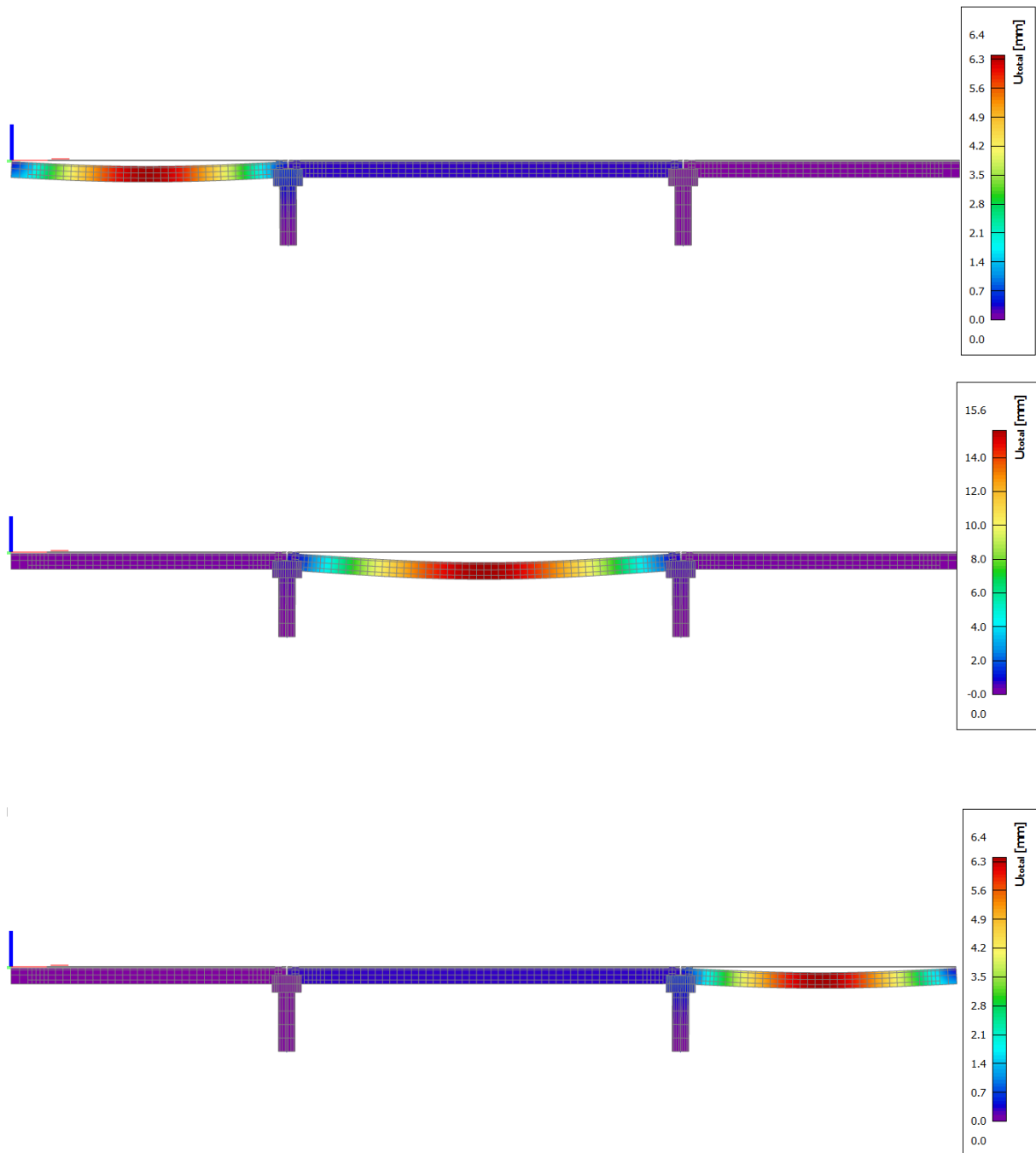
slučaj 4: kontinuirani nosač na elastomernim ležajevima



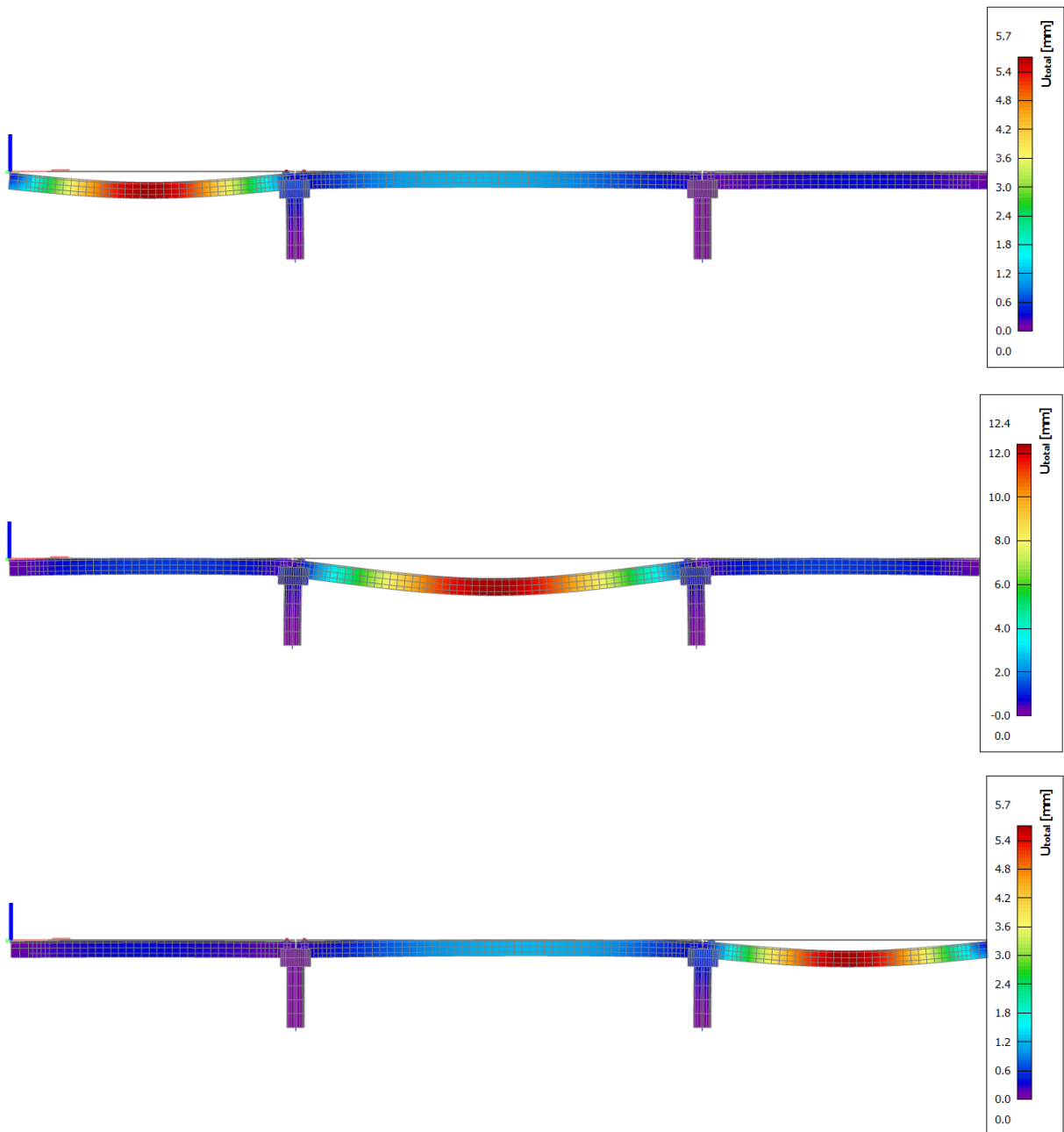
Slika 59. Pomaci glavnih rasponskih nosača i najveći progibi za slučaj 1: niz od tri proste grede na krutim ležajevima



Slika 60. Pomaci glavnih rasponskih nosača i najveći progibi za slučaj 2: kontinuirani nosač na krutim ležajevima



Slika 61. Pomaci glavnih rasponskih nosača i najveći progibi za slučaj 3: niz od tri proste grede na elastomernim ležajevima



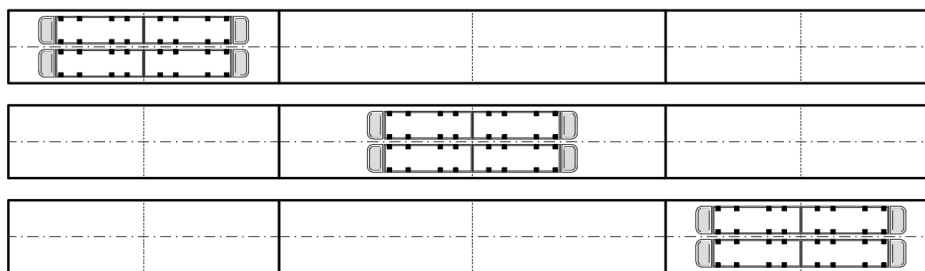
Slika 62. Pomaci glavnih rasponskih nosača i najveći progibi za slučaj 4: kontinuirani nosač na elastomernim ležajevima

7. USPOREDBA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA S NUMERIČKOM ANALIZOM

7.1. Usporedba rezultata statičkog ispitivanja

U ovom poglavlju prikazuje se usporedba rezultata statičkog ispitivanja dobivenih eksperimentalno (djelovanjem probnog opterećenja) i rezultata dobivenih numeričkom analizom.

Na predmetnom nadvožnjaku provedeno je mjerenje progiba uslijed probnog opterećenja kamionima, raspoređenih po poljima nadvožnjaka kako je prikazano na Slici 63. Položaj kamiona (opterećenih površina) i veličine opterećenja su navedene u poglavlju 4.



Slika 63. Raspored probnog opterećenja (kamiona) po poljima nadvožnjaka [2]

U ovom radu je provedena je numerička analiza, odnosno proračun deformacija i progiba konstrukcije za probno opterećenje (kamioni) po poljima nadvožnjaka prema Slici 63, a za različite rubne uvjete – kako je opisano u poglavlju 6.

Dobiveni rezultati statičkog ispitivanja prikazani su u Tablici 11.

Tablica 11.: Progibi [mm] na mjernim mjestima u poljima nadvožnjaka pri eksperimentalnom ispitivanju (probno opterećenje) i numeričkoj analizi

Polje (raspon) / mjerno mjesto		Progibi [mm] iz eksperimentalnog ispitivanja (probno opterećenje)	Progibi iz numeričke analize [mm] ¹⁾			
			slučaj 1: niz od tri proste grede na krutim ležajevima	slučaj 2: kontinuirani nosač na krutim ležajevima	slučaj 3 ²⁾ : niz od tri proste grede na elastomernim ležajevima	slučaj 4 ²⁾ : kontinuirani nosač na elastomernim ležajevima
L1	2A	3,7	4,5	3,3	4,8-0,2 =	4,1-0,2 =
	2B	3,6			4,6	3,9
L2	4A	8,6	10,2	6,6	13,3-0,4 =	10,2-0,5 =
	4B	9,0			12,9	9,7
L3	6A	3,5	4,5	3,3	4,8-0,2 =	4,1-0,2 =
	6B	3,6			4,6	3,9

Napomena:

- 1) U numeričkom modelu su očekivano dobivene jednake veličine pomaka u čvorovima na mjestu mjernih mjesta obzirom da je za opterećenje uzeta srednja vrijednost težine kamiona te da je poprečni presjek simetričan. Iz tog razloga je navedena jedna vrijednost progiba za svaki raspon.
- 2) Od vertikalnih pomaka dobivenih na mjernim mjestima oduzeta je srednja vrijednost vertikalnih pomaka nad osloncima

Odstupanja numeričkih rezultata od eksperimentalnih, izražena u postocima [%], prikazana su u Tablici 12.

Tablica 12.: Odstupanja progiba dobivenih numeričkom analizom od eksperimentalnih

Polje (raspon) / mjerno mjesto		Progibi [mm] iz eksperimentalnog ispitivanja (probno opterećenje)	Odstupanja progiba dobivenih numeričkom analizom [%]			
			slučaj 1: niz od tri proste grede na krutim ležajevima	slučaj 2: kontinuirani nosač na krutim ležajevima	slučaj 3: niz od tri proste grede na elastomernim ležajevima	slučaj 4: kontinuirani nosač na elastomernim ležajevima
L1	2A	3,7	+21,6	-10,8	+24,3	+5,4
	2B	3,6	+25,0	-8,3	+27,8	+8,3
L2	4A	8,6	+18,6	-23,24	+50,0	+12,8
	4B	9,0	+13,3	-26,7	+43,3	+7,8
L3	6A	3,5	+28,6	-5,7	+31,4	+11,0
	6B	3,6	+25,0	-8,3	+27,8	+8,3

7.2. Usporedba rezultata dinamičkog ispitivanja

U ovom poglavlju prikazuje se usporedba rezultata dinamičkog ispitivanja dobivenih eksperimentalno i rezultata dobivenih numeričkom analizom.

Na predmetnom nadvožnjaku eksperimentalno su utvrđeni vlastiti oblici titranja konstrukcije.

Također, provedena je numerička dinamička analiza te su dobiveni i numerički vlastiti oblici titranja konstrukcije.

Usporedba vlastitih frekvencija dobivenih eksperimentalno i numerički prikazana je na Tablici 13.

Tablica 13.: Vlastite frekvencije [Hz] pri eksperimentalnom ispitivanju i numeričkoj analizi

	Frekvencije osciliranja vlastitih oblika u eksperimentalnom ispitivanju f [Hz]	Frekvencije osciliranja vlastitih oblika iz numeričke analize f [Hz]			
		slučaj 1: niz od tri proste grede na krutim ležajevima	slučaj 2: kontinuirani nosač na krutim ležajevima	slučaj 3: niz od tri proste grede na elastomernim ležajevima	slučaj 4: kontinuirani nosač na elastomernim ležajevima
Vlastita frekvencija	3,31	2,80	3,49	2,45	2,76
	4,25	3,16	3,85	2,96	3,28
	9,13	6,22	8,49	5,75	5,26
	11,69	9,46	10,51	9,06	8,93
	23,50	18,02	18,76	16,75	17,30

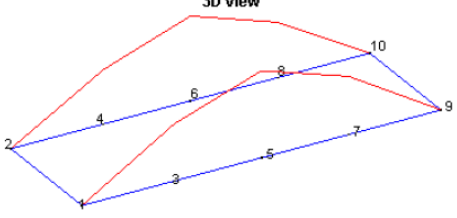
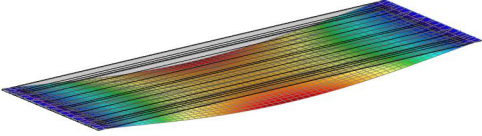
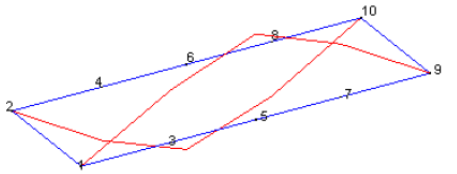
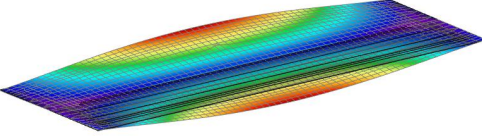
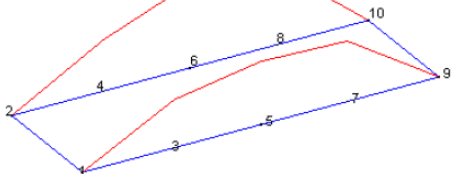
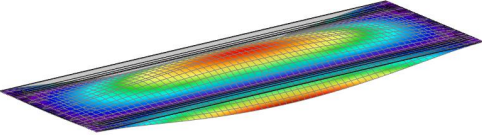
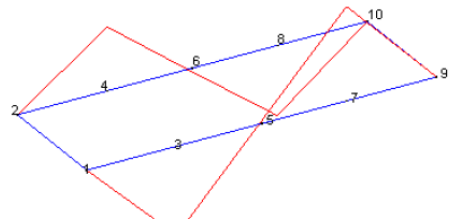
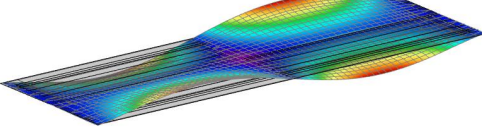
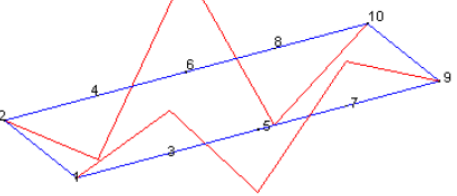
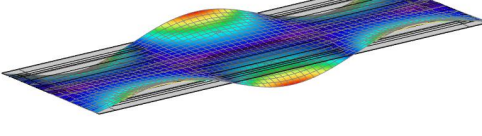
Odstupanja numeričkih rezultata od eksperimentalnih, izražena u postocima [%], prikazana su u Tablici 14.

Tablica 14.: Odstupanja vlastitih frekvencija dobivenih numeričkom analizom od eksperimentalnih

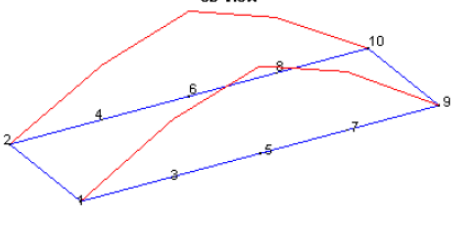
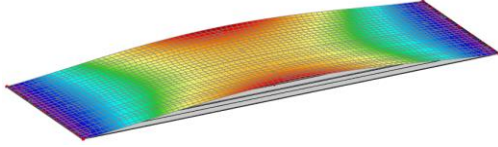
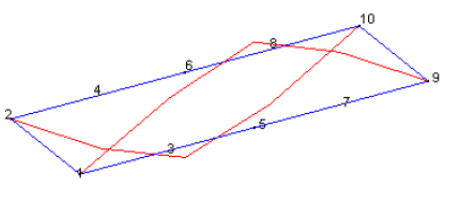
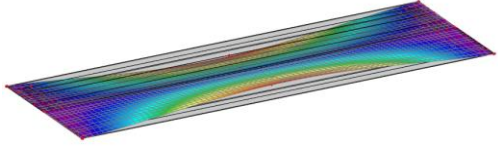
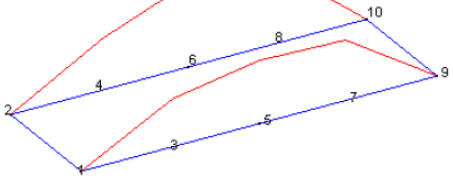
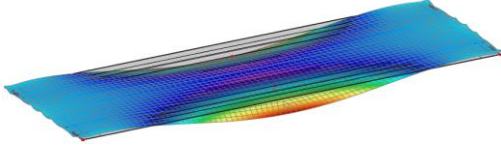
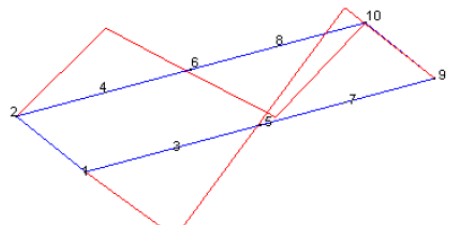
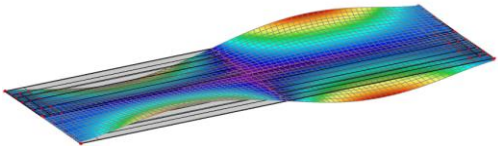
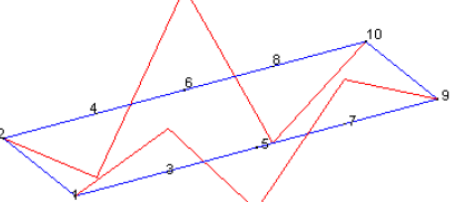
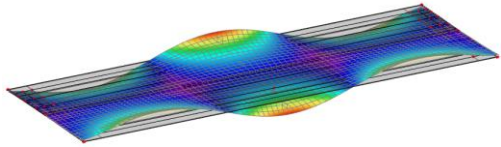
	Frekvencije osciliranja vlastitih oblika u eksperimentalnom ispitivanju f [Hz]	Odstupanje frekvencije osciliranja vlastitih oblika iz numeričke analize [%]			
		slučaj 1: niz od tri proste grede na krutim ležajevima	slučaj 2: kontinuirani nosač na krutim ležajevima	slučaj 3: niz od tri proste grede na elastomernim ležajevima	slučaj 4: kontinuirani nosač na elastomernim ležajevima
Vlastita frekvencija	3,31	-15,4	+5,4	-26,0	-16,6
	4,25	-25,6	-9,4	-30,3	-22,8
	9,13	-31,9	-7,0	-37,0	-42,4
	11,69	-19,1	-12,5	-22,5	-23,6
	23,50	-23,3	-10,1	-28,7	-26,4

Usporedba vlastitih oblika titranja dobivenih eksperimentalno i numerički prikazana je na sljedećim tablicama.

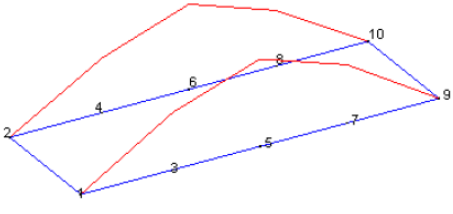
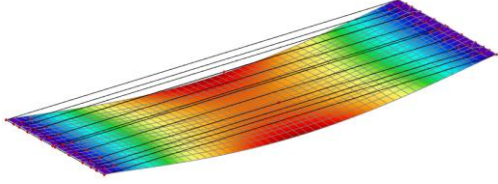
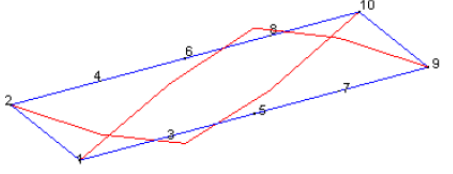
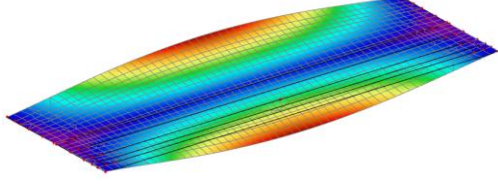
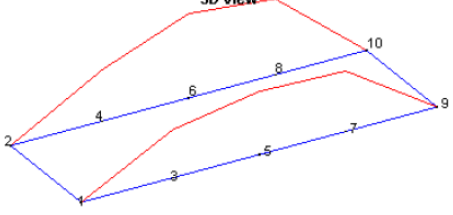
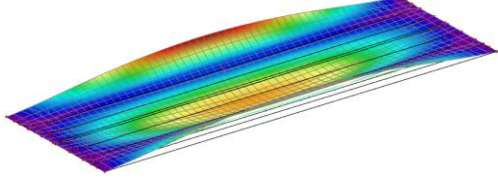
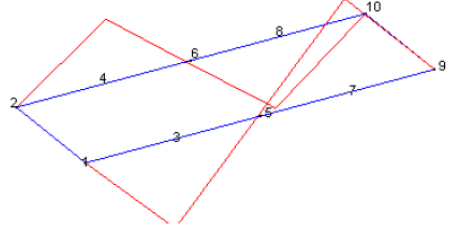
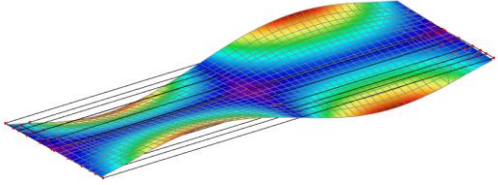
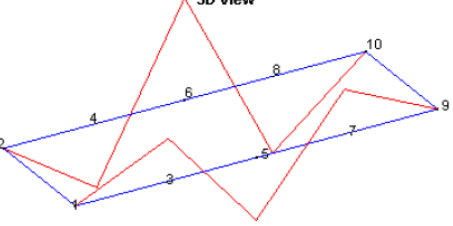
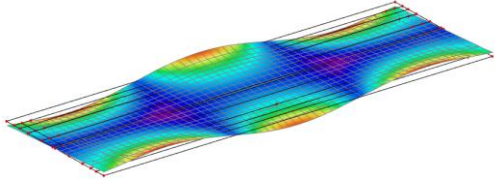
Tablica 15.: Vlastiti oblici titranja: slučaj 1 - niz od tri proste grede na krutim ležajevima

Vlastiti oblici titranja dobiveni eksperimentalno	Vlastiti oblici titranja dobiveni u numeričkoj analizi
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	

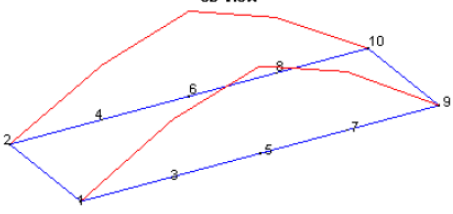
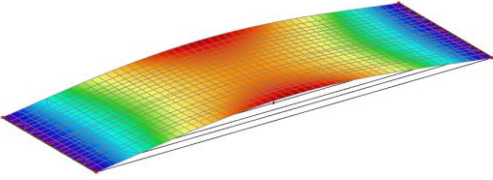
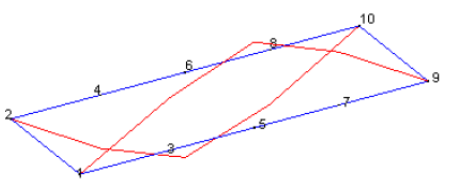
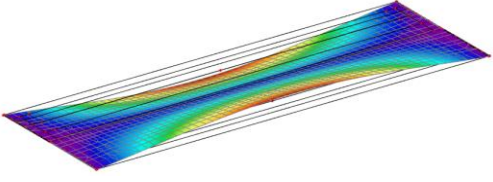
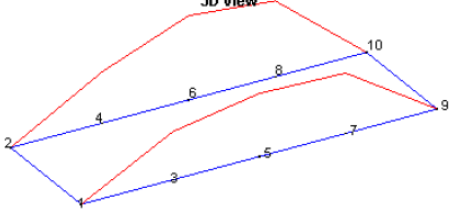
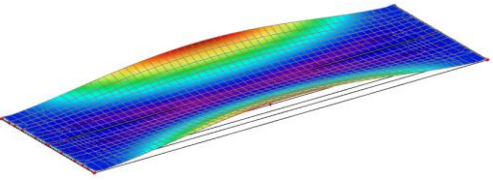
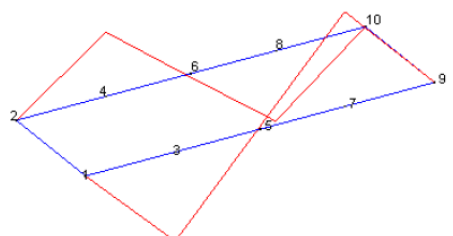
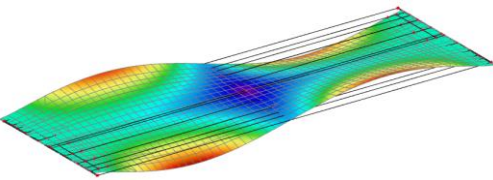
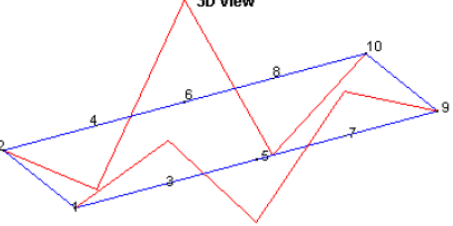
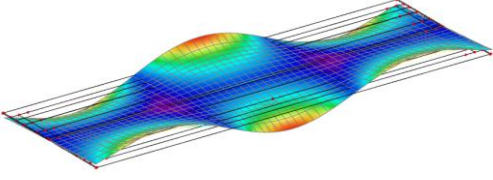
Tablica 16.: Vlastiti oblici titranja: slučaj 2 - kontinuirani nosač na krutim ležajevima

Vlastiti oblici titranja dobiveni eksperimentalno	Vlastiti oblici titranja dobiveni u numeričkoj analizi
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	

Tablica 17.: Vlastiti oblici titranja: slučaj 3 - niz od tri proste grede na elastomernim ležajevima

Vlastiti oblici titranja dobiveni eksperimentalno	Vlastiti oblici titranja dobiveni u numeričkoj analizi
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	

Tablica 18.: Vlastiti oblici titranja: slučaj 4 - kontinuirani nosač na elastomernim ležajevima

Vlastiti oblici titranja dobiveni eksperimentalno	Vlastiti oblici titranja dobiveni u numeričkoj analizi
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	
<p>3D View</p> 	

8. ZAKLJUČAK O PONAŠANJU KONTRUKCIJE NA TEMELJU PRIKAZANIH REZULTATA

Na temelju usporedbe rezultata ispitivanja mosta na probno opterećenje (četiri kamiona u sredini svakog raspona) i provedene numeričke analize, donose se zaključci o utjecaju različitih rubnih uvjeta, odnosno različitih statičkih shema i načina oslanjanja glavnih rasponskih nosača nadvožnjaka.

U numeričkim analizama obrađeni su slučajevi dvije statičke sheme: tri slobodno oslonjene grede i kontinuirani nosač preko tri polja te dva načina oslanjanja glavnih rasponskih nosača na naglavnu gredu: preko idealnih oslonaca i simulacijom elastomernih ležajeva.

Za statičko djelovanje uspoređeni su progibi izmjereni tijekom ispitivanja nadvožnjaka pod djelovanjem probnog opterećenja s progibima dobivenim numeričkim analizama.

Usporedbom dobivenih rezultata (Tablica 11) zaključuje se slijedeće:

- Najmanje odstupanje u progibima, od eksperimentalno mjerenih, daje slučaj 4 (kontinuirani nosač oslonjen preko elastomernih ležajeva na naglavne grede), a zatim slučaj 2 (kontinuirani nosač oslonjen preko idealnih ležajeva na naglavne grede).
- Numerički model kontinuiranog nosača dalje bolje rezultate za progibe od modela sustava prostih greda.
- Neka istraživanja i iskustva ukazuju da je savojna krutost glavnih nosača veća u stvarnosti nego što se uzima u proračunu, a zbog većeg modula elastičnosti u stvarnosti u odnosu na modul koji se prema normama uzima u proračunu. Doprinos većoj savojnoj krutosti presjeka također daje i prednaprezanje nosača te značajan udio nenapete armature u nosaču. Također, pri modeliranju je odabran armirani beton klase C30/37 koji ima modul elastičnosti $E = 32 \text{ MPa}$, ali je zbog količine armature u presjeku stvarni modul veći. Uzimajući navedeno u obzir – slučaj 4 dao bi još bolja slaganja numeričkih rezultata s eksperimentalnim rezultatima.

Za ispravno numeričko modeliranje konstrukcija bitno je odabrati odgovarajući statički sustav, materijalna svojstva gradiva i rubne uvjete (ležajeve), što se u konačnici potvrđuje rezultatima ispitivanja probnim opterećenjem.

POPIS LITERATURE

- [1] Bartolac, M.: PROGRAM ISPITIVANJA – nadvožnjak PAVUČNJAK, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za tehničku mehaniku, 2024.
- [2] Koščak, J.: IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU – nadvožnjak PAVUČNJAK, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za tehničku mehaniku, 2024.
- [3] Galinec, M.: GLAVNI PROJEKT NADVOŽNJAKA „PAVUČNJAK“ - IZMJENA I DOPUNA, Inženjerski projektni zavod d.d. Zagreb, 2023.
- [4] HRN EN 1991-2:2012, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- 2. dio: Prometna opterećenja mostova (EN 1991-2:2003+AC:2010), HZN, Zagreb, 2012.
- [5] Marović, P.: ISPITIVANJE KONSTRUKCIJA - zapisi s predavanja, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2010.
- [6] HRN U.M1.046:1984: Ispitivanje mosta probnim opterećenjem, HZN, Zagreb.
- [7] Ministerio de Fomento; Dirección General de Carreteras: Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera, 1999.
- [8] Damjanović, D.: Ispitivanje konstrukcija skripta, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2017.
- [9] SCIA Engineer 21,
[https://downloads.scia.net/support/sciaengineer/manuals/MAN%20\[Eng\]%20SCIA2%201.1%20-%20Fundamentals%20Training.pdf](https://downloads.scia.net/support/sciaengineer/manuals/MAN%20[Eng]%20SCIA2%201.1%20-%20Fundamentals%20Training.pdf)
- [10] Šimunić, Ž., Dolanjski, A.: Elastomerni ležajevi, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2007.

POPIS SLIKA

Slika 1. Nadvožnjak „Pavučnjak, situacija [3].....	3
Slika 2. Nadvožnjak „Pavučnjak, pogled [3].....	3
Slika 3. Nadvožnjak „Pavučnjak, uzdužni presjek [3].....	4
Slika 4. Nadvožnjak „Pavučnjak, poprečni presjek [3].....	4
Slika 5. Nadvožnjak „Pavučnjak, poprečni presjek na stupištu [3].....	6
Slika 6. Kamion s 3 osovine – 26 t [7].....	16
Slika 7. Kamion s 4 osovine – 38 t [7].....	16
Slika 8. Shematski prikaz kamiona s 4 osovine s označenim opterećenjem i međuosovinskim razmacima [2].....	21
Slika 9. Shematski prikaz faza probnog opterećenja, statičko djelovanje.....	23
Slika 10. Shema mjernih mjesta za mjerenje vertikalnih pomaka kod statičkog ispitivanja [2].....	25
Slika 11. Shema mjernih mjesta za mjerenje parametara kod dinamičkog ispitivanja [2]..	26
Slika 12. Zapis dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko mosta brzinom od 20 km/h – Faza dinamičkog ispitivanja DIN 20 [2].....	27
Slika 13. Zapis dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko mosta brzinom od 40 km/h – Faza dinamičkog ispitivanja DIN 40 [2].....	28
Slika 14. Zapis dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko mosta brzinom od 60 km/h – Faza dinamičkog ispitivanja DIN 60 [2].....	28
Slika 15. Eksperimentalno određeni vlastiti oblik titranja s pripadajućom vlastitom frekvencijom od 3,31 Hz [2].....	29
Slika 16. Eksperimentalno određeni vlastiti oblik titranja s pripadajućom vlastitom frekvencijom od 4,25 Hz [2].....	29
Slika 17. Eksperimentalno određeni vlastiti oblik titranja s pripadajućom vlastitom frekvencijom od 9,13 Hz [2].....	30
Slika 18. Eksperimentalno određeni vlastiti oblik titranja s pripadajućom vlastitom frekvencijom od 11,69 Hz [2].....	30
Slika 19. Eksperimentalno određeni vlastiti oblik titranja s pripadajućom vlastitom frekvencijom od 23,5 Hz [2].....	30
Slika 20. Proračunski model konstrukcije.....	31
Slika 21. Karakterističan glavni nosač rasponske konstrukcije (tlocrt, nacrt, poprečni presjeci).....	32
Slika 22. Poprečni presjeci.....	32

Slika 23. Rubni uvjeti (ležajevi) na proračunskom modelu	33
Slika 24. Dodatno stalno djelovanje - pješačka staza (G1).....	34
Slika 25. Dodatno stalno djelovanje - vijenac (G2)	34
Slika 26. Dodatno stalno djelovanje - ograda za pješake (G3).....	34
Slika 27. Dodatno stalno djelovanje - odbojna ograda (G4).....	35
Slika 28. Dodatno stalno djelovanje - asfaltni zastor (G5).....	35
Slika 29. Probno opterećenje – 4K R1	36
Slika 30. Probno opterećenje - 4K R2.....	37
Slika 31. Probno opterećenje - 4K R3.....	38
Slika 32. Dijagram momenata savijanja za probno opterećenje (anvelopa momenata savijanja djelovanja 4K R1, 4K R2 i 4K R3)	38
Slika 33. Rubni uvjeti (ležajevi) na proračunskom modelu [4].....	39
Slika 34. Kontinuirano opterećenje prema EC Model 1 [4]	40
Slika 35. Kontinuirano opterećenje prema EC Model 1 [4]	40
Slika 36. Dijagram momenata savijanja od opterećenja EC-Model 1 (kontinuirano).....	41
Slika 37. Dijagram momenata savijanja od opterećenja EC-Model 1 (koncentrirano).....	41
Slika 38. Progibi u mjernim točkama 2A i 2B - faza opterećenja 2 (2k u 2A).....	42
Slika 39. Progibi u mjernim točkama 2A i 2B - faza opterećenja 3 (4k u 2).....	42
Slika 40. Progibi u mjernim točkama 4A i 4B - faza opterećenja 8 (2k u 4A).....	42
Slika 41. Progibi u mjernim točkama 4A i 4B - faza opterećenja 9 (4k u 4).....	43
Slika 42. Progibi u mjernim točkama 4A i 4B - faza opterećenja 10 (2k u 4B)	43
Slika 43. Progibi u mjernim točkama 6A i 6B - faza opterećenja 13 (2k u 6B)	43
Slika 44. Progibi u mjernim točkama 6A i 6B - faza opterećenja 14 (4K u 6).....	43
Slika 45. Plošne mase za osnovno djelovanje G1 (pješačka staza).....	44
Slika 46. Plošne mase za osnovno djelovanje G2 (vijenac)	44
Slika 47. Plošne mase za osnovno djelovanje G3 (ograda za pješake)	45
Slika 48. Plošne mase za osnovno djelovanje G4 (odbojna ograda).....	45
Slika 49. Plošne mase za osnovno djelovanje G5 (asfaltni zastor i hidroizolacija)	45
Slika 50. Vlastiti oblik osciliranja, $f = 2,73$ Hz	46
Slika 51. Vlastiti oblik osciliranja, $f = 3,09$ Hz	46
Slika 52. Vlastiti oblik osciliranja, $f = 6,15$ Hz	46
Slika 53. Vlastiti oblik osciliranja, $f = 8,01$ Hz	47
Slika 54. Vlastiti oblik osciliranja, $f = 17,47$ Hz.....	47
Slika 55. Statička shema prostih greda i kontinuiranog nosača preko tri polja: 1) niz prostih greda; 2) kontinuirani nosač.....	48
Slika 56. Shematski prikaz kontinuiteta glavnih rasponskih nosača: a) bez kontinuiteta - sustav niza prostih greda; b) kontinuitet na mjestu kolničke ploče - kontinuirani nosač	49

Slika 57. Detalj oslanjanja rasponske konstrukcije na naglavnu gredu: a) oznaka detalja; b) shema detalja.....	50
Slika 58. Shema opterećenja četiri kamiona po poljima	52
Slika 59. Pomaci glavnih rasponskih nosača i najveći progibi za slučaj 1: niz od tri proste grede na krutim ležajevima	53
Slika 60. Pomaci glavnih rasponskih nosača i najveći progibi za slučaj 2: kontinuirani nosač na krutim ležajevima.....	54
Slika 61. Pomaci glavnih rasponskih nosača i najveći progibi za slučaj 3: niz od tri proste grede na elastomernim ležajevima	55
Slika 62. Pomaci glavnih rasponskih nosača i najveći progibi za slučaj 4: kontinuirani nosač na elastomernim ležajevima	56
Slika 63. Raspored probnog opterećenja (kamiona) po poljima nadvožnjaka [2]	57

POPIS TABLICA

Tablica 1.: Razredi betona elemenata konstrukcije [3].....	7
Tablica 2.: Elastomerni ležajevi: dimenzije, dopuštena nosivost i dopušteni pomak [3].....	8
Tablica 3.: Podaci o kamionima: međuosovinski razmaci, osovinska opterećenja, površinska težina po kotaču [2].....	22
Tablica 4.: Srednje vrijednosti težina kamiona [2]	22
Tablica 5.: Faze dinamičkog ispitivanja mosta [2].....	24
Tablica 6.: Rezultati statičkog ispitivanja mosta [2].....	25
Tablica 7.: Rezultati dinamičkog ispitivanja mosta [2]	27
Tablica 8.: Izmjerene vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja [2].....	29
Tablica 9.: Izmjerene vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja.....	33
Tablica 10.: Efikasnost probnog opterećenja.....	41
Tablica 11.: Progibi [mm] na mjernim mjestima u poljima nadvožnjaka pri eksperimentalnom ispitivanju (probno opterećenje) i numeričkoj analizi.....	58
Tablica 12.: Odstupanja progiba dobivenih numeričkom analizom od eksperimentalnih....	59
Tablica 13.: Vlastite frekvencije [Hz] pri eksperimentalnom ispitivanju i numeričkoj analizi	60
Tablica 14.: Odstupanja vlastitih frekvencija dobivenih numeričkom analizom od eksperimentalnih	61
Tablica 15.: Vlastiti oblici titranja: slučaj 1 - niz od tri proste grede na krutim ležajevima ..	62
Tablica 16.: Vlastiti oblici titranja: slučaj 2 - kontinuirani nosač na krutim ležajevima	63
Tablica 17.: Vlastiti oblici titranja: slučaj 1 - niz od tri proste grede na elastomernim ležajevima	64
Tablica 18.: Vlastiti oblici titranja: slučaj 1 - kontinuirani nosač na elastomernim ležajevima	65