

Ispitivanja pri provedbi ocjene stanja mostova

Palajsa, Dominik

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:237:899256>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Dominik Palajsa

**ISPITIVANJA PRI PROVEDBI OCJENJIVANJA
STANJA MOSTOVA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Dominik Palajsa

**ISPITIVANJA PRI PROVEDBI OCJENJIVANJA
STANJA MOSTOVA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Marko Bartolac

Komentor: dr. sc. Janko Koščak

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Dominik Palajsa

Tests within the bridge assessment procedure

MASTER THESIS

Supervisor: Assoc. Prof. PhD. Marko Bartolac

Co-supervisor: PhD. Janko Koščak

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:


Digitally signed by MARIJO BARTOLAC
DN: cn=MARIJO BARTOLAC, o=Sveučilište u Zagrebu, ou=Građevinski fakultet, email=MARIJO.BARTOLAC@grad.unizg.hr, c=HR
Date: 2024.11.13 08:56:57 +01'00'

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja:

Dominik Palajsa, 0082061131

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Ispitivanja pri provedbi ocjenjivanja stanja mostova

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

13.11.2024.

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja:

Dominik Palajsa, 91277399469

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

Ispitivanja pri provedbi ocjenjivanja stanja mostova

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

izv. prof. dr. sc. Marko Bartolac

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

21.11.2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

13.11.2024.

Potpis:

ZAHVALE

Zahvaljujem se svojim mentorima, izv. prof. dr. sc. Marku Bartolcu i dr. sc. Janku Koščaku, na stručnom vodstvu, korisnim savjetima i strpljenju tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem svojim roditeljima i cijeloj obitelji na bezuvjetnoj podršci i motivaciji tijekom cijelog mog školovanja. Hvala svim prijateljima i kolegama s fakulteta iz Karlovca koji su bili uz mene i pružili pomoć kad je bilo najpotrebnije. Posebno se zahvaljujem Marceli Medić na pomoći i podršci tijekom svih pet godina studiranja. Na diplomskom studiju, izdvojio bih Tonija Nasića, s kojim sam pisao svaki seminar koji se izvodio u paru, te Marka Antića, koji mi je često ustupio smještaj i time olakšao moj studentski život.

Ovaj rad posvećujem svom djedu, Josipu Vlaho, koji mi je bio velika potpora tijekom studija, ali me, nažalost, napustio četiri mjeseca prije obrane diplomskog rada. Neka ovaj uspjeh bude izraz zahvalnosti za svu njegovu ljubav i ohrabrenje.

SAŽETAK

Na početku ovog rada opisano je ispitivanje konstrukcija uz kratak povijesni pregled koji je doveo do početaka standardizacije u ovom području. Slijedi analiza zakonskog okvira Republike Hrvatske koji se odnosi na ispitivanje konstrukcija, s naglaskom na normativne dokumente, njihovu strukturu i problematiku. Ukazano je na određene nedostatke hrvatskih normi i propisa, te je izvršena usporedba s vodećim svjetskim normama koje oblikuju ključne trendove u ispitivanju konstrukcija. Veći dio teorijskog dijela rada posvećen je smjernicama iz Ujedinjene Kraljevine, čije bi prakse mogle poslužiti kao polazište za razvoj hrvatskih smjernica. Praktični dio rada obuhvaća spregnuti most smješten pod kutem od $10,70^\circ$ u odnosu na os korita rijeke, na kojem je provedeno statičko i dinamičko ispitivanje. Na temelju izmjerenih podataka izvršena je usporedba s računskim rezultatima dobivenim iz izrađenog numeričkog modela mosta, čime je ocijenjeno stanje predmetnog mosta. U završnom dijelu rada, na temelju mosta pod kutem od $10,70^\circ$, izrađena su još četiri jednaka modela mosta (s istim materijalima i poprečnim presjecima), ali s različitim kutovima usmjerenja (0° , 20° , 30° i 40°). Cilj je bio analizirati utjecaj kuta na promjene rezultata i utvrditi trendove koji nastaju s njegovim povećanjem.

Ključne riječi: ispitivanje mostova opterećenjem, hrvatska legislativa ispitivanja konstrukcija, britanske smjernice za ispitivanje mostova, eksperimentalna i računska analiza spregnutog mosta, ocjena stanja mosta, utjecaj kuta usmjerenja mosta

SUMMARY

At the beginning of this thesis, structural testing is described, along with a brief historical overview that led to the early stages of standardization in this field. This is followed by an analysis of the legal framework in the Republic of Croatia related to structural testing, with emphasis on normative documents, their structure, and associated issues. Certain shortcomings of Croatian standards and regulations are highlighted, and a comparison is made with leading international standards that shape key trends in structural testing. A significant part of the theoretical section is dedicated to guidelines from the United Kingdom, whose practices could serve as a foundation for developing Croatian guidelines. The practical section covers a composite bridge positioned at an angle of 10.70° relative to the riverbed axis, on which static and dynamic testing was conducted. Based on the measured data, a comparison was made with the computational results obtained from the created numerical model of the bridge, thereby assessing the condition of the structure. In the final section, based on the bridge at a 10.70° angle, four additional identical bridge models (with the same materials and cross-sections) were created, but with varying orientation angles (0° , 20° , 30° , and 40°). The goal was to analyze the impact of the angle on result variations and identify trends that emerge with its increase.

Key words: Bridge load testing, Croatian legislation for structural testing, British guidelines for bridge testing, Experimental and structural analysis of composite bridge, Bridge condition assessment, Effect of bridge orientation angle

1. UVOD	1
2. METODE I TEHNIKE RADA.....	2
3. UVOD, VAŽNOST I POVIJESNI RAZVOJ ISPITIVANJA MOSTOVA.....	3
3.1. Uvod o ispitivanju konstrukcija.....	3
3.1.1. Povijesni pregled ispitivanja mostova: od ranih inženjerskih podviga do suvremenih standarda sigurnosti.....	4
3.1.1.1. Evolucija ispitivanja mostova kroz povijest eksperimentalne znanosti	4
3.1.1.2. Nesreće uzrokovane pogrešnim ispitivanjem mostova: Lekcije iz povijesti i početak standardizacije	5
4. ANALIZA NORMATIVNIH REGULATIVA ISPITIVANJA MOSTOVA U REPUBLICI HRVATSKOJ I SVIJETU	7
4.1. Zastupljenost mostova prema tipu konstrukcije i materijalu u Hrvatskoj.....	7
4.2. Općeniti pregled zakonskog okvira i normativne regulative ispitivanja konstrukcija u Hrvatskoj: Struktura i problematika.....	10
4.3. Usporedba osnovnih značajki svjetskih reprezentativnih normi za ispitivanje mostova.....	12
4.4. Podjela i učestalost pojedinih pregleda građevinskih konstrukcija prema hrvatskim i njemačkim propisima (normama).....	15
4.4.1. Tehnički propis za građevinske konstrukcije i norma HRN U.M1.046:1984	15
4.4.2. Njemačka norma DIN 1076	16
5. BRITANSKE SMJERNICE ZA ISPITIVANJE MOSTOVA	18
5.1. Oblici ispitivanja opterećenjem.....	18
5.1.1. Dijagnostičko ispitivanje	18
5.1.2. Ispitivanje uporabljivosti.....	19
5.1.3. Ispitivanje nosivosti	19
5.1.4. Ispitivanje dinamičkim opterećenjem	20
5.2. Postupak procjene	20
5.3. Mostovi od kamenih i betonskih lukova.....	20
5.3.1. Problematika lučnih mostova	20
5.3.2. Ispitivanje zidanih lučnih mostova.....	21
5.3.3. Ispitivanje betonskih lučnih mostova.....	22
5.3.4. Primjeri zidanih lučnih mostova u Republici Hrvatskoj.....	22
5.4. Uvjeti dijagnostičkog ispitivanja	25

5.4.1.	Tipovi konstrukcija i način opterećenja.....	25
5.4.1.2.	Kompozitno djelovanje	27
5.4.1.3.	Rubni uvjeti	28
5.4.1.4.	Elastična upetost čvorova.....	29
5.4.1.5.	Poprečno stlačivanje	29
5.5.	Metode nanošenja opterećenja.....	29
5.5.1.	Mrtvi teret (eng. <i>Dead load</i>).....	29
5.5.2.	Vodene vreće	30
5.5.3.	Sustavi sa sidrenjem u tlu ili stijeni (eng. <i>Jacking systems reacting against ground or rock anchors</i>)	31
5.5.4.	Specijalno jednoosno priključno vozilo (eng. <i>HB single-axle trailer</i>).....	31
5.5.5.	Natovarena vozila.....	32
5.5.6.	Ispitivanje željezničkim vozilima.....	32
5.6.	Mjerni instrumenti.....	33
5.6.1.	Mjerenje pomaka.....	33
5.6.2.	Mjerenje naprezanja.....	34
5.6.3.	Mjerenje temperature	34
5.7.	Postavljanje mjernih instrumenata.....	35
5.7.1.	Mjerala (senzori) pomaka	36
5.7.2.	Mjerne trake (eng. <i>Strain gauges</i>).....	36
5.7.3.	Mjerenje odgovora	36
5.8.	Interpretacija rezultata	37
5.8.1.	Usporedba izmjerenih i izračunatih rezultata.....	37
5.8.1.1.	Linearnost.....	37
5.8.1.2.	Mrtvo opterećenje.....	38
5.8.1.3.	Krutost.....	38
5.8.1.4.	Lokalni efekti.....	38
5.8.2.	Kalibracija strukturnih modela.....	39
5.9.	Procjena nosivosti.....	40
5.9.1.	Granično stanje nosivosti.....	40
5.9.2.	Pouzdanost.....	40
5.9.3.	Distribucija opterećenja.....	41
5.9.4.	Dodatni faktori čvrstoće	42

5.9.5.	Ispitivanja otkazivanja nosivosti.....	42
5.9.6.	Postupak naknadne optimizacije (eng. <i>Retrofitting</i>)	43
5.9.7.	Preporučena metoda određivanja sigurne nosivosti konstrukcije.....	44
5.10.	Dugoročna pouzdanost.....	45
5.10.1.	Kompozitno djelovanje	45
5.10.2.	Ograničeni preostali vijek trajanja.....	45
5.10.3.	Ponovno testiranje.....	45
5.10.4.	Praćenje nepouzdatih djelovanja	46
5.10.5.	Vrste skrivene nosivosti	46
6.	ISPITIVANJE I RAČUNSKA ANALIZA KONSTRUKCIJE MOSTA.....	47
6.1.	Tehnički opis	47
6.2.	Ispitivanje mosta	52
6.2.1.	Faze ispitivanja i efikasnost probnog opterećenja	54
6.2.2.	Rezultati ispitivanja.....	60
6.2.2.1.	Rezultati statičkog ispitivanja – mjerenje pomaka	60
6.2.2.2.	Rezultati dinamičkog ispitivanja.....	61
6.3.	Računska analiza konstrukcije.....	63
6.4.	Zaključak o ponašanju konstrukcije nakon provedenog ispitivanja i analize računskih i izmjerenih rezultata	64
7.	ISTRAŽIVANJE UTJECAJA RAZLIČITIH KUTOVA POLOŽAJA MOSTA U ODNOSU NA KORITO RIJEKE: ANALIZA I USPOREDBA MODELA.....	65
7.1.	Usporedba računskih progiba pojedinih modela.....	67
7.2.	Analiza modalnih frekvencija mostova pod različitim kutovima zakošenja	68
8.	ZAKLJUČAK.....	74
	PRILOG A.....	75
	PRILOG B.....	96
	POPIS LITERATURE	109
	POPIS SLIKA.....	114
	POPIS TABLICA.....	118

1. UVOD

Tema ovog diplomskog rada temelji se na ispitivanju mostova, važnom aspektu inženjerske prakse koji osigurava sigurnost i funkcionalnost ovih građevina. Ispitivanje nije samo ključna komponenta provjere mostova nakon izgradnje, već i bitan faktor u sprječavanju mogućih nesreća i osiguravanju dugovječnosti konstrukcija. Hrvatska se može pohvaliti bogatom tradicijom mostogradnje koja obuhvaća različita povijesna razdoblja, a današnji mostovi svjedoče o njihovoj važnosti za prometnu infrastrukturu i svakodnevni život građana.

Potreba za ozbiljnijim pristupom ispitivanju mostova u Hrvatskoj postaje sve očiglednija zbog dotrajalosti ovih konstrukcija i učestalih poplavnih događaja. Ovi izazovi upućuju na potrebu za unapređenjem postojećih normi i standarda ispitivanja mostova kako bi se osigurala njihova sigurnost i dugovječnost. Trenutne hrvatske norme i zakonski okviri često su nedovoljno detaljni i neadekvatni, što ukazuje na potrebu za podizanjem standarda na višu razinu. U radu će se izložiti osnovna struktura i problemi s kojima se suočavaju hrvatske norme za ispitivanje mostova, te će se analizirati primjena praksi iz drugih normi, uz potkrepljenje europskim i svjetskim standardima koji dodatno oblikuju okvir ispitivanja.

Jedan od središnjih dijelova ovog rada bit će detaljna analiza britanskih smjernica za ispitivanje mostova, budući da je Ujedinjeno Kraljevstvo razvilo specifične smjernice koje se odnose na ovu temu. Na kraju rada, naglasak će biti na na praktičnom dijelu, gdje će se predstaviti ispitivanje stvarnog mosta kroz modeliranje i računsku analizu, pružajući tako uvid u primjenu teorijskih načela u praksi.

2. METODE I TEHNIKE RADA

U ovom diplomskom radu primijenjene su sljedeće metode znanstvenog istraživanja:

- **Kvalitativno istraživanje:** ovaj pristup uglavnom je korišten u teorijskom dijelu rada
- **Kvantitativne metode:** prikupljeni su brožčani podaci o progibima, frekvencijama i ostalim parametrima konstrukcije kroz simulacije i eksperimentalne metode
- **Metode modeliranja:** U programskom paketu SCIA Engineer razvijeni su numerički modeli mostova kako bi se simuliralo ponašanje mosta pri statičkom i dinamičkom ispitivanju
- **Metoda simulacije (numeričke metode):** Korištenje numeričkih metoda (kao što je metoda konačnih elemenata) omogućilo je analizu ponašanja mosta u simuliranim uvjetima opterećenja
- **Eksperimentalne metode:** Mjerenja stvarnog ponašanja mosta provedena su kroz statička i dinamička ispitivanja na terenu, čime su rezultati simulacija uspoređeni sa stvarnim podacima
- **Metoda slučaja:** Analiziran je stvarni slučaj mosta kako bi se dobili zaključci koji podržavaju teorijske pretpostavke i metodologiju simulacija
- **Metoda opažanja:** Proveden je vizualni pregled mosta, prije i nakon ispitivanja
- **Metode mjerenja:** Korišteni su precizni mjerni instrumenti za praćenje stvarnog ponašanja mosta tijekom ispitivanja, što je omogućilo usporedbu s numeričkim rezultatima

3. UVOD, VAŽNOST I POVIJESNI RAZVOJ ISPITIVANJA MOSTOVA

U ovom poglavlju definirano je ispitivanje konstrukcija te njegova svrha i važnost. Budući da se rad bazira na ispitivanju mostova, dan je i osnovni pregled pojmova koji su bitni za mostove. Zatim su navedene mnoge nesreće koje su kao posljedica neshvaćanja ponašanja konstrukcija dovele do revolucionarnih saznanja u građevinarstvu, što je potaknulo i početke standardizacije postupaka ispitivanja.

3.1. Uvod o ispitivanju konstrukcija

Ispitivanje konstrukcija provodi se kako bi se ocijenilo njihovo ponašanje u skladu s predviđenim i utvrđenim pretpostavkama u projektu te ustanovilo koliko ponašanje konstrukcije odstupa od tih pretpostavki. Ovi postupci su djelomično regulirani normama, pri čemu je za neke konstrukcije ispitivanje obavezno, dok za druge može biti predviđeno prema projektu. Ispitivanjem se također mogu identificirati eventualna oštećenja konstrukcije ili njenih pojedinih dijelova te riješiti nejasnoće u ponašanju manje poznatih materijala. Ovaj proces nam otkriva pouzdane podatke o trenutnom stanju i ponašanju konstrukcije [1].

Među najčešće ispitivanim konstrukcijama su mostovi, prvenstveno zbog njihove izuzetne važnosti u prometnoj infrastrukturi. Njihova pouzdanost mora biti neupitna, jer svako značajno oštećenje može dovesti do kolapsa prometnog sustava i ozbiljno ugroziti sigurnost korisnika [2]. Nadalje, budući da su mostovi nerijetko statički određeni sustavi, poput grednih mostova, otkazivanje jednog elementa može rezultirati kolapsom cijele konstrukcije, što dodatno naglašava važnost njihovog ispitivanja.

Mostovi se definiraju kao građevine koje omogućuju prijelaz prometnica preko prirodnih (rijeke, kanjoni) ili umjetnih zapreka (ulice, kolodvori). Gornji ustroj obuhvaća sve dijelove glavne nosive konstrukcije iznad ležaja, kao što su kolničke konstrukcije i prometne površine. Donji ustroj, s druge strane, uključuje dijelove ispod ležišta rasponske konstrukcije poput upornjaka, temelja i stupova. Postoji mnogo podjela mostova, ali u kontekstu ovog rada najvažnije su podjele s obzirom na vrstu prometa (pješački, cestovni i željeznički), oblike glavnog nosivog sklopa (gredni, lučni, viseći, razuporni i ovješeni) te tipove nosive strukture (pločasti, rebrasti, sandučasti). Ovisno o materijalu od kojeg su izgrađeni, mostovi mogu biti drveni, metalni (od čelika, lijevanog željeza), masivni (od opeke, prirodnog kamena, betona) ili kombinacija različitih materijala [3].

3.1.1. Povijesni pregled ispitivanja mostova: od ranih inženjerskih podviga do suvremenih standarda sigurnosti

3.1.1.1. Evolucija ispitivanja mostova kroz povijest eksperimentalne znanosti

Prve teorijske osnove za ispitivanje konstrukcija razvile su se u renesansi. Leonardo da Vinci provodio je prva poznata ispitivanja konstrukcija od užadi, greda i stupova, dok je Galileo Galilei postavio temelje klasične fizike i smatra se utemeljiteljem eksperimentalne znanosti [1].

Puno prije razvoja teorijskih osnova u renesansi, sigurnost mostova bila je izuzetno važna, što pokazuju rane metode ispitivanja i legende o inženjerima koji su riskirali život stojeći ispod svojih konstrukcija tijekom ispitivanja. Primjerice, Fabricijev most, najstariji postojeći most u Rimu, nosi natpis na latinskom: "L FABRICIVS C F CVR VIAR FACIVNDVM COERAVIT EIDEMQUE PROBAVIT", što se prevodi kao: "Lucius Fabricius, sin Gaja, nadzornik cesta, odobrio je gradnju. Sam ga je testirao" [4].

Ispitivanje mostova postalo je još važnije s razvojem novih materijala i tehnologija tijekom Prve industrijske revolucije. Primjer je Iron Bridge, prvi most na svijetu izgrađen od lijevanog željeza, završen 1779. godine pod vodstvom inženjera Abrahama Darbyja III [5].

Evolucija u građevinarstvu dovela je i do sve inovativnijih metoda ispitivanja, kao što je primjer iz 1883. godine, kada je inženjer Washington Roebling organizirao test probnim opterećenjem na Brooklyn Bridgeu, koristeći cirkusku skupinu od 21 slona (Slika 1) [6].

Događaj koji je značajno utjecao na povijest ispitivanja mostova i označio početak analize dinamičkih opterećenja bio je kolaps Tacoma Narrows Bridgea. Poznat kao "Gallopning Gertie", most se srušio 1940. godine zbog aeroelastičnih oscilacija [7]. Ovaj incident bio je ključan za razumijevanje aerodinamičkih sila i doveo je do razvoja novih metoda ispitivanja i projektiranja mostova.

Danas se čini da se važnost redovitog ispitivanja i održavanja mostova sve manje prepoznaje, što je tragično potvrđeno urušavanjem Morandijevog mosta u Genovi 2018. godine, pri čemu su poginule 43 osobe [8]. Ova katastrofa izazvala je veliku političku kontroverzu o lošem stanju infrastrukture u Italiji i pokrenula šira pitanja o stanju mostova diljem Europe.



Slika 1.: Brooklyn bridge – ispitivanje probnim opterećenjem skupinom slonova (Izvor: [9])

3.1.1.2. Nesreće uzrokovane pogrešnim ispitivanjem mostova: Lekcije iz povijesti i početak standardizacije

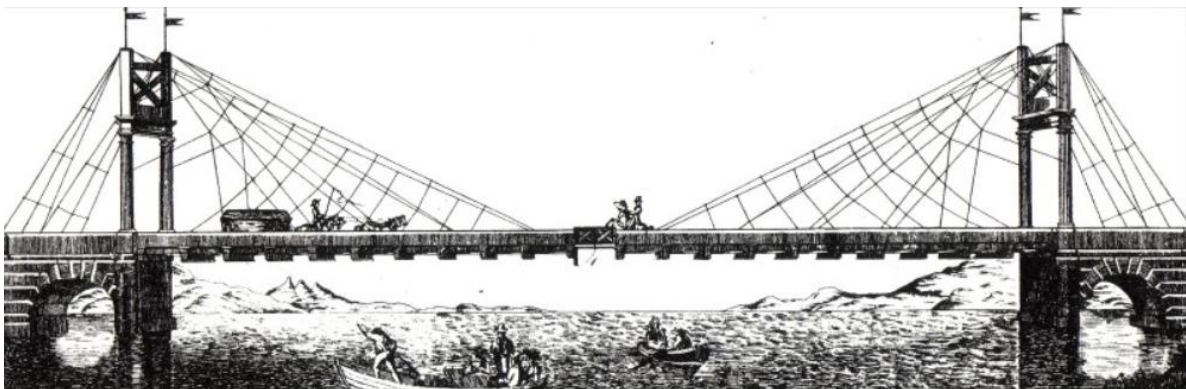
Ispitivanja mostova u 19. stoljeću potvrđivala su ne samo nosivost konstrukcije, već su također nadoknađivala nedostatke tadašnjih proračunskih metoda, uključujući moguće nedostatke materijala [10].

Obično su se tijekom ispitivanja mjerili samo pomaci, budući da su oni smatrani najvažnijim učinkom, dok su ostali pouzdani kriteriji tada bili nedostupni. Ako su pomaci bili dovoljno mali ili blizu onim izračunatim, smatralo se da konstrukcija prolazi test. Međutim, ovaj pristup nije uvijek bio pouzdan, što potvrđuje slučaj cestovnog mosta u blizini Saleza, u švicarskom kantonu St. Gallen, koji se srušio tijekom ispitivanja 1884. godine. Most se iznenada srušio pri izmjerenom elastičnom pomaku od samo 10 mm, iako je teorijski maksimalni pomak bio predviđen na 17,5 mm [11].

Mnoge nesreće izazvane su nemarom, stoga ćemo navesti dvije tragične anegdote o neuspjelim ispitivanjima. Most u Švicarskoj, preko rijeke Rhone u blizini Peneya, s rasponom od 100 metara, podvrgnut je ispitivanju koristeći vreće ispunjene pijeskom. Nakon ispitivanja počela je padati jaka kiša i vreće su upile toliko vode da je došlo do kolapsa mosta. Još jedan švicarski most, preko rijeke Broje u blizini Payernea, srušio se 1873. godine jer je radnik nemarno bacao vodene spremnike korištene za ispitivanje, čime je oštetio glavnu gredu [11].

Razvojem mostogradnje pokazalo se da uspješno provedeno ispitivanje mosta ne jamči dugoročnu sigurnost konstrukcije. To je bio slučaj s mostom preko rijeke Saale kod Nienburga u Njemačkoj. Most, koji je završen davne 1825. godine, bio je dug 118 metara i širok 7.6 metara. Predstavljao je ranu verziju mosta sa zategnutim kabelima, a budući da je bio potpuno novi tip mosta, ispitivanje je bilo posebno važno. Ispitivanje je provedeno pomoću kočije s oko 1200 komada cigle koju je vuklo 10 konja [12], a izmjereni pomaci su bili toliko mali da je konstrukcija proglašena sigurnom [10]. Most se srušio samo nekoliko mjeseci kasnije prilikom posjete vojvode. Kada je vojvodin konvoj trebao prijeći most, gomila ljudi se okupila s jedne strane mosta, što je preopteretilo kablove. Most se srušio i više od 55 ljudi je poginulo [10, 12].

Most u Velikoj Britaniji, u blizini Salforda, srušio se 12. travnja 1831. godine zbog rezonantnih vibracija izazvanih marširajućim trupama. Nakon ovog incidenta, britanska vojska izdala je opću direktivu kojom se zabranjuje marširanje trupama preko mostova [13].



Slika 2.: Most Nienburger Saale prema nacrtu njegova graditelja Christiana Bandhauera:

[10])

Švicarska željeznička uprava počela je zahtijevati redovite inspekcije svih željezničkih mostova nakon što se 1891. godine dogodila najveća željeznička nesreća u povijesti te države, rušenjem Münchensteiner mosta, kojeg je konstruirao Gustave Eiffel [10, 14]. Tijekom tih inspekcija provodili su se jednostavni testovi, pri čemu se most opteretio prema pretpostavkama o opterećenju iz prethodno izvedene strukturalne analize. Ispitivanja opterećenjem postala su standardna praksa, a rezultati ispitivanja često se nisu ni analizirali [15]. Nesreća je prikazana na Slici 3.

Prve napore za stvaranje pravila za ispitivanja opterećenjem poduzela je bavarska civilna služba 1878. godine, a godinu kasnije i švicarska željeznička uprava. Druge europske zemlje

i zemlje zapadnog svijeta krajem 19. stoljeća definirale su slične propise za ispitivanje opterećenjem mostova na temelju pravila švicarske željeznice [10].



Slika 3.: Kolaps Münchensteiner mosta (Izvor: [16])

4. ANALIZA NORMATIVNIH REGULATIVA ISPITIVANJA MOSTOVA U REPUBLICI HRVATSKOJ I SVIJETU

4.1. Zastupljenost mostova prema tipu konstrukcije i materijalu u Hrvatskoj

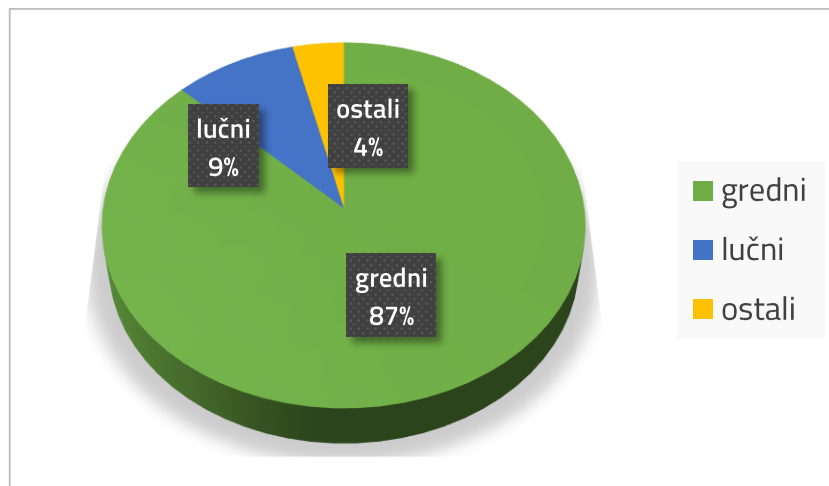
Hrvatska ima bogatu tradiciju mostogradnje te stoga treba zadržati svoje mjesto u svjetskom vrhu. Posjedujemo vrijednu zbirku mostova, od rimskog doba, srednjeg vijeka, Napoleonovih vremena, austro-ugarske ere, pa sve do suvremenih dostignuća poput Pelješkog mosta. Uz gradnju novih, također je važno očuvati i redovito održavati postojeće mostove kako bi ponos prošlih generacija bio osiguran i za buduće.

Budući da postupci i metode ispitivanja ovise o tipu konstrukcije i materijalu od kojeg su mostovi izgrađeni, važno je prilagoditi ispitne procedure svakom pojedinom slučaju. Stoga, prije nego što usporedimo prakse ispitivanja stanja mostova u Hrvatskoj s praksama u Europi i svijetu, ključno je stvoriti jasnu sliku o zastupljenosti pojedinih tipova mostova u našoj zemlji.

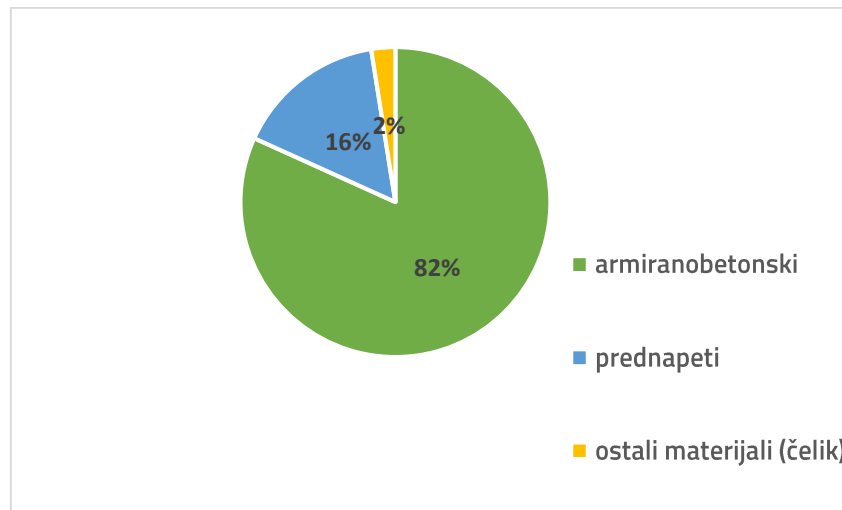
Vrlo je teško doći do sveobuhvatne baze podataka o ukupnom broju i vrstama svih mostova u Hrvatskoj. Međutim, budući da je većina mostova pod ingerencijom Hrvatskih cesta d.o.o., koristimo se njihovom statistikom iz 2012. godine za mostove s rasponom većim od 5

metara. Prema toj statistici, ukupno postoji 823 mosta. Najveći udio čine gredni mostovi, što se vidi na grafu, s udjelom od 87%. Od tih, 523 su armiranobetonski, 113 su prednapeti, a 18 je izrađeno od drugih materijala, pri čemu je najzastupljeniji čelik. Lučnih mostova ima 74, što čini 9% ukupnog broja, od čega je 34 zidanih, 39 betonskih i armiranobetonskih, te 1 čelični most [17].

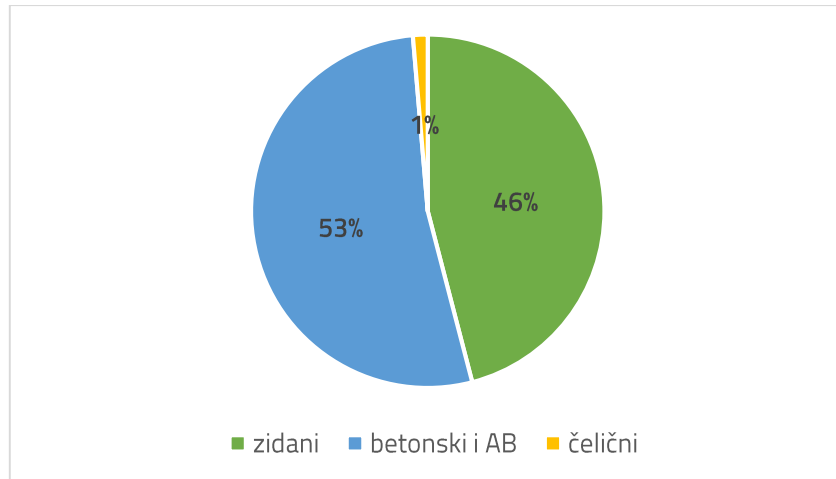
Preostalih 37 mostova, odnosno 4%, čine ostali tipovi mostova, koji su pretežito razupore i okviri [17]. Statistički podaci prikazani su grafički na Slici 4. do Slike 6.



Slika 4.: Zastupljenost mostova u Hrvatskoj prema tipu konstrukcije (Izvor: [17])



Slika 5.: Zastupljenost grednih mostova u Hrvatskoj obzirom na materijal (Izvor: [17])



Slika 6.: Zastupljenost lučnih mostova u Hrvatskoj obzirom na materijal (Izvor: [17])

Zaključno, najviše je mostova od betona i armiranog betona, dok je čeličnih mostova i mostova od drugih materijala znatno manje.

Za usporedbu, u Njemačkoj ima ukupno oko 120 000 mostova, od čega se statistika odnosi na 36 000 mostova koji su u mreži saveznih cesta. Od tih mostova, 88% su betonski/prednapeti mostovi, 7% su čelični, a 4% su od čeličnih kompozita [18]. Iako Njemačka ima znatno veći broj mostova u usporedbi s Hrvatskom, razlika u udjelu mostova prema materijalu je relativno mala.

4.2. Općeniti pregled zakonskog okvira i normativne regulative ispitivanja konstrukcija u Hrvatskoj: Struktura i problematika

Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja Republike Hrvatske, u skladu s člankom 17. stavkom 2. Zakona o gradnji ("Narodne novine", broj 153/13), donosi Tehnički propis za građevinske konstrukcije. Ovaj propis detaljno specificira zahtijevana svojstva koja građevni proizvodi moraju zadovoljiti te postavlja standarde za projektiranje, izvođenje, uklanjanje i sve ostale aspekte vezane uz građevinske konstrukcije, uključujući ispitivanje i održavanje. Propis precizno određuje koje se norme pritom primjenjuju [19]. Konkretno, za ispitivanje mostova pokusnim opterećenjem koristi se HRN U.M1.046:1984, koja opisuje postupke ispitivanja pod djelovanjem statičkih i dinamičkih opterećenja, klasificira vrste opterećenja te definira vrste mostova koji se ispituju i u kojim vremenskim intervalima [1]. Svi ovi detalji bit će izneseni u poglavlju 4.4.1. .

Svi postojeći mostovi projektirani su i izgrađeni u skladu s normama koje su tada bile na snazi. Od tog vremena, prometna opterećenja na cestovnim mostovima znatno su se povećala, a za postojeće željezničke mostove ponekad se zahtijeva uvođenje viših razreda, tj. kategorije pruge. U načelu, proračunsko ocjenjivanje pouzdanosti postojećih mostova provodi se samo za granično stanje nosivosti, a ne i uporabljivosti jer se smatra da je ono provjereno odgovarajućim pregledima konstrukcije. Međutim, ako se promijeni uporabna funkcija konstrukcije, tada se treba provjeriti i uporabljivost [20].

Mnoge države, uključujući Njemačku, Ujedinjenu Kraljevinu, Nizozemsku, Austriju, Kanadu, Švicarsku i nordijske zemlje, usvojile su nove norme i smjernice za ocjenu stanja postojećih mostova. Nažalost, Hrvatska još uvijek nema takve norme, pa se za ocjenu stanja postojećih mostova često koriste suvremene norme namijenjene novim mostovima, što u ponekim slučajevima može dovesti do donošenja pogrešnih odluka koje rezultiraju skupim i nepotrebnim sanacijama i rekonstrukcijama [20].

Trenutno je vizualni pregled za manje mostove tipskih konstrukcija ključno sredstvo utvrđivanja njihovog stanja, ali kvaliteta i ujednačenost rezultata procjene ovise o motivaciji, kvalifikaciji i opremljenosti osoblja koje izvodi preglede. Navedena metoda nije dovoljno pouzdana jer ne odražava u potpunosti stvarno stanje mosta te može rezultirati lošijim odabirom rješenja za sanaciju ili rekonstrukciju. Nažalost, velik problem je što je trenutni sustav ocjenjivanja općenit i formaliziran što onemogućuje postizanje objektivnih i ujednačenih rezultata između različitih ispitivača mostova.

To možemo vidjeti u Tablici 1., gdje je 15 različitih ocjenjivača ocjenjivalo gornji ustroj mosta (Slika 6.) prema različitim kategorijama¹. Smanjenje razlika u postupku ocjene stanja mosta osigurat će veću objektivnost i ujednačenost rezultata [17].

Tablica 1.: Varijacija ocjena pojedinih ocjenjivača u odnosu na srednju vrijednost prilikom ocjenjivanja gornjeg ustroja mosta (Izvor: [17])

Ocjenjivač	Gornji ustroj - MOST 1							
	C.1.1.		C.1.2.		C.2.		C.3.	
	ocjena	odst.	ocjena	odst.	ocjena	odst.	ocjena	odst.
1	4	0,20	4	0,27	4	1,13	4	1,87
2	4	0,20	4	0,27	2	0,87	4	1,87
3	4	0,20	4	0,27	2	0,87	1	1,13
4	4	0,20	4	0,27	3	0,13	2	0,13
5	4	0,20	4	0,27	2	0,87	1	1,13
6	4	0,20	2	1,73	2	0,87	2	0,13
7	4	0,20	4	0,27	2	0,87	2	0,13
8	3	0,80	3	0,73	3	0,13	1	1,13
9	3	0,80	3	0,73	3	0,13	1	1,13
10	4	0,20	5	1,27	4	1,13	5	2,87
11	4	0,20	4	0,27	3	0,13	3	0,87
12	4	0,20	4	0,27	4	1,13	2	0,13
13	3	0,80	3	0,73	3	0,13	1	1,13
14	4	0,20	4	0,27	2	0,87	1	1,13
15	4	0,20	4	0,27	4	1,13	2	0,13
Srednja vrijednost	3,8		3,73		2,87		2,13	
Standardna devijacija	0,41		0,7		0,83		1,3	



Slika 7.: Most s vidljivim znakovima podlokavanja temelja stupa podvrgnut ocjenjivanju (Izvor: [17])

¹ Oznake elemenata mostova koje se vrednuju unutar sustava upravljanja državnim cestama poduzeća Hrvatske ceste. Skupine elemenata kategorizirane su u četiri kategorije (A – prilazi i čunjevi; B – donji ustroj; C – gornji ustroj; D – oprema). Svaka od tih kategorija ima podkategorije koje se odnose na elemente mostova, a za gornji ustroj su to: C.1.1. Glavni nosači, C.1.2. Rasponski sklop, C.2. Prijelazne naprave i C.3. Ležajevi [15]

4.3. Usporedba osnovnih značajki svjetskih reprezentativnih normi za ispitivanje mostova

EN Eurokodovi, doneseni na razini Europske unije [21], čine skup od 10 normi, od EN 1990 do EN 1999, koje pružaju ujednačen pristup projektiranju i izvođenju građevinskih objekata i infrastrukturnih građevina te pokrivaju širok raspon područja, uključujući geotehničke aspekte, otpornost na požar te izvanredna djelovanja poput potresa [22]. Iako se smatraju najnaprednijim svjetskim standardima za građevinske konstrukcije [23], nažalost u njima se ne pokriva područje ispitivanja konstrukcija.

Već smo ranije u radu naglasili važnost ispitivanja mostova, zbog njihove ključne uloge u prometnoj infrastrukturi, ali i zato što su često statički određeni sustavi. Takvi „serijski“ konstrukcijski sustavi, gdje su elementi povezani u nizu prema svojoj funkciji, nemaju rezervnu zalihu nosivosti. Ukratko, slom jednog elementa može dovesti do kolapsa cijelog sustava, što je poznato kao efekt „najslabije karike“ [20].

Međunarodna organizacija za standardizaciju, ISO (eng. *International Organization for Standardization*), u normi ISO 13822:210 postavlja zahtjeve i postupke za ocjenu postojećih konstrukcija, temeljeći se na načelima konstrukcijske pouzdanosti i posljedicama otkazivanja nosivosti. Odnosno, ova norma se bazira na ISO 2394, koja propisuje opće principe pouzdanosti za konstrukcije. Umjesto definiranja specifičnih vremenskih intervala za procjenu stanja pojedinih tipova konstrukcija, norma ističe da je evaluacija nužna u slučaju promjene funkcije uporabe ili produženja radnog vijeka. Također, provjere pouzdanosti trebaju se provoditi uslijed potresa, povećanog prometa ili prema zahtjevima nadležnih tijela, kao i u slučaju strukturnog pogoršanja uzrokovanog vanjskim čimbenicima, poput zamora, korozije ili drugih djelovanja ovisnih o vremenu [24].

Kao što smo spomenuli, Hrvatska nema normu za ocjenjivanje pouzdanosti postojećih konstrukcija. Mnoge države imaju norme koje se odnose samo na ocjenjivanje pouzdanosti cestovnih mostova, poput njemačke DIN 1076, nizozemske NEN 8700, američke AASHTO MBE i kanadske CAN/CSA-S6-06. Austrijske norme ONR 24008 obuhvaćaju cestovne i željezničke mostove, dok švicarske norme SIA 269 pokrivaju cjelokupno područje građevinskih konstrukcija, uključujući cestovne i željezničke mostove. Stoga, SIA 269 i ONR 24008 predstavljaju jedine dostupne norme za proračun postojećih željezničkih mostova, pri čemu se koriste jednaka pravila kao i za cestovne mostove, ali se veća pozornost posvećuje problemu zamora i ocjenjivanju preostalog uporabnog vijeka [20].

U europskim normama ne postoji izravan proračun robusnosti [25], samo se u švicarskim normama spominje ocjenjivanje konstrukcije obzirom na robusnost, propisujući ispitivanje posljedica oštećenja zbog djelovanja okoliša ili izvanrednih djelovanja na stabilnost i nosivost konstrukcije, uz analizu mogućih rizika i odgovarajućih scenarija sloma [20].

Kanadske norme CAN/CSA-S6-06 odnose se na projektiranje, procjenu i obnovu fiksnih i pomičnih mostova. Osim cestovnih, obuhvaćaju i pješачke mostove, bez ograničenja duljine raspona, no ne pokrivaju nužno sve aspekte svakog tipa mosta velikog raspona [26]. Američke norme MBE slične su kanadskim i primjenjuju slična načela ocjenjivanja pouzdanosti, kao i postupke ocjenjivanja opterećenja [20].

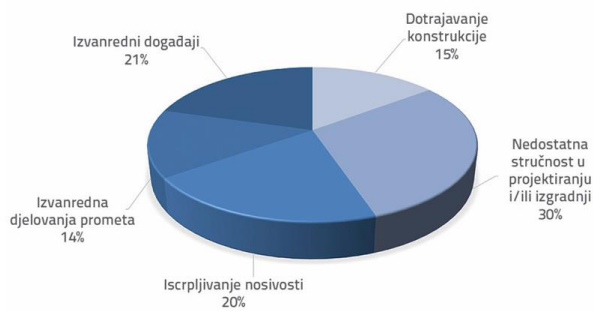
Podaci iz Europe i Sjeverne Amerike upućuju na velika odstupanja u opterećenjima cestovnih mostova, koja uvelike ovisi o gospodarskim čimbenicima pojedine regije ili države. S druge strane, prometna opterećenja željezničkih mostova definirana su na razini cijele Europe i uključuju stvarne vlakove, što olakšava klasifikaciju opterećenja. Kada je riječ o provjeri postojećih mostova, sjevernoameričke norme temelje se na stalnim djelovanjima i dominantnom promjenjivom djelovanju – prometnom opterećenju. U europskim normama mostovi se provjeravaju i za sva ostala promjenjiva djelovanja [20].

U ovom radu specifično su obrađene britanske smjernice za ispitivanje mostova, ne slučajno, jer Ujedinjeno Kraljevstvo zauzima zavidan položaj u Europi kada je riječ o normizaciji koja pokriva širok spektar područja u građevinarstvu. Na primjer, za razliku od većine europskih zemalja, u Ujedinjenom Kraljevstvu postoje čak i službena udruženja forenzičkih inženjera te zakonski definirani postupci za utvrđivanje uzroka otkazivanja konstrukcija. U ostatku Europe, takva udruženja i zakonske norme za forenzičko istraživanje ne postoje, iako postoje osnovne smjernice koje nisu zakonski propisane [25].

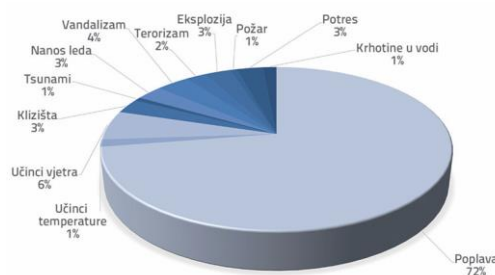
Otkazivanje mostova u svijetu (bez podataka iz Kine i Indije) zbog različitih čimbenika prikazanih na grafovima od Slike 7. do Slike 10. ilustriraju ne samo koliko je njihovo ispitivanje ključno, već i u kolikoj mjeri zanemareno. Čak 30% glavnih uzroka otkazivanja može se pripisati manjku znanja i stručnosti, 15% dotrajalosti konstrukcija, pri čemu su poplave odgovorne za čak 72% tih slučajeva. Zanimljivo, 14% poduzroka povezanih s ljudskim faktorima odnosi se na ispitivanje mostova [25].

Prema ovoj statistici, situacija u Hrvatskoj je zabrinjavajuća jer su mnogi mostovi u dotrajalom stanju, a brojna područja u zemlji često se suočavaju s poplavama. Nažalost, nedostaju adekvatne norme i zakonski propisi za ispitivanje i održavanje konstrukcija. Članak 150. *Zakona o gradnji Republike Hrvatske* propisuje obvezu vlasnika da redovito održavaju građevine kako bi osigurali sigurnost korisnika i spriječili nastalu štetu [27].

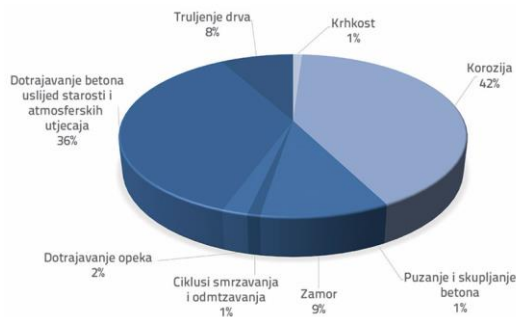
Nažalost, rizik za sigurnost se povećava iz činjenice što se ne prepoznaje potreba za održavanjem dok ne dođe do nekih ozbiljnih incidenata.



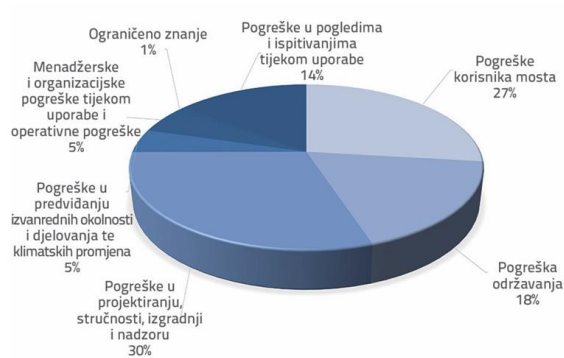
Slika 8.: Glavni uzroci otkazivanja mostova (Izvor: [25])



Slika 9.: Poduzroci otkazivanja – izvanredne pojave (Izvor: [25])



Slika 10.: Poduzroci otkazivanja – dotrajavanje konstrukcije (Izvor: [25])



Slika 11.: Poduzroci otkazivanja – ljudski faktori (Izvor: [25])

4.4. Podjela i učestalost pojedinih pregleda građevinskih konstrukcija prema hrvatskim i njemačkim propisima (normama)

4.4.1. Tehnički propis za građevinske konstrukcije i norma HRN U.M1.046:1984

Prema članku 22. *Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije* [19], pregledi građevinskih konstrukcija su propisani obzirom na vrstu objekta i specifične zahtjeve. Osnovni pregledi moraju se obavljati najmanje jednom godišnje, uz mogućnost češćih pregleda za određene vrste konstrukcija. Njihova svrha je utvrđivanje općeg stanja konstrukcije, uključujući uvid u dokumentaciju i vizualni pregled ključnih elemenata koji su bitni za nosivost i otpornost na požar. Ti pregledi obuhvaćaju spojeve nosivih elemenata, potporne elemente i glavne nosače, čije otkazivanje može ugroziti sigurnost korisnika ili prouzročiti materijalnu štetu.

Glavni pregledi provode se svakih 10 godina za zgrade, a svakih 5 godina za mostove, tornjeve i druge inženjerske građevine. Cilj glavnih pregleda je detaljno utvrđivanje stanja konstrukcije i materijala, uključujući kontrolu temelja, nosive konstrukcije, ležajeva, zaštite od korozije, sustava odvodnje i drenaže, priključaka instalacija, elemenata za sigurnost poput ograda i penjalica, geometrije konstrukcije i otpornosti na požar. Također obuhvaćaju brtvljenje i provjetravanje sandučastih elemenata te kontrolu ugrađene opreme za opažanje i mjerenje ponašanja konstrukcije (monitoring). Pregledi se provode vizualno, mjerenjima i ispitivanjima, uz uvid u dokumentaciju građevine [19].

Ako se pregledom utvrde nedostaci u tehničkim svojstvima građevine, potrebno je dokazati da konstrukcija i dalje ispunjava minimalne zahtjeve propisa. Ako ne ispunjava, treba provesti sanaciju ili je ukloniti [19].

Prema normi HRN U.M1.046:1984 [28], most se smatra ispravnom konstrukcijom ako su ispunjeni sljedeći uvjeti:

- 1) Izmjereni progibi i pomaci su manji ili jednaki teorijskim vrijednostima.
- 2) Izmjereni trajni progibi nakon rasterećenja su manji od:
 - a) 15% maksimalnih mjerenih progiba na istom mjestu za čelične i spregnute mostove,
 - b) 20% mjerenih progiba za mostove od prednapregnutog betona,
 - c) 25% maksimalnih mjerenih progiba za armiranobetonske mostove.
- 3) Širina pukotina kod armiranobetonskih mostova je manja od dozvoljenih, u skladu s tehničkim propisima.

4) Veličine izmjerenih progiba su takve da ne utječu na funkcionalnost ili estetski izgled konstrukcije.

U slučaju da navedeni uvjeti nisu ispunjeni, a trajni progibi su prekoračeni do 25%, potrebno je ponoviti probno opterećenje. Pri tom ponovljenom ispitivanju trajni progibi ne smiju prekoračiti:

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

Ova pravila osiguravaju da se mostovi, čak i nakon određenih nedostataka, mogu smatrati sigurnima nakon dodatnih provjera i ispitivanja.

4.4.2. Njemačka norma DIN 1076

Njemačka norma DIN 1076 [29] odnosi se na ispitivanje građevinskih konstrukcija cestovne infrastrukture. Iako su sveobuhvatne, često su općenite i ne ulaze u specifične detalje o tome što i kako ispitivati. Unutar tih normi propisana su ispitivanja koja se provode u određenim intervalima, a pregledi su podijeljeni na sljedeće vrste:

- **H1 – glavni pregled** (njem. *Hauptprüfung 1*): Glavni pregledi provode se prije predaje građevine nadležnoj cestovnoj upravi. Ovaj pregled uključuje detaljnu provjeru stanja konstrukcije kako bi se osigurala njena ispravnost prije puštanja u uporabu.
- **H2 – glavni pregled** (njem. *Hauptprüfung 2*): glavni pregled koji se provodi prije isteka jamstvenog roka građevine. Nakon toga, **glavni pregledi (H)** provode se svakih 6 godina te obuhvaćaju temeljite kontrole nosivih dijelova konstrukcije, uključujući temelje, ležajeve, spojeve i druge ključne elemente.
- **E – jednostavni pregled** (njem. *Einfache Prüfung*): jednostavni pregledi provode se svake 3 godine nakon glavnog pregleda. Ovi pregledi su prošireni vizualni pregledi bez upotrebe uređaja i opreme, ali, ako se pojave sumnje, mogu postati opsežniji od samih glavnih pregleda
- **S – specijalni pregled** (njem. *Sonderprüfung*): ovi se pregledi provode u posebnim slučajevima, poput prirodnih katastrofa, nesreća ili kada inspekcija sugerira potrebu za dodatnim provjerama. Također, mogu biti dio specifične analize oštećenja ili u svrhu ponovne analize konstrukcije.

- **V - pregled** (njem. *Prüfungen nach besonderen Vorschriften*): pregledi koji se provode prema posebnim propisima, posebno za mehaničke i električne sustave konstrukcija, poput mostova s pokretnim dijelovima ili prometnih signalizacija.

5. BRITANSKE SMJERNICE ZA ISPITIVANJE MOSTOVA [30]

Odluka Europske unije iz 1988. godine o implementaciji standarda vozila od 40 tona izazvala je paniku u redovima britanskih inženjera građevinarstva zbog sumnje da će kod velikog broja mostova biti utvrđena nedovoljna nosivost, ili će biti potrebna izdašnija sredstva za ojačanje takvih mostova. Nadalje, velik broj mostova su se činili zadovoljavajućim za uobičajen promet, bez znakova oštećenja, ali su svejedno pali na procjenama. Drugim riječima, posebno kod starijih cestovnih i željezničkih mostova, teško je procijeniti rezerve nosivosti uobičajenim analitičkim metodama. Stoga je Britanski odbor za zgrade i konstrukcije (eng. *Institution's Building and Structures Board*) osnovao pododbor za ispitivanje mostova (eng. *The National Steering Committee for Load Testing Bridges*) koji je izradio autoritativne smjernice (eng. *Guidelines for the supplementary load testing of bridges*), odnosno dokument koji daje savjete i upute za uporabu dopunskog ispitivanja opterećenjem u svrhu procjene nosivosti postojećih cestovnih i željezničkih mostova, donosi okvir za odlučivanje kada se most mora podvrgnuti ispitivanju te osigurava sigurnu, dosljednu i točnu interpretaciju rezultata. Također, dokument sadrži informacije o vrsti i količini mjerne opreme, specijaliziranim tehnikama i metodama ispitivanja te analizira rizik ispitivanja uključujući javnu sigurnost i ekonomski kontekst.

5.1. Oblici ispitivanja opterećenjem

Britanske smjernice uglavnom se odnose na ispitivanje dopunskim opterećenjem svih tipova konstrukcija, ali glavna primjena je za starije konstrukcije mostova malih i srednje velikih raspona. Ne baziraju se na specifičnim vrstama materijala, ali su pojedine metode i tehnike ispitivanja prilagođene pojedinim vrstama. Nadalje, posebno se napominje kako smjernice ne vrijede za lučne mostove od opeke jer se procjena nosivosti uglavnom temelji na empirijskim metodama, iako su navedeni neki savjeti za praćenje stanja takvih konstrukcija.

5.1.1. Dijagnostičko ispitivanje

Red veličine opterećenja koja se koriste u ovim ispitivanjima je takav da osigurava zadovoljavajuće i mjerljive odgovore od konstrukcije bez da izazovemo trajno oštećenje na konstrukciji. Stoga, mala je vjerojatnost da će takva opterećenja premašiti ona koja se formiraju na konstrukciji pri eksploataciji uobičajenim prometom. Ovim testom ispituju se

gornji dijelovi konstrukcije mosta, a ne podkonstrukcije ili temelja, iako ti dijelovi mogu biti međusobno povezani kod nekih oblika konstrukcija. Nadalje, ova se ispitivanja provode za praćenje stanja onih konstrukcija kod kojih je ustanovljeno propadanje, odnosno degradacija stanja ili kod onih konstrukcija koje su prošle kroz strukturne popravke i ojačanja. Kao što i sam naziv nagovještava, ova ispitivanja dopunjuju analitičke metode procjene koje se baziraju na proračunima i primjenjenih normi. Rezultati ovih testova pružaju uvid u ponašanje konstrukcije pod djelovanjem opterećenja i kako se ona prenose među različitim konstrukcijskim elementima te služe za modificiranje matematičkog modela kako bi opisivao konstrukciju na što precizniji i realniji način. Ovi testovi se ne koriste striktno za određivanje kapaciteta konstrukcije, već su jako važan segment za cjelokupan postupak procjene.

5.1.2. Ispitivanje uporabljivosti

Ispitivanje uporabljivosti nije nam važno u kontekstu ovog rada jer se uglavnom koristi za novoizgrađene mostove, a nama je pozornost usmjerena na postojeće mostove. Inače, ovo ispitivanje koristimo kada želimo usvojiti znanja o novim materijalima ili novim konceptima dizajna. Kao i kod dijagnostičkog ispitivanja, rezultati ispitivanja se koriste za potvrdu ili izmjenu teorijskih pretpostavki, ali razina opterećenja je mnogo veća i jednaka je razini opterećenja za granično stanje uporabljivosti. Ovo se ispitivanje rijetko koristi u Ujedinjenom Kraljevstvu zbog visokog stupnja razvijenosti modernih metoda analize.

5.1.3. Ispitivanje nosivosti

Ispitivanje nosivosti, kao i dijagnostičko ispitivanje, koristi se za procjenu sigurnih kapaciteta nosivosti. Glavna razlika je u tome što se rezultati ovih ispitivanja koriste izravno za određivanje sigurnog kapaciteta nosivosti, bez potrebe za daljnjim teorijskim analizama. U ovim ispitivanjima koristi se znatno veća razina opterećenja nego u drugim oblicima ispitivanja, što povećava rizik od trajnog oštećenja. Opterećenje se na konstrukciju nanosi u inkrementima do unaprijed određenog maksimuma ili dok konstrukcija ne pokaže znakove popuštanja. U trenutku pisanja ovog rada, ovo ispitivanje je predmet revizije u Ujedinjenom Kraljevstvu.

5.1.4. Ispitivanje dinamičkim opterećenjem

U ovom ispitivanju koriste se ambijentalne ili prisilne vibracije. Rezultati, koji su obično mjera krutosti, a ne čvrstoće, koriste se za potvrdu proračuna ili se njihovom usporedbom u vremenu može poslužiti za praćenje bilo kakvog pogoršanja ili oštećenja konstrukcije. Ova ispitivanja su posebno korisna za konstrukcije koje su osjetljive na dinamička opterećenja. Nadalje, važno je napomenuti da vozila na mostu mogu generirati dinamička opterećenja, ali to neće uvijek izazvati dinamički odgovor konstrukcije.

5.2. Postupak procjene

Procjena konstrukcije važeća je samo u vrijeme kada je provedena i ne uzima u obzir daljnja pogoršanja. Također, mora se odrediti razina sigurnosti u postupku procjene zbog nesigurnosti u određivanju maksimalnih opterećenja i zbog budućih pogoršanja konstrukcije.

Mostovi u Ujedinjenoj Kraljevini se procjenjuju primjenom principa graničnog stanja. Budući da se procjene obavljaju zbog sigurnosnih razloga, a ne zbog osiguravanja trajnosti, uobičajena je primjena graničnog stanja nosivosti. Iznimke su zidane konstrukcije i konstrukcije od lijevanog željeza (budući da je krhki materijal postoji opasnost od iznenadnog sloma).

Poznavanje točnih svojstava materijala ključno je za odluku o provođenju ispitivanja opterećenjem, osobito u slučaju materijala sklona krhkom lomu. Ova informacija je važna za analitičke postupke, ali nije presudna za sam postupak ispitivanja i interpretaciju rezultata.

5.3. Mostovi od kamenih i betonskih lukova

5.3.1. Problematika lučnih mostova

Ujedinjeno Kraljevstvo Velike Britanije i Sjeverne Irske bogato je lučnim mostovima, zbog čega njihove smjernice za ispitivanje mostova stavljaju poseban naglasak na ove tipove konstrukcija. Zidani lučni mostovi su konstrukcije s ispunom, a unutarnje dimenzije lukova, kontrafora i potpornih spandrelnih zidova često nisu dostupne. Nadalje, interakcija između zidanog materijala poput kamenih blokova i ispune nije u potpunosti razumljiva. Zbog toga je teško primijeniti metode koje se baziraju na empirijskim procjenama, kao što je

dijagnostičko ispitivanje, jer je teško odrediti kako će most reagirati na dodatno opterećenje tijekom ispitivanja.

Postoje razni napredni računalni programi koji se baziraju na metodi konačnih elemenata, koji mogu poboljšati procjenu kapaciteta nosivosti mostova, međutim, dijagnostička ispitivanja neće doprinijeti toj procjeni.

Problem kamenih lukova je njihova složena struktura, imaju slaba i kritična mjesta koja bi mogla pretrpjeti značajna oštećenja prilikom ispitivanja. Ozbiljni problemi nastaju kada dođe do pucanja veza između komponenata, što omogućuje tim dijelovima da se ponašaju kao neovisni entiteti. Na primjer, pod velikim opterećenjem, luk se može odvojiti od bočnih potpornih zidova ili puknuti kroz sami luk. Budući da je većina kamenih lukova povezana samo slojem morta, smicanje tih slojeva može uzrokovati odvajanje.

Ovi problemi mogu se pojaviti i pri opterećenjima koja su znatno niža od maksimalnih, međutim, i u takvom stanju većina kamenih lučnih mostova mogla bi dobro funkcionirati. Ipak, nije pametno provoditi ispitivanja pri razinama opterećenja koje bi mogla uzrokovati pukotine ili oštećenja koja bi mogla ugroziti dugotrajnu upotrebljivost i nosivost mosta.

Istraživanja željezničkih lučnih mostova pokazala su da lukovi mogu vrlo brzo doživjeti otkazivanje nosivosti ukoliko su izloženi stalnim opterećenjima koja uzrokuju naprezanje jednako otprilike polovici maksimalnog naprezanja koje zidani materijal može izdržati. Istraživanja su provedena zbog sve učestalijih oštećenja na lukovima koji su izloženi teretnim vlakovima s velikim osovinskim opterećenjem od 25 tona.

Također je utvrđeno da se vijek trajanja mosta dodatno smanjuje kada je zidani materijal zasićen vodom. To je očekivano jer pri maksimalnom opterećenju lukovi stvaraju zglobne mehanizme s pukotinama i lomljenjem zidanog materijala, odvajanjem prstenova i velikim pomacima svoda. Ispitivanja otkazivanja nosivosti pokazuju da ovi problemi nastaju već pri opterećenjima manjim od onih potrebnih za potpuni kolaps mosta. Zaključno, ako uobičajeni promet uzrokuje takva opterećenja, otkazivanje nosivosti je vjerojatno.

5.3.2. Ispitivanje zidanih lučnih mostova

Preporučuje se da se ispitivanja opterećenjem na mostovima sa zidanim lukovima provode tek nakon što se najprije izmjere naprezanja koja postoje zbog vlastite težine mosta. Ova mjerenja se vrše pomoću specijalnih testova koji se provode pomoću plosnatih preša. S daljnjim ispitivanjima može se krenuti tek nakon analize rezultata takvih testova. Istraživanja su pokazala da su naprezanja često veća u petama luka, a manja nego što se očekivalo na vrhu luka. To zapravo znači da su se upornjaci mosta malo raširili pod

djelovanjem vlastite težine, pa se most ponaša kao trozglobni luk. Mnogi se lukovi nalaze u takvom stanju zbog prvih deformacija koje nastupaju nakon što se uklone podupirači nakon gradnje.

Ako nalazi inspekcije utvrde da luk ne trpi progresivno povećanje oštećenja i da su naprezanja od vlastite težine unutar prihvatljivih granica, tada se lučni svod može ispitivati pod opterećenjem koje odgovara postojećem prometnom opterećenju. Ako mjerenja pokažu da ukupna naprezanja u nekim dijelovima luka dosežu otprilike polovicu maksimalnog naprezanja koje zidani materijal može izdržati, postoji velik rizik od funkcionalnog otkazivanja nosivosti. Ipak, kratkoročno gledano, konačna nosivost mosta vjerojatno bi trebala biti zadovoljavajuća.

5.3.3. Ispitivanje betonskih lučnih mostova

Mnogi problemi koji se odnose na zidane lukove nisu prisutni kod betonskih lukova. Betonski lukovi mogu imati slične nedostatke kao zidani lukovi, ali zbog količine i rasporeda armature, općenito se ponašaju drugačije. Glavna razlika je u tome što betonski lukovi nisu toliko osjetljivi na pomicanje tla, i ako nisu projektirani kao trozglobni luk, u svodu betonskih lukova vjerojatno će se pojaviti pukotine. Betonski lukovi su obično otpornije konstrukcije, pa se kod ispitivanja naglasak stavlja na specifične detalje, a ne na cjelokupnu konstrukciju.

5.3.4. Primjeri zidanih lučnih mostova u Republici Hrvatskoj

Kao što se Ujedinjena Kraljevina može pohvaliti svojim zidanim lučnim mostovima, tako i Hrvatska posjeduje ponosnu zbirku impresivnih primjera ovakvih mostova koji ukrašavaju njezin krajolik već stoljećima i sastavni su dio kulturnog i arhitektonskog identiteta zemlje.

Najreprezentativniji primjer zidanog lučnog mosta u Hrvatskoj, a prema mnogima i jedan od najljepših u zemlji je most Milivoja Frkovića preko rijeke Kupe u Sisku [31]. Frkovićev most je građen u razdoblju od 1927. do 1934. godine i obuhvaća četiri elegantna luka preko rijeke, uz dodatno tri luka nad inundacijama. Izgrađen je od skladne kombinacije opeke prepeke i prirodnog kamena, a estetskoj vrijednosti i jedinstvenom izgledu pridonosi pažljivo osmišljeni detalji poput vijenca, arhivolta, ograda i stupova [2].

Osim mosta u Sisku, još jedno izvanredno postignuće Milivoja Frkovića je most preko rijeke Like u Kosinju. Izgradnja mosta započela je 1929. godine, a u prosincu 1936. godine pušten je u promet. Most je ukupne dužine 70 metara, uključujući upornjake, dok je širina između kamenih parapeta 5,5 metara [32]. Iznad korita rijeke Like izdižu se tri skladna polukružna

otvora, svaki dužine 18 metara. Iznad stupova su izvedeni kružni štedni otvori, koji se odlično uklapaju u cjelokupnu vizuru mosta i olakšavaju protok za vrijeme poplava [2].



Slika 12.: Most preko rijeke Kupe u Sisku (Izvor: [33])



Slika 13.: Most preko rijeke Like u Kosinju (Izvor: [34])

Ako želimo zaroniti dublje u povijest mostogradnje u Hrvatskoj, možemo krenuti povijesnim cestama od Karlovca prema moru. Vozeći se Karolinom, možemo stići do jednog od najstarijih spomenika hrvatske mostogradnje koji se i dalje koristi u prometu, a riječ je o mostu preko rijeke Dobre u naselju Novigrad na Dobri, u blizini bajkovitog starog dvorca. Ukupna duljina mosta iznosi 122 metra, dok je širina nešto veća od 4 metra. Kolnik mosta, zaštićen masivnom kamenom ogradom, blago se uzdiže od obala prema sredini rijeke. Čvrsti

zidani piloni nose osam glavnih polukružnih svodova, a na početku mosta, na desnoj obali, nalaze se još dva manja segmenta svoda [35]. Ovim mostom je 1732. godine prometno povezana unutrašnjost Hrvatske s Hrvatskim primorjem [36], a zahvaljujući Svjetskom prvenstvu u reliju WRC (eng. *World Rally Championship*), slike mosta i obližnjeg starog grada obišle su svijet u više od 150 zemalja [37].



Slika 14.: Most u Novigradu na Dobri (Izvor: [38])

Ako se prema moru umjesto Karolinom uputimo Jozefinom, naići ćemo na impresivan dvokatni kameni most preko rijeke Tounjčice, koji je značajan spomenik inženjerstva Vojne krajine. Ovaj most, poznat kao Josipov most, nazvan je po rimskom caru Josipu II., a na mostu se nalazi spomen-ploča koja opisuje njegov dolazak 3. svibnja 1775. godine i njegovu odluku o izgradnji novog puta [35]. Ovaj most jedinstven je ne samo u Hrvatskoj, već i u ovom dijelu Europe, kao jedini dvokatni most s kipovima i spomen-pločama, čime predstavlja neponovljiv spomenik hrvatske mostogradnje [39].



Slika 15.: Most u Tounju preko rijeke Tounjčice (Izvor: [40])

5.4. Uvjeti dijagnostičkog ispitivanja

Britanske smjernice određuju kada je, odnosno kada nije dijagnostičko ispitivanje prikladna, opravdana i korisna opcija u postupku ocjene stanja mosta.

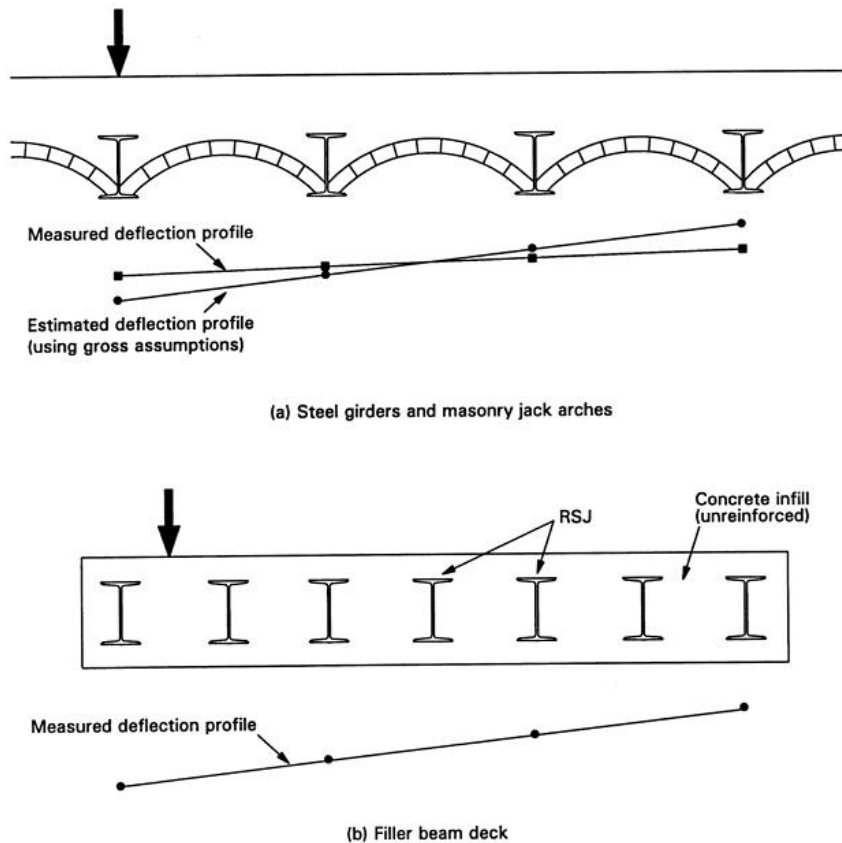
Stoga, ono se ne preporučuje kada postoje nedostaci koji utječu na posmičnu nosivost oslonaca, jer je posmični lom iznenadan i nastupa bez prethodnih upozorenja. Maksimalne posmične sile javljaju se na osloncima ili u njihovoj blizini, a na tim mjestima su iznosi progiba i rotacija mali, čak i ako su ležajevi mekani. Pri visokim razinama opterećenja, vrijednosti progiba i rotacija bili bi mali, stoga postoji tehnološko ograničenje jer ne postoji metoda kojom možemo jednostavno odrediti posmična naprezanja ispitivanjem u određenom presjeku konstrukcije. Jedan od faktora koji može utjecati na izvedivost provođenja ispitivanja je i količina opterećenja koja je potrebna za postizanje zadovoljavajućih rezultata, a problem je izraženiji kod mostova većih raspona. Pri odluci o provođenju ispitivanja opterećenjem potrebno je provesti studiju izvedivosti, a u nastavku su navedeni neki savjeti.

5.4.1. Tipovi konstrukcija i način opterećenja

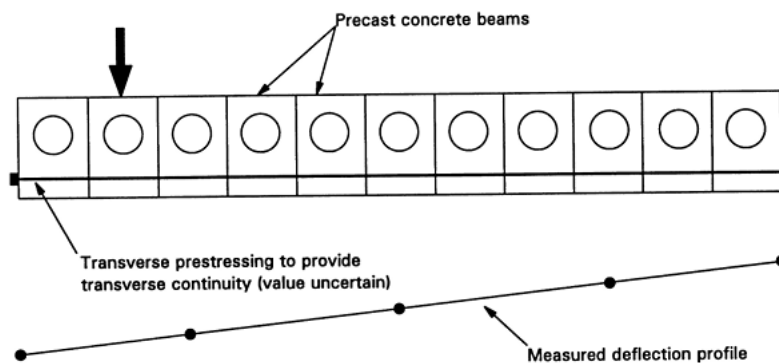
5.4.1.1. Poprečna raspodjela opterećenja

Vrlo je teško izračunati doprinos poprečnih elemenata u poprečnoj krutosti kod starijih tipova konstrukcija s lučnim svodovima od zidane opeke ili metalnim pločama između uzdužnih nosača, stoga je ispitivanje opterećenjem jedini način na koji možemo odrediti krutost za daljnju analizu. Sličan problem imamo kod mostova, gdje se gornji ustroj sastoji od zasebnih uzdužnih nosača, kod kojih je poprečna raspodjela opterećenja osigurana poprečnim prednapinjanjem ili nekom vrstom posmične veze. Ispitivanje opterećenjem bi bilo prikladno kada moramo odrediti raspodjelu poprečnih opterećenja, a istodobno nije

moгуće odrediti poprečnu krutost i učinkovitost sredstva koje osigurava poprečni kontinuitet. Primjeri su prikazani na Slici 16. i 17.



Slika 16.: Primjeri gdje su procjene poprečne krutosti nejasne – čelične grede i lukovi od opeke (gore) te čelične grede s betonskom ispunom (dolje) (Izvor: [30])

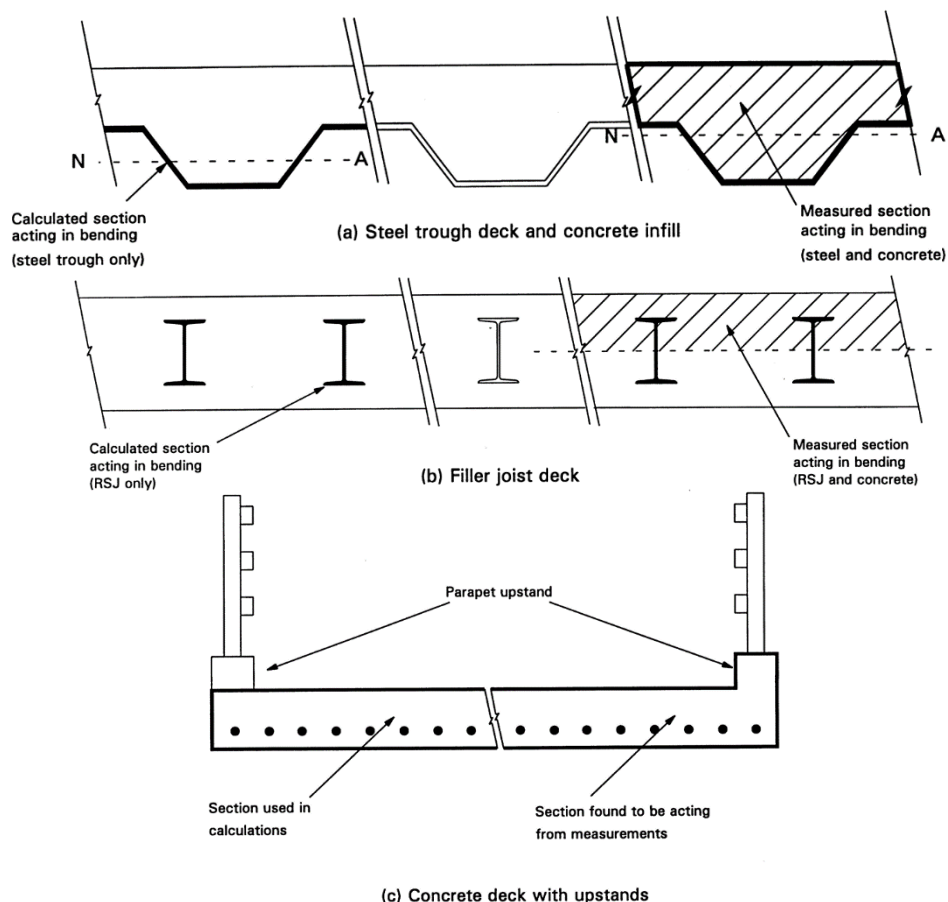


Slika 17.: Primjeri gdje su procjene poprečne krutosti nejasne – prednapregnute betonske grede (Izvor: [30])

5.4.1.2. Kompozitno djelovanje

Kod čeličnih koritastih ploha ispunjenih betonom, bez prepoznatljivog oblika spoja na smicanje, teško je izračunati koliko trenje između betona i čelika potiče stupanj kompozitnog djelovanja. Također, kod betonskih mostova kod kojih su susjedne betonske grede prekrivene slojem betona izvedenim na licu mjesta i ukoliko nema fizičkih spojeva, primjerice posmičnih veza između greda i betonske ispune izvedene na licu mjesta, teško je procijeniti u kolikoj mjeri hrapavost dodirne površine utječe na kompozitno djelovanje. Kako bi se kvantificirao stupanj kompozitnog djelovanja, može se pratiti obrazac deformacija (naprezanja) duž vertikalnog presjeka konstrukcije dok se primjenjuje opterećenje. Na Slici 18. je prikazano:

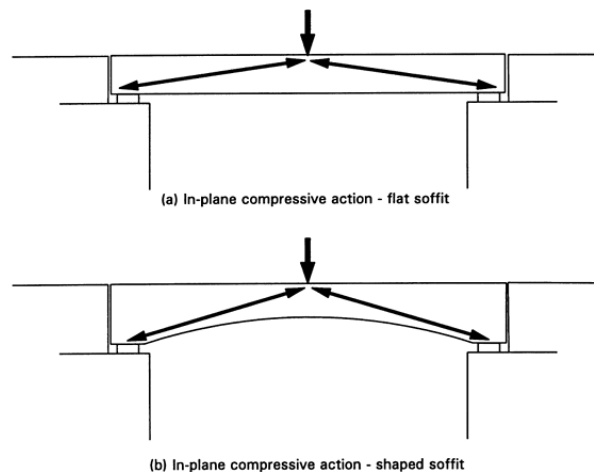
- betonska ispuna također sudjeluje u savijanju zajedno sa čeličnim koritom, a ne samo korito, kako je prethodno pretpostavljano
- projektirano je da samo čelični nosači sudjeluju u savijanju, no i beton također ima ulogu
- kod betonske ploče s parapetima, parapet također pridonose nosivosti, a ne samo ploča



Slika 18.: Primjeri neprojektiranog kompozitnog djelovanja (Izvor: [30])

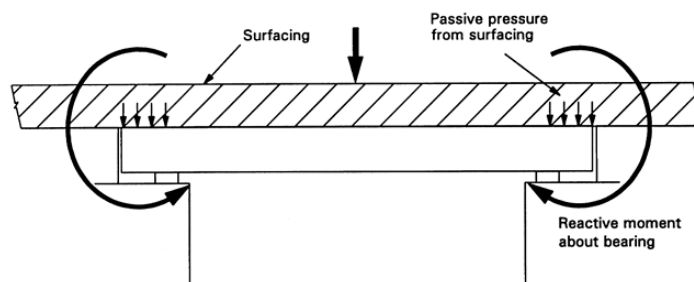
5.4.1.3. Rubni uvjeti

Za jednostavno oslonjene konstrukcije pretpostavljamo samo vertikalno ograničenje i da se trenje u ležajevima može zanemariti. Na Slici 19. prikazano je da zakrivljeni podgled, kada se primijeni vertikalno opterećenje, omogućuje bolju raspodjelu tlačnih sila, jer se sile prenose duž zakrivljenih linija, čime se smanjuju naprezanja na krajevima konstrukcije. Suprotno tome, ravni podgled ne pruža dodatnu otpornost osim one koja dolazi iz samih oslonaca. Površinski sloj, poput asfalta ili betona, koji prekriva mostnu konstrukciju, također može pružiti dodatnu otpornost. Ovaj sloj djeluje kao pasivna sila koja pomaže stabilizirati most pod opterećenjem. Kada se primijeni vertikalno opterećenje, površinski sloj može pružiti otpor pomicanju i rotaciji, stvarajući pasivni pritisak koji djeluje suprotno deformacijama mosta (Slika 20.). Ispitivanje opterećenjem nam daje mogućnost za kvantifikaciju takvih efekata. U studiji izvedivosti naglašava se potreba za identifikacijom značajki i elemenata konstrukcije koji imaju potencijal za povećanje procijenjene nosivosti.



Slika 19.: Tlačno djelovanje u ravni: prijenos sila obzirom na oblik podgleda mosta (eng.

soffit) (Izvor: [30])



Slika 20.: Utjecaj pasivnog pritiska kontinuiranog površinskog sloja na stabilizaciju mosta:

dodatna otpornost zbog trenja i reaktivnih momenata (Izvor: [30])

5.4.1.4. Elastična upetost čvorova

Kod čeličnih mostova s tri glavne grede i poprečnim gredama u dizajnu, često pretpostavljamo da su spojevi na vanjskim gredama zglobovi, a spoj preko središnje grede je fiksiran. U ovom slučaju, ispitivanje opterećenjem moglo bi upućivati na red veličine bilo koje fiksacije na slobodnom kraju i omogućiti preciznije određivanje već izračunate otpornosti poprečne grede na savijanje.

5.4.1.5. Poprečno stlačivanje

U slučaju koncentriranog opterećenja na betonskoj ploči na tipu mosta sa gredama i pločama, mogu se generirati tlačne sile u ravnini koje će, uz uobičajenu savojnu i posmičnu otpornost, pružiti dodatan otpor na opterećenje. Ovaj učinak se može ispitati opterećenjem i u određenoj mjeri kvantificirati. Ukoliko je ukupna nosivost konstrukcije takva da podnosi lokalna opterećenja, tada bi ispitivanje opterećenjem bilo ograničeno na to područje i provodilo bi se drugačije od globalnog ispitivanja.

5.5. Metode nanošenja opterećenja

Zahtjevi poput odabira pozicije opterećenja, raspodjela opterećenja u uzdužnom ili poprečnom smjeru, primjene globalnih ili lokalnih opterećenja, ili njihove kombinacije, određuju se u okviru studije izvedivosti, što će utjecati na odabir prikladne metode nanošenja opterećenja.

Postoji mnogo metoda nanošenja opterećenja, a mnoge od njih su preskupe i prekompleksne za praktičnu primjenu na terenu. U nastavku slijedi pregled pojedinih metoda s pripadajućim prednostima i nedostacima.

5.5.1. Mrtvi teret (eng. *Dead load*)

Mrtvo opterećenje ili teret blokova (eng. *Kentledge*) koriste se kao koncentrirana ili distribuirana opterećenja na pločniku mosta. Nedostatak je što blokovi kada se postave na pločnik kao distribuirana opterećenja mogu u nekim slučajevima izazvati učinak očvršćivanja konstrukcije. Nadalje, njihovo postavljanje i uklanjanje je spor proces.

Pri testiranju malih mostova, blokovi se mogu pridržati na okviru koji premošćuje konstrukciju, slično kao ispitivanje pilota. Primijenjena opterećenja mjere se dozom za mjerenje sile ispod dizalice. Prednost ove metode je što se opterećenje može brzo ukloniti oslobađanjem pritiska dizalice.

Druga mogućnost je da nosivi okvir bude dizajniran na način da s jednom od svojih potpornih reakcija pruži potrebnu konfiguraciju opterećenja. U tom slučaju bi jedna potpora bila pozicionirana izvan mosta, dok bi druga, koja sadrži opterećene stanice, bila pozicionirana na odgovarajućem mjestu na mostu. Nedostatak ove metode je što se opterećenje ne može brzo ukloniti. Također, potpore koje nisu na mostu mogu uzrokovati preopterećenje nasipa što kod nekih tipova mostova može utjecati na ponašanje pločnika.

U slučajevima kada se nanosi koncentrirano opterećenje nosivim okvirima, važno je da se ne zanemari stabilnost takvog sustava.

5.5.2. Vodene vreće

Pri testiranju mrtvim teretom mogu se koristiti fleksibilne vodene vreće.

Prednosti ovih vreća su što su lako prenosive kada su prazne, omogućuju ravnomjernu raspodjelu opterećenja kada su postavljene na pločnik, i mogu se postepeno puniti tako da nema naglog porasta opterećenja. Opterećenje se mjeri pomoću instrumenta za mjerenje protoka koji je spojen u liniji s opskrbnom pumpom. Metoda ispitivanja vodenim vrećama je idealna kada se želi odrediti utjecaj naprezanja na pojedine konstrukcijske elemente zbog velikog ravnomjerno raspoređenog opterećenja. Prikladne su za mostove iznad rijeka.

Nedostatak ove metode je što punjenje vreća, čak i sa puno snažnijim pumpama, može trajati predugo. Iako je to navedeno kao prednost, ponekad ipak može biti pretjerano. Također, potrebna je velika količina dostupne vode, za koju je potrebna dozvola za ispušavanje. Nadalje, struktura mora biti ravna kako bi se izbjegla neravnomjerna raspodjela opterećenja.

Ovisno o namjeni, postoji više vrsta koje su navedene u nastavku.

a) spremnici s pravokutnom bazom: Vreće imaju pravokutnu ili kvadratnu bazu, što podsjeća na jastuk ili vodeni madrac. Kada su napunjene vodom, mogu biti visoke pola metra. Neki dizajni omogućuju slaganje vreća jedna na drugu, međutim, preporučuje se samo jedan dodatan sloj.

b) fleksibilni spremnici koji rade po principu fleksibilne brane:

Spremnici s pravokutnom ili kvadratnom bazom otvoreni su na vrhu. Mogu biti dizajnirani s kapacitetom do 100 tona. Ravnomjerno opterećenje koje stvaraju spremnici ovisi od dubini vode, a kod nekih dizajna može biti dubine 2,50 metara. Na taj način može se formirati ravnomjerno raspoređeno opterećenje od 24 kN/m².

c) viseće vodene vreće: Ove vreće namijenjene su da vise s konstrukcije mosta jer na taj način predstavljaju koncentrirane sile u specifičnim točkama. Primjena ovih vreća može biti ograničena kod nekih mostova gdje vješanje vreća može biti alternativa opterećenjima koja se primjenjuju na razini pločnika. Ovo ispitivanje se može primijeniti za čelične rešetkaste mostove ili za željezničke mostove otvorenog tipa, odnosno bez pločnika.

5.5.3. Sustavi sa sidrenjem u tlu ili stijeni (eng. *Jacking systems reacting against ground or rock anchors*)

U ispitivanju konstrukcija mogu se koristiti sustavi koji se upiru u tlo ili stijenu u kombinaciji s prednapinjajućim hidrauličkim dizalicama i čeličnim testnim sustavima kako bi se formirala vrlo velika opterećenja za ispitivanje mostova do sloma, stoga ova metoda nije praktična za dijagnostičko ispitivanje.

Nedostaci su što su potrebni povoljni uvjeti na gradilištu za instalaciju sidrišta po prihvatljivoj cijeni, i za svaki most se zahtijeva projektiranje specijalnog sustava. Ovi sustavi imaju sposobnost brzog generiranja visokih opterećenja te lako može doći do narušavanja sigurnosti ukoliko dođe do pogreške, stoga ovo ispitivanje moraju vršiti specijalizirani izvođači.

5.5.4. Specijalno jednoosno priključno vozilo (eng. *HB single-axle trailer*)

Ova testna prikolica (Slika 21.) može simetrično oko svoje osovine nositi posebne betonske blokove (eng. *Kentledge*), omogućujući postavljanje opterećenja u inkrementima do 45 tona. Prikolica također ima posebne cijevne produžetke koji omogućuju zahtijevanu udaljenost prikolice od vučnog vozila, kako bi se osiguralo da se tijekom ispitivanja vučno vozilo ne nalazi na mostu. Važno je napomenuti da se prikolica na lokaciju dovozi u neopterećenom stanju, te da je potrebno dodatno transportno sredstvo za betonske blokove, produžetke, dizalice i svu ostalu opremu.



Slika 21.: Specijalno jednoosno priključno vozilo za vrijeme ispitivanja odvodnog kanala

5.5.5. Natovarena vozila

Natovareni kamioni najčešća su metoda ispitivanja mostova. Obično se koriste četveroosovinski kamioni za šljunak mase od 30 do 32 tone, koji se nakon punjenja važu. Prednost opterećenja vozilima je u tome što se opterećenje može lako primijeniti i premjestiti na različite pozicije na konstrukciji. Važno je napomenuti da ako mostovi nisu ravnih površina ili imaju lošu oblogu, opterećenja na kotačima mogu biti neujednačena i najbolje je mjeriti ih na mjestu opterećenja pomoću prenosivih vaga. Međutim, to može biti previše dugotrajno za realizaciju osim u slučaju malog broja opterećenih pozicija.

5.5.6. Ispitivanje željezničkim vozilima

Lokomotive se mogu koristiti kao statička ili dinamička opterećenja. Pobude koje mogu izazvati dugi vlakovi važne su za mjerenje prirodnih frekvencija i prigušenja. Određivanje težine lokomotiva može biti prilično zahtjevno jer vage za željeznička vozila nisu tako česte u sustavu, iako su mase pojedinih lokomotiva, primjerice električnih, uglavnom poznate.

5.6. Mjerni instrumenti

Za postizanje zadovoljavajućih rezultata, važni su ispravan tip, količina i lokacija instrumentacije koja se koristi na konstrukciji tijekom ispitivanja. Prilikom odabira instrumentacije, važno je pažljivo analizirati odgovara li ona očekivanom rasponu mjerenja. Primjerice, mjerenje malih pomaka može biti otežano utjecajem temperature. Cilj dijagnostičkog ispitivanja je kvantificirati već poznati efekt koji bi mogao biti koristan za procjenu. U takvim slučajevima, potrebna instrumentacija može biti vrlo jednostavna.

5.6.1. Mjerenje pomaka

Instrumentacija koja se koristi u dijagnostičkom ispitivanju mora biti sposobna za mjerenje malih pomaka. Najčešće se koriste potenciometerski pretvornici, kao što su rotacijski ili linearni potencimetri, te LVDT (eng. *Linear Variable Differential Transformer*), tj. linearni varijabilni diferencijalni transformator, ili mjerači s kazaljkom koji se ručno očitavaju.

Ovi uređaji mogu biti postavljeni na neovisan stalak ili skelu, a mogu biti montirani izravno na konstrukciju, ili se senzori mogu povezati s podlogom pomoću vertikalne veze ostvarene invar žicama. Invar žice koriste se zbog minimalnog utjecaja temperaturnih promjena, a moraju biti zategnute i kratke kako bi se spriječile oscilacije uzrokovane vjetrom.

U željezničkoj industriji razvijen je sustav za brzo i ekonomično mjerenje pomaka na mostovima, koji se koristi za dodatna ispitivanja radi utvrđivanja ponašanja mostnih ploča, kao i za redovito praćenje u svrhu održavanja. Ovaj sustav koristi posebno dizajnirane teleskopske stupove za mjerenje pomaka mostova. Tri stupa se koriste kako bi se dobila točna mjerenja pomaka u odnosu na oslonce, a stupovi se postavljaju pneumatski, što omogućuje jednostavnu instalaciju. Osim toga, postoji i mobilni sustav za mjerenje deformacija, MST (eng. *Mobile Strain Transducer*), koji može koristiti identičan sustav bilježenja podataka kao i teleskopski stupovi.

Pomaci se mogu mjeriti i na druge načine, poput elektroničkih libela, laserskih tehnika i fotogrametrije. Dok su neke od ovih metoda učinkovitije od drugih, neke će doživjeti daljnji razvoj u budućnosti. Primjerice, mnogi optički sustavi, poput laserskih teodolita, mogu imati problema s preciznim mjerenjima zbog atmosferske distorzije.

5.6.2. Mjerenje naprezanja

Prilikom odabira instrumenata za mjerenje naprezanja, važno je uzeti u obzir nekoliko faktora. Prvo, važna je vrsta materijala konstrukcije koja se ispituje, jer se instrumenti biraju ovisno o tome je li riječ o betonu, čeliku ili nekom drugom materijalu. Vibrirajući žični mjerni uređaji VW (eng. Vibrating Wire Sensors) i prijenosni komparatori „*demec*“ (eng. Demountable Mechanical Gauges) koriste se za betonske i čelične konstrukcije, dok se elektro – otporni senzori ERS (eng. Electro-Resistive Strain Gauges/Sensors) uglavnom koriste za metalne konstrukcije. Nadalje, izbor instrumenata ovisi o vrsti mjerenja (statička ili dinamička) i prostoru dostupnom za montažu. Na primjer, VW mjerači se koriste samo za statička ispitivanja jer su njihova očitavanja diskretna i ne mogu pratiti brze promjene naprezanja koje se javljaju pri dinamičkim opterećenjima poput vibracija i prolaza vozila.

Oprema „*demec*“ mjerača je relativno jednostavna, robusna i jeftina za uporabu. Pogodna je za jednostavna ispitivanja kada se mjerenja moraju obaviti na malom broju točaka koje su smještene blizu jedna druge na jednom području unutar konstrukcije. Zbog ručnog načina rada, *demec* mjerači su prikladniji za dugoročno praćenje.

ERS senzori su visoke točnosti i omogućuju kontinuirano očitavanje, zbog čega su pogodni za dinamička ispitivanja. Njihova mana je što zahtijevaju temeljitu pripremu površine, a za njihovu instalaciju su potrebni posebno obučeni tehničari.

Nadalje, optički senzori za mjerenje deformacija temelje se na optičkim vlaknima i koriste tehnologiju FBG (eng. *Fiber Bragg Grating*). Koriste se za praćenje naprezanja, temperature, ubrzanja i pomaka, te se mogu integrirati u različite tipove transduktora. Za razliku od tradicionalnih električnih mjerača, ne zahtijevaju električnu energiju, što ih čini pogodnima za primjene u izazovnim uvjetima, poput prostora s visokim elektromagnetskim smetnjama. Na konstrukciji se mogu postaviti vezanjem, zavarivanjem, pričvršćivanjem ili ulijevanjem u materijale. Prednosti uključuju manju cijenu instalacije u velikim projektima, poput nadzora tunela i cjevovoda, te veću sigurnost u opasnim okruženjima [41].

5.6.3. Mjerenje temperature

Tijekom ispitivanja vrlo je važno mjeriti temperaturu jer promjene temperature mogu značajno utjecati na deformacije kolničke konstrukcije mosta. Ako je moguće, prije ispitivanja treba provjeriti instrumentaciju kako bi se ustanovili svi učinci promjena temperature. Jedna od jednostavnijih metoda za određivanje temperature je uporaba

termoparova. Termoparovi koriste Seebeckov efekt², pri kojem spoj dva različita metala stvara napon razmjeran temperaturi. Razlika u temperaturi između mjernog i referentnog spoja (koji je na poznatoj nižoj temperaturi) uzrokuje protok struje, što omogućuje mjerenje temperature.

Tablica 2.: Sažetak mjerila i sustava instrumentacije (Izvor: [30])

Instrumentation systems	Principal applications	Suitable load conditions	Suitable structures	Types of equipment	Remarks
LVDT	Displacement	Static, dynamic	No restriction	Electrical	Rigid mounting required
Deflection pole	Displacement	Static, dynamic	No restriction	Electrical	Quick to set up, very efficient data recording
Dial gauge	Displacement	Static	No restriction	Mechanical	Manual reading and rigid mounting required
Laser theodolite systems	Displacement related	Static, dynamic	No restriction	Laser	Good for two-dimensional displacement
Vibrating wire VW gauge	Strain	Static	No restriction	Acoustic	Easy to glue to any surface, accurate, can be temperature sensing
Electrical resistance strain ERS gauge	Strain	Static, dynamic	Metal, concrete	Electrical	Accurate and reliable but costly, requires special skills
Demountable ERS gauge	Strain	Static, dynamic	Masonry, metal, timber	Electrical	Accurate and reliable but not widely used
Mobile strain transducer	Strain	Static, dynamic	Metal	Electrical	Used in conjunction with deflection pole system
Demec gauge	Strain	Static	No restriction	Mechanical	Easy to use but human error can be significant
Accelerometers	Vibration	Dynamic	No restriction	Electrical	Accurate if used correctly
Thermocouples	Temperature	Static, dynamic	No restriction	Electrical	Easy to make and use on site

5.7. Postavljanje mjernih instrumenata

Ključ za uspješno ispitivanje mosta jest pravilno postavljanje mjernih instrumenata. Važno je znati što se i na koji način mjeri te koji svi pomaci, kvarovi ili bilo koji drugi efekti mogu narušiti točnost rezultata ispitivanja. Valjanost cjelokupne opreme potrebno je provjeriti prije samog ispitivanja.

² Seebeckov efekt - pojava električnog napona u električnom strujnom krugu sastavljena od dva različita vodiča kada im se spojevi nalaze na različitim temperaturama, omogućuje izravno pretvaranje razlike temperature u električnu struju, tu je pojavu 1821. otkrio njemački fizičar Thomas Johann Seebeck (1770–1831) [42]

5.7.1. Mjerila (senzori) pomaka

Stabilna i čvrsta podloga jedna je od najvažnijih zahtjeva pri postavljanju mjernih pretvornika. Pretvornici se najčešće pričvršćuju na neovisnu površinu, a ukoliko postoji povjerenje u integritet upornjaka, tada se mogu smjestiti na ležajne klupice koristeći utege. Inače, pretvornici su potrebni na upornjacima kako bi se osiguralo da izmjereni pomaci u određenom rasponu nisu rezultat pomicanja ležajeva.

Pretvornici koji su opružno opterećeni i rade u tlaku trebaju biti postavljeni na glatke i ravne dijelove konstrukcije, a ukoliko nije moguće osigurati ravnu površinu, tada se na konstrukciju lijepo mali čelični klinovi izrezani pod odgovarajućim kutom.

Pretvornici koji rade u vlaku pričvršćuju se na konstrukciju pomoću invar žice, a te žice moraju biti kratke kako ne bi bile pod utjecajem strujanja zraka.

5.7.2. Mjerne trake (eng. *Strain gauges*)

Elektro-otporne mjerne trake ili elektro-otporni senzori, poznati kao ERS (eng. *Electro-Resistive Strain gauges/sensors*), koriste promjenu električnog otpora materijala kao odgovor na mehaničku deformaciju za mjerenje naprezanja. Ovi senzori moraju imati visokokvalitetne konektore, a njihova instalacija zahtijeva pažljivu pripremu površine i pričvršćivanje od strane obučenog tehničara. Stoga veću primjenu imaju senzori s vibrirajućom žicom, poznati kao VW senzori (eng. *Vibrating wire sensors*) jer su puno jednostavniji i mogu se instalirati uz malo obuke i prakse.

Kod instalacije VW senzora, oni se prvo postavljaju podešavanjem razmaka cijevi na način da su žice napete na potrebnoj frekvenciji vibriranja. Postavljanje frekvencije ovisi o tome očekuje li se pozitivno ili negativno naprezanje, a ako nije poznato, senzori se postavljaju na sredinu njihovog uporabnog raspona. Važno je prilikom postavljanja VW senzora na beton osigurati da nema postojećih pukotina u blizini senzora. Ukoliko pukotina prolazi kroz senzor, izmjerit će se veliki porast naprezanja, dok pukotine koje se nalaze u blizini, ali izvan duljine senzora, mogu imati suprotan učinak.

5.7.3. Mjerenje odgovora

Prije početka ispitivanja, sva instrumentacija bi trebala biti provjerena nekoliko puta za slučaj nultog opterećenja s ciljem identificiranja svih trendova na temperaturni utjecaj. Također, instrumentacija bi trebala biti provjerena za svaku poziciju ili inkrement opterećenja odmah nakon aplikacije opterećenja i neposredno prije sljedeće pozicije ili inkrementa.

Drugim riječima, svaki put kada se promijeni vrijednost ili položaj opterećenja, mjerni instrumenti provjeravaju se dva puta. Iskusni inženjeri obično provjeravaju nekoliko skeniranja podataka između inkrementa, iako to nije praktično kada se podaci bilježe ručno.

Pri porastu opterećenja, preporučuje se kontinuirano prikazivanje i ažuriranje grafikona opterećenje – maksimalni pomak kako bi se na vrijeme uočio svaki nelinearni odgovor. Pojava nelinearnog ponašanja treba odmah biti prijavljena, a test treba prekinuti i utvrditi uzrok prije nastavka ispitivanja. U tom se trenutku treba zabilježiti temperatura, vrijeme i promjena svih vremenskih uvjeta jer primjerice nagla kiša može ohladiti senzore. Na završetku testa, kada se ukloni svo opterećenje, mjerni instrumenti se moraju očitati kako bi se provjerilo vraćaju li se u nulu i postoji li trajna deformacija na konstrukciji.

5.8. Interpretacija rezultata

U ovom poglavlju britanske smjernice opisuju način na koji se dobiveni rezultati ispitivanja koriste, obrađuju i interpretiraju kako bi se što točnije odredila vrijednost kapaciteta nosivosti konstrukcije. One naglašavaju kako je fizičko ponašanje konstrukcije ključno, a ne samo činjenica da je konstrukcija izdržala određenu razinu opterećenja. Rezultati ispitivanja obuhvaćaju izmjerene deformacije i/ili pomake u odnosu na pripadajuće konfiguracije i intenzitete opterećenja. Treba se provesti najmanje jedna metoda analize i napraviti matematički model konstrukcije koji moraju biti dovoljno dobri pokazatelji ponašanja promatrane konstrukcije pod zadanim opterećenjem. Ako se ispitivanjem dođe do neočekivanih rezultata i odgovora konstrukcije, potrebno je napraviti potpuno novu matematičku idealizaciju.

5.8.1. Usporedba izmjerenih i izračunatih rezultata

Svrha dijagnostičkog ispitivanja konstrukcije jest poboljšati njezin analitički model, a temeljni korak je usporediti izračunate rezultate konstrukcije s onima izmjerenim pod ispitnim opterećenjem. Nije dovoljno usporediti samo apsolutne vrijednosti, već i kvalitativne karakteristike, na primjer, imaju li profili poprečnih deformacija sličan oblik. U većini slučajeva utvrdit će se da su izmjereni odgovori značajno niži od izračunatih.

5.8.1.1. Linearnost

Potrebno je utvrditi linearno ponašanje konstrukcije, pri čemu će promjene opterećenja uzrokovati proporcionalne promjene deformacija i naprezanja, koja se uklanjanjem

opterećenja vraćaju na nulu. Pri nižim razinama opterećenja izmjereni odgovori mogu biti vrlo mali i podložni narušavanju točnosti zbog eksperimentalnih grešaka u mjernoj opremi. Svaki dokaz o nelinearnom ponašanju može ukazivati na oštećenje na konstrukciji i treba ga podvrgnuti daljnjem istraživanju. Prije usporedbe izmjerenih i izračunatih rezultata, potrebno ih je pažljivo pregledati zbog njihove dosljednosti, a sva neobjašnjena odstupanja i očigledno pogrešne vrijednosti ne smiju se uzeti u obzir.

5.8.1.2. Mrtvo opterećenje

Svaka konstrukcija nosi vlastitu težinu, zajedno sa nadodanim mrtvim opterećenjem kao što su površinski sloj i svi nekonstruktivni elementi. Važan dio postupka procjene je odrediti koliki je dio kapaciteta nosivosti konstrukcije potreban za nošenje tih opterećenja.

Učinak mrtvog opterećenja na konstrukciju ovisi o metodi i redosljedu gradnje, a te se informacije dobivaju iz projektne dokumentacije, odnosno iz građevinskih zapisa i nacрта izvedenog stanja. U većini slučajeva, zbog ravnomjerne raspodjele mrtvog opterećenja, njegovi se učinci mogu točno odrediti bez korištenja metoda za analizu distribucije opterećenja. Međutim, u nekim slučajevima, kao što su rebra luka od lijevanog željeza, naprezanja od mrtvog opterećenja teško se određuju analitičkim putem; stoga britanske smjernice nude razne metode kojima se ona mogu eksperimentalno odrediti.

5.8.1.3. Krutost

Analizirajući rezultate ispitivanja, trebalo bi zaključiti je li i na koji način konstrukcija kruća nego što je utvrđeno u izračunima. Niže vrijednosti deformacija na konstrukciji ukazuju na to da su izračunati parametri longitudinalne krutosti preniski, a ravniji profili poprečnih deformacija ukazuju na to da su izračunati parametri poprečne krutosti preniski. Neki od ovih efekata proizlaze iz drugih čimbenika, kao što su rotacijska ograničenja na osloncima koja nastaju zbog površinskog sloja iznad spoja ili zaglavljених ležajeva. Pregled profila uzdužnog pomaka, zajedno s bilo kojim izmjerenim deformacijama u blizini oslonaca može ukazivati na postojanje nekog oblika ograničenja na rubovima. Na krutost konstrukcije utječu i nekonstrukcijski elementi kao što su ograde, koji u stvarnosti djeluju zajedno s konstrukcijom i pridonose njezinoj nosivosti.

5.8.1.4. Lokalni efekti

Do sada smo ponašanje konstrukcije promatrali kao jedinstvenu cjelinu, no u nekim slučajevima prividni nedostatak nosivosti može biti određen kapacitetom elementa ili

komponente pod djelovanjem lokalnog opterećenja. U takvim situacijama može biti potreban nešto drugačiji pristup u interpretaciji i analizi dobivenih rezultata ispitivanjem opterećenjem, budući da je cilj ispitivanja mogao potvrditi je li se, uz savijanje i posmik, pojavilo neko drugo konstrukcijsko djelovanje. Primjerice, kada se na betonsku ploču tipa mosta s gredama i pločom nanese koncentrirano opterećenje, razvoj tlačnih membranskih naprezanja u ravnini može doprinijeti nosivosti ploče koja može nositi veća opterećenja nego što bi se izračunalo na temelju savijanja i probijanja smicanjem. Zaključno, proučavanje izmjerenih površinskih deformacija u blizini primijenjenog opterećenja može ukazati na to dolazi li do aktivacije membranskog učinka i smije li se uzeti u obzir. Takva odluka temelji se na proučavanju i analizi izmjerenih deformacija, bez oslanjanja na bilo kakve izračunate vrijednosti.

5.8.2. Kalibracija strukturnih modela

Usporedba izračunatih i izmjerenih deformacija ukazuje na potrebne prilagodbe ulaznih parametara analitičkog modela konstrukcije. Sljedeća faza je iterativna, pri čemu se konstrukcija ponovno analizira s prilagođenim ulaznim parametrima, sve dok se ne postigne optimalno rješenje u kojem se izračunate i izmjerene vrijednosti što više podudaraju. Prilagodba ulaznih podataka provodi se logičnim i metodičnim pristupom kako bi se razlikovali učinci različitih promjena. Na primjer, ako se smatra da su poprečne krutosti netočne, bolje ih je prilagoditi zasebno od uzdužnih krutosti, iako je u mnogim programima omjer uzdužne i poprečne krutosti važniji od apsolutnih vrijednosti bilo koje od njih. Budući da se uglavnom koristi linearno – elastična analiza, trebalo bi biti jednostavno uspostaviti odnos između promjena određenog ulaznog parametra i odgovarajućih promjena izlaznih vrijednosti te tako relativno brzo doći do optimalne idealizacije konstrukcije.

Ponekad, čak i sa modificiranim analitičkim modelom, neće biti moguće postići dobro podudaranje svake izmjerene i izračunate vrijednosti, stoga je potrebno odlučiti koje su vrijednosti najvažnije za podudaranje. Ponekad je važnije da se podudaraju profili poprečnih deformacija nego njihove apsolutne vrijednosti. Usvajanje optimalnog rješenja može ovisiti o prirodi i vrsti nedostatka nosivosti. Na primjer, u slučaju nedostatka otpornosti na savijanje, veći značaj bi se pridavao podudaranju uzdužnih deformacija nego drugim mjerenjima.

U slučaju lokalnih nedostataka, možda neće uvijek biti potrebno revidirati analitički model. Rezultati ispitivanja mogu biti dovoljni da potvrde aktivaciju oblika konstrukcijskog djelovanja koji bi pružao dodatnu otpornost na lokalno opterećenje. Drugim riječima, ti

rezultati bi pokazali da se taj dodatni faktor može uzeti u obzir u proračunu, što bi bilo opravdano iskustvom iz prakse i rezultatima istraživanja.

5.9. Procjena nosivosti

5.9.1. Granično stanje nosivosti

U slučaju kada bismo poznavali ponašanje pojedinih konstrukcijskih elemenata kroz cijeli elastično – plastični raspon i način na koji se opterećenja raspodjeljuju između susjednih elemenata kako se cijela konstrukcija približava kolapsu, tada bismo sigurnu nosivost konstrukcije mogli izravno zaključiti iz ispitivanja opterećenjem provedenog u elastičnom rasponu. Ipak, postoji malo primjera posebnih tipova elemenata za koje je moguće predvidjeti ponašanje pri kolapsu temeljem ponašanja u elastičnom rasponu kada se testiraju zasebno.

Elementi u svakoj konstrukciji su međusobno povezani, a njihovo ponašanje je pod utjecajem rubnih uvjeta koje pružaju susjedni elementi.

Kod većine mostovskih konstrukcija onemogućeno je izravno izračunavanje sigurne nosivosti iz ispitivanja opterećenjem u elastičnom rasponu s bilo kojom razinom povjerenja. Inače, svrha dijagnostičkog ispitivanja je pružiti bolje razumijevanje globalnog i lokalnog ponašanja konstrukcije, a time i usavršiti analitički model kako bi na što realniji način prikazivao stvarnu konstrukciju.

Nakon kalibracije analitičkog modela prema rezultatima dobivenih iz ispitivanja, kao što je opisano u prethodnom poglavlju, optimizirani model se koristi za ponovnu analizu konstrukcije prema graničnom stanju nosivosti. Međutim, to ne vrijedi za one konstrukcije koje se ocjenjuju prema različitim metodama, kao što su zidane konstrukcije ili konstrukcije od lijevanog željeza.

Naknadna i ponovljena analiza pokazat će sposobnost konstrukcije da nosi potrebna opterećenja. Važno je napomenuti da se sve pretpostavke za granično stanje nosivosti vrše unutar analitičkog procesa, gdje se faktorska čvrstoća elementa provjerava u odnosu na faktorska opterećenja dobivena korištenjem revidiranog analitičkog modela.

5.9.2. Pouzdanost

Britanske smjernice ističu dva osnovna problematična područja koja se odnose na pouzdanost rezultata ispitivanja opterećenjem. Prvi problem je kako odrediti u kojoj se mjeri

poboljšanja analitičkog modela, dobivena na temelju ispitivanja pri relativno niskim razinama opterećenja, mogu primijeniti i na granično stanje nosivosti konstrukcije. Odnosno, postoji određeni stupanj nesigurnosti s valjanošću rezultata i poboljšanja analitičkog modela pri nižim razinama opterećenja kada se primjenjuju na veća opterećenja, odnosno kada je konstrukcija izložena najvećem opterećenju.

Drugi problem se odnosi na nesigurne faktore, kao što je utjecaj kompozitnog djelovanja, koje možda ne bi bilo analizirano u teorijskoj procjeni, ali može utjecati na rezultate pri višim razinama opterećenja. Navedeni faktori mogu promijeniti osnovni mehanizam distribucije opterećenja u konstrukciji, što dovodi do nesigurnosti u pouzdanosti rezultata ispitivanja.

Ova dva temeljna problema bit će analizirana u nastavku ovog rada s posebnim naglaskom na pouzdanost pri višim razinama opterećenja.

5.9.3. Distribucija opterećenja

Tema ovog poglavlja je način na koji pristupiti analizi raspodjele opterećenja kod različitih tipova konstrukcija, posebno onih koje se ne mogu lako analizirati klasičnim metodama. Za tipove konstrukcija koje su neadekvatne za analizu, poput zidanih lukova, preporučuje se osloniti na postojeće izvještaje o ispitivanjima sloma sličnih konstrukcija.

Ako tijekom ispitivanja poprečni konstrukcijski elementi ostanu neoštećeni, to upućuje da se karakteristike poprečne raspodjele opterećenja nisu značajno promijenile s porastom opterećenja.

Različita istraživanja pokazala su ponašanje konstrukcije u trenutku kolapsa, uključujući način na koji se opterećenje raspoređuje kroz konstrukciju. Neka istraživanja su pokazala da mehanizmi poboljšane distribucije opterećenja, utvrđeni dijagnostičkim ispitivanjem, ostaju učinkoviti sve do trenutka kolapsa konstrukcije. Drugim riječima, način raspodjele opterećenja ostaje stabilan čak i kada se konstrukcija približava graničnom stanju. Na primjer, ispitivanje mosta s uzdužnim gredama i lukovima od opeke pokazalo je da su lukovi imali sposobnost pravilnog raspoređivanja opterećenja neposredno prije kolapsa.

U drugom slučaju otkriveno je da, iako je konstrukcija ostala netaknuta do trenutka kolapsa, ponašanje konstrukcije u tom trenutku najbolje odgovara nekom drugom modelu, a ne onom koji je prvotno pretpostavljen. Konkretno, most s ispunom između greda (eng. *Filler beam deck*) ponašala se kao da ima dodatne kosne podupirače (eng. *raking struts*) između greda, zbog čega se most mogao ocijeniti kao konstrukcija tipa „shear key“, koja koristi metode za elastičnu raspodjelu opterećenja. To znači da je konstrukcija pružala veću

otpornost zbog neočekivanih dodatnih potpora, ali to ponašanje nije bilo predviđeno u početnom modelu.

5.9.4. Dodatni faktori čvrstoće

U postupku procjene nosivosti konstrukcije važno je razumjeti hoće li dodatni faktori čvrstoće ostati učinkoviti i pri većim intenzitetima opterećenjima. Ovi faktori mogu povećati nosivost konstrukcije, ali njihova učinkovitost sklona je variranju ovisno o intenzitetu opterećenja.

Pojedinačni doprinosi dodatnih faktora, kao što su rubna ograničenja ili kompozitno djelovanje, često se teško određuju iz rezultata ispitivanja opterećenjem, a njihovu učinkovitost pri višim iznosima opterećenja i deformacija teško je točno odrediti. Odluka o tome hoće li se osloniti na doprinos određenog faktora ovisit će o nekoliko čimbenika.

Ako konstrukcija bez dodatnih faktora pokazuje mali manjak u kapacitetu, a dodatni faktor pokriva dovoljno čvrstoće da zadovolji uvjete, možda će se odlučiti da konstrukcija zadovoljava zahtjevima unatoč nesigurnostima u dugoročnoj učinkovitosti. Ako su izmjerene deformacije niže od izračunatih, može se smatrati da dodatni faktor doprinosi čvrstoći zbog aktivacije drugih nepoznatih izvora čvrstoće.

U nekim slučajevima razmatra se smanjenje doprinosa dodatnih faktora u konačnom stanju, na primjer prilikom kolapsa. Prethodna ispitivanja otkazivanja nosivosti mogu pomoći inženjerima da procijene je li doprinos nekog dodatnog faktora i dalje učinkovit pri većim opterećenjima.

5.9.5. Ispitivanja otkazivanja nosivosti

Ispitivanja otkazivanja nosivosti provode se kako bi se istražilo ponašanje konstrukcije pri ekstremnim, maksimalnim opterećenjima, a rezultati tih ispitivanja nisu uvijek primjenjivi na sve slične konstrukcije. Stoga britanske smjernice upućuju na oprez pri primjeni rezultata ispitivanja otkazivanja nosivosti s jedne konstrukcije na drugu.

Svaki inženjer mora procijeniti je li ponašanje opisano u izvještaju o ispitivanju otkazivanja nosivosti primjenjivo na konstrukciju koja je predmet njegova istraživanja i je li to ponašanje u dovoljnoj mjeri opisano.

Neki inženjeri smatraju da rezultati možda nisu primjenjivi na sve slične konstrukcije, dok drugi vjeruju da se rezultati mogu primjeniti na druge konstrukcije uz određenu razinu

povjerenja i da su dodatni učinci identificirani u tim ispitivanjima pouzdani za veća opterećenja.

Britanske smjernice daju detalje o ispitivanjima otkazivanja nosivosti koji su relevantni za procjenu pouzdanosti konstrukcije do trenutka kolapsa, uključujući mehanizme otkazivanja nosivosti, što se može vidjeti u Tablici 3.

Tablica 3.: Detalji ispitivanja otkazivanja nosivosti (Izvor: [30])

Table 8.1 Details of collapse tests

Type of bridge	Comments on performance	Failure load (kN)	Reference
Filler beam	Four-point loading, ductile bending	2900	Low, A. McC. and Ricketts, N. TRL report RR 383
Reinforced concrete beam and slab (components in-situ)	Hennebique construction, point loading applied to each component. Punch through failure.	2900	Ricketts, N.J. and Low, A. McC. TRL report RR 377
slab	Combined shear and slab punch failure.	2750	
cross beam			
main beam 1 (poor condition)	Large flexural cracks but unable to fail.	5250	
main beam 2 (good condition)	Large flexural cracks but unable to fail.	5200	
Masonry arches	Line loading		Page, J
Preston	Arch ring crushing. Poor condition, no parapets, distorted arch, four hinge failure. Three-hinge snap through failure.	2110	TRL report RR 110
Prestwood	Four-hinge failure.	228	TRL report RR 110
	Rubble masonry, poor condition.		
Torksey	29° skew, ashlar masonry, good condition. Load tests to failure of 11 arch bridges between 1984 and 1994.	1080	TRL report RR 159
Shinafoot		2524	
Strathmashie		1325	TRL report RR 159
Barlae		2900	TRL report RR 201
			TRL Report RR 201. Melbourne, C. and
Load tests to collapse on masonry arch bridges			Page, J. <i>Proceedings of the First Conference on Arch Bridges</i> , 1995
General			
Various	Tests described for hogging plate, two jack arches and trough deck		Cullington, D.W. and Beales, C. (1994). <i>ICE Bridge Modification Conference</i>

5.9.6. Postupak naknadne optimizacije (eng. *Retrofixing*)

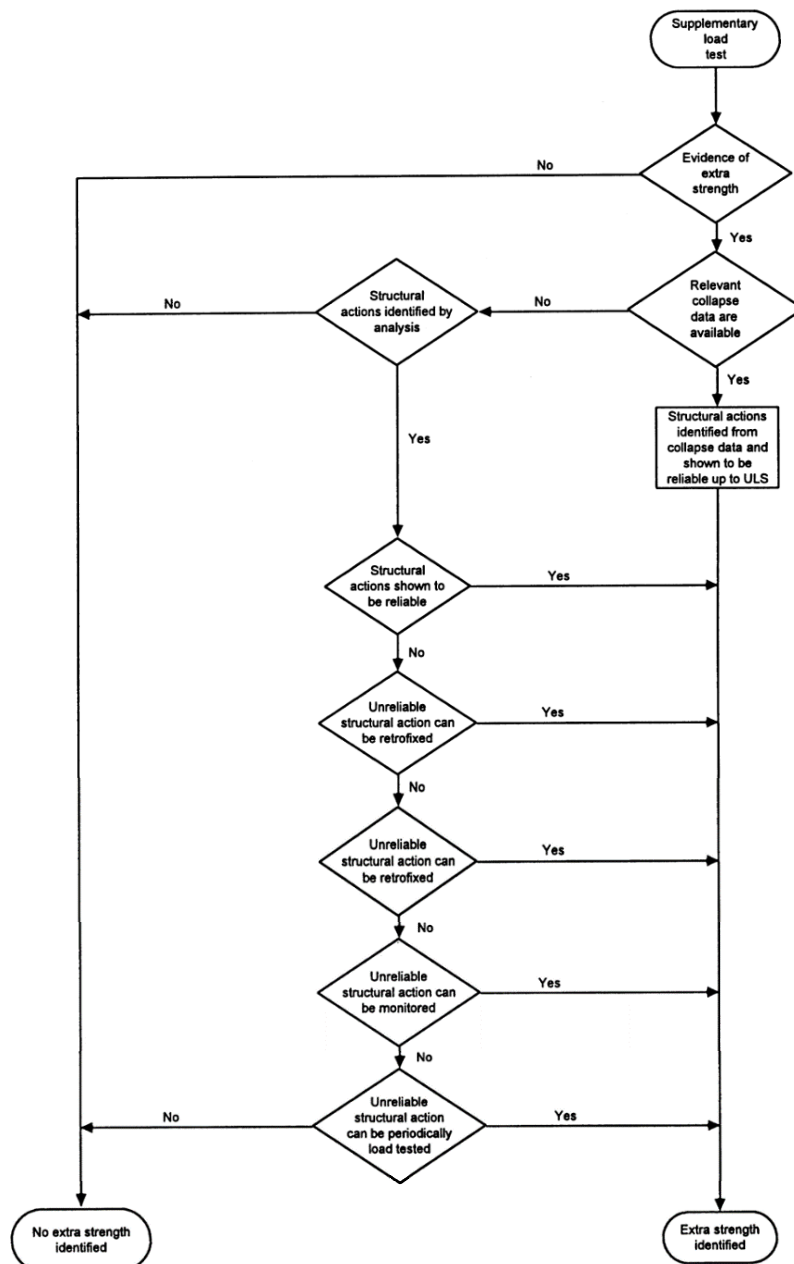
Naknadna optimizacija je postupak dodavanja ili modificiranja dijelova postojeće konstrukcije kako bi se poboljšala njezina učinkovitost, bez da se ta promjena smatra klasičnim ojačavanjem, održavanjem ili obnovom.

Na primjer, ako imamo mostnu ploču koja se sastoji od čeličnih elemenata i betonske ispune, postoji rizik da će pri većim opterećenjima nestati kompozitno djelovanje. Kako bi se

očuvala željena kompozitna svojstva, mogu se dodati fizički spojevi koji će osigurati da čelični elementi i betonska ispuna ostanu povezani i pri većim opterećenjima.

5.9.7. Preporučena metoda određivanja sigurne nosivosti konstrukcije

Britanske smjernice nude pitanja koja pomažu lakše odrediti sigurnu nosivost konstrukcije na temelju rezultata iz dijagnostičkog ispitivanja. Kako bi se na pitanja odgovorilo na što dosljedniji i logičniji način, preporučuje se slijediti metodu opisanu na Slici 22. Navedena metoda se koristi nakon analize konstrukcije pomoću podataka iz dijagnostičkih ispitivanja.



Slika 22.: Metoda određivanja sigurne nosivosti konstrukcije (Izvor: [30])

5.10. Dugoročna pouzdanost

Mostovi su građevine dugog vijeka trajanja, stoga je važno uzeti u obzir dugoročnu pouzdanost svih čimbenika koji mogu utjecati na nosivost i stabilnost konstrukcije kroz vrijeme, odnosno svih čimbenika koji su korišteni u reviziji nosivosti konstrukcije.

5.10.1. Kompozitno djelovanje

U slučaju kompozitnog djelovanja, na primjer između betonske ispune i čeličnog potpornog korita bez uporabe spojnih elemenata, važno je procijeniti može li se tijekom preostalog vijeka trajanja mosta osloniti na to djelovanje. Ovo kompozitno djelovanje može iščeznuti ako slučajno dođe do preopterećenja mosta ili zbog legalnih opterećenja koja su znatno veća od ranijih, uobičajenih opterećenja. Pouzdanost može značajno ovisiti o temperaturi, primjerice u slučaju asfaltnog zastora, čija dodatna krutost ovisi o vanjskoj temperaturi. Nedostatak hidroizolacijskog sloja može ubrzati propadanje konstrukcije, što može biti kritično ako se procjena oslanja na poprečnu raspodjelu opterećenja, a most je poprečno prednapet.

5.10.2. Ograničeni preostali vijek trajanja

Ako će se mostna konstrukcija zamijeniti za desetak godina, tada je opravdano priznati doprinose sumnjivih čimbenika, odnosno onih čimbenika koji nisu u potpunosti pouzdani. Teško je dati jasna pravila o tome, stoga se prije donošenja odluke svaki slučaj mora zasebno analizirati i razmotriti.

5.10.3. Ponovno testiranje

U budućnosti se može provesti ponovno ispitivanje konstrukcije kako bi se utvrdilo doprinosi li sporni mehanizam nosivosti konstrukcije u jednakoj mjeri kao prije. Ponovna ispitivanja ne moraju biti toliko sveobuhvatna i detaljna kao originalna, budući da se provode samo na ključnim dijelovima mosta, odnosno potrebno je dobiti rezultate za nekoliko ključnih referentnih točaka. To ispitivanje mora biti konzistentno s prijašnjim ispitivanjima kako bi se mogla što točnije i preciznije ponoviti, stoga je važno imati detaljne zapise iz originalnih ispitivanja, uključujući podatke o vremenskim uvjetima i temperaturi.

5.10.4. Praćenje nepouzdatih djelovanja

Redovitim praćenjem može se provjeravati dugoročna pouzdanost mosta, pri čemu se može koristiti postojeća oprema ili instalirati novi sustav praćenja.

Specifičan sustav praćenja može se postaviti tijekom redovitih posjeta terenu ili, što je danas sve češći trend, na daljinu putem odgovarajuće komunikacijske veze (sustav monitoringa, eng. *Structural Health Monitoring – SHM*). Praćenje je potrebno samo na nekoliko ključnih referentnih točaka.

5.10.5. Vrste skrivene nosivosti

U procjeni dugoročne nosivosti može se pouzdati u dodatne izvore nosivosti mosta koji nisu odmah uočljivi, ali se stalno aktiviraju zbog specifičnih konstrukcijskih značajki. Na primjer, mogu postojati priključci na čeličnu gredu koji omogućuju da ona djeluje kompozitno s okolnim betonom, čak i ako ti priključci nisu prepoznati kao spojni elementi.

Ako tijekom ispitivanja ponašanje mosta odgovara očekivanjima, to može pružiti veće povjerenje u njegovu stabilnost. Drugim riječima, konstrukcija koja se ponaša prema prognozama, s manjim naprezanjima i deformacijama, pruža dodatnu sigurnost u procjeni dugoročne nosivosti, u usporedbi s konstrukcijom čije ponašanje je neočekivano.

U nekim slučajevima, manji zahvati na konstrukciji mogu dodatno osigurati dugoročnu pouzdanost, odnosno omogućiti da sporni mehanizam ostane učinkovit na duže vrijeme. Na primjer, ako želimo iskoristiti tlačno djelovanje u ploči mosta, tj. omogućiti da betonska ploča, uz rubne grede, nosi dio opterećenja preko tlačnih sila, a ne da se oslanjamo samo na grede, postoji opasnost od bočnog pomicanja rubnih greda. To sprečavamo postavljanjem poprečnih veza koje drže rubne grede na mjestu.

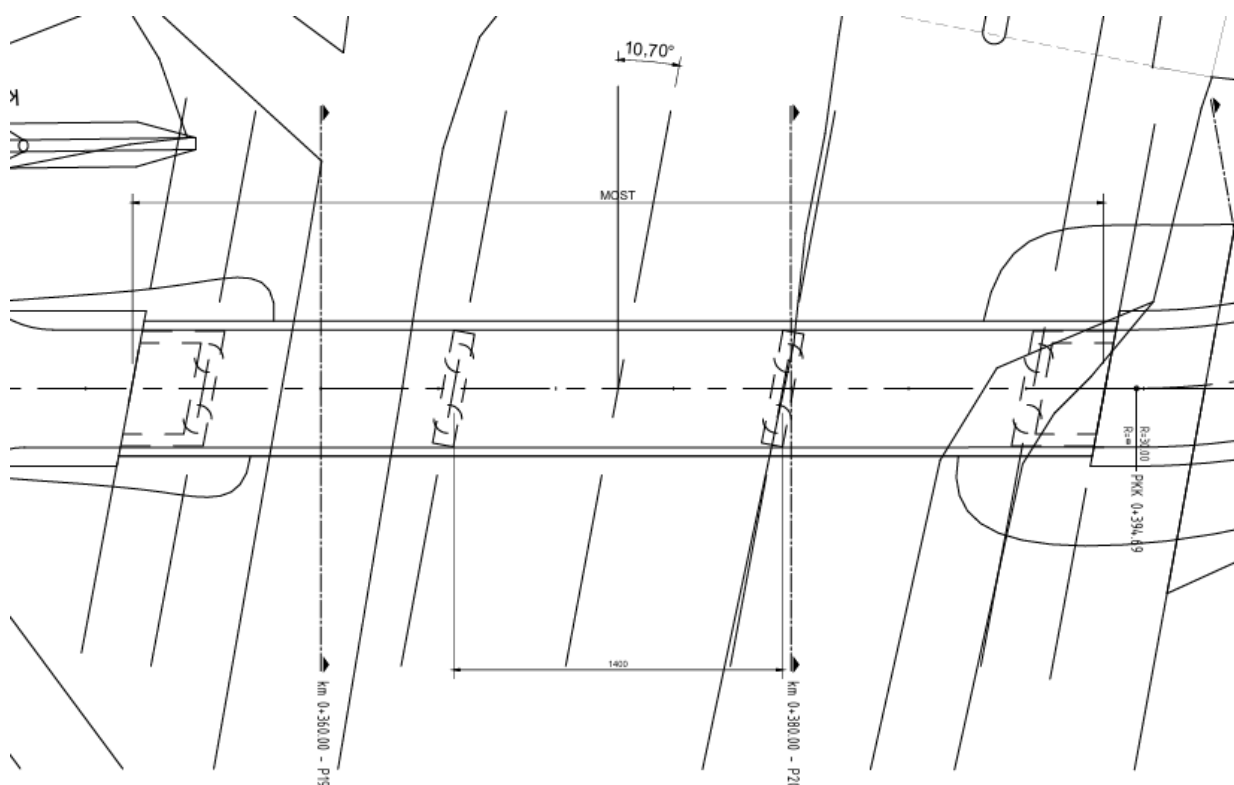
6. ISPITIVANJE I RAČUNSKA ANALIZA KONSTRUKCIJE MOSTA

6.1. Tehnički opis

Dispozicija mosta

Most se tlocrtno proteže pravocrtno pod kutem od 10.76° u odnosu na os reguliranog korita rijeke te se sastoji od tri raspona dimenzija 10.65 + 14.00 + 10.65 metara (Slika 23). Početak mosta (na stacionaži 0+352.00) se nalazi na početku krila upornjaka U1, dok se kraj mosta (na stacionaži 0+393.30) nalazi na kraju krila upornjaka U2, što čini ukupnu dužinu od 41.30 metara.

Širina prometnog traka iznosi 2x250 cm, uz vijence širine 37 cm, čime ukupna širina mosta iznosi 574 cm. Trasa mosta ima uzdužni nagib od -0.51%, dok je poprečni nagib 2.5%.



Slika 23.: Situacijski prikaz mosta i njegovog nagiba u odnosu na os korita rijeke

Donji ustroj

Upornjaci su sastavljeni od upornjačkog zida debljine 120 cm i usporednih krila debljine 40 cm, izvedenih od betona klase C30/37. Sve plohe upornjaka u dodiru s tлом su hidroizolirane. Temeljenje zida upornjaka i krila izvedeni su na temeljnoj stopi dimenzija 300x662 cm debljine 80cm, koja je izvedena od betona klase C25/30, armirano mekom armaturom B500B. Temeljna stopa izvedena je na sloju podložnog nabijenog tucanika debljine 50 cm. Horizontalna sila u uzdužnom smjeru raspoređuje se na upornjake što je vrlo povoljno za ponašanje cijele konstrukcije. Spoj sa upornjacima je izveden kao nepomičan, zglobno oslonjen.

Stupovi upornjaka i stupašta su kružnog poprečnog presjeka promjera 120 cm i izrađeni su od betona klase C30/37. Temeljenje stupova je izvedeno na temeljnoj stopi dimenzija 400x662 cm i debljine 80 cm, također od betona klase C25/30, armirano mekom armaturom B500B. Na temeljima stupašta izvedeni su nadtemelji dimenzija 110x140x116 cm. Temeljna stopa se postavlja na sloju podložnog nabijenog tucanika debljine 50 cm. Spoj sa stupaštem izveden je kao upeti spoj. Na Slici 25. prikazan je pogled na stupašta mosta, dok je uzdužni presjek mosta prikazan na Slici 26.

Rasponska konstrukcija

Rasponska konstrukcija sastoji se od pet predgotovljenih montažnih nosača T presjeka izrađenih od betona klase C40/50, koji su na licu mjesta monolitizirani armiranobetonskom pločom debljine 16 cm od betona klase C30/37. Dimenzije montažnih predgotovljenih nosača T presjeka su 110/54 cm, odnosno gornji pojas je širok 110 cm debljine 14 cm, a ukupna visina nosača iznosi 54 cm. Dužina nosača je 11.20 m u krajnjim poljima i 13.94 m u srednjem polju. Iznad upornjaka i stupašta nalaze se poprečne AB grede, također izrađene od betona klase C30/37. Uzdužni nosači montirani su na trakastom ležaju, a svi nosači armirani su mekom armaturom kvalitete B500B. Na Slici 24. prikazan je poprečni presjek rasponske konstrukcije.

Statički sustav

Montažni nosači oslonjeni su na ležajne grede stupova i upornjaka preko trakastih ležajeva od Trikosala³ sa sidrima, što omogućuje da rasponska konstrukcija statički funkcionira kao kontinuirani nosač preko tri raspona, zglobno oslonjen na upornjake i stupašta.

³ TRICOSAL 181-K koristi se kao sredstvo za bubrenje i stabilizaciju dimenzija očvrslog betona tijekom betoniranja pod pritiskom, injektiranja i izrade prenapregnutih betona. Također je učinkovito u injektiranjima pri niskim temperaturama [43].

U proračunu je rasponska konstrukcija modelirana u dva dijela, a rezultati su superponirani. Prvi dio odnosi se na predgotovljene elemente koji za vrijeme postavljanja djeluju kao proste grede slobodno oslonjene na rubovima, dok se nakon monolitizacije most ponaša kao kontinuirana greda koja prelazi preko tri raspona.

Oprema mosta

a) Zastor

Na kolničkoj ploči mosta postavljena su dva sloja asfaltbetona:

- Nosivi sloj: AC 16 Base, debljine 6 cm
- Habajući sloj: AC 11 Surf, debljine 4 cm

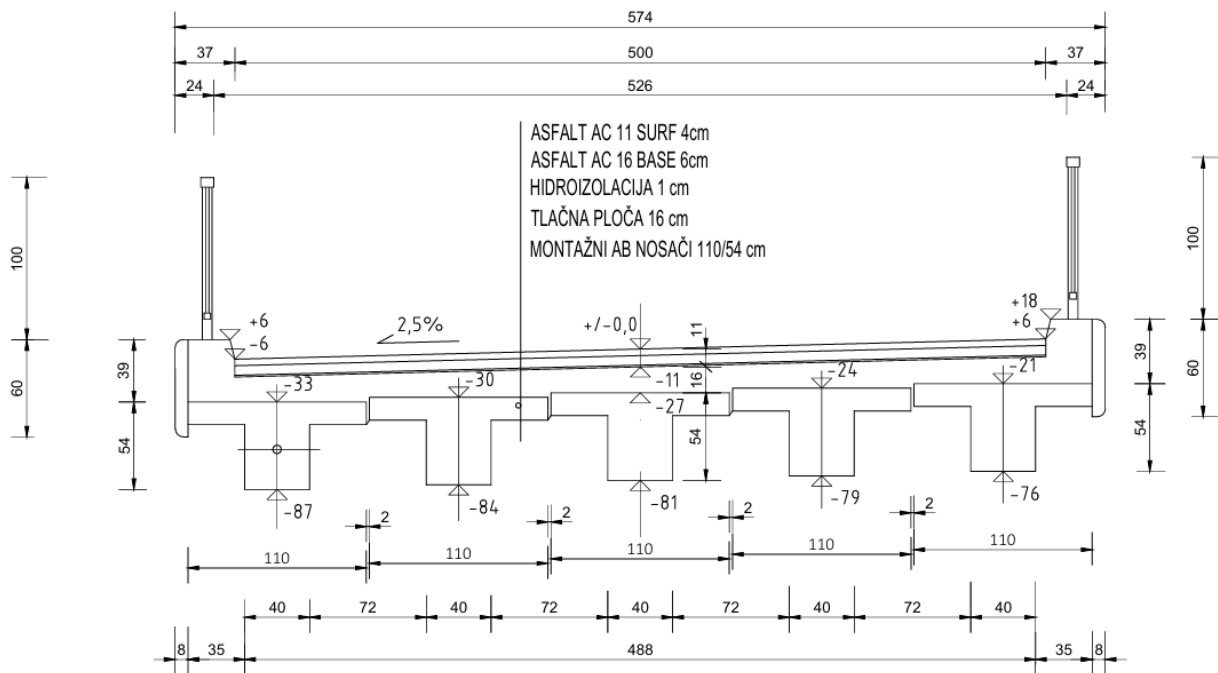
b) Hidroizolacija

Hidroizolacija ploče kolnika izvedena je jednoslojno, tipa Albifol, debljine 1 cm.

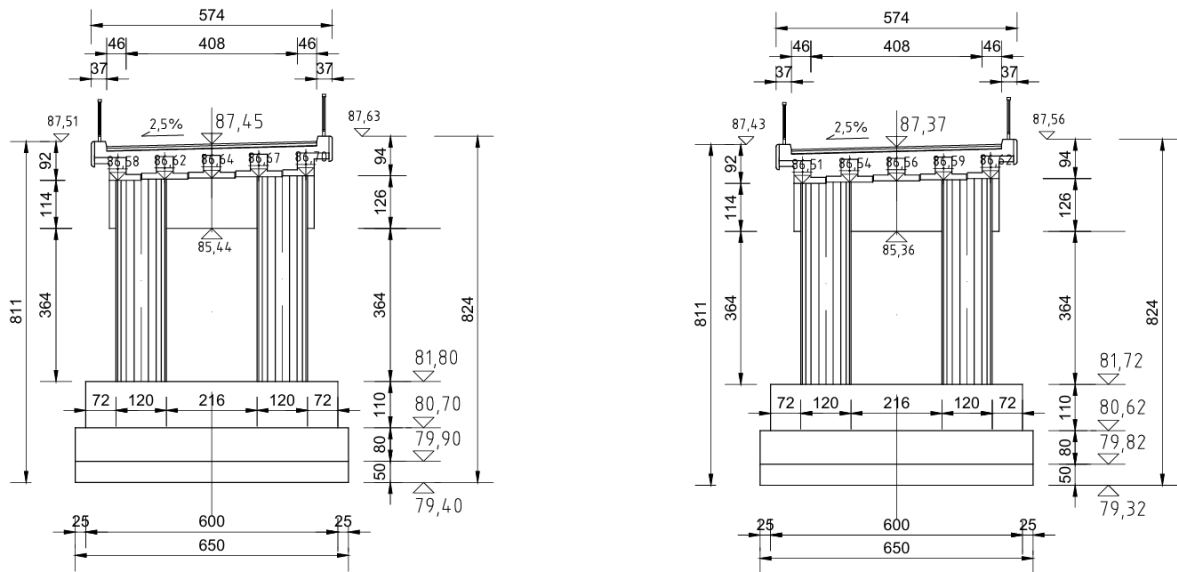
c) Ograda

Ograda mosta izrađena je od čeličnih profila pravokutnog presjeka s vertikalnom ispunom. Visina ograde iznosi 100 cm, a sidrena je u monolitni beton vijenca nosača.

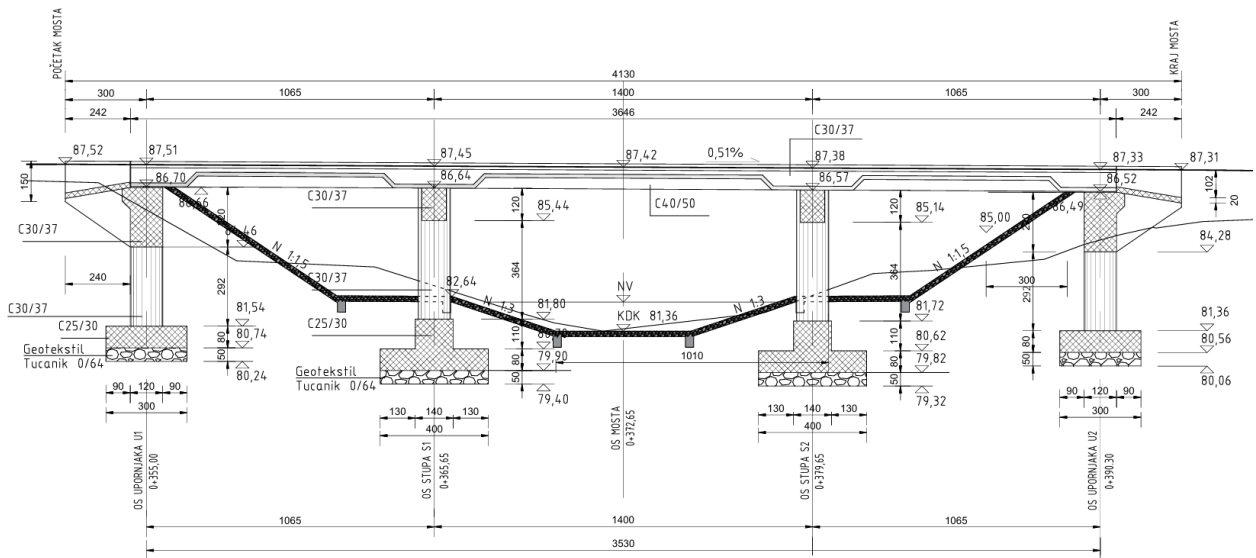
Relevantni nacrti iz projektne dokumentacije i pripadajuća fotodokumentacija



Slika 24.: Normalni poprečni presjek mosta



Slika 25.: Pogled na stupišta (S1 lijevo i S2 desno) u smjeru stacionaže



Slika 26.: Uzdužni presjek mosta

Radi boljeg razumijevanja i predočavanja predmetnog mosta, na Slici 27. prikazana je fotodokumentacija mosta snimljena prije ispitivanja.



Slika 27.: Fotodokumentacija predmetnog mosta

6.2. Ispitivanje mosta

Ispitivanje mosta provedeno je u sunčanim vremenskim uvjetima pri temperaturi od 28°C, prema normi HRN U.M1.046:1984 – Ispitivanje mostova probnim opterećenjima. Opterećenje je provedeno kao redovno prema učestalosti ispitivanja, normalno prema veličini tereta, te statičko i dinamičko prema prirodi opterećenja, a kratkotrajno prema trajanju opterećenja. Provedena je modalna analiza, što predstavlja dodatak postojećoj normi, budući da ista ne uključuje ovu vrstu ispitivanja.. Vizualni pregledi mosta izvršeni su prije i nakon završetka ispitivanja, pri čemu nisu utvrđena nikakva oštećenja konstrukcije.

Ispitivanje statičkim opterećenjem

Ispitivanje mosta probnim opterećenjem izvedeno je korištenjem dvaju kamiona s tri osovine, duljine 7,6 metara, prosječne mase od približno 30 tona (30,38 tona i 29,90 tona). Kamioni su postavljeni na rasponsku konstrukciju tako da su omogućili ostvarivanje maksimalnih unutarnjih sila i pomaka u glavnim elementima konstrukcije mosta. Za vrijeme statičkog ispitivanja, vertikalni pomaci mjereni su modificiranom metodom geometrijskog nivelmana, dok su, nakon uklanjanja opterećenja s konstrukcije, provjeravani mogući trajni, odnosno zaostali pomaci.

Ispitivanje dinamičkim opterećenjem

Ispitivanje dinamičkog opterećenja na mostu provedeno je pomoću jednog kamiona s tri osovine, mase 29,90 tona i duljine 7,6 metara, koji se preko mosta kretao različitim brzinama, od 10 do 30 km/h. Ove brzine su određene sukladno projektu i uvjetima na terenu (konfiguraciji ceste). Dok je kamion prelazio most, na karakterističnim mjestima vršena su mjerenja dinamičkog odziva rasponskog sklopa na primijenjeno opterećenje, kako bi se odredili ključni dinamički parametri ponašanja konstrukcije. Također, određeni su vlastiti oblici titranja mosta, kao i pripadajuće frekvencije i koeficijenti prigušenja pri djelovanju ambijentalnih pobuda. Na Slici 28. vidimo akcelerometre korištene pri ispitivanju.



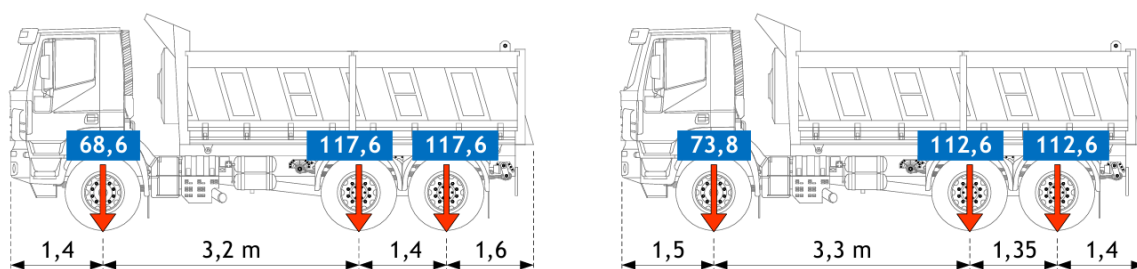
Slika 28.: Akcelerometri za dinamičko ispitivanje mosta

Podaci o probnom opterećenju

Kao što je već prethodno navedeno, ispitivanje mosta probnim opterećenjem provedeno je korištenjem dvaju kamiona s tri osovine, prosječne mase od oko 30 tona. Karakteristike svakog kamiona prikazane su u Tablici 4., dok je na Slici 29. i Prilogu A1 prikazan shematski prikaz korištenih kamiona tijekom ispitivanja.

Tablica 4.: Težine kamiona korištenih prilikom probnog opterećenja

Kamioni (3 osovine)	Težina osovina [kN]		Ukupno: [kN]
	1. osovina	2. + 3. osovina	
1. kamion	68.60	235.20	303.80
2. kamion	73.80	225.20	299.00
Srednja vrijednost:	71.20	230.20	301.40



Slika 29.: Shematski prikaz kamiona s tri osovine korištenih u probnom opterećenju, s prikazom opterećenja i međuosovinskih razmaka

6.2.1. Faze ispitivanja i efikasnost probnog opterećenja

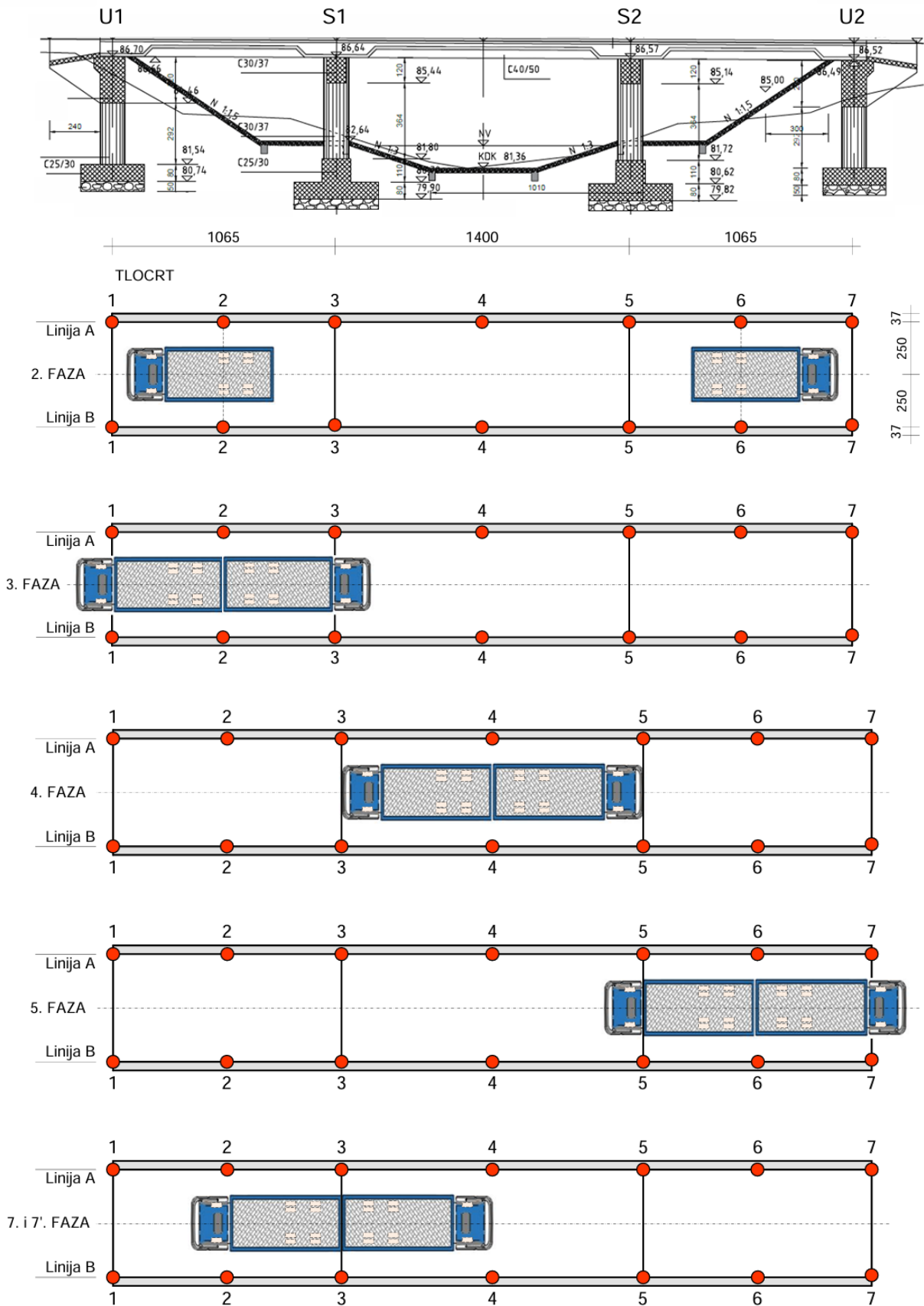
a) Statičko ispitivanje

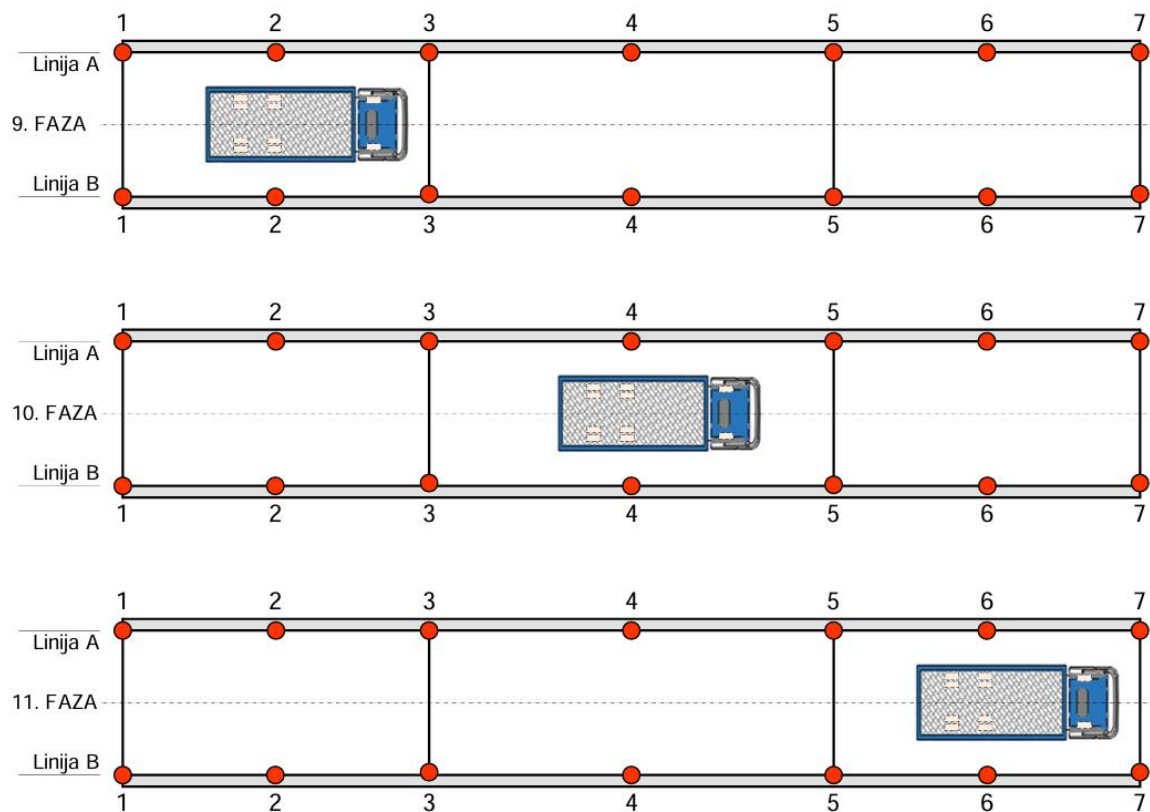
Statičko ispitivanje mosta probnim opterećenjem izvedeno je kroz nekoliko faza. Raspored kamiona u poprečnom i uzdužnom smjeru mosta tijekom faza statičkog ispitivanja opisan je u Tablici 5. i prikazan na Slici 30., te u Prilogu A1. Na Slici 31. može se vidjeti statičko ispitivanje u fazi 4, a fotodokumentacija svih faza dostupna je u Prilogu A5.

Tablica 5.: Faze statičkog ispitivanja mosta

NAZIV FAZE	OPIS
FAZA 1	Početno stanje, most rasterećen
FAZA 2	1 kamion u polovici RASPONA 1 i 1 kamion u polovici RASPONA 3 – simetrično opterećenje (mjerna mjesta 2 i 6);
FAZA 3	2 kamiona u polovici RASPONA 1 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 2);
FAZA 4	2 kamiona u polovici RASPONA 2 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 4);
FAZA 5	2 kamiona u polovici RASPONA 3 - simetrično opterećenje(mjerno mjesto 6);
FAZA 6	Most rasterećen;
FAZA 7	2 kamiona iznad STUPA S1 – provjera slijeganja oslonaca /temelja (mjerno mjesto 3);
FAZA 7'	2 kamiona iznad STUPA S1 nakon 15 minuta – provjera slijeganja oslonaca /temelja (mjerno mjesto 3);
FAZA 8	Most rasterećen;
FAZA 9	1 kamion u polovici RASPONA 1 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 2);
FAZA 10	1 kamion u polovici RASPONA 2 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 4);
FAZA 11	1 kamion u polovici RASPONA 3 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 6);
FAZA 12	Most rasterećen.

UZDUŽNI PRESJEK





Slika 30.: Tlocrtni raspored kamiona za sve faze statičkog opterećenja mosta



Slika 31.: Faza 4 – položaj kamiona za postizanje maksimalnog pomaka u srednjem rasponu

Tijekom probnog opterećenja provedeno je mjerenje vertikalnih pomaka u ukupno 14 točaka: 7 točaka uzduž linije A i 7 točaka uzduž linije B. Vertikalni pomaci na linijama A i B, koje su bile smještene uz rubnjake, mjereni su na sredinama raspona i na pozicijama iznad oslonaca. Nakon rasterećenja konstrukcije provjereni su eventualni trajni (zaostali) pomaci. Vertikalni pomaci tijekom statičkog ispitivanja zabilježeni su modificiranom metodom geometrijskog nivelmana. Uvjeti za optičko opažanje bili su povoljni, a preciznost mjerenja procijenjena je na standardno odstupanje od 0,2–0,3 mm. Položaj mjernih točaka prikazan je na shemi u Prilogu A2 i Slici 30. Izdvojeni rezultati pomaka nalaze se u točki 6.2.2.1., dok su potpuni rezultati geodetskih mjerenja prikazani u geodetskom izvješću (Prilog A2).

Osvrt na primjenu britanskih smjernica

Tijekom ispitivanja, vertikalni pomaci mjereni su na rubovima mosta modificiranom metodom geometrijskog nivelmana. Prema britanskim smjernicama, na primjer, mogla je biti primijenjena preciznija metoda pomoću LVDT senzora, pri čemu bi mjerenjem pomaka ležajeva na upornjacima i stupovima mosta bila omogućena kontrola geodetskih mjerenja. Kako je opisano u poglavlju 5.6.1., mjerenje pomaka u našem slučaju bilo bi izvedivo na rubnim rasponima mosta, zbog jednostavnije instalacije i montaže mjerne opreme, budući da se ti rasponi ne nalaze iznad rijeke. Osim toga, mjerenjem pomaka na svakom nosaču mosta mogla bi se analizirati poprečna raspodjela opterećenja. Također, LVDT sensorima mogli smo mjeriti i relativne deformacije, primjerice po visini nosača, čime bismo mu odredili neutralnu os.

Efikasnost probnog opterećenja

Teret je postavljen tako da učinak probnog opterećenja što više nalikuje učinku pokretnog opterećenja korištenog u statičkoj analizi konstrukcije. Prema normi HRN U.M1.046:1984, efikasnost probnog opterećenja određuje se prema izrazu (1), gdje je:

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

- V_{stat} – maksimalna računaska vrijednost momenta savijanja, poprečnih ili uzdužnih sila uzrokovanih probnim opterećenjem
- V_n – maksimalna računaska vrijednost momenta savijanja, poprečnih ili uzdužnih sila iz statičkog proračuna za prometno opterećenje prema Eurocode standardima

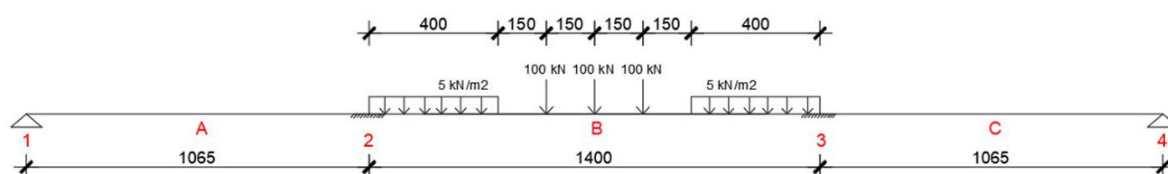
Dijagrami unutarnjih sila za probno opterećenje prikazani su u Prilogu A4. Efikasnosti probnog opterećenja za rasponsku konstrukciju prikazani su u Tablici 7.

Tablica 6.: Efikasnosti probnog opterećenja za rasponsku konstrukciju mosta

UNUTARNJA SILA	LOKACIJA	PROBNO OPTEREĆENJE	PRORAČUNSKO OPTEREĆENJE ⁴ (EC Model 1)			EFIKASNOST PROBNOG OPTEREĆENJA
			EC_q	EC_F	Σ	
MOMENT SAVIJANJA	Polovica krajnjeg (manjeg) raspona	122,96	75,62	289,87	365,49	33,64%
	Polovica srednjeg (većeg) raspona	121,90	85,80	284,69	370,49	32,90%
	Oslonci (iznad stupova S1 i S2)	-140,08	-151,63	-228,20	-379,83	36,88%

Napomena o efikasnosti probnog opterećenja:

Možemo primijetiti da je efikasnost probnog opterećenja u prosjeku oko 30%. Razlog tome je što smo u analizi koristili model 1 prema Eurocode-u, koji je prilično strog. Međutim, s obzirom na to da se ovdje radi o mostu koji će služiti prilazu poljoprivrednom zemljištu i neće biti izložen velikim prometnim opterećenjima, u predmetnom projektu je korišten drugačiji model s manjim opterećenjem. Na Slici 32. prikazan je model prometnog opterećenja za srednji raspon prema projektnoj dokumentaciji, na temelju koje se ostvaruje efikasnost veća od 50%.



Slika 32.: Model prometnog opterećenja srednjeg raspona prema projektu

⁴ Model 1 prema Eurocode-u uključuje ukupno proračunsko opterećenje koje se definira kao suma kombinacija kontinuiranog i koncentriranog opterećenja: EC_q (proračunsko kontinuirano opterećenje) + EC_F (proračunsko koncentrirano opterećenje).

b) Dinamičko ispitivanje

Nakon završenog statičkog ispitivanja provedeno je dinamičko ispitivanje. Dinamičko ispitivanje izvedeno je prolaskom jednog kamiona preko rasponske konstrukcije objekta različitim brzinama od 10 km/h, 20 km/h i 30 km/h (Tablica 6.). Te brzine prilagođene su uvjetima na terenu, zbog čega nije bilo moguće ispitati dinamički odgovor konstrukcije pri većim brzinama od 30 km/h. Tijekom dinamičkog ispitivanja mjerene su promjene dinamičkih pomaka u sredini raspona (mjesto DP1, DP2 i DP3) duž linije B (Prilog A1). Za mjerenje dinamičkih pomaka korišteni su akcelerometri **PCB Piezotronics 393B31** i sustav za prikupljanje podataka **B&K 3560C** s odgovarajućim softverom.

Tablica 7.: Faze dinamičkog ispitivanja

Faze dinamičkog ispitivanja mosta – određivanje dinamičkog pomaka	
DIN 10	Prolaz jednog kamiona preko rasponske konstrukcije brzinom od 10 km/h
DIN 20	Prolaz jednog kamiona preko rasponske konstrukcije brzinom od 20 km/h
DIN 30	Prolaz jednog kamiona preko rasponske konstrukcije brzinom od 30 km/h

Za određivanje osnovnih dinamičkih parametara konstrukcije, poput vlastitih frekvencija i oblika titranja, mjerene su akceleracije na šest mjernih mjesta u svakom rasponu. Mjerenje akceleracija provedeno je istim akcelerometrima PCB Piezotronics 393B31 i sustavom za prikupljanje podataka kao i pri mjerenju dinamičkih pomaka. Rezultati dinamičkih ispitivanja prikazani su u točki 6.2.2.2., dok su skice mjernih točaka za mjerenje dinamičkih pomaka i akceleracija prikazane u Prilogu A1.

6.2.2. Rezultati ispitivanja

6.2.2.1. Rezultati statičkog ispitivanja – mjerenje pomaka

Kompletni rezultati mjerenja pomaka tijekom statičkog ispitivanja konstrukcije dostupni su u geodetskom izvješću u Prilogu A2. U Tablici 8. prikazani su maksimalni izmjereni progibi za sve faze maksimalnog opterećenja te njihova usporedba s odgovarajućim računskim vrijednostima (Prilog A4).

Tablica 8.: Usporedba maksimalnih izmjerenih i računskih vertikalnih progiba

Faza opterećenja	Mjerno mjesto	Izmjereni progib $W_{e, \max}$ [mm]	Računski progib $W_{e, \max}$ [mm]	Zaostali progib [mm]
FAZA 2	A6	1,5	1,3	0,0
FAZA 3	A2 = B2	1,8	1,5	0,2
FAZA 4	B4	3,85	2,8	0,2
FAZA 5	B6	1,95	1,5	0,1
FAZA 9	A2	1,1	1,2	0,1
FAZA 10	A4	2,3	1,9	0,1
FAZA 11	A6	1,1	1,2	0,1

Izmjerene vrijednosti pomaka u skladu su s proračunskim vrijednostima za odgovarajuće opterećenje, dok su zaostali (trajni) pomaci nakon rasterećenja unutar granica točnosti mjerenja i manji od dopuštenih vrijednosti za armiranobetonske konstrukcije (25 % maksimalnih izmjerenih vrijednosti).

Na temelju rezultata prikazanih u Tablici 8. možemo zaključiti da u fazama kada se opterećenje koncentrira u jednom rasponu, zabilježen je značajan porast progiba s dodavanjem drugog kamiona. Na primjer, u zadnjem rasponu, progib za jedan kamion, čija se srednja osovina nalazi u sredini raspona, iznosi 1,1 mm (faza 11). Međutim, kada se doda drugi kamion (faza 5), progib gotovo udvostručuje na 1,95 mm, unatoč tome što se prve osovine oba kamiona nalaze izvan raspona. Slična situacija se pojavljuje i na prvom rasponu,

gdje progib za jedan kamion (faza 9) iznosi 1,1 mm, a s dodatkom drugog kamiona (faza 3) naraste na 1,8 mm.

Usporedba faza 9 i 11 sa šahovskom fazom 2, tj. kada se kamioni nalaze na rubnim rasponima istovremeno, pokazuje da šahovska raspodjela opterećenja ima utjecaj na povećanje progiba. Naime, u fazi 2 pomaci su veći nego u fazama 9 i 11.

Računski rezultati u SCIA-i potvrđuju simetriju modela, jer su vrijednosti za faze 9 i 11 (jedan kamion u rubnim rasponima) te faze 3 i 5 (dva kamiona u rubnim rasponima) identične. Manja odstupanja između računskih i izmjerenih vrijednosti mogu ukazivati na prisutne lokalne efekte ili vanjske faktore koji nisu u potpunosti obuhvaćeni simulacijom.

U Tablici 8 možemo primijetiti nešto veća odstupanja između izmjerenih i računskih progiba, osobito u fazi 4, gdje izmjereni progib iznosi 3,85 mm, dok je računski progib 2,8 mm. Razlog odstupanja je što je u numeričkom modelu pretpostavljeno da su nosači kontinuirani, sukladno projektnoj dokumentaciji. Međutim, u stvarnosti kontinuitet nosača osiguran je samo preko kontinuitetne ploče, što znači da u numeričkom modelu postoji veći kapacitet za preuzimanje momenata savijanja na stupovima nego što je to slučaj u stvarnoj izvedbi konstrukcije.

6.2.2.2. Rezultati dinamičkog ispitivanja

Dinamičko ispitivanje provedeno je radi utvrđivanja ponašanja konstrukcije pod dinamičkim djelovanjem prometnog opterećenja kamionima i definiranja ključnih dinamičkih parametara konstrukcije. U Prilogu A3 prikazani su vremenski zapisi mjerenja vertikalnih dinamičkih pomaka u sredini raspona pri prolascima kamiona brzinama od 10 km/h, 20 km/h i 30 km/h, koji su korišteni za izračun dinamičkih koeficijenata. Također, u istom prilogu nalaze se zapisi singularnih vrijednosti matrice autospektralnih gustoća, koje su korištene za određivanje vlastitih frekvencija i eksperimentalnih oblika titranja. Skice mjernih mjesta na kojima su mjerena pomicanja i akceleracije prikazane su u Prilogu A1.

Na temelju vremenskih zapisa mjerenja vertikalnih dinamičkih pomaka, izračunate su maksimalne vrijednosti dinamičkih koeficijenata za prolazak kamiona pri brzinama od 10 do 30 km/h, prema izrazu (2), kako je prikazano u Tablici 9.

$$\varphi = \frac{\Delta y + Y_{st}}{Y_{st}} \quad (2)$$

Inkrementi dinamičkog pomaka očitani su iz zapisa dinamičkog pomaka tijekom prolaska kamiona preko rasponske konstrukcije pri brzinama od 10, 20 i 30 km/h. Ovaj inkrement predstavlja aritmetičku sredinu dvaju maksimalnih dinamičkih pomaka (pozitivnog i negativnog). Dinamički koeficijent izračunava se prema izrazu (2), gdje se u brojničku inkrement zbraja sa statičkim pomakom, a zatim se taj rezultat podijeli s tim istim statičkim pomakom. Statički pomaci korišteni za izračun dinamičkog koeficijenta dobiveni su u fazama 9, 10 i 11 statičkog ispitivanja, pri čemu je isti kamion uvijek smješten na polovici prvog, drugog (srednjeg) ili trećeg raspona, ovisno o fazi. Vrijednosti ovih statičkih pomaka prikazane su u geodetskom izvješću (Prilog A2), pri čemu su korišteni podaci sa strane A mosta radi dodatne sigurnosti, iako se inače u praksi koriste podaci s one strane na kojoj su postavljeni senzori, što je u ovom slučaju strana B.

Tablica 9.: Inkrementi dinamičkih pomaka i procjena dinamičkog koeficijenta

Faza ispitivanja	Mjerno mjesto	Inkrement dinamičkog pomaka $\Delta\gamma$ [mm]	Dinamički koeficijent ϕ
DIN 10 $v = 10$ km/h	DP1 (L1/2)	0,0464	1,036
	DP2 (L2/2)	0,0609	1,024
	DP3 (L3/2)	0,0551	1,039
DIN 20 $v = 20$ km/h	DP1 (L1/2)	0,1639	1,126
	DP2 (L2/2)	0,2371	1,095
	DP3 (L3/2)	0,2016	1,144
DIN 30 $v = 30$ km/h	DP1 (L1/2)	0,3107	1,239
	DP2 (L2/2)	0,5276	1,211
	DP3 (L3/2)	0,3920	1,280
$\gamma_{\text{stat, L1}} = 1.3$ (Faza 9); $\gamma_{\text{stat, L2}} = 2.5$ (Faza 10); $\gamma_{\text{stat, L3}} = 1.4$ (Faza 11);			

Vlastite frekvencije

Analizom zapisa singularnih vrijednosti iz matrica autospektralnih gustoća izdvojene su glavne vlastite frekvencije titranja (Prilog A3). U Tablici 10. prikazana je usporedba osnovnih vlastitih frekvencija rasponskog sklopa, dobivenih eksperimentalno i numerički, zajedno s koeficijentima prigušenja.

Tablica 10.: Izmjerene i računске vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja

Oblik titranja	Izmjerena frekvencija	Računska frekvencija [Hz]	Koeficijent prigušenja ξ [%]
(1.) PRVI	7,389	7,00	4,008 %
(2.) DRUGI	15,330	12,92	2,519 %
(3.) TREĆI	23,23	15,80	3,599 %
(4.) ČETVRTI	41,03	44,12	2,023 %

Dinamički odgovor rasponskog sklopa je očekivan i realističan, a osnovne vlastite frekvencije titranja sklopa jasno su vidljive u spektralnim funkcijama odgovora konstrukcije. Izmjerene vlastite frekvencije podudaraju se s računskim vrijednostima. Prikazani dinamički parametri imaju značajnu ulogu u budućoj dijagnostici objekta tijekom eksploatacije. Vizualnim pregledom konstrukcije prije i nakon statičkog i dinamičkog ispitivanja nije uočeno nikakvo oštećenje.

6.3. Računska analiza konstrukcije

Spregnuti most modeliran je u programskom paketu SCIA Engineer, uz korištenje AutoCAD-a za lakše crtanje modela, dok su dijelovi zatim uvezeni u SCIA-u. Izrađen je model konačnih elemenata konstrukcije s ulaznim podacima preuzetim iz projekta, a provedena je statička i dinamička računska analiza. Svi presjeci i karakteristike materijala definirani su prema tehničkom opisu. U modelu su određeni momenti savijanja i progibi za odgovarajuće faze statičkog probnog opterećenja i računskog opterećenja iz projekta. Također su određene vlastite frekvencije titranja s pripadajućim oblicima titranja.

Ploča debljine 16 cm povezuje četiri nosača "T" oblika koji omogućuju prijenos vertikalnih i horizontalnih sila rasponskog sklopa na ležajeve. Nosači sudjeluju u prijenosu opterećenja sa određenom efektivnom širinom koja je također uzeta u obzir u proračunu. Njihova

integracija ostvarena je pomoću funkcije 'ribbed slab', koja omogućuje brže povezivanje nosača odgovarajućeg presjeka. Prijelaz s mosta na nasip, tj. rubno oslanjanje rasponske konstrukcije na upornjake, simulirano je nepomičnim ležajevima, pri čemu upornjaci nisu modelirani. Elastomerni ležajevi modelirani su kao kruti štapovi koji ostvaruju vezu između rasponske konstrukcije i naglavne grede, odnosno stupova. Na dnu stupova modelirani su upeti ležajevi.

Opterećenje je definirano u skladu s Eurocodeom i fazama statičkog ispitivanja kamionima provedenim na mostu. U masu, ključnu za dinamičku analizu, uključene su vlastita težina elemenata (eng. Self weight) te masa slojeva asfalta i hidroizolacije. Ograda nije uključena u model, budući da tijekom ispitivanja nije bila montirana, čime se nastojalo postići što realnija simulacija mosta.

6.4. Zaključak o ponašanju konstrukcije nakon provedenog ispitivanja i analize računskih i izmjerenih rezultata

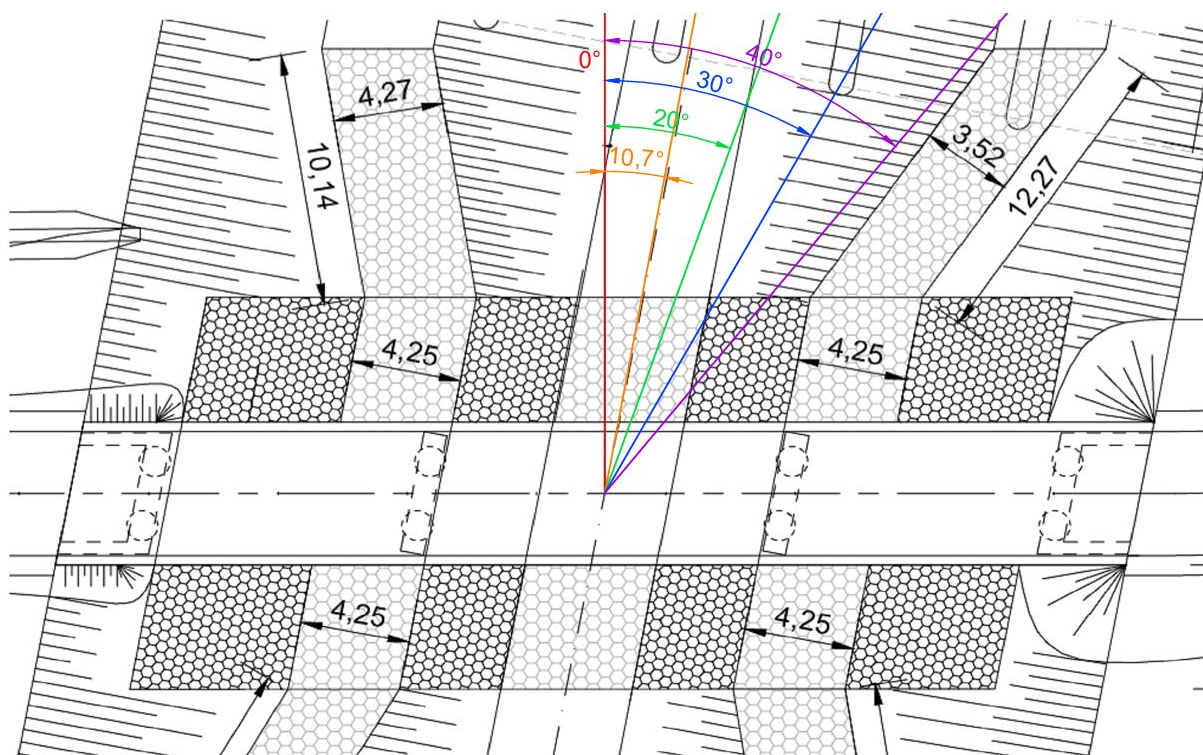
Na temelju rezultata statičkog i dinamičkog ispitivanja mosta te provedene analize, izdvajaju se sljedeći zaključci:

- Izmjerene vrijednosti pomaka rasponske konstrukcije su u očekivanim granicama i u skladu s proračunskim vrijednostima.
- Konstrukcija nakon rasterećenja ne pokazuje značajne zaostale pomake, što potvrđuje njezino elastično ponašanje tijekom ispitivanja.
- Izmjereni dinamički odziv rasponske konstrukcije je realan i očekivan, dok su osnovne vlastite frekvencije u skladu s teorijskim vrijednostima.
- Na konstrukciji mosta nisu zabilježena nikakva oštećenja prije ili nakon ispitivanja.

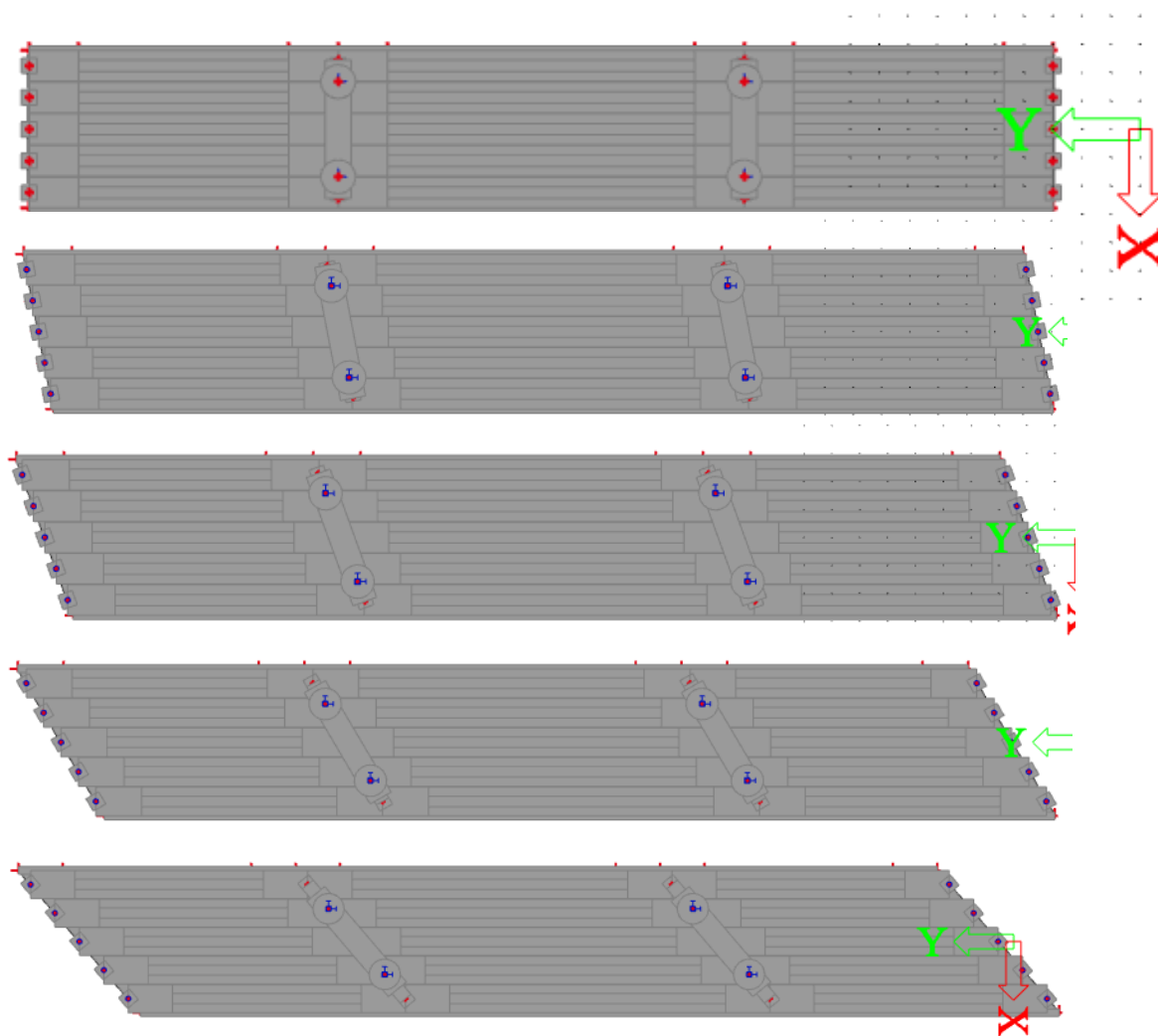
Prema uvjetima navedenim u točki 4 norme HRN U.M1.046:1984, analizom rezultata ispitivanja zaključeno je da je nosiva konstrukcija mosta tijekom probnog opterećenja zadovoljila zahtjeve za tehničku ispravnost. Stoga, most je spreman za preuzimanje prometnih opterećenja predviđenih projektom.

7. ISTRAŽIVANJE UTJECAJA RAZLIČITIH KUTOVA POLOŽAJA MOSTA U ODNOSU NA KORITO RIJEKE: ANALIZA I USPOREDBA MODELA

Predmetni most koji se analizira, kao što je spomenuto u tehničkom opisu, nagnut je pod kutom od $10,70^\circ$ u odnosu na korito rijeke. Ovo poglavlje predstavlja dodatnu studiju slučaja u kojoj ćemo analizirati još četiri nova modela mosta, usmjerena pod kutovima od 0° (tada je uzdužna os mosta okomita na os korita rijeke), 20° , 30° i 40° . Pretpostavljamo da svi uvjeti i metode ispitivanja definirani za predmetni most vrijede i za ove modele, koji imaju iste materijale i poprečne presjeke, te ćemo ih promatrati kao da su podvrgnuti identičnim statičkim i dinamičkim ispitivanjima. Usporedbom rezultata ovih ispitivanja cilj je utvrditi zakonitosti u ponašanju mostova pod različitim kutovima položaja u odnosu na korito rijeke i dobiti uvid u utjecaj tih kutova na statičke i dinamičke parametre konstrukcije. Na Slici 33. prikazani su različiti kutovi usmjerenja mosta u odnosu na os korita rijeke, dok su na Slici 34. prikazani tlocrti numeričkih modela gledani odozdo.



Slika 33.: Prikaz različitih kutova usmjerenja mosta u odnosu na os korita rijeke



Slika 34.: Tlocrti numeričkih modela (gledano odozdo) za kutove nagiba 0° , 10.70° , 20° , 30° , 40°

7.1. Usporedba računskih progiba pojedinih modela

U Tablici 11. prikazane su vrijednosti računskih progiba u svim fazama statičkog ispitivanja za svaki model mosta, dok se u Prilogu B nalaze rezultati tih ispitivanja za sve faze i preostale modele.

Tablica 11.: Usporedba maksimalnih vertikalnih progiba po fazama statičkog ispitivanja kod različitih modela mosta

FAZA OPTEREĆENJA	RAČUNSKI PROGIBI				
	M∠ 0°	M∠ 10,7°	M∠ 20°	M∠ 30°	M∠ 40°
Faza 2	1,5	1,3	1,3	1,2	1,1
Faza 3	1,7	1,5	1,7	1,4	1,3
Faza 4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,3
Faza 5	1,7	1,5	1,5	1,4	1,2
Faza 9	1,3	1,2	1,1	1,1	1,00
Faza 10	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6
Faza 11	1,3	1,2	1,1	1,1	0,9

Kako se kut nagiba osi rijeke povećava, most postaje krući, što kroz sve faze ispitivanja rezultira manjim progibima. Ovaj je trend jasno uočljiv; primjerice, u Fazi 10 progib se smanjuje s 2,1 mm pri kutu od 0° na 1,6 mm pri kutu od 40°. Porast krutosti može biti rezultat promjene u geometriji mosta uzrokovane nagibom stupišta, što mijenja način na koji se sile raspoređuju kroz konstrukciju.

U Tablici 12. prikazane su sve postotne promjene progiba po fazama u odnosu na model mosta pod kutom 0°.

Tablica 12.: Prikaz postotnih promjena progiba u odnosu na nulti kut

FAZA OPTEREĆENJA	POSTOTNA PROMJENA U ODNOSU NA NULTI KUT				
	M \angle 0°	M \angle 10,7°	M \angle 20°	M \angle 30°	M \angle 40°
Faza 2		-13,33%	-13,33%	-20%	-26,67%
Faza 3		-11,76%	0%	-17,65%	-23,53%
Faza 4		-9,68%	-12,90%	-16,13%	-25,81%
Faza 5		-11,74%	-11,74%	-17,65%	-29,41%
Faza 9		-7,69%	-15,38%	-15,38%	-23,08%
Faza 10		-9,52%	-14,29%	-19,05%	-23,81%
Faza 11		-7,69%	-15,38%	-15,38%	-30,77%

Prema nekim studijama o kosim mostovima, kut zakošenja do 20° ne izaziva značajnu razliku u odnosu na ravne mostove, jer su promjene u njihovom ponašanju zanemarive. Rezultati analize pokazuju da se progibi u mostovima s kutom zakošenja do 20° razlikuju do 15%, što je unutar prihvatljivih inženjerskih tolerancija. Međutim, za mostove s kutovima zakošenja većim od 20°, utjecaj kuta na konstrukciju postaje značajniji i mora se uzeti u obzir u analizi [44]. Torzija, koja nastaje uslijed neravnomjerno raspoređenih sila, postaje izraženija kako kut zakošenja raste. Zbog toga se s povećanjem kuta povećavaju i torzijski efekti, koji zahtijevaju dodatnu pažnju u analizi konstrukcije.

7.2. Analiza modalnih frekvencija mostova pod različitim kutovima zakošenja

S povećanjem kuta zakošenja, frekvencija prvog oblika titranja općenito raste, što pokazuje stabilan trend rasta s blagim porastom pri svakom povećanju kuta (Tablica 13.). To je očekivano jer povećanje kuta obično povećava krutost konstrukcije u horizontalnom smjeru. Prikaz promjene frekvencije prvog oblika titranja i njegovih postotnih promjena⁵ u odnosu na nulti kut prikazan je u Tablici 13. U Prilogu B nalaze se prikazi svih modalnih oblika titranja za preostala četiri modela mosta.

⁵ Postotna promjena je izračunata prema izrazu: [(nova vrijednost – početna vrijednost)/početna vr.] · 100

Tablica 13.: Usporedba frekvencija prvog oblika titranja za različite modele mostova

MODEL MOSTA	1. OBLIK TITRANJA – vertikalni val	
	Frekvencija [Hz]	Postotna promjena [%]
$\angle 0^\circ$	6,63	-
$\angle 10,7^\circ$	7,00	+5,58%
$\angle 20^\circ$	7,10	+7,08%
$\angle 30^\circ$	7,31	+10,26%
$\angle 40^\circ$	7,66	+15,54%

Drugi oblik titranja odnosi se na torziju srednjeg raspona mosta, pri čemu frekvencija također pokazuje trend povećanja. Međutim, u rasponu kutova od $10,70^\circ$ do 20° , razlika u promjeni frekvencije je najmanja, što ukazuje na to da utjecaj tog raspona zakosjenja najmanje utječe na promjenu frekvencije (Tablica 14.)

Tablica 14.: Usporedba frekvencija drugog oblika titranja za različite modele mostova

MODEL MOSTA	2. OBLIK TITRANJA – torzija srednjeg raspona	
	Frekvencija [Hz]	Postotna promjena [%]
$\angle 0^\circ$	12,34	-
$\angle 10,7^\circ$	12,92	+4,70%
$\angle 20^\circ$	13,29	+7,70%
$\angle 30^\circ$	13,36	+8,27%
$\angle 40^\circ$	13,70	+11,02%

Treći oblik titranja, koji predstavlja torziju vanjskih raspona, pokazuje najmanji porast frekvencije s povećanjem kuta usmjerenja. Zanimljivo je da između kutova od $10,70^\circ$ i 20° nije bilo promjene frekvencije, što upućuje na to da za ovaj oblik titranja kut u tom rasponu nema značajan utjecaj (Tablica 15.)

Tablica 15.: Usporedba frekvencija trećeg oblika titranja za različite modele mostova

MODEL MOSTA	3. OBLIK TITRANJA – torzija vanjskih raspona	
	Frekvencija [Hz]	Postotna promjena [%]
$\angle 0^\circ$	14,90	-
$\angle 10,7^\circ$	15,80	+6,04%
$\angle 20^\circ$	15,79	+5,97%
$\angle 30^\circ$	16,03	+7,58%
$\angle 40^\circ$	16,38	+9,93%

Sva tri oblika titranja pokazuju općeniti trend rasta frekvencije s povećanjem kuta zakošenja, što je u skladu s istraživanjima koja pokazuju da se prirodne frekvencije mostova obično povećavaju s većim kutovima nagiba [45]. Prema [45] duljina raspona i kut nagiba utječu na vlastitu frekvenciju mostova, pri čemu osnovna frekvencija opada ili raste s povećanjem duljine i kuta nagiba. Također, kut nagiba utječe na način vibracija konstrukcija, pri čemu mostovi s kutom nagiba između 0° i 45° pokazuju pretežno modalne oblike savijanja. Kut zakošenja ima različite učinke na svaki oblik titranja. Prvi oblik pokazuje najveću osjetljivost na promjenu kuta, dok treći oblik ima najmanji utjecaj.

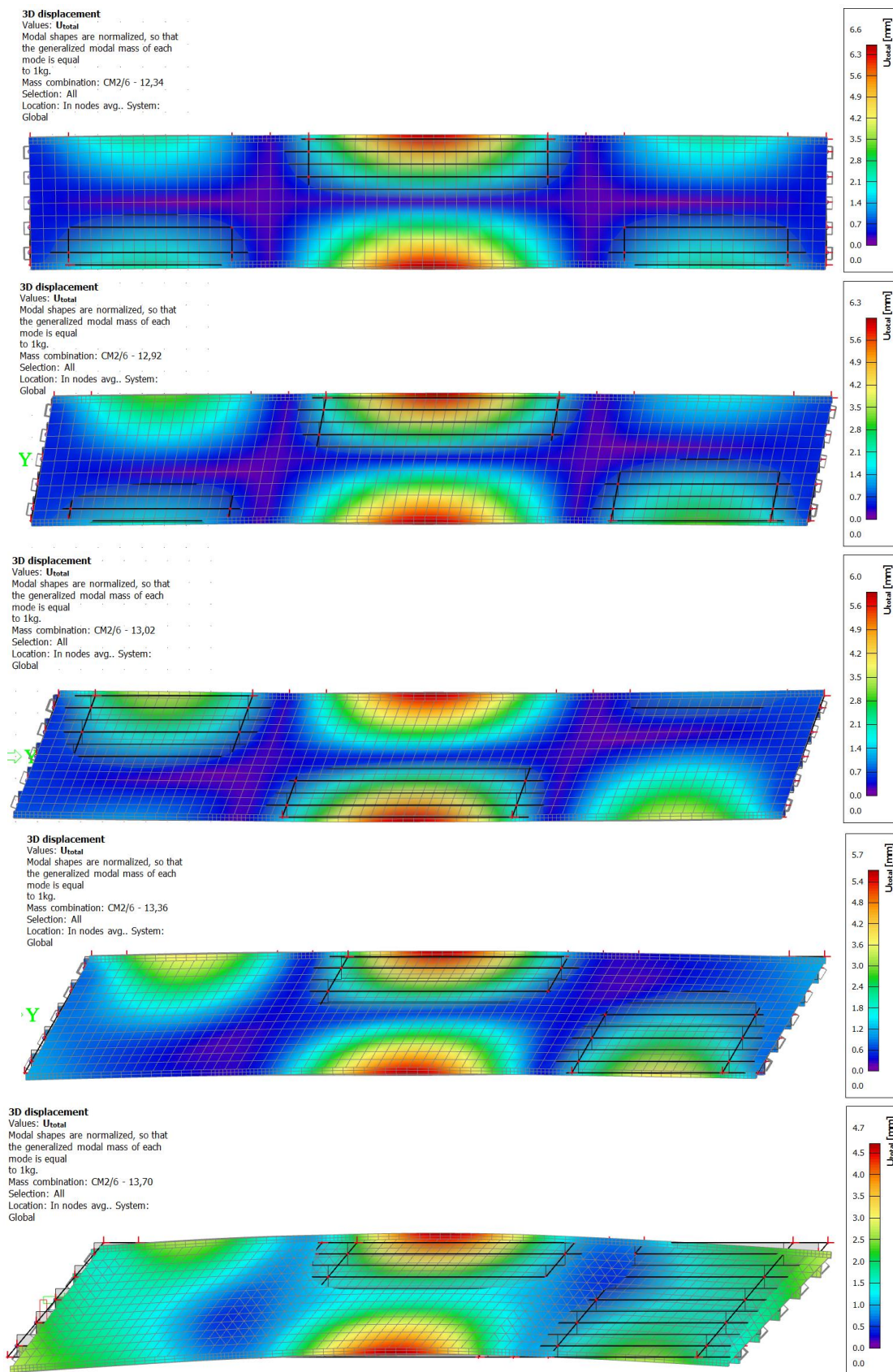
Promjene frekvencija nisu linearne, što ukazuje na složenu interakciju između geometrije mosta i njegovog dinamičkog ponašanja. Ova nelinearnost ukazuje na to da se most ponaša drugačije ovisno o kutu zakošenja, čime je bitno detaljno analizirati svaki slučaj zasebno.

Ove promjene u frekvencijama mogu imati značajan utjecaj na projektiranje mostova, posebno u okviru seizmičkog projektiranja i utjecaja vjetera. Analiza modalnih frekvencija može pomoći u optimizaciji dizajna kako bi se most učinio otpornijim na dinamičke sile.

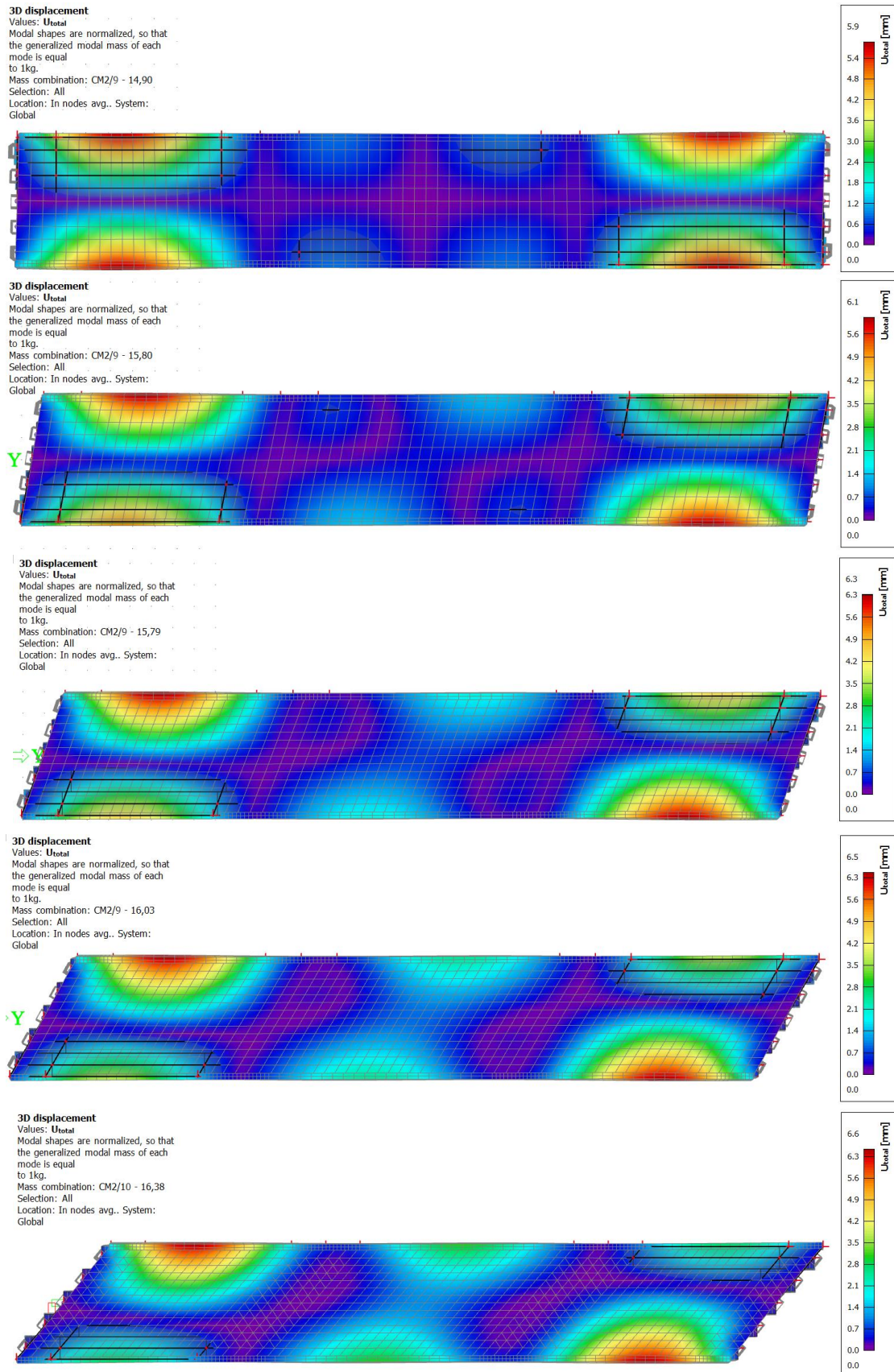
Na Slici 35. prikazani su tlocrtni prikazi raspodjele deformacija drugog oblika titranja za svaki model mosta. Možemo uočiti da s povećanjem kuta nagiba osi rijeke u odnosu na poprečnu os mosta dolazi do porasta frekvencije drugog oblika titranja te sve izraženije asimetrije u deformacijama. Kod početnog kuta od 0° (12,34 Hz), most pokazuje simetrične deformacije, s najvećim vrijednostima u središnjem rasponu i ravnomjernom raspodjelom deformacija duž cijele dužine. S porastom kuta, frekvencija se uzastopno povećava, a deformacije postaju sve više asimetrične, s izraženijim pomacima na krajevima raspona. Na modelu pod kutom od 40° (13,70 Hz), deformacije postaju izrazito asimetrične, s najvećim pomacima na jednom kraju mosta.

Na Slici 36. prikazane su raspodjele deformacija za treći oblik titranja, na isti način kao na Slici 35. Kod početnog kuta od 0° (14,90 Hz), treći oblik titranja pokazuje simetričnu raspodjelu deformacija s primjetnim lokaliziranim pomacima na krajevima raspona. S daljnjim uzastopnim povećanjem kuta, frekvencija raste, a deformacije postaju intenzivnije na krajevima mosta, dok se središnji dio mosta počinje sve izraženije deformirati. Na modelu pod kutom od 40° (16,38 Hz), deformacije su izrazito lokalizirane na krajevima mosta i asimetrične. Slično kao kod drugog oblika titranja, frekvencija trećeg oblika raste s povećanjem kuta nagiba osi rijeke u odnosu na poprečnu os mosta, a deformacije postaju sve više intenzivnije, lokalizirane i sve asimetričnije.

Zaključno, kako se kut povećava, deformacije postaju sve neravnomjernije raspoređene i koncentrirane na krajevima raspona mosta, što može ukazivati na promjene u raspodjeli naprezanja unutar konstrukcije uslijed promjene geometrije sustava.



Slika 35.: Usporedba drugog oblika titranja kod modela mosta od 0° do 40° (odozgo prema dolje)



Slika 36.: Usporedba trećeg oblika titranja kod modela mosta od 0° do 40°
 (odozgo prema dolje)

8. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu rada naglašena je važnost standardizacije i normizacije u području ispitivanja građevinskih konstrukcija, osobito mostova. Za razliku od projektiranja i izvođenja građevinskih konstrukcija, gdje su na razini Europske unije donesene i zakonski usvojene smjernice i upute, područje ispitivanja i ocjene stanja konstrukcija ostaje prilično razjedinjeno i nedovoljno razvijeno. Nedostatak jedinstvenih smjernica i standardiziranih metoda ispitivanja može rezultirati različitim interpretacijama i otežati inženjerima donošenje jednoznačnih procjena stanja konstrukcija.

Dok zemlje poput Njemačke imaju osnovne i općenite norme za ocjenjivanje postojećih mostova, Hrvatska, iako ima norme i smjernice, još uvijek nema detaljne priručnike, zbog čega se inženjeri često oslanjaju na norme namijenjene novim mostovima, što može rezultirati nepotrebno skupim rješenjima za sanaciju. Iako postojeći zakonski okvir u Hrvatskoj već propisuje obvezno periodično ispitivanje mostova, nedostaje učinkovit sustav kontrole i kaznenih mjera za vlasnike koji ne provode redovita ispitivanja. Stroži propisi i dodatne mjere koje bi potaknule odgovorno održavanje ključni su za osiguranje sigurnosti mostova.

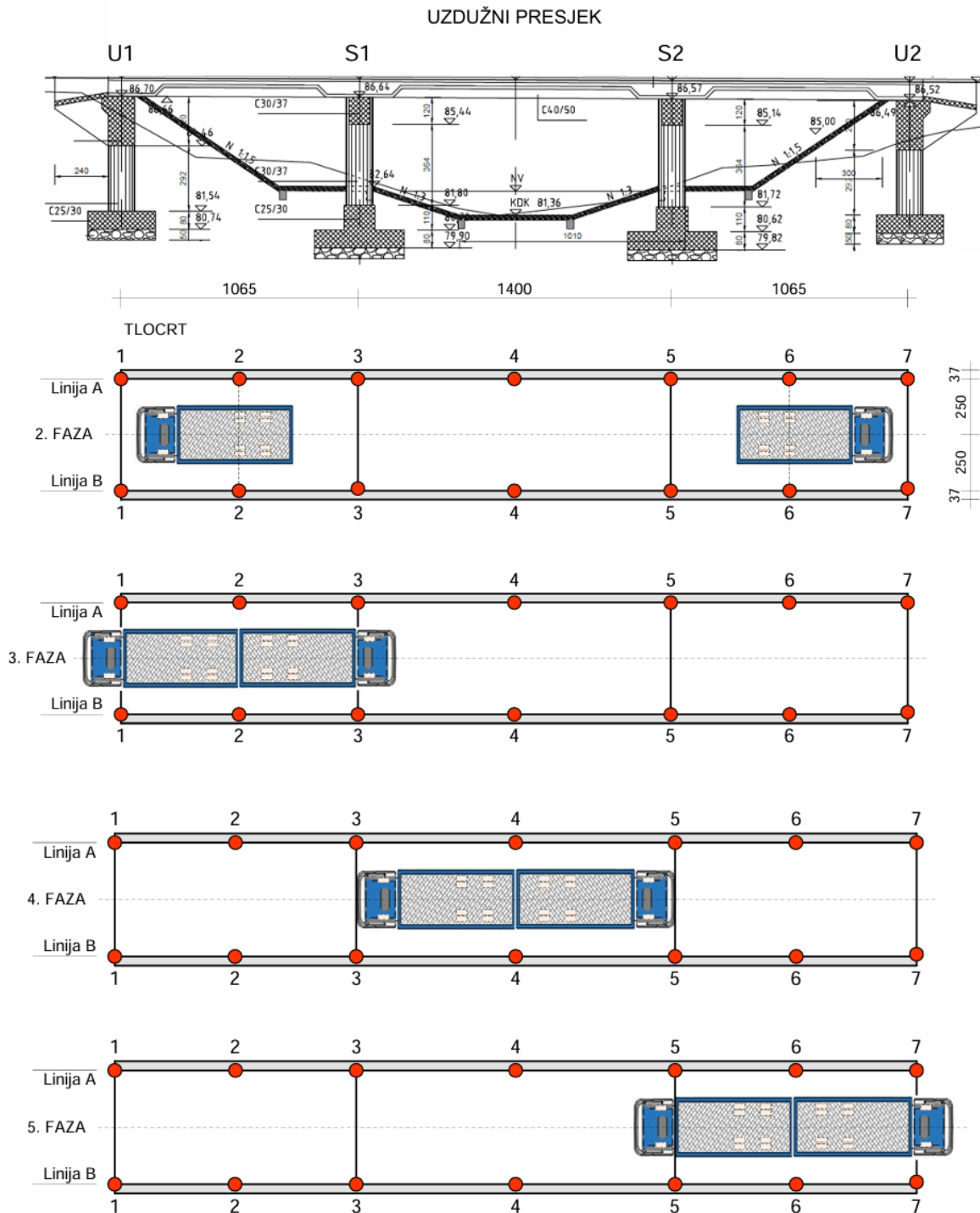
Velika Britanija, kao jedna od vodećih zemalja u području ispitivanja konstrukcija, posjeduje smjernice koje su detaljno analizirane u ovom radu i koje se bave specifičnim efektima i parametrima koji mogu olakšati ispitivanje, razumijevanje i interpretaciju rezultata. Ove smjernice mogle bi poslužiti kao temelj za razvoj hrvatskih smjernica.

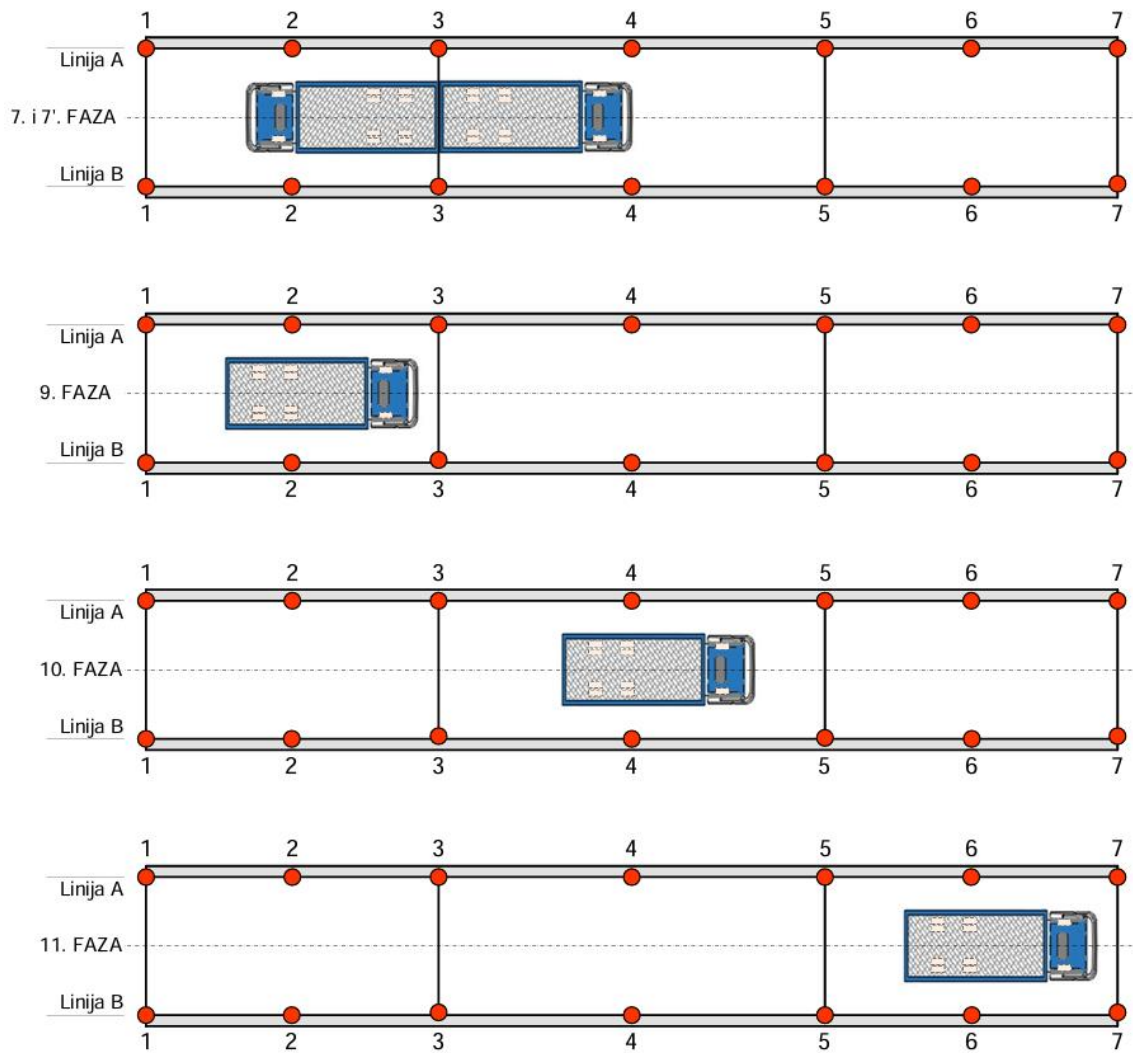
U praktičnom dijelu rada provedeno je ispitivanje spregnutog mosta na terenu prema hrvatskoj normi HRN U.M1.046:1984, pri čemu je stanje mosta ocijenjeno kao zadovoljavajuće temeljem izmjerenih podataka i usporedbe s rezultatima numeričkog modela. Osim toga, izrađena su četiri dodatna numerička modela mosta s kutovima zakošenja od 0° do 40° , kako bi se analizirali učinci promjene kuta na mehanička svojstva mosta. Utvrđeno je da povećanje kuta zakošenja doprinosi povećanju krutosti mosta, što rezultira smanjenjem progiba, dok frekvencije vlastitih oblika titranja rastu. Promjena progiba pokazuje gotovo linearan trend, dok je promjena frekvencija složenija i teško predvidljiva. Također, raspodjela deformacija kod pojedinog oblika titranja postaje sve više asimetrična s porastom kuta zakošenja. Mostove s kutovima zakošenja do 20° možemo modelirati kao ravne mostove, uz prikazana odstupanja u rezultatima do 15%. Za kutove veće od 20° potrebno je uzeti u obzir zakošenje zbog sve izraženijih utjecaja, poput torzijskih efekata, jer pojednostavljeni modeli postaju nepouzdana.

PRILOG A

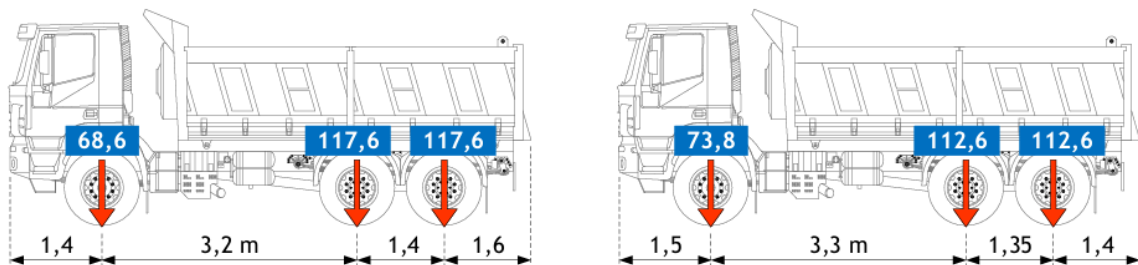
1. Raspored mjernih mjesta i sheme opterećenja
2. Geodetsko izvješće
3. Zapisi dinamičkih ispitivanja
4. Računska analiza konstrukcije
5. Fotodokumentacija ispitivanja mosta

1. Raspored mjernih mjesta i sheme opterećenja

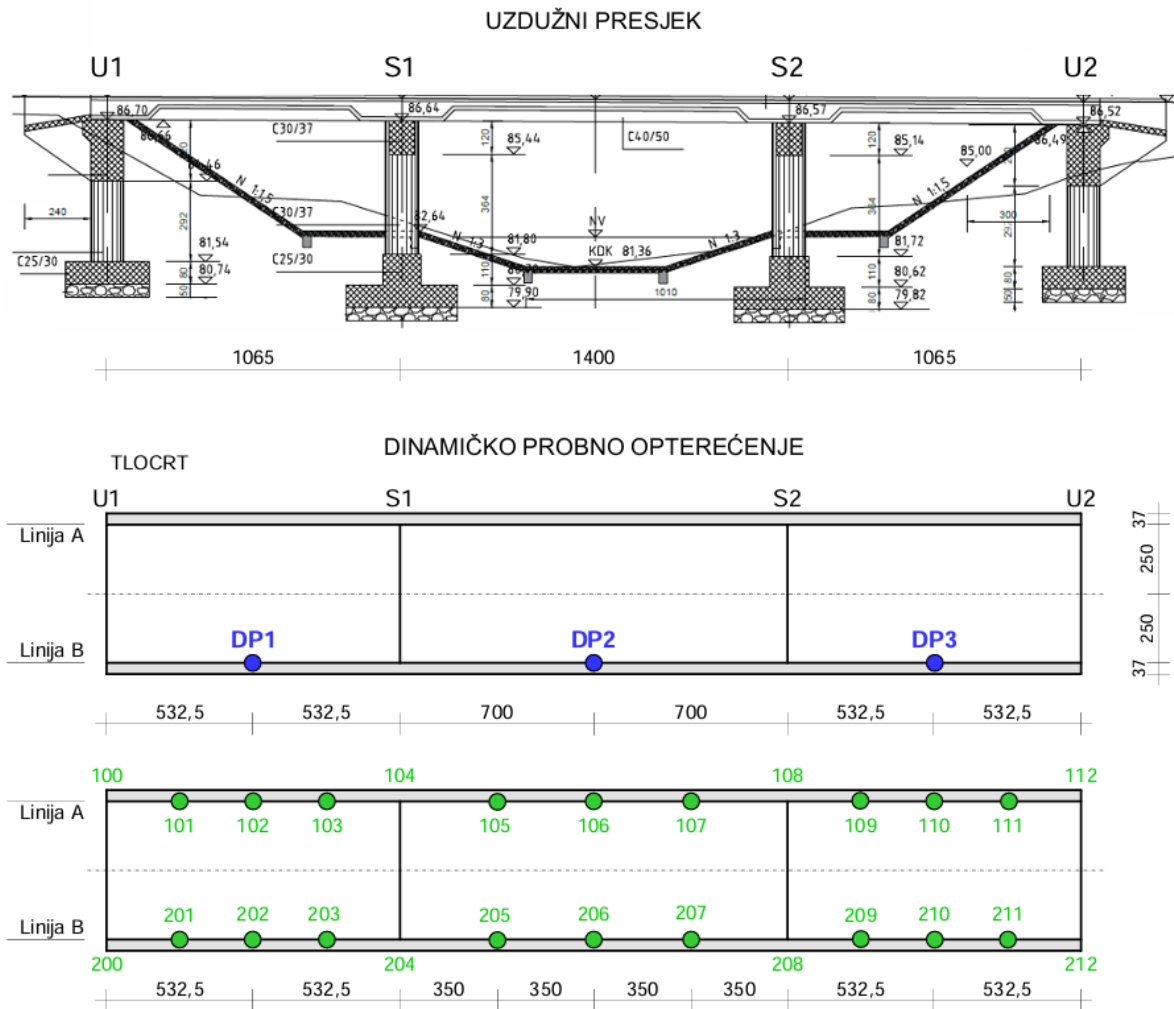




Slika 37.: Tlocrtni raspored kamiona za sve faze statičkog opterećenja mosta



Slika 38.: Shematski prikaz kamiona s tri osovine korištenih u probnom opterećenju, s prikazom opterećenja i međuosovinskih razmaka



Slika 39.: Shema mjernih mjesta za mjerenje dinamičkih pomaka prilikom prolaska kamiona (gore **plavo**) i vlastitih oblika titranja te koeficijenata prigušenja konstrukcije (dolje **zeleno**)

2. Geodetsko izvješće

Mjerno mjesto	F2 (F1)		F3 (F1)		F4 (F1)		F5 (F1)		F6 (F1)	
	1k u 2, 1k u 6		2k u 2		2k u 4		2k u 6		0	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	0,2	0,1	0,2	0,2					0,0	0,0
2	1,4	1,1	2,0	2,0	-0,9	-0,6			0,1	0,2
3	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2			0,0	0,0
4	-1,2	-1,4	-0,6	-0,7	3,8	4,1	-0,3	-0,3	0,2	0,2
5	0,1	0,2			0,1	0,3	0,3	0,4	0,0	0,0
6	1,6	1,1			-1,0	-0,8	2,2	2,3	0,0	0,1
7	0,1	0,2					0,4	0,3	0,0	0,0

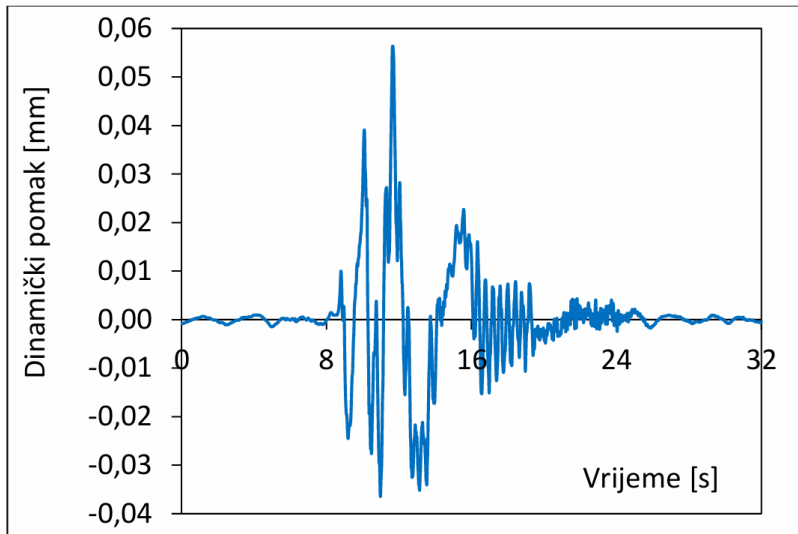
Mjerno mjesto	F7 (F6)		F7' (F6)		F8 (F6)	
	2k u 3		2k u 3		0	
	A	B	A	B	A	B
3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,0	0,0

Mjerno mjesto	F9 (F8)		F10 (F8)		F11 (F8)		F12 (F8)	
	1k u 2		1k u 4		1k u 6		0	
	A	B	A	B	A	B	A	B
2	1,3	1,1					0,1	0,1
4			2,5	2,3			0,1	0,1
6					1,4	1,1	0,0	0,1

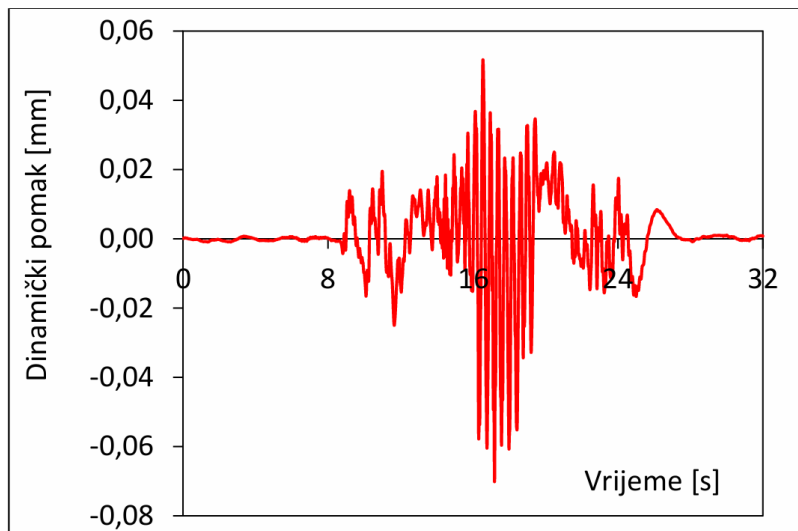
Slika 40.: Geodetsko izvješće – rezultati izmjerenih pomaka tijekom statičkog ispitivanja mosta

3. Zapisi dinamičkih ispitivanja

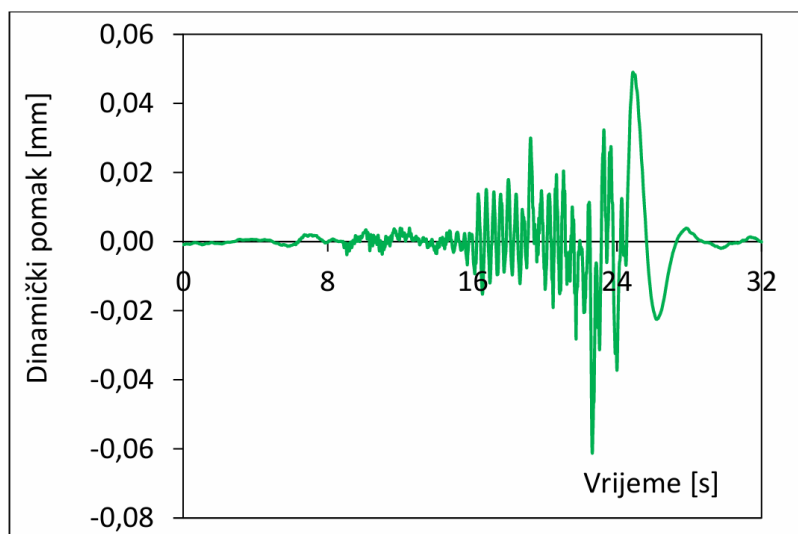
DP1 $\Delta y = 0,0464$ mm



DP2 $\Delta y = 0,0609$ mm

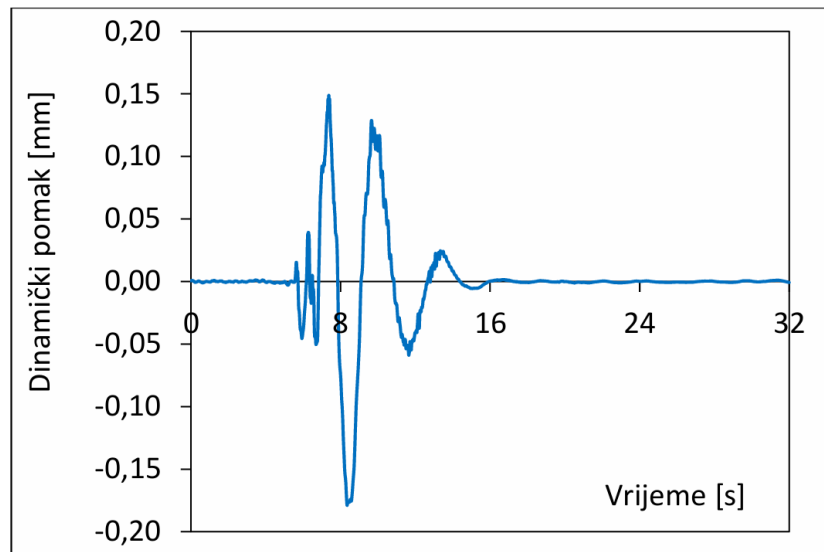


DP3 $\Delta y = 0,0551$ mm

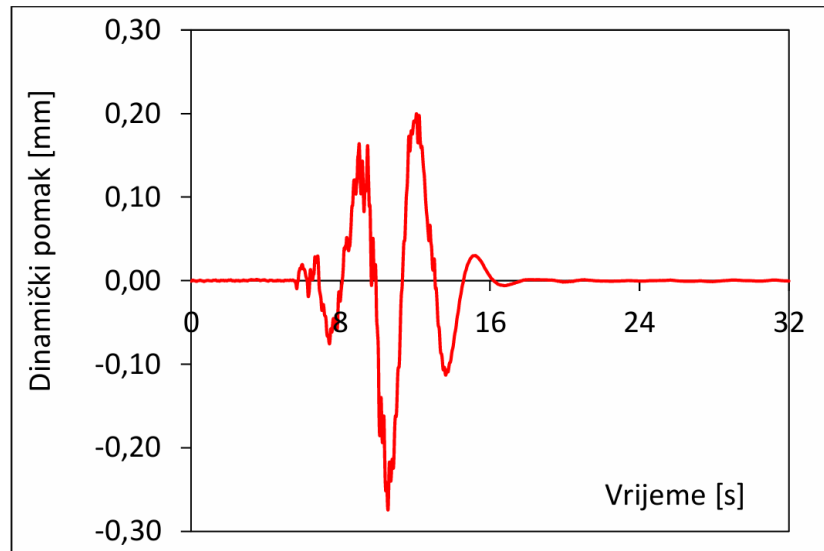


Slika 41.: Zapisi dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko rasponske konstrukcije brzinom od 10 km/h (DIN 10)

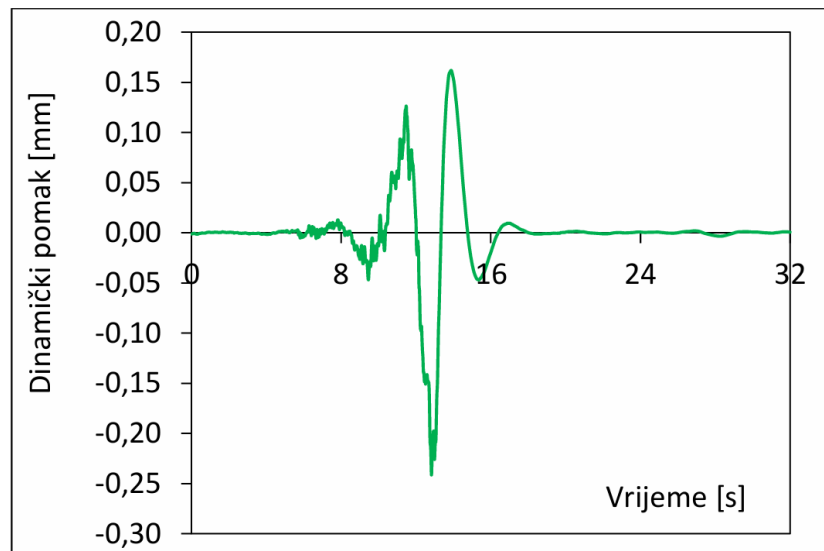
DP1 $\Delta y = 0,1639$ mm



DP2 $\Delta y = 0,2371$ mm

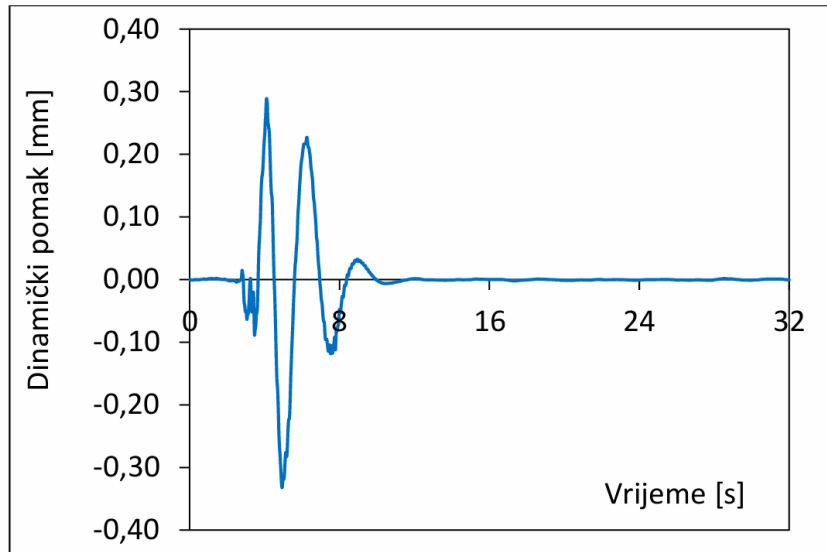


DP3 $\Delta y = 0,2016$ mm

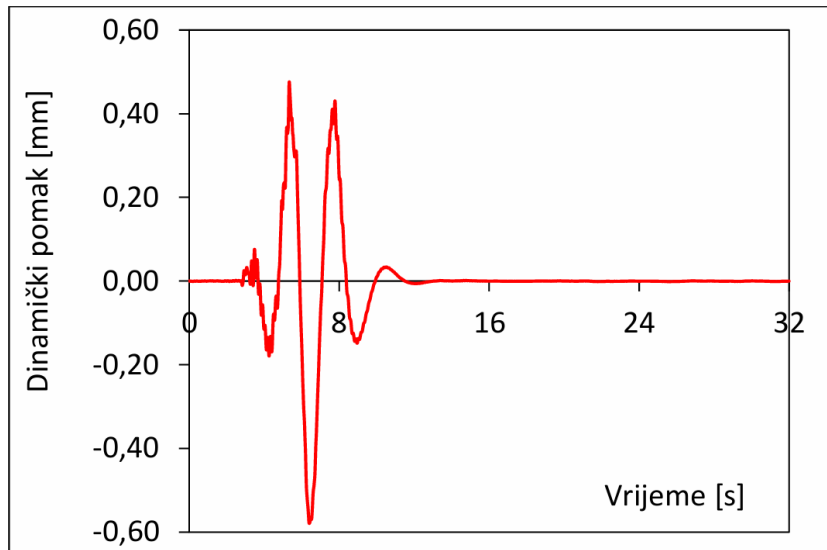


Slika 42.: Zapisi dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko rasponske konstrukcije brzinom od 20 km/h (DIN 20)

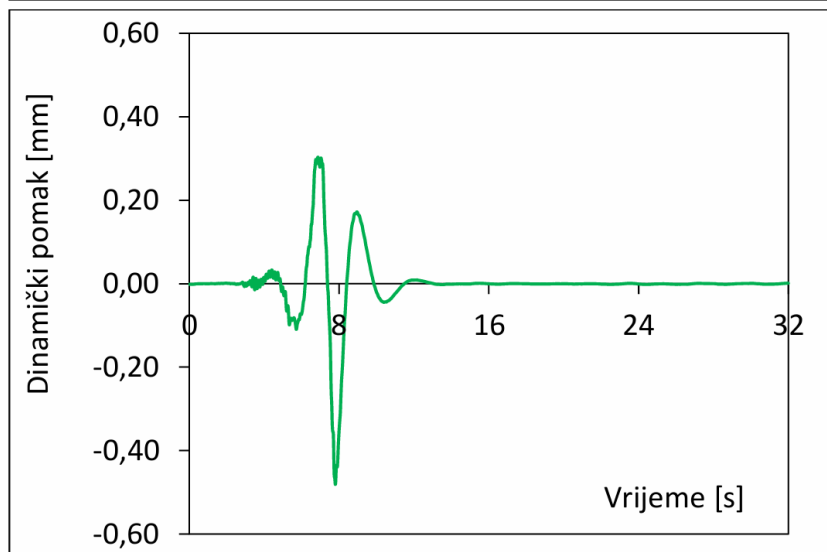
DP1 $\Delta y = 0,3107$ mm



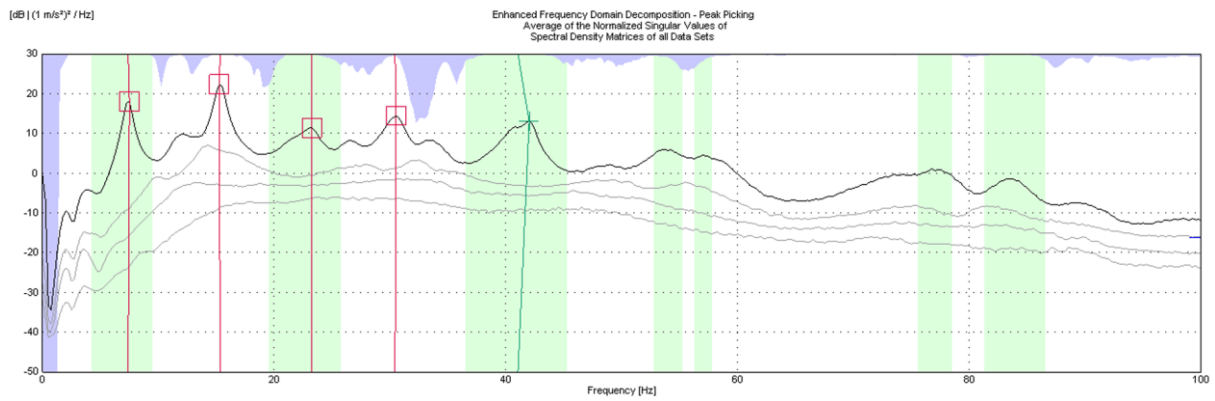
DP2 $\Delta y = 0,5276$ mm



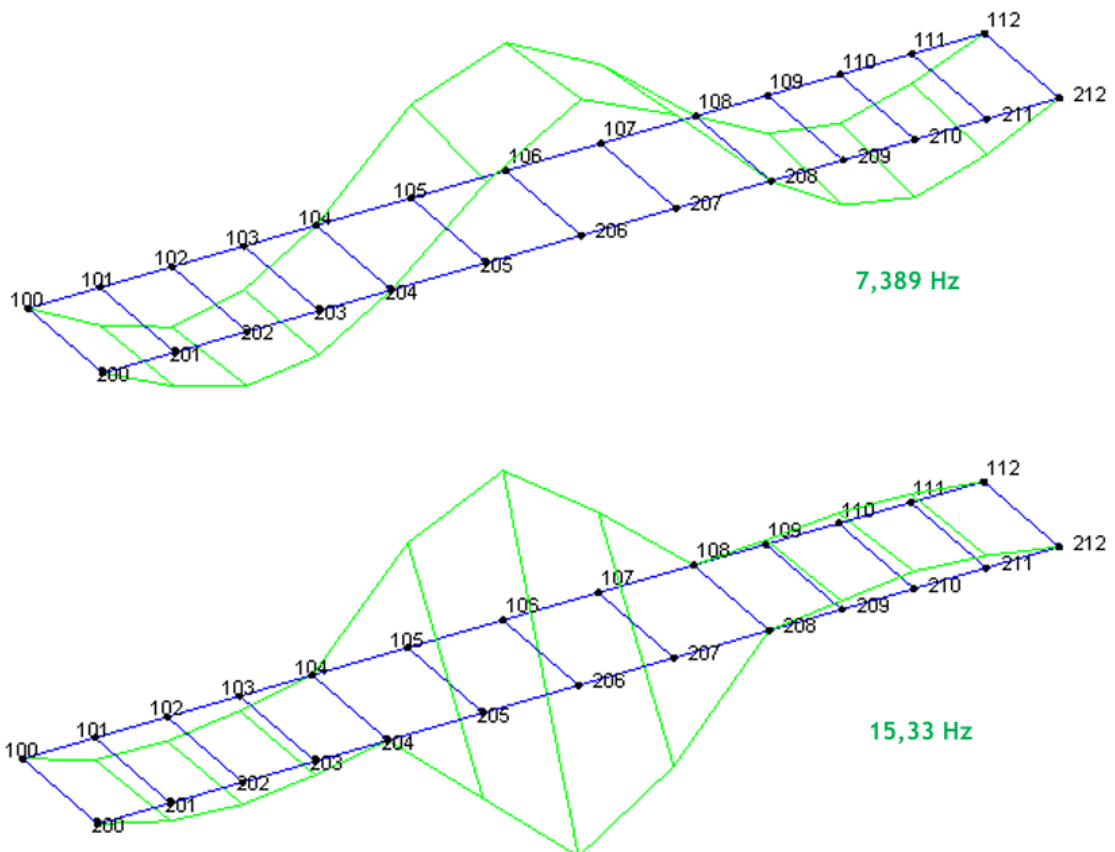
DP3 $\Delta y = 0,3920$ mm

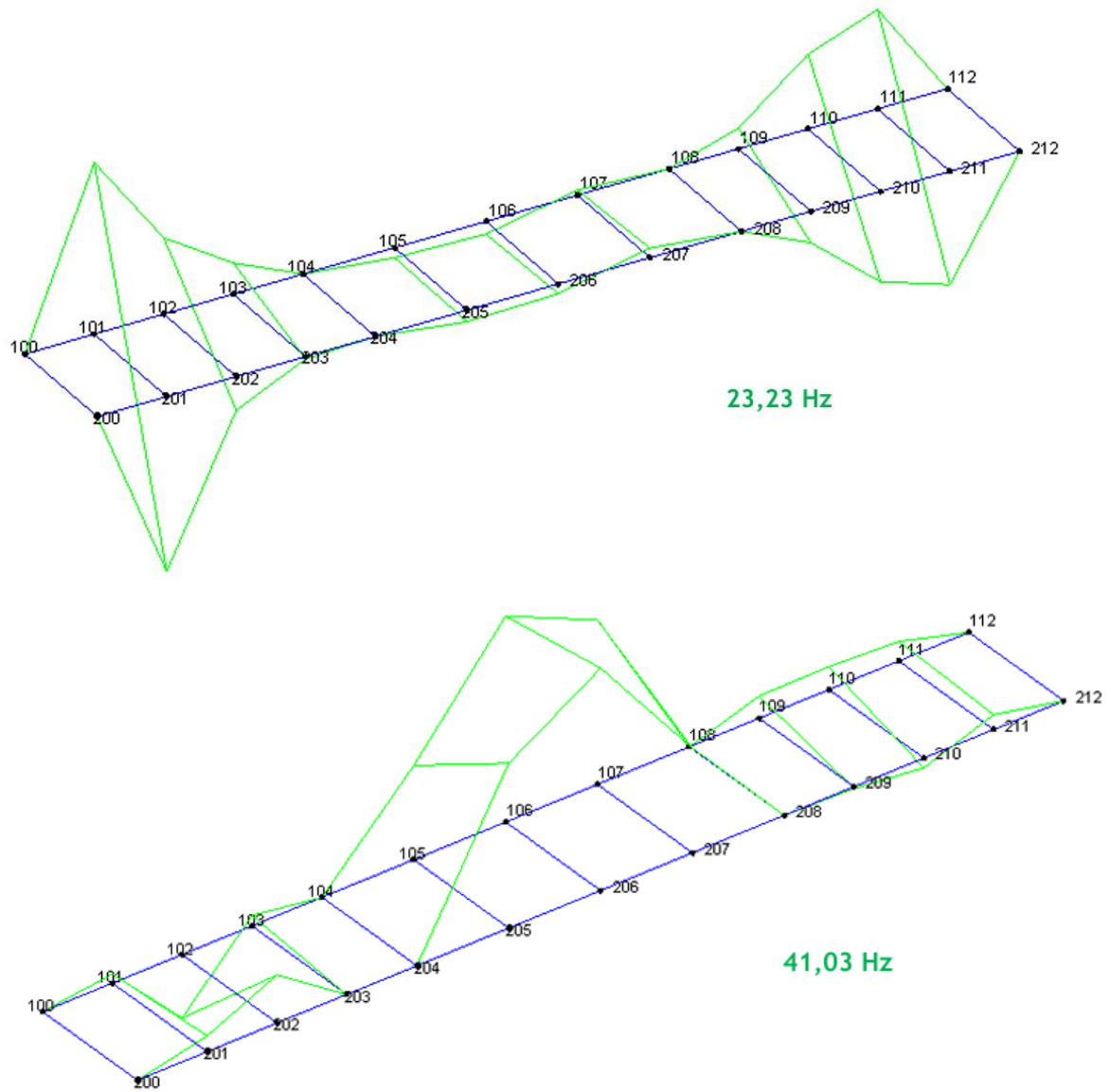


Slika 43.: Zapisi dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko rasponske konstrukcije brzinom od 30 km/h (DIN 30)



Slika 44.: Zapisi singularnih vrijednosti matrica autospektralnih gustoća s istaknutim vlastitim frekvencijama osciliranja

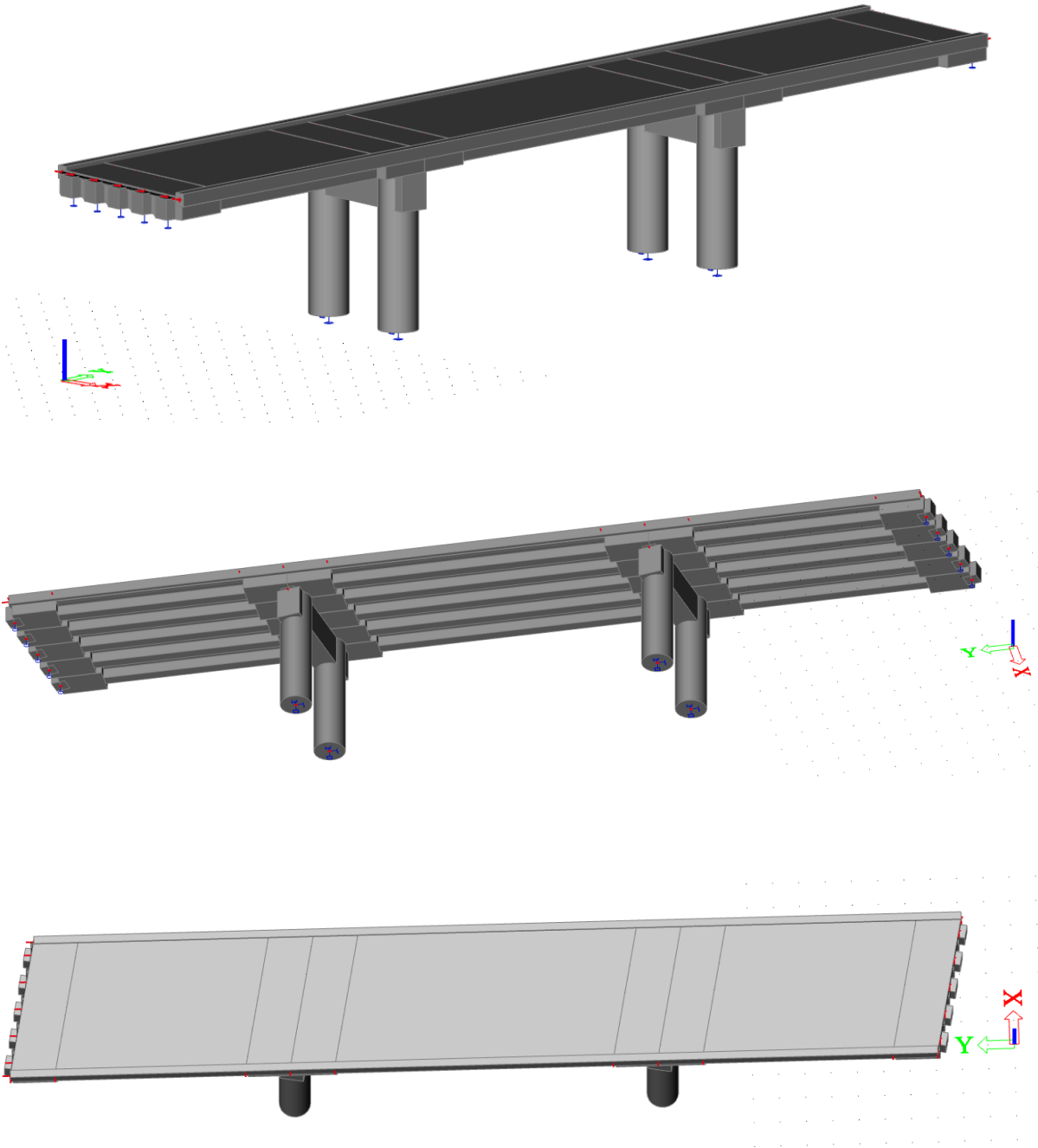




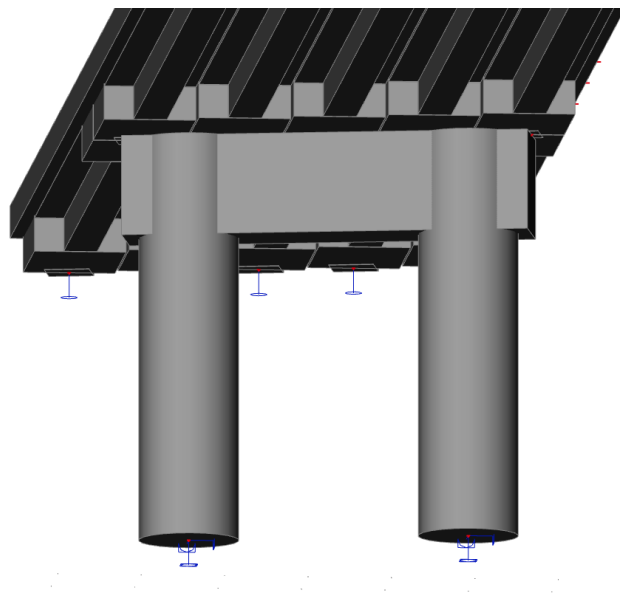
Slika 45.: Eksperimentalno određeni vlastiti oblici osciliranja i odgovarajuće vlastite frekvencije

4. Računska analiza konstrukcije

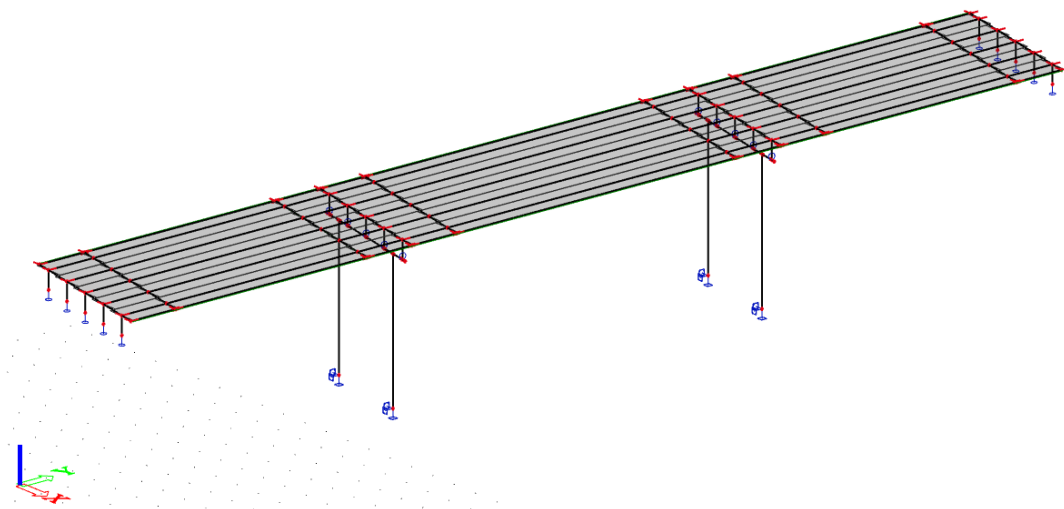
a) prikaz numeričkog modela



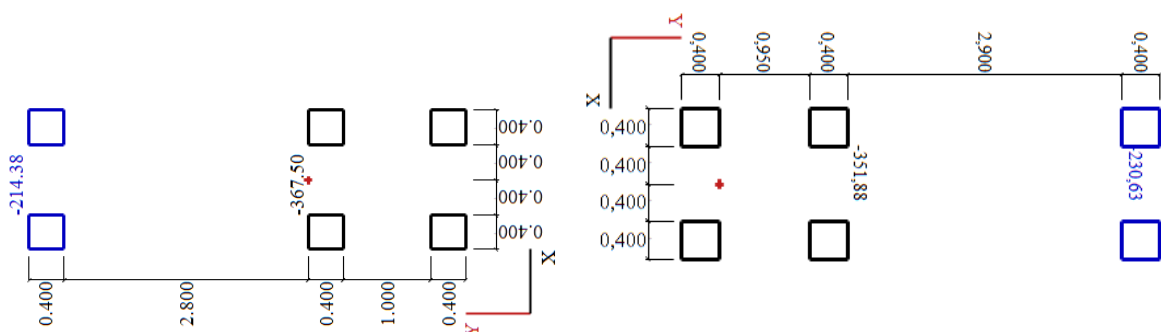
Slika 46.: 3D prikaz numeričkog modela mosta



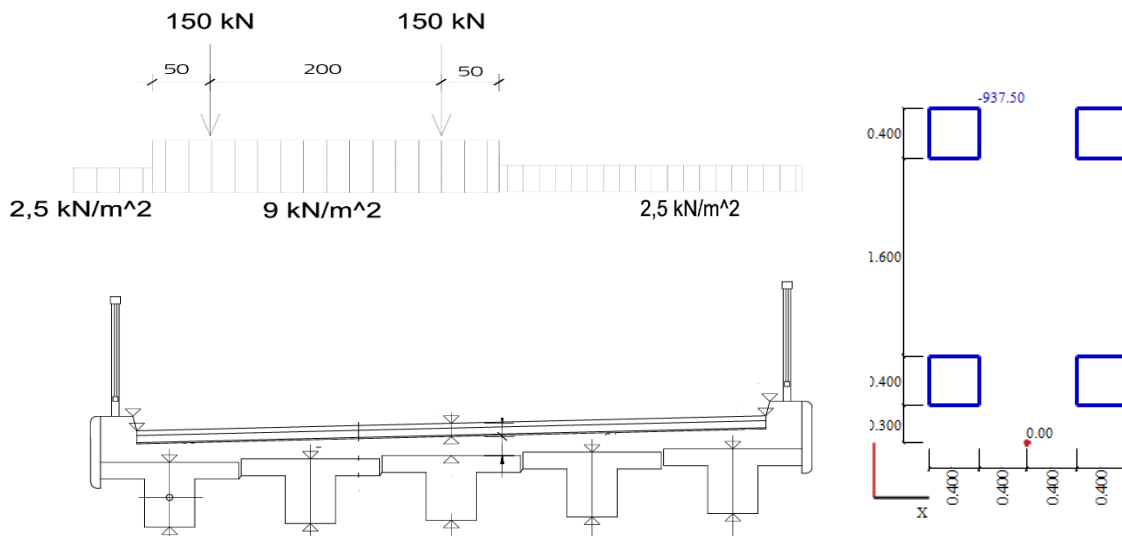
Slika 47.: Usporedni prikaz: stvarni most i numerički model



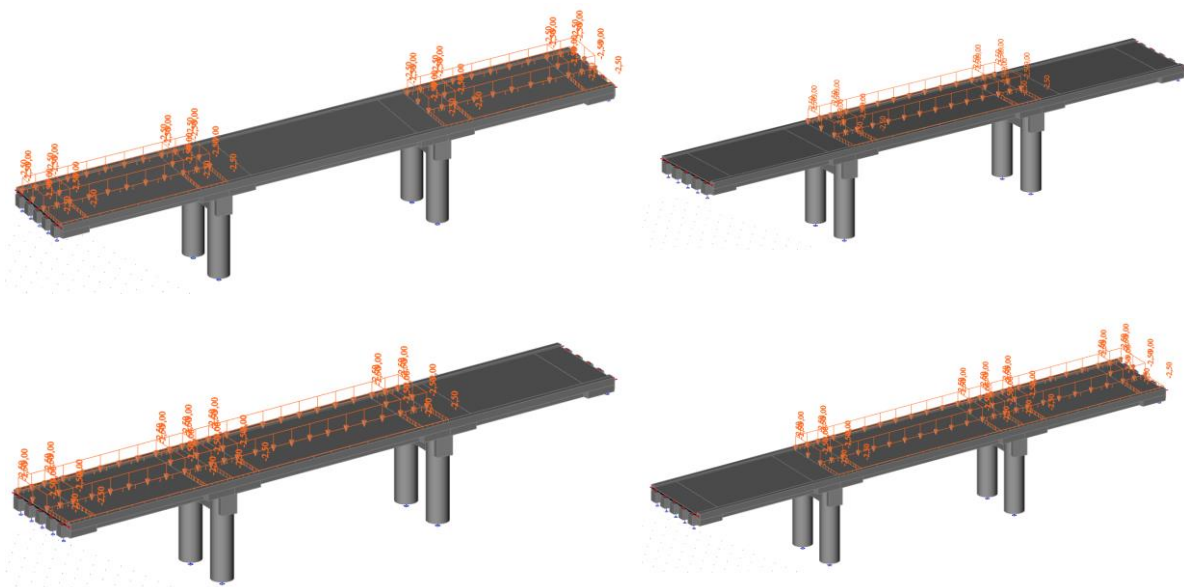
Slika 48.: Prikaz štapnog modela mosta



Slika 49.: Shematski prikaz opterećenja od 1. kamiona (lijevo) i 2. kamiona (desno)



Slika 50.: Shema opterećenja od proračunskog kontinuiranog i koncentriranog opterećenja (desno) i tlocrtni raspored opterećenja prema Eurocodeu (lijevo)

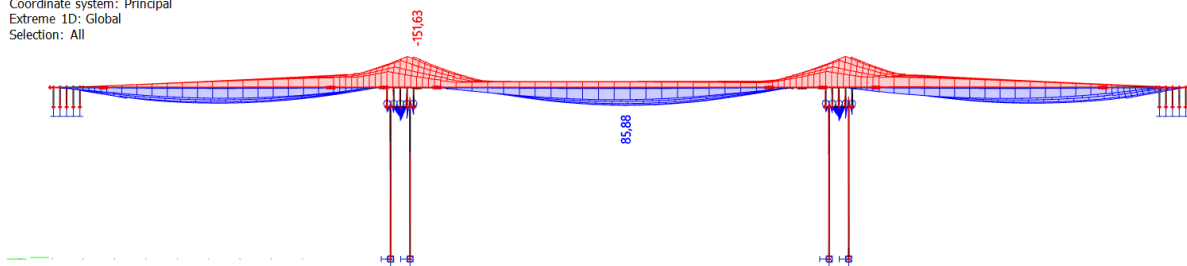


Slika 51.: Slučajevi opterećenja za kontinuirano proračunsko opterećenje prema Eurocodeu - EC_q

b) Računske vrijednosti statičke i dinamičke analize konstrukcije

1D internal forces

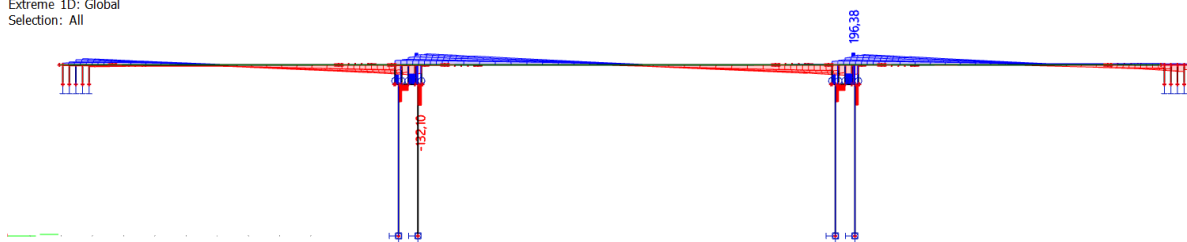
Values: M_y
 Linear calculation
 Combination: EC_q
 Coordinate system: Principal
 Extreme 1D: Global
 Selection: All



Slika 52.: Anvelopa dijagrama momenata savijanja za proračunsko kontinuirano opterećenje EC_q – maksimalni moment savijanja

1D internal forces

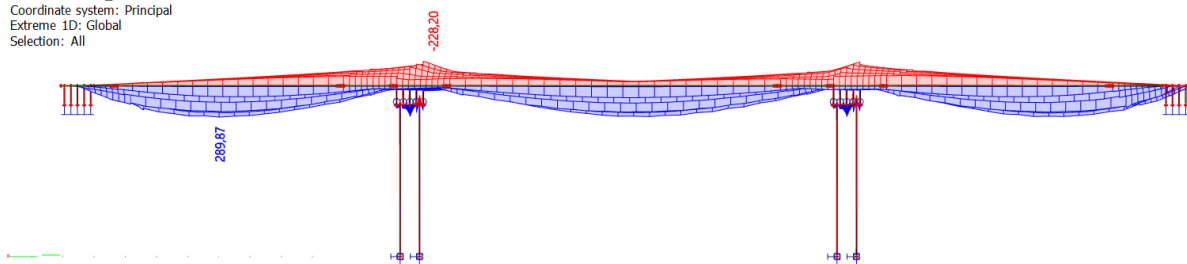
Values: V_z
 Linear calculation
 Combination: EC_q
 Coordinate system: Principal
 Extreme 1D: Global
 Selection: All



Slika 53.: Anvelopa dijagrama poprečnih sila za proračunsko kontinuirano opterećenje EC_q – maksimalna poprečna sila

1D internal forces

Values: M_y
 Linear calculation
 Combination: EC_F
 Coordinate system: Principal
 Extreme 1D: Global
 Selection: All



Slika 54.: Anvelopa dijagrama momenata savijanja za proračunsko koncentrirano opterećenje EC_F – maksimalni moment savijanja

1D internal forcesValues: V_z

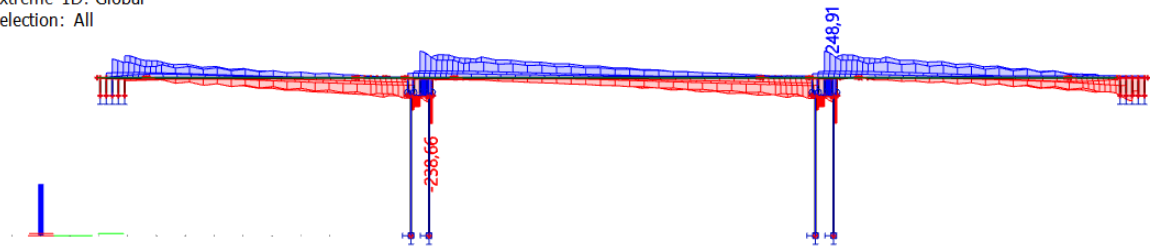
Linear calculation

Combination: EC_F

Coordinate system: Principal

Extreme 1D: Global

Selection: All



Slika 55.: Anvelopa dijagrama poprečnih sila za proračunsko koncentrirano opterećenje EC_F – maksimalna poprečna sila

1D internal forcesValues: M_y

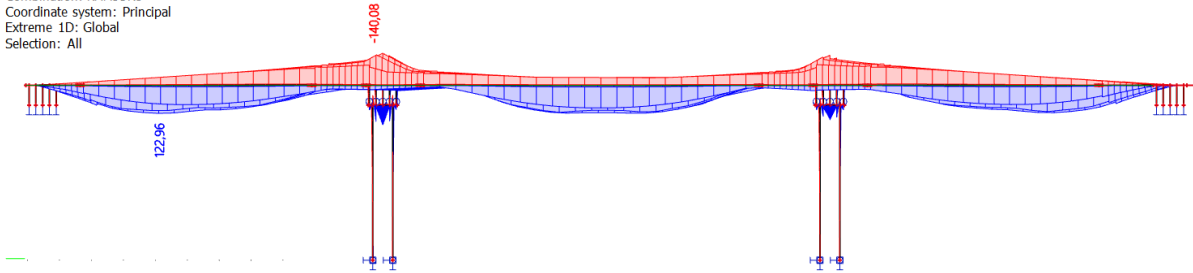
Linear calculation

Combination: KAMIONI

Coordinate system: Principal

Extreme 1D: Global

Selection: All



Slika 56.: Anvelopa dijagrama momenata savijanja od probnog opterećenja – maksimalni moment savijanja

1D internal forcesValues: V_z

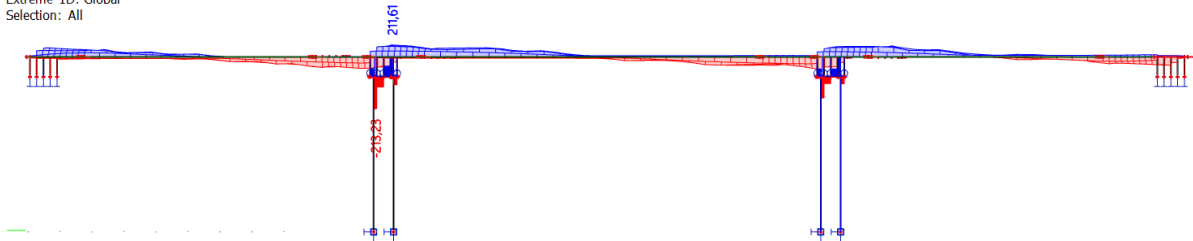
Linear calculation

Combination: KAMIONI

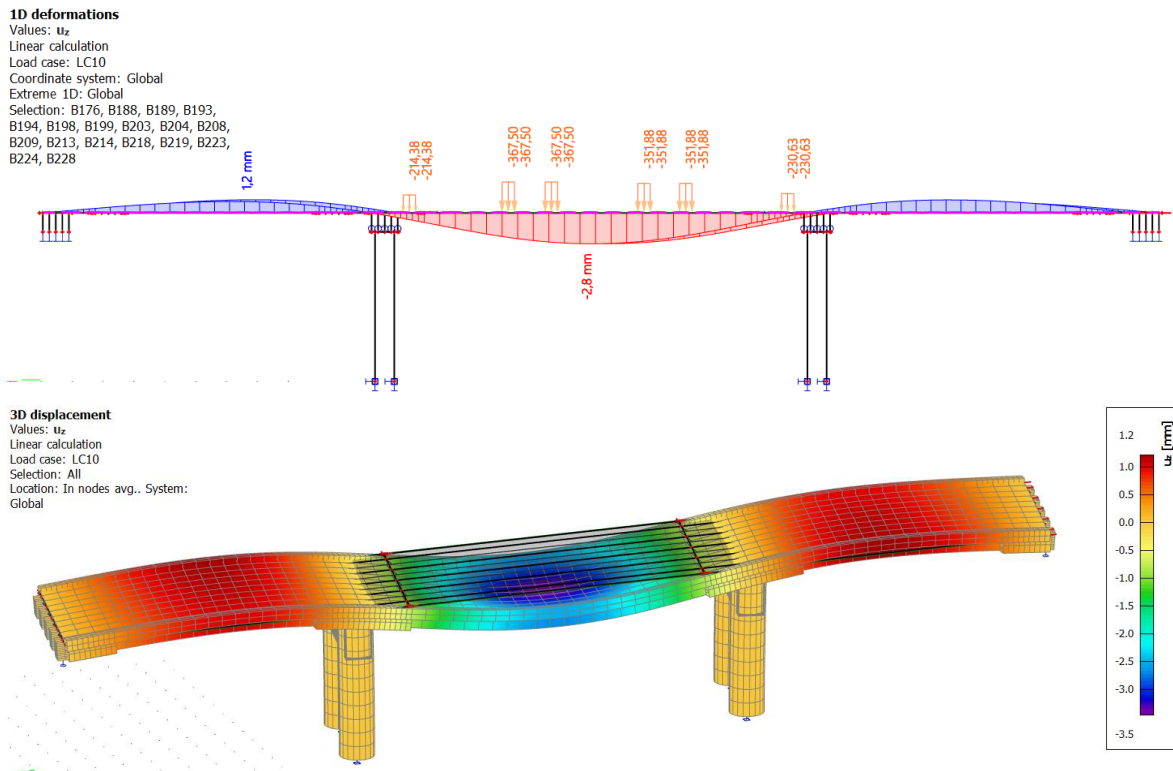
Coordinate system: Principal

Extreme 1D: Global

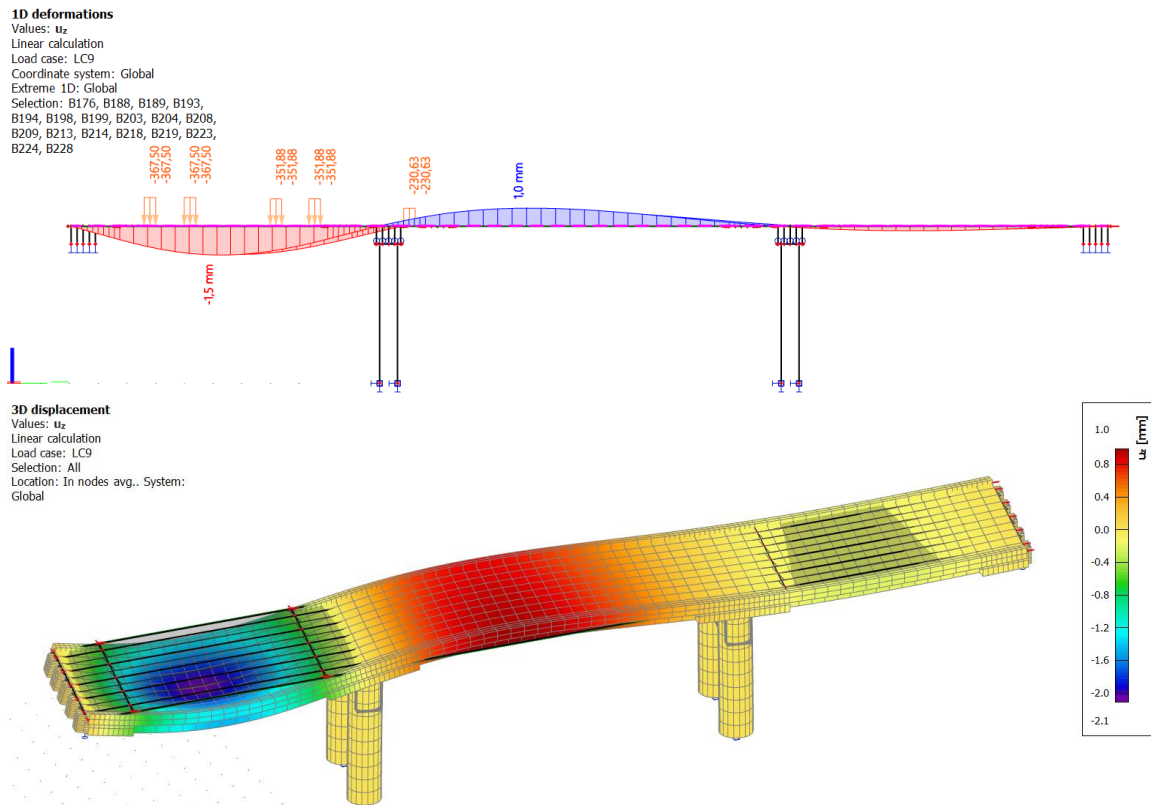
Selection: All



Slika 57.: Anvelopa dijagrama poprečnih sila od probnog opterećenja – maksimalna poprečna sila



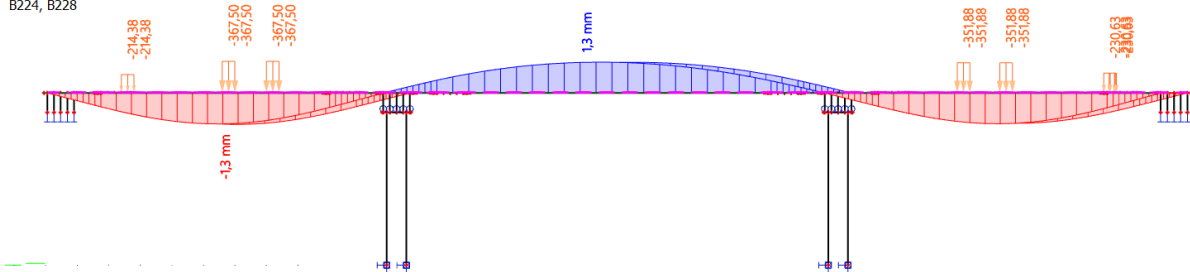
Slika 58.: Statičko ispitivanje - Faza 4: Shema opterećenja, progibna linija i 3D prikaz progiba za dva kamiona na polovici srednjeg raspona



Slika 59.: Statičko ispitivanje - Faze 3 i 5: Shema opterećenja, progibna linija i 3D prikaz progiba za dva kamiona na polovici krajnjeg raspona

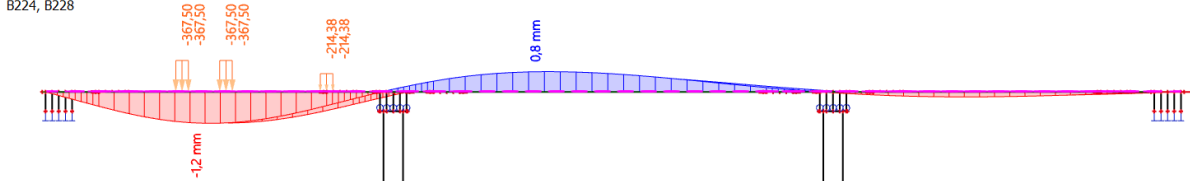
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC8
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B224, B228



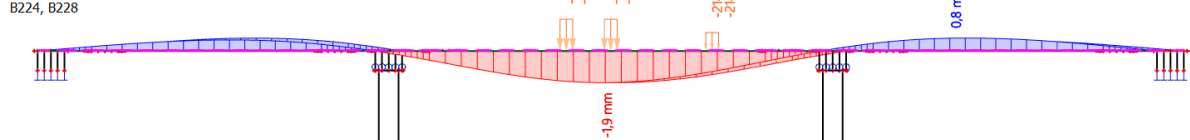
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC13
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B224, B228



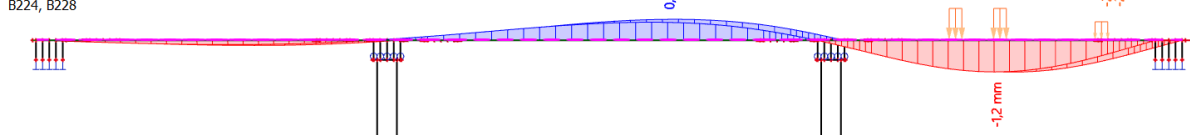
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC14
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B224, B228



1D deformations

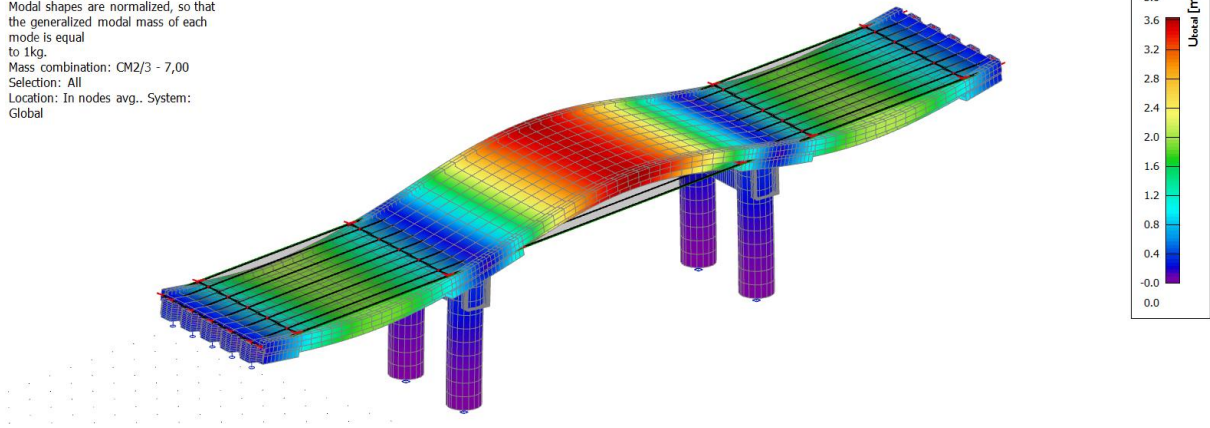
Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC15
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B224, B228



Slika 60.: Prikaz progibnih linija i shema opterećenja za Faze 2, 9, 10 i 11 (odozgo prema dolje)

3D displacement

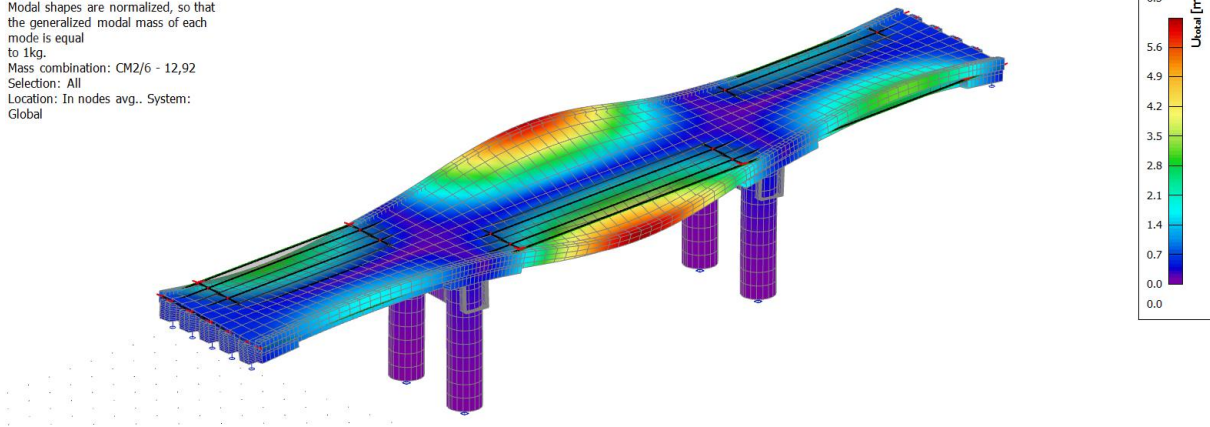
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/3 - 7,00
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 61.: Prvi vlastiti oblik titranja (7,00 Hz)

3D displacement

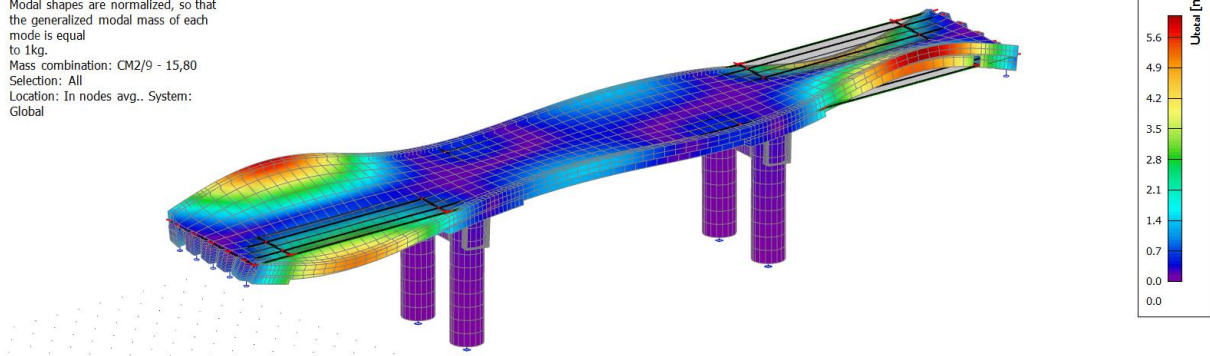
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/6 - 12,92
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



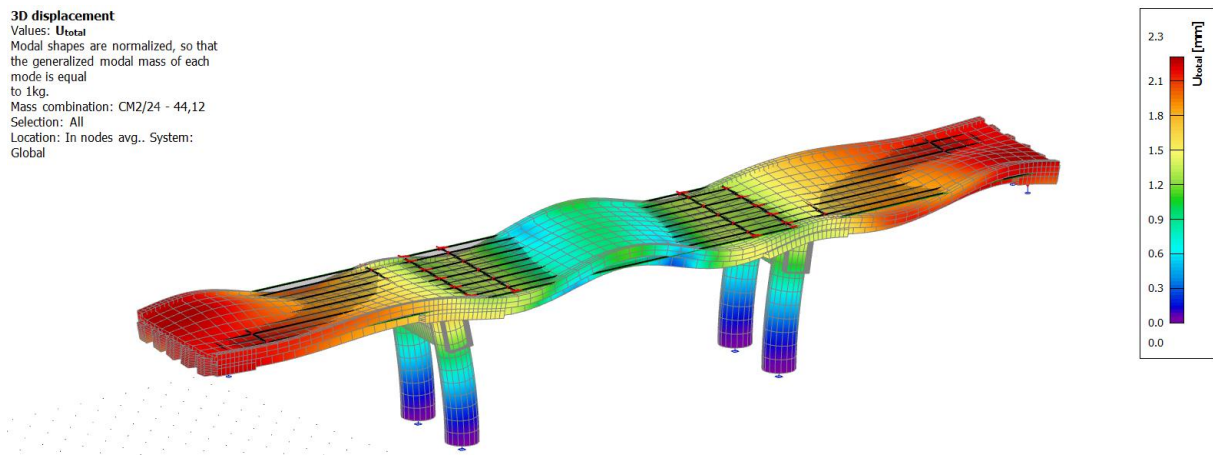
Slika 62.: Drugi vlastiti oblik titranja (12,92 Hz)

3D displacement

Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/9 - 15,80
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 63.: Treći vlastiti oblik titranja (15,80 Hz)



Slika 64.: Četvrti vlastiti oblik titranja (44,12 Hz)

5. Fotodokumentacija ispitivanja mosta



Slika 65.: Statičko ispitivanje mosta kamionima – mjerenje vertikalnih pomaka u FAZI 2 (gore) i FAZI 3 (dolje)



Slika 66.: Statičko ispitivanje mosta kamionima – mjerenje vertikalnih pomaka u FAZI 4 (gore) i FAZI 5 (dolje)



Slika 67.: Statičko ispitivanje mosta kamionima – mjerenje vertikalnih pomaka u FAZAMA

7 i 7'



Slika 68.: Akcelerometri za dinamičko ispitivanje mosta

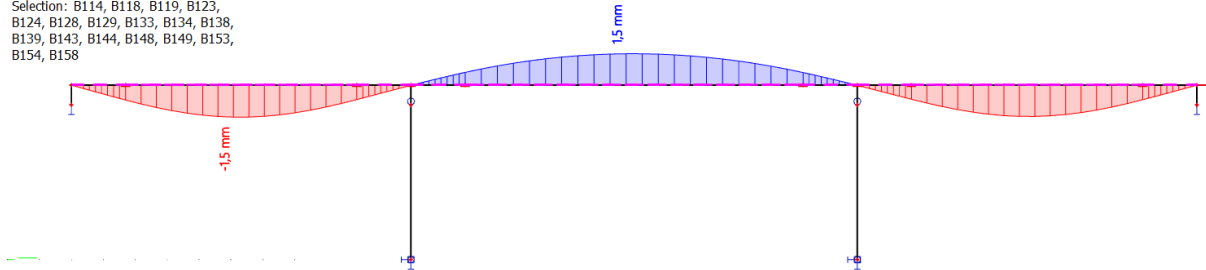
PRILOG B

1. Računska analiza mosta pod kutom od 0°
2. Računska analiza mosta pod kutom od 20°
3. Računska analiza mosta pod kutom od 30°
4. Računska analiza mosta pod kutom od 40°

1. Računska analiza mosta pod kutem od 0°

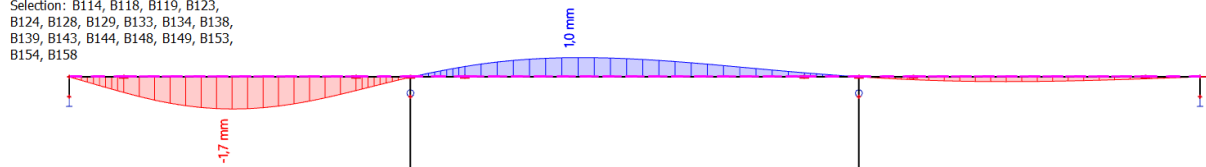
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC8
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B114, B118, B119, B123,
 B124, B128, B129, B133, B134, B138,
 B139, B143, B144, B148, B149, B153,
 B154, B158



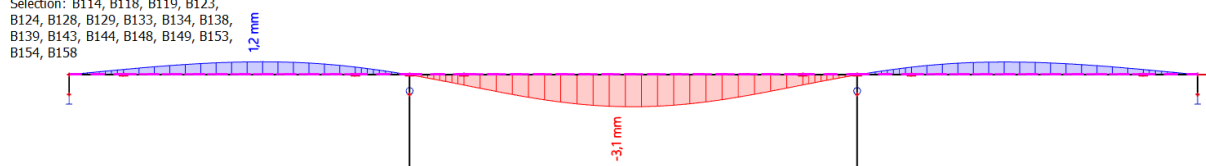
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC9
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B114, B118, B119, B123,
 B124, B128, B129, B133, B134, B138,
 B139, B143, B144, B148, B149, B153,
 B154, B158



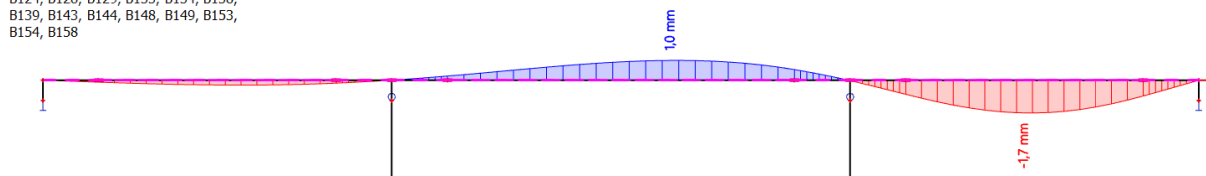
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC10
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B114, B118, B119, B123,
 B124, B128, B129, B133, B134, B138,
 B139, B143, B144, B148, B149, B153,
 B154, B158



1D deformations

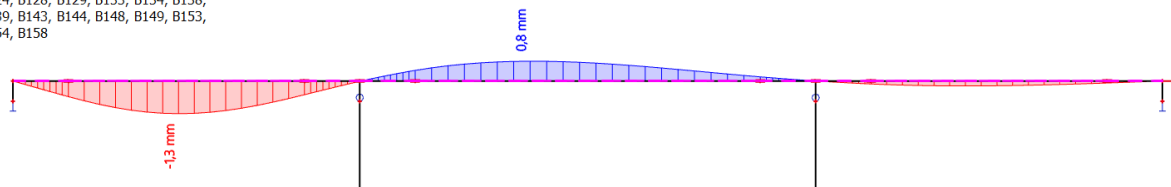
Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC11
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B114, B118, B119, B123,
 B124, B128, B129, B133, B134, B138,
 B139, B143, B144, B148, B149, B153,
 B154, B158



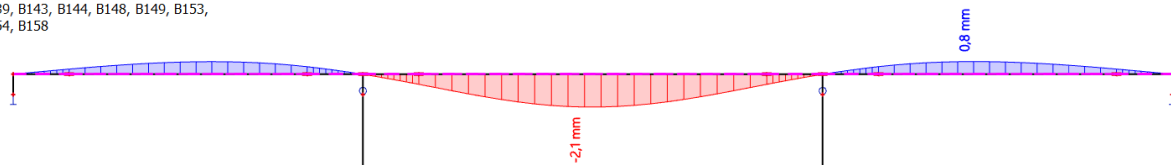
Slika 69. Računski progibi modela $\angle 0^\circ$ za faze 2, 3, 4 i 5 (gore prema dolje)

1D deformations

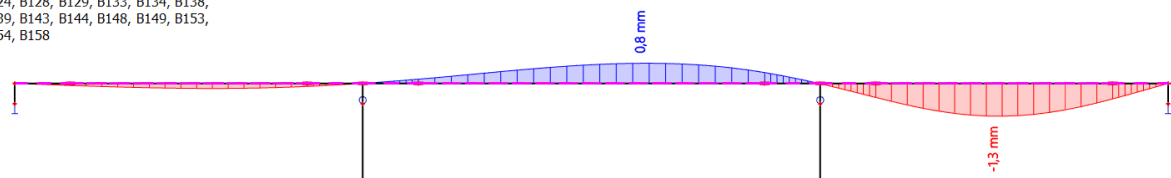
Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC13
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B114, B118, B119, B123,
 B124, B128, B129, B133, B134, B138,
 B139, B143, B144, B148, B149, B153,
 B154, B158

**1D deformations**

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC14
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B114, B118, B119, B123,
 B124, B128, B129, B133, B134, B138,
 B139, B143, B144, B148, B149, B153,
 B154, B158

**1D deformations**

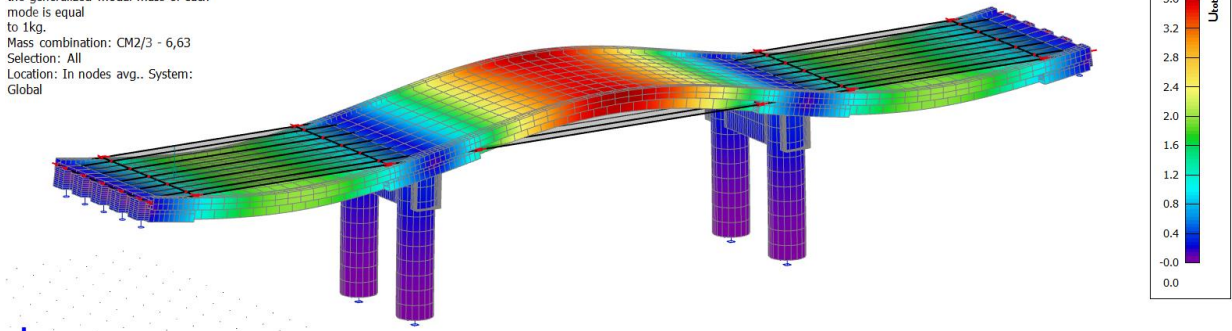
Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC15
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B114, B118, B119, B123,
 B124, B128, B129, B133, B134, B138,
 B139, B143, B144, B148, B149, B153,
 B154, B158



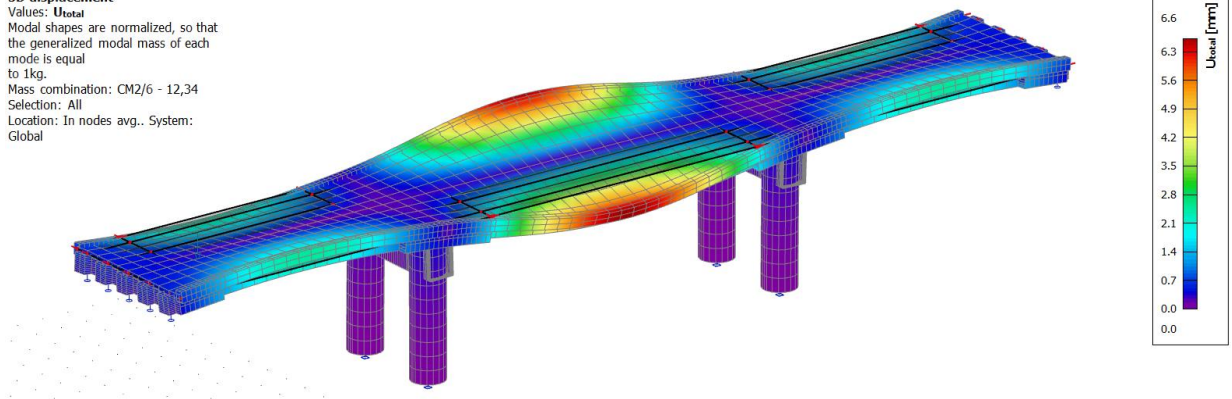
Slika 70.: Računski progibi modela $\angle 0^\circ$ za faze 9,10 i 11 (gore prema dolje)

3D displacement

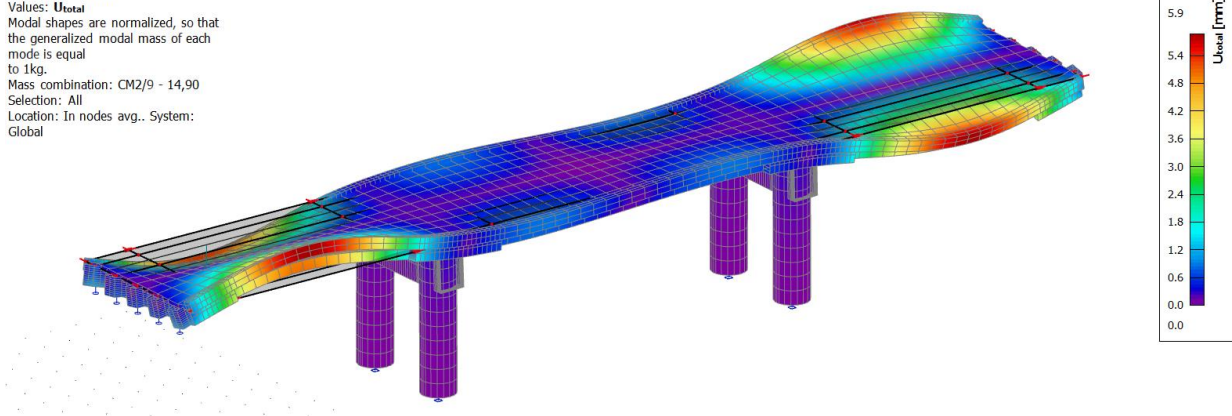
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/3 - 6,63
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global

Slika 71.: Model $\angle 0^\circ$ - prvi vlastiti oblik titranja (6,63 Hz)**3D displacement**

Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/6 - 12,34
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global

Slika 72.: Model $\angle 0^\circ$ - drugi vlastiti oblik titranja (12,34 Hz)**3D displacement**

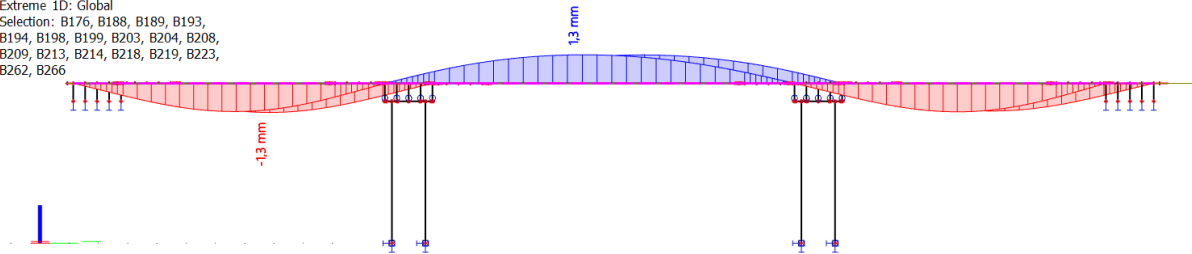
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/9 - 14,90
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global

Slika 73.: Model $\angle 0^\circ$ - treći vlastiti oblik titranja (14,90 Hz)

2. Računska analiza mosta pod kutom od 20°

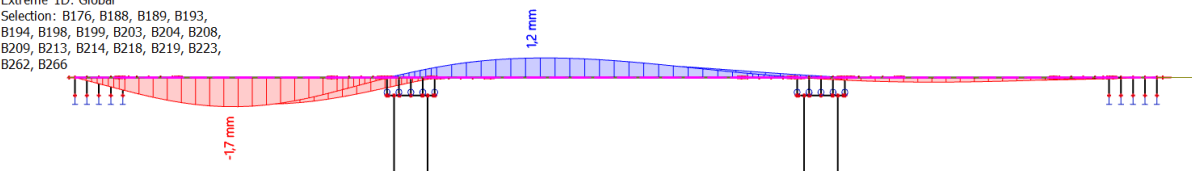
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC15
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B262, B266



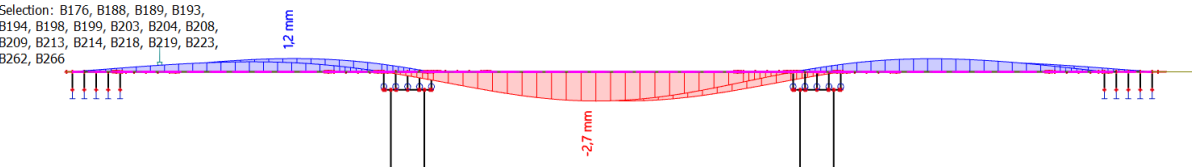
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC9
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B262, B266



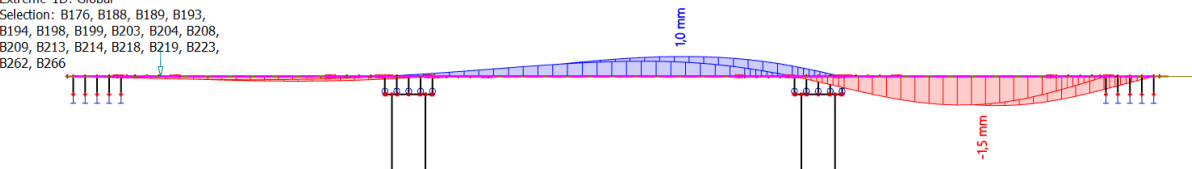
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC10
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B262, B266



1D deformations

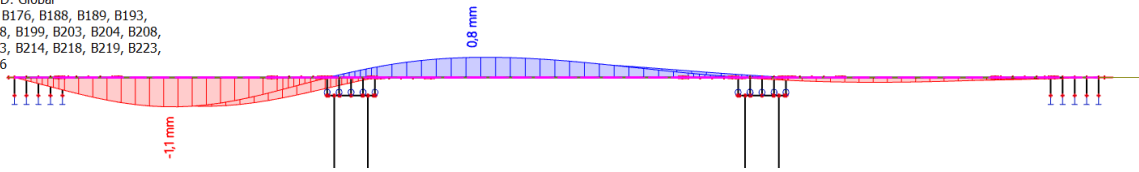
Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC11
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B262, B266



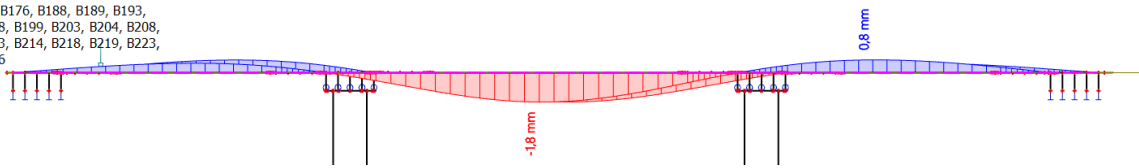
Slika 74.: Računski progibi modela $\angle 20^\circ$ za faze 2, 3, 4 i 5 (gore prema dolje)

1D deformations

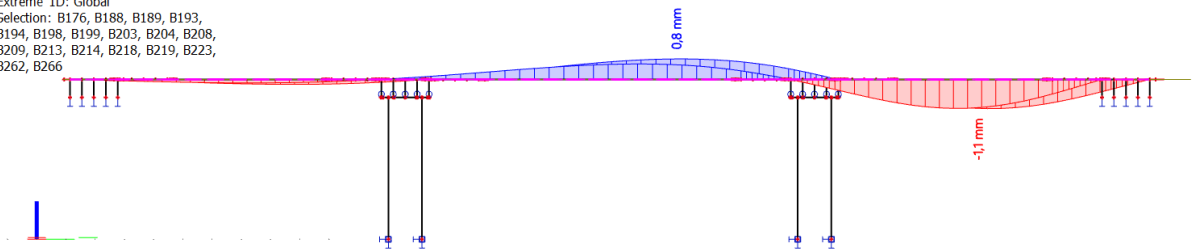
Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC13
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B262, B266

**1D deformations**

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC14
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B262, B266

**1D deformations**

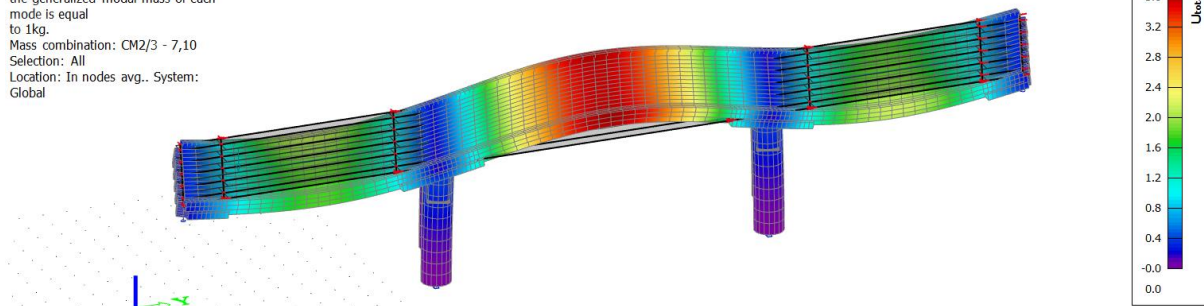
Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC8
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B262, B266



Slika 75.: Računski progibi modela $\angle 20^\circ$ za faze 9,10 i 11 (gore prema dolje)

3D displacement

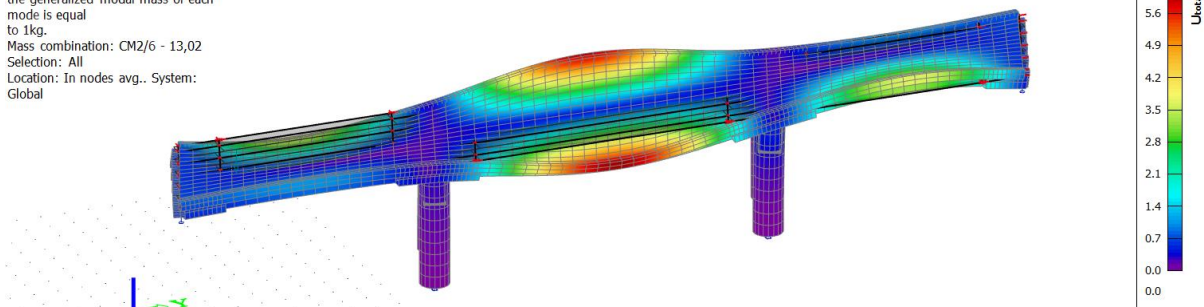
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/3 - 7,10
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 76.: Model $\angle 20^\circ$ - prvi vlastiti oblik titranja (7,10 Hz)

3D displacement

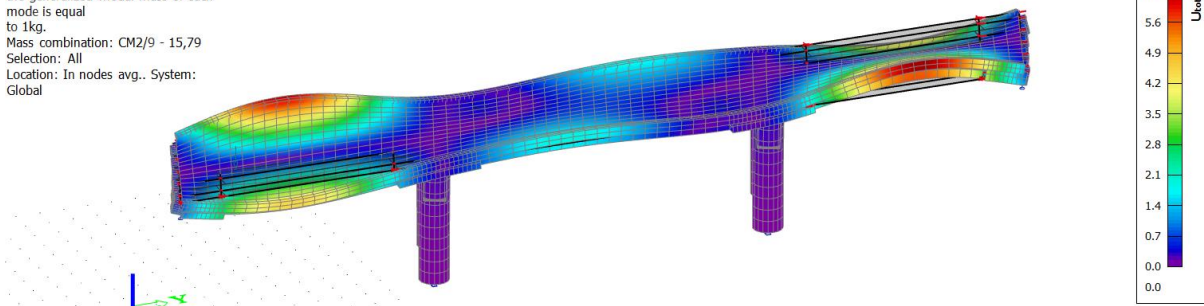
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/6 - 13,02
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 77.: Model $\angle 20^\circ$ - drugi vlastiti oblik titranja (13,02 Hz)

3D displacement

Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/9 - 15,79
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global

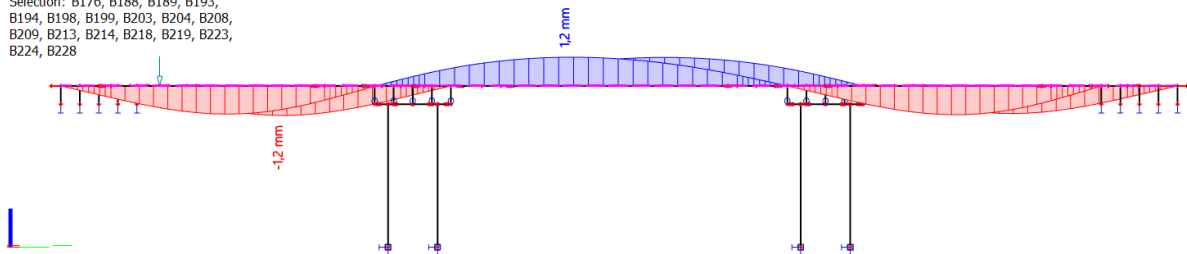


Slika 78.: Model $\angle 20^\circ$ - treći vlastiti oblik titranja (15,79 Hz)

3. Računska analiza mosta pod kutom od 30°

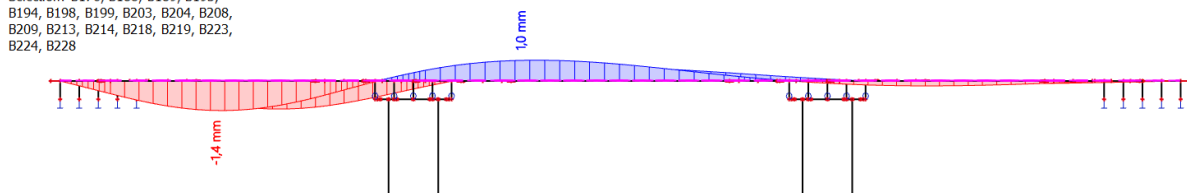
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC8
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B224, B228



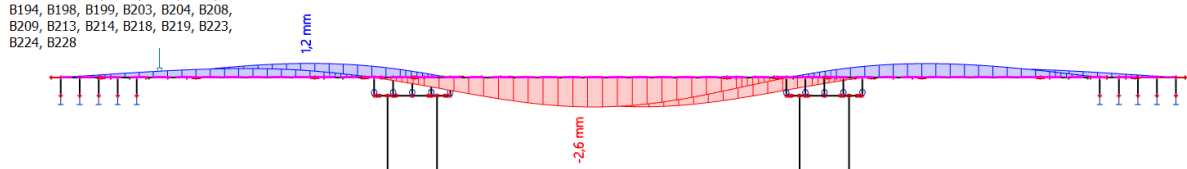
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC9
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B224, B228



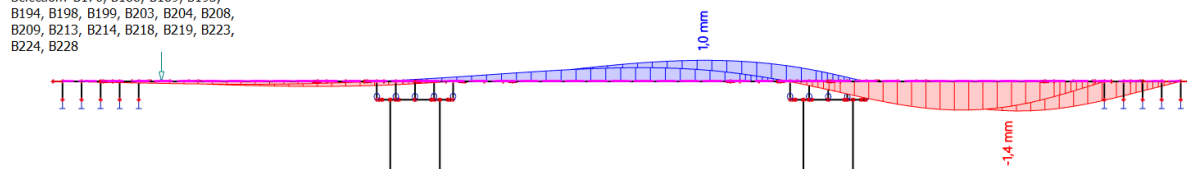
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC10
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B224, B228



1D deformations

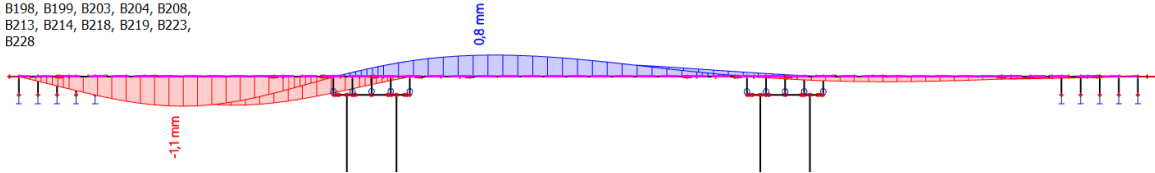
Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC11
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B224, B228



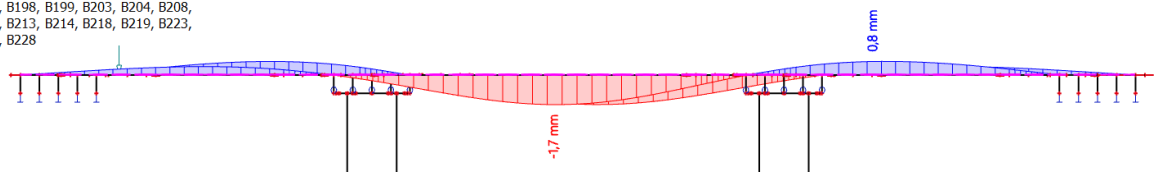
Slika 79.: Računski progibi modela $\angle 30^\circ$ za faze 2, 3, 4 i 5 (gore prema dolje)

1D deformations

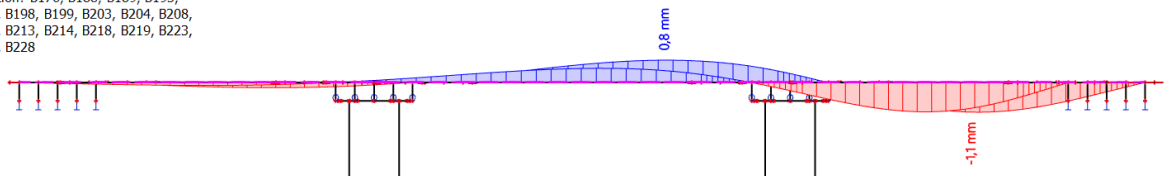
Values: u_z
Linear calculation
Load case: LC13
Coordinate system: Global
Extreme 1D: Global
Selection: B176, B188, B189, B193,
B194, B198, B199, B203, B204, B208,
B209, B213, B214, B218, B219, B223,
B224, B228

**1D deformations**

Values: u_z
Linear calculation
Load case: LC14
Coordinate system: Global
Extreme 1D: Global
Selection: B176, B188, B189, B193,
B194, B198, B199, B203, B204, B208,
B209, B213, B214, B218, B219, B223,
B224, B228

**1D deformations**

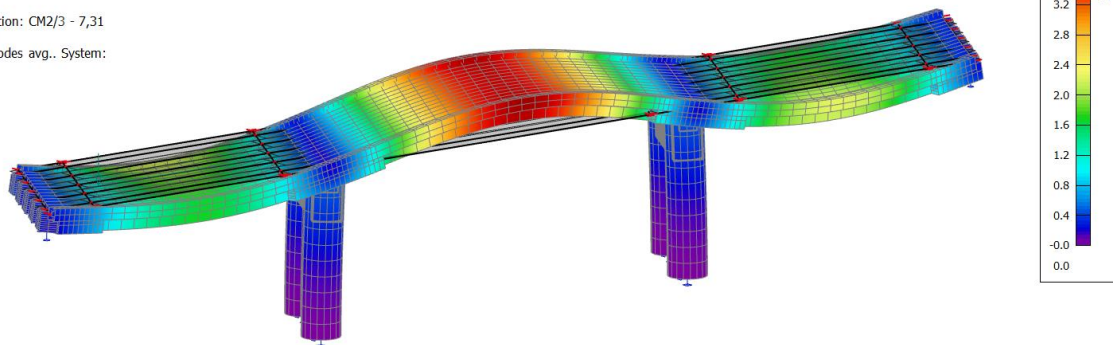
Values: u_z
Linear calculation
Load case: LC15
Coordinate system: Global
Extreme 1D: Global
Selection: B176, B188, B189, B193,
B194, B198, B199, B203, B204, B208,
B209, B213, B214, B218, B219, B223,
B224, B228



Slika 80.: Računski progibi modela $\angle 30^\circ$ za faze 9,10 i 11 (gore prema dolje)

3D displacement

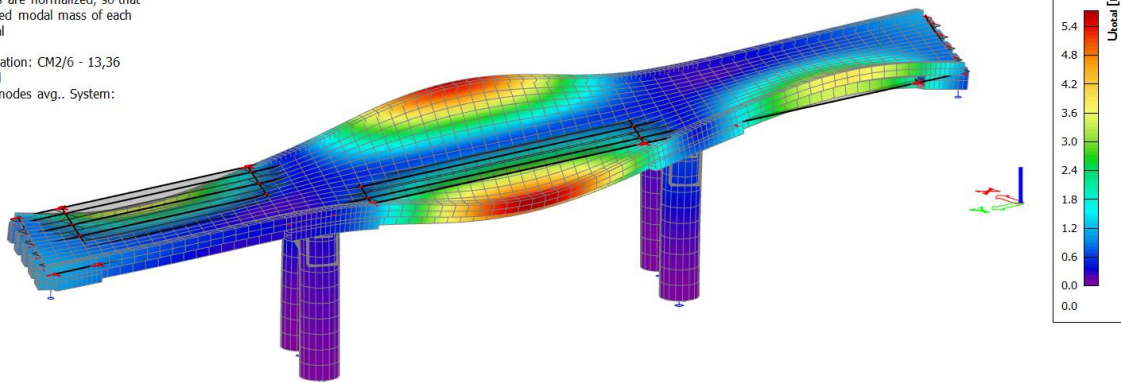
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/3 - 7,31
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 81.: Model $\angle 30^\circ$ - prvi vlastiti oblik titranja (7,31 Hz)

3D displacement

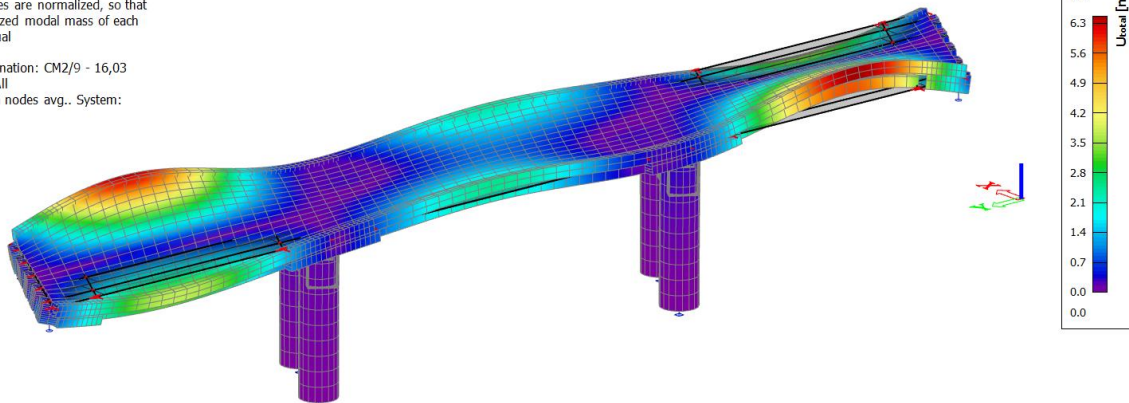
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/6 - 13,36
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 82.: Model $\angle 30^\circ$ - drugi vlastiti oblik titranja (13,36 Hz)

3D displacement

Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/9 - 16,03
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global

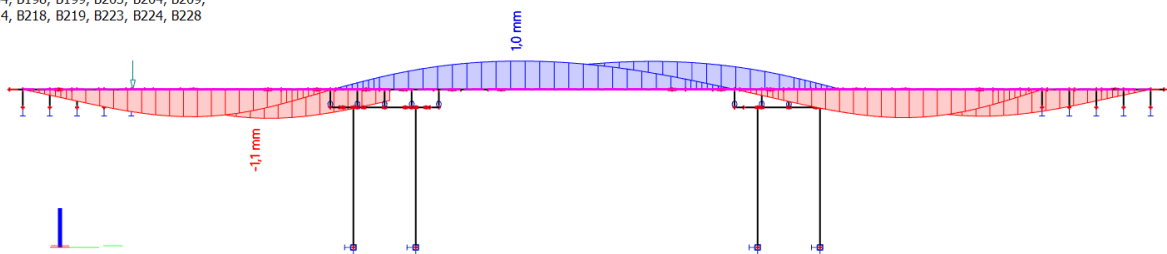


Slika 83.: Model $\angle 30^\circ$ - treći vlastiti oblik titranja (16,03 Hz)

4. Računska analiza mosta pod kutom od 40°

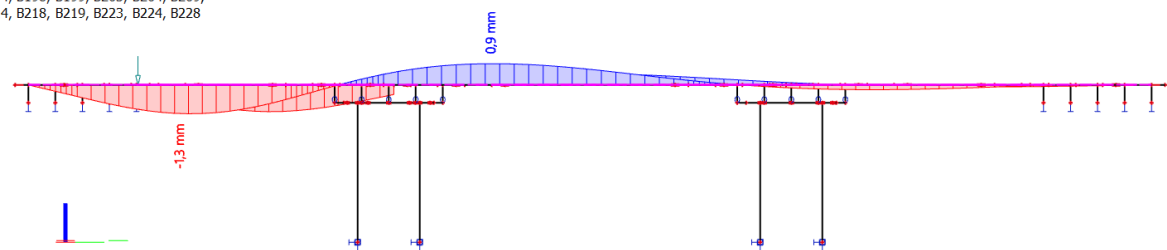
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC8
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B209,
 B214, B218, B219, B223, B224, B228



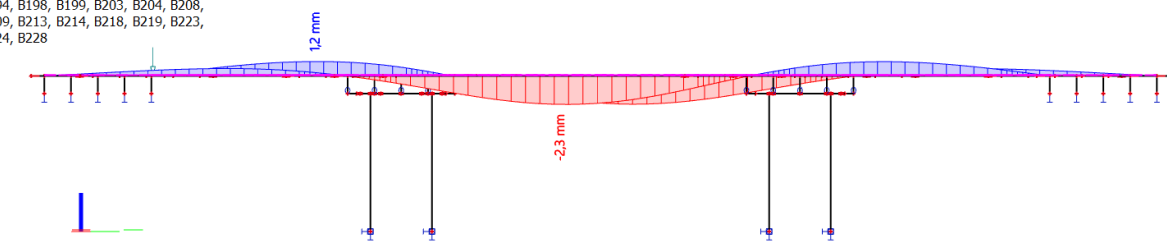
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC9
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B209,
 B214, B218, B219, B223, B224, B228



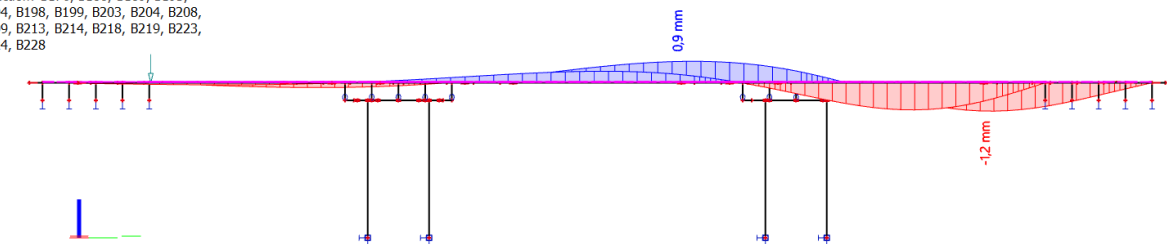
1D deformations

Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC10
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B224, B228



1D deformations

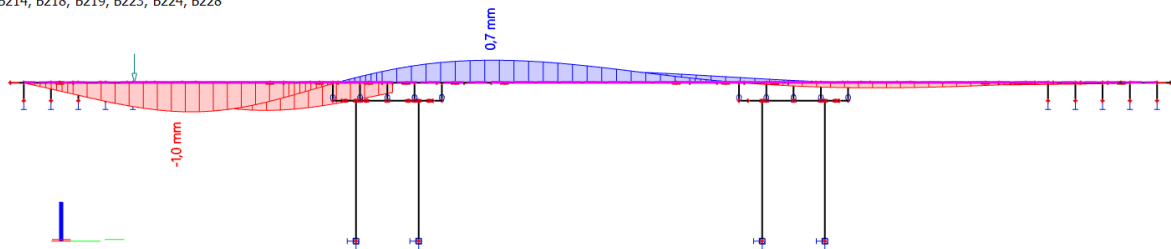
Values: u_z
 Linear calculation
 Load case: LC11
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: B176, B188, B189, B193,
 B194, B198, B199, B203, B204, B208,
 B209, B213, B214, B218, B219, B223,
 B224, B228



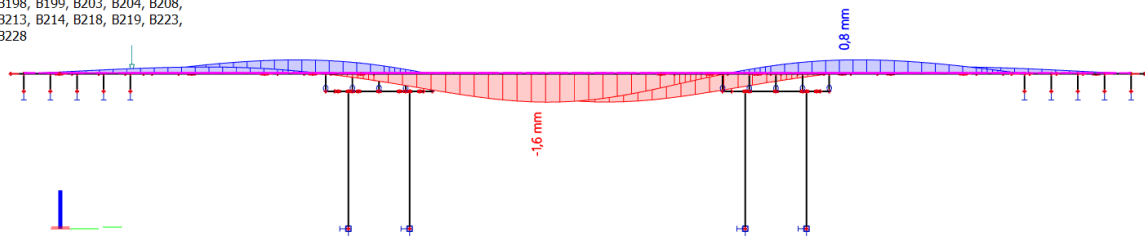
Slika 84.: Računski progibi modela $\angle 40^\circ$ za faze 2, 3, 4 i 5 (gore prema dolje)

1D deformations

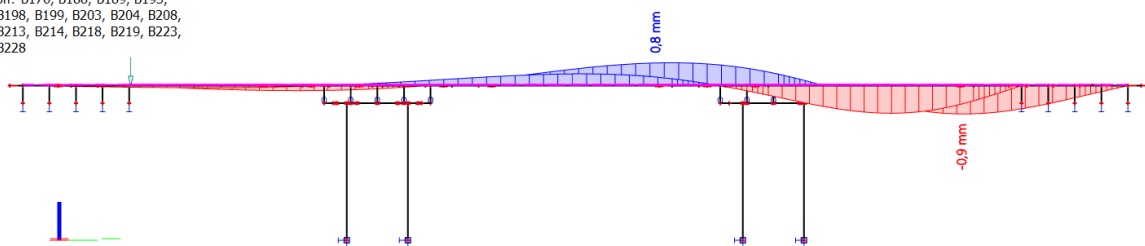
Values: u_z
Linear calculation
Load case: LC13
Coordinate system: Global
Extreme 1D: Global
Selection: B176, B188, B189, B193,
B194, B198, B199, B203, B204, B209,
B214, B218, B219, B223, B224, B228

**1D deformations**

Values: u_z
Linear calculation
Load case: LC14
Coordinate system: Global
Extreme 1D: Global
Selection: B176, B188, B189, B193,
B194, B198, B199, B203, B204, B208,
B209, B213, B214, B218, B219, B223,
B224, B228

**1D deformations**

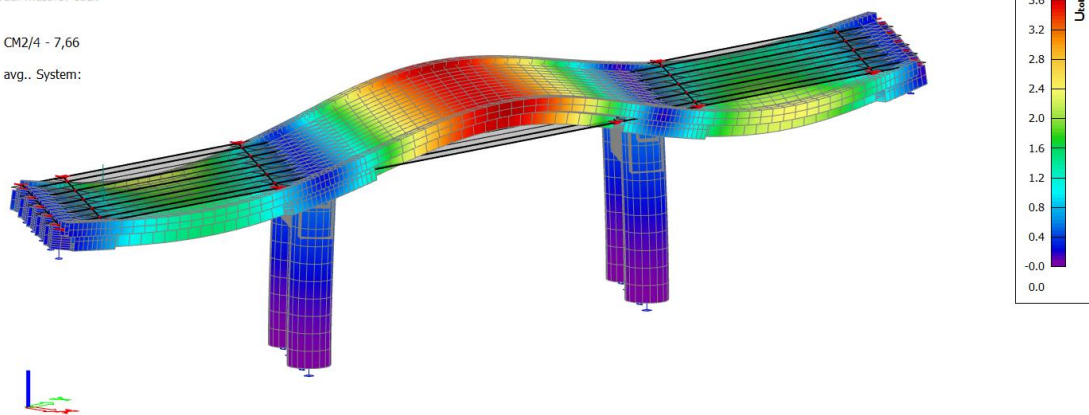
Values: u_z
Linear calculation
Load case: LC15
Coordinate system: Global
Extreme 1D: Global
Selection: B176, B188, B189, B193,
B194, B198, B199, B203, B204, B208,
B209, B213, B214, B218, B219, B223,
B224, B228



Slika 85.: Računski progibi modela $\angle 40^\circ$ za faze 9,10 i 11 (gore prema dolje)

3D displacement

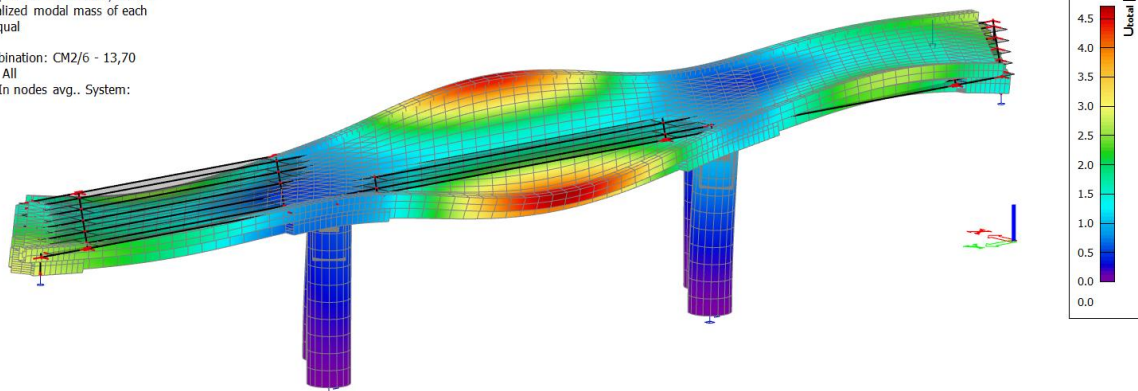
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/4 - 7,66
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 86.: Model $\angle 40^\circ$ - prvi vlastiti oblik titranja (7,66 Hz)

3D displacement

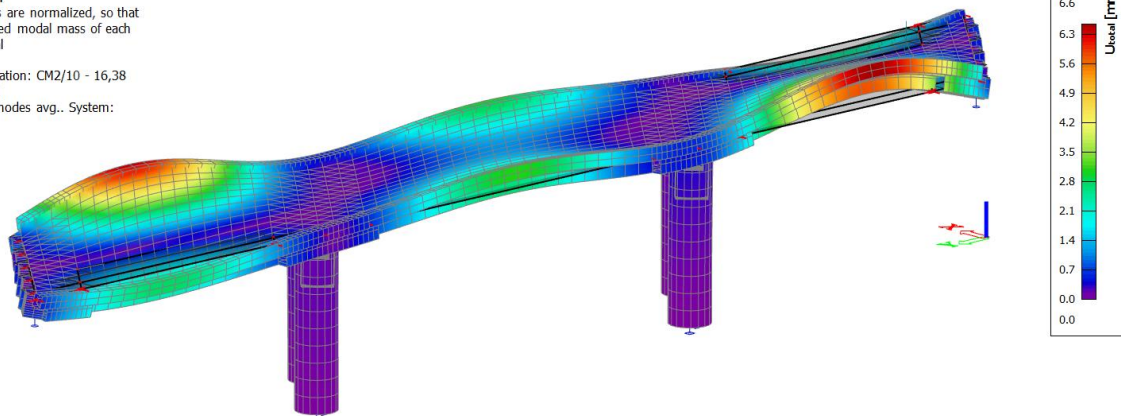
Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/6 - 13,70
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 87.: Model $\angle 40^\circ$ - drugi vlastiti oblik titranja (13,70 Hz)

3D displacement

Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM2/10 - 16,38
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 88.: Model $\angle 40^\circ$ - treći vlastiti oblik titranja (16,38 Hz)

POPIS LITERATURE

- [1] Bartolac M. *Ispitivanje konstrukcija* [predavanje]. Zagreb: Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu; 2022.
- [2] Radić J, Mandić A, Puž G. *Konstruiranje mostova (Mostovi 2)*. Zagreb: Hrvatska sveučilišna naklada; 2005.
- [3] Biondić H. Probno opterećenje mostova. *Ekscentar* [Internet]. 2011;14:80-83. [pristupljeno: 14. listopada 2024.]. Dostupno: <https://hrcak.srce.hr/file/106575>
- [4] Bondono J. Tiber River. *Tourist in Rome* [Internet]. Dostupno: <https://www.jeffbondono.com/TouristInRome/TiberRiver.html> [Pristupljeno: 18. svibnja 2024.]
- [5] Ironbridge Gorge Museum Trust. The Iron Bridge. *Iron Bridge*. Dostupno: <https://www.ironbridge.org.uk/about-us/the-iron-bridge/> [Pristupljeno: 18. svibnja 2024.]
- [6] Wikipedia. Brooklyn Bridge. *Wikipedia*. Dostupno: https://en.wikipedia.org/wiki/Brooklyn_Bridge . [Pristupljeno: 18. svibnja 2024.]
- [7] Washington State Department of Transportation. Bridges and Tunnels – Historical bridge failures. *Washington State Department of Transportation*. Dostupno: <https://wsdot.wa.gov/tnbhistory/bridges-failure.htm> [Pristupljeno: 18. svibnja 2024.]
- [8] The Guardian. What caused the Genoa Morandi bridge collapse and the end of an Italian national myth. *The Guardian*. Dostupno: <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/26/what-caused-the-genoa-morandi-bridge-collapse-and-the-end-of-an-italian-national-myth> [Pristupljeno: 18. svibnja 2024.]
- [9] Remembering the Brooklyn Bridge. *Bridge of the Brooklyn*. Dostupno: <https://bridgeofthebrooklyn.weebly.com/remembering-the-brooklyn-bridge.html> [Pristupljeno: 18. svibnja 2024.]
- [10] Lantsoght E, urednik. *Load Testing of Bridges: Current Practice and Diagnostic Load Testing*. Volumen 12. London: Taylor & Francis Group; 2019.

-
- [11] Schacht G, Marx S, Bolle G. Loading tests of existing concrete structures – historical development and present practice. U: *Proceedings of the 4th International fib Congress; 2011. lipanj; Prag, Češka. 2011. Str. 3-4.*
- [12] Birnstiel C. Collapse of a cable-stayed road bridge in Germany in 1825. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering History and Heritage.* 2013;166(EH4):207-226. Dostupno na: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/ehah.13.00007> [Pristupljeno: 18. svibnja 2024.]
- [13] Manchester Group of the Victorian Society. Suspension Bridge, Broughton. *Manchester Victorian Architects.* Dostupno: <https://manchestervictorianarchitects.org.uk/buildings/suspension-bridge-broughton> [Pristupljeno: 20. svibnja 2024.]
- [14] Neue Zürcher Zeitung. Münchenstein 1891: Das schwerste Eisenbahnunglück der Schweiz. *Neue Zürcher Zeitung.* Dostupno na: <https://www.nzz.ch/schweiz/muenchenstein-1891-das-schwerste-eisenbahnunglueck-der-schweiz-ld.1560063> [Pristupljeno: 20. svibnja 2024.]
- [15] Bolle G, Schacht G, Marx S. Geschichtliche Entwicklung und aktuelle Praxis der Probelastung — Teil 1: Geschichtliche Entwicklung im 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts. *Bautechnik.* 2010;87(11):700-707.
- [16] Photobibliothek.ch. *Schweizer Brücken.* Dostupno: <https://www.photobibliothek.ch/seite007ab.html> [Pristupljeno: 20. svibnja 2024.]
- [17] Tenžera D, Puž G, Radić J. Vizualni pregled kao pomagalo za ocjenu stanja mostova. *Građevinar.* 2012;64(9):717-726
- [18] Naumann J. Bauwerksprüfung nach DIN 1076 – Bedeutung, Verantwortung, Durchführung. *Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.* Dostupno na: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/ehah.13.00007> [Pristupljeno: 27. svibnja 2024.]
- [19] Zakonodavni odbor. Tehnički propis za građevinske konstrukcije. *Narodne novine.* Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_02_17_403.html [Pristupljeno: 29. svibnja 2024.]
- [20] Šavor Z, Šavor Novak M. Postupci ocjenjivanja pouzdanosti postojećih mostova. *Građevinar.* 2015;67(6):557-72.

-
- [21] Wikipedia. Eurocodes. *Wikipedia*. Dostupno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Eurocodes> [Pristupljeno: 04. lipnja 2024.]
- [22] Joint Research Centre. About EN Eurocodes. *Eurocodes: Building the Future*. Dostupno na: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/en-eurocodes/about-en-eurocodes> [Pristupljeno: 04. lipnja 2024.]
- [23] Radio Moslavina. Što su Eurokodovi i kako se primjenjuju u složenim građevinskim projektima. *Radio Moslavina*. Dostupno na: <https://www.radiomoslavina.hr/2021/03/sto-su-eurokodovi-i-kako-se-primjenjuju-u-slozenim-gradevinskim-projektima/> [Pristupljeno: 04. lipnja 2024.]
- [24] International Organization for Standardization (ISO). ISO 13822: Bases for design of structures – Assessment of existing structures. *ISO Online Browsing Platform*. Dostupno na: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13822:ed-2:v1:en:sec:1> [Pristupljeno: 04. lipnja 2024.]
- [25] Milić I, Mandić Ivanković A, Syrkov A, Skokandić D. Otkazivanje mostova, forenzičko inženjerstvo i preporuke za projektiranje robusnih konstrukcija. *Građevinar*. 2021;73(7):717-736.
- [26] CSA Group. CSA S6:19 Canadian Highway Bridge Design Code. *CSA Group*. Dostupno na: <https://www.csagroup.org/store/product/2418400/> [Pristupljeno: 04. lipnja 2024.]
- [27] Zakonodavni odbor. Zakon o gradnji. *Narodne novine*. Dostupno na: <https://www.zakon.hr/z/690/Zakon-o-gradnji> [Pristupljeno: 08. lipnja 2024.]
- [28] Ispitivanje mostova pokusnim opterećenjem. HRN U.M1.046:1984. 1984. Hrvatski zavod za norme
- [29] Prüfung von Ingenieurbauwerken – Brücken und sonstige Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. DIN 1076:2024. 2024. Deutsches Institut für Normung e.V.
- [30] National Steering Committee for the Load Testing of Bridges. *Guidelines for the supplementary load testing of bridges*. The Institution of Civil Engineers. London; 1998.
- [31] Wikipedija. Stari most u Sisku. *Wikipedia*. Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Stari_most_u_Sisku [Pristupljeno: 22. kolovoza 2024.].
- [32] Wikipedija. Kosinjski most. *Wikipedia*. Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Kosinjski_most [Pristupljeno: 22. kolovoza 2024.].

- [33] Večernji list. *U Sisku, europskom gradu sporta 2019*. Dostupno: <https://www.vecernji.hr/lifestyle/u-sisku-europskom-gradu-sporta-2019-1339510> [Pristupljeno: 22. kolovoza 2024.].
- [34] Visit Lika. *Kosinjski most*. Dostupno: <https://visit-lika.com/page/kosinjski-most> [Pristupljeno: 10. studenog 2024.].
- [35] Černicki L, Forenbaher S. *Starim cestama do mora*. Zagreb: Libricon; 2012.
- [36] Vincentinum. Most u Novigradu na Dobri. *Vincentinum Novigrad*. Dostupno na: <https://vincentinum-novigrad.com/portfolio-items/most-u-novigradu-na-dobri/>. [Pristupljeno: 17. kolovoza 2024.].
- [37] Kaportal. Iz Hrvatske u svijet otišla spektakularna slika i dvorca iznad Dobre u Novigradu. *Kaportal*. Dostupno na: <https://kaportal.net.hr/kas/4023616/iz-hrvatske-u-svijet-otisla-spektakularna-slika-i-dvorca-iznad-dobre-u-novigradu/>. [Pristupljeno: 17. Kolovoza 2024.].
- [38] Hrvatski vojnik. *Novigrad na Dobri*. Dostupno: <https://hrvatski-vojn timer.hr/novigrad-na-dobri/> [Pristupljeno: 22. kolovoza 2024.].
- [39] Općina Tounj. Jožefinski most na Tounjčici. *Tounj*. Dostupno na: <https://www.tounj.hr/jozefinski-most-na-tounjcici/>. [Pristupljeno: 22. kolovoza 2024.].
- [40] Croatia Travel Reviews. *Tounjski most*. Dostupno: <https://croatiatravelreviews.com/tounjski-most/> [Pristupljeno: 22. kolovoza 2024.].
- [41] HBK. Strain measurement basics. *HBK World*. Dostupno na: <https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/strain-measurement-basics>. [Pristupljeno: 11. studenog 2024.]
- [42] Medić, V. Seebeckov efekt. *Enciklopedija.hr*. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/seebeckov-efekt>. [Pristupljeno: 05. rujna 2024.].
- [43] KGK d.o.o. *TRICOSAL 181-K*. Dostupno: <https://kgk.hr/?product=tricosal-181-k> [Pristupljeno: 11. studenog 2024.].
- [44] Građevinsko-arhitektonski fakultet u Splitu. Skripta: Mostovi. *Gradst.unist.hr*. Dostupno na: <https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Betonske%20konstrukcije/PSG%20Mostovi/Skripta%20Mostovi.pdf>. [Pristupljeno: 9. studenog 2024.]

- [45] Mohseni M. Influence of span length and angle of inclination on the natural frequency of bridges. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*. Dostupno na: <https://www.scielo.br/j/riem/a/v56qsT8bJJ7nz6ZdtXVZCDc/>. [Pristupljeno 09. Studenog 2024.].

POPIS SLIKA

Slika 1.: Brooklyn bridge – ispitivanje probnim opterećenjem skupinom slonova (Izvor: [9])	5
Slika 2.: Most Nienburger Saale prema nacrtu njegova graditelja Christiana Bandhauera: [10])	6
Slika 3.: Kolaps Münchensteiner mosta (Izvor: [16])	7
Slika 4.: Zastupljenost mostova u Hrvatskoj prema tipu konstrukcije (Izvor: [17])	8
Slika 5.: Zastupljenost grednih mostova u Hrvatskoj obzirom na materijal (Izvor: [17])	8
Slika 6.: Zastupljenost lučnih mostova u Hrvatskoj obzirom na materijal (Izvor: [17])	9
Slika 7.: Most s vidljivim znakovima podlokavanja.....	11
Slika 8.: Glavni uzroci otkazivanja mostova (Izvor: [25]).....	14
Slika 9.: Poduzroci otkazivanja – izvanredne pojave (Izvor: [25]).....	14
Slika 10.: Poduzroci otkazivanja – dotrajavanje konstrukcije (Izvor: [25]).....	14
Slika 11.: Poduzroci otkazivanja – ljudski faktori (Izvor: [25]).....	14
Slika 12.: Most preko rijeke Kupe u Sisku (Izvor: [33]).....	23
Slika 13.: Most preko rijeke Like u Kosinju (Izvor: [34]).....	23
Slika 14.: Most u Novigradu na Dobri (Izvor: [38]).....	24
Slika 15.: Most u Tounju preko rijeke Tounjčice (Izvor: [40])	24
Slika 16.: Primjeri gdje su procjene poprečne krutosti nejasne – čelične grede i lukovi od opeke (gore) te čelične grede s betonskom ispunom (dolje) (Izvor: [30]).....	26
Slika 17.: Primjeri gdje su procjene poprečne krutosti nejasne – prednapregnute betonske grede (Izvor: [30]).....	26
Slika 18.: Primjeri neprojektiranog kompozitnog djelovanja (Izvor: [30]).....	27
Slika 19.: Tlačno djelovanje u ravnini: prijenos sila obzirom na oblik podgleda mosta (eng. <i>soffit</i>) (Izvor: [30])	28
Slika 20.: Utjecaj pasivnog pritiska kontinuiranog površinskog sloja na stabilizaciju mosta: dodatna otpornost zbog trenja i reaktivnih momenata (Izvor: [30]).....	28
Slika 21.: Specijalno jednoosno priključno vozilo za vrijeme ispitivanja odvodnog kanala..	32
Slika 22.: Metoda određivanja sigurne nosivosti konstrukcije (Izvor: [30]).....	44
Slika 23.: Situacijski prikaz mosta i njegovog nagiba u odnosu na os korita rijeke.....	47
Slika 24.: Normalni poprečni presjek mosta.....	49
Slika 25.: Pogled na stupišta (S1 lijevo i S2 desno) u smjeru stacionaže	50
Slika 26.: Uzdužni presjek mosta	50
Slika 27.: Fotodokumentacija predmetnog mosta.....	51

Slika 28.: Akcelerometri za dinamičko ispitivanje mosta.....	52
Slika 29.: Shematski prikaz kamiona s tri osovine korištenih u probnom opterećenju, s prikazom opterećenja i međuosovinskih razmaka.....	53
Slika 30.: Tlocrtni raspored kamiona za sve faze statičkog opterećenja mosta.....	56
Slika 31.: Faza 4 – položaj kamiona za postizanje maksimalnog pomaka u srednjem rasponu	56
Slika 32.: Model prometnog opterećenja srednjeg raspona prema projektu.....	58
Slika 33.: Prikaz različitih kutova usmjerenja mosta u odnosu na os korita rijeke.....	65
Slika 34.: Tlocrti numeričkih modela (gledano odozdo) za kutove nagiba 0° , 10.70° , 20° , 30° , 40°	66
Slika 35.: Usporedba drugog oblika titranja kod modela mosta od 0° do 40° (odozgo prema dolje)	72
Slika 36.: Usporedba trećeg oblika titranja kod modela mosta od 0° do 40° (odozgo prema dolje).....	73
Slika 37.: Tlocrtni raspored kamiona za sve faze statičkog opterećenja mosta.....	77
Slika 38.: Shematski prikaz kamiona s tri osovine korištenih u probnom opterećenju, s prikazom opterećenja i međuosovinskih razmaka.....	77
Slika 39.: Shema mjernih mjesta za mjerenje dinamičkih pomaka prilikom prolaska kamiona (gore plavo) i vlastitih oblika titranja te koeficijenta prigušenja konstrukcije (dolje zeleno)	78
Slika 40.: Geodetsko izvješće – rezultati izmjerenih pomaka tijekom statičkog ispitivanja mosta	79
Slika 41.: Zapisi dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko rasponske konstrukcije brzinom od 10 km/h (DIN 10).....	80
Slika 42.: Zapisi dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko rasponske konstrukcije brzinom od 20 km/h (DIN 20).....	81
Slika 43.: Zapisi dinamičkog pomaka u vremenu pri prolasku kamiona preko rasponske konstrukcije brzinom od 30 km/h (DIN 30).....	82
Slika 44.: Zapisi singularnih vrijednosti matrica autospektralnih gustoća s istaknutim vlastitim frekvencijama osciliranja	83
Slika 45.: Eksperimentalno određeni vlastiti oblici osciliranja i odgovarajuće vlastite frekvencije	84
Slika 46.: 3D prikaz numeričkog modela mosta.....	85
Slika 47.: Usporedni prikaz: stvarni most i numerički model.....	86
Slika 48.: Prikaz štapnog modela mosta.....	86
Slika 49.: Shematski prikaz opterećenja od 1. kamiona (lijevo) i 2. kamiona (desno).....	86

Slika 50.: Shema opterećenja od proračunskog kontinuiranog i koncentriranog opterećenja (desno) i tlocrtni raspored opterećenja prema Eurocodeu (lijevo).....	87
Slika 51.: Slučajevi opterećenja za kontinuirano proračunsko opterećenje prema Eurocodeu - EC _q	87
Slika 52.: Anvelopa dijagrama momenata savijanja za proračunsko kontinuirano opterećenje EC _q – maksimalni moment savijanja.....	88
Slika 53.: Anvelopa dijagrama poprečnih sila za proračunsko kontinuirano opterećenje EC _q – maksimalna poprečna sila.....	88
Slika 54.: Anvelopa dijagrama momenata savijanja za proračunsko koncentrirano opterećenje EC _F – maksimalni moment savijanja.....	88
Slika 55.: Anvelopa dijagrama poprečnih sila za proračunsko koncentrirano opterećenje EC _F – maksimalna poprečna sila.....	89
Slika 56.: Anvelopa dijagrama momenata savijanja od probnog opterećenja– maksimalni moment savijanja.....	89
Slika 57.: Anvelopa dijagrama poprečnih sila od probnog opterećenja – maksimalna poprečna sila.....	89
Slika 59.: Statičko ispitivanje - Faze 3 i 5: Shema opterećenja, progibna linija i 3D prikaz progiba za dva kamiona na polovici krajnjeg raspona.....	90
Slika 58.: Statičko ispitivanje - Faza 4: Shema opterećenja, progibna linija i 3D prikaz progiba za dva kamiona na polovici srednjeg raspona.....	90
Slika 60.: Prikaz progibnih linija i shema opterećenja za Faze 2, 9, 10 i 11 (odozgo prema dolje).....	91
Slika 61.: Prvi vlastiti oblik titranja (7,00 Hz).....	92
Slika 62.: Drugi vlastiti oblik titranja (12,92 Hz).....	92
Slika 63.: Treći vlastiti oblik titranja (15,80 Hz).....	92
Slika 64.: Četvrti vlastiti oblik titranja (44,12 Hz).....	93
Slika 65.: Statičko ispitivanje mosta kamionima – mjerenje vertikalnih pomaka u FAZI 2 (gore) i FAZI 3 (dolje).....	94
Slika 66.: Statičko ispitivanje mosta kamionima – mjerenje vertikalnih pomaka u FAZI 4 (gore) i FAZI 5 (dolje).....	94
Slika 67.: Statičko ispitivanje mosta kamionima – mjerenje vertikalnih pomaka u FAZAMA 7 i 7'.....	95
Slika 68.: Akcelerometri za dinamičko ispitivanje mosta.....	95
Slika 69. Računski progibi modela $\angle 0^\circ$ za faze 2, 3, 4 i 5 (gore prema dolje).....	97
Slika 70.: Računski progibi modela $\angle 0^\circ$ za faze 9,10 i 11 (gore prema dolje).....	98
Slika 71.: Model $\angle 0^\circ$ - prvi vlastiti oblik titranja (6,63 Hz).....	99

Slika 72.: Model $\angle 0^\circ$ - drugi vlastiti oblik titranja (12,34 Hz).....	99
Slika 73.: Model $\angle 0^\circ$ - treći vlastiti oblik titranja (14,90 Hz).....	99
Slika 74.: Računski progibi modela $\angle 20^\circ$ za faze 2, 3, 4 i 5 (gore prema dolje).....	100
Slika 75.: Računski progibi modela $\angle 20^\circ$ za faze 9,10 i 11 (gore prema dolje).....	101
Slika 76.: Model $\angle 20^\circ$ - prvi vlastiti oblik titranja (7,10 Hz).....	102
Slika 77.: Model $\angle 20^\circ$ - drugi vlastiti oblik titranja (13,02 Hz).....	102
Slika 78.: Model $\angle 20^\circ$ - treći vlastiti oblik titranja (15,79 Hz).....	102
Slika 79.: Računski progibi modela $\angle 30^\circ$ za faze 2, 3, 4 i 5 (gore prema dolje).....	103
Slika 80.: Računski progibi modela $\angle 30^\circ$ za faze 9,10 i 11 (gore prema dolje).....	104
Slika 81.: Model $\angle 30^\circ$ - prvi vlastiti oblik titranja (7,31 Hz).....	105
Slika 82.: Model $\angle 30^\circ$ - drugi vlastiti oblik titranja (13,36 Hz).....	105
Slika 83.: Model $\angle 30^\circ$ - treći vlastiti oblik titranja (16,03 Hz).....	105
Slika 84.: Računski progibi modela $\angle 40^\circ$ za faze 2, 3, 4 i 5 (gore prema dolje).....	106
Slika 85.: Računski progibi modela $\angle 40^\circ$ za faze 9,10 i 11 (gore prema dolje).....	107
Slika 86.: Model $\angle 40^\circ$ - prvi vlastiti oblik titranja (7,66 Hz).....	108
Slika 87.: Model $\angle 40^\circ$ - drugi vlastiti oblik titranja (13,70 Hz).....	108
Slika 88.: Model $\angle 40^\circ$ - treći vlastiti oblik titranja (16,38 Hz).....	108

POPIS TABLICA

Tablica 1.: Varijacija ocjena pojedinih ocjenjivača u odnosu na srednju vrijednost prilikom ocjenjivanja gornjeg ustroja mosta (Izvor: [17]).....	11
Tablica 2.: Sažetak mjerila i sustava instrumentacije (Izvor: [30]).....	35
Tablica 3.: Detalji ispitivanja otkazivanja nosivosti (Izvor: [30])	43
Tablica 4.: Težine kamiona korištenih prilikom probnog opterećenja	53
Tablica 5.: Faze statičkog ispitivanja mosta	54
Tablica 7.: Efikasnosti probnog opterećenja za rasponsku konstrukciju mosta.....	58
Tablica 6.: Faze dinamičkog ispitivanja	59
Tablica 8.: Usporedba maksimalnih izmjerenih i računskih vertikalnih progiba.....	60
Tablica 9.: Inkrementi dinamičkih pomaka i procjena dinamičkog koeficijenta.....	62
Tablica 10.: Izmjerene i računске vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja	63
Tablica 11.: Usporedba maksimalnih vertikalnih progiba po fazama statičkog ispitivanja kod različitih modela mosta	67
Tablica 12.: Prikaz postotnih promjena progiba u odnosu na nulti kut.....	68
Tablica 13.: Usporedba frekvencija prvog oblika titranja za različite modele mostova	69
Tablica 14.: Usporedba frekvencija drugog oblika titranja za različite modele mostova.....	69
Tablica 15.: Usporedba frekvencija trećeg oblika titranja za različite modele mostova	70