

# Učinkovitost nosača spregnutog mosta sa zatvorenim i otvorenim poprečnim presjekom

---

**Grdović, Bartol**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2025**

*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:237:664345>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Bartol Grdović

**UČINKOVITOST NOSAČA SPREGNUTOG  
MOSTA SA ZATVORENIM I OTVORENIM  
POPREČNIM PRESJEKOM**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Bartol Grdović

**UČINKOVITOST NOSAČA SPREGNUTOG  
MOSTA SA ZATVORENIM I OTVORENIM  
POPREČNIM PRESJEKOM**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: doc. dr. sc. Mladen Srbić

Komentor: prof. dr. sc. Anđelko Vlašić

Zagreb, 2025.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Bartol Grdović

**EFFICIENCY OF THE COMPOSITE BRIDGE  
GIRDER WITH OPEN AND BOX-SHAPED  
THIN-WALLED CROSS-SECTION**

MASTER THESIS

Mentor: doc. dr. sc. Mladen Srbić

Co-Mentor: prof. dr. sc. Anđelko Vlašić

Zagreb, 2025



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Bartol Grdović

(Ime i prezime)

0082063825

(IMBAG)

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

Učinkovitost nosača spregnutog mosta sa zatvorenim i otvorenim poprečnim presjekom

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

Efficiency of the composite bridge girder with open and box-shaped thin-walled cross-section

(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:

18.02.2025.

Mentor:

doc.dr.sc. Mladen Srbić

Potpis mentora:

Komentor:

prof.dr.sc. Anđelko Vlašić



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

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

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

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

Datum:

Potpis:



## OBRAZAC 6

### IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

(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:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

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

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(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:

Potpis:

## ZAHVALE

Iskreno se zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Mladenu Srbiću na ukazanom povjerenju, vodstvu, kolegijalnom pristupu i pomoći kako kroz studij tako i prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Također zahvaljujem prof. dr. sc. Anđelku Vlašiću koji nam je dao predložak za izradu spregnutih mostova u programu SOFiSTiK na kolegiju Mostovi 3.

Jednako tako, jedno veliko hvala mojoj obitelji i prijateljima na nesebičnoj podršci koju su mi pružali tijekom cijelog studija.



## SAŽETAK

### UČINKOVITOST NOSAČA SPREGNUTOG MOSTA SA ZATVORENIM I OTVORENIM POPREČNIM PRESJEKOM

U okviru rada analiziraju se nosači spregnutih grednih mostova sa zatvorenim i otvorenim poprečnim presjekom uz primjenu Modela opterećenja 1. Izrađena su dva modela spregnutih mostova istih raspona i širina uz različite poprečne presjeke nosača. Rad se sastoji od tri dijela. U prvom dijelu koji je teoretski opisane su karakteristike spregnutih mostova otvorenog poprečnog presjeka. Drugi dio rada bavi se analizom i dimenzioniranjem dvaju spregnutih mostova. Posljednji dio rada bavi se usporedbom rezultata i učinkovitosti pojedinog nosača. Na kraju rada dan je zaključak i preporuka koji tip nosača odabrati za dane ulazne parametre.

**Ključne riječi:** spregnuti most, zatvoreni poprečni presjek, otvoreni poprečni presjek, dimenzioniranje, utrošak čelika

## SUMMARY

### EFFICIENCY OF THE COMPOSITE BRIDGE GIRDER WITH OPEN AND BOX-SHAPED THIN-WALLED CROSS-SECTION

In the framework of the work, girders of composite bridges with closed and open cross-sections are analyzed with the application of Load Model 1. Two models of composite bridges of the same span and width with different cross-sections of the girders were made. The paper consists of three parts. In the first part, which is theoretical, the characteristics of open section composite bridges are described. The second part of the work deals with the analysis and dimensioning of two composite bridges. The last part of the paper deals with the comparison of the results and efficiency of each girder. At the end of the work, a conclusion and recommendation is given as to which type of support to choose for the given input parameters.

**Key words:** composite bridge, box-shaped cross-section, open cross-section, dimensioning, consumption of steel

---

# SADRŽAJ

ZAHVALE.....	i
SAŽETAK.....	ii
SUMMARY.....	iii
SADRŽAJ.....	iv
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. SPREGNUTI MOSTOVI.....</b>	<b>2</b>
2.1. Općenito o spregnutim mostovima.....	2
2.2. Nosači zatvorenog tipa.....	3
2.3. Nosači otvorenog tipa.....	4
<b>3. OPIS SOFTWARE-A I PARAMETRI MOSTOVA.....</b>	<b>6</b>
3.1. Opis software-a.....	6
3.2. Vrsta modela.....	6
3.3. Vrste elemenata.....	7
3.4. Geometrija modela.....	7
3.5. Modeliranje faza izvedbe - CSM.....	7
3.6. Parametri mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima.....	8
3.7. Parametri mosta otvorenog presjeka s I nosačima.....	13
<b>4. ANALIZA OPTEREĆENJA MOSTA OTVORENOG PRESJEKA SA SANDUČASTIM NOSAČIMA.....</b>	<b>18</b>
4.1. Vlastita težina mosta.....	18
4.2. Dodatno stalno opterećenje.....	22
4.3. Prometno opterećenje.....	24
4.4. Temperatura.....	28
4.4.1. Jednolika temperatura.....	28
4.4.2. Nejednolika linearno promjenjiva temperatura.....	31
4.4.3. Kombinacija jednolike i nejednolike linearno promjenjive temperature.....	31
4.5. Opterećenje vjetrom.....	32
4.5.1. Vjetar na rasponski sklop poprečno.....	32

---

4.5.2.	Vjetar na rasponski sklop uzdužno.....	36
4.5.3.	Vjetar na rasponski sklop vertikalno.....	37
4.5.4.	Vjetar na stupove.....	39
4.6.	Analiza potresnog opterećenja.....	39
<b>5.</b>	<b>SILE I OPTEREĆENJA MOSTA OTVORENOG PRESJEKA SA SANDUČASTIM NOSAČIMA.....</b>	<b>41</b>
5.1.	Rezne sile.....	41
5.1.1.	Prometno opterećenje.....	41
5.1.2.	Opterećenje vjetrom.....	46
5.1.3.	Temperaturno opterećenje.....	49
5.1.4.	Potresno opterećenje.....	51
5.2.	Reakcije i pomaci od dominantnih opterećenja.....	55
5.2.1.	Stalno opterećenje.....	55
5.2.2.	Prometno opterećenje.....	56
5.2.3.	Vjetrovno opterećenje.....	58
5.2.4.	Temperaturna opterećenje.....	62
5.2.5.	Potresno opterećenje.....	65
<b>6.</b>	<b>DOKAZ STABILNOSTI MOSTA OTVORENOG PRESJEKA SA SANDUČASTIM NOSAČIMA.....</b>	<b>67</b>
6.1.	Presjeci dimenzioniranih elemenata.....	67
6.2.	Faktori i izrazi za kombinacije opterećenja.....	69
6.3.	Prikaz naprezanja za kombinacije opterećenja.....	70
6.4.	Dokaz stabilnosti limova.....	72
6.4.1.	Hrbat u presjeku iznad ležaja ( $t = 20 \text{ mm}$ ).....	76
6.4.2.	Hrbat u presjeku smanjenja debljine sa $t = 20 \text{ mm}$ na $t = 16 \text{ mm}$ .....	83
6.4.3.	Hrbat u presjeku u sredini raspona ( $t = 16 \text{ mm}$ ).....	90
6.5.	Armatura stupova i vezne grede.....	97
6.5.1.	Armatura stupova.....	97
6.5.2.	Armatura donje stijenke vezne grede.....	99
6.5.3.	Armatura gornje stijenke vezne grede.....	100
6.5.4.	Armatura bočnih stijenki vezne grede.....	102
<b>7.</b>	<b>GSU MOSTA OTVORENOG PRESJEKA SA SANDUČASTIM NOSAČIMA.....</b>	<b>104</b>
7.1.	Minimalna armatura u betonskoj ploči.....	105
7.2.	Kontrola raspucavanja zbog izvanrednog djelovanja.....	108

---

7.3.	Proračun minimalne armature ploče i kontrola raspucavanja .....	110
7.4.	Provjera naprezanja (tlak) .....	112
<b>8.</b>	<b>LEŽAJEVI MOSTA OTVORENOG PRESJEKA SA SANDUČASTIM NOSAČIMA.....</b>	<b>116</b>
8.1.	Odabir ležajeva prema kombinacijama reakcija.....	116
8.2.	Odabir prijelaznih naprava prema kombinacijama reakcija.....	118
<b>9.</b>	<b>ANALIZA OPTEREĆENJA MOSTA OTVORENOG PRESJEKA S I NOSAČIMA.....</b>	<b>119</b>
9.1.	Vlastita težina mosta .....	119
9.2.	Dodatno stalno opterećenje.....	123
9.3.	Prometno opterećenje.....	125
9.4.	Temperatura.....	129
9.4.1.	Jednolika temperatura .....	129
9.4.2.	Nejednolika linearno promjenjiva temperatura.....	132
9.4.3.	Kombinacija jednolike i nejednolike linearno promjenjive temperature.....	132
9.5.	Opterećenje vjetrom.....	133
9.5.1.	Vjetar na rasponski sklop poprečno.....	133
9.5.2.	Vjetar na rasponski sklop uzdužno.....	137
9.5.3.	Vjetar na rasponski sklop vertikalno.....	138
9.5.4.	Vjetar na stupove .....	140
9.6.	Analiza potresnog opterećenja.....	140
<b>10.</b>	<b>SILE I OPTEREĆENJA MOSTA OTVORENOG PRESJEKA S I NOSAČIMA.....</b>	<b>142</b>
10.1.	Rezne sile.....	142
10.1.1.	Prometno opterećenje.....	142
10.1.2.	Opterećenje vjetrom.....	147
10.1.3.	Temperaturno opterećenje.....	150
10.1.4.	Potresno opterećenje.....	152
10.2.	Reakcije i pomaci od dominantnih opterećenja.....	156
10.2.1.	Stalno opterećenje.....	156
10.2.2.	Prometno opterećenje.....	157
10.2.3.	Vjetrovno opterećenje.....	159
10.2.4.	Temperaturna opterećenje.....	163
10.2.5.	Potresno opterećenje.....	166
<b>11.</b>	<b>DOKAZ STABILNOSTI MOSTA OTVORENOG PRESJEKA S I NOSAČIMA.....</b>	<b>168</b>
11.1.	Presjeci dimenzioniranih elemenata.....	168
11.2.	Faktori i izrazi za kombinacije opterećenja.....	171

---

11.3.	Prikaz naprezanja za kombinacije opterećenja .....	172
11.4.	Dokaz stabilnosti limova .....	174
11.4.1.	Hrbat u presjeku iznad ležaja ( $t = 25 \text{ mm}$ ).....	180
11.4.2.	Hrbat u presjeku smanjenja debljine sa $t = 25 \text{ mm}$ na $t = 20 \text{ mm}$ .....	187
11.4.3.	Hrbat u presjeku smanjenja debljine sa $t = 20 \text{ mm}$ na $t = 16 \text{ mm}$ .....	194
11.4.4.	Hrbat u presjeku u sredini raspona ( $t = 16 \text{ mm}$ ) .....	201
11.4.5.	Hrbat u presjeku pokraj ležaja $x=23,5 \text{ m}$ ( $t = 25 \text{ mm}$ ) .....	208
11.5.	Armatura stupova i vezne grede .....	222
11.5.1.	Armatura stupova .....	222
11.5.2.	Armatura donje stijenke vezne grede .....	224
11.5.3.	Armatura gornje stijenke vezne grede.....	225
11.5.4.	Armatura bočnih stijenki vezne grede .....	227
<b>12.</b>	<b>GSU MOSTA OTVORENOG PRESJEKA S I NOSAČIMA .....</b>	<b>229</b>
12.1.	Minimalna armatura u betonskoj ploči.....	230
12.2.	Kontrola raspucavanja zbog izvanrednog djelovanja .....	230
12.3.	Proračun minimalne armature ploče i kontrola raspucavanja .....	231
12.4.	Provjera naprezanja (tlak) .....	233
<b>13.</b>	<b>LEŽAJEVI MOSTA OTVORENOG PRESJEKA S I NOSAČIMA.....</b>	<b>237</b>
13.1.	Odabir ležajeva prema kombinacijama reakcija.....	237
13.2.	Odabir prijelaznih naprava prema kombinacijama reakcija.....	239
<b>14.</b>	<b>USPOREDBA REZULTATA DVAJU PROJEKTIRANIH MOSTOVA.....</b>	<b>240</b>
<b>15.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>244</b>
	POPIS LITERATURE .....	245
	POPIS SLIKA.....	246
	POPIS TABLICA.....	253
	PRILOZI .....	254

## 1. UVOD

Tema ovog rada je usporedba učinkovitosti nosača kontinuiranih spregnutih mostova sa zatvorenim i otvorenim poprečnim presjekom. Cilj nam je bio pronaći adekvatan poprečni presjek za raspone premošćivanja koji nisu idealni ni za jedan tip nosača. Kako bi zaključak bio što točniji jedini parametar koji se mijenja kod dva promatrana mosta je vrsta uzdužnog nosača.

U ovom radu razmatran je statički sustav mostova s kontinuiranim rasponskim sklopom. Napravljena je analiza i dimenzioniranje na stalna i prometna opterećenja, utjecaj vjetra i potresa, te na temperaturna djelovanja. U obzir su uzete i faze izvedbe mosta.

Kod spregnutog mosta zatvorenog presjeka sa sandučastim nosačima očekuju se manje debljine elemenata zbog povećane krutosti nosača zbog svoga oblika.

Kod spregnutog mosta zatvorenog presjeka s I nosačima očekuju se veće debljine elemenata i veća naprezanja u materijalu glavnog nosača zbog manje krutosti samog tipa presjeka u odnosu na sandučasti poprečni presjek.

Na kraju će biti dan zaključak koji će se temeljiti na vrijednostima dobivenim iz proračuna koji će biti prikazani za svaki spregnuti most pojedinačno.

## 2. SPREGNUTI MOSTOVI

### 2.1. Općenito o spregnutim mostovima

Početak 20. st. počinju se koristiti pravi spregnuti mostovi. Stariji mostovi koji su građeni od čelika i betona nisu uzimali u odnos međudjelovanja tih dvaju materijala, već su svaki materijal promatrali zasebno što je povećavalo složenost sustava. Kako bi se reducirao broj elemenata u presjeku pristupilo se sprezanju betonske ploče sa čeličnim nosačima. Mostovi spregnutih nosača povoljni su za ostvarivanje srednjih raspona od 40 m do 120 m. [1]

Zbog spregnutog djelovanja došlo je do znatnih ušteda pri gradnji. Primarno se smanjila količina potrebnog čelika u odnosu na potpuno čelične mostove. To je najbolje vidljivo na područjima gdje je betonska ploča preuzima tlačna naprezanja. Potrebne su manje konstrukcijske visine zbog povećanja krutosti u odnosu na mostove gdje nema sprezanja. Nadalje betonska kolnička ploča ima stabilizacijski utjecaj na čelične nosače, ona u horizontalnoj ravnini preuzima na sebe horizontalna djelovanja i tako zamjenjuje klasične spregove iz čiste čelične izvedbe. [1]

U odnosu na betonske presjeke najveća razlika se vidi u pogledu težine. Kod spregnutih mostova znatno je reducirana težina rasponskog sklopa čime se ostvaruje mogućnost za preuzimanje većih opterećenja. Dodatna prednost vidljiva je u fazi betoniranja ploče gdje se zbog čeličnog nosača koji je postavljen u prijašnjim fazama gradnje ne moraju koristiti složene skele i oplata. [1]

S druge strane postoje i neki nedostaci u odnosu na betonske sustave poput složenije izvedbe i složenijih proračuna zbog odvojene montaže čeličnih nosača i betoniranja ploče. Nadalje dolazi do većih progiba i opasnosti u pogledu pojave zamora čelika. Spregnuti sustavi imaju veće debljine limova u odnosu na čelične sustave zbog veće težine čime se komplicira i sama radionička izvedba i zavarivanje. Također potrebno je obratiti dodatnu pažnju na bočnu nestabilnost čeličnog nosača zbog njegove male torzijske krutosti. [1]

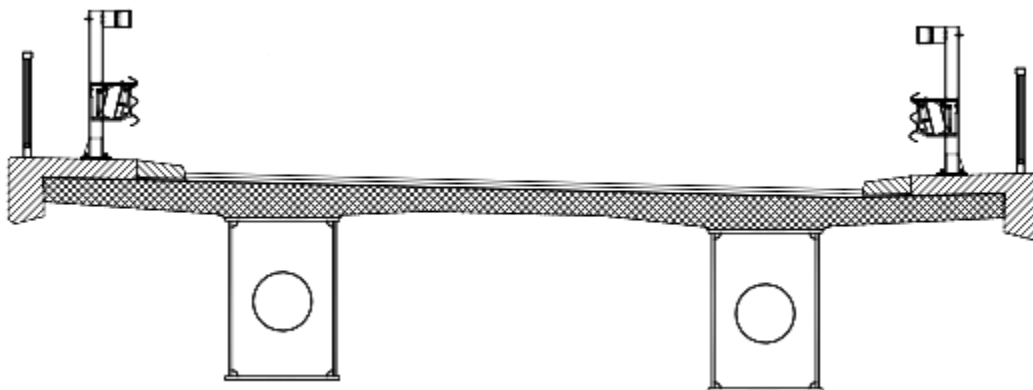


Glavna podjela spregnutih mostova prema tipu poprečnog presjeka je na spregnute mostove sa zatvorenim poprečnim presjekom i na spregnute mostove sa otvorenim poprečnim presjekom. [1]

## 2.2. Nosači zatvorenog tipa

Nosači zatvorenog tipa koriste se za veće raspone zbog bolje poprečne preraspodjele sila i većeg broja hrptova u odnosu na nosače otvorenog tipa. Uporabom zatvorenih nosača može se uštedjeti na količini utrošenog čelika. [1]

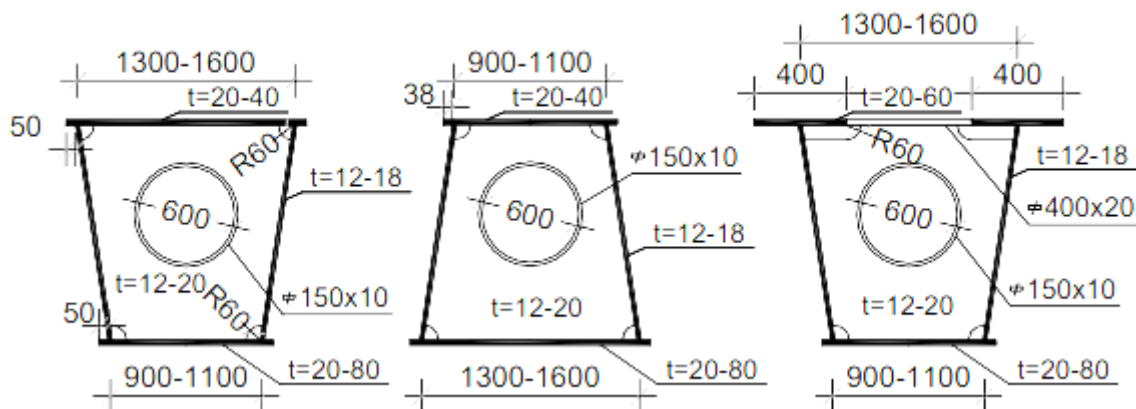
Zbog povećane torzijske krutosti zatvorenog nosača izostavljaju se vertikalna ukrućenja, ali horizontalna i dalje moraju biti prisutna. Poprečni nosači mogu se postavljati samo na mjestima oslanjanja mosta. [1]



Slika 1. Poprečni presjek sa zatvorenim trapeznim nosačem [1]

Glavni nosači sastavljeni su od uzdužnih limova koji tvore zatvoreni poprečni presjek. Moguća su oblikovanja gdje su i gornji i donji pojas jednakih širina (pravokutni presjek), i trapezni presjeci gdje su gornji i donji pojasevi različitih širina. [1]

U svrhu ovog programa koristiti će se presjek sa redukcijom gornjeg pojasa tako da se on izvodi samo iznad hrptova, kao dva odvojena pojasa širina 400 mm. Presjek postaje zatvoreni tek nakon spajanja sa kolničkom betonskom pločom. Dva odvojena pojasa spajaju se poprečnom vezicom 400x20 mm u uzdužnom smjeru na području gdje su dijafragme.



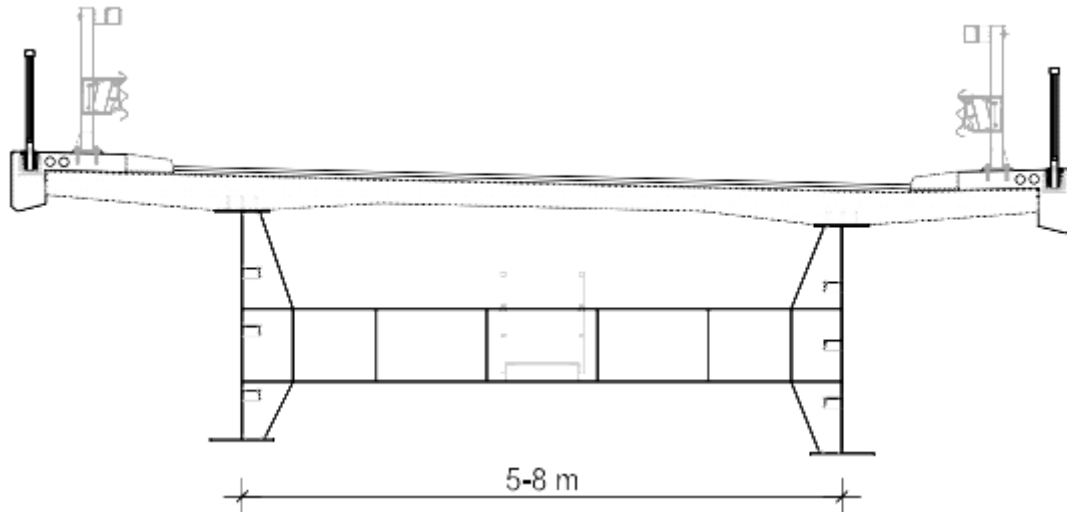
Slika 2. Vrste oblikovanja trapeznog presjeka [1]

Uzdužna i poprečna ukrućenja hrptova i pojasnica se koriste ukoliko se radi o presjeku klase 4. Klasa 3 nema problema lokalne stabilnosti pa se ukrućenja ne trebaju koristiti. Poželjno je izbjegavati korištenje ukrućenja jer oni znatno kompliciraju izvedbu i povećavaju utrošak čelika. Čelični nosač se izrađuje u radionici i zatim transportira na gradilište gdje se ugrađuju u konačan položaj. [1]

### 2.3. Nosači otvorenog tipa

Nosači otvorenog tipa sastoje se od gornje i donje pojasnice te hrpta. U pravilu se I nosači izvode varenjem, osim kod malih raspona gdje se mogu upotrijebiti toplo valjani profili. Poprečni presjek može sadržavati dva ili više nosača. Veći broj nosača nije povoljan za raspone veće od 50 m jer ekonomski nije isplativ.

Debljina kolničke ploče ovisi o razmaku između nosača. Presjeci se mogu izvoditi sa vutama ili bez njih. Ako je razmak između nosača veći od 5 m izvode se vute u kolničkoj ploči iznad nosača. One se izvode na duljini od 0.2 raspona ploče sa svake strane nosača. [1]



Slika 3. Poprečni presjek s 2 l nosača. [1]

Za ovakve tipove nosača najčešće se koriste poprečna (vertikalna) i uzdužna ukrućenja hrptova. Vertikalna ukrućenja se postavljaju na osloncima i na mjestima gdje dolaze poprečni nosači, a uzdužna se koriste kod hrptova većih od 2 m i postavljaju se kontinuirano po cijeloj duljini nosača. Ona se uvijek postavljaju u težište tlačnog dijela hrpta. [1]

Poprečni nosači sa glavnim nosačima tvore okvir. U pravilu poprečni nosači su konstantne visine, ali ta visina ne mora biti jednaka u svim rasponima. Postavljaju se u sredini visine glavnih uzdužnih nosača, ili malo ispod nje ako se radi o ležajevima. Na glavni nosač se uvijek spajaju na mjestima vertikalnih ukrućenja hrpta. Postavljaju se na svakih 4 do 8 m. [1]

### 3. OPIS SOFTWARE-A I PARAMETRI MOSTOVA

#### 3.1. Opis software-a

Za modeliranje i proračun konstrukcije mostova korišten je programski paket „SOFiSTiK“. Unutar programskog paketa „SOFiSTiK“ definirani su svi korišteni materijali i poprečni presjeci za modele mostova pomoću tekstualnog potprograma „Teddy“. Upotrebljavan je i grafički potprogram „SOFiPLUS(-X) Modeling“ kako bi se grafički zadali modeli mostova. Unutar tekstualnog potprograma „Teddy“ za poprečne presjeke glavnih uzdužnih nosača zadani su konstantni i varijabilni parametri poprečnih presjeka glavnih uzdužnih nosača. Unutar grafičkog potprograma „SOFiPLUS“ osim grafičkog modeliranja konstrukcije mosta, zadana je promjena varijabilnih parametara kao što su sudjelujuća širina betonske ploče i čeličnog nosača, raspucalost presjeka i debljina limova čeličnog nosača. Nakon oblikovanja mosta zadana su opterećenja na most koristeći mogućnost grafičkog zadavanja u „SOFiPLUS“ potprogramu, tekstualno zadavanje u „Teddy“ potprogramu i modula unutar „SOFiSTiK“ programa. Prvo su zadana grafička opterećenja u „SOFiPLUS“ potprogramu, a to su dodatna vlastita težina, težina betonske ploče i dodatno stalno opterećenje, dok vlastitu težinu mosta sam software uzima u obzir. U sljedećem korak, kako bi software primijenio ta opterećenja, u proračunu je pokrenut „Linear Analysis“ koji je pomoću modula ASE proračunao statička opterećenja. Pomoću „Construction Stages“ zadan je tijek faza izvedbe kao i uzimanje u obzir skupljanja i puzanja konstrukcije mosta. Nakon što su definirane faze izvedbe, pomoću modula „Traffic Loader“ definira se prometno opterećenje u ovisnosti o namjeni i dimenzijama mosta, a za proračun prometnog opterećenja korišten je modul ELLA koji preko utjecajnih linija pronalazi rezne sile u željenim elementima.

#### 3.2. Vrsta modela

Konstrukcije su modelirane pomoću hibridnog modela. Hibridni model je napredniji model za razliku od roštiljnog modela. Kod roštiljnog modela potrebno je uzdužne čelične nosače i betonsku ploču svesti na sustav štapova ekvivalentnih statičkih karakteristika gdje su uzdužni čelični nosači uzdužni štapovi povezani poprečnim štapovima tj. betonskom pločom. Kod hibridnog modela uzdužne čelične nosače oblikujemo kao uzdužne štapove ekvivalentnih statičkih karakteristika, a betonsku ploču zadajemo kao pločasti element s

reduciranom uzdužnom krutosti. Time dobivamo spregnuti poprečni presjek. Redukcija uzdužne krutosti betonske ploče radi jer je uzdužna krutost mosta definirana pomoću uzdužnih čeličnih nosača i betonske pojasnice. Dobili smo kvalitetniju preraspodjelu opterećenja između betonske pojasnice i čeličnog nosača te je moguće odrediti stvarnu poziciju neutralne osi.

### 3.3. Vrste elemenata

Za definiranje modela primarno su korišteni štapni elementi. Štapnim elementima definirao se spregnuti presjek i poprečni nosači. Za definiranje betonske ploče korišteni su plošni elementi. Ležajevi su modelirani pomoću opruga odgovarajuće krutosti, a povezani su sa spregnutim presjekom pomoću „Constraina“. Ploča je za uzdužni smjer uzeta bez krutosti tako da sva opterećenja preuzima presjek spregnutog štapnog elementa.

### 3.4. Geometrija modela

Određivanje geometrije modela započinje zadavanjem centralne osi iz ishodišta lokalnog koordinatnog sustava. Centralna os prolazi sredinom poprečnog presjeka mosta. Nakon zadavanja centralne osi, zadaju se sekundarne osi koje čine osi čeličnih nosača i rubove betonske kolničke ploče. Potrebno je generirati čvorove uzdužne osi nosača („Placements“) kako bi poslije mogli raditi promjene materijala.

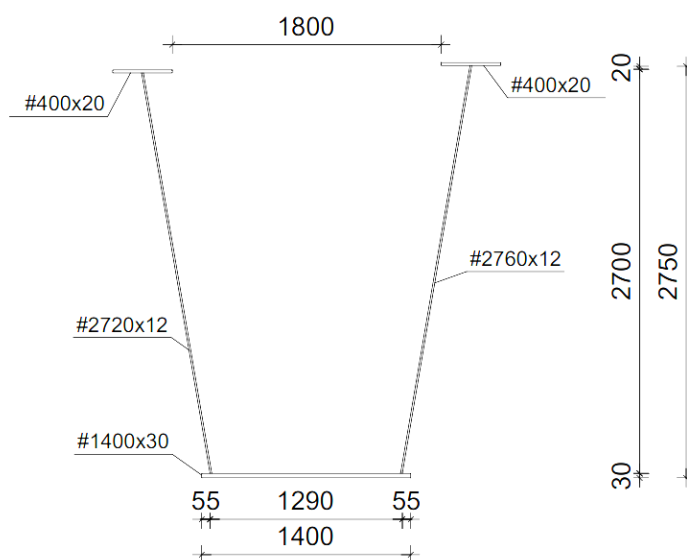
### 3.5. Modeliranje faza izvedbe - CSM

Pomoću modula „Construction stages“ modelirane su faze izvedbe konstrukcije mosta. Faze izvedbe:

1. Izvedba donjeg ustroja
2. Montaža čelika
3. Betoniranje polja
4. Očvršćivanje polja
5. Betoniranje ležajeva
6. Očvršćivanje ležajeva
7. Postavljanje opreme mosta
8. Puštanje mosta u promet
9. Kraj uporabnog vijeka mosta

### 3.6. Parametri mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima

Projektirani most se nalazi na lokaciji Split. Modeliran je kontinuirani spregnuti most sa 4 raspona ukupne duljine 230.4 metra. Dva unutarnja raspona iznose 60 metara, dok su krajnji rasponi kraći od unutarnjih raspona i iznose 47 metara kako bi se ujednačili pozitivni momenti savijanja kroz sve raspone. Čelični dio presjeka je trapezni presjek sa širim gornjim pojasom od donjeg, konstantne visine od 2750 mm po cijeloj dužini mosta.

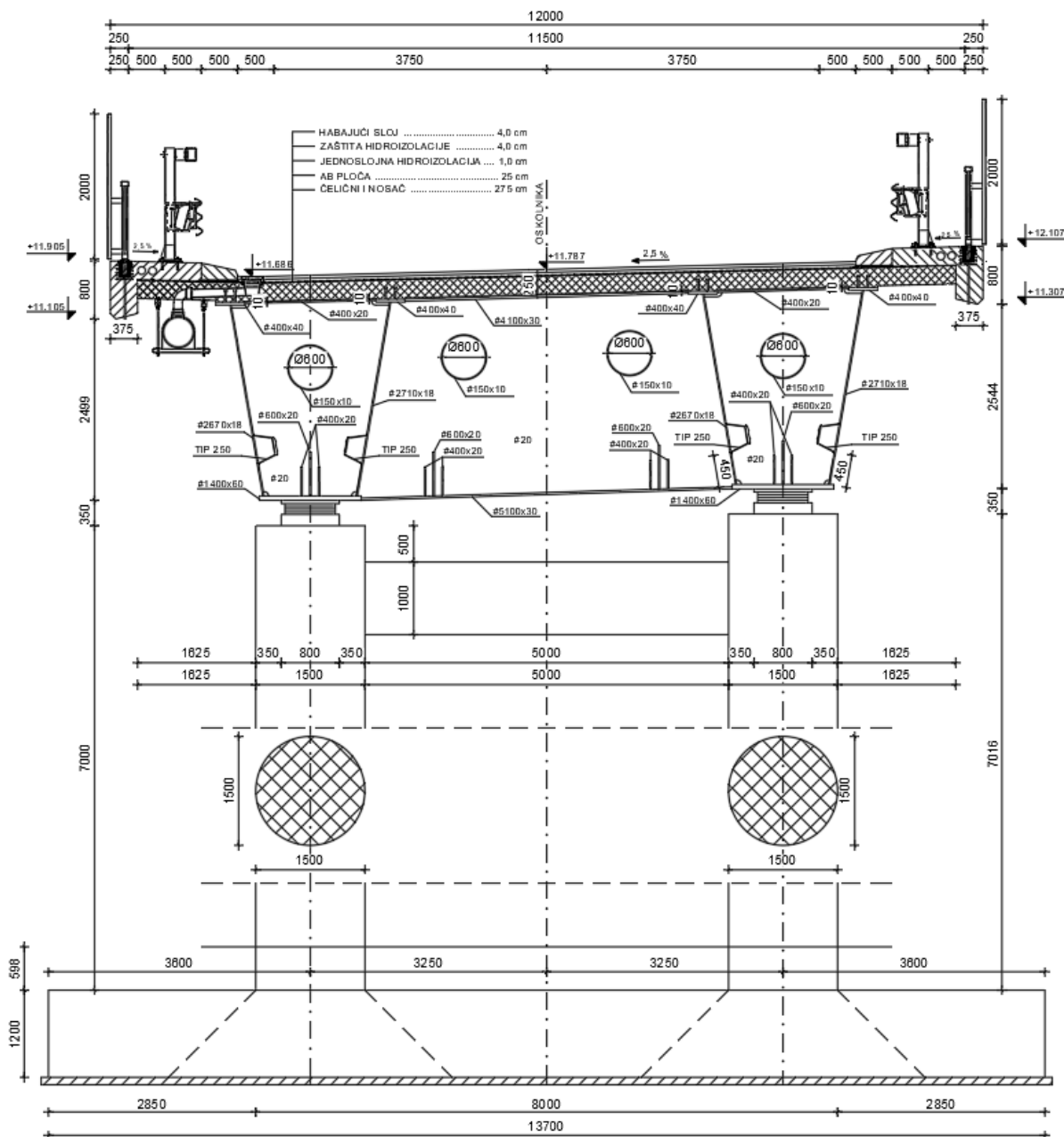


Slika 4. Karakteristični presjek glavnog trapeznog nosača

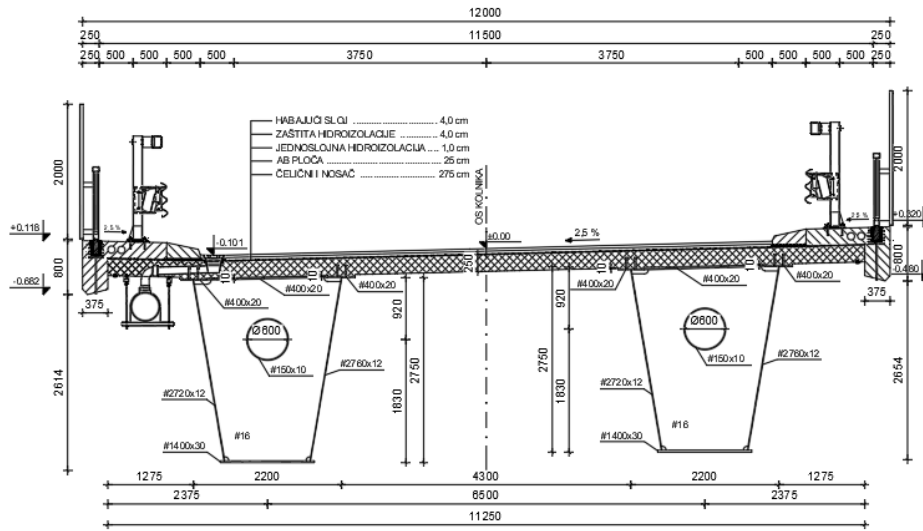
Ukupna širina mosta iznosi 12 metara, dok je betonske ploče širine 11.25 metara i konstantne debljine od 25 cm. Kolnička površina se sastoji od dva vozna traka širine 375 cm. Presjek se sastoji od dva glavna uzdužna nosača na osnom razmaku od 6.5 metara. Na mjestima oslanjanja na ležajeve nalaze se poprečni nosači koji su postavljeni po cijeloj visini uzdužnih nosača. Također postavljena su i 2 kontrolna otvora promjera 60 cm i ukrute na mjestima oslanjanja na same ležajeve.

Stupovi su visine 7 metara mjereno od vrha temelja. Kružnog su poprečnog presjeka i promjera 1.5 m. U poprečnom smjeru stupove povezuje naglavna greda koja je kvadratnog presjeka dimenzija 100 cm. Temelj svakog stupišta je pravokutna armiranobetonska ploča visine 120 cm, širine 13.7 m i dubine 5.2 metra. Dva upornjaka su istih dimenzija.

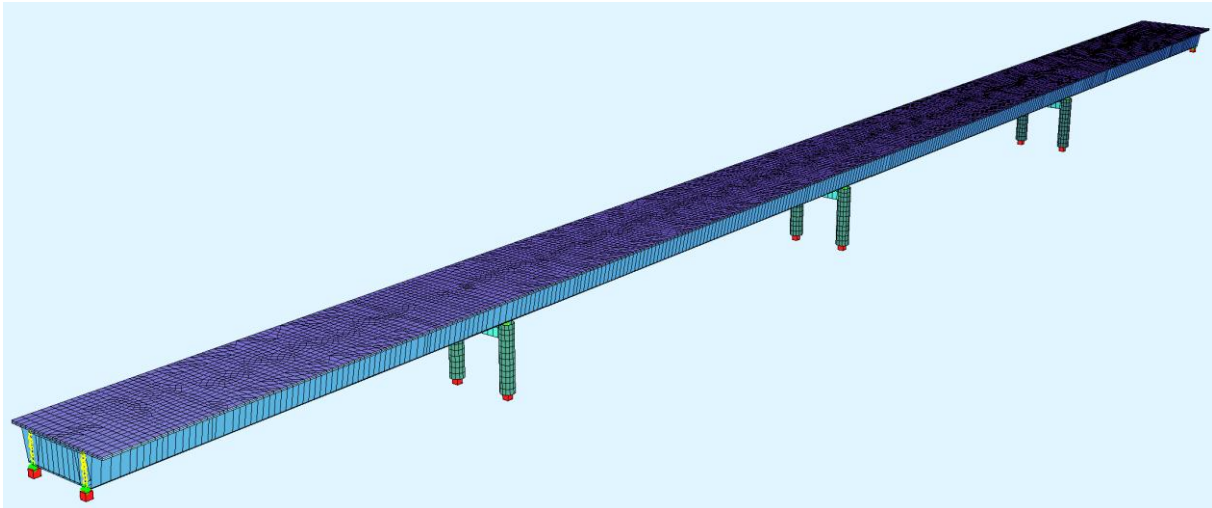
Dodatna oprema se sastoji od sustava za odvodnju, pješačke staze i rubnjaka, zaštitne ograde visine 200 cm i odbojne ograde, vijenca, zastora i hidroizolacije. Ležajevi su lončasti.



Slika 5. Karakteristični presjek nad stupom S1

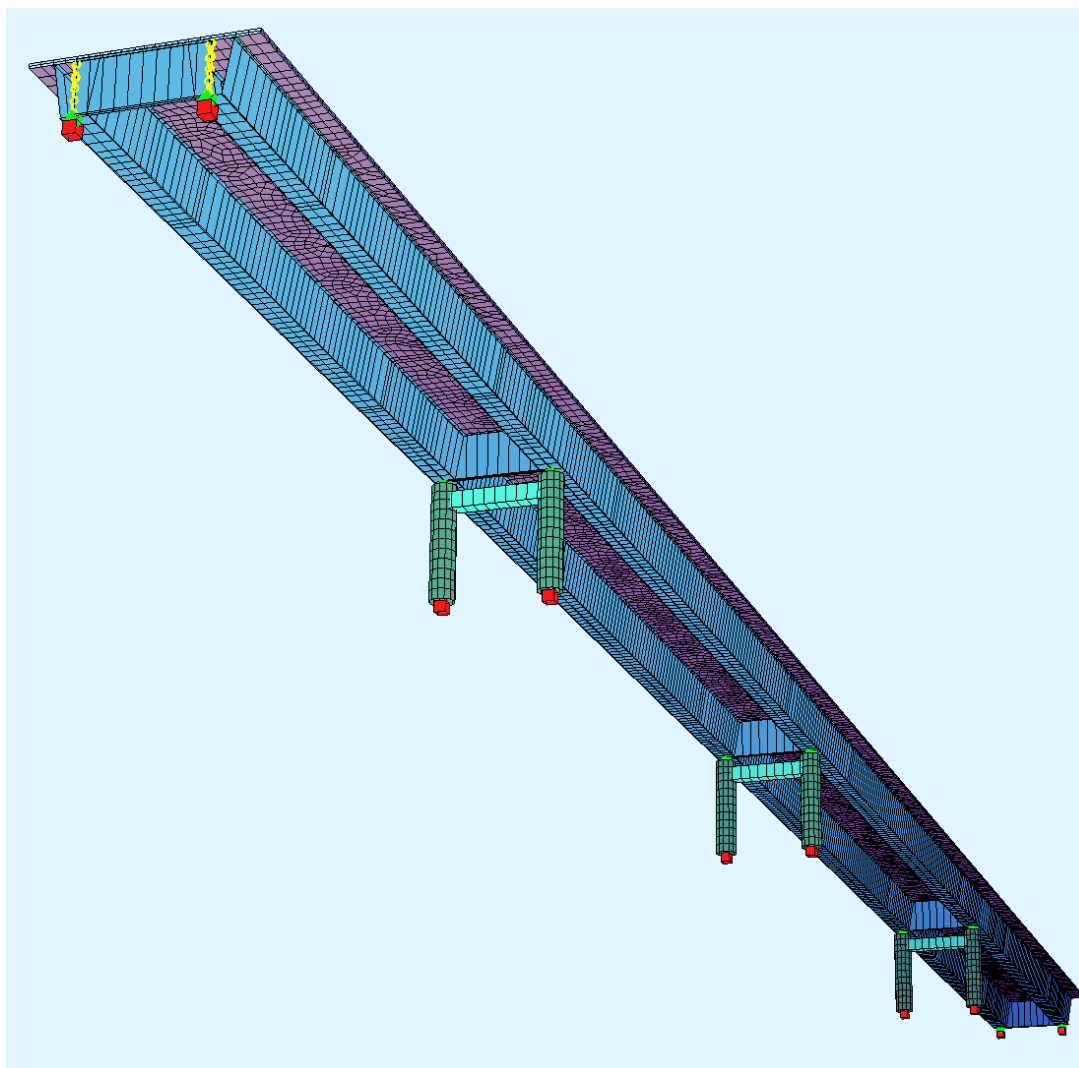


Slika 6. Karakteristični presjek u polju

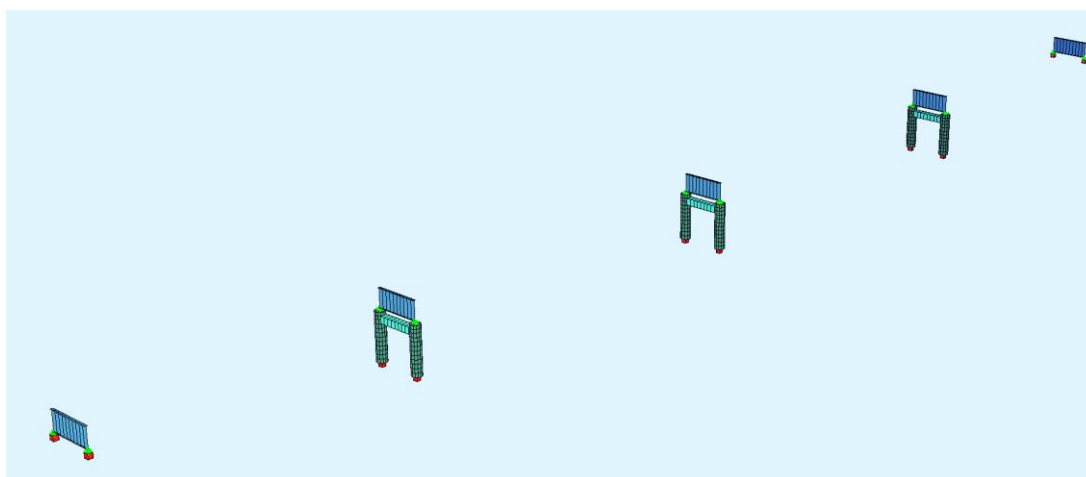


Slika 7. 3D prikaz modela, SOFiSTiK

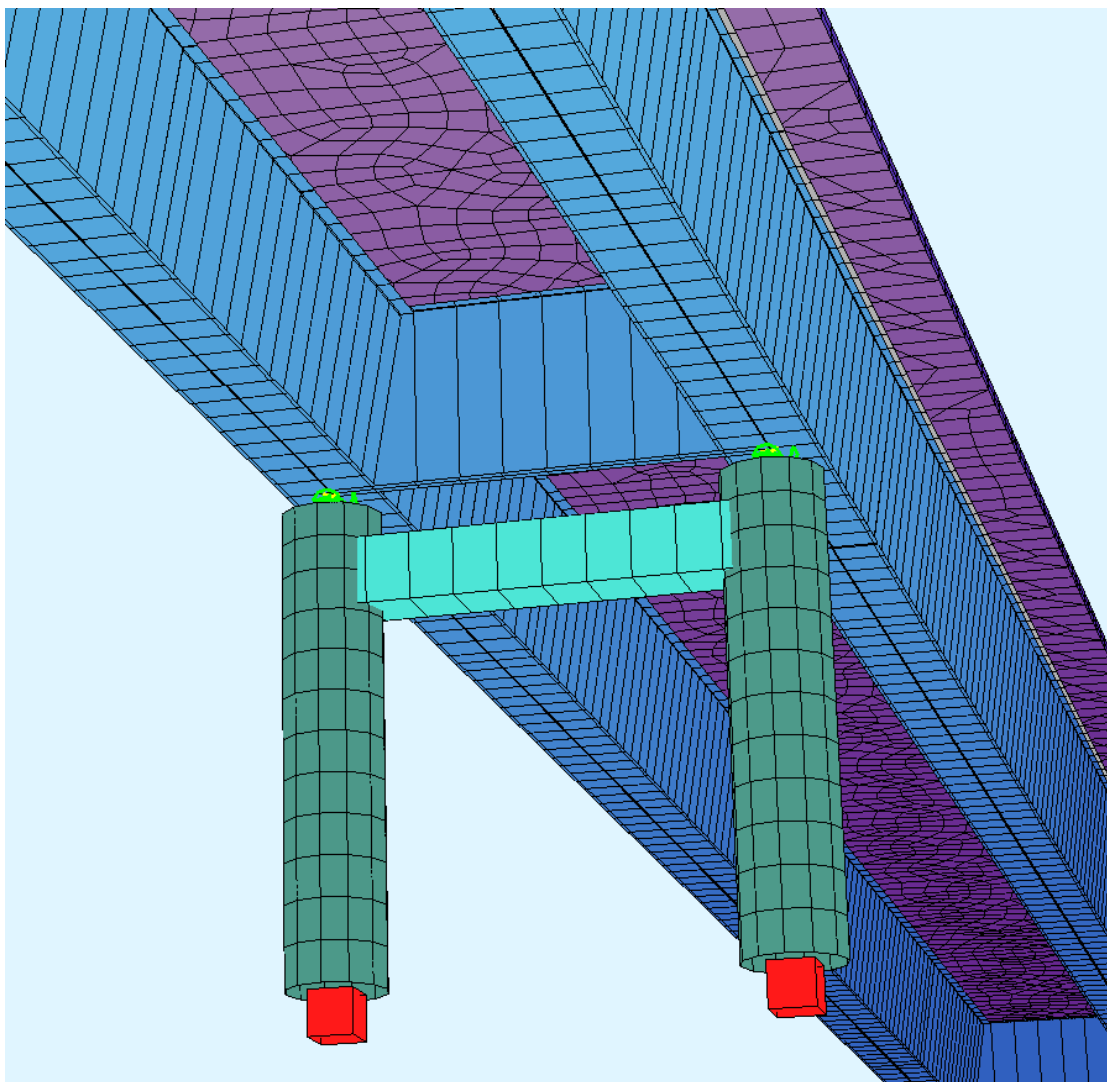




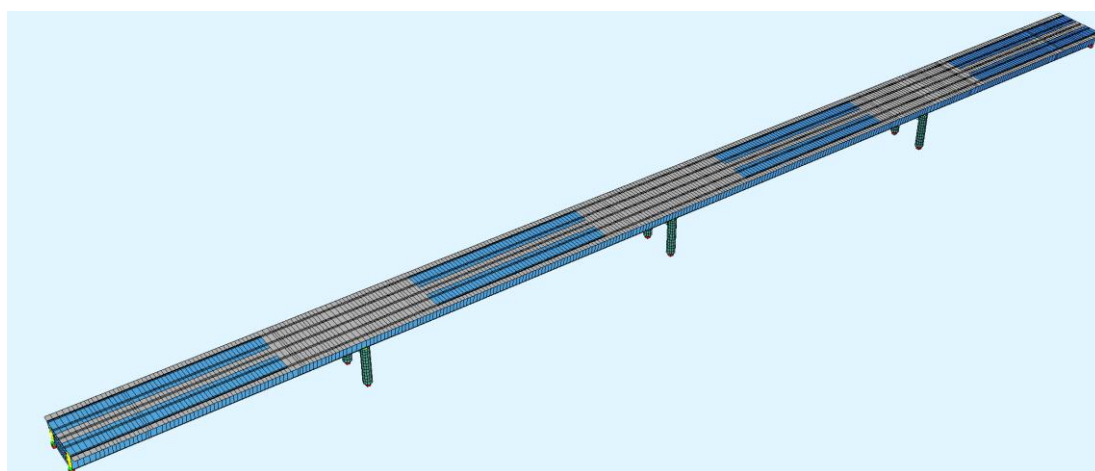
Slika 8. 3D prikaz modela s donje strane, SOFiSTiK



Slika 9. Raspored poprečnih nosača modela, SOFiSTiK



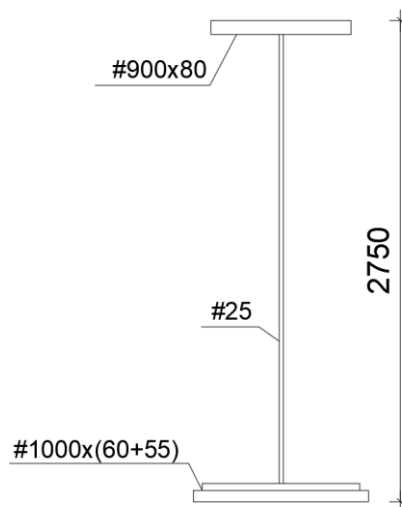
Slika 10. Detalj oslanjanja na stup, SOFiSTiK



Slika 11. Prikaz sudjelujućih čeličnih površina, SOFiSTiK

### 3.7. Parametri mosta otvorenog presjeka s I nosačima

Projektirani most se nalazi na lokaciji Split. Modeliran je kontinuirani spregnuti most sa 4 raspona ukupne duljine 230.4 metra. Dva unutarnja raspona iznose 60 metara, dok su krajnji rasponi kraći od unutarnjih raspona i iznose 47 metara kako bi se ujednačili pozitivni momenti savijanja kroz sve raspone. Čelični dio presjeka je zavareni „I“ presjek, konstantne visine od 2750 mm po cijeloj dužini mosta.

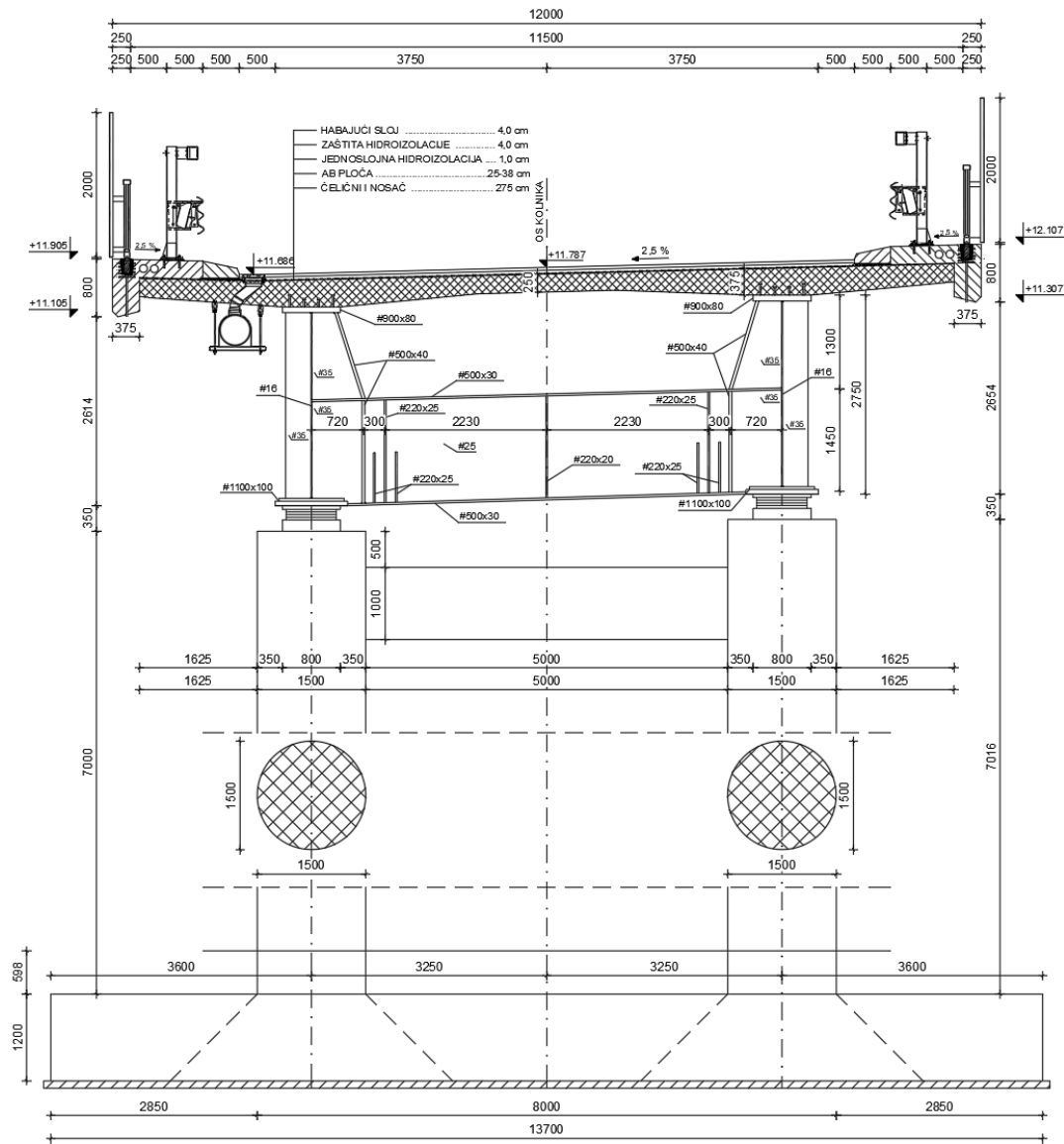


Slika 12. Karakteristični presjek glavnog „I“ nosača

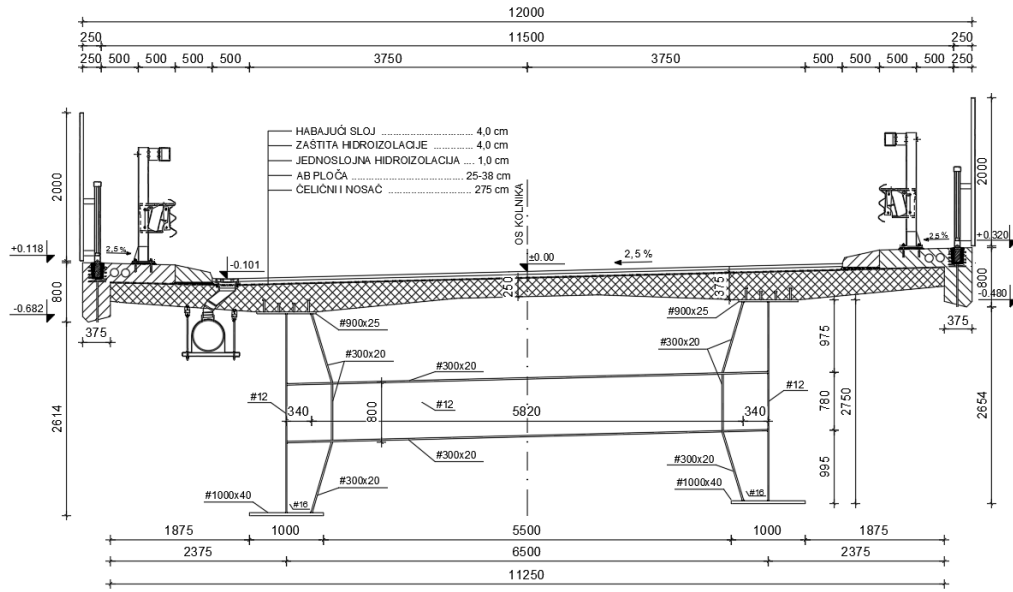
Ukupna širina mosta iznosi 12 metara, dok je betonske ploče širine 11.25 metara izvedena s vutama debljine 45 cm iznad glavnih nosača, te 25 cm na sredini i krajevima ploče. Kolnička površina se sastoji od dva vozna traka širine 375 cm. Presjek se sastoji od dva glavna uzdužna nosača na osnovom razmaku od 6.5 metara. Na mjestima oslanjanja na ležajeve nalaze se poprečni nosači koji su visine 145 cm i vertikalne ukrute na glavnim nosačima. Dodatni poprečni nosači visine 80 cm postavljeni su svakih 5 metara u uzdužnom smjeru.

Stupovi su visine 7 metara mjereno od vrha temelja. Kružnog su poprečnog presjeka i promjera 1.5 m. U poprečnom smjeru stupove povezuje naglavna greda koja je kvadratnog presjeka dimenzija 120 cm. Temelj svakog stupišta je pravokutna armiranobetonska ploča visine 120 cm, širine 13.7 m i dubine 5.2 metra. Dva upornjaka su istih dimenzija.

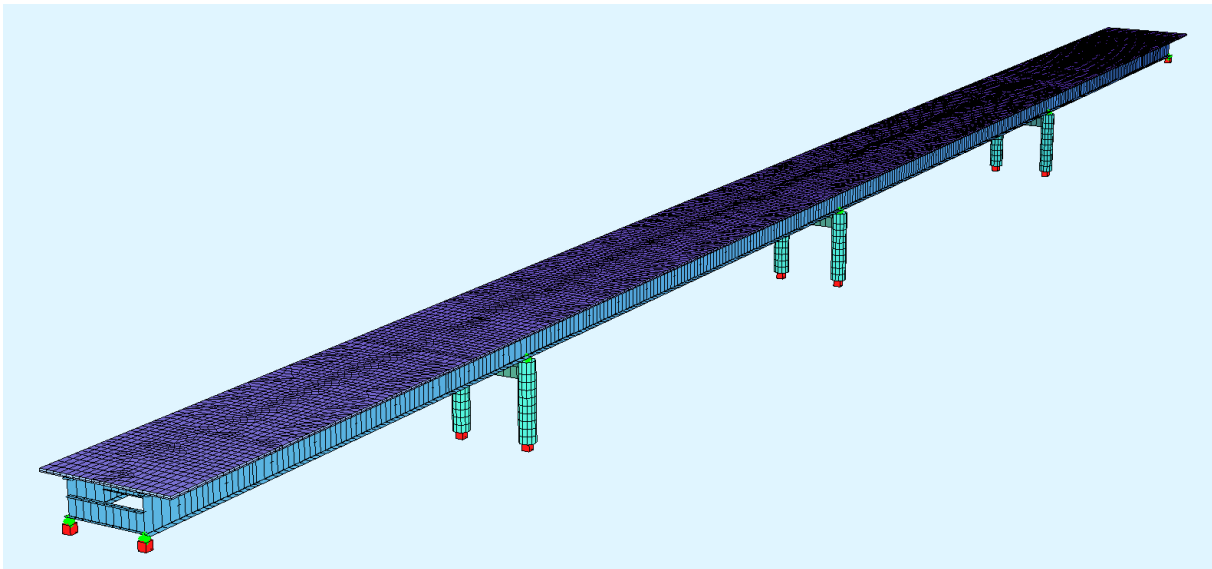
Dodatna oprema se sastoji od sustava za odvodnju, pješačke staze i rubnjaka, zaštitne ograde visine 200 cm i odbojne ograde, vijenca, zastora i hidroizolacije. Ležajevi su lončasti.



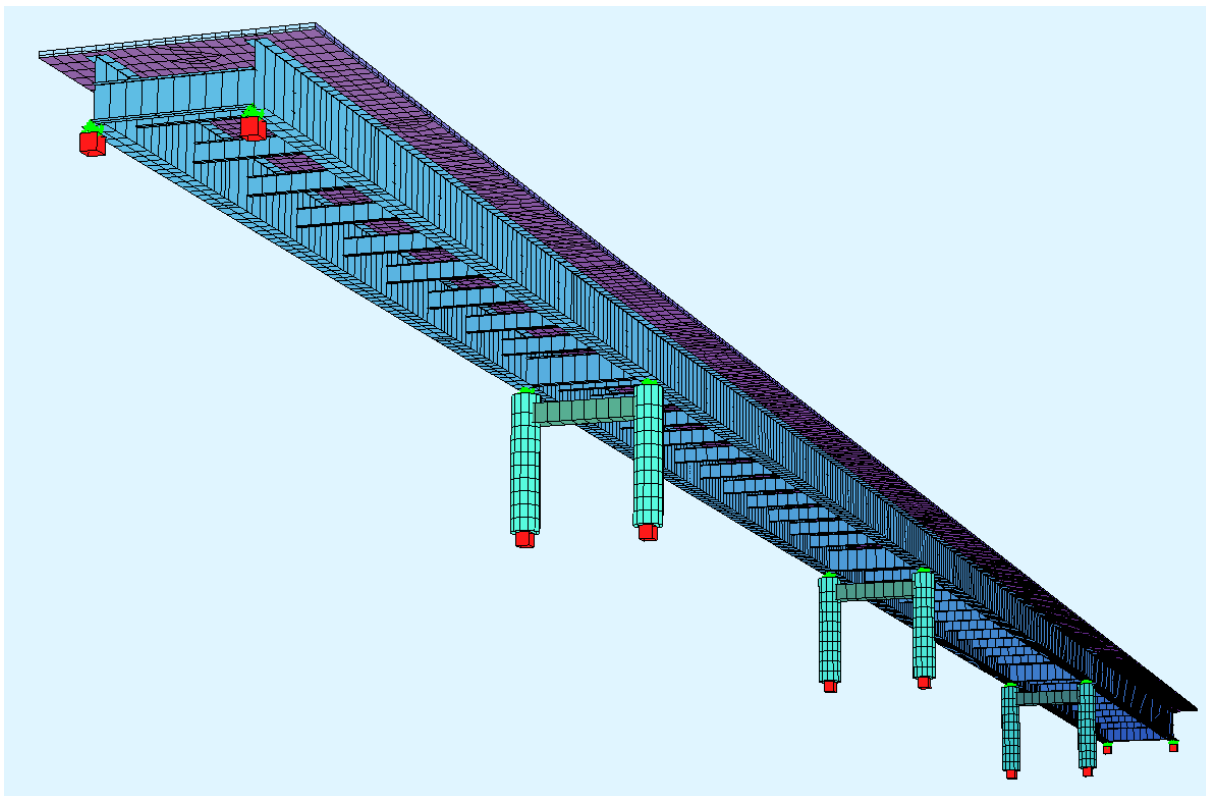
Slika 13. Karakteristični presjek nad stupom S1



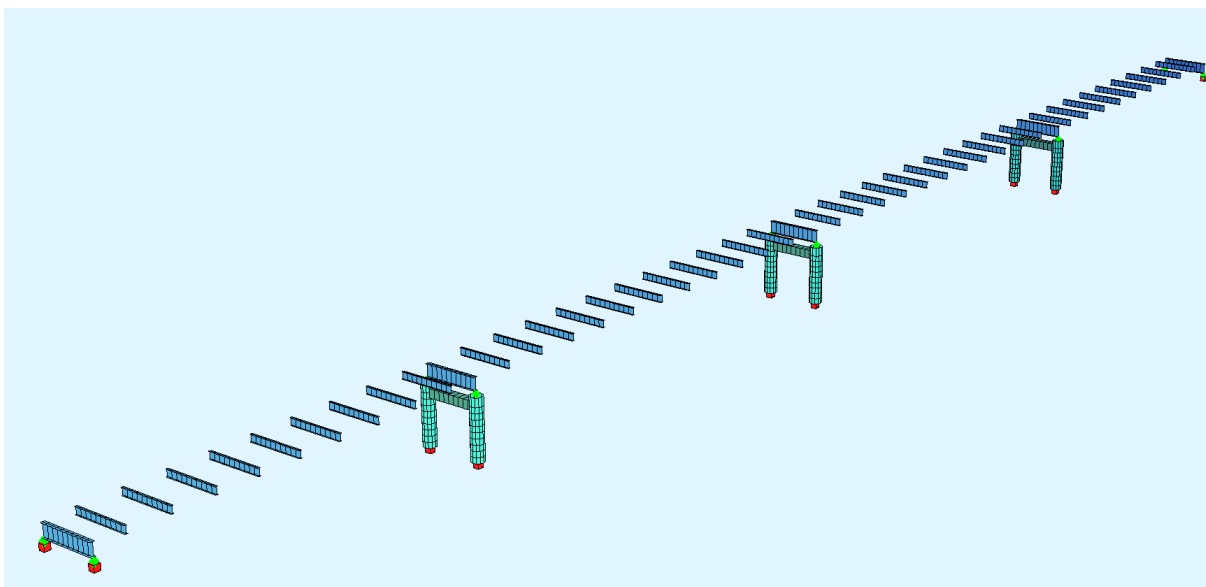
Slika 14. Karakteristični presjek u polju



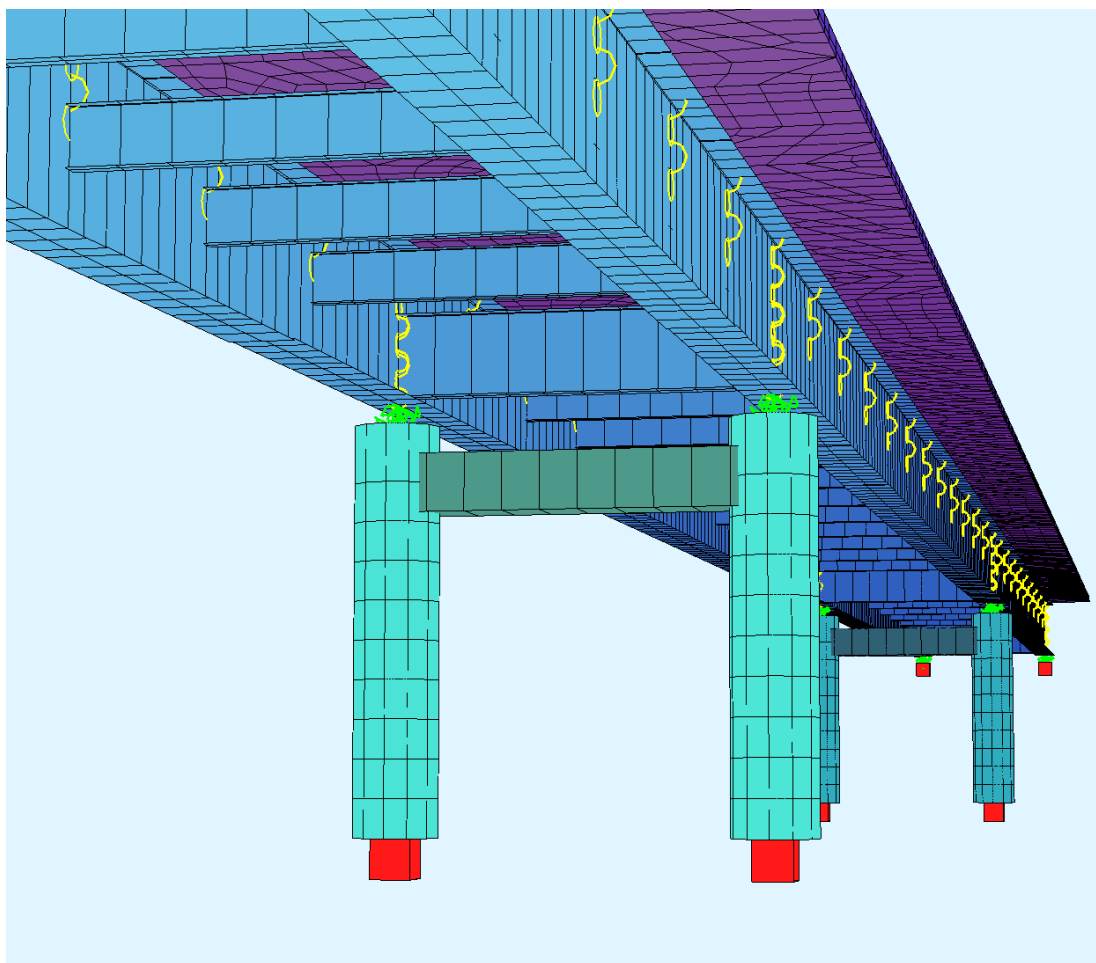
Slika 15. 3D prikaz modela, SOFiStiK



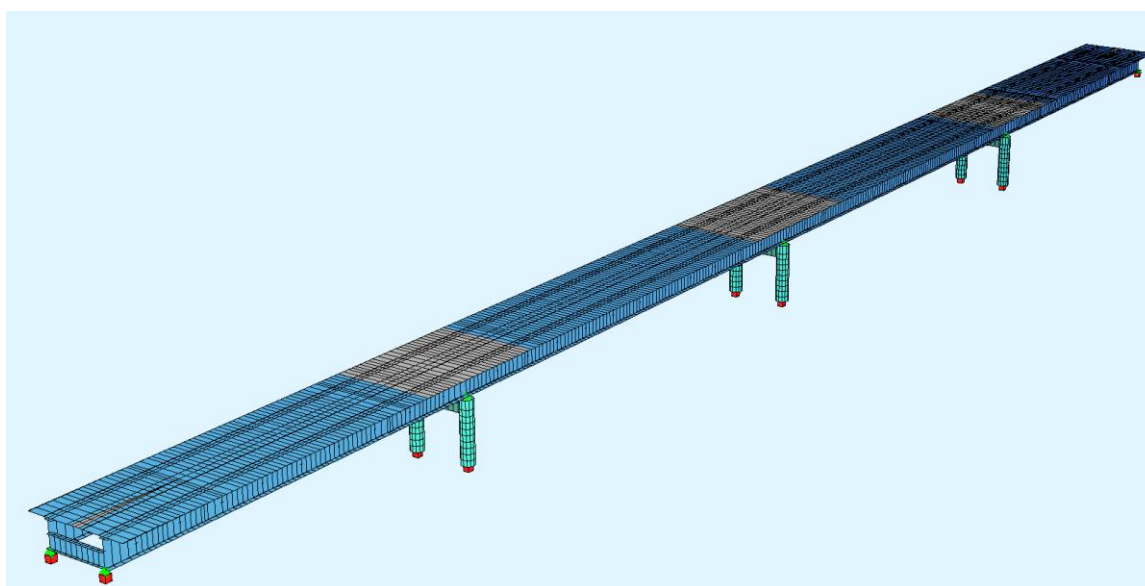
Slika 16. 3D prikaz modela s donje strane, SOFiSTiK



Slika 17. Raspored poprečnih nosača modela, SOFiSTiK



Slika 18. Detalj oslanjanja na stup, SOFiSTiK



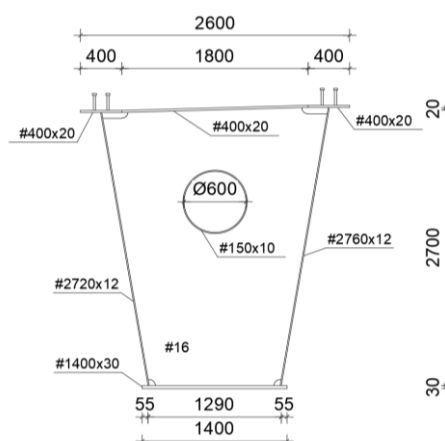
Slika 19. Prikaz sudjelujućih čeličnih površina, SOFiSTiK

## 4. ANALIZA OPTEREĆENJA MOSTA OTVORENOG PRESJEKA SA SANDUČASTIM NOSAČIMA

### 4.1. Vlastita težina mosta

Osim dijelova presjeka glavnog nosača, u vlastitu težinu čeličnog sklopa ulaze i svi poprečni elementi koji nisu dio glavnog statičkog modela. Ti dijelovi čine dodatnu vlastitu težinu koja se u model nanosi u obliku koncentriranih sila na mjestima gdje stvarno djeluje.

#### Polje



Slika 20. Presjek glavnog trapeznog nosača u polju

#### Faza 1 – montaža čeličnih nosaca

Izračun dodatnog opterećenja jednog nosača u polju:

$$V_{\text{dijafragme}} = 2,700 \cdot 2,000 \cdot 0,016 = 0,0864 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{ukruta otvora}} = 0,15 \cdot [(0,31^2\pi) - (0,30^2\pi)] = 0,0029 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{otvor u dijafragmi}} = 0,302 \cdot 0,016 = 0,0048 \text{ m}^3$$

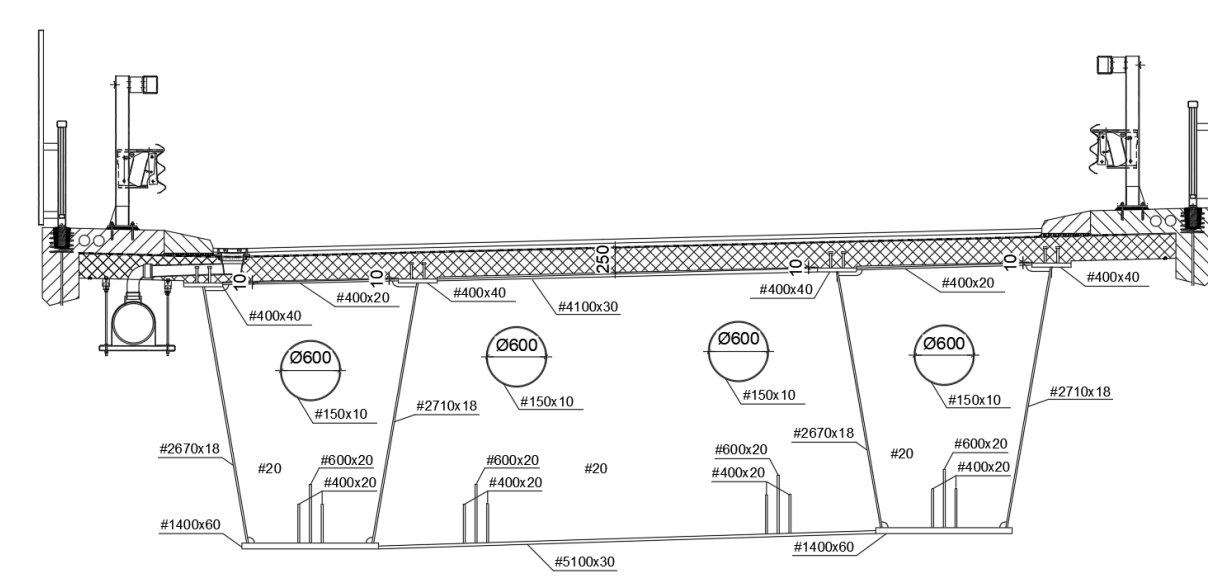


$$V_{\text{dodatna vlastita težina}} = V_{\text{dijafragme}} + V_{\text{ukruta otvora}} - V_{\text{otvor u dijafragmi}}$$

$$= 0,0864 + 0,0029 - 0,0048 = 0,085 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{dodatna vlastita težina}} = V_{\text{dodatna vlastita težina}} \cdot \gamma_s = 0,085 \cdot 80 = 6,80 \text{ kN}$$

## Ležaj



Slika 21. Presjek glavnog trapeznog nosača nad ležajem

Izračun dodatnog opterećenja jednog nosača nad ležajem:

$$V_{\text{dijafragme}} = 2,700 \cdot 2,000 \cdot 0,016 = 0,0864 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{pojasevi dijafragme}} = 1,800 \cdot 0,400 \cdot 0,020 = 0,014 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{ukruta otvora}} = 0,15 \cdot [(0,31^2 \pi) - (0,30^2 \pi)] = 0,0029 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{otvor dijafragme}} = 0,302 \cdot 0,020 = 0,006 \text{ m}^3$$

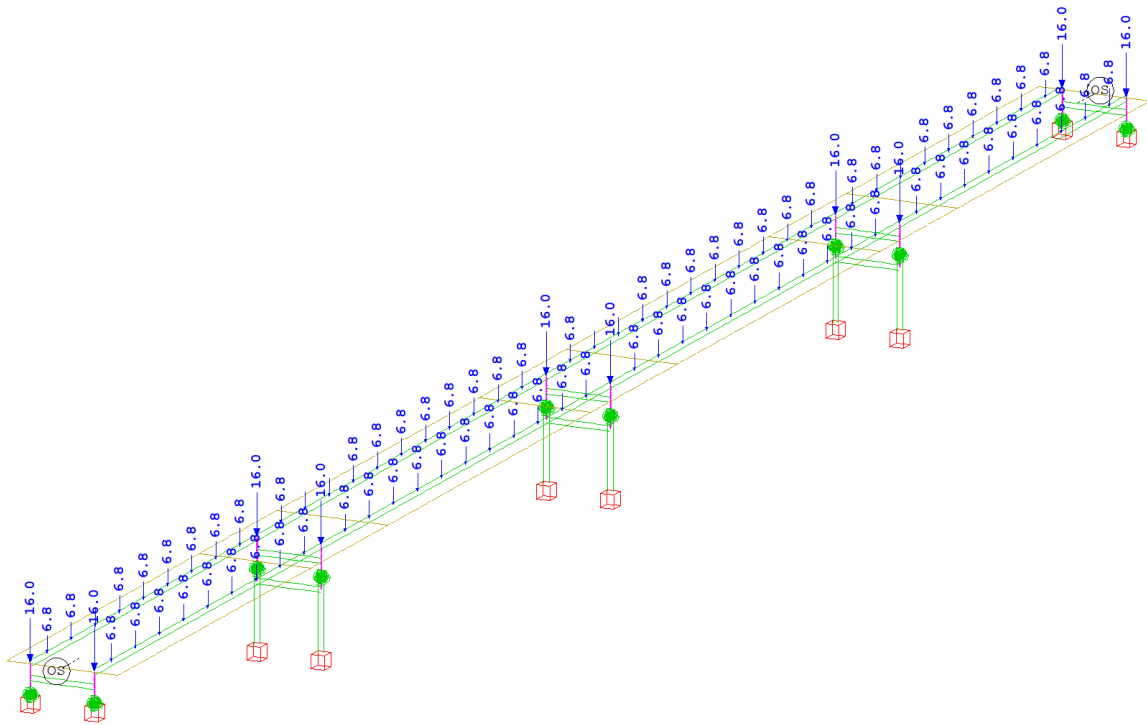
$$V_{\text{ukrućenja}} = 2 \cdot 0,400 \cdot 0,020 + 2 \cdot 0,600 \cdot 0,020 = 0,040 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{dodatna vlastita težina}}$$

$$= V_{\text{dijafragme}} + V_{\text{pojasevi dijafragme}} + 2 \cdot (V_{\text{ukruta otvora}} - V_{\text{otvor dijafragme}} + V_{\text{ukrućenja}})$$

$$= 0,11 + 0,014 + 2 \cdot (0,0029 - 0,006 + 0,040) = 0,20 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{dodatna vlastita težina}} = V_{\text{dodatna vlastita težina}} \cdot \gamma_s = 0,20 \cdot 80 = 16,00 \text{ kN}$$

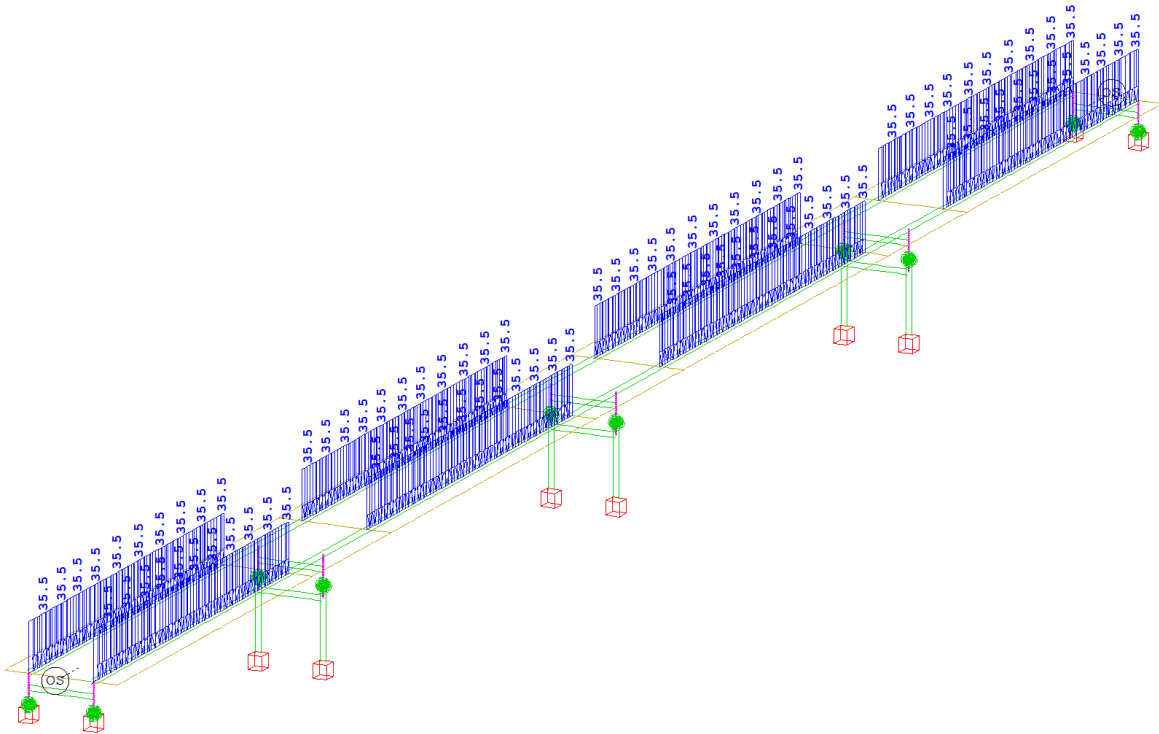


Slika 22. Unos dodatne vlastite težine, SOFiSTiK

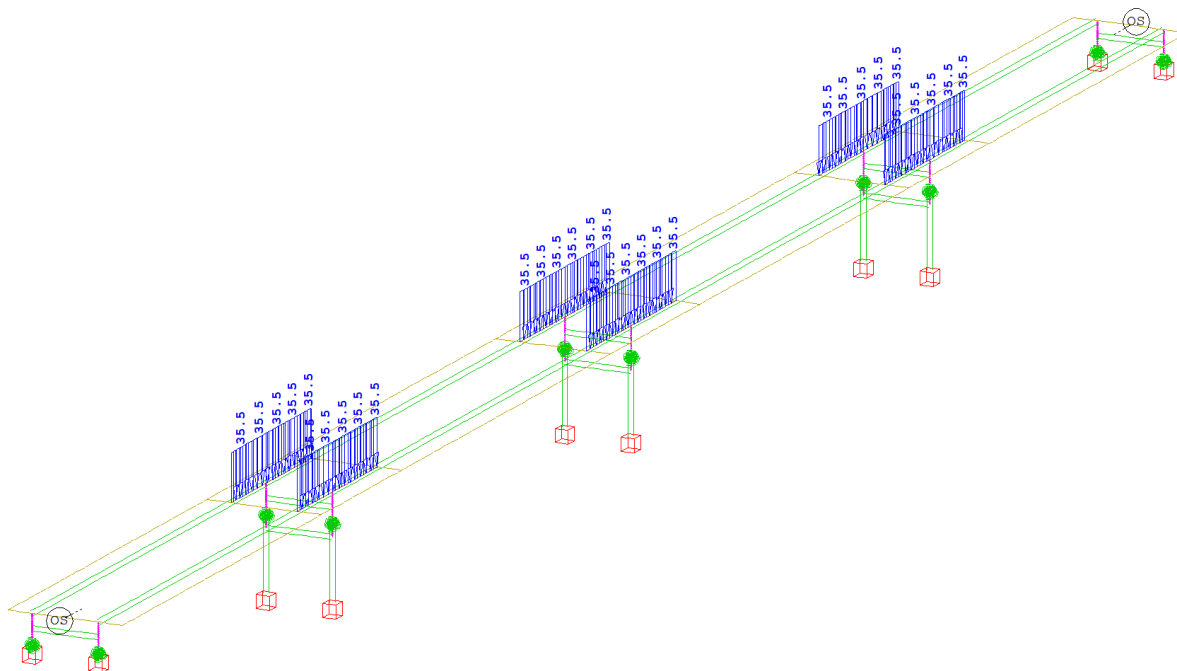
Faza 2 – betoniranje ploče spregnutog presjeka

$$A_{\text{polovina ploče}} = 1,42 \text{ m}^2$$

$$G_{\text{ploče za 1 nosač}} = A_{\text{polovina ploče}} \cdot \gamma_c = 1,42 \cdot 25 = 35,50 \text{ kN/m}$$

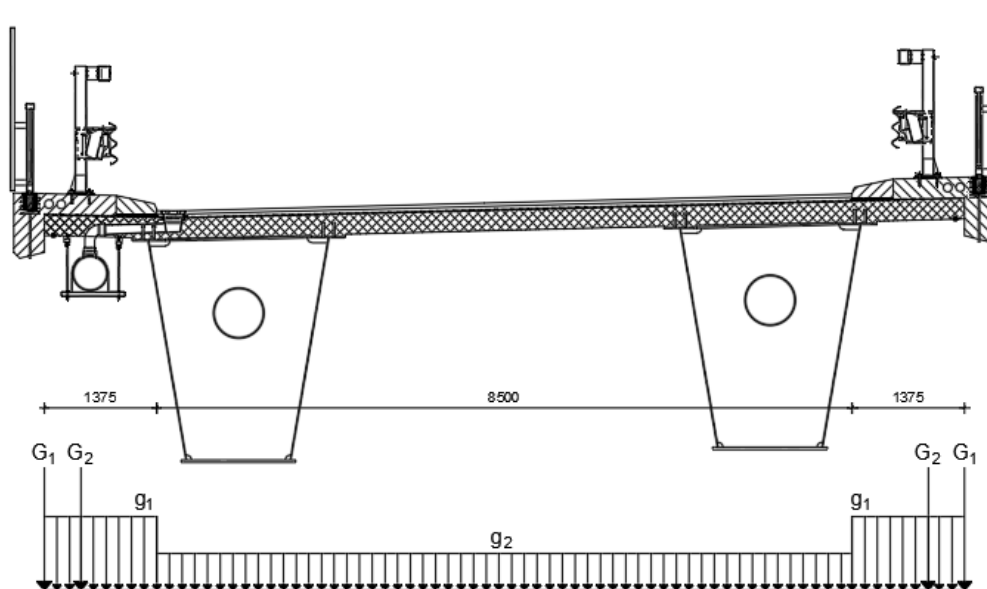


Slika 23. Unos opterećenja betonske ploče za polje, SOFiSTiK



Slika 24. Unos opterećenja betonske ploče za ležaj, SOFiSTiK

#### 4.2. Dodatno stalno opterećenje



Slika 25. Dodatno stalno opterećenje

Za cijeli most:

Pješačka staza, rubnjak .....	$0,2 \cdot 1,375 \cdot 25 \cdot 2 = 13,75 \text{ kN/m}$
Hidroizolacija.....	$0,5 \cdot 11,50 = 5,75 \text{ kN/m}$
Zastor.....	$0,08 \cdot 8,5 \cdot 21 = 14,28 \text{ kN/m}$
Ograde.....	$4 \cdot 0,5 = 2,0 \text{ kN/m}$
Vijenac.....	$0,284 \cdot 25 \cdot 2 = 14,21 \text{ kN/m}$

Ukupno: = 49,99 kN/m

Izračun dodatnih stalnih opterećenja grupiranih po širini mosta za unos u statički model:

Linijnska opterećenja:

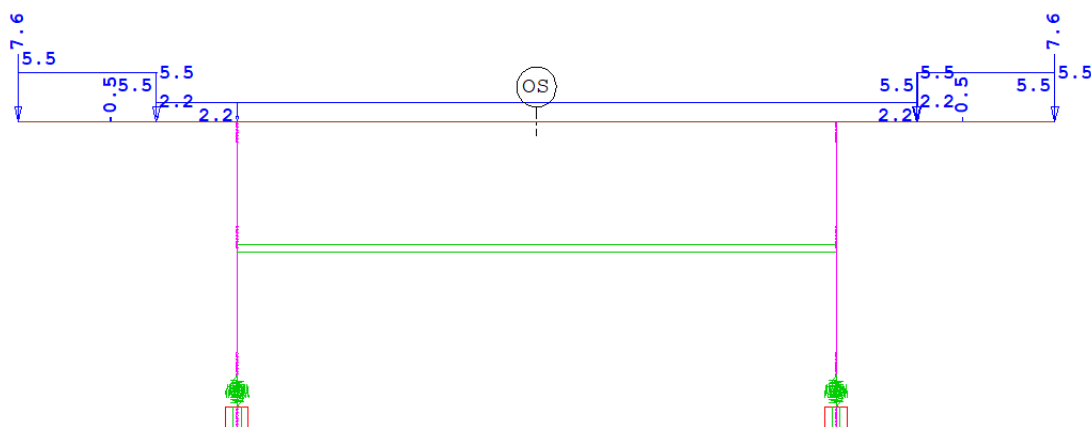
$$G_1 = A_v \cdot 25 \text{ (vijenac)} + 0,5 \text{ (ograda)} = 0,284 \cdot 25 + 0,5 = 7,60 \text{ kN/m}$$

$$G_2 = 0,5 \text{ (ograda)} = 0,5 \text{ kN/m}$$

Plošna (površinska) opterećenja:

$$g_1 = 0,5 \text{ (hidroizolacija)} + d_h \cdot 25 \text{ (hodnik)} = 0,5 + 0,2 \cdot 25 = 5,5 \text{ kN/m}^2$$

$$g_2 = 0,5 \text{ (hidroizolacija)} + d_z \cdot 21 \text{ (zastor)} = 0,5 + 0,08 \cdot 21 = 2,18 \text{ kN/m}^2$$



Slika 26. Unos dodatnog stalnog opterećenja, SOFiStiK

### 4.3. Prometno opterećenje

#### Model opterećenja 1

U svrhu ovog rada korišten je Model opterećenja 1. Model opterećenja 1 pokriva većinu djelovanja teretnih i osobnih vozila, te je glavni model opterećenja. Sastoji se od dvoosovinskog sustava – tandema vozila i jednolikog raspodijeljenog opterećenja. [5]

#### **Moguće sheme opterećenja**

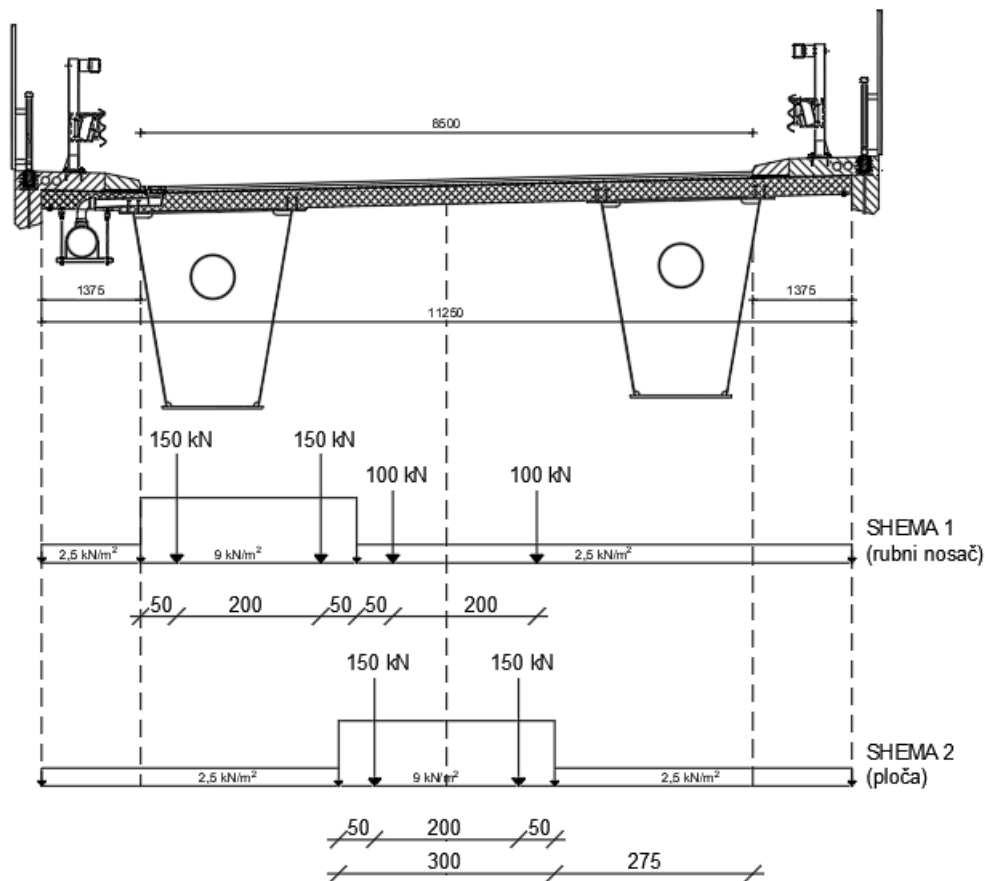
Položaj glavnog prometnog traka ovisi o konstrukcijskom elementu za koji tražimo kritičnu vrijednost rezne sile za dimenzioniranje. Položaj teškog vozila (glavnog prometnog traka) u poprečnom smjeru može se tako mijenjati kako bi se odredila maksimalna vrijednost mjerodavnog učinka za dimenzioniranje. [5]

Elementi za koje tražimo mjerodavne sheme prometnog opterećenja:

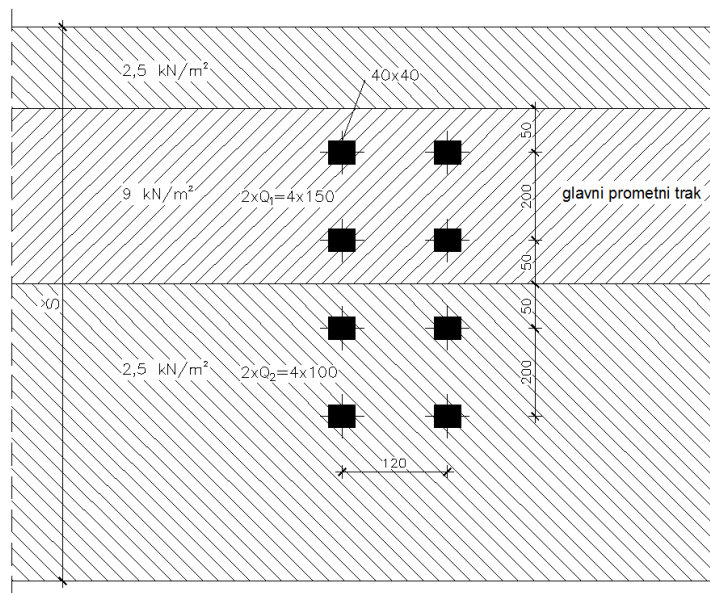
1. glavni nosač (max i min  $M_y$ )

a) rubni nosač → SHEMA 1

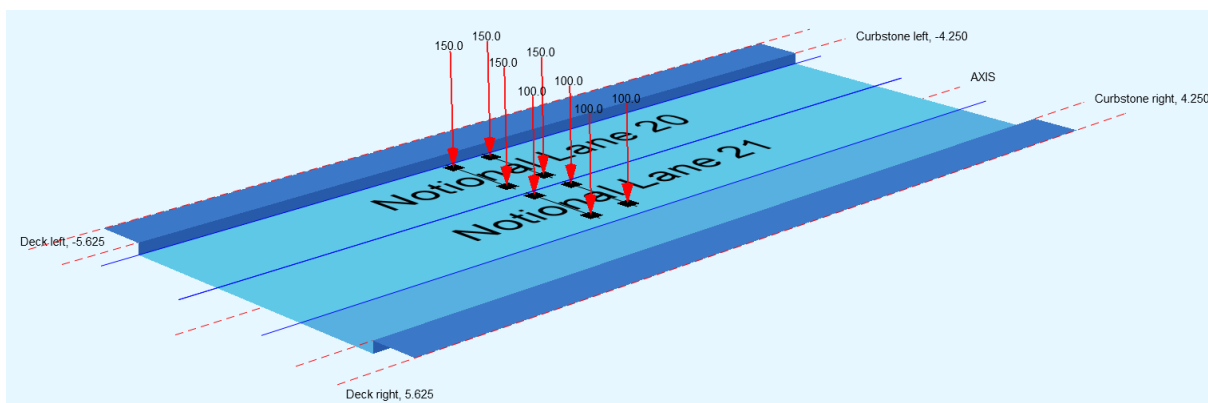
2. betonska ploča (max i min  $M_y$ ) → SHEMA 2



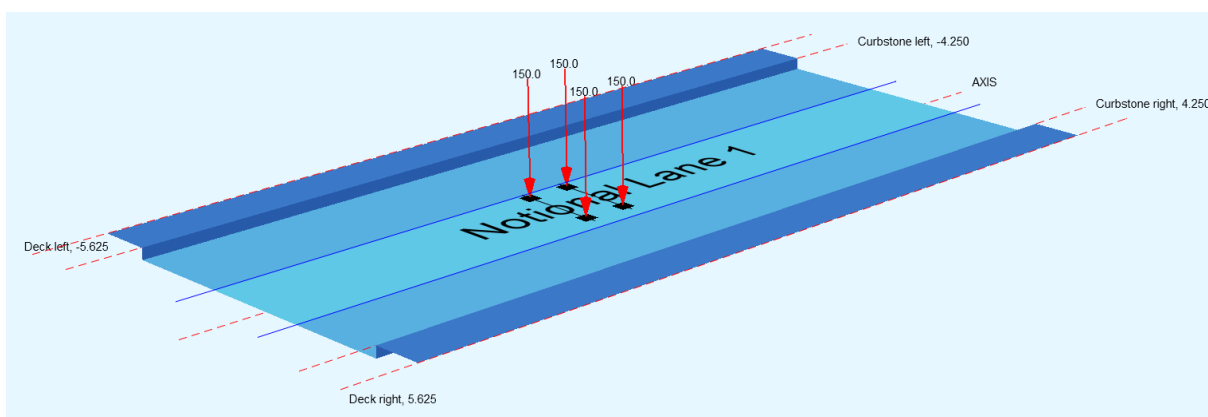
Slika 27. Sheme prometnog opterećenja



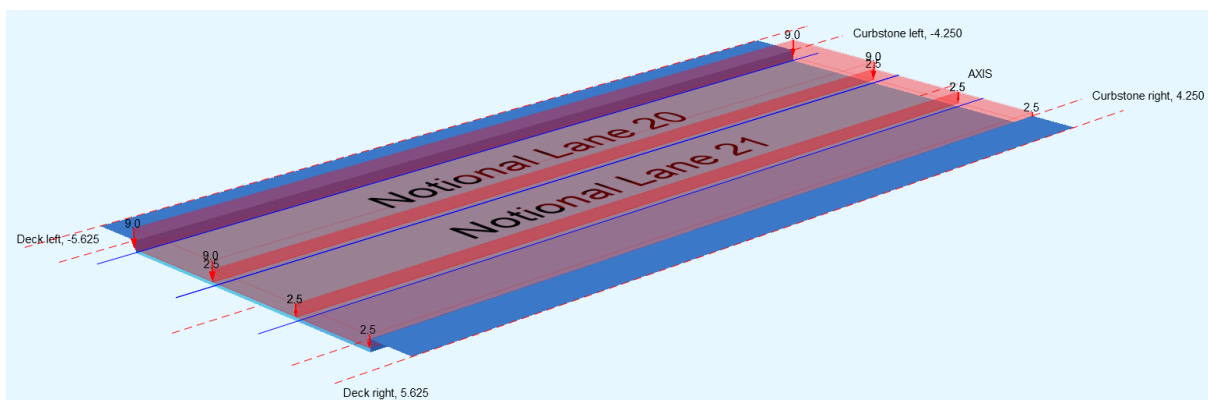
Slika 28. Uzdružni i tlocrtni raspored prometnog opterećenja [1]



Slika 29. Tandem vozila, LM1, shema 1, SOFiSTiK

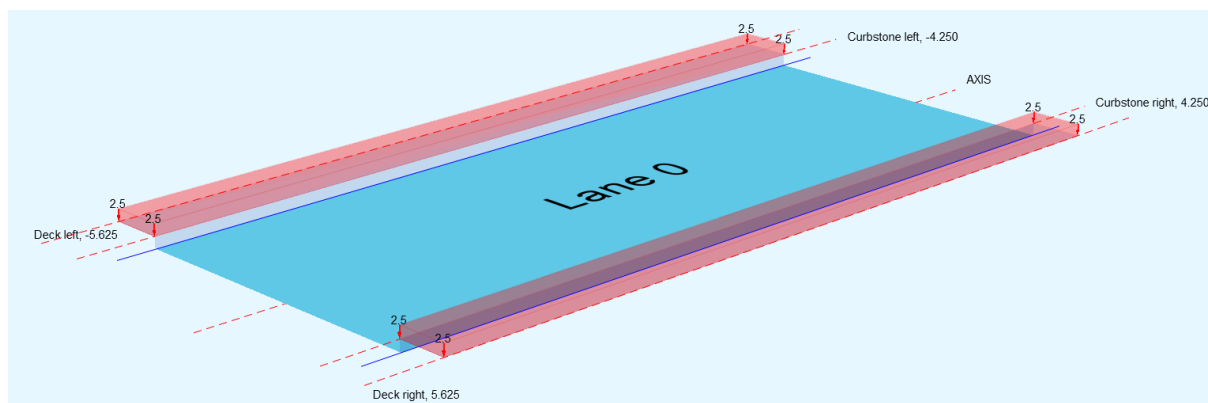


Slika 30. Tandem vozila, LM1, shema 2, SOFiSTiK



Slika 31. Kontinuirano opterećenje prometnih trakova, LM1, SOFiSTiK





Slika 32. Kontinuirano opterećenje hodnika, LM1, SOFiSTiK

### Kočenje:

Sila kočenja može djelovati na mostu bilo gdje duž glavnog prometnog traka.

Tablica 1. Parametri za izračun sile kočenja [1]

$\alpha_{Q1}$ – koeficijent redukcije opterećenja teškog vozila	$\alpha_{Q1} = 1,0$
$\alpha_{q1}$ – koeficijent redukcije opterećenja kontinuiranog opterećenja	$\alpha_{q1} = 1,0$
q – kontinuirano opterećenje u 1. traci	q = 9,0 kN/m <sup>2</sup>
$Q_{1k}$ – osovinsko opterećenje u 1. traci	$Q_{1k} = 300$ kN
$w_l$ – širina 1. trake	$w_l = 3,0$ m
L – duljina mosta	L = 214,0 m

$$Q_{1k} = 0,6 \cdot \alpha_{Q1} \cdot 2 \cdot Q_{1k} + 0,1 \cdot \alpha_{Q1} \cdot q_{1k} \cdot w_l \cdot L$$

$$Q_{1k} = 0,6 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 300 + 0,1 \cdot 1 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 214 = 937,8 \text{ kN}$$

$$900 \text{ kN} \leq Q_{1k} = 937,8 \text{ kN} \rightarrow Q_{1k} = 900 \text{ kN}$$

Sila pokretanja po iznosu je jednaka sili kočenja, a djeluje u suprotnom smjeru.

## 4.4. Temperatura

### 4.4.1. Jednolika temperatura

Iz karte najviših i najnižih temperatura zraka za lokaciju mosta u Splitu očitane su vrijednosti [3]:

$$T_{\max} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\min} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Korištenjem dijagrama i linije za vrstu nosača (linija 2) očitane su vrijednosti maksimalne i minimalne temperature mosta [3]:

$$T_{e,\max} = 44 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{e,\min} = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Najveća razlika negativne računске temperature mosta je:

$$\Delta T_{N,\text{con}} = -(T_0 - T_{e,\min}) = -(15 - (-5)) = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

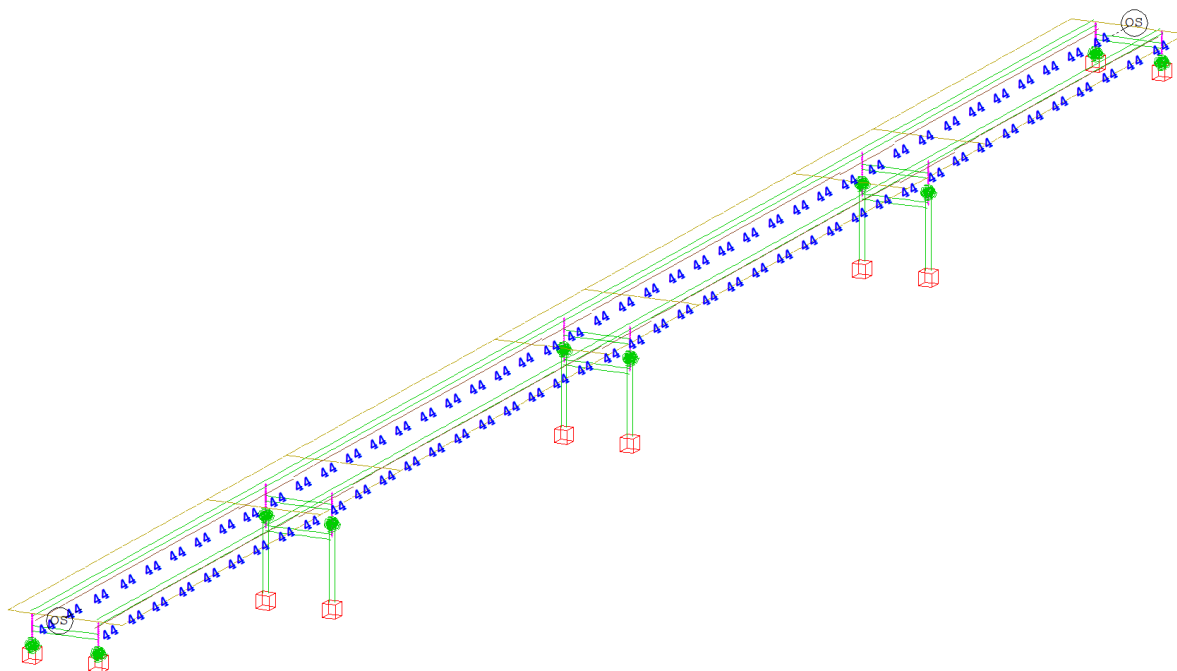
Najveća razlika pozitivne računске temperature mosta je:

$$\Delta T_{N,\text{exp}} = T_0 - T_{e,\max} = 44 - 15 = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

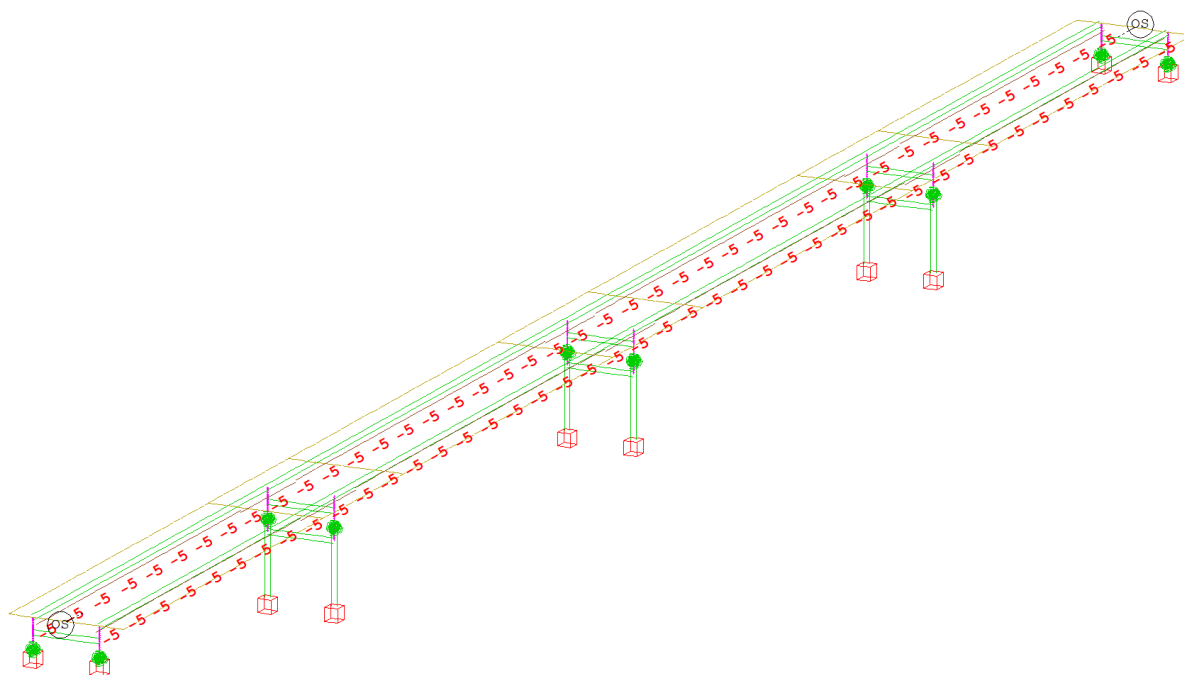
Temperatura mjerodavne za proračun pomaka prijelaznih naprava i ležajeva te reakcija ležajeva su:

$$\Delta T_{N,\text{con,bear}} = \Delta T_{N,\text{con}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = -20 - 20 = -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

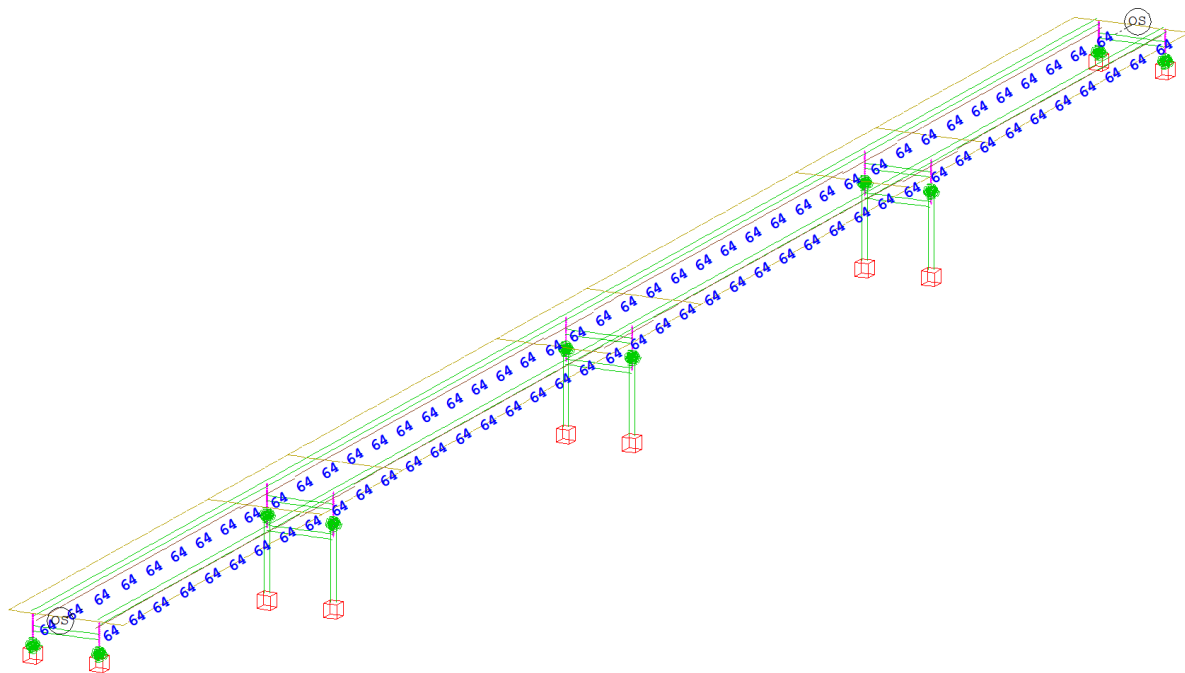
$$\Delta T_{N,\text{exp,bear}} = \Delta T_{N,\text{exp}} + 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 29 + 20 = 49 \text{ }^{\circ}\text{C}$$



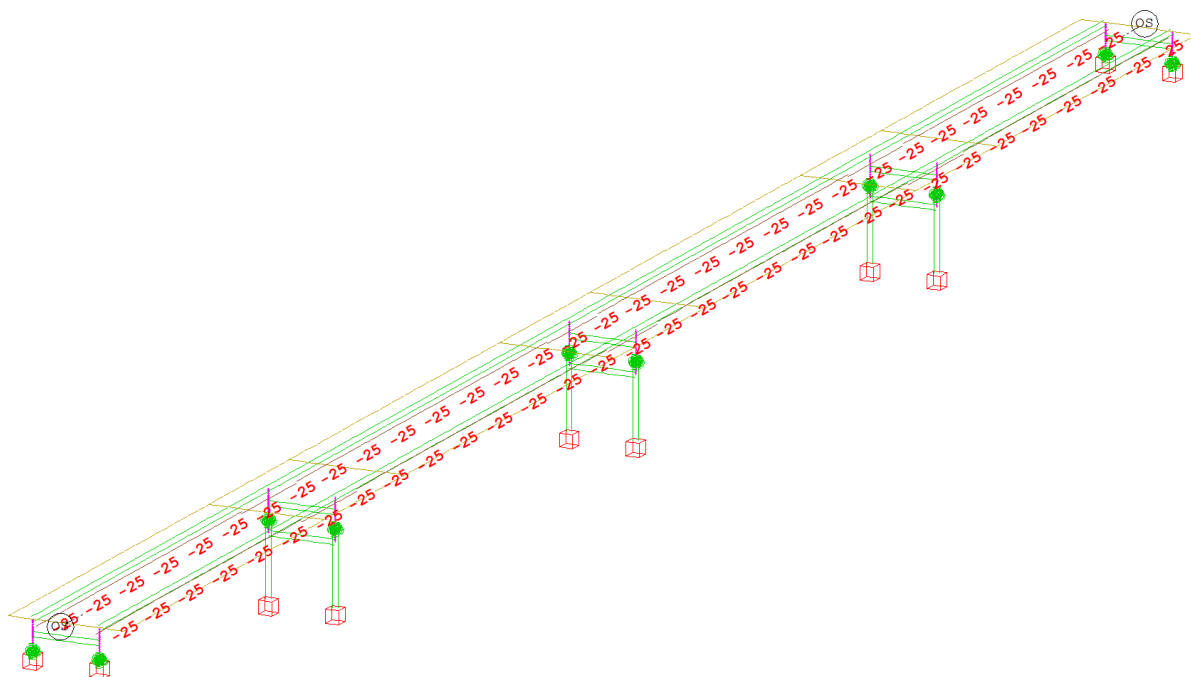
Slika 33. Prikaz jednolike temperature zagrijavanja mosta, SOFiSTiK



Slika 34. Prikaz jednolike temperature hlađenja mosta, SOFiSTiK



Slika 35. Jednolika temperatura zagrijavanja ležajeva i prijelaznih naprava, SOFiSTiK



Slika 36. Jednolika temperatura hlađenja za ležajeve i prijelazne naprave, SOFiSTiK

#### 4.4.2. Nejednolika linearno promjenjiva temperatura

Tablica 2. Nejednolika linearno promjenjiva temperatura

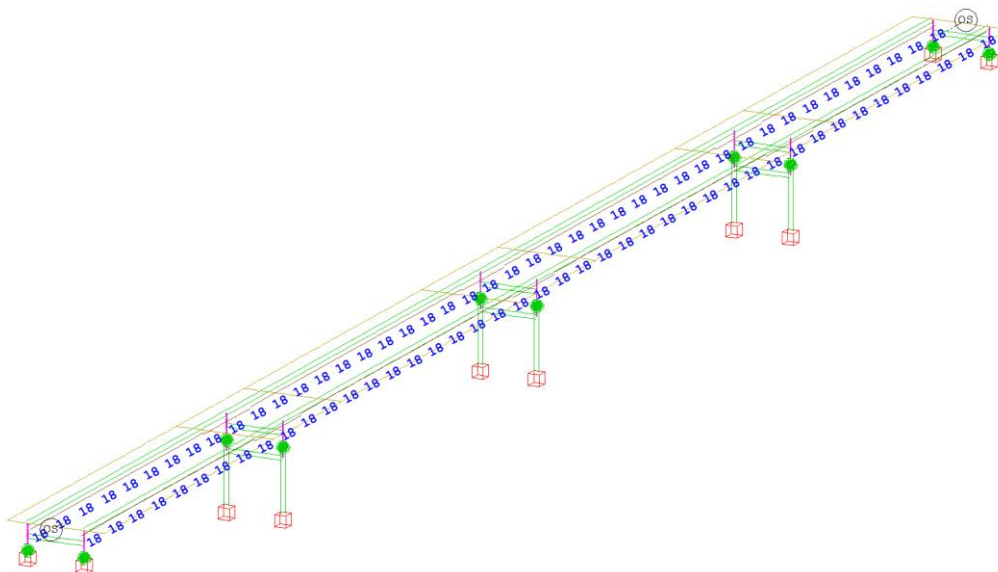
Tip sklopa	Gornji dio nosača topliji od donjeg ( $\Delta T_{M,heat}$ ) [°C]	Donji dio nosača topliji od gornjeg ( $\Delta T_{M,cool}$ ) [°C]
Spregnuti nosač	15 $k_{sur(8cm)} = 1,0$	18 $k_{sur(8cm)} = 1,0$
	$15 \cdot 1,0 = 15$	$18 \cdot 1,0 = 18,0$

#### 4.4.3. Kombinacija jednolike i nejednolike linearno promjenjive temperature

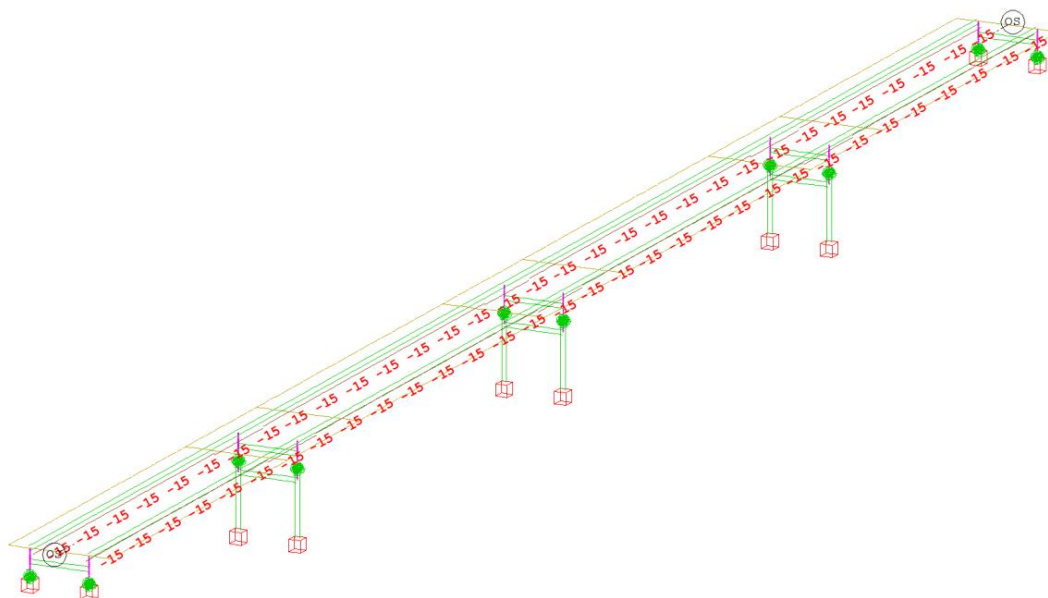
U nekim slučajevima potrebno je uzeti u obzir istodobno djelovanje jednolike i nejednolike temperaturne komponente, pa se koristi nepovoljniji od slijedećih učinaka [1]:

$$\Delta T_{M,heat} + \omega_N \Delta T_{N,exp} \text{ ili } \Delta T_{M,cool} + \omega_N \Delta T_{N,con} , \omega_N = 0,35$$

$$\omega_N \Delta T_{M,heat} + \Delta T_{N,exp} \text{ ili } \omega_N \Delta T_{M,cool} + \Delta T_{N,con} , \omega_N = 0,75$$



Slika 37. Prikaz nejednolike temperature mosta (donji dio nosača topliji), SOFiSTiK

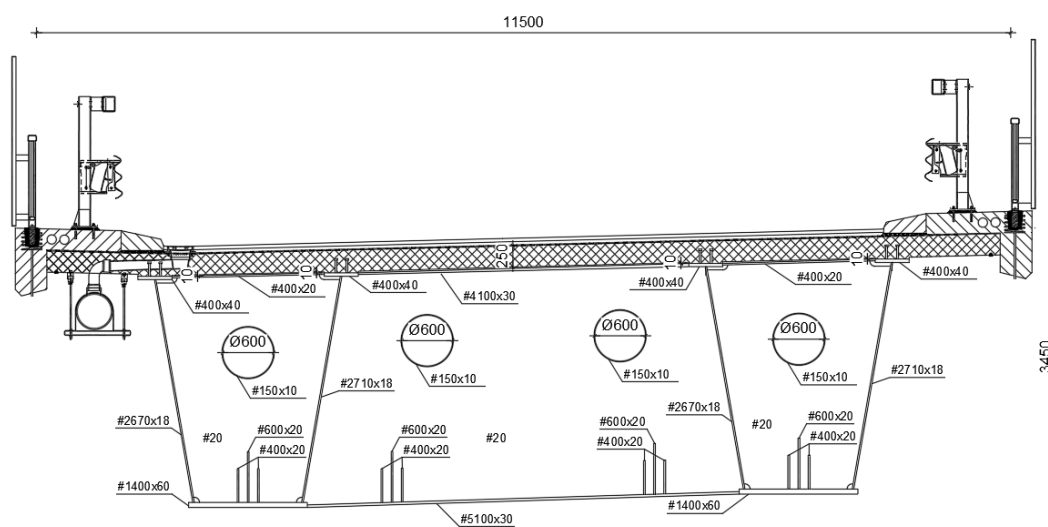


Slika 38. Prikaz nejednolike temperature mosta (gornji dio nosača topliji), SOFiSTiK

#### 4.5. Opterećenje vjetrom

##### 4.5.1. Vjetar na rasponski sklop poprečno

##### Neopterećeni most



Slika 39. Slika neopterećenog mosta

$$F_{w(x)} = q_b \cdot c_e(Z) \cdot c_{fx,0} \cdot h_{ref}$$

Iz vjetrovne karte Hrvatske za lokaciju mosta Split očitano je [4]:

$$v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$$

Osnovna brzina vjetra:

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} = 25 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 25 \text{ m/s}$$

Osnovni pritisak vjetra:

$$q_b = \frac{\delta}{2000} \cdot v_b^2 = \frac{1,25}{2000} \cdot 25^2 = 0,39 \text{ m/s}^2$$

Iz dijagrama prema visini ( $z = 7 \text{ m}$ ) na kojoj se nalazi rasponski sklop od terena i prema kategoriji terena (kategorija 0) očitano je koeficijent izloženosti  $c_e(z) = 2,75$ .

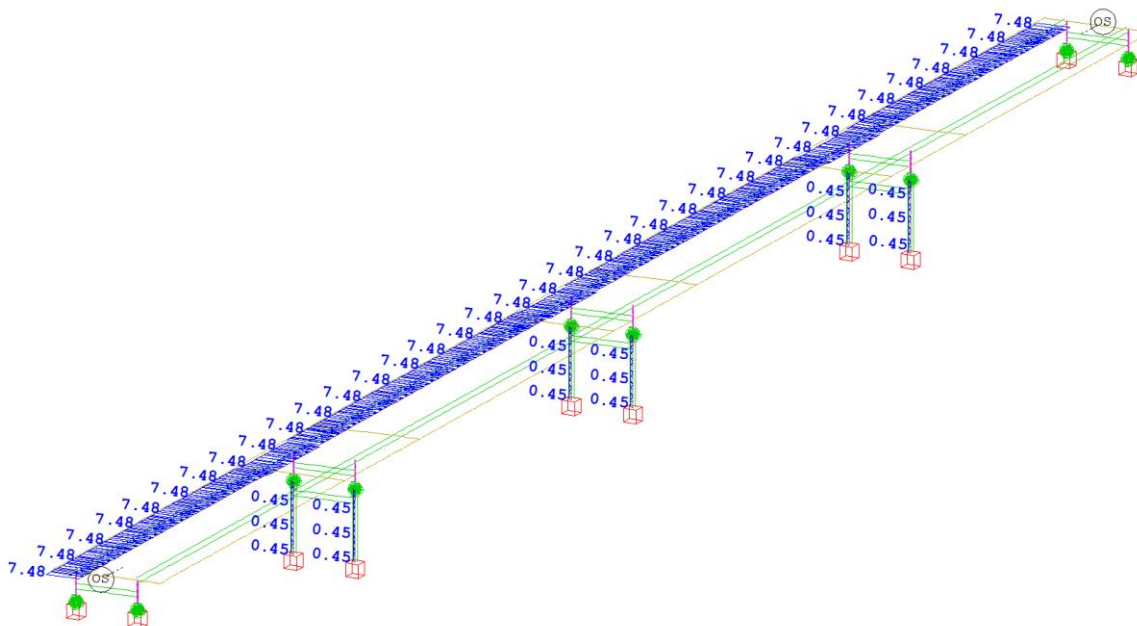
Koeficijent oblika  $c_{fx,0}$ :

$$\frac{b}{d_{tot}} = \frac{11,50}{3,45} = 3,33 \rightarrow c_{fx,0} = 1,50 \text{ (očitano iz dijagrama)}$$

Referentna visina sklopa na koju djeluje pritisak vjetra  $h_{ref}$ :

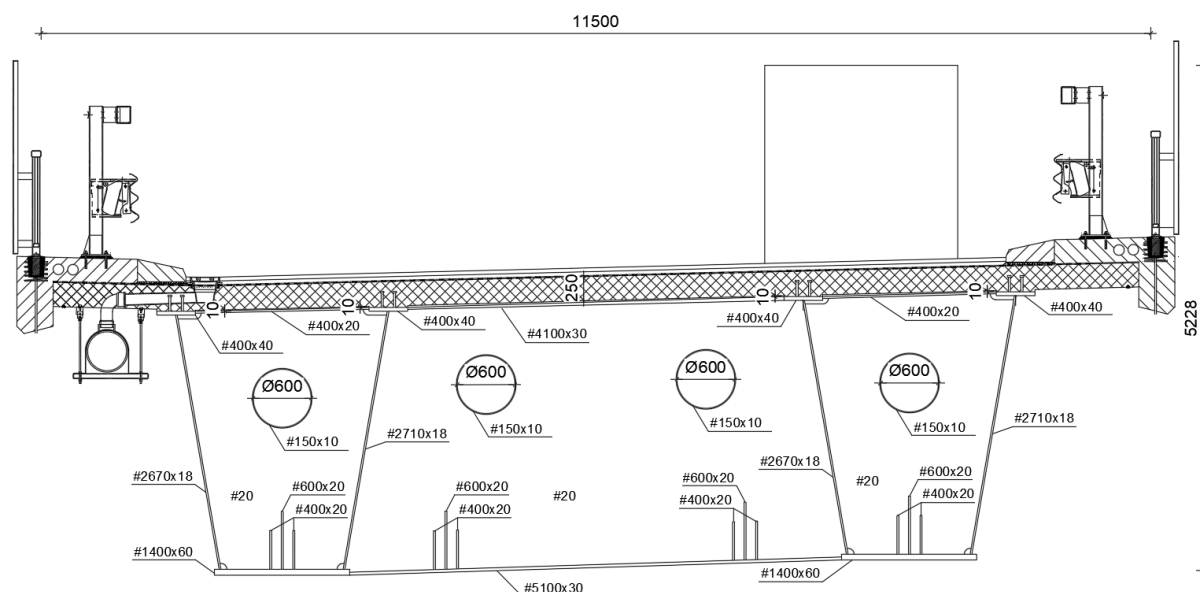
$$h_{ref} = d_{tot} + 1,2 = 3,45 + 1,2 = 4,65 \text{ m}$$

$$F_{w(x)} = 0,39 \cdot 2,75 \cdot 1,5 \cdot 4,65 = 7,48 \text{ kN/m}$$



Slika 40. Prikaz opterećenja vjetrom poprečno na neopterećeni most, SOFiSTiK

## Opterećeni most



Slika 41. Slika opterećenog mosta

$$F_w(x) = q_p \cdot c_{fx,0} \cdot h_{ref}$$

Vršni pritisak vjetra  $q_p$ :

$$q_p = \min\{0,64 ; q_b \cdot C_e(z)\} = \{0,64 ; (0,39 \cdot 2,75 = 1,07)\} = 0,64 \text{ kN/m}^2$$

Koeficijent oblika  $c_{fx,0}$ :

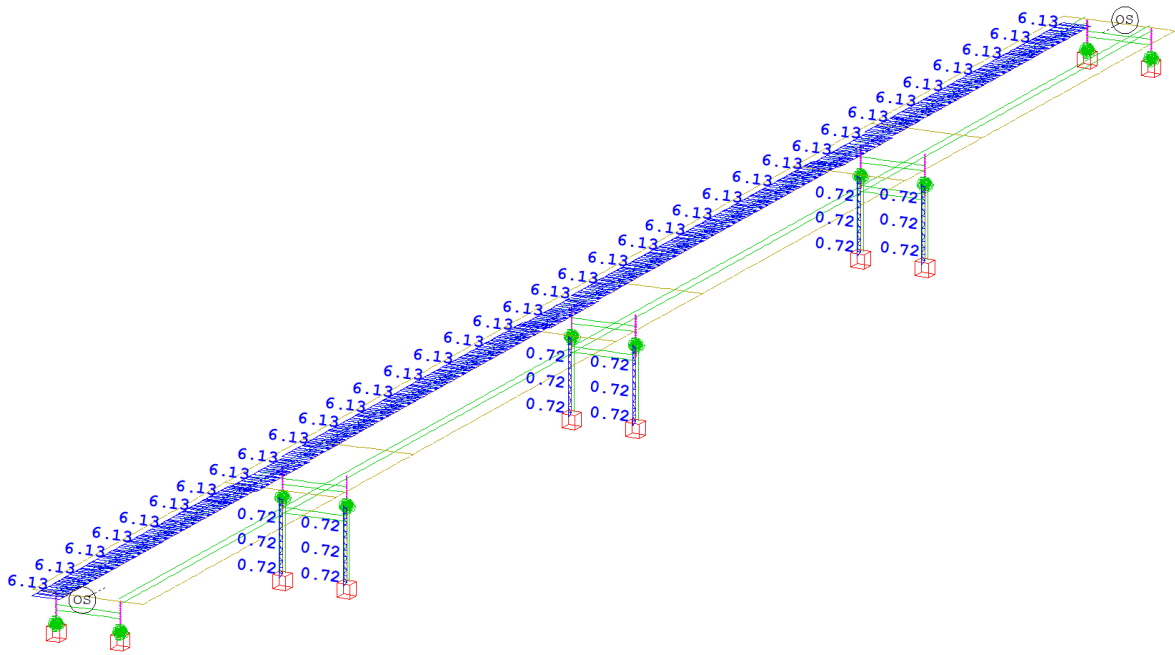
$$\frac{b}{d_{tot}} = \frac{11,50}{5,23} = 2,20 \rightarrow C_{fx,0} = 1,83 \text{ (očitano iz dijagrama)}$$

Referentna visina sklopa na koju djeluje pritisak vjetra  $h_{ref}$ :

$$h_{ref} = d_{tot} = 5,23 \text{ m}$$

$$F_w(x) = 0,64 \cdot 1,83 \cdot 5,23 = 6,13 \text{ kN/m}$$



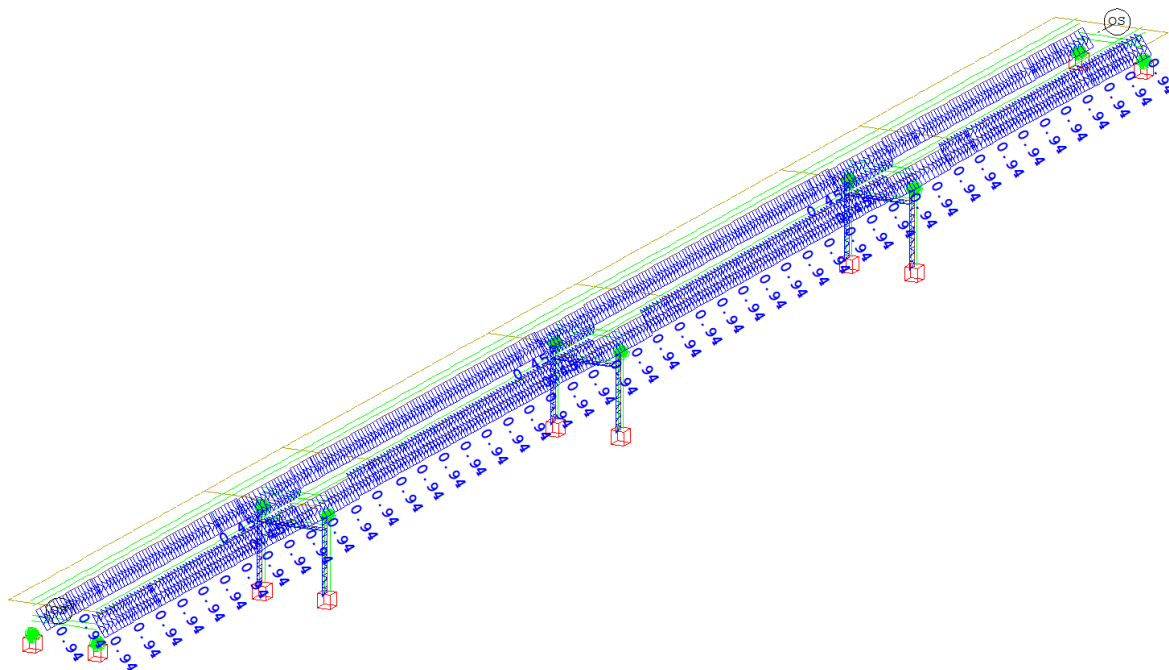


Slika 42. Prikaz opterećenja vjetrom poprečno na opterećeni most, SOFiSTiK

#### 4.5.2. Vjetar na rasponski sklop uzdužno

##### Neopterećeni most

$$F_{W(y),neopt} = 0,25 \cdot F_{W(x),neopt} = 0,25 \cdot 7,48 = 1,87 \text{ kN/m}$$



Slika 43. Prikaz opterećenja vjetrom uzdužno na neopterećeni most, SOFiSTiK

##### Opterećeni most

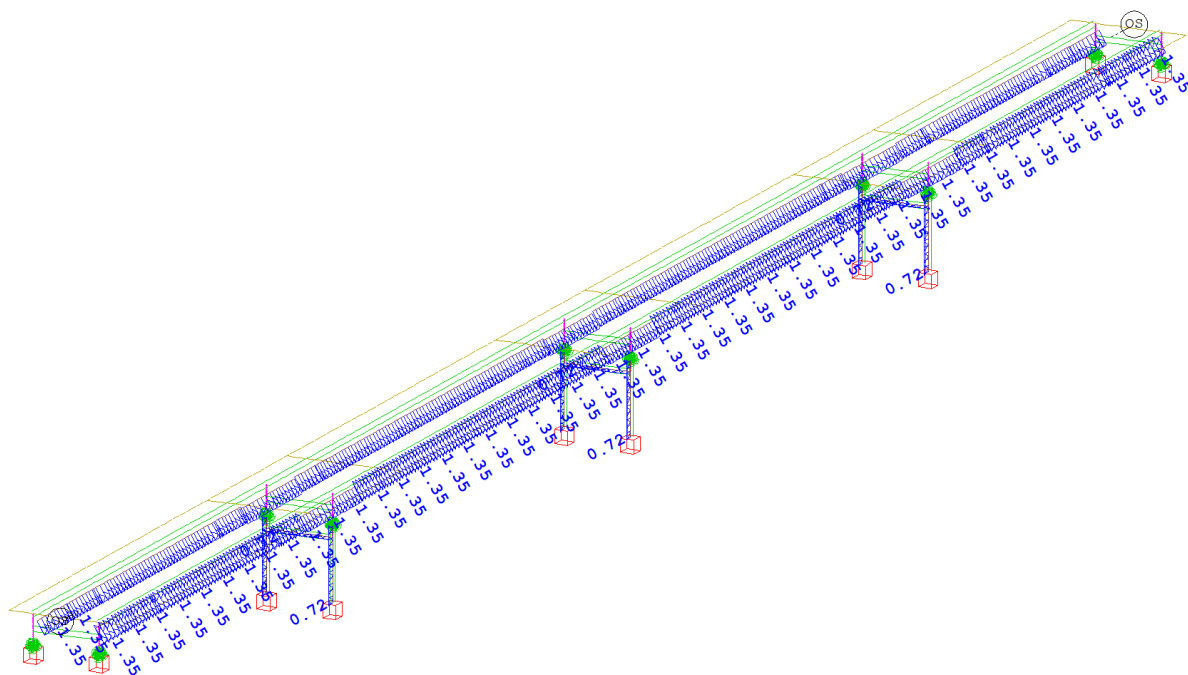
$$F_{W(y),opt} = 0,25 \cdot F_{W(x),opt} + 0,5 \cdot q_p \cdot c_{fx,0} \cdot h_{ref,vozilo}$$

$$F_{W(y),opt} = 0,25 \cdot 6,13 + 0,5 \cdot 0,64 \cdot 1,83 \cdot 2,0 = 2,70 \text{ kN/m}$$

$q_p$  –vršni pritisak vjetra na opterećen most

$$c_{fx,0} = 1,83$$

$$h_{ref,vozilo} = 2,0 \text{ m}$$



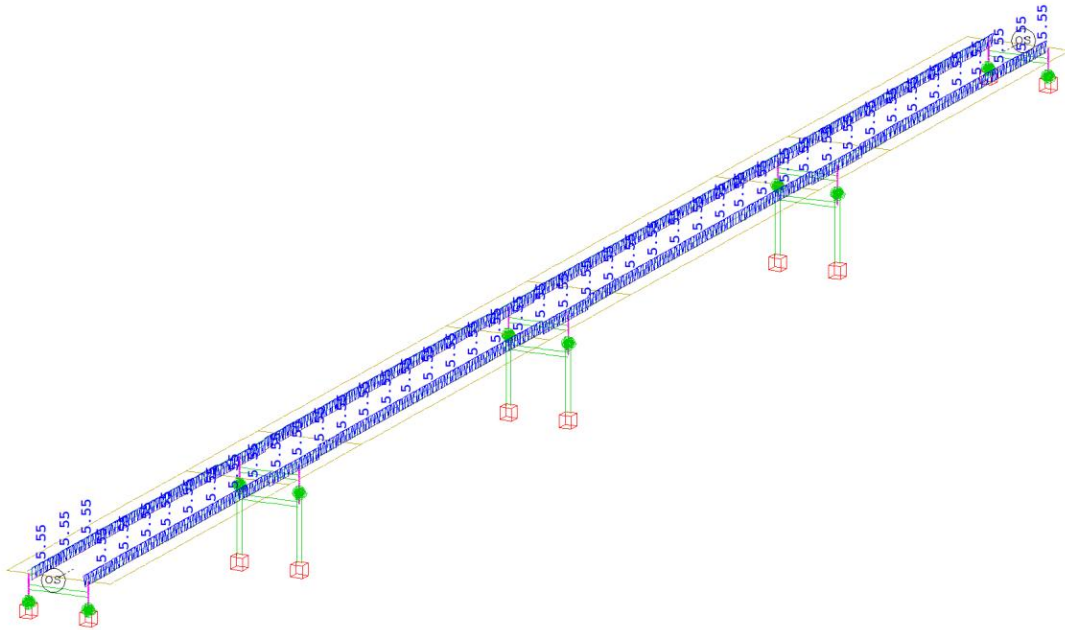
Slika 44. Prikaz opterećenja vjetrom uzdužno na opterećeni most, SOFiSTiK

#### 4.5.3. Vjetar na rasponski sklop vertikalno

##### Neopterećeni most

$$F_{w(z),neopt} = q_b \cdot c_e(Z) \cdot c_{f,z} \cdot b = 0,39 \cdot 2,75 \cdot 0,9 \cdot 11,50 = 11,10 \text{ kN/m}$$

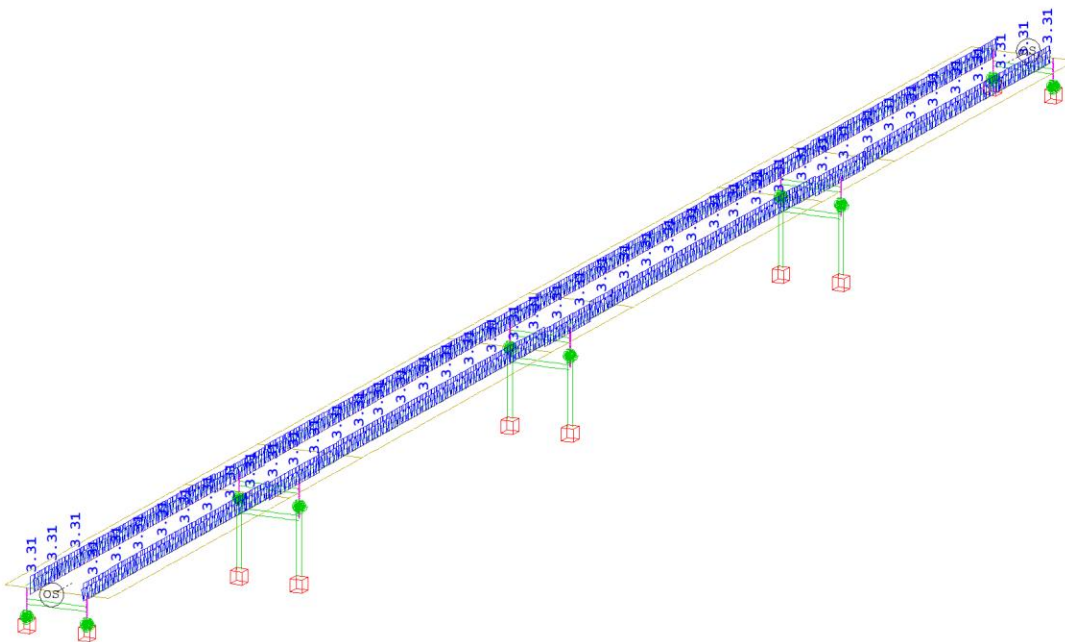
$$c_{f,z} = 0,9$$



Slika 45. Prikaz opterećenja vjetrom vertikalno na neopterećeni most, SOFiSTiK

#### Opterećeni most

$$F_{w(z),opt} = q_b \cdot c_{f,z} \cdot b = 0,64 \cdot 0,9 \cdot 11,50 = 6,62 \text{ kN/m}$$



Slika 46. Prikaz opterećenja vjetrom vertikalno na opterećeni most, SOFiSTiK

#### 4.5.4. Vjetar na stupove

S obzirom da su stupovi kružnog poprečnog presjeka provodi se samo jedan proračun za oba smjera

##### Opterećeni most

$$F_w = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot b$$

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0,75 \cdot 1,0 = 0,75$$

$$F_w = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,75 \cdot 0,64 \cdot 1,5 = 0,72 \text{ kN/m}$$

##### Neopterećeni most

$$F_w = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot b$$

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0,77 \cdot 1,0 = 0,77$$

$$F_w = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,77 \cdot 0,39 \cdot 1,5 = 0,45 \text{ kN/m}$$

#### 4.6. Analiza potresnog opterećenja

Akceleracija tla za povratni period  $T_p = 475$  godina očitano iz karte  $a_g = 0,22 \text{ g}$  [10].

Određena kategorija tla – A

Node	TM			RM			RMB [tm2]
	X[t]	Y[t]	Z[t]	X[tm2]	Y[tm2]	Z[tm2]	
total <sup>1</sup>	3545.090	3545.090	3545.090	2.936E+03	2.483E+03	4.833E+02	-
	S[m] <sup>2</sup>			RM(S) <sup>3</sup>			
	107.000	0.000	0.286	5.322E+04	8.237E+00	-1.193E-01	
				8.237E+00	1.332E+07	7.310E-02	
				-1.193E-01	7.310E-02	1.336E+07	
active <sup>1</sup>	3539.988	3539.988	3539.988	2.936E+03	2.482E+03	4.824E+02	-
	S[m] <sup>2</sup>			RM(S) <sup>3</sup>			
	107.000	0.000	0.272	5.268E+04	8.237E+00	-1.135E-01	
				8.237E+00	1.330E+07	6.948E-02	
				-1.135E-01	6.948E-02	1.334E+07	

Slika 47. Prikaz zbroja masa i momenata inercije, SOFiSTiK Report Browser

Posmična sila pri dnu „base-shear“ (BS) iznosi:

- BS x smjera: 6,9 %

$$\text{base shear}_x = \frac{\text{sum of forces}_x}{\text{sum of masses}_x} = \frac{2388.4}{3454,09 \cdot 10} = 0,069 = 6,9 \%$$

LC	Z-1v1 [m]	Mode	Forces			Moments		
			PX[kN]	PY[kN]	PZ[kN]	MX[kNm]	MY[kNm]	MZ[kNm]
901	-50.000	CQC <sup>1</sup>	2388.4	0.4	19.6	0.53	3419.68	51.73

Slika 48. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser

- BS y smjera: 12,00 %

$$\text{base shear}_y = \frac{\text{sum of forces}_y}{\text{sum of masses}_y} = \frac{4156,9}{3454,09 \cdot 10} = 0,120 = 12,00 \%$$

LC	Z-1v1 [m]	Mode	Forces			Moments		
			PX[kN]	PY[kN]	PZ[kN]	MX[kNm]	MY[kNm]	MZ[kNm]
904	-50.000	CQC <sup>1</sup>	0.4	4156.9	34.7	2128.64	3712.68	444760.38

Slika 49. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser

- BS z smjera: 7,40 %

$$\text{base shear}_z = \frac{\text{sum of forces}_z}{\text{sum of masses}_z} = \frac{2545,90}{3454,09 \cdot 10} = 0,074 = 7,40 \%$$

LC	Z-1v1 [m]	Mode	Forces			Moments		
			PX[kN]	PY[kN]	PZ[kN]	MX[kNm]	MY[kNm]	MZ[kNm]
909	-50.000	CQC <sup>1</sup>	10.6	18.2	2545.9	59.18	272336.31	1943.05

Slika 50. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser

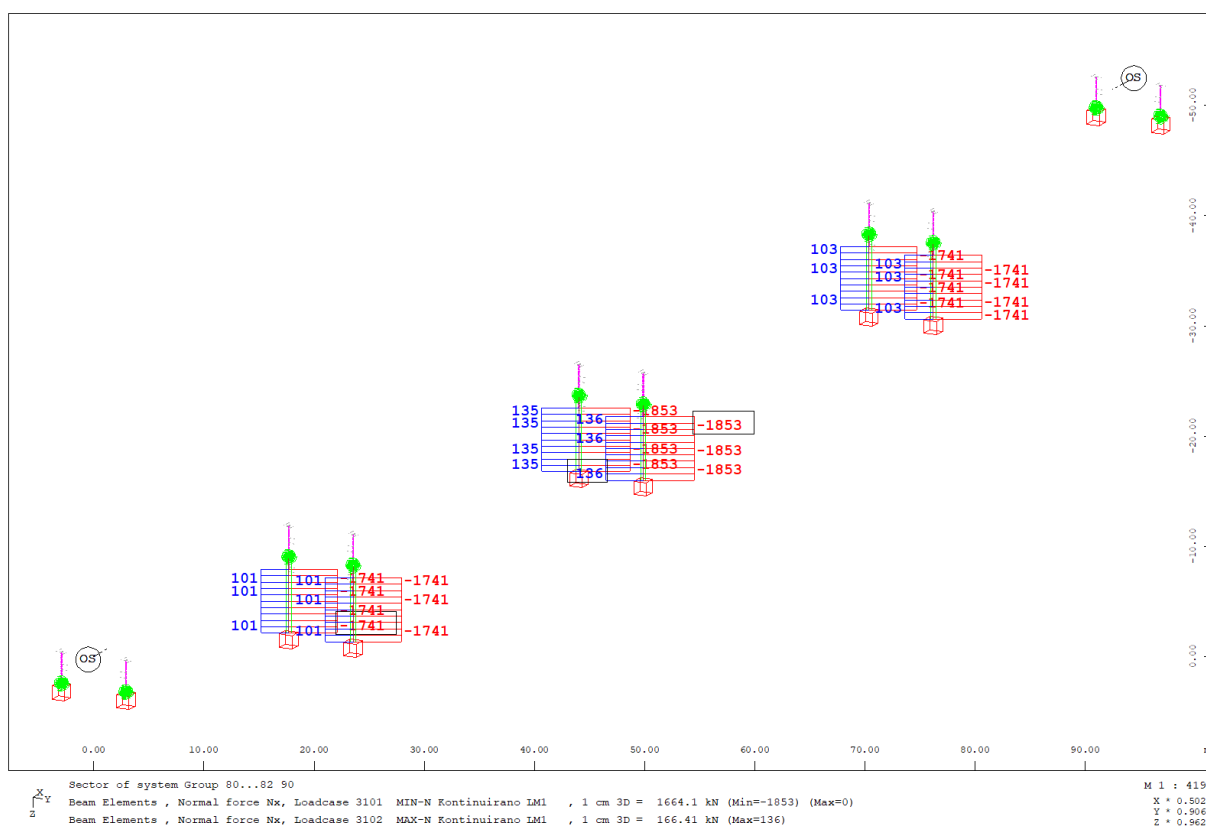
## 5. SILE I OPTEREĆENJA MOSTA OTVORENOG PRESJEKA SA SANDUČASTIM NOSAČIMA

### 5.1. Rezne sile

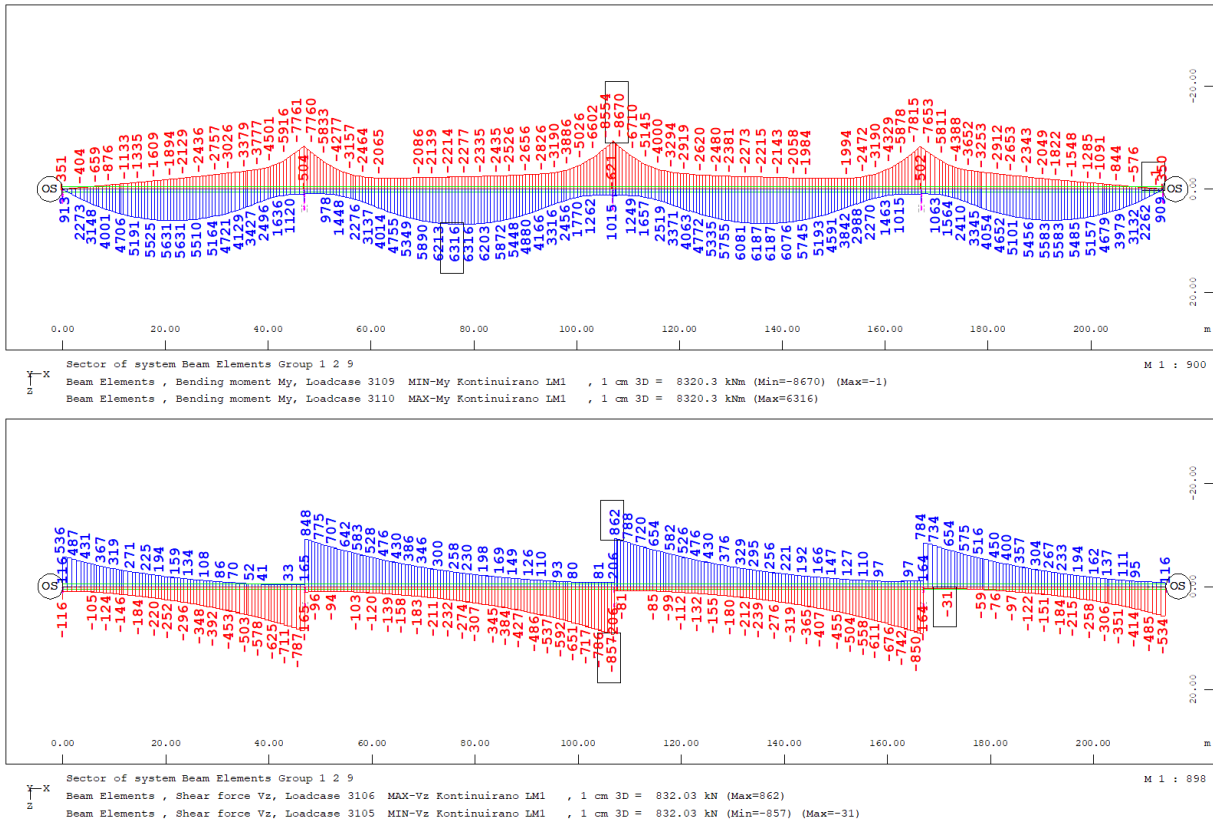
U nastavku su prikazane rezne sile i pomaci za rasponski sklop i stupove.

#### 5.1.1. Prometno opterećenje

Anvelope kontinuiranog kolnika:



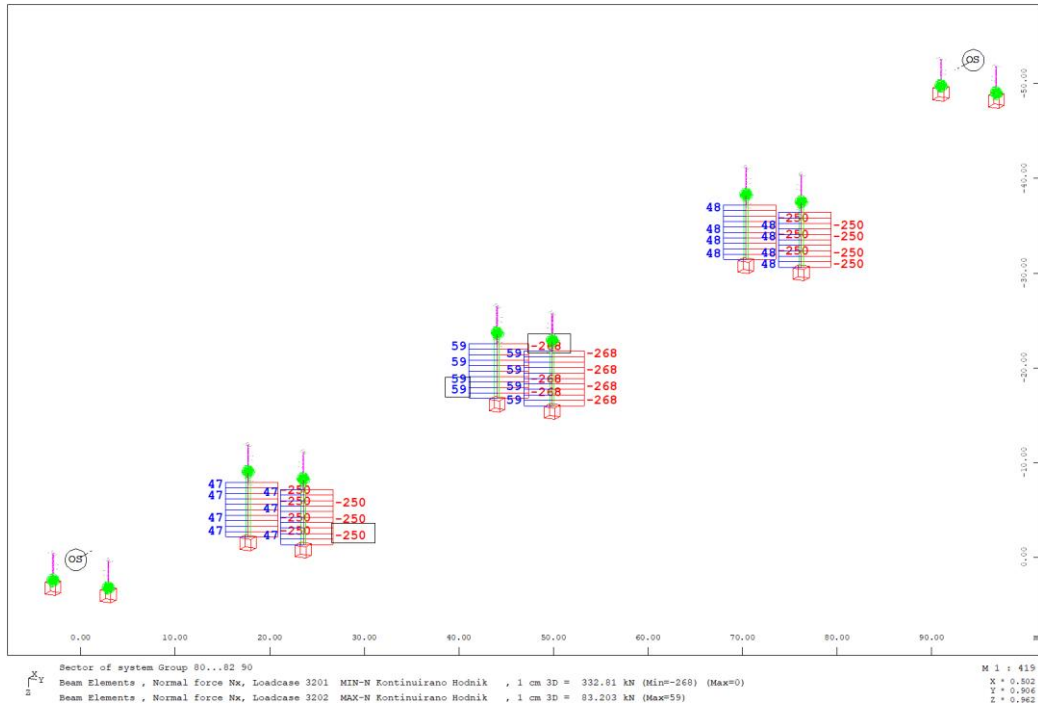
Slika 51. Uzdužna sila, SOFiSTiK



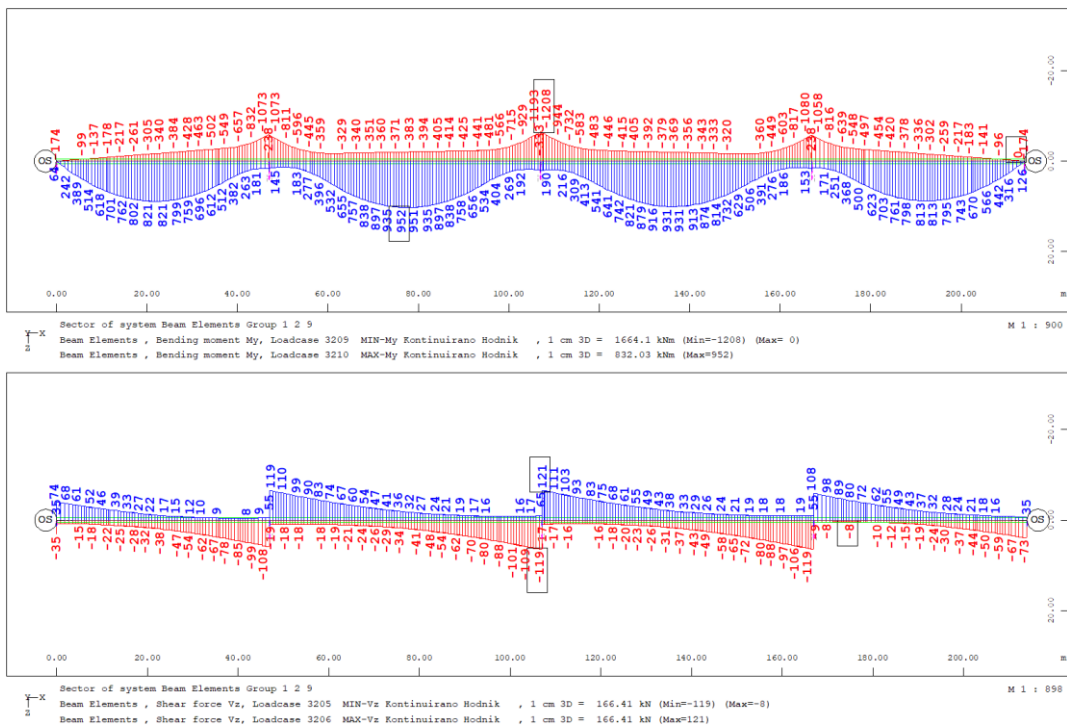
Slika 52. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK



Anvelopa kontinuiranog hodnika:



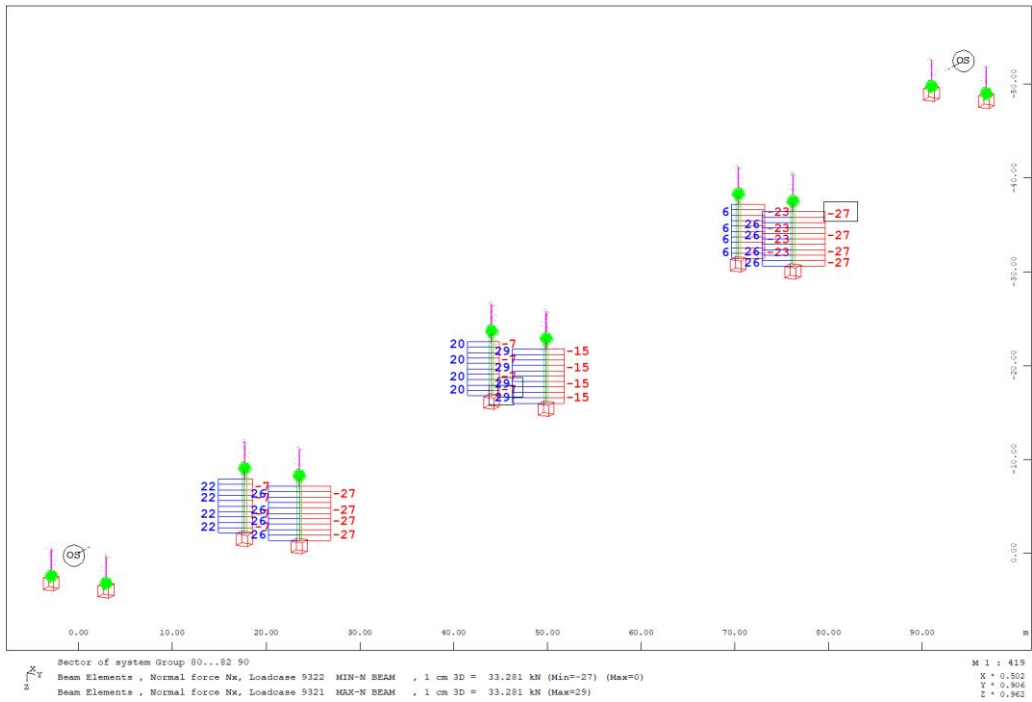
Slika 53. Uzdužna sila, SOFiSTiK



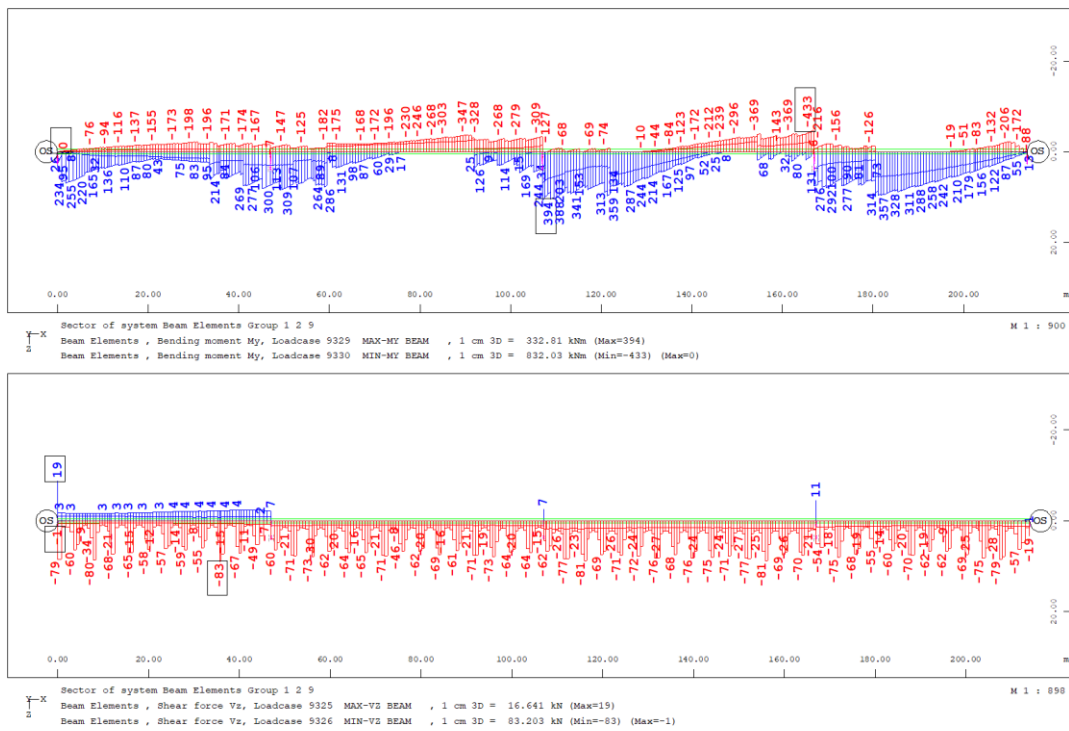
Slika 54. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK



Anvelopa kočenja:



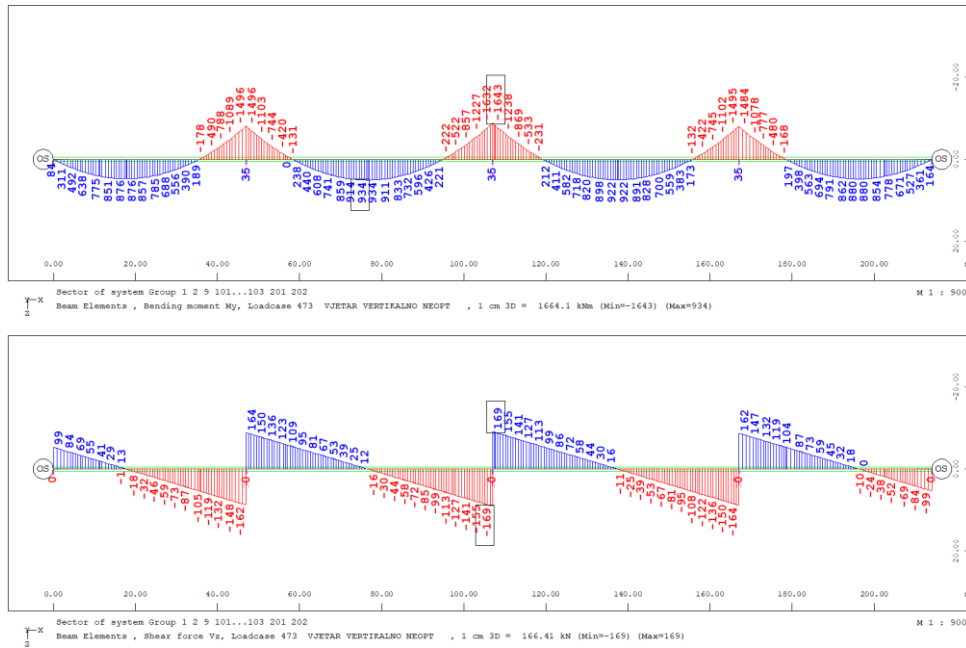
Slika 57. Uzdužna sila, SOFiSTiK



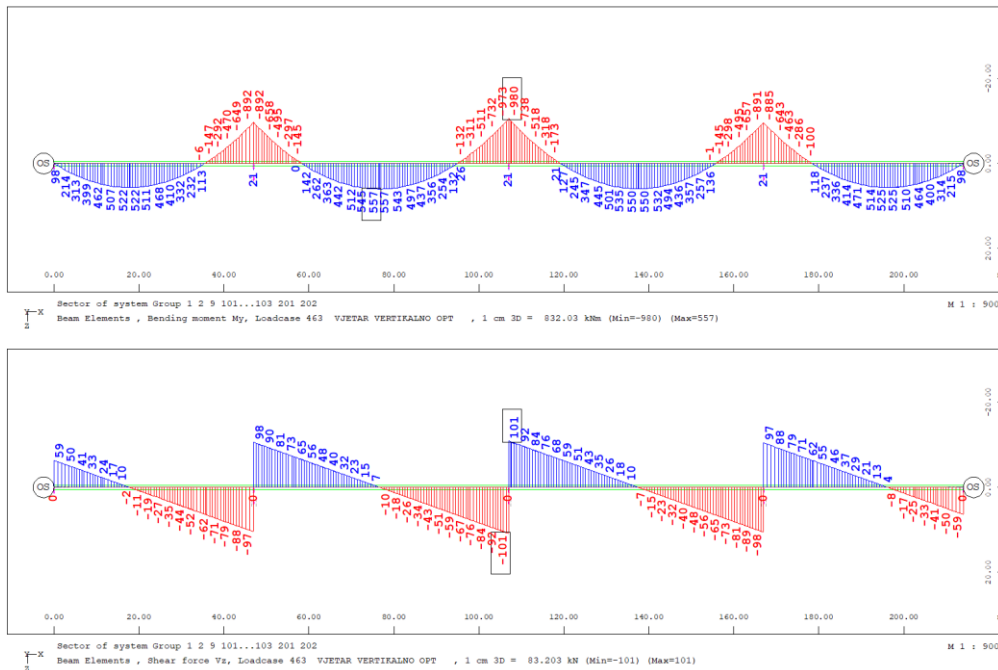
Slika 58. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK

### 5.1.2. Opterećenje vjetrom

Vjetar vertikalno na rasponski sklop:

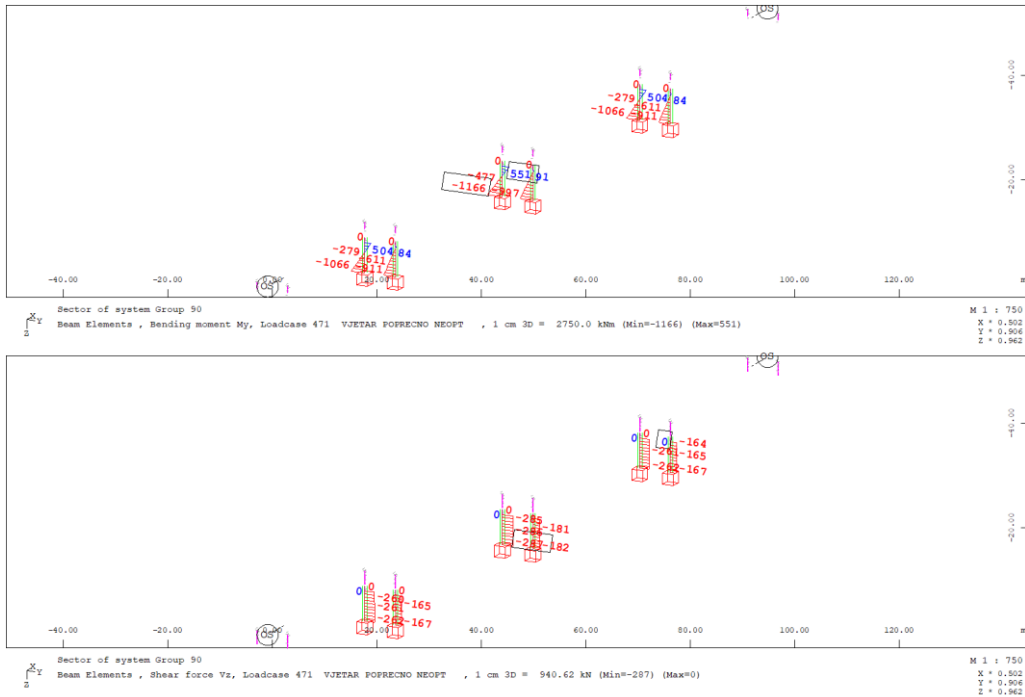


Slika 59. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK

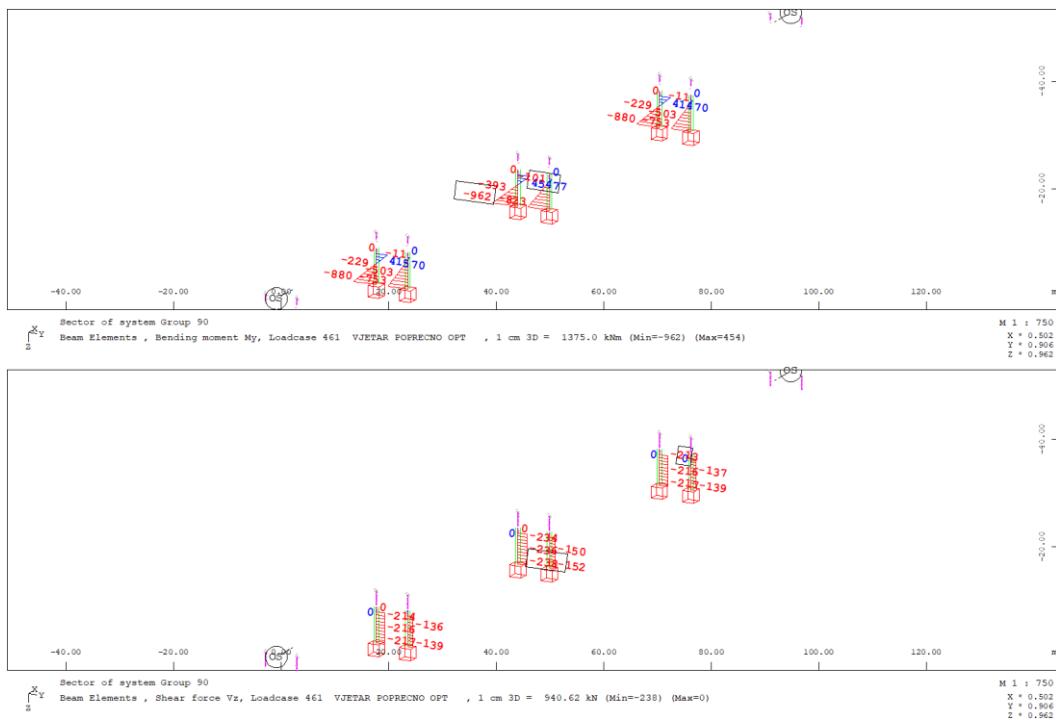


Slika 60. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK

Vjetar poprečno na stupove:

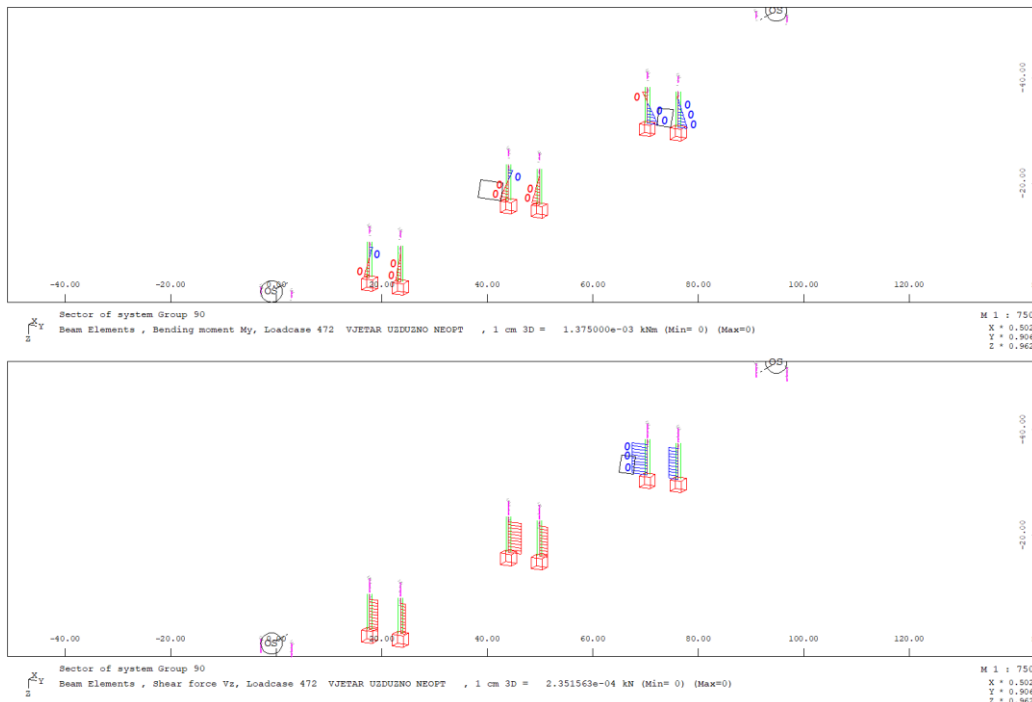


Slika 61. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK

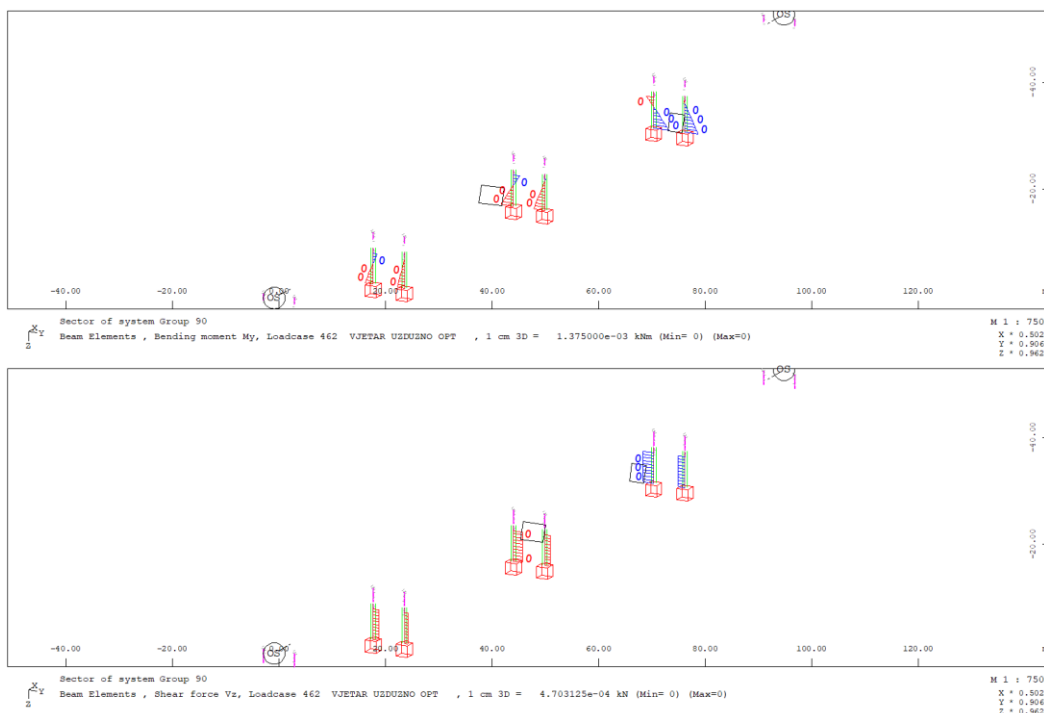


Slika 62. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK

Vjetar uzdužno na stupove:

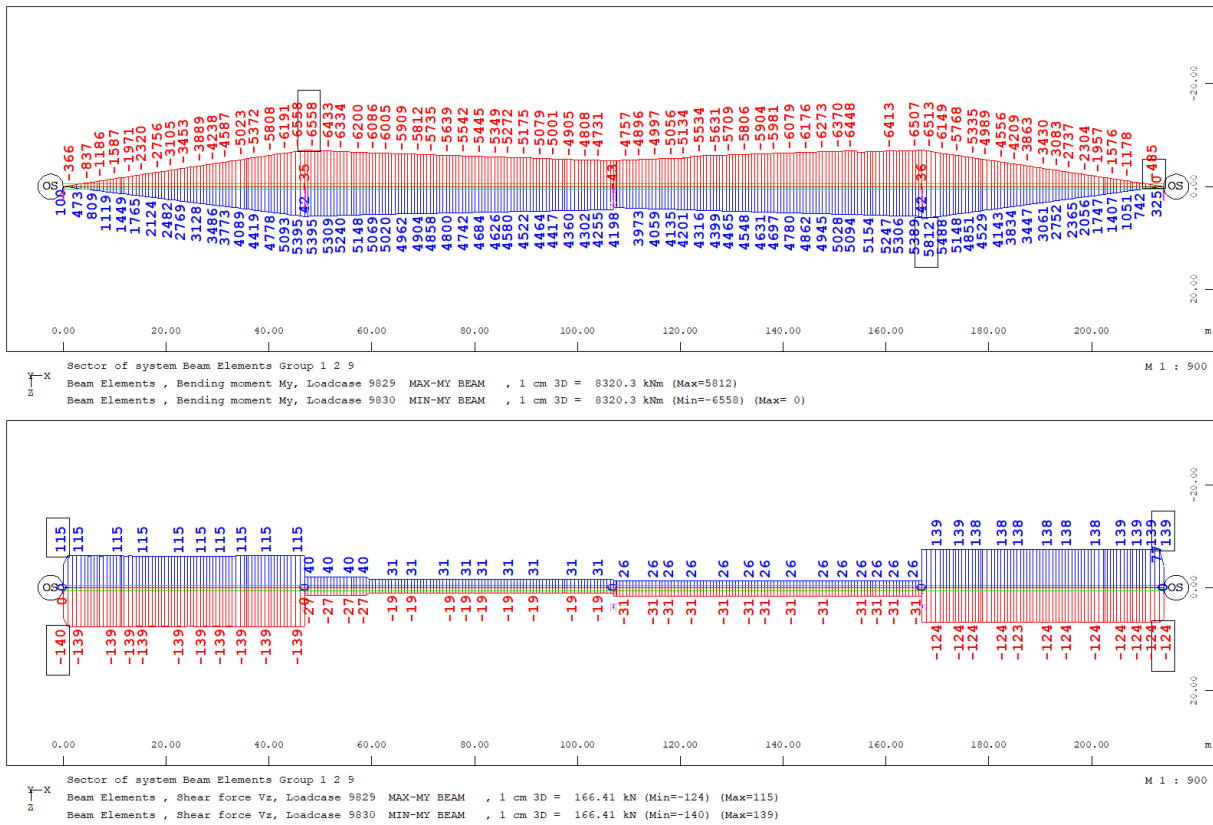


Slika 63. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK

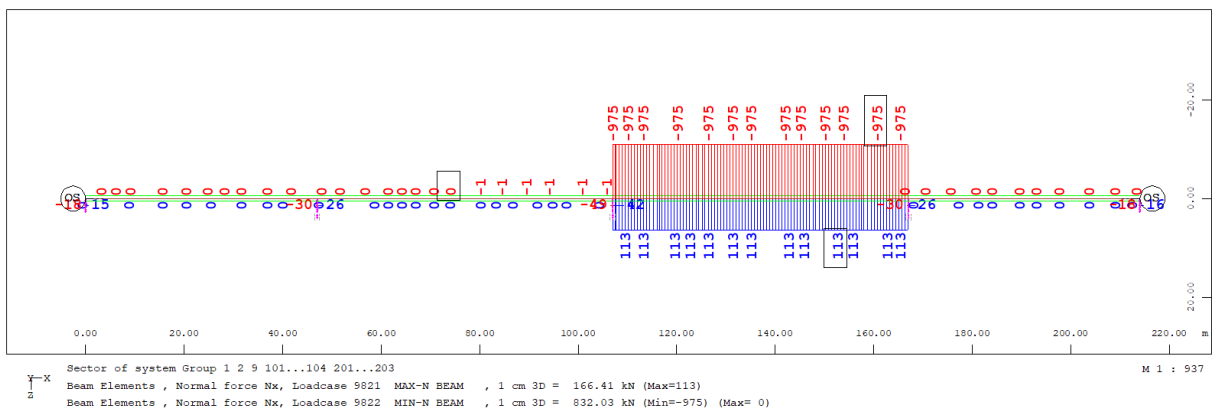


Slika 64. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK

### 5.1.3. Temperaturno opterećenje



Slika 65. Moment savijanja i poprečna sila za rasponski sklop, SOFiSTiK



Slika 66. Uzdužna sila za rasponski sklop, SOFiSTiK



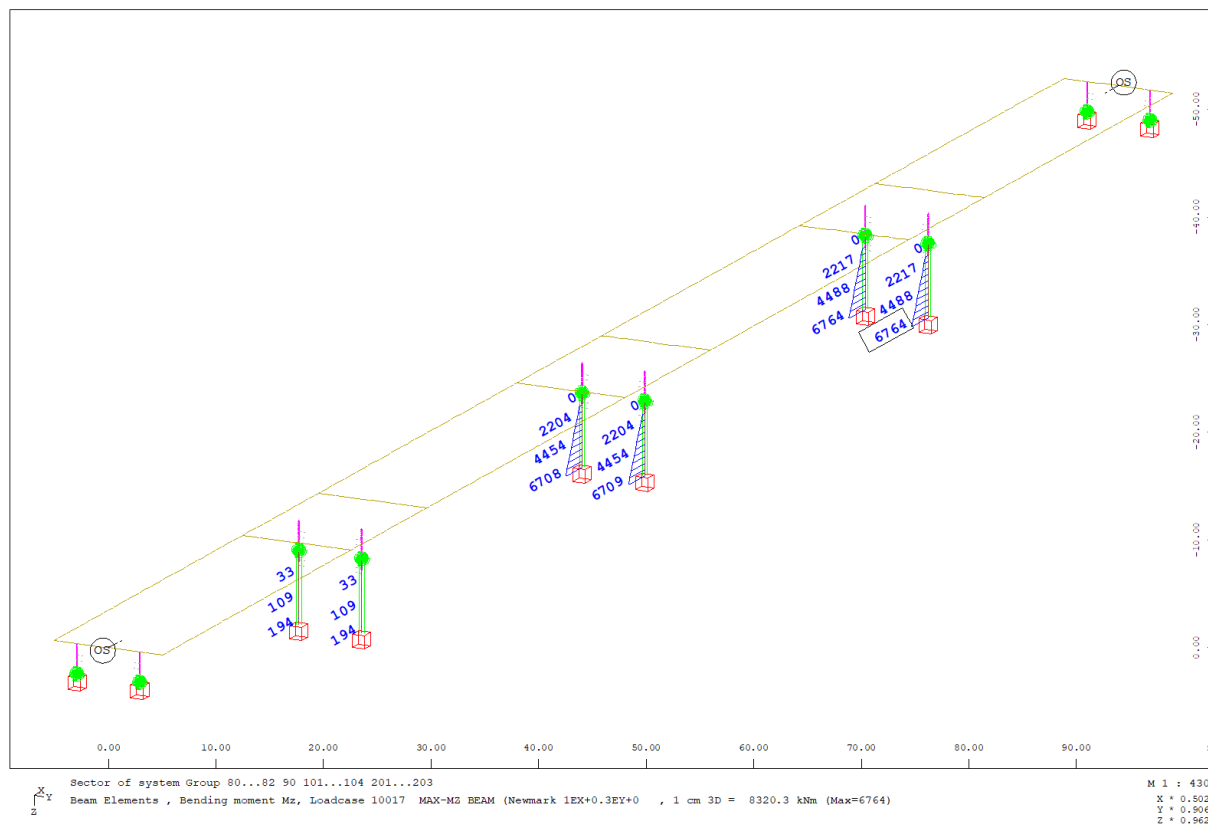
Slika 67. Moment savijanja i poprečna sila za stupove, SOFiSTiK



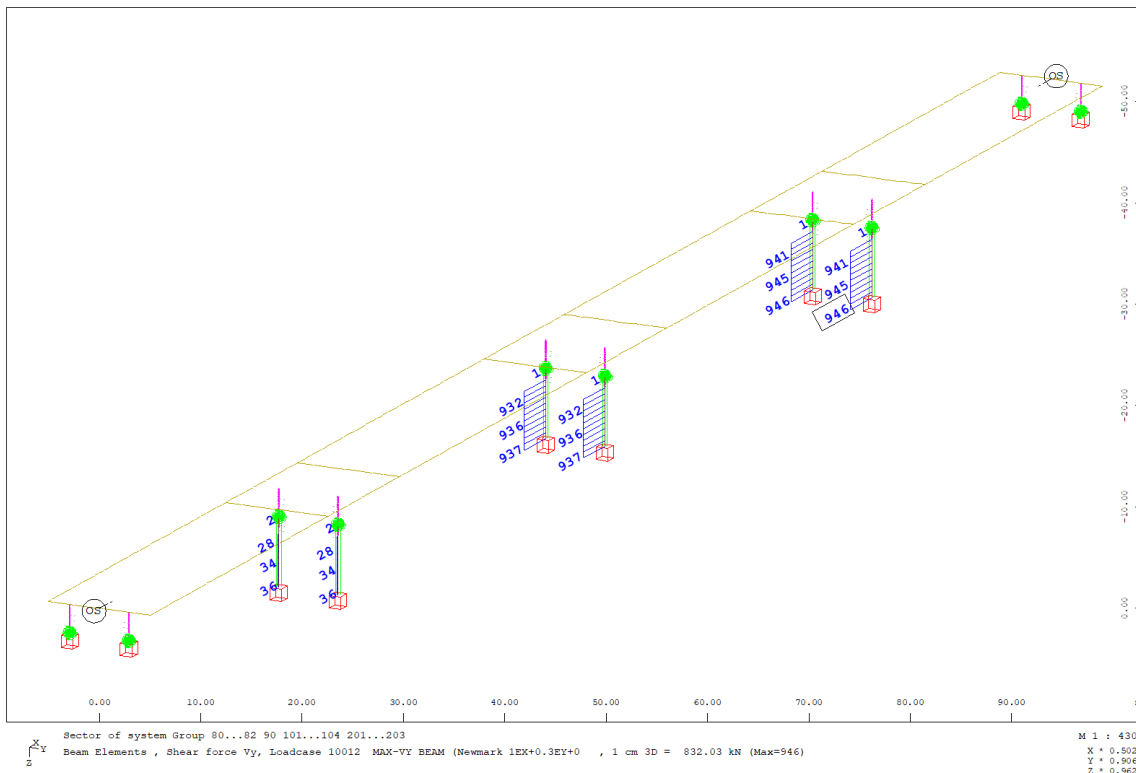
## 5.1.4. Potresno opterećenje

Ispisuju se rezne sile samo u stupovima.

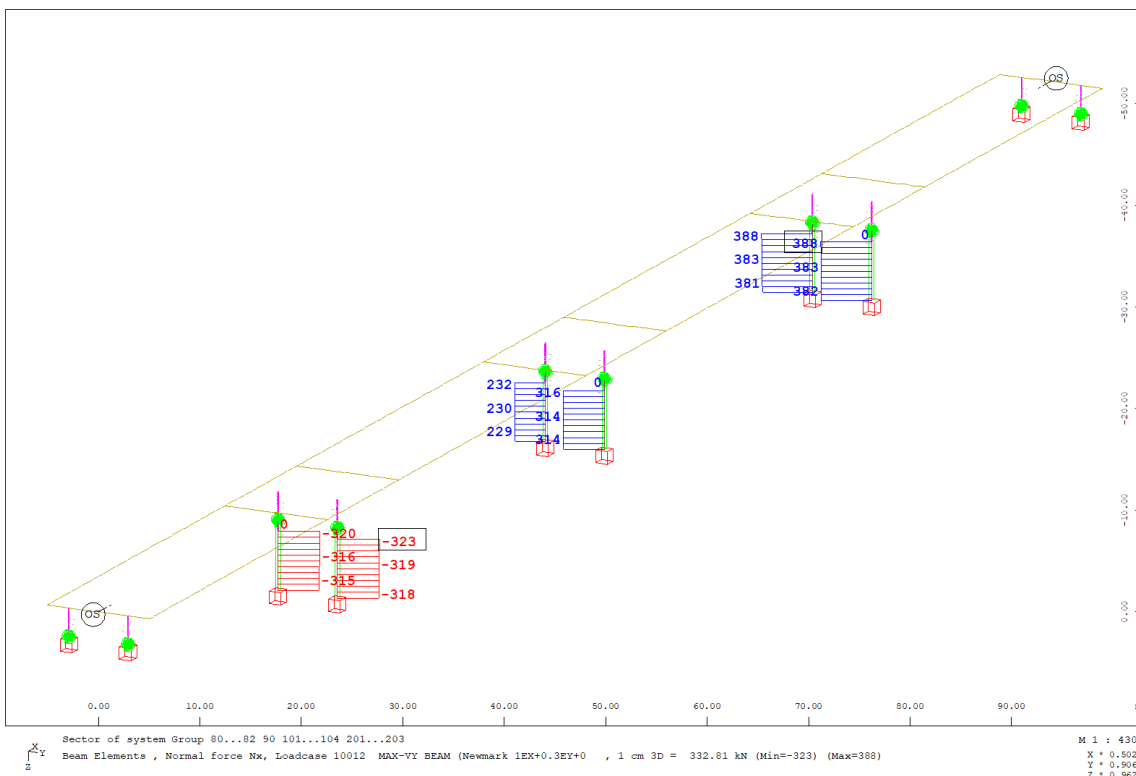
Potres u x smjeru:



Slika 68. Moment savijanja za potres u x smjeru, SOFiSTiK

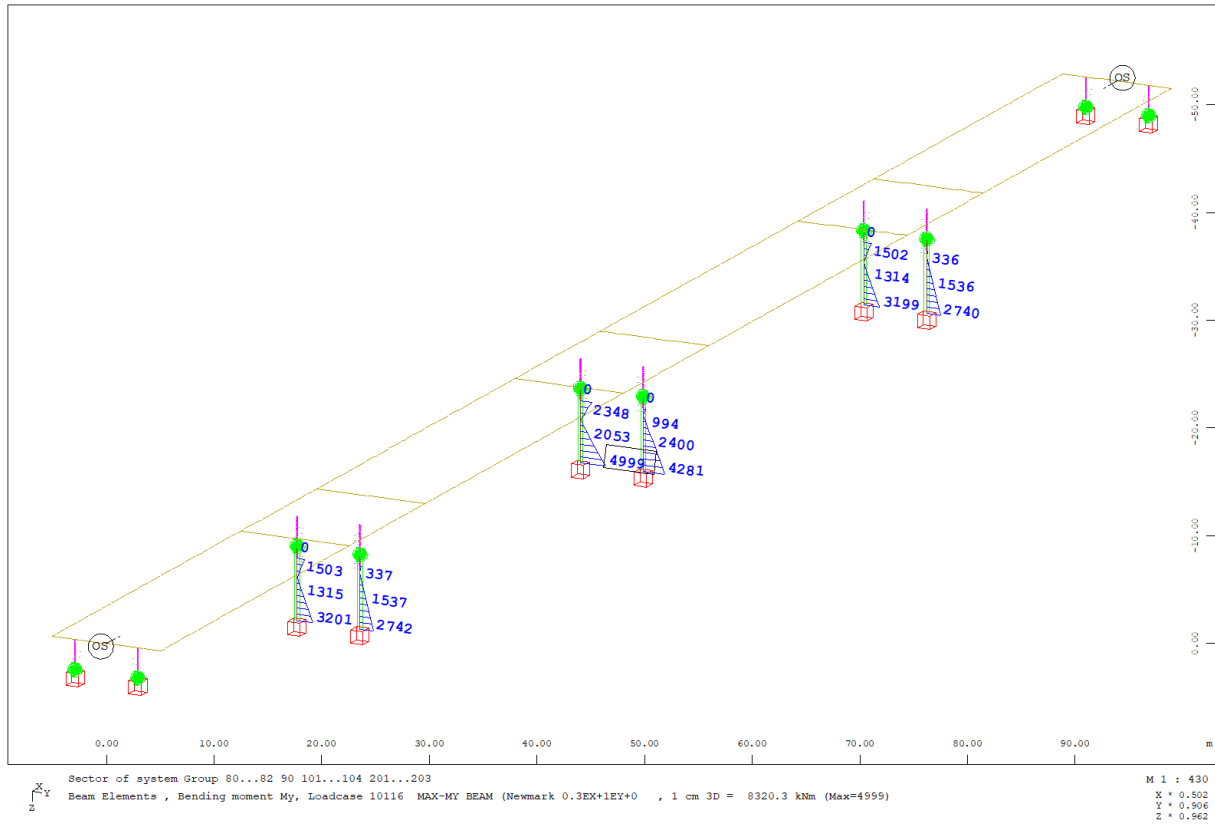


Slika 69. Poprečna sila za potres u x smjeru, SOFiSTiK

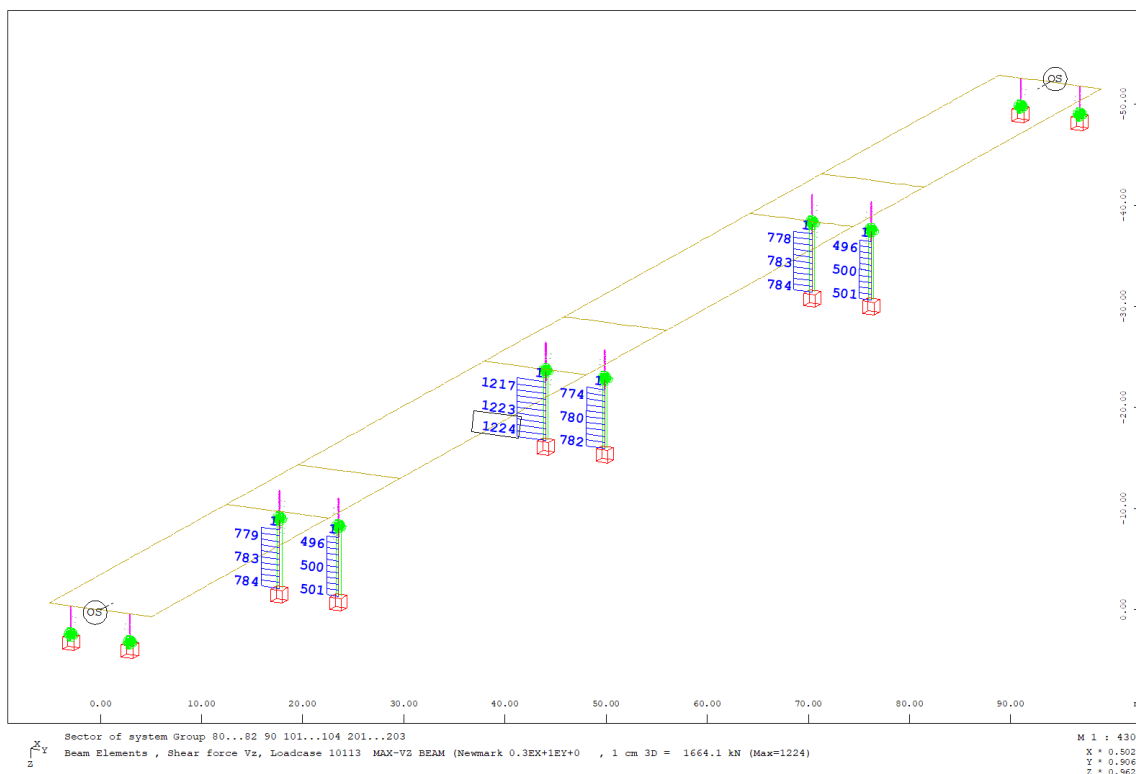


Slika 70. Uzdužna sila za potres u x smjeru, SOFiSTiK

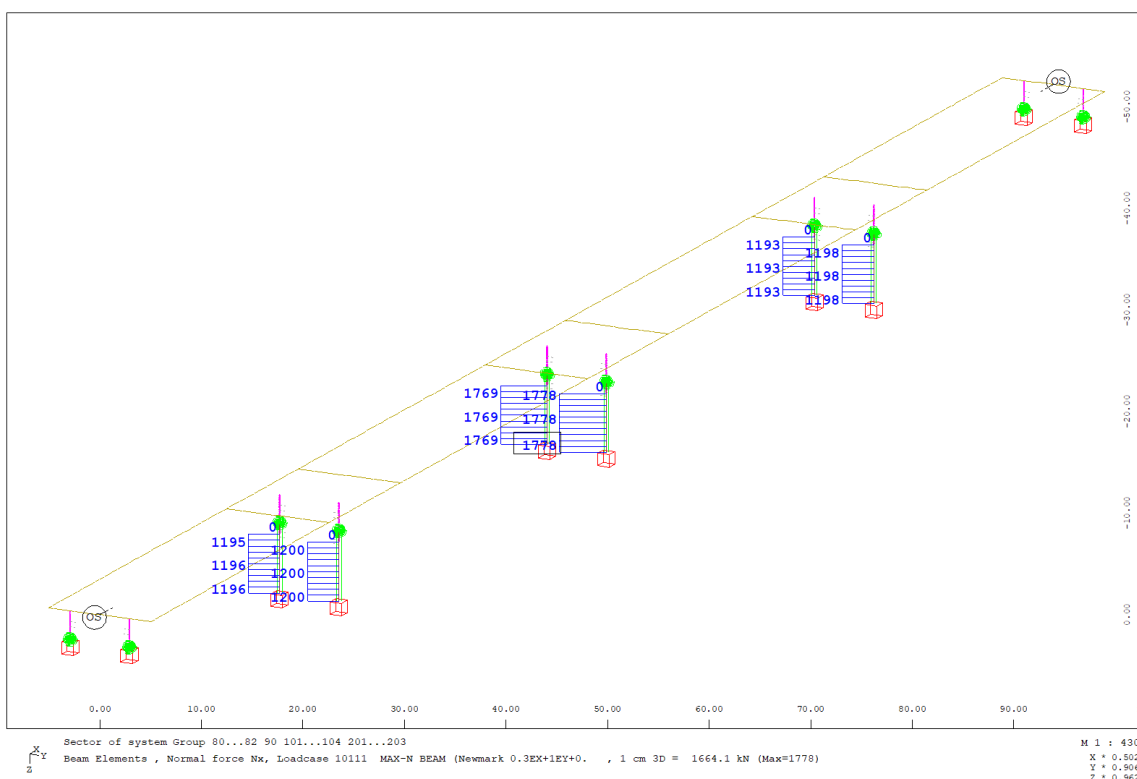
Potres u y smjeru:



Slika 71. Moment savijanja za potres u y smjeru, SOFiSTiK



Slika 72. Poprečna sila za potres u y smjeru, SOFiSTiK

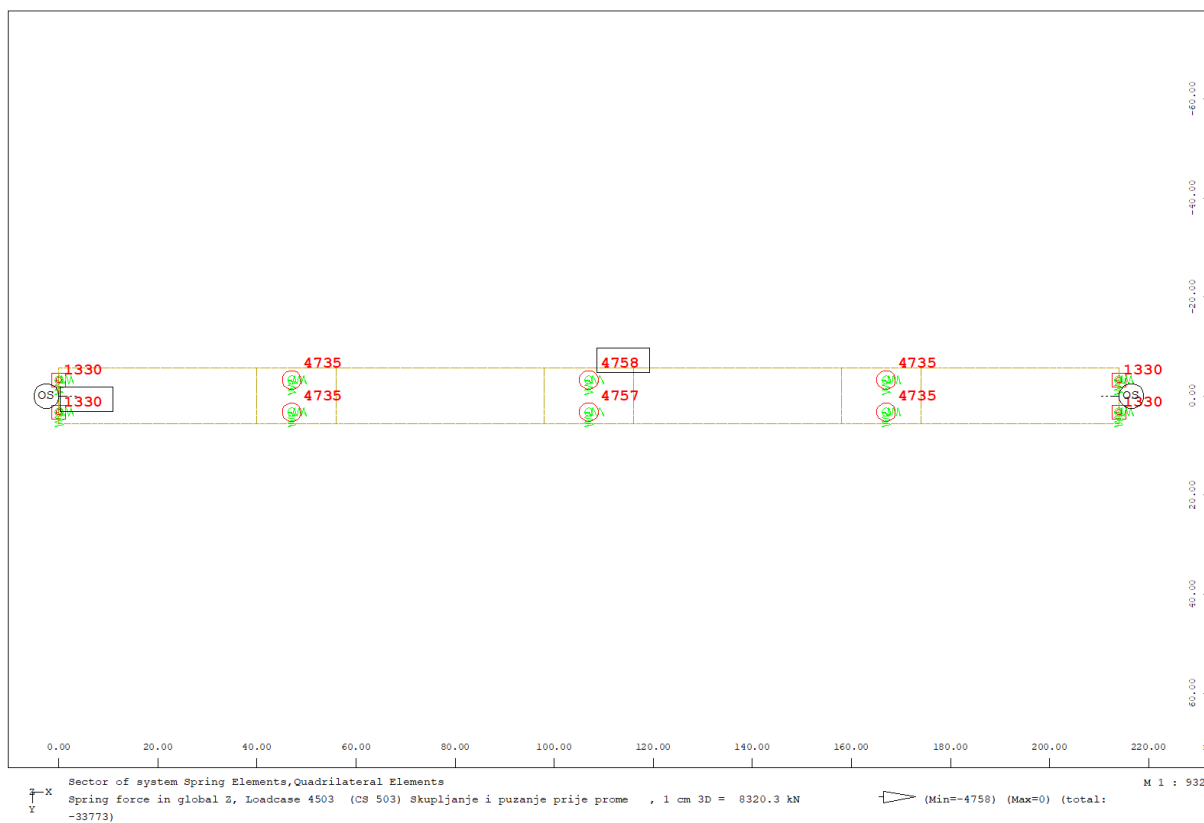


Slika 73. Uzdužna sila za potres u y smjeru, SOFiSTiK

## 5.2. Reakcije i pomaci od dominantnih opterećenja

Reakcije i pomaci u ležajevima dane su za sva opterećenja prema priloženoj excel tablici.

### 5.2.1. Stalno opterećenje



Slika 74. Vertikalna reakcija, SOFiSTiK

### 5.2.2. Prometno opterećenje

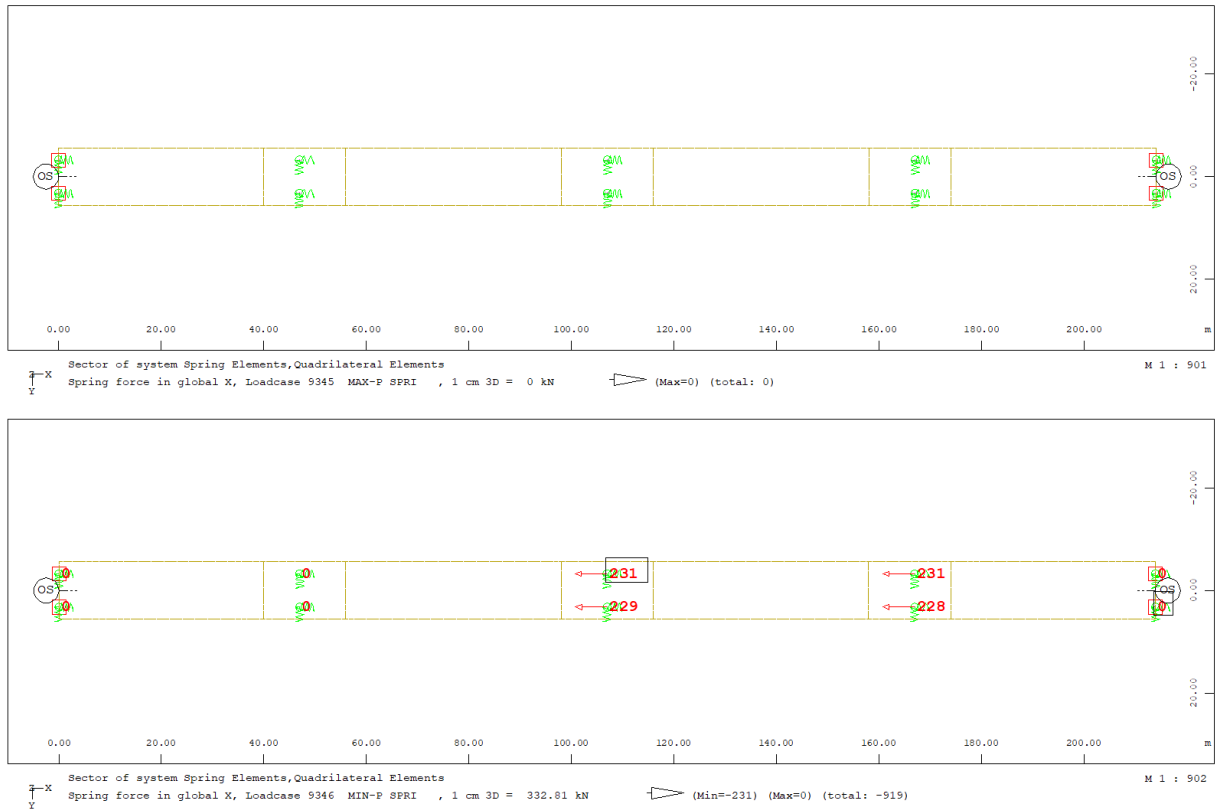


Slika 75. Vertikalna reakcija(minimalna), SOFiStiK



Slika 76. Vertikalna reakcija(maksimalna), SOFiStiK

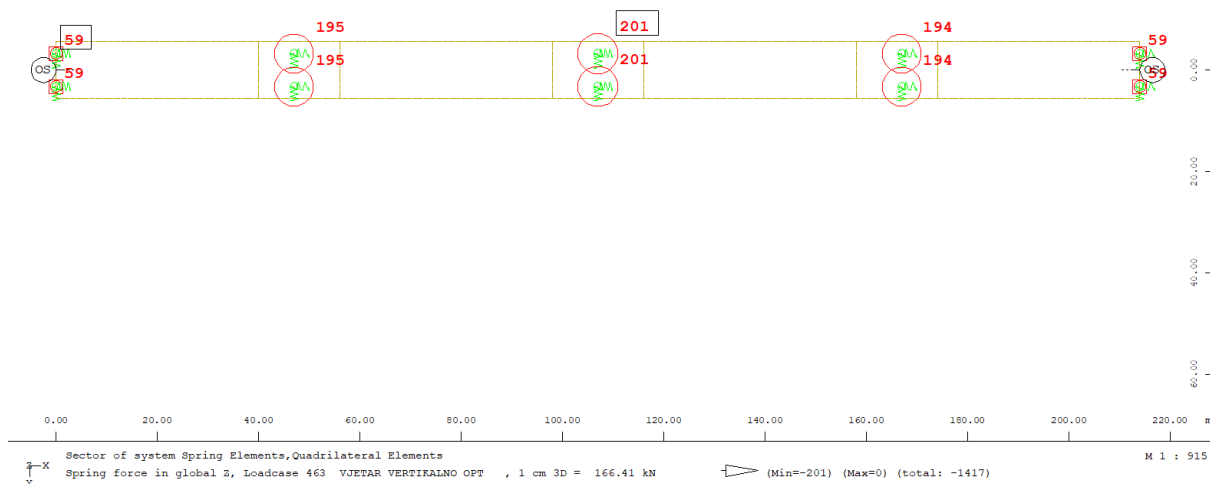
## Sile i opterećenja mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima



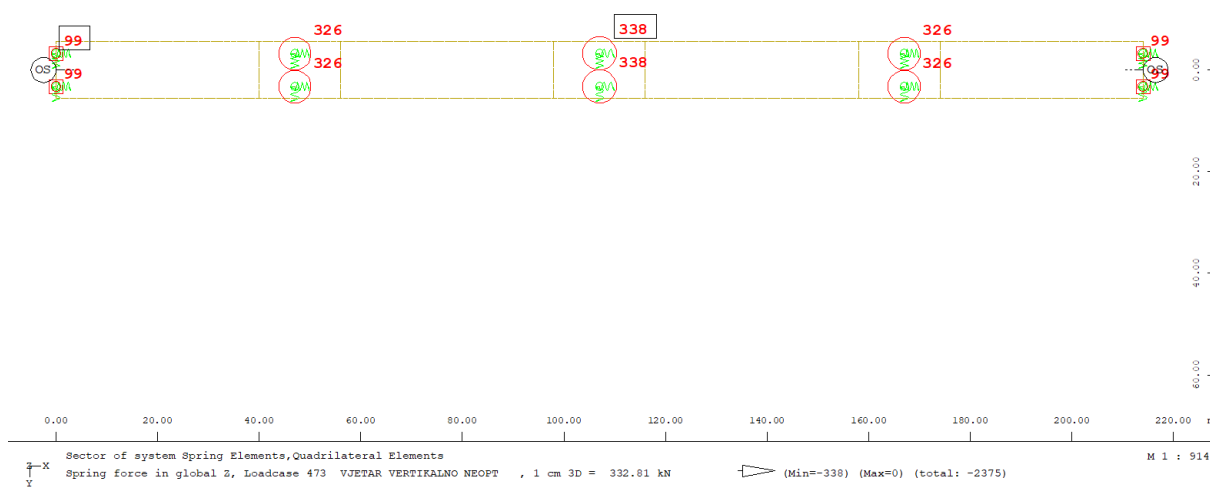
Slika 77. Uzdužna reakcija od kočenja, SOFiSTiK

### 5.2.3. Vjetrovno opterećenje

Vjetar vertikalno na rasponski sklop:



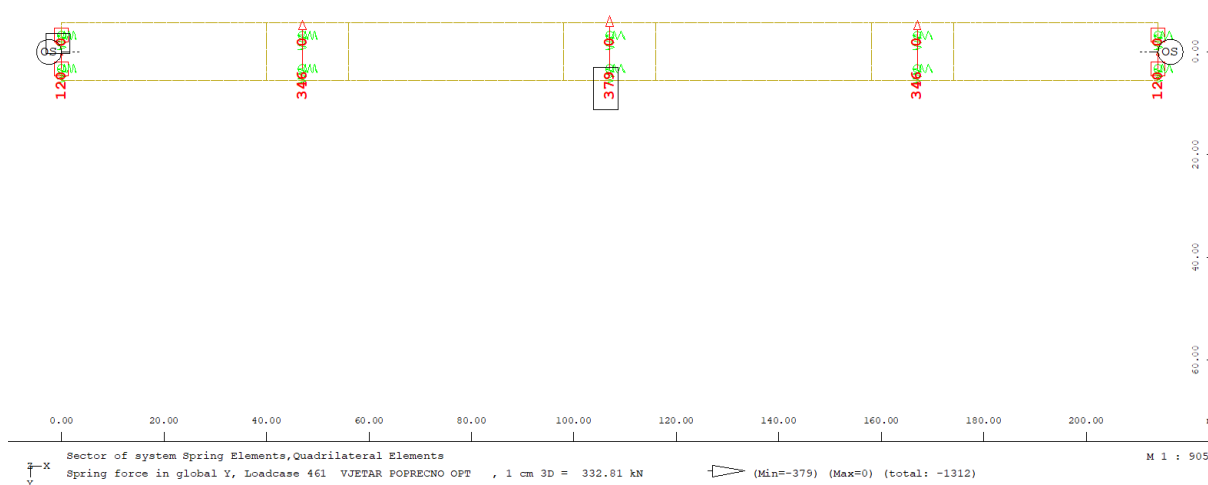
Slika 78. Vertikalna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK



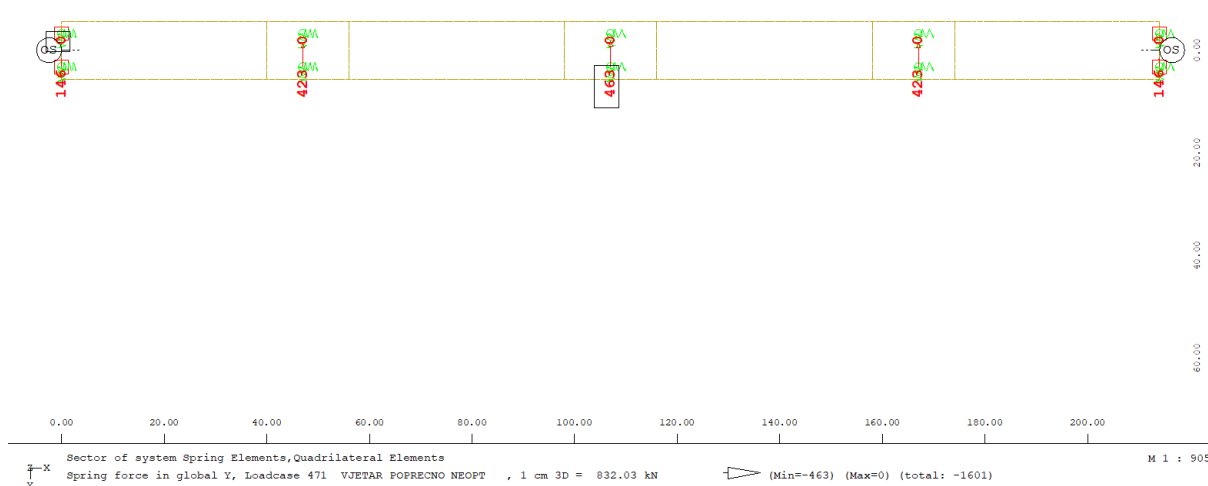
Slika 79. Vertikalna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK



Vjetar poprečno na rasponski sklop:

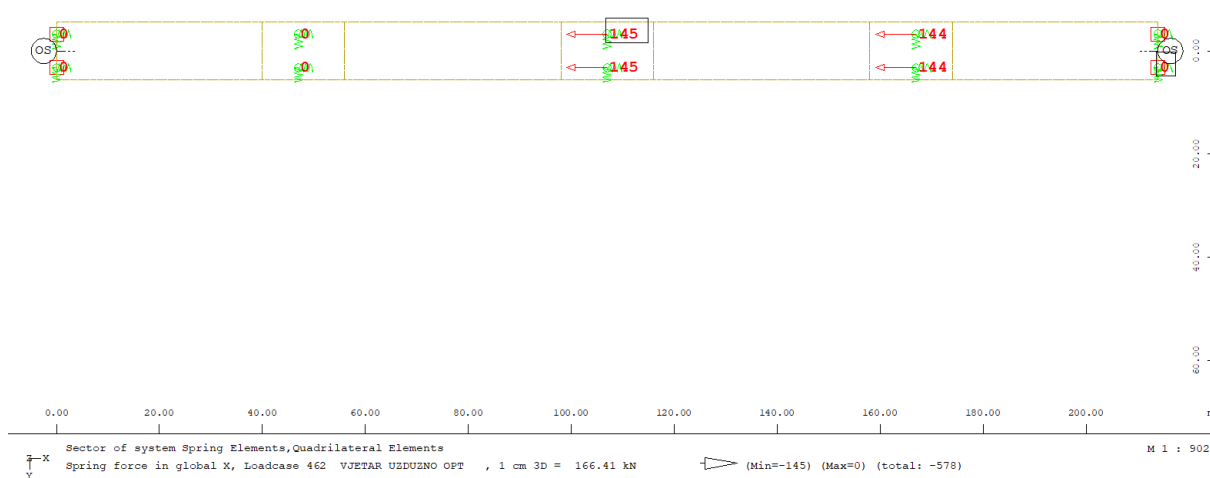


Slika 80. Poprečna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK

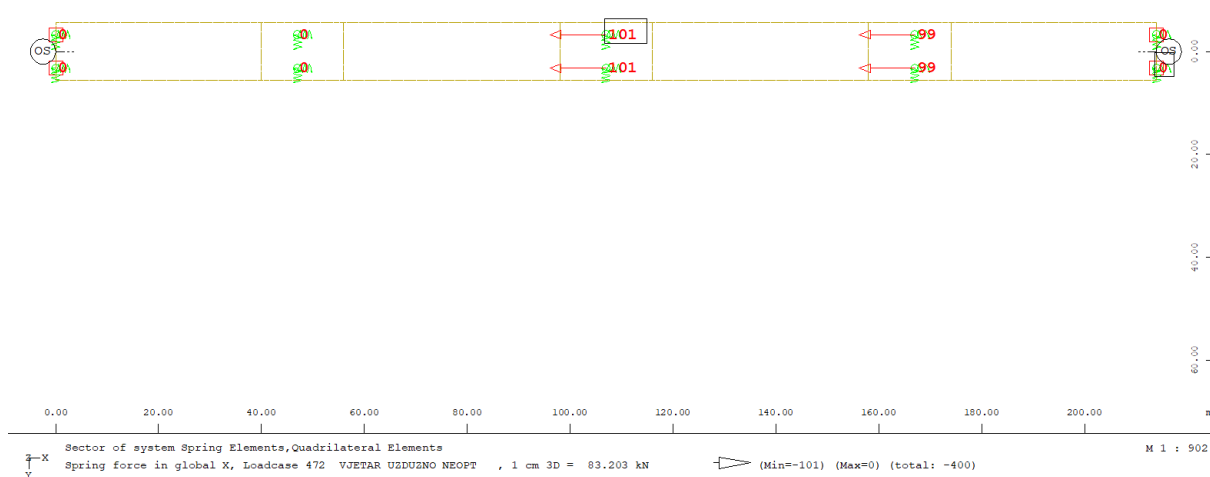


Slika 81. Poprečna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK

Vjetar uzdužno na rasponski sklop:

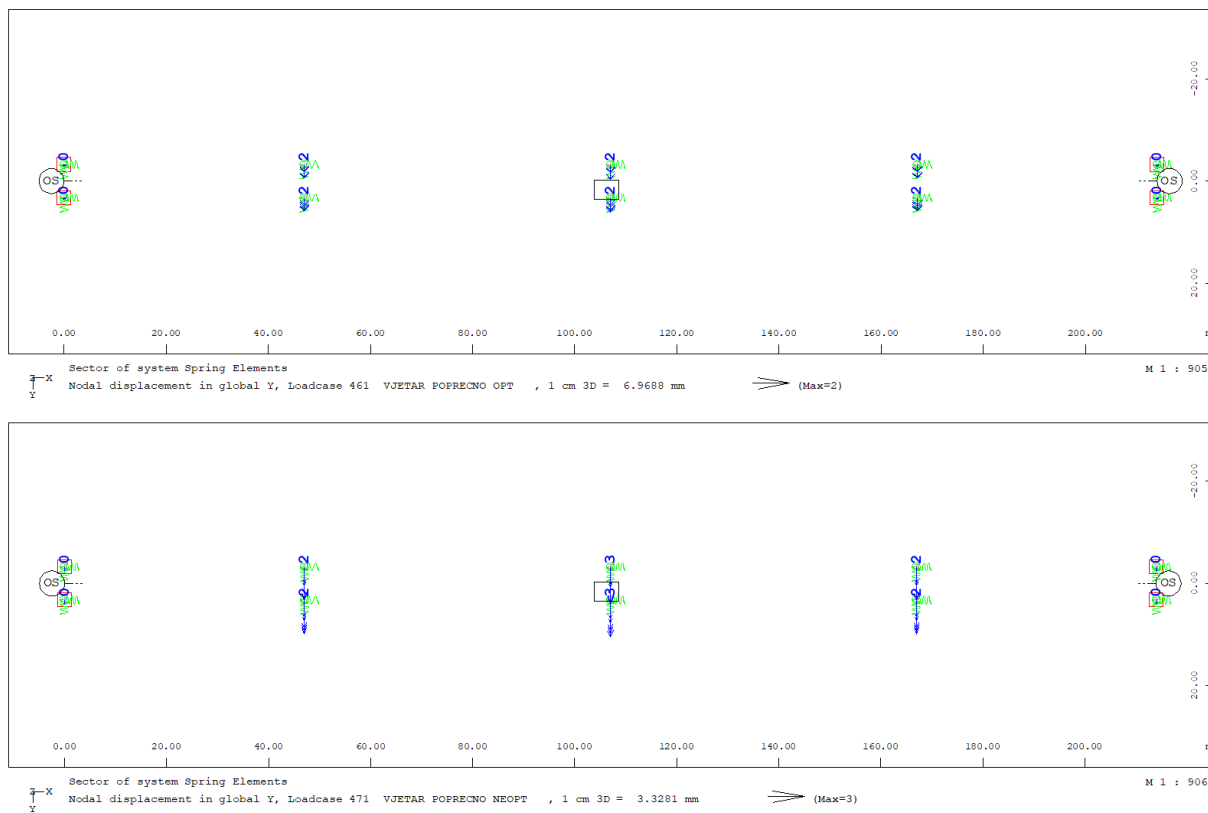


Slika 82. Uzdužna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK



Slika 83. Uzdužna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK

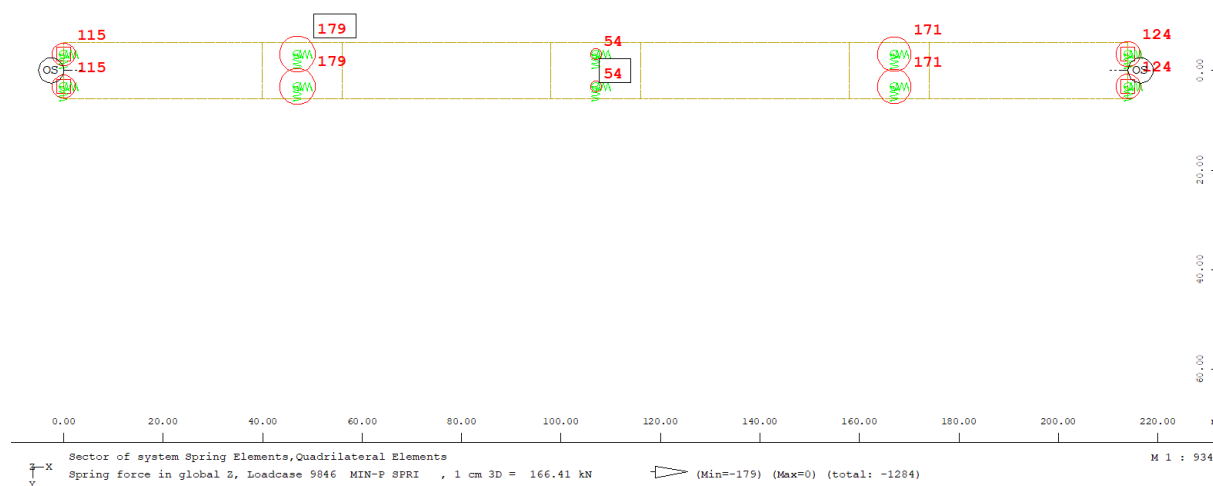
Poprečni pomaci od vjetra:



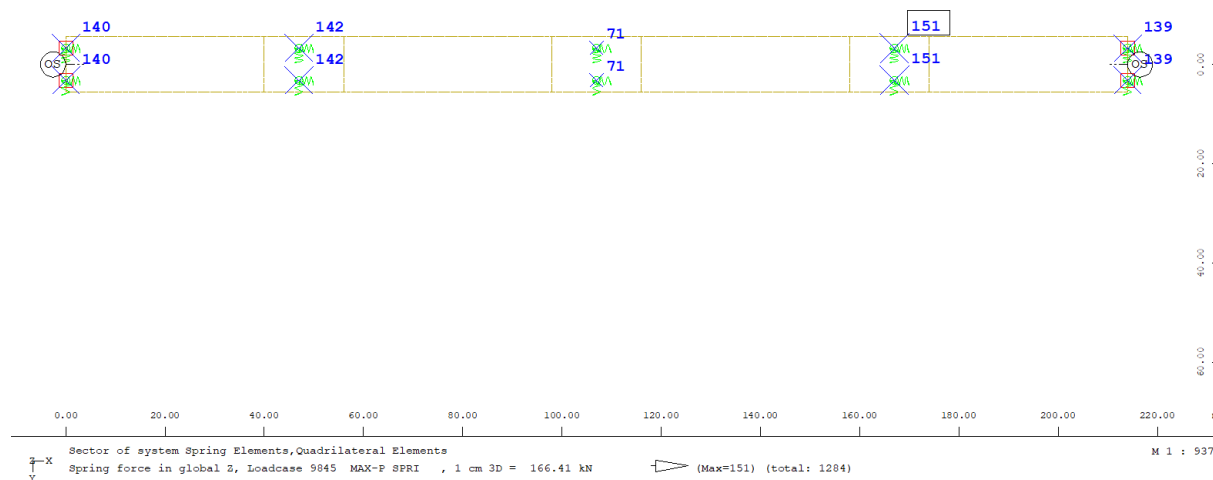
Slika 84. Poprečni pomaci na opterećeni i neopterećeni most, SOFiSTiK

### 5.2.4. Temperaturna opterećenje

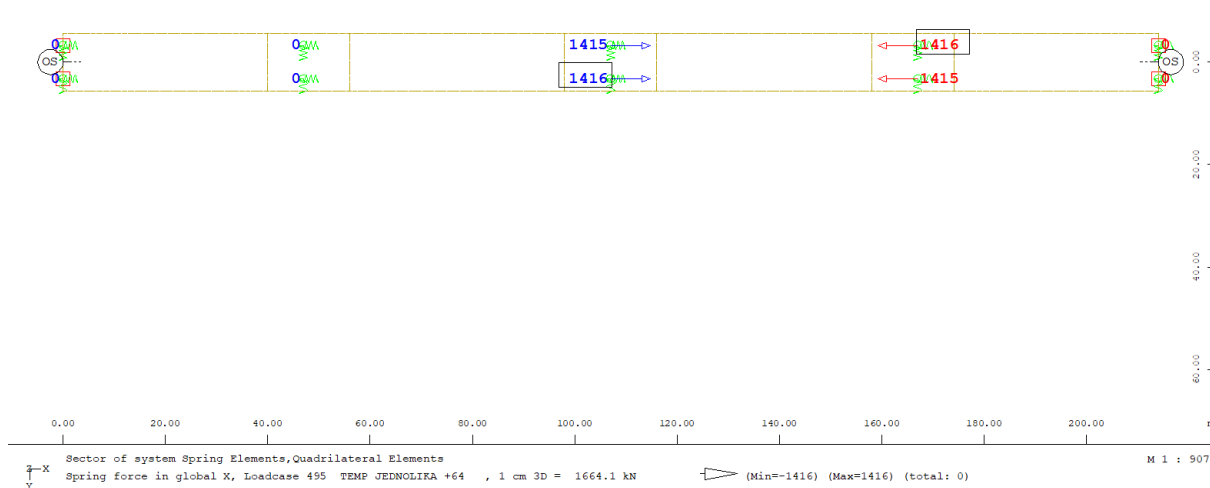
Reakcije:



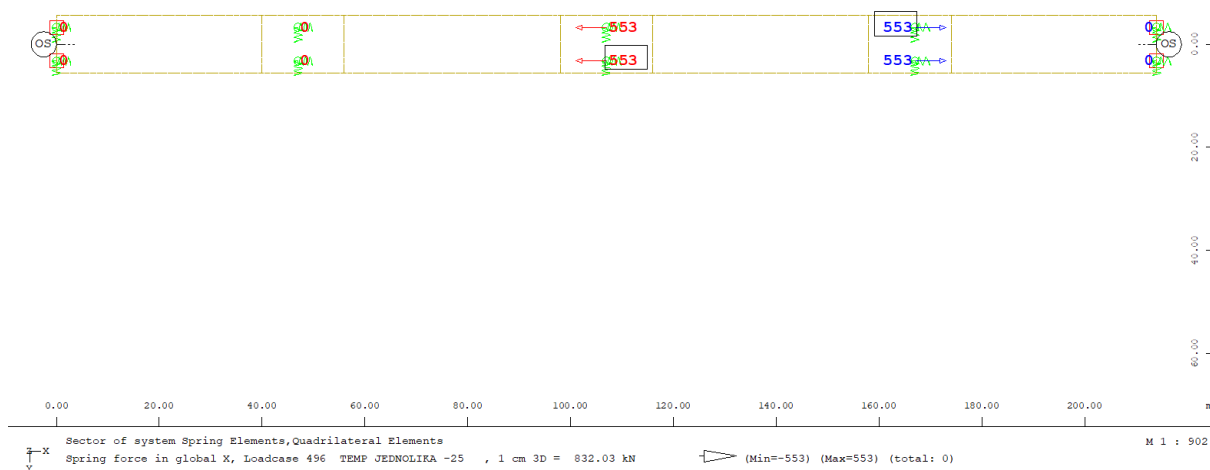
Slika 85. Vertikalna reakcija (minimalna), SOFiSTiK



Slika 86. Vertikalna reakcija (maksimalna), SOFiSTiK

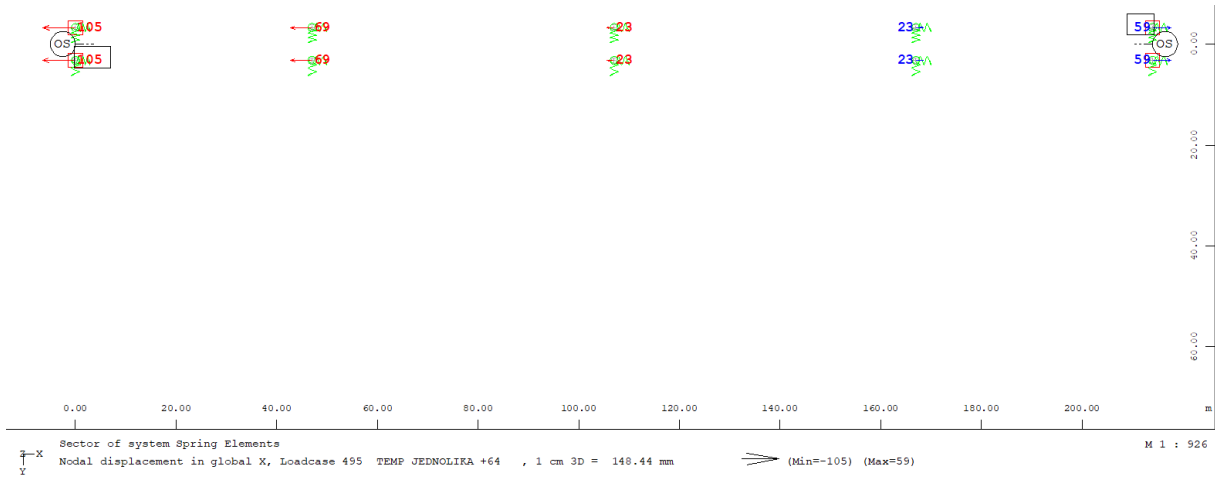


Slika 87. Uzdužna reakcija(minimalna), SOFiSTiK

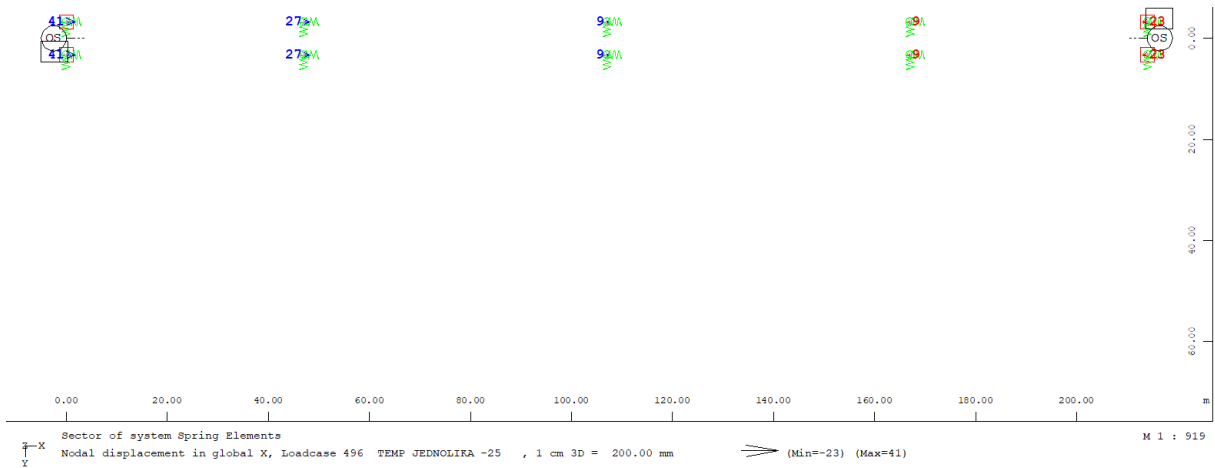


Slika 88. Uzdužna reakcija(maksimalna), SOFiSTiK

Pomaci:



Slika 89. Uzdužni pomak, SOFiSTiK



Slika 90. Uzdužni pomak, SOFiSTiK

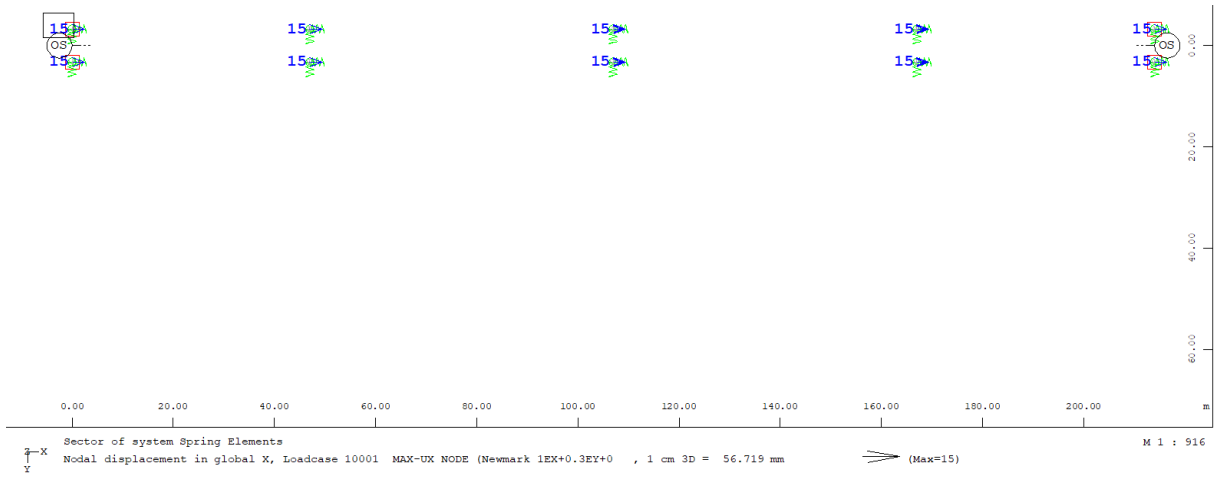
### 5.2.5. Potresno opterećenje

Reakcije:

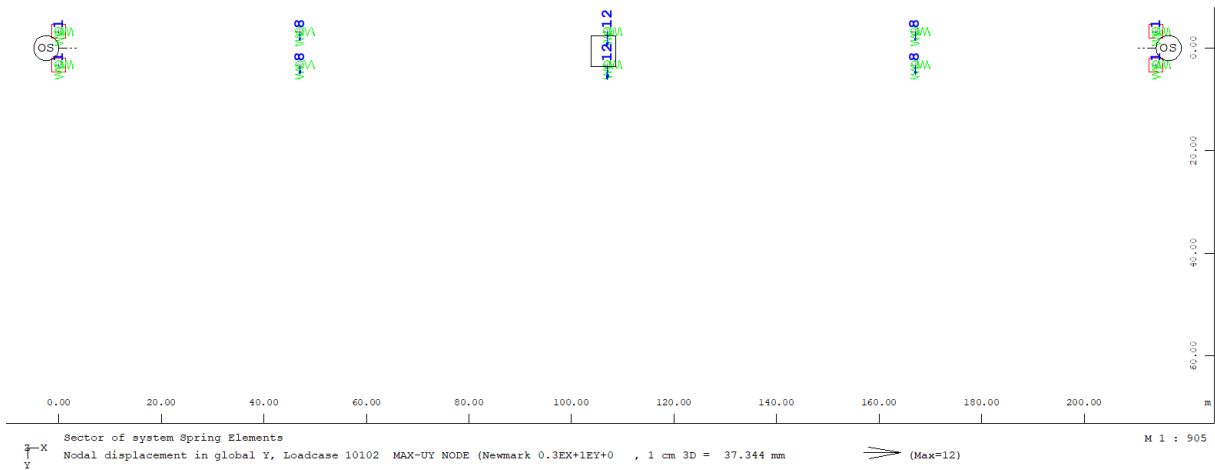


Slika 91. Vertikalna reakcija, SOFiSTiK

Pomaci:



Slika 92. Uzdužni pomak u x smjeru, SOFiSTiK

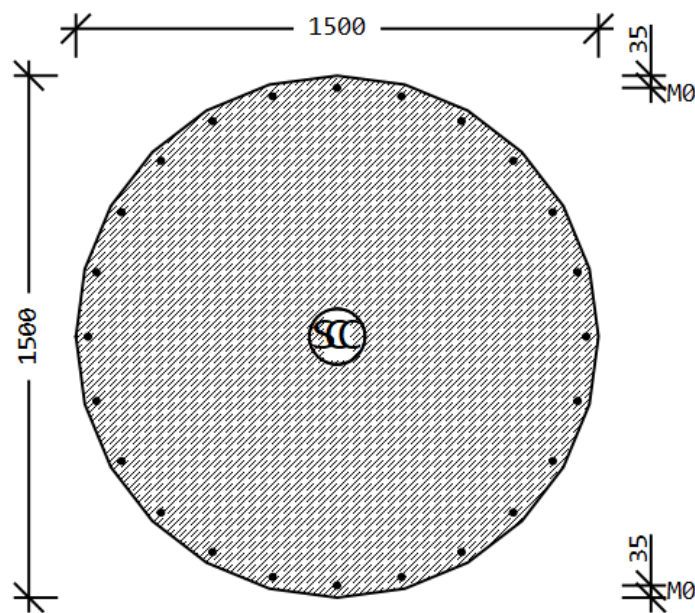


Slika 93. Uzdužni pomak u y smjeru, SOFiSTiK

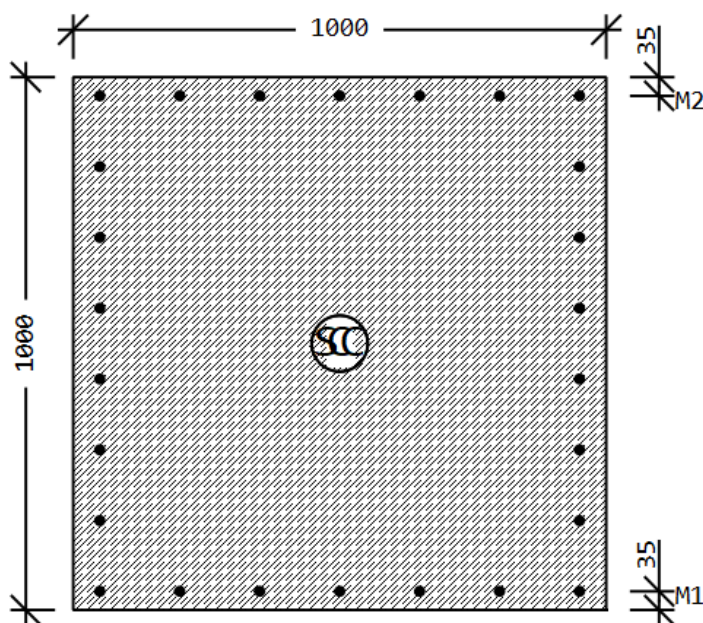


## 6. DOKAZ STABILNOSTI MOSTA OTVORENOG PRESJEKA SA SANDUĀASTIM NOSAĀIMA

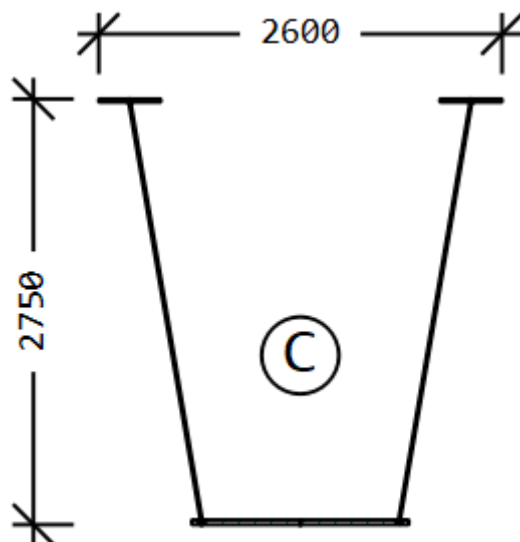
### 6.1. Presjeci dimenzioniranih elemenata



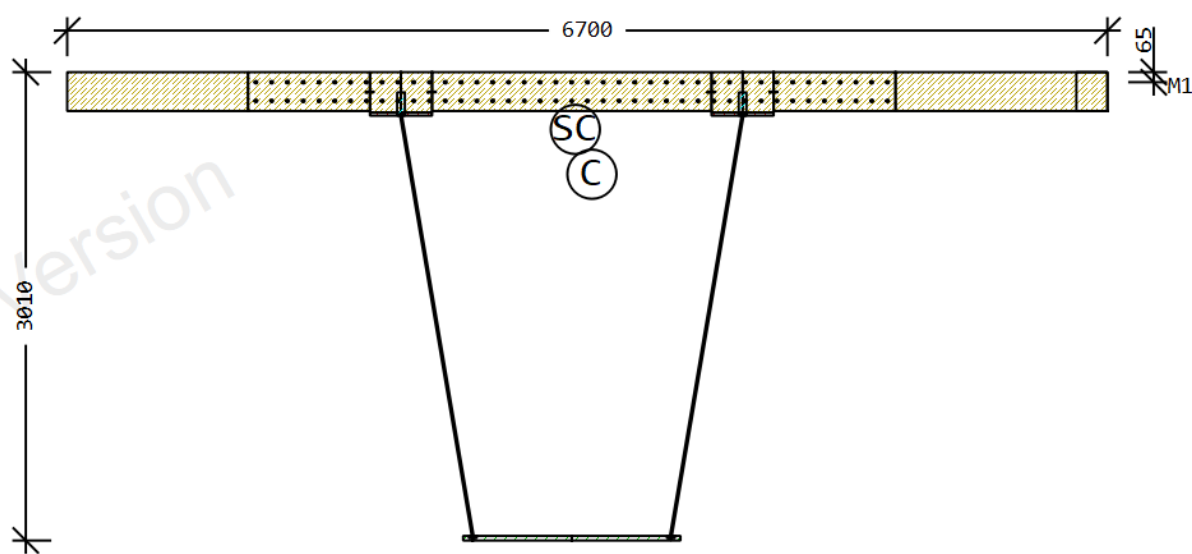
Slika 94. Popreĉni presjek stupova, SOFiSTiK



Slika 95. Popreĉni presjek vezne grede, SOFiSTiK



Slika 96. Presjek glavnog nosača, SOFiSTiK



Slika 97. Presjek mosta kroz jedan trapezni nosač, SOFiSTiK

## 6.2. Faktori i izrazi za kombinacije opterećenja

Tablica 3. Koeficijenti sigurnosti i kombinacija za djelovanja [2]

Naziv djelovanja	Tip	Parcijalni koeficijenti sigurnosti		Koeficijenti kombinacije			
		Nepovoljna $\gamma_{i,sup}$	Povoljna $\gamma_{i,inf}$	Rijetka $\psi_0$	Česta $\psi_1$	Nazovi-stalna $\psi_2$	Neučestale $\psi_1$
Stalno djelovanje - Vlastita težina i Dodatno stalno	G	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Prometno osovinsko opterećenje	L_T	1.35	0	0.75	0.75	0	0.80
Prometno kontinuirano opterećenje	L_U	1.35	0	0.40	0.40	0	0.80
Vjetar	ZWN	1.50	0	0.60	0.20	0.00	0.60
Vjetar sa prometom	ZWO	1.50	0	1.00	0	0	1.00
Temperatura	T	1.5	0	0.0	0.60	0.50	0.80
Potres	EQ	1.00	0	0	0	0	0

Dimenzioniranje elemenata mosta provedeno je prema graničnom stanju nosivosti za:

- stalnu ili prolaznu situaciju ("persistent or transient" - DESI):

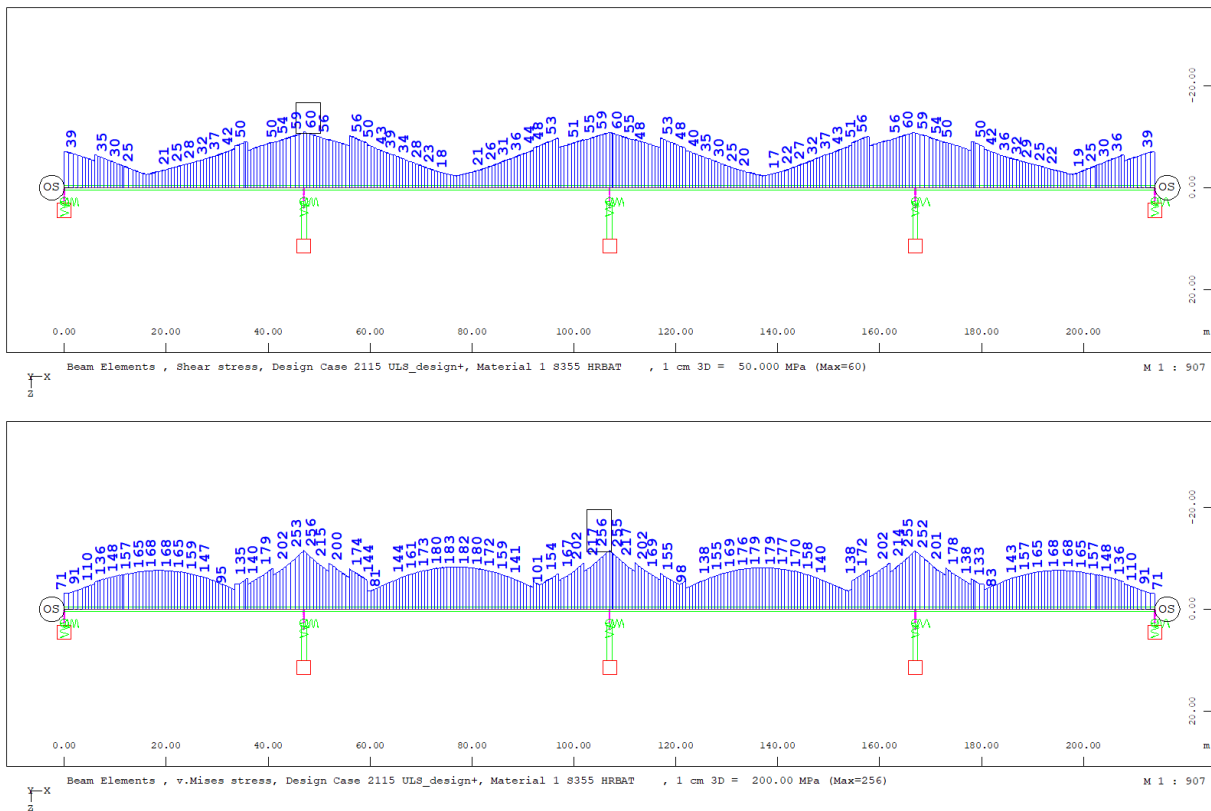
$$E_d = E_d \left[ \sum_j (\gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}) + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\gamma_Q \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + \gamma_p \cdot P_k \right]$$

- potresnu situaciju ("seismic" - EARQ) [11]:

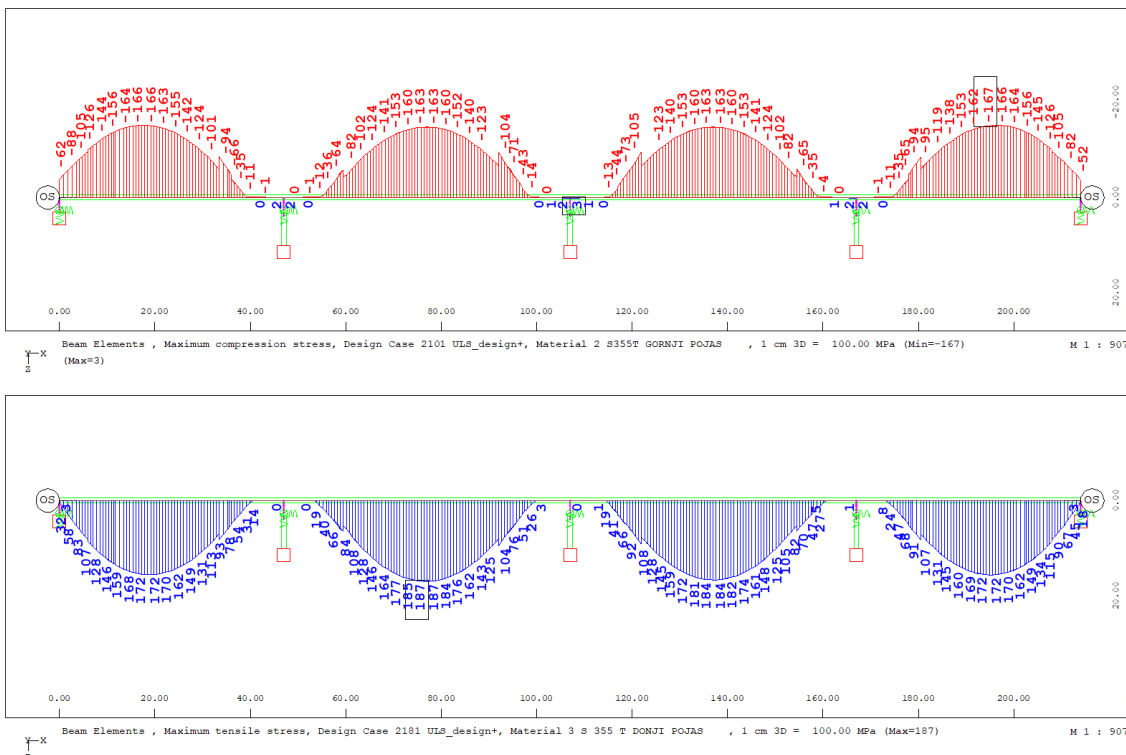
$$E_d = E_d[\sum_j(G_{k,j}) + \gamma_I A_{Ed} + \sum_{i>1}(\psi_{2i} \cdot Q_{k,i}) + P_k]$$

### 6.3. Prikaz naprezanja za kombinacije opterećenja

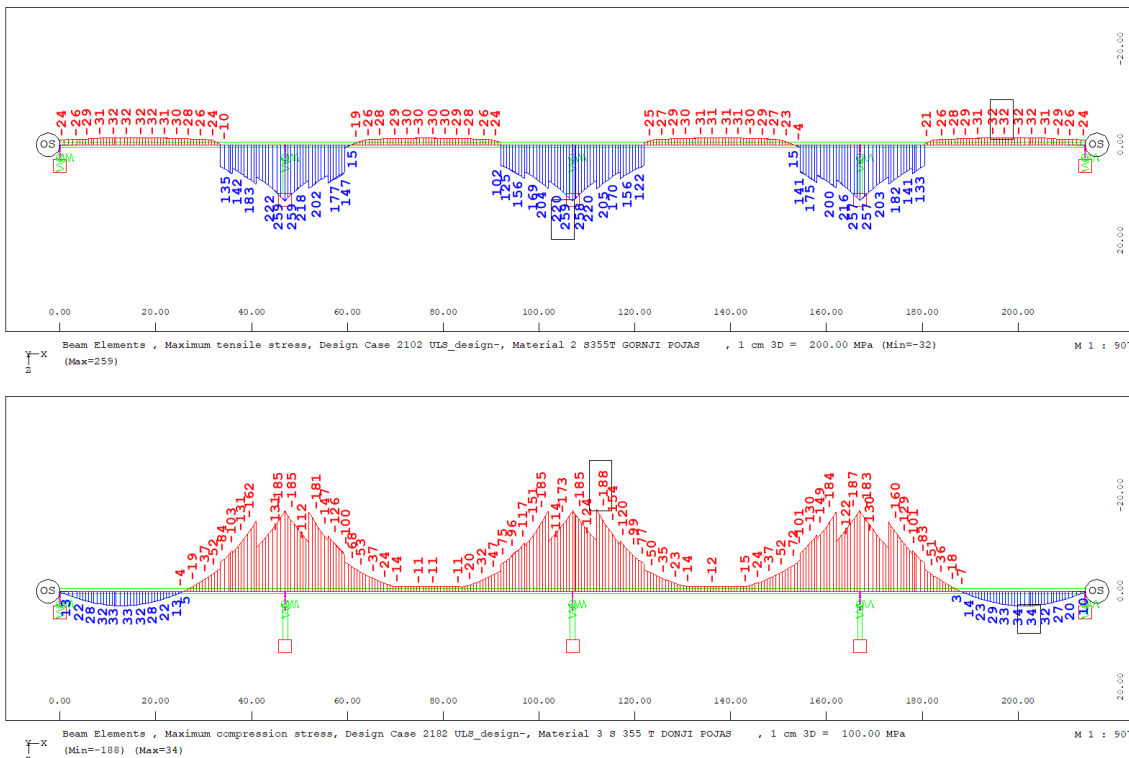
Iskazana su naprezanja za mjerodavnu kombinaciju.



Slika 98. Posmična naprezanja i v.Mises naprezanja u hrptu, SOFiSTiK



Slika 99. Najveće tlačno naprezanje gornjeg pojasa i najveće vlačno naprezanje donjeg pojasa, SOFISTIČ



Slika 100. Najveće vlačno naprezanje gornjeg pojasa i najveće tlačno naprezanje donjeg pojasa, SOFISTIČ

#### 6.4. Dokaz stabilnosti limova

Granična naprezanja prema graničnom stanju nosivosti određena su kako slijedi:

Za vlak:

$$\sigma_{rd,max} = 355 \text{ MPa}$$

Za tlak (debljina lima  $\leq 40$  mm):

$$\sigma_{rd,max} = \frac{-355}{1,1} = -322 \text{ MPa}$$

Za tlak (debljina lima  $> 40$  mm):

$$\sigma_{rd,min} = \frac{-335}{1,1} = -304 \text{ MPa}$$

Za posmik:

$$\tau_{rd} = \frac{322}{\sqrt{3}} = 185 \text{ MPa}$$

#### Donji pojas

Donji pojas nosača nalazi se u čistom tlaku za najveći negativni moment savijanja. Provjera se vrši prema EN 1993-1-5 [8] ukoliko lamela donjeg pojasa ne zadovoljava uvjet za klasu 3.

Uvjeti za klasu 3 presjeka mogu se vidjeti iz norme EN 1993-1-1 [8], u ovisnosti o rubnim uvjetima i stanju naprezanja u limu.

Ukoliko je izraz za klasu 3 zadovoljen, stabilnost je zadovoljena i daljnja provjera izostaje.

U slučaju da izrazi za klasu 3 nije zadovoljen provodi se dokaz stabilnosti donjeg pojasa prema poglavlju 10 iz norme EN 1993-1-5 [8].

Klasifikacija donjeg pojasa debljine 40 mm:

Širina donjeg pojasa:	$c = 1265,8 \text{ mm}$	
Debljina donjeg pojasa:	$t = 40 \text{ mm}$	
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$	$t \leq 40 \text{ mm}$
	$f_y = 335 \text{ N/mm}^2$	$t > 40 \text{ mm}$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{335}} = 0,838 \qquad \frac{c}{t} = \frac{1265,8}{40} = 31,65$$

$$38 \cdot \varepsilon = 31,83 \rightarrow 31,65 \leq 31,83 \rightarrow \text{Presjek je u klasi 2}$$

Presjek zadovoljava uvjet stabilnosti i nije potrebna provjera stabilnosti.

Klasifikacija donjeg pojasa debljine 80 mm:

Širina donjeg pojasa:	$c = 1265,8 \text{ mm}$	
Debljina donjeg pojasa:	$t = 80 \text{ mm}$	
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$	$t \leq 40 \text{ mm}$
	$f_y = 335 \text{ N/mm}^2$	$t > 40 \text{ mm}$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{335}} = 0,838 \qquad \frac{c}{t} = \frac{1265,8}{80} = 15,82$$

$$38 \cdot \varepsilon = 31,83 \rightarrow 15,82 \leq 31,83 \rightarrow \text{Presjek je u klasi 2}$$

Presjek zadovoljava uvjet stabilnosti i nije potrebna provjera stabilnosti.

## Hrbat

Hrbat je pločasti element ukrućen uzdužnim ukрутama ili neukrućen, izložen složenom stanju naprezanja. Uzdužna normalna naprezanja po rubu lima hrpta posljedica su momenta savijanja nosača i mijenjaju predznak od tlaka do vlaka. Osim uzdužnih naprezanja, u hrptu su još i značajna posmična naprezanja. Dokaz stabilnosti mora uzeti u obzir interakciju između ovih naponskih stanja.

Kod provjere hrpta na stabilnost on se promatra kao pločasti element pridržan na obje strane jer ga na krajevima pridržavaju pojasevi nosača. Dakle, svi relevantni izrazi se koriste za opciju unutarnjeg pridržanog elementa. [2]

Naprezanja za hrbat u presjeku iznad ležaja uzimaju se za dvije kombinacije:

1. Najveći negativni moment savijanja i pripadajuća poprečna sila
2. Najveća poprečna sila i pripadajući moment savijanja



Slika 101. Najveći negativni moment savijanja i pripadajuća poprečna sila, SOFiSTiK





Slika 102. Najveća poprečna sila i pripadajući moment savijanja, SOFiSTiK



Slika 103. Najveća poprečna sila i pripadajući moment, SOFiSTiK

6.4.1. Hrbat u presjeku iznad ležaja ( $t = 20 \text{ mm}$ )

Ulazni podatci:

Razmak dijafragmi:	$a = 5000 \text{ mm}$
Visina hrpta:	$b = 2590 \text{ mm}$
Debljina hrpta:	$t = 20 \text{ mm}$
Naprezanja za najveći moment savijanja, LC 2102:	$\sigma_{1x,Ed} = 182 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -245 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 59 \text{ N/mm}^2$
Naprezanja za najveću poprečnu silu, LC 2103:	$\sigma_{1x,Ed} = 171 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -230 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 60 \text{ N/mm}^2$
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355,00 \text{ N/mm}^2$
Koeficijent sigurnosti za čelik u tlaku:	$\gamma_{M1} = 1,10$
Proračunska granica popuštanja čelika:	$f_{yd} = 322,73 \text{ N/mm}^2$

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆI MOMENT SAVIJANJA

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2 = \left(\frac{182}{355}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{59}{355}\right)^2 = 0,35$$

$$\alpha_{ult,k} = 1,70$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-245}{182} = -1,35 < -1$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,35))^2 = 32,92$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189\,800 \cdot \left(\frac{20}{2590}\right)^2 = 11,32 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 32,92 \cdot 11,32 = 372,54 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{372,54}{182} = 2,05$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukružene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2590} = 1,93 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4\left(\frac{2590}{5000}\right)^2 = 6,41 \text{ N/mm}^2$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 6,41 \cdot 11,32 = 72,58 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{72,58}{59} = 1,23$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,35)}{4 \cdot 2,05} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,35)}{4 \cdot 2,05} \right)^2 + \frac{1 - (-1,35)}{2 \cdot 2,05^2} + \frac{1}{1,23^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\alpha_{cr} = 1,077$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{1,70}{1,077}} = 1,257 \geq 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,257 - 0,055 \cdot (3 + (-1,35))}{1,257^2} = 0,738 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,738$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \lambda_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,257} = 0,700$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{182}{0,738 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{59}{0,700 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,584 + 0,205 = 0,789 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆU POPREČNU SILU

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{171}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{60}{355} \right)^2 = 0,318$$

$$\alpha_{ult,k} = 1,77$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-230}{171} = -1,35 < -1$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,35))^2 = 32,88$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 = 189\,800 \cdot \left( \frac{20}{2590} \right)^2 = 11,32 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 32,88 \cdot 11,32 = 372,18 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{372,18}{171} = 2,176$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2590} = 1,93 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2590/5000)^2 = 6,41$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E = 6,41 \cdot 11,32 = 72,58 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{72,58}{60} = 1,21$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,35)}{4 \cdot 2,176} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,35)}{4 \cdot (2,176)} \right)^2 + \frac{1 - (-1,35)}{2 \cdot 2,176^2} + \frac{1}{1,21^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_{cr} &= 1,08 \end{aligned}$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{1,77}{1,08}} = 1,282 > 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,74 - 0,055 \cdot (3 + (-1,35))}{1,282^2} = 0,725 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,725$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,282} = 0,691$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{171}{0,725 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{60}{0,691 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,534 + 0,217 = 0,751 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.



6.4.2. Hrbat u presjeku smanjenja debljine sa  $t = 20$  mm na  $t = 16$  mm

Ulazni podatci:

Razmak dijafragmi:	$a = 5000$ mm
Visina hrpta:	$b = 2670$ mm
Debljina hrpta:	$t = 16$ mm
Naprezanja za najveći moment savijanja, LC 2102:	$\sigma_{1x,Ed} = 145$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_{2x,Ed} = -171$ N/mm <sup>2</sup> $\tau_{Ed} = 37$ N/mm <sup>2</sup>
Naprezanja za najveću poprečnu silu, LC 2103:	$\sigma_{1x,Ed} = 115$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_{2x,Ed} = -117$ N/mm <sup>2</sup> $\tau_{Ed} = 56$ N/mm <sup>2</sup>
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355,00$ N/mm <sup>2</sup>
Koeficijent sigurnosti za čelik u tlaku:	$\gamma_{M1} = 1,10$
Proračunska granica popuštanja čelika:	$f_{yd} = 322,73$ N/mm <sup>2</sup>

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆI MOMENT SAVIJANJA

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2 = \left(\frac{145}{355}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{37}{355}\right)^2 = 0,20$$

$$\alpha_{ult,k} = 2,24$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-171}{145} = -1,18 < -3$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,18))^2 = 28,40$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189\,800 \cdot \left(\frac{16}{2670}\right)^2 = 6,82 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 28,40 \cdot 6,82 = 193,58 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{193,58}{145} = 1,36$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukružene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2670} = 1,87 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2670/5000)^2 = 6,48$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 6,48 \cdot 6,82 = 44,17 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{44,17}{37} = 1,19$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,18)}{4 \cdot 1,36} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,18)}{4 \cdot 1,36} \right)^2 + \frac{1 - (-1,18)}{2 \cdot 1,36^2} + \frac{1}{1,19^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\alpha_{cr} = 0,899$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,24}{0,899}} = 1,579 \geq 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,579 - 0,055 \cdot (3 + (-1,18))}{1,579^2} = 0,593 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,593$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \lambda_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,579} = 0,601$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{145}{0,593 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{37}{0,601 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,573 + 0,110 = 0,683 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆU POPREČNU SILU

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{115}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{56}{355} \right)^2 = 0,180$$

$$\alpha_{ult,k} = 2,36$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-117}{115} = -1,02 < -3$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,02))^2 = 24,34$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 = 189\,800 \cdot \left( \frac{16}{2670} \right)^2 = 6,82 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 24,34 \cdot 6,82 = 165,88 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{165,88}{115} = 1,44$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2670} = 1,87 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2670/5000)^2 = 6,48$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E = 6,48 \cdot 6,82 = 44,17 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{44,17}{56} = 0,79$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,02)}{4 \cdot 1,44} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,02)}{4 \cdot (1,44)} \right)^2 + \frac{1 - (-1,02)}{2 \cdot 1,44^2} + \frac{1}{0,79^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_{cr} &= 0,69 \end{aligned}$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,36}{0,69}} = 1,846 > 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,846 - 0,055 \cdot (3 + (-1,02))}{1,846^2} = 0,510 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,510$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,846} = 0,538$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{115}{0,510 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{56}{0,538 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,489 + 0,321 = 0,810 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

## 6.4.3. Hrbat u presjeku u sredini raspona (t = 16 mm)

Ulazni podatci:

Razmak dijafragmi:	a = 5000 mm
Visina hrpta:	b = 2670 mm
Debljina hrpta:	t = 16 mm
Naprezanja za najveći moment savijanja, LC 2101:	$\sigma_{1x,Ed} = 160 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -168 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 10 \text{ N/mm}^2$
Naprezanja za najveću poprečnu silu, LC 2103:	$\sigma_{1x,Ed} = 120 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -122 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 7 \text{ N/mm}^2$
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355,00 \text{ N/mm}^2$
Koeficijent sigurnosti za čelik u tlaku:	$\gamma_{M1} = 1,10$
Proračunska granica popuštanja čelika:	$f_{yd} = 322,73 \text{ N/mm}^2$

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆI MOMENT SAVIJANJA

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2 = \left(\frac{160}{355}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{10}{355}\right)^2 = 0,21$$

$$\alpha_{ult,k} = 2,21$$



U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-168}{160} = -1,05 < -3$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,05))^2 = 25,13$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189\,800 \cdot \left(\frac{16}{2670}\right)^2 = 6,82 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 25,13 \cdot 6,82 = 171,29 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{171,29}{160} = 1,07$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukružene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2670} = 1,87 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2670/5000)^2 = 6,48$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 6,48 \cdot 6,82 = 44,17 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{44,17}{10} = 4,42$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,05)}{4 \cdot 1,07} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,05)}{4 \cdot 1,07} \right)^2 + \frac{1 - (-1,05)}{2 \cdot 1,07^2} + \frac{1}{4,42^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\alpha_{cr} = 1,041$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,21}{1,041}} = 1,456 \geq 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,456 - 0,055 \cdot (3 + (-1,05))}{1,456^2} = 0,636 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,636$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \lambda_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,456} = 0,635$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{160}{0,636 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{10}{0,635 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,607 + 0,010 = 0,617 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆU POPREČNU SILU

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{120}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{7}{355} \right)^2 = 0,180$$

$$\alpha_{ult,k} = 2,94$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-122}{120} = -1,02 < -3$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,02))^2 = 24,32$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 = 189\,800 \cdot \left( \frac{16}{2670} \right)^2 = 6,82 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 24,32 \cdot 6,82 = 165,76 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{165,76}{120} = 1,38$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2670} = 1,87 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2670/5000)^2 = 6,48$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E = 6,48 \cdot 6,82 = 44,17 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{44,17}{7} = 6,31$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,02)}{4 \cdot 1,38} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,02)}{4 \cdot (1,38)} \right)^2 + \frac{1 - (-1,02)}{2 \cdot 1,38^2} + \frac{1}{6,31^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_{cr} &= 1,35 \end{aligned}$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,94}{1,35}} = 1,477 > 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,477 - 0,055 \cdot (3 + (-1,02))}{1,477^2} = 0,627 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,627$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,477} = 0,629$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{120}{0,627 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{7}{0,629 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

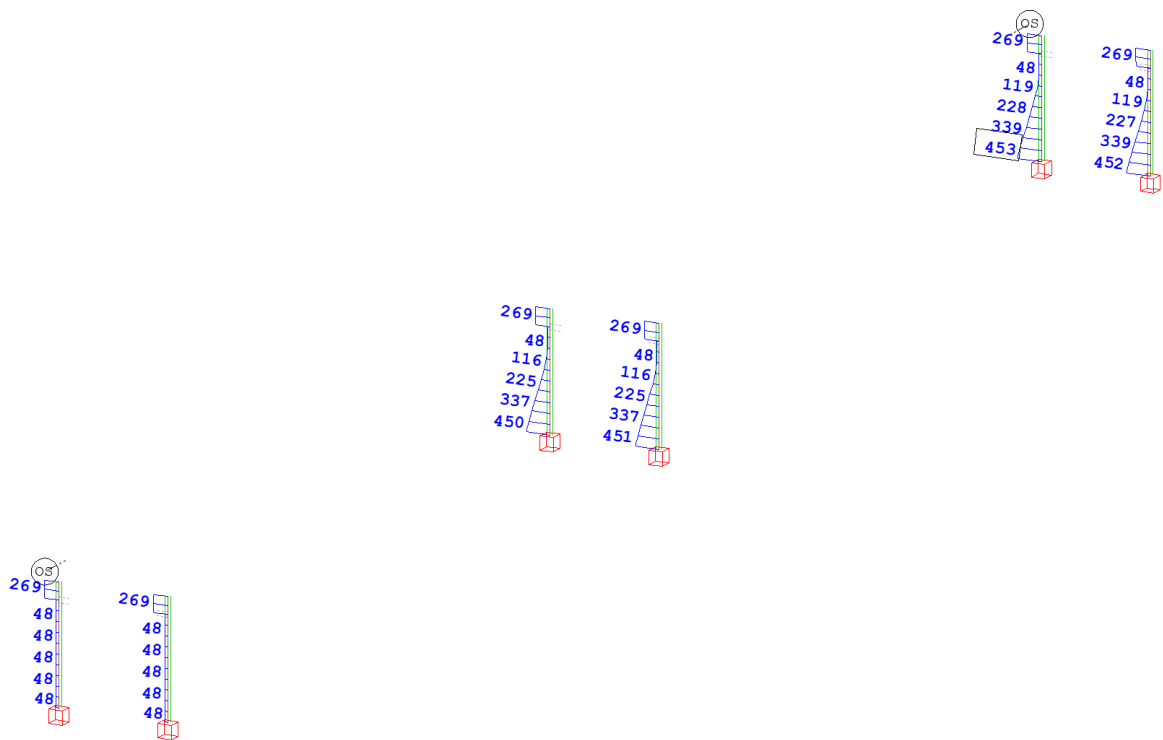
$$0,352 + 0,004 = 0,356 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

## 6.5. Armatura stupova i vezne grede

Za dimenzioniranje stupova i veznih greda korišten je faktor ponašanja  $q = 1.5$ .

### 6.5.1. Armatura stupova



Slika 104. Ukupna potrebna armatura stupa, SOFiSTiK

Opseg stupa:

$$O = 2 \cdot r \cdot \pi = 2 \cdot 75 \cdot \pi = 471 \text{ cm}$$

Ukupna potrebna količina armature:

$$\frac{453 \text{ cm}^2}{7 \text{ m}} = 64,71 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Najmanja ukupna površina armature u seizmičkom području [10]:

$$A_{s,\min} = 8\emptyset 12 = 9,05 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\min} = 0,010 \cdot A_1 = 0,01 \cdot 75^2 \cdot \pi = 176,71 \text{ cm}^2$$

Maksimalna ukupna armatura stupa [6]:

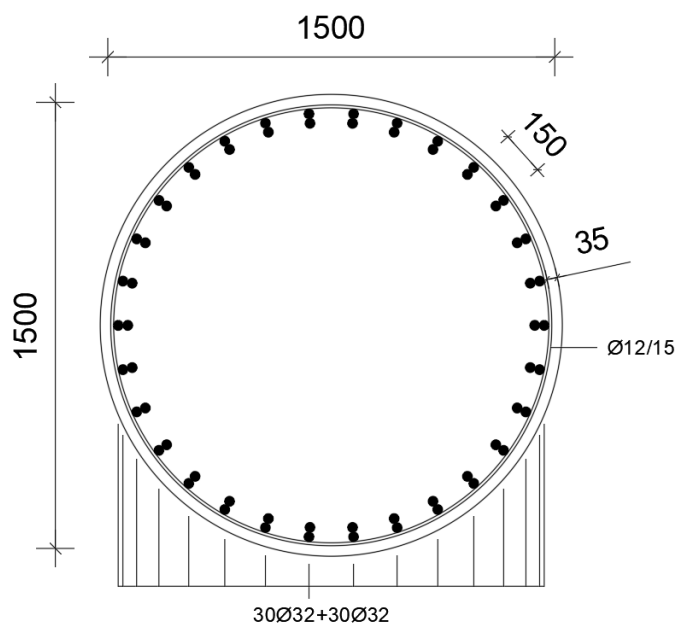
$$A_{s,\max} = 0,04 \cdot A_1 = 0,04 \cdot 75^2 \cdot \pi = 706,86 \text{ cm}^2$$

Odabrana armatura stupa:

$$A_{s,\text{prov,ukupno}} = 60\emptyset 32 = 482,55 \text{ cm}^2 > 453 \text{ cm}^2$$

Armatura je postavljena u snopu od  $30\emptyset 32 + 30\emptyset 32$ .

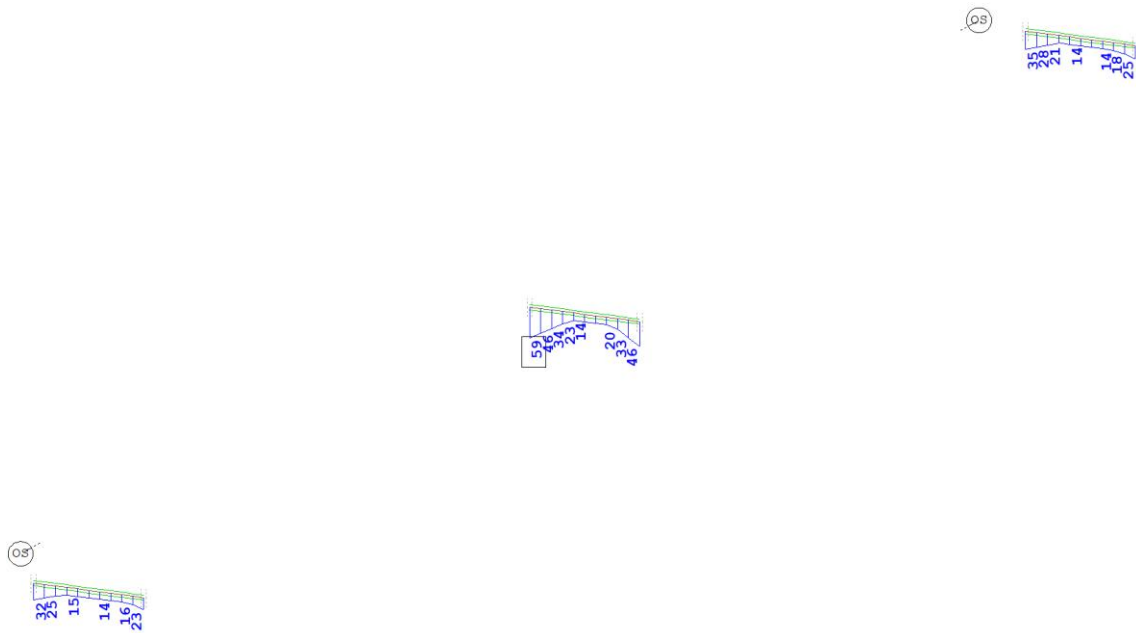
Razmak između armature u iznosi 15,00 cm. Vilice promjera 12 mm su postavljene na razmaku od 15 cm.



Slika 105. Armatura stupa, SOFiSTiK



## 6.5.2. Armatura donje stijenke vezne grede



Slika 106. Ukupna potrebna armatura donje stijenke vezne grede, SOFiSTiK

Opseg grede:

$$O = 4a = 4 \cdot 100 = 400 \text{ cm}$$

Potrebna količina armature:

$$\frac{59 \text{ cm}^2}{5,0 \text{ m}} = 11,80 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Najmanja ukupna površina armature u seizmičkom području [10]:

$$A_{s,\min} = 8\emptyset 12 = 9,04 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\min} = 0,010 \cdot A_1 = 0,01 \cdot 100^2 = 100 \text{ cm}^2$$

Maksimalna armatura grede [6]:

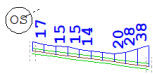
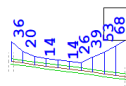
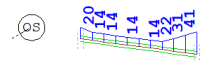
$$A_{s,max,1} = 0,04 \cdot A_1 = 0,04 \cdot 100^2 = 400 \text{ cm}^2$$

Odabrana armatura grede za jednu donju stijenku:

$$A_{s,prov,stijenka\ dolje} = 10\emptyset 28 = 61,58 \text{ cm}^2$$

Armatura se postavlja u dva reda. U prvom redu se nalazi 6 šipki promjera 28 mm, a u drugom redu se nalaze 4 šipke promjera 28 mm. Razmak između šipki armature iznosi 17.5 cm.

### 6.5.3. Armatura gornje stijenke vezne grede



Slika 107. Ukupna potrebna armatura gornje stijenke vezne grede, SOFiSTiK

Opseg grede:

$$O = 4a = 4 \cdot 100 = 400 \text{ cm}$$

Potrebna količina armature:

$$\frac{68 \text{ cm}^2}{5,0 \text{ m}} = 13,60 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Najmanja ukupna površina armature u seizmičkom području [10]:

$$A_{s,\min} = 8\emptyset 12 = 9,04 \text{ cm}^2$$
$$A_{s,\min} = 0,010 \cdot A_1 = 0,01 \cdot 100^2 = 100 \text{ cm}^2$$

Maksimalna armatura grede [6]:

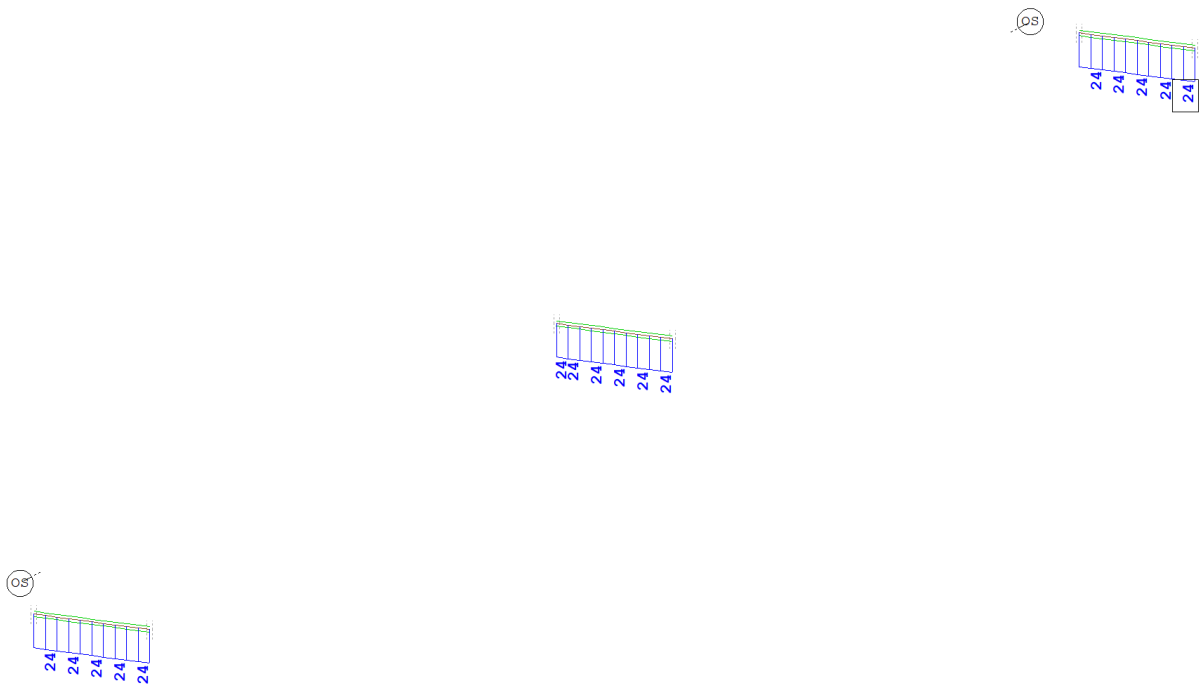
$$A_{s,\max,1} = 0,04 \cdot A_1 = 0,04 \cdot 100^2 = 400 \text{ cm}^2$$

Odabrana armatura grede za jednu stijenku:

$$A_{s,\text{prov, stijenka gore}} = 12\emptyset 28 = 73,88 \text{ cm}^2$$

Armatura se postavlja u dva reda. U prvom redu se nalazi 6 šipki promjera 28 mm, a u drugom redu se također nalazi 6 šipki promjera 28 mm. Razmak između šipki armature iznosi 17.5 cm.

#### 6.5.4. Armatura bočnih stijenki vezne grede



Slika 108. Ukupna potrebna armatura bočnih stijenki vezne grede, SOFiSTiK

Opseg grede:

$$O = 4a = 4 \cdot 100 = 400 \text{ cm}$$

Potrebna količina armature:

$$\frac{24 \text{ cm}^2}{5,0 \text{ m}} = 4,80 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Najmanja ukupna površina armature u seizmičkom području [10]:

$$A_{s,\min} = 8\emptyset 12 = 9,04 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\min} = 0,010 \cdot A_1 = 0,01 \cdot 100^2 = 100 \text{ cm}^2$$

Maksimalna armatura grede [6]:

$$A_{s,max,1} = 0,04 \cdot A_1 = 0,04 \cdot 100^2 = 400 \text{ cm}^2$$

Odabrana armatura grede za jednu bočnu stijenku:

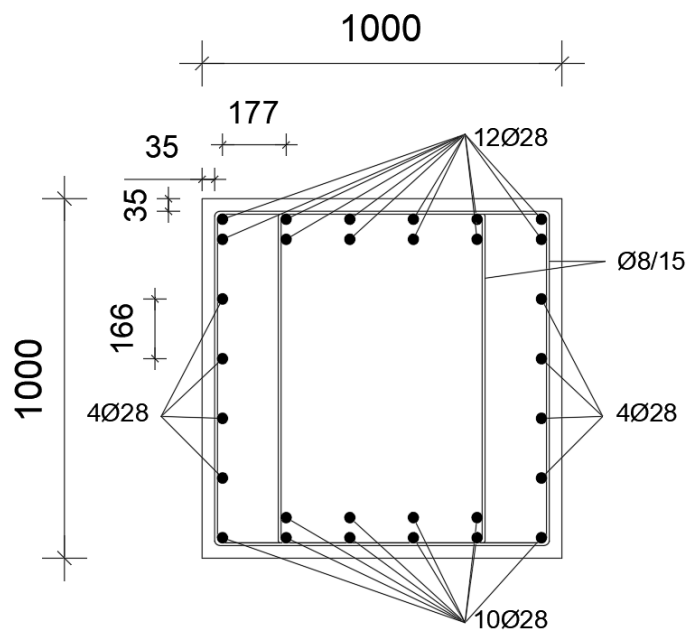
$$A_{s,prov,stijenka\ bočno} = 4\emptyset 28 = 24,63 \text{ cm}^2$$

Armatura se postavlja u jednom redu. U svakoj stijenci se nalaze 4 šipke promjera 28 mm na međusobnom razmaku od 16.5 cm. Postavljene su vilice promjera 8 mm na razmaku od 15 centimetara.

Ukupna površina armature u veznoj gredi:

$$A_{s,prov,ukupno} = 2 \cdot 3\emptyset 32 + 10\emptyset 28 + 12\emptyset 28 = 184,73 \text{ cm}^2$$

$$184,73 \text{ cm}^2 > 59 + 68 + 2 \cdot 24 = 175 \text{ cm}^2$$



Slika 109. Armatura vezne grede, SOFiSTiK

## 7. GSU MOSTA OTVORENOG PRESJEKA SA SANDUČASTIM NOSAČIMA

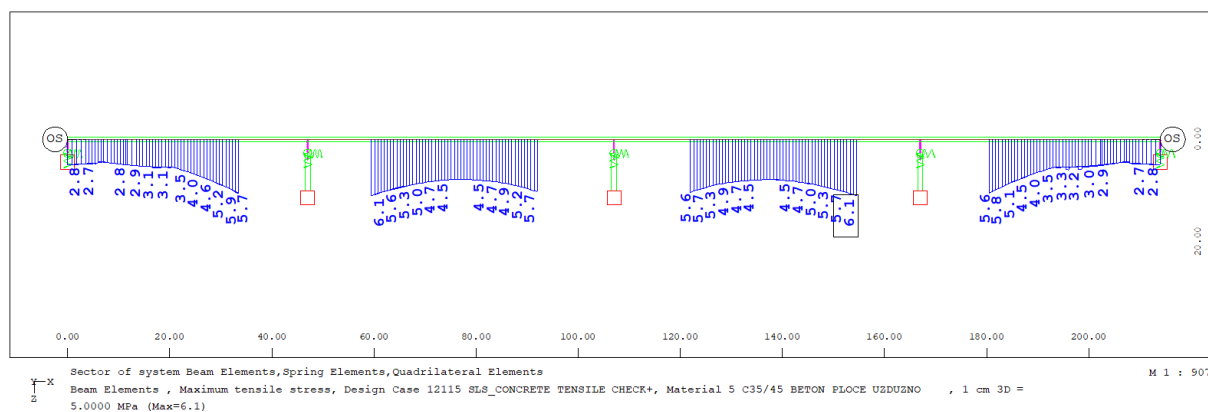
### Naprezanja (vlak) u betonskoj ploči za rijetku kombinaciju

Za određivanje učinaka raspucavanja u spregnutim nosačima s betonskim pojasnicama smije se upotrijebiti sljedeća metoda. Prvo treba proračunati anvelopu unutrašnjih sila i momenata za karakterističnu kombinaciju (još se naziva i rijetka), vidjeti normu EN 1990:2002, točku 6.5.3 [12], uključujući dugotrajne učinke, upotrebom krutosti na savijanje  $E_{a1}$  neraspucalih presjeka. To se naziva „proračun bez raspucavanja“.

Zatim, u područjima u kojima vlačno naprezanje najopterećenijeg betonskog vlakna zbog anvelope globalnih učinaka za normalni beton premašuje dvostruku vrijednost  $f_{ctm}$  prema tablici 3.1 norme EN 1992-1-1 [6], treba smanjiti krutost nosača bez betonske ploče (vidjeti točku 1.5.2.12.) Ta se raspodjela krutosti smije upotrebljavati za proračun graničnih stanja nosivosti i graničnih stanja uporabljivosti. Zatim se nova raspodjela unutrašnjih sila, a ako je potrebno i deformiranja, određuje ponovnim proračunom. To se naziva „proračun s raspucavanjem“.

Za ploču je u modelu proveden postupak redukcije modula elastičnosti na 30 MPa u području raspucavanja. Područje raspucavanja definirano je na dijelovima nosača gdje naprezanja u ploči prelaze iznos:

$$\sigma_{rasp.} = 2 \cdot f_{ctm} = 2 \cdot 3,2 = 6,4MPa \quad (\text{za beton C35/45: } f_{ctm} = 3,2 \text{ N/mm}^2)$$



Slika 110. Prikaz najvećih vlačnih naprezanja u betonskoj ploči, SOFiSTiK

### Širina pukotina za čestu kombinaciju

Za spregnute mostove provodi se dokaz širine pukotine od 0,2 mm.

Provedena provjera širina pukotina u betonu stupa za granično stanje uporabljivosti je za:

- čestu kombinaciju djelovanja [7]

$$S_d = S_d \left[ \sum_j (G_{k,j}) + \psi_{11} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right] \quad w < 0,2mm$$

#### 7.1. Minimalna armatura u betonskoj ploči

(1) Ako se ne upotrebljava točnija metoda za određivanje minimalne armature u skladu s točkom 7.3.2 norme EN 1992-1-1 [6], u svim betonskim dijelovima poprečnog presjeka koji su izloženi učincima prisilnih deformiranja i/ili izravnim vlačnim učincima vanjskih djelovanja u pravilu je potrebna minimalna armatura. Kod spregnutih nosača koji nisu prednapeti nategama zahtijevana minimalna ploština armature  $A_s$  za ploče spregnutih greda dana je izrazom:

$$A_s = k_s \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} / \sigma_s$$

Gdje je:

$f_{ct,eff}$  – srednja vrijednost djelotvorne vlačne čvrstoće betona u očekivanom trenutku pojave prvih pukotina. Za  $f_{ct,eff}$  smiju se uzeti vrijednosti  $f_{ctm}$ , vidjeti [6], tablica 3.1, ili  $f_{lctm}$ , vidjeti tablicu 11.3.1, uzimajući za mjerodavni razred betona čvrstoću u trenutku kada se očekuje pojava pukotina. Ako se starost betona u trenutku raspucavanja, koja je manja od 28 dana, ne može sa sigurnošću odrediti, smije se uzeti najmanja vlačna čvrstoća od 3 N/mm<sup>2</sup>.

$k$  – koeficijent kojim se uzima u obzir učinak nelinearno raspoređenih vlastitih naprezanja, smije se uzeti 0,8

$k_s$  – koeficijent kojim se uzima u obzir učinak smanjenja uzdužne sile u betonskoj ploči zbog početnog raspucavanja i lokalnog proklizavanja posmičnog spoja, smije se uzeti 0,9

$k_c$  – koeficijent kojim se obuhvaća raspodjela naprezanja unutar presjeka neposredno prije raspucavanja i dan je izrazom:

$$k_c = \frac{1}{1 + h_c/(2z_o)} + 0,3 \leq 1,0$$

$h_c$  – debljina betonske pojasnice bez vuta ili rebara

$z_o$  – vertikalni razmak težišta neraspucane betonske pojasnice i neraspucanog spregnutog presjeka, proračunanog upotrebljavajući faktor redukcije  $n_0 = E_a/E_{cm}$  za kratkotrajno opterećenje (svađanje presjeka na čelik)

$\sigma_s$  – najveće dopušteno naprezanje u armaturi neposredno nakon raspucavanja. Ovo naprezanje smije se uzeti kao njezina karakteristična granica popuštanja  $f_{sk}$ . Međutim, može biti potrebna manja vrijednost, ovisno o promjeru šipke, kako bi se zadovoljila zahtijevana ograničenja širina pukotina. U našem slučaju  $\sigma_s$  treba proračunati prema stavku (3) iz idućeg poglavlja.

$A_{ct}$  – ploština vlačnog područja (prouzročenog izravnim opterećenjem i primarnim učincima skupljanja) neposredno prije raspucavanja poprečnog presjeka. U svrhu pojednostavnjenja smije se upotrijebiti površina betonskog dijela unutar sudjelujuće širine.



Tablica 4. Granični promjer za šipke rebraste armature [2]

Naprezanje u čeliku $\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	Najveći promjer šipke $\phi^*$ (mm) za proračunsku širinu pukotine $w_k$		
	$w_k=0,4$ mm	$w_k=0,3$ mm	$w_k=0,2$ mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

(2) Ograničenje širine pukotina može se provjeriti ograničenjem promjera šipke na vrijednost danu izrazom:

$$\phi = \phi^* \cdot f_{ct,eff} / f_{ct,0}$$

Gdje je:

$\phi^*$  – najveća dimenzija šipke dana u gornjoj tablici

$f_{ct,0}$  – referentna čvrstoća jednaka 2,9 N/mm<sup>2</sup>.

(3) Najmanje polovicu zahtijevane minimalne armature treba postaviti između polovice debljine ploče i plohe izložene većoj vlačnoj deformaciji.

(4) Za određivanje minimalne armature betonskih pojasnica promjenjive debljine okomito na smjer grede treba upotrebljavati lokalnu debljinu.

(5) Minimalnu armaturu u skladu sa stavcima (1) i (2) treba postaviti tamo gdje su pri karakterističnoj kombinaciji djelovanja naprezanja u betonu vlačna.

## 7.2. Kontrola raspucavanja zbog izvanrednog djelovanja

(1) Ako je predviđena barem minimalna armatura dana u prethodnom poglavlju, ograničenje širina pukotina na prihvatljive vrijednosti smije se općenito postići ograničenjem razmaka ili promjera šipki. Najveći promjer šipke i najveći razmak šipki ovise o naprezanju u armaturi  $\sigma_s$  i proračunskoj širini pukotine. Najveći promjeri šipki dani su u tablici u prethodnom poglavlju, a najveći razmaci šipki slijedećoj tablici:

Tablica 5. Najveći razmaci za šipke rebraste armature [2]

Naprezanje u čeliku $\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	Najveći razmaci šipki (mm) za proračunsku širinu pukotine $w_k$		
	$w_k=0,4\text{mm}$	$w_k=0,3\text{mm}$	$w_k=0,2\text{mm}$
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

(2) Unutarnje sile treba odrediti elastičnim proračunom, uzimajući u obzir učinke raspucavanja betona. Naprezanja u armaturi treba odrediti uzimajući u obzir učinke sudjelovanje betona između pukotina. Ako se ne upotrebljava točnija metoda, naprezanja se smiju proračunati prema stavku (3).

(3) U spregnutim nosačima gdje se pretpostavlja da je betonska ploča raspucala i nije prednapeta nategama, naprezanja u armaturi su povećana zbog učinaka sudjelovanja betona između pukotina u odnosu na naprezanja kada se proračun temelji na spregnutom presjeku sa zanemarenjem betona. Vlačno naprezanje u armaturi  $\sigma_s$  zbog izravnog djelovanja smije se proračunati iz izraza:

$$\sigma_s = \sigma_{s,0} + \Delta\sigma_s$$

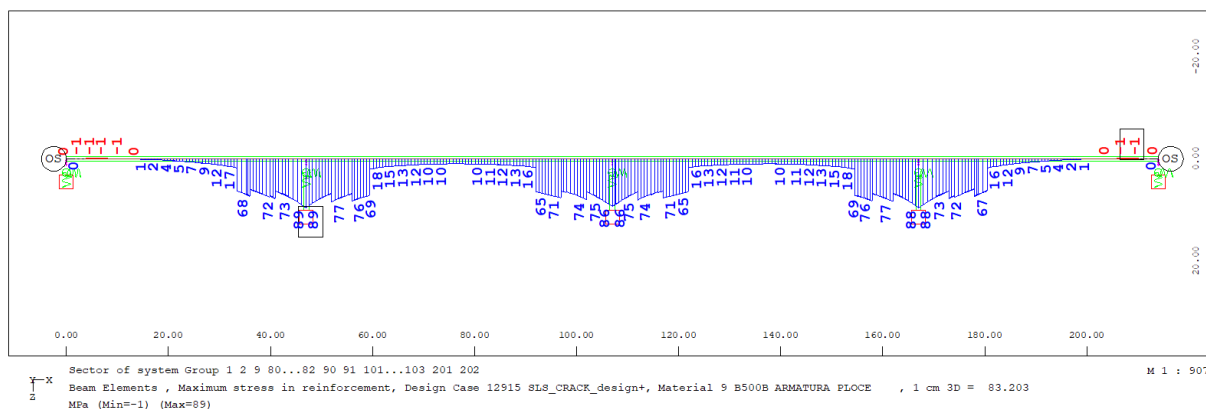
UZ:

$$\Delta\sigma_s = \frac{0,4f_{ctm}}{\alpha_{st} \cdot \rho_s}$$

$$\alpha_{st} = \frac{AI}{A_a \cdot I_a}$$

gdje je:

$\sigma_{s,0}$  – naprezanje u armaturi prouzročeno unutarnjim silama koje djeluju na spregnuti presjek, proračunano zanemarujući beton u vlaku



Slika 111. Prikaz najvećeg naprezanja u armaturi od unutarnjih sila, SOFiSTiK

$f_{ctm}$  – srednja vlačna čvrstoća betona

$\rho_s$  – omjer armiranja dan kao  $\rho_s = (A_s / A_{ct})$

$A_{ct}$  – sudjelujuća površina betonske pojasnice unutar vlačnog područja; koja se pojednostavnjeno smije se uzeti kao površina betonskog dijela presjeka unutar sudjelujuće širine

$A_s$  – ukupna površina svih slojeva uzdužne armature unutar sudjelujuće površine  $A_{ct}$

$A, I$  – površina i moment tromosti spregnutog presjeka zanemarujući beton u vlaku i profilirani lim ako postoji, ali uzeti u obzir armaturu

$A_a, I_a$  – ploština i moment tromosti dijela presjeka samo od konstrukcijskog čelika

### 7.3. Proračun minimalne armature ploče i kontrola raspucavanja

Vlačno naprezanje u armaturi zbog izravnog djelovanja:

$$\sigma_s = \sigma_{s,o} + \Delta\sigma_s = 161,4 \text{ MPa}$$

Naprezanje u armaturi prouzročeno unutarnjim silama koje djeluju na spregnuti presjek, proračunano zanemarujući beton u vlaku (ČESTA KOMBINACIJA):

$$\sigma_{s,o} = 89 \text{ MPa}$$

Povećanje naprezanja u armaturi zbog učinaka sudjelovanja betona između pukotina u odnosu na naprezanja kada se proračun temelji na spregnutom presjeku sa zanemarenjem betona:

$$\Delta\sigma_s = \frac{0,4f_{ctm}}{\alpha_{st} \cdot \rho_s} = 72,4 \text{ MPa}$$

Srednja vlačna čvrstoća betona:

$$f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

Odnos karakteristika spregnutog presjeka s raspucalim betonom i presjeka čeličnog nosača:

$$\alpha_{st} = \frac{A \cdot I}{A_a \cdot I_a} = 1,1001$$

Karakteristike spregnutog presjeka zanemarujući beton u vlaku i profilirani lim ako postoji, ali uzeti u obzir armaturu (karakteristike raspucalog spregnutog presjeka):

$$A = 0,2935 \text{ m}^2$$

$$I = 0,371 \text{ m}^4$$

Karakteristike dijela presjeka samo od konstrukcijskog čelika:

$$A_a = 0,2812 \text{ m}^2$$

$$I_a = 0,352 \text{ m}^4$$

Omjer armiranja

$$\rho_s = A_s/A_{ct} = 0,0161$$

Ukupna površina svih slojeva uzdužne armature unutar sudjelujuće površine:

$$A_s = 215,2 \text{ cm}^2$$

Površina vlačnog područja (površina betonskog dijela unutar sudjelujuće širine):

$$A_{ct} = 13387,5 \text{ cm}^2$$

Sudjelujuća širina:

$$b_{eff} = 535,5 \text{ cm}$$

Zahtijevana minimalna površina armature za ploče spregnutih greda:

$$A_s = k_s \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

$$A_s = 191,1 \text{ cm}^2$$

Koeficijent kojim se uzima u obzir učinak smanjenja uzdužne sile u betonskoj ploči zbog početnog raspucavanja i lokalnog proklizavanja posmičnog spoja:

$$k_s = 0,9$$

Koeficijent kojim se obuhvaća raspodjela naprezanja unutar presjeka neposredno prije raspucavanja:

$$k_c = \frac{1}{1 + h_c/(2z_0)} + 0,3 \leq 1$$

$$k_c = 1,18 \rightarrow k_c = 1$$

Debljina betonske pojasnice bez vuta ili rebara:

$$h_c = 25 \text{ cm}$$

Vertikalni razmak težišta neraspucane betonske pojasnice i neraspucanog spregnutog presjeka, proračunanog upotrebljavajući faktor redukcije  $n_0 = E_a/E_{cm}$  za kratkotrajno opterećenje (svađanje presjeka na čelik):

$$z_0 = 91,03 \text{ cm}$$

Koeficijent kojim se uzima u obzir učinak nelinearno raspoređenih vlastitih naprezanja:

$$k = 0,8$$

Srednja vrijednost djelotvorne vlačne čvrstoće betona u očekivanom trenutku pojave prvih pukotina:

$$f_{ct,eff} \approx f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

Ograničenje promjera šipke: ( $f_{ct,0} = 2,9 \text{ MPa}$  – referentna čvrstoća)

$$\phi = \phi^* \cdot \frac{f_{ct,eff}}{f_{ct,0}} = 27 \text{ mm}$$

Najveća dimenzija šipke  $\phi^*$  [mm] za širinu pukotine 0,2 mm (prema tablici 4):

$$24,7 \text{ mm}$$

Najveći razmaci šipki  $s$  [mm]:

$$198,2 \text{ mm}$$

Tablica 6. Minimalna armatura ploče i kontrola raspucavanja

ODABIR ARMATURE	$\phi$ [mm]	razmak $s$ [cm]	$A_s$ [cm <sup>2</sup> ]	
POTREBNO:	Max. 27	Max. 19,8	Min. 191,1	
ODABRANO:	16	10	215,2	ZADOVOLJENO

#### 7.4. Provjera naprezanja (tlak)

Provedena je provjera naprezanja u ploči i stupu za nazovistalnu i rijetku kombinaciju. Potrebno je zadovoljiti uvjet da tlačna naprezanja budu manja od [7]:

PLOČA I STUP:

Beton C35/45:  $f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$

- rijetka ili karakteristična kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum_j G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right] \quad \sigma_c < 0,6f_{ck} = 21 \text{ N/mm}^2$$

- nazovistalna kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum_j (G_{k,j}) + \sum_i (\psi_{2i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right] \quad \sigma_c < 0,45f_{ck} = 15,8 \text{ N/mm}^2$$

Beton C40/50:  $f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$

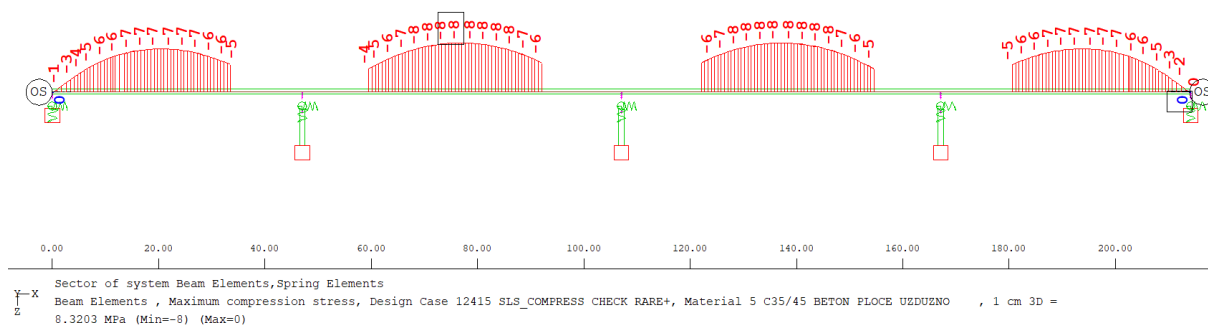
- rijetka ili karakteristična kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum_j G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right] \quad \sigma_c < 0,6f_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$$

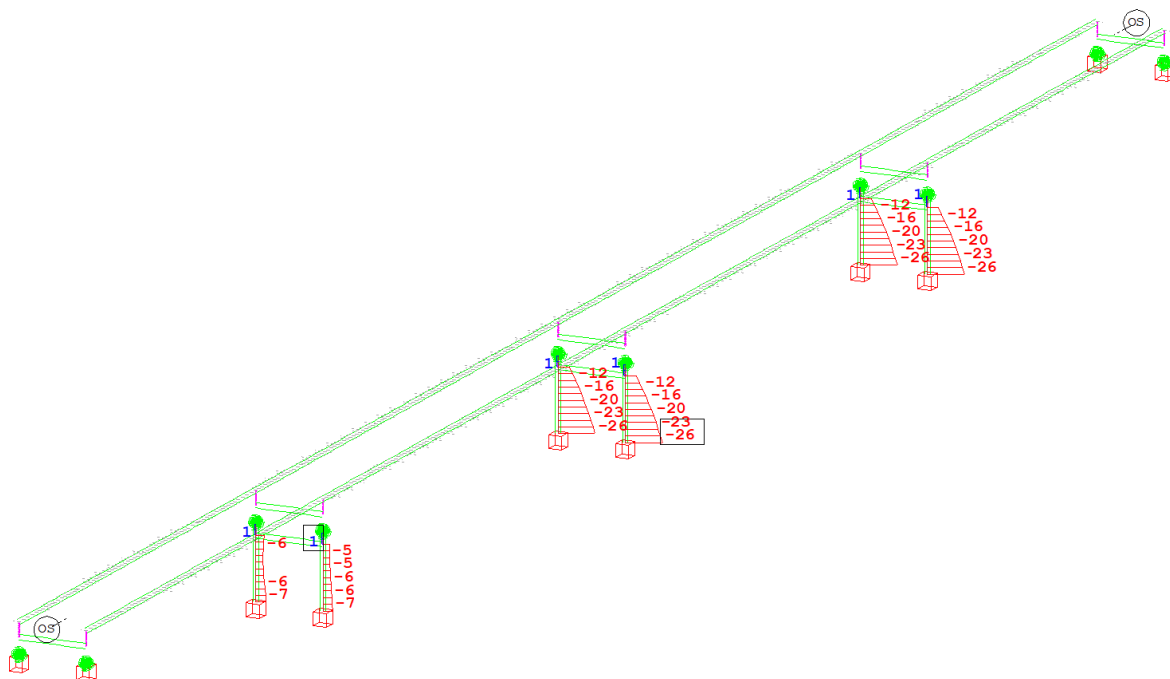
- nazovistalna kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum_j (G_{k,j}) + \sum_i (\psi_{2i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right] \quad \sigma_c < 0,45f_{ck} = 18 \text{ N/mm}^2$$

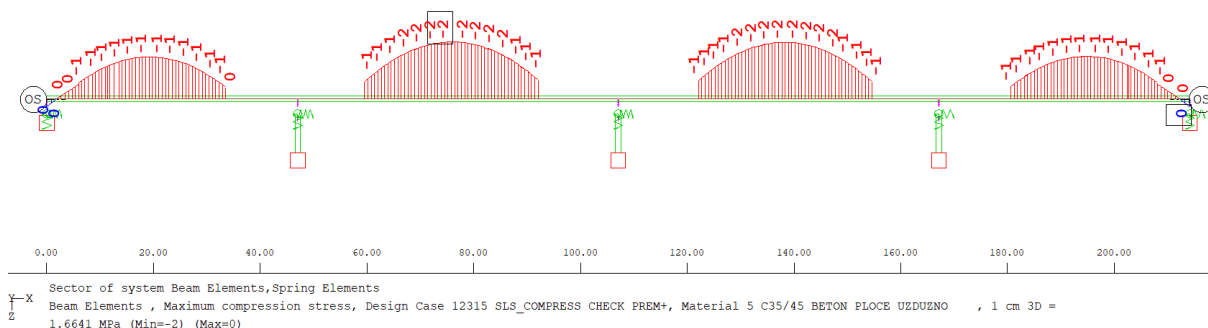
U nastavku se nalaze tlačna naprezanja u betonu za rijetku i nazovistalnu kombinaciju.



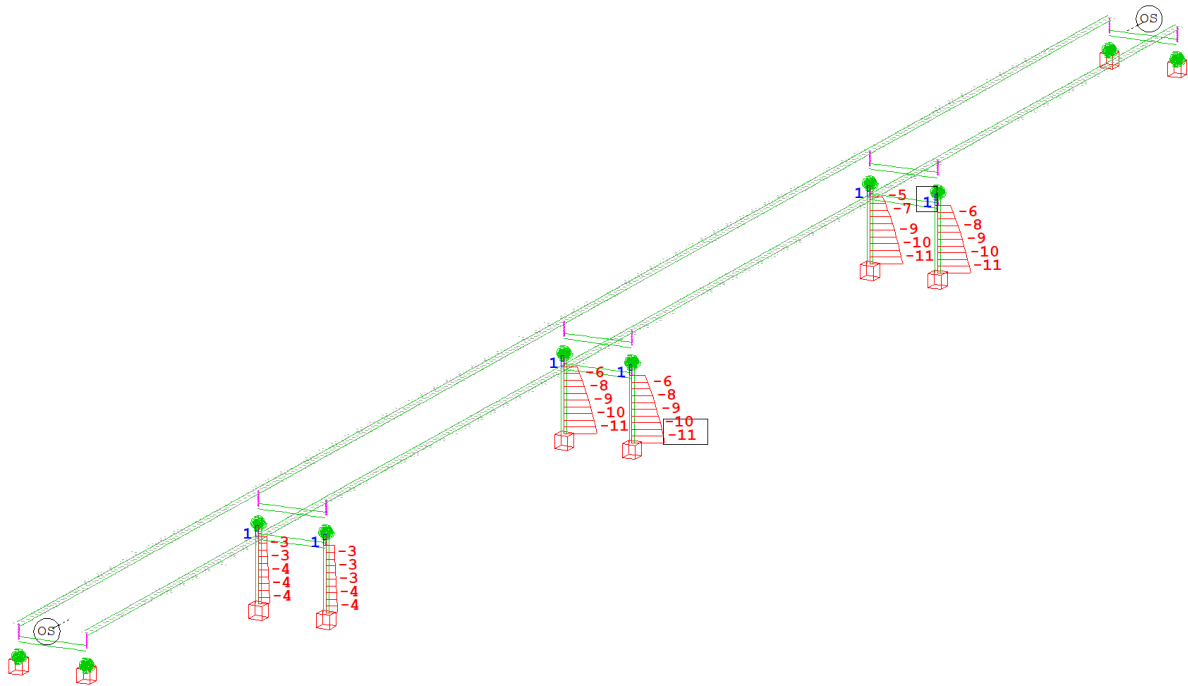
Slika 112. Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za rijetku kombinaciju, SOFiSTiK



Slika 113. Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za rijetku kombinaciju, SOFiSTiK



Slika 114. Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za nazovistalnu kombinaciju, SOFiSTiK



Slika 115. Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za nazovistalnu kombinaciju, SOFiSTiK

Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za rijetku kombinaciju:

$$8 \text{ N/mm}^2 < 21 \text{ N/mm}^2$$

Tlačna naprezanja u ploči su manja od dopuštenih naprezanja za rijetku kombinaciju, a time je zadovoljen uvjet nosivosti.

Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za rijetku kombinaciju:

$$26 \text{ N/mm}^2 > 24 \text{ N/mm}^2$$

Tlačna naprezanja u stupu su veća od dopuštenih naprezanja za rijetku kombinaciju. S obzirom da su naprezanja unutar dopuštene granice odstupanja od 10% (26,4 N/mm<sup>2</sup>) zadovoljen je uvjet nosivosti.



Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za nazovistalnu kombinaciju:

$$2 \text{ N/mm}^2 < 15,8 \text{ N/mm}^2$$

Tlačna naprezanja u ploči su manja od dopuštenih naprezanja za nazovistalnu kombinaciju, a time je zadovoljen uvjet nosivosti.

Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za nazovistalnu kombinaciju:

$$11 \text{ N/mm}^2 < 18 \text{ N/mm}^2$$

Tlačna naprezanja u stupu su manja od dopuštenih naprezanja za nazovistalnu kombinaciju, a time je zadovoljen uvjet nosivosti.

## 8. LEŽAJEVI MOSTA OTVORENOG PRESJEKA SA SANDUČASTIM NOSAČIMA

### 8.1. Odabir ležajeva prema kombinacijama reakcija

Za dimenzionirani most odabrani su lončasti ležajevi.

Dispozicija ležaja:								
SMJER	DJELOVANJE	LC U MODELU	Tražena vrijednost iz Wingrafa	U1	S1	S2	S3	U2
				TGa3, TGe3	TGa7, TGe7	TGe7, TF7	TGe7, TF7	TGa3, TGe3
VERTIKALNE REAKCIJE	Stalno TLAK	4503	Spring force in global z	1330	4734	4759	4734	1330
	Promet TLAK	3013+3113+3213	Spring force in global z	719	1746	1853	1746	718
	Promet VLAK	3014+3114+3214	Spring force in global z	105	104	137	104	105
	Vjetar opterećen (TLAK/VLAK)	463	Spring force in global z	59	195	202	194	59
	Vjetar neopterećen (TLAK/VLAK)	473	Spring force in global z	99	326	338	326	99
	Temperatura TLAK	9846	Spring force in global z	115	173	53	170	118
	Temperatura VLAK	9845	Spring force in global z	138	143	66	144	139
	Potres svi smjerovi (TLAK/VLAK)	10038, 10138, 10238	Spring force in global z	268	580	794	579	270
POPREČNE REAKCIJE	Vjetar opterećen (+/-)	461	Spring force in global y	121	344	381	344	121
	Vjetar neopterećen (+/-)	471	Spring force in global y	148	420	465	420	148
	Potres svi smjerovi (+/-)	10138*	Spring force in global y	431	1032	1612	1031	431
UZDUŽNE REAKCIJE	Vjetar opterećen (+/-)	462	Spring force in global x	0	0	145	144	0
	Vjetar neopterećen (+/-)	472	Spring force in global x	0	0	100	100	0
	Kočenje (+/-)	9345, 9346	Spring force in global x	0	0	228	228	0
	Temperatura pozitivna	495	Spring force in global x	0	0	587	587	0
	Temperatura negativna	496	Spring force in global x	0	0	229	229	0
	Potres x smjer (+/-)	10038*	Spring force in global x	0	0	589	599	0
	VERTIKALNE KOMBINACIJE REAKCIJA	1. MAX: Stalno + Promet + Temperatura + Vjetar opt.			2223	6848	6867	6844
2. MAX: Stalno + Temperatura + Vjetar neopterećen			1544	5233	5150	5230	1547	
3. MAX: Stalno + Potres + 0,5xTemperatura			1655,5	5400,5	5579,5	5398	1659	
4. MIN: Stalno + Promet + Temperatura + Vjetar opt.			1028	4292	4354	4292	1027	
5. MIN: Stalno + Temperatura + Vjetar neopterećen			1093	4265	4355	4264	1092	
6. MIN: Stalno + Potres + 0,5xTemperatura			993	4082,5	3932	4083	990,5	
UZDUŽNE KOMB. REAKCIJA	1. Kočenje + Vjetar opterećen + Temperatura			0	0	960	959	0
	2. Temperatura + Vjetar neopterećen			0	0	687	687	0
	3. Potres x smjer + 0,5x Temperatura			0	0	882,5	892,5	0
UZDUŽNI POMAKI	Temperatura pozitivna	495	Node displacement in global x	105	69	23	23	59
	Temperatura negativna	496	Node displacement in global x	41	27	9	9	23
	Potres x smjer (+/-)	10001	Node displacement in global x	24	34	34	34	34
POPREČNI POMAKI	Vjetar neopterećen / opterećen	461, 471	Node displacement in global y	1	9	14	9	1
	Potres y smjer (+/-)	10102	Node displacement in global y	3	25	38	25	3
UZDUŽNA KOMBINACIJA POMAKA		0,4xPotres x smjer + 0,5xTemperatura		62,1	48,1	25,1	25,1	43,1
		ODABRANA PRIJELAZNA NAPRAVA		<b>D160</b>				

Slika 116. Rekapitulacija sila u ležajevima i pomaka od stalnih i promjenjivih djelovanja

Odabrani ležajevi:

Upornjak U1:

Maksimalna uzdužna kombinacija reakcija = 0 kN

Maksimalna vertikalna kombinacija reakcija = 2223,0 kN

Maksimalna poprečna reakcija = 431 kN

Na lijevom stupu odabran je ležaj TGa-3, a na desnom TGe-3

Stupište S1:

Maksimalna uzdužna kombinacija reakcija = 0 kN

Maksimalna vertikalna kombinacija reakcija = 6848,0 kN

Maksimalna poprečna reakcija = 1032 kN

Na lijevom stupu odabran je ležaj TGa-7, a na desnom TGe-7

Stupište S2:

Maksimalna uzdužna kombinacija reakcija = 960,0 kN

Maksimalna vertikalna kombinacija reakcija = 6867,0 kN

Maksimalna poprečna reakcija = 1612,0 kN

Na lijevom stupu odabran je ležaj TGe-7, a na desnom TF-7

Stupište S3:

Maksimalna uzdužna kombinacija reakcija = 959,0 kN

Maksimalna vertikalna kombinacija reakcija = 6844,0 kN

Maksimalna poprečna reakcija = 1031,0 kN

Na lijevom stupu odabran je ležaj TGe-7, a na desnom TF-7

Upornjak U2:

Maksimalna uzdužna kombinacija reakcija = 0 kN

Maksimalna vertikalna kombinacija reakcija = 2225,0 kN

Maksimalna poprečna reakcija = 431,0 kN

Na lijevom stupu odabran je ležaj TGe-3, a na desnom TGe-3

## 8.2. Odabir prijelaznih naprava prema kombinacijama reakcija

Na upornjaku U1 mjerodavna vrijednost pomaka je 62,1 mm te je odabrana prijelazna naprava tipa D160.

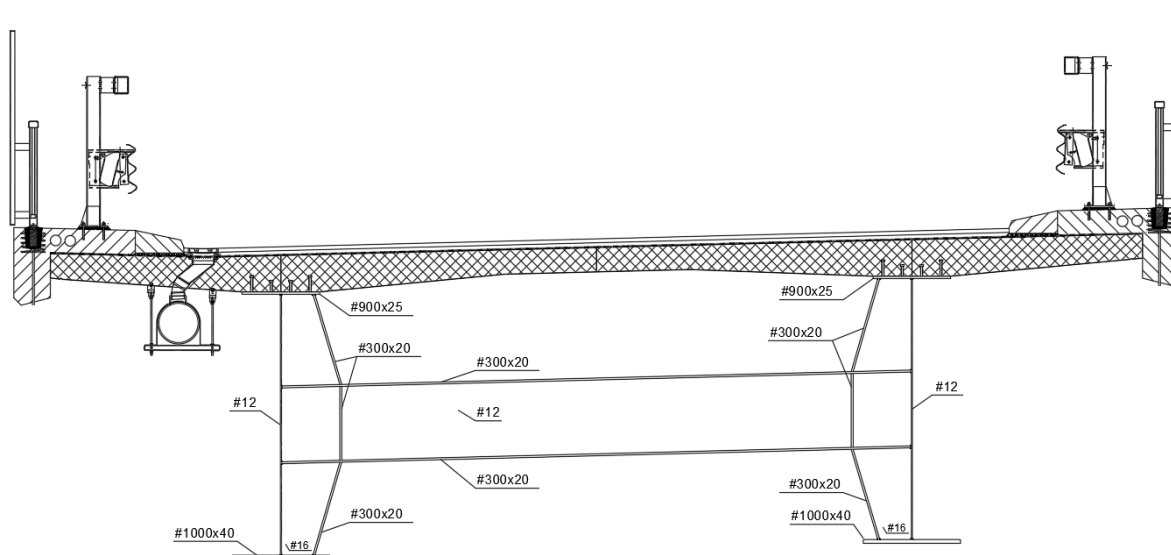
Na upornjaku U2 mjerodavna vrijednost pomaka je 43,1 mm te je odabrana prijelazna naprava tipa D160.

## 9. ANALIZA OPTEREĆENJA MOSTA OTVORENOG PRESJEKA S I NOSAČIMA

### 9.1. Vlastita težina mosta

Osim dijelova presjeka glavnog nosača, u vlastitu težinu čeličnog sklopa ulaze i svi poprečni elementi koji nisu dio glavnog statičkog modela. Ti dijelovi čine dodatnu vlastitu težinu koja se u model nanosi u obliku koncentriranih sila na mjestima gdje stvarno djeluje.

#### Polje



Slika 117. Presjek glavnog I nosača u polju

#### Faza 1 – montaža čeličnih nosaca

Izračun dodatnog opterećenja jednog nosača u polju:

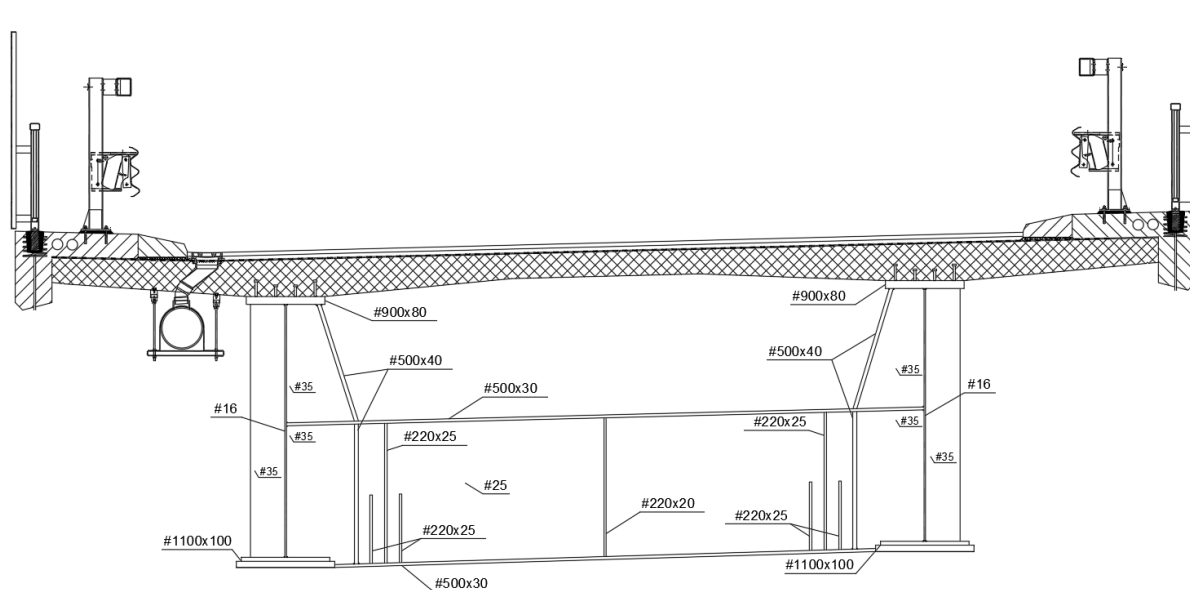
$$V_{\text{ukrućenja}} = 0,300 \cdot (0,970 + 1,000) \cdot 0,020 = 0,012 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{vertikalna ukrućenja}} = (0,433 \cdot 0,358) \cdot 0,016 = 0,013 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{dodatna vlastita težina}} = V_{\text{ukrućenja}} + V_{\text{vertikalna ukrućenja}} = 0,012 + 0,013 = 0,025 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{dodatna vlastita težina}} = V_{\text{dodatna vlastita težina}} \cdot \gamma_S = 0,025 \cdot 80 = 2,00 \text{ kN}$$

## Ležaj



Slika 118. Presjek glavnog I nosača nad ležajem

Izračun dodatnog opterećenja jednog nosača nad ležajem:

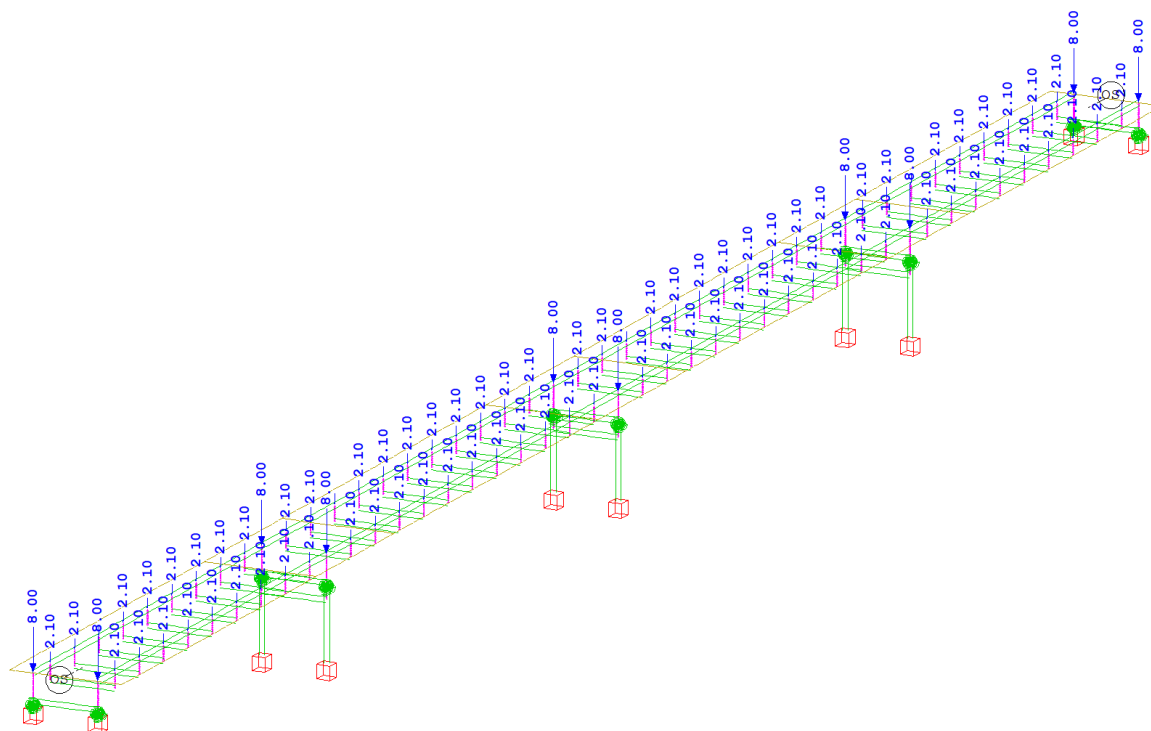
$$V_{\text{ukrućenja}} = 0,500 \cdot (1,240 + 1,520) \cdot 0,040 = 0,055 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{vertikalna ukrućenja}} = 2,566 \cdot 0,350 \cdot 0,035 + 0,600 \cdot 0,035 = 0,052 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{ukrućenja za prešu}} = 2 \cdot (0,0695 + 0,139) \cdot 0,025 \cdot 0,22 + 0,139 \cdot 0,01 \cdot 0,22 = 0,0026 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} V_{\text{dodatna vlastita težina}} &= V_{\text{ukrućenja}} + V_{\text{vertikalna ukrućenja}} + V_{\text{ukrućenja za prešu}} \\ &= 0,055 + 0,052 + 0,0026 = 0,110 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$G_{\text{dodatna vlastita težina}} = V_{\text{dodatna vlastita težina}} \cdot \gamma_S = 0,110 \cdot 80 = 8,77 \text{ kN}$$

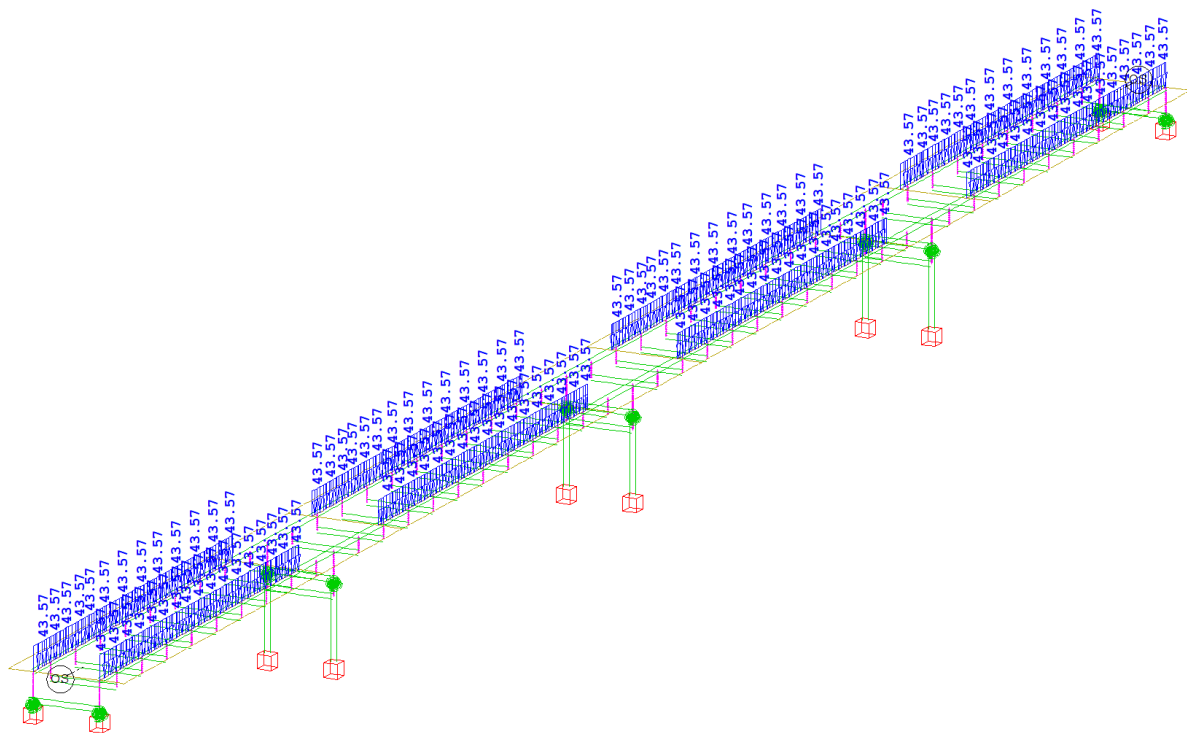


Slika 119. Unos dodatne vlastite težine, SOFiSTiK

Faza 2 – betoniranje ploče spregnutog presjeka

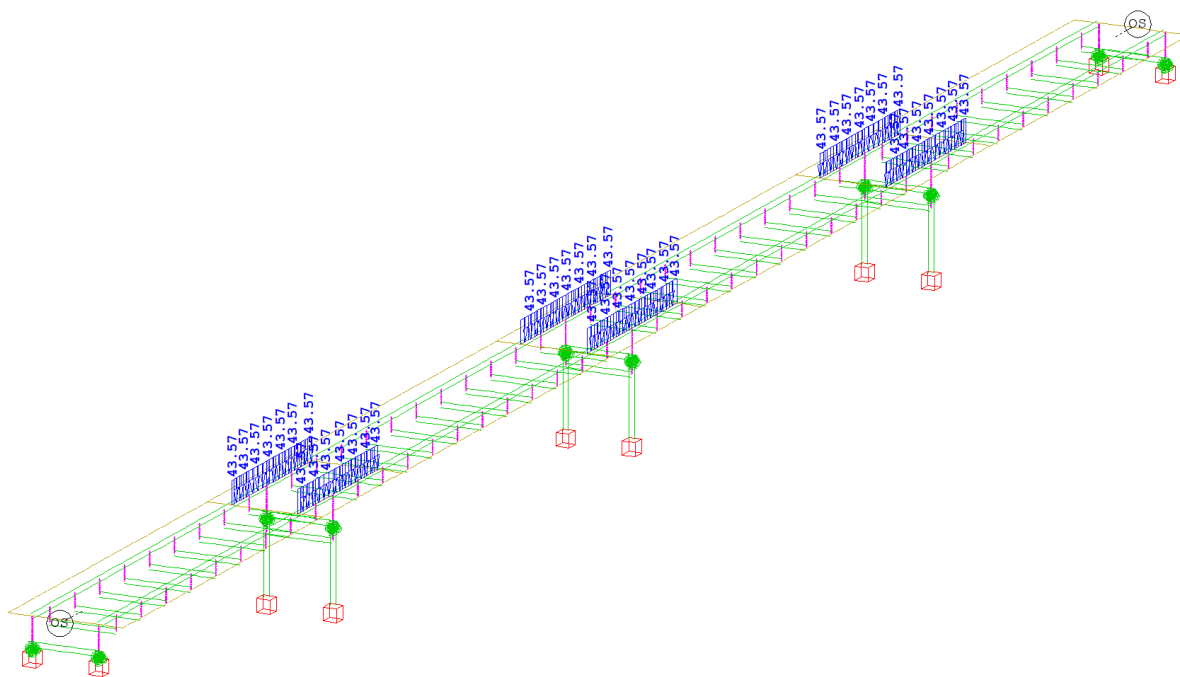
$$A_{\text{polovina ploče}} = 1,743 \text{ m}^2$$

$$G_{\text{ploče za 1 nosač}} = A_{\text{polovina ploče}} \cdot \gamma_c = 1,743 \cdot 25 = 43,57 \text{ kN/m}$$



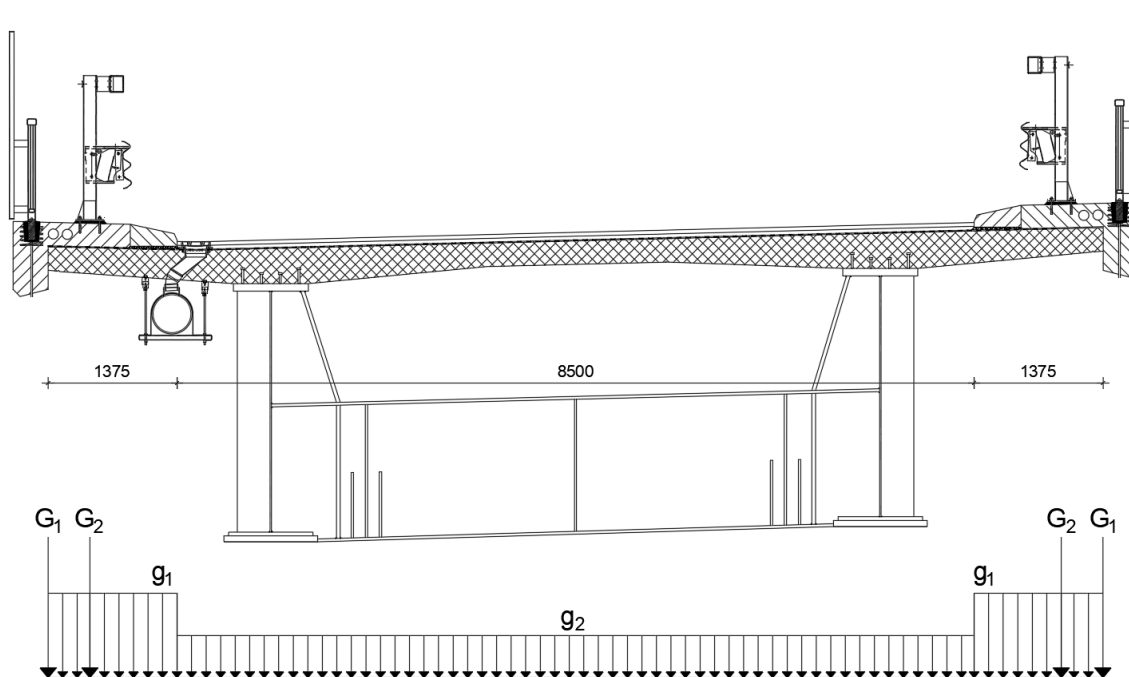
Slika 120. Unos opterećenja betonske ploče za polje, SOFiSTiK





Slika 121. Unos opterećenja betonske ploče za ležaj, SOFiSTiK

## 9.2. Dodatno stalno opterećenje



Slika 122. Dodatno stalno opterećenje

Za cijeli most:

Pješačka staza, rubnjak .....	$0,2 \cdot 1,375 \cdot 25 \cdot 2 = 13,75 \text{ kN/m}$
Hidroizolacija.....	$0,5 \cdot 11,50 = 5,75 \text{ kN/m}$
Zastor.....	$0,08 \cdot 8,5 \cdot 21 = 14,28 \text{ kN/m}$
Ograde.....	$4 \cdot 0,5 = 2,0 \text{ kN/m}$
Vijenac.....	$0,284 \cdot 25 \cdot 2 = 14,21 \text{ kN/m}$
Ukupno: = 49,99 kN/m	

Izračun dodatnih stalnih opterećenja grupiranih po širini mosta za unos u statički model:

Linijaska opterećenja:

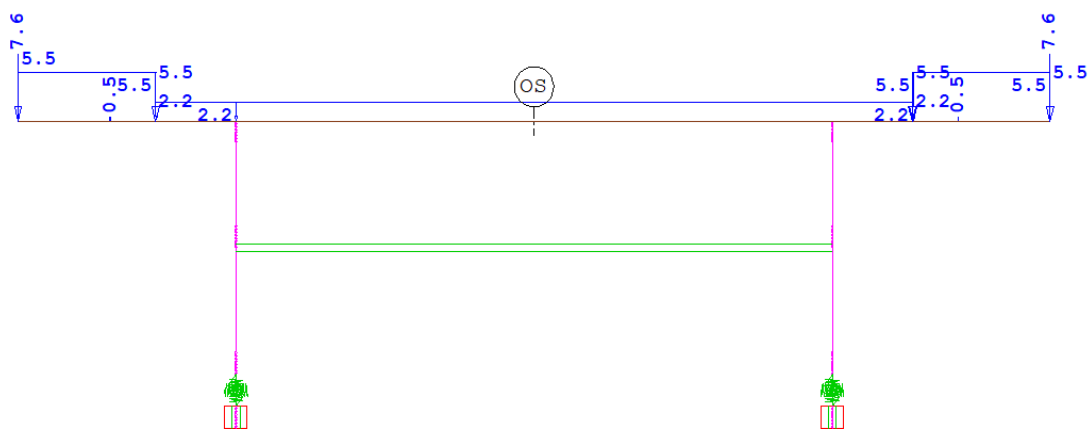
$$G_1 = A_v \cdot 25 \text{ (vijenac)} + 0,5 \text{ (ograda)} = 0,284 \cdot 25 + 0,5 = 7,60 \text{ kN/m}$$

$$G_2 = 0,5 \text{ (ograda)} = 0,5 \text{ kN/m}$$

Plošna (površinska) opterećenja:

$$g_1 = 0,5 \text{ (hidroizolacija)} + d_h \cdot 25 \text{ (hodnik)} = 0,5 + 0,2 \cdot 25 = 5,5 \text{ kN/m}^2$$

$$g_2 = 0,5 \text{ (hidroizolacija)} + d_z \cdot 21 \text{ (zastor)} = 0,5 + 0,08 \cdot 21 = 2,18 \text{ kN/m}^2$$



Slika 123. Unos dodatnog stalnog opterećenja, SOFiSTiK

### 9.3. Prometno opterećenje

#### Model opterećenja 1

U svrhu ovog rada korišten je Model opterećenja 1. Model opterećenja 1 pokriva većinu djelovanja teretnih i osobnih vozila, te je glavni model opterećenja. Sastoji se od dvoosovinskog sustava – tandema vozila i jednolikog raspodijeljenog opterećenja. [5]

#### **Moguće sheme opterećenja**

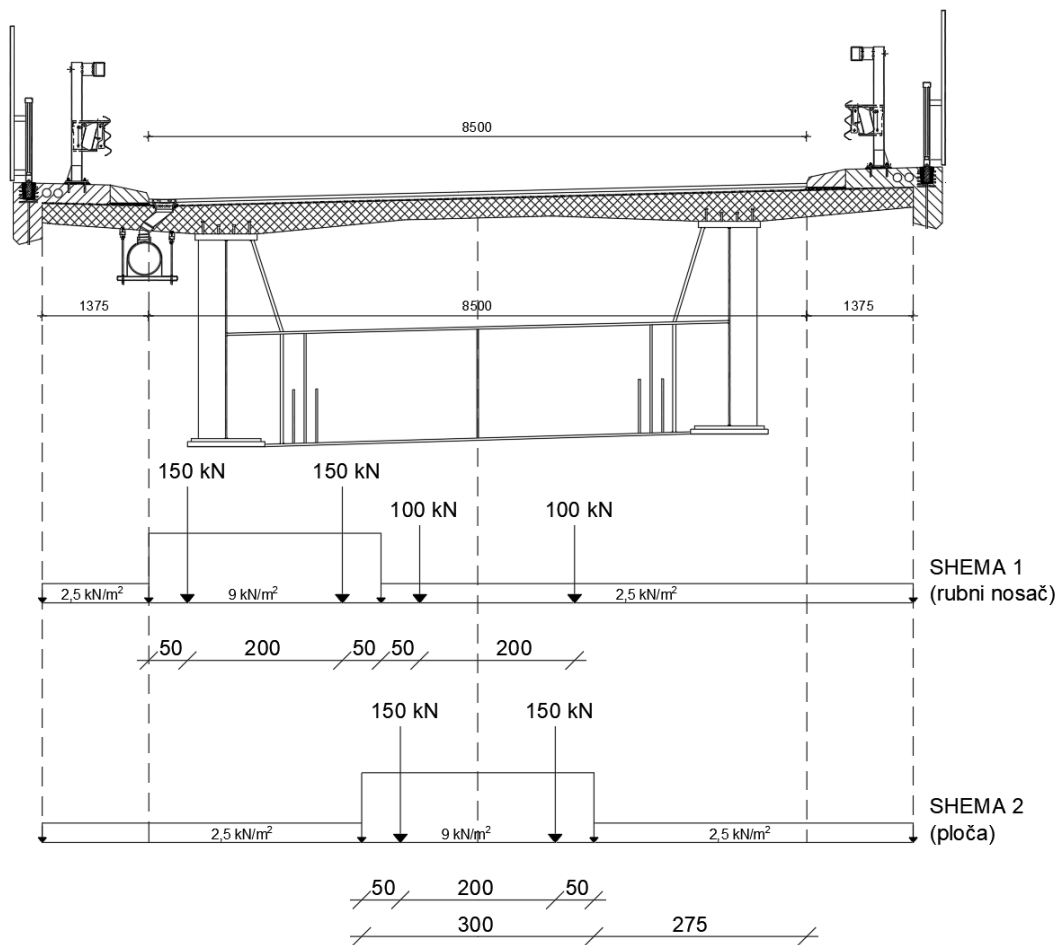
Položaj glavnog prometnog traka ovisi o konstrukcijskom elementu za koji tražimo kritičnu vrijednost rezne sile za dimenzioniranje. Položaj teškog vozila (glavnog prometnog traka) u poprečnom smjeru može se tako mijenjati kako bi se odredila maksimalna vrijednost mjerodavnog učinka za dimenzioniranje. [5]

Elementi za koje tražimo mjerodavne sheme prometnog opterećenja:

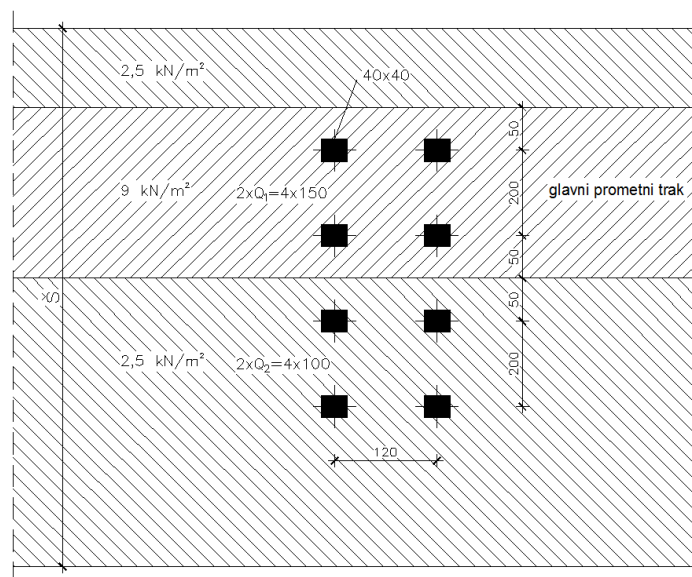
1. glavni nosač (max i min  $M_y$ )

a) rubni nosač → SHEMA 1

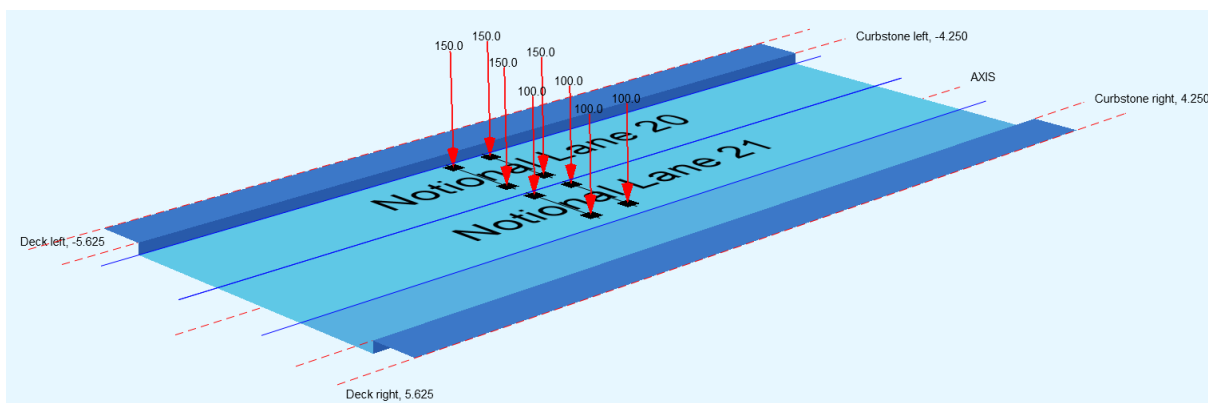
2. betonska ploča (max i min  $M_y$ ) → SHEMA 2



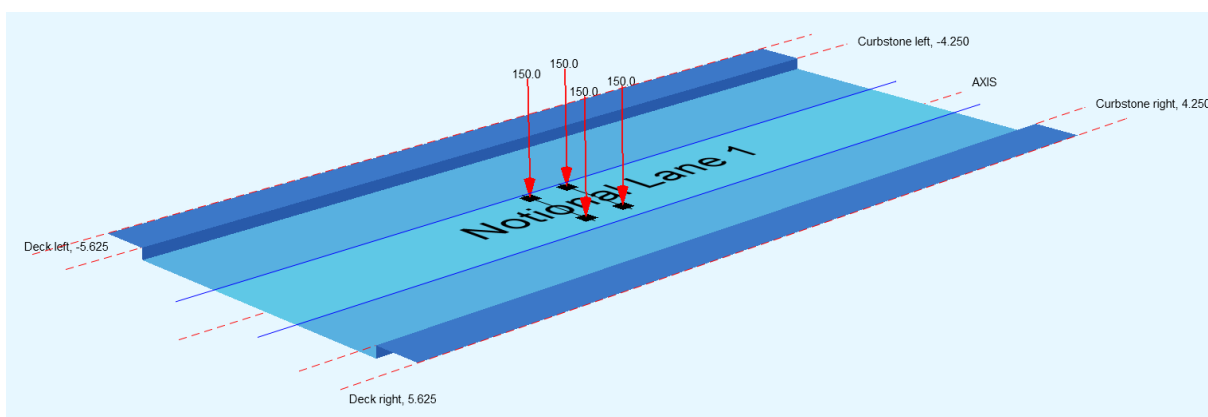
Slika 124. Sheme prometnog opterećenja



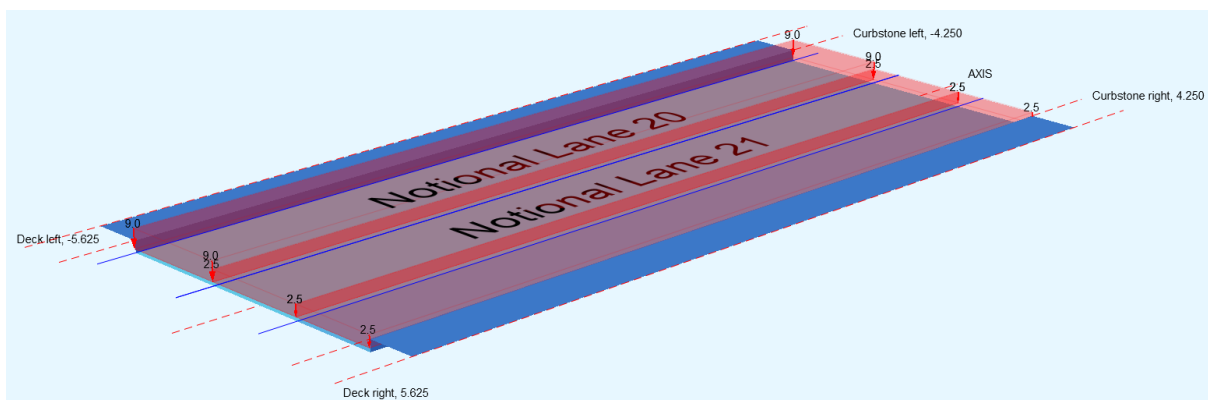
Slika 125. Uzdužni i tlocrtni raspored prometnog opterećenja [1]



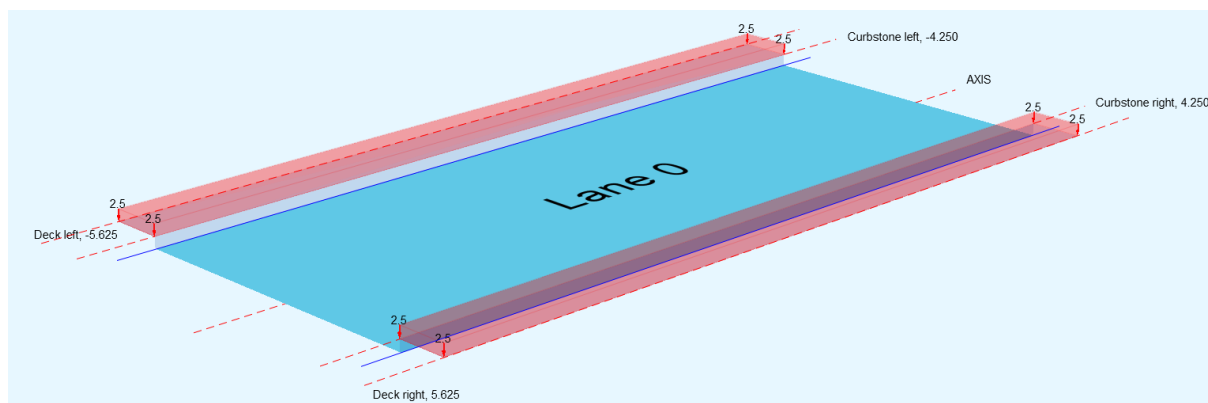
Slika 126. Tandem vozila, LM1, shema 1, SOFiSTiK



Slika 127. Tandem vozila, LM1, shema 2, SOFiSTiK



Slika 128. Kontinuirano opterećenje prometnih trakova, LM1, SOFiSTiK



Slika 129. Kontinuirano opterećenje hodnika, LM1, SOFiSTiK

**Kočenje:**

Sila kočenja može djelovati na mostu bilo gdje duž glavnog prometnog traka.

**Tablica 7. Parametri za izračun sile kočenja [1]**

$\alpha_{Q1}$ – koeficijent redukcije opterećenja teškog vozila	$\alpha_{Q1}=1,0$
$\alpha_{q1}$ – koeficijent redukcije opterećenja kontinuiranog opterećenja	$\alpha_{q1} = 1,0$
q – kontinuirano opterećenje u 1. traci	q =9,0 kN/m <sup>2</sup>
Q <sub>1k</sub> – osovinsko opterećenje u 1.traci	Q <sub>1k</sub> = 300 kN
w <sub>I</sub> – širina 1.trake	w <sub>I</sub> = 3,0 m
L – duljina mosta	L= 214,0 m

$$Q_{1k} = 0,6 \cdot \alpha_{Q1} \cdot 2 \cdot Q_{1k} + 0,1 \cdot \alpha_{Q1} \cdot q_{1k} \cdot w_I \cdot L$$

$$Q_{1k} = 0,6 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 300 + 0,1 \cdot 1 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 214 = 937,8 \text{ kN}$$

$$900 \text{ kN} \leq Q_{1k} = 937,8 \text{ kN} \rightarrow Q_{1k} = 900 \text{ kN}$$

Sila pokretanja po iznosu je jednaka sili kočenja, a djeluje u suprotnom smjeru.

## 9.4. Temperatura

### 9.4.1. Jednolika temperatura

Iz karte najviših i najnižih temperatura zraka za lokaciju mosta u Splitu očitane su vrijednosti [3]:

$$T_{\max} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\min} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Korištenjem dijagrama i linije za vrstu nosača (linija 2) očitane su vrijednosti maksimalne i minimalne temperature mosta [3]:

$$T_{e,\max} = 44 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{e,\min} = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Najveća razlika negativne računске temperature mosta je:

$$\Delta T_{N,\text{con}} = -(T_0 - T_{e,\min}) = -(15 - (-5)) = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

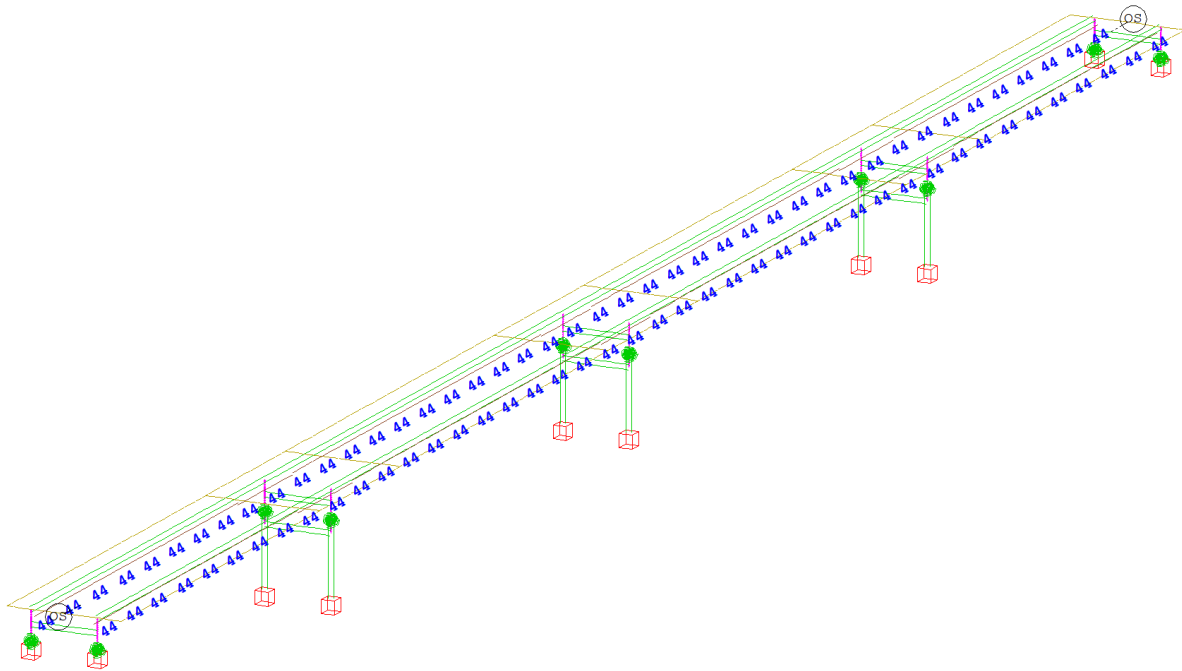
Najveća razlika pozitivne računске temperature mosta je:

$$\Delta T_{N,\text{exp}} = T_0 - T_{e,\max} = 44 - 15 = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

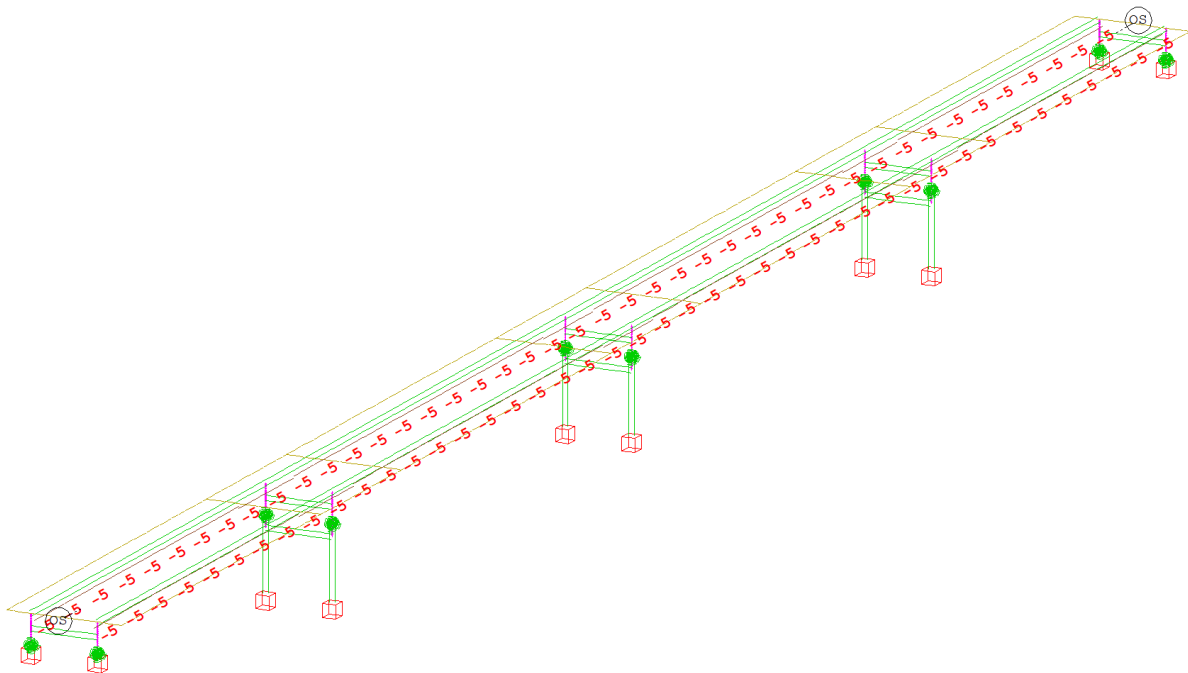
Temperatura mjerodavne za proračun pomaka prijelaznih naprava i ležajeva te reakcija ležajeva su:

$$\Delta T_{N,\text{con,bear}} = \Delta T_{N,\text{con}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = -20 - 20 = -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{N,\text{exp,bear}} = \Delta T_{N,\text{exp}} + 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 29 + 20 = 49 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

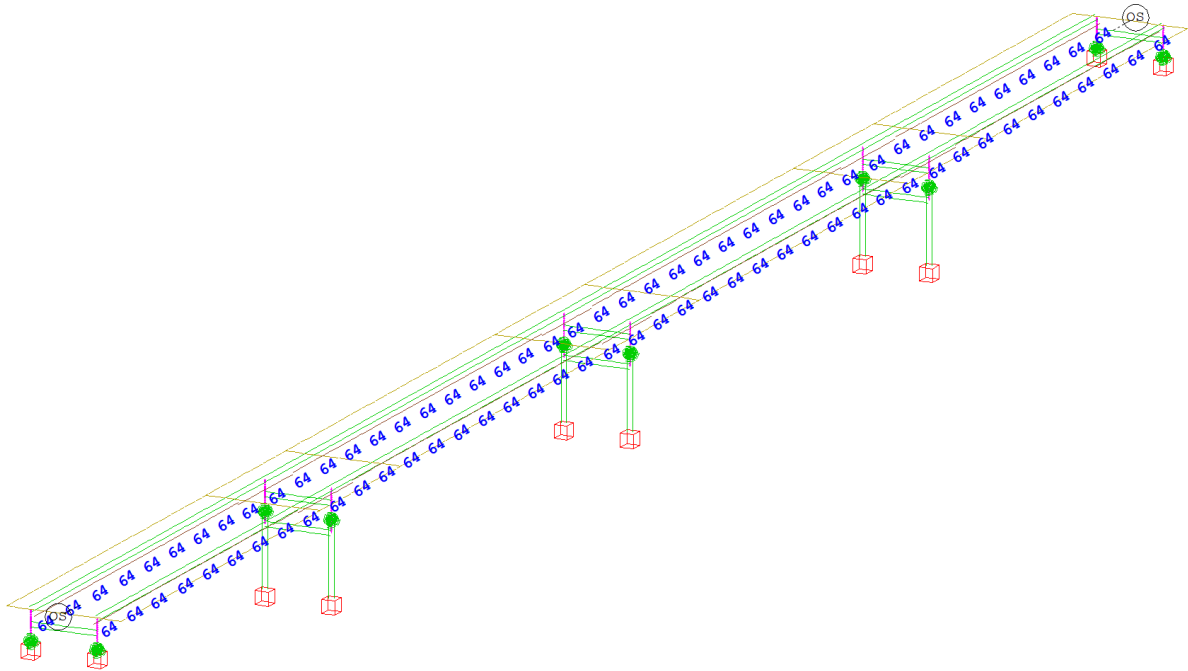


Slika 130. Prikaz jednolike temperature zagrijavanja mosta, SOFiSTiK

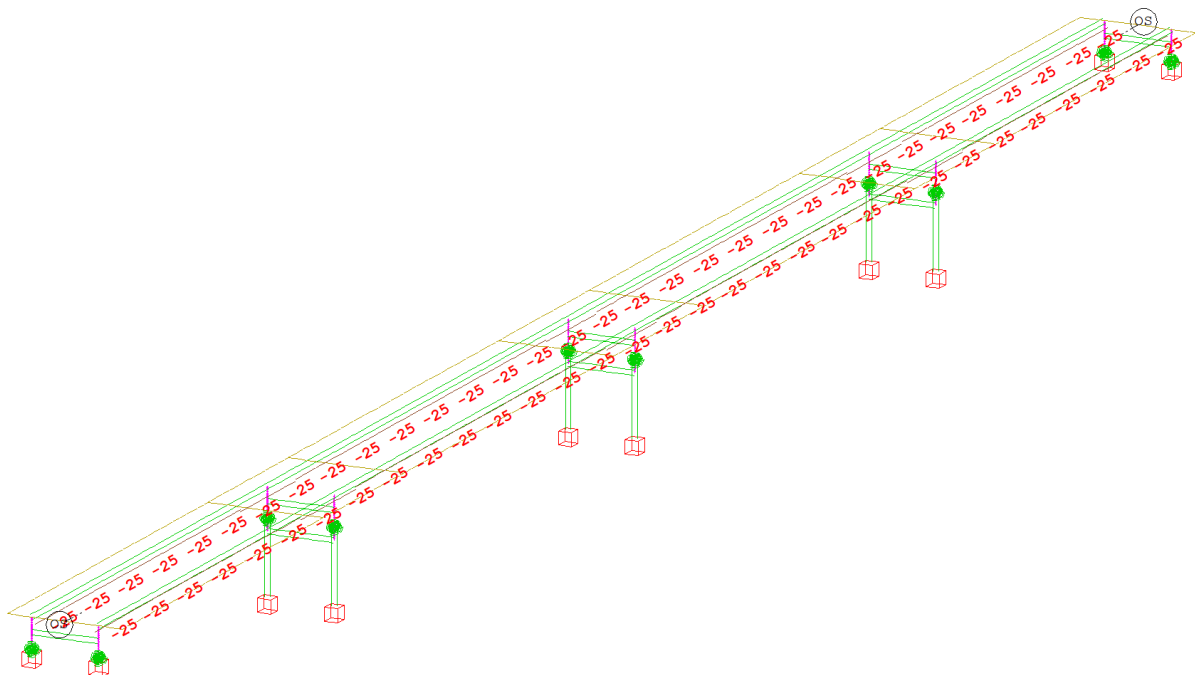


Slika 131. Prikaz jednolike temperature hlađenja mosta, SOFiSTiK





Slika 132. Jednolika temperatura zagrijavanja ležajeva i prijelaznih naprava, SOFiSTiK



Slika 133. Jednolika temperatura hlađenja za ležajeve i prijelazne naprave, SOFiSTiK

### 9.4.2. Nejednolika linearno promjenjiva temperatura

Tablica 8. Nejednolika linearno promjenjiva temperatura

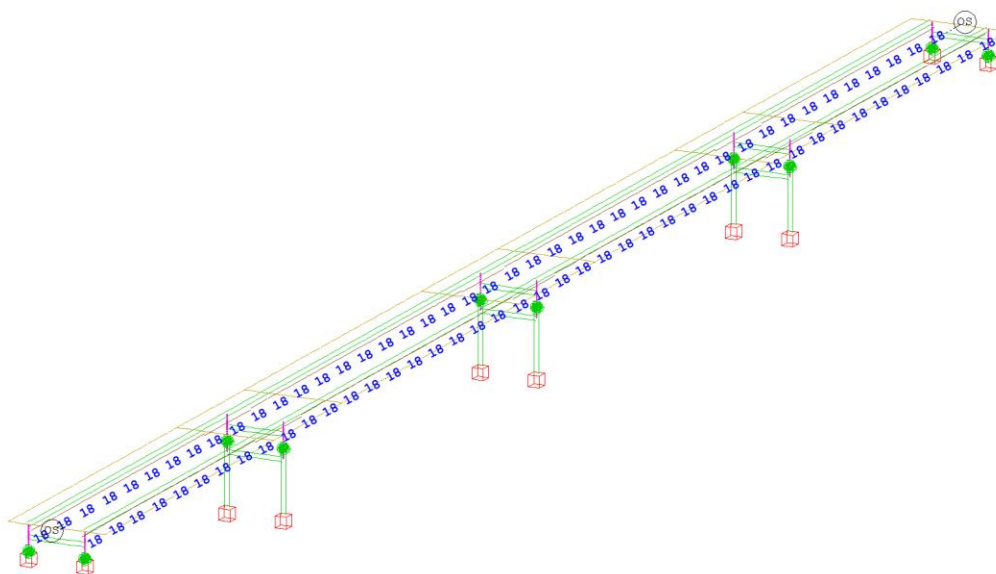
Tip sklopa	Gornji dio nosača topliji od donjeg ( $\Delta T_{M,heat}$ ) [ $^{\circ}C$ ]	Donji dio nosača topliji od gornjeg ( $\Delta T_{M,cool}$ ) [ $^{\circ}C$ ]
Spregnuti nosač	15 $k_{sur(8cm)} = 1,0$	18 $k_{sur(8cm)} = 1,0$
	$15 \cdot 1,0 = 15$	$18 \cdot 1,0 = 18,0$

### 9.4.3. Kombinacija jednolike i nejednolike linearno promjenjive temperature

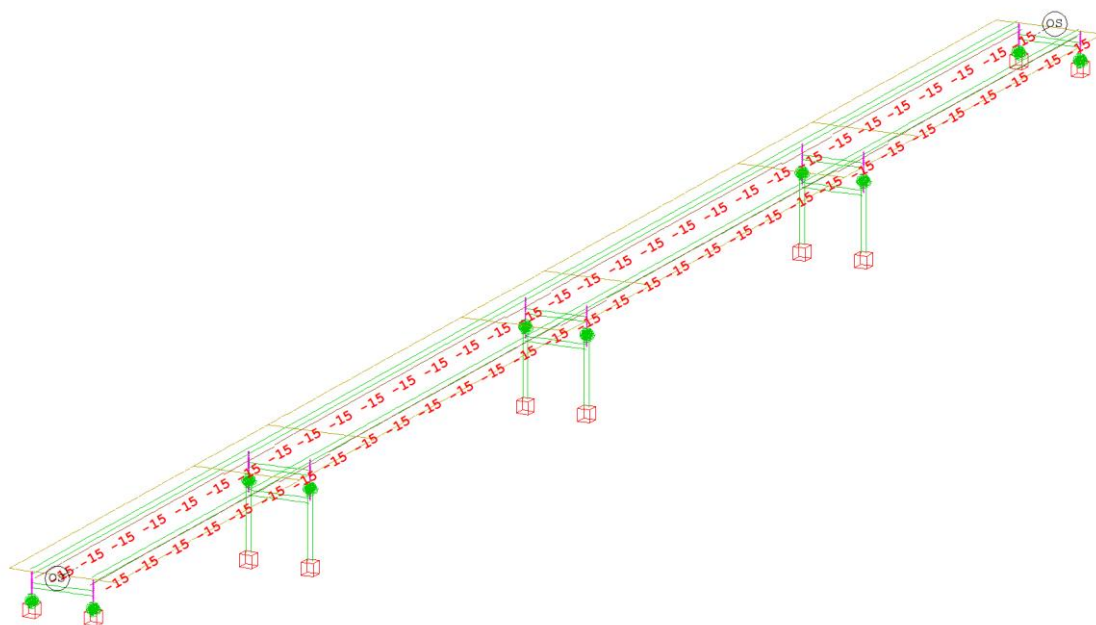
U nekim slučajevima potrebno je uzeti u obzir istodobno djelovanje jednolike i nejednolike temperaturne komponente, pa se koristi nepovoljniji od slijedećih učinaka [1]:

$$\Delta T_{M,heat} + \omega_N \Delta T_{N,exp} \text{ ili } \Delta T_{M,cool} + \omega_N \Delta T_{N,con} , \omega_N = 0,35$$

$$\omega_N \Delta T_{M,heat} + \Delta T_{N,exp} \text{ ili } \omega_N \Delta T_{M,cool} + \Delta T_{N,con} , \omega_N = 0,75$$



Slika 134. Prikaz nejednolike temperature mosta (donji dio nosača topliji), SOFiSTiK

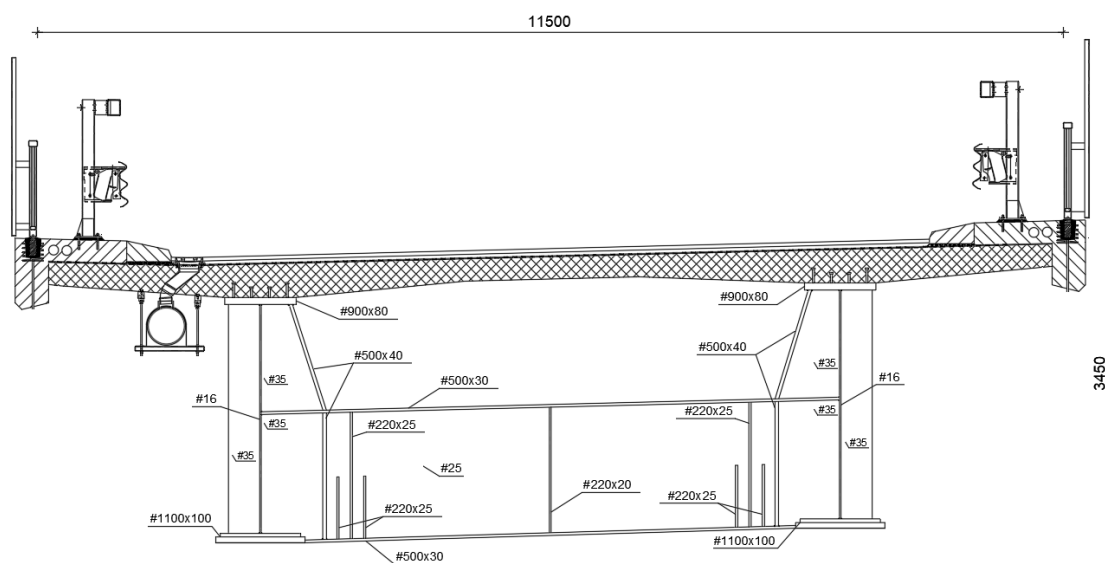


Slika 135. Prikaz nejednolike temperature mosta (gornji dio nosača topliji), SOFiSTiK

## 9.5. Opterećenje vjetrom

### 9.5.1. Vjetar na rasponski sklop poprečno

#### Neopterećeni most



Slika 136. Slika neopterećenog mosta

$$F_{w(x)} = q_b \cdot c_e(Z) \cdot c_{fx,0} \cdot h_{ref}$$

Iz vjetrovne karte Hrvatske za lokaciju mosta Split očitano je [4]:

$$v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$$

Osnovna brzina vjetra:

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} = 25 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 25 \text{ m/s}$$

Osnovni pritisak vjetra:

$$q_b = \frac{\delta}{2000} \cdot v_b^2 = \frac{1,25}{2000} \cdot 25^2 = 0,39 \text{ m/s}^2$$

Iz dijagrama prema visini ( $z = 7 \text{ m}$ ) na kojoj se nalazi rasponski sklop od terena i prema kategoriji terena (kategorija 0) očitano je koeficijent izloženosti  $c_e(z) = 2,75$ .

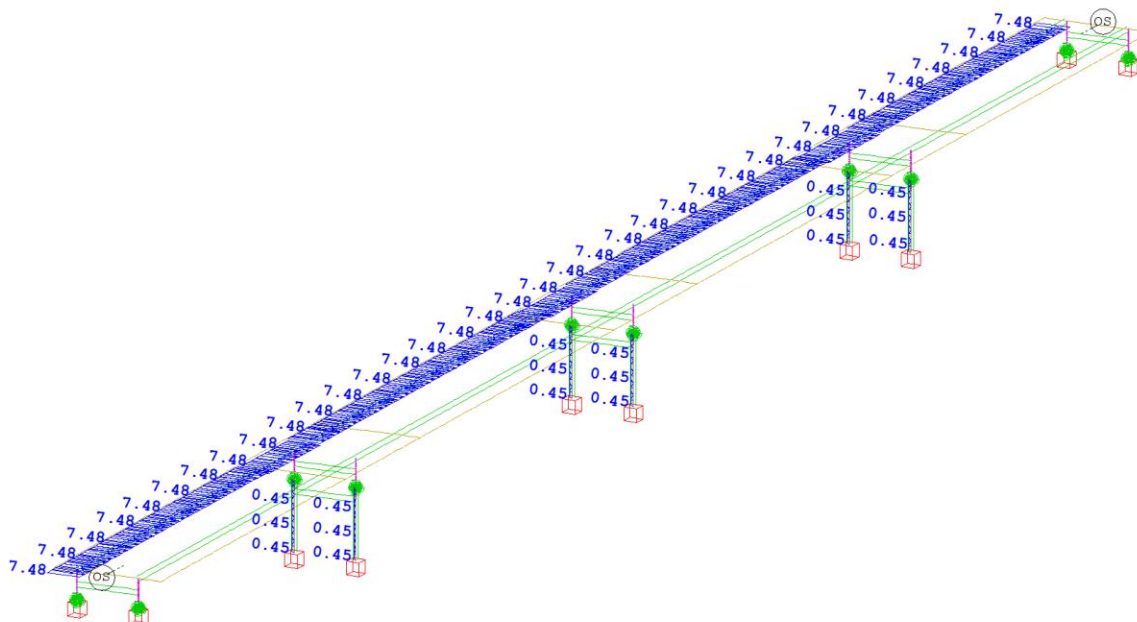
Koeficijent oblika  $c_{fx,0}$ :

$$\frac{b}{d_{tot}} = \frac{11,50}{3,45} = 3,33 \rightarrow c_{fx,0} = 1,50 \text{ (očitano iz dijagrama)}$$

Referentna visina sklopa na koju djeluje pritisak vjetra  $h_{ref}$ :

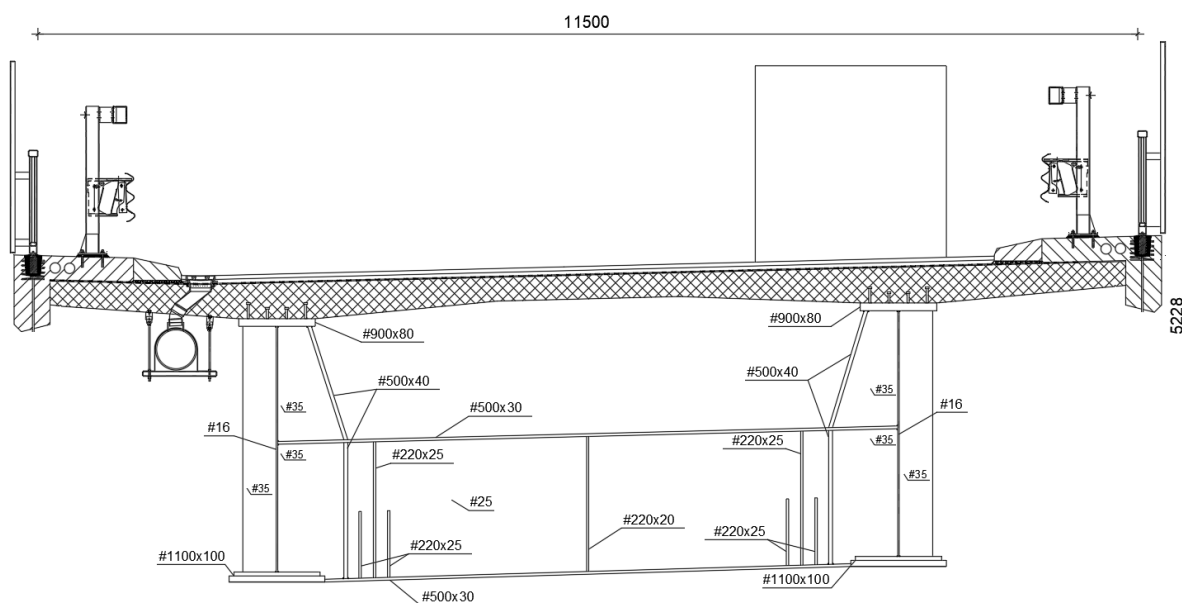
$$h_{ref} = d_{tot} + 1,2 = 3,45 + 1,2 = 4,65 \text{ m}$$

$$F_{w(x)} = 0,39 \cdot 2,75 \cdot 1,5 \cdot 4,65 = 7,48 \text{ kN/m}$$



Slika 137. Prikaz opterećenja vjetrom poprečno na neopterećeni most, SOFiSTiK

Opterećeni most



Slika 138. Slika opterećenog mosta

$$F_w(x) = q_p \cdot c_{fx,0} \cdot h_{ref}$$

Vršni pritisak vjetra  $q_p$ :

$$q_p = \min\{0,64 ; q_b \cdot C_e(z)\} = \{0,64 ; (0,39 \cdot 2,75 = 1,07)\} = 0,64 \text{ kN/m}^2$$

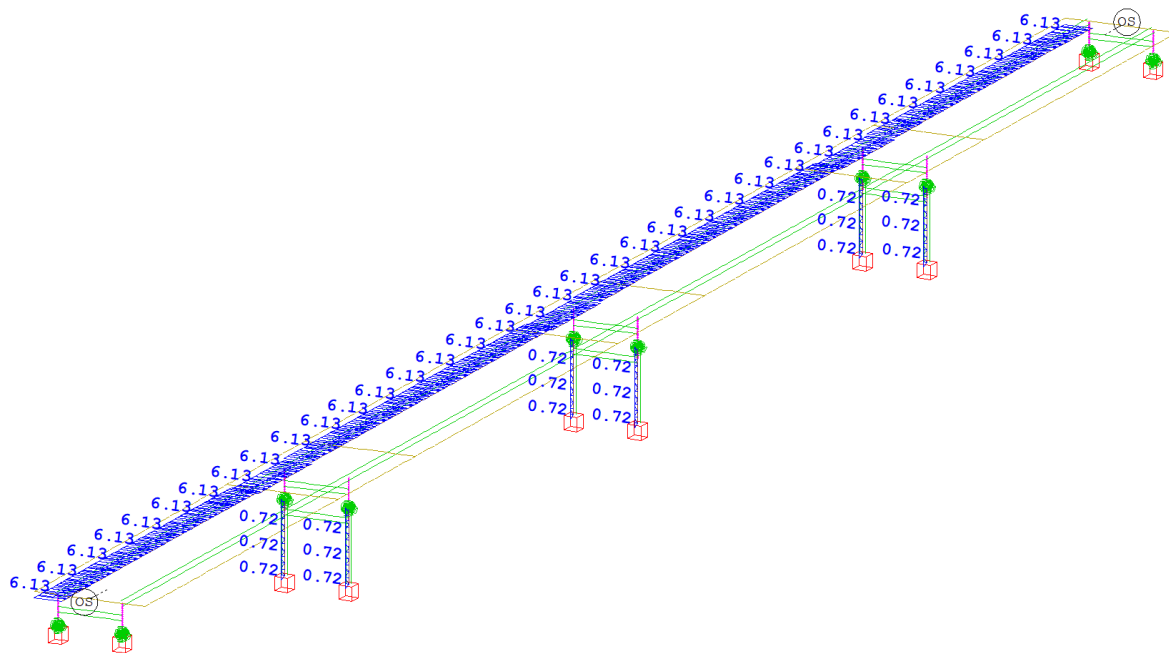
Koeficijent oblika  $c_{fx,0}$ :

$$\frac{b}{d_{tot}} = \frac{11,50}{5,23} = 2,20 \rightarrow C_{fx,0} = 1,83 \text{ (očitano iz dijagrama)}$$

Referentna visina sklopa na koju djeluje pritisak vjetra  $h_{ref}$ :

$$h_{ref} = d_{tot} = 5,23 \text{ m}$$

$$F_w(x) = 0,64 \cdot 1,83 \cdot 5,23 = 6,13 \text{ kN/m}$$

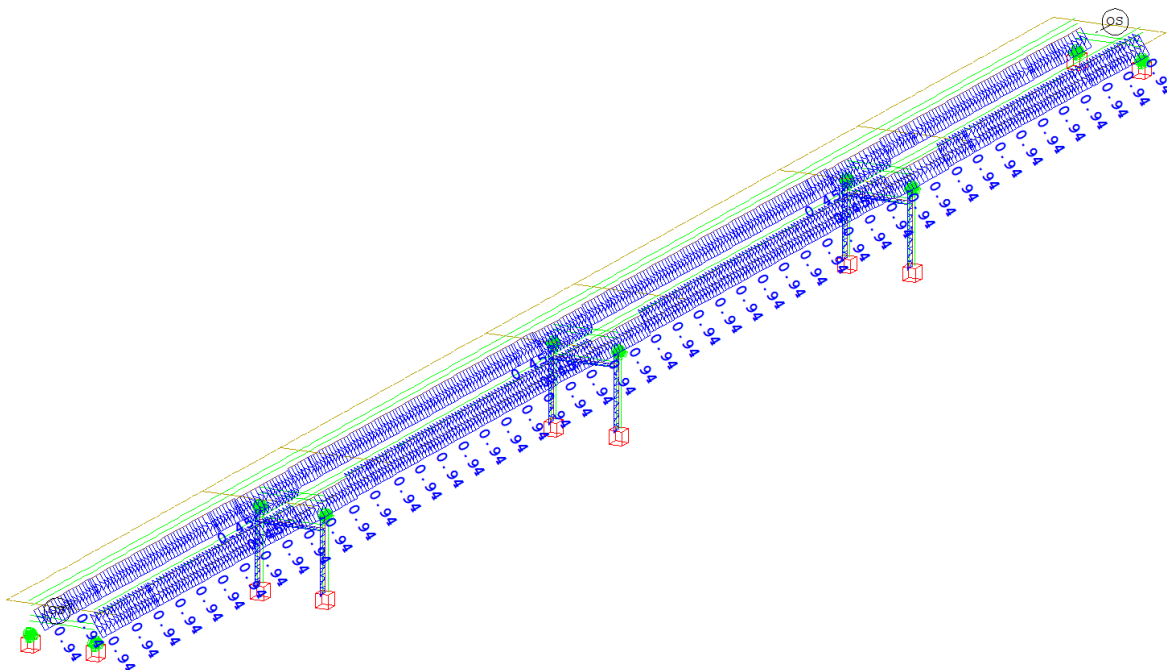


Slika 139. Prikaz opterećenja vjetrom poprečno na opterećeni most, SOFiSTiK

## 9.5.2. Vjetar na rasponski sklop uzdužno

### Neopterećeni most

$$F_{W(y),neopt} = 0,25 \cdot F_{W(x),neopt} = 0,25 \cdot 7,48 = 1,87 \text{ kN/m}$$



Slika 140. Prikaz opterećenja vjetrom uzdužno na neopterećeni most, SOFiSTiK

### Opterećeni most

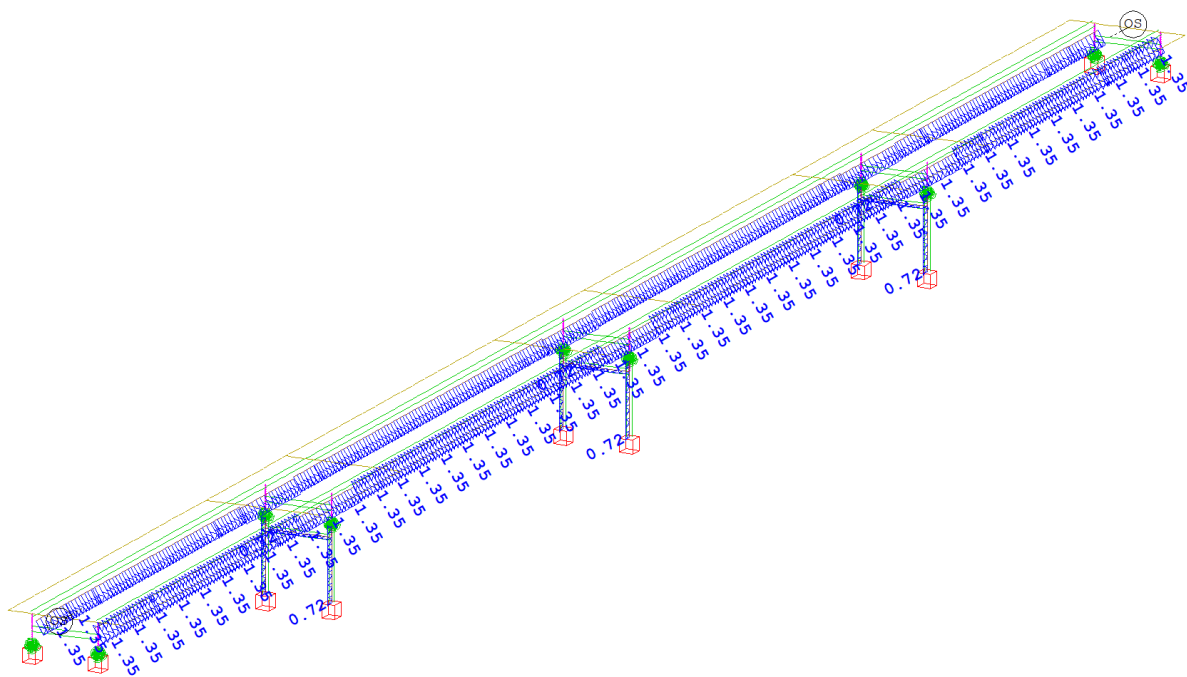
$$F_{W(y),opt} = 0,25 \cdot F_{W(x),opt} + 0,5 \cdot q_p \cdot c_{fx,0} \cdot h_{ref,vozilo}$$

$$F_{W(y),opt} = 0,25 \cdot 6,13 + 0,5 \cdot 0,64 \cdot 1,83 \cdot 2,0 = 2,70 \text{ kN/m}$$

$q_p$  –vršni pritisak vjetra na opterećen most

$$c_{fx,0} = 1,83$$

$$h_{ref,vozilo} = 2,0 \text{ m}$$



Slika 141. Prikaz opterećenja vjetrom uzdužno na opterećeni most, SOFiSTiK

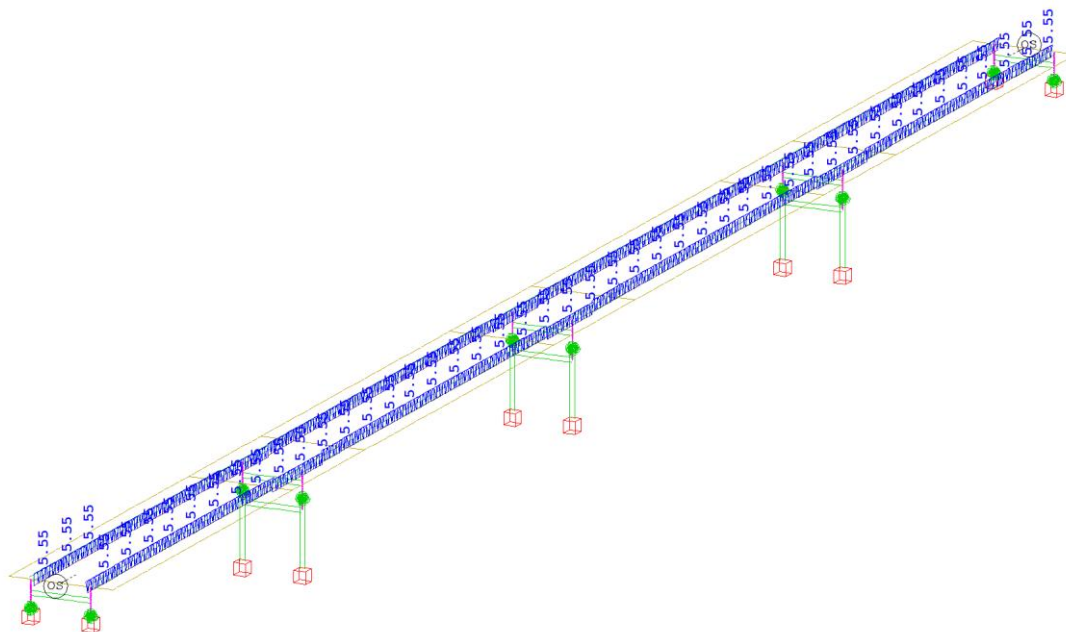
### 9.5.3. Vjetar na rasponski sklop vertikalno

#### Neopterećeni most

$$F_{w(z),neopt} = q_b \cdot c_e(Z) \cdot c_{f,z} \cdot b = 0,39 \cdot 2,75 \cdot 0,9 \cdot 11,50 = 11,10 \text{ kN/m}$$

$$c_{f,z} = 0,9$$

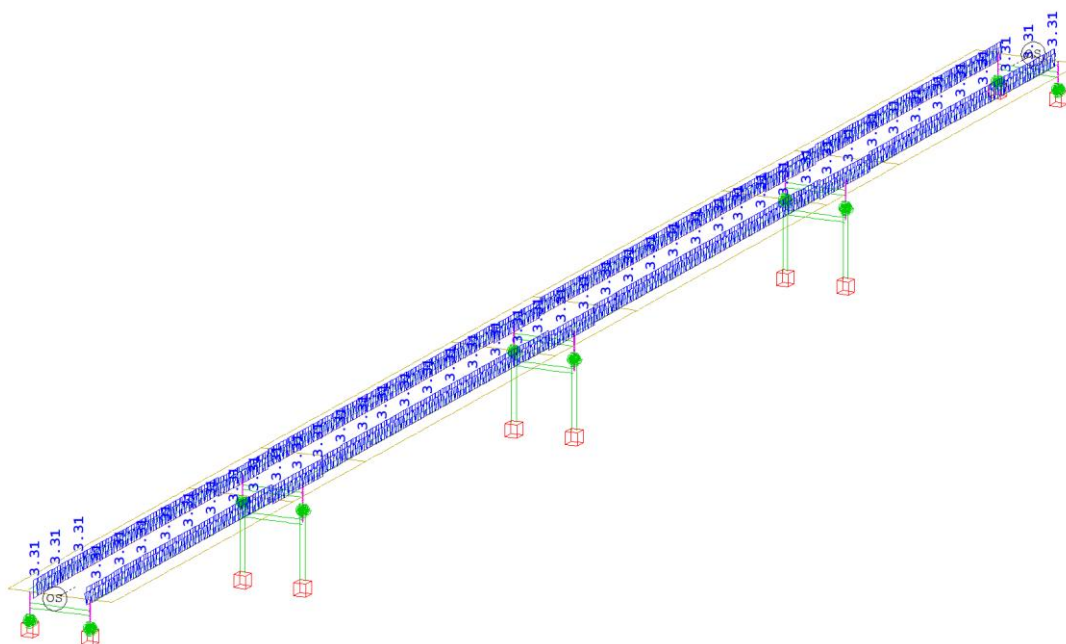




Slika 142. Prikaz opterećenja vjetrom vertikalno na neopterećeni most, SOFiSTiK

Opterećeni most

$$F_{w(z),opt} = q_b \cdot c_{f,z} \cdot b = 0,64 \cdot 0,9 \cdot 11,50 = 6,62 \text{ kN/m}$$



Slika 143. Prikaz opterećenja vjetrom vertikalno na opterećeni most, SOFiSTiK

### 9.5.4. Vjetar na stupove

S obzirom da su stupovi kružnog poprečnog presjeka provodi se samo jedan proračun za oba smjera

#### Opterećeni most

$$F_w = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot b$$

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0,75 \cdot 1,0 = 0,75$$

$$F_w = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,75 \cdot 0,64 \cdot 1,5 = 0,72 \text{ kN/m}$$

#### Neopterećeni most

$$F_w = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot b$$

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0,77 \cdot 1,0 = 0,77$$

$$F_w = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,77 \cdot 0,39 \cdot 1,5 = 0,45 \text{ kN/m}$$

## 9.6. Analiza potresnog opterećenja

Akceleracija tla za povratni period  $T_p = 475$  godina očitano iz karte  $a_g = 0,22 \text{ g}$  [10].

Određena kategorija tla – A

Node	TM			RM			RMB [tm2]
	X[t]	Y[t]	Z[t]	X[tm2]	Y[tm2]	Z[tm2]	
total <sup>1</sup>	3739.984	3739.984	3739.984	2.085E+03	2.063E+03	5.231E+01	-
	S[m] <sup>2</sup>			RM(S) <sup>3</sup>			
	107.000	0.000	0.299	5.536E+04	8.225E+00	-1.257E-01	
				8.225E+00	1.393E+07	-3.018E+00	
				-1.257E-01	-3.018E+00	1.397E+07	
active <sup>1</sup>	3734.321	3734.321	3734.321	2.085E+03	2.063E+03	5.129E+01	-
	S[m] <sup>2</sup>			RM(S) <sup>3</sup>			
	107.000	0.000	0.284	5.475E+04	8.225E+00	-1.195E-01	
				8.225E+00	1.391E+07	-2.631E+00	
				-1.195E-01	-2.631E+00	1.395E+07	

Slika 144. Prikaz zbroja masa i momenata inercije, SOFiSTiK Report Browser

Posmična sila pri dnu „base-shear“ (BS) iznosi:

- BS x smjera: 9,00 %

$$\text{base shear}_x = \frac{\text{sum of forces}_x}{\text{sum of masses}_x} = \frac{2453.4}{3739,98 \cdot 10} = 0,090 = 9,0 \%$$

LC	Z-1v1 [m]	Mode	Forces			Moments		
			PX[kN]	PY[kN]	PZ[kN]	MX[kNm]	MY[kNm]	MZ[kNm]
901	-50.000	CQC <sup>1</sup>	2453.4	0.2	21.3	0.13	3658.42	18.66

Slika 145. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser

- BS y smjera: 15,10 %

$$\text{base shear}_y = \frac{\text{sum of forces}_y}{\text{sum of masses}_y} = \frac{4148,7}{3739,98 \cdot 10} = 0,151 = 15,10 \%$$

LC	Z-1v1 [m]	Mode	Forces			Moments		
			PX[kN]	PY[kN]	PZ[kN]	MX[kNm]	MY[kNm]	MZ[kNm]
904	-50.000	CQC <sup>1</sup>	0.2	4148.7	3.9	924.99	417.36	443864.44

Slika 146. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser

- BS z smjera: 9,30 %

$$\text{base shear}_z = \frac{\text{sum of forces}_z}{\text{sum of masses}_z} = \frac{2549,3}{3739,98 \cdot 10} = 0,093 = 9,30 \%$$

LC	Z-1v1 [m]	Mode	Forces			Moments		
			PX[kN]	PY[kN]	PZ[kN]	MX[kNm]	MY[kNm]	MZ[kNm]
909	-50.000	CQC <sup>1</sup>	10.9	1.9	2549.3	8.70	272680.00	204.77

Slika 147. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser

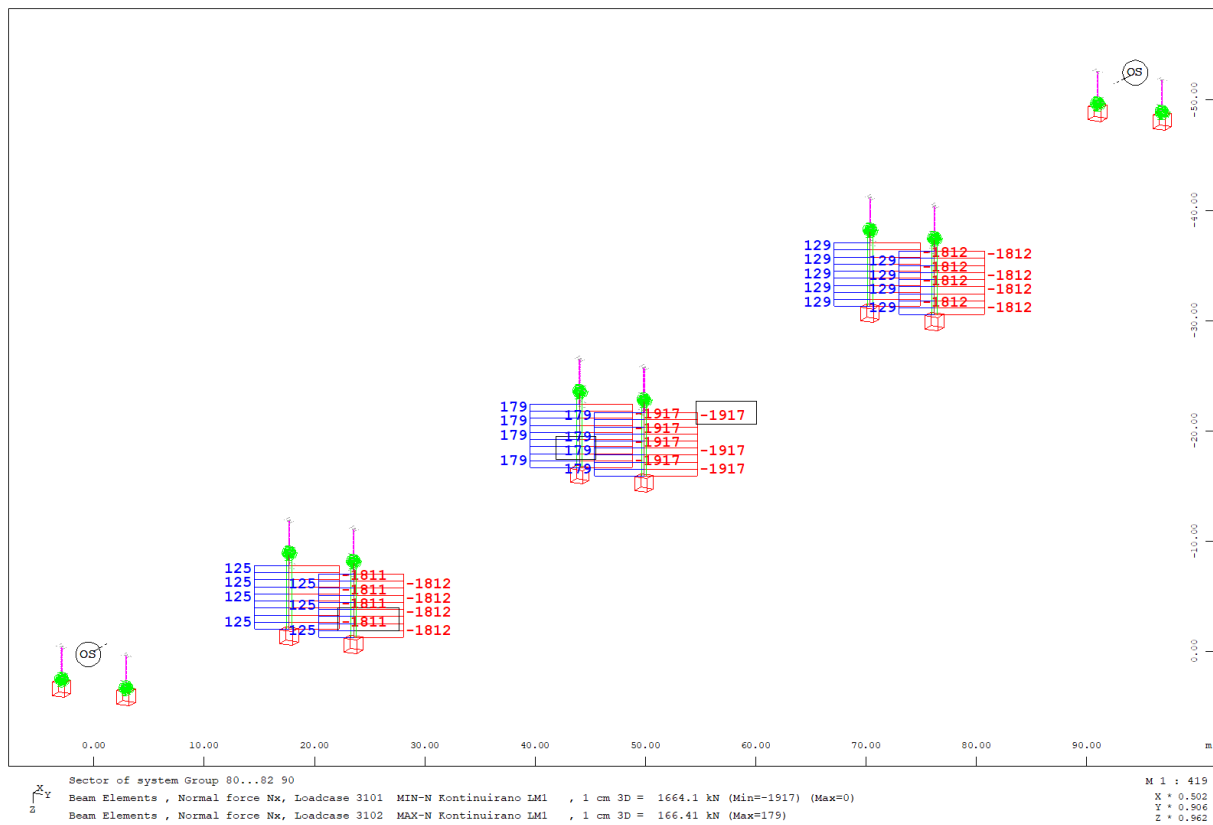
## 10. SILE I OPTEREĆENJA MOSTA OTVORENOG PRESJEKA S I NOSAČIMA

### 10.1. Rezne sile

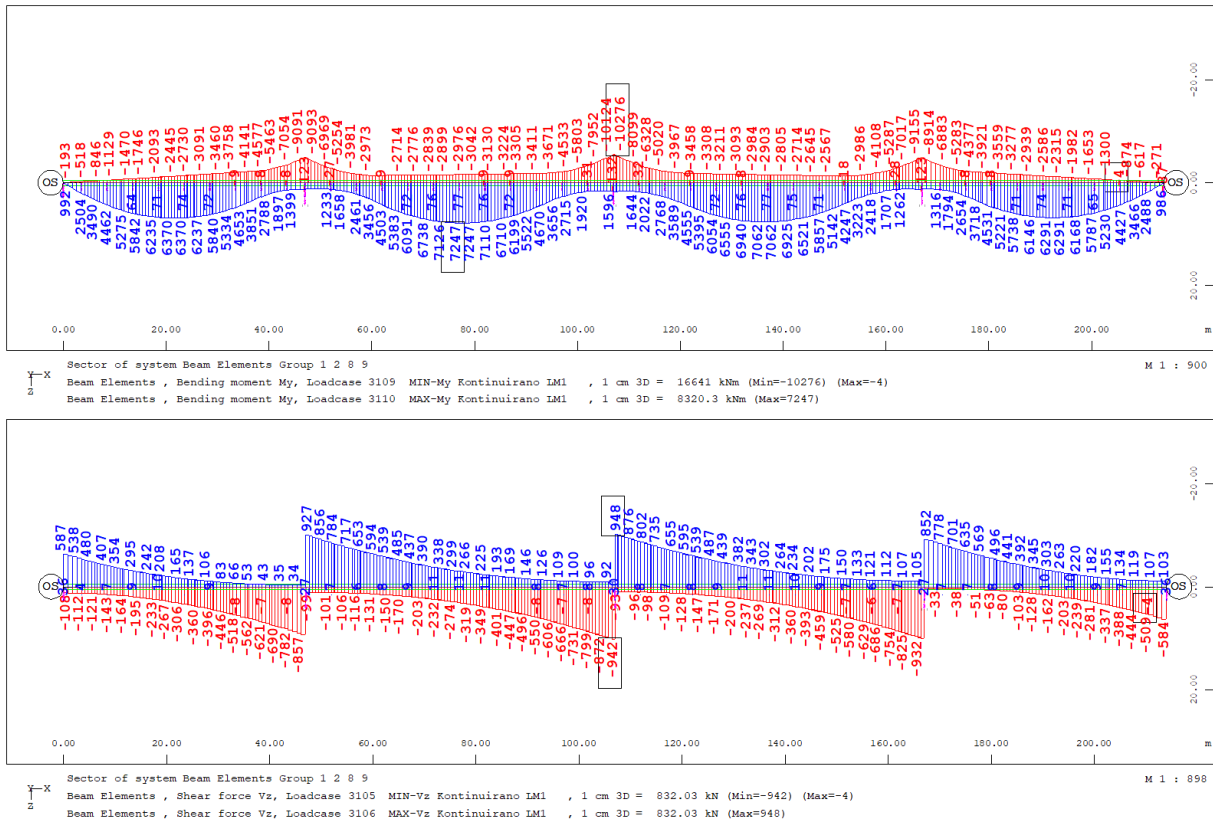
U nastavku su prikazane rezne sile i pomaci za rasponski sklop i stupove.

#### 10.1.1. Prometno opterećenje

Anvelope kontinuiranog kolnika:



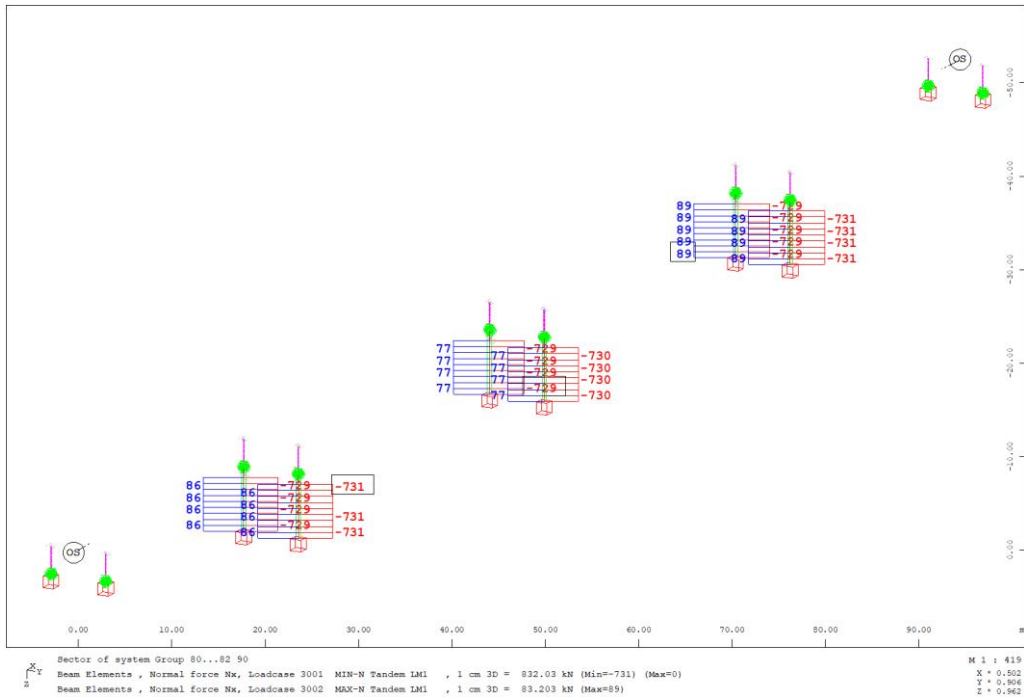
Slika 148. Uzdužna sila, SOFiSTiK



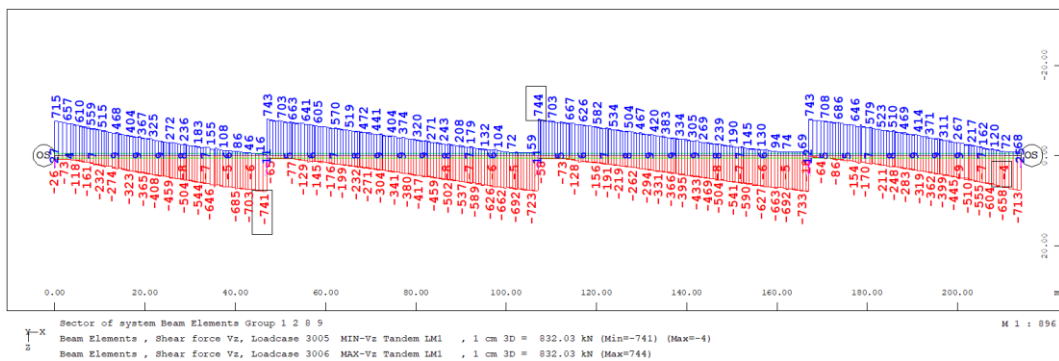
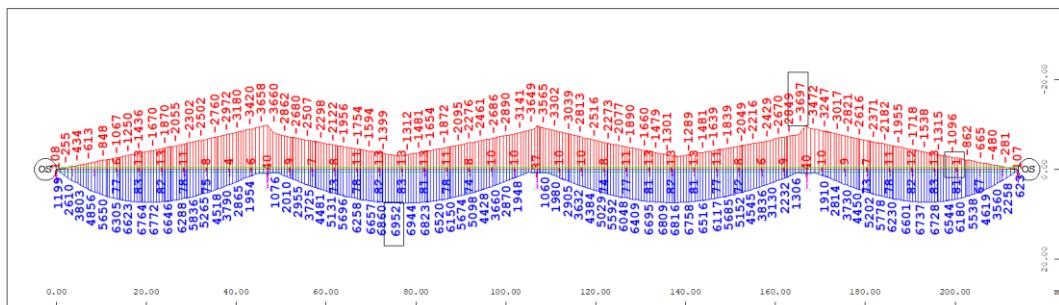
Slika 149. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK



Anvelopa tandema:

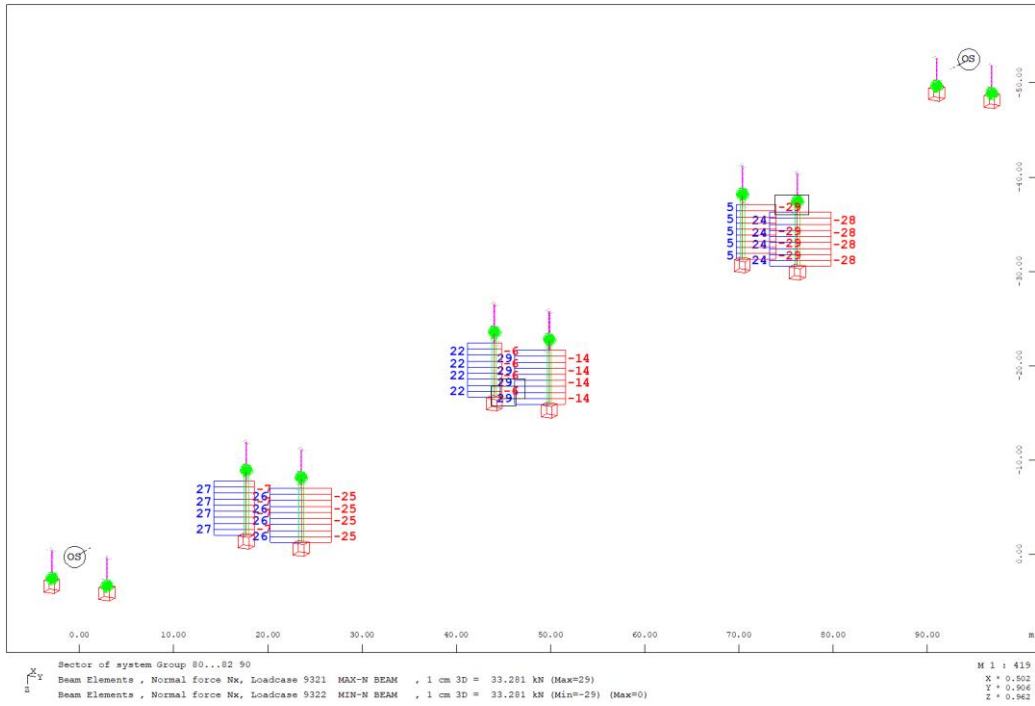


Slika 152. Uzdužna sila, SOFiSTiK

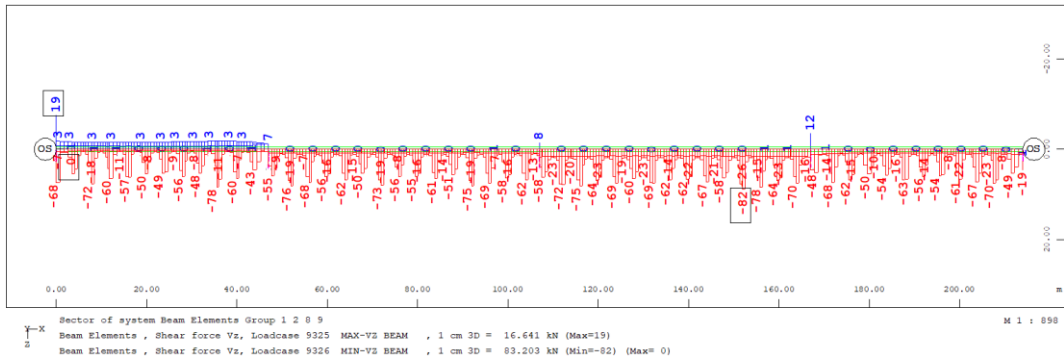
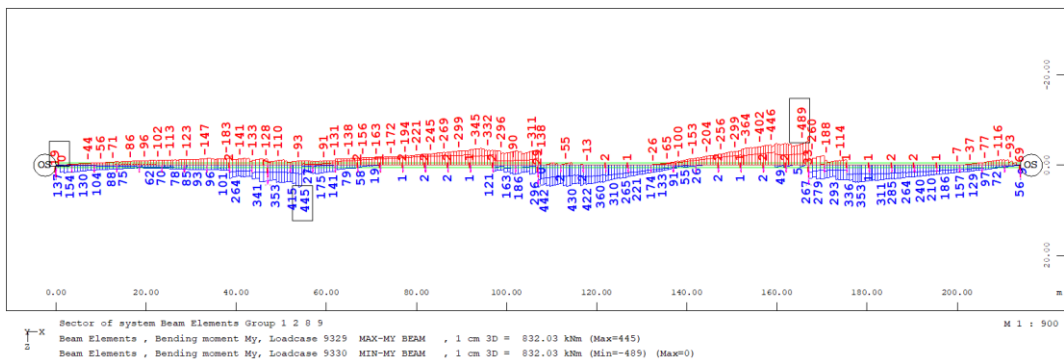


Slika 153. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK

Anvelopa kočenja:



Slika 154. Uzdužna sila, SOFiSTiK

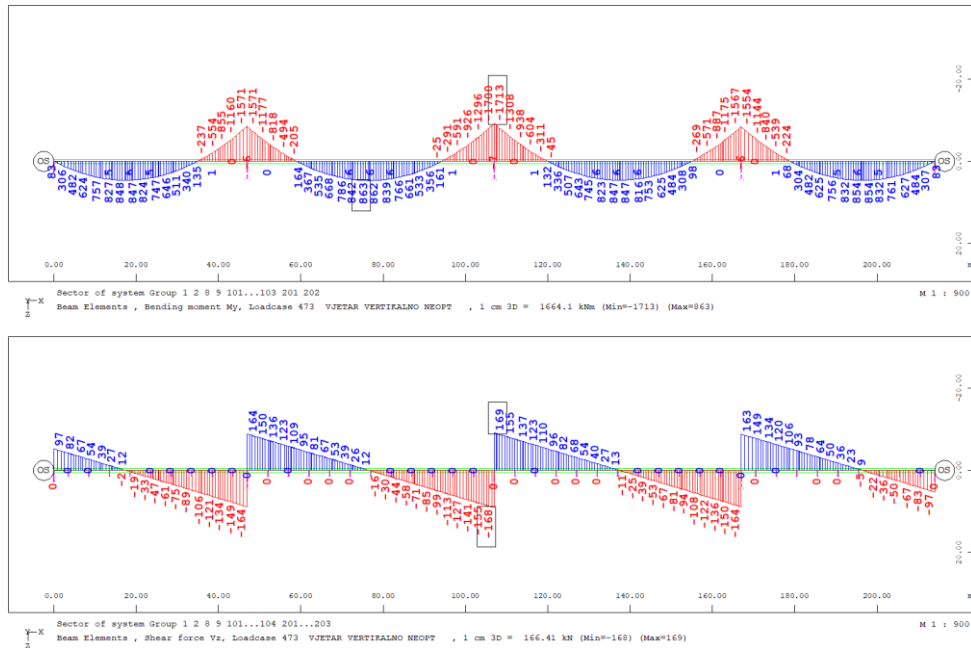


Slika 155. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK

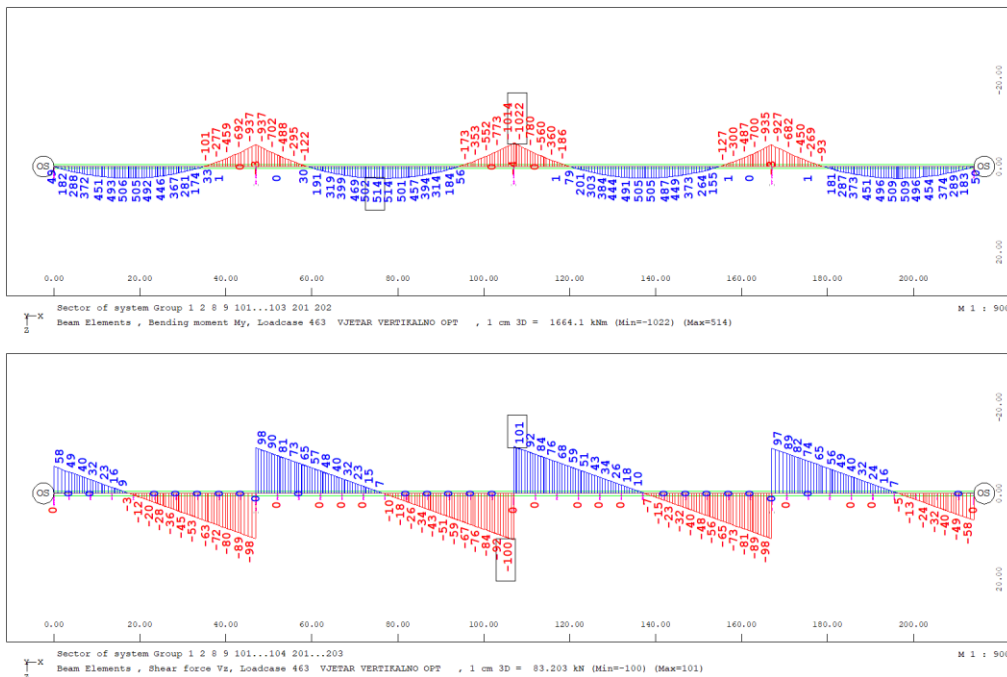


## 10.1.2. Opterećenje vjetrom

Vjetar vertikalno na rasponski sklop:

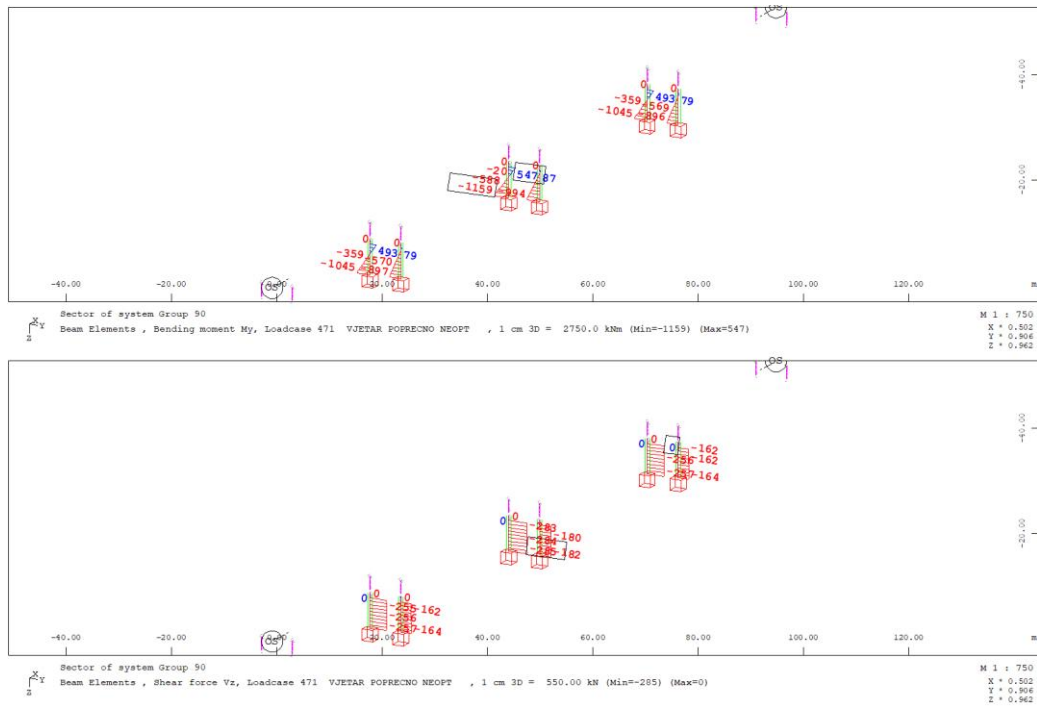


Slika 156. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK

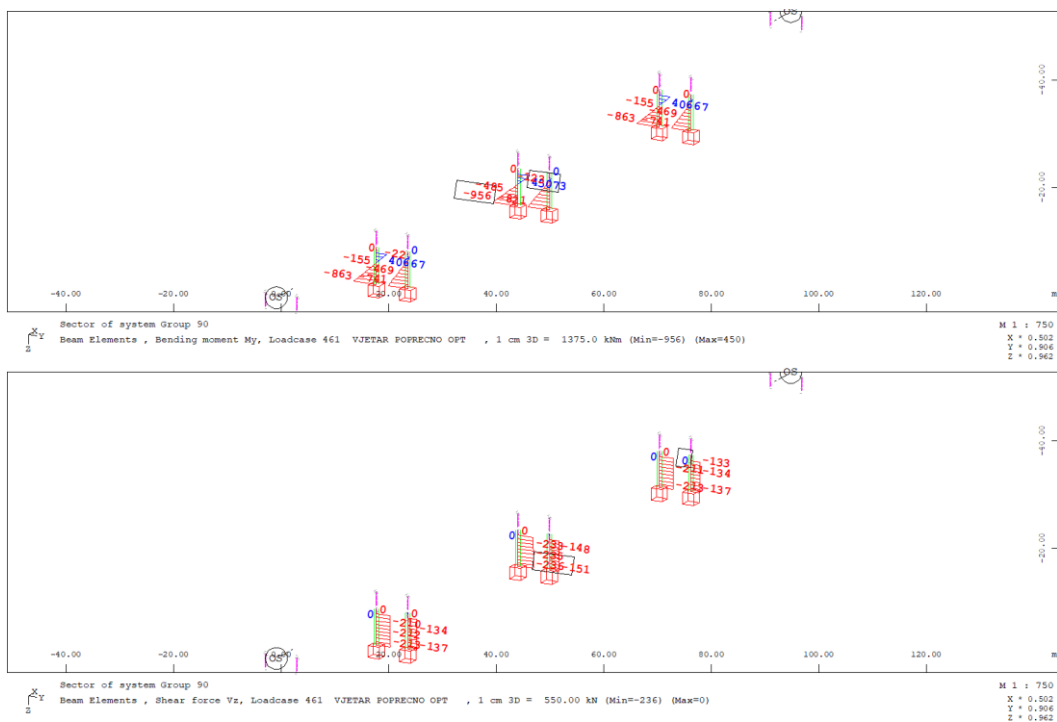


Slika 157. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK

Vjetar poprečno na stupove:

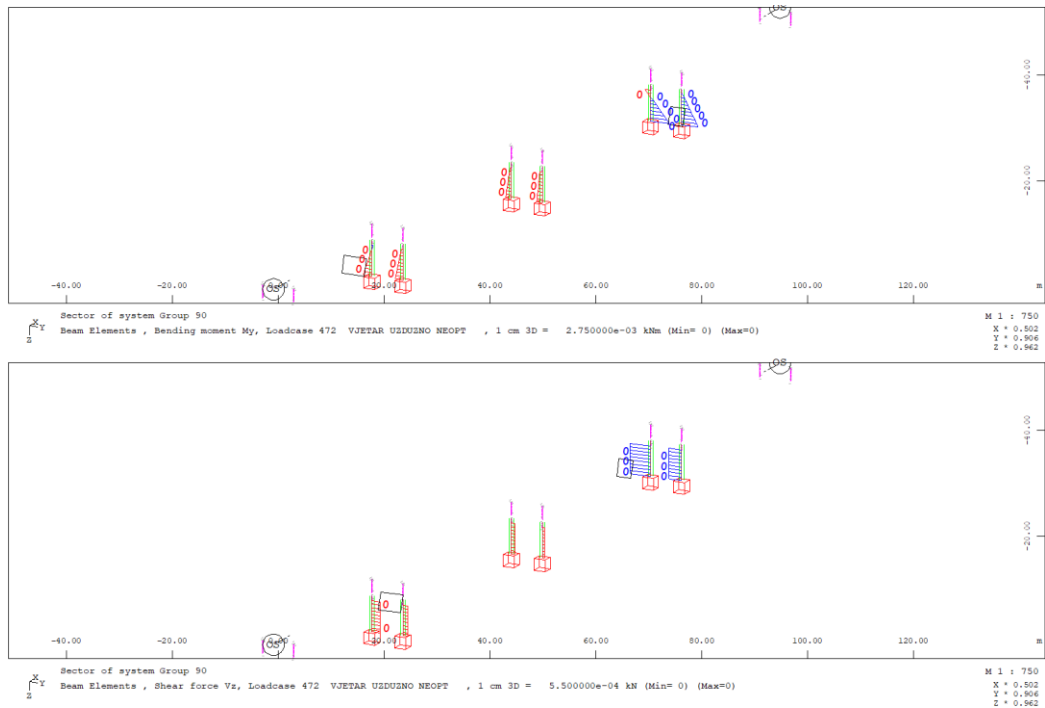


Slika 158. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK

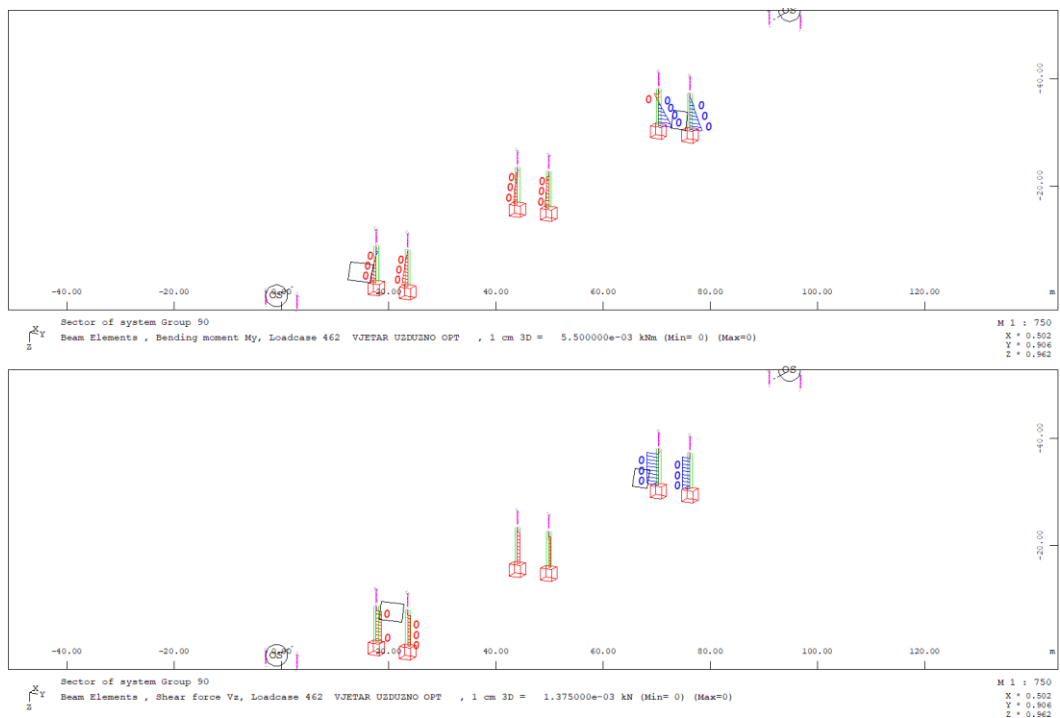


Slika 159. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK

Vjetar uzdužno na stupove:

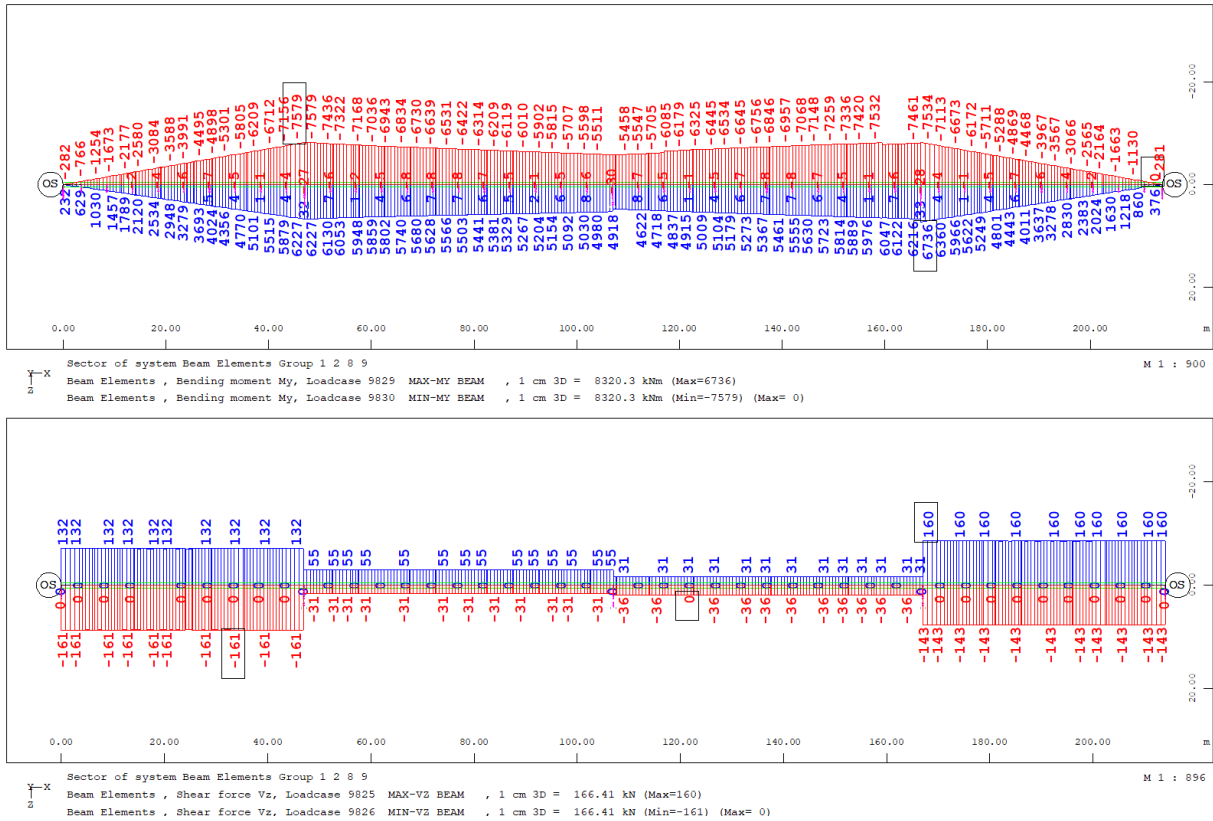


Slika 160. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK

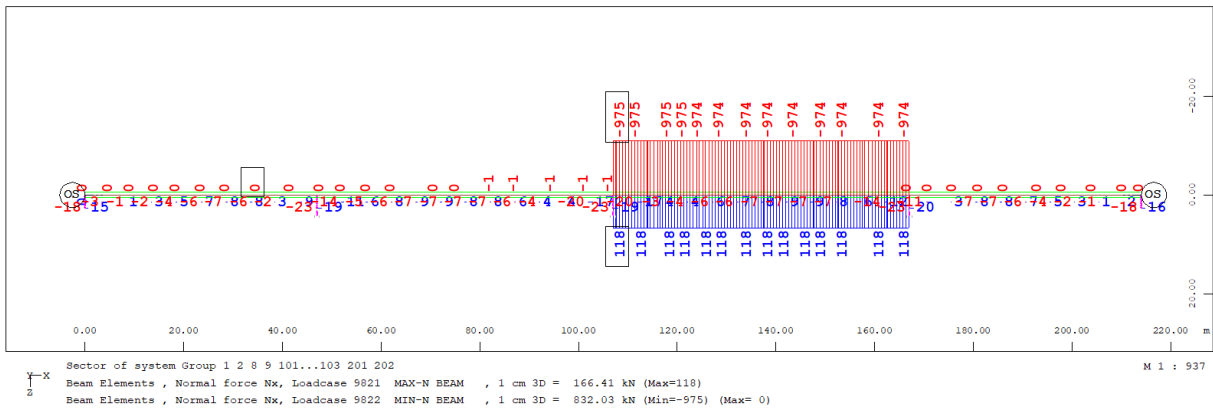


Slika 161. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK

10.1.3. Temperaturno opterećenje



Slika 162. Moment savijanja i poprečna sila za rasponski sklop, SOFiSTiK



Slika 163. Uzdužna sila za rasponski sklop, SOFiSTiK

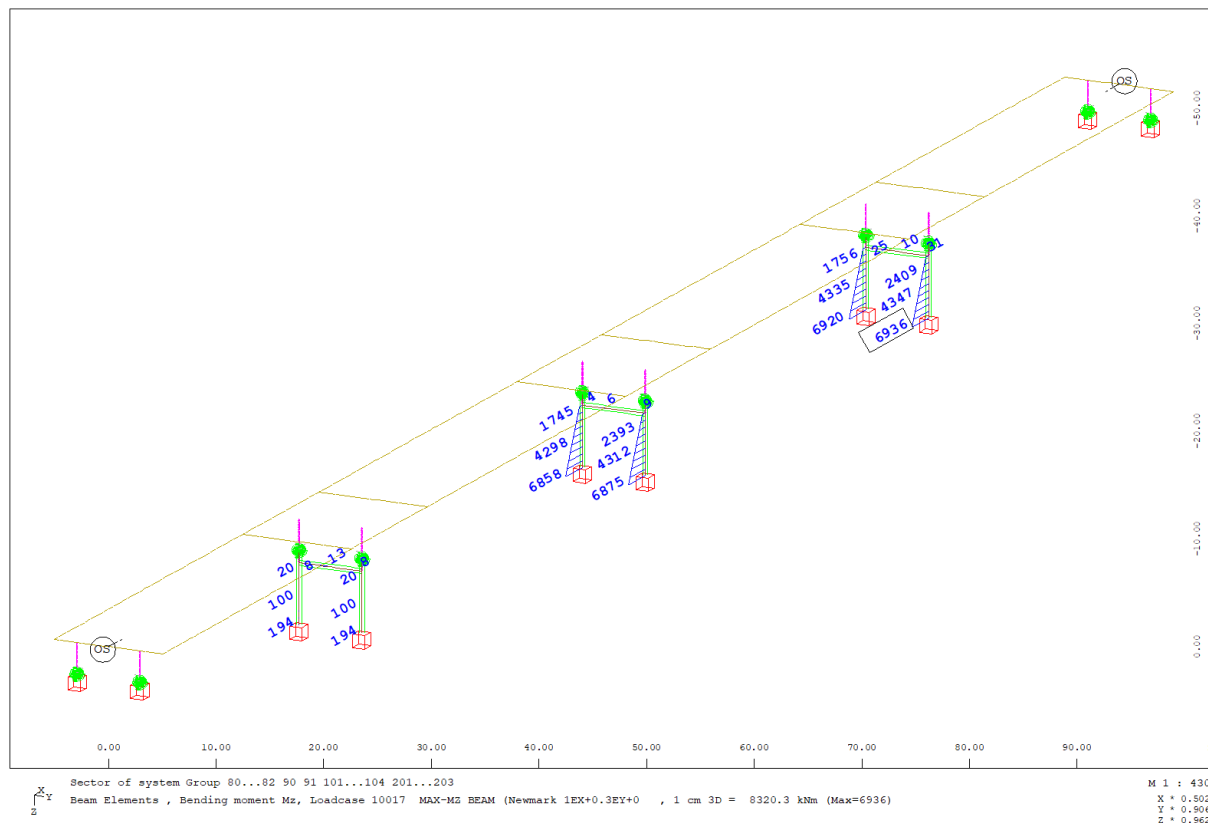


Slika 164. Moment savijanja i poprečna sila za stupove, SOFiSTiK

## 10.1.4. Potresno opterećenje

Ispisuju se rezne sile samo u stupovima.

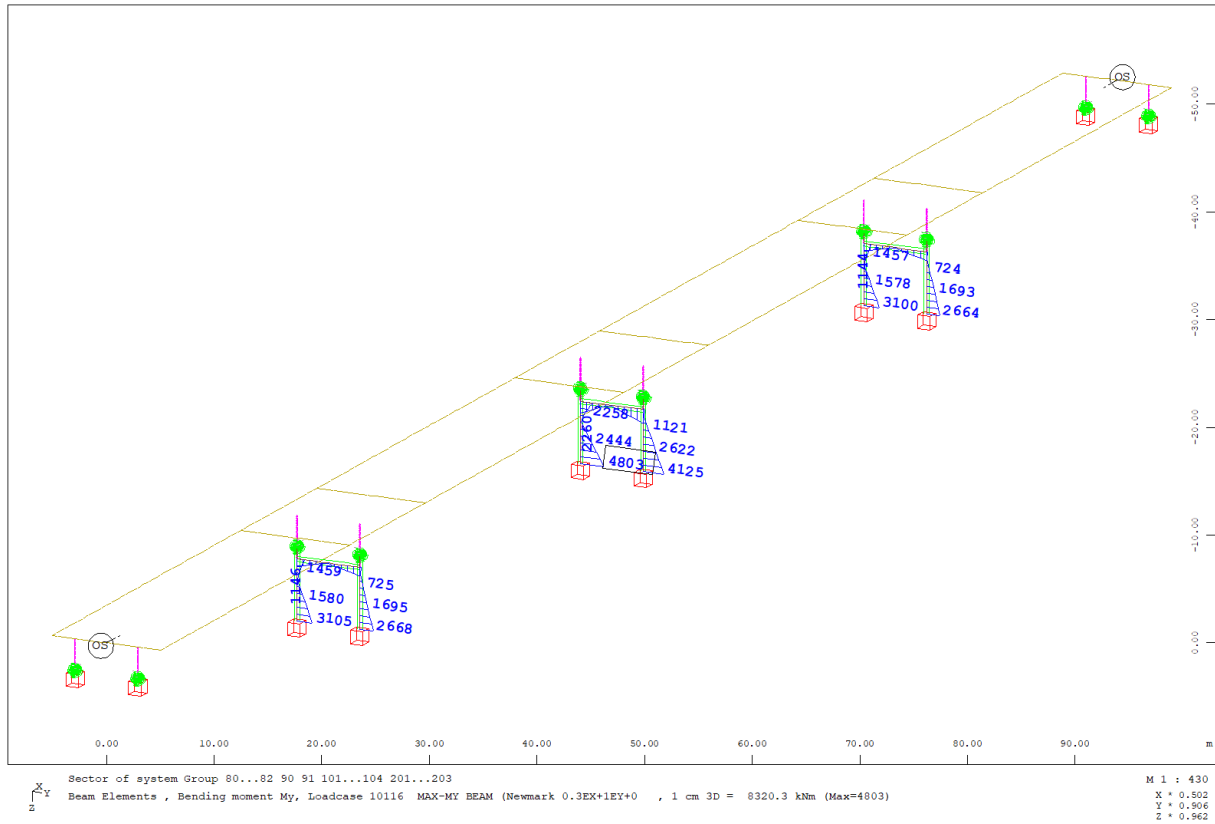
Potres u x smjeru:



Slika 165. Moment savijanja za potres u x smjeru, SOFiSTiK

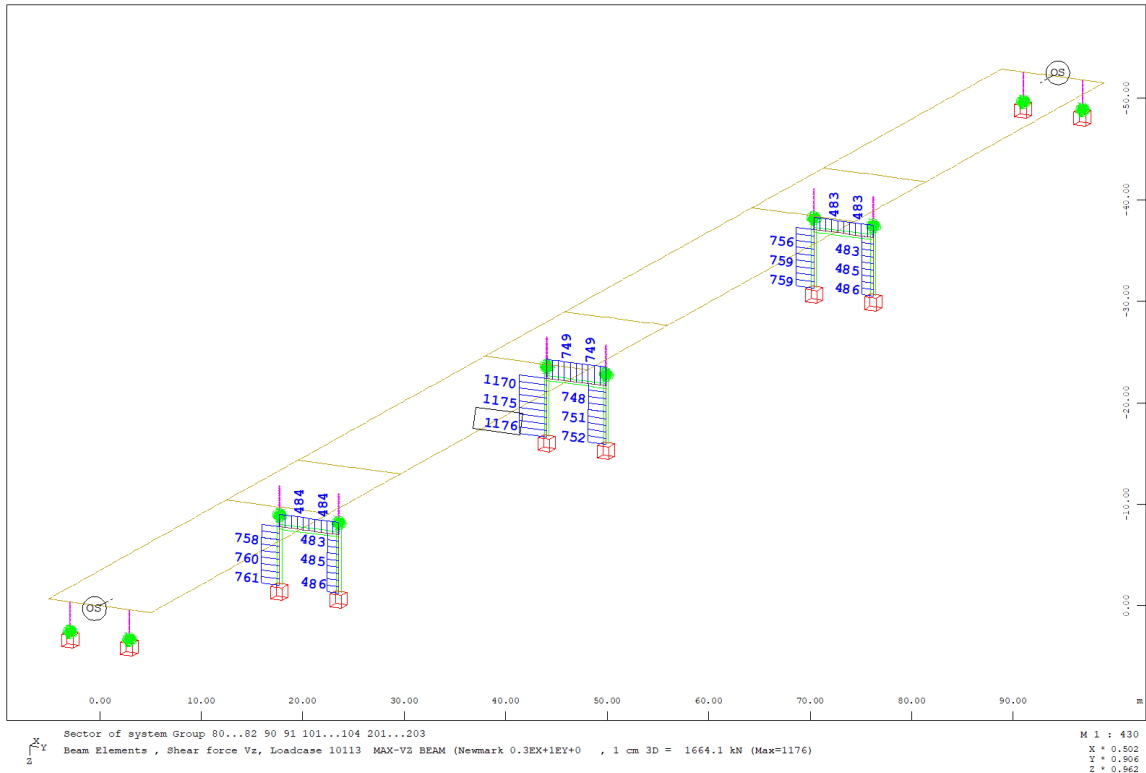


Potres u y smjeru:

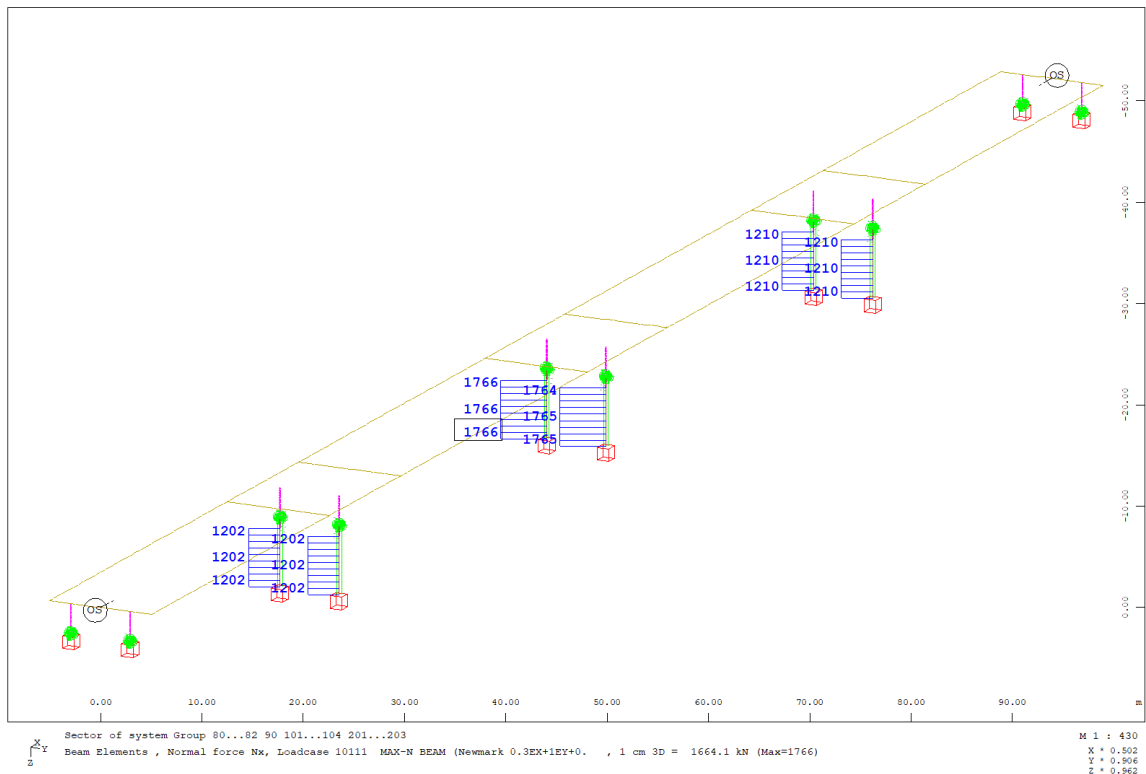


Slika 168. Moment savijanja za potres u y smjeru, SOFiSTiK





Slika 169. Poprečna sila za potres u y smjeru, SOFiSTiK

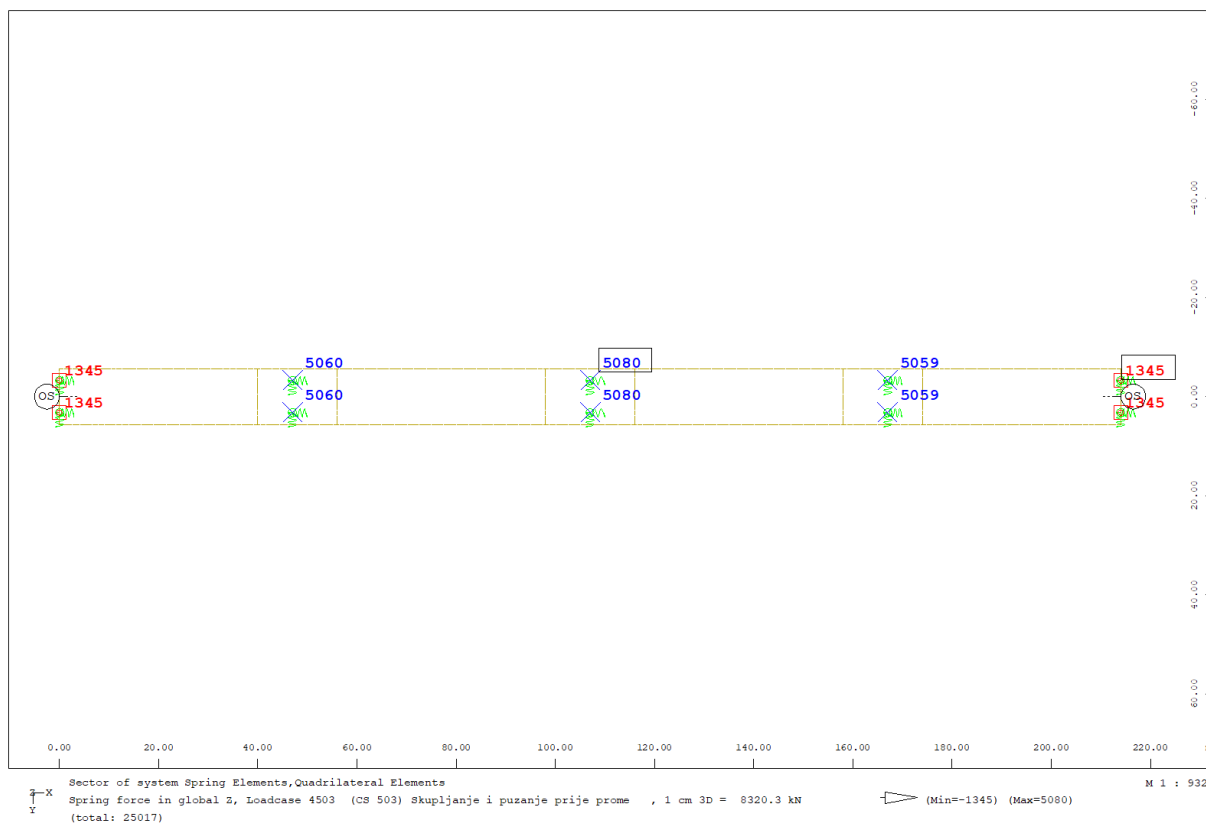


Slika 170. Uzdužna sila za potres u y smjeru, SOFiSTiK

## 10.2. Reakcije i pomaci od dominantnih opterećenja

Reakcije i pomaci u ležajevima dane su za sva opterećenja prema priloženoj excel tablici.

### 10.2.1. Stalno opterećenje



Slika 171. Vertikalna reakcija, SOFiSTiK

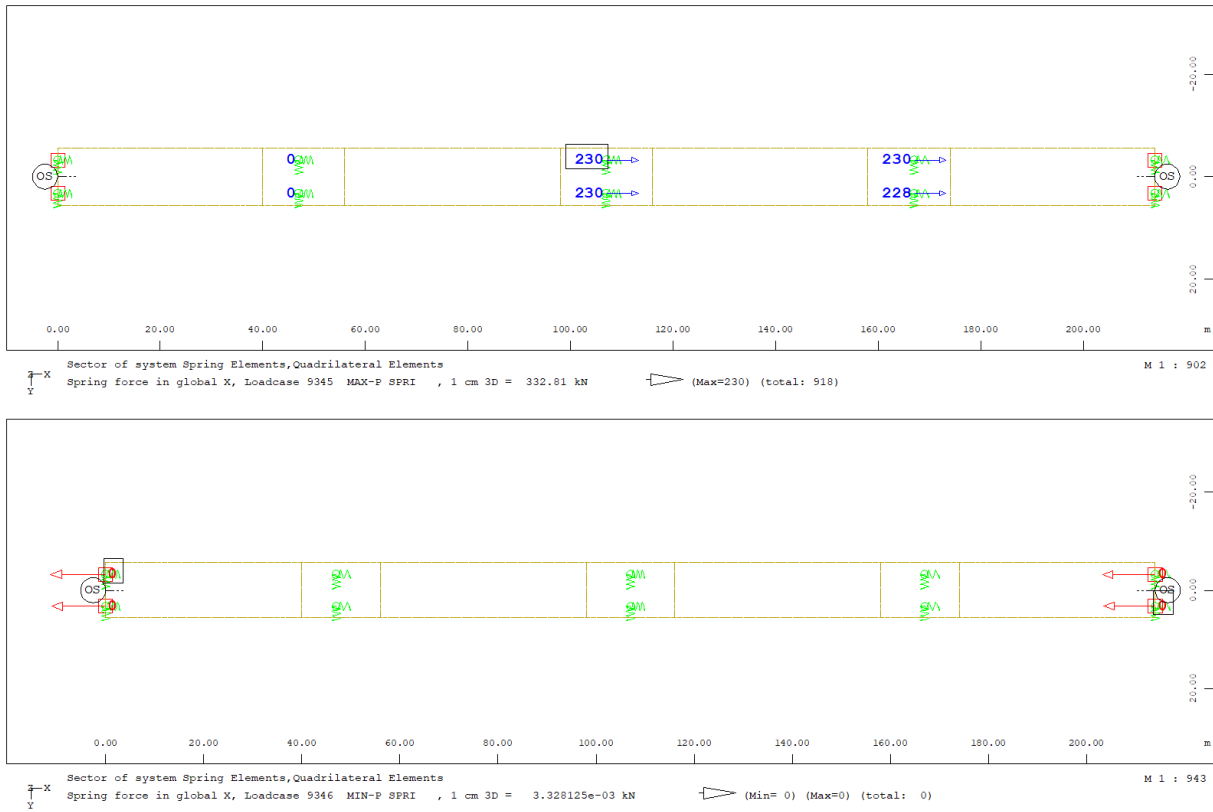
10.2.2. Prometno opterećenje



Slika 172. Vertikalna reakcija(minimalna), SOFiSTiK



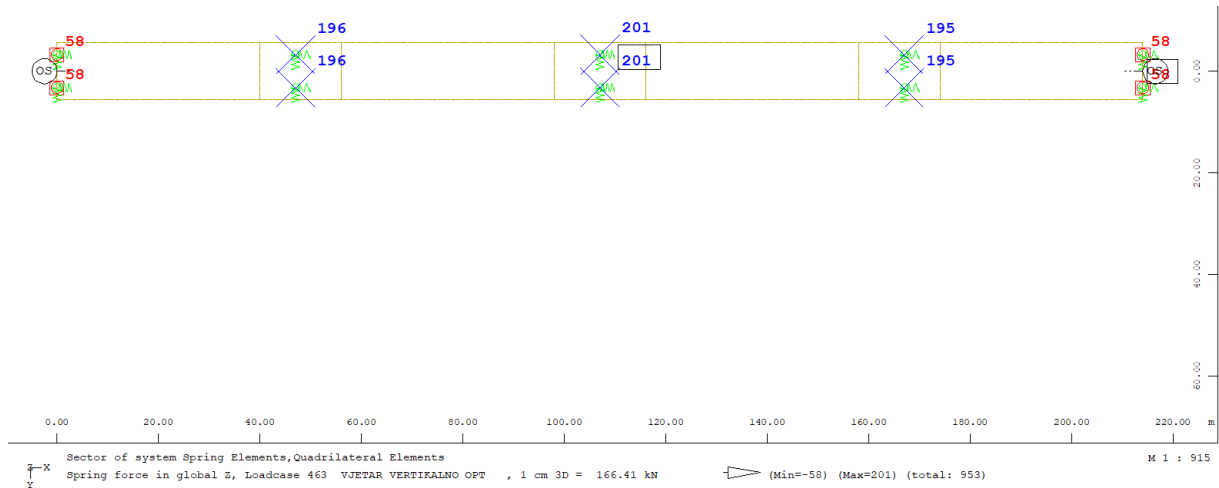
Slika 173. Vertikalna reakcija(maksimalna), SOFiSTiK



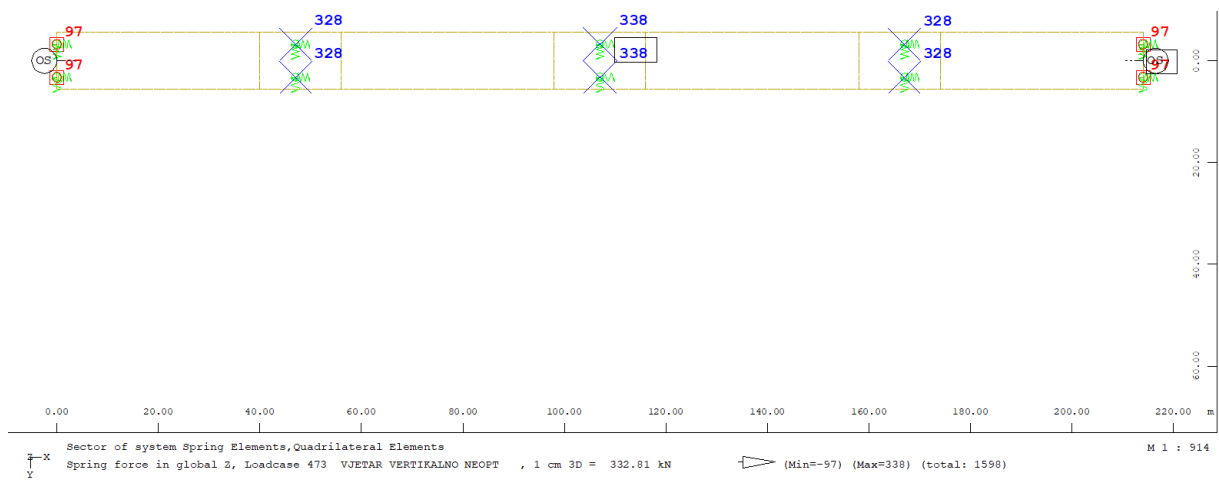
Slika 174. Uzdužna reakcija od kočnja, SOFISTiK

## 10.2.3. Vjetrovno opterećenje

Vjetar vertikalno na rasponski sklop:

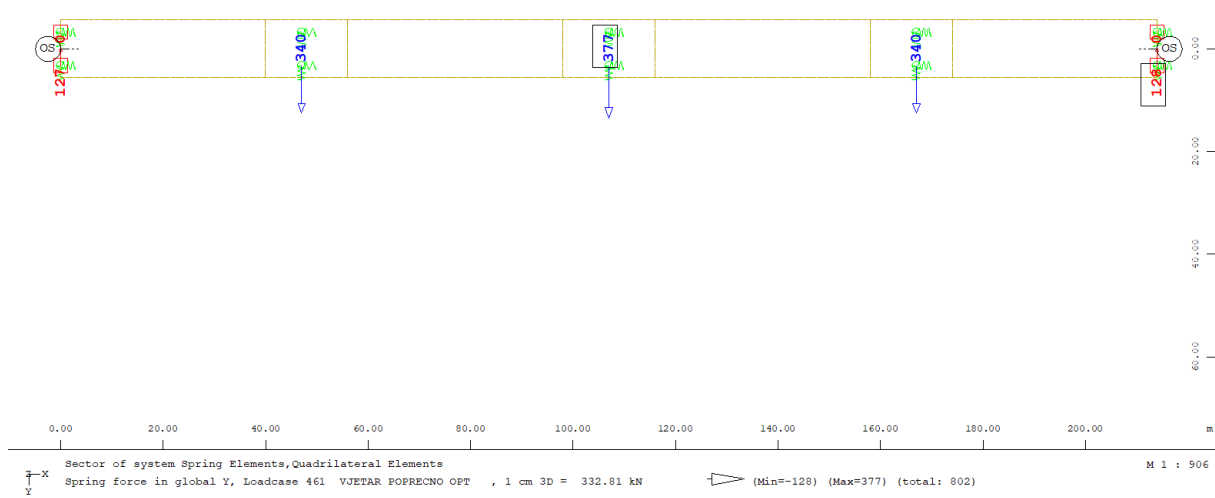


Slika 175. Vertikalna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK

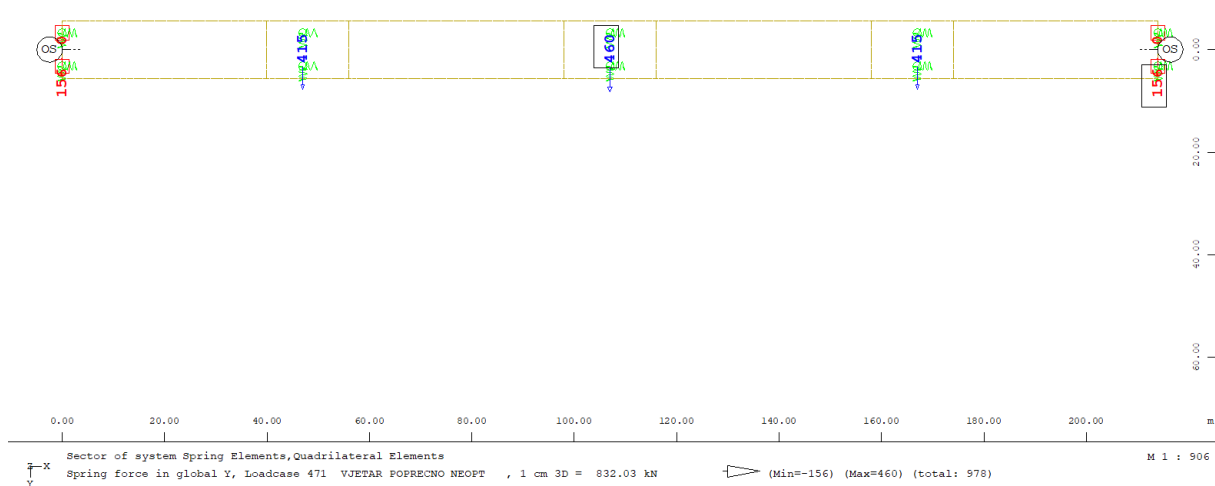


Slika 176. Vertikalna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK

Vjetar poprečno na rasponski sklop:

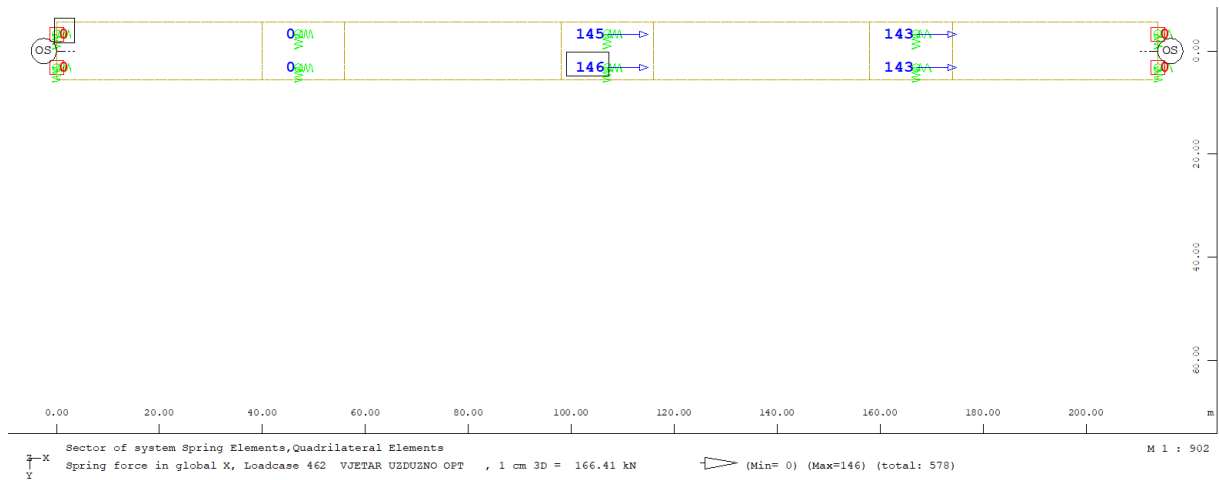


Slika 177. Poprečna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK

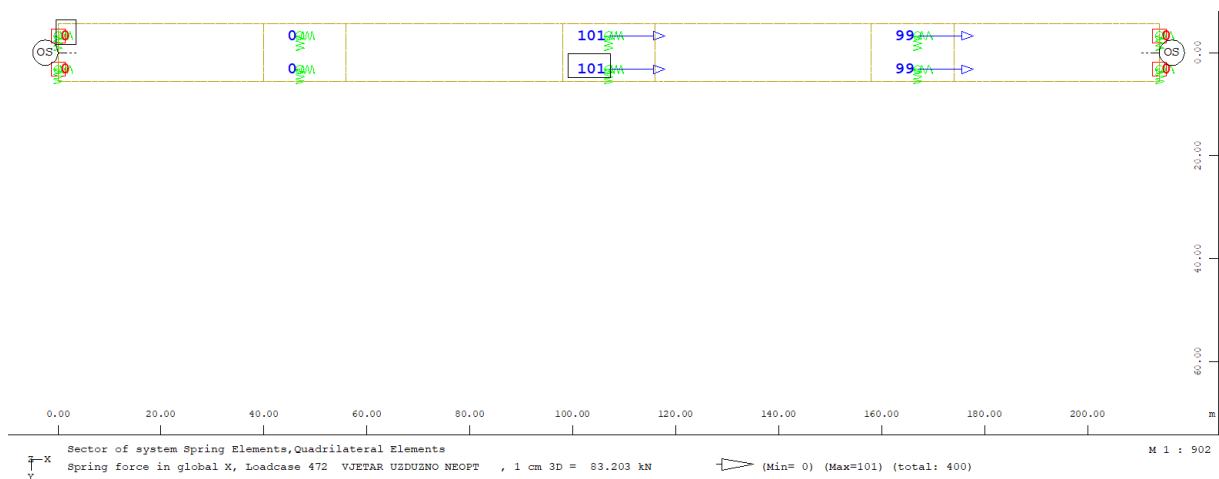


Slika 178. Poprečna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK

Vjetar uzdužno na rasponski sklop:

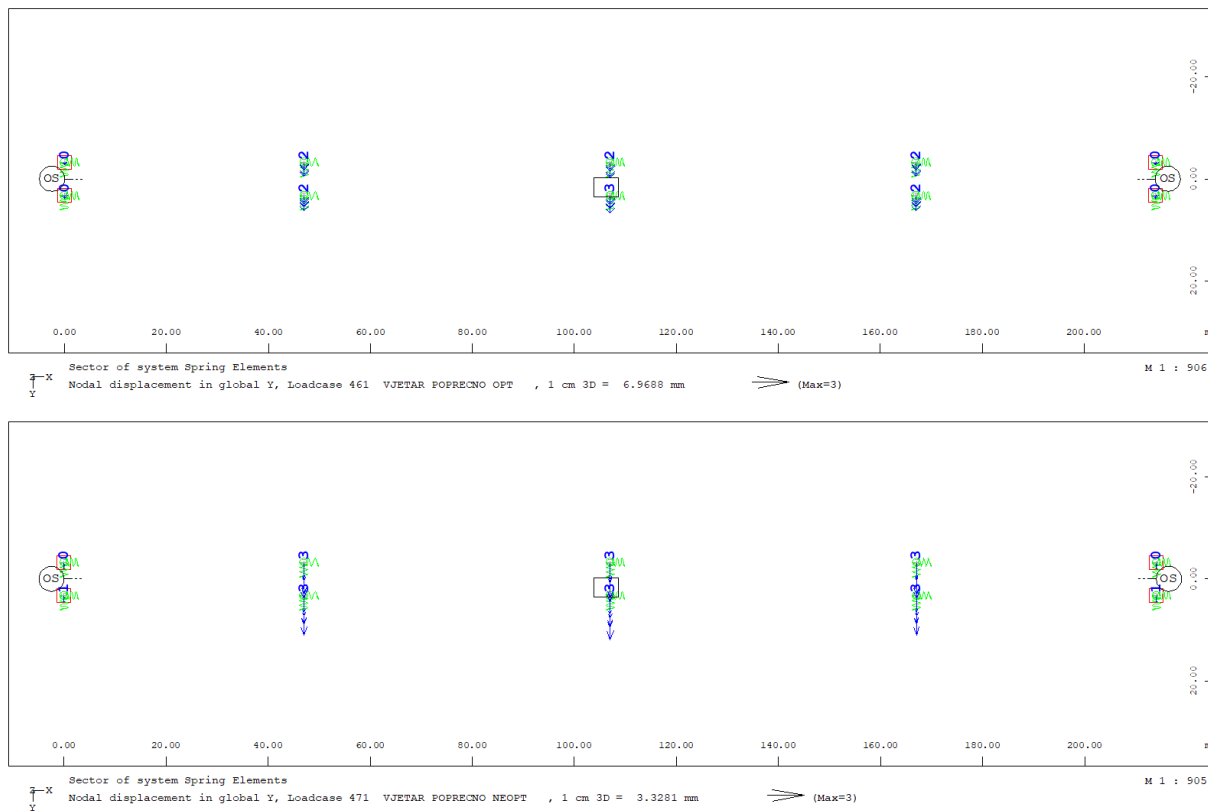


Slika 179. Uzdužna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK



Slika 180. Uzdužna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK

Poprečni pomaci od vjetra:

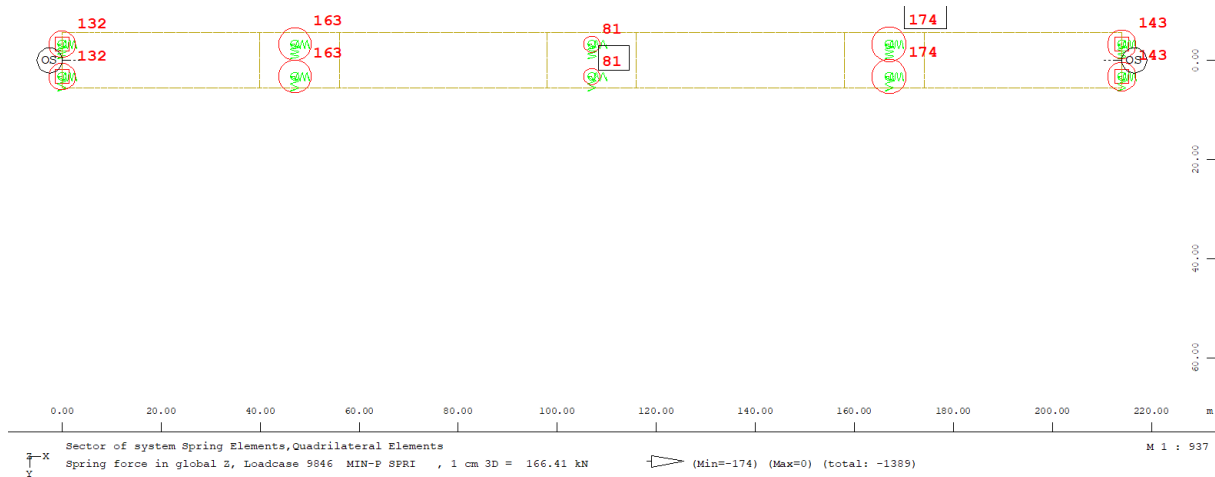


Slika 181. Poprečni pomaci na opterećeni i neopterećeni most, SOFiSTiK

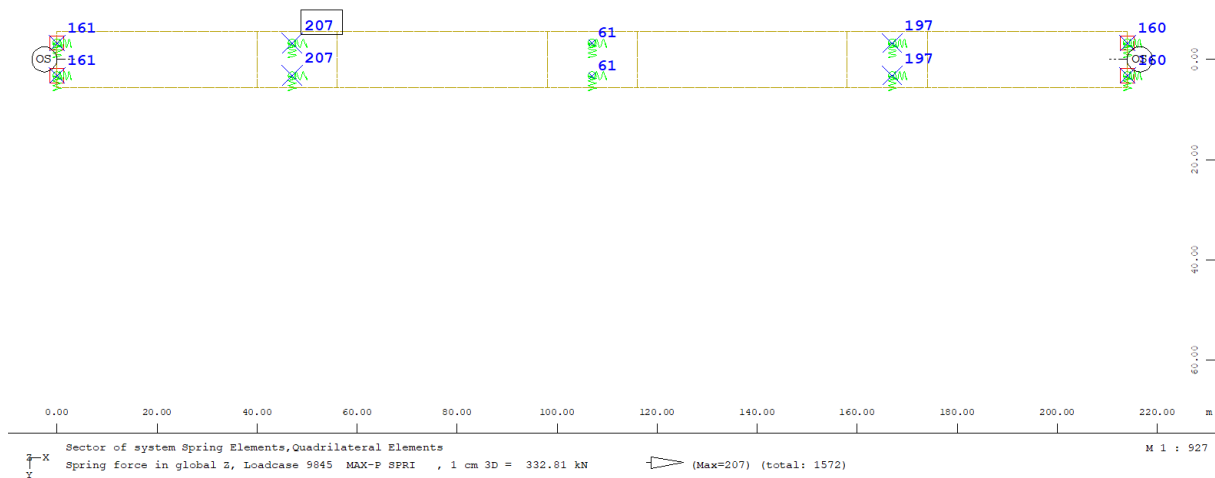


## 10.2.4. Temperaturna opterećenje

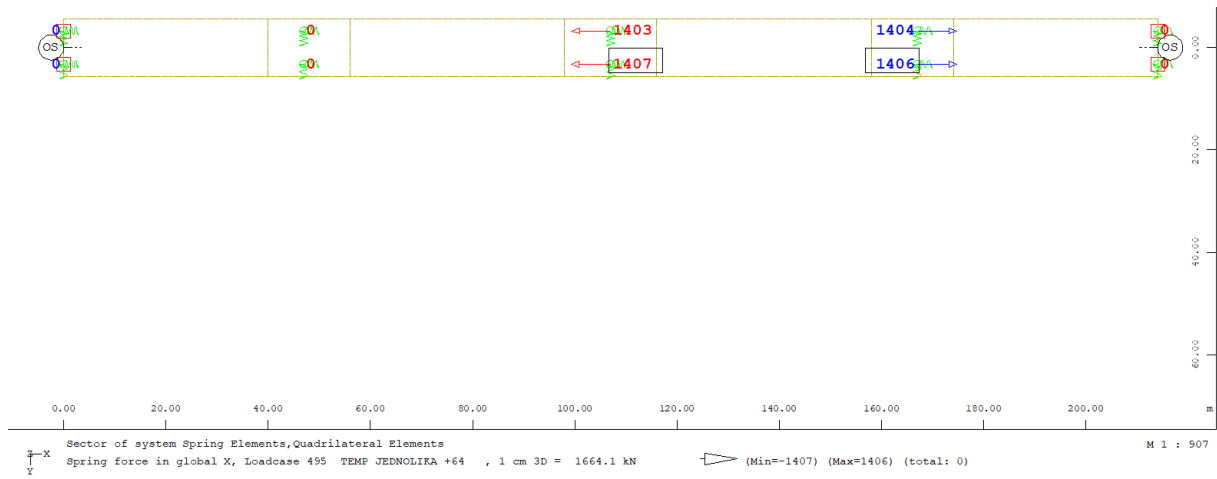
Reakcije:



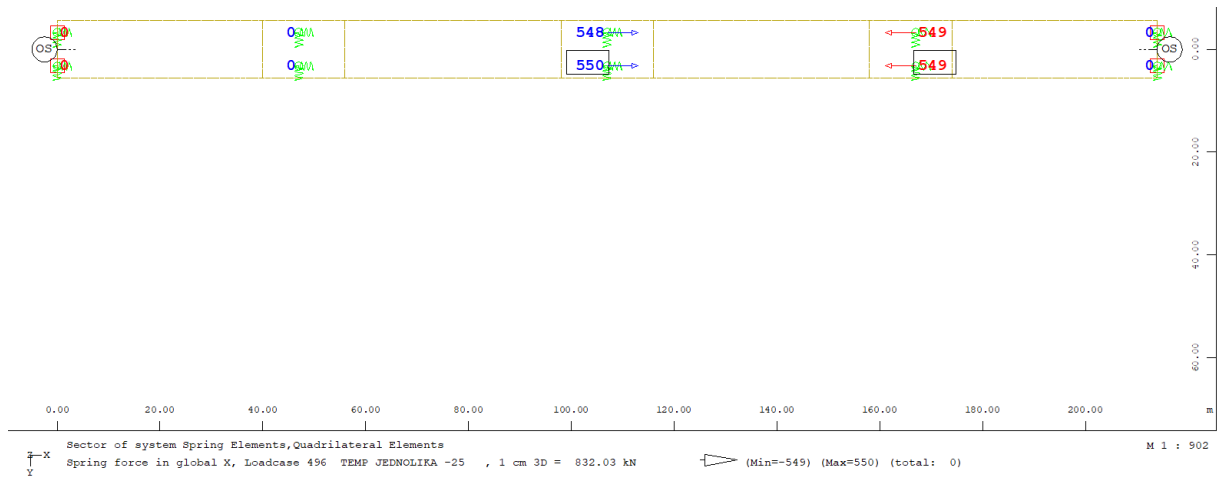
Slika 182. Vertikalna reakcija(minimalna), SOFiSTiK



Slika 183. Vertikalna reakcija(maksimalna), SOFiSTiK

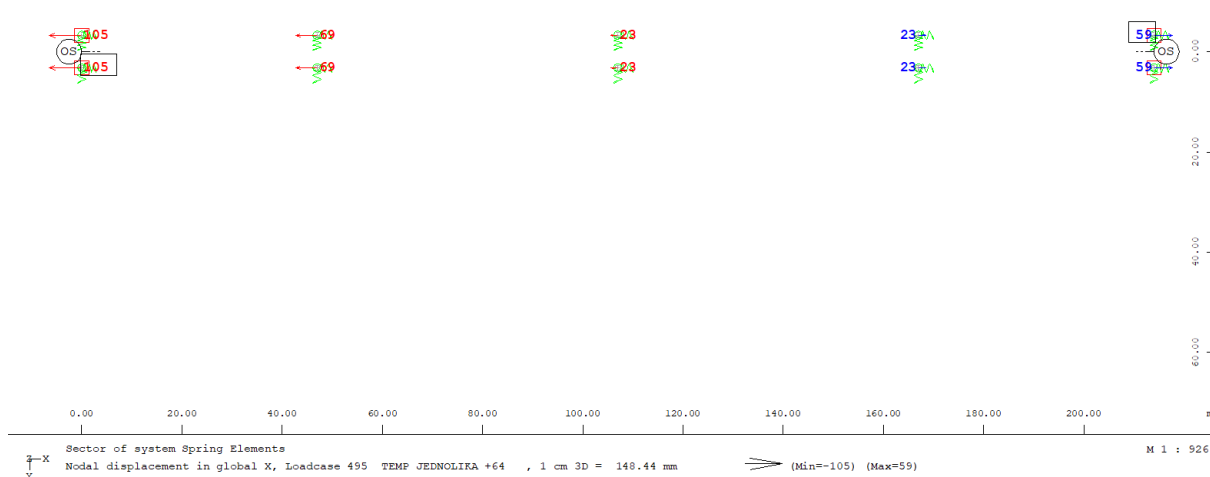


Slika 184. Uzdužna reakcija(minimalna), SOFiSTiK

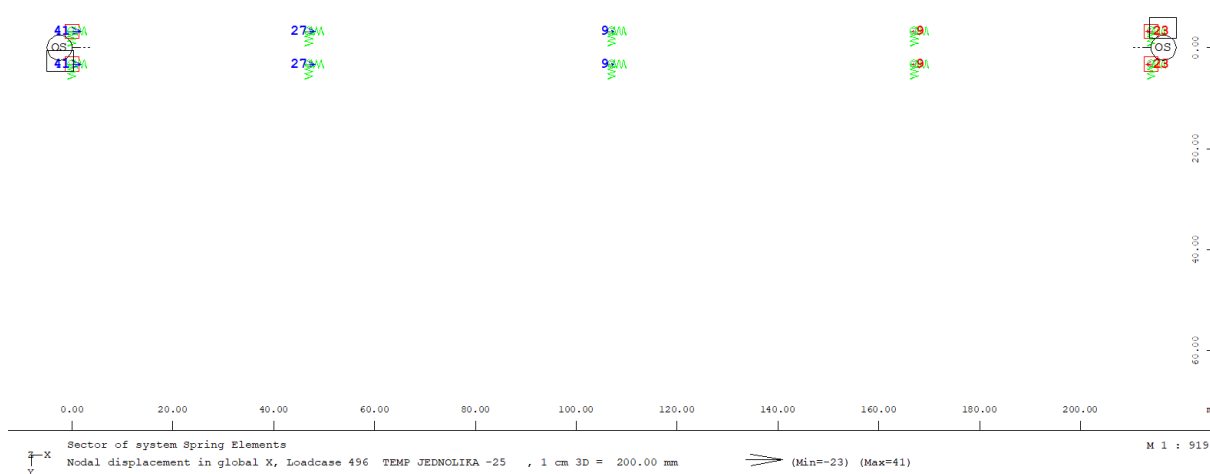


Slika 185. Uzdužna reakcija(maksimalna), SOFiSTiK

Pomaci:



Slika 186. Uzdužni pomak, SOFiSTiK



Slika 187. Uzdužni pomak, SOFiSTiK

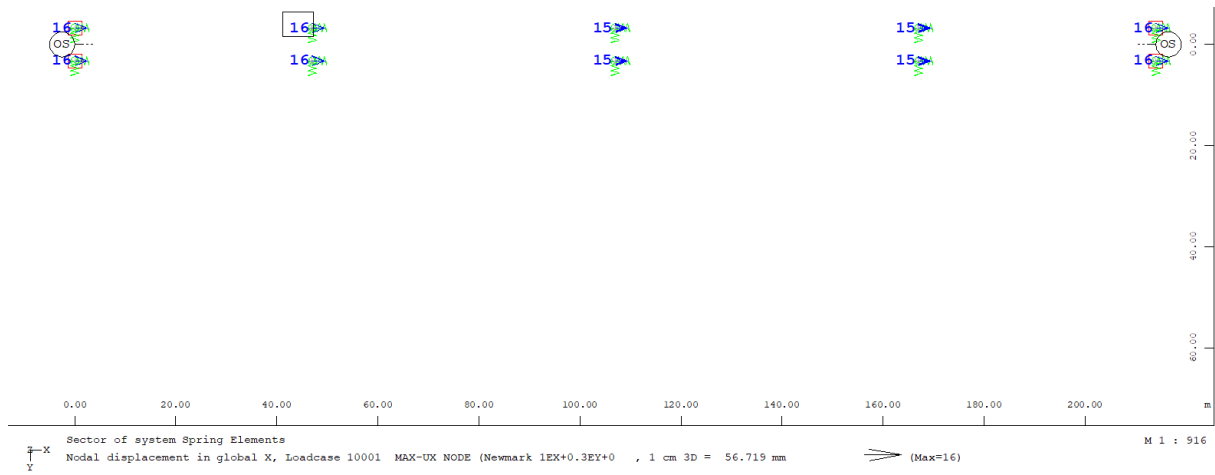
### 10.2.5. Potresno opterećenje

Reakcije:

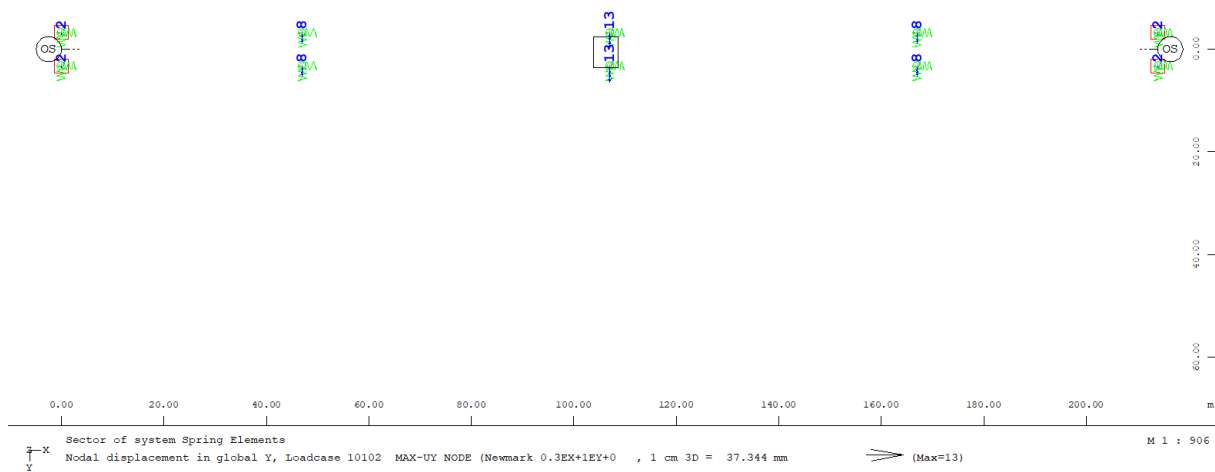


Slika 188. Vertikalna reakcija, SOFiSTiK

Pomaci:



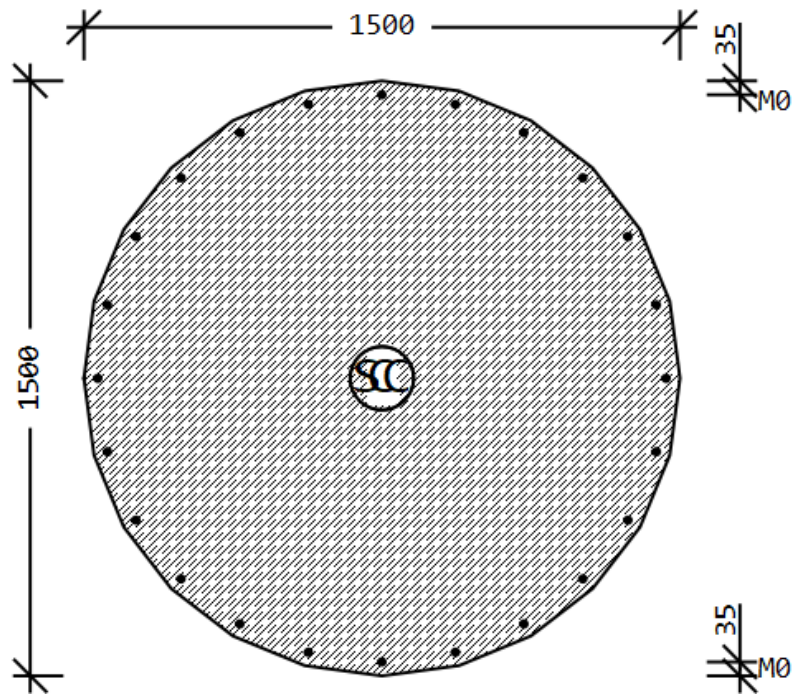
Slika 189. Uzdužni pomak u x smjeru, SOFiSTiK



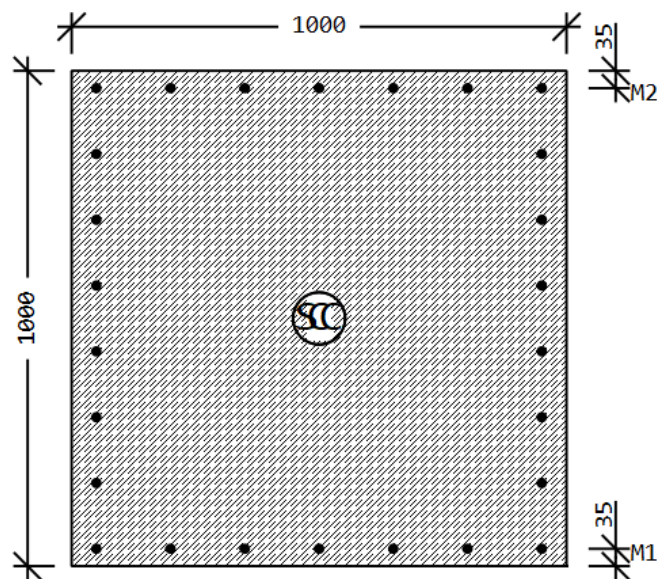
Slika 190. Uzdužni pomak u y smjeru, SOFiSTiK

## 11. DOKAZ STABILNOSTI MOSTA OTVORENOG PRESJEKA S I NOSAČIMA

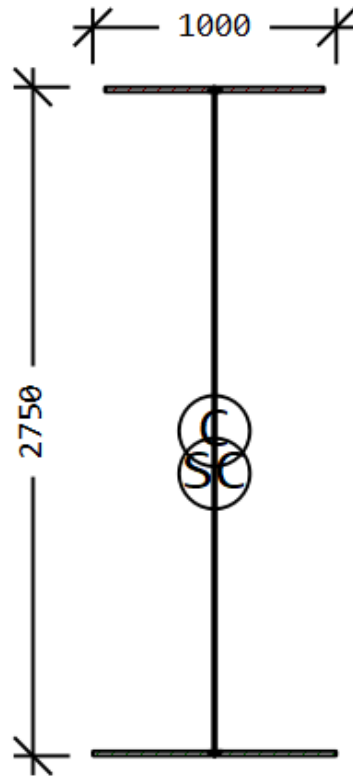
### 11.1. Presjeci dimenzioniranih elemenata



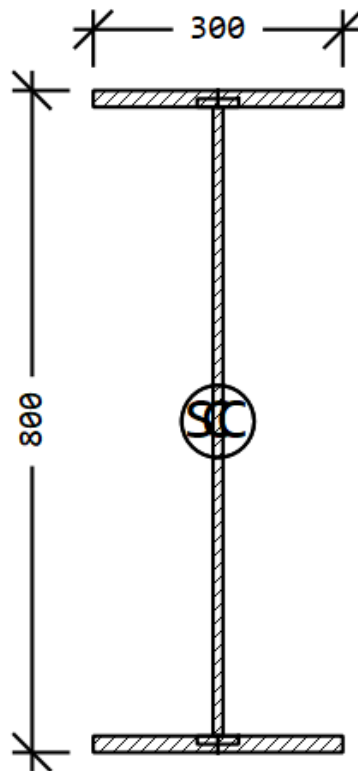
Slika 191. Poprečni presjek stupova, SOFiSTiK



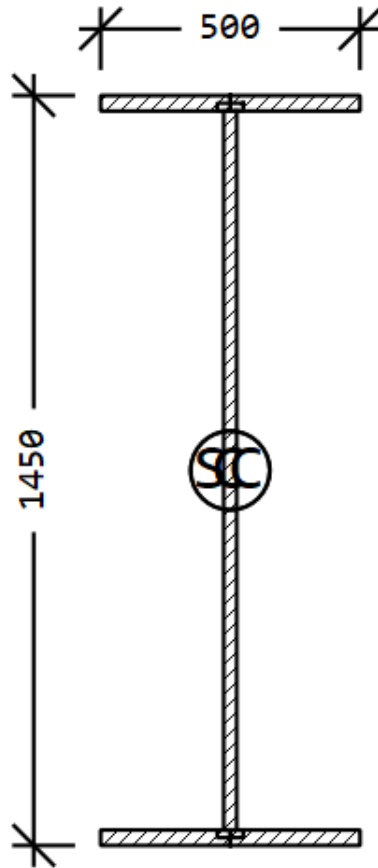
Slika 192. Poprečni presjek vezne grede, SOFiSTiK



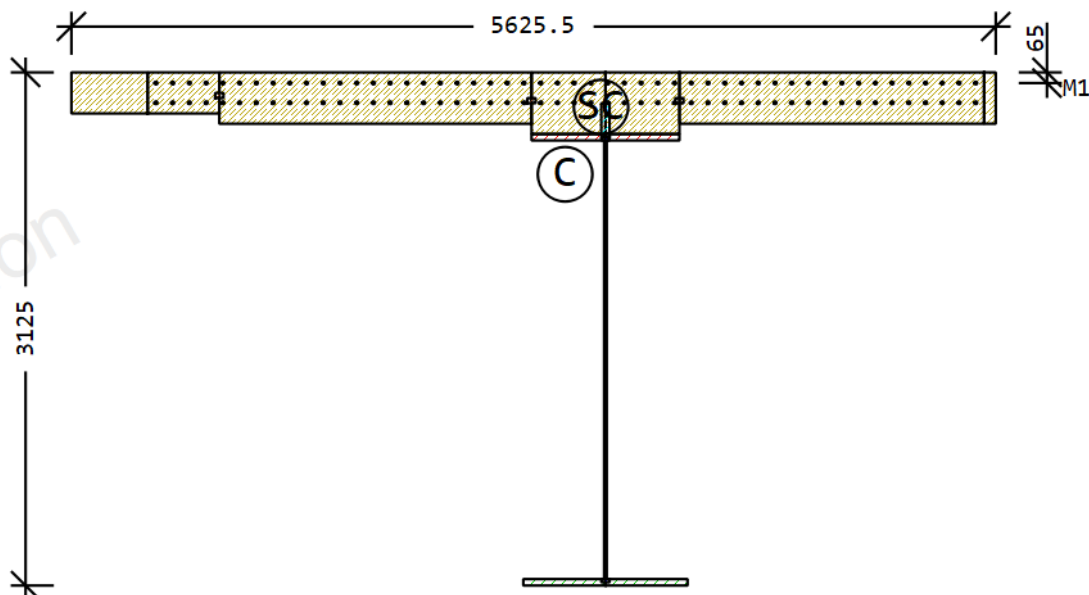
Slika 193. Presjek glavnog nosača, SOFiSTiK



Slika 194. Presjek poprečnog nosača u polju, SOFiSTiK



Slika 195. Presjek poprečnog nosača na ležaju, SOFiSTiK



Slika 196. Presjek mosta kroz jedan glavni I nosač, SOFiSTiK



## 11.2. Faktori i izrazi za kombinacije opterećenja

Tablica 9. Koeficijenti sigurnosti i kombinacija za djelovanja [2]

Naziv djelovanja	Tip	Parcijalni koeficijenti sigurnosti		Koeficijenti kombinacije			
		Nepovoljna $\gamma_{i,sup}$	Povoljna $\gamma_{i,inf}$	Rijetka $\psi_0$	Česta $\psi_1$	Nazovi-stalna $\psi_2$	Neučestale $\psi_1$
Stalno djelovanje - Vlastita težina i Dodatno stalno	G	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Prometno osovinsko opterećenje	L_T	1.35	0	0.75	0.75	0	0.80
Prometno kontinuirano opterećenje	L_U	1.35	0	0.40	0.40	0	0.80
Vjetar	ZWN	1.50	0	0.60	0.20	0.00	0.60
Vjetar sa prometom	ZWO	1.50	0	1.00	0	0	1.00
Temperatura	T	1.5	0	0.0	0.60	0.50	0.80
Potres	EQ	1.00	0	0	0	0	0

Dimenzioniranje elemenata mosta provedeno je prema graničnom stanju nosivosti za:

- stalnu ili prolaznu situaciju ("persistent or transient" - DESI):

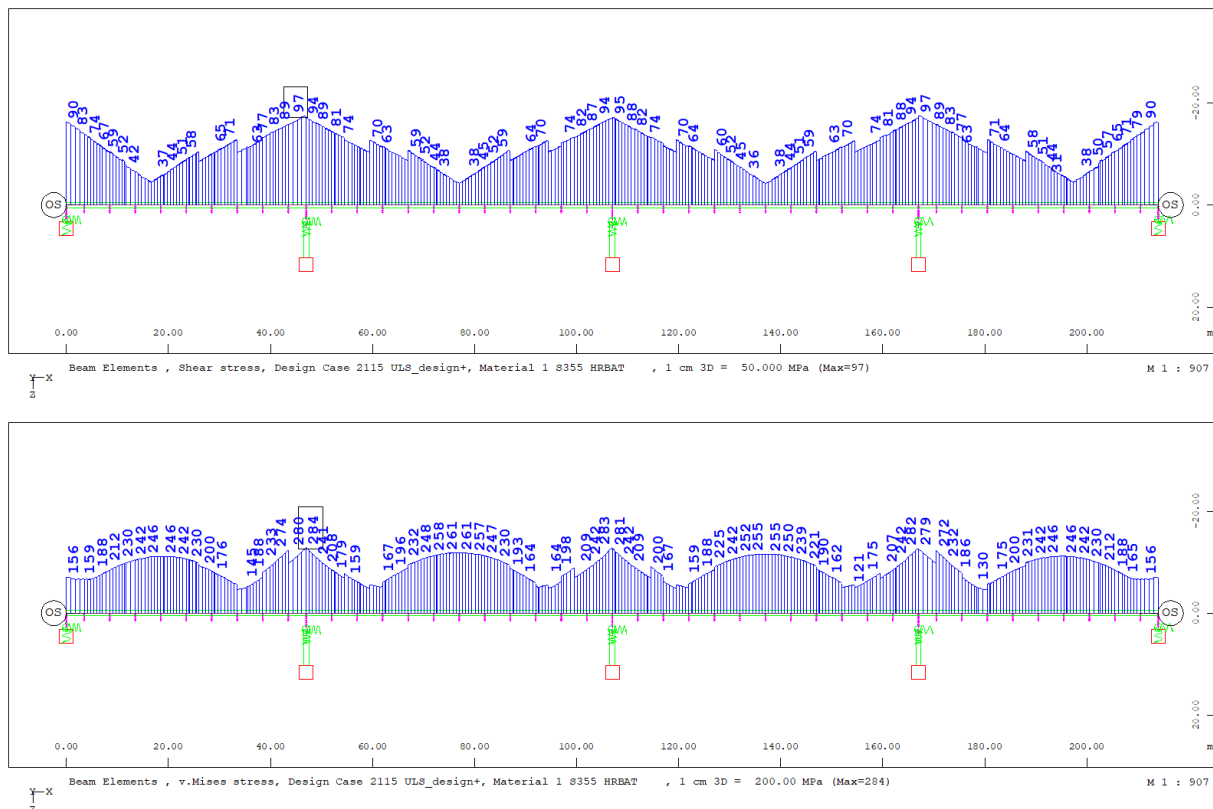
$$E_d = E_d \left[ \sum_j (\gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}) + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\gamma_Q \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + \gamma_p \cdot P_k \right]$$

- potresnu situaciju ("seismic" - EARQ) [11]:

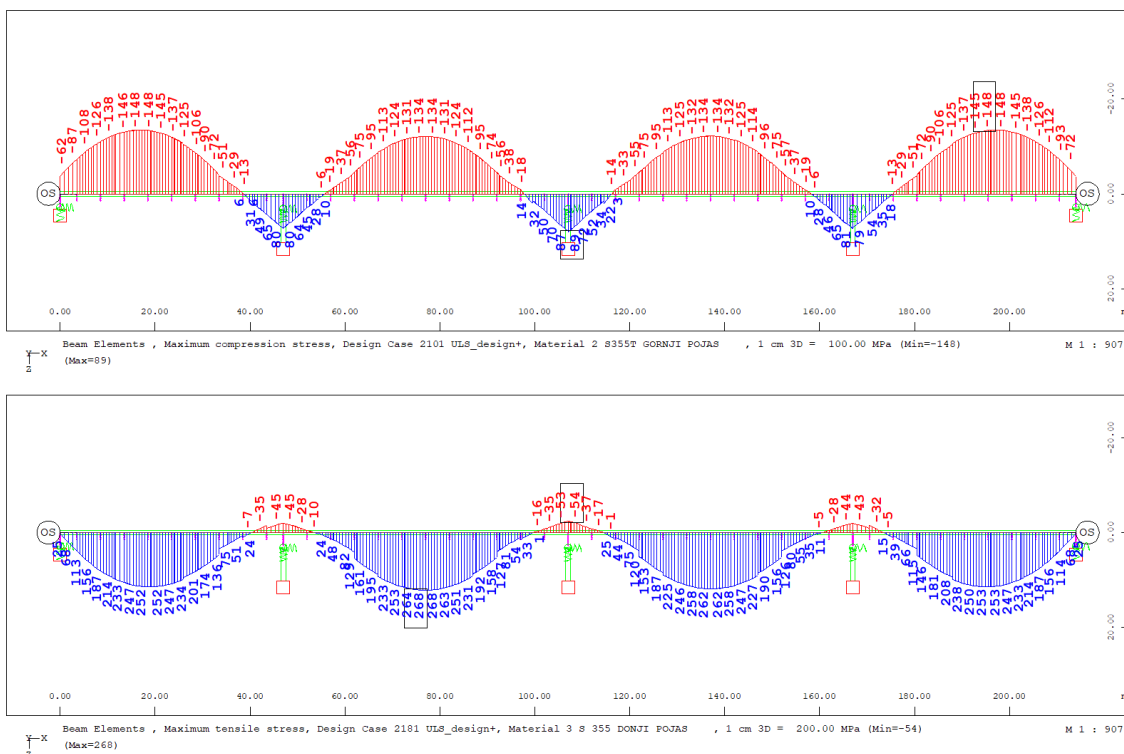
$$E_d = E_d[\sum_j(G_{k,j}) + \gamma_I A_{Ed} + \sum_{i>1}(\psi_{2i} \cdot Q_{k,i}) + P_k]$$

### 11.3. Prikaz naprezanja za kombinacije opterećenja

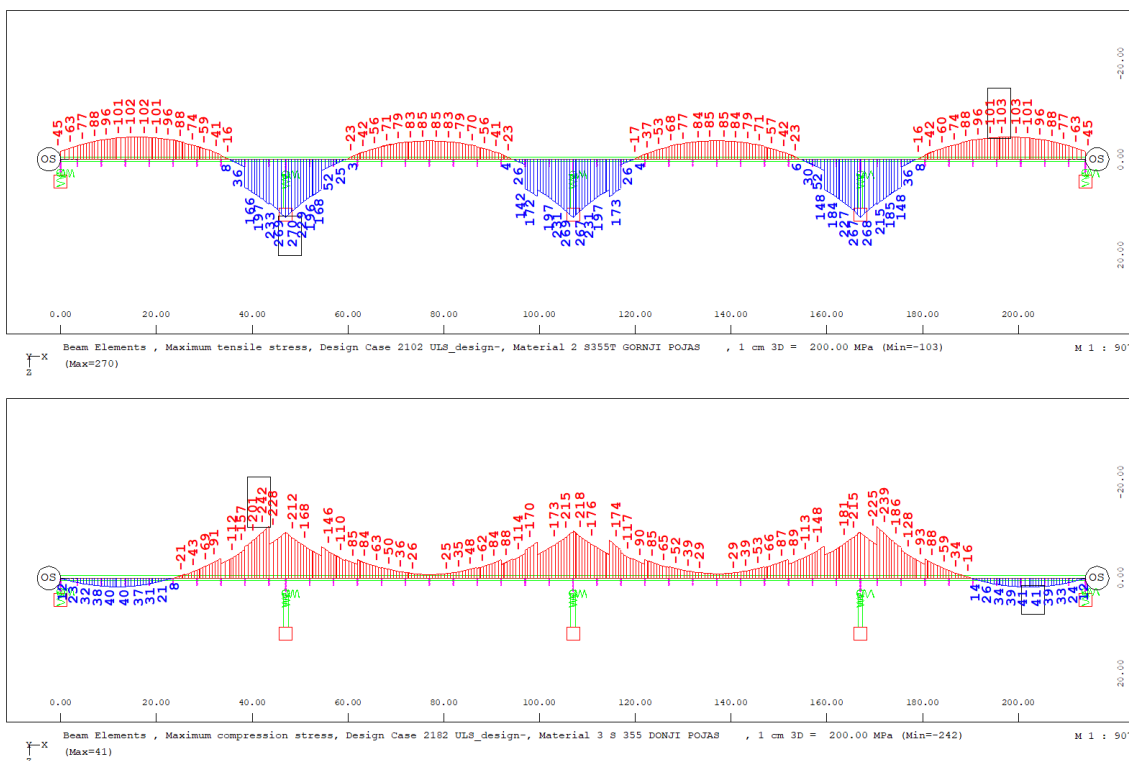
Iskazana su naprezanja za mjerodavnu kombinaciju.



Slika 197. Posmična naprezanja i V.Mises naprezanja u hrptu, SOFiSTiK



Slika 198. Najveće tlačno naprezanje gornjeg pojasa i najveće vlačno naprezanje donjeg pojasa, SOFiSTiK



Slika 199. Najveće vlačno naprezanje gornjeg pojasa i najveće tlačno naprezanje donjeg pojasa, SOFiSTiK

#### 11.4. Dokaz stabilnosti limova

Granična naprezanja prema graničnom stanju nosivosti određena su kako slijedi:

Za vlak:

$$\sigma_{rd,max} = 355 \text{ MPa}$$

Za tlak (debljina lima  $\leq 40$  mm):

$$\sigma_{rd,max} = \frac{-355}{1,1} = -322 \text{ MPa}$$

Za tlak (debljina lima  $> 40$  mm):

$$\sigma_{rd,min} = \frac{-335}{1,1} = -304 \text{ MPa}$$

Za posmik:

$$\tau_{rd} = \frac{322}{\sqrt{3}} = 185 \text{ MPa}$$

#### Donji pojas

Donji pojas nosača nalazi se u čistom tlaku za najveći negativni moment savijanja. Provjera se vrši (prema EN 1993-1-5 [8]) ukoliko lamela donjeg pojasa ne zadovoljava uvjet za klasu 3.

Uvjeti za klasu 3 presjeka mogu se vidjeti iz tablice 5.2 norme HRN EN 1993-1-1 [8], u ovisnosti o rubnim uvjetima i stanju naprezanja u limu.

Ukoliko je izraz za klasu 3 zadovoljen, stabilnost je zadovoljena i daljnja provjera izostaje.

U slučaju da izrazi za klasu 3 nije zadovoljen provodi se dokaz stabilnosti donjeg pojasa prema poglavlju 10 norme HRN EN1993-1-5 [8].

Klasifikacija donjeg pojasa debljine 40 mm:

Širina donjeg pojasa:	$c = 494,0 \text{ mm}$	
Debljina donjeg pojasa:	$t = 40 \text{ mm}$	
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$	$t \leq 40 \text{ mm}$
	$f_y = 335 \text{ N/mm}^2$	$t > 40 \text{ mm}$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814 \qquad \frac{c}{t} = \frac{494,0}{40} = 12,35$$

$$14 \cdot \varepsilon = 11,39 \rightarrow 12,35 > 11,39 \rightarrow \text{Presjek nije u klasi 3}$$

Presjek ne zadovoljava uvjet stabilnosti, potrebna provjera stabilnosti.

Klasifikacija donjeg pojasa debljine 60 mm:

Širina donjeg pojasa:	$c = 494,0 \text{ mm}$	
Debljina donjeg pojasa:	$t = 60 \text{ mm}$	
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$	$t \leq 40 \text{ mm}$
	$f_y = 335 \text{ N/mm}^2$	$t > 40 \text{ mm}$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{335}} = 0,838 \qquad \frac{c}{t} = \frac{494,0}{60} = 8,23$$

$$14 \cdot \varepsilon = 11,73 \rightarrow 8,23 \leq 11,72 \rightarrow \text{Presjek je u klasi 3}$$

Presjek zadovoljava uvjet stabilnosti i nije potrebna provjera stabilnosti.

Klasifikacija donjeg pojasa debljine 110 mm:

Širina donjeg pojasa:  $c = 494,0 \text{ mm}$

Debljina donjeg pojasa:  $t = 110 \text{ mm}$

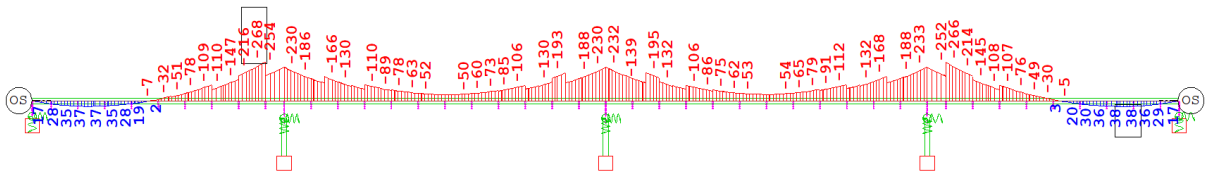
$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$   $t \leq 40 \text{ mm}$

Granica popuštanja čelika:  $f_y = 335 \text{ N/mm}^2$   $t > 40 \text{ mm}$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{335}} = 0,838 \qquad \frac{c}{t} = \frac{494,0}{110} = 4,49$$

$$14 \cdot \varepsilon = 11,73 \rightarrow 4,49 \leq 11,73 \rightarrow \text{Presjek je u klasi 3}$$

Presjek zadovoljava uvjet stabilnosti i nije potrebna provjera stabilnosti.



Slika 200. Maksimalna tlačna naprezanja u čeliku, SOFiSTiK

Dokaz stabilnosti donjeg pojasa debljine 40 mm:

$$\sigma_{x,Ed} = 110,0 \text{ N/mm}^2; \quad \gamma_{M1} = 1,10; \quad \psi = 1,00; \quad k_{\sigma,x} = 0,43; \quad b = c = 494 \text{ mm}$$

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189\,800 \cdot \left(\frac{40}{494}\right)^2 = 1244,41 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E}} = \sqrt{\frac{355}{0,43 \cdot 1244,41}} = 0,815$$

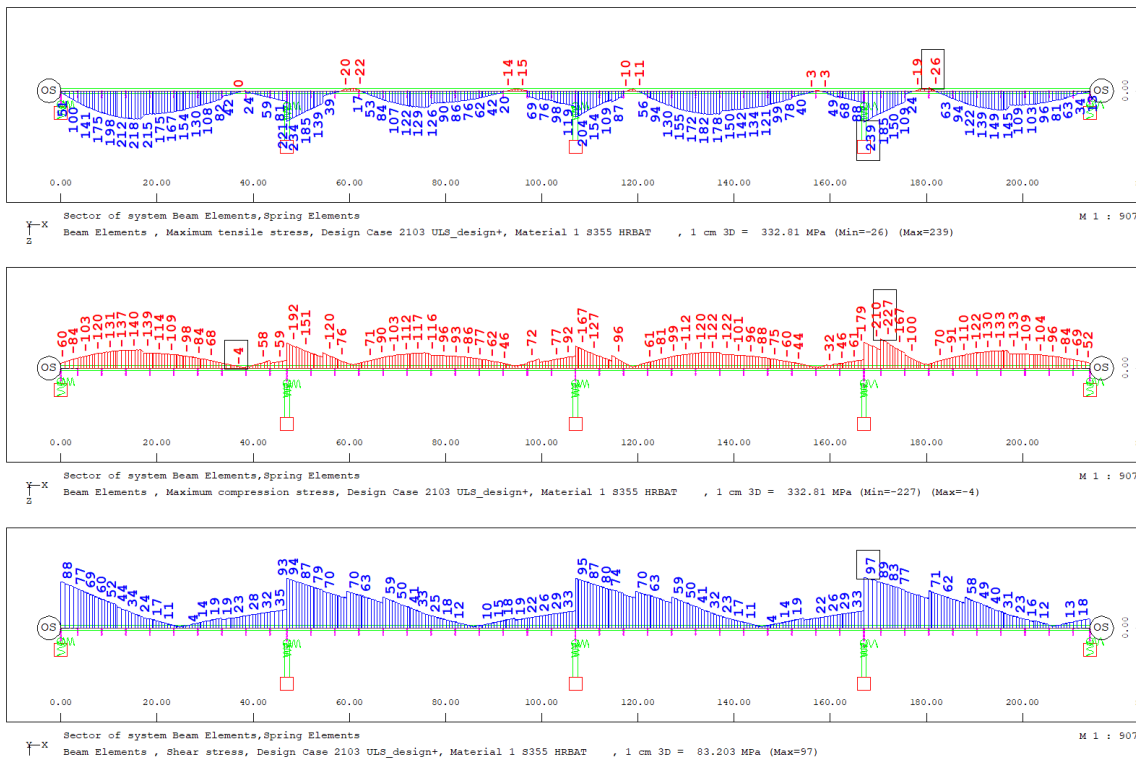
$$\rho_x = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2} = \frac{0,815 - 0,055 \cdot (3 + 1)}{0,815^2} = 0,896$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} = \frac{110,0}{0,896 \cdot 355 / 1,1} = 0,38 \leq 1$$

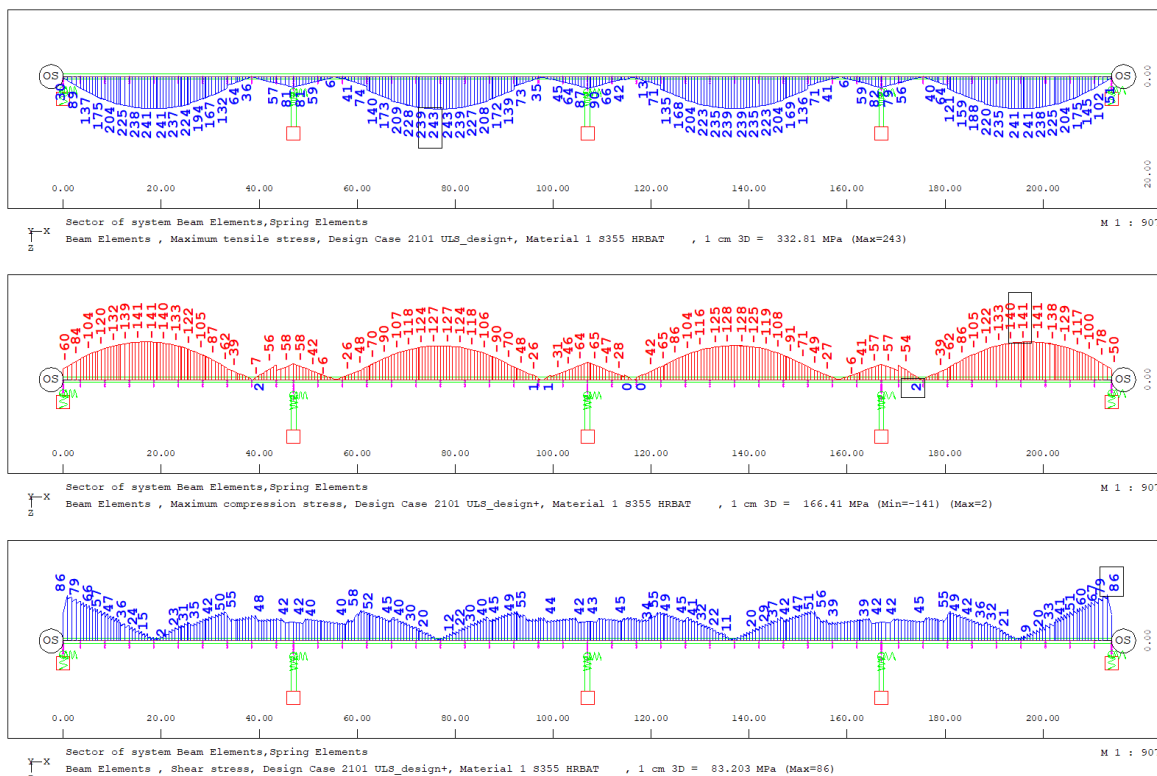
Uvjet stabilnosti je zadovoljen.







Slika 202. Najveća poprečna sila i pripadajući moment savijanja, SOFiSTiK



Slika 203. Najveća poprečna sila i pripadajući moment, SOFiSTiK

11.4.1. Hrbat u presjeku iznad ležaja ( $t = 25 \text{ mm}$ )

Ulazni podatci:

Razmak dijafragmi:	$a = 5000 \text{ mm}$
Visina hrpta:	$b = 2560 \text{ mm}$
Debljina hrpta:	$t = 25 \text{ mm}$
Naprezanja za najveći moment savijanja, LC 2102:	$\sigma_{1x,Ed} = 209 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -254 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 88 \text{ N/mm}^2$
Naprezanja za najveću poprečnu silu, LC 2103:	$\sigma_{1x,Ed} = 192 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -234 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 94 \text{ N/mm}^2$
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355,00 \text{ N/mm}^2$
Koeficijent sigurnosti za čelik u tlaku:	$\gamma_{M1} = 1,10$
Proračunska granica popuštanja čelika:	$f_{yd} = 322,73 \text{ N/mm}^2$

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆI MOMENT SAVIJANJA

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{209}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{88}{355} \right)^2 = 0,59$$

$$\alpha_{ult,k} = 1,37$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-254}{209} = -1,22 < -1$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,22))^2 = 29,35$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189\,800 \cdot \left(\frac{25}{2560}\right)^2 = 18,10 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 29,35 \cdot 18,10 = 531,21 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{531,21}{209} = 2,54$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukružene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2560} = 1,95 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2560/5000)^2 = 6,39$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 6,39 \cdot 18,10 = 115,64 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog napreznja i posmičnih računskih napreznja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{115,64}{88} = 1,31$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,22)}{4 \cdot 2,54} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,22)}{4 \cdot 2,54} \right)^2 + \frac{1 - (-1,22)}{2 \cdot 2,54^2} + \frac{1}{1,31^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\alpha_{cr} = 1,183$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{1,37}{1,183}} = 1,077 \geq 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno napreznje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,077 - 0,055 \cdot (3 + (-1,22))}{1,077^2} = 0,844 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,844$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \lambda_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,077} = 0,771$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{209}{0,844 \cdot 355/1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{88}{0,771 \cdot 355/1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,589 + 0,376 = 0,965 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆU POPREČNU SILU

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2 = \left(\frac{192}{355}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{94}{355}\right)^2 = 0,503$$

$$\alpha_{ult,k} = 1,41$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-234}{192} = -1,22 < -1$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,22))^2 = 29,44$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189\,800 \cdot \left(\frac{25}{2560}\right)^2 = 18,10 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 29,44 \cdot 18,10 = 532,86 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{532,86}{192} = 2,775$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2560} = 1,95 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4\left(\frac{2560}{5000}\right)^2 = 6,39 \text{ N/mm}^2$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E = 6,39 \cdot 18,10 = 115,64 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{115,64}{94} = 1,23$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,22)}{4 \cdot 2,775} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,22)}{4 \cdot (2,775)} \right)^2 + \frac{1 - (-1,22)}{2 \cdot 2,775^2} + \frac{1}{1,23^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_{cr} &= 1,14 \end{aligned}$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{1,41}{1,14}} = 1,11 > 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,11 - 0,055 \cdot (3 + (-1,22))}{1,11^2} = 0,820 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,820$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,11} = 0,756$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{192}{0,820 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{94}{0,756 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,527 + 0,445 = 0,972 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.



11.4.2. Hrbat u presjeku smanjenja debljine sa  $t = 25 \text{ mm}$  na  $t = 20 \text{ mm}$ 

Ulazni podatci:

Razmak dijafragmi:	$a = 5000 \text{ mm}$
Visina hrpta:	$b = 2650 \text{ mm}$
Debljina hrpta:	$t = 20 \text{ mm}$
Naprezanja za najveći moment savijanja, LC 2102:	$\sigma_{1x,Ed} = 126 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -21 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 40 \text{ N/mm}^2$
Naprezanja za najveću poprečnu silu, LC 2103:	$\sigma_{1x,Ed} = 45 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -10 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 74 \text{ N/mm}^2$
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355,00 \text{ N/mm}^2$
Koeficijent sigurnosti za čelik u tlaku:	$\gamma_{M1} = 1,10$
Proračunska granica popuštanja čelika:	$f_{yd} = 322,73 \text{ N/mm}^2$

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆI MOMENT SAVIJANJA

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{126}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{40}{355} \right)^2 = 0,16$$

$$\alpha_{ult,k} = 2,47$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-21}{126} = -0,17 < 0$$

$$k_{\sigma,x} = 7,81 - 6,29 \cdot \psi_x + 9,78 \cdot \psi_x^2 = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,17) + 9,78 \cdot (-0,17)^2 = 9,13$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189\,800 \cdot \left(\frac{20}{2650}\right)^2 = 10,81 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 9,13 \cdot 10,81 = 98,70 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{98,70}{126} = 0,78$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2650} = 1,89 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2650/5000)^2 = 6,46$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 6,46 \cdot 10,81 = 69,88 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{69,88}{40} = 1,75$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-0,17)}{4 \cdot 0,78} + \left[ \left( \frac{1 + (-0,17)}{4 \cdot 0,78} \right)^2 + \frac{1 - (-0,17)}{2 \cdot 0,78^2} + \frac{1}{1,75^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\alpha_{cr} = 0,701$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,47}{0,701}} = 1,877 \geq 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,877 - 0,055 \cdot (3 + (-0,17))}{1,877^2} = 0,488 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,488$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \overline{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,877} = 0,532$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{126}{0,488 \cdot 355/1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{40}{0,532 \cdot 355/1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,639 + 0,160 = 0,802 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

---

**PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆU POPREČNU SILU**

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{45}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{74}{355} \right)^2 = 0,146$$

$$\alpha_{ult,k} = 2,61$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-10}{45} = -0,22 < 0$$

$$k_{\sigma,x} = 7,81 - 6,29 \cdot \psi_x + 9,78 \cdot \psi_x^2 = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,22) + 9,78 \cdot (-0,22)^2 = 9,69$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 = 189\,800 \cdot \left( \frac{20}{2650} \right)^2 = 10,81 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 9,69 \cdot 10,81 = 104,77 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{104,77}{45} = 2,33$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2650} = 1,89 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2650/5000)^2 = 6,46$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E = 6,46 \cdot 10,81 = 69,88 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{69,88}{74} = 0,94$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-0,22)}{4 \cdot 2,33} + \left[ \left( \frac{1 + (-0,22)}{4 \cdot (2,33)} \right)^2 + \frac{1 - (-0,22)}{2 \cdot 2,33^2} + \frac{1}{0,94^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_{cr} &= 0,84 \end{aligned}$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,61}{0,84}} = 1,769 > 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,769 - 0,055 \cdot (3 + (-0,22))}{1,769^2} = 0,516 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,516$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,769} = 0,555$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{45}{0,516 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{74}{0,555 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,073 + 0,512 = 0,585 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

11.4.3. Hrbat u presjeku smanjenja debljine sa  $t = 20$  mm na  $t = 16$  mm

Ulazni podatci:

Razmak dijafragmi:	$a = 5000$ mm
Visina hrpta:	$b = 2670$ mm
Debljina hrpta:	$t = 16$ mm
Naprezanja za najveći moment savijanja, LC 2102:	$\sigma_{1x,Ed} = 84$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_{2x,Ed} = 66$ N/mm <sup>2</sup> $\tau_{Ed} = 19$ N/mm <sup>2</sup>
Naprezanja za najveću poprečnu silu, LC 2103:	$\sigma_{1x,Ed} = 99$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_{2x,Ed} = -130$ N/mm <sup>2</sup> $\tau_{Ed} = 59$ N/mm <sup>2</sup>
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355,00$ N/mm <sup>2</sup>
Koeficijent sigurnosti za čelik u tlaku:	$\gamma_{M1} = 1,10$
Proračunska granica popuštanja čelika:	$f_{yd} = 322,73$ N/mm <sup>2</sup>

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆI MOMENT SAVIJANJA

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{84}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{19}{355} \right)^2 = 0,06$$

$$\alpha_{ult,k} = 3,94$$



U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{66}{84} = 0,79 < 1$$

$$k_{\sigma,x} = \frac{8,2}{1,05 + \psi_x} = \frac{8,2}{1,05 + 0,79} = 4,47$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189\,800 \cdot \left(\frac{16}{2670}\right)^2 = 6,82 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 4,47 \cdot 6,82 = 30,45 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{30,45}{84} = 0,36$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2670} = 1,87 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2670/5000)^2 = 6,48$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 6,48 \cdot 6,82 = 44,17 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog napreznja i posmičnih računskih napreznja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{44,17}{19} = 2,33$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (0,79)}{4 \cdot 0,36} + \left[ \left( \frac{1 + (0,79)}{4 \cdot 0,36} \right)^2 + \frac{1 - (0,79)}{2 \cdot 0,36^2} + \frac{1}{2,33^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\alpha_{cr} = 0,355$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{3,94}{0,355}} = 3,330 \geq 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno napreznje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{3,330 - 0,055 \cdot (3 + (0,79))}{3,330^2} = 0,282 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,282$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \overline{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 3,330} = 0,340$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{84}{0,282 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{19}{0,340 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,855 + 0,090 = 0,945 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

---

**PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆU POPREČNU SILU**

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{99}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{59}{355} \right)^2 = 0,161$$

$$\alpha_{ult,k} = 2,50$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-130}{99} = -1,31 < -1$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,31))^2 = 32,00$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 = 189\,800 \cdot \left( \frac{16}{2670} \right)^2 = 6,82 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 32,00 \cdot 6,82 = 218,08 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{218,08}{99} = 2,20$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2670} = 1,87 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2670/5000)^2 = 6,48$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E = 6,48 \cdot 6,82 = 44,17 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{44,17}{59} = 0,75$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,31)}{4 \cdot 2,20} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,31)}{4 \cdot (2,20)} \right)^2 + \frac{1 - (-1,31)}{2 \cdot 2,20^2} + \frac{1}{0,75^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_{cr} &= 0,72 \end{aligned}$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,50}{0,72}} = 1,860 > 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,860 - 0,055 \cdot (3 + (-1,31))}{1,860^2} = 0,511 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,511$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,860} = 0,535$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{99}{0,511 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{59}{0,535 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,361 + 0,350 = 0,711 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

11.4.4. Hrbat u presjeku u sredini raspona ( $t = 16 \text{ mm}$ )

Ulazni podatci:

Razmak dijafragmi:	$a = 5000 \text{ mm}$
Visina hrpta:	$b = 2670 \text{ mm}$
Debljina hrpta:	$t = 16 \text{ mm}$
Naprezanja za najveći moment savijanja, LC 2101:	$\sigma_{1x,Ed} = 140 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -241 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 2 \text{ N/mm}^2$
Naprezanja za najveću poprečnu silu, LC 2103:	$\sigma_{1x,Ed} = 139 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -167 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 20 \text{ N/mm}^2$
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355,00 \text{ N/mm}^2$
Koeficijent sigurnosti za čelik u tlaku:	$\gamma_{M1} = 1,10$
Proračunska granica popuštanja čelika:	$f_{yd} = 322,73 \text{ N/mm}^2$

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆI MOMENT SAVIJANJA

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{140}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{2}{355} \right)^2 = 0,16$$

$$\alpha_{ult,k} = 2,54$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-241}{140} = -1,72 < -3$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,72))^2 = 44,29$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189\,800 \cdot \left(\frac{16}{2670}\right)^2 = 6,82 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 44,29 \cdot 6,82 = 301,86 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{301,86}{140} = 2,16$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2670} = 1,87 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2670/5000)^2 = 6,48$$



Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 6,48 \cdot 6,82 = 44,17 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{44,17}{2} = 22,09$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,72)}{4 \cdot 2,16} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,72)}{4 \cdot 2,16} \right)^2 + \frac{1 - (-1,72)}{2 \cdot 2,16^2} + \frac{1}{22,09^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\alpha_{cr} = 2,148$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,54}{2,148}} = 1,086 \geq 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,086 - 0,055 \cdot (3 + (-1,72))}{1,086^2} = 0,861 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,861$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \overline{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,086} = 0,767$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{140}{0,861 \cdot 355/1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{2}{0,767 \cdot 355/1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,254 + 0,001 = 0,255 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

---

**PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆU POPREČNU SILU**

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{139}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{20}{355} \right)^2 = 0,163$$

$$\alpha_{ult,k} = 2,48$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-167}{139} = -1,20 < -3$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,20))^2 = 28,98$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 = 189\,800 \cdot \left( \frac{16}{2670} \right)^2 = 6,82 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 28,98 \cdot 6,82 = 197,53 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{197,53}{139} = 1,42$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2670} = 1,87 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2670/5000)^2 = 6,48$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E = 6,48 \cdot 6,82 = 44,17 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprežanja i posmičnih računskih naprežanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{44,17}{20} = 2,21$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,20)}{4 \cdot 1,42} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,20)}{4 \cdot (1,42)} \right)^2 + \frac{1 - (-1,20)}{2 \cdot 1,42^2} + \frac{1}{2,21^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_{cr} &= 1,20 \end{aligned}$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,48}{1,20}} = 1,435 > 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,435 - 0,055 \cdot (3 + (-1,20))}{1,435^2} = 0,649 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,649$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,435} = 0,642$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{139}{0,649 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{20}{0,642 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,441 + 0,028 = 0,469 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

## 11.4.5. Hrbat u presjeku pokraj ležaja x=36 m (t = 25 mm)

Ulazni podatci:

Razmak dijafragmi:	a = 5000 mm
Visina hrpta:	b = 2560 mm
Debljina hrpta:	t = 25 mm
Naprezanja za najveći moment savijanja, LC 2102:	$\sigma_{1x,Ed} = 257 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -220 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 74 \text{ N/mm}^2$
Naprezanja za najveću poprečnu silu, LC 2103:	$\sigma_{1x,Ed} = 151 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{2x,Ed} = -185 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Ed} = 79 \text{ N/mm}^2$
Granica popuštanja čelika:	$f_y = 355,00 \text{ N/mm}^2$
Koeficijent sigurnosti za čelik u tlaku:	$\gamma_{M1} = 1,10$
Proračunska granica popuštanja čelika:	$f_{yd} = 322,73 \text{ N/mm}^2$

PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆI MOMENT SAVIJANJA

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{257}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{74}{355} \right)^2 = 0,65$$

$$\alpha_{ult,k} = 1,24$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-220}{257} = -0,86 < 0$$

$$k_{\sigma,x} = 7,81 - 6,29 \cdot \psi_x + 9,87 \cdot \psi_x^2 = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,86) + 9,87 \cdot (-0,86)^2 = 20,36$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189\,800 \cdot \left(\frac{25}{2560}\right)^2 = 18,10 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 20,36 \cdot 18,10 = 368,55 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{368,55}{257} = 1,95$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukružene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2560} = 1,95 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4(2560/5000)^2 = 6,39$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 6,39 \cdot 18,10 = 115,64 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{115,64}{74} = 1,56$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-0,86)}{4 \cdot 1,95} + \left[ \left( \frac{1 + (-0,86)}{4 \cdot 1,95} \right)^2 + \frac{1 - (-0,86)}{2 \cdot 1,95^2} + \frac{1}{1,56^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\alpha_{cr} = 1,049$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{1,24}{1,049}} = 1,085 \geq 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,085 - 0,055 \cdot (3 + (-0,86))}{1,085^2} = 0,821 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,821$$



Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \overline{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,085} = 0,767$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{257}{0,821 \cdot 355/1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{74}{0,767 \cdot 355/1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,940 + 0,270 = 1,208 > 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta nije zadovoljen, potreban je dokaz stabilnosti sa ukrućenjem.

---

**PRORAČUN STABILNOSTI HRPTA NA NAPREZANJA ZA NAJVEĆU POPREČNU SILU**

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje karakteristične otpornosti u najkritičnijoj točki ploče:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 = \left( \frac{151}{355} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{79}{355} \right)^2 = 0,33$$

$$\alpha_{ult,k} = 1,74$$

U ovisnosti o odnosu vrijednosti naprezanja na krajevima hrpta, izračunavamo koeficijent izbočavanja:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-185}{151} = -1,23 < -1$$

$$k_{\sigma,x} = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,23))^2 = 30,20$$

Eulerovo kritično naprezanje:

$$\sigma_E = 189\,800 \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 = 189\,800 \cdot \left( \frac{25}{2560} \right)^2 = 18,10 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 30,20 \cdot 18,10 = 546,58 \text{ N/mm}^2$$

Vrijednost komponente:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{546,58}{151} = 3,62$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta utječe na koeficijent izbočavanja neukrućene ploče:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2560} = 1,95 \geq 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4(h_w/a)^2 = 5,34 + 4\left(\frac{2560}{5000}\right)^2 = 6,39 \text{ N/mm}^2$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E = 6,39 \cdot 18,10 = 115,64 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{115,64}{79} = 1,46$$

Faktor za proračunska opterećenja za dosizanje elastičnog kritičnog opterećenja ploče:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-1,23)}{4 \cdot 3,62} + \left[ \left( \frac{1 + (-1,23)}{4 \cdot (3,62)} \right)^2 + \frac{1 - (-1,23)}{2 \cdot 3,62^2} + \frac{1}{1,46^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_{cr} &= 1,36 \end{aligned}$$

Svedena vitkost hrpta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{1,74}{1,36}} = 1,13 > 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\rho_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,13 - 0,055 \cdot (3 + (-1,23))}{1,13^2} = 0,811 < 1,00$$

$$\rho_x = 0,811$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,13} = 0,750$$

Uvjet stabilnosti hrpta:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{151}{0,811 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{74}{0,750 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,333 + 0,319 = 0,652 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

PRORAČUN S JEDNIM UZDUŽNIM UKRUČENJEM [9]

Položaj neutralne osi za ulazna naprezanja od savijanja:

$$b_c = \frac{\sigma_1 \cdot h_w}{|\sigma_1| \cdot |\sigma_2|} = \frac{257 \cdot 2560}{|257| + |-220|} = 1379,29 \text{ mm}$$

Udaljenost osi ukrute od tlačnog ruba presjeka:

$$b_{11} = 450 \text{ mm}$$

Naprezanje u osi ukrute:

$$\sigma_{11} = \frac{\sigma_1 \cdot (b_c - b_{11})}{b_c} = \frac{257 \cdot (1379,29 - 450)}{1379,29} = 173,15 \text{ N/mm}^2$$

Odnos naprezanja na ukruti i tlačnom rubu presjeka:

$$\psi_{11} = \frac{\sigma_{11}}{\sigma_1} = \frac{173,15}{257} = 0,674$$

Svojstva ukrute zatvorenog tipa 250:

Površina ukrute:	$A_{sl,0} = 6115 \text{ mm}^2$
Moment tromosti ukrute:	$I_{sl,0} = 41100000 \text{ mm}^4$
Položaj težišta ukrute:	$z_{sl,0} = 163,2 \text{ mm}$
	$a = bl = 400 \text{ mm}$
Dimenzije ukrute	$b = 250 \text{ mm}$
	$t = 8 \text{ mm}$
	$h = 250 \text{ mm}$

Ukupne karakteristike zatvorene ukrute:

Udaljenost osi ukrute od neutralne osi:

$$b_{c1} = b_c - b_{11} = 1379,29 - 450 = 929,29 \text{ mm}$$

Duljina pripadajućeg dijela ploče:

$$b_p = \frac{3 - \psi_{11}}{5 - \psi_{11}} \cdot b_1 + 0,4 \cdot b_{c1} + a = \frac{3 - 0,674}{5 - 0,674} \cdot 450 + 0,4 \cdot 929,29 + 400 = 1013,68 \text{ mm}$$

Površina pripadajućeg dijela ploče:

$$A_p = b_p \cdot t = 1013,68 \cdot 25 = 25342,07 \text{ mm}^2$$

Površina ukrute i pripadajućeg dijela ploče:

$$A_{sl,1} = A_{sl,0} + A_p = 6115 + 25342,07 = 31457,07 \text{ mm}^2$$

Težište ukrute i pripadajućeg dijela ploče:

$$z_{sl,1} = \frac{A_p \cdot \left(-\frac{t}{2}\right) + A_{sl,0} \cdot z_{sl,0}}{A_{sl,1}} = \frac{25342,07 \cdot \left(-\frac{8}{2}\right) + 6115 \cdot 163,2}{31457,07} = 21,65 \text{ mm}$$

Moment tromosti ukrute i pripadajućeg dijela ploče:

$$I_{sl,1} = I_{sl,0} + \frac{b_p \cdot t^3}{12} + A_{sl,0} \cdot e_1^2 + A_p \cdot e_2^2 = 194496992 \text{ mm}^4$$

*Pločasto ponašanje polja pridržanog ukrotom:*

Kritična dužina polja lima:

$$\begin{aligned} b_1 &= b - b_{1,1} = 2110 \text{ mm} \\ b_2 &= b_{1,1} = 450 \text{ mm} \\ a_c &= 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t^3 \cdot b}} = 6265,40 \text{ mm} \end{aligned}$$

Elastično kritično naprezanje u području ukrute:

$$a < a_c \rightarrow \sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t^3 \cdot b \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2} = 718,71 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanje na tlačnom rubu ploče:

$$\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,sl} \cdot \frac{b_c}{(b_c - b_1)} = 1066,74 \text{ N/mm}^2$$

Elastično kritično naprezanje izbočavanja ploče:

$$\sigma_{cr,x} = \sigma_{cr,x} = 1066,67 \text{ N/mm}^2$$

Odnos razmaka dijafragmi i visine hrpta:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{5000}{2560} = 1,95$$

$$\alpha < 3 \rightarrow k_\tau = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot I_{sl}/(t^3 \cdot h_w)}{\alpha^2} + 2,2 \cdot \sqrt{\frac{I_{sl}}{t^3 \cdot h_w}} = 9,708$$

Elastični kritični posmik za izbočavanje ploče:

$$\tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E = 9,708 \cdot 18,10 = 175,72 \text{ N/mm}^2$$

Odnos kritičnog posmičnog naprezanja i posmičnih računskih naprezanja:

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} = \frac{175,72}{74} = 2,38$$

Komponenta:

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{1066,67}{257} = 4,51$$

Odnos naprezanja na rubovima hrpta:

$$\psi_x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-220}{257} = -0,86 < 0$$



Faktor za proračunsko opterećenje da se dosegne elastično kritično opterećenje ploče:

$$\begin{aligned}\frac{1}{\alpha_{cr}} &= \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[ \left( \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,t}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1 + (-0,86)}{4 \cdot 5,21} + \left[ \left( \frac{1 + (-0,86)}{4 \cdot (4,51)} \right)^2 + \frac{1 - (-0,86)}{2 \cdot 4,51^2} + \frac{1}{2,38^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \alpha_{cr} &= 2,04\end{aligned}$$

Svedena vitkost hrpta:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{1,236}{2,04}} = 0,78 > 0,673$$

Koeficijent redukcije za uzdužno normalno naprezanje:

$$\begin{aligned}\rho_x &= \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,78 - 0,055 \cdot (3 + (-0,86))}{0,78^2} = 1,091 < 1,00 \\ \rho_x &= 1,000\end{aligned}$$

Redukcijski faktor za posmična naprezanja iznosi:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 0,78} = 1,067$$

Štapno ponašanje ukrute:

Kritično elastično naprezanje izvijanja tlačnog štapa ukrute:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,a} \cdot a^2} = 512,59 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanje na tlačnom rubu ploče:

$$\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,sl} \cdot \frac{b_c}{(b_c - b_1)} = 760,81 \text{ N/mm}^2$$

Vitkost štapa:

$$\bar{\lambda}_c = \bar{\lambda}_p = 0,78$$

Pomoćni faktor:

$$\alpha = 0,34$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}} = 78,63$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,50$$

$$e = \max(e_1, e_2) = 141,55 \text{ mm}$$

$$\phi = 0,5 \left[ 1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2 \right] = 0,948$$

Faktor redukcije za izvijanje tlačne ukrute:

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = 0,672$$

Interakcijski faktor redukcije između pločastog i štapnog ponašanja:

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,p}} - 1 = 0,402$$

$$\rho_c = (\rho_x - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0,883$$

Uvijte stabilnosti:

$$\left( \frac{\sigma_{1x,Ed}}{\rho_c \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left( \frac{257}{0,883 \cdot 355/1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{74}{1,067 \cdot 355/1,1} \right)^2 \leq 1,00$$

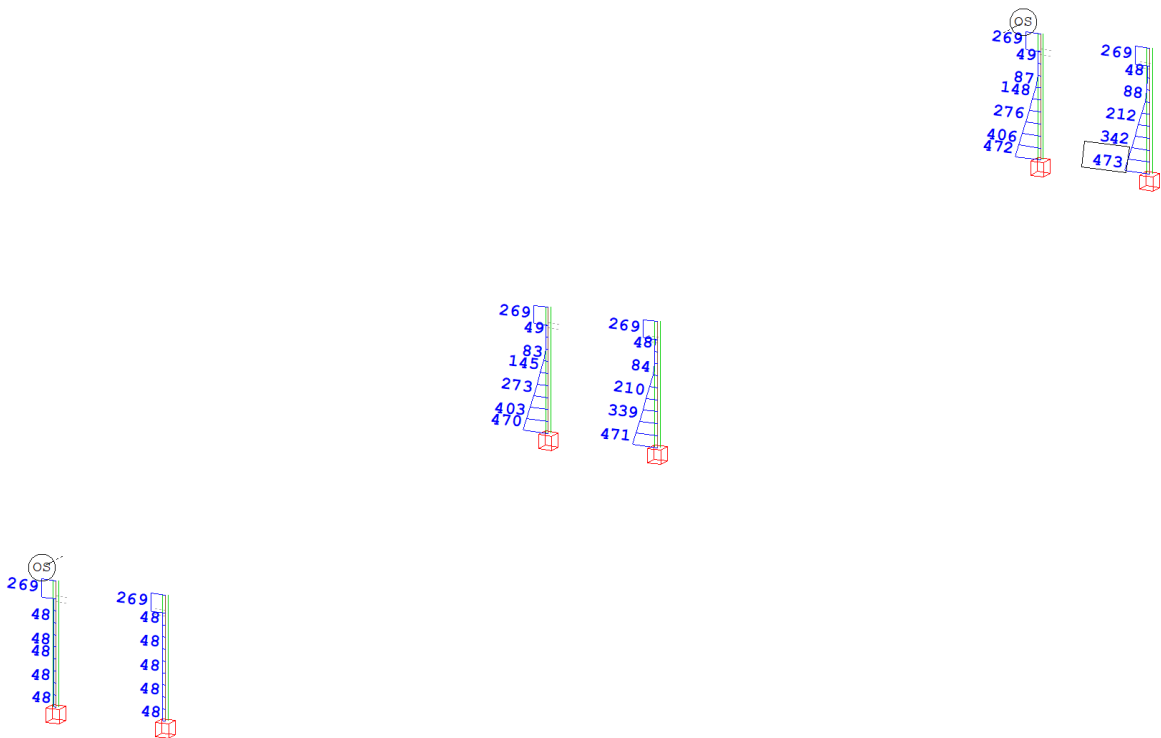
$$0,814 + 0,139 = 0,953 < 1,00$$

Uvjet za stabilnost hrpta je zadovoljen.

## 11.5. Armatura stupova i vezne grede

Za dimenzioniranje stupova i veznih greda korišten je faktor ponašanja  $q = 1.5$ .

### 11.5.1. Armatura stupova



Slika 204. Ukupna potrebna armatura stupa, SOFiSTiK

Opseg stupa:

$$O = 2 \cdot r \cdot \pi = 2 \cdot 75 \cdot \pi = 471 \text{ cm}$$

Ukupna potrebna količina armature:

$$\frac{473 \text{ cm}^2}{7 \text{ m}} = 67,57 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Najmanja ukupna površina armature u seizmičkom području [10]:

$$A_{s,\min} = 8\emptyset 12 = 9,05 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\min} = 0,010 \cdot A_1 = 0,01 \cdot 75^2 \cdot \pi = 176,71 \text{ cm}^2$$

Maksimalna ukupna armatura stupa [6]:

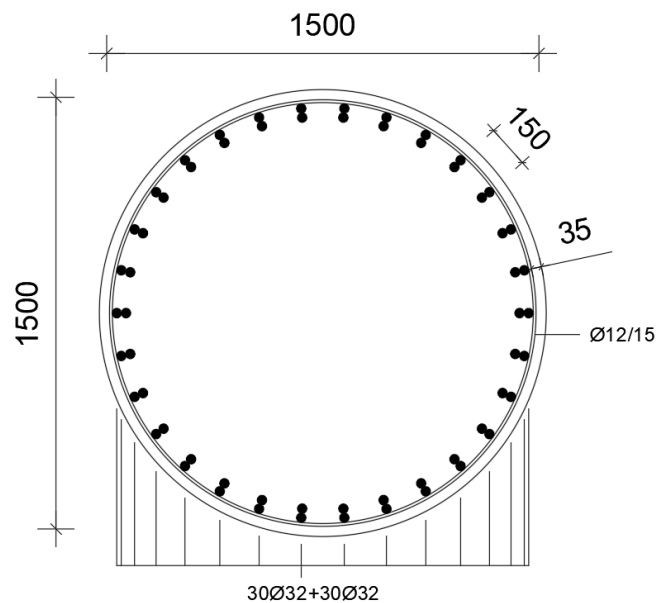
$$A_{s,\max} = 0,04 \cdot A_1 = 0,04 \cdot 75^2 \cdot \pi = 706,86 \text{ cm}^2$$

Odabrana armatura stupa:

$$A_{s,\text{prov},\text{ukupno}} = 60\emptyset 32 = 482,55 \text{ cm}^2 > 473 \text{ cm}^2$$

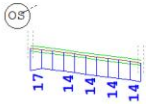
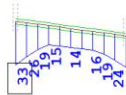
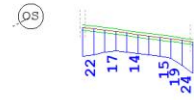
Armatura je postavljena u snopu od  $30\emptyset 32 + 30\emptyset 32$ .

Razmak između armature u iznosi 15,00 cm. Vilice promjera 12 mm su postavljene na razmaku od 15 cm.



Slika 205. Armatura stupa, SOFiSTiK

## 11.5.2. Armatura donje stijenke vezne grede



Slika 206. Ukupna potrebna armatura donje stijenke vezne grede, SOFiSTiK

Opseg grede:

$$O = 4a = 4 \cdot 100 = 400 \text{ cm}$$

Potrebna količina armature:

$$\frac{33 \text{ cm}^2}{5,0 \text{ m}} = 6,60 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Najmanja ukupna površina armature u seizmičkom području [10]:

$$A_{s,\min} = 8\emptyset 12 = 9,04 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\min} = 0,010 \cdot A_1 = 0,01 \cdot 100^2 = 100 \text{ cm}^2$$

Maksimalna armatura grede [6]:

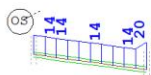
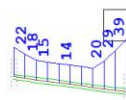
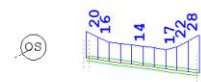
$$A_{s,max,1} = 0,04 \cdot A_1 = 0,04 \cdot 100^2 = 400 \text{ cm}^2$$

Odabrana armatura grede za jednu donju stijenku:

$$A_{s,prov,stijenka\ dolje} = 10\emptyset 28 = 61,58 \text{ cm}^2$$

Armatura se postavlja u dva reda. U prvom redu se nalazi 6 šipki promjera 28 mm, a u drugom redu se nalaze 4 šipke promjera 28 mm. Razmak između šipki armature iznosi 17.5 cm.

### 11.5.3. Armatura gornje stijenke vezne grede



Slika 207. Ukupna potrebna armatura gornje stijenke vezne grede, SOFiSTiK

Opseg grede:

$$O = 4a = 4 \cdot 100 = 400 \text{ cm}$$

Potrebna količina armature:

$$\frac{39 \text{ cm}^2}{5,0 \text{ m}} = 7,80 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Najmanja ukupna površina armature u seizmičkom području [10]:

$$A_{s,\min} = 8\emptyset 12 = 9,04 \text{ cm}^2$$
$$A_{s,\min} = 0,010 \cdot A_1 = 0,01 \cdot 100^2 = 100 \text{ cm}^2$$

Maksimalna armatura grede [6]:

$$A_{s,\max,1} = 0,04 \cdot A_1 = 0,04 \cdot 100^2 = 400 \text{ cm}^2$$

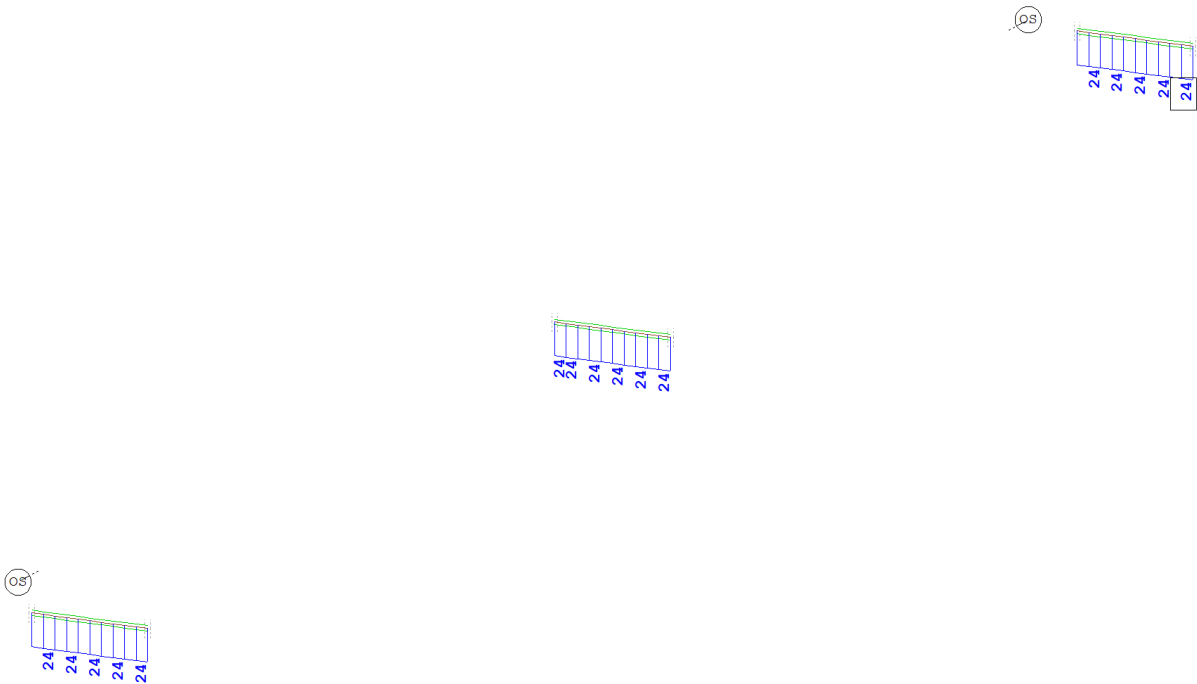
Odabrana armatura grede za jednu stijenku:

$$A_{s,\text{prov,stijenka gore}} = 12\emptyset 28 = 73,89 \text{ cm}^2$$

Armatura se postavlja u dva reda. U prvom redu se nalazi 6 šipki promjera 28 mm, a u drugom redu se također nalazi 6 šipki promjera 28 mm. Razmak između šipki armature iznosi 17.5 cm.



## 11.5.4. Armatura bočnih stijenki vezne grede



Slika 208. Ukupna potrebna armatura bočnih stijenki vezne grede, SOFiSTiK

Opseg grede:

$$O = 4a = 4 \cdot 100 = 400 \text{ cm}$$

Potrebna količina armature:

$$\frac{24 \text{ cm}^2}{5,0 \text{ m}} = 4,80 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Najmanja ukupna površina armature u seizmičkom području [10]:

$$A_{s,\min} = 8\emptyset 12 = 9,04 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\min} = 0,010 \cdot A_1 = 0,01 \cdot 100^2 = 100 \text{ cm}^2$$

Maksimalna armatura grede [6]:

$$A_{s,max,1} = 0,04 \cdot A_1 = 0,04 \cdot 100^2 = 400 \text{ cm}^2$$

Odabrana armatura grede za jednu bočnu stijenku:

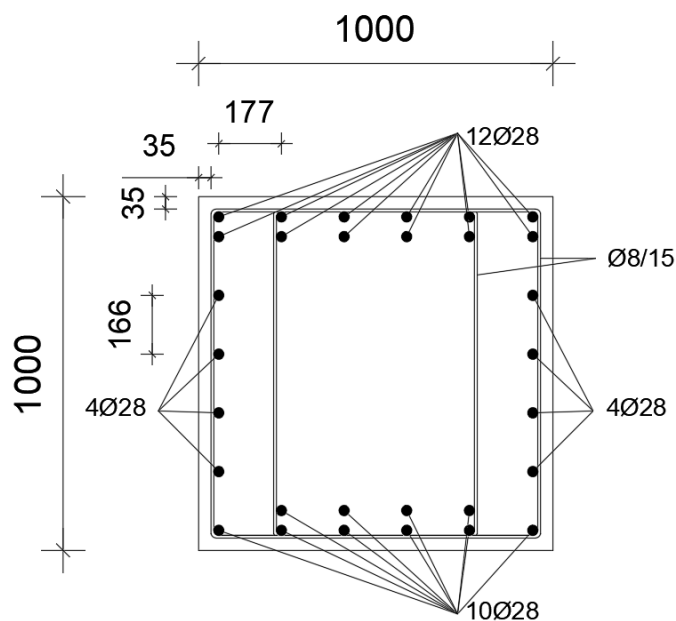
$$A_{s,prov,stijenka\ bočno} = 4\emptyset 28 = 24,63 \text{ cm}^2$$

Armatura se postavlja u jednom redu. U svakoj stijenci se nalaze 4 šipke promjera 28 mm na međusobnom razmaku od 16.5 cm. Postavljene su vilice promjera 8 mm na razmaku od 15 centimetara.

Ukupna površina armature u veznoj gredi:

$$A_{s,prov,ukupno} = 2 \cdot 3\emptyset 32 + 10\emptyset 28 + 12\emptyset 28 = 184,73 \text{ cm}^2$$

$$184,73 \text{ cm}^2 > 33 + 39 + 2 \cdot 24 = 120 \text{ cm}^2$$



Slika 209. Armatura vezne grede, SOFiSTiK

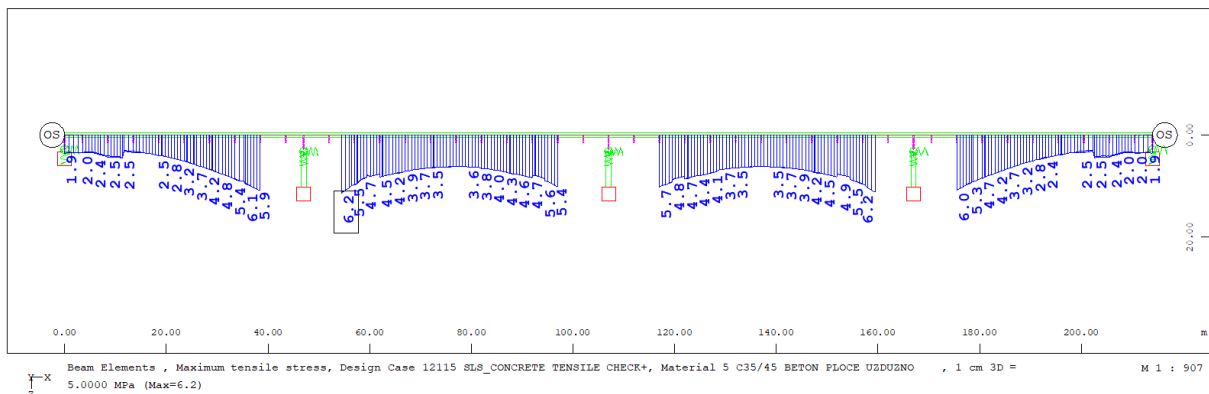
## 12. GSU MOSTA OTVORENOG PRESJEKA S I NOSAČIMA

### Naprezanja (vlak) u betonskoj ploči za rijetku kombinaciju

Proračun naprezanja u betonskoj ploči proveden je na isti način kao i kod mosta sa nosačima zatvorenog tipa. Sva objašnjenja dana su u poglavlju 6.

Za ploču je u modelu proveden postupak redukcije modula elastičnosti na 30 MPa u području raspucavanja. Područje raspucavanja definirano je na dijelovima nosača gdje naprezanja u ploči prelaze iznos:

$$\sigma_{rasp.} = 2 \cdot f_{ctm} = 2 \cdot 3,2 = 6,4MPa \quad (\text{za beton C35/45: } f_{ctm} = 3,2 \text{ N/mm}^2)$$



Slika 210. Prikaz najvećih vlačnih naprezanja u betonskoj ploči, SOFiSTiK

## Širina pukotina za čestu kombinaciju

Za spregnute mostove provodi se dokaz širine pukotine od 0,2 mm.

Provedena provjera širina pukotina u betonu stupa za granično stanje uporabljivosti je za:

- čestu kombinaciju djelovanja

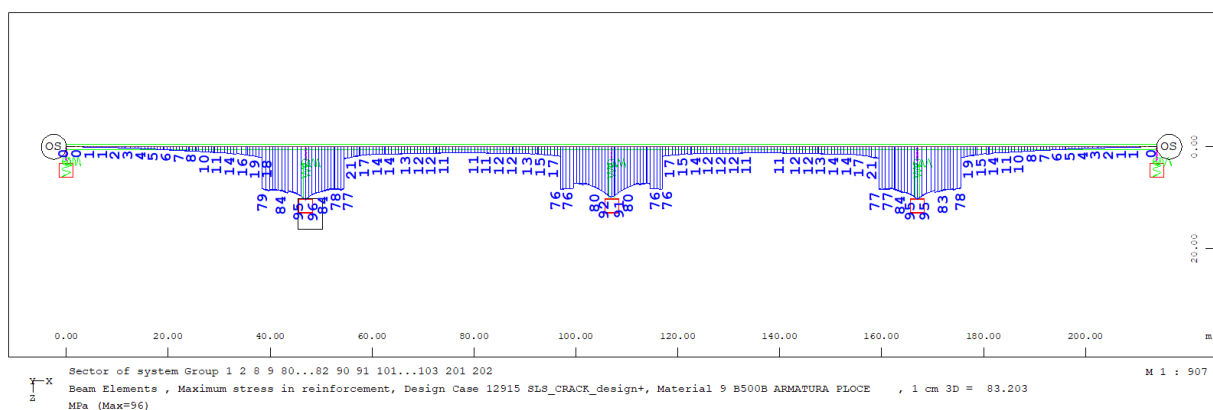
$$S_d = S_d \left[ \sum_j (G_{k,j}) + \psi_{11} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right] \quad w < 0,2mm$$

### 12.1. Minimalna armatura u betonskoj ploči

Za određivanje minimalne armature u betonskoj ploči mosta s nosačima otvorenog tipa korišteni su isti izrazi kao i pri proračunu minimalne armature u betonskoj ploči mosta s nosačima zatvorenog tipa. Sve vrijednosti i izrazi dani su u poglavlju 6.2.

### 12.2. Kontrola raspucavanja zbog izvanrednog djelovanja

Za kontrolu raspucavanja u betonskoj ploči mosta s nosačima otvorenog tipa korišteni su isti izrazi kao i pri kontroli raspucavanja betonske ploče mosta s nosačima zatvorenog tipa. Sve vrijednosti i izrazi dani su u poglavlju 6.3.



Slika 211. Prikaz najvećeg naprezanja u armaturi od unutarnjih sila, SOFiSTiK

### 12.3. Proračun minimalne armature ploče i kontrola raspucavanja

Vlačno naprezanje u armaturi zbog izravnog djelovanja:

$$\sigma_s = \sigma_{s,0} + \Delta\sigma_s = 157,6 \text{ MPa}$$

Naprezanje u armaturi prouzročeno unutarnjim silama koje djeluju na spregnuti presjek, proračunano zanemarujući beton u vlaku (ČESTA KOMBINACIJA):

$$\sigma_{s,0} = 96 \text{ MPa}$$

Povećanje naprezanja u armaturi zbog učinaka sudjelovanja betona između pukotina u odnosu na naprezanja kada se proračun temelji na spregnutom presjeku sa zanemarenjem betona:

$$\Delta\sigma_s = \frac{0,4f_{ctm}}{\alpha_{st} \cdot \rho_s} = 61,6 \text{ MPa}$$

Srednja vlačna čvrstoća betona:

$$f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

Odnos karakteristika spregnutog presjeka s raspucalim betonom i presjeka čeličnog nosača:

$$\alpha_{st} = \frac{A \cdot I}{A_a \cdot I_a} = 1,2930$$

Karakteristike spregnutog presjeka zanemarujući beton u vlaku i profilirani lim ako postoji, ali uzeti u obzir armaturu (karakteristike raspucalog spregnutog presjeka):

$$A = 0,2577 \text{ m}^2$$

$$I = 0,396 \text{ m}^4$$

Karakteristike dijela presjeka samo od konstrukcijskog čelika:

$$A_a = 0,2363 \text{ m}^2$$

$$I_a = 0,334 \text{ m}^4$$

Omjer armiranja

$$\rho_s = A_s/A_{ct} = 0,0161$$

Ukupna površina svih slojeva uzdužne armature unutar sudjelujuće površine:

$$A_s = 226,1 \text{ cm}^2$$

Površina vlačnog područja (površina betonskog dijela unutar sudjelujuće širine):

$$A_{ct} = 14062,5 \text{ cm}^2$$

Sudjelujuća širina:

$$b_{eff} = 562,5 \text{ cm}$$

Zahtijevana minimalna površina armature za ploče spregnutih greda:

$$A_s = k_s \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

$$A_s = 205,6 \text{ cm}^2$$

Koeficijent kojim se uzima u obzir učinak smanjenja uzdužne sile u betonskoj ploči zbog početnog raspucavanja i lokalnog proklizavanja posmičnog spoja:

$$k_s = 0,9$$

Koeficijent kojim se obuhvaća raspodjela naprezanja unutar presjeka neposredno prije raspucavanja:

$$k_c = \frac{1}{1 + h_c/(2z_0)} + 0,3 \leq 1$$

$$k_c = 1,16 \rightarrow k_c = 1$$

Debljina betonske pojasnice bez vuta ili rebara:

$$h_c = 25 \text{ cm}$$

Vertikalni razmak težišta neraspucane betonske pojasnice i neraspucanog spregnutog presjeka, proračunanog upotrebljavajući faktor redukcije  $n_0 = E_a/E_{cm}$  za kratkotrajno opterećenje (svađanje presjeka na čelik):

$$z_0 = 79,57 \text{ cm}$$

Koeficijent kojim se uzima u obzir učinak nelinearno raspoređenih vlastitih naprezanja:

$$k = 0,8$$

Srednja vrijednost djelotvorne vlačne čvrstoće betona u očekivanom trenutku pojave prvih pukotina:

$$f_{ct,eff} \approx f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

Ograničenje promjera šipke: ( $f_{ct,0} = 2,9 \text{ MPa}$  – referentna čvrstoća)

$$\phi = \phi^* \cdot \frac{f_{ct,eff}}{f_{ct,0}} = 27 \text{ mm}$$

Najveća dimenzija šipke  $\phi^*$  [mm] za širinu pukotine 0,2 mm (prema tablici 4):

$$25,0 \text{ mm}$$

Najveći razmaci šipki  $s$  [mm]:

$$200,0 \text{ mm}$$

Tablica 10. Minimalna armatura ploče i kontrola raspucavanja

ODABIR ARMATURE	$\phi$ [mm]	razmak $s$ [cm]	$A_s$ [cm <sup>2</sup> ]	
POTREBNO:	Max. 27	Max. 20,0	Min. 205,6	
ODABRANO:	16	10	226,1	ZADOVOLJENO

## 12.4. Provjera naprezanja (tlak)

Provedena je provjera naprezanja u ploči i stupu za nazovistalnu i rijetku kombinaciju. Potrebno je zadovoljiti uvjet da tlačna naprezanja budu manja od:

PLOČA I STUP:

Beton C35/45:  $f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$

- rijetka ili karakteristična kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum_j G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right] \quad \sigma_c < 0,6f_{ck} = 21 \text{ N/mm}^2$$

- nazovistalna kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum_j (G_{k,j}) + \sum_i (\psi_{2i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right] \quad \sigma_c < 0,45f_{ck} = 15,8 \text{ N/mm}^2$$

Beton C40/50:  $f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$

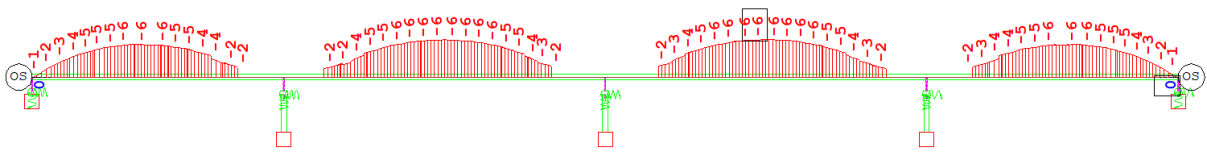
- rijetka ili karakteristična kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum_j G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right] \quad \sigma_c < 0,6f_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$$

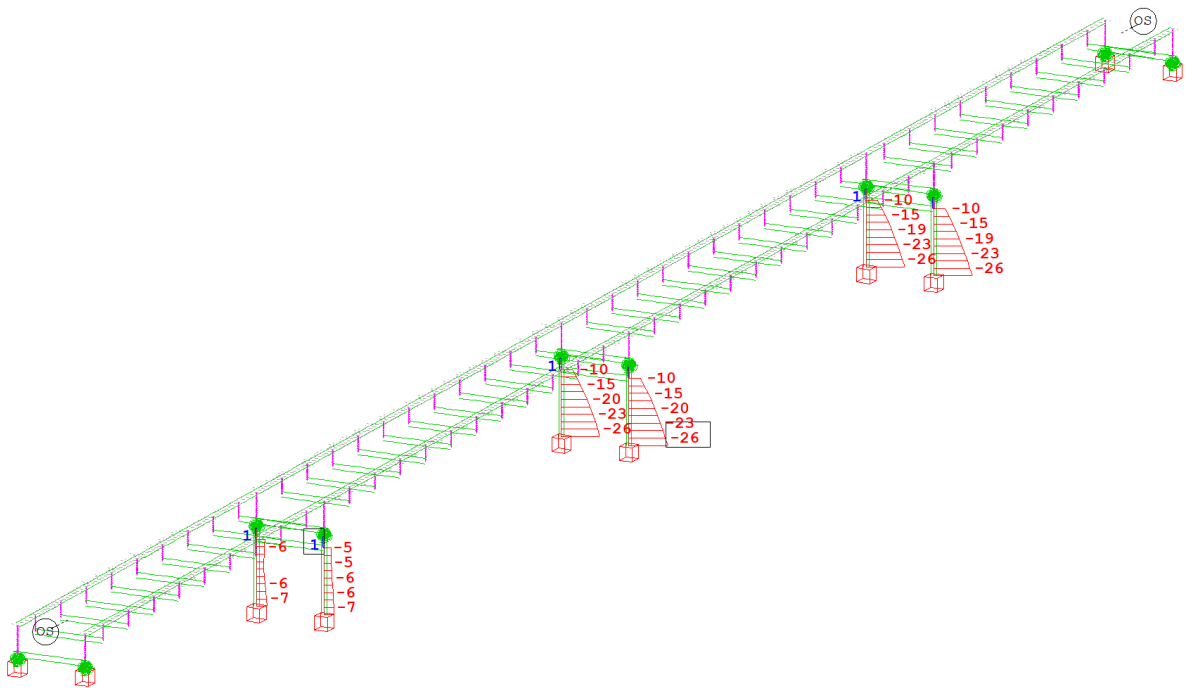
- nazovistalna kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum_j (G_{k,j}) + \sum_i (\psi_{2i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right] \quad \sigma_c < 0,45f_{ck} = 18 \text{ N/mm}^2$$

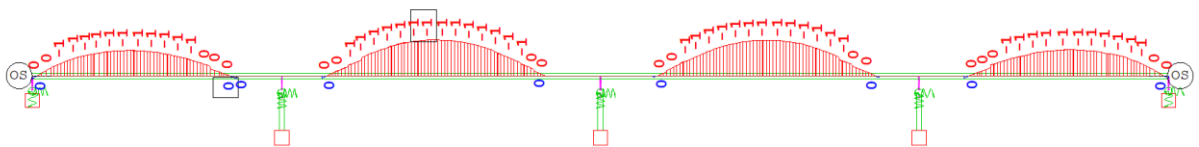
U nastavku se nalaze tlačna naprezanja u betonu za rijetku i nazovistalnu kombinaciju.



Slika 212. Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za rijetku kombinaciju, SOFiSTiK

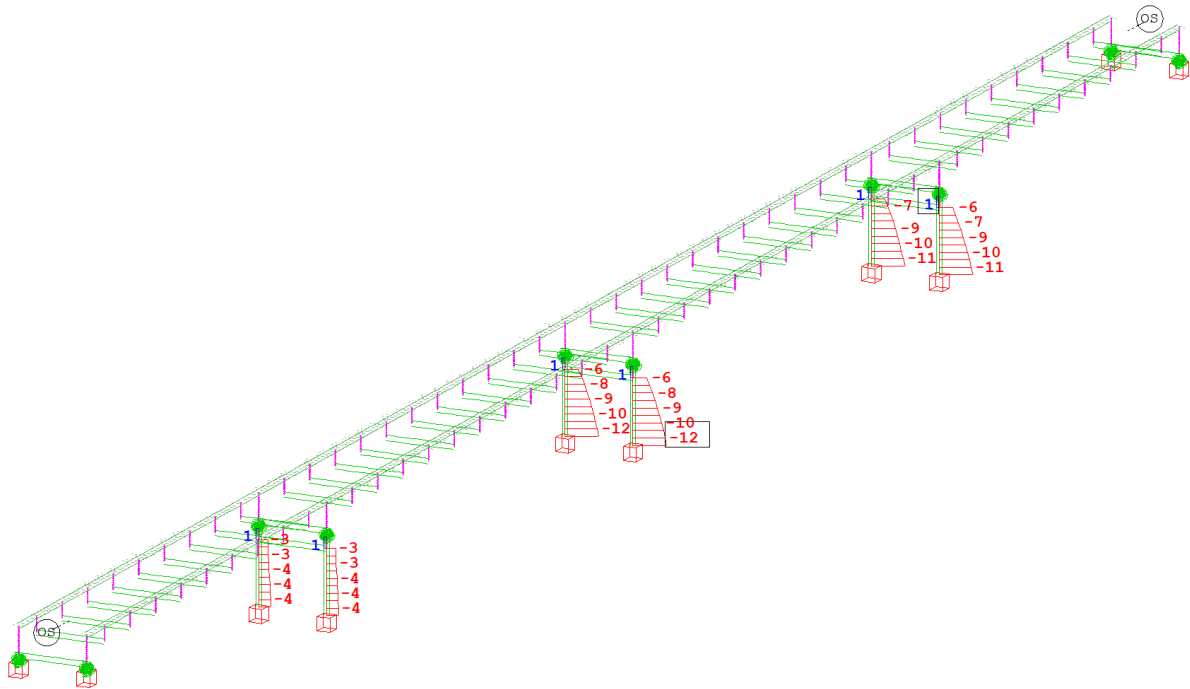


Slika 213. Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za rijetku kombinaciju, SOFiSTiK



Slika 214. Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za nazovistalnu kombinaciju, SOFiSTiK





Slika 215. Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za nazovistalnu kombinaciju, SOFiSTiK

Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za rijetku kombinaciju:

$$6 \text{ N/mm}^2 < 21 \text{ N/mm}^2$$

Tlačna naprezanja u ploči su manja od dopuštenih naprezanja za rijetku kombinaciju, a time je zadovoljen uvjet nosivosti.

Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za rijetku kombinaciju:

$$26 \text{ N/mm}^2 > 24 \text{ N/mm}^2$$

Tlačna naprezanja u stupu su veća od dopuštenih naprezanja za rijetku kombinaciju. S obzirom da su naprezanja unutar dopuštene granice odstupanja od 10% ( $26,4 \text{ N/mm}^2$ ) zadovoljen je uvjet nosivosti.

Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za nazovistalnu kombinaciju:

$$1 \text{ N/mm}^2 < 15,8 \text{ N/mm}^2$$

Tlačna naprezanja u ploči su manja od dopuštenih naprezanja za nazovistalnu kombinaciju, a time je zadovoljen uvjet nosivosti.

Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za nazovistalnu kombinaciju:

$$12 \text{ N/mm}^2 < 18 \text{ N/mm}^2$$

Tlačna naprezanja u stupu su manja od dopuštenih naprezanja za nazovistalnu kombinaciju, a time je zadovoljen uvjet nosivosti.

## 13. LEŽAJEVI MOSTA OTVORENOG PRESJEKA S I NOSAČIMA

### 13.1. Odabir ležajeva prema kombinacijama reakcija

Za dimenzionirani most odabrani su lončasti ležajevi.

Dispozicija ležaja:								
SMJER	DJELOVANJE	LC U MODELU	Tražena vrijednost iz Wingrafa	U1	S1	S2	S3	U2
				TGa3, TGe3	TGa6, TGe6	TGe7, TF7	TGe6, TF6	TGa3, TGe3
VERTIKALNE REAKCIJE	Stalno TLAK	4503	Spring force in global z	1345	5060	5080	5059	1345
	Promet TLAK	3013+3113+3213	Spring force in global z	726	125	179	129	725
	Promet VLAK	3014+3114+3214	Spring force in global z	117	1814	1920	1815	110
	Vjetar opterećen (TLAK/VLAK)	463	Spring force in global z	58	196	201	195	58
	Vjetar neopterećen (TLAK/VLAK)	473	Spring force in global z	97	328	338	328	97
	Temperatura TLAK	9846	Spring force in global z	132	163	81	174	143
	Temperatura VLAK	9845	Spring force in global z	161	207	61	197	160
Potres svi smjerovi (TLAK/VLAK)	10038, 10138, 10238	Spring force in global z	301	720	1018	729	303	
POPREČNE REAKCIJE	Vjetar opterećen (+/-)	461	Spring force in global y	127	340	377	340	128
	Vjetar neopterećen (+/-)	471	Spring force in global y	156	415	460	415	156
	Potres y smjer (+/-)	10138*	Spring force in global y	488	1219	1887	1217	486
UZDUŽNE REAKCIJE	Vjetar opterećen (+/-)	462	Spring force in global x	0	0	146	143	0
	Vjetar neopterećen (+/-)	472	Spring force in global x	0	0	101	99	0
	Kočenje (+/-)	9345, 9346	Spring force in global x	0	0	230	230	0
	Temperatura pozitivna	495	Spring force in global x	0	0	1407	1406	0
	Temperatura negativna	496	Spring force in global x	0	0	550	549	0
	Potres x smjer (+/-)	10038*	Spring force in global x	0	0	944	959	0
VERTIKALNE KOMBINACIJE REAKCIJA	1. MAX: Stalno + Promet + Temperatura + Vjetar opt.			2261	5544	5541	5557	2271
	2. MAX: Stalno + Temperatura + Vjetar neopterećen			1574	5551	5499	5561	1585
	3. MAX: Stalno + Potres + 0,5xTemperatura			1712	5861,5	6138,5	5875	1719,5
	4. MIN: Stalno + Promet + Temperatura + Vjetar opt.			1009	2843	2898	2852	1017
	5. MIN: Stalno + Temperatura + Vjetar neopterećen			1087	4525	4681	4534	1088
	6. MIN: Stalno + Potres + 0,5xTemperatura			963,5	4236,5	4031,5	4231,5	962
UZDUŽNE KOMB. REAKCIJA	1. Kočenje + Vjetar opterećen + Temperatura			0	0	1783	1779	0
	2. Temperatura + Vjetar neopterećen			0	0	1508	1505	0
	3. Potres x smjer + 0,5x Temperatura			0	0	1647,5	1662	0
UZDUŽNI POMACI	Temperatura pozitivna	495	Node displacement in global x	105	69	23	23	59
	Temperatura negativna	496	Node displacement in global x	41	27	9	9	23
	Potres x smjer (+/-)	10001	Node displacement in global x	16	16	15	15	16
	Vjetar neopterećen / opterećen	461, 471	Node displacement in global y	1	3	3	3	1
POPREČNI POMACI	Potres y smjer (+/-)	10102	Node displacement in global y	2	8	13	8	2
	UZDUŽNA KOMBINACIJA POMAKA			0,4xPotres x smjer + 0,5xTemperatura	58,9	40,9	17,5	17,5
ODABRANA PRIJELAZNA NAPRAVA				D160				D160

Slika 216. Rekapitulacija sila u ležajevima i pomaka od stalnih i promjenjivih djelovanja

Odabrani ležajevi:

Upornjak U1:

Maksimalna uzdužna kombinacija reakcija = 0 kN

Maksimalna vertikalna kombinacija reakcija = 2261,0 kN

Maksimalna poprečna reakcija = 488 kN

Na lijevom stupu odabran je ležaj TGa-3, a na desnom TGe-3

Stupište S1:

Maksimalna uzdužna kombinacija reakcija = 0 kN

Maksimalna vertikalna kombinacija reakcija = 5861,50 kN

Maksimalna poprečna reakcija = 1219 kN

Na lijevom stupu odabran je ležaj TGa-6, a na desnom TGe-6

Stupište S2:

Maksimalna uzdužna kombinacija reakcija = 1783,0 kN

Maksimalna vertikalna kombinacija reakcija = 6138,5 kN

Maksimalna poprečna reakcija = 1887,0 kN

Na lijevom stupu odabran je ležaj TGe-7, a na desnom TF-7

Stupište S3:

Maksimalna uzdužna kombinacija reakcija = 1779,0 kN

Maksimalna vertikalna kombinacija reakcija = 5875,0 kN

Maksimalna poprečna reakcija = 1217,0 kN

Na lijevom stupu odabran je ležaj TGe-6, a na desnom TF-6

Upornjak U2:

Maksimalna uzdužna kombinacija reakcija = 0 kN

Maksimalna vertikalna kombinacija reakcija = 2271,0 kN

Maksimalna poprečna reakcija = 486,0 kN

Na lijevom stupu odabran je ležaj TGa-3, a na desnom TGe-3

### 13.2. Odabir prijelaznih naprava prema kombinacijama reakcija

Na upornjaku U1 mjerodavna vrijednost pomaka je 58,9 mm te je odabrana prijelazna naprava tipa D160.

Na upornjaku U2 mjerodavna vrijednost pomaka je 35,9 mm te je odabrana prijelazna naprava tipa D160.

## 14. USPOREDBA REZULTATA DVAJU PROJEKTIRANIH MOSTOVA

Za usporedbu rezultata dvaju projektiranih mostova prvenstveno će se promatrati količina utrošenog čelika.

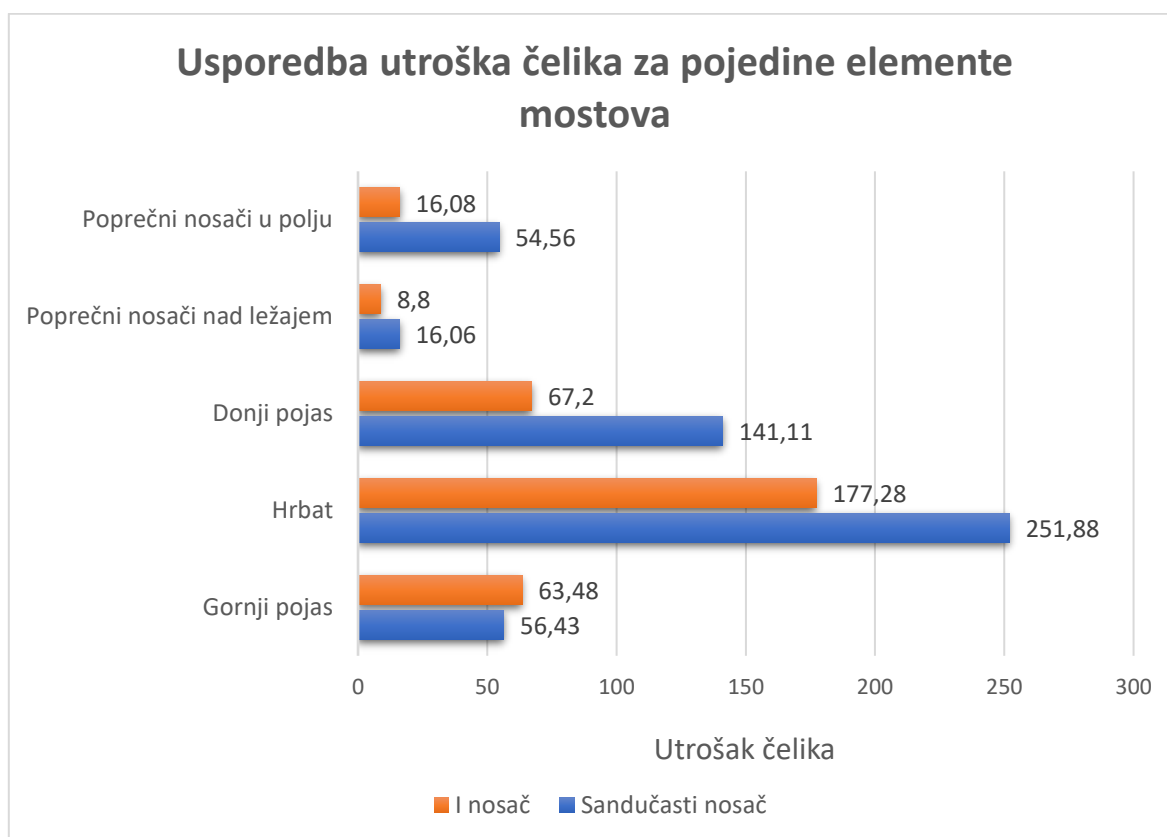
Elementi donjeg ustroja su jednakih dimenzija za oba dva mosta. Rezne sile u elementima su također praktički jednake i u tim dijelovima mostova nema značajnih razlika.

Prometne površine i dodatna oprema mostove je u potpunosti jednaka za projektirani most otvorenog presjeka s I nosačima i most otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima.

Kod betonskih ploča dolazi do prvih vidljivih razlika. Kod mosta otvorenog presjeka s I nosačima osi tih nosača se nalaze na međusobnom razmaku od 6,50 m što izaziva potrebu za korištenje betonske ploče sa vutama koje povećavaju količinu utrošenog betona. Težina te ploče iznosi 87,14 kN/m mosta. Pri dimenziranju mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima osni razmak između osi gornjih pojasnica susjednih nosača iznosi 4,30 m što dopušta izvedbu betonske ploče u konstantnom nagibu bez vuta. Težina te ploče iznosi 71,00 kN/m mosta što je 18,52 % manje u odnosu na most otvorenog presjeka s I nosačima.

Značajne razlike u utrošku materijala se događaju u elementima glavnih nosača. Promotrimo prvo poprečne nosače i dodatne ukrutne elemente ovih mostova. Na mosta otvorenog presjeka s I nosačima koristimo 0,201 t čelika za svaki poprečni nosač u polju i sve pripadajuće ukrutne elemente, dok se nad ležajevima koristi 0,88 t čelika što ukupno iznosi 1,081 t čelika. Kod mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima koristimo 0,682 t čelika za svaki poprečni nosač u polju i sve pripadajuće ukrutne elemente, dok se nad ležajevima koristi 1,606 t čelika što ukupno iznosi 2,288 t čelika. Iz zbrojenih količina čelika za poprečne nosače u polju i iznad ležajeva dobivamo da kod mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima koristimo 112 % više čelika.

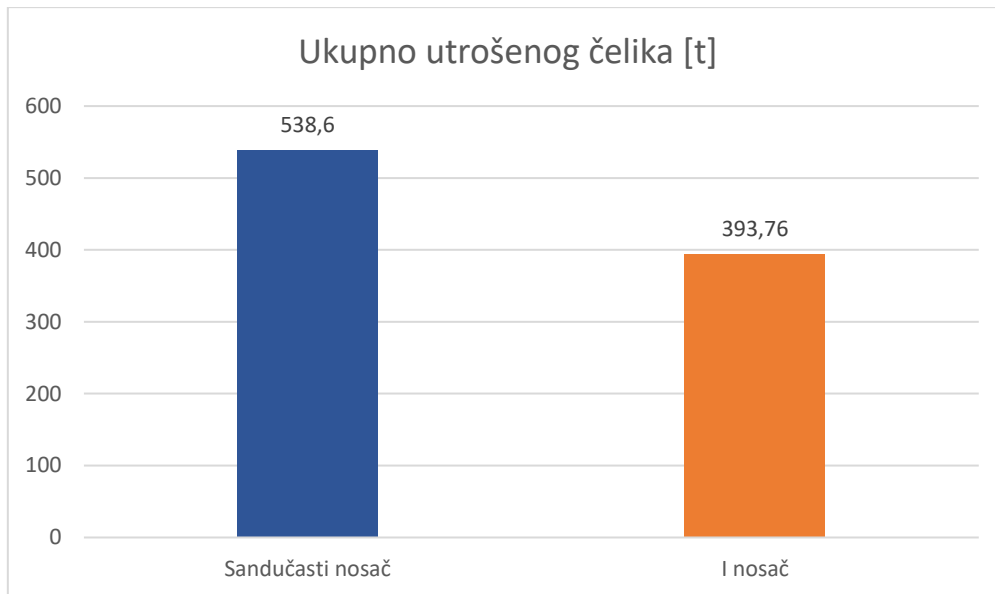
U hrptovima i pojasnicama dolazi do najvećih razlika u utrošku čelika. Pri projektiranju mosta otvorenog presjeka s I nosačima korišteni su deblji elementi ali manji ih je bio broj. Nosač ima dvije pojasnice i jedan hrbat. Na hrbat je utrošeno 177,28 t čelika, za gornji pojas 63,48 t, te za donji pojas 67,20 tona čelika. S druge strane imamo most otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima koji ima tanje elemente ali veći broj njih. Nosač ima dvije pojasnice i dva hrbat. Na hrbat je utrošeno 251,88 t čelika, za gornji pojas 56,43 t, te za donji pojas 141,11 tona čelika



Slika 217. Graf usporedbe utroška čelika za pojedine elemente mostova

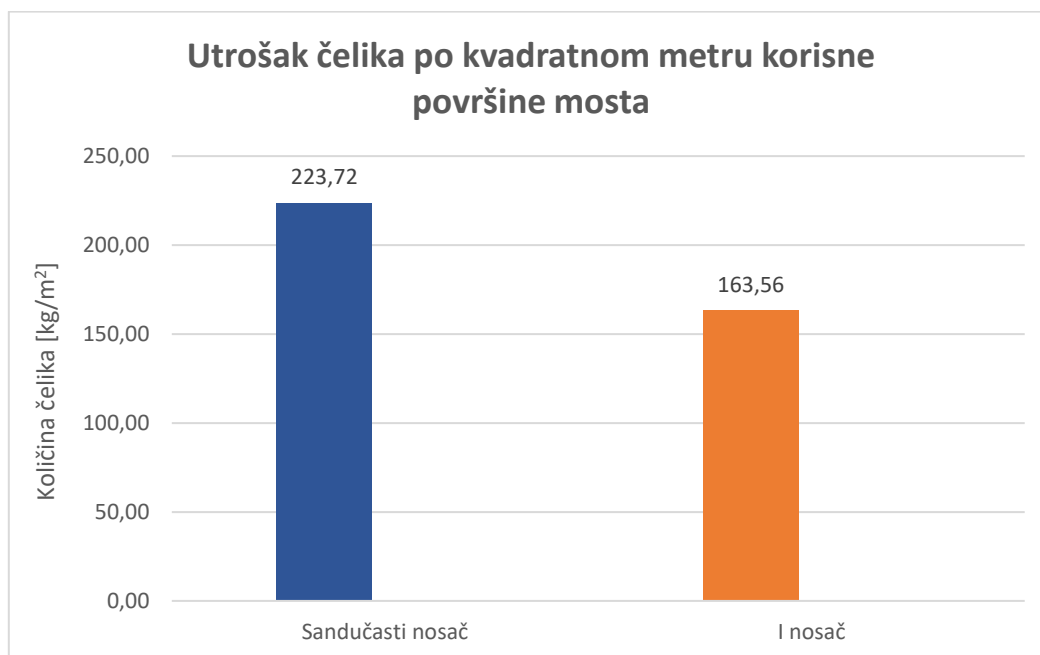
Iz priloženog grafa vidljivo je da se u svim segmentima mosta, izuzev gornjeg pojasa, više čelika koristi kod elemenata mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima.

Kada zbrojimo sve elemente glavnog nosača dobijemo podatak da se kod mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima koristi 26,89 % više čelika.



Slika 218. Graf usporedbe ukupnog utroška čelika

Sljedeći graf će prikazati razliku utrošak čelika po metru kvadratnom korisne površine dvaju mostova.



Slika 219. Utročak čelika po metru kvadratnom korisne površine



Zbog nezadovoljavanja uvijete stabilnosti u blizini ležaja kod mosta otvorenog presjeka sa I nosačima, u blizini ležajeva, dodana su uzdužna ukrućenja u blizini oslanjanja mosta na ležajeve. Time se osigurava dodatna stabilnost mosta. Kod mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima nemamo potrebu za dodavanjem uzdužnih ukruta, ali one su svejedno postavljene kao dodatno osiguranje u slučaju nepredviđenih tereta ili događaja.

Za kraj možemo promotriti iskoristivost kritičnih presjeka projektiranih mostova. Kod mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima imamo ravnomjernu iskoristivost presjeka nad ležajevima i u polju. Oba promatrana elementa, hrptovi i pojasnice, imaju značajne zalihe nosivosti što je poželjno zbog sigurnosti i trenda rastuće prometne opterećenosti mostova. Debljine elemenata su usklađene i nema velikih odstupanja od presjeka do presjeka. S druge strane kod mosta otvorenog presjeka sa I nosačima dolazi do vrlo velike iskoristivosti presjeka iznad ležajeva, dok su presjeci u polju manje iskorišteni. Dimenzije elemenata, pogotovo donjeg pojasa iznad ležajeva, su značajno veće od ostalih elemenata u presjeku. Zbog velikih tlačnih naprezanja kod mostova otvorenog profila s I nosačima na mjestima oslanjanja se izvodi dodatna lamela kako bi naprezanja ostala u dopuštenim granicama. Zbog toga dolazi do kompliciranije, a ujedno i skuplje izvedbe.

## 15. ZAKLJUČAK

U radu su dimenzionirana dva mosta koja se razlikuju samo po tipu glavnog nosača. Cilj nam je bio saznati koji je nosač optimalniji za zadanu prepreku. Korištenjem hibridnog modela određene su optimalne debljine elemenata za promatrane tipove poprečnih presjeka.

Glavni nosači mostova nisu projektirani u njihovim najefikasnijim  $l/h$  omjerima, već su napravljeni tako da zadovolje zadane parametre tražene visine. Za svrhu ovog rada promatrani su nosači velikih visina na srednje velikim rasponima.

U konačnici, uzevši u obzir da nam je glavni parametar usporedbe bio utrošak čelika dobili smo podatke koji govore da je mosta otvorenog presjeka sa I nosačima isplativiji od mosta otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima. U pogledu nosivosti i stabilnosti prednjače mostovi otvorenog presjeka sa sandučastim nosačima. Iz prikazanih proračuna vidljivo je da oni imaju veće zalihe nosivosti i bolje preuzimaju djelujuća opterećenja što je dokazano korištenjem tanjih elemenata.

---

## POPIS LITERATURE

- [1] Separati i prezentacije iz kolegija Mostovi 2, Građevinski fakultet u Zagrebu
- [2] Separati i prezentacije iz kolegija Mostovi 3, Građevinski fakultet u Zagrebu
- [3] Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-5: Opća djelovanja -- Toplinska djelovanja (EN 1991-1-5:2003)
- [4] Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-4: Opća djelovanja -- Djelovanja vjetra (EN 1991-1-4:2005+AC:2010+A1:2010)
- [5] Eurokod 1 -- Djelovanja na konstrukcije -- 2. dio: Prometna opterećenja mostova i drugih inženjerskih građevina (EN 1991-2:2023)
- [6] Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004/A1:2014)
- [7] Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -- 2. dio: Betonski mostovi -- Proračun i pravila razrade detalja (EN 1992-2:2005+AC:2008)
- [8] Eurokod 3 -- Projektiranje čeličnih konstrukcija -- Dio 1-5: Pločasti konstrukcijski elementi (EN 1993-1-5:2024)
- [9] Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija -- 2. dio: Čelični mostovi (EN 1993-2:2006+AC:2009)
- [10] Eurokod 8 -- Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i potresna djelovanja (EN 1998-1-1:2024)
- [11] Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 2. dio: Mostovi (EN 1998-2:2005+AC:2010+A1:2009+A2:2011)
- [12] Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija (EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC:2010)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Poprečni presjek sa zatvorenim trapeznim nosačem [1].....	3
Slika 2. Vrste oblikovanja trapeznog presjeka [1].....	4
Slika 3. Poprečni presjek s 2 I nosača. [1].....	5
Slika 4. Karakteristični presjek glavnog trapeznog nosača.....	8
Slika 5. Karakteristični presjek nad stupom S1.....	9
Slika 6. Karakteristični presjek u polju.....	10
Slika 7. 3D prikaz modela, SOFiSTiK.....	10
Slika 8. 3D prikaz modela s donje strane, SOFiSTiK.....	11
Slika 9. Raspored poprečnih nosača modela, SOFiSTiK.....	11
Slika 10. Detalj oslanjanja na stup, SOFiSTiK.....	12
Slika 11. Prikaz sudjelujućih čeličnih površina, SOFiSTiK.....	12
Slika 12. Karakteristični presjek glavnog „I“ nosača.....	13
Slika 13. Karakteristični presjek nad stupom S1.....	14
Slika 14. Karakteristični presjek u polju.....	15
Slika 15. 3D prikaz modela, SOFiSTiK.....	15
Slika 16. 3D prikaz modela s donje strane, SOFiSTiK.....	16
Slika 17. Raspored poprečnih nosača modela, SOFiSTiK.....	16
Slika 18. Detalj oslanjanja na stup, SOFiSTiK.....	17
Slika 19. Prikaz sudjelujućih čeličnih površina, SOFiSTiK.....	17
Slika 20. Presjek glavnog trapeznog nosača u polju.....	18
Slika 21. Presjek glavnog trapeznog nosača nad ležajem.....	19
Slika 22. Unos dodatne vlastite težine, SOFiSTiK.....	20
Slika 23. Unos opterećenja betonske ploče za polje, SOFiSTiK.....	21
Slika 24. Unos opterećenja betonske ploče za ležaj, SOFiSTiK.....	22
Slika 25. Dodatno stalno opterećenje.....	22
Slika 26. Unos dodatnog stalnog opterećenja, SOFiSTiK.....	23
Slika 27. Sheme prometnog opterećenja.....	25
Slika 28. Uzdužni i tlocrtni raspored prometnog opterećenja [1].....	25
Slika 29. Tandem vozila, LM1, shema 1, SOFiSTiK.....	26
Slika 30. Tandem vozila, LM1, shema 2, SOFiSTiK.....	26
Slika 31. Kontinuirano opterećenje prometnih trakova, LM1, SOFiSTiK.....	26
Slika 32. Kontinuirano opterećenje hodnika, LM1, SOFiSTiK.....	27
Slika 33. Prikaz jednolike temperature zagrijavanja mosta, SOFiSTiK.....	29

Slika 34. Prikaz jednolike temperature hlađenja mosta, SOFiSTiK.....	29
Slika 35. Jednolika temperatura zagrijavanja ležajeva i prijelaznih naprava, SOFiSTiK.....	30
Slika 36. Jednolika temperatura hlađenja za ležajeve i prijelazne naprave, SOFiSTiK.....	30
Slika 37. Prikaz nejednolike temperature mosta (donji dio nosača topliji), SOFiSTiK.....	31
Slika 38. Prikaz nejednolike temperature mosta (gornji dio nosača topliji), SOFiSTiK.....	32
Slika 39. Slika neopterećenog mosta.....	32
Slika 40. Prikaz opterećenja vjetrom poprečno na neopterećeni most, SOFiSTiK.....	33
Slika 41. Slika opterećenog mosta.....	34
Slika 42. Prikaz opterećenja vjetrom poprečno na opterećeni most, SOFiSTiK.....	35
Slika 43. Prikaz opterećenja vjetrom uzdužno na neopterećeni most, SOFiSTiK.....	36
Slika 44. Prikaz opterećenja vjetrom uzdužno na opterećeni most, SOFiSTiK.....	37
Slika 45. Prikaz opterećenja vjetrom vertikalno na neopterećeni most, SOFiSTiK.....	38
Slika 46. Prikaz opterećenja vjetrom vertikalno na opterećeni most, SOFiSTiK.....	38
Slika 47. Prikaz zbroja masa i momenata inercije, SOFiSTiK Report Browser.....	39
Slika 48. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser.....	40
Slika 49. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser.....	40
Slika 50. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser.....	40
Slika 51. Uzdužna sila, SOFiSTiK.....	41
Slika 52. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK.....	42
Slika 53. Uzdužna sila, SOFiSTiK.....	43
Slika 54. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK.....	43
Slika 55. Uzdužna sila, SOFiSTiK.....	44
Slika 56. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK.....	44
Slika 57. Uzdužna sila, SOFiSTiK.....	45
Slika 58. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK.....	45
Slika 59. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK.....	46
Slika 60. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK.....	46
Slika 61. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK.....	47
Slika 62. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK.....	47
Slika 63. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK.....	48
Slika 64. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK.....	48
Slika 65. Moment savijanja i poprečna sila za rasponski sklop, SOFiSTiK.....	49
Slika 66. Uzdužna sila za rasponski sklop, SOFiSTiK.....	49
Slika 67. Moment savijanja i poprečna sila za stupove, SOFiSTiK.....	50
Slika 68. Moment savijanja za potres u x smjeru, SOFiSTiK.....	51
Slika 69. Poprečna sila za potres u x smjeru, SOFiSTiK.....	52
Slika 70. Uzdužna sila za potres u x smjeru, SOFiSTiK.....	52

Slika 71. Moment savijanja za potres u y smjeru, SOFiSTiK .....	53
Slika 72. Poprečna sila za potres u y smjeru, SOFiSTiK.....	54
Slika 73. Uzdužna sila za potres u y smjeru, SOFiSTiK.....	54
Slika 74. Vertikalna reakcija, SOFiSTiK.....	55
Slika 75. Vertikalna reakcija(minimalna), SOFiSTiK.....	56
Slika 76. Vertikalna reakcija(maksimalna), SOFiSTiK.....	56
Slika 77. Uzdužna reakcija od kočenja, SOFiSTiK.....	57
Slika 78. Vertikalna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK.....	58
Slika 79. Vertikalna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK .....	58
Slika 80. Poprečna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK .....	59
Slika 81. Poprečna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK.....	59
Slika 82. Uzdužna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK.....	60
Slika 83. Uzdužna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK.....	60
Slika 84. Poprečni pomaci na opterećeni i neopterećeni most, SOFiSTiK.....	61
Slika 85. Vertikalna reakcija(minimalna), SOFiSTiK.....	62
Slika 86. Vertikalna reakcija(maksimalna), SOFiSTiK.....	62
Slika 87. Uzdužna reakcija(minimalna), SOFiSTiK.....	63
Slika 88. Uzdužna reakcija(maksimalna), SOFiSTiK.....	63
Slika 89. Uzdužni pomak, SOFiSTiK.....	64
Slika 90. Uzdužni pomak, SOFiSTiK.....	64
Slika 91. Vertikalna reakcija, SOFiSTiK.....	65
Slika 92. Uzdužni pomak u x smjeru, SOFiSTiK .....	66
Slika 93. Uzdužni pomak u y smjeru, SOFiSTiK .....	66
Slika 94. Poprečni presjek stupova, SOFiSTiK.....	67
Slika 95. Poprečni presjek vezne grede, SOFiSTiK.....	67
Slika 96. Presjek glavnog nosača, SOFiSTiK.....	68
Slika 97. Presjek mosta kroz jedan trapezni nosač, SOFiSTiK.....	68
Slika 98. Posmična naprezanja i V.Mises naprezanja u hrptu, SOFiSTiK.....	70
Slika 99. Najveće tlačno naprezanje gornjeg pojasa i najveće vlačno naprezanje donjeg pojasa, SOFiSTiK.....	71
Slika 100. Najveće vlačno naprezanje gornjeg pojasa i najveće tlačno naprezanje donjeg pojasa, SOFiSTiK.....	71
Slika 101. Najveći negativni moment savijanja i pripadajuća poprečna sila, SOFiSTiK .....	74
Slika 102. Najveća poprečna sila i pripadajući moment savijanja, SOFiSTiK.....	75
Slika 103. Najveća poprečna sila i pripadajući moment, SOFiSTiK.....	75
Slika 104. Ukupna potrebna armatura stupa, SOFiSTiK.....	97
Slika 105. Armatura stupa, SOFiSTiK.....	98

Slika 106. Ukupna potrebna armatura donje stijenke vezne grede, SOFiSTiK.....	99
Slika 107. Ukupna potrebna armatura gornje stijenke vezne grede, SOFiSTiK.....	100
Slika 108. Ukupna potrebna armatura bočnih stijenki vezne grede, SOFiSTiK.....	102
Slika 109. Armatura vezne grede, SOFiSTiK .....	103
Slika 110. Prikaz najvećih vlačnih naprezanja u betonskoj ploči, SOFiSTiK.....	105
Slika 111. Prikaz najvećeg naprezanja u armaturi od unutarnjih sila, SOFiSTiK .....	109
Slika 112. Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za rijetku kombinaciju, SOFiSTiK.....	113
Slika 113. Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za rijetku kombinaciju, SOFiSTiK .....	113
Slika 114. Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za nazovistalnu kombinaciju, SOFiSTiK .....	113
Slika 115. Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za nazovistalnu kombinaciju, SOFiSTiK .....	114
Slika 116. Rekapitulacija sila u ležajevima i pomaka od stalnih i promjenjivih djelovanja	116
Slika 117. Presjek glavnog I nosača u polju.....	119
Slika 118. Presjek glavnog I nosača nad ležajem.....	120
Slika 119. Unos dodatne vlastite težine, SOFiSTiK .....	121
Slika 120. Unos opterećenja betonske ploče za polje, SOFiSTiK.....	122
Slika 121. Unos opterećenja betonske ploče za ležaj, SOFiSTiK.....	123
Slika 122. Dodatno stalno opterećenje .....	123
Slika 123. Unos dodatnog stalnog opterećenja, SOFiSTiK.....	124
Slika 124. Sheme prometnog opterećenja.....	126
Slika 125. Uzdužni i tlocrtni raspored prometnog opterećenja [1].....	126
Slika 126. Tandem vozila, LM1, shema 1, SOFiSTiK .....	127
Slika 127. Tandem vozila, LM1, shema 2, SOFiSTiK .....	127
Slika 128. Kontinuirano opterećenje prometnih trakova, LM1, SOFiSTiK.....	127
Slika 129. Kontinuirano opterećenje hodnika, LM1, SOFiSTiK.....	128
Slika 130. Prikaz jednolike temperature zagrijavanja mosta, SOFiSTiK.....	130
Slika 131. Prikaz jednolike temperature hlađenja mosta, SOFiSTiK.....	130
Slika 132. Jednolika temperatura zagrijavanja ležajeva i prijelaznih naprava, SOFiSTiK .	131
Slika 133. Jednolika temperatura hlađenja za ležajeve i prijelazne naprave, SOFiSTiK....	131
Slika 134. Prikaz nejednolike temperature mosta (donji dio nosača topliji), SOFiSTiK.....	132
Slika 135. Prikaz nejednolike temperature mosta (gornji dio nosača topliji), SOFiSTiK ...	133
Slika 136. Slika neopterećenog mosta .....	133
Slika 137. Prikaz opterećenja vjetrom poprečno na neopterećeni most, SOFiSTiK.....	134
Slika 138. Slika opterećenog mosta.....	135
Slika 139. Prikaz opterećenja vjetrom poprečno na opterećeni most, SOFiSTiK.....	136
Slika 140. Prikaz opterećenja vjetrom uzdužno na neopterećeni most, SOFiSTiK.....	137

Slika 141. Prikaz opterećenja vjetrom uzdužno na opterećeni most, SOFiSTiK.....	138
Slika 142. Prikaz opterećenja vjetrom vertikalno na neopterećeni most, SOFiSTiK.....	139
Slika 143. Prikaz opterećenja vjetrom vertikalno na opterećeni most, SOFiSTiK.....	139
Slika 144. Prikaz zbroja masa i momenata inercije, SOFiSTiK Report Browser .....	140
Slika 145. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser .....	141
Slika 146. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser .....	141
Slika 147. Base-Shear u X smjeru, SOFiSTiK Report Browser .....	141
Slika 148. Uzdužna sila, SOFiSTiK.....	142
Slika 149. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK.....	143
Slika 150. Uzdužna sila, SOFiSTiK.....	144
Slika 151. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK.....	144
Slika 152. Uzdužna sila, SOFiSTiK.....	145
Slika 153. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK.....	145
Slika 154. Uzdužna sila, SOFiSTiK.....	146
Slika 155. Moment savijanja te poprečna sila, SOFiSTiK.....	146
Slika 156. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK .....	147
Slika 157. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK.....	147
Slika 158. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK .....	148
Slika 159. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK.....	148
Slika 160. Moment savijanja i poprečna sila na neopterećeni most, SOFiSTiK .....	149
Slika 161. Moment savijanja i poprečna sila na opterećeni most, SOFiSTiK.....	149
Slika 162. Moment savijanja i poprečna sila za rasponski sklop, SOFiSTiK.....	150
Slika 163. Uzdužna sila za rasponski sklop, SOFiSTiK.....	150
Slika 164. Moment savijanja i poprečna sila za stupove, SOFiSTiK.....	151
Slika 165. Moment savijanja za potres u x smjeru, SOFiSTiK.....	152
Slika 166. Poprečna sila za potres u x smjeru, SOFiSTiK.....	153
Slika 167. Uzdužna sila za potres u x smjeru, SOFiSTiK .....	153
Slika 168. Moment savijanja za potres u y smjeru, SOFiSTiK .....	154
Slika 169. Poprečna sila za potres u y smjeru, SOFiSTiK.....	155
Slika 170. Uzdužna sila za potres u y smjeru, SOFiSTiK .....	155
Slika 171. Vertikalna reakcija, SOFiSTiK.....	156
Slika 172. Vertikalna reakcija(minimalna), SOFiSTiK.....	157
Slika 173. Vertikalna reakcija(maksimalna), SOFiSTiK .....	157
Slika 174. Uzdužna reakcija od kočenja, SOFiSTiK .....	158
Slika 175. Vertikalna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK.....	159
Slika 176. Vertikalna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK.....	159
Slika 177. Poprečna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK.....	160



Slika 178. Poprečna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK.....	160
Slika 179. Uzdužna reakcija za opterećeni most, SOFiSTiK.....	161
Slika 180. Uzdužna reakcija za neopterećeni most, SOFiSTiK .....	161
Slika 181. Poprečni pomaci na opterećeni i neopterećeni most, SOFiSTiK .....	162
Slika 182. Vertikalna reakcija(minimalna), SOFiSTiK.....	163
Slika 183. Vertikalna reakcija(maksimalna), SOFiSTiK .....	163
Slika 184. Uzdužna reakcija(minimalna), SOFiSTiK.....	164
Slika 185. Uzdužna reakcija(maksimalna), SOFiSTiK.....	164
Slika 186. Uzdužni pomak, SOFiSTiK .....	165
Slika 187. Uzdužni pomak, SOFiSTiK .....	165
Slika 188. Vertikalna reakcija, SOFiSTiK.....	166
Slika 189. Uzdužni pomak u x smjeru, SOFiSTiK.....	167
Slika 190. Uzdužni pomak u y smjeru, SOFiSTiK.....	167
Slika 191. Poprečni presjek stupova, SOFiSTiK.....	168
Slika 192. Poprečni presjek vezne grede, SOFiSTiK.....	168
Slika 193. Presjek glavnog nosača, SOFiSTiK.....	169
Slika 194. Presjek poprečnog nosača u polju, SOFiSTiK .....	169
Slika 195. Presjek poprečnog nosača na ležaju, SOFiSTiK .....	170
Slika 196. Presjek mosta kroz jedan glavni I nosač, SOFiSTiK .....	170
Slika 197. Posmična naprezanja i V.Mises naprezanja u hrptu, SOFiSTiK .....	172
Slika 198. Najveće tlačno naprezanje gornjeg pojasa i najveće vlačno naprezanje donjeg pojasa, SOFiSTiK.....	173
Slika 199. Najveće vlačno naprezanje gornjeg pojasa i najveće tlačno naprezanje donjeg pojasa, SOFiSTiK.....	173
Slika 200. Maksimalna tlačna naprezanja u čeliku, SOFiSTiK.....	177
Slika 201. Najveći negativni moment savijanja i pripadajuća poprečna sila, SOFiSTiK ....	178
Slika 202. Najveća poprečna sila i pripadajući moment savijanja, SOFiSTiK.....	179
Slika 203. Najveća poprečna sila i pripadajući moment, SOFiSTiK.....	179
Slika 204. Ukupna potrebna armatura stupa, SOFiSTiK .....	222
Slika 205. Armatura stupa, SOFiSTiK.....	223
Slika 206. Ukupna potrebna armatura donje stijenke vezne grede, SOFiSTiK.....	224
Slika 207. Ukupna potrebna armatura gornje stijenke vezne grede, SOFiSTiK.....	225
Slika 208. Ukupna potrebna armatura bočnih stijenki vezne grede, SOFiSTiK.....	227
Slika 209. Armatura vezne grede, SOFiSTiK .....	228
Slika 210. Prikaz najvećih vlačnih naprezanja u betonskoj ploči, SOFiSTiK.....	229
Slika 211. Prikaz najvećeg naprezanja u armaturi od unutarnjih sila, SOFiSTiK .....	230
Slika 212. Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za rijetku kombinaciju, SOFiSTiK.....	234

---

Slika 213. Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za rijetku kombinaciju, SOFiSTiK .....	234
Slika 214. Maksimalna tlačna naprezanja u ploči za nazovistalnu kombinaciju, SOFiSTiK .....	234
Slika 215. Maksimalna tlačna naprezanja u stupu za nazovistalnu kombinaciju, SOFiSTiK .....	235
Slika 216. Rekapitulacija sila u ležajevima i pomaka od stalnih i promjenjivih djelovanja	237
Slika 217. Graf usporedbe utroška čelika za pojedine elemente mostova .....	241
Slika 218. Graf usporedbe ukupnog utroška čelika .....	242
Slika 219. Utrošak čelika po metru kvadratnom korisne površine .....	242

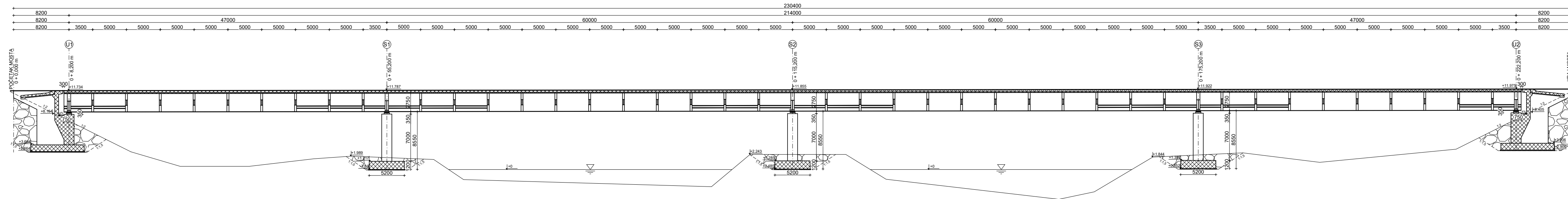
## POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri za izračun sile kočenja [1].....	27
Tablica 2. Nejednolika linearno promjenjiva temperatura.....	31
Tablica 3. Koeficijenti sigurnosti i kombinacija za djelovanja [2] .....	69
Tablica 4. Granični promjer za šipke rebraste armature [2].....	107
Tablica 5. Najveći razmaci za šipke rebraste armature [2].....	108
Tablica 6. Minimalna armatura ploče i kontrola raspucavanja .....	111
Tablica 7. Parametri za izračun sile kočenja [1].....	128
Tablica 8. Nejednolika linearno promjenjiva temperatura.....	132
Tablica 9. Koeficijenti sigurnosti i kombinacija za djelovanja [2] .....	171
Tablica 10. Minimalna armatura ploče i kontrola raspucavanja.....	232

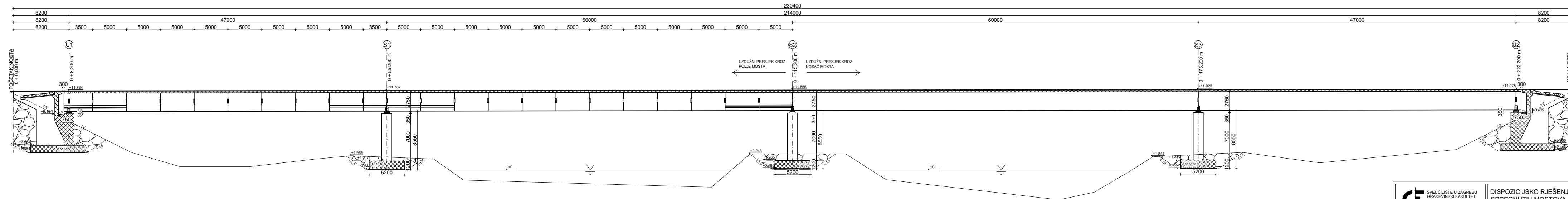
## PRILOZI

1. Uzdužni presjek mostova
2. Presjek mosta sa sandučastim nosačima
3. Presjek mosta s I nosačima
4. Raspored materijala i ležajeva

UZDUŽNI PRESJEK MOSTA S OTVORENIM POPREČNIM PRESJEKOM  
MJ 1:400

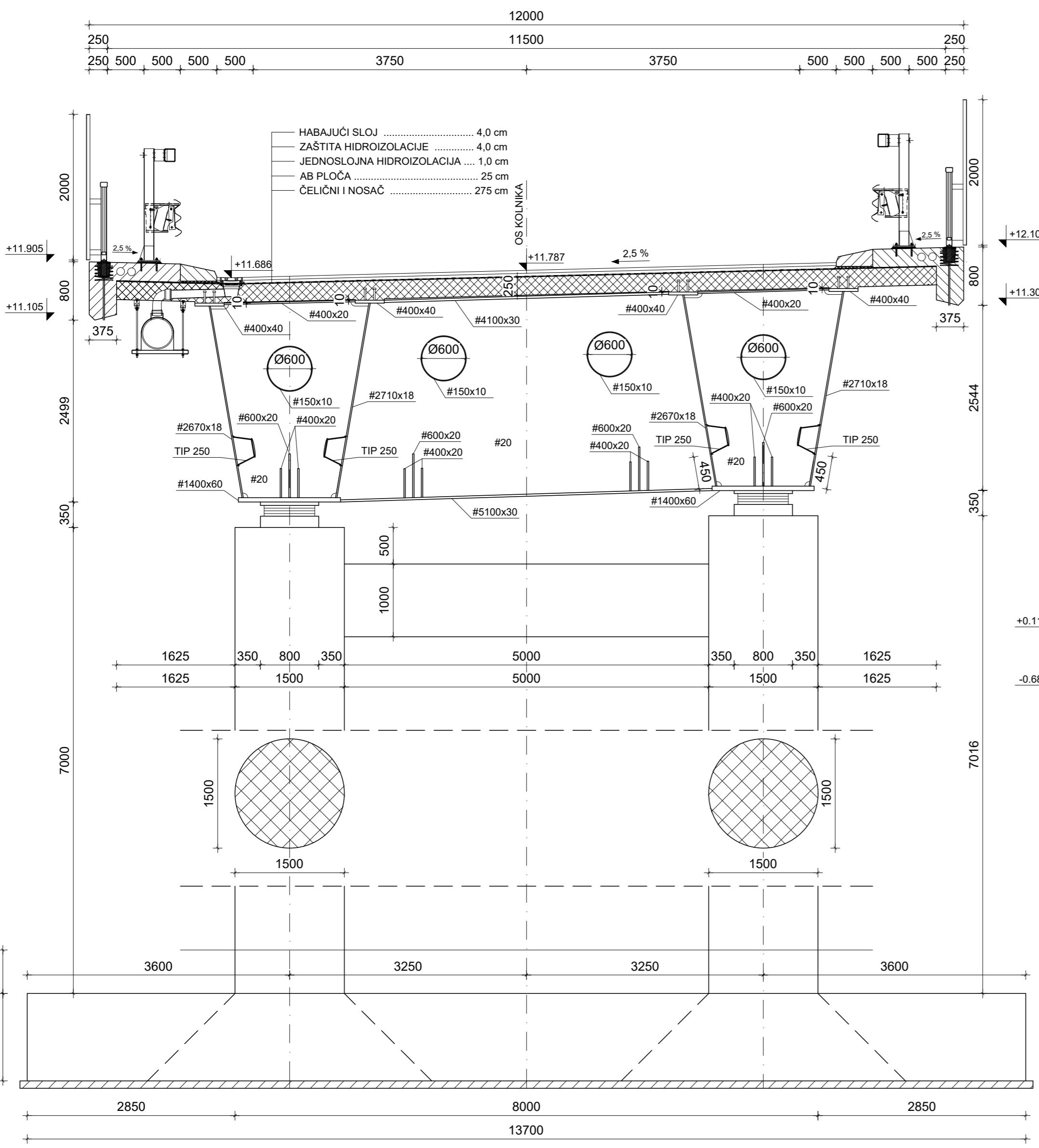


UZDUŽNI PRESJEK MOSTA S ZATVORENIM POPREČNIM PRESJEKOM  
MJ 1:400

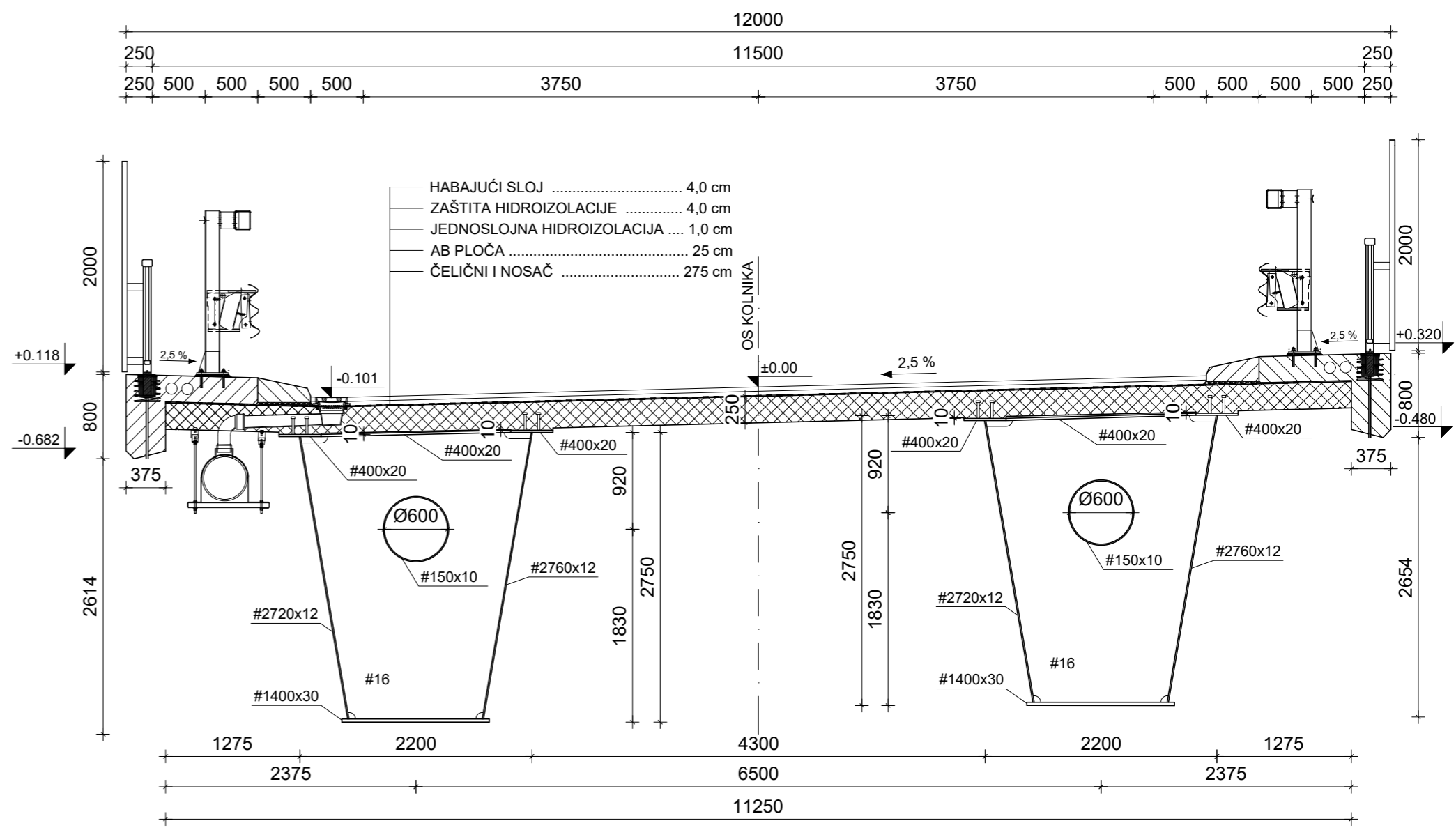


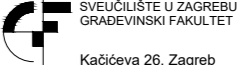
 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb		<b>DISPOZICIJSKO RJEŠENJE          SPREGNUTIH MOSTOVA</b>	
Sadržaj nacrt:			
<b>Uzdužni presjek mostova</b>			
Razina obrade: <b>Diplomski rad</b>			
Asistent: <b>doc. dr. sc. Mladen Srbić</b>		Pregledao:	
Datum: <b>15.02.2025.g.</b>		Mjerilo:	
Školska godina: <b>2024./2025.</b>		<b>1:400</b>	
Izradio: <b>Bartol Grdović</b>			

POPREČNI PRESJEK NAD STUPOM S1  
MJ 1:50

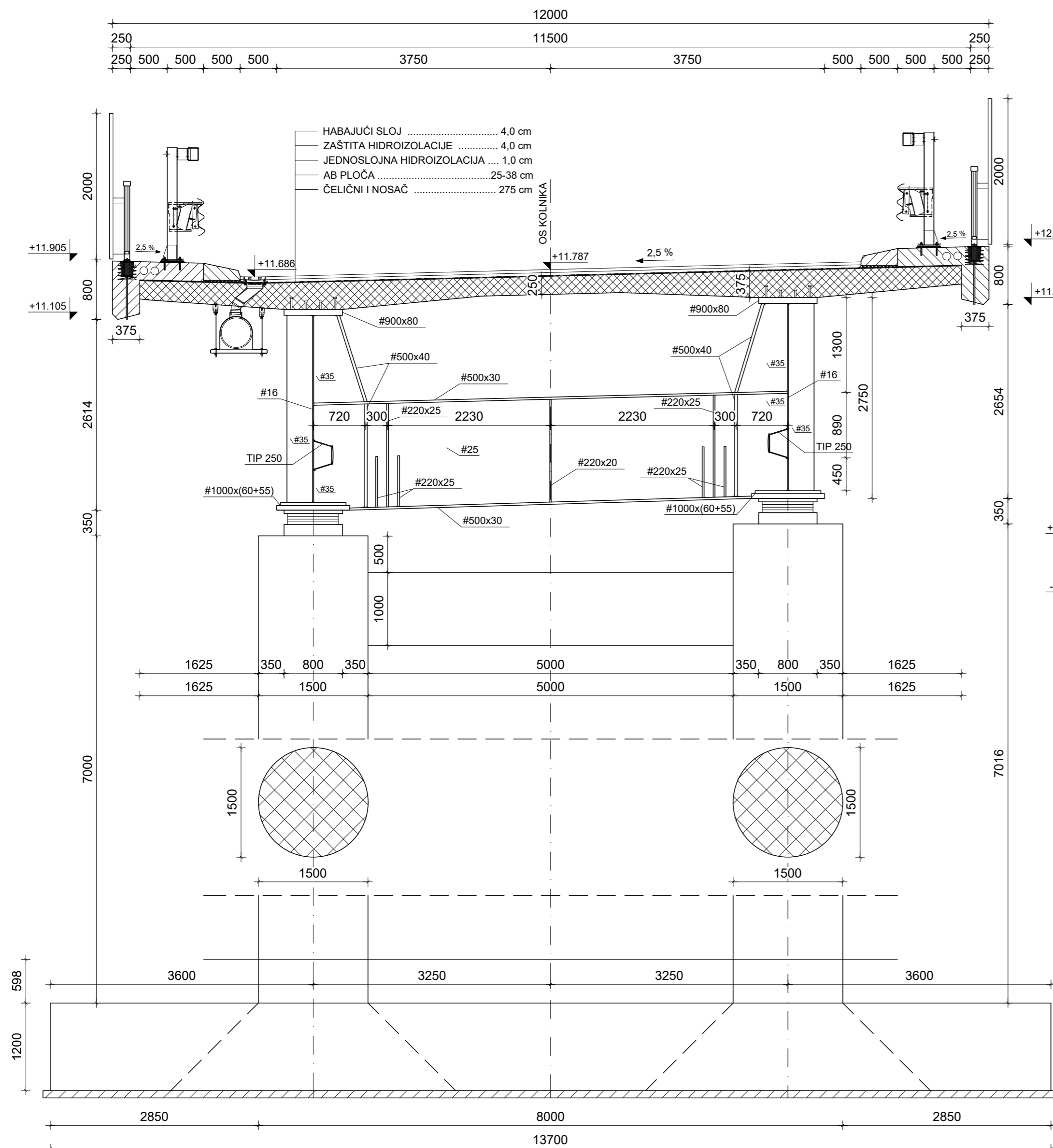


KARAKTERISTIČNI POPREČNI PRESJEK  
MJ 1:50

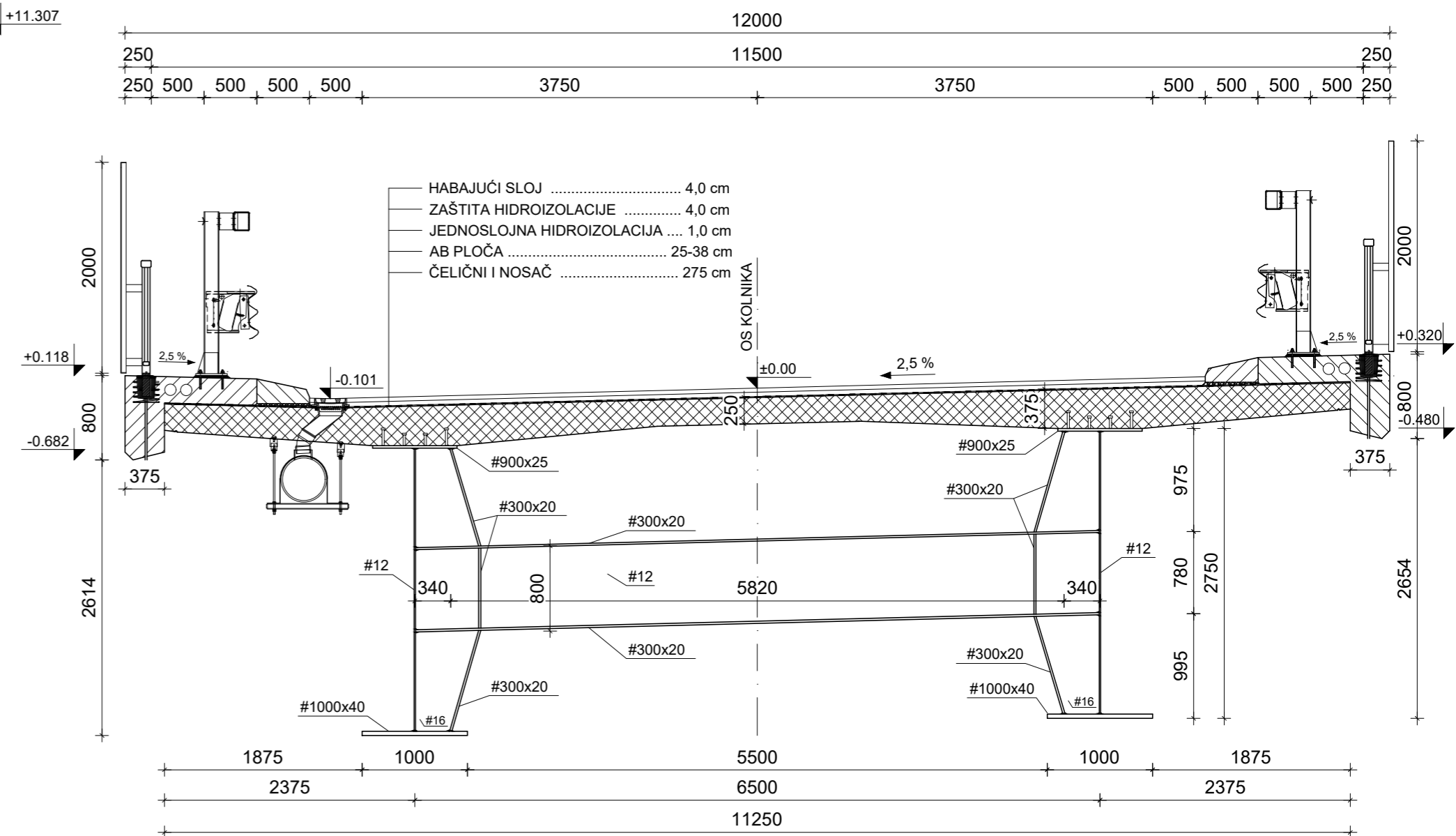


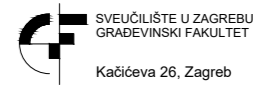
 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb	DISPOZICIJSKO RJEŠENJE SPREGNUTOG MOSTA SA SANDUČASTIM NOSAČIMA	
	Sadržaj nacrti: Presjek mosta sa sandučastim nosačima	
Razina obrade: Diplomski rad		
Asistent: doc. dr. sc. Mladen Srbić		Pregradio:
Datum: 15.02.2025.g.		Mjerilo: 1:50
Školska godina: 2024./2025.		
Izradio: Bartol Grdović		

POPREČNI PRESJEK NAD STUPOM S1  
MJ 1:50

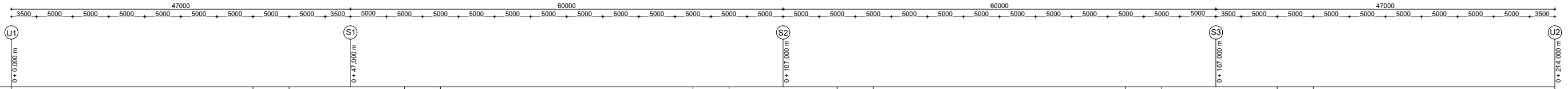


KARAKTERISTIČNI POPREČNI PRESJEK  
MJ 1:50



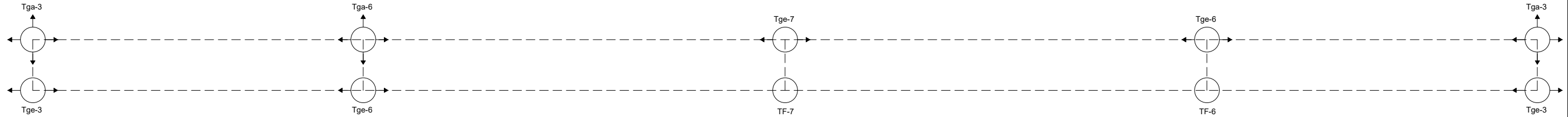
 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb		DISPOZICIJSKO RJEŠENJE SPREGNUTOG MOSTA S I NOSAČIMA	
Sadržaj nacrt: Presjek mosta s I nosačima			
Razina obrade: Diplomski rad			
Asistent: doc. dr. sc. Mladen Srbić		Pregledao:	
Datum: 15.02.2025.g.		Mjerilo: 1:50	
Školska godina: 2024./2025.			
Izradio: Bartol Grdović			

RASPORED MATERIJALA MOSTA S OTVORENIM POPREČNIM PRESJEKOM  
MJ 1:400

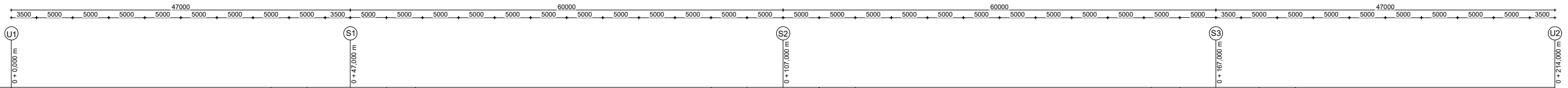


DEBLJINA LIMA GORNJEG POJASA [mm]	40		60	80	60	40		60	80	60	40		60	80	60	40						
DEBLJINA LIMA HRPTA [mm]	16		20	25		20	16		20	25		20	16		20	25		20	16			
DEBLJINA LIMA DONJEG POJASA [mm]	40		60	60+55		60	40		60	60+55		60	40		60	60+55		60	40			
SUDJELJUJUĆA ŠIRINA BETONA LIJEVO [mm]	2305																		2375		2305	
SUDJELJUJUĆA ŠIRINA BETONA DESNO [mm]	2786																		3250		2786	
RASPUCALOST BETONSKE PLOČE []	0		1	0		1	0		1	0		1	0		1	0		1	0			

TLOCRTNI RASPORED LEŽAJEVA MOSTA S OTVORENIM POPREČNIM PRESJEKOM

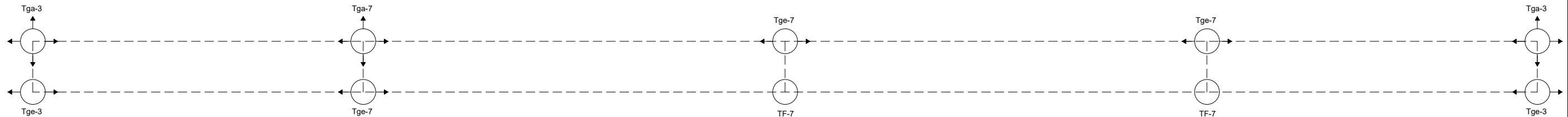


RASPORED MATERIJALA MOSTA S ZATVORENIM POPREČNIM PRESJEKOM  
MJ 1:400



DEBLJINA LIMA GORNJEG POJASA [mm]	40		60	80	60	40		60	80	60	40		60	80	60	40		20	16				
DEBLJINA LIMA HRPTA [mm]	20	16	20		16		20		16		20		16		20		16		20	20			
DEBLJINA LIMA DONJEG POJASA [mm]	40		80		40		80		40		80		40		80		40		40				
SUDJELJUJUĆA ŠIRINA ČELIKA DONJEG POJASA [mm]	1																	0.957	0.988		0.957		1
RASPUCALOST BETONSKE PLOČE []	0		1	0		1	0		1	0		1	0		1	0		1	0				

TLOCRTNI RASPORED LEŽAJEVA MOSTA S ZATVORENIM POPREČNIM PRESJEKOM



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINARSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb	DISPOZICIJSKO RJEŠENJE SPREGNUTIH MOSTOVA	
	Sadržaj nacrt: <b>Raspored materijala i ležajeva</b>	
Razina obrade: <b>Diplomski rad</b>		
Asistent: <b>doc. dr. sc. Mladen Srbić</b>		Pregledao:
Datum: <b>15.02.2025.g.</b>		Mjerilo: <b>1:600</b>
Školska godina: <b>2024./2025.</b>		Izradio: <b>Bartol Grdović</b>