

# Nelinearna analiza višekratne čelične zgrade stabilizirane inovativnim posmičnim zidom

---

**Krupa-Jurić, Emanuel**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:890451>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-02**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Emanuel Krupa-Jurić

**NELINEARNA ANALIZA VIŠEKATNE ČELIČNE  
ZGRADE STABILIZIRANE INOVATIVNIM  
POSMIČNIM ZIDOM**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Emanuel Krupa-Jurić

**NELINEARNA ANALIZA VIŠEKATNE ČELIČNE  
ZGRADE STABILIZIRANE INOVATIVNIM  
POSMIČNIM ZIDOM**

DIPLOMSKI RAD

izv. prof. dr. sc. Ivan Lukačević

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Emanuel Krupa-Jurić

**NONLINEAR ANALYSIS OF MULTI-STOREY STEEL  
BUILDING WITH INNOVATIVE SHEAR WALL  
BRACING SYSTEM**

MASTER THESIS

izv. prof. dr. sc. Ivan Lukačević

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

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

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

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

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

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

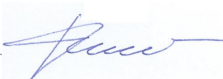
Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

 Digitally signed by IVAN  
LUKAČEVIĆ  
Date: 2024.09.17 21:21:10 +02'00'

Komentor:



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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. Ivanu Lukačeviću na savjetima, pomoći i strpljenju tijekom izrade diplomskog rada. Zahvaljujem se roditeljima, bratu, bakama i djedovima na potpori tijekom studija.



## SAŽETAK

Diplomski rad obrađuje višekatnu čeličnu zgradu stabiliziranu inovativnim dvojnim sustavom koji se sastoji od okvira i posmičnih zidova izvedenom od hladno oblikovanih čeličnih limova ispunjenih betonom. U prvom dijelu rada prikazana je ideja dvojnih sustava te dosadašnji razvoj inovativnih posmičnih zidova. U drugom dijelu provedena je linearna elastična analiza za statička djelovanja te linearna dinamička analiza za djelovanje potresa. U trećem dijelu provedena je nelinearna analiza inovativnog posmičnog zida, a u zadnjem dijelu provedena je nelinearna statička analiza postupnog guranja kojom je određena krivulja kapaciteta, faktor prekogranične čvrstoće i faktor ponašanja.

**Ključne riječi:** dvojni sustav; inovativni posmični zid; metoda postupnog guranja; krivulja kapaciteta; faktor prekogranične čvrstoće; faktor ponašanja

## SUMMARY

The thesis deals with a multi-story steel building stabilized by an innovative dual system consisting of a frame and shear walls made of cold-formed steel sheets filled with concrete.

The first part of the paper presents the idea of dual systems and the development of innovative shear walls. In the second part, a linear elastic analysis for static effects and a linear dynamic analysis for earthquake effects were performed. In the third part, a nonlinear analysis of the innovative shear wall was performed, and in the last part, a nonlinear static pushover analysis was performed, which determined the capacity curve, overstrength factor and behavior factor.

**Key words:** dual system; innovative shear wall; pushover method; capacity curve; overstrength factor; behavior factor

## SADRŽAJ

ZAHVALE.....	i
SAŽETAK.....	ii
SUMMARY.....	iii
SADRŽAJ.....	iv
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivacija.....	1
1.2. Princip dvojnih sustava i primjeri.....	1
1.3. Sendvič panel profilirani lim – beton – profilirani lim.....	2
1.3.1. Numerički model.....	3
1.3.2. Potvrda ispravnosti modela.....	3
1.3.3. Parametarska analiza.....	4
1.3.4. Zaključak.....	6
<b>2. ANALIZA OPTEREĆENJA.....</b>	<b>7</b>
2.1. Stalno opterećenje.....	7
2.1.1. Stalno opterećenje međukatne konstrukcije.....	7
2.1.2. Stalno opterećenje krovne konstrukcije.....	7
2.1.3. Ostalo stalno opterećenje-fasadni zidovi.....	8
2.2. Uporabno opterećenje.....	8
2.3. Opterećenje snijegom.....	9
2.4. Opterećenje vjetrom.....	10
2.4.1. Općenito.....	10
2.4.2. Tlak pri vršnoj brzini.....	11
2.4.3. Konstrukcijski faktor.....	12
2.4.4. Tlak vjetra na površine.....	18
2.4.4.1. Vanjski tlak na vertikalne stijene.....	18
2.4.4.2. Vanjski tlak na površinu krova.....	20
2.4.4.3. Vanjski tlak na površinu krova.....	21
2.4.4.4. Ukupni tlak na sve površine.....	21
<b>3. PRELIMINARNO DIMENZIONIRANJE.....</b>	<b>24</b>
3.1. Preliminarni odabir dimenzija nosača.....	24

---

3.1.1.	Preliminarne dimenzije nosača.....	25
3.1.1.1.	Sekundarni nosač A2-B2.....	25
3.1.1.2.	Glavni nosač B1-B4.....	25
3.1.1.3.	Rubni nosač A1-B1.....	26
3.1.2.	Odabir dimenzija nosača okvirnog sustava.....	27
3.1.2.1.	Glavni nosač A1-A4.....	27
3.2.	Preliminarne dimenzije stupova.....	28
3.2.1.	Provjera stupa A1.....	29
3.2.2.	Provjera stupa A4.....	30
3.2.3.	Provjera stupa B4.....	30
3.2.4.	Provjera stupa B1.....	31
3.3.	Rekapitulacija profila.....	32
<b>4.</b>	<b>LINEARNA ANLIZA KONSTRUKCIJE I DIMENZIONIRANJE.....</b>	<b>33</b>
4.1.	Proračunski model.....	33
4.2.	Djelovanja na konstrukciju.....	35
4.2.1.	Analiza opterećenja.....	35
4.2.2.	Imperfekcije okvira.....	35
4.2.3.	Potresno djelovanje.....	37
4.2.3.1.	Horizontalni spektar odziva.....	37
4.2.3.2.	Proračunsko ubrzanje tla.....	38
4.2.3.3.	Kategorija tla.....	38
4.2.3.4.	Faktor važnosti.....	39
4.2.3.5.	Kriterij pravilnosti.....	39
4.2.3.6.	Faktor ponašanja.....	40
4.2.3.7.	Slučajni torzijski učinci.....	40
4.2.3.8.	Ukupna težina građevine za vrijeme djelovanja potresa.....	41
4.2.3.9.	Dinamički odgovor.....	42
4.2.4.	Kombinacije opterećenja.....	44
4.2.4.1.	Potresna kombinacija.....	44
4.2.5.	Klasifikacija okvira.....	45
4.2.5.1.	Klasifikacija okvira – potres.....	46
4.2.5.1.1	Međukatni pomak.....	48

---

4.3.	Dimenzioniranje.....	49
4.3.1.	Materijal.....	49
4.3.2.	Međukatna konstrukcija.....	50
4.3.2.1.	Statički sustav i poprečni presjek.....	51
4.3.2.2.	Materijal.....	51
4.3.2.3.	Krajnje granično stanje – faza izvedbe.....	52
4.3.2.4.	Krajnje granično stanje – konačna faza.....	54
4.3.3.	Zglobno oslonjeni nosač (A2-B2).....	55
4.3.4.	Zglobno oslonjeni nosač (A1-B1).....	59
4.3.5.	Zglobno oslonjeni nosač (B1-B4).....	62
4.3.6.	Okvir s posmičnim zidom (A4-A7).....	66
4.3.7.	Okvir A4-A7.....	67
4.3.7.1.	Nosač.....	67
4.3.7.2.	Stup.....	74
4.3.8.	Okvir (A7-A10).....	81
4.3.8.1.	Nosač.....	82
4.3.8.2.	Stup.....	86
4.3.9.	Ovir (B4-C4).....	94
4.3.9.1.	Nosač.....	94
4.3.9.2.	Stup.....	100
<b>5.</b>	<b>MODELIRANJE POSMIČNOG ZIDA.....</b>	<b>109</b>
5.1.	Geometrija i materijal.....	109
5.2.	Numerički model (FEA).....	109
5.3.	Rezultati numeričke analize.....	113
<b>6.</b>	<b>PUSHOVER ANALIZA – N2 METODA.....</b>	<b>114</b>
6.1.	Razlog primjene i osnovna ograničenja.....	114
6.2.	Opis metode kroz korake.....	114
6.3.	Proračun.....	119
6.3.1.	Pushover analiza.....	119
6.3.2.	Ciljani pomak.....	148
6.3.3.	Faktor prekogranične čvrstoće.....	150
6.3.4.	Faktor ponašanja.....	151

---

6.4.	Analiza rezultata.....	151
7.	<b>PRORAČUN PRIKLJUČAKA.....</b>	<b>153</b>
7.1.	Stopa stupa B1.....	153
7.2.	Stopa stupa A4.....	163
7.3.	Stopa stupa A1.....	170
7.4.	Priključak nosača okvira i sekundarnog nosača na stup A4.....	177
7.5.	Priključak nosača okvira i sekundarnog nosača na stup B4 .....	190
7.6.	Priključak nosača okvira i sekundarnog nosača na stup A1.....	200
7.7.	Nastavak stupa A4.....	204
7.8.	Nastavak stupa A1.....	218
7.9.	Nastavak stupa B4.....	234
8.	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>249</b>
	<b>POPIS LITERATURE .....</b>	<b>251</b>
	<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>253</b>
	<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>257</b>

## 1. UVOD

### 1.1. Motivacija

Jedan od temeljnih zahtjeva norme za projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – EN 1998 je zahtjev da ne smije doći do rušenja. Konstrukcija mora biti projektirana i izvedena tako da se može oduprijeti proračunskom potresu bez lokalnog ili globalnog urušavanja te da zadrži potrebnu nosivost i nakon potresa. Dokazom graničnog stanja nosivost treba pokazati da konstrukcija ima dovoljnu otpornost i sposobnost disipacije potresne energije. Drugim riječima, konstrukcija duktilnim ponašanjem histerezno disipira potresnu energiju uz zadržavanje otpornosti. Kapacitativnim projektiranjem se točno određuju mjesta u konstruktivnom sustavu gdje će se potresna energija trošiti nelinearnim deformiranjem dok će ostali elementi ostati u elastičnom području. Popravci konstrukcija nakon jačih potresa u kojima se javljaju trajne deformacije su skupi i često puta neizvedivi. S ciljem minimiziranja štete i smanjenjem ekonomskih gubitaka razvijeni su dvojni sustavi. Dvojni sustav se sastoji od upetih okvira (eng. *moment resisting frames*, u nastavku MRF), koji ostaje u elastičnom području za vrijeme potresa, kombiniranog sa sustavom kojemu je svrha plastično se deformirati i tako trošiti potresnu energiju, a koji se lako može zamijeniti dok će elastični MRF osigurati recentriranje konstrukcije.

### 1.2. Princip dvojnih sustava i primjeri

Princip dvojnih sustava se može opisati idealiziranim sustavom od dvije opruge paralelno spojene. Ako imamo opruge različitih krutosti za isti pomak jedna opruga će biti u elastičnom području dok će druga već imati plastične deformacije. Analogno vrijedi i za dvojni sustav. Fleksibilni podsustav treba ostati u elastičnom području dok kruti podsustav za isti iznos pomaka doseže krajnju plastičnu deformaciju. Uklanjanjem krutog podsustava elastični sustav ponovno zauzima nedeformiranu konfiguraciju. Primjeri takvih konstrukcija su MRF sustavi kombinirani s ekscentričnim vezovima koji imaju vijčano spojene potresne veze. Drugi primjer sustava je da su zamjenjivi posmični paneli kao disipativni elementi. Detaljan opis ova dva sustava može se naći u literaturi [1], [2] i [3]. S ciljem povećanja duktilnosti, otpornosti na lateralno opterećenje, ekonomičnosti i brzine gradnje kao zamjenjivi disipativni sustav moguć je i posmični zid u spregnutoj izvedbi čeličnih profiliranih limova i ispunjenih betonom što obrađuje ovaj rad.

### 1.3. Sendvič panel profilirani lim – beton – profilirani lim

U ovom tekstu dan je sažeti prikaz istraživanja iz rada [4] koji obrađuje sendvič panel izveden profiliranim limovima ispunjenim betonom.

Posmični zid ovog tipa izvodi se sprežanjem hladno oblikovanih čeličnih limova i betona s djelomično popustljivim moždanicima. Dva profilirana lima se moždanicima povezuju s betonskom ispunom čime se formira sendvič panel koji je omeđen čeličnim okvirom. U odnosu na klasični armirano betonski posmični zid, čvrstoća i duktilnost su povećana zbog čeličnih limova uz kraće vrijeme izvedbe. Prva istraživanja posmičnih zidova za lateralnu stabilizaciju izvedenih od laganih okvira od hladno oblikovanog čelika (eng. *light-framed cold-formed steel* – CFS) provode Fulop i Dubina [5]. Provedena su monotona i ciklička ispitivanja na CFS posmičnim zidovima u kombinaciji s profiliranim limovima, OSB pločama i gips pločama. Istraživanjem je utvrđeno da je otkazivanje posmičnog zida uzrokovano otkazivanjem priključaka, a zatim otkazivanjem profiliranog lima. Zaključak istraživanja je da CFS posmični zid s profiliranim limom ima dovoljnu lateralnu krutost. Stojanović i Tipping [5] rade parametarsko istraživanje CFS posmičnih zidova s profiliranim limom u kojemu variraju 6 parametara: geometrija profila i profiliranog lima, tip, veličina i razmak vijaka, dodatak gips ploče s jedne strane te izvedba s profiliranim limom na jednoj ili dvije strane. U svim uzorcima došlo je do izvlačenja vijaka iz profiliranog lima uz formiranje tlačnih i vlačnih polja. Yu i ostali [7] i Zhang i ostali [8] profilirani lim postavljaju izravno na površinu elemenata CFS posmičnog zida te pokazuju kako takva konfiguracija ima vrlo visoku čvrstoću i krutost. Također, istraživanja su pokazala kako CFS posmični zid u kombinaciji s profiliranim limom ima veću krutost i čvrstoću u odnosu na kombinacije s OSB pločama, ravnim čeličnim limovima ili drvenim panelima. Fulop i Dubina [5] također pokazuju kako tip opterećenja nema značajan utjecaj na ponašanje CFS posmičnog zida, ali je duktilnost nešto manja kod cikličkog opterećenja uslijed otkazivanja vijaka za pričvršćivanje. Rješenje je u izvedbi otvora na profiliranom limu. Uslijed lokalnog oslabljenja trganje u okolici oslabljenja se javlja u isto vrijeme s izbočavanjem profiliranog lima. Pretpostavlja se da ta oslabljenja ne uzrokuju smanjenje lateralne krutosti već povećavaju duktilnost zbog promjene toka sila koju uzrokuju i time sprečavaju otkazivanje vijaka za pričvršćivanje. Dodavanje betonske ispune između dva profilirana lima povećava lateralnu krutost i osigurava ravnomjerniju raspodjelu naprezanja.



### 1.3.1. Numerički model

Numerički model u radu [4] analiziran je Abaqus Explicit Solver-om kojim je moguće uzeti u obzir geometrijske i materijalne nelinearnosti. Istraživanje se uspoređuje s istraživanjem koje je proveo Mahdavian [9]. Dimenzije posmičnog zida su 2,4x1,2. Vertikalni elementi okvira su od 350 S 200-68 profila, a horizontalni elementi od 350 T 150-68 profila. Profilirani lim je Verco Decking SV36. Numerički model ne uzima u obzir imperfekcije. Za modeliranje čeličnih elemenata CFS-a korišten je bilinearni elastoplastični radni dijagram.

### 1.3.2. Potvrda ispravnosti modela

Rezultati numeričke analize u radu [4] uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima istraživanja koje je proveo Mahdavian [8] te krivulja sila-pomak dobivena numeričkom analizom ima zadovoljavajuće poklapanje s krivuljom dobivenom eksperimentom kako je prikazano na slici 1.1. Također usporedba dobivenih rezultata dana je u tablici 1.1.



Slika 1.1 Usporedba eksperimentalne i numeričke krivulje (Izvor: [4])

Tablica 1.1 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata (Izvor: [4])

	$P_{ult}$ [kN]	Ratio	$\Delta_{ult}$ [mm]	Ratio
Experimental	80.8	<b>0.92</b>	68.4	<b>1.00</b>
Numerical	73.9		68.5	

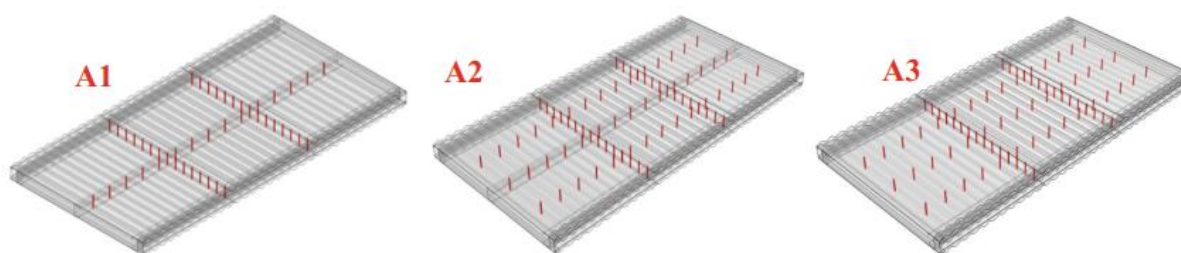
Numeričko i eksperimentalno istraživanje pokazuju da se profilirani lim izbočava u donjoj zoni posmičnog zida popraćeno s torzijom i lokalnim izbočavanjem elemenata okvira.

### 1.3.3. Parametarska analiza

Parametarskom analizom u radu [4] ispitivalo se kako na ponašanje posmičnog zida utječu čvrstoća betona, debljina profiliranog lima, promjer moždanika i njihov raspored. Parametri su prikazani u tablici 1.2.

Tablica 1.2 Parametri koji su se mijenjali u analizi (Izvor: [4])

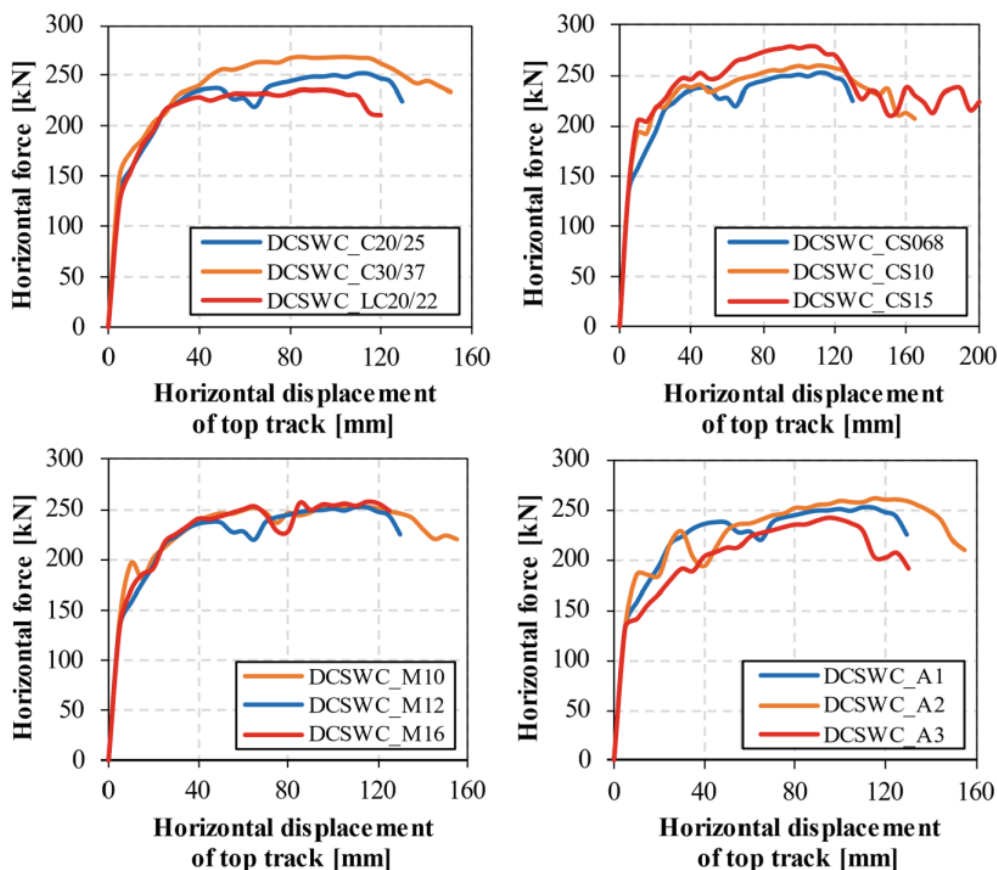
Model name [DSWC_xx]	Concrete class	Thickness of corrugated sheathing [mm]	Diameter of bolts	Arrangement of bolts
C20/25	<b>C20/25</b>	0.68	M12	A1
C30/37	<b>C30/37</b>			
LC20/22	<b>LC20/22</b>			
CS068	C20/25	<b>0.68</b>	M12	A1
CS10		<b>1.0</b>		
CS15		<b>1.5</b>		
M10	C20/25	0.68	<b>M10</b>	A1
M12			<b>M12</b>	
M16			<b>M16</b>	
A1	C20/25	0.68	M12	<b>A1</b>
A2				<b>A2</b>
A3				<b>A3</b>



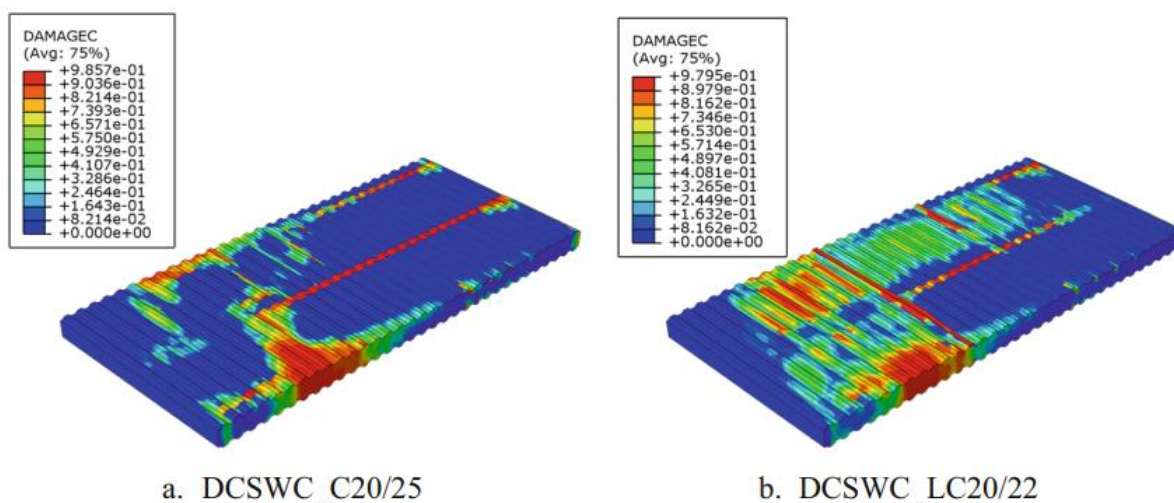
Slika 1.2 Raspored moždanika (Izvor: [4])

U svim uzorcima, prikazanim na slici 1.2; je došlo do izvijanja vertikalnih elemenata okvira i formiranja dijagonalnih oštećenja u limu te oštećenja u betonu uz središnji stup dok su se uočile razlike u ponašanju uslijed različitih vrijednosti parametara koji su već navedeni. Veća čvrstoća betona pridonosi većoj otpornosti posmičnog zid. Posmični zid s lakoagregatnim betonom ima sličnu otpornost uz puno manju masu, ali otkazivanje je naglo bez formiranja tlačnih i vlačnih dijagonala. Veća debljina profiliranog lima utječe na povećanje čvrstoće i

popuštanja posmičnog zida. Promjer moždanika ne utječe značajno na ponašanje posmičnog zida dok raspored utječe na duktilnost. U modelu u kojemu nema središnjeg stupa uočena je razlika u ponašanju u pogledu otpornosti i duktilnosti. Oštećenja se javljaju dijagonalno duž cijelog zida. Tlačna oštećenja su prikazana na slici 1.4. Zaključeno je da centralni stup značajno pridonosi otpornosti i duktilnosti.



Slika 1.3 Raspored moždanika (Izvor: [4])



Slika 1.4 Tlačna oštećenja u betonu (Izvor: [4])

#### 1.3.4. Zaključak

Čvrstoća betona značajno pridonosi otpornosti posmičnog zida. Lakoagregatni betoni slično pridonose čvrstoći uz značajno smanjenje mase. Otkazivanje posmičnih zidova s lakoagregatnim betonom je trenutno bez formiranja dijagonalnih oštećenja u betonu. Debljina profiliranog lima najviše pridonosi duktilnosti i popuštanju posmičnog zida. Promjer moždanika ne utječe na ponašanje dok raspored utječe na otpornost i duktilnost

## 2. ANALIZA OPTEREĆENJA

### 2.1. Stalno opterećenje

#### 2.1.1. Stalno opterećenje međukatne konstrukcije

Međukatna konstrukcija je odabrana kao sustav Hoesch Additive Floor. Nosivost ploče jednaka je zbroju nosivosti betona i profiliranog lima jer prema normi EN 1994-1-1 stupanj sprezanja je  $\eta = 0$ . Za analizu opterećenja će se preliminarno odrediti dimenzije čeličnog profiliranog lima  $t=1,1$  mm i debljina betonske ploče  $d=8$  cm. Iz odabrane literature očitana je vrijednost težine lima. Prema normi EN 1991-1-1 (Aneks A) određene su volumne težine za zadane slojeve poda.

Stalna djelovanja na međukatnu konstrukciju su sljedeća:

Vlastita težina čeličnog profiliranog lima $t = 1,00$ mm	= 0,13 kN/m <sup>2</sup>
Vlastita težina betonske ploče $h = 8,0$ cm	= 2,39 kN/ m <sup>2</sup>
Zvučna izolacija (stiropor) $d = 2,0$ cm, $\gamma = 0,3$ kN/m <sup>3</sup>	= 0,01 kN/ m <sup>2</sup>
Cementni estrih $d = 5,0$ cm, $\gamma = 22,0$ kN/m <sup>3</sup>	= 1,10 kN/ m <sup>2</sup>
Podna obloga (parket) $d = 2,2$ cm, $\gamma = 8,0$ kN/m <sup>3</sup>	= 0,18 kN/ m <sup>2</sup>
	<hr/>
	$g_{k,1} = 3,81$ kN/ m <sup>2</sup>

#### 2.1.2. Stalno opterećenje krovne konstrukcije

Međukatna konstrukcija ista je kao i na ostalim katovima. Krov je ravan i prohodan te je povremeno izložen servisnom opterećenju pa su slojevi hidroizolacije i termoizolacije zaštićeni slojem šljunka:

Stalna djelovanja na međukatnu konstrukciju su sljedeća:

Vlastita težina čeličnog profiliranog lima $t = 1,00$ mm	= 0,13 kN/ m <sup>2</sup>
Vlastita težina betonske ploče $h = 8,0$ cm	= 2,39 kN/ m <sup>2</sup>

Hidroizolacija		
$d = 1,0 \text{ cm}, \gamma = 10,0 \text{ kN/m}^3$		$= 0,10 \text{ kN/ m}^2$
Beton za nagib ( 2-6 cm )		
$d = 4,0 \text{ cm}, \gamma = 24 \text{ kN/m}^3$		$= 0,96 \text{ kN/ m}^2$
Termoizolacija		
$d = 10,0 \text{ cm}, \gamma = 0,3 \text{ kN/m}^3$		$= 0,03 \text{ kN/ m}^2$
Granulirani šljunak		
$d = 5,0 \text{ cm}, \gamma = 20 \text{ kN/m}^3$		
		$g_{k,2} = 4,61 \text{ kN/ m}^2$

### 2.1.3. Ostalo stalno opterećenje-fasadni zidovi

Rubni nosači preuzimaju polovicu težine fasadnog zida ispod i iznad kata odnosno preuzimaju 4,2m zida, a krovni nosači preuzimaju polovicu fasadnog zida odnosno 2,1 m.

vlastita težina fasadnog zida	$g_{k,3} = 1,00 \text{ kN/m}'$
nosači krovne konstrukcije	$g_{k,3} = 1,00 \cdot 2,1 = 2,10 \text{ kN/m}'$
nosači na ostalim katovima	$g_{k,3} = 1,00 \cdot 2,1 = 2,10 \text{ kN/m}'$

## 2.2. Uporabno opterećenje

Uporabno opterećenje se određuje prema normi HRN EN 1991-1-1 ovisno o namjeni zgrade. Zgrada je namijenjena za uredske prostore, prema tome je zgrada svrstana u kategoriju B. Krovovi se prema normi HRN EN 1991-1-1 razvrstavaju prema dostupnosti. Krov je svrstan u kategoriju H s obzirom da je nedostupan, osim za redovito održavanje i popravak.

uporabno opterećenje međukatne konstrukcije kategorija B (uredi) + pomični pregradni zidovi	$q_{k,1} = 3,00 + 0,80 = 3,80 \text{ kN/m}^2$
uporabno opterećenje krovne konstrukcije	$q_{k,2} = 0,40 \text{ kN/m}^2$

### 2.3. Opterećenje snijegom

Opterećenje snijegom na krovu dobiva se prema normi EN 1991-1-3 [5] izrazom:

$$s = s_k \cdot \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \quad 2.1$$

$s_k$  -karakteristično opterećenje snijegom na tlu

$\mu_i = 0,8$  - koeficijent oblika opterećenja snijegom na krovu za nagib  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$

$C_e = 1,0$  - koeficijent izloženosti

$C_t = 1,0$  - toplinski koeficijent zbog zagrijavanja zgrade

Karakteristično opterećenje snijegom  $s_k$  se određuje prema karti snježnih područja.



Slika 2.1 Zone karakterističnog opterećenja snijegom  $s_k$  (Izvor: [12])

Tablica 2.1 Karakteristična opterećenja snijegom na tlu za različite geografske lokacije i nadmorske visine (Izvor: [12])

Nadmorska visina do [m]	1. područje – priobalje i otoci [kN/m <sup>2</sup> ]	2. područje – zaleđe Dalmacije, Primorja i Istre [kN/m <sup>2</sup> ]	3. područje – kontinentalna Hrvatska [kN/m <sup>2</sup> ]	4. područje – gorska Hrvatska [kN/m <sup>2</sup> ]
100	0,50	0,75	1,00	1,25
200	0,50	0,75	1,25	1,50
300	0,50	0,75	1,50	1,75
400	0,50	1,00	1,75	2,00
500	0,50	1,25	2,00	2,50
600	0,50	1,50	2,25	3,00
700	0,50	2,00	2,50	3,50
800	0,50	2,50	2,75	4,00
900	1,00	3,00	3,00	4,50
1 000	2,00	4,00	3,50	5,00
1 100	3,00	5,00	4,00	5,50
1 200	4,00	6,00	4,50	6,00
1 300	5,00	7,00		7,00
1 400	6,00	8,00		8,00
1 500		9,00		9,00
1 600		10,00		10,00
1 700		11,00		11,00
1 800		12,00		

Opterećenja snijegom prema izrazu (2.1) iznosi:

$$s = 1,25 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,00 \text{ kN/m}^2$$

## 2.4. Opterećenje vjetrom

### 2.4.1. Općenito

Opterećenje vjetrom na građevinu provedeno je prema EN 1991-1-4 prema postupku primjenjivom za građevine visine do 200 m. Djelovanje vjetrom se prikazuje pojednostavljenom skupinom sila ili tlakova.

Tlak vjetra koji djeluje na vanjske površine građevine određuje se prema izrazu:

$$W_e = q_b \cdot c_e(z_e) \cdot c_{pe} \quad 2.2$$

a tlak vjetra koji djeluje na unutarnje površine građevine prema izrazu:

$$W_i = q_b \cdot c_e(z_i) \cdot c_{pi} \quad 2.3$$

gdje je:

$q_b$  – osnovni tlak kod osnovne brzine vjetra  $v_b$

$c_e(z_e)$  – koeficijent izloženosti koji ovisi o kategoriji terena i visini iznad tla  $z$



$c_{pe}$  - koeficijent vanjskog tlaka

$c_{pi}$  - koeficijent unutarnjeg tlaka

## 2.4.2. Tlak pri vršnoj brzini

Tlak vjetra pri vršnoj brzini se određuje prema izrazu:

$$q_p(z_e) = q_b \cdot c_e(z_e) \quad 2.4$$

Tlak vjetra pri osnovnoj brzini se određuje prema izrazu:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad 2.5$$

gdje je:

$\rho$  - gustoća zraka uzeta s vrijednošću 1,25 kg/m<sup>3</sup>

$v_b$  - osnovna brzina vjetra Osnovna brzina vjetra određuje se prema izrazu:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad 2.6$$

gdje je:

$c_{dir}$  - Koeficijent smjera vjetra (preporučena vrijednost je 1,0)

$c_{season}$  - Koeficijent godišnjeg doba ( preporučena vrijednost je 1,0)

$v_{b,0}$  - Temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra

Temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra zadana je i iznosi:  $v_{b,0} = 25$  m/s pa osnovna brzina vjetra prema izrazu (2.7) iznosi:

$$v_b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25,0 = 25,0 \text{ m/s}$$

Osnovni tlak uslijed osnovne brzine vjetra prema izrazu (2.5) iznosi:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 = 0,391 \text{ kN/m}^2$$

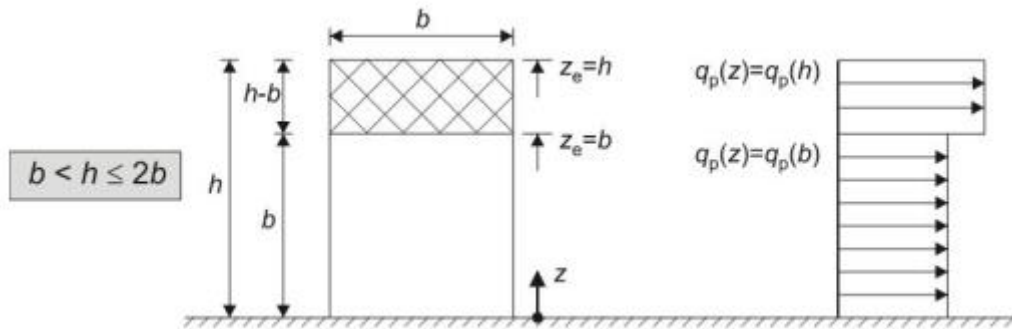
Promatrana građevina nalazi se na terenu IV. kategorije, u području s najmanje 15% površine prekrivene zgradama prosječne visine 15 metara, tj. u gradskom području. Građevina je tlocrtno kvadratnog oblika pa je opterećenje vjetrom jednako za oba smjera. Referentna visina ovisi o omjeru visine i širine i uvijek se odnosi na gornji rub odgovarajućeg zida.

$h = 33,6$  m - visina objekta

$b = 24,0$  m - širina objekta okomito na smjer djelovanja vjetra

Odnos između visine i širine objekta je:  $b = 24,0 \text{ m} < h = 33,6 \text{ m} < 2b = 48,0 \text{ m}$

Prema tome, građevina se smije proračunati kao da se sastoji od dva dijela od kojih je donji visine  $b$  i gornji koji čini ostatak visine zida kako je prikazano na slici 2.2..



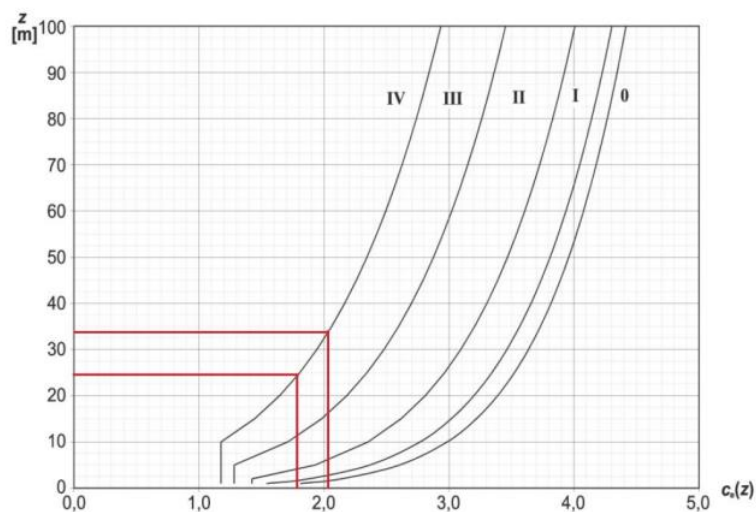
Slika 2.2 Raspodjela tlaka vjetra po visini (Izvor: [13])

Za ravne terene gdje su  $c_0(z)=1,0$   $k_t=1,0$  faktor izloženosti može se prema slici 2.2 odrediti kao funkcija visine iznad terena i funkcija kategorije terena

$c_0(z)$  - faktor orografije

$k_t$  - faktor turbulencije

Koeficijent izloženosti očitao je sa slike (2.3) za teren IV. kategorije i obje vrijednosti



Slika 2.3 Grafički prikaz faktora izloženosti  $c_e(z)$  za  $c_0=1,0$ ,  $k_t=1,0$  (Izvor: [13])

### 2.4.3. Konstrukcijski faktor

Konstrukcijski faktor  $c_s c_d$  obuhvaća učinke djelovanja vjetra od neistovremene pojave vršnog tlaka vjetra na površinu ( $c_s$ ) zajedno s učinkom od titranja konstrukcije zbog turbulencije ( $c_d$ )

Faktor veličine  $c_s$  obuhvaća učinke smanjenja djelovanja vjetra zbog neistovremene pojave vršnog tlaka vjetra na površinu dok dinamički faktor  $c_d$  obuhvaća povećanje učinka vibracija zbog turbulencije u rezonanciji s konstrukcijom.

$$c_s c_d = \frac{1 + 2k_p l_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7l_v(z_s)} \quad 2.7$$

gdje je:

$k_p$  - vršni faktor definiran kao omjer maksimalne vrijednosti promjenjivog dijela odziva prema standardnoj devijaciji

$l_v$  - intenzitet turbulencije

$B^2$  - faktor pozadine kojim se uzima u obzir nemogućnost potpunog djelovanja tlaka vjetra na površinu,

$R^2$  - faktor rezonantnog odziva kojim se uzima u obzir rezonancija turbulencije i vlastitog oblika vibracija

$z_s = 0,6 \cdot h$  - referentna visina za vertikalne konstrukcije ( npr. zgrade )

Dimenzije građevine:  $b = 24$  m,  $h = 33,6$  m

1. Kategorija terena je IV:  $z_0 = 1,0$  m, a  $z_{\min} = 10,0$  m
2. Referentna visina iznosi  $z_s = 0,6 \cdot 33,6 = 20,16$  m  $> z_{\min} = 10,0$  m
3. Koeficijent orografije je  $c_0(z_s) = 1,0$  jer je nagib terena manji od  $3^\circ$
4. Koeficijent hrapavosti za  $z_{\min} = 10,0$  m  $< z_s = 20,16$  m  $< z_{\max} = 200,0$  m određuje se izrazom :

$$c_r(z_s) = 0,19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right) \quad 2.8$$

$$c_r(z_s) = 0,19 \left( \frac{1,0}{0,05} \right)^{0,07} \ln \left( \frac{20,16}{1,0} \right) = 0,704$$

5. Preporučena vrijednost koeficijenta turbulencije je  $k_l = 1,0$
6. Intenzitet turbulencije za  $z_{\min} = 10$  m  $< z_s = 20,16$  m  $< z_{\max} = 200,0$  m izračunava se izrazom:

$$l_v(z_s) = \frac{k_l}{(c_0(z_s) \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right))} \quad 2.9$$

$$l_v(20,16) = \frac{1,0}{(1,0 \ln \left( \frac{20,16}{1,0} \right))} = 0,333$$

7. Dužina turbulencije  $L(z_s)$  predstavlja prosječnu veličinu udara za prirodne vjetrove, a za  $z > z_{\min}$  dobiva se izrazom:

$$L(z_s) = L_t \left( \frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha \quad 2.10$$

gdje je:

$$L_t = 300 \text{ m}$$

$$z_t = 200 \text{ m}$$

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(1,0) = 0,67 + 0,05 \ln(1,0) = 0,67$$

Tada je:

$$L(z_s) = 300 \left( \frac{20,16}{200} \right)^{0,67} = 64,48 \text{ m}$$

8. Koeficijent pozadine određuje se prema izrazom:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} \quad 2.11$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \left( \frac{24 + 33,6}{64,8} \right)^{0,63}} = 0,544$$

9. Srednja brzina vjetra na referentnoj visini  $z_s$  izračunava se prema izrazom:

$$v_m(z_s) = c_r(z_s) \cdot c_0(z_s) \cdot v_b \quad 2.12$$

$$v_m(z_s) = c_r(z_s) \cdot c_0(z_s) \cdot v_b \quad 2.13$$

$$v_m(z_s) = 0,704 \cdot 1,0 \cdot 25 = 17,60 \text{ m/s}$$

10. Prirodna frekvencija konstrukcije  $\eta_{1,x}$  procjenjuje se pojednostavnjenim izrazom:

$$\eta_{1,x} = \frac{\sqrt{d}}{0,1h} \quad 2.14$$

$$\eta_{1,x} = \frac{\sqrt{24}}{0,1 \cdot 33,6} = 1,46 \text{ Hz}$$

11. Bezdimenzijska funkcija spektralne gustoće snage određuje se izrazom:

$$S_L(z_s, \eta_{1,x}) = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, \eta_{1,x})}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z_s, \eta_{1,x}))^{\frac{5}{3}}} \quad 2.15$$

gdje se bezdimenzijska frekvencija određuje prema izrazu:

$$f_L(z_s, \eta_{1,x}) = \frac{\eta_{1,x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} \quad 2.16$$

$$f_L(z_s, \eta_{1,x}) = \frac{1,46 \cdot 64,48}{17,60} = 5,349$$

Tada je:

$$S_L(z_s, \eta_{1,x}) = \frac{6,8 \cdot 5,349}{(1 + 10,2 \cdot 5,349)^{\frac{5}{3}}} = 0,045$$

12. Logaritamsko opadanje konstrukcijskog prigušenja za čeličnu konstrukciju iznosi:

$$\delta_s = 0,05$$

13. Logaritamsko opadanje aerodinamičkog prigušenja za čeličnu konstrukciju izračunava se sljedećim izrazom:

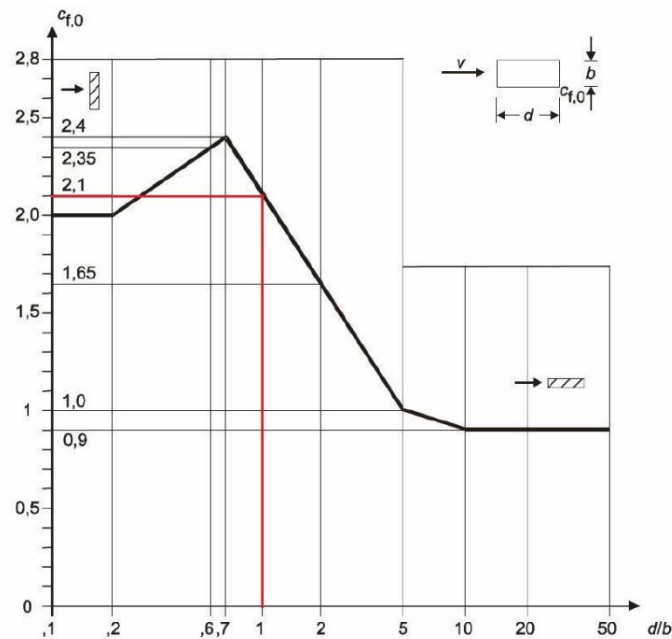
$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot \eta_{1,x} \cdot m_e} \quad 2.17$$

gdje je:

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  - gustoća zraka

$c_f = c_{f,0} = 2,1$  - koeficijent sile očitao sa slike 2.4 za  $d/b = 24/24 = 1,0$

$m_e = 150 \text{ t/m}$  - ekvivalentna masa po jedinici dužine



Slika 2.4 Koeficijent sile za pravokutne poprečne presjeke bez slobodnog protoka (Izvor: [13])

Logaritamsko opadanje aerodinamičkog prigušenja prema izrazu (2.18) iznosi:

$$\delta_a = \frac{2,1 \cdot 1,25 \cdot 24 \cdot 17,6}{2 \cdot 1,46 \cdot 150 \cdot 10^3}$$

14. Nema specijalnih uređaja pa je logaritamsko opadanje prigušenja uslijed specijalnih uređaja jednako:

$$\delta_d = 0,0$$

15. Ukupno logaritamsko opadanje prigušenja iznosi:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d = 0,05 + 0,0025 + 0,0 = 0,0525$$

16. Funkcije aerodinamičke vodljivosti  $R_h(\eta_h)$  i  $R_b(\eta_b)$  određuju se prema sljedećim izrazima:

$$R_h(\eta_h) = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} \cdot (1 - e^{-2\eta_h}) \quad 2.18$$

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} f_L(z_s, \eta_{1,x}) = \frac{4,6 \cdot 33,6}{64,48} \cdot 5,349 = 12,82$$

$$R_h(\eta_h) = \frac{1}{12,82} - \frac{1}{2 \cdot 12,82^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 12,82}) = 0,075$$

$$R_b(\eta_b) = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} \cdot (1 - e^{-2\eta_b}) \quad 2.19$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} f_L(z_s, \eta_{1,x}) = \frac{4,6 \cdot 24}{64,48} \cdot 5,349 = 9,16$$

$$R_b(\eta_b) = \frac{1}{9,16} - \frac{1}{2 \cdot 9,16^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 9,16}) = 0,103$$

17. Koeficijent rezonantnog odziva određuje se prema izrazu:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} S_L(z_s, \eta_{1,x}) \quad 2.20$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,0525} \cdot 0,045 \cdot 0,075 \cdot 0,103 = 0,0326$$

18. Udarni koeficijent  $k_p$  dobiva se izrazom (2.25), nakon određene očekivane frekvencije

v:

$$v = \eta_{1,x} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad 2.21$$

$$v = 1,46 \cdot \sqrt{\frac{0,0326}{0,0544 + 0,0326}} = 0,347 < 8 \text{ Hz}$$

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \geq 3,00$$

Gdje je  $T = 600 \text{ s}$

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(0,347 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(0,347 \cdot 600)}} = 3,00 \geq 3,45$$

19. Faktor konstrukcije određuje se izrazom

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot 3,45 \cdot 0,333 \cdot \sqrt{0,544 + 0,0326}}{1 + 7 \cdot 0,333}$$

$$c_s c_d = 0,824$$

## 2.4.4. Tlak vjetra na površine

Ukupno djelovanje tlaka vjetra dobijemo zbrajanjem unutarnjeg i vanjskog tlaka koji djeluju istovremeno. S obzirom da je građevina kvadratnog tlocrta, dva okomita smjera puhanja su istovjetni.

### 2.4.4.1. Vanjski tlak na vertikalne stijene

Koeficijenti vanjskog tlaka  $c_{pe}$  određuju se prema tablici 2.2:

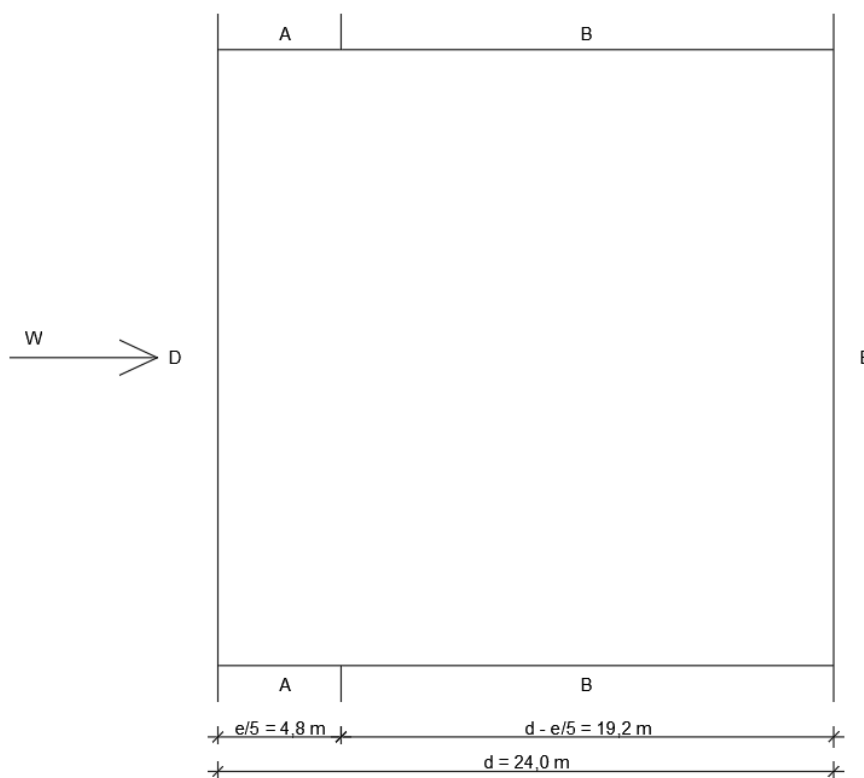
Tablica 2.2 Preporučene vrijednosti koeficijenta vanjskog tlaka za vertikalne zidove tlocrtno pravokutnih zgrada (Izvor: [13])

Područje	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
$\geq 5$	-1.4	-1.7	-0.8	-1.1	-0.5	-0.7	+0.8	+1.0	-0.5	-0.7
1	-1.2	-1.4	-0.8	-1.1	-0.5		+0.8	+1.0	-0.5	
$\leq 0.25$	-1.2	-1.4	-0.8	-1.1	-0.5		+0.7	+1.0	-0.3	-0.5

Širina građevine okomito na smjer puhanja vjetra:  $b = 24,0$  m

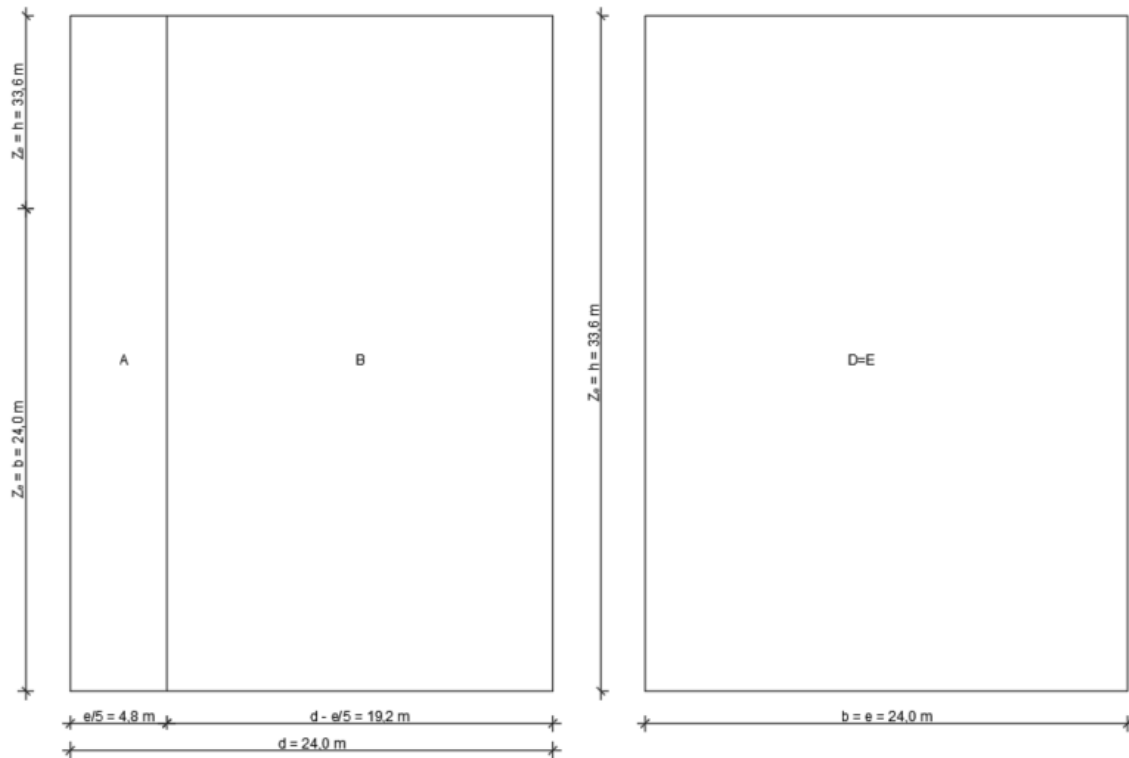
$e = \min(b; 2h) = \min(24,0; 67,2) = 24,0$  m

$d = 24$  m  $\rightarrow e \geq d$



Slika 2.5 Podjela vertikalnih površina u tlocrtu





Slika 2.6 Podjela vertikalnih površina u pogledu

Za bočnu stranu i zavjetrinu kao poredbena visina se uzima cijela visina zgrade.

Odnos visine i širine:  $b/h = 33,6/24 = 1,4$

S obzirom da je  $b/h = 1,4$  između 1 i 5, norma EN 1991-1-4 dopušta linearnu interpolaciju.

Tada dobijemo vrijednosti koeficijenta vanjskog tlaka za svaku površinu:

$$(A) = e/5 \cdot h = 4,8 \cdot 33,6 = 161,28 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10} = -1,22$$

$$(B) = (d - e/5) \cdot h = 19,2 \cdot 33,6 = 645,12 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10} = -0,8$$

$$(D) = b \cdot h = 24 \cdot 33,6 = 806,40 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10} = +0,8$$

$$(E) = b \cdot h = 24 \cdot 33,6 = 806,40 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10} = -0,5$$

Djelovanje vjetera na vertikalne površine računa se izrazom (2.2) za svaku opterećenu površinu gdje je  $q_p(z_e)$  prethodno određen izrazom (2.4):

Tablica 2.3 Vrijednosti vanjskog tlaka na vertikalne površine D i E

ETAŽA	VISINA PODA KATA	PODRUČJE	PODRUČJE D - NA UDARU VJETRA				PODRUČJE D - NA UDARU VJETRA			
	Z		Ze	Ce(Z)	Cpe	We[kN/m <sup>2</sup> ]	Ze	Ce(Z)	Cpe	We[kN/m <sup>2</sup> ]
PRIZ.	0.0	1	24.0	1.80	0.8	0.563	33.6	2.05	-0.50	-0.401
1. KAT	4.2					0.563				-0.401
2. KAT	8.4					0.563				-0.401
3. KAT	12.6					0.563				-0.401
4. KAT	16.8	2	33.6	2.05	0.8	0.641	33.6	2.05	-0.50	-0.401
5. KAT	21.0					0.641				-0.401
6. KAT	25.2					0.641				-0.401
7. KAT	29.4					0.641				-0.401
8. KAT	33.6					0.641				-0.401

Tablica 2.4 Vrijednosti vanjskog tlaka na vertikalne površine A i B

ETAŽA	VISINA PODA KATA	PODRUČJE	PODRUČJE A - BOČNA STRANA				PODRUČJE B - BOČNA STRANA			
	Z		Ze	Ce(Z)	Cpe	We[kN/m <sup>2</sup> ]	Ze	Ce(Z)	Cpe	We[kN/m <sup>2</sup> ]
PRIZ.	0.0	1	33.6	2.05	-1.22	-0.978	33.6	2.05	-0.80	-0.641
1. KAT	4.2					-0.978				-0.641
2. KAT	8.4					-0.978				-0.641
3. KAT	12.6					-0.978				-0.641
4. KAT	16.8	2	33.6	2.05	-1.22	-0.978	33.6	2.05	-0.80	-0.641
5. KAT	21.0					-0.978				-0.641
6. KAT	25.2					-0.978				-0.641
7. KAT	29.4					-0.978				-0.641
8. KAT	33.6					-0.978				-0.641

## 2.4.4.2. Vanjski tlak na površinu krova

Koeficijent vanjskog tlaka  $c_{pe}$  na ravne krovove određuje se prema tablici 2.5

Tablica 2.5 Preporučene vrijednosti koeficijenta vanjskog tlaka za ravne krovove (Izvor: [13])

Tip krova	Zona							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
S oštrim zabatima	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+ 0,2	
							-0,6	

$$e = \min (b; 2h) = \min (24,0; 67,2) = 24,0 \text{ m}$$

Vrijednosti koeficijenta vanjskog tlaka za opterećene površine su:

$$(F) = e / 4 \cdot e / 10 = 6 \cdot 2,4 = 14,40 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10} = -1,8$$

$$(G) = (b - e / 2) \cdot e / 10 = 12 \cdot 2,4 = 28,8 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10} = -1,2$$

$$(H) = b \cdot (e / 2 - e / 10) = 24 \cdot 9,6 = 230,4 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10} = -0,7$$

$$(I) = b \cdot (d - e / 2) = 24 \cdot 12 = 288 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10} = +0,2; -0,6$$

Djelovanje vjetra na vertikalne površine računa se izrazom (2.2) za svaku opterećenu površinu gdje je  $q_p(z_e)$  prethodno određen izrazom (2.4):

$$w_e^F = 0,802 \cdot (-1,8) = -1,444 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^G = 0,802 \cdot (-1,2) = -0,962 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^H = 0,802 \cdot (-0,7) = -0,561 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^I = 0,802 \cdot (+0,2) = +0,160 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^J = 0,802 \cdot (-0,6) = -0,481 \text{ kN/m}^2$$

#### 2.4.4.3. Vanjski tlak na površinu krova

Koeficijent unutarnjeg tlaka  $c_{pi}$  na vertikalne stijene ovisi o veličini i rasporedu otvora po oplošju građevine. Za zatvorene građevine s unutarnjim pregradama za najnepovoljniji slučaj prema normi EN 1991-1-4 može se uzeti s vrijednostima:  $c_{pi} = +0,2$  i  $c_{pi} = -0,3$

Djelovanje vjetra na unutarnje vertikalne površine određuje se prema izrazu (). Za referentnu visinu  $z_e = 33,6 \text{ m}$  određen je vršni tlak  $q_p(33,6) = 0,802 \text{ kN/m}^2$  pa se sada mogu odrediti unutarnji tlakovi na vertikalne površine.

$$w_i^+ = 0,802 \cdot (+0,2) = +0,160 \text{ kN/m}^2$$

$$w_i^- = 0,802 \cdot (-0,3) = -0,240 \text{ kN/m}^2$$

#### 2.4.4.4. Ukupni tlak na sve površine

Ukupna vrijednost djelovanja vjetra dobije se algebarskim zbrajanjem vanjskog i unutarnjeg tlaka:

$$w = (F_{w,e} - F_{w,i}) / A_{ref} = c_s c_d \cdot w_e + w_i$$

Za pozitivan unutarnji tlak  $w_i^+$  raspodjela tlakova je prikazana na slici 2.7, a vrijednosti ukupnog tlaka su sljedeće:

Vertikalne površine

$$w_A = -0,978 \cdot 0,824 - (+0,160) = -0,966 \text{ kN/m}^2$$

$$w_B = -0,641 \cdot 0,824 - (+0,160) = -0,688 \text{ kN/m}^2$$

$$w_D(z_e = 24 \text{ m}) = +0,563 \cdot 0,824 - (+0,160) = +0,304 \text{ kN/m}^2$$

$$w_D(z_e = 33,6 \text{ m}) = +0,641 \cdot 0,824 - (+0,160) = +0,368 \text{ kN/m}^2$$

$$w_E = -0,401 \cdot 0,824 - (+0,160) = -0,490 \text{ kN/m}^2$$

Krovne površine

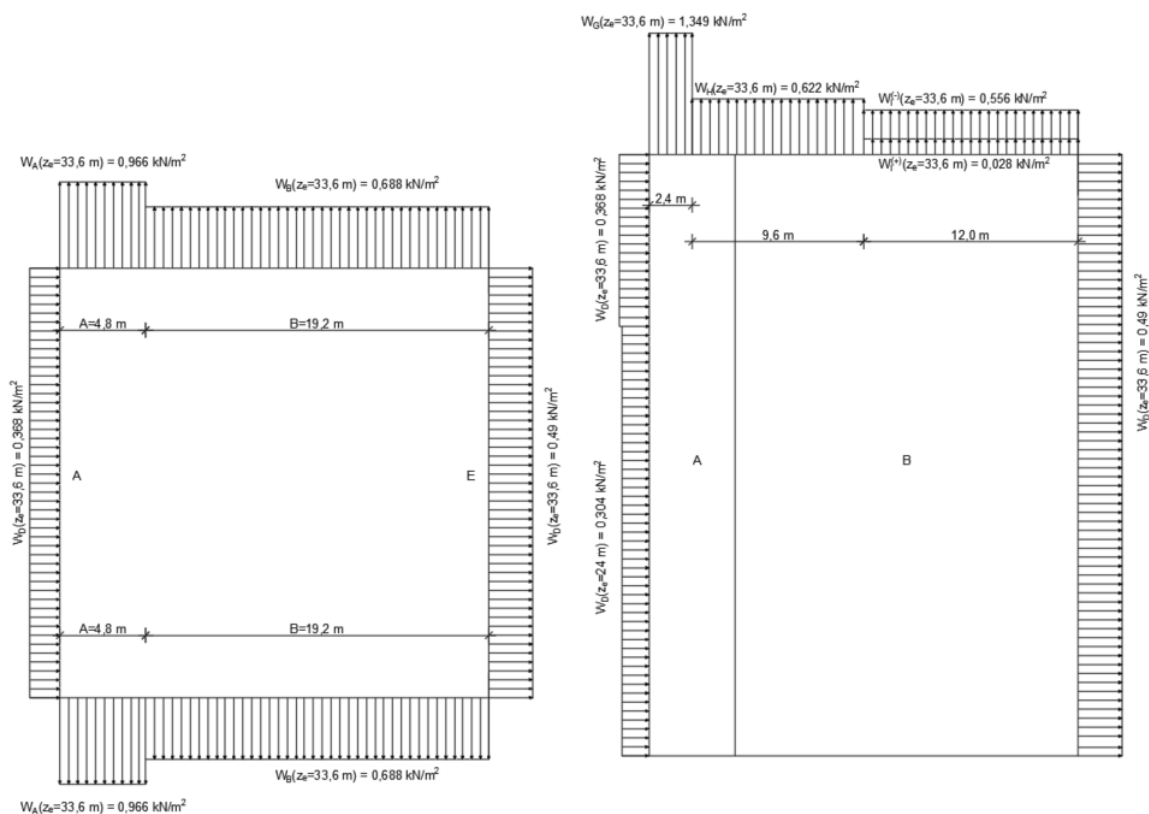
$$w_F = -1,444 \cdot 0,824 - (+0,160) = -1,349 \text{ kN/m}^2$$

$$w_G = -0,962 \cdot 0,824 - (+0,160) = -0,952 \text{ kN/m}^2$$

$$w_H = -0,561 \cdot 0,824 - (+0,160) = -0,622 \text{ kN/m}^2$$

$$w_I^{(+)} = +0,160 \cdot 0,824 - (+0,160) = -0,028 \text{ kN/m}^2$$

$$w_I^{(-)} = -0,481 \cdot 0,824 - (+0,160) = -0,556 \text{ kN/m}^2$$



Slika 2.7 Ukupni tlak za  $c_{pi} = +0,2$

Za negativan unutarnji tlak  $w_i^-$  raspodjela tlakova je prikazana na slici 2.8, a vrijednosti ukupnog tlaka su sljedeće:

Vertikalne površine

$$w_A = -0,978 \cdot 0,824 - (-0,240) = -0,566 \text{ kN/m}^2$$

$$w_B = -0,641 \cdot 0,824 - (-0,240) = -0,288 \text{ kN/m}^2$$

$$w_D(z_e = 24 \text{ m}) = +0,563 \cdot 0,824 - (-0,240) = +0,704 \text{ kN/m}^2$$

$$w_D(z_e = 33,6 \text{ m}) = +0,641 \cdot 0,824 - (-0,240) = +0,768 \text{ kN/m}^2$$

$$w_E = -0,401 \cdot 0,824 - (-0,240) = -0,090 \text{ kN/m}^2$$

Krovne površine

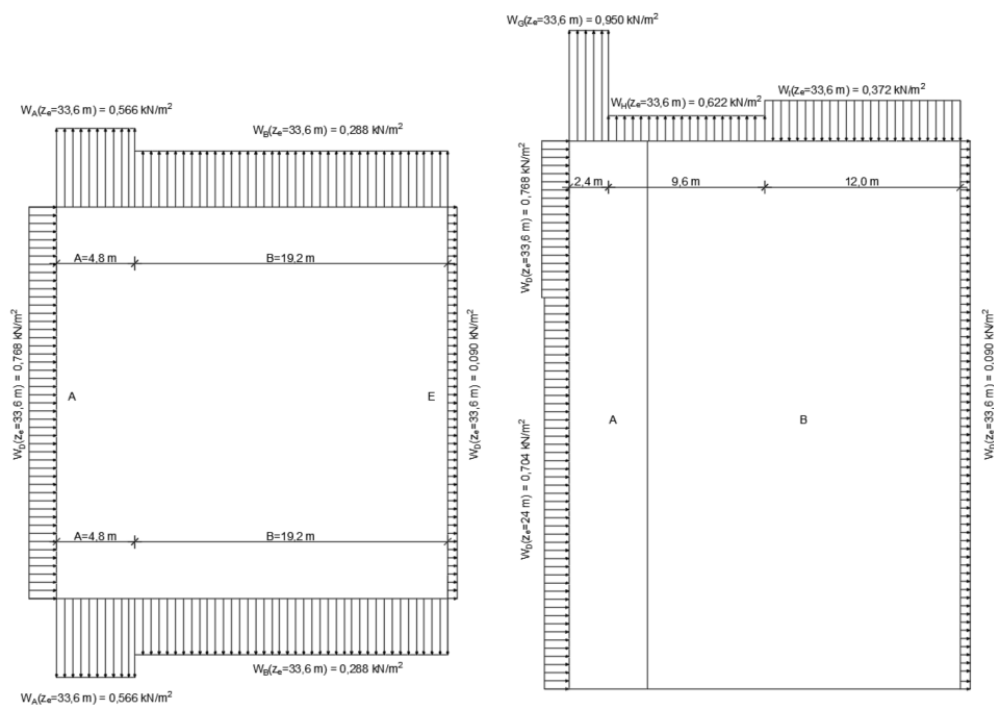
$$w_F = -1,444 \cdot 0,824 - (-0,240) = -0,950 \text{ kN/m}^2$$

$$w_G = -0,962 \cdot 0,824 - (-0,240) = -0,552 \text{ kN/m}^2$$

$$w_H = -0,561 \cdot 0,824 - (-0,240) = -0,222 \text{ kN/m}^2$$

$$w_I^{(+)} = +0,160 \cdot 0,824 - (-0,240) = +0,372 \text{ kN/m}^2$$

$$w_I^{(-)} = -0,481 \cdot 0,824 - (-0,240) = -0,156 \text{ kN/m}^2$$



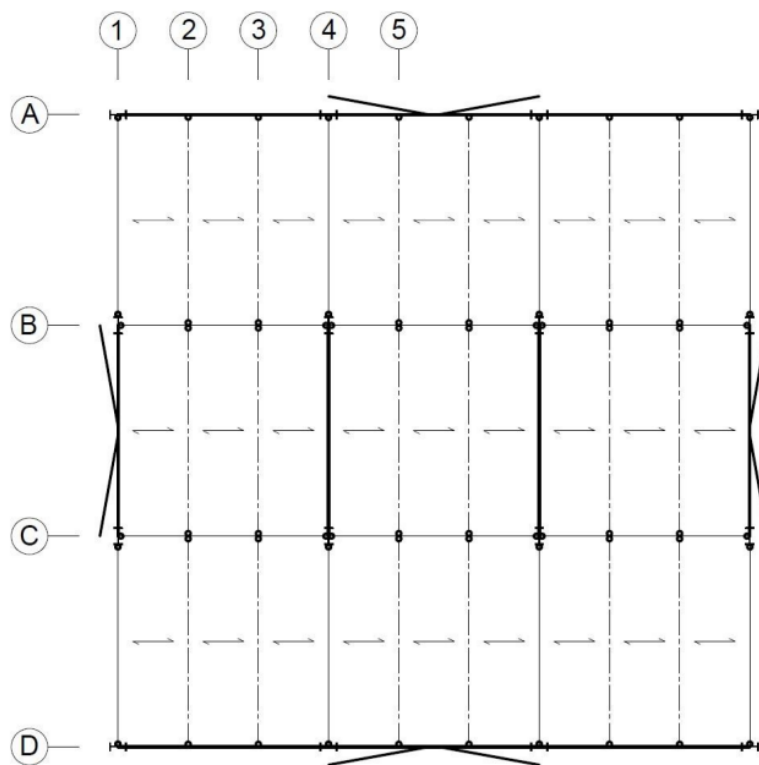
Slika 2.8 Ukupni tlak za  $c_{pi} = -0,3$

### 3. PRELIMINARNO DIMENZIONIRANJE

Preliminarnim proračunom će se odrediti profili nosača i stupova za kvalitetu čelika S355. Stupovi će se dimenzionirati na temelju uzdužnih sila, a nosači prema momentima savijanja. S odabranim profilima će se zatim provesti analiza konstrukcije i dimenzioniranje.

#### 3.1. Preliminarni odabir dimenzija nosača

Preliminarno dimenzioniranje se provodi za gravitacijsko opterećenje (stalno, uporabno i snijeg). Sekundarni nosači su zglobno oslonjeni dok su glavni nosači upeti (okvirni sustav). Za sekundarne nosače preliminarni proračun će biti mjerodavan dok za glavne nosače će sile i momenti biti podcijenjeni jer nisu u obzir uzete sile vjetra i potresa. Oznake elemenata su prikazane na slici 3.1.



Slika 3.1 Oznake elemenata (Izvor: [2])

### 3.1.1. Preliminarne dimenzije nosača

#### 3.1.1.1. Sekundarni nosač A2-B2

Sekundarni nosači su jednostavno oslonjeni nosači. Razmak nosača je  $e = 2,67$  m.

Procjena vlastite težine sekundarnog međukatnog nosača je:

$$g = 1,00 \text{ kN/m'}$$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot g + 1,35 \cdot g_{k,1} \cdot e + 1,50 \cdot q_{k,1} \cdot e$$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot 1,00 + 1,35 \cdot 3,81 \cdot 2,67 + 1,50 \cdot 3,80 \cdot 2,67 = 30,30 \text{ kN/m'}$$

Moment savijanja za mjerodavno opterećenje je:

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8} = \frac{30,30 \cdot 8^2}{8} = 242,4 \text{ kNm}$$

Za opterećenje momentom savijanja  $M_{Ed} = 242,4$  kNm i kvalitetu čelika S355 odabran je profil IPE 330, za koji je  $g = 0,49 \text{ kN/m'}$  <  $1,00 \text{ kN/m'}$ .

Vlastita težina krovnog sekundarnog nosača procijenjena je s vrijednošću:

$$g = 1,00 \text{ kN/m'}$$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot g + 1,35 \cdot g_{k,1} \cdot e + 1,50 \cdot q_{k,1} \cdot e$$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot 1,00 + 1,35 \cdot 4,61 \cdot 2,67 + 1,50 \cdot (0,40 \cdot 2,67 + 0,5 \cdot 1,00 \cdot 2,67) = 21,57 \text{ kN/m'}$$

Moment savijanja za mjerodavno opterećenje je:

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8} = \frac{21,57 \cdot 8^2}{8} = 172,56 \text{ kNm}$$

Za opterećenje momentom savijanja  $M_{Ed} = 172,56$  kNm i kvalitetu čelika S355 odabran je profil IPE 300, za koji je  $g = 0,42 \text{ kN/m'}$  <  $1,00 \text{ kN/m'}$ .

#### 3.1.1.2. Glavni nosač B1-B4

Glavni nosač B1-B4 je prosta greda. Opterećen je reakcijama sekundarnih nosača u trećinama raspona. Vrijednosti sekundarnih nosača su:

$$q_{Ed} = 30,30 - 1,35 + 1,35 \cdot 0,49 = 29,61 \text{ kN/m'}$$
 – korekcija vl. težine sek. nosača

$$R_{sek} = \frac{q_{Ed} \cdot L}{2} = \frac{29,61 \cdot 8}{2} \cdot 2 = 236,88 \text{ kN}$$

Procjena vlastite težine glavnog međukatnog nosača je:

$$g = 1,00 \text{ kN/m'}$$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot g = 1,35 \text{ kN/m'}$$

Moment savijanja za mjerodavno opterećenje je:

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8} + \frac{R_{sek} \cdot L}{3} = \frac{1,35 \cdot 8^2}{8} + \frac{236,88 \cdot 8}{3} = 643,27 \text{ kNm}$$

Za opterećenje momentom savijanja  $M_{Ed} = 643,27 \text{ kNm}$  i kvalitetu čelika S355 odabran je profil IPE 500, za koji je  $g = 0,91 \text{ kN/m'}$  <  $1,00 \text{ kN/m'}$

Vrijednosti ležajnih reakcija krovnih sekundarnih nosača su sljedeće:

$$q_{Ed} = 21,57 - 1,35 + 1,35 \cdot 0,42 = 20,79 \text{ kN/m'}$$
 – korekcija vl. težine sek. nosača

$$R_{sek} = \frac{q_{Ed} \cdot L}{2} = \frac{20,79 \cdot 8}{2} = 166,32 \text{ kN}$$

Procjena vlastite težine glavnog krovnog nosača je:

$$g = 1,00 \text{ kN/m'}$$

Moment savijanja za mjerodavno opterećenje je:

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8} + \frac{R_{sek} \cdot L}{3} = \frac{1,35 \cdot 8^2}{8} + \frac{166,32 \cdot 8}{3} = 454,32 \text{ kNm}$$

Za opterećenje momentom savijanja  $M_{Ed} = 454,32 \text{ kNm}$  i kvalitetu čelika S355 odabran je profil IPE 400, za koji je  $g = 0,66 \text{ kN/m'}$  <  $1,00 \text{ kN/m'}$

### 3.1.1.3. Rubni nosač A1-B1

Sekundarni nosači su proste grede. Procjena vlastite težine sekundarnog međukatnog nosača je:

$$g = 1,00 \text{ kN/m'}$$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot g + 1,35 \cdot (g_{k,1} \cdot e / 2 + g_{k,3}) + 1,50 \cdot q_{k,1} \cdot e / 2$$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot 1,00 + 1,35 \cdot (3,81 \cdot 2,67 / 2 + 4,2) + 1,50 \cdot 3,80 \cdot 2,67 / 2 = 21,50 \text{ kN/m'}$$

Moment savijanja za mjerodavno opterećenje je:

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8} = \frac{21,50 \cdot 8^2}{8} = 172,00 \text{ kNm}$$

Za opterećenje momentom savijanja  $M_{Ed} = 172,00 \text{ kNm}$  i kvalitetu čelika S355 odabran je profil IPE 300, za koji je  $g = 0,42 \text{ kN/m'}$  <  $1,00 \text{ kN/m'}$

Vlastita težina krovnog nosača procijenjena je s vrijednošću:

$$g = 1,00 \text{ kN/m'}$$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot g + 1,35 \cdot (g_{k,2} \cdot e + g_{k,3}) + 1,50 \cdot (q_{k,2} \cdot e / 2 + 0,5 \cdot s \cdot e / 2)$$



$$q_{Ed} = 1,35 \cdot 1,00 + 1,35 \cdot (4,61 \cdot 2,67/2 + 2,1) + 1,50 \cdot (0,40 \cdot 2,67/2 + 0,5 \cdot 1,00 \cdot 2,67/2) = 14,30 \text{ kN/m'}$$

Moment savijanja za mjerodavno opterećenje je:

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8} = \frac{14,30 \cdot 8^2}{8} = 114,40 \text{ kNm}$$

Za opterećenje momentom savijanja  $M_{Ed} = 114,40 \text{ kNm}$  i kvalitetu čelika S355 odabran je profil IPE 240, za koji je  $g = 0,31 \text{ kN/m'}$  <  $1,00 \text{ kN/m'}$ .

### 3.1.2. Odabir dimenzija nosača okvirnog sustava

#### 3.1.2.1. Glavni nosač A1-A4

Kako bi bili na strani pouzdanosti nosač će se proračunati kao jednostavno oslonjeni. Nosač je opterećen u trećinama raspona reakcijama sekundarnih nosača te vlastitom težinom fasadnih nosača.

Vlastita težina međukatnog glavnog nosača procijenjena je s vrijednošću:  $g = 1,00 \text{ kN/m'}$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot (g + g_{k,3}) = 1,35 \cdot (1 + 4,2) = 7,02 \text{ kN/m'}$$

$$R_{sek} = \frac{q_{Ed} \cdot L}{2} = \frac{7,02 \cdot 8}{2} = 28,08 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8} + \frac{R_{sek} \cdot L}{3} = \frac{7,02 \cdot 8^2}{8} + \frac{28,08 \cdot 8}{3} = 372 \text{ kNm}$$

Za opterećenje momentom savijanja  $M_{Ed} = 372,00 \text{ kNm}$  i kvalitetu čelika S355 odabran je profil IPE 400, za koji je  $g = 0,66 \text{ kN/m'}$  <  $1,00 \text{ kN/m'}$ .

Vlastita težina krovnog glavnog nosača procijenjena je s vrijednošću:

$$g = 1,00 \text{ kN/m'}$$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot (g + g_{k,3}) = 1,35 \cdot (1 + 2,1) = 4,19 \text{ kN/m'}$$

$$R_{sek} = \frac{q_{Ed} \cdot L}{8} = \frac{4,19 \cdot 8}{8} = 4,19 \text{ kN}$$

Moment savijanja za mjerodavno opterećenje je

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8} + \frac{R_{sek} \cdot L}{3} = \frac{4,19 \cdot 8^2}{8} + \frac{4,19 \cdot 8}{3} = 255,3 \text{ kNm}$$

Za opterećenje momentom savijanja  $M_{Ed} = 255,3 \text{ kNm}$  i kvalitetu čelika S355 odabran je profil IPE 330, za koji je  $g = 0,49 \text{ kN/m'}$  <  $1,00 \text{ kN/m'}$ .

### 3.2. Preliminarne dimenzije stupova

Za proračun uzdužne sile u stupu na koju će se preliminarno dimenzionirati stup, vl težina stupa će se uzeti proporcionalno opterećenju koje preuzima. Stupovi i pripadne površine prikazani su na slici 3.2.

Opterećenje međukatne konstrukcije

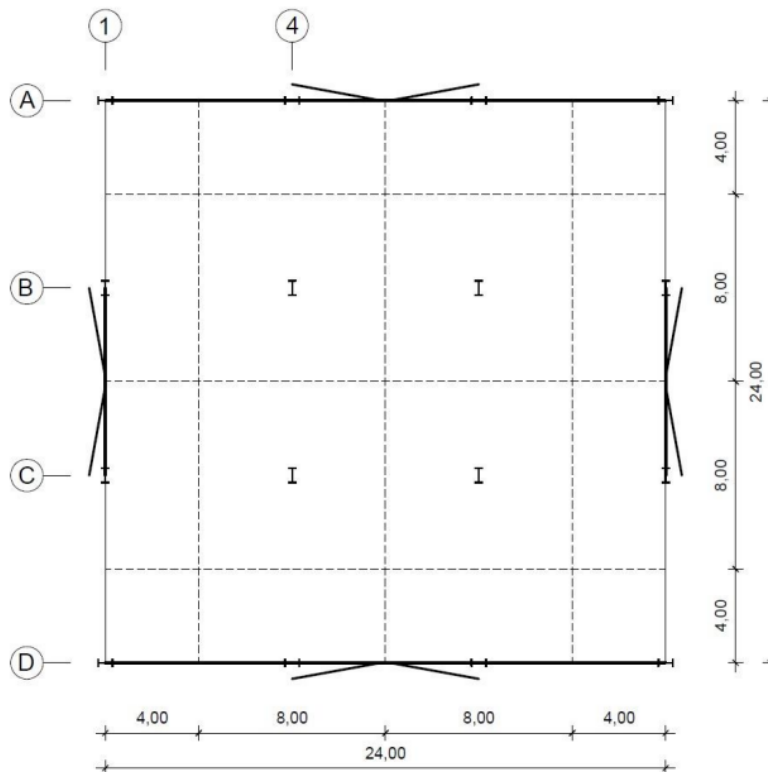
VI. težine međukatne konstrukcije	$g_{k,1} = 3,81 \text{ kN/m}^2$
Uporabno opterećenje međukatne konstrukcije	$q_{k,1} = 3,80 \text{ kN/m}^2$

$$q_{Ed,1} = 1,35 \cdot g_{k,1} + 1,50 \cdot q_{k,1} = 1,35 \cdot 3,81 + 1,5 \cdot 3,80 = 10,84 \text{ kN/m}^2$$

Opterećenje krova

VI. Težine krovne konstrukcije	$g_{k,1} = 4,61 \text{ kN/m}^2$
Uporabno opterećenje krovne konstrukcije	$q_{k,1} = 0,40 \text{ kN/m}^2$

$$q_{Ed,1} = 1,35 \cdot g_{k,1} + 1,50 \cdot q_{k,1} = 1,35 \cdot 4,61 + 1,5 \cdot 0,40 = 6,82 \text{ kN/m}^2$$



Slika 3.2 Oznake stupova (Izvor: [3])

### 3.2.1. Provjera stupa A1

Površina koja pripada stupu A1 iznosi:

$$A = a \cdot b = 4,0 \cdot 4,0 = 16,0 \text{ m}^2$$

Vlastita težina stupa duljine  $L = 33,6 \text{ m}$  :

$$G = L \cdot g_{\text{pretp.}} = 33,6 \cdot 1,5 = 50,4 \text{ kN}$$

Težina sekundarnog nosača, rubnih međukatnih nosača oznaka A1 – A4 te A1 – B1 s pripadajućom vlastitom težinom fasadnih zidova koju preuzima stup iznosi:

$$G_1 = a \cdot (g_{A1-A4} + g_{k,3}) + b \cdot (g_{A1-B1} + g_{k,3} + g_{\text{sek}})$$

$$G_1 = 4,0 \cdot (1,0 + 4,2) + 4,0 \cdot (0,42 + 4,2 + 0,49) = 41,24 \text{ kN}$$

Opterećenje međukatne konstrukcije koje preuzima stup je sljedeće:

$$Q_{Ed,1} = a \cdot b \cdot q_{Ed,1} = 4,0 \cdot 4,0 \cdot 10,84 = 173,44 \text{ kN}$$

Težina sekundarnog nosača, rubnih krovnih nosača oznaka A1 – A4 te A1 – B1 s pripadajućom vlastitom težinom fasadnih zidova koju preuzima stup iznosi

$$G_2 = a \cdot (g_{A1-A4} + g_{k,3}) + b \cdot (g_{A1-B1} + g_{k,3} + g_{\text{sek}})$$

$$G_2 = 4,0 \cdot (1,0 + 2,1) + 4,0 \cdot (0,31 + 2,1 + 0,42) = 23,72 \text{ kN}$$

Opterećenje krovne konstrukcije koje preuzima stup je sljedeće:

$$Q_{Ed,2} = a \cdot b \cdot q_{Ed,2} = 4,0 \cdot 4,0 \cdot 6,82 = 109,12 \text{ kN}$$

Mjerodavna kombinacija djelovanja koja djeluju na stup je :

$$Q_{Ed,uk} = 1,35 \cdot G + (1,35 \cdot G_1 + Q_{Ed,1}) \cdot n_{\text{katovala}} + 1,35 \cdot G_2 + Q_{Ed,2}$$

$$Q_{Ed,uk} = 1,35 \cdot 50,4 + (1,35 \cdot 41,24 + 173,44) \cdot 7 + 1,35 \cdot 23,72 + 109,12$$

$$Q_{Ed,uk} = 1813,00 \text{ kN}$$

Za opterećenje uzdužnom tlačnom silom  $Q_{Ed,uk} = 1813,00 \text{ kN}$ , kvalitetu čelika S355 i duljinu izvijanja od 4,2 m odabran je širokopojasni valjani profil HEA 280, za koji vrijedi:

$$G = L \cdot g_{\text{odabr.}} = 33,6 \cdot 0,75 = 25,2 \text{ kN} < 50,4 \text{ kN}$$

### 3.2.2. Provjera stupa A4

Površina koja pripada stupu A4 iznosi:

$$A = a \cdot b = 8,0 \cdot 4,0 = 32,0 \text{ m}^2$$

Vlastita težina stupa duljine  $L = 33,6 \text{ m}$  :

$$G = L \cdot g_{\text{pretp.}} = 33,6 \cdot 1,5 = 50,4 \text{ kN}$$

Opterećenje međukatne konstrukcije koje preuzima stup je sljedeće:

$$Q_{\text{Ed},1} = a \cdot b \cdot q_{\text{Ed},1} = 8,0 \cdot 4,0 \cdot 10,84 = 346,88 \text{ kN}$$

Težina sekundarnog nosača, rubnog krovnog nosača oznake A1 – A4 s pripadajućom vlastitom težinom fasadnih zidova koju preuzima stup iznosi:

$$G_2 = a \cdot (g_{\text{A1-A4}} + g_{\text{k},3}) + b \cdot g_{\text{sek}} \cdot 2$$

$$G_2 = 8 \cdot (1,0 + 2,1) + 4,0 \cdot 0,42 \cdot 2 = 28,16 \text{ kN}$$

Opterećenje krovne konstrukcije koje preuzima stup je sljedeće:

$$Q_{\text{Ed},2} = a \cdot b \cdot q_{\text{Ed},2} = 8,0 \cdot 4,0 \cdot 6,82 = 218,24 \text{ kN}$$

Mjerodavna kombinacija djelovanja koja djeluju na stup je :

$$Q_{\text{Ed,uk}} = 1,35 \cdot G + (1,35 \cdot G_1 + Q_{\text{Ed},1}) \cdot n_{\text{katova}} + 1,35 \cdot G_2 + Q_{\text{Ed},2}$$

$$Q_{\text{Ed,uk}} = 1,35 \cdot 50,4 + (1,35 \cdot 45,52 + 346,88) \cdot 7 + 1,35 \cdot 28,16 + 218,24$$

$$Q_{\text{Ed,uk}} = 3183,00 \text{ kN}$$

Za opterećenje uzdužnom tlačnom silom  $Q_{\text{Ed,uk}} = 3183,00 \text{ kN}$ , kvalitetu čelika S355 i duljinu izvijanja od 4,2 m odabran je širokopojasni valjani profil HEA 360, za koji vrijedi:

$$G = L \cdot g_{\text{odabr.}} = 33,6 \cdot 1,12 = 37,63 \text{ kN} < 50,4 \text{ kN}$$

### 3.2.3. Provjera stupa B4

Površina koja pripada stupu B4 iznosi:

$$A = a \cdot b = 8,0 \cdot 8,0 = 64,0 \text{ m}^2$$

Vlastita težina stupa duljine  $L = 33,6 \text{ m}$  :

$$G = L \cdot g_{\text{pretp.}} = 33,6 \cdot 2,0 = 67,2 \text{ kN}$$

Težina glavnih i sekundarnih međukatnih nosača koju preuzima stup iznosi:

$$G_1 = a \cdot g_{\text{gl}} + b \cdot g_{\text{sek}} \cdot 3$$

$$G_1 = 8 \cdot 0,91 + 8,0 \cdot 0,49 \cdot 3 = 19,04 \text{ kN}$$

Opterećenje međukatne konstrukcije koje preuzima stup je sljedeće:

$$Q_{Ed,1} = a \cdot b \cdot q_{Ed,1} = 8,0 \cdot 8,0 \cdot 10,84 = 693,76 \text{ kN}$$

Težina glavnih i sekundarnih krovnih nosača koju preuzima stup iznosi:

$$G_2 = a \cdot g_{gl} + b \cdot g_{sek} \cdot 3$$

$$G_2 = 8 \cdot 0,66 + 8,0 \cdot 0,42 \cdot 3 = 15,36 \text{ kN}$$

Opterećenje krovne konstrukcije koje preuzima stup je sljedeće:

$$Q_{Ed,2} = a \cdot b \cdot q_{Ed,2} = 8,0 \cdot 8,0 \cdot 6,82 = 436,48 \text{ kN}$$

Mjerodavna kombinacija djelovanja koja djeluju na stup je :

$$Q_{Ed,uk} = 1,35 \cdot G + (1,35 \cdot G_1 + Q_{Ed,1}) \cdot n_{katova} + 1,35 \cdot G_2 + Q_{Ed,2}$$

$$Q_{Ed,uk} = 1,35 \cdot 67,2 + (1,35 \cdot 19,04 + 693,76) \cdot 7 + 1,35 \cdot 15,36 + 436,48$$

$$Q_{Ed,uk} = 5584,00 \text{ kN}$$

Za opterećenje uzdužnom tlačnom silom  $Q_{Ed,uk} = 5584,00 \text{ kN}$ , kvalitetu čelika S355 i duljinu izvijanja od 4,2 m odabran je širokopojasni valjani profil HEA 650, za koji vrijedi:

$$G = L \cdot g_{odabr.} = 33,6 \cdot 1,90 = 63,84 \text{ kN} < 67,2 \text{ kN}$$

### 3.2.4. Provjera stupa B1

Površina koja pripada stupu B1 iznosi:

$$A = a \cdot b = 4,0 \cdot 8,0 = 32,0 \text{ m}^2$$

Vlastita težina stupa duljine  $L = 33,6 \text{ m}$  procjenjuje se s vrijednošću:

$$G = L \cdot g_{pretp.} = 33,6 \cdot 1,5 = 50,4 \text{ kN}$$

Težina glavnih i sekundarnih međukatnih nosača s pripadajućom vlastitom težinom fasadnih zidova koju preuzima stup iznosi:

$$G_1 = a \cdot g_{B1-B4} + b/2 \cdot g_{A1-B1} + b/2 \cdot g_{gl} + b \cdot g_{sek} + b \cdot g_{k,3}$$

$$G_1 = 4 \cdot 0,91 + 4 \cdot 0,42 + 4 \cdot 0,66 + 8 \cdot 0,49 + 8 \cdot 4,2 = 45,48 \text{ kN}$$

Opterećenje međukatne konstrukcije koje preuzima stup je sljedeće:

$$Q_{Ed,1} = a \cdot b \cdot q_{Ed,1} = 4,0 \cdot 8,0 \cdot 10,84 = 346,88 \text{ kN}$$

Težina glavnih i sekundarnih krovnih nosača koju preuzima stup iznosi:

$$G_2 = a \cdot g_{B1-B4} + b/2 \cdot g_{A1-B1} + b/2 \cdot g_{gl} + b \cdot g_{sek} + b \cdot g_{k,3}$$

$$G_2 = 4 \cdot 0,66 + 4 \cdot 0,31 + 4 \cdot 0,49 + 8 \cdot 0,42 + 8 \cdot 2,1 = 26,00 \text{ Kn}$$

Opterećenje krovne konstrukcije koje preuzima stup je sljedeće:

$$Q_{Ed,2} = a \cdot b \cdot q_{Ed,2} = 4,0 \cdot 8,0 \cdot 6,82 = 218,24 \text{ kN}$$

Mjerodavna kombinacija djelovanja koja djeluju na stup je :

$$Q_{Ed,uk} = 1,35 \cdot G + (1,35 \cdot G_1 + Q_{Ed,1}) \cdot n_{katova} + 1,35 \cdot G_2 + Q_{Ed,2}$$

$$Q_{Ed,uk} = 1,35 \cdot 50,4 + (1,35 \cdot 45,48 + 346,88) \cdot 7 + 1,35 \cdot 26 + 218,24$$

$$Q_{Ed,uk} = 3179,00 \text{ kN}$$

Za opterećenje uzdužnom tlačnom silom  $Q_{Ed,uk} = 3179,00 \text{ kN}$ , kvalitetu čelika S355 i duljinu izvijanja od 4,2 m odabran je širokopojasni valjani profil HEA 360, za koji vrijedi:

$$G = L \cdot g_{odabr.} = 33,6 \cdot 1,12 = 37,63 \text{ kN} < 50,4 \text{ kN}$$

### 3.3. Rekapitulacija profila

Odabrani profili nosača i stupova prikazani su u tablicama 3.1 i 3.2.

Tablica 3.1 Preliminarni profili nosača

OZNAKA	MEĐUKATNI	G [Kn/m']	KROVNI	G [Kn/m']
A2-B2	IPE 330	0.49	IPE300	0.42
B1-B4	IPE500	0.91	IPE400	0.66
A1-B1	IPE300	0.42	IPE240	0.31
A1-A4	IPE400	0.66	IPE330	0.49

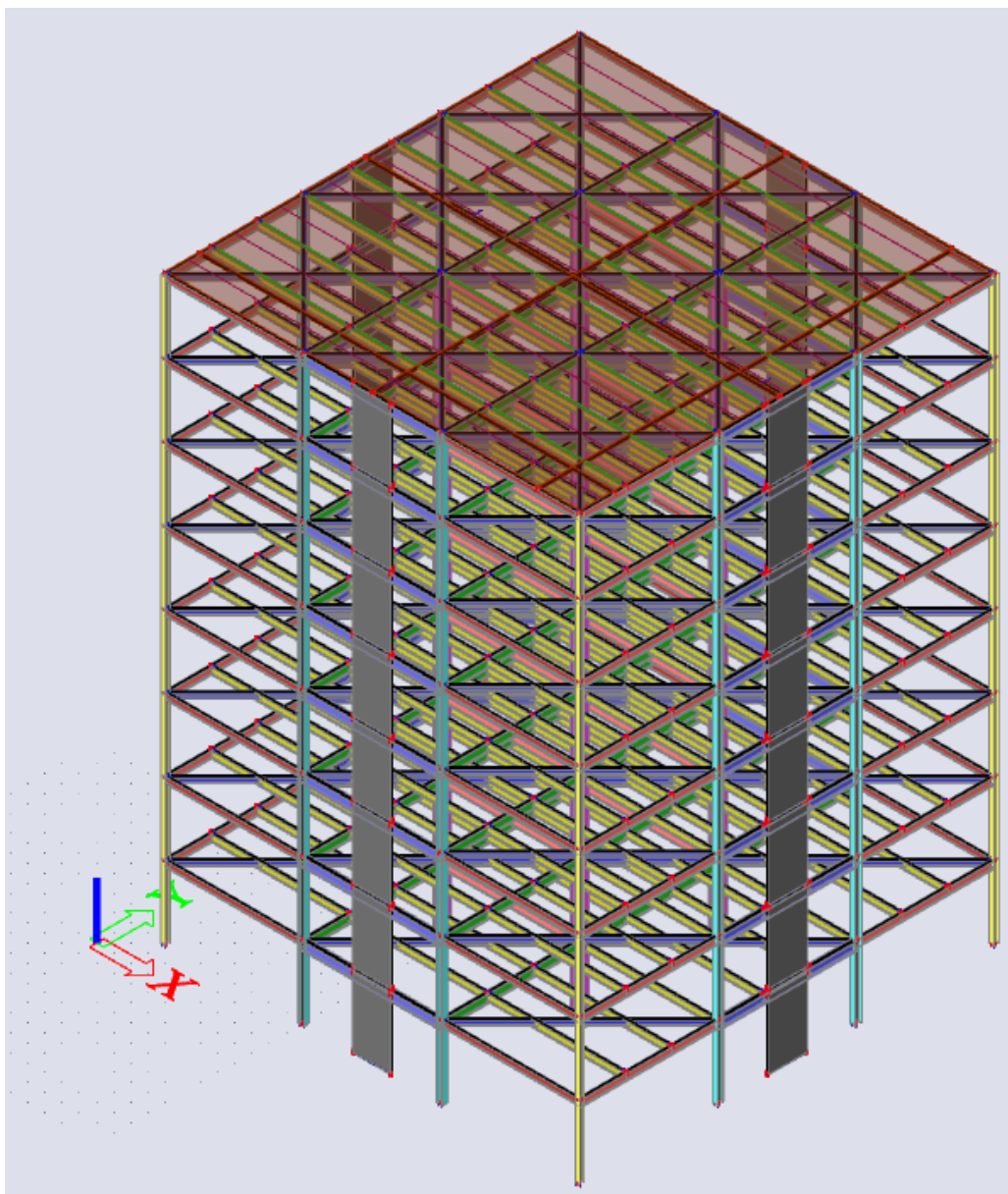
Tablica 3.2 Preliminarni profili stupova

OZNAKA	PROFIL	G [Kn/m']
A1	HEA280	0.76
A4	HEA360	1.12
B1	HEA360	1.12
B4	HEA650	1.9

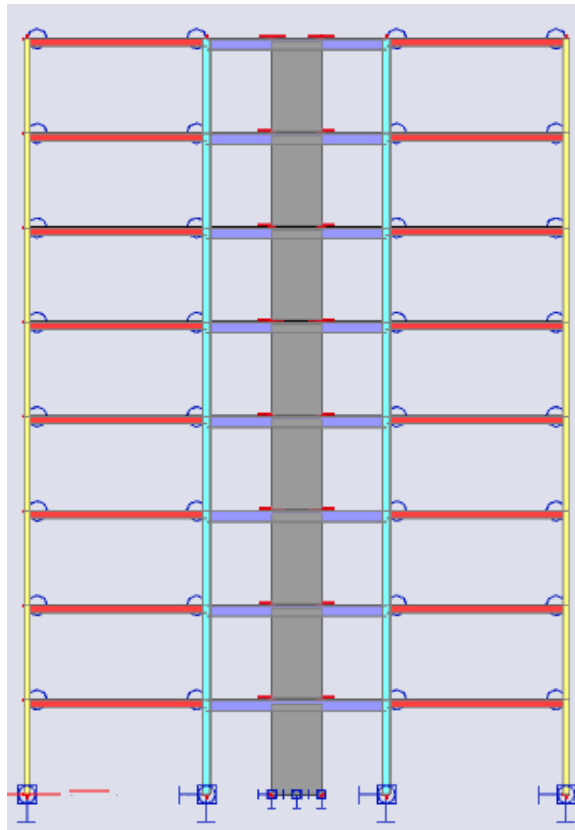
## 4. LINEARNA ANALIZA KONSTRUKCIJE I DIMENZIONIRANJE

### 4.1. Proračunski model

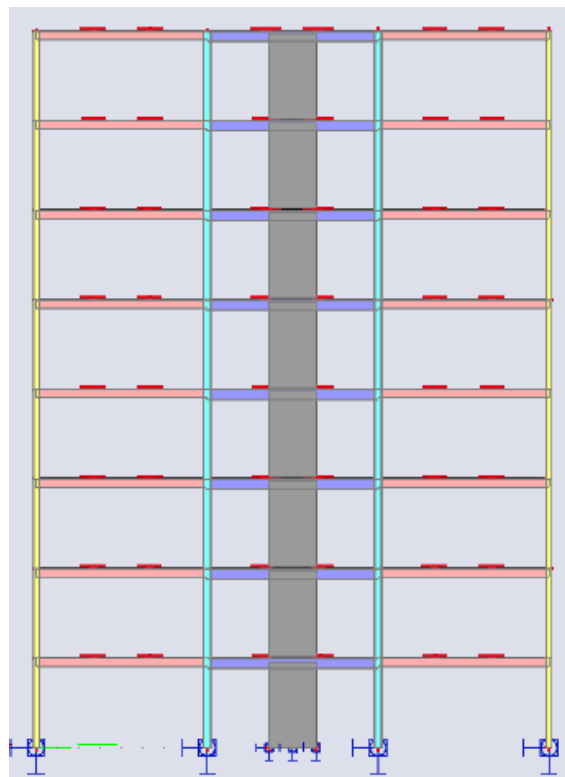
Za proračun konstrukcije korišten je program Scia Engineer. Na slici 4.1 prikazan je 3D model u programu Scia Engineer. Na slikama 4.2 i 4.3 prikazani su X-Z i Y-Z pogledi.



Slika 4.1 3D model



Slika 4.2 Pogled X-Z



Slika 4.3 Pogled Y-Z



## 4.2. Djelovanja na konstrukciju

### 4.2.1. Analiza opterećenja

Karakteristične vrijednosti djelovanja dodatno stalnog opterećenja, snijega i vjetera određena su u točki 2. Analiza opterećenja.

Opterećenja su prikazana u tablici 4.1, a vlastita težina elemenata uzeta je u obzir u programu Scia.

Tablica 4.1 Opterećenja

Name	Description	Action type	Load group	Load type	Spec	Direction	Duration	Master load case
LC1	v. težina	Permanent	LG1	Self weight		-Z		
LC2	dodatno stalno	Permanent	LG1	Standard				
LC3	snijeg	Variable	LG3	Static	Standard		Short	None
LC4	vjetar 1	Variable	LG4	Static	Standard		Short	None
LC7	uporaba	Variable	LG2	Static	Standard		Short	None
SX		Variable	LG5	Dynamic	Seismicity			None
SX_AE	Accidental eccentricity for SX	Variable	SX_AE	Static	Seismic accidental eccentricity		Short	SX
SY		Variable	LG5	Dynamic	Seismicity			None
SY_AE	Accidental eccentricity for SX1	Variable	SX1_AE	Static	Seismic accidental eccentricity		Short	SY
LC8	vjetar 2	Variable	LG4	Static	Standard		Short	None
LC9	vjetar 3	Variable	LG4	Static	Standard		Short	None
LC10	vjetar 4	Variable	LG4	Static	Standard		Short	None
LC11	vjetar 5	Variable	LG4	Static	Standard		Short	None
LC12	vjetar 6	Variable	LG4	Static	Standard		Short	None
LC13	Imperfekcije g - x	Permanent	LG1	Standard				
LC14	imperfekcije q - x	Variable	LG2	Static	Standard		Short	None
LC15	imperfekcije q - y	Variable	LG2	Static	Standard		Short	None
LC16	Imperfekcije g - y	Permanent	LG1	Standard				

### 4.2.2. Imperfekcije okvira

U globalnoj analizi konstrukcije u obzir se uzimaju i globalne imperfekcije okvira u obliku ekvivalentnih geometrijskih imperfekcija. Ekvivalente globalne imperfekcije se zadaju u obliku početnih bočnih pomaka preko početnog kuta rotacije okvira u odnosu na temeljnu stopu stupa. Imperfekcije se mogu uzeti u obzir i preko zatvorenog sustava horizontalnih sila. Primijenit će se postupak preko zatvorenog sustava horizontalnih sila. Ekvivalentne horizontalne sile se računaju množenjem vertikalnog opterećenja kata s inicijalnom imperfekcijom. Ekvivalentne horizontalne sile mogu djelovati u bilo kojem smjeru, ali se u obzir uzimaju u jednom smjeru za svaki slučaj.

Početni kut rotacije u odnosu na stopu stupova jednak je:

$$\Phi = \alpha_h \cdot \alpha_m \cdot \Phi_0$$

4.1

$\alpha_h$  - reduksijski faktor visine h

h - ukupna visina konstrukcije

$\alpha_m$  - reduksijski faktor za broj stupova u redu

m - broj stupova koji idu kroz sve katove po jednoj ravnini

$$\Phi_0 = \frac{1}{200}$$

Redukcijski faktor visine:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ ali } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

Redukcijski faktor broja stupova određen je izrazom () te ovisi o broju stupova u ravnini:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad 4.2$$

Ekvivalentne horizontalne sile dobivaju se množenjem početnog kuta zaokreta i vertikalnog opterećenja kata :

$$\Delta H = \Phi \cdot V \quad 4.3$$

Okvirni sustav s 4 stupova ( m = 4 )

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{33,6}} = 0,345 \leq \frac{2}{3} \rightarrow \alpha_h = \frac{2}{3}$$

Redukcijski faktor broja stupova iznosi:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{4}\right)} = 0,79$$

Pa je početni kut rotacije:

$$\Phi = \alpha_h \cdot \alpha_m \cdot \Phi_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,79 \cdot \frac{1}{200} = 0,0026$$

Zgrada je tlocrtno simetrična pa su ekvivalentne horizontalne sile jednake u oba smjera.

Ekvivalentne horizontalne sile se razmatraju za svaki smjer posebno.

Suma vertikalnih sila na krovnoj etaži:

$$\sum G_{Ed,8} = 1,35 \cdot (4,61 \cdot 576 + 2,1 \cdot 48) = 3721 \text{ kN}$$

$$\sum Q_{Ed,8} = 1,5 \cdot (0,4 \cdot 576 + 1 \cdot 576) = 1210 \text{ kN}$$

Suma vertikalnih sila na karakterističnoj etaži:

$$\sum G_{Ed,1-7} = 1,35 \cdot (3,81 \cdot 576 + 4,2 \cdot 48) = 3235 \text{ kN}$$

$$\sum Q_{Ed,1-7} = 1,5 \cdot 3,8 \cdot 576 = 3283 \text{ kN}$$

Horizontalna sila uslijed imperfekcija za krovnu etažu:

$$\Delta H_{G,8} = \Phi \cdot V_{Ed,8} = 0,0026 \cdot 3721 = 9,67 \text{ kN}$$

$$\Delta H_{Q,8} = \Phi \cdot V_{Ed,8} = 0,0026 \cdot 1210 = 3,15 \text{ kN}$$

Horizontalna sila uslijed imperfekcija za karakterističnu etažu:

$$\Delta H_{G,1-7} = \Phi \cdot V_{Ed,1-7} = 0,0026 \cdot 3235 = 8,41 \text{ kN}$$

$$\Delta H_{Q,1-7} = \Phi \cdot V_{Ed,1-7} = 0,0026 \cdot 3283 = 8,54 \text{ kN}$$

#### 4.2.3. Potresno djelovanje

Potresno djelovanje se određuje prema normi EN 1998. Tijelo državne uprave izdaje seizmološku kartu u kojoj je nacionalni teritorij podijeljen na potresna područja obzirom o lokalnoj opasnosti koja je u svakom području konstanta. Opasnost se opisuje poredbenim vršnim ubrzanjem tla tipa A. Poredbeno vršno ubrzanje tla odgovara povratnom razdoblju  $T_{NCR}$  potresnog djelovanja za zahtjev da ne smije doći do rušenja (vjerojatnost premašaja u 50 godina,  $P_{NCR}$ ).

Prema normi EN 1998 potresno gibanje neke točke na površini prikazuje se elastičnim spektrom ubrzanja odziva temeljnog tla.

Horizontalno potresno djelovanje opisano je s dvije neovisne ortogonalne komponente prikazane istim spektrom odziva.

##### 4.2.3.1. Horizontalni spektar odziva

Horizontalna komponenta proračunskog spektra odziva  $S_d(T)$  određuje se sljedećim izrazima:

$$0 \leq T \leq T_B \quad S_d(T) = a_g \cdot S \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad 4.4$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad 4.5$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad S_d(T) = a_g \cdot S \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \geq \beta \cdot a_g \quad 4.6$$

$$T_D \leq T \leq 4,0 \text{ s} \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \geq \beta \cdot a_g \quad 4.7$$

gdje je:

$S_d(T)$  - horizontalna komponenta proračunskog spektra odziva

$T$  - period vibracija linearnog sustava s jednim stupnjem slobode

$a_g$  - proračunsko ubrzanje tla tipa A

$T_B, T_C$  - granice intervala konstantnog spektralnog ubrzanja

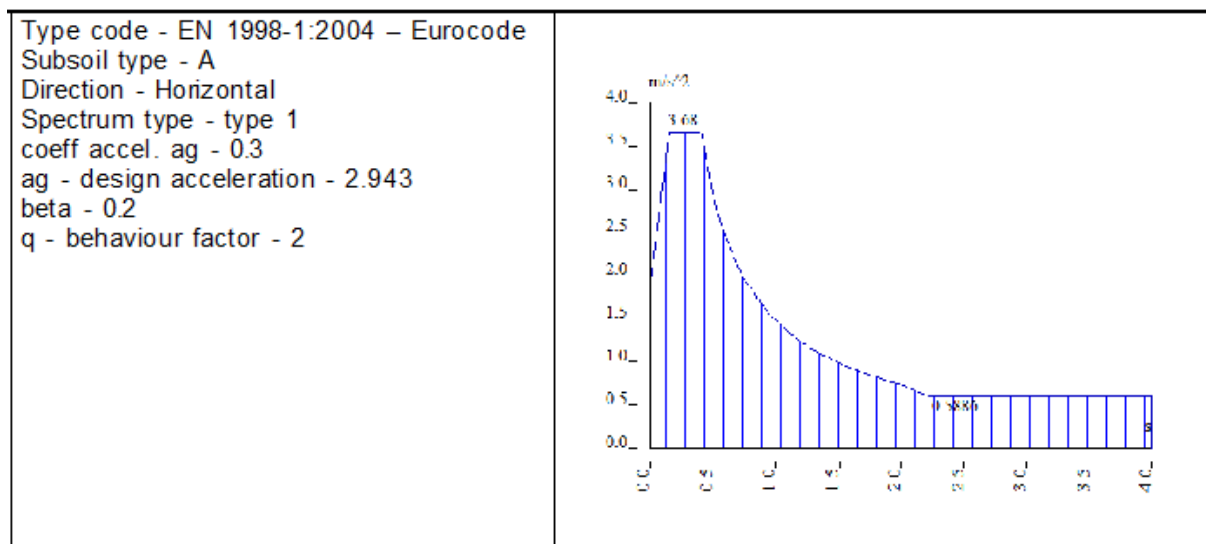
$T_D$  - granica koja definira početak područja spektra s konstantnim pomacima

$S$  - faktor tla

$q$  - faktor ponašanja ovisan o vrsti materijala i tipu konstrukcije

$\beta$  - donji granični faktor horizontalnog proračunskog spektra za koji preporučena vrijednost iznosi 0,2

Primjenjeni proračunski spektar prikazan je na slici 4.4.



Slika 4.4 Proračunski spektar

#### 4.2.3.2. Proračunsko ubrzanje tla

Potresno djelovanje određuje se preko proračunskog ubrzanja tla  $a_g$  koje odgovara povratnom periodu potresa od 475 godina. Za područje u kojem je smještena projektom predviđena građevina vrijedi:  $a_g = 0,30 \cdot g = 0,30 \cdot 9,81 = 2,94 \text{ m/s}^2$

#### 4.2.3.3. Kategorija tla

Prema normi EN 1998 za uzimanje u obzir utjecaja temeljnog tla na potresno djelovanje smije se upotrijebiti tipovi temeljnog tla A, B, C, D i E.

Projektom je predviđeno tlo tipa A odnosno stijena ili ruga geološka formacija poput stijene uključujući najviše 5m slabijeg materijala na površini.

Prosječna brzina širenja posmičnih valova  $v_s > 800$  m/s.

Parametri za kategoriju tla tipa A su sljedeći:

$$S = 1,0$$

$$T_B = 0,15$$

$$T_C = 0,4$$

$$T_D = 2,0$$

#### 4.2.3.4. Faktor važnosti

Građevine se svrstavaju u 4 razreda važnosti ovisno o posljedicama rušenja na ljudske živote, njihovoj važnosti za javnu sigurnost i civilnu zaštitu u razdoblju neposredno nakon potresa te društvenih i ekonomskih posljedica nakon rušenja. Klase važnosti ovise o namjeni građevine. Projektom predviđena građevina prema namjeni pripada klasi II za koju faktor važnosti iznosi  $\gamma_I = 1,0$ .

#### 4.2.3.5. Kriterij pravilnosti

U proračunu na potres konstrukcije zgrada se kategoriziraju kao pravilne ili nepravilne. Obzirom na pravilnost građevine norma EN 1998 propisuje sljedeće:

Model konstrukcije – ravninski ili prostorni

Metodu proračuna – postupak bočnim silama ili modalni proračun

Odabir vrijednosti faktora ponašanja  $q$

Kriteriji pravilnosti građevine u tlocrtu su sljedeći:

- 1) Konstrukcija zgrade, gledajući masu i krutost, mora u tlocrtu biti simetrična s obzirom na dvije ortogonalne osi
- 2) Tlocrtni oblik mora biti kompaktan na način da može biti omeđen poligonalnom konveksnom linijom
- 3) Stropovi moraju biti dovoljno kruti da njihov progib ima mali utjecaj na prijenos sila u vertikalnim elementima
- 4) Za svaki kat, u oba smjera  $x$  i  $y$ , ekscentricitet  $e_0$  mora zadovoljiti uvjete:  $e_{0,x} \leq 0,30 \cdot r_x$  i  $e_{0,y} \leq 0,30 \cdot r_y$

gdje su:

$e_{0,x}, e_{0,y}$  - razmak između centra krutosti i centra masa

$r_x, r_y$  - drugi korijen omjera torzijske i bočne krutosti za svaki smjer

Kriteriji pravilnosti građevine po visini su:

- 1) Sustav otporan na lateralne sile mora biti neprekinut od temelja do vrha zgrade
- 2) Masa i bočna krutost pojedinih katova moraju biti konstantne ili se postepeno smanjuju od podnožja do vrha zgrade
- 3) Kod skeletnih konstrukcija omjer između stvarne otpornosti i otpornosti koja se zahtijeva u analizi ne smije se mijenjati neproporcionalno između susjednih katova
- 4) Ako je zgrada promjenjivog vertikalnog presjeka moraju se poštovati određena ograničenja

Projektom predviđena građevina zadovoljava sve uvjete pravilnosti.

#### 4.2.3.6. Faktor ponašanja

Faktorom ponašanje se uzima u obzir mogućnost konstrukcije da se odupire potresnom djelovanju plastičnim deformiranjem čime se troši seizmička energija. Prema tome, seizmičke sile dobivene pod pretpostavkom da je ponašanje konstrukcije linearno elastično umanjujemo faktorom ponašanja.

U potresnoj analizi odabire se faktor ponašanja  $q = 2,0$  jer će se u daljnjoj analizi metodom postupnog guranja odrediti faktor ponašanja za visoki razred duktilnosti.

#### 4.2.3.7. Slučajni torzijski učinci

Kako bi se uzele u obzir nesigurnosti u položaju masa i prostorne promjene potresnog gibanja, smatra se da je izračunato središte masa svakog kata pomaknuto iz svog početnog položaja u svakom smjeru za slučajni ekscentricitet koji iznosi:

$$e_{ai} = \pm 0,05 \cdot L_i$$

gdje je :

$e_{ai}$  - slučajni ekscentricitet centra mase od svog početnog položaja, uzet na svim stropovima u istom smjeru

$L_i$  - dimenzija stropa okomito na smjer seizmičkog djelovanja

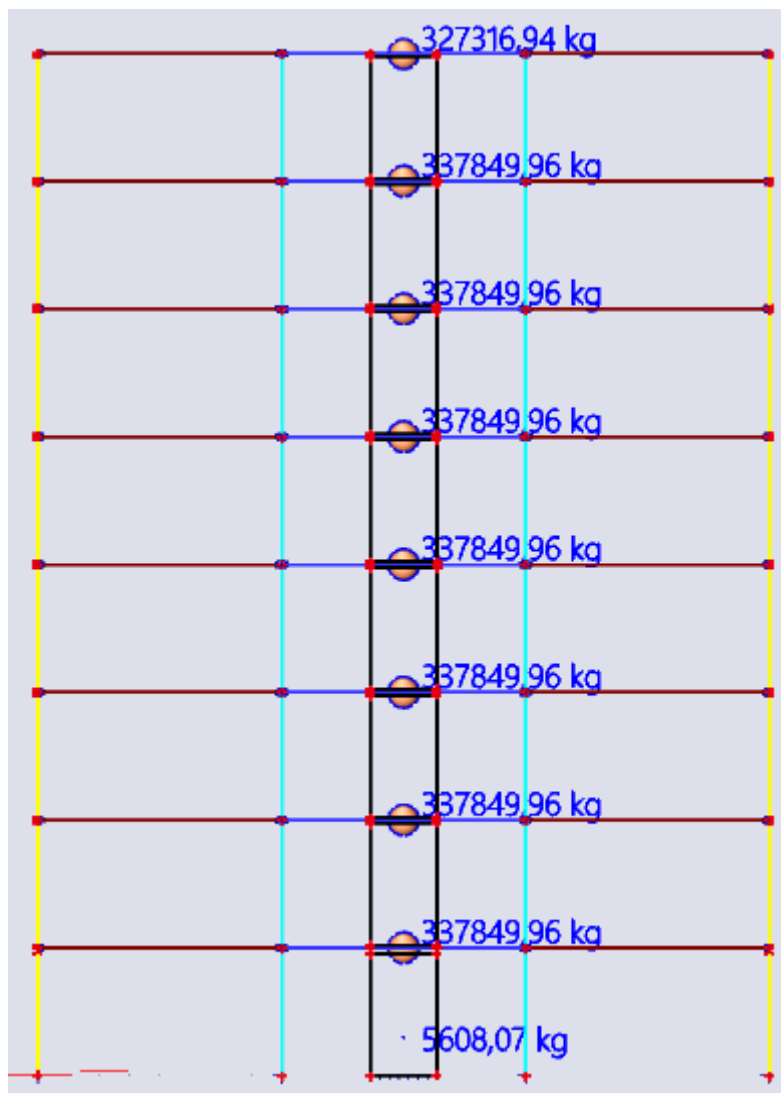
Budući da je građevina tlocrtno kvadratnog oblika te jednolika po visini, ekscentricitet je za oba smjera i za sve katove jednak i iznosi:

$$e_{ai} = \pm 0,05 \cdot L_i = \pm 0,05 \cdot 24,0 = 1,20 \text{ m}$$

Slučajni torzijski učinci zadati će se u software prilikom definiranja potresne analize konstrukcije.

#### 4.2.3.8. Ukupna težina građevine za vrijeme djelovanja potresa

Mase po etažama su prikazane na slici 4.5.



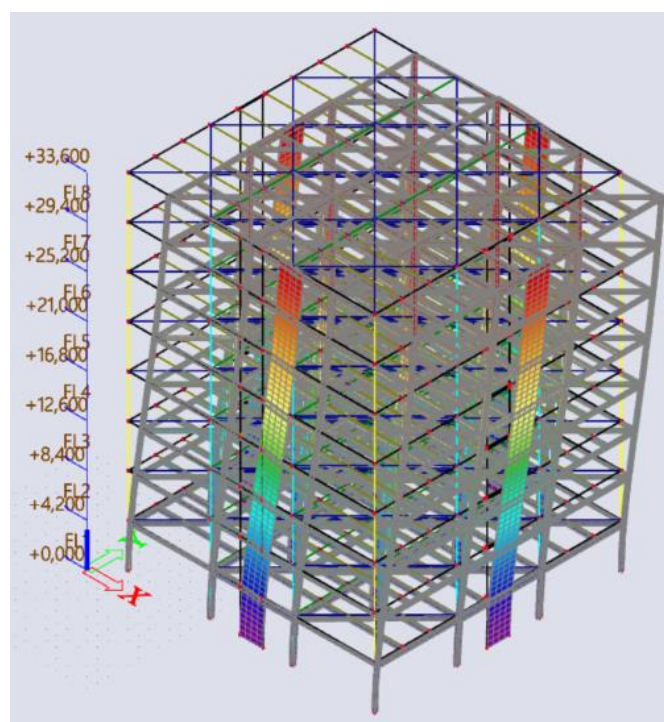
Slika 4.5 Mase po etažama

## 4.2.3.9. Dinamički odgovor

Seizmička analiza provedena je u programu SCIA Engineer. Djelovanje međukatne konstrukcije kao krute dijafragme u proračunskom modelu je simulirano vezovima u svakom polju. Vezovi su modelirani kao apsolutno kruti, bez mase te su isključeni iz prijenosa vertikalnog opterećenja. Time se htjelo postići djelovanje krute dijafragme koja prikuplja i prenosi inercijske sile na vertikalne elemente konstrukcije osiguravajući zajedničko djelovanje konstrukcijskih elemenata pri preuzimanju horizontalnog potresnog djelovanja. U Tablici 4.2. prikazani su podaci o frekvencijama, periodima i aktivacije mase za prvih 10 modova. Prema normi EN 1998 u dva ortogonalna smjera mora biti aktivirano više od 90% mase. U X smjeru aktivirano je 96,11%, a u Y smjeru 95,87% te je uvjet zadovoljen.

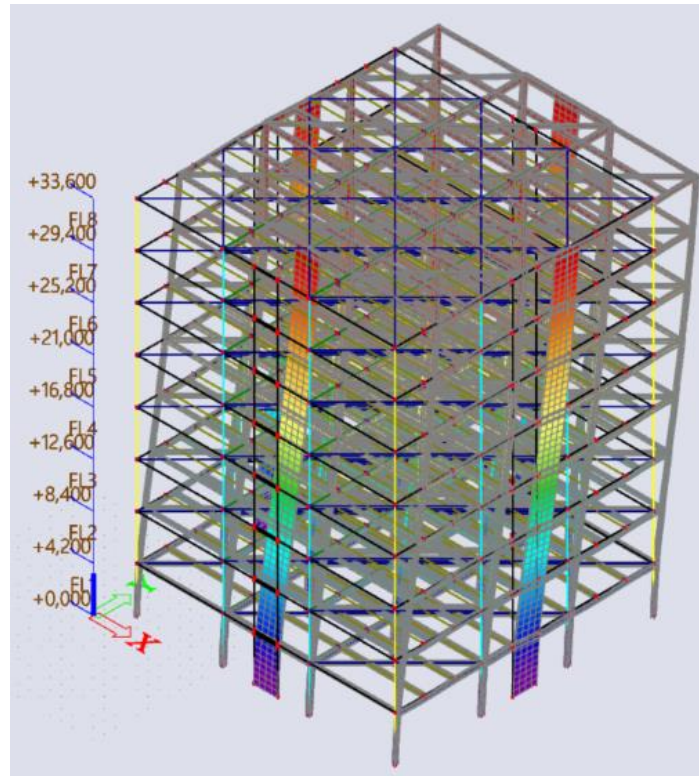
Tablica 4.2 Dinamički odgovor konstrukcije za prvih 10 modova

Mode	omega [rad/s]	Period [s]	Freq. [Hz]	$W_{xi}/W_{xtot}$	$W_{yi}/W_{ytot}$	$W_{zi}/W_{ztot}$	$N_{xi\_R}/W_{xtot\_I}$	$N_{yi\_R}/W_{ytot\_I}$	$N_{zi\_R}/W_{ztot\_F}$
1	3.67331	1,71	0,58	0,7492	0,0000	0,0000	0,0000	0,2498	0,0000
2	3.68876	1,70	0,59	0,0000	0,7595	0,0000	0,2390	0,0000	0,0000
3	4.58738	1,37	0,73	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,7881
4	12.0821	0,52	1,92	0,0000	0,1265	0,0000	0,4547	0,0000	0,0002
5	12.617	0,50	2,01	0,1365	0,0000	0,0000	0,0000	0,4462	0,0000
6	14.38	0,44	2,29	0,0000	0,0004	0,0000	0,0014	0,0000	0,1078
7	22.2146	0,28	3,54	0,0000	0,0418	0,0000	0,0913	0,0000	0,0019
8	24.9562	0,25	3,97	0,0487	0,0000	0,0000	0,0000	0,1051	0,0000
9	25.823	0,24	4,11	0,0000	0,0030	0,0000	0,0063	0,0000	0,0397
10	32.7345	0,19	5,21	0,0000	0,0233	0,0000	0,0675	0,0000	0,0038
11	38.4007	0,16	6,11	0,0000	0,0043	0,0000	0,0141	0,0000	0,0203
12	38.4418	0,16	6,12	0,0268	0,0000	0,0000	0,0000	0,0815	0,0000
				0,9611	0,9587	0,0000	0,8742	0,8826	0,9617

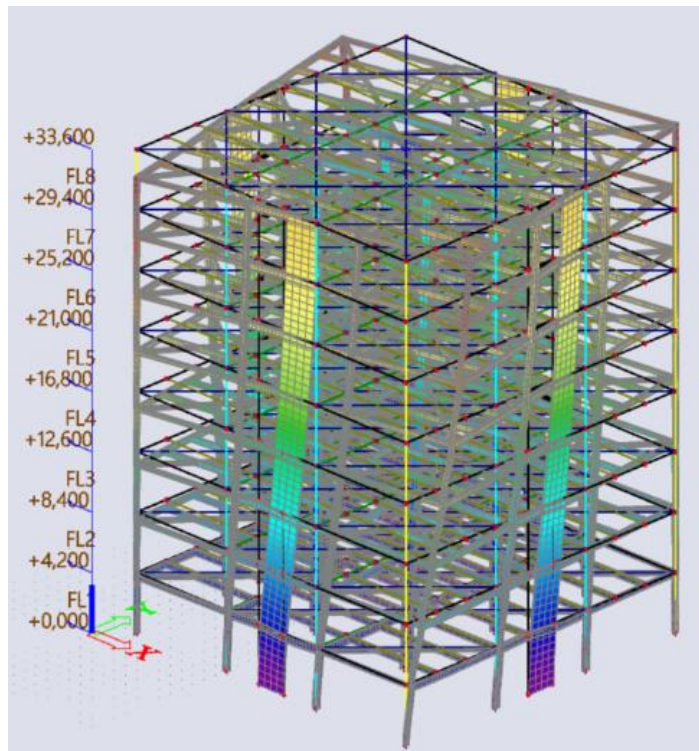


Slika 4.6 1. ton – translacija u X smjeru





Slika 4.7 2. ton – translacija u Y smjeru



Slika 4.8 3. ton - torzija

#### 4.2.4. Kombinacije opterećenja

Kombinacije opterećenja određene su prema normi EN 1990. Promatraju se granično stanje nosivosti (krajnje granično stanje) i granično stanje uporabivosti.

Osnovna kombinacija opterećenja:

$$\sum \gamma_G \cdot G_{k,i} + \gamma_Q \cdot Q_1 + \sum \gamma_Q \cdot \psi_{f_i} \cdot Q_{k,i}$$

Parcijalni faktori za granično stanje nosivosti su:

Stalno opterećenje :  $\gamma_G = 1,35$

Promjenjivo opterećenje :  $\gamma_Q = 1,5$

Koeficijenti kombinacije za kombiniranje više promjenjivih djelovanja u istoj kombinaciji pritom je u svakoj kombinaciji jedno promjenjivo opterećenje vodeće:

Uporabno opterećenje :  $\psi_q = 0,7$

Snijeg :  $\psi_s = 0,5$

Vjetar :  $\psi_w = 0,6$

##### 4.2.4.1. Potresna kombinacija

Kombinacija djelovanja za izvanredne situacije odnosno potres:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad 4.8$$

$G_{k,j}$  - karakteristična vrijednost stalnog djelovanja

$A_{Ed}$  - karakteristična vrijednost seizmičkog djelovanja

$Q_{k,i}$  - karakteristična vrijednost promjenjivog djelovanja

$\psi_{2,i}$  - koeficijenti kombinacije

$\psi_{2,i} = 0,3$  - za uporabno opterećenje uredskih zgrada

$\psi_{2,i} = 0,0$  - ostala promjenjiva djelovanja

Horizontalne sile potresa u X i Y smjeru moraju se uzeti na način da djeluju istovremeno, s tim da je jedan smjer uvijek dominantan. Kombiniraju se tako da je:

$$A_{Ed,x} = E_{Ed,x} + 0,3 \cdot E_{Ed,y} \text{ i } A_{Ed,y} = 0,3 \cdot E_{Ed,x} + E_{Ed,y} \quad 4.9$$

$E_{Ed,x}$  - proračunske vrijednosti seizmičkog djelovanja u smjeru X

$E_{Ed,y}$  - proračunske vrijednosti seizmičkog djelovanja u smjeru Y

Konačne vrijednosti koje će se u ovom slučaju uzeti u obzir su sljedeće:

x smjer:  $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \pm E_{Ed,ai,x} \pm E_{Ed,x} \pm 0,3 \cdot E_{Ed,y} + 0,3 \cdot Q_{k,i}$

y smjer:  $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \pm E_{Ed,ai,y} \pm E_{Ed,y} \pm 0,3 \cdot E_{Ed,x} + 0,3 \cdot Q_{k,i}$

#### 4.2.5. Klasifikacija okvira

Unutarnje sile i momenti se mogu odrediti proračunom prvog reda s početnim oblikom konstrukcije ako sa povećanje momenata i unutarnjih sila uslijed deformiranja konstrukcije može zanemariti.

Uvjet je ispunjen ako je zadovoljen sljedeći kriterij:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} = \left( \frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left( \frac{h}{\delta_{h,Ed}} \right) \geq 10 \quad 4.10$$

Ako je:

$3 < \alpha_{cr} < 10$  učinci 2. reda uzimaju se približnim metodama

$\alpha_{cr} < 3$  primjenjuju egzaktne metode

$F_{cr}$  - elastično kritično opterećenje koje uzrokuje instabilitet uslijed bočne pomičnosti

$F_{Ed}$  - računaska vrijednost ukupne vertikalne reakcije na temelj

$H_{Ed,i}$  - ukupna računaska horizontalna reakcija na dnu i-tog kata

$V_{Ed,i}$  - ukupna računaska vertikalna reakcija na dnu i-tog kata  $h_i$  - visina i-tog kata

$\delta_{h,Ed,i}$  - horizontalni pomak i-tog kata u odnosu na dno i-tog kata

$\alpha_{cr}$  se računa za svaku kombinaciju graničnog stanja nosivosti. Mjerodavna je najmanja vrijednost koja iznosi 16,25 prema tome učinci drugog reda se zanemaruju. Klasifikacija okvira provedena je u software-u SCIA Engineer. Na slici 4.9 je prikazan mjerodavan globalni mod izvijanja

**3D displacement**Values:  $u_z$ 

Stability calculation. Buckling shapes are normalized, so that the maximum nodal displacement

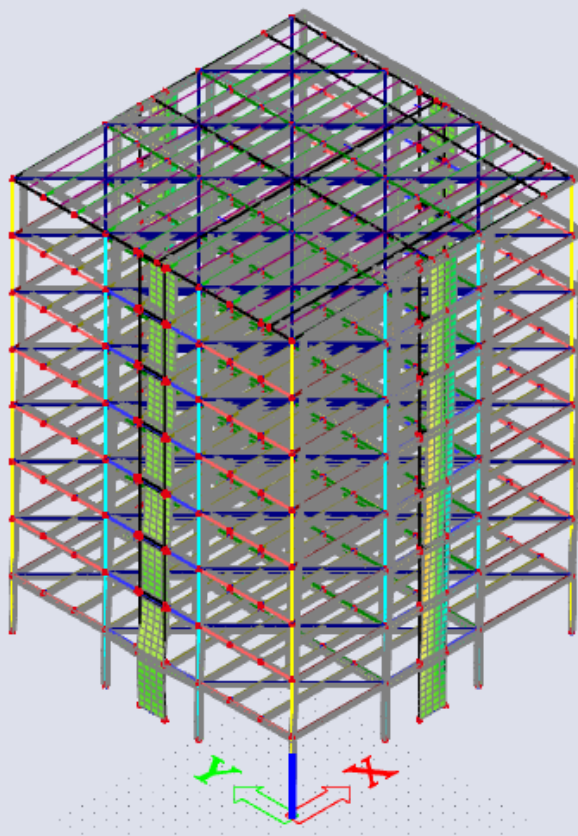
resp. rotation component of each mode is equal to 1m resp. 1rad.

Linear stability combinations: SL4/28 - 16,25

Selection: All

Location: In nodes avg.. System:

Global



Slika 4.9 Globalni mod izvijanja

## 4.2.5.1. Klasifikacija okvira – potres

Učinke drugog reda u potresnoj analizi ne treba uzimati u obzir ako je zadovoljen sljedeći uvjet:

$$\theta = \frac{P_{\text{tot}} \cdot d_r}{V_{\text{tot}} \cdot h} \leq 0,10 \quad 4.11$$

gdje je :

- $\theta$  – koeficijent osjetljivosti za vrijednosti međukatnog pomaka
- $d_r$  – proračunski katni pomak određen kao razlika prosječnih bočnih pomaka na vrhu i pri podnožju promatranog

$P_{tot}$  - ukupno gravitacijsko opterećenje za promatrani kat i katove iznad njega za seizmičku proračunsku situaciju

$V_{tot}$  - ukupna seizmička računsa sila za promatrani kat

$h$  - visina kata

Proračunski pomak se određuje na sljedeći način:

$$d_s = q_d \cdot d_e \quad 4.12$$

Gdje je:

$d_s$  - pomak točke konstrukcijskog sustava prouzročen proračunskim potresnim djelovanjem

$q_d$  - faktor ponašanja za pomak koji se pretpostavlja jednak  $q$

$d_e$  - pomak iste točke konstrukcijskog sustava određene linearnim proračunom utemeljenom na proračunskom spektru odziva

Vrijednosti koeficijenata senzitivnosti prikazane su u tablicama 4.3 i 4.4.

**Tablica 4.3** Ukupna seizmička sila  $V_{tot}$ , gravitacijsko  $P_{tot}$ , pomaci katova  $d_r$  u smjeru osi X te koeficijent senzibilnosti za mjerodavnu proračunsku kombinaciju

KAT	$V_{tot,x}$ [kN]	$P_{tot}$ [kN]	$d_r$ [cm]	$\vartheta$
0	6668.2	28390.18	1.185	0.012012
1	5687.07	24791.95	2.34	0.024288
2	4593.09	21198.17	2.67	0.02934
3	3591.49	17611.28	2.655	0.030998
4	2686.18	14030.59	2.505	0.031153
5	1858.18	10456.06	2.295	0.030748
6	1105.09	6886.66	2.055	0.030491
7	455.47	3332.19	1.77	0.030831

Tablica 4.4 Ukupna seizmička sila  $V_{tot}$ , gravitacijsko  $P_{tot}$ , pomaci katova  $d_r$  u smjeru osi Y te koeficijent senzibilnosti za mjerodavnu proračunsku kombinaciju

KAT	$V_{tot,y}$ [kN]	$P_{tot}$ [kN]	$d_r$ [cm]	$\theta$
0	6334	28390.18	1.26	0.013447
1	5705	24791.95	2.49	0.025764
2	4741	21198.17	2.67	0.028424
3	3767	17611.28	2.64	0.029387
4	2854	14030.59	2.445	0.028619
5	2020	10456.06	2.19	0.026991
6	1266	6886.66	1.935	0.025061
7	657	3332.19	1.68	0.020287

#### 4.2.5.1.1 Međukatni pomak

Međukatni pomak se provjerava za povratni period  $T = 95$  godina. Vrijednosti su prikazane u tablicama 4.5 i 4.6

Tablica 4.5 Međukatni pomak Y smjer

Kat	$h_i$ [m]	$d_{r,i,y}$ [cm]	$d_{r,i}/0.0075h < 1.0$
0	4.2	2.13	0.68
1	4.2	1.93	0.61
2	4.2	2.01	0.64
3	4.2	2.14	0.68
4	4.2	2.14	0.68
5	4.2	1.94	0.62
6	4.2	1.08	0.34
7	4.2	0.12	0.04

Tablica 4.6 Međukatni pomak X smjer

Kat	$h_i$ [m]	$d_{r,i,x}$ [cm]	$d_{r,i}/0.0075h < 1.0$
0	4.2	1.2	0.38
1	4.2	1.38	0.44
2	4.2	1.61	0.51
3	4.2	1.79	0.57
4	4.2	1.87	0.59
5	4.2	1.8	0.57
6	4.2	1.48	0.47
7	4.2	0.57	0.18

## 4.3. Dimenzioniranje

### 4.3.1. Materijal

Za sve nosive elemente se koristi čelik kvalitete S355.

Karakteristike:

Granica popuštanja :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_a} = \frac{355}{1,0} = 355 \text{ N/mm}^2 = 35,5 \text{ kN/cm}^2$$

Čvrstoća:

$$f_u = 510 \text{ N/mm}^2 = 51,0 \text{ kN/cm}^2$$

Modul elastičnosti :

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 = 21000 \text{ kN/cm}^2$$

Poissonov koeficijent :

$$\nu = 0,3$$

Modul posmika :

$$G = 80770 \text{ N/mm}^2 = 8077 \text{ kN/cm}^2$$

Koeficijent  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yk}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

### 4.3.2. Međukatna konstrukcija

Za međukatnu konstrukciju odabrana je konstrukcija Hoesch Additive Floor. Ukupna nosivost ploče jednaka je zbroju nosivosti profiliranog čeličnog lima i nosivosti betona. Princip nosivosti prikazan je na slici 4.10.

Ukupna nosivost jednaka je:

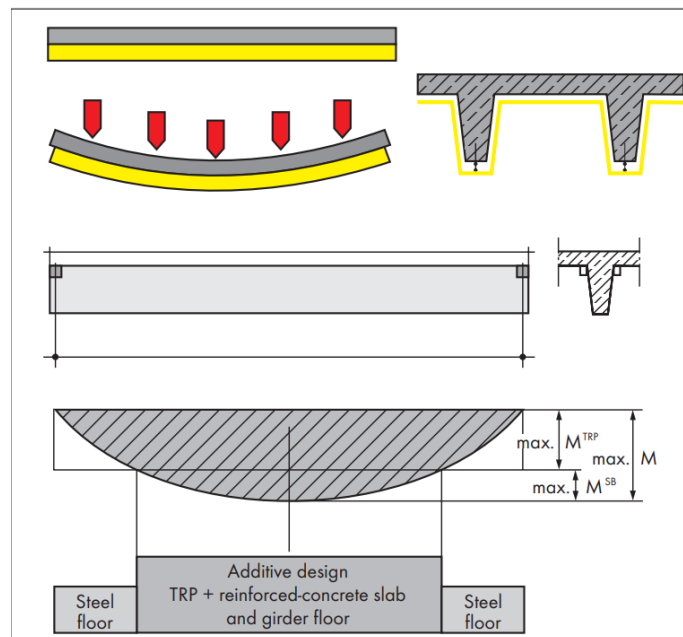
$$M_{Rd} = M_{PT,Rd} + M_{c,Rd}$$

Gdje su:

$M_{Rd}$  - računski otpornost na savijanje ploče u polju

$M_{PT,Rd}$  - računski otpornost na savijanje čeličnog profiliranog lima

$M_{c,Rd}$  - računski otpornost na savijanje sitnorebraste AB ploče



Slika 4.10 Nosivost ploče Hoesch Additive Floore

Princip je takav da se iskorištava puna nosivost profiliranog lima, a beton preuzima ostatak momenta odnosno:

$$M_{c,Rd} = M_{Rd} - M_{PT,Rd}$$



## 4.3.2.1. Statički sustav i poprečni presjek

Trapezni lim se postavlja između sekundarnih i glavnih nosača, na rasponu  $L = 2,67$  m. Na nosače dolazi trapezni lim TRP 200,  $t = 1,0$  mm s betonskom pločom debljine  $h_c = 8$  cm. Karakteristike Hoesch Additive trapeznog lima TRP 200 su sljedeće:

Debljina lima $t_v$ [mm]	= 1,00
Vlastita težina lima $g$ [kN/m <sup>2</sup> ]	= 0,128
Površina poprečnog presjeka $A_{ef}$ [cm <sup>2</sup> /m]	= 7,24
Moment tromosti $I_{ef}$ [cm <sup>4</sup> /m]	= 653
Otpornost na savijanje [kN/m]	= 17,0
Otpornost na posmik jednog nosača lima $A_{k,Rd}$ [kN]	= 17,9

U svakom rebro čeličnog profila se stavlja uzdužna armatura  $1\Phi 8$  s razmakom  $u$  u odnosu na donju pojasnicu trapeznog lima

$$u = c_{nom} + ds / 2 = 50 + 8 / 2 = 54 \text{ mm}$$

Računski raspon ploče  $L$  određuje se prema sljedećem izrazu:

$$L = L_{uk} - (b_{0,1} + b_{0,2}) \cdot 0,5 - 2 \cdot e - 2 \cdot L_k \cdot 0,5$$

$$L = 2,67 - (0,15 + 0,15) \cdot 0,5 \cdot 2 - 2 \cdot 0,005 - 0,05 = 2,46$$

## 4.3.2.2. Materijal

Razred čvrstoće betona LC 30/33

$$f_{ck} = 3,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 \cdot \frac{3,0}{1,5} = 1,7 \text{ kN/cm}^2$$

Armatura B500B

$$f_{yk} = 50,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{vd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,5 \text{ kN/cm}^2$$

Čavli: Hilti X-ENP-19 L15

$$F_{V,Rd} = \frac{F_{V,Rk}}{\gamma_M} = \frac{8}{1,25} = 6,4 \text{ kN}$$

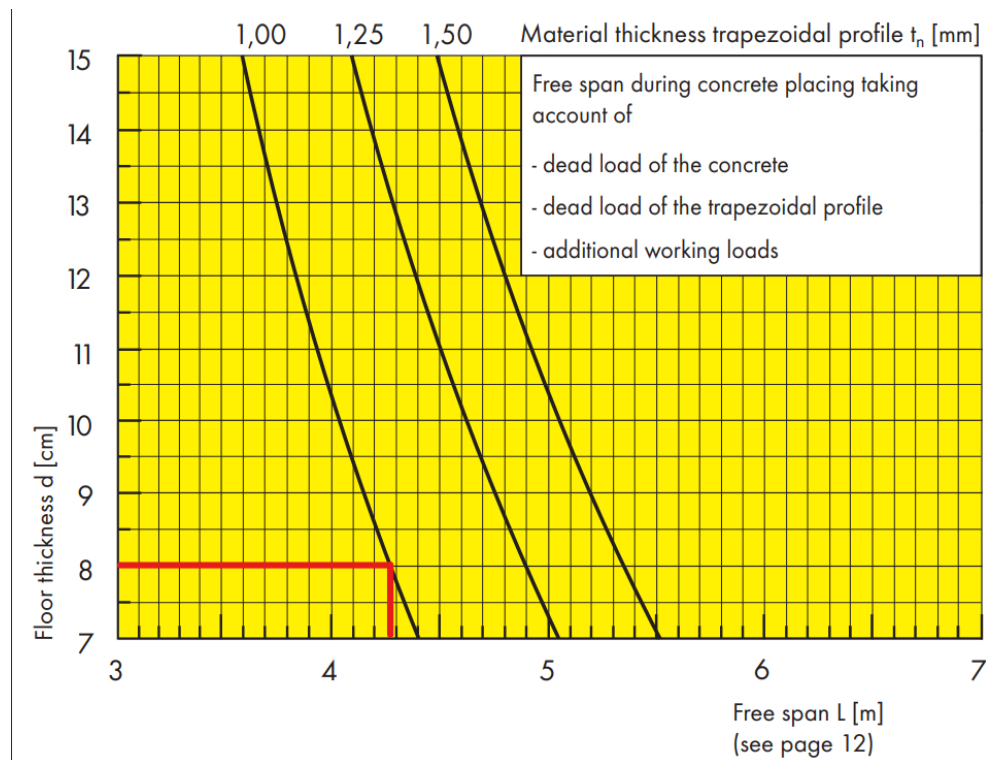
Odabir raspona trapeznog lima bez podupiranja

Ulazni podaci za odabir trapeznog lima:

Odabrana debljina lima: TRP 200,  $t_N = 1,00$  mm

Debljina armiranobetonske ploče:  $h_c = 8,00$  cm

Debljina armirano betonske ploče određuje se prema dijagramu na slici 4.11.



Slika 4.11 Odabir debljine betona za odabrani raspon

Sa slike je očitani najveći mogući raspon bez podupiranja  $L = 4,30$  m

Provjera :  $L/L_{max} = 2,46 / 4,3 = 0,57$  Zadovoljava

#### 4.3.2.3. Krajnje granično stanje – faza izvedbe

Kako se ploča ne podupire prilikom betoniranja, trapezni lim mora nositi vlastitu težinu, težinu svježeg betona i korisno opterećenje od građevinske opreme koja prema propisima iznosi  $q_{1k} = 0,75$  kN/m<sup>2</sup> na površini  $3 \times 2,67$  m<sup>2</sup>.

Vlastita težina trapeznog lima:

$$g_{1,k} = 0,128 \text{ kN/m}^2$$

Vlastita težina svježeg betona:

$$g_{2,k} = 0,87 + h_c \cdot 20,50 = 0,87 + 0,08 \cdot 20,50 = 2,51 \text{ kN/m}^2$$

Računsko stalno opterećenje:

$$g_d = \gamma_G \cdot (g_{1,k} + g_{2,k}) = 1,35 \cdot (0,128 + 2,51) = 3,56 \text{ kN/m}^2$$

Računsko promjenjivo opterećenje:

$$q_{1,d} = \Delta q_d = \gamma_Q \cdot q_{1,k} = 1,5 \cdot 0,75 = 1,13 \text{ kN/m}^2$$

$$e_d = g_d + q_{1,d} = 3,56 + 1,13 = 4,69 \text{ kN/m}^2$$

Učinci djelovanja

$$M_{Ed} = \frac{e_d \cdot L^2}{8} = \frac{4,69 \cdot 2,67^2}{8} = 4,18 \text{ kNm/m}$$

$$V_{Ed} = \frac{e_d \cdot L}{2} = \frac{4,69 \cdot 2,67}{2} = 6,26 \text{ kNm}$$

Sila na odrez po jednom nosaču čelične table:

$$A_{K,Ed} = \frac{0,75 \cdot V_{Ed}}{2}$$

$$A_{K,Ed} = \frac{0,75 \cdot 6,26}{2} = 2,35 \text{ kN}$$

Sila na odrez po jednom čavlu:

$$V_{Ed} = 0,25 \cdot A_{K,Ed} = 0,58 \text{ kN}$$

Otpornost na savijanje

Dokaz otpornosti na savijanje čeličnog profiliranog lima se dokazuje prema izrazu:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{PT,Rd}} \leq 1,0$$

gdje su:

$M_{Ed}$  - računski vrijednost momenta savijanja

$M_{PT,Rd}$  - računski otpornost na savijanje čeličnog profiliranog lima

$$M_{PT,Rd} = \frac{M_{PT,Rk}}{\gamma_M} = \frac{17}{1,1} = 15,45 \text{ kNm/m}$$

Dokaz :

$$\frac{M_{Ed}}{M_{PT,Rd}} = \frac{4,18}{15,45} = 0,27 < 1,0$$

Uvjet zadovoljen

Otpornost na posmik

Računska otpornost na posmik jednog nosača lima AK,Rd prema tablici 6.1 iznosi 17,9 kN pa prema tome dokaz pouzdanosti ma posmik glasi:

$$\frac{A_{K,Ed}}{A_{K,Rd}} = \frac{2,35}{17,9} = 0,13 < 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

Dokaz čavla na odrez Karakteristična otpornost čavla na odrez iznosi:

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rk}}{Y_{M2}} = \frac{8}{1,25} = 6,40 \text{ kN}$$

Dokaz otpornosti čavla na odrez:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{0,58}{6,40} = 0,09 < 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

#### 4.3.2.4. Krajnje granično stanje – konačna faza

Vlastita težina trapeznog lima:

$$g_{1,k} = 0,128 \text{ kN/m}^2$$

Vlastita težina očvrslulog betona:

$$g_{2,k} = 0,83 + hc \cdot 19,50 = 0,83 + 0,08 \cdot 19,50 = 2,39 \text{ kN/m}^2$$

Računsko stalno opterećenje:

$$g_d = \gamma_G \cdot (g_{1,k} + g_{2,k}) = 1,35 \cdot (0,128 + 2,39) = 3,40 \text{ kN/m}^2$$

Računsko promjenjivo opterećenje:

$$q_{1,d} = \Delta q_d = \gamma_Q \cdot q_{1,k} = 1,5 \cdot 3,8 = 5,7 \text{ kN/m}^2$$

Ukupno opterećenje:

$$e_d = g_d + q_{1,d} = 3,40 + 5,7 = 9,1 \text{ kN/m}^2$$

Učinci djelovanja

$$M_{Ed} = \frac{e_d \cdot L^2}{8} = \frac{9,1 \cdot 2,67^2}{8} = 8,11 \text{ kNm/m}$$

$$V_{Ed} = \frac{e_d \cdot L}{2} = \frac{9,1 \cdot 2,67}{2} = 12,15 \text{ kNm}$$

Sila na odrez po jednom nosaču čelične table:

$$A_{K,Ed} = \frac{0,75 \cdot V_{Ed}}{2}$$

$$A_{K,Ed} = \frac{0,75 \cdot 12,15}{2} = 4,56 \text{ kN}$$

Sila na odrez po jednom čavlu:

$$V_{Ed} = 0,25 \cdot A_{K,Ed} = 1,14 \text{ kN}$$

Otpornost na savijanje Preuzimanje momenta savijanja se odvija preko oba dijela - trapeznog lima i AB rebraste ploče. U blizini ležajeva lim preuzima cijeli iznos opterećenja.

Dokaz otpornosti na savijanje:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} < 1,0$$

$$M_{Rd} = M_{PT,Rd} + M_{c,Rd}$$

Gdje su:

$M_{Rd}$  - računski otpornost na savijanje ploče u polju

$M_{PT,Rd}$  - računski otpornost na savijanje čeličnog profiliranog lima

$M_{c,Rd}$  - računski otpornost na savijanje sitnorebraste AB ploče

$$M_{PT,Rd} = \frac{M_{PT,Rk}}{\gamma_M} = \frac{17}{1,1} = 15,45 \text{ kNm/m}$$

Potrebni  $M_{c,Rd}$ :

$$M_{c,Rd} = M_{Ed} - M_{PT,Rd} = 8,11 - 15,45 = -7,34 \text{ kNm/m}$$

Cijeli moment savijanja preuzima čelični lim.

#### 4.3.3. Zglobno oslonjeni nosač (A2-B2)

Preliminarno odabrani nosač IPE 330 ne zadovoljava GSU jer je maksimalni progib za mjerodavnu kombinaciju  $1.0(G+dG) + 1.0Q$ :

$$\delta = 4,5 \text{ cm} > L / 250 = 800 / 250 = 3,2 \text{ cm}$$

Odabrani profil je IPE 400.

**Karakteristike poprečnog presjeka : IPE400**

Površina poprečnog presjeka:	: $A = 96,39 \text{ cm}^2$
Visina presjeka	: $h = 400 \text{ mm}$
Širina pojasnice:	: $b = 180 \text{ mm}$
Debljina hrpta	: $t_w = 8,6 \text{ mm}$
Debljina pojasnice	: $t_f = 13,5 \text{ mm}$
Radijus zaobljenja	: $r = 21 \text{ mm}$
Torzijska konstanta	: $I_t = 51,08 \text{ cm}^4$
Konstanta krivljenja	: $I_w = 490\,000 \text{ cm}^6$
Moment tromosti	: $I_y = 23\,130 \text{ cm}^4$ ; $I_z = 1\,318 \text{ cm}^4$
Moment otpora	: $W_y = 1\,156 \text{ cm}^3$ ; $W_z = 146,40 \text{ cm}^3$
Plastični moment otpora	: $W_{pl,y} = 1\,307 \text{ cm}^3$ ; $W_{pl,z} = 229 \text{ cm}^3$

**Klasifikacija poprečnog presjeka**

Pojasnica

$$\frac{c}{t_f} = \frac{\frac{b-t_w-2\cdot r}{2}}{t_f} = \frac{\frac{180-8,6-2\cdot 21}{2}}{13,5} = 4,79 < 9\cdot \varepsilon = 9\cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klasa 1.

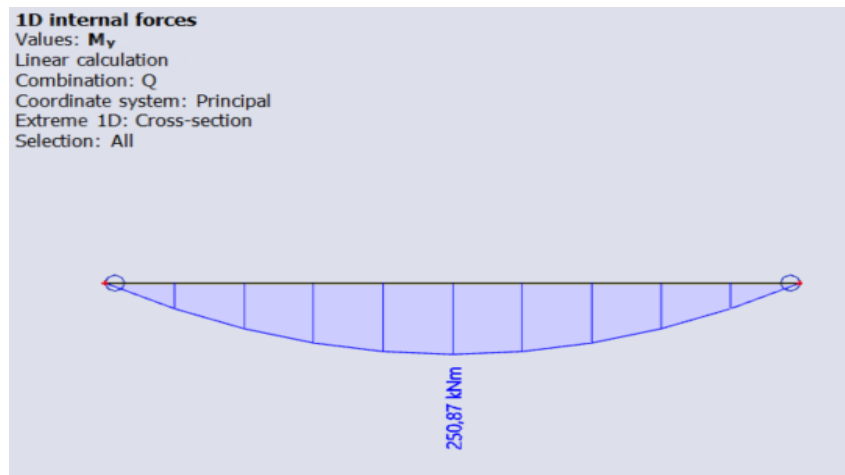
Hrbat

$$\frac{c}{t_w} = \frac{h-2\cdot t_f-2\cdot r}{t_w} = \frac{400-2\cdot 13,5-2\cdot 21}{8,6} = 38,48 < 72\cdot \varepsilon = 72\cdot 0,81 = 58,32$$

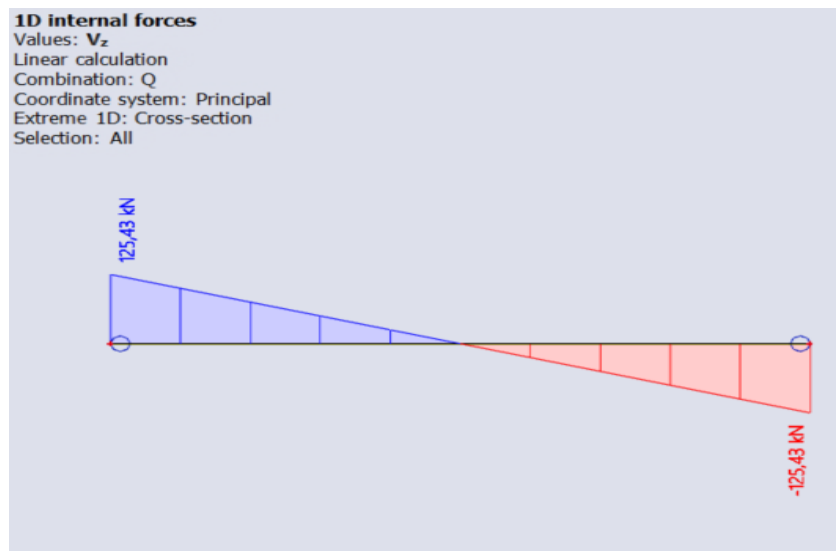
Hrbat je klasa 1.

Poprečni presjek je klasa 1 pa je mjerodavna plastična otpornost.

## Unutarnje sile i momenti



Slika 4.12 Mjerodavna vrijednost momenta savijanja nosač A2-B2



Slika 4.13 Mjerodavna vrijednost poprečne sile A2-B2

Otpornost poprečnog presjeka

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1\,307 \cdot 35,5}{1,0} = 46\,399 \text{ kNcm} = 464 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{251}{464} = 0,54 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

## Otpornost poprečnog presjeka na posmik

Provjera izbočavanja hrpta na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} ; \varepsilon = 0,81 \quad \eta = 1,2$$

$$H_w = h - 2t_f = 400 - 2 \cdot 13,5 = 373 \text{ mm}$$

$$\frac{373}{8,6} = 43,37 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik.

Plastična posmična otpornost

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_{v,z} = 96,39 - 2 \cdot 18 \cdot 1,35 + (0,86 + 2 \cdot 2,1) \cdot 1,35 \geq 1,2 \cdot 37,3 \cdot 0,86$$

$$A_{v,z} = 54,62 \text{ cm}^2 > 38,49 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left( \frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = \frac{54,62 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 1119 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{125}{1119} = 0,11$$

Uvjet zadovoljen.

$$V_{z,Ed} < 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$$

$$125 < 0,5 \cdot 1119 = 559 \text{ kN}$$

Nema redukcije granice popuštanja zbog posmika.

## Otpornost elementa

Sekundarni nosači su statičkog sustava proste grede i za sve kombinacije opterećeni su pozitivnim momentom savijanja. Gornja pojasnica je pridržana međukatnom konstrukcijom stoga nema opasnosti od bočno-torzijskog izvijanja.

## GSU

Mjerodavna kombinacija opterećenja za granično stanje uporabivosti je  $1.0(G+dG) + 1.0Q$ . Najveći progib iznosi  $\delta = 2,36 \text{ cm}$ . Da bi nosač zadovoljio granično stanje uporabivosti, mora vrijediti sljedeći uvjet:  $\delta = 2,36 \text{ cm} < L / 250 = 800 / 250 = 3,2 \text{ cm}$



#### 4.3.4. Zglobno oslonjeni nosač (A1-B1)

Preliminarno odabrani nosač IPE 300 ne zadovoljava GSU jer je maksimalni progib za mjerodavnu kombinaciju  $1.0(G+dG) + 1.0Q$ :

$$\delta = 3,9 \text{ cm} > L / 250 = 800 / 250 = 3,2 \text{ cm}$$

Odabrani profil je IPE 330.

##### Karakteristike poprečnog presjeka : IPE330

Površina poprečnog presjeka: :  $A = 62,61 \text{ cm}^2$

Visina presjeka :  $h = 330 \text{ mm}$

Širina pojasnice: :  $b = 160 \text{ mm}$

Debljina hrpta :  $t_w = 7,5 \text{ mm}$

Debljina pojasnice :  $t_f = 11,5 \text{ mm}$

Radius zaobljenja :  $r = 18 \text{ mm}$

Torzijska konstanta :  $I_t = 128,15 \text{ cm}^4$

Konstanta krivljenja :  $I_w = 196\,090 \text{ cm}^6$

Moment tromosti :  $I_y = 11\,700 \text{ cm}^4$ ;  $I_z = 788,10 \text{ cm}^4$

Moment otpora :  $W_y = 713,10 \text{ cm}^3$ ;  $W_z = 98,52 \text{ cm}^3$

Plastični moment otpora :  $W_{pl,y} = 804,30 \text{ cm}^3$ ;  $W_{pl,z} = 153,70 \text{ cm}^3$

##### Klasifikacija poprečnog presjeka

Pojasnica

$$\frac{c}{t_f} = \frac{\frac{b-t_w-2\cdot r}{2}}{t_f} = \frac{\frac{160-7,5-2\cdot 18}{2}}{11,5} = 5,07 < 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klasa 1.

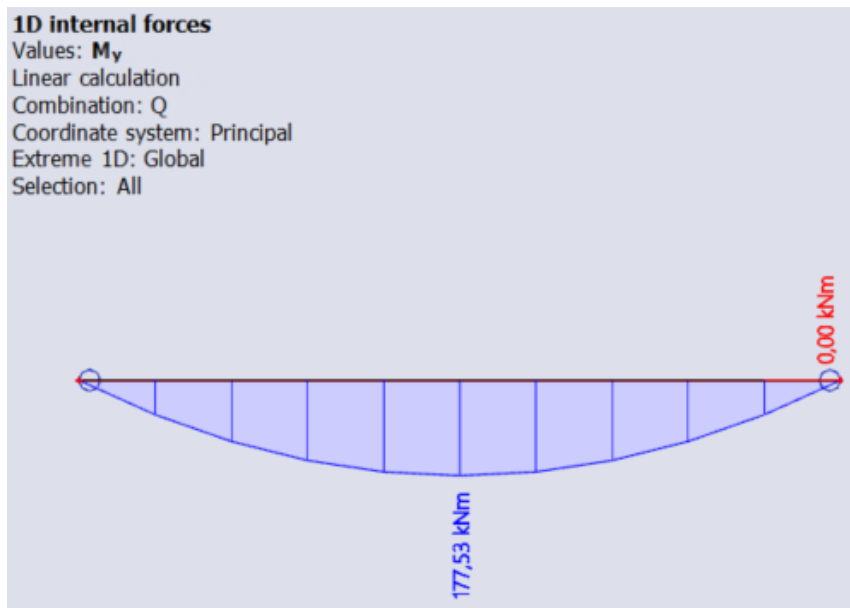
Hrbat

$$\frac{c}{t_w} = \frac{h-2\cdot t_f-2\cdot r}{t_w} = \frac{330-2\cdot 11,5-2\cdot 18}{7,5} = 36,13 < 72 \cdot \varepsilon = 72 \cdot 0,81 = 58,32$$

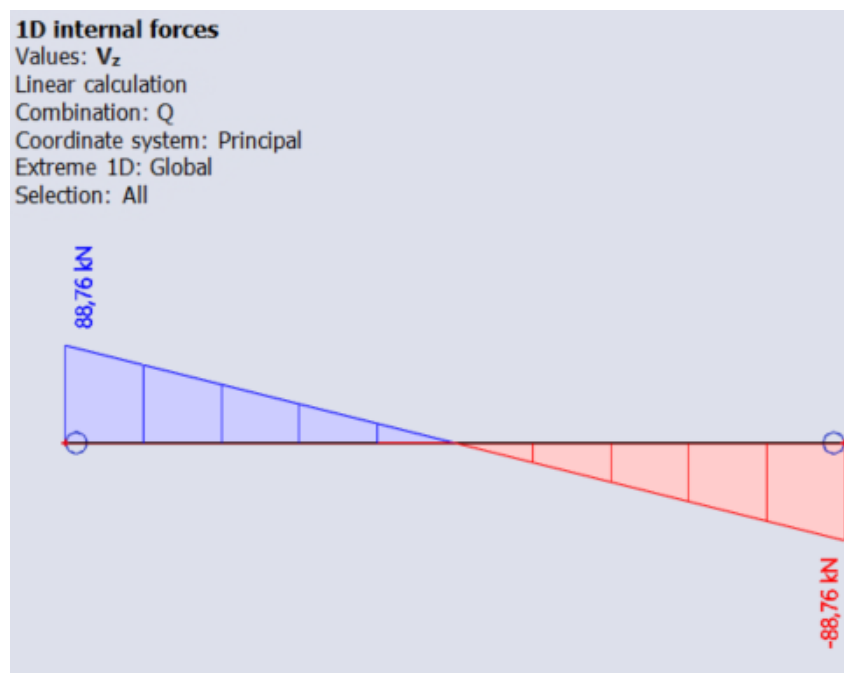
Hrbat je klasa 1.

Poprečni presjek je klasa 1 pa je mjerodavna plastična otpornost.

## Unutarnje sile i momenti



Slika 4.14 Mjerodavna vrijednost momenta savijanja A1-B1



Slika 4.15 Mjerodavna vrijednost poprečne sile A1-B1

Otpornost poprečnog presjeka

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{804,3 \cdot 35,5}{1,0} = 28\,552 \text{ kNcm} = 285 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{178}{285} = 0,80 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

### Otpornost poprečnog presjeka na posmik

Provjera izbočavanja hrpta na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}; \quad \varepsilon = 0,81 \quad \eta = 1,2$$

$$h_w = h - 2t_f = 330 - 2 \cdot 11,5 = 307 \text{ mm}$$

$$\frac{307}{7,5} = 40,93 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik.

Plastična posmična otpornost

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_{v,z} = 62,61 - 2 \cdot 16 \cdot 1,15 + (0,75 + 2 \cdot 1,8) \cdot 1,15 \geq 1,2 \cdot 30,7 \cdot 0,75$$

$$A_{v,z} = 30,81 \text{ cm}^2 > 27,63 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{30,81 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 631 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{89}{631} = 0,14$$

Uvjet zadovoljen.

$$V_{z,Ed} < 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$$

$$89 < 0,5 \cdot 631 = 315 \text{ kN}$$

Nema redukcije granice popuštanja zbog posmika.

## Otpornost elementa

Sekundarni nosači su statičkog sustava proste grede i za sve kombinacije opterećeni su pozitivnim momentom savijanja. Gornja pojasnica je pridržana međukatnom konstrukcijom stoga nema opasnosti od bočno-torzijskog izvijanja.

### GSU

Mjerodavna kombinacija opterećenja za granično stanje uporabivosti je  $1.0(G+dG) + 1.0Q$ . Najveći progib iznosi  $\delta = 2,36$  cm. Da bi nosač zadovoljio granično stanje uporabivosti, mora vrijediti sljedeći uvjet:

$$\delta = 3,2 \text{ cm} < L / 250 = 800 / 250 = 3,2 \text{ cm}$$

### 4.3.5. Zglobno oslonjeni nosač (B1-B4)

Mjerodavna kombinacija: GSN  $1,35G + 1,5Q$ . Preliminarno odabrani profil IPE 500 na zadovoljava provjeru GSN pa se odabire IPE 550.

#### Karakteristike poprečnog presjeka : IPE 550

Površina poprečnog presjeka:	: $A = 134,40 \text{ cm}^2$
Visina presjeka	: $h = 550 \text{ mm}$
Širina pojasnice:	: $b = 210 \text{ mm}$
Debljina hrpta	: $t_w = 11,1 \text{ mm}$
Debljina pojasnice	: $t_f = 17,2 \text{ mm}$
Radius zaobljenja	: $r = 24 \text{ mm}$
Torzijska konstanta	: $I_t = 121,70 \text{ cm}^4$
Konstanta krivljenja	: $I_w = 1\,861\,500 \text{ cm}^6$
Moment tromosti	: $I_y = 67\,116 \text{ cm}^4$ ; $I_z = 2\,668 \text{ cm}^4$
Moment otpora	: $W_y = 2\,441 \text{ cm}^3$ ; $W_z = 254,10 \text{ cm}^3$
Plastični moment otpora	: $W_{pl,y} = 2\,787 \text{ cm}^3$ ; $W_{pl,z} = 400,54 \text{ cm}^3$

#### Klasifikacija poprečnog presjeka

Pojasnica

$$\frac{c}{t_f} = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{t_f} = \frac{210 - 11,1 - 2 \cdot 24}{17,2} = 4,38 < 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klasa 1.

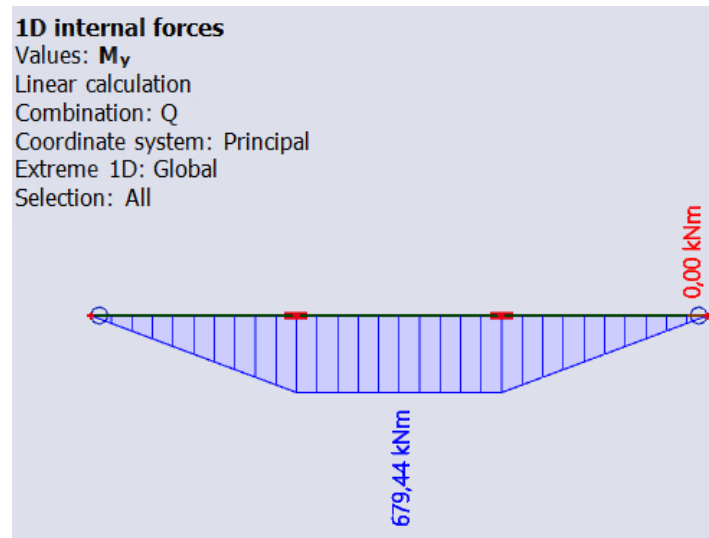
Hrbat

$$\frac{c}{t_w} = \frac{h-2\cdot t_f-2\cdot r}{t_w} = \frac{550-2\cdot 17,2-2\cdot 24}{11,1} = 42,13 < 72\cdot \varepsilon = 72\cdot 0,81 = 58,32$$

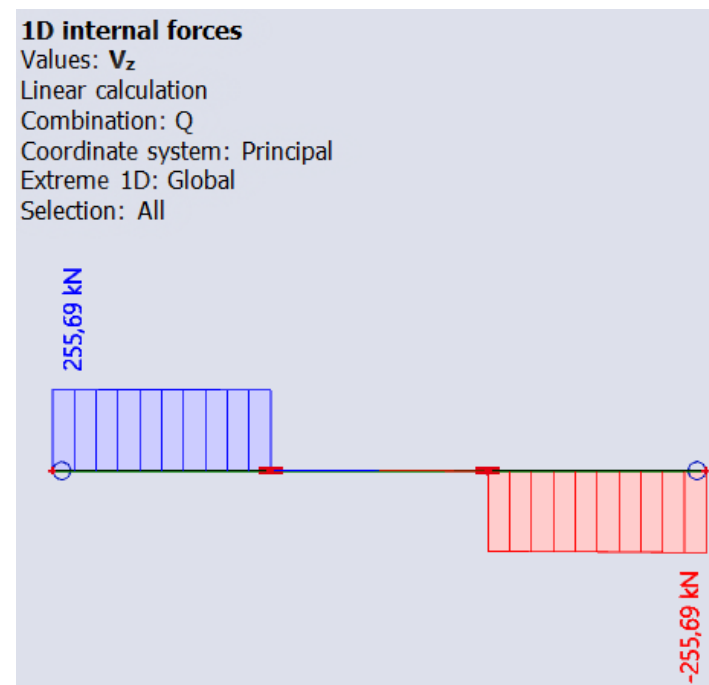
Hrbat je klasa 1.

Poprečni presjek je klasa 1 pa je mjerodavna plastična otpornost.

Unutarnje sile i momenti



Slika 4.16 Mjerodavna vrijednost momenta savijanja B1-B4



Slika 4.17 Mjerodavna vrijednost poprečne sile B1-B4

**Otpornost poprečnog presjeka****Otpornost poprečnog presjeka na savijanje**

$$M_{y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2787 \cdot 35,5}{1,0} = 98\,939 \text{ kNcm} = 989 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{680}{989} = 0,69 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

**Otpornost poprečnog presjeka na posmik**

Provjera izbočavanja hrpta na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}; \quad \varepsilon = 0,81 \quad \eta = 1,2$$

$$H_w = h - 2t_f = 550 - 2 \cdot 17,2 = 515,6 \text{ mm}$$

$$\frac{515,6}{11,1} = 46,45 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik.

Plastična posmična otpornost

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_{v,z} = 134,40 - 2 \cdot 21 \cdot 1,72 + (1,11 + 2 \cdot 2,4) \cdot 1,72 \geq 1,2 \cdot 51,56 \cdot 1,11$$

$$A_{v,z} = 72,33 \text{ cm}^2 > 68,67 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{72,33 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 1482 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{256}{1482} = 0,17$$

Uvjet zadovoljen.

$$V_{z,Ed} < 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$$

$$256 < 0,5 \cdot 1482 = 741 \text{ kN}$$

Nema redukcije granice popuštanja zbog posmika.

### Otpornost elementa na savijanje

Nosač je pridržan u trećinama raspona pa je  $L_{cr} = 267 \text{ cm}$ .

Određivanje faktora  $C_1$

$$\Psi = \frac{680}{680} = 1$$

$$C_1 = 1,0$$

$$L_{cr} = 267 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} \right]$$

$$M_{cr} = 1,0 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 2668}{267^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{1\,861\,500}{2\,668} + \frac{267^2 \cdot 8\,077 \cdot 121,70}{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 2668}} \right] = 231522 \text{ kNcm}$$

$$M_{cr} = 2\,315 \text{ kNm}$$

Bezdimenzionalna vitkost

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2787 \cdot 35,5}{231522}} = 0,65$$

U normi 1993-1-1 u tablicama 6.3 i 6.4 dane su krivulje bočno torzijskog izvijanja i pripadne vrijednosti faktora imperfekcije ovisno o vrsti profila i odnosu njegove visine i širine pa je tako za:

$$h/b = 550/210 = 2,62 > 2,0 \text{ i valjane I presjeke mjerodavna krivulja izvijanja b}$$

za koju vrijedi:  $\alpha_{LT} = 0,34$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,34 \cdot (0,65 - 0,2) + 0,65^2 \right] = 0,787$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,787 + \sqrt{0,787^2 - 0,65^2}} = 0,81 < 1$$

Računska otpornost

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,81 \cdot \frac{2787 \cdot 35,5}{1,1} = 72\,854 \text{ kNcm} = 728 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{680}{728} = 0,93 \leq 1,0$$

GSU

Mjerodavna kombinacija opterećenja za granično stanje uporabivosti je  $1.0(G+dG) + 1.0Q$ . Najveći progib iznosi  $\delta = 2,3$  cm. Da bi nosač zadovoljio granično stanje uporabivosti, mora vrijediti sljedeći uvjet:

$$\delta = 2,3 \text{ cm} < L / 250 = 800 / 250 = 3,2 \text{ cm}$$

#### 4.3.6. Okvir s posmičnim zidom (A4-A7)

Kao duktilna područja se predviđaju posmični zidovi. Prema tome nosači i stupovi trebaju ostati u elastičnom području. Stoga će se nosači i stupovi provjeriti na tlak uzevši u obzir najnepovoljniju kombinaciju uzdužne sile. U provjeri  $N_{Ed}$  treba računati prema izrazu:

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot N_{Ed,E} \quad 4.13$$

Promatrani sustav nije pokriven normom pa će se pretpostaviti da je  $\Omega = 2$ .

$N_{Ed,G}$  – tlačna sila u stupu za nepotresno djelovanje koja se uzima u kombinaciji djelovanja pri potresnoj proračunskoj situaciji

$N_{Ed,E}$  – tlačna sila u stupu u potresnoj proračunskoj situaciji

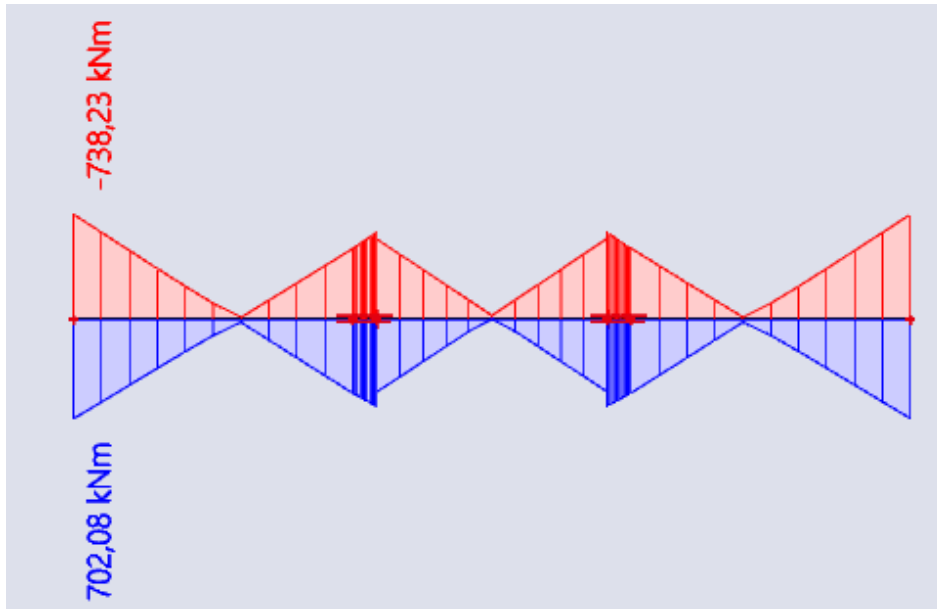
$\gamma_{ov}$  – koeficijent povećane čvrstoće preporučene vrijednosti 1,25



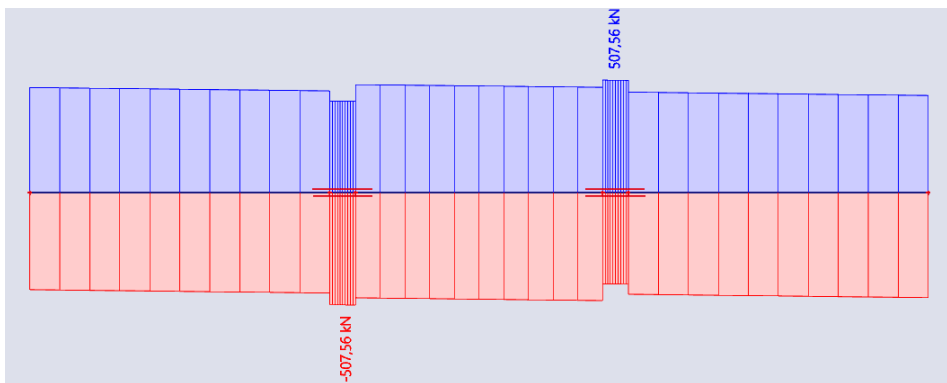
### 4.3.7. Okvir A4-A7

#### 4.3.7.1. Nosač

Unutarnje sile i momenti



Slika 4.18 Mjerodavna vrijednost momenta savijanja za nosač okvira A4-A7



Slika 4.19 Mjerodavna vrijednost poprečne sile za nosač okvira A4-A7

Proračunska uzdužna sila je:

$$N_{Ed,G} = 59,74 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,E} = 155,45 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot N_{Ed,E} = 59,74 + 1,1 \cdot 1,25 \cdot 155,45 = 487 \text{ kN}$$

**Karakteristike poprečnog presjeka : HEA 500**

Površina poprečnog presjeka:	: $A = 197,5 \text{ cm}^2$
Visina presjeka	: $h = 490 \text{ mm}$
Širina pojasnice:	: $b = 300 \text{ mm}$
Debljina hrpta	: $t_w = 12 \text{ mm}$
Debljina pojasnice	: $t_f = 23 \text{ mm}$
Radius zaobljenja	: $r = 27 \text{ mm}$
Torzijska konstanta	: $I_t = 309,3 \text{ cm}^4$
Konstanta krivljenja	: $I_w = 5643000 \text{ cm}^6$
Moment tromosti	: $I_y = 86970 \text{ cm}^4$ ; $I_z = 10370 \text{ cm}^4$
Moment otpora	: $W_y = 3550 \text{ cm}^3$ ; $W_z = 691,1 \text{ cm}^3$
Plastični moment otpora	: $W_{pl,y} = 3949 \text{ cm}^3$ ; $W_{pl,z} = 1059 \text{ cm}^3$

**Klasifikacija poprečnog presjeka**

Pojasnica

$$\frac{c}{t_f} = \frac{\frac{b-t_w-2\cdot r}{2}}{t_f} = \frac{\frac{300-12-2\cdot 27}{2}}{23} = 5,09 < 9\cdot \varepsilon = 9\cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klasa 1.

Hrpat (tlak i savijanje)

$$a = \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{2 \cdot t_w \cdot f_y} = \frac{487 \cdot 1,0}{2 \cdot 12 \cdot 35,5} = 5,72 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{1}{c} \cdot \left( \frac{c}{2} + a \right) = \frac{1}{390} \cdot \left( \frac{390}{2} + 57,2 \right) = 0,65 \leq 1$$

$$\frac{c}{t_w} = \frac{h-2\cdot t_f-2\cdot r}{t_w} = \frac{490-2\cdot 23-2\cdot 27}{12} = 32,5 \leq \frac{396\cdot \varepsilon}{13\cdot \alpha - 1} = \frac{396\cdot 0,81}{13\cdot 0,65 - 1} = 43,06$$

Hrpat je klasa 1.

Poprečni presjek je klasa 1 pa je mjerodavna plastična otpornost.

**Otpornost poprečnog presjeka**

Otpornost poprečnog presjeka na tlačnu silu

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{197,5 \cdot 35,5}{1,0} = 7011 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{487}{7011} = 0,07 < 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

**Otpornost poprečnog presjeka na savijanje**

$$M_{y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3949 \cdot 35,5}{1,0} = 140189 \text{ kNcm} = 1401 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{738}{1401} = 0,52 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

**Otpornost poprečnog presjeka na posmik**

Provjera izbočavanja hrpta na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}; \quad \varepsilon = 0,81 \quad \eta = 1,2$$

$$h_w = h - 2t_f = 490 - 2 \cdot 23 = 444 \text{ mm}$$

$$\frac{444}{12} = 37 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik.

Plastična posmična otpornost

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_{v,z} = 197,5 - 2 \cdot 30 \cdot 2,3 + (1,2 + 2 \cdot 2,7) \cdot 2,3 \geq 1,2 \cdot 44,4 \cdot 1,2$$

$$A_{v,z} = 74,68 \text{ cm}^2 > 63,94 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{74,6 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 1530 \text{ N}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{509}{1530} = 0,33$$

Uvjet zadovoljen.

Interakcija M-V-N

Nema redukcije otpornosti na savijanje ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$$

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{pl,Rd}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

508 kN < 765 kN - nema redukcije zbog poprečne sile

$$487 \text{ kN} \leq 0,25 \cdot 7011 = 1752 \text{ kN}$$

487 kN ≤ 0,5 · 44,4 · 1,2 · 35,5/1,0 = 945 kN - nema redukcije plastične otpornosti zbog uzdužne sile

### Otpornost elementa

Otpornost elementa na izvijanje

Efektivna duljina izvijanja nosača

Posmični zid je širine 2,2 m, raspon nosača je 8,00 m pa su duljine izvijanja:

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 299 \text{ cm}$$

Eulerova kritična sila:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 86970}{299^2} = 201\,625 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 10370}{299^2} = 24\,041 \text{ kN}$$

Svedena vitkost:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{35,5 \cdot 197,5}{201\,625}} = 0,19$$

$\bar{\lambda}_y < 0,2 \rightarrow \chi = 1,0$  Nema redukcije otpornosti.

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{35,5 \cdot 197,5}{24\,041}} = 0,54$$

- za os z-z linija izvijanja je b, faktor imperfekcije  $\alpha = 0,34$

$$\Phi_z = 0,5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5[1 + 0,34 \cdot (0,54 - 0,2) + 0,54^2] = 0,70$$

Faktor redukcije  $\chi_z$ :

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,70 + \sqrt{0,70^2 - 0,54^2}} = 0,877$$

Računska otpornost

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,877 \cdot \frac{197,5 \cdot 35,5}{1,1} = 5545 \text{ kN}$$

Uvjet:

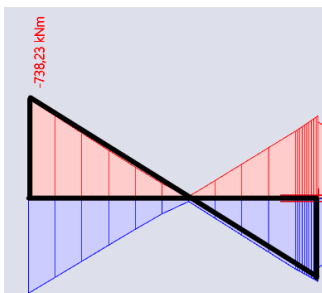
$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{487}{5545} = 0,09 < 1,0$$

Otpornost elementa na savijanje

Međukatna konstrukcija pridržava gornju pojasnicu nosača dok je donja pojasnica pridržana na širini zida. Na bočno torzijsko izvijanje će se provjeriti dio nosača koji je opterećen negativnim momentom savijanja gdje nije pridržana donja pojasnica.

Određivanje faktora  $C_1$



$$\Psi = \frac{-615}{738} = -0,83$$

$$C_1 = 2,55$$

$$L_{cr} = 299 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} \right]$$

$$M_{cr} = 2,55 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 10\,370}{299^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{5\,643\,000}{10\,370} + \frac{299^2 \cdot 8\,077 \cdot 309,3}{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 10\,370}} \right] = 1\,560\,665 \text{ kNcm}$$

$$M_{cr} = 15\,606 \text{ kNm}$$

Bezdimenzionalna vitkost

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{3\,949 \cdot 35,5}{1\,560\,665}} = 0,30$$

U normi 1993-1-1 u tablicama 6.3 i 6.4 dane su krivulje bočno torzijskog izvijanja i pripadne vrijednosti faktora imperfekcije ovisno o vrsti profila i odnosu njegove visine i širine pa je tako za:

$$h/b = 490/300 = 1,63 < 2,0 \text{ i valjane I presjeke mjerodavna krivulja izvijanja a}$$

za koju vrijedi:  $\alpha_{LT} = 0,21$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,3 - 0,2) + 0,3^2] = 0,56$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,56 + \sqrt{0,56^2 - 0,30^2}} = 0,96 < 1$$

Računska otpornost

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,96 \cdot \frac{3\,949 \cdot 35,5}{1,1} = 122\,347 \text{ kNcm} = 1223 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{738}{1223} = 0,60 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

**Otpornost elementa izloženog momentu savijanja i uzdužnoj sili**

Interakcijski faktori  $k_{ij}$  će se odrediti prema metodi 2.

Interakcijske formule:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$M_{z,Ed} = 0$  pa se  $k_{yz}$  i  $k_{zz}$  ne računaju.

Određivanje  $C_{mi}$ :

$$\Psi = \frac{-615}{738} = -0,83$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot \Psi \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot \Psi \geq 0,4$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,83) = 0,27$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,83) = 0,27$$

$$C_{my} = 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left[ 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \leq C_{my} \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right]$$

$$k_{yy} = 0,4 \left[ 1 + (0,30 - 0,2) \cdot \frac{487}{1 \cdot \frac{7011}{1,1}} \right] \leq 0,4 \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{487}{1 \cdot \frac{7011}{1,1}} \right]$$

$$k_{yy} = 0,40 \leq 0,42$$

$$k_{yy} = 0,40$$

Za  $\bar{\lambda}_z > 0,4$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{(0,1 \cdot \bar{\lambda}_z)}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right]$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{(0,1 \cdot 0,54)}{(0,4 - 0,25)} \cdot \frac{487}{0,87 \cdot \frac{7011}{1,1}} \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(0,4 - 0,25)} \cdot \frac{487}{0,87 \cdot \frac{7011}{1,1}} \right]$$

$$k_{zy} = 0.96 \geq 0.94$$

$$k_{zy} = 0.99$$

$$\frac{N_{Ed}}{X_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} = \frac{487}{1 \cdot \frac{7011}{1.1}} + 0.4 \cdot \frac{738}{0.96 \cdot \frac{1401}{1.1}} = 0.31 \leq 1.0$$

$$\frac{N_{Ed}}{X_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} = \frac{487}{0.87 \cdot \frac{7011}{1.1}} + 0.96 \cdot \frac{738}{0.96 \cdot \frac{1401}{1.1}} = 0.67 \leq 1.0$$

### GSU

Mjerodavna kombinacija opterećenja za granično stanje uporabivosti je seizmička kombinacija  $S_y$ . Najveći progib iznosi  $\delta = 0,3$  cm. Da bi nosač zadovoljio granično stanje uporabivosti, mora vrijediti sljedeći uvjet:

$$\delta = 0,3 \text{ cm} < L / 250 = 800 / 250 = 3,2 \text{ cm}$$

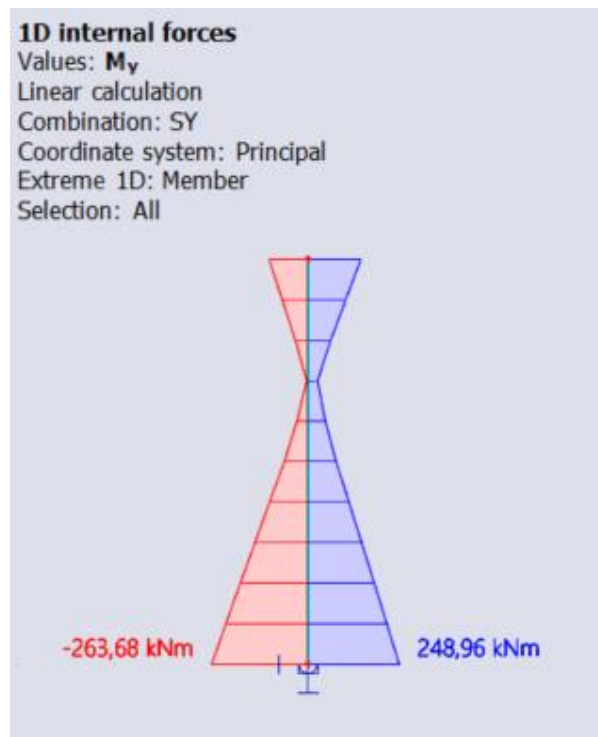
### 4.3.7.2. Stup

Proračunska uzdužna sila je:

$$N_{Ed,G} = 1327 \text{ kN}$$

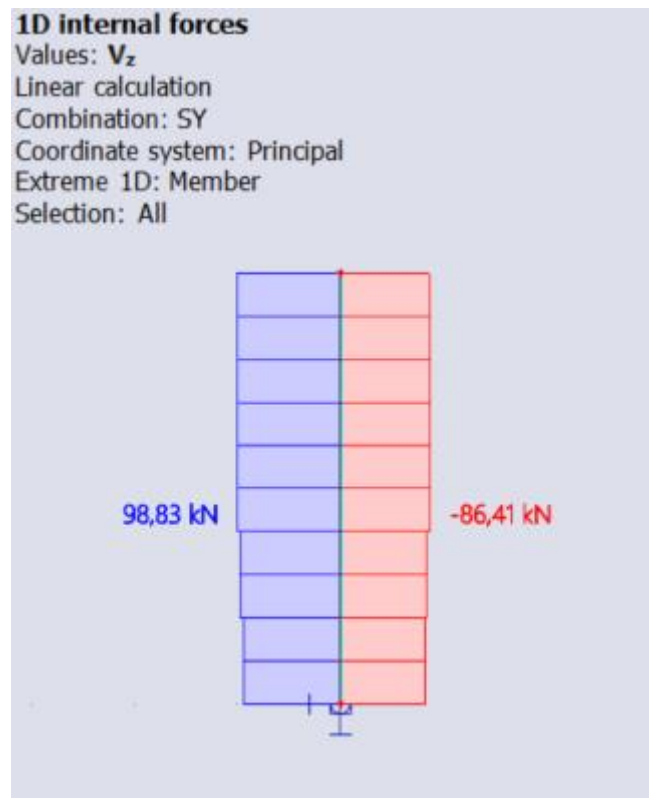
$$N_{Ed,E} = 3616 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot N_{Ed,E} = 132 + 1,1 \cdot 1,25 \cdot 3616 = 6299 \text{ kN}$$



Slika 4.20 Mjerodavna vrijednost momenta savijanja stupa okvira A4-A7





Slika 4.21 Mjerodavna vrijednost poprečne sile stupa okvira A4-A7

#### Karakteristike poprečnog presjeka : HEM 340

Preliminarnim dimenzioniranjem u obzir nije uzeto seizmičko djelovanje stoga odabrani profil HEA 360 ne zadovoljava. Odabrani profil je HEM 340.

Površina poprečnog presjeka:	: $A = 315,80 \text{ cm}^2$
Visina presjeka	: $h = 377 \text{ mm}$
Širina pojasnice:	: $b = 309 \text{ mm}$
Debljina hrpta	: $t_w = 21 \text{ mm}$
Debljina pojasnice	: $t_f = 40 \text{ mm}$
Radijus zaobljenja	: $r = 27 \text{ mm}$
Torzijska konstanta	: $I_t = 1506 \text{ cm}^4$
Konstanta krivljenja	: $I_w = 5584000 \text{ cm}^6$
Moment tromosti	: $I_y = 76370 \text{ cm}^4$ ; $I_z = 19710 \text{ cm}^4$
Moment otpora	: $W_y = 4052 \text{ cm}^3$ ; $W_z = 1276 \text{ cm}^3$
Plastični moment otpora	: $W_{pl,y} = 4718 \text{ cm}^3$ ; $W_{pl,z} = 1953 \text{ cm}^3$

## Klasifikacija poprečnog presjeka

Pojasnica

$$\frac{c}{t_f} = \frac{\frac{b-t_w-2\cdot r}{2}}{t_f} = \frac{\frac{309-21-2\cdot 27}{2}}{40} = 2,92 < 9\cdot \varepsilon = 9\cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klasa 1.

Hrbat

$$\frac{c}{t_w} = \frac{h-2\cdot t_f-2\cdot r}{t_w} = \frac{377-2\cdot 40-2\cdot 27}{21} = 11,57 < 72\cdot \varepsilon = 72\cdot 0,81 = 58,32$$

Hrbat je klasa 1.

Poprečni presjek je klasa 1 pa je mjerodavna plastična otpornost.

## Otpornost poprečnog presjeka

Otpornost poprečnog presjeka na tlačnu silu

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A\cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{345,80\cdot 35,5}{1,0} = 11\,210\text{kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{6299}{11\,210} = 0,56 < 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{pl,Rd}$$

$$N_{Ed} = 6299\text{ kN} > 0,25 \cdot 11\,210 = 2\,802\text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5\cdot h_w\cdot t_w\cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{Ed} = 6299\text{ kN} > 0,5 \cdot 29,7 \cdot 2,1 \cdot 35,5 / 1,0 = 1\,107\text{ kN}$$

Potrebna je redukcija plastične otpornosti

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5\cdot a}, \text{ ali } M_{N,y,Rd} < M_{pl,y,Rd}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0,56$$

$$a = \frac{A-2\cdot b\cdot t_f}{A} = \frac{315,80-2\cdot 30,9\cdot 4}{315,80} = 0,22$$

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a} = \frac{4718 \cdot 35,5}{1,0} \cdot \frac{1-0,56}{1-0,5 \cdot 0,22} = 828 \text{ kNm} < 1674 \text{ kNm}$$

### Otpornost poprečnog presjeka na posmik

Provjera izbočavanja hrpta na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}; \quad \varepsilon = 0,81 \quad \eta = 1,2$$

$$h_w = h - 2t_f = 377 - 2 \cdot 40 = 297 \text{ mm}$$

$$\frac{297}{21} = 14,4 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik.

Plastična posmična otpornost

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_{v,z} = 315,80 - 2 \cdot 30,9 \cdot 4,0 + (2,1 + 2 \cdot 2,7) \cdot 4,0 \geq 1,2 \cdot 29,7 \cdot 2,1$$

$$A_{v,z} = 98,6 \text{ cm}^2 > 74,84 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{Y_{MO}} = \frac{98,6 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 2020 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{99}{2020} = 0,05$$

Uvjet zadovoljen.

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$$

$$V_{z,Ed} = 99 \text{ kN} < 1010 \text{ kN}$$

Nema redukcije zbog poprečne sile

### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{264}{828} = 0,32 \leq 1,0 \text{ Uvjet zadovoljen.}$$

## Otpornost elementa

Otpornost elementa na izvijanje

Okvir ne nepomičan te je efektivna duljina izvijanja za izvijanje u ravnini manja od visine stupa, ali će se uzeti konzervativna vrijednost jednaka visini.

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 420 \text{ cm}$$

Eulerova kritična sila:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 76\,370}{420^2} = 89\,731 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 19\,710}{420^2} = 23\,158 \text{ kN}$$

Svedena vitkost:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{35,5 \cdot 315,80}{89\,731}} = 0,353$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{35,5 \cdot 315,80}{23\,158}} = 0,696$$

- za os y-y linija izvijanja je a, faktor imperfekcije  $\alpha = 0,21$

$$\Phi_y = 0,5 [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 [1 + 0,21 \cdot (0,353 - 0,2) + 0,353^2] = 0,578$$

- za os z-z linija izvijanja je b, faktor imperfekcije  $\alpha = 0,34$

$$\Phi_z = 0,5 [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 [1 + 0,34 \cdot (0,696 - 0,2) + 0,696^2] = 0,827$$

Faktor redukcije  $\chi_y$ :

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,578 + \sqrt{0,578^2 - 0,353^2}} = 0,96$$

Faktor redukcije  $\chi_z$ :

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,827 + \sqrt{0,827^2 - 0,696^2}} = 0,78$$

Računska otpornost

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,78 \cdot \frac{315,80 \cdot 35,5}{1,1} = 7949 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{6299}{7949} = 0,79 < 1,0$$

### Otpornost elementa na savijanje

Za mjerodavnu kombinaciju  $S_y$  nosač će se promatrati kao nosač sa momentima na krajevima.

Određivanje faktora  $C_1$



$$\Psi = \frac{-107}{249} = -0,43$$

$$C_1 = 2,05$$

$$L_{cr} = 420 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} \right]$$

$$M_{cr} = 2,05 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 19\,710}{420^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{5\,584\,000}{19\,710} + \frac{420^2 \cdot 8\,077 \cdot 1\,506}{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 19\,710}} \right] = 1\,312\,963 \text{ kNcm}$$

$$M_{cr} = 13\,129 \text{ kNm}$$

Bezdimenzionalna vitkost

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{4\,718 \cdot 35,5}{1\,312\,963}} = 0,36$$

U normi 1993-1-1 u tablicama 6.3 i 6.4 dane su krivulje bočno torzijskog izvijanja i pripadne vrijednosti faktora imperfekcije ovisno o vrsti profila i odnosu njegove visine i širine pa je tako za:

$h/b = 377/309 = 1,22 < 2,0$  i valjane I presjeke mjerodavna krivulja izvijanja a

za koju vrijedi:  $\alpha_{LT} = 0,21$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,36 - 0,2) + 0,36^2] = 0,58$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,58 + \sqrt{0,58^2 - 0,36^2}} = 0,96 < 1$$

Računska otpornost

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,96 \cdot \frac{4718 \cdot 35,5}{1,1} = 146\,172 \text{ kNm} = 1461 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{264}{1461} = 0,18 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

Otpornost elementa izloženog momentu savijanja i uzdužnoj sili

Interakcijski faktori  $k_{ij}$  će se odrediti prema metodi 2.

Interakcijske formule:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$M_{z,Ed} = 0$  pa se  $k_{yz}$  i  $k_{zz}$  ne računaju.

Određivanje  $C_{mi}$ :

$$\Psi = \frac{-107}{249} = -0,43$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot \Psi \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot \Psi \geq 0,4$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,43) = 0,43$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,43) = 0,43$$

$$C_{my} = 0,43$$

$$C_{mLT} = 0,43$$

$$k_{yy} = C_{my} \left[ 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right] \leq C_{my} \left[ 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right]$$

$$k_{yy} = 0.43 \left[ 1 + (0.353 - 0.2) \cdot \frac{6\,299}{0.96 \cdot \frac{11\,210}{1.1}} \right] \leq 0.43 \left[ 1 + 0.8 \cdot \frac{6\,299}{0.96 \cdot \frac{11\,210}{1.1}} \right]$$

$$k_{yy} = 0.47 \leq 0.65$$

$$k_{yy} = 0.47$$

Za  $\bar{\lambda}_z > 0.4$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{(0.1 \cdot \bar{\lambda}_z)}{(C_{mLT} - 0.25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right] \leq \left[ 1 - \frac{0.1}{(C_{mLT} - 0.25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right]$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{(0.1 \cdot 0.696)}{(0.43 - 0.25)} \cdot \frac{6\,299}{0.78 \cdot \frac{11\,210}{1.1}} \right] \leq \left[ 1 - \frac{0.1}{(0.43 - 0.25)} \cdot \frac{6\,299}{0.78 \cdot \frac{11\,210}{1.1}} \right]$$

$$k_{zy} = 0.69 \geq 0.56$$

$$k_{zy} = 0.56$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} = \frac{6\,299}{0.96 \cdot \frac{11\,210}{1.1}} + 0.47 \cdot \frac{264}{0.96 \cdot \frac{1\,674}{1.1}} = 0.73 \leq 1.0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} = \frac{6\,299}{0.78 \cdot \frac{7\,011}{1.1}} + 0.69 \cdot \frac{264}{0.96 \cdot \frac{1\,674}{1.1}} = 0.76 \leq 1.0$$

Uvjet zadovoljen.

### GSU

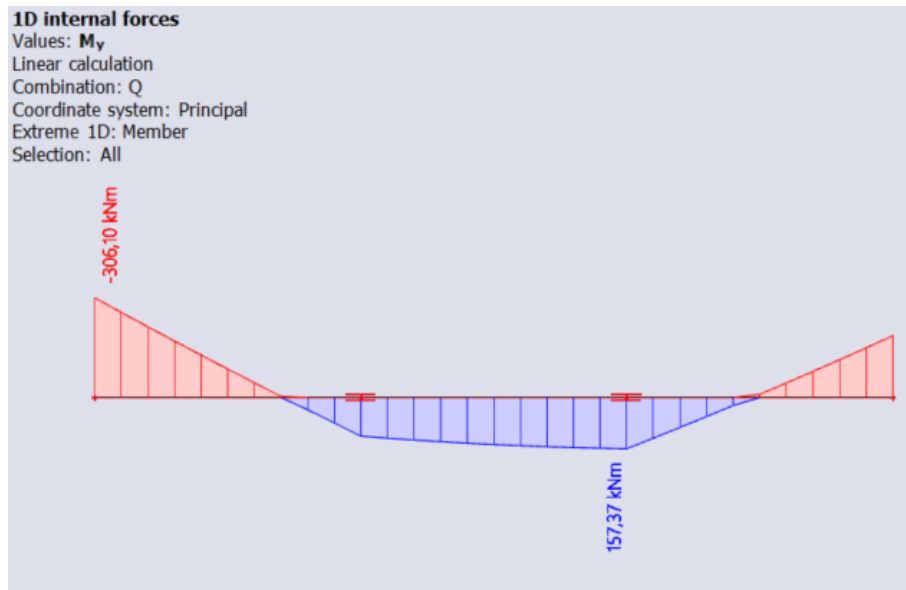
Mjerodavna kombinacija opterećenja za granično stanje uporabivosti je Seismic SY vodeće, a najveći progib iznosi  $\delta = 0,11$  cm. Da bi stup zadovoljio granično stanje uporabivosti, mora vrijediti sljedeći uvjet:  $\delta = 0,11 < L/150 = 420/150 = 2,8$  cm

### 4.3.8. Okvir (A7-A10)

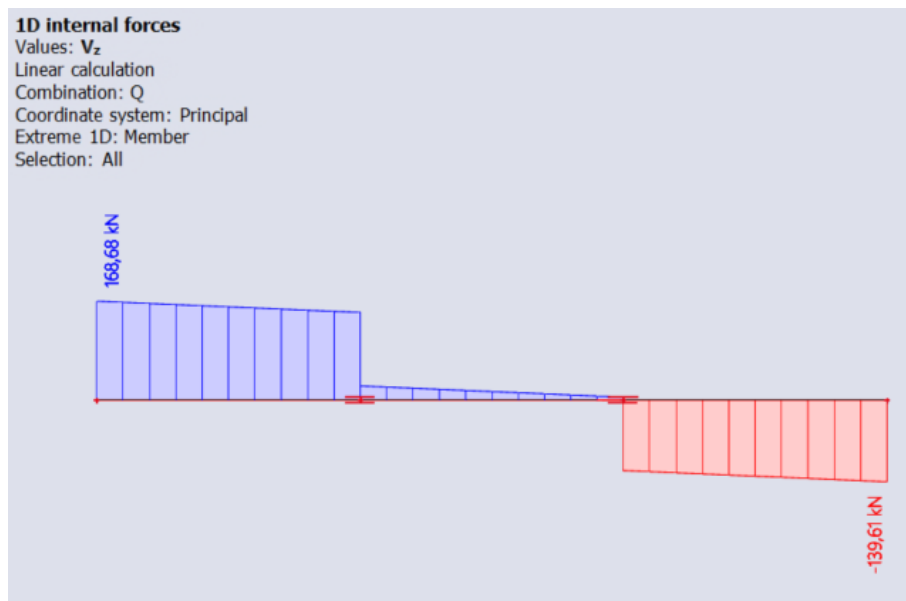
Preliminarnim dimenzioniranjem određen je profil IPE 400. Mjerodavna kombinacija za granično stanje nosivosti je 1,35G + 1,50Q.

## 4.3.8.1. Nosač

## Unutarnje sile i momenti



Slika 4.22 Mjerodavna vrijednost momenta savijanja za nosač okvira A7 – A10



Slika 4.23 Mjerodavna vrijednost poprečne sile za nosač okvira A7 – A10

## Karakteristike poprečnog presjeka : IPE400

Površina poprečnog presjeka: :  $A = 96,39 \text{ cm}^2$

Visina presjeka :  $h = 400 \text{ mm}$

Širina pojasnice: :  $b = 180 \text{ mm}$



Debljina hrpta	: $t_w = 8,6 \text{ mm}$
Debljina pojasnice	: $t_f = 13,5 \text{ mm}$
Radijus zaobljenja	: $r = 21 \text{ mm}$
Torzijska konstanta	: $I_t = 51,08 \text{ cm}^4$
Konstanta krivljenja	: $I_w = 490\,000 \text{ cm}^6$
Moment tromosti	: $I_y = 23\,130 \text{ cm}^4$ ; $I_z = 1\,318 \text{ cm}^4$
Moment otpora	: $W_y = 1\,156 \text{ cm}^3$ ; $W_z = 146,40 \text{ cm}^3$
Plastični moment otpora	: $W_{pl,y} = 1\,307 \text{ cm}^3$ ; $W_{pl,z} = 229 \text{ cm}^3$

### Klasifikacija poprečnog presjeka

Pojasnica

$$\frac{c}{t_f} = \frac{\frac{b-t_w-2\cdot r}{2}}{t_f} = \frac{\frac{180-8,6-2\cdot 21}{2}}{13,5} = 4,79 < 9\cdot \varepsilon = 9\cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klasa 1.

Hrbat

$$\frac{c}{t_w} = \frac{h-2\cdot t_f-2\cdot r}{t_w} = \frac{400-2\cdot 13,5-2\cdot 21}{8,6} = 38,48 < 72\cdot \varepsilon = 72\cdot 0,81 = 58,32$$

Hrbat je klasa 1.

Poprečni presjek je klasa 1 pa je mjerodavna plastična otpornost.

### Otpornost poprečnog presjeka

#### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1\,307 \cdot 35,5}{1,0} = 46\,399 \text{ kNcm} = 464 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{306}{464} = 0,66 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

## Otpornost poprečnog presjeka na posmik

Provjera izbočavanja hrpta na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} ; \varepsilon = 0,81 \quad \eta = 1,2$$

$$H_w = h - 2t_f = 400 - 2 \cdot 13,5 = 373 \text{ mm}$$

$$\frac{373}{8,6} = 43,37 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik.

Plastična posmična otpornost

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_{v,z} = 96,39 - 2 \cdot 18 \cdot 1,35 + (0,86 + 2 \cdot 2,1) \cdot 1,35 \geq 1,2 \cdot 37,3 \cdot 0,86$$

$$A_{v,z} = 54,62 \text{ cm}^2 > 38,49 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left( \frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = \frac{54,62 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 1119 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{169}{1119} = 0,15$$

Uvjet zadovoljen.

$$V_{z,Ed} < 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$$

$$169 < 0,5 \cdot 1119 = 559 \text{ kN}$$

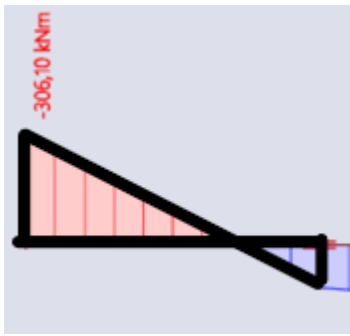
Nema redukcije granice popuštanja zbog posmika.

## Otpornost elementa

### Otpornost elementa na savijanje

Gornja pojasnica je pridržana međukatnom konstrukcijom, ali uslijed okvirnog djelovanja javljaju se negativni momenti stoga treba provjeriti otpornost na bočno torzijsko izvijanje. Nosač je bočno pridržan sekundarnim nosačima u trećinama raspona.

Određivanje faktora  $C_1$



$$\Psi = \frac{-119}{306} = -0,39$$

$$C_1 = 2,05$$

$$L_{cr} = 267 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} \right]$$

$$M_{cr} = 2,05 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 1\,318}{267^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{490\,000}{1\,318} + \frac{420^2 \cdot 8\,077 \cdot 51,08}{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 1\,318}} \right] = 198\,446 \text{ kNcm}$$

$$M_{cr} = 1\,984 \text{ kNm}$$

Bezdimenzionalna vitkost

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1\,307 \cdot 35,5}{198\,446}} = 0,48$$

U normi 1993-1-1 u tablicama 6.3 i 6.4 dane su krivulje bočno torzijskog izvijanja i pripadne vrijednosti faktora imperfekcije ovisno o vrsti profila i odnosu njegove visine i širine pa je tako za:

$h/b = 400/180 = 2,22 > 2,0$  i valjane I presjeke mjerodavna krivulja izvijanja b

za koju vrijedi:  $\alpha_{LT} = 0,34$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,48 - 0,2) + 0,48^2] = 0,66$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,66 + \sqrt{0,66^2 - 0,48^2}} = 0,90 < 1$$

Računska otpornost

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,90 \cdot \frac{1\,307 \cdot 35,5}{1,1} = 37\,962 \text{ kNcm} = 379 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{306}{379} = 0,81 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

### GSU

Mjerodavna kombinacija opterećenja za granično stanje uporabivosti je

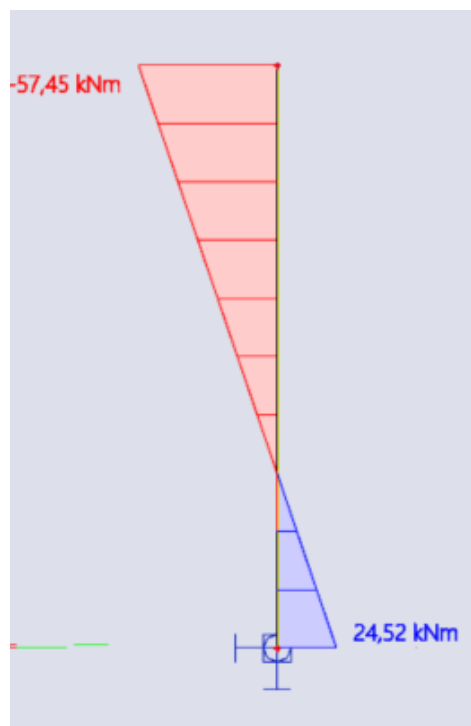
1,0G + 1,0Q, a najveći progib iznosi  $\delta = 1,04$  cm . Da bi nosač zadovoljio granično stanje uporabivosti, mora vrijediti sljedeći uvjet:

$$\delta = 1,04 \text{ cm} < L/250 = 800/250 = 3,2 \text{ cm}$$

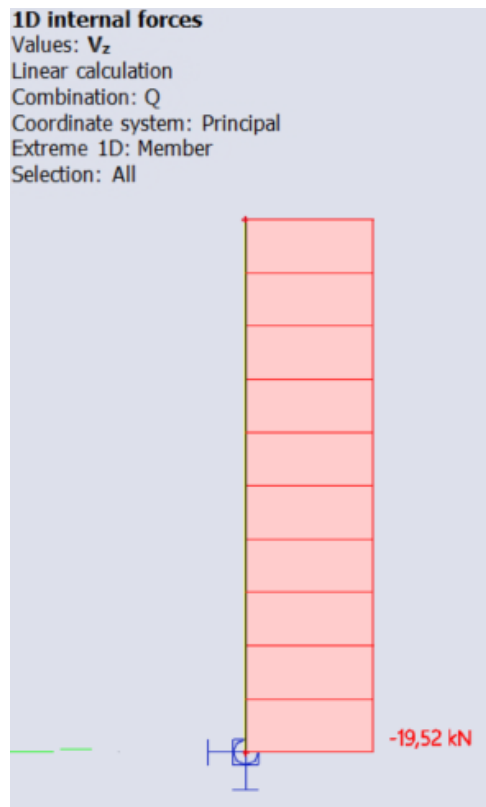
Uvjet je zadovoljen.

### 4.3.8.2. Stup

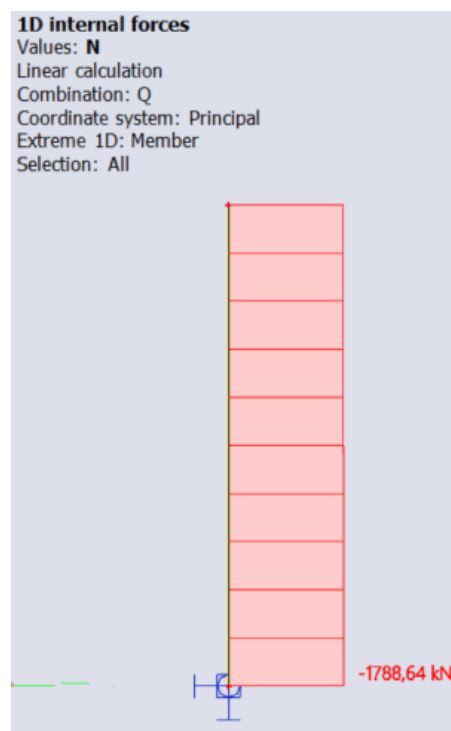
#### Unutarnje sile i momenti



Slika 4.24 Mjerodavna vrijednost momenta savijanja za stup okvira A7 – A10



Slika 4.25 Mjerodavna vrijednost poprečne sile za nosač okvira A7 – A10



Slika 4.26 Mjerodavna vrijednost poprečne sile za nosač okvira A7 – A1

**Karakteristike poprečnog presjeka : HEA 280**

Površina poprečnog presjeka:	: $A = A = 97,26 \text{ cm}^2$
Visina presjeka	: $h = 270 \text{ mm}$
Širina pojasnice:	: $b = 280 \text{ mm}$
Debljina hrpta	: $t_w = 8,0 \text{ mm}$
Debljina pojasnice	: $t_f = 13,0 \text{ mm}$
Radijus zaobljenja	: $r = 24 \text{ mm}$
Torzijska konstanta	: $I_t = 61,39 \text{ cm}^4$
Konstanta krivljenja	: $I_w = 770 140 \text{ cm}^6$
Moment tromosti	: $I_y = 13 673 \text{ cm}^4$ ; $I_z = 4 763 \text{ cm}^4$
Moment otpora	: $W_y = 1 013 \text{ cm}^3$ ; $W_z = 340 \text{ cm}^3$
Plastični moment otpora	: $W_{pl,y} = 1 112,55 \text{ cm}^3$ ; $W_{pl,z} = 518,13 \text{ cm}^3$

**Klasifikacija poprečnog presjeka**

Pojasnica

$$\frac{c}{t_f} = \frac{\frac{b-t_w-2\cdot r}{2}}{t_f} = \frac{\frac{280-8,0-2\cdot 24}{2}}{13,0} = 8,62 < 14\cdot \varepsilon = 14\cdot 0,81 = 11,34$$

Pojasnica je klasa 3.

Hrbat

$$\frac{c}{t_w} = \frac{h-2\cdot t_f-2\cdot r}{t_w} = \frac{270-2\cdot 13,0-2\cdot 24}{8,0} = 24,5 < 72\cdot \varepsilon = 72\cdot 0,81 = 58,32$$

Hrbat je klasa 1.

Poprečni presjek je klasa 3 pa je mjerodavna elastična otpornost.

Otpornost poprečnog presjeka na tlačnu silu

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A\cdot f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{97,26\cdot 35,5}{1,0} = 3 453 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{1789}{3453} = 0,52 < 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{y,Rd} = M_{el,y,Rd} = \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1\,013 \cdot 35,5}{1,0} = 35\,965 \text{ kNcm} = 359 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{58}{359} = 0,15 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

### Interakcija savijanja i tlačne sile

Naprezanje od savijanja

$$\sigma_{M,Ed,x} = \frac{M_{Ed}}{W_y} = \frac{5745}{1013} = 5,67 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Naprezanje od tlačne sile

$$\sigma_{N,Ed,x} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{1789}{97,26} = 18,39 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Ukupno naprezanje:

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{M,Ed,x} + \sigma_{N,Ed,x} = 5,67 + 18,39 = 24,06 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Uvjet:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$24,06 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 35,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Uvjet zadovoljen.

### Otpornost poprečnog presjeka na posmik

Provjera izbočavanja hrpta na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}; \quad \varepsilon = 0,81 \quad \eta = 1,2$$

$$h_w = h - 2t_f = 270 - 2 \cdot 13,0 = 244 \text{ mm}$$

$$\frac{244}{8,0} = 30,5 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik.

Plastična posmična otpornost

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_{v,z} = 97,26 - 2 \cdot 28 \cdot 1,30 + (0,80 + 2 \cdot 2,4) \cdot 1,30 \geq 1,2 \cdot 24,4 \cdot 0,80$$

$$A_{v,z} = 31,74 \text{ cm}^2 > 23,42 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{MO}} = \frac{31,74 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 650 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{19,52}{650} = 0,15$$

Uvjet zadovoljen.

$$V_{z,Ed} < 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$$

$$19,5 < 0,5 \cdot 650 = 325 \text{ kN}$$

Nema redukcije granice popuštanja zbog posmika.

### Otpornost elementa

Otpornost elementa na izvijanje

Okvir ne nepomičan te je efektivna duljina izvijanja za izvijanje u ravnini manja od visine stupa, ali će se uzeti konzervativna vrijednost jednaka visini.

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 420 \text{ cm}$$

Eulerova kritična sila:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 13\,373}{420^2} = 15\,712 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 4\,763}{420^2} = 5\,596 \text{ kN}$$

Svedena vitkost:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{35,5 \cdot 97,26}{15\,712}} = 0,47$$



$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{35,5 \cdot 97,26}{5 \cdot 596}} = 0,79$$

U normi 1993-1-1 u tablicama 6.3 i 6.4 dane su krivulje bočno torzijskog izvijanja i pripadne vrijednosti faktora imperfekcije ovisno o vrsti profila i odnosu njegove visine i širine pa je tako za:

$h/b = 270/28 = 0,96 < 1,2$  i valjane I presjeke mjerodavna krivulja izvijanja

- za os y-y linija izvijanja je b, faktor imperfekcije  $\alpha = 0,34$

$$\Phi_y = 0,5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5[1 + 0,34 \cdot (0,47 - 0,2) + 0,47^2] = 0,65$$

- za os z-z linija izvijanja je c, faktor imperfekcije  $\alpha = 0,49$

$$\Phi_z = 0,5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,79 - 0,2) + 0,79^2] = 0,96$$

Faktor redukcije  $\chi_y$ :

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,65 + \sqrt{0,65^2 - 0,47^2}} = 0,91$$

Faktor redukcije  $\chi_z$ :

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,96 + \sqrt{0,96^2 - 0,79^2}} = 0,66$$

Računska otpornost

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,66 \cdot \frac{97,26 \cdot 35,5}{1,1} = 2071 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{1789}{2071} = 0,86 < 1,0$$

Otpornost elementa na savijanje

Određivanje faktora  $C_1$

$$\Psi = \frac{-24,52}{57,45} = -0,43$$

$$C_1 = 2,05$$

$$L_{cr} = 420 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} \right]$$

$$M_{cr} = 2,05 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 4\,763}{420^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{770\,140}{4\,763} + \frac{420^2 \cdot 8\,077 \cdot 61,39}{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 4\,763}} \right] = 181\,501 \text{ kNcm}$$

$$M_{cr} = 1\,815 \text{ kNm}$$

Bezdimenzionalna vitkost

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1\,013 \cdot 35,5}{181\,501}} = 0,45$$

U normi 1993-1-1 u tablicama 6.3 i 6.4 dane su krivulje bočno torzijskog izvijanja i pripadne vrijednosti faktora imperfekcije ovisno o vrsti profila i odnosu njegove visine i širine pa je tako za:

$$h/b = 270/280 = 0,96 < 2,0 \text{ i valjane I presjeke mjerodavna krivulja izvijanja a}$$

$$\text{za koju vrijedi: } \alpha_{LT} = 0,21$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,45 - 0,2) + 0,45^2] = 0,63$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,63 + \sqrt{0,63^2 - 0,45^2}} = 0,93 < 1$$

Računska otpornost

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,93 \cdot \frac{1\,013 \cdot 35,5}{1,1} = 30\,403 \text{ kNcm} = 304 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{57,45}{304} = 0,18 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

**Otpornost elementa izloženog momentu savijanja i uzdužnoj sili**

Interakcijski faktori  $k_{ij}$  će se odrediti prema metodi 2.

Interakcijske formule:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{Y_{M1}} \leq 1,0$$

$M_{z,Ed} = 0$  pa se  $k_{yz}$  i  $k_{zz}$  ne računaju.

Određivanje  $C_{mi}$ :

$$\Psi = \frac{-24,52}{57,45} = -0,43$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot \Psi \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot \Psi \geq 0,4$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,43) = 0,43$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,43) = 0,43$$

$$C_{my} = 0,43$$

$$C_{mLT} = 0,43$$

$$k_{yy} = C_{my} \left[ 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right] \leq C_{my} \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right]$$

$$k_{yy} = 0,43 \left[ 1 + (0,47 - 0,2) \cdot \frac{1\,789}{0,91 \cdot \frac{3\,453}{1,1}} \right] \leq 0,43 \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{1\,789}{0,91 \cdot \frac{3\,453}{1,1}} \right]$$

$$k_{yy} = 0,50 \leq 0,65$$

$$k_{yy} = 0,50$$

Za  $\bar{\lambda}_z > 0,4$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{(0,1 \cdot \bar{\lambda}_z)}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right] \leq \left[ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right]$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{(0,1 \cdot 0,79)}{(0,43 - 0,25)} \cdot \frac{1\,789}{0,66 \cdot \frac{3\,453}{1,1}} \right] \leq \left[ 1 - \frac{0,1}{(0,43 - 0,25)} \cdot \frac{1\,789}{0,66 \cdot \frac{11\,210}{1,1}} \right]$$

$$k_{zy} = 0,62 \geq 0,52$$

$$k_{zy} = 0,62$$

$$\frac{N_{Ed}}{X_V \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} = \frac{1789}{0,91 \cdot \frac{3453}{1,1}} + 0,50 \cdot \frac{57,45}{0,93 \cdot \frac{359}{1,1}} = 0,72 \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{X_Z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} = \frac{1789}{0,66 \cdot \frac{3453}{1,1}} + 0,62 \cdot \frac{57,45}{0,96 \cdot \frac{359}{1,1}} = 0,97 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

### GSU

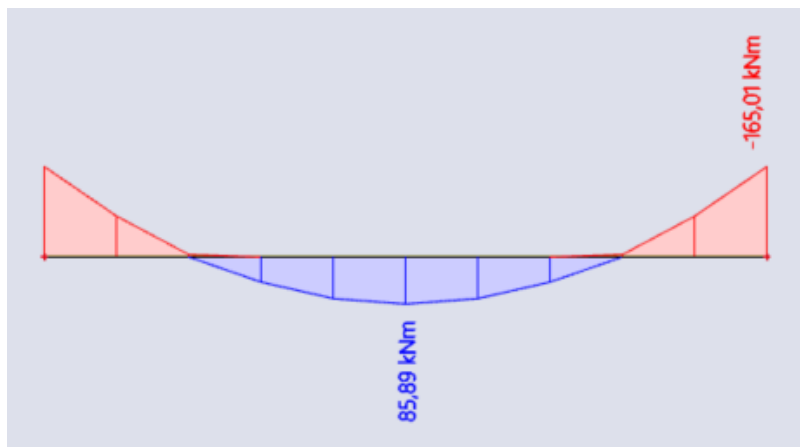
Mjerodavna kombinacija opterećenja za granično stanje uporabivosti je 1,0G + 1,0Q, a najveći progib iznosi  $\delta = 0,1$  cm . Da bi stup zadovoljio granično stanje uporabivosti, mora vrijediti sljedeći uvjet:  $\delta = 0,1$  cm < L 150 = 420 150 = 2,8 cm

### 4.3.9. Ovir (B4-C4)

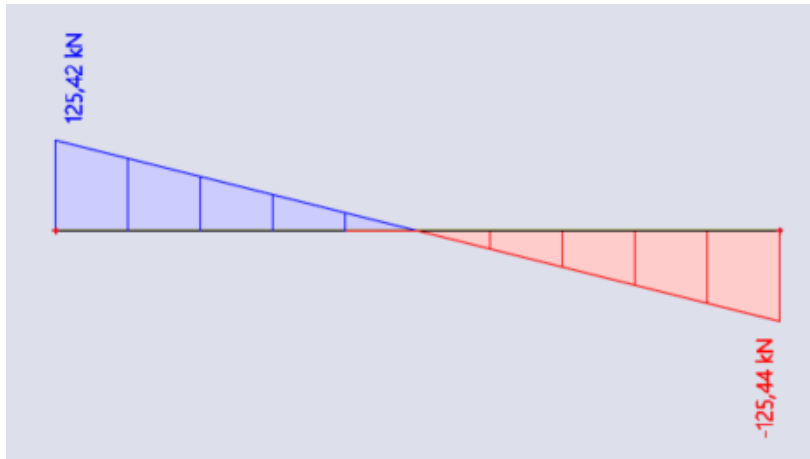
Preliminarnim dimenzioniranjem određen je profil IPE 400. Mjerodavna kombinacija za granično stanje nosivosti je 1,35G + 1,50Q.

#### 4.3.9.1. Nosač

#### Unutarnje sile i momenti



Slika 4.27 Mjerodavna vrijednost momenta savijanja za nosač okvira B4 – C4



Slika 4.28 Mjerodavna vrijednost poprečne sile za nosač okvira B4 – C4

**Karakteristike poprečnog presjeka : IPE400**

Površina poprečnog presjeka:	: $A = 96,39 \text{ cm}^2$
Visina presjeka	: $h = 400 \text{ mm}$
Širina pojasnice:	: $b = 180 \text{ mm}$
Debljina hrpta	: $t_w = 8,6 \text{ mm}$
Debljina pojasnice	: $t_f = 13,5 \text{ mm}$
Radijus zaobljenja	: $r = 21 \text{ mm}$
Torzijska konstanta	: $I_t = 51,08 \text{ cm}^4$
Konstanta krivljenja	: $I_w = 490\,000 \text{ cm}^6$
Moment tromosti	: $I_y = 23\,130 \text{ cm}^4$ ; $I_z = 1\,318 \text{ cm}^4$
Moment otpora	: $W_y = 1\,156 \text{ cm}^3$ ; $W_z = 146,40 \text{ cm}^3$
Plastični moment otpora	: $W_{pl,y} = 1\,307 \text{ cm}^3$ ; $W_{pl,z} = 229 \text{ cm}^3$

**Klasifikacija poprečnog presjeka**

Pojasnica

$$\frac{c}{t_f} = \frac{\frac{b-t_w-2\cdot r}{2}}{t_f} = \frac{\frac{180-8,6-2\cdot 21}{2}}{13,5} = 4,79 < 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klasa 1.

Hrpat

$$\frac{c}{t_w} = \frac{h-2\cdot t_f-2\cdot r}{t_w} = \frac{400-2\cdot 13,5-2\cdot 21}{8,6} = 38,48 < 72 \cdot \varepsilon = 72 \cdot 0,81 = 58,32$$

Hrpat je klasa 1.

Poprečni presjek je klasa 1 pa je mjerodavna plastična otpornost.

### Otpornost poprečnog presjeka

#### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1\,307 \cdot 35,5}{1,0} = 46\,399 \text{ kNcm} = 464 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{165}{464} = 0,36 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

#### Otpornost poprečnog presjeka na posmik

Provjera izbočavanja hrpta na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}; \quad \varepsilon = 0,81 \quad \eta = 1,2$$

$$H_w = h - 2t_f = 400 - 2 \cdot 13,5 = 373 \text{ mm}$$

$$\frac{373}{8,6} = 43,37 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik.

#### Plastična posmična otpornost

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_{v,z} = 96,39 - 2 \cdot 18 \cdot 1,35 + (0,86 + 2 \cdot 2,1) \cdot 1,35 \geq 1,2 \cdot 37,3 \cdot 0,86$$

$$A_{v,z} = 54,62 \text{ cm}^2 > 38,49 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{54,62 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 1119 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{125}{1119} = 0,11$$

Uvjet zadovoljen.

$$V_{z,Ed} < 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$$

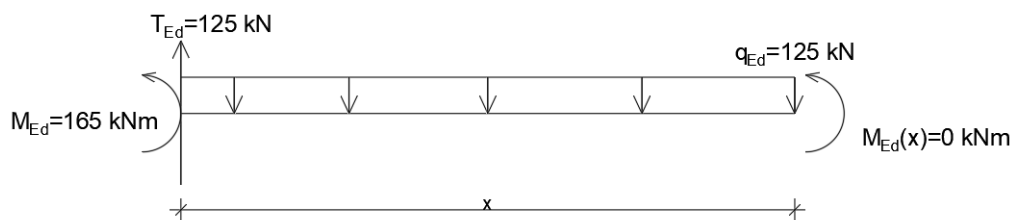
$$125 < 0,5 \cdot 1\,119 = 559 \text{ kN}$$

Nema redukcije granice popuštanja zbog posmika.

## Otpornost elementa

### Otpornost elementa na savijanje

Gornja pojasnica je pridržana međukatnom konstrukcijom, ali uslijed okvirnog djelovanja javljaju se negativni momenti stoga treba provjeriti otpornost na bočno torzijsko izvijanje. Promatrat će se dio nosača do nul točke momentnog dijagrama.

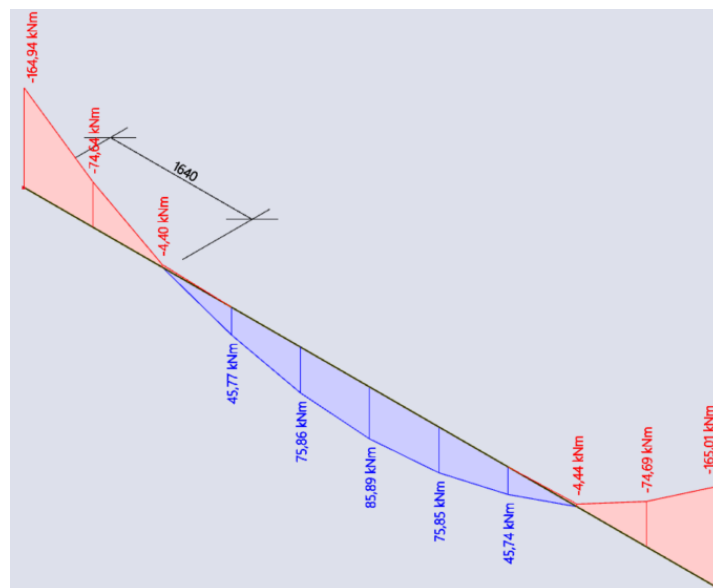


Slika 4.29 Određivanje položaja nul-točke momentnog dijagrama

$$M(x) = 29,85 \cdot \frac{x^2}{2} - 125 \cdot x + 165 = 0$$

Rješenja kvadratne jednačbe jednake su nul točkama momentnog dijagrama:

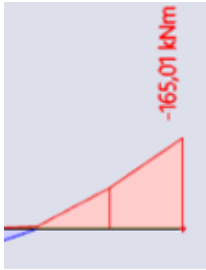
$$X_1 = 1,64 \text{ m}$$



Slika 4.30 Položaj nul-točke momentnog dijagrama

Određivanje faktora  $C_1$  i  $C_2$

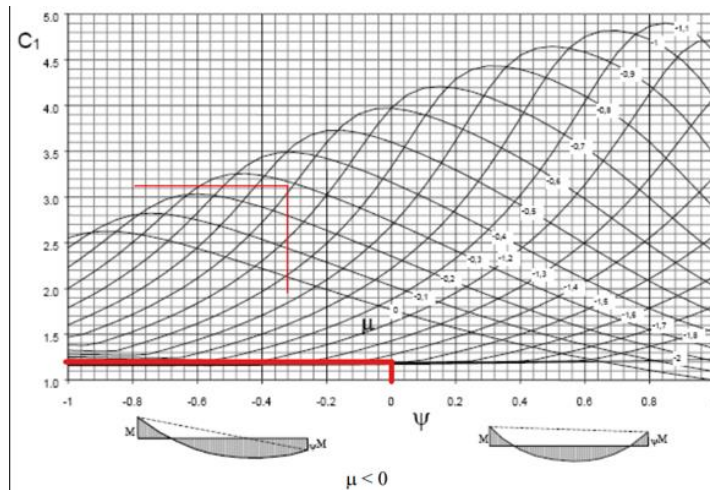
- za mjerodavnu kombinaciju 1,35G + 1,50Q omjer momenata na krajevima jednak je:



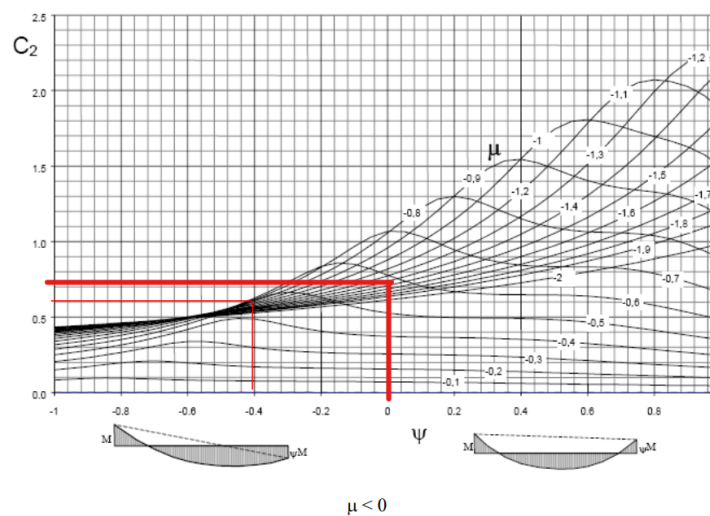
$$\Psi = 0$$

-za mjerodavnu kombinaciju 1,35G + 1,50Q omjer momenta uslijed poprečnog opterećenja i maksimalnog momenta na kraju jednak je:

$$\mu = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8 \cdot M_{Ed}} = \frac{29,85 \cdot 8^2}{8 \cdot 165} = 1,45$$



Slika 4.31 C1 – Momenti na krajevima i jednoliko raspodijeljeno opterećenje



Slika 4.32 C2 – Momenti na krajevima i jednoliko raspodijeljeno opterećenje



Očitano:

$$C_1 = 1,2$$

$$C_2 = 0,7$$

-nosač je opterećen na gornjem pojasu, vrijedi:

$$Z_g = h/2 = 40/2 = 20 \text{ cm}$$

$$L_{cr} = 164 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

$$M_{cr} = 1,2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 1\,318}{164^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{490\,000}{1\,318} + \frac{164^2 \cdot 8\,077 \cdot 51,08}{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 1\,318} + (0,7 \cdot 20)^2} - 0,7 \cdot 20 \right] = 119\,160 \text{ kNcm}$$

$$M_{cr} = 1\,191 \text{ kNm}$$

Bezdimenzionalna vitkost

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1\,307 \cdot 35,5}{119\,160}} = 0,62$$

U normi 1993-1-1 u tablicama 6.3 i 6.4 dane su krivulje bočno torzijskog izvijanja i pripadne vrijednosti faktora imperfekcije ovisno o vrsti profila i odnosu njegove visine i širine pa je tako za:

$$h/b = 400/180 = 2,22 > 2,0 \text{ i valjane I presjeke mjerodavna krivulja izvijanja b}$$

za koju vrijedi:  $\alpha_{LT} = 0,34$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,62 - 0,2) + 0,62^2] = 0,76$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,76 + \sqrt{0,76^2 - 0,62^2}} = 0,83 < 1$$

Računska otpornost

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,83 \cdot \frac{1\,307 \cdot 35,5}{1,1} = 35\,009 \text{ kNcm} = 350 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{165}{350} = 0,47 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

## GSU

Mjerodavna kombinacija opterećenja za granično stanje uporabivosti je GSU 7 1,0G + 1,0Q, a najveći progib iznosi  $\delta = 0,5$  cm . Da bi nosač zadovoljio granično stanje uporabivosti, mora vrijediti sljedeći uvjet:

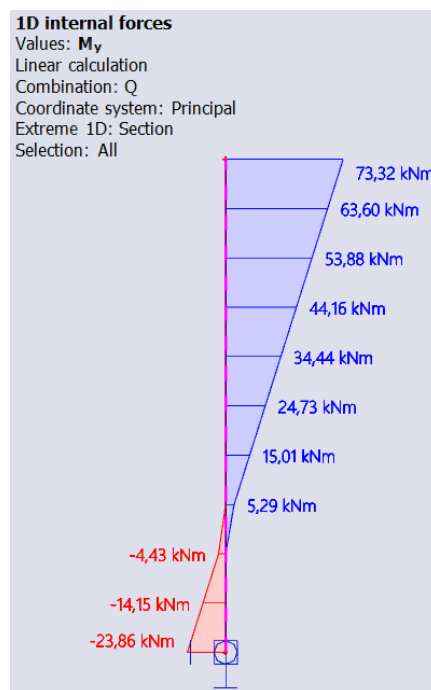
$$\delta = 0,5 \text{ cm} < L/250 = 800/250 = 3,2 \text{ cm}$$

Uvjet je zadovoljen.

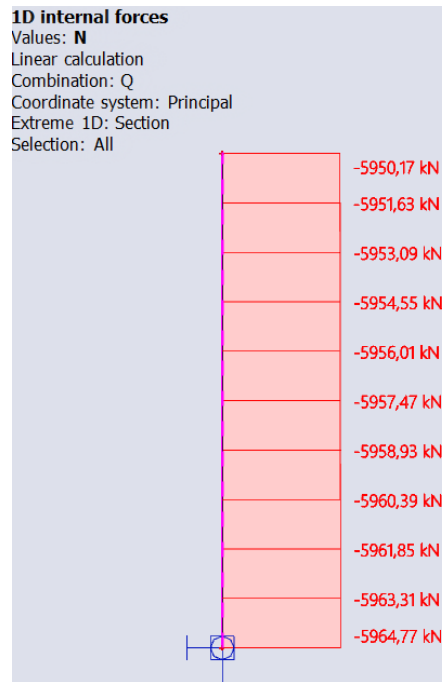
### 4.3.9.2. Stup

Preliminarnim dimenzioniranjem određen je profil HEA 650. Stup HEA 650 ne zadovoljava pa se odabire HEB 800 Mjerodavna kombinacija za granično stanje nosivosti je 1,35G + 1,50Q.

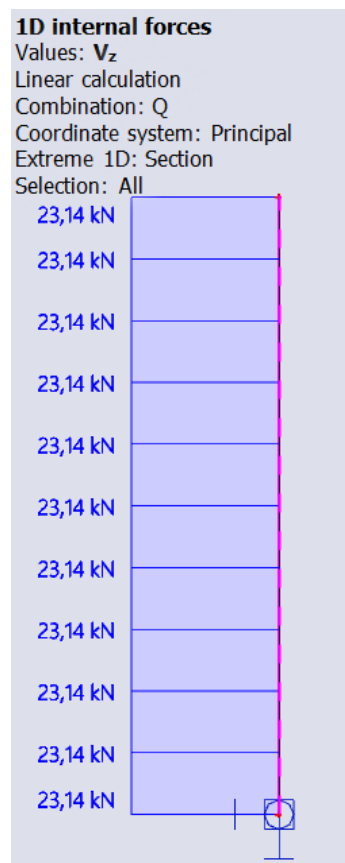
Unutarnje sile i momenti



Slika 4.33 Mjerodavna vrijednost momenta savijanja za stup okvira B4 – C4



Slika 4.34 Mjerodavna vrijednost uzdužne sile za stup okvira (B4 – C4)



Slika 4.35 Mjerodavna vrijednost uzdužne sile za stup okvira B4 – C4

**Karakteristike poprečnog presjeka : HEB 800**

Površina poprečnog presjeka:	: $A = 334,20 \text{ cm}^2$
Visina presjeka	: $h = 800 \text{ mm}$
Širina pojasnice:	: $b = 300 \text{ mm}$
Debljina hrpta	: $t_w = 17,5 \text{ mm}$
Debljina pojasnice	: $t_f = 33,0 \text{ mm}$
Radijus zaobljenja	: $r = 30,0$
Torzijska konstanta	: $I_t = 962,10 \text{ cm}^4$
Konstanta krivljenja	: $I_w = 21\,617\,000 \text{ cm}^6$
Moment tromosti	: $I_y = 359\,080 \text{ cm}^4$ ; $I_z = 14\,904 \text{ cm}^4$
Moment otpora	: $W_y = 8\,977 \text{ cm}^3$ ; $W_z = 993,60 \text{ cm}^3$
Plastični moment otpora	: $W_{pl,y} = 10\,230,33 \text{ cm}^3$ ; $W_{pl,z} = 1\,553,13 \text{ cm}^3$

**Klasifikacija poprečnog presjeka**

Pojasnica

$$\frac{c}{t_f} = \frac{\frac{b-t_w-2\cdot r}{2}}{t_f} = \frac{\frac{300-17,5-2\cdot 30}{2}}{33} = 3,37 < 9\cdot \varepsilon = 9\cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klasa 1.

Hrbat

$$\frac{c}{t_w} = \frac{h-2\cdot t_f-2\cdot r}{t_w} = \frac{800-2\cdot 33-2\cdot 30}{17,5} = 38,5 < 72\cdot \varepsilon = 72\cdot 0,81 = 58,32$$

Hrbat je klasa 1.

Poprečni presjek je klasa 1 pa je mjerodavna plastična otpornost.

**Otpornost poprečnog presjeka**

Otpornost poprečnog presjeka na tlačnu silu

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{334,2 \cdot 35,5}{1,0} = 11\,864 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{5\,933}{11\,864} = 0,50 < 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{pl,Rd}$$

$$N_{Ed} = 5\,933 \text{ kN} > 0,25 \cdot 11\,864 = 2\,966 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{Ed} = 5\,933 \text{ kN} > 0,5 \cdot 73,4 \cdot 1,75 \cdot 35,5 / 1,0 = 2\,279 \text{ kN}$$

Potrebna je redukcija plastične otpornosti

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a}, \text{ ali } M_{N,y,Rd} < M_{pl,y,Rd}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0,50$$

$$a = \frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A} = \frac{334,20 - 2 \cdot 30,0 \cdot 3,3}{334,20} = 0,41$$

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a} = \frac{8\,977 \cdot 35,5}{1,0} \cdot \frac{1-0,50}{1-0,5 \cdot 0,41} = 2\,004 \text{ kNm} < 3\,186 \text{ kNm}$$

Otpornost poprečnog presjeka na posmik

Provjera izbočavanja hrpta na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}; \quad \varepsilon = 0,81 \quad \eta = 1,2$$

$$h_w = h - 2t_f = 800 - 2 \cdot 33 = 734 \text{ mm}$$

$$\frac{734}{17,5} = 41,94 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik.

Plastična posmična otpornost

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_{v,z} = 334,20 - 2 \cdot 30,0 \cdot 3,3 + (1,75 + 2 \cdot 3,0) \cdot 3,3 \geq 1,2 \cdot 73,4 \cdot 1,75$$

$$A_{v,z} = 161,78 \text{ cm}^2 > 154,14 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{161,78 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 3\,315 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{23}{3315} = 0,08$$

Uvjet zadovoljen.

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$$

$$V_{z,Ed} = 23 \text{ kN} < 1\,657 \text{ kN}$$

Nema redukcije zbog poprečne sile

### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{73}{2004} = 0,04 \leq 1,0 \text{ Uvjet zadovoljen.}$$

### Otpornost elementa

Otpornost elementa na izvijanje

Okvir ne nepomičan te je efektivna duljina izvijanja za izvijanje u ravnini manja od visine stupa, ali će se uzeti konzervativna vrijednost jednaka visini.

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 420 \text{ cm}$$

Eulerova kritična sila:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 358\,080}{420^2} = 420727 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 14904}{420^2} = 17511 \text{ kN}$$

Svedena vitkost:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{35,5 \cdot 334,20}{420727}} = 0,17$$

Nema opasnosti od izvijanja  $\chi_y = 1,0$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{35,5 \cdot 334,20}{17511}} = 0,82$$

U normi 1993-1-1 u tablicama 6.3 i 6.4 dane su krivulje bočno torzijskog izvijanja i pripadne vrijednosti faktora imperfekcije ovisno o vrsti profila i odnosu njegove visine i širine pa je tako za:

$h/b = 800/300 = 2,67 > 1,2$  i valjane I presjeke mjerodavna krivulja izvijanja

- za os z-z linija izvijanja je b, faktor imperfekcije  $\alpha = 0,34$

$$\Phi_z = 0.5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5[1 + 0.34 \cdot (0.82 - 0.2) + 0.82^2] = 0,94$$

Faktor redukcije  $\chi_z$ :

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0.94 + \sqrt{0.94^2 - 0.82^2}} = 0.71$$

Računska otpornost

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0.71 \cdot \frac{334,2 \cdot 35,5}{1.1} = 7657 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{5965}{7657} = 0,78 < 1,0$$

Otpornost elementa na savijanje

Za mjerodavnu kombinaciju  $S_y$  nosač će se promatrati kao nosač sa momentima na krajevima

Određivanje faktora  $C_1$

$$\Psi = \frac{-23,83}{73,32} = 0,33$$

$$C_1 = 2,05$$

$$L_{cr} = 420 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} \right]$$

$$M_{cr} = 2,05 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 14\,904}{420^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{21617000}{14904} + \frac{420^2 \cdot 8\,077 \cdot 962}{\pi^2 \cdot 21\,000 \cdot 14\,904}} \right] = 1562362 \text{ kNm}$$

$$M_{cr} = 15\,623 \text{ kNm}$$

Bezdimenzionalna vitkost

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{10230 \cdot 35,5}{1562362}} = 0,48$$

U normi 1993-1-1 u tablicama 6.3 i 6.4 dane su krivulje bočno torzijskog izvijanja i pripadne vrijednosti faktora imperfekcije ovisno o vrsti profila i odnosu njegove visine i širine pa je tako za:

$h/b = 800/300 = 2,66 > 2,0$  i valjane I presjeke mjerodavna krivulja izvijanja b

za koju vrijedi:  $\alpha_{LT} = 0,34$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,48 - 0,2) + 0,48^2] = 0,66$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,66 + \sqrt{0,66^2 - 0,48^2}} = 0,89 < 1$$

Računska otpornost

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,89 \cdot \frac{10230 \cdot 35,5}{1,1} = 293833 \text{ kNcm} = 2938 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{73}{2938} = 0,02 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

Otpornost elementa izloženog momentu savijanja i uzdužnoj sili

Interakcijski faktori  $k_{ij}$  će se odrediti prema metodi 2.

Interakcijske formule:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$M_{z,Ed} = 0$  pa se  $k_{yz}$  i  $k_{zz}$  ne računaju.



Određivanje  $C_{mi}$ :

$$\Psi = \frac{-23,83}{73,32} = 0,33$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot \Psi \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot \Psi \geq 0,4$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,33) = 0,47$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,33) = 0,47$$

$$C_{my} = 0,47$$

$$C_{mLT} = 0,47$$

$$k_{yy} = C_{my} \left[ 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{X_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right] \leq C_{my} \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{X_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right]$$

$$k_{yy} = 0,47 \left[ 1 + (0,17 - 0,2) \cdot \frac{5965}{1,0 \cdot \frac{11864}{1,1}} \right] \leq 0,47 \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{5965}{1,0 \cdot \frac{11864}{1,1}} \right]$$

$$k_{yy} = 0,46 \leq 0,67$$

$$k_{yy} = 0,46$$

Za  $\bar{\lambda}_z > 0,4$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{(0,1 \cdot \bar{\lambda}_z)}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{X_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{X_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right]$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{(0,1 \cdot 0,82)}{(0,47 - 0,25)} \cdot \frac{5969}{0,71 \cdot \frac{11864}{1,1}} \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(0,47 - 0,25)} \cdot \frac{6299}{0,71 \cdot \frac{11864}{1,1}} \right]$$

$$k_{zy} = 0,71 \geq 0,65$$

$$k_{zy} = 0,56$$

$$\frac{N_{Ed}}{X_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} = \frac{5965}{1,0 \cdot \frac{11864}{1,1}} + 0,46 \cdot \frac{73}{0,89 \cdot \frac{3631}{1,1}} = 0,56 \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} = \frac{5965}{0,71 \cdot \frac{11864}{1,1}} + 0,69 \cdot \frac{73}{0,89 \cdot \frac{3631}{1,1}} = 0,80 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen.

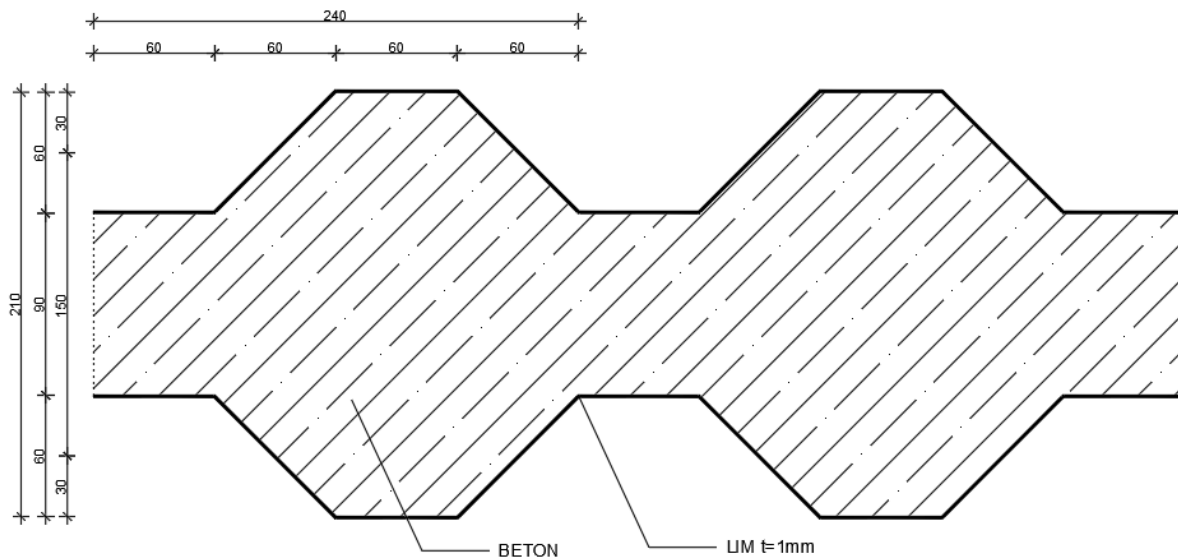
## GSU

Mjerodavna kombinacija opterećenja za granično stanje uporabivosti je 1,0 G + 1,0 Q vodeće, a najveći progib iznosi  $\delta = 0,14$  cm . Da bi stup zadovoljio granično stanje uporabivosti, mora vrijediti sljedeći uvjet:  $\delta = 0,14$  cm <  $L / 150 = 420 / 150 = 2,8$  cm.

## 5. MODELIRANJE POSMIČNOG ZIDA

### 5.1. Geometrija i materijal

Dimenzije posmičnog zida su  $b/h = 2,2 \text{ m} \times 4,2 \text{ m}$ . Profilirani lim je debljine 1mm, a prosječna debljina betona je 1500 mm kako je prikazano na slici 5.1. Klasa betona je C25/30, a lim je čelik BM\_10.

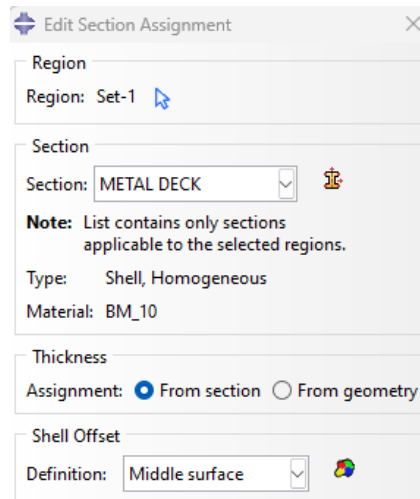


Slika 5.1 Poprečni presjek posmičnog zida

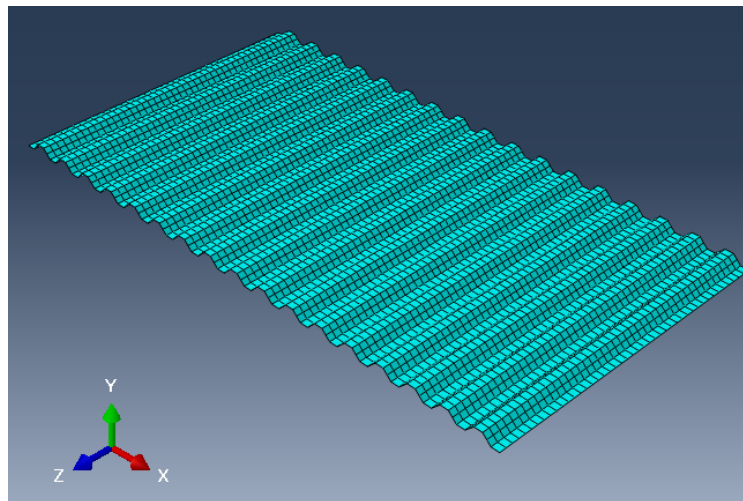
### 5.2. Numerički model (FEA)

Prije provedbe pushover analize kojom će se ispitati učinak spregnutog posmičnog zida profilirani lim – beton na bočnu krutost okvira potrebno je odrediti zakon ponašanja zida opterećenog poprečnom silom. Dijagram sila-pomak koja opisuje ponašanje spregnutog posmičnog odredit će se primjenom programa Abaqus u kojemu će se provesti analiza te će se dobiveni rezultati koristiti u globalnoj analizi okvira.

Profilirani lim je modeliran pomoću shell elemenata što je prikazano na slikama 5.2 i 5.3. Korišten je postupak za modeliranje čeličnih profila prema radu [18].

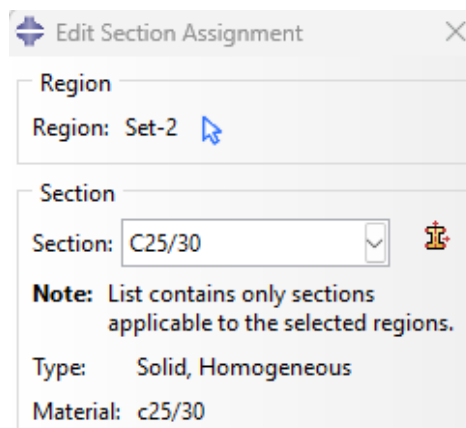


Slika 5.2 Karakteristike Profiliranog lima

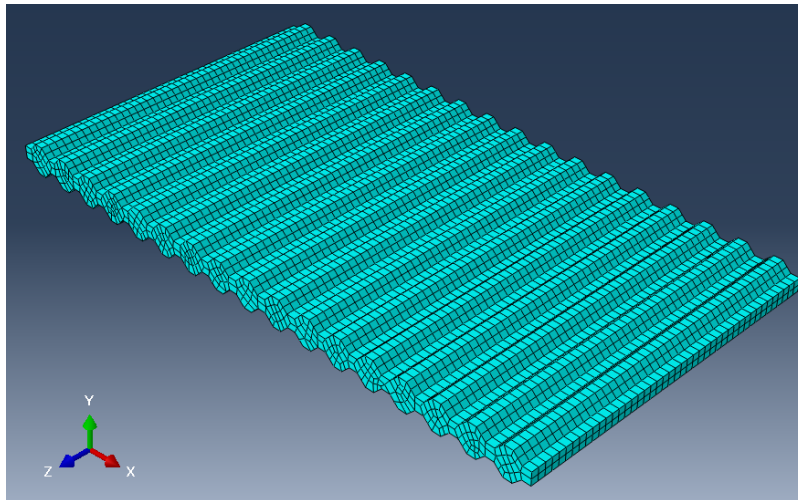


Slika 5.3 Profilirani lima

Betonska ispuna modelirana je pomoću volumnog konačnog elementa odnosno solid elemenata što je prikazano na slikama 5.4 i 5.5.. Korišten je potupak za modeliranje betona prema radu [18].

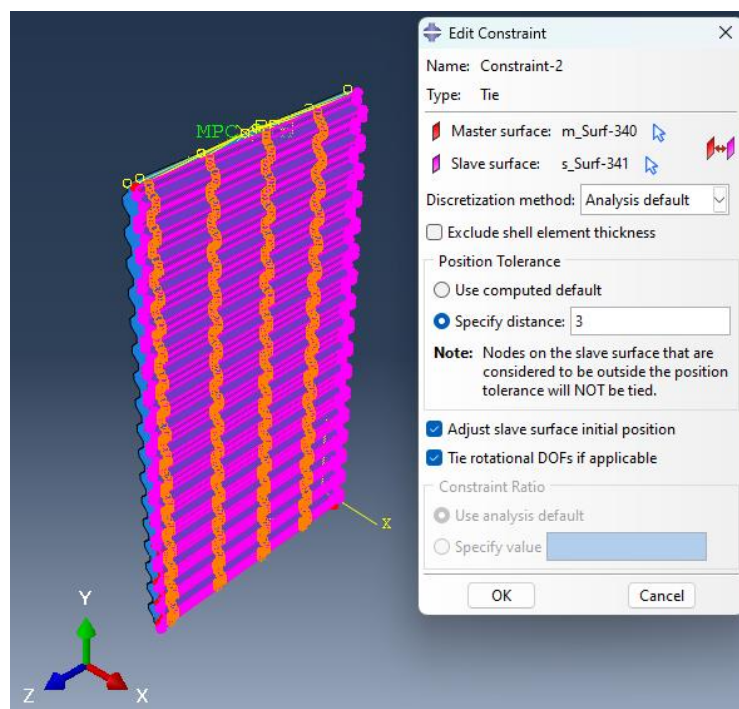


Slika 5.4 Karakteristike betonske ispune



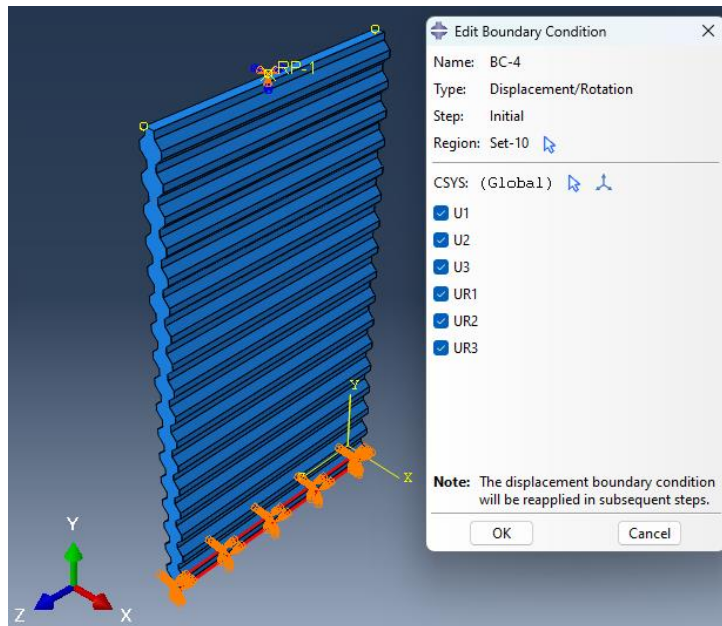
Slika 5.5 Betonska ispuna

Konstruktivno povezivanje profiliranog lima i betona se ostvaruje moždanicima dok je u modelu veza ostvarena pomoću „tie constraint“ uvjeta što je prikazano na slici 5.6 .



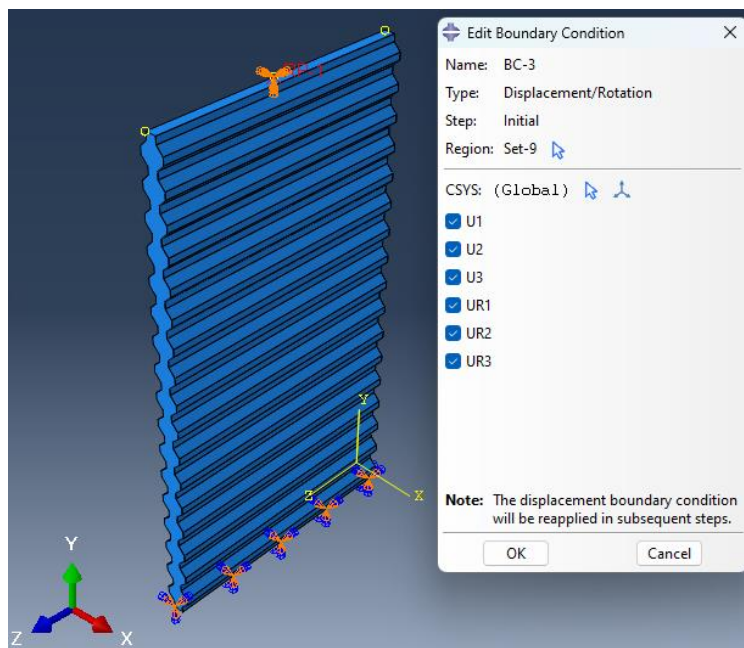
Slika 5.6 Veza između profiliranog lima i betona

Rubni uvjeti su zadani tako da su spriječene rotacije i pomaci u svim smjerovima kako je prikazano na slici 5.7.



Slika 5.7 Rubni uvjeti na dnu zida

Na vrhu zida su također spriječeni svi pomaci i rotacije, ali zadaje se prisilni pomak od 100 mm u poprečnom smjeru čime će se dobiti odnos poprečne sile u dnu zida i pomaka na vrhu kako je prikazano na slici 5.8.



Slika 5.8 Rubni uvjeti na vrhu zida

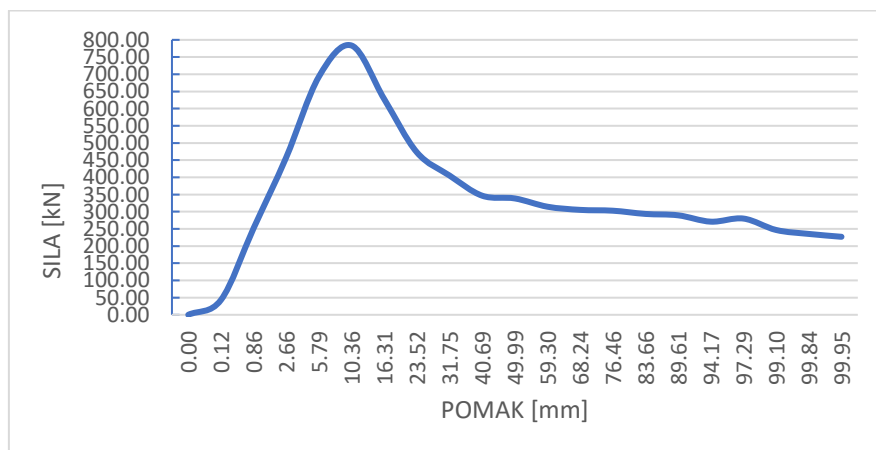
### 5.3. Rezultati numeričke analize

Za potrebe ovoga rada potreban nam je odnos poprečne reakcije i pomaka vrha zida.

Iz software-a su očitane vrijednosti prikazane u tablici 5.1, a na slici 5.9 prikazana je krivulja koja prikazuje odnos poprečne reakcije i pomaka.:

Tablica 5.1 Vrijednosti poprečne reakcije i pomaka vrha zida

F [kN]	d [mm]
0.00	0.00
43.22	0.12
252.00	0.86
458.35	2.66
693.16	5.79
783.50	10.36
627.50	16.31
472.70	23.52
405.20	31.75
346.50	40.69
338.60	49.99
314.50	59.30
305.30	68.24
302.90	76.46
293.50	83.66
289.50	89.61
271.00	94.17
280.00	97.29
246.80	99.10
235.30	99.84
227.00	99.95



Slika 5.9 Dijagram sila-pomak

## 6. PUSHOVER ANALIZA – N2 METODA

### 6.1. Razlog primjene i osnovna ograničenja

Razlog primjene metode je taj što pushover analiza daje uvid u konstruktivne pojedinosti koje utječu na odziv konstrukcije uslijed djelovanja jakih potresa. Pushover analizom moguće je odrediti čvrstoću i duktilnost sustava te ukazuje na moguće nedostatke u konstruktivnom oblikovanju koje nije moguće uočiti primjenom elastične analize. N2 metoda je približna metoda pa kao takva ima i određena ograničenja. Metoda je primjenjiva na 2D analizu. Osnovna pretpostavka analize je vremenski nezavisan oblik deformacije konstrukcije što znači da je analiza ograničena na konstrukcije koje vibriraju dominantno u prvom, odnosno drugom tonu. Za konstrukcije gdje su doprinosi viših tonova dominantni analiza ne daje prihvatljive rezultate.

### 6.2. Opis metode kroz korake

Koraci N2 metode prema [19] su:

#### 1.KORAK – PODACI

Seizmički zahtjevi izražavaju se elastičnim spektrom pseudoakceleracije kao funkcije vlastitog perioda, odnosno  $S_{ae} = f(T_n)$ . Prigušenje je uzeto u obzir samom tvorbom spektra. Analizira se 2D statički sustav, a potreban je nelinearni odnos sile i pomaka za elemente statičkog sustava. U standardnim okvirnim sustavima na nosačima se zadaju plastični zglobovi čije nelinearno ponašanje se opisuje bilinearnim ili trilinearnim odnosom momenta i rotacije. Plošni elementi, koji su predmet ovog rada, također se opisuju nelinearnim odnosom sila-pomak.

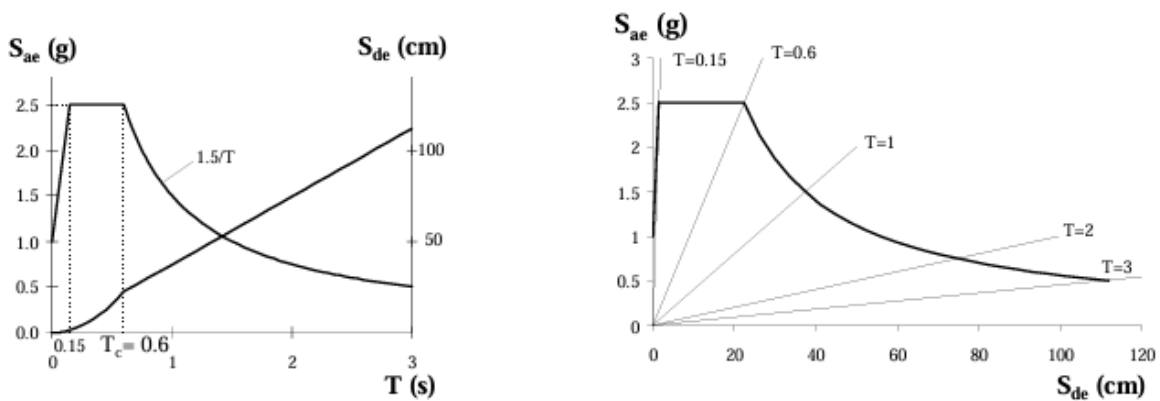
#### 2.KORAK – SEIZMIČKI ZAHTJEV U AD FORMATU

Primjenjuje se normalizirani elastični spektar pseudoubrzanja ovisno o vlastitom periodu konstrukcije s prigušenjem od 5% prikazan na slici 6.1. Za elastični SDOF sustav vrijedi sljedeći odnos vršnog pomaka i pseudoakceleracije:

$$S_{de} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad 6.1$$



Spektar ubrzanja i pomaka se mogu prikazati i u AD formatu:



Slika 6.1 Elastični spektar pomaka i ubrzanja u klasičnom i AD formatu (Izvor: [19])

Za neelastični SDOF sustav spektar ubrzanja i pomaka se određuju na sljedeći način:

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad 6.2$$

$$S_d = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad 6.3$$

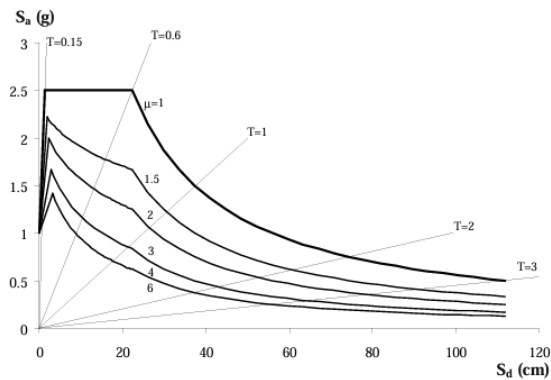
Gdje je  $\mu$  faktor duktilnosti,  $R_\mu$  faktor redukcije radi duktilnosti.

Za faktor redukcije se koristi bilinearni spektar:

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_c} + 1; T < T_c \quad 6.4$$

$$R_\mu = \mu; T > T_c \quad 6.5$$

Gdje je  $T_c$  period koji dijeli spektar na dio spektra s konstantnom akceleracijom i dio sa konstantnom brzinom. Za periode  $T > T_c$  pomak neelastičnog sustava jednak je pomaku elastičnog sustava s istim periodom. Pomoću formula (6.2) i (6.3) uz konstantu vrijednost faktora duktilnosti elastični spektar se može pretvoriti u neelastični spektar prikazan na slici 6.2.



Slika 6.2 Elastični i pripadni neelastični spektri ovisno o faktoru duktilnosti (Izvor: [19])

### 3.KORAK – PUSHOVER

Konstrukcija se opterećuje monotono rastućim bočnim silama koje predstavljaju inercijalne sile koje djeluju uslijed seizmičkog djelovanja. Bočne sile se inkrementalno povećavaju što dovodi do postupnog popuštanja pojedinih elemenata čime se postupno smanjuje krutost. Rezultat analize se u praksi najčešće prikazuje odnosom pomaka vrha konstrukcije i poprečne reakcije u temelju. Ograničenja za odabir raspodjele bočnih sila nema, ali se u praksi koriste raspodjele koje su se pokazale kao dobra pretpostavka. Vektor bočnog opterećenja dan je izrazom:

$$\{P\}=p[M]\{\Phi\} \quad 6.6$$

$p$  – skalar kojim se kontrolira iznos bočnih sila

$[M]$  – dijagonalna matrica masa

$\{\Phi\}$  – vektor pretpostavljenog oblika pomaka

Osnovna pretpostavka metode je konstantan oblik pomaka za vrijeme trajanja potresa odnosno da konstrukcija dominantno titra u jednom modu, a iz fizikalnih razloga najpogodniji odabir pomaka je onaj koji odgovara obliku prvog tona jer tada raspodjela poprečnih sila odgovara raspodjeli efektivnih seizmičkih sila.

### 4.EKVIVALENTNI SDOF MODEL I KRIVULJA KAPACITETA

U N2 metodi seizmički zahtjev određen je korištenjem spektra odziva u kojem je uzeta u obzir i neelastično ponašanje prema tome konstrukciju bi trebalo modelirati kao SDOF sustav. Za prikaz transformacije MDOF sustava u SDOF sustav pokazat će se način koji se koristi u N2 metodi.

Jednadžba gibanja MDOF sustava je sljedeća:

$$[M]\{D\}'' + \{R\} = [M]\{1\}a \quad 6.7$$

$[M]$  – dijagonalna matrica masa

$\{D\}$  – vektor pomaka

$\{R\}$  – vektor unutarnjih sila

Vektor pomaka jednak je:

$$\{U\} = \{\Phi\}D_t \quad 6.8$$

$D_t$  – pomak vrha konstrukcije u ovisnosti o vremenu

Iz ravnoteže sila vrijedi:

$$\{R\} = \{P\} \quad 6.9$$

$\{R\}$  – vektor unutarnjih sila

$\{P\}$  – bočno opterećenje

Uvrštavanjem jednadžbi (6.6), (6.8) i (6.9) u jednadžbu (6.7) te množenjem s lijeva s  $\{\Phi\}^T$  dobije se:

$$\{\Phi\}^T [M] \{\Phi\} D_t'' + \{\Phi\}^T [M] \{\Phi\} p = -\{\Phi\}^T [M] \{1\} a \quad 6.10$$

Zatim dijeljenjem s  $\{\Phi\}^T [M] \{1\}$  dobije se:

$$m^* D^{*''} + F^* = -m^* a \quad 6.11$$

Gdje su:

$m^*$  – masa ekvivalentnog SDOF sustava

$$m^* = \sum_i^n m_i \cdot \Phi_i \quad 6.12$$

$d^*$  – pomak ekvivalentnog SDOF

$$d^* = \frac{d_t}{\Gamma} \quad 6.13$$

$F^*$  - sila ekvivalentnog SDOF

$$F^* = \frac{V}{\Gamma} \quad 6.14$$

$V$  – sila MDOF sustava

$$V = \{\Phi\}^T [M] \{1\} p = p m^* \quad 6.15$$

Konstanta transformacije  $\Gamma$  iz MDOF u SDOF je određena izrazom:

$$\Gamma = \frac{\{\Phi\}^T [M] \{1\}}{\{\Phi\}^T [M] \{\Phi\}} = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2} \quad 6.16$$

Isti faktor transformacije se koristi i za silu i za pomak stoga krivulja dobivena za MDOF vrijedi i za SDOF uz korekciju mjerila na osima. Prema tome krutost SDOF sustava jednaka je kao i krutost MDOF sustava.

Elastični period idealnog bilenarnog sustava jednak je:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_y^*}{F_y^*}} \quad 6.17$$

$d_y^*$  - pomak na početku popuštanja

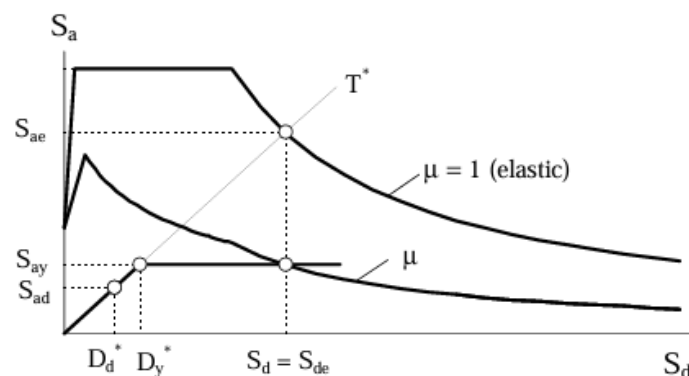
$F_y^*$  - sila pri popuštanju

Krivulja kapaciteta u AD formatu se dobije dijeljenjem sile  $F_y^*$  s ekvivalentom masom  $m^*$ :

$$S_a = \frac{F_y^*}{m^*} \quad 6.18$$

### 5. SEIZMIČKI ZAHTJEV ZA EKVIVALENTNI SDOF SUSTAV

Za SDOF sustave sa dugim i srednje dugim periodom seizmički zahtjev se određuje prema slici 6.3.



Slika 6.3 Elastični i neelastični spektar i dijagram kapaciteta (Izvor: [19])

Presjecište pravca koji odgovara elastičnom periodu idealiziranog SDOF sustava  $T^*$  s elastičnim spektrom  $S_{ae}$  dobivamo zahtijevanu čvrstoću za elastično ponašanje i pripadni pomak.  $S_{ay}$  predstavlja zahtjev akceleracije i kapaciteta za neelastični sustav. Faktor redukcije određuje se na sljedeći način:

$$R_{\mu} = \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}} \quad 6.19$$

Ako je period  $T^* > T_c$  tada je pomak neelastičnog sustava jednak pomaku elastičnog sustava.

$$S_d = S_{de}(T^*) \quad 6.20$$

$$R_{\mu} = \mu \quad 6.21$$

Ako je period  $T^* < T_c$  tada se duktilnost određuje prema sljedećem izrazu:

$$\mu = (R_{\mu} - 1) \frac{T_c}{T^*} + 1 \quad 6.22$$

Pomak:

$$S_d = \mu D_y^* = \frac{S_{de}}{R_{\mu}} \left( 1 + (R_{\mu} - 1) \frac{T_c}{T^*} \right) \quad 6.23$$

## 6. SEIZMIČKI ZAHTJEV ZA MDOF SUSTAV

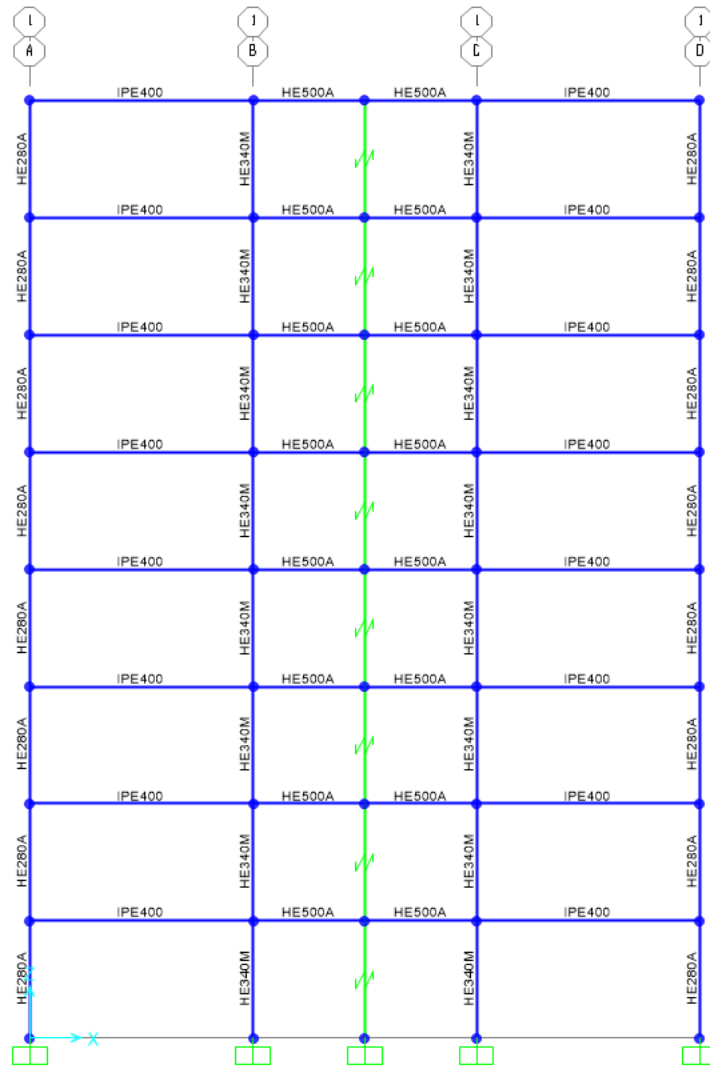
Zahtijevani pomak za SDOF sustav se pomoću faktora transformacije pretvori u zahtijevani pomak za MDOF sustav:

$$D_t = S_d^{\square} \cdot \Gamma \quad 6.24$$

### 6.3. Proračun

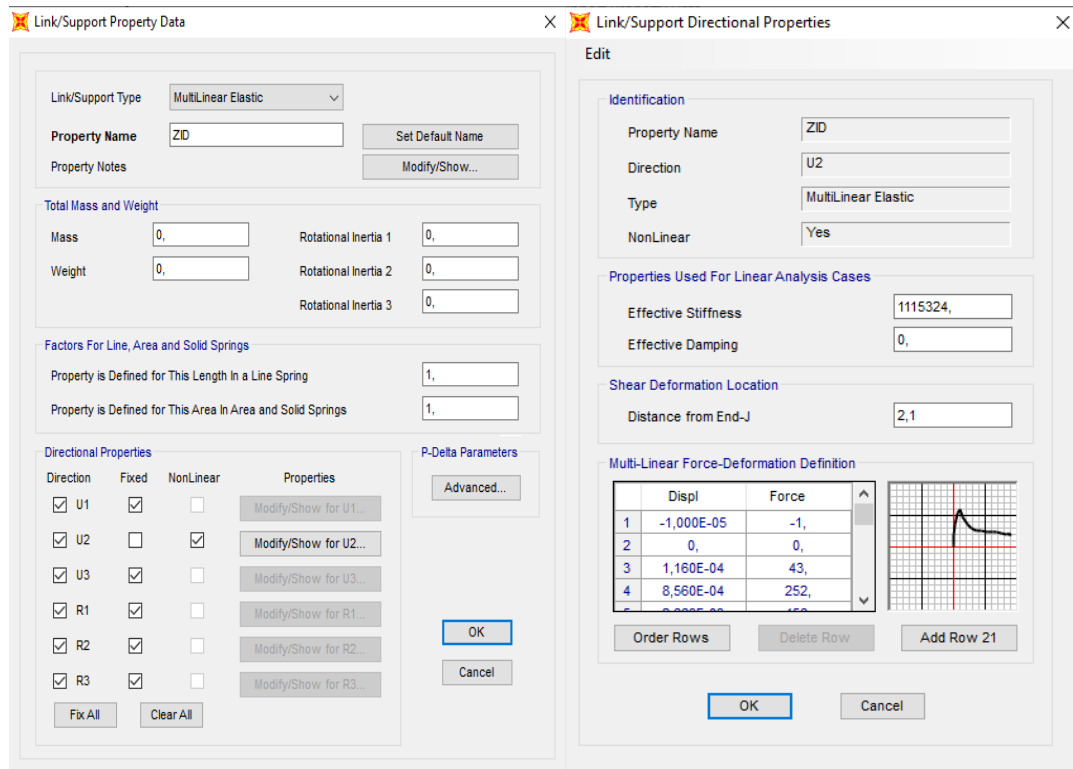
#### 6.3.1. Pushover analiza

U programu SAP 2000 provedena je 2D analiza trobrodnog okvira lateralno stabiliziranog spregnutim posmičnim zidom koji je prikazan na slici 6.4. Okvir će se analizirati za polovicu ukupne mase obzirom da u tom smjeru dva okvira sudjeluju u prijenosu horizontalnog odnosno potresnog djelovanja.



Slika 6.4 2D model

Pushover analizom provjerava se zahtjev dvojnosti sustava. Cilj je da se seizmička energija disipira plastičnim deformiranjem kompozitnih posmičnih zidova dok svi ostali elementi odnosno nosači i stupovi okvira ostanu u elastičnom području. Na nosačima su zadani plastični zglobovi, a posmični zidovi su modelirani link elementima u kojemu je zadana nelinearna krivulja sila-pomak dobivena analizom u programu Abaqus kako je prikazano na slici 6.5.



Slika 6.5 Zadavanje karakteristika link elemenata

Konstrukcija se opterećuje raspodelom bočnog opterećenja proporcionalno pomacima prvog moda s kontrolnim pomakom vrha konstrukcije od 0,15m.

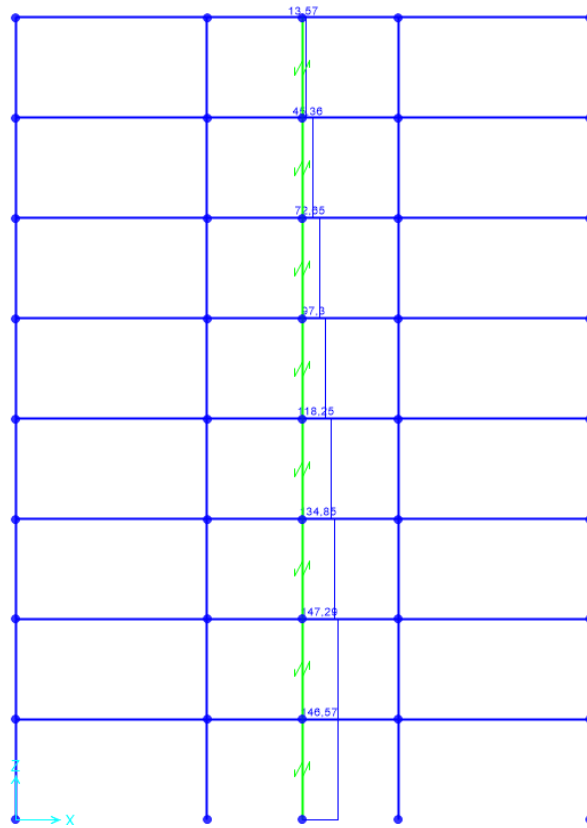
Normalizirani vektor pomaka prvog moda:

$$\{\Phi\}^T = [0,18 \ 0,36 \ 0,53 \ 0,68 \ 0,80 \ 0,97 \ 1]$$

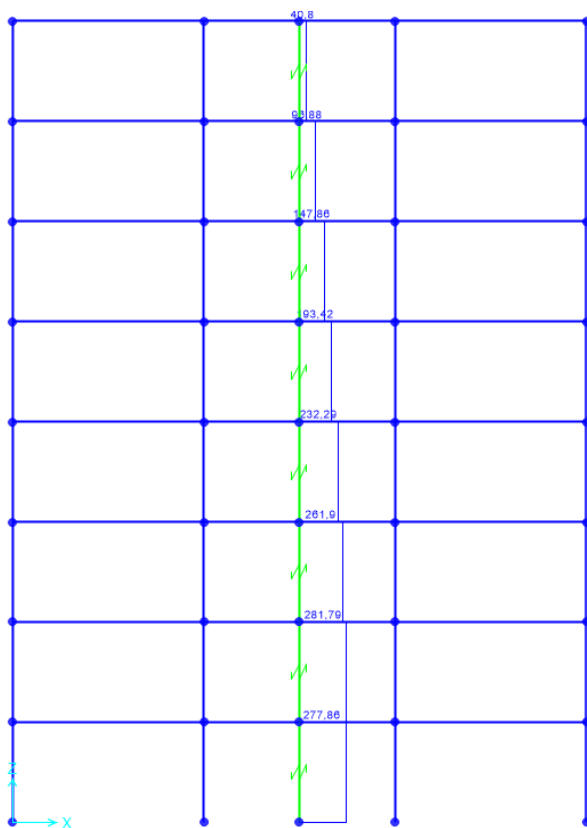
Matrica masa:

$$[M] = \begin{bmatrix} 169 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 169 \end{bmatrix}, n \cdot n = 8 \cdot 8$$

Opterećenje se nanosi u 50 koraka. Na slikama 6.6 do 6.56 će biti prikazano po koracima kako se mijenjala posmična sila u link elementima koji predstavljaju posmične zidove.

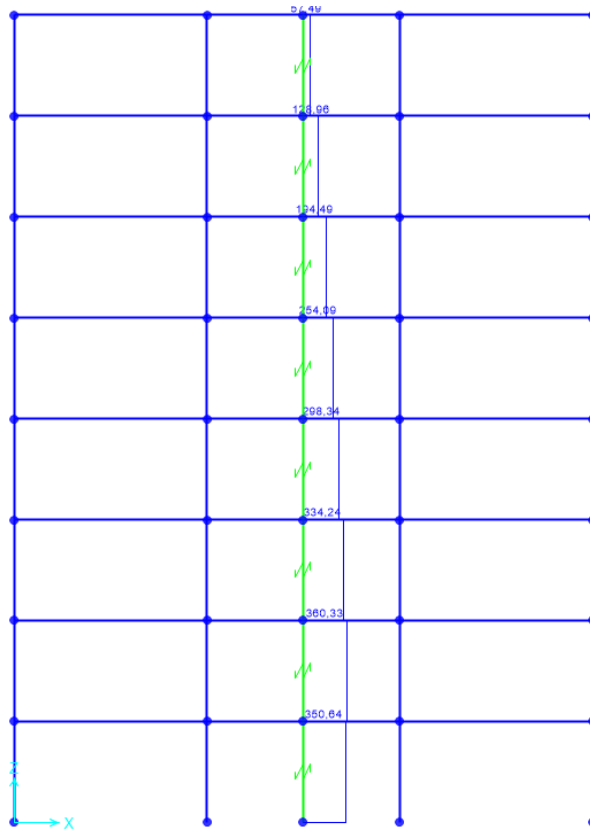


Slika 6.6 1. korak

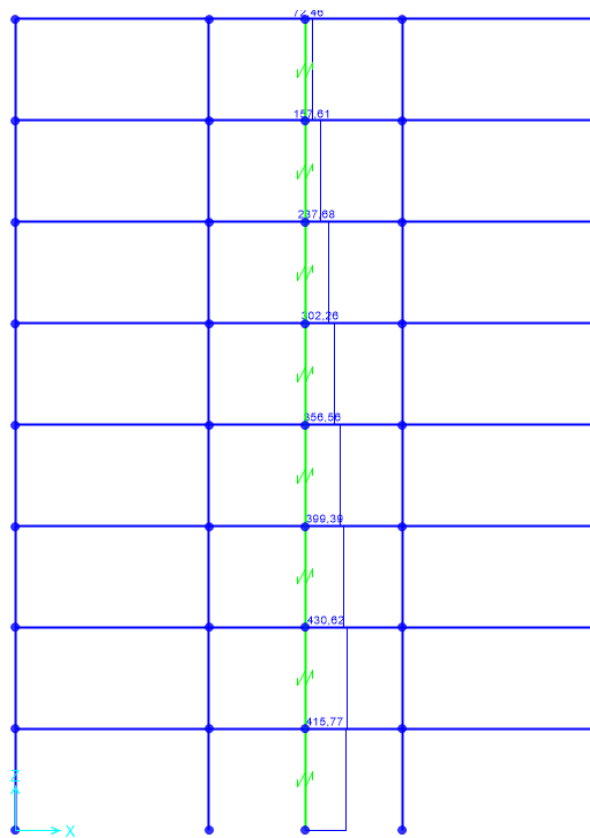


Slika 6.7 2. korak

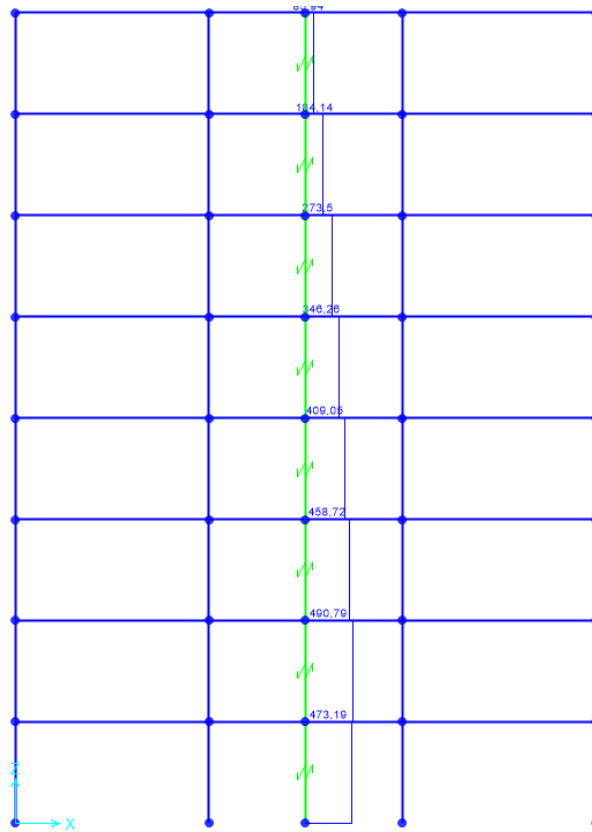




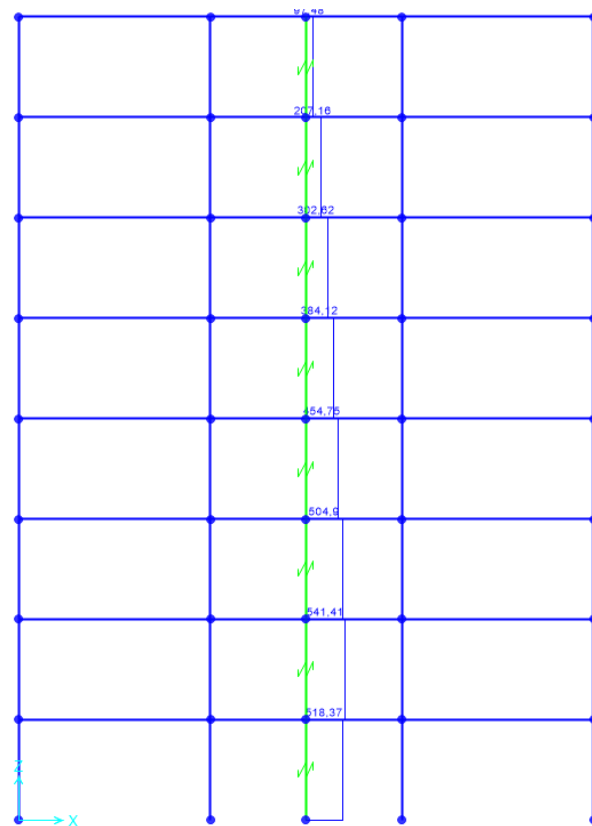
Slika 6.8 3. korak



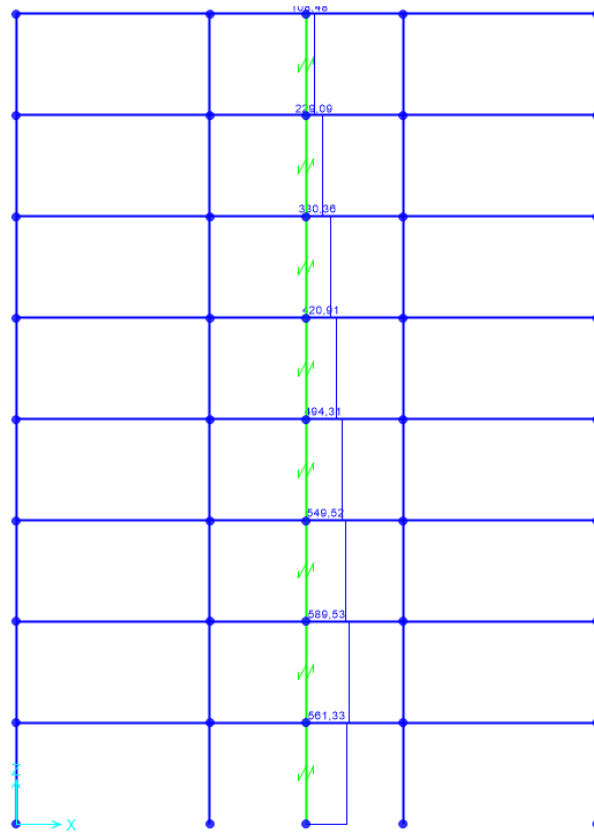
Slika 6.9 4. korak



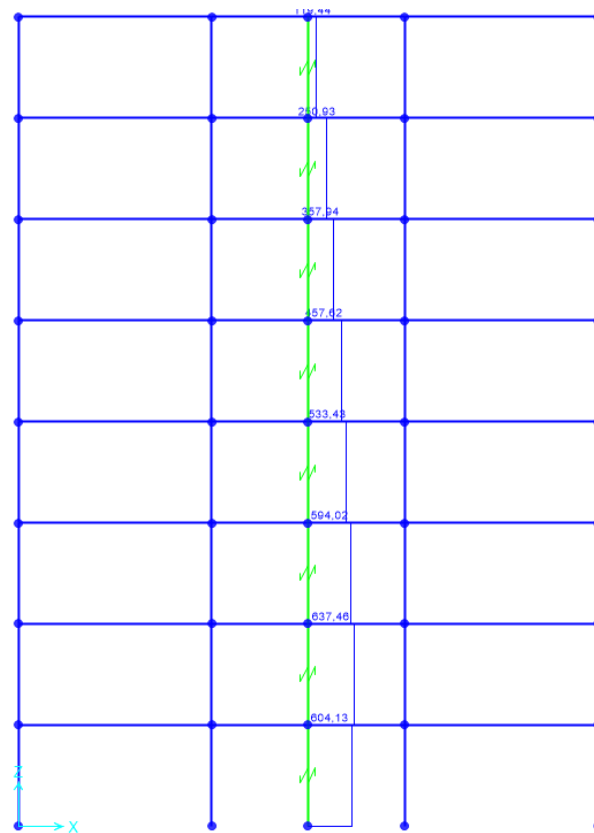
Slika 6.10 5. korak



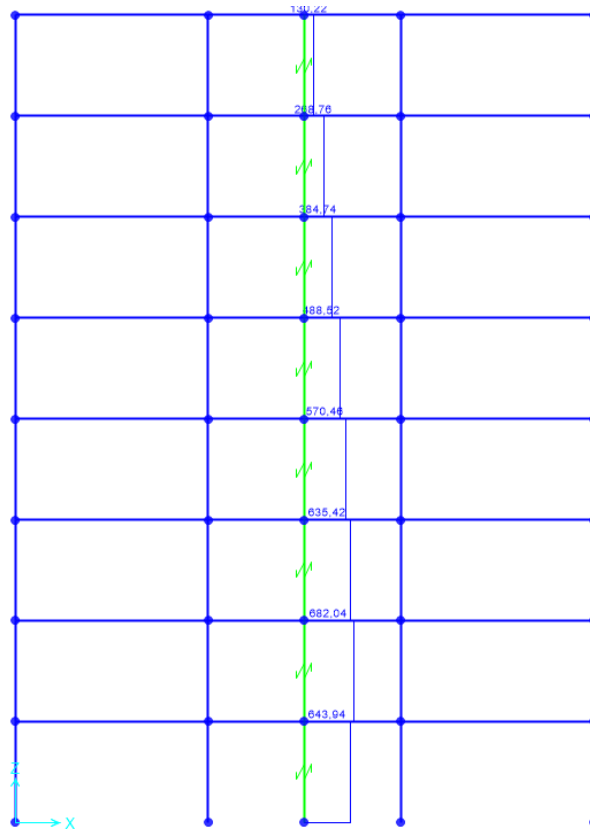
Slika 6.11 6. korak



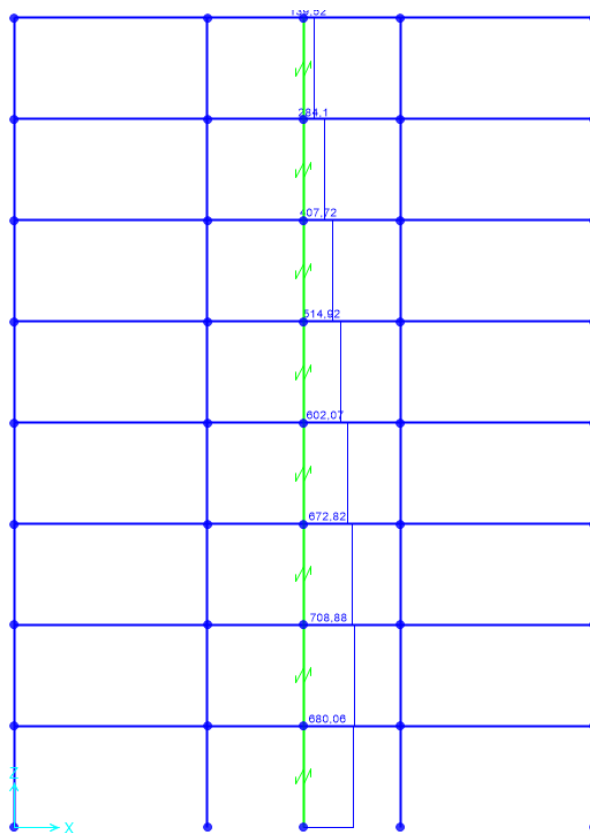
Slika 6.12 7. korak



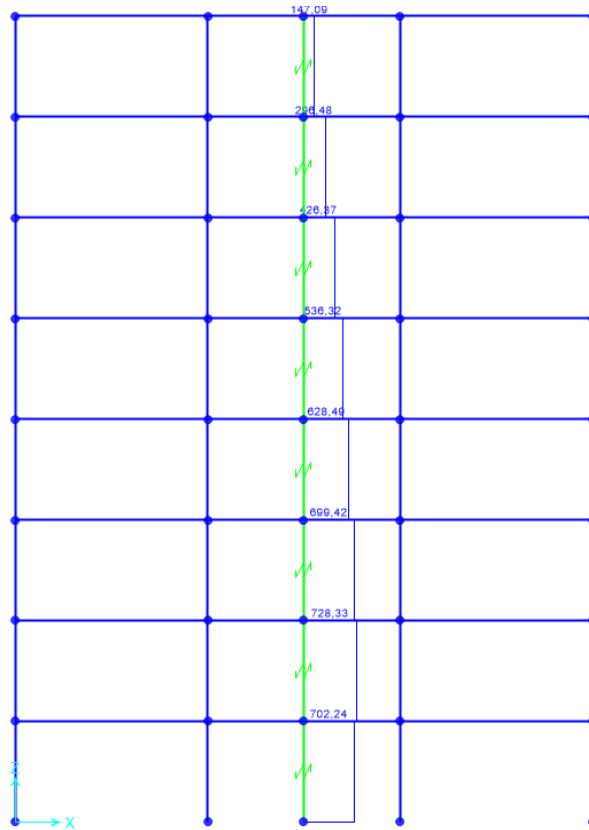
Slika 6.13 8. korak



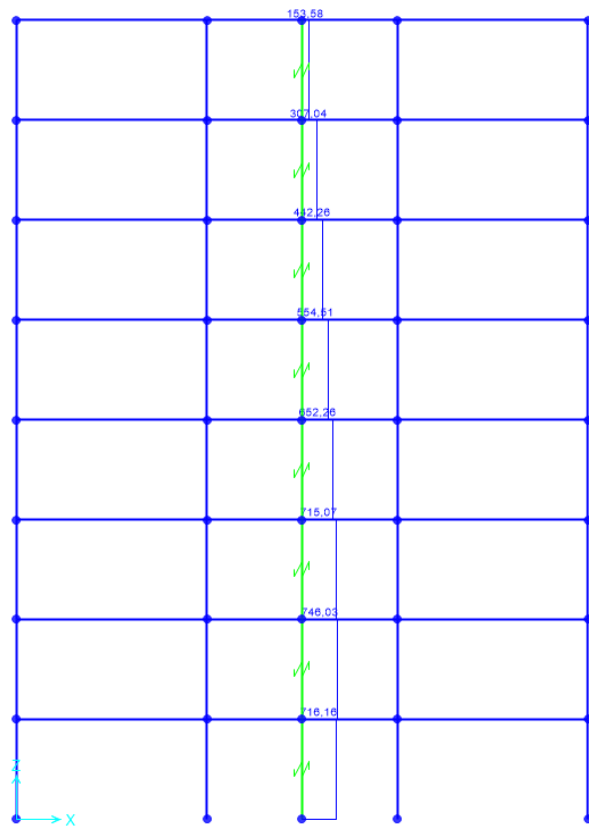
Slika 6.14 9. korak



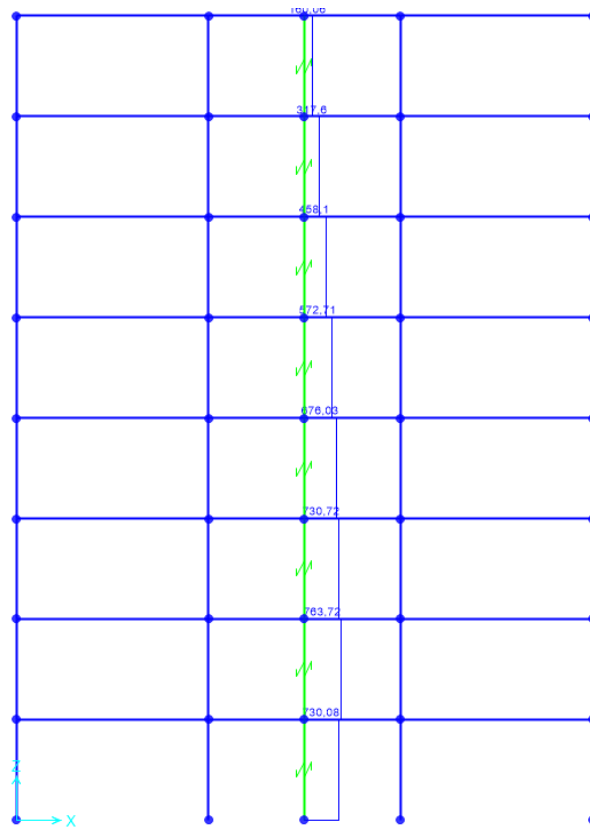
Slika 6.15 10. korak



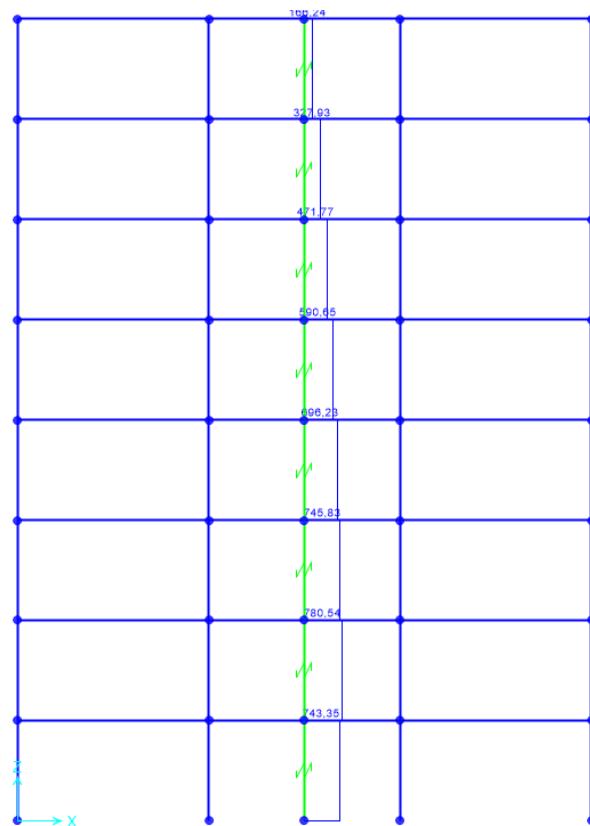
Slika 6.16 11. korak



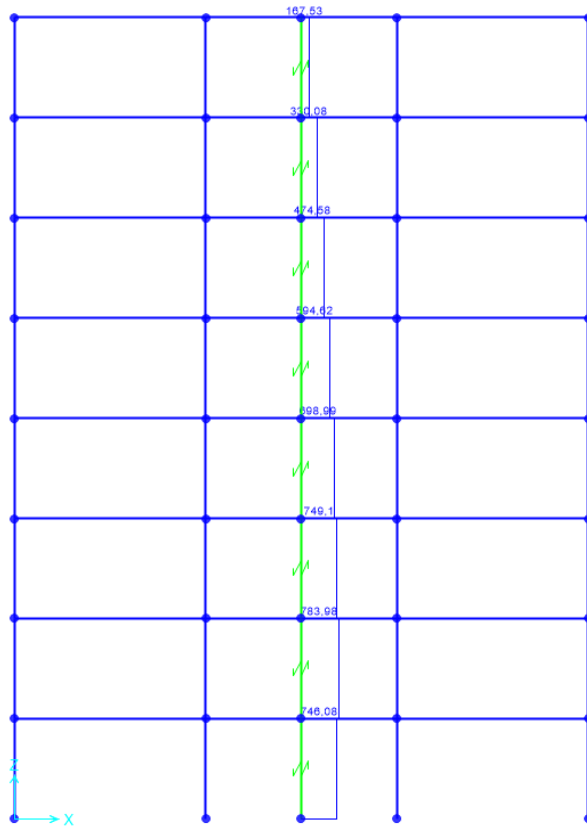
Slika 6.17 12. korak



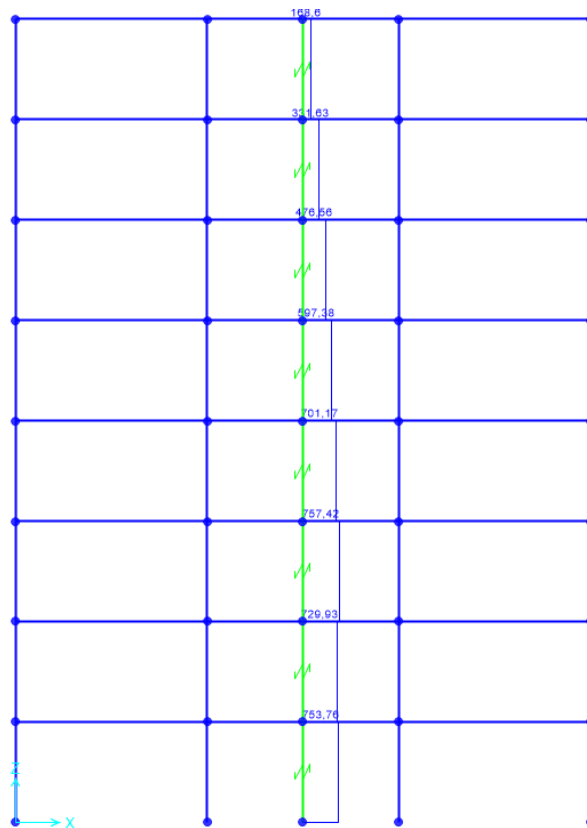
Slika 6.18 13. korak



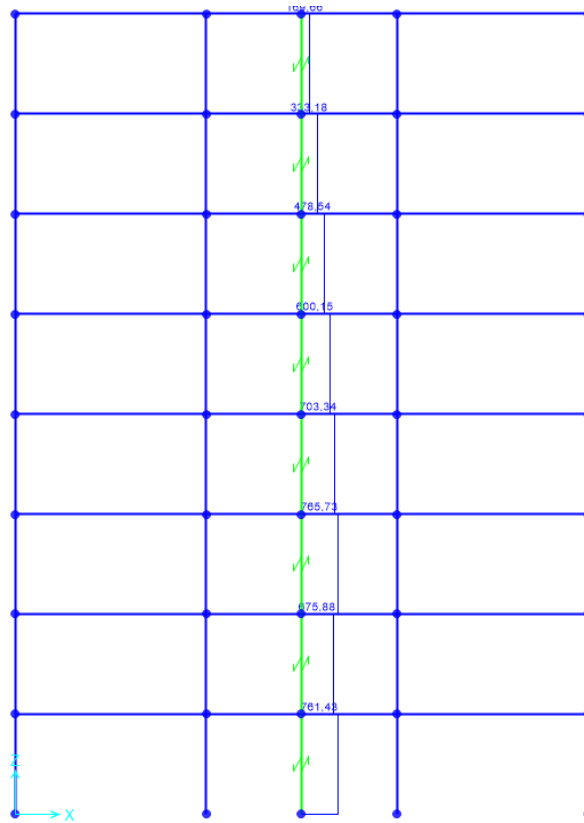
Slika 6.19 14. korak



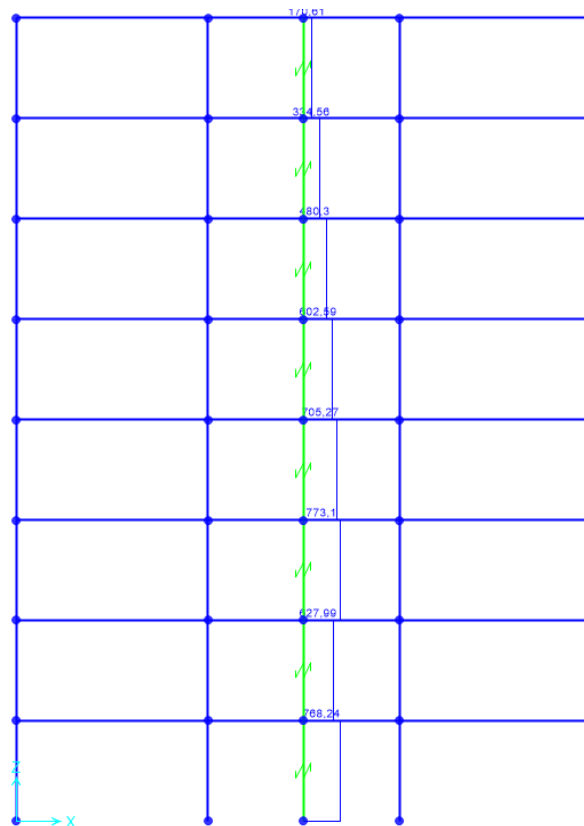
Slika 6.20 15. korak



Slika 6.21 16. korak

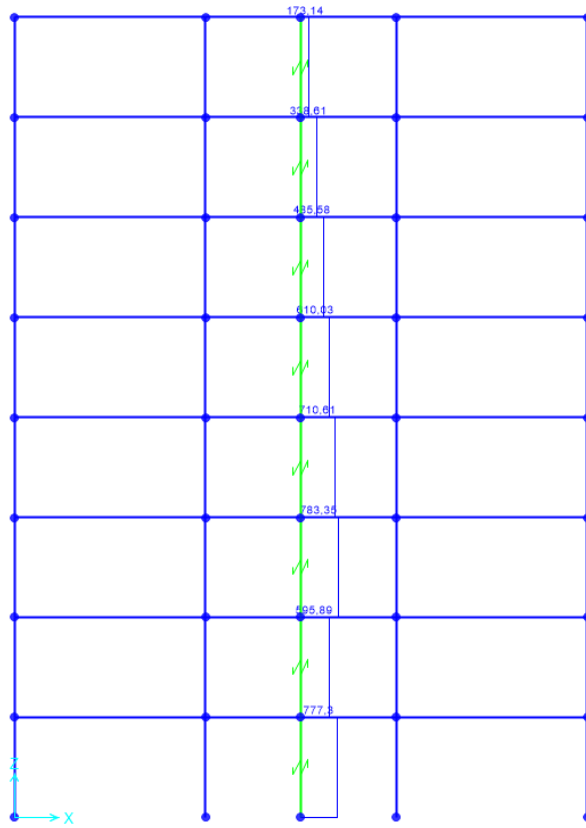


Slika 6.22 17. korak

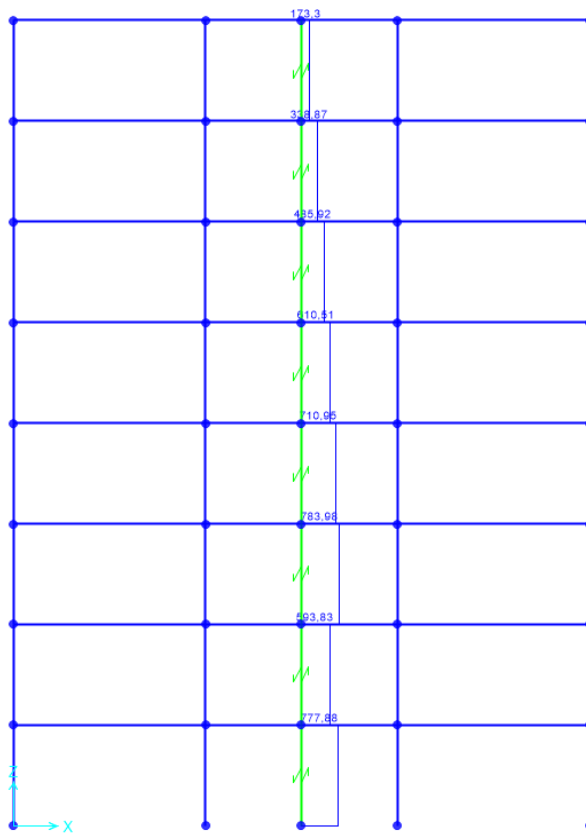


Slika 6.23 18. korak

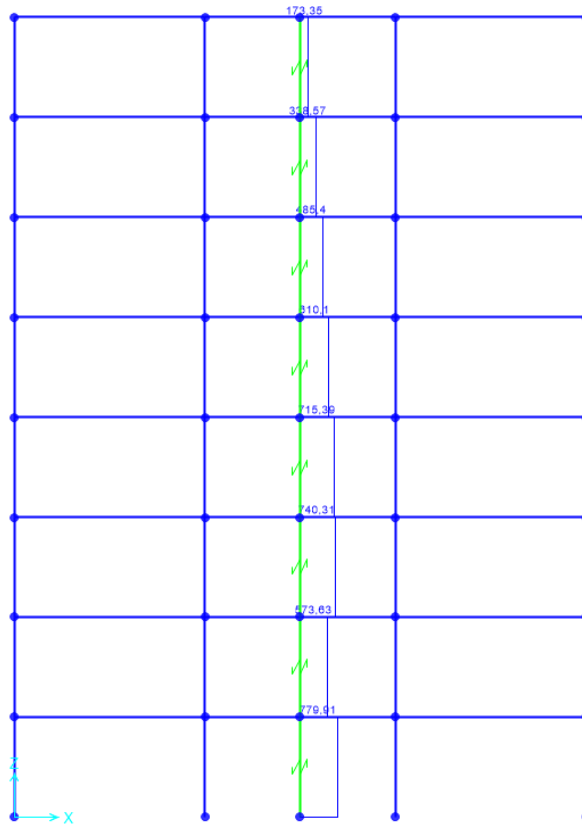




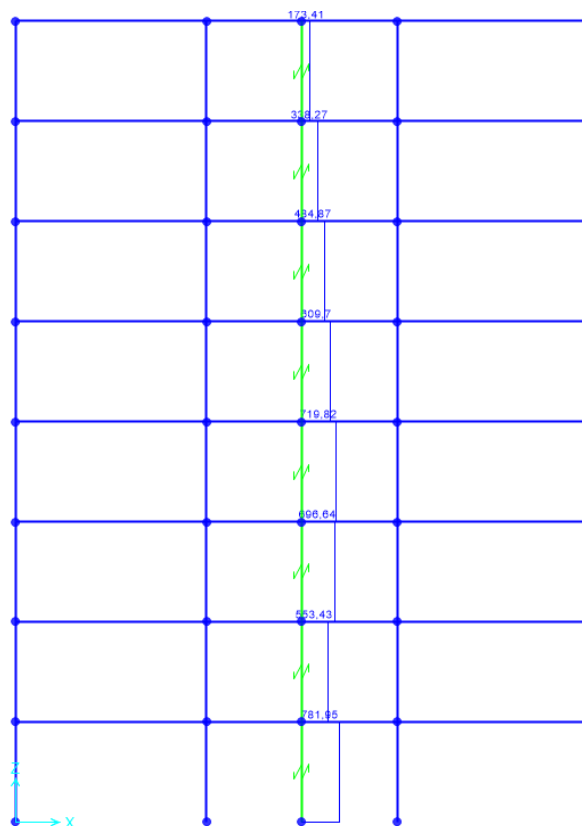
Slika 6.24 19. korak



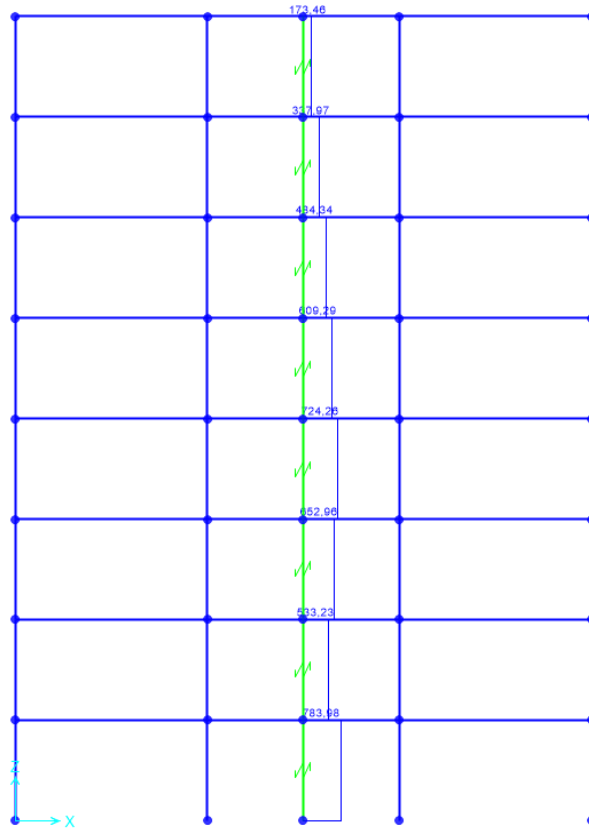
Slika 6.25 20. korak



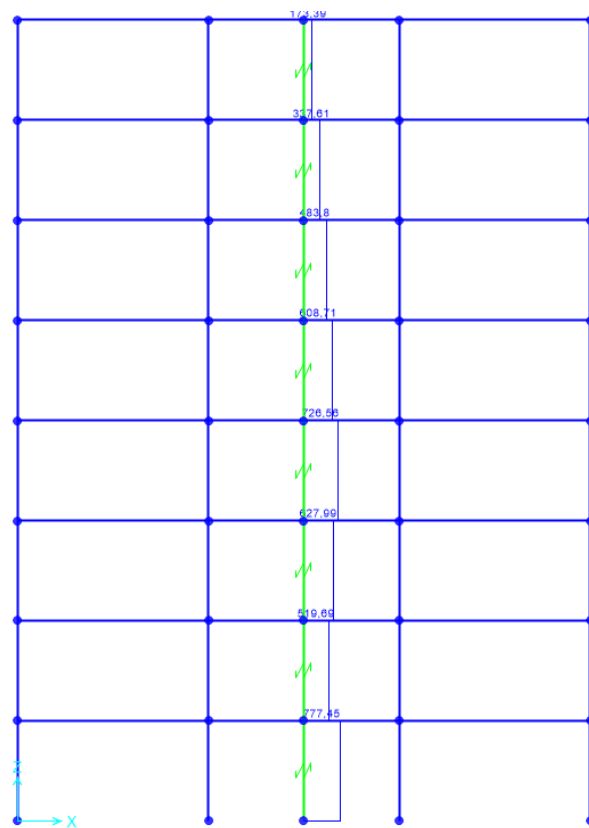
Slika 6.26 21. korak



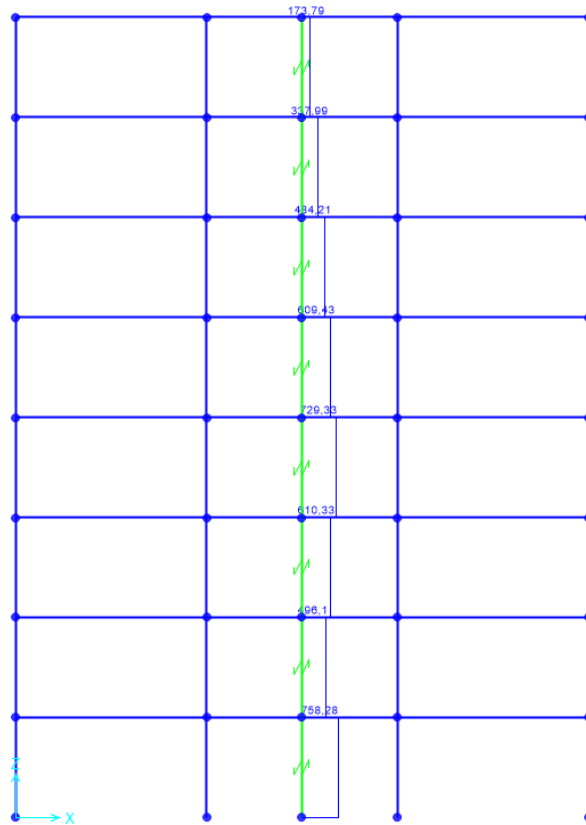
Slika 6.27 22. korak



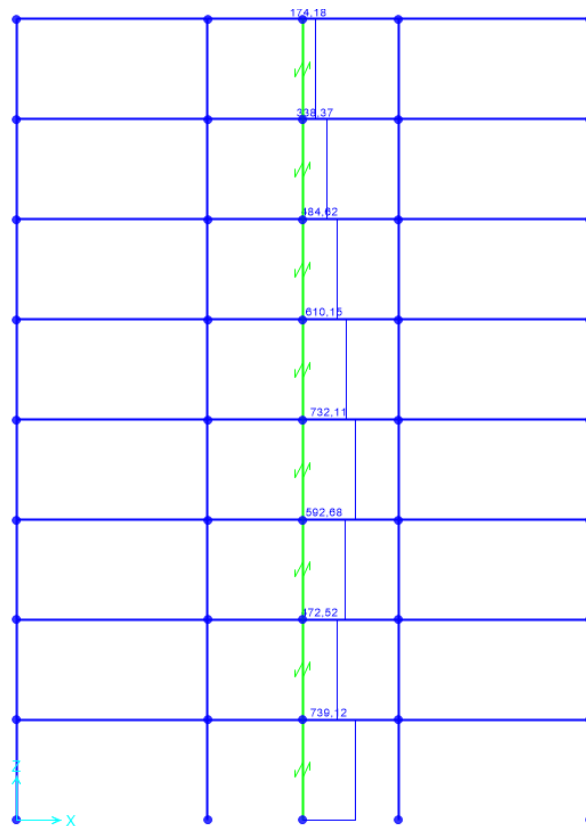
Slika 6.28 23. korak



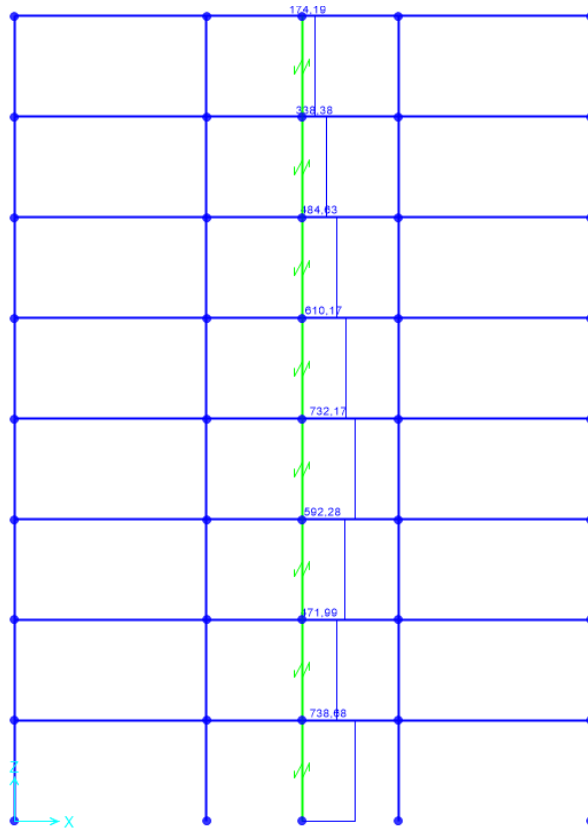
Slika 6.29 24. korak



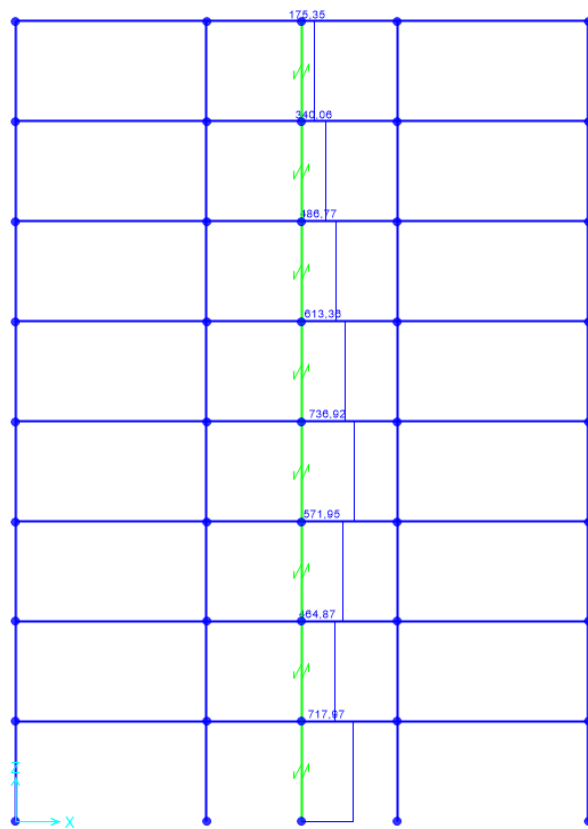
Slika 6.30 25. korak



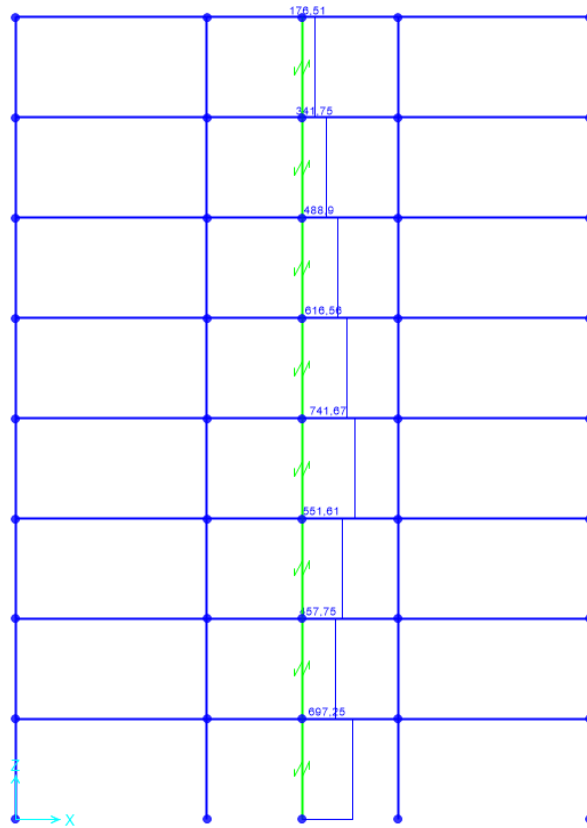
Slika 6.31 26. korak



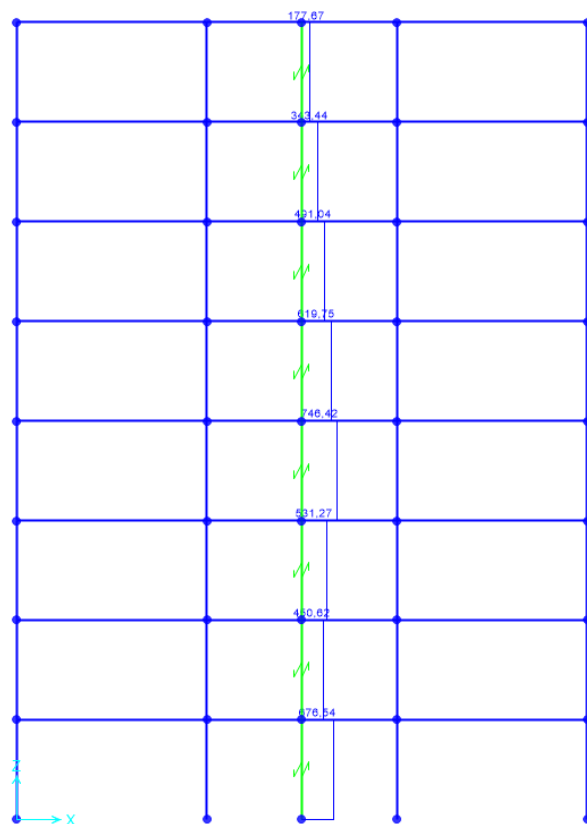
Slika 6.32 27. korak



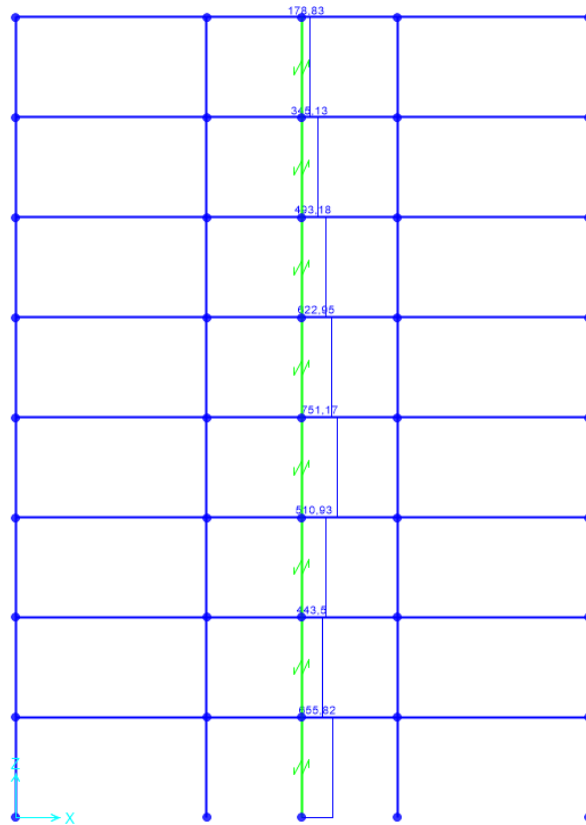
Slika 6.33 28. korak



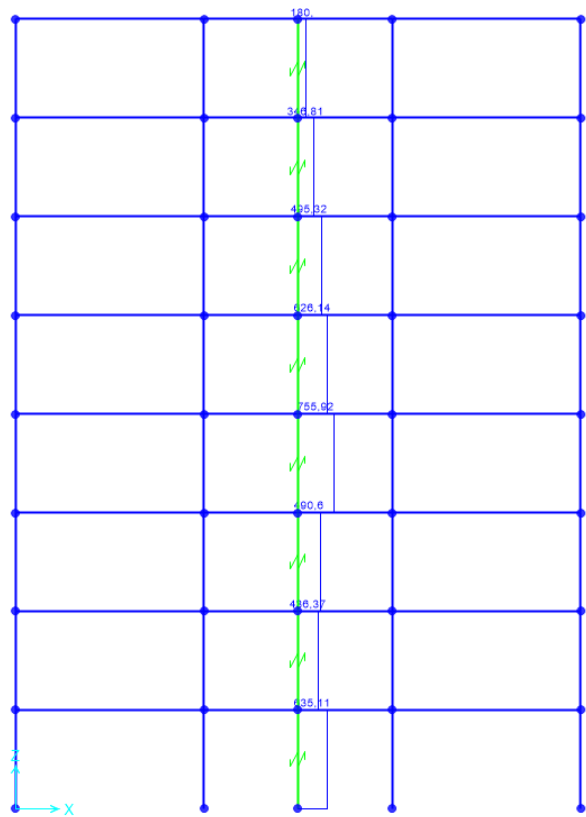
Slika 6.34 29. korak



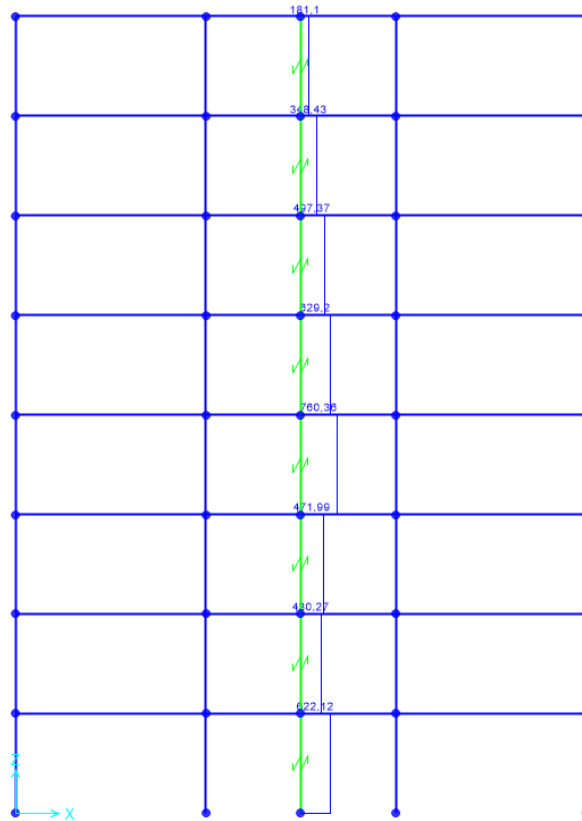
Slika 6.35 30. korak



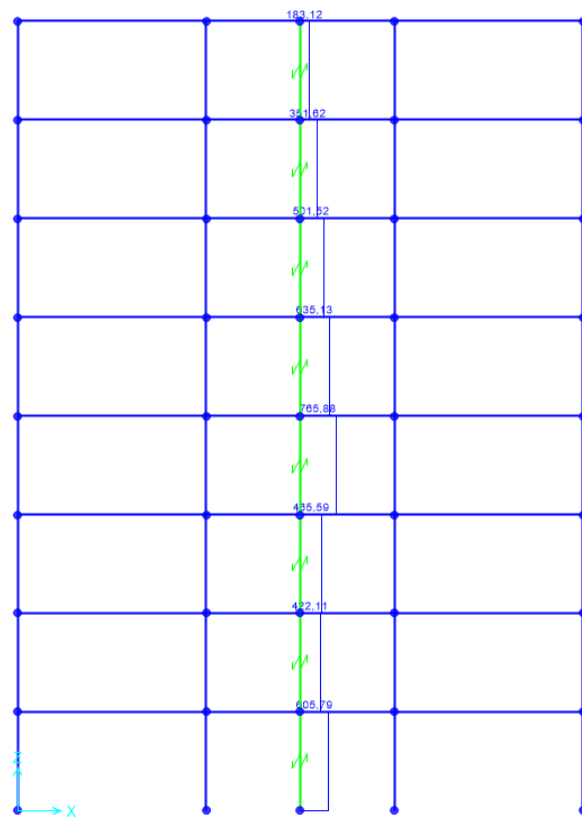
Slika 6.36 31. korak



Slika 6.37 32. korak

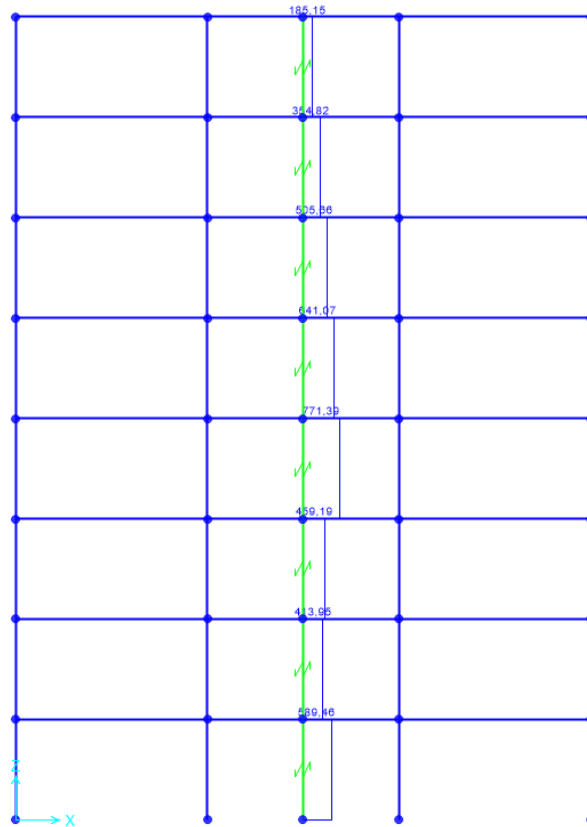


Slika 6.38 33. korak

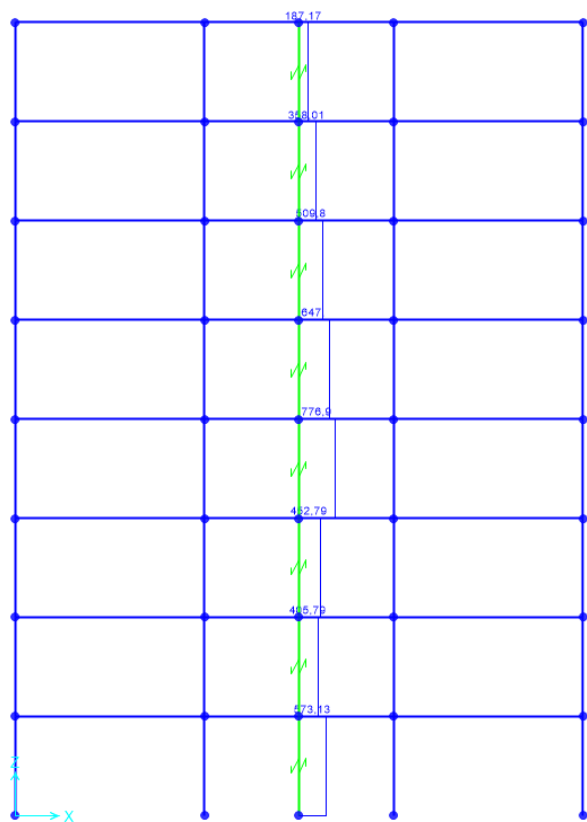


Slika 6.39 34. korak

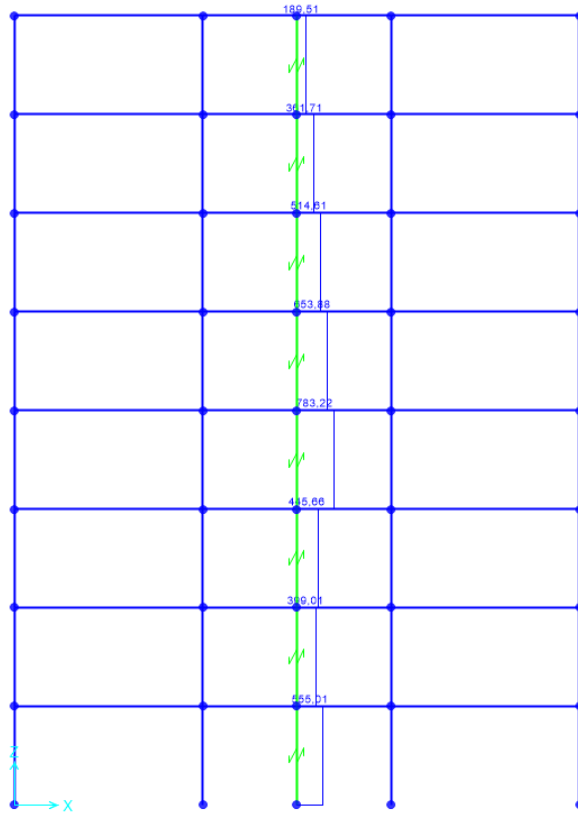




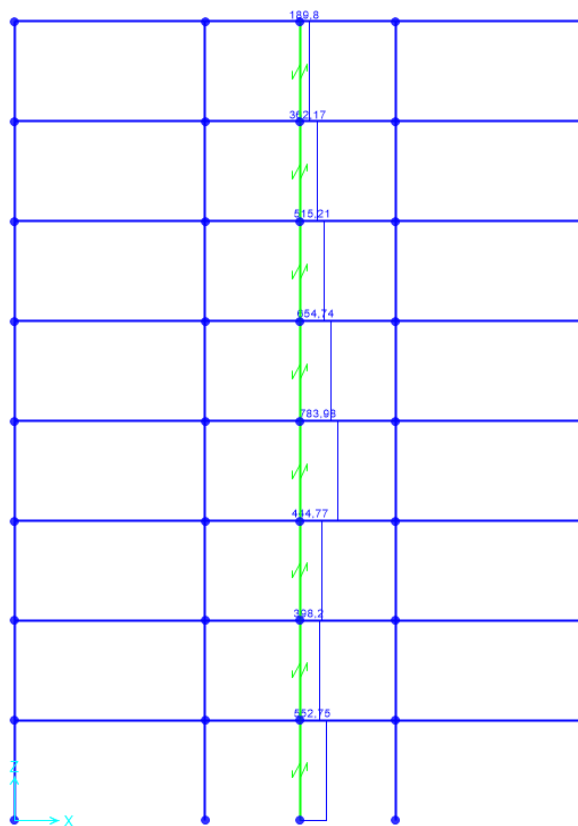
Slika 6.40 35. korak



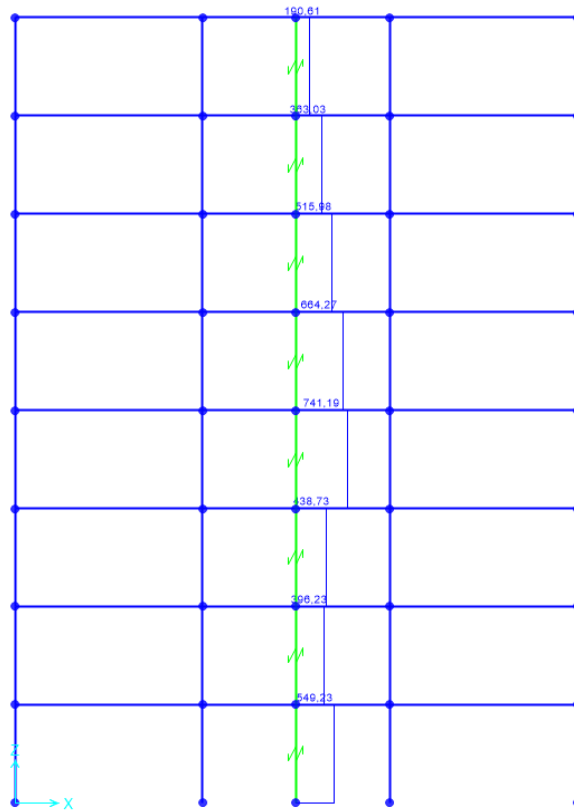
Slika 6.41 36. korak



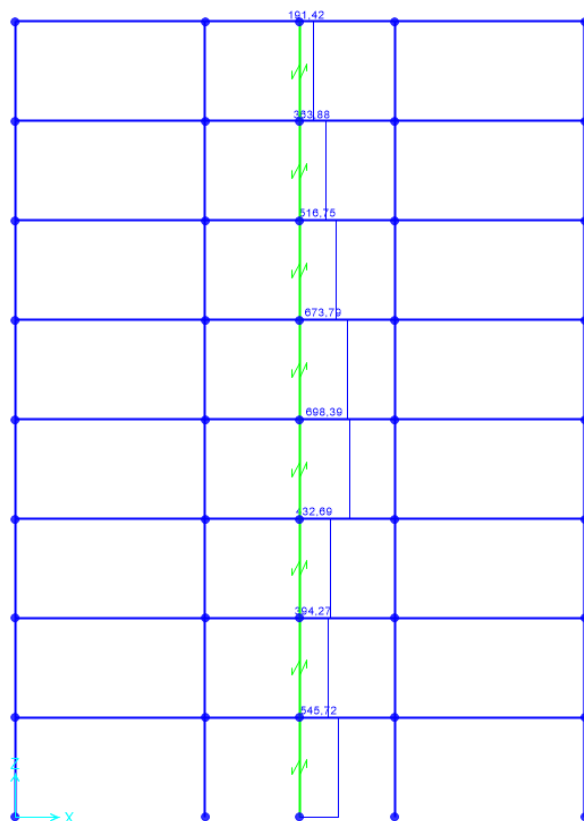
Slika 6.42 37. korak



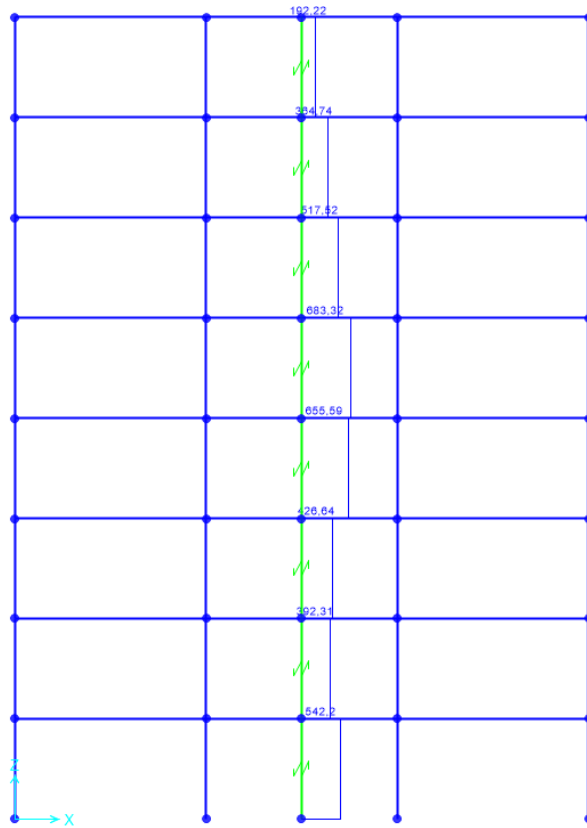
Slika 6.43 38. korak



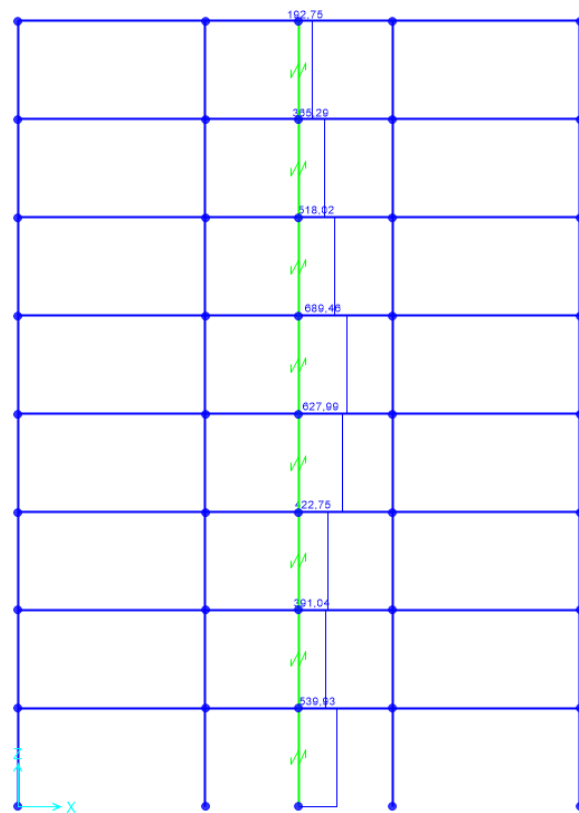
Slika 6.44 39. korak



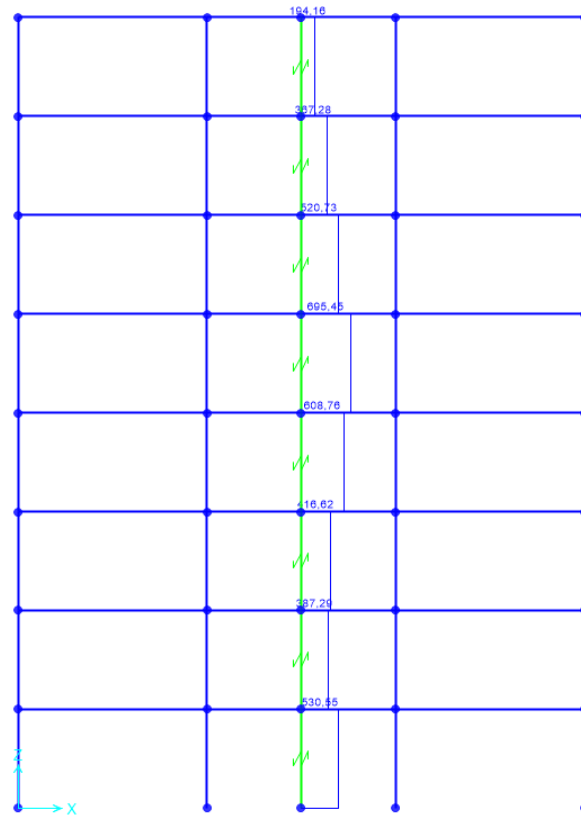
Slika 6.45 40. korak



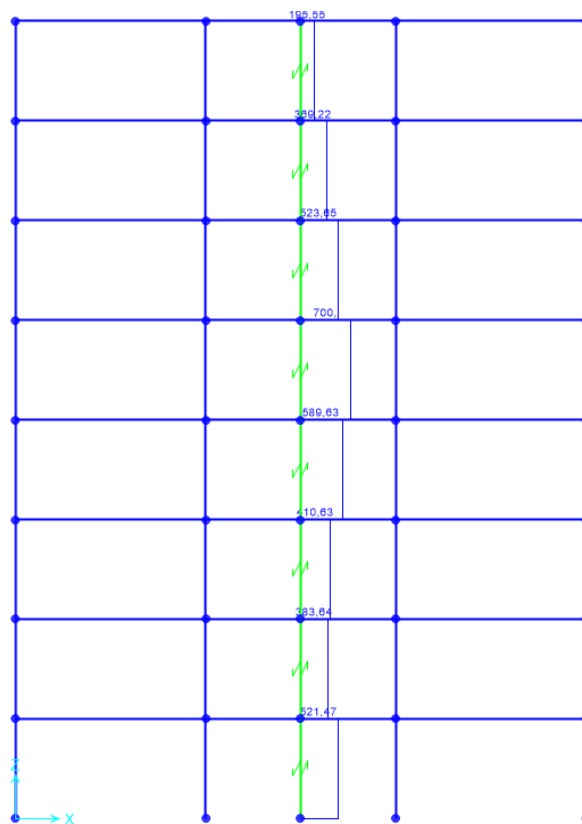
Slika 6.46 41. korak



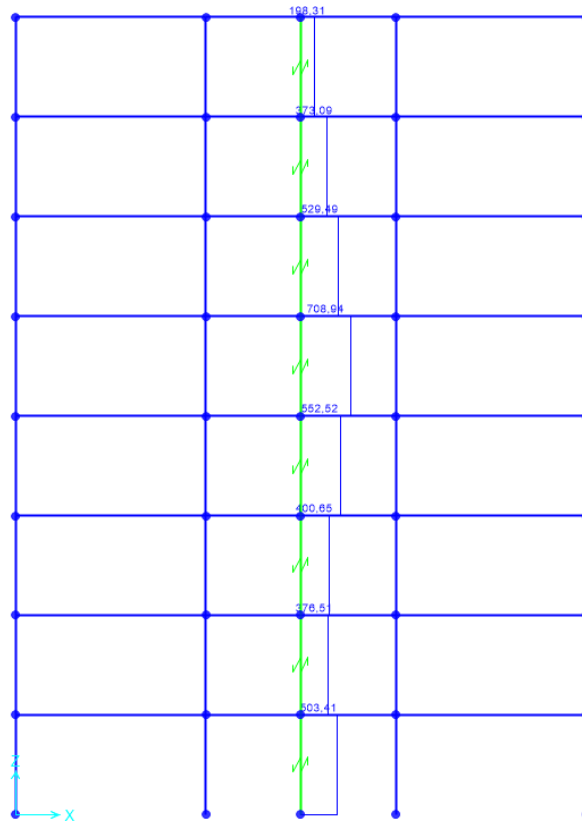
Slika 6.47 42. korak



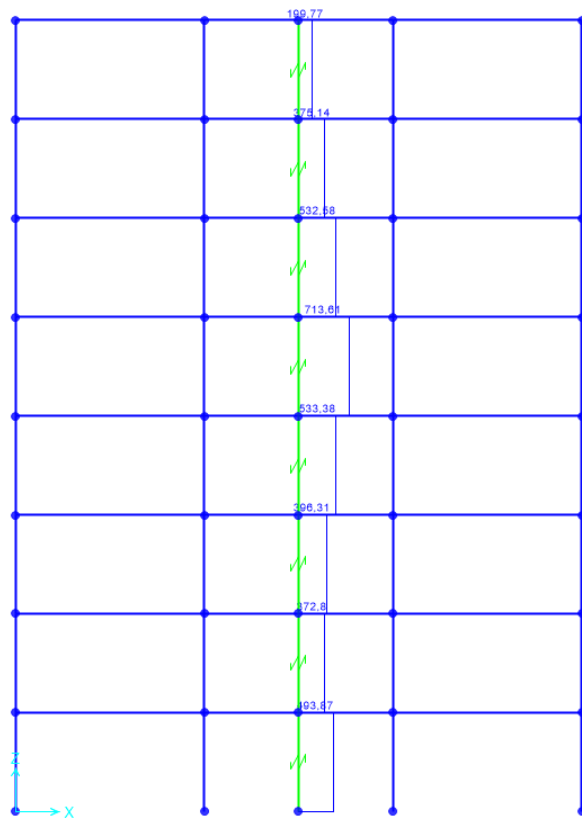
Slika 6.48 43. korak



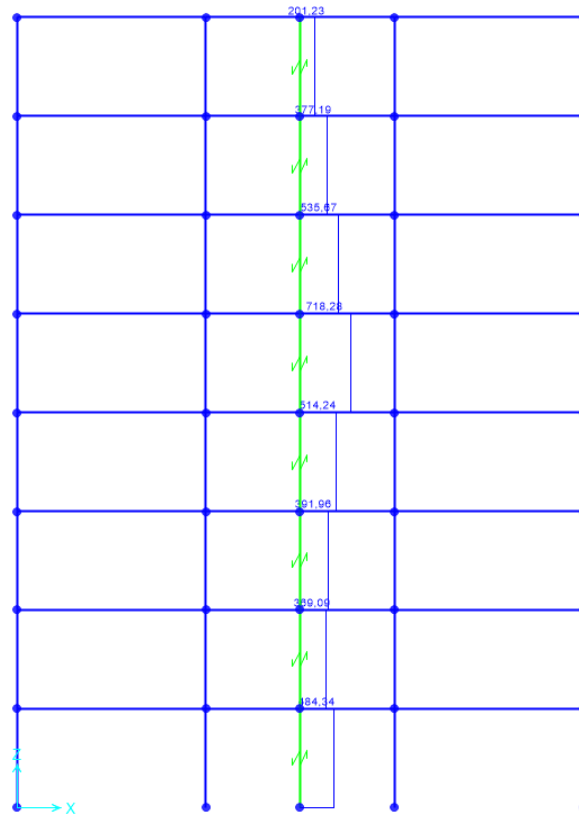
Slika 6.49 44. korak



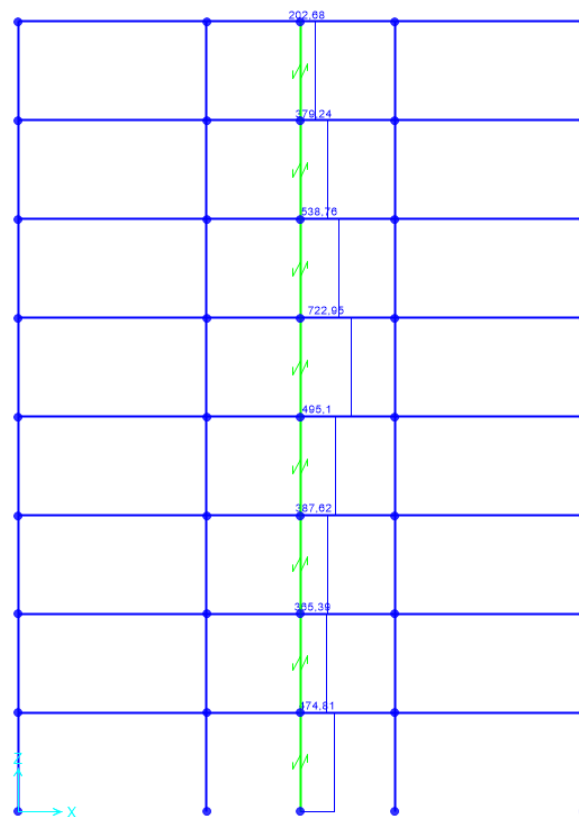
Slika 6.50 45. korak



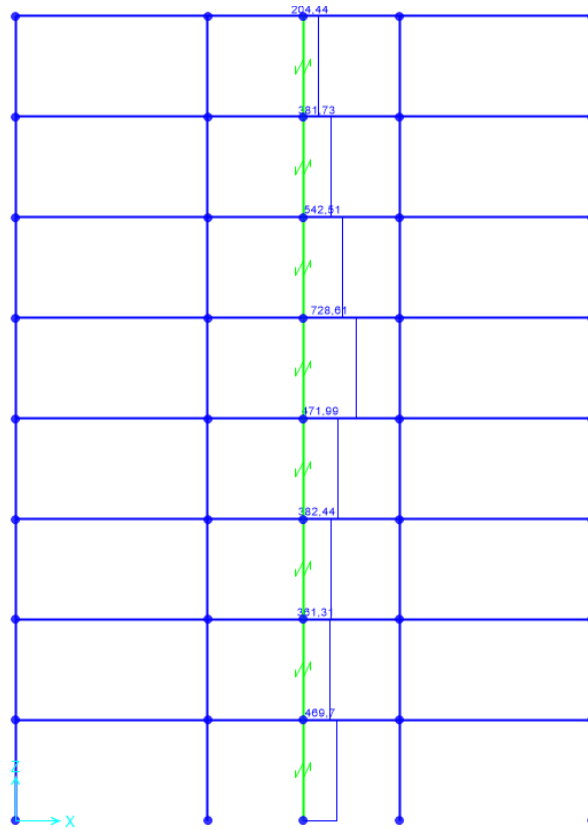
Slika 6.51 46. korak



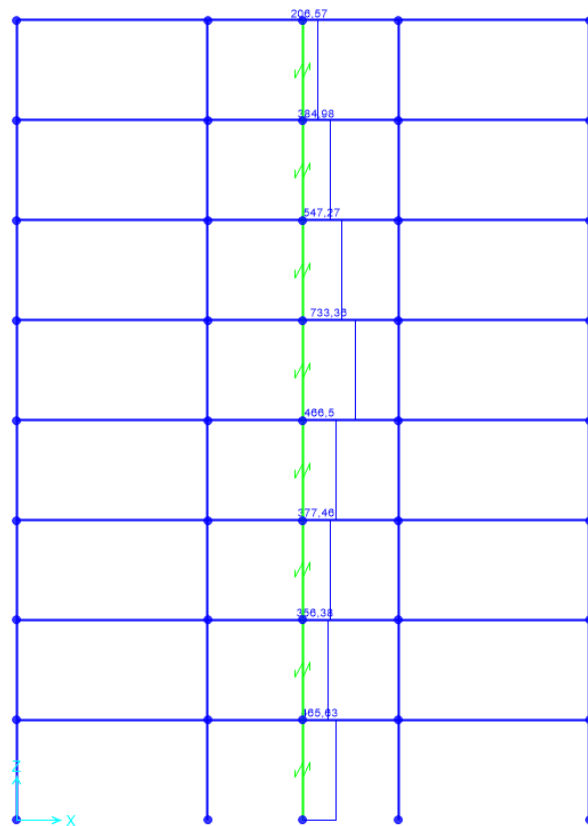
Slika 6.52 47. korak



Slika 6.53 48. korak



Slika 6.54 49. korak

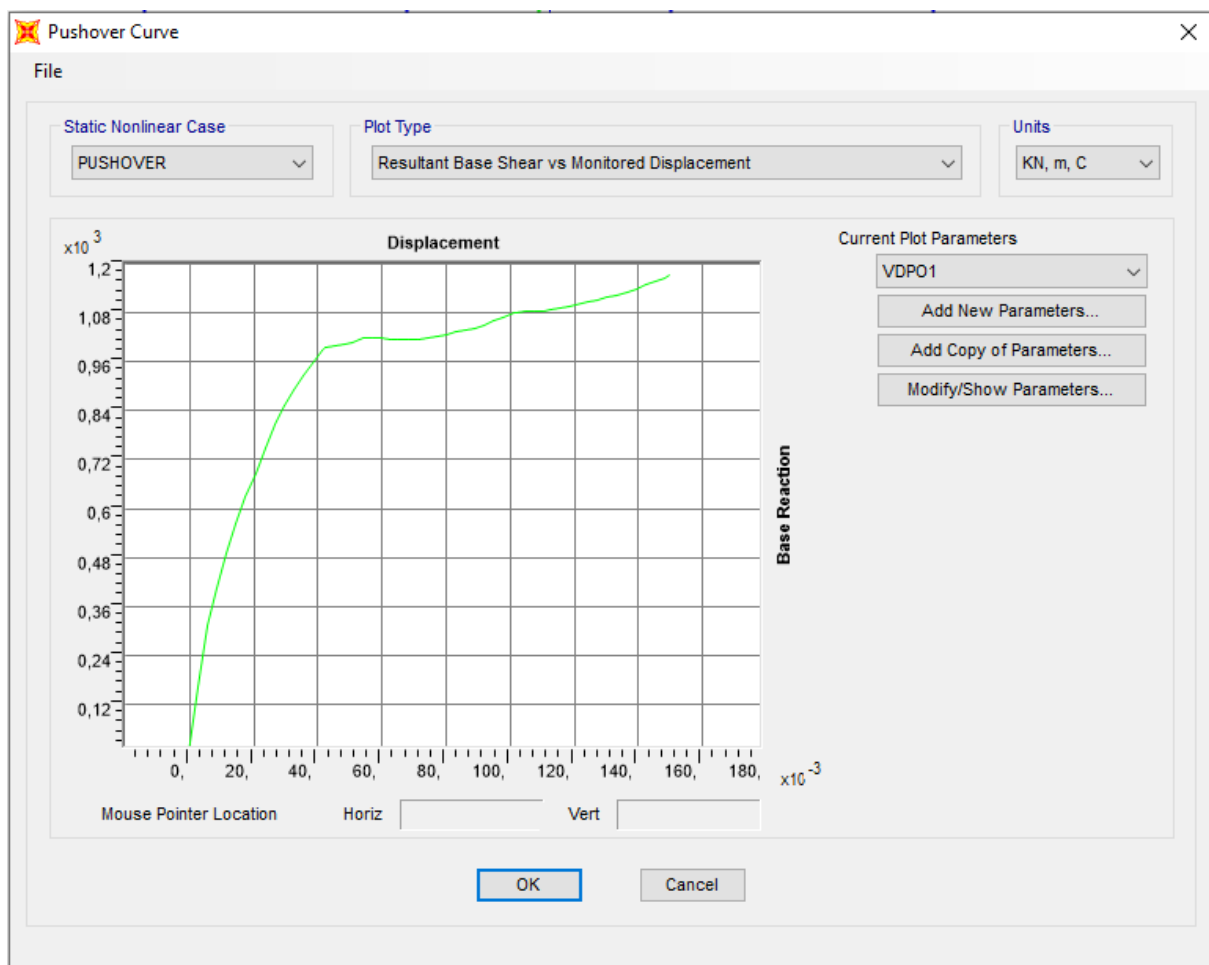


Slika 6.55 50. korak



Od slike 6.4. do slike 6.54. pokazan je tijek promjene posmične sile u link elementima koji predstavljaju posmične zidove. Svakim inkrementom povećanja bočnog opterećenja poprečna sila u linkovima raste. U 16. koraku poprečna sila u linku na drugoj etaži dosegula je vršnu vrijednost od 783 kN nakon koje sila počinje padati što znači da je došlo do popuštanja posmičnog zida. Daljnjim povećanjem bočnog opterećenja dolazi do iscrpljivanja nosivosti posmičnih zidova i u ostalim etažama. U 50. koraku, za vrijednost vršnog pomaka konstrukcije od 0,15 m, u zidovima prvih 4 etaže je došlo do otkazivanja. U niti jednom koraku nije došlo do otvaranja plastičnih zglobova u nosačima okvira što znači da je došlo do plastifikacije samo u posmičnim zidovima čime je zadovoljen uvjet dvojnosti promatranog konstruktivnog sustava. Obzirom da su elementi okvira ostali u elastičnom području uklanjanjem zidova koji su se plastično deformirali konstrukcija će se recentrirati, dok se oštećeni zidovi se zamjenjuju novima.

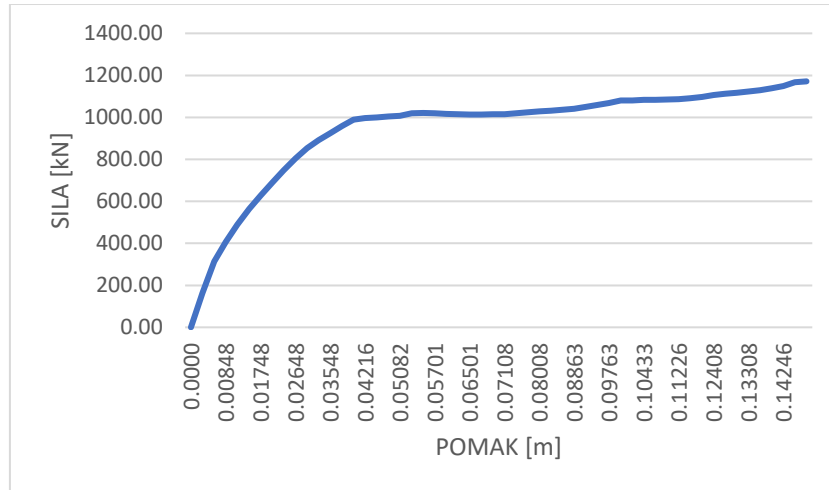
Rezultat analize je krivulja, prikazana na slici 6.56 koja povezuje poprečnu reakciju u temelju i pomak vrha konstrukcije:



Slika 6.56 Krivulja poprečna reakcija-pomak MDOF sustava

### 6.3.2. Ciljani pomak

Seizmički zahtjev se određuje primjenom spektra odgovora SDOF sustava uzimajući u obzir nelinearno ponašanje pri čemu ekvivalentni SDOF sustav odgovara titranju MDOF sustava u 1. modu. Prema tome potrebno je promatrani MDOF sustav transformirati u ekvivalentni SDOF. Krivulja kapaciteta za ekvivalentni SDOF sustav prikazana je na slici 6.58.



Slika 6.57 Dijagram poprečna sila-pomak MDOF sustava

Transformacija se vrši pomoću izraza 6.12., 6.13., 6.14. i 6.15.:

masa ekvivalentnog SDOF sustava je:

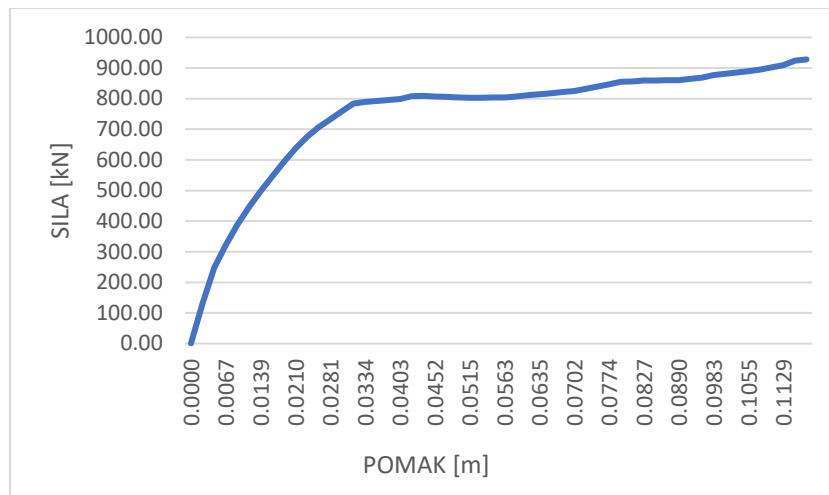
$$m^* = \sum_i^n m_i \cdot \Phi_i = 169 \cdot (0,18 + 0,36 + 0,53 + 0,68 + 0,80 + 0,97 + 1) = 763,88 \text{ t}$$

$\Gamma$  – faktor transformacije je:

$$\Gamma = \frac{\{\Phi\}^T [M] \{1\}}{\{\Phi\}^T [M] \{\Phi\}} = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2}$$

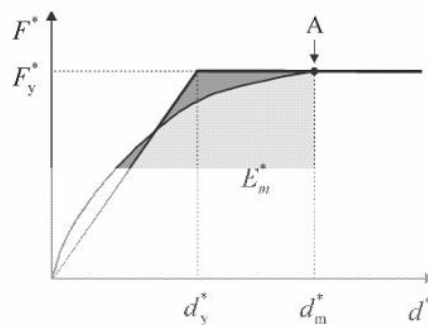
$$= \frac{763,88}{169 \cdot (0,18^2 + 0,36^2 + 0,52^2 + 0,68^2 + 0,80^2 + 0,90^2 + 0,97^2 + 1^2)} = 1,262$$

Isti faktor transformacije se koristi i za silu i za pomak stoga krivulja dobivena za MDOF vrijedi i za SDOF uz korekciju mjerila na osima. Prema tome krutost SDOF sustava jednaka je kao i krutost MDOF sustava.

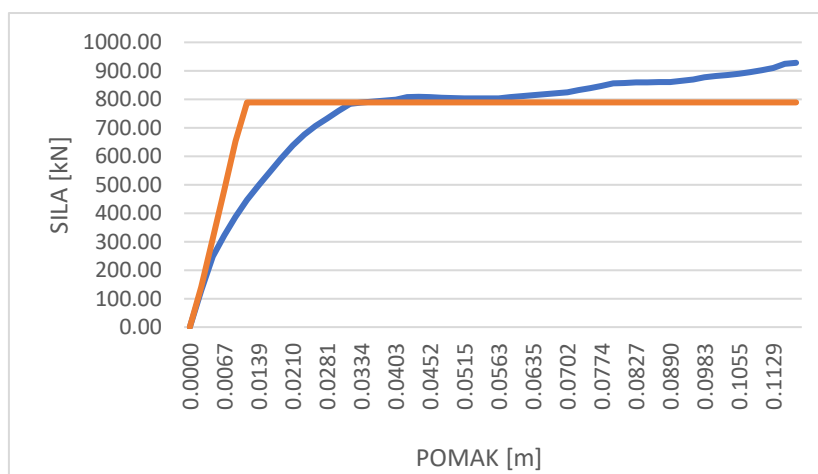


Slika 6.58 Dijagram poprečna sila-pomak ekvivalentnog SDOF sustava

Prema normi EN 1998 ciljani pomak ekvivalentnog SDOF određuje se iz elastičnog spektra odziva. Prvo će se odrediti idealizirana bilinearna krivulja sila-pomak. Princip se bazira na jednakosti energije deformiranja kako je prikazano na slici 6.59. Na slici 6.60 prikazana je idealizirana krivulja kapaciteta ekvivalentnog SDOF sustava



Slika 6.59 Bilinearna krivulja sila-pomak SDOF sustava po principu jednakosti energije (Izvor:[11])



Slika 6.60 Bilinearna krivulja sila-pomak SDOF ekvivalentnog sustava

Pomak na početku popuštanja idealiziranog SDOF sustava određuje se prema izrazu:

$$d_y^* = 2 \cdot \left( d_m^* - \frac{E_m^*}{F_m^*} \right) \quad 6.25$$

Gdje su:

$d_m^*$  - pomak kod stvaranja plastičnog mehanizma

$E_m^*$  - stvarna energija deformiranja do početka stvaranja plastičnog mehanizma

$F_m^*$  - sila pri popuštanju ujedno i granična čvrstoća idealiziranog sustava

$$d_m^* = 0,1129 \text{ m}$$

$$E_m^* = 88,30 \text{ kJ}$$

$$F_m^* = 789,10 \text{ kN}$$

$$d_y^* = 2 \cdot \left( 0,1129 - \frac{88,30}{789,10} \right) = 0,011 \text{ m}$$

Period idealiziranog istovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode je:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_y^*}{F_y^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{763,88 \cdot 0,011}{789,10}} = 0,65 \text{ s}$$

Ciljani pomak ekvivalentnog SDOF sustava s periodom  $T^*$  je:

$$d_{et}^* = S_e(T^*) \left[ \frac{T^*}{2\pi} \right]^2 = 4,53 \cdot \left( \frac{0,65}{2\pi} \right)^2 = 0,05 \text{ m}$$

Prema normi EN 1998 ciljani pomak se određuje ovisno o periodu  $T^*$ . Za period  $T^* > T_c = 0,4$  ciljani pomak  $d_t^*$  jednak je  $d_{et}^*$ .

Ciljani pomak ekvivalentnog SDOF sustava transformiramo u pomak vrha konstrukcije promatranog MDOF sustava pomoću faktora transformacije:

$$d_t = d_t^* \cdot \Gamma = 0,05 \cdot 1,262 = 0,061 \text{ m}$$

Analiza se ponavlja s novim pomakom vrha koji je jednak dobivenom ciljanom pomaku.

### 6.3.3. Faktor prekogranične čvrstoće

Faktor prekogranične čvrstoće definira se omjerom poprečne reakcije u trenutku otkazivanja svih zidova i poprečne sile u trenutku plastifikacije prvog elementa. U 16. koraku dolazi do pojave plastičnih deformacija za poprečnu reakciju od 989,36 kN. Krajnji iznos poprečne reakcije je 1 171,32 kN. Tada faktor prekogranične čvrstoće jednak:

$$\frac{\alpha_u}{\alpha_1} = \frac{1171,32}{989,36} = 1,18$$

#### 6.3.4. Faktor ponašanja

Faktor ponašanje se prema EN 1998 određuje sljedećim izrazom:

$$q = q_0 k_w \quad 6.26$$

$q_0$  -osnovna vrijednost faktora ponašanja, ovisno o tipu konstrukcije i pravilnosti po visini

$k_w$  -faktor koji uzima u obzir prevladavajući mod otkazivanja sistema sa zidovima

EN 1998 za okvirne sustave, dvojne sustave i sustav spojenih zidova, koje su visoka klasa duktilnosti – DCH, propisuje osnovnu vrijednost faktora ponašanja:

$$q_0 = 4,5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$$

EN 1998 za promatrani sustav propisuje vrijednost  $k_w = 1,00$ .

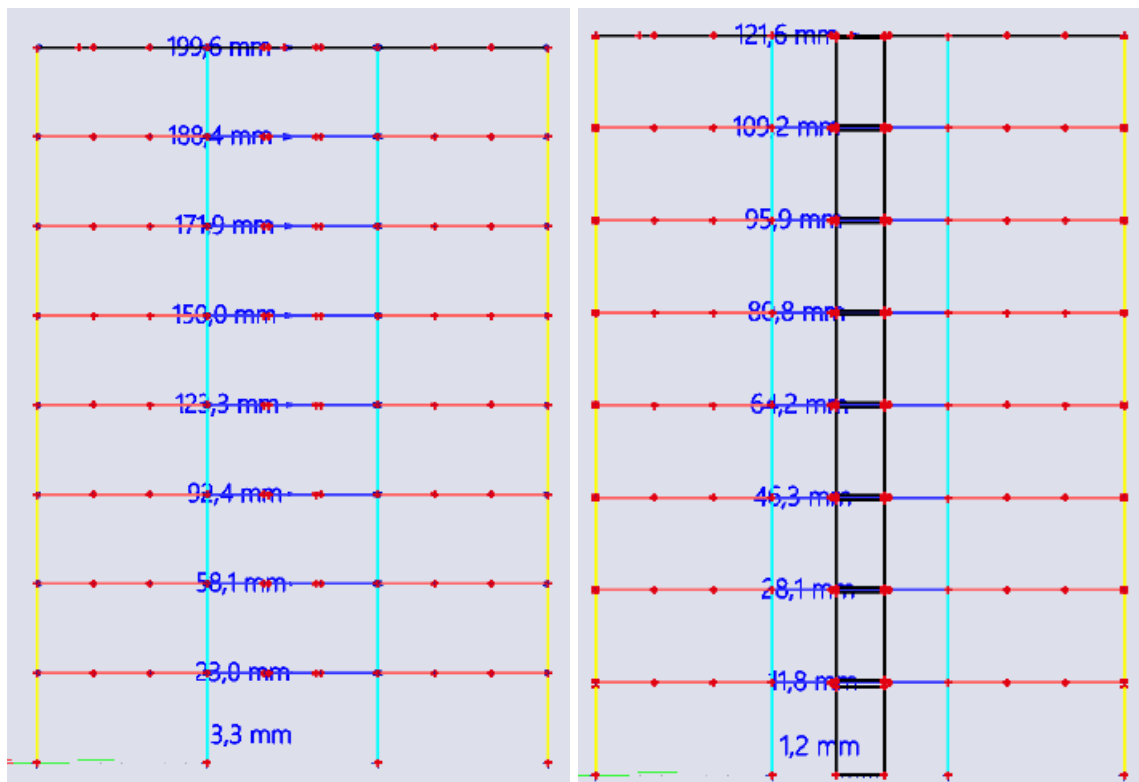
Pa je faktor ponašanja jednak:

$$q = 4,5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1} k_w = 4,5 \cdot 1,18 \cdot 1,00 = 5,31$$

Usvojena vrijednost  $q = 5,00$ .

#### 6.4. Analiza rezultata

Elastičnom analizom je potvrđeno da su posmični zidovi vrlo efikasan način lateralne stabilizacije konstrukcije. Najbolji pokazatelj je usporedba promatranog okvirnog sustava sa i bez posmičnih zidova . Pomaci sustava sa i bez posmičnih zidova pokazani su na slici 6.61.



Slika 6.61 Pomaci sustava bez posmičnih zidova i s posmičnim zidovima

Pomak vrha konstrukcije je manji za 40% primjenom posmičnih zidova.

Pushover analizom pokazano je kako okvirni sustav ostaje elastičan dok se posmični zidovi plastično deformiraju. Time je zadovoljen uvjet dvojnog sustava jer posmični zidovi su namijenjeni za disipaciju seizmičke energije koji se nakon otkazivanja zamjenjuju, a okvir koji ostaje elastičan treba osigurati sile za recentriranje. Ciljani pomak određen principom jednakosti energije jednak je  $d_t = 0,061$  m. Norma EN 1998 nalaže postupno guranje s kontrolnim pomakom jednakim  $1,5 d_t = 0,0915$  m. Konstrukcija je postupno gurana do vrijednosti  $d = 0,15$  m s već navedenim rezultatima što znači da je uvjet zadovoljen. Oblikom krivulje kapaciteta vidi se duktilno otkazivanje jer nakon početka tečenja krivulja blago raste.

U modalnoj analizi koristio se faktor ponašanje jednak 2 što je vrlo konzervativna pretpostavka. Provedbom pushover analize usvojena je vrijednost jednaka 5. Primjenom faktora ponašanja jednakog 5, vrijednost horizontalne komponente proračunskog spektra odziva je 2,5 puta manja nego u slučaju kada je faktor ponašanja jednak 2. Prema tome, konstrukcija će se dimenzionirati na puno manje sile.

## 7. PRORAČUN PRIKLJUČAKA

### 7.1. Stopa stupa B1

#### Project item CON1

##### Design

Name	CON1
Description	
Analysis	Stress, strain/ loads in equilibrium

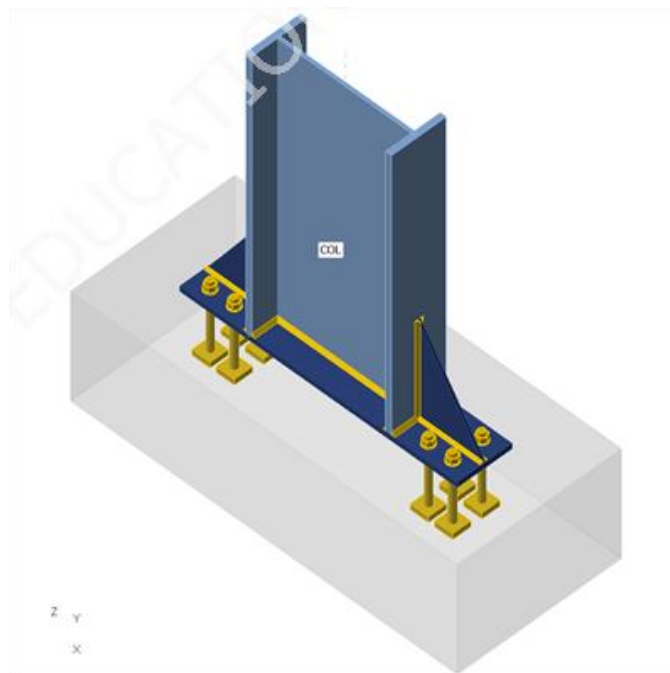
##### Members

##### Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ – Direction [°]	$\gamma$ – Pitch [°]	$\alpha$ – Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
COL	HEB800	0.0	90. 0	0.0	0	0	0

##### Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [mm]
COL/ end		Node	0



## Cross-sections

Name	Material	Drawing
2 - HEB800	S 355	

## Anchors

Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M36 10.9	36	900.0	1000.0	1018

## Load effects (forces in equilibrium)

Name	Member	N [kN]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE1	COL / End	- 5945. 0	17. 0	126. 0	0.0	721. 0	0.0

## Unbalanced forces

Name	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE1	- 126. 0	17. 0	- 5945. 0	0.0	721. 0	0.0

## Foundation block

Item	Value	Unit
<b>CB 1</b>		
Dimensions	900 x 2120	mm
Depth	600	mm
Anchor	M36 10.9	
Anchoring length	300	mm
Shear force transfer	Friction	



## Check

### Summary

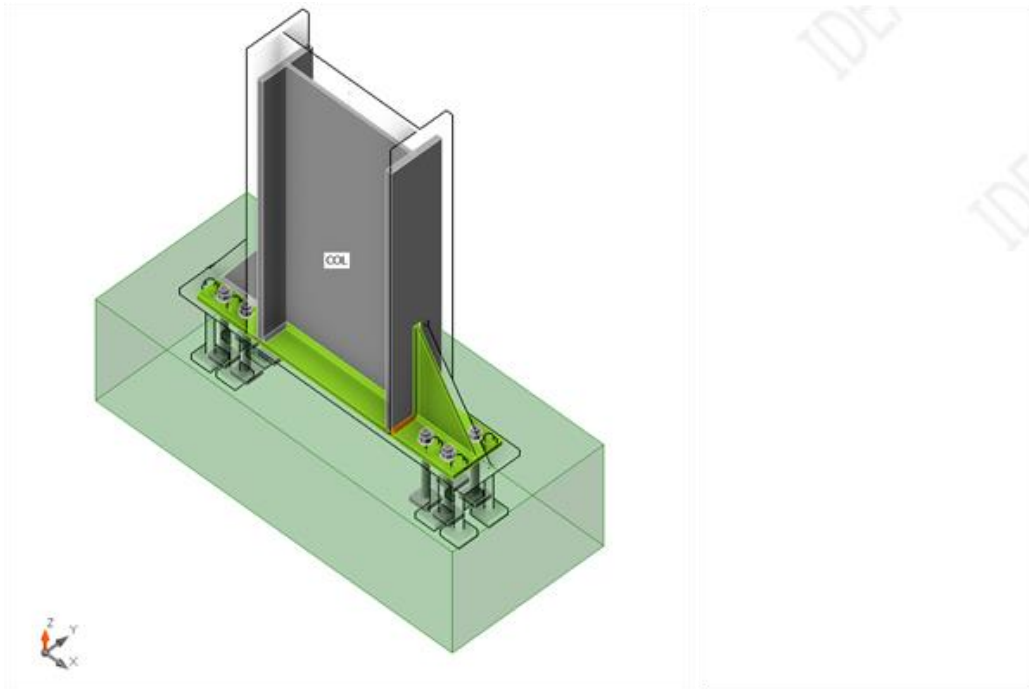
Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	$0.1 < 5.0\%$	OK
Anchors	$0.0 < 100\%$	OK
Welds	$98.1 < 100\%$	OK
Concrete block	$82.0 < 100\%$	OK
Shear	$8.5 < 100\%$	OK
Buckling	Not calculated	

### Design data

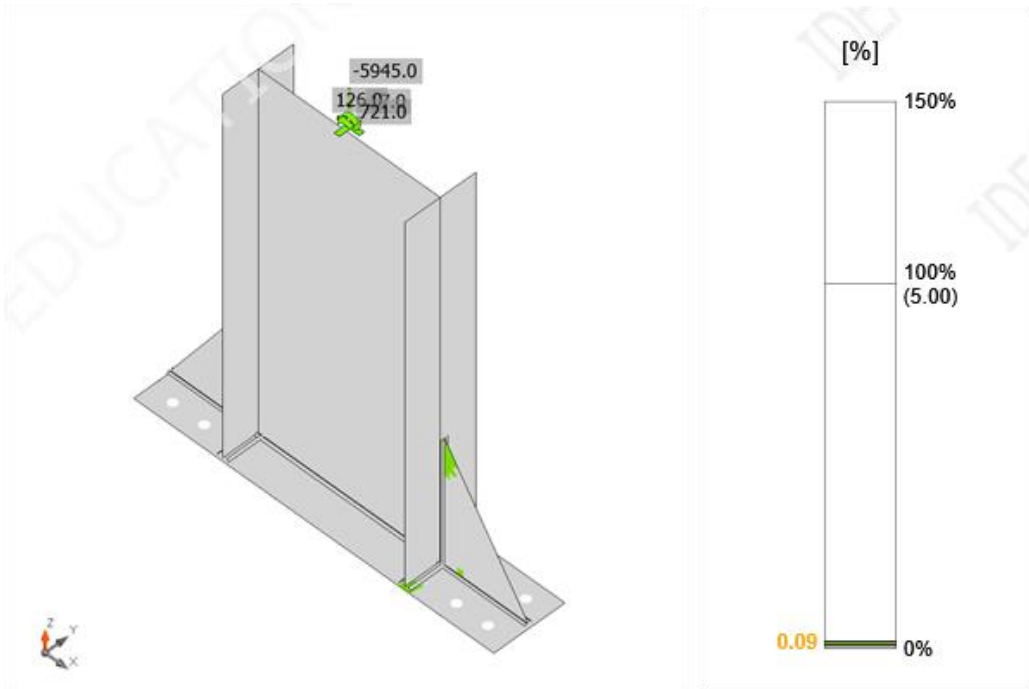
Material	$f_y$ [MPa]	$\epsilon_{lim}$ [%]
S 355	355.0	5.0

### Symbol explanation

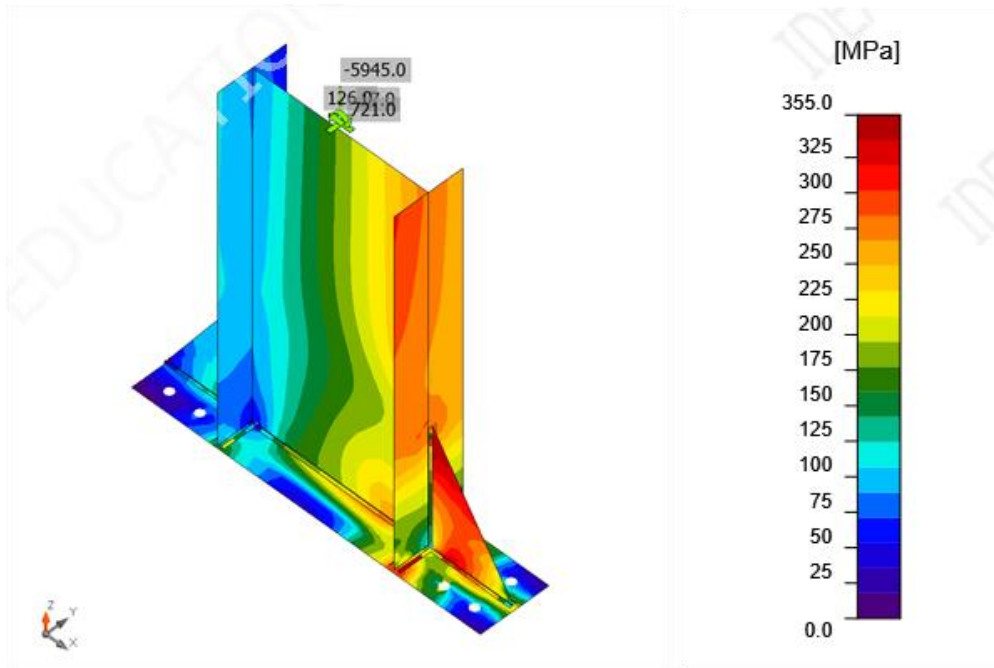
$t_p$	Plate thickness
$\sigma_{Ed}$	Equivalent stress
$\epsilon_{Pl}$	Plastic strain
$\sigma_{c,Ed}$	Contact stress
$f_y$	Yield strength
$\epsilon_{lim}$	Limit of plastic strain



Overall check, LE1



Strain check, LE1






*Equivalent stress, LE1*

## Buckling

Buckling analysis was not calculated.

## Bill of material

### Manufacturing operations

Name	Plates [mm]	Shape	Nr.	Welds Throat thickness [mm]	Length [mm]	Bolts	Nr.
BP1	P30.0x300.0-1520.0 (S 355)		1	Double fillet: 10.0	1367.0	M36 10.9	4
RIB1	P15.0x355.0-535.0 (S 355)		1	Double fillet: 10.0	890.0		
RIB2	P15.0x355.0-535.0 (S 355)		1	Double fillet: 10.0	890.0		

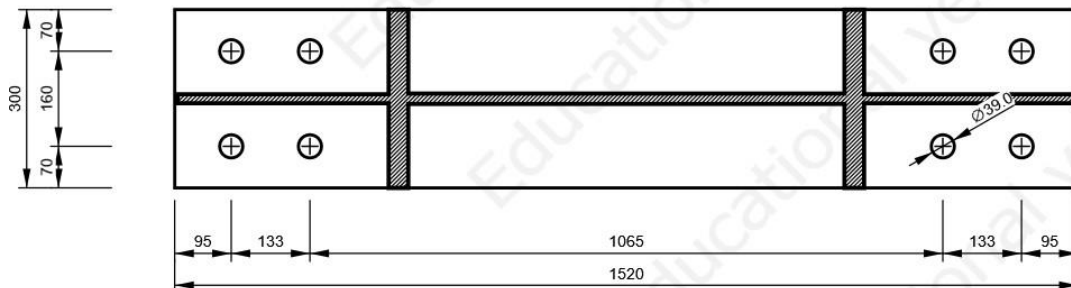
## Welds

Type	Material	Throat thickness [mm]	Leg size [mm]	Length [mm]
Double fillet	S 355	10.0	14.1	3147.0

## Anchors

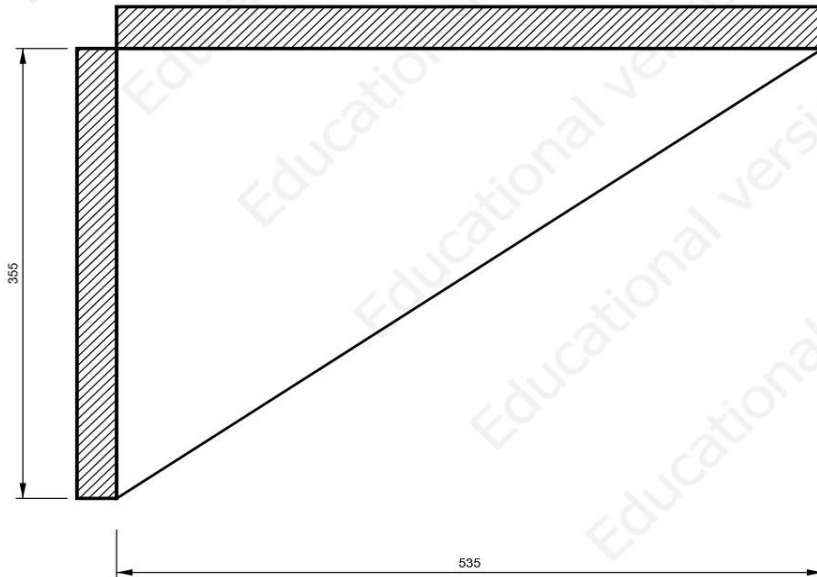
Name	Length [mm]	Drill length [mm]	Count
M36 10.9	330	300	4

Drawing BP1 P30.0x1520-300 (S 355)  
P30.0x1520-300 (S 355)



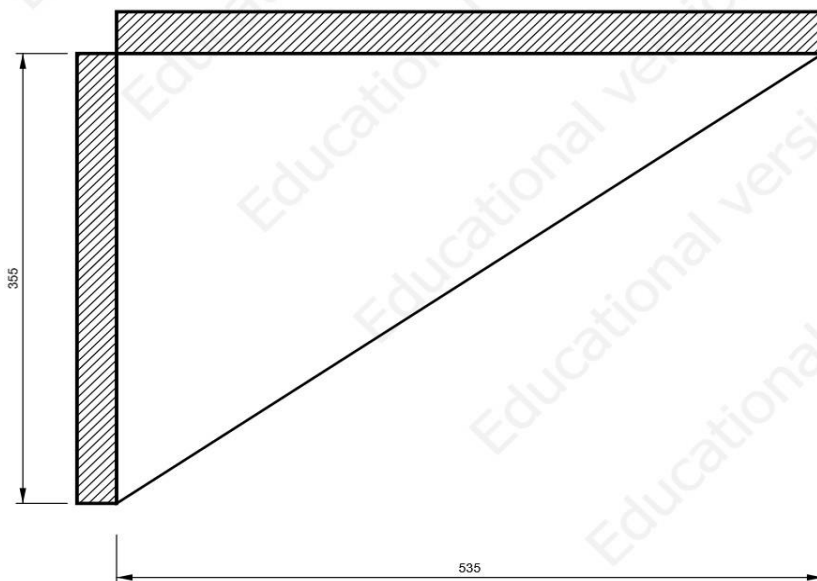
RIB1

P15.0x535-355 (S 355)



RIB2

P15.0x535-355 (S 355)



## Check

## Rotational stiffness

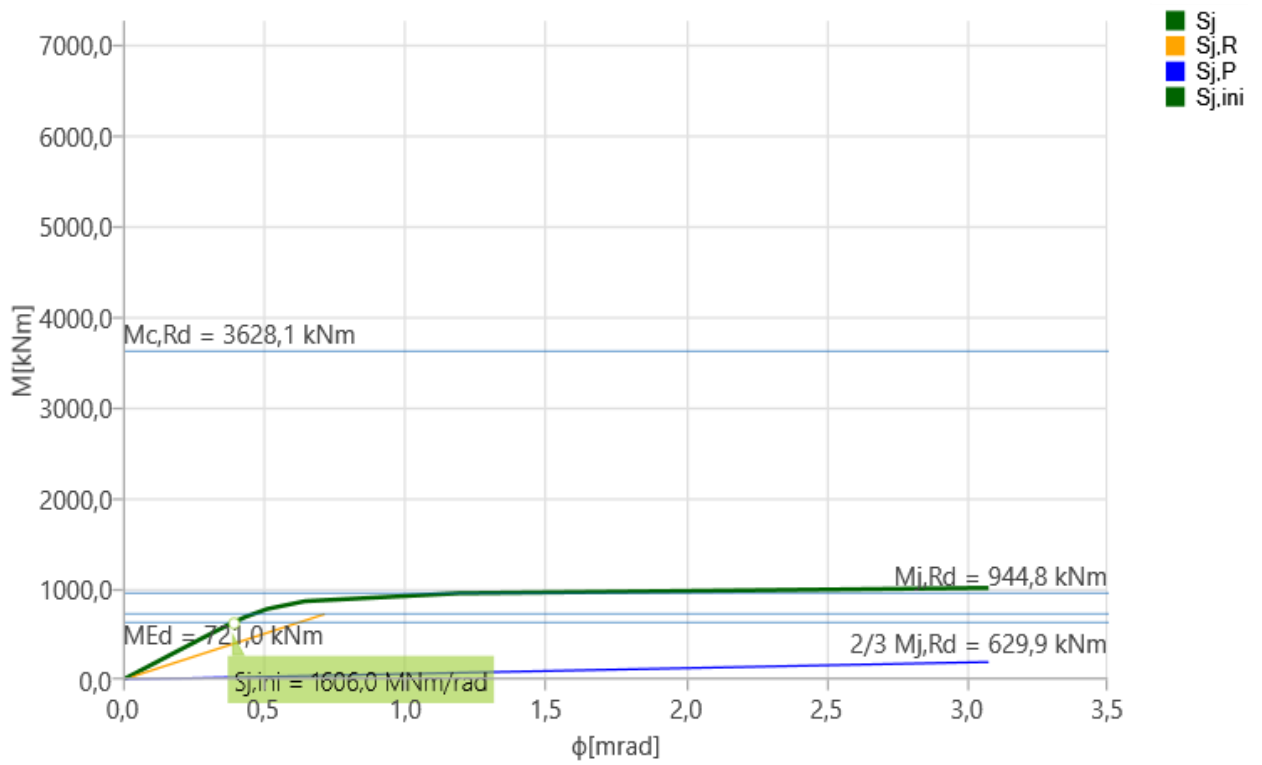
Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
COL	My	LE1	944. 8	1606. 0	1. 1	6.00	1005. 5	62.8	Rigid

## Secant rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	M [kNm]	$S_{j,s}$ [MNm/rad]	$\phi$ [mrad]
COL	My	LE1	721 .0	1563.6	0.5

## Symbol explanation

$M_{j,Rd}$	Bending resistance
$S_{j,ini}$	Initial rotational stiffness
$\phi_c$	Rotational capacity
$S_{j,R}$	Limit value - rigid joint
$S_{j,P}$	Limit value - nominally pinned joint
$S_{j,s}$	Secant rotational stiffness
$\phi$	Rotational deformation

Stiffness diagram  $M_y - \phi_y$ , LE1



## 7.2. Stopa stupa A4

Project item CON1

Design

Name CON1

Description

Analysis Stress, strain/ loads in equilibrium

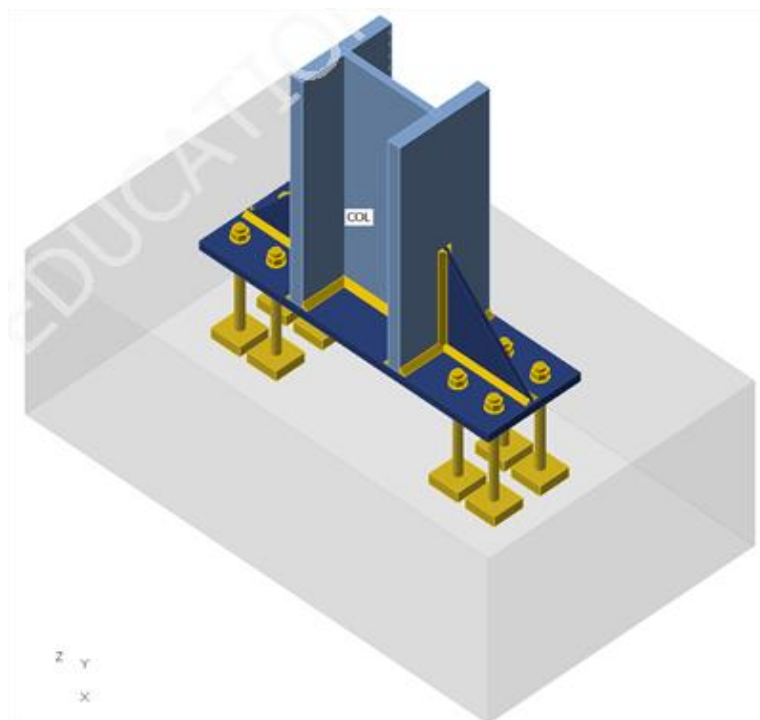
Members

Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ – Direction [°]	$\gamma$ – Pitch [°]	$\alpha$ – Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
COL	2 - HEM340	0.0	90.0	0.0	0	0	0

Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [mm]
COL/ end		Node	0



## Cross-sections

Name	Material	Drawing
2 - HEM340	S 355	

## Anchors

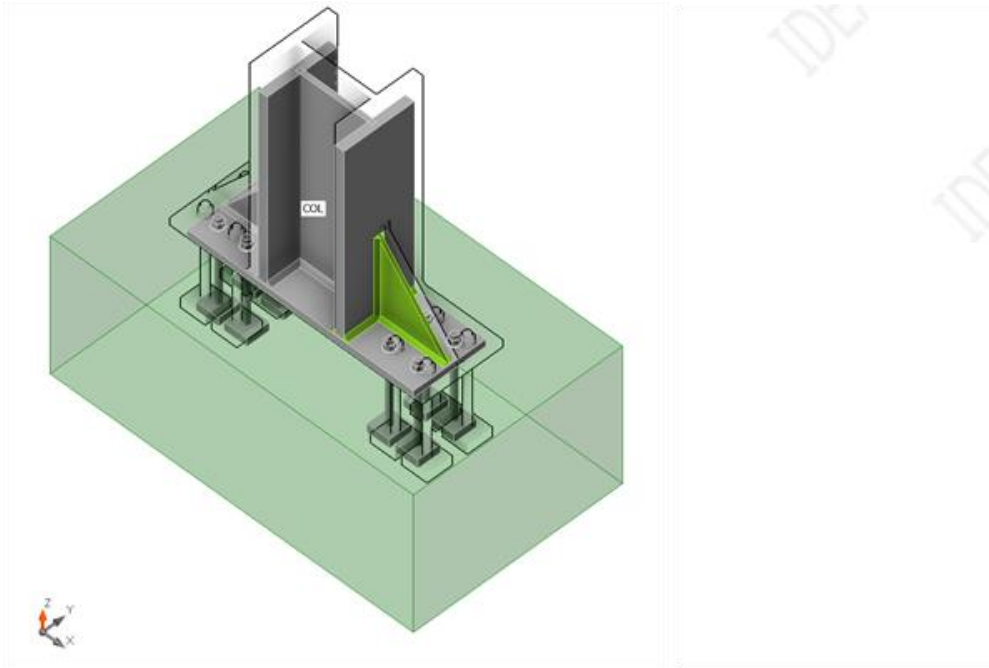
Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M27 10.9	27	900.0	1000.0	573

## Load effects (forces in equilibrium)

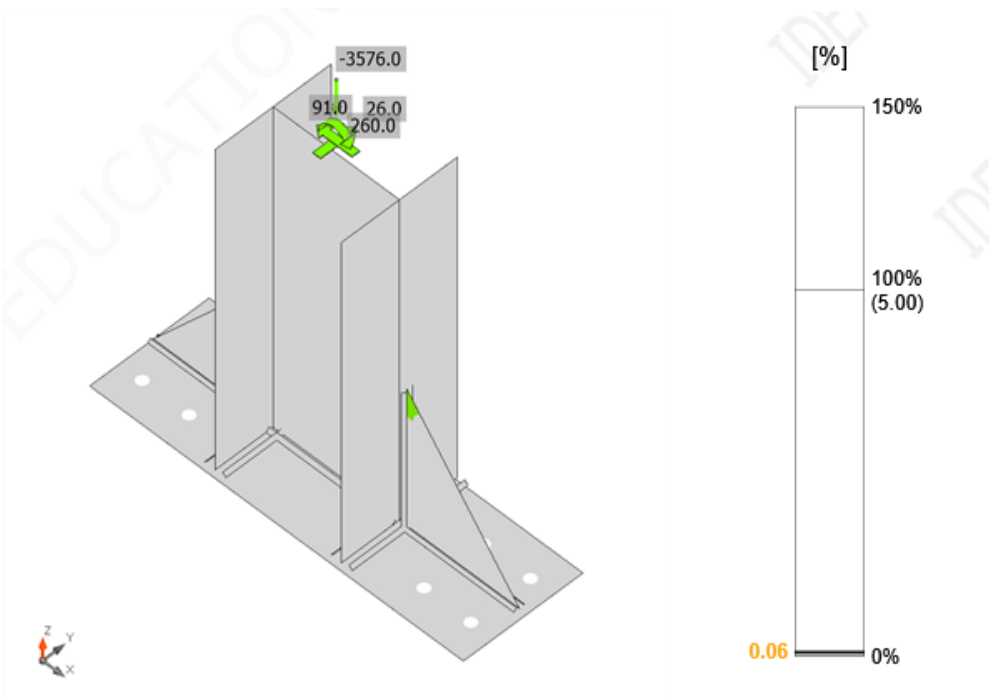
Name	Member	N [kN]	$V_y$ [kN]	$V_z$ [kN]	$M_x$ [kNm]	$M_y$ [kNm]	$M_z$ [kNm]
LE1	COL/ End	-3576	26.0	91.0	0.0	260.0	0.0

## Check

## Summary

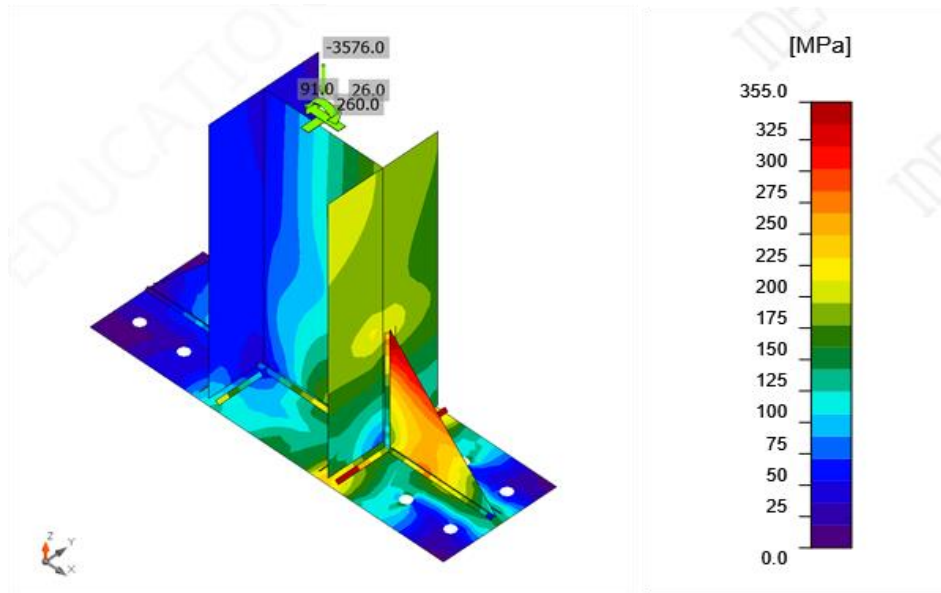



Overall check, LE1



Strain check, LE1

Equivalent stress, LE1






*Equivalent stress, LE1*

**Buckling**

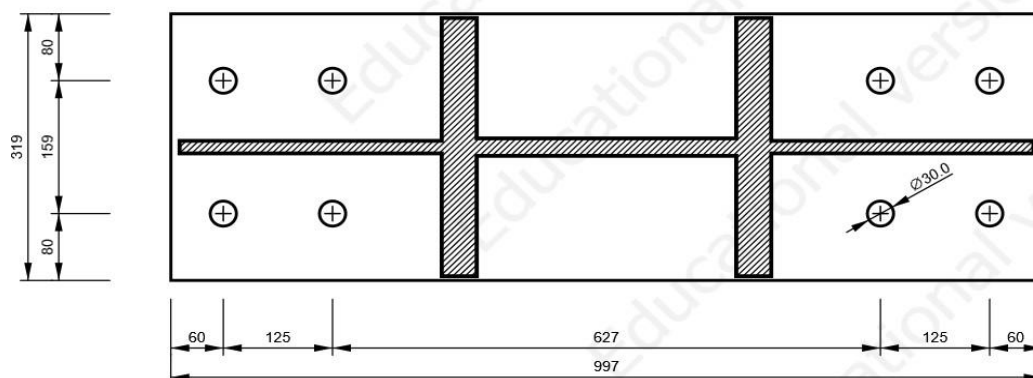
**Buckling analysis was not calculated**

## Bill of material

## Manufacturing operations

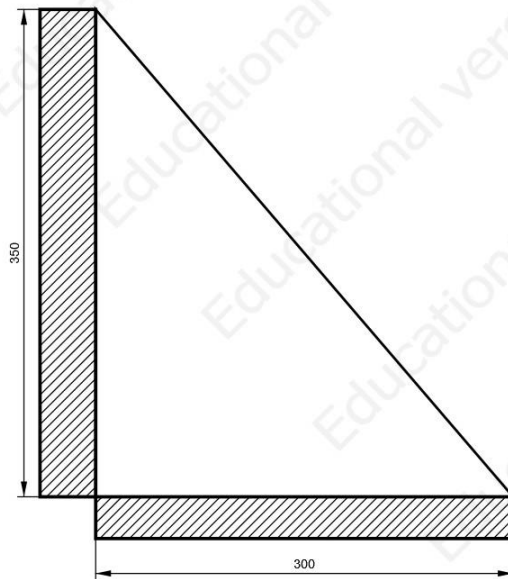
Name	Plates [mm]	Shape	Nr.	Welds Throat thickness [mm]	Length [mm]	Bolts	Nr.
BP1	P30.0x319.0-997.0(S 355)		1	Double fillet: 10.0	955.0	M27 10.9	4
RIB2	P15.0x300.0-350.0(S 355)		1	Double fillet: 10.0	650.0		
RIB3	P15.0x300.0-350.0(S 355)		1	Double fillet: 10.0	650.0		

## Drawing BP1 P30.0x997-319 (S355)



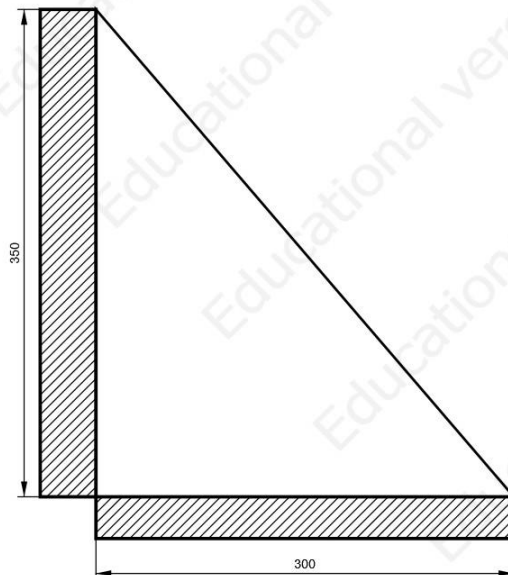
RIB2

P15.0x350-300 (S 355)



RIB3

P15.0x350-300 (S 355)



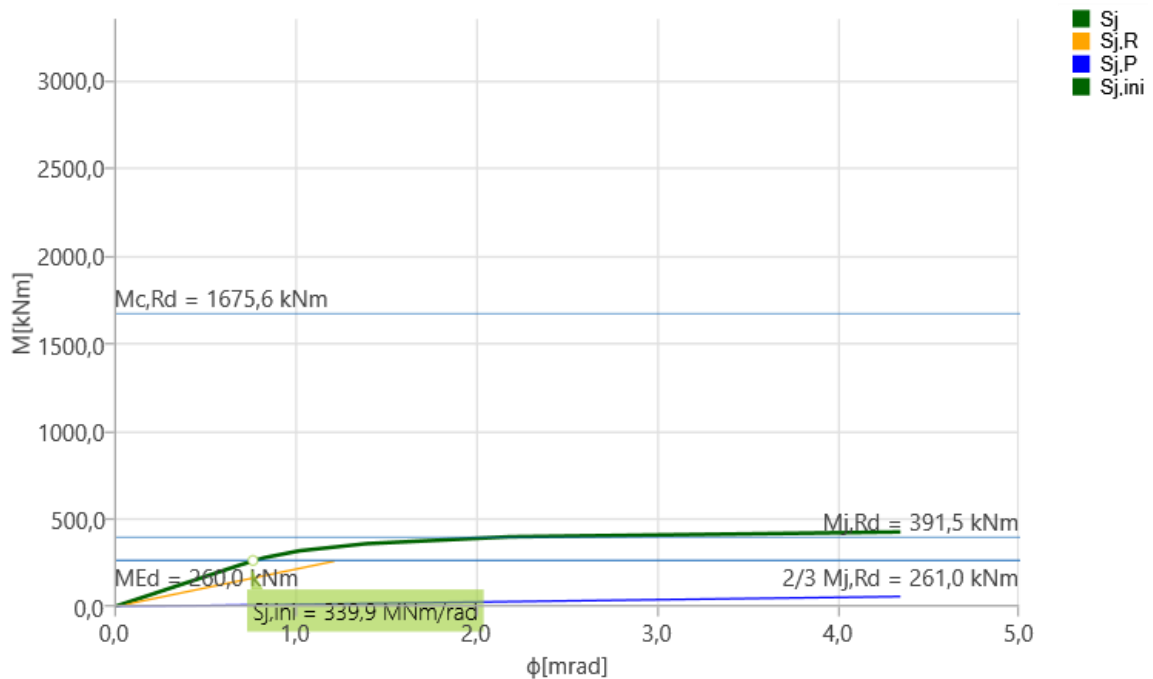
## Check

## Rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
COL	My	LE1	391.5	339.9	2.0	6.0	213.8	13.4	Rigid

## Secant rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	M [kNm]	$S_{j,s}$ [MNm/rad]	$\phi$ [mrad]
COL	My	LE1	260.0	340.0	0.8

Stiffness diagram  $M_y - \phi_y$ , LE1

### 7.3. Stopa stupa A1

Project item CON1

Design

Name CON1

Description

Analysis Stress, strain/ simplified loading

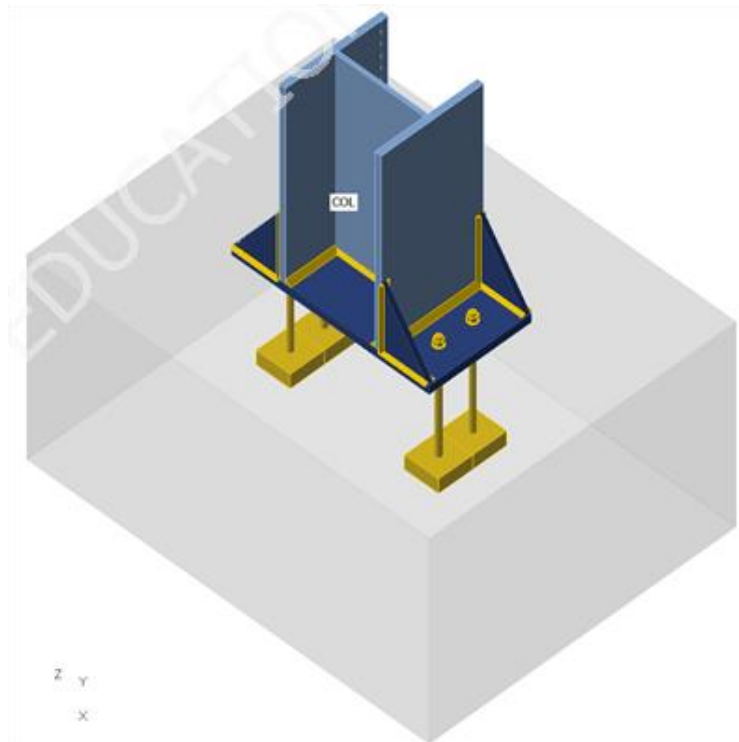
**Members**

**Geometry**

Name	Cross-section	$\beta$ – Direction [°]	$\gamma$ – Pitch [°]	$\alpha$ – Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
COL	1 - CON1(HEB300)	0.0	90. 0	0.0	0	0	0

**Supports and forces**

Name	Support	Forces in	X [mm]
COL/ end		Node	0





## Cross-sections

Name	Material	Drawing
1 - CON1(HEB300)	S 355	

## Anchors

Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M16 10.9	16	900.0	1000.0	201

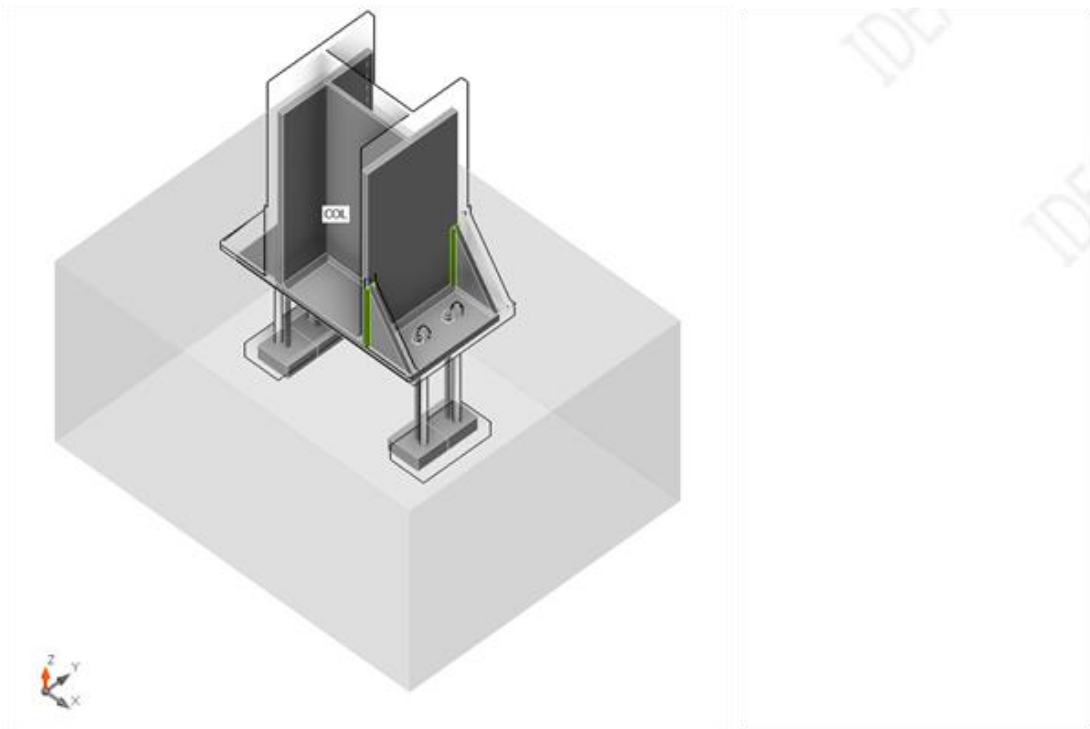
## Load effects (Equilibrium not required)

Name	Member	N [kN]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE1	COL / End	1790.0	18.2	27.8	0.0	57.0	0.0

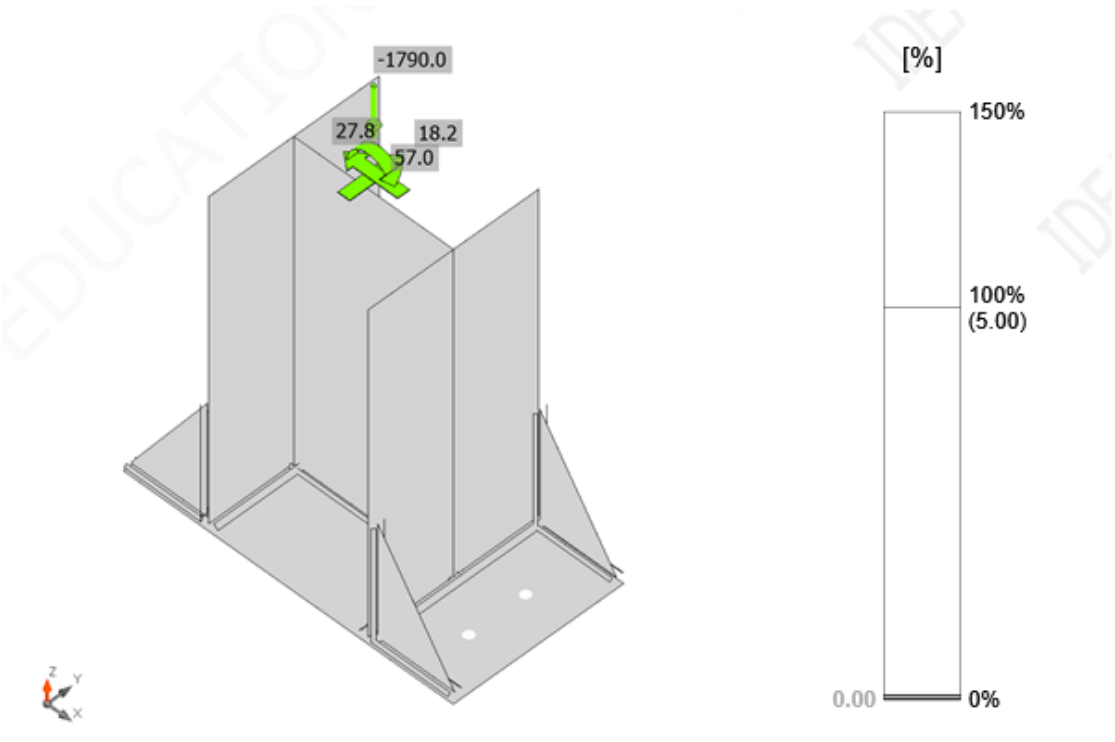
## Check

## Summary

Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	0.0 < 5.0%	OK
Anchors	0.0 < 100%	OK
Welds	75.4 < 100%	OK
Concrete block	50.7 < 100%	OK
Shear	7.4 < 100%	OK
Buckling	Notcalculated	

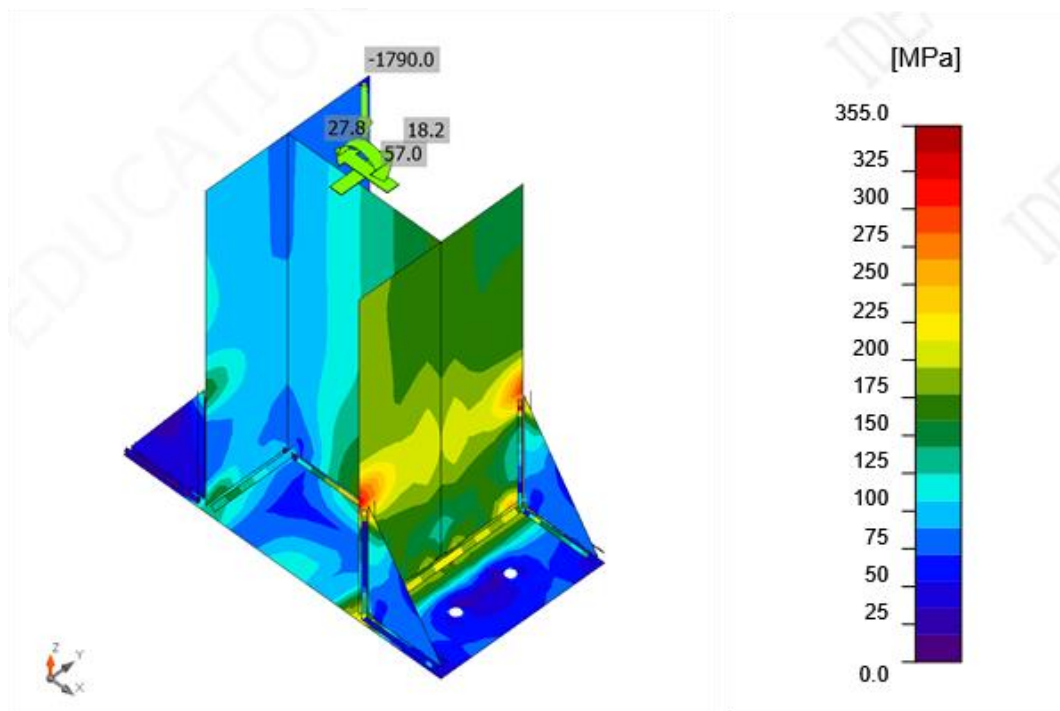


Overall check, LE1



Strain check, LE1

## Strain check, LE1





## Equivalent stress, LE


## Buckling

Buckling analysis was not calculated

## Bill of material

## Manufacturing operations

Name	Plates[mm]	Shape	Nr.	Welds Throat thickness [mm]	Length [mm]	Bolts	Nr.
BP1	P25.0x300.0-580.0(S 355)		1	Double fillet: 10.0 Double fillet: 6.0	600.0 281.0	M16 10.9	4
RIB1	P15.0x135.0-200.0(S 355)		2	Double fillet: 6.0	670.0		

RIB2	P15.0x135.0-200.0(S 355)		2	Double fillet: 6.0	670.0		
------	--------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	---	--------------------	-------	--	--

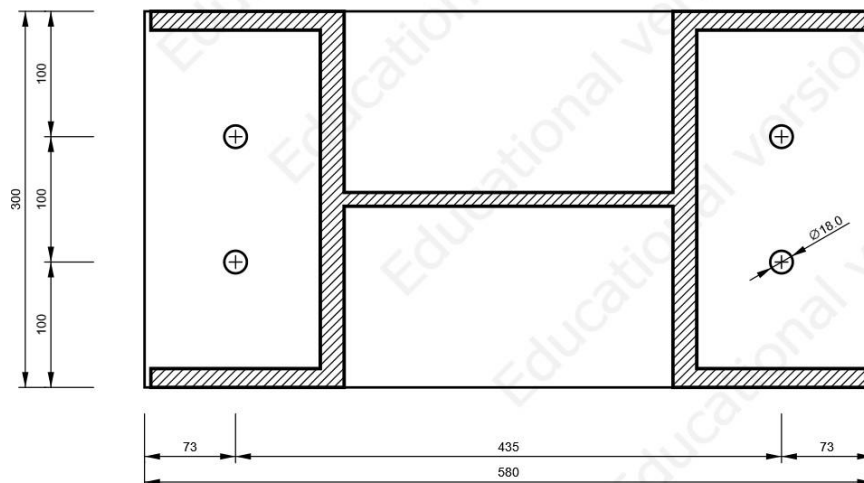
## Welds

Type	Material	Throat thickness[mm]	Leg size [mm]	Length [mm]
Double fillet	S 355	10.0	14.1	600.0
Double fillet	S 355	6.0	8.5	1621.0

## Anchors

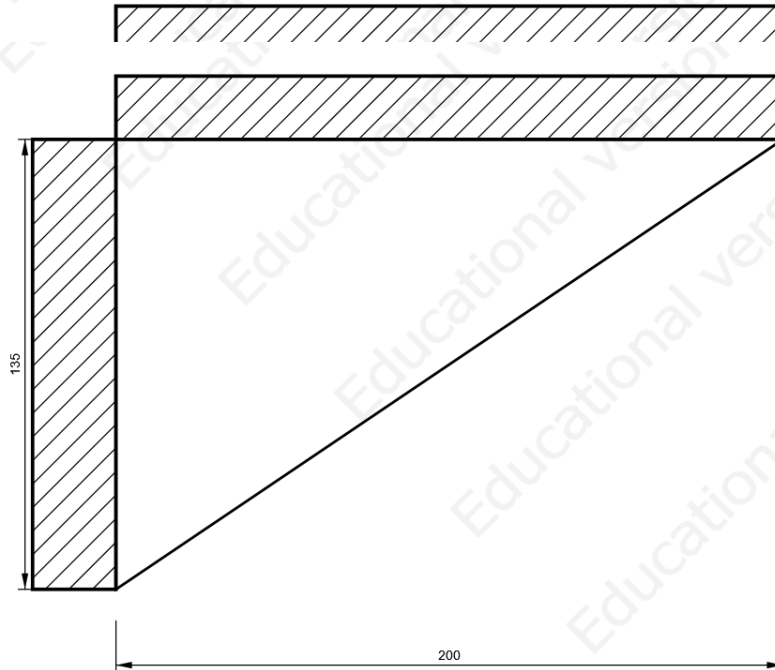
Name	Length [mm]	Drill length [mm]	Count
M16 10.9	325	300	4

## Drawing BP1 P25.0x580-300 (S 355)



RIB1

P15.0x200-135 (S 355)



RIB2P15.0x200-135 (S 355)

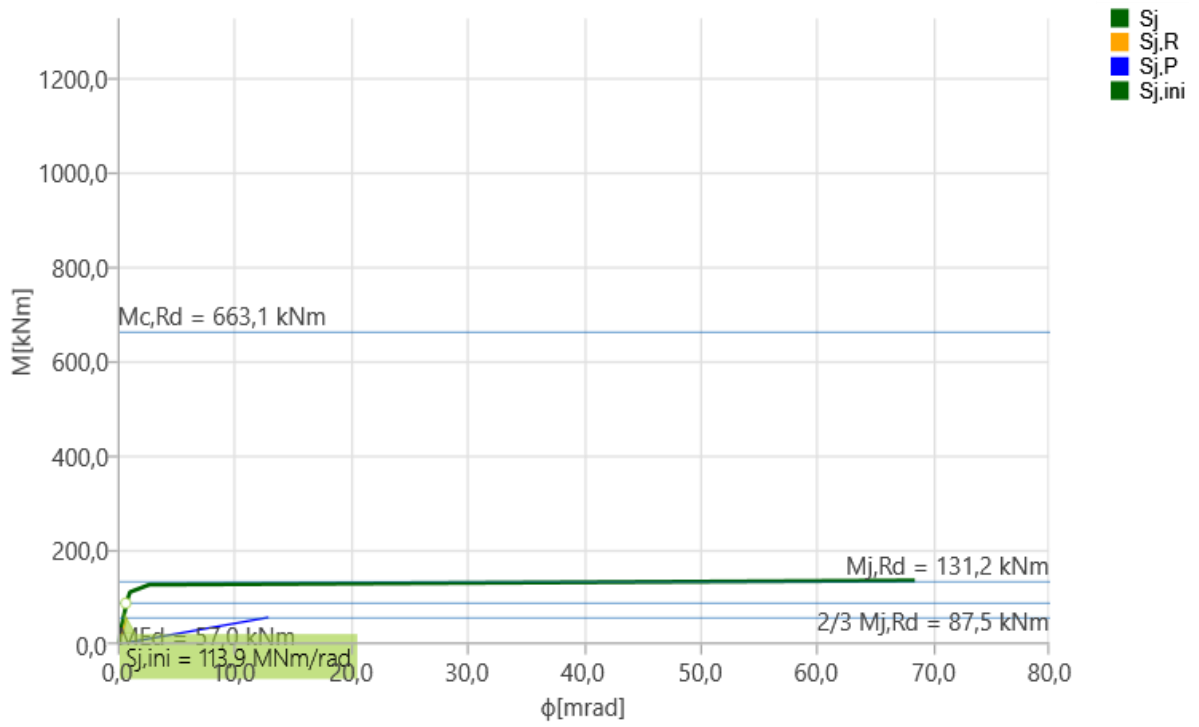
Check

**Rotational stiffness**

Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	$\Phi_c$ [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
COL	My	LE1	131.2	113.9	6.0	6.00	70.5	4.4	Rigid

**Secant rotational stiffness**

Name	Comp.	Loads	M [kNm]	$S_{j,s}$ [MNm/rad]	$\Phi$ [mrad]
COL	My	LE1	57.0	115.7	0.5

Stiffness diagram  $M_y - \phi$

## 7.4. Priključak nosača okvira i sekundarnog nosača na stup A4

### Project item N67

#### Design

Name	N67
Description	
Analysis	Stress, strain/ simplified loading

#### Members

#### Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ – Direction [°]	$\gamma$ – Pitch [°]	$\alpha$ – Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
B93	6 - HEM340	0.0	90.0	90.0	0	0	0
B102	18 - IPE400	90.0	0.0	0.0	0	0	-200
B103	36 - HEA500	90.0	0.0	0.0	0	0	-245
B115	42 - IPE400	0.0	0.0	0.0	0	0	-200

#### Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [m m]
B93 / begin	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz	Position	0
B93 / end	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz	Position	0
B102 / begin		Position	0
B103 / end		Position	0
B115 / begin		Position	0

## Cross-sections

Name	Material
6 - HEM340	S 355
18 - IPE400	S 355
36 - HEA500	S 355
42 - IPE400	S 355

## Bolts

Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M24 10.9	24	900.0	1000.0	452

## Load effects (Equilibrium not required)

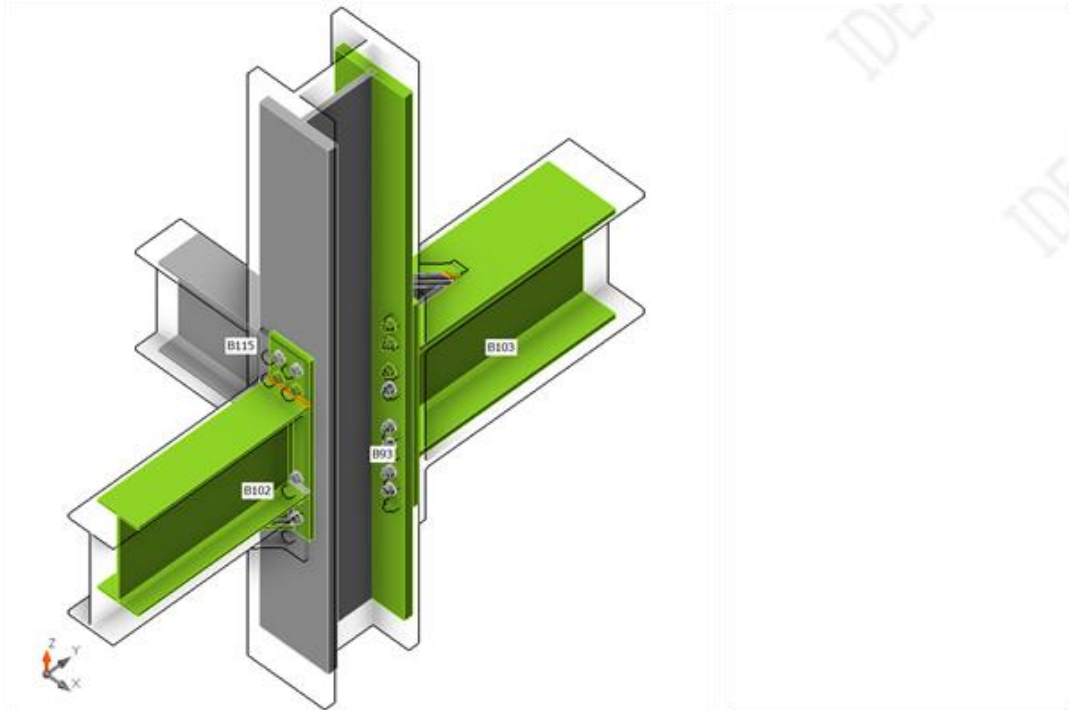
Name	Member	N [kN]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE1	B102 / Begin	0.0	0.0	165.0	0.0	-290.0	0.0
	B103 / End	-154.0	0.0	460.6	0.0	650.0	0.0
	B115 / Begin	0.0	0.0	125.0	0.0	0.0	0.0

## Check

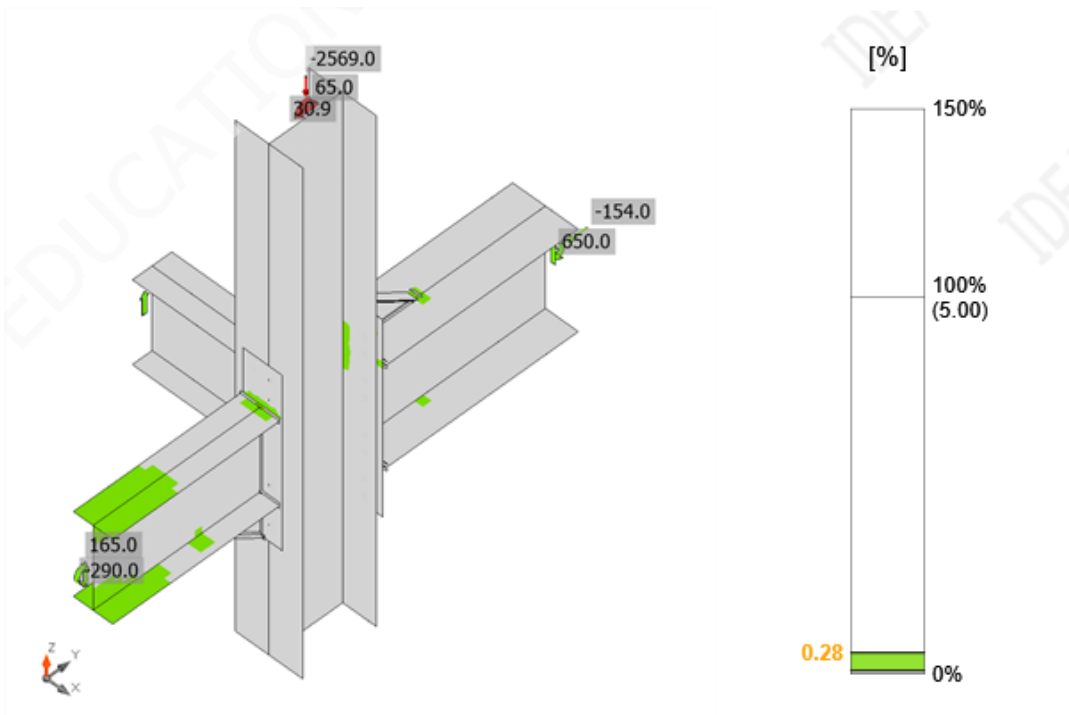
### Summary

Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	0.3 < 5.0%	OK
Bolts	90.2 < 100%	OK
Welds	98.9 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	

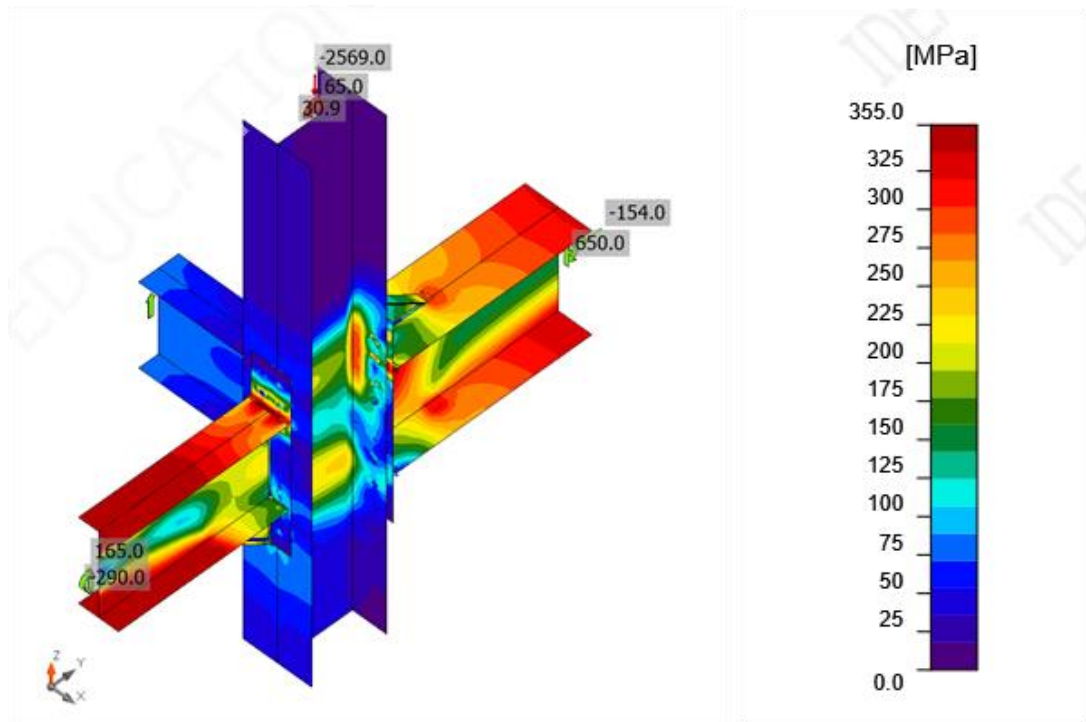




Overall check, LE1



Strain check, LE1

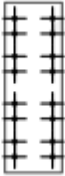


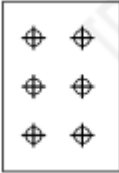





*Equivalent stress, LE1*

**Buckling**

Buckling analysis was not calculated.

## Bill of material

Name	Plates [mm]	Shape	Nr.	Welds Throat thickness [mm]	Length [mm]	Bolts	Nr.
EP1	P30.0x300.0-900.0 (S 355)		1	Double fillet: 8.0	1067. 0	M24 10.9	16
WID1	P18.0x180.0-265.0 (S 355)		2	Double fillet: 8.0	1730. 7		
	P18.0x50.0-320.4 (S 355)		2				
FP2	P12.0x192.0-280.0 (S 355)		1	Double fillet: 8.0	280. 0	M24 10.9	6
EP2	P20.0x180.0-800.0 (S 355)		1	Double fillet: 8.0	746. 5	M24 10.9	12
WID2	P10.0x180.0-265.0 (S 355)		1	Double fillet: 8.0	865. 4		

	P10.0x50.0-320.4 (S 355)		1				
--	--------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	---	--	--	--	--

## Welds

Typ e	Material	Throat thickness[mm]	Leg size [mm]	Length [mm]
Double fillet	S 355	8.0	11.3	4689.6

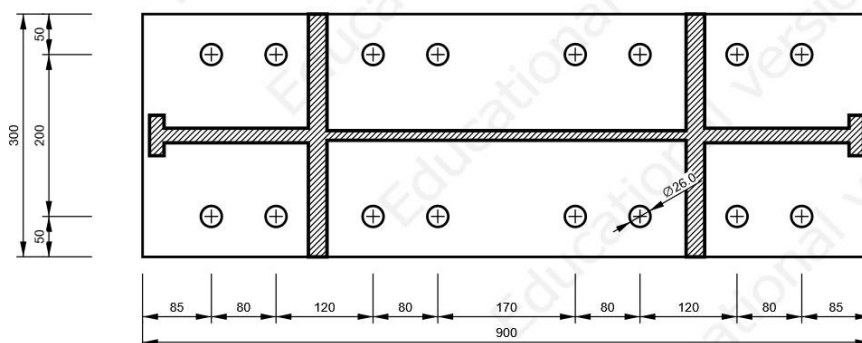
## Bolts

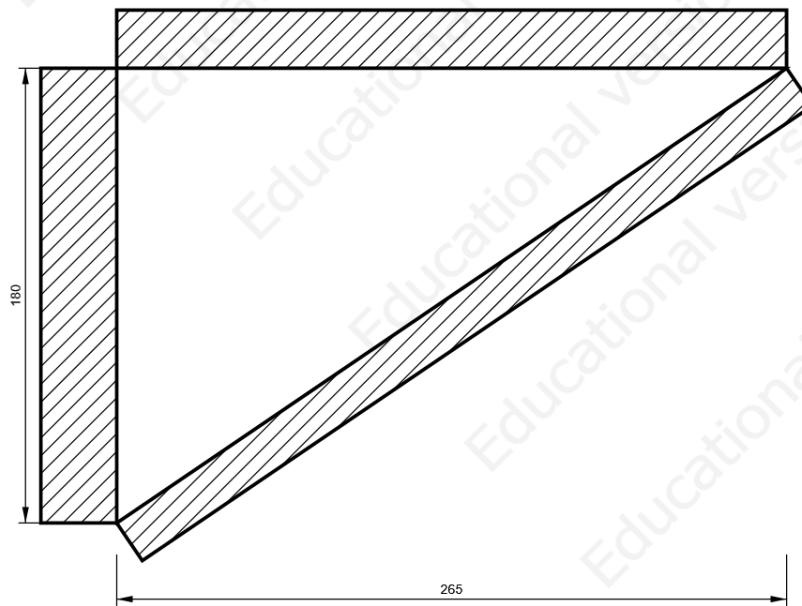
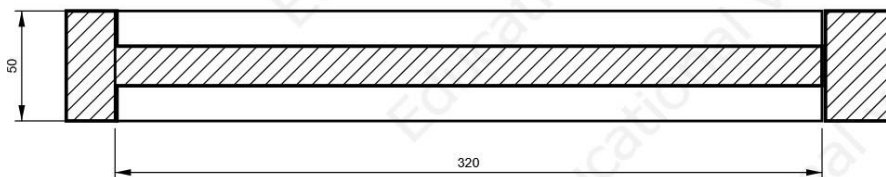
Name	Grip length [mm]	Count
M24 10.9	70	1 6
M24 10.9	21	6
M24 10.9	60	1 2

## Drawing

### EP1

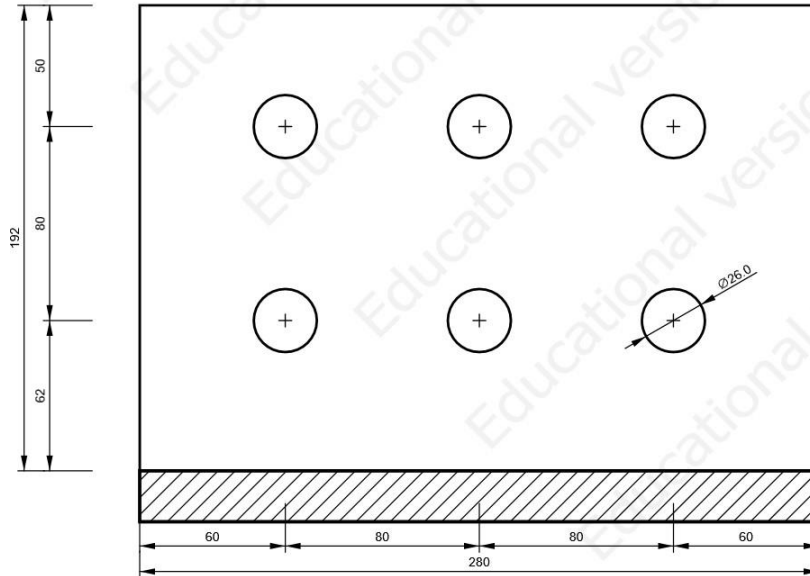
P20.0x790-230 (S 355)



**WID1 - WID1a****P18.0x265-180 (S 355)****WID1 - WID1b****P18.0x320-50 (S 355)**

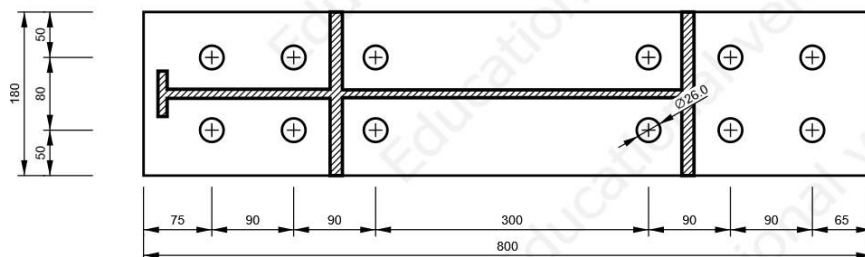
FP2

P12.0x280-192 (S 355)



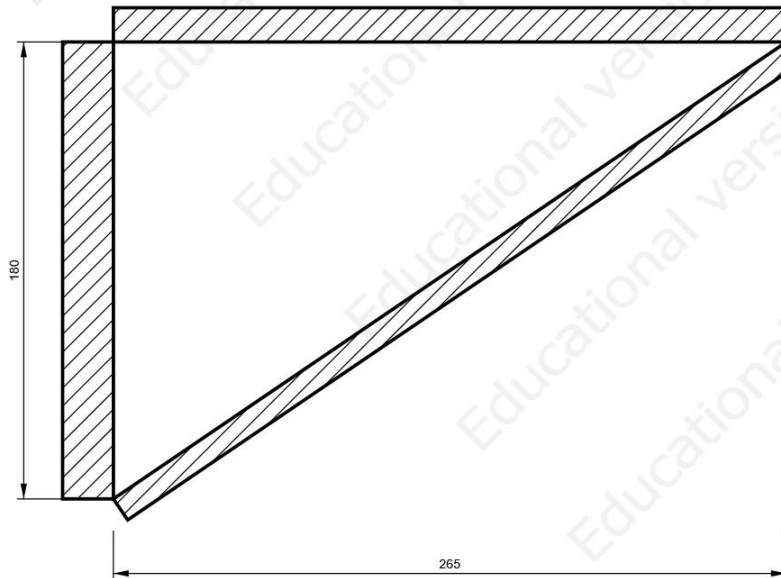
EP2

P20.0x800-180 (S 355)



WID2 - WID2a

P10.0x265-180 (S 355)

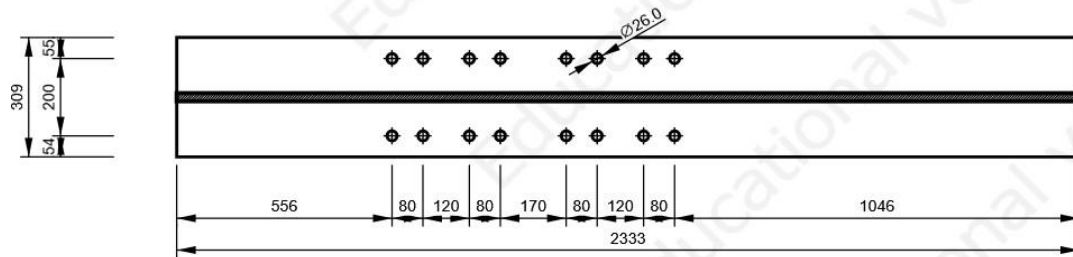


WID2 - WID2b

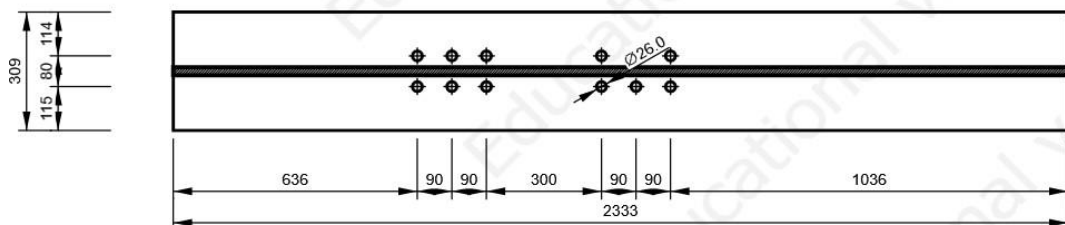
P10.0x320-50 (S 355)



## B93, HEM340 - Bottom flange 1:

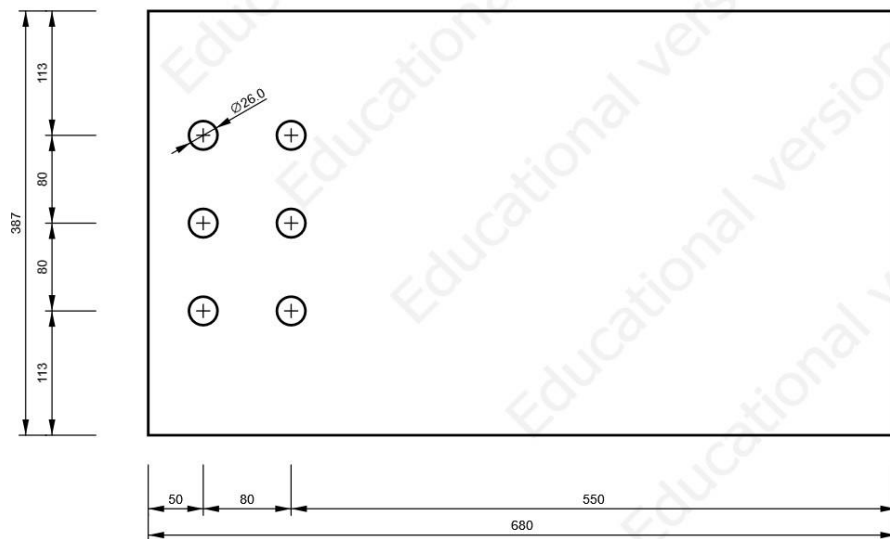


## B93, HEM340 - Top flange 1:





## B115, IPE400 - Web 1:



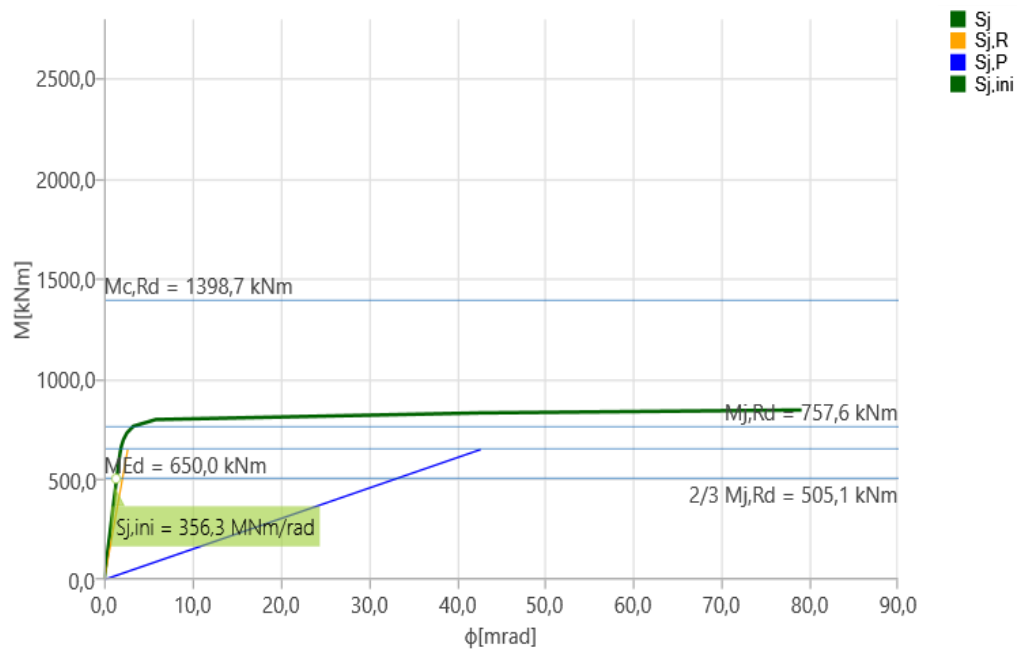
## Check

## Rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
B103	My	LE1	757. 6	35 6.3	- 3.1	6.0 0	24 3.6	15.2	Rigid

## Secant rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	M [kNm]	$S_{j,s}$ [MNm/rad]	$\phi$ [mrad]
B103	My	LE1	65 0.0	346.4	-1.9



Stiffness diagram  $M_y - \phi_y$ , LE1

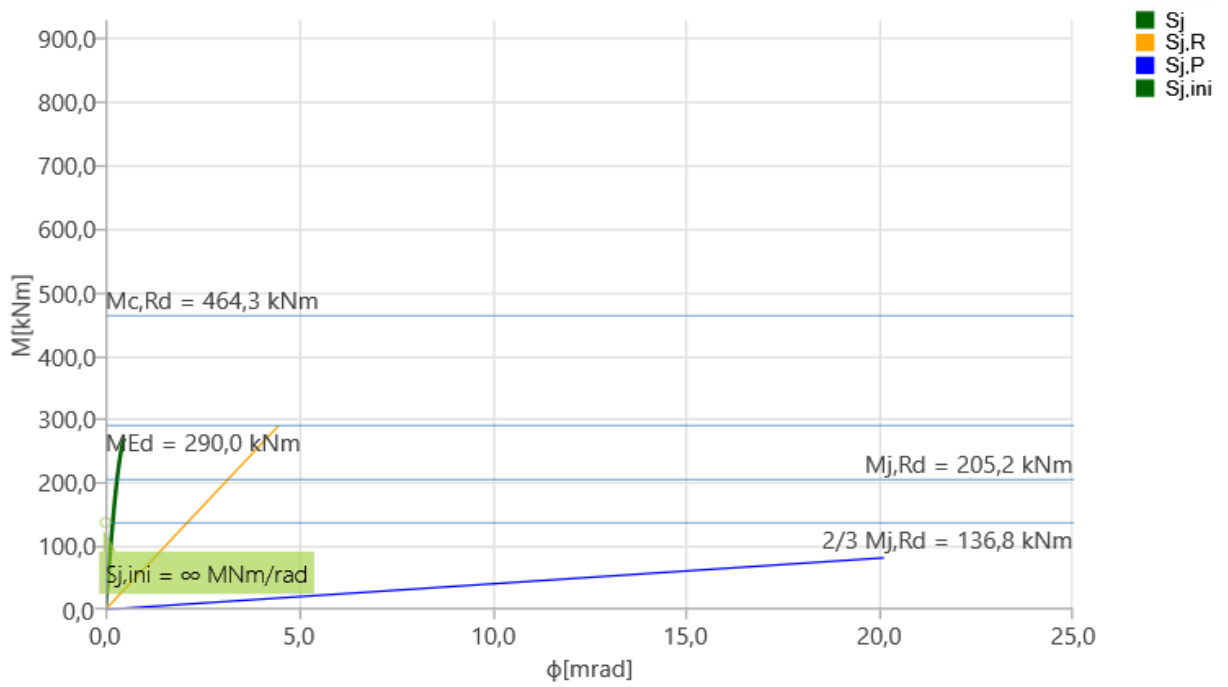
Check

Rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
B102	$M_y$	LE1	- 205.2	$\infty$	- 0.3	6.00	64.8	4.0	Rigid

Secant rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	M [kNm]	$S_{j,s}$ [MNm/rad]	$\phi$ [mrad]
B102	$M_y$	LE1	290.0	0.0	-20.1

Stiffness diagram  $M_\gamma - \phi_\gamma$

## 7.5. Priključak nosača okvira i sekundarnog nosača na stup B4

### Project item N69

#### Design

Name N69

Description

Analysis Stress, strain/ loads in equilibrium

#### Members

#### Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ – Direction [°]	$\gamma$ – Pitch [°]	$\alpha$ – Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
B95	6 - HEB800	0.0	90.0	0.0	0	0	0
B107	18 - IPE550	90.0	0.0	0.0	0	0	-275
B111	24 - IPE400	0.0	0.0	0.0	0	0	-200
B114	30 - IPE400	0.0	0.0	0.0	0	0	-200

#### Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [mm]
B95 / begin	N-V <sub>y</sub> -V <sub>z</sub> -M <sub>x</sub> -M <sub>y</sub> -M <sub>z</sub>	Position	0
B95 / end		Position	0
B107 / end		Position	0
B111 / begin		Position	0
B114 / end		Position	0

#### Cross-sections

Name	Material
6 - HEB800	S 355
18 - IPE550	S 355
24 - IPE400	S 355
30 - IPE400	S 355

## Bolts

Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M24 10.9	24	900. 0	1000 .0	452

## Load effects (forces in equilibrium)

Name	Member	N [kN]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE1	B95 / Begin	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	B95 / End	2272.0	0.0	109.0	0.0	294.0	0.0
	B107 / End	0.0	0.0	256.0	0.0	0.0	0.0
	B111 / Begin	0.0	0.0	125.0	0.0	0.0	0.0
	B114 / End	0.0	0.0	125.0	0.0	215.0	0.0

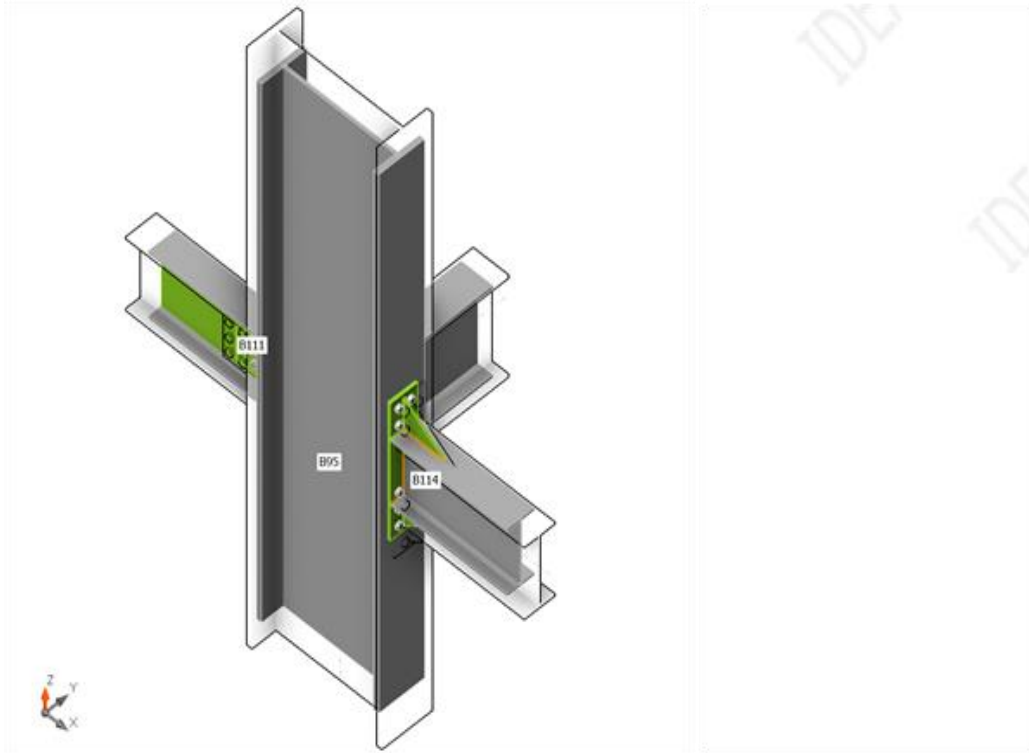
## Unbalanced forces

Name	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE1	109.0	0.0	2778.0	0.0	509.0	0.0

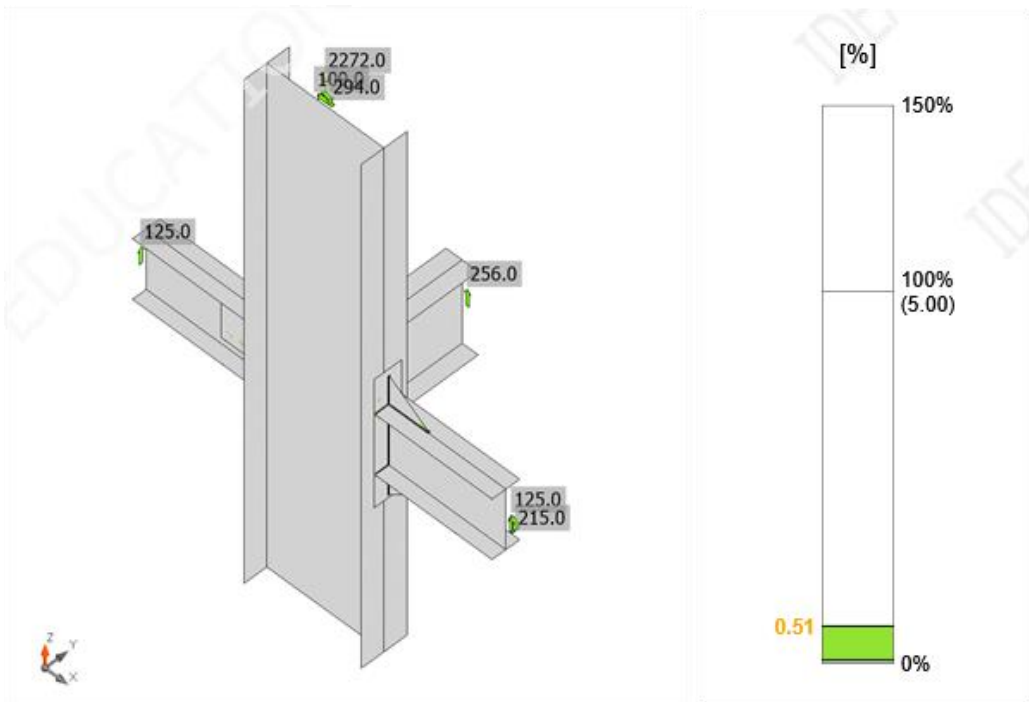
## Check

## Summary

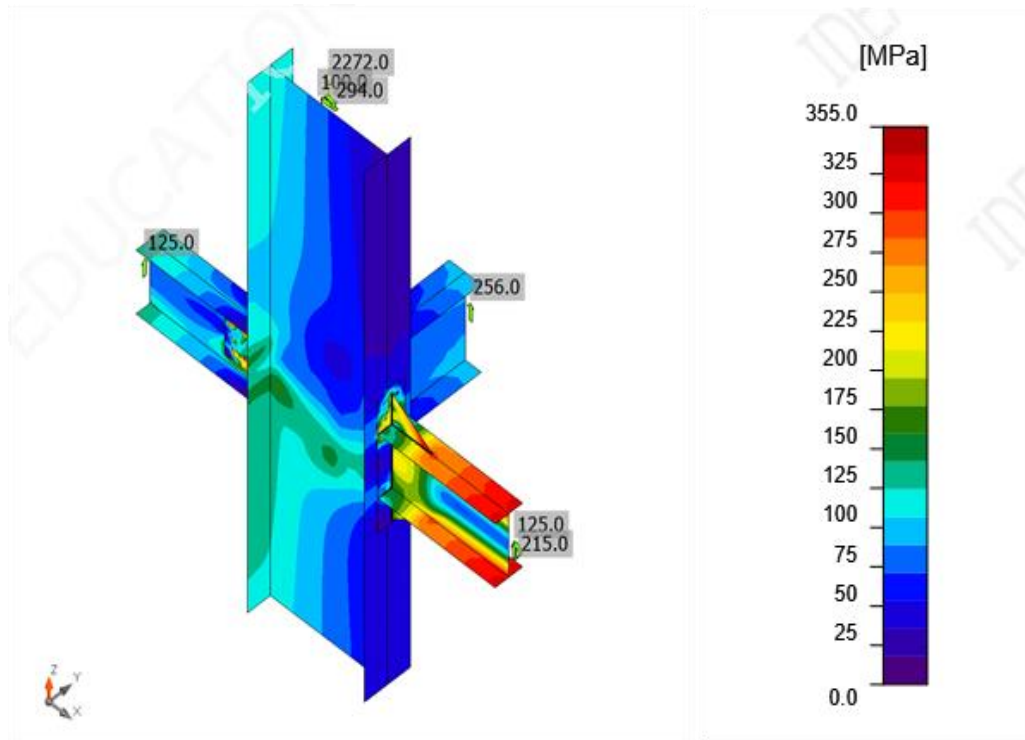
Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	0.5 < 5.0%	OK
Bolts	84.6 < 100%	OK
Welds	98.0 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	



Overall check, LE1





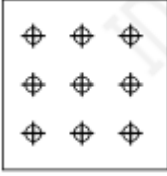

Strain check, LE1



*Equivalent stress, LE1*

## Bill of material

## Manufacturing operations

Name	Plates [mm]	Shape	Nr.	Welds Throat thickness [mm]	Length [mm]	Bolts	Nr.
EP1	P16.0x180.0-820.0 (S 355)		1	Double fillet: 4.0	746.5	M24 10.9	12
WID1	P10.0x180.0-265.0 (S 355)		2	Double fillet: 4.0	890.0		
FP1	P12.0x272.0-280.0 (S 355)		1	Double fillet: 8.0	280.0	M24 10.9	9
FP2	P20.0x198.0-440.0 (S 355)		1	Double fillet: 4.0	440.0	M24 10.9	10



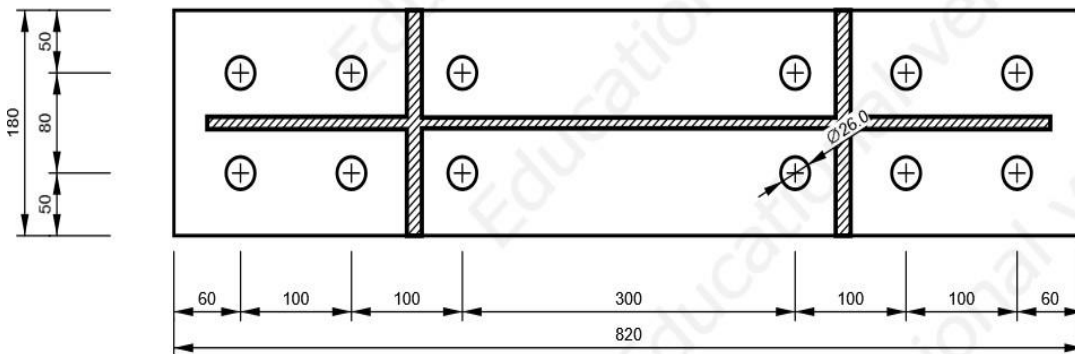
## Welds

Type	Material	Throat thickness [mm]	Leg size [mm]	Length [mm]
Double fillet	S 355	4.0	5.7	2076.5
Double fillet	S 355	8.0	11.3	280.0

## Bolts

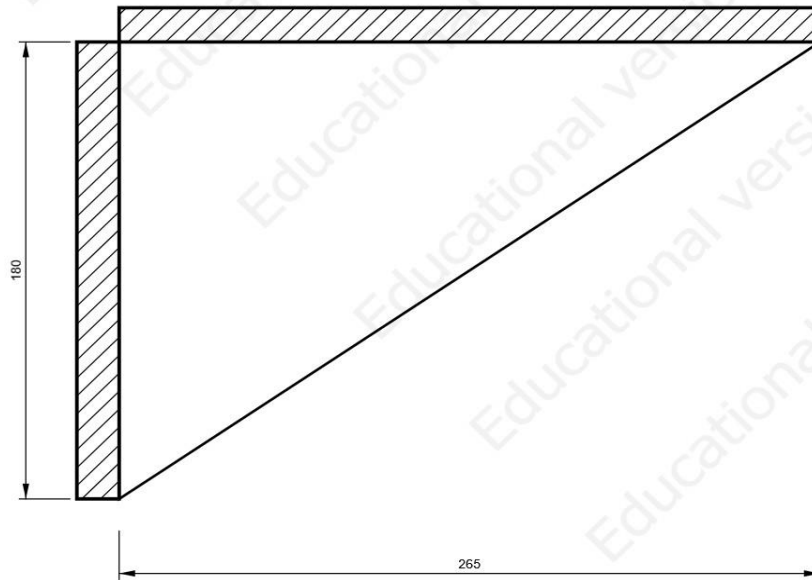
Name	Grip length [mm]	Count
M24 10.9	49	12
M24 10.9	21	9
M24 10.9	31	10

## Drawing EP1



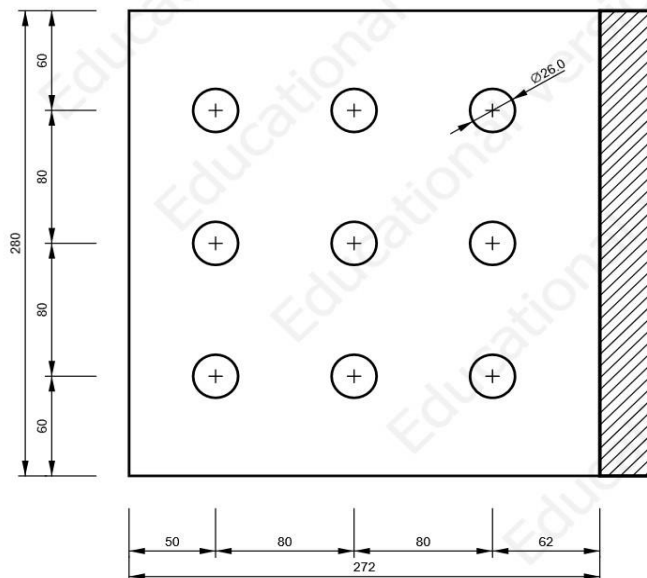
WID1

P10.0x265-180 (S 355)



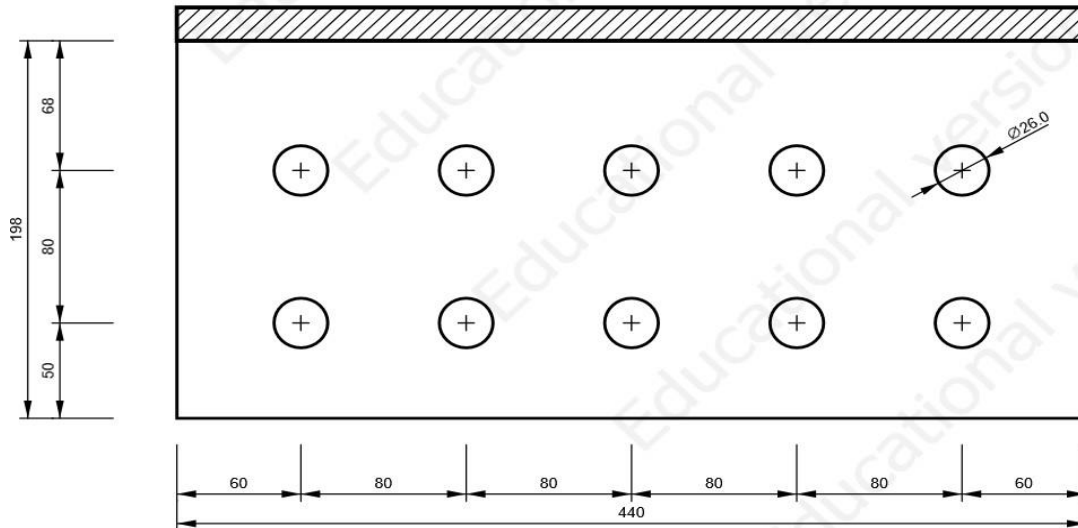
FP1

P12.0x280-272 (S 355)

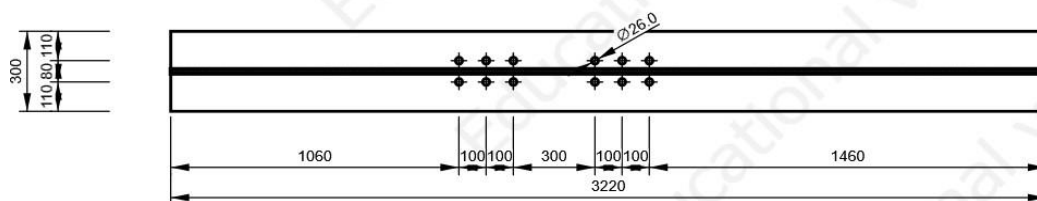


FP2

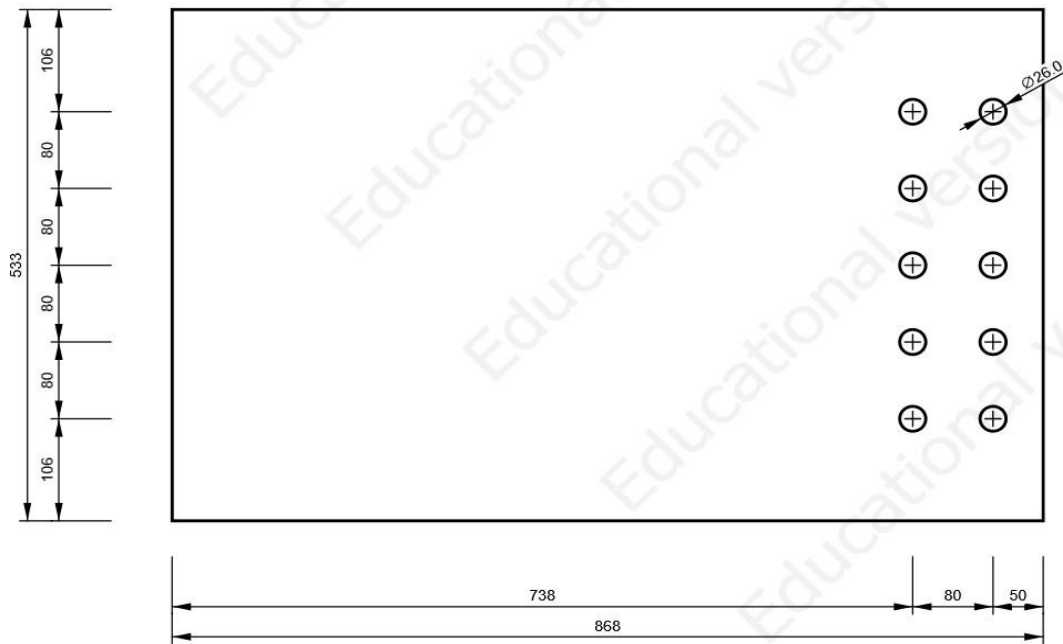
P20.0x440-198 (S 355)



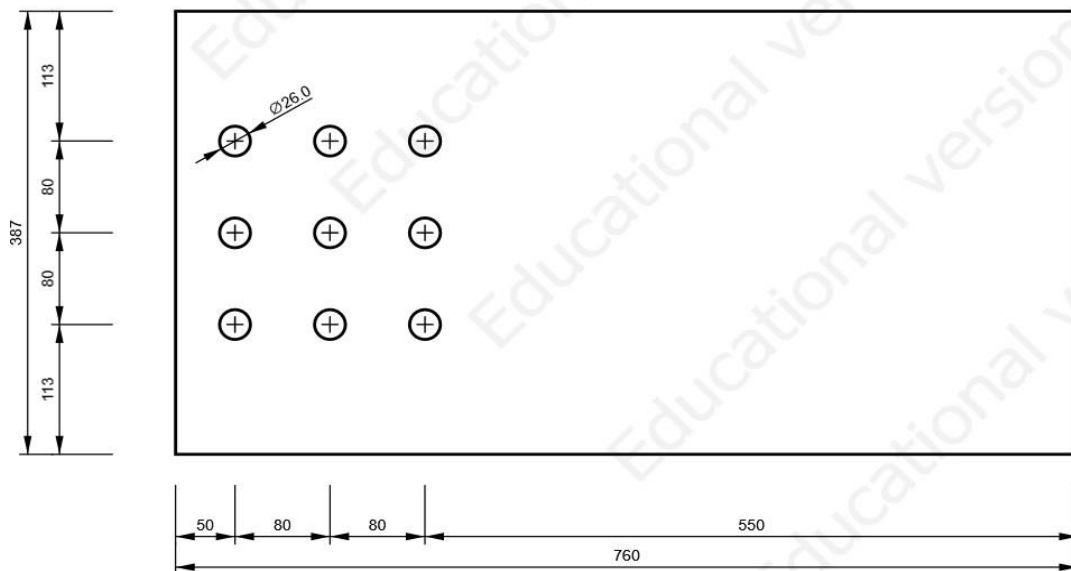
B95, HEB800 - Bottom flange 1:



## B107, IPE550 - Web 1:



## B111, IPE400 - Web 1:



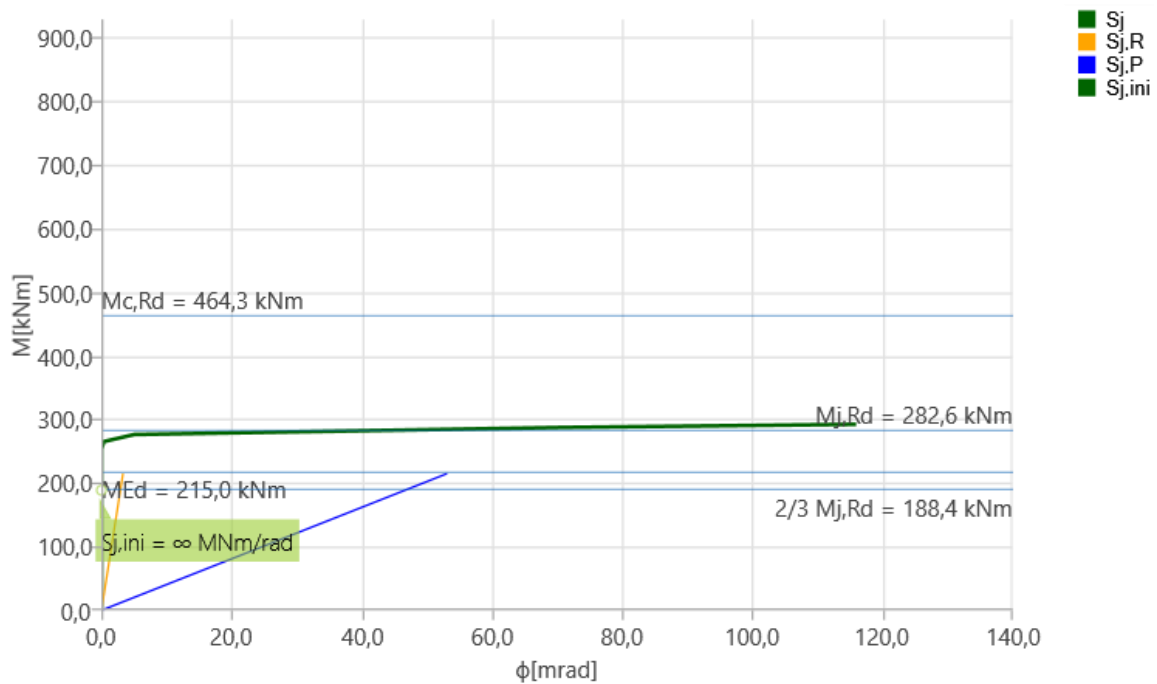
## Check

## Rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
B114	My	LE1	282.6	$\infty$	10.8	6.0	64.8	4.0	Rigid

## Secant rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	M [kNm]	$S_{j,s}$ [MNm/rad]	$\phi$ [mrad]
B114	My	LE1	215.0	$\infty$	0.0

Stiffness diagram  $M_y - \phi_y, L$

## 7.6. Priključak nosača okvira i sekundarnog nosača na stup A1

Project item N58

Design

Name N58

Description

Analysis Stress, strain/ simplified loading

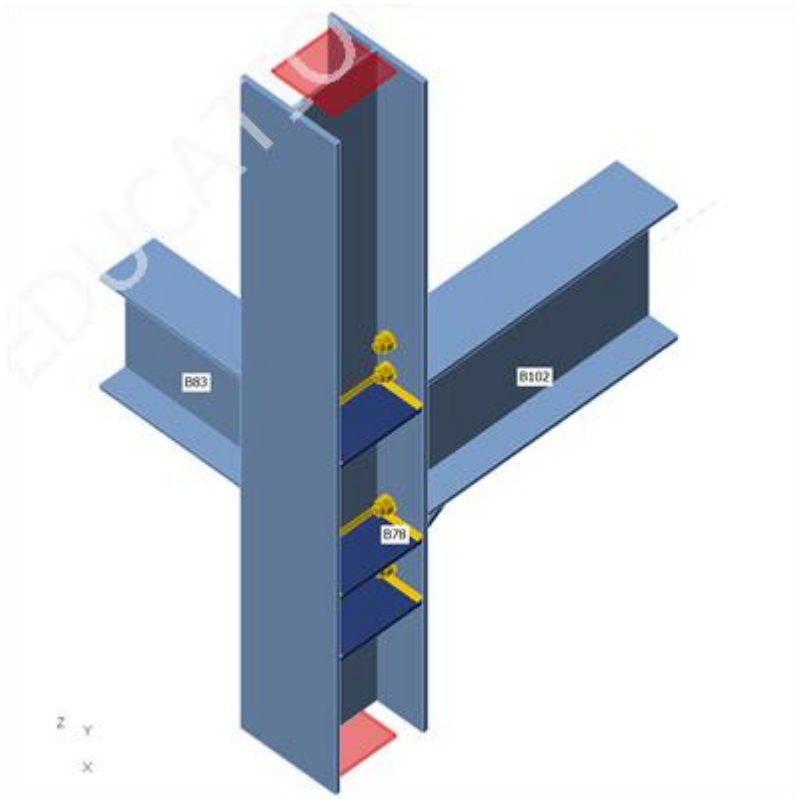
Members

Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ – Direction [°]	$\gamma$ – Pitch [°]	$\alpha$ – Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
B78	6 - HEA280	0.0	90.0	90.0	0	0	0
B83	12 - IPE330	0.0	0.0	0.0	0	0	-165
B102	24 - IPE400	90.0	0.0	0.0	0	0	-200

Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [mm]
B78 / begin	N-V <sub>y</sub> -V <sub>z</sub> -M <sub>x</sub> -M <sub>y</sub> -M <sub>z</sub>	Position	0
B78 / end	N-V <sub>y</sub> -V <sub>z</sub> -M <sub>x</sub> -M <sub>y</sub> -M <sub>z</sub>	Position	0
B83 / begin		Position	0
B102 / end		Position	0



## Cross-sections

Name	Material
6 - HEA280	S 355
12 - IPE330	S 355
24 - IPE400	S 355

## Bolts

Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M24 10.9	24	900.0	1000.0	452

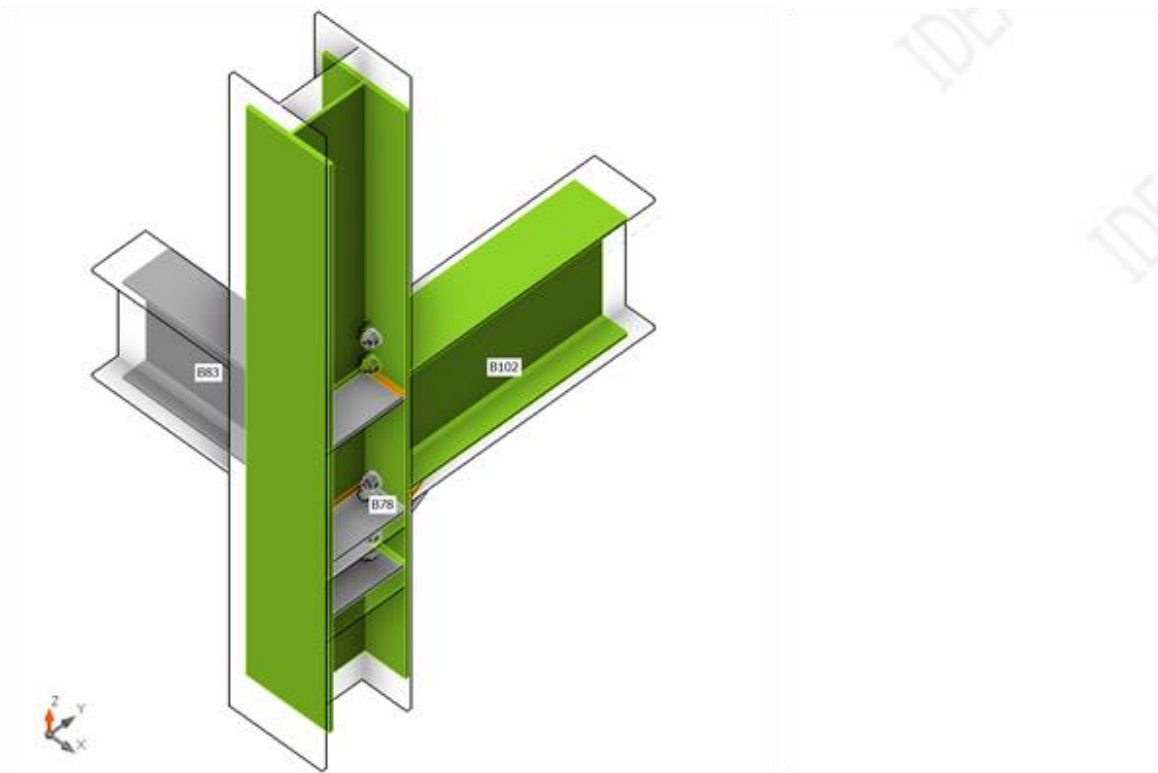
## Load effects (Equilibrium not required)

Name	Member	N [kN]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE1	B83 / Begin	0.0	0.0	90.0	0.0	0.0	0.0
	B102 / End	0.0	0.0	165.0	0.0	290.0	0.0

## Check

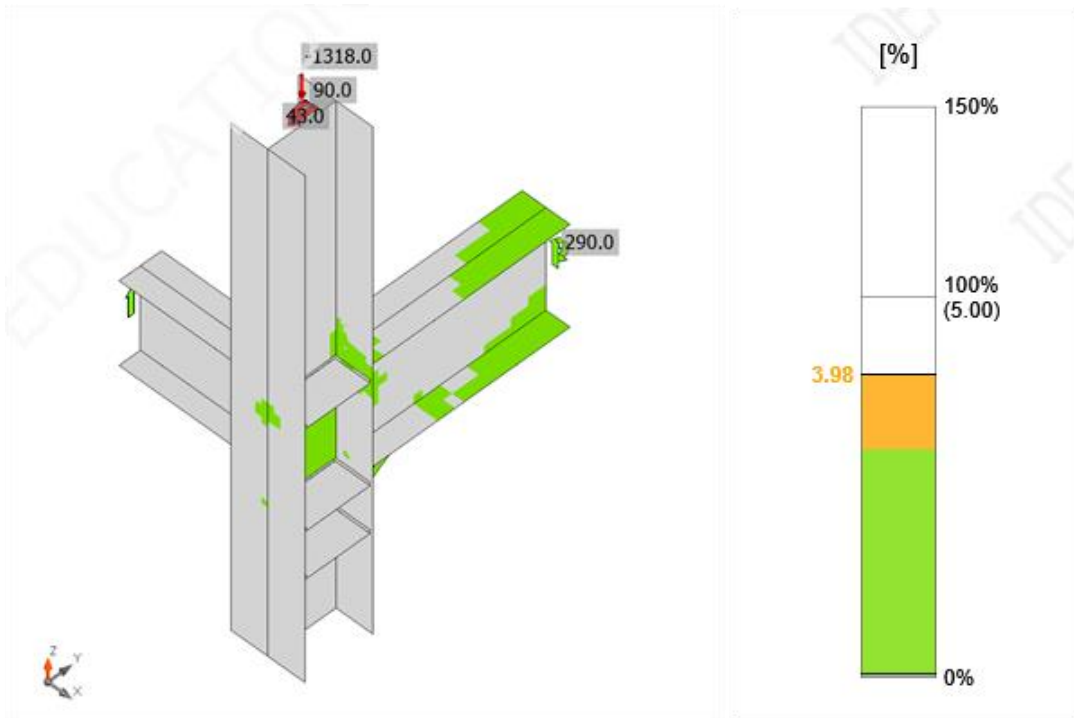
### Summary

Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	$4.0 < 5.0\%$	OK
Bolts	$91.3 < 100\%$	OK
Welds	$98.7 < 100\%$	OK
Buckling	Not calculated	

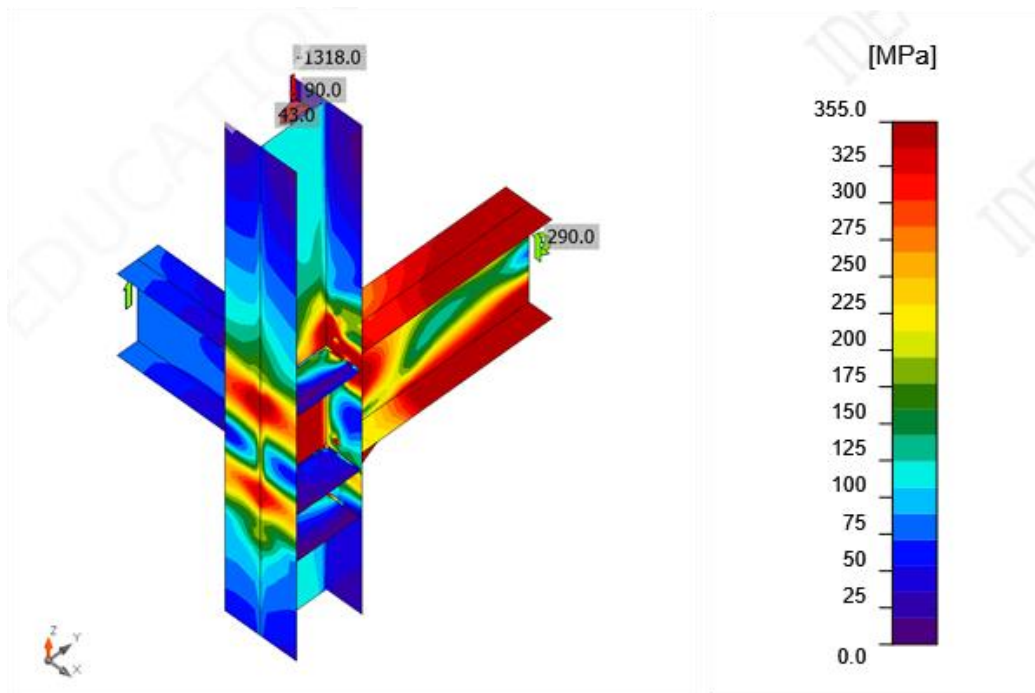


Overall check, LE1





Strain check, LE1



Equivalent stress, LE1

## Buckling

Buckling analysis was not cal

## 7.7. Nastavak stupa A4

Project item N556

### Design

Name	N556
Description	
Analysis	Stress, strain/ loads in equilibrium

### Members

#### Geometry

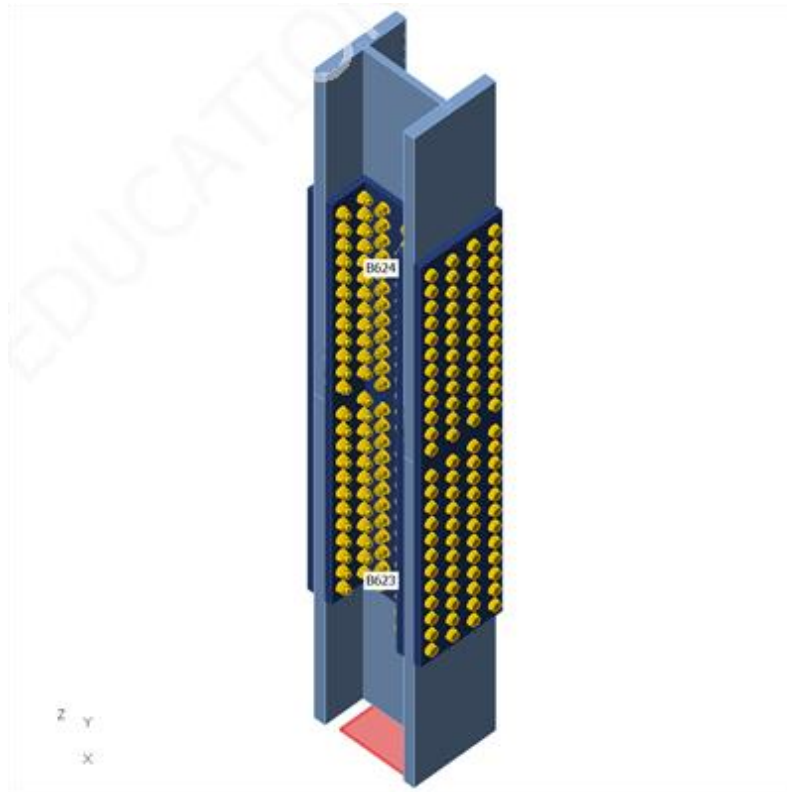
Name	Cross-section	$\beta$ – Direction [°]	$\gamma$ – Pitch [°]	$\alpha$ – Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
B623	6 - HEM340	0.0	90.0	0.0	0	0	0
B624	6 - HEM340	0.0	90.0	0.0	0	0	0

#### Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [mm]
B623 / begin	N-V $\gamma$ -Vz-Mx-My-Mz	Position	0
B624 / end		Position	0

#### Cross-sections

Name	Material
6 - HEM340	S 355



### Bolts

Name	Diameter [mm]	$f_v$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Grossarea [mm <sup>2</sup> ]
M20 10.9	20	900.0	1000.0	314

### Load effects (forces in equilibrium)

Name	Member	N [kN]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE1	B623 / Begin	3617.0	0.0	160.0	0.0	49.0	0.0
	B624 / End	-3617.0	0.0	-160.0	0.0	-49.0	0.0
LE2	B623 / Begin	-1164.0	0.0	160.0	0.0	49.0	0.0
	B624 / End	1164.0	0.0	-160.0	0.0	-49.0	0.0

### Bolts

Name	Diameter [mm]	$f_v$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Grossarea [mm <sup>2</sup> ]
M20 10.9	20	900.0	1000.0	314

## Load effects (forces in equilibrium)

Name	Member	N [kN]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE1	B623 / Begin	3617.0	0.0	160.0	0.0	49.0	0.0
	B624 / End	-3617.0	0.0	-160.0	0.0	-49.0	0.0
LE2	B623 / Begin	-1164.0	0.0	160.0	0.0	49.0	0.0
	B624 / End	1164.0	0.0	-160.0	0.0	-49.0	0.0

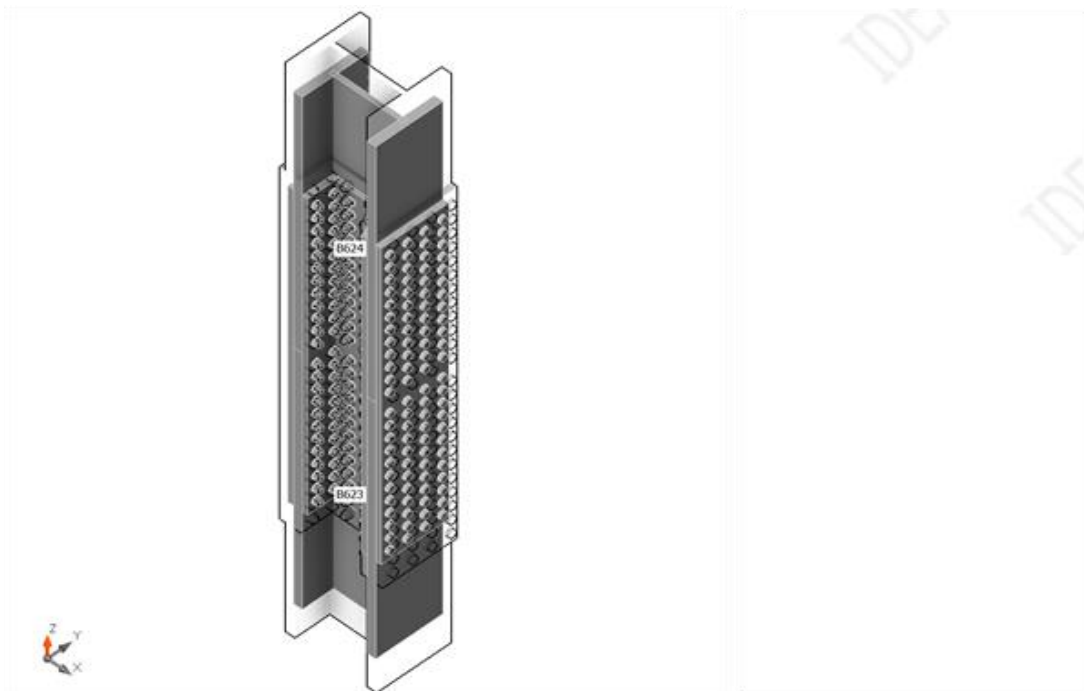
## Unbalanced forces

Name	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
LE2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

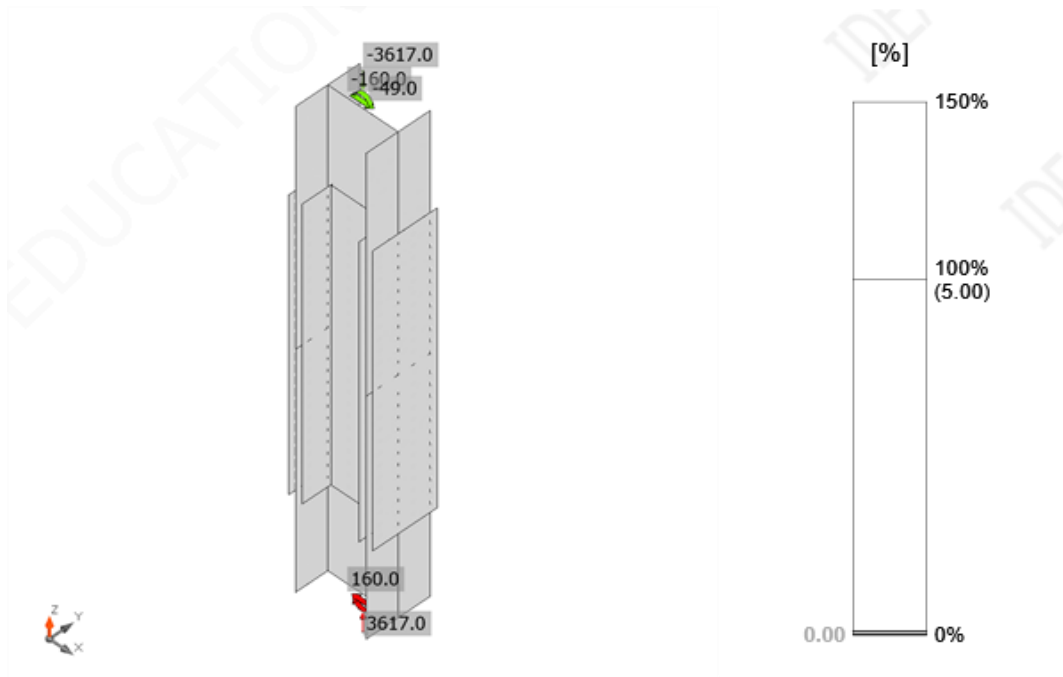
## Check

## Summary

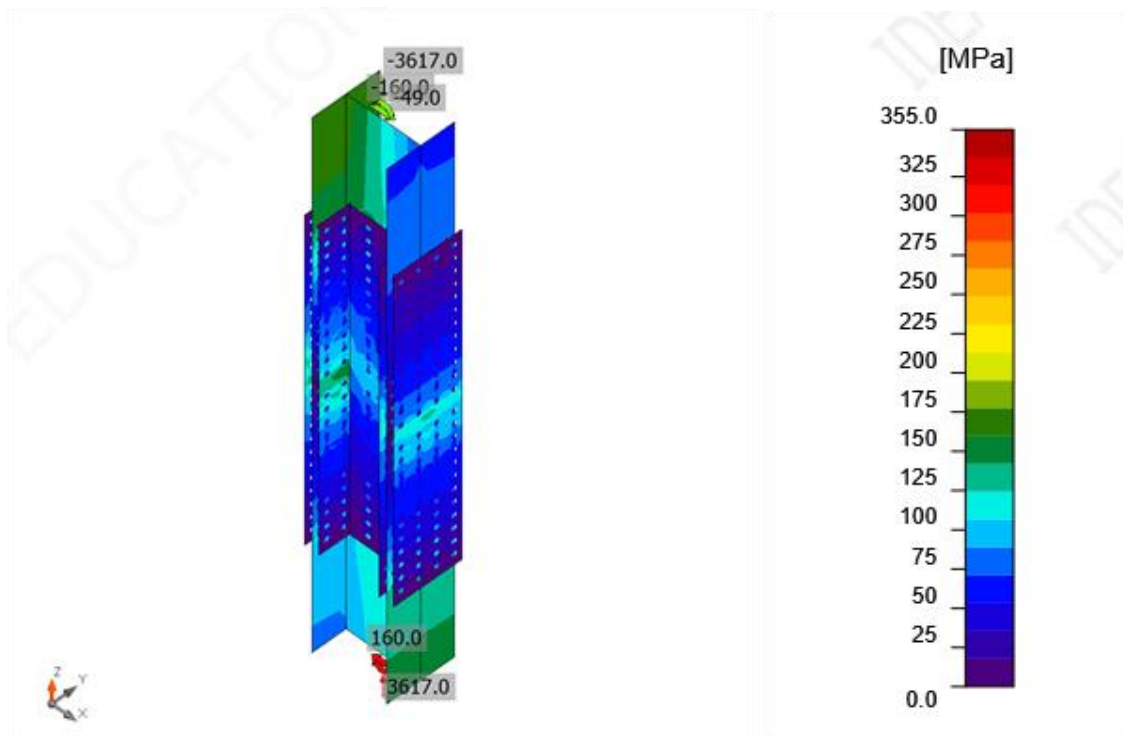
Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	0.0 < 5.0%	OK
Bolts	29.6 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	



Overall check, LE1



Strain check, LE1



Equivalent stress, LE1

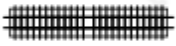
## Buckling

Buckling analysis was not calculated.

## Bill of material

## Manufacturing operations

Name	Plates [mm]	Shape	Nr.	Welds Throat thickness [mm]	Length [mm]	Bolts	Nr.
SPL1	P25.0x1520.0-309.0 (S 355)		1			M20 10.9	96
	P25.0x1520.0-142.0 (S 355)		1				
	P25.0x1520.0-142.0 (S 355)		1				
SPL2	P25.0x1520.0-309.0 (S 355)		1			M20 10.9	96
	P25.0x1520.0-142.0 (S 355)		1				
	P25.0x1520.0-142.0 (S 355)		1				
SPL3	P15.0x1520.0-267.0 (S 355)		1			M20 10.9	48

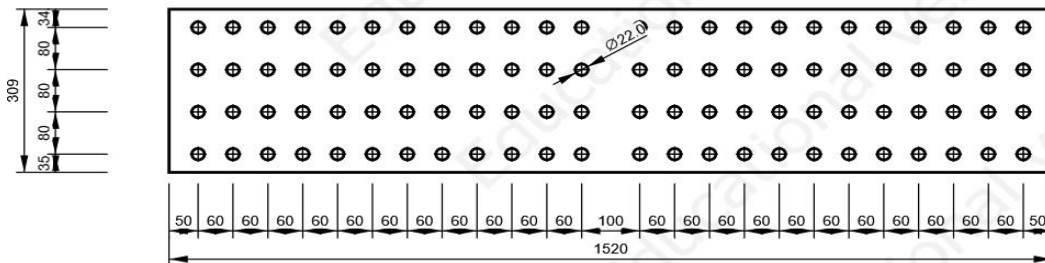
	P15.0x1520.0-267.0 (S 355)		1				
--	----------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	---	--	--	--	--

## Bolts

Name	Grip length [mm]	Count
M20 10.9	90	192
M20 10.9	51	48

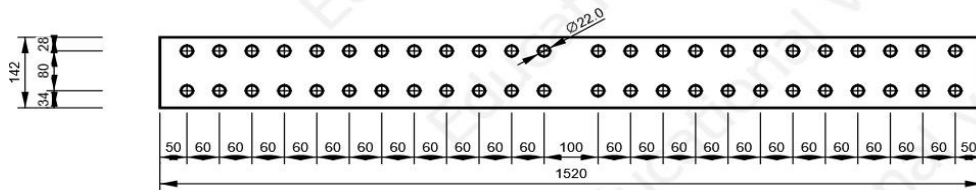
Drawing SPL1 -SPL1a

P25.0x309-1520(s355)



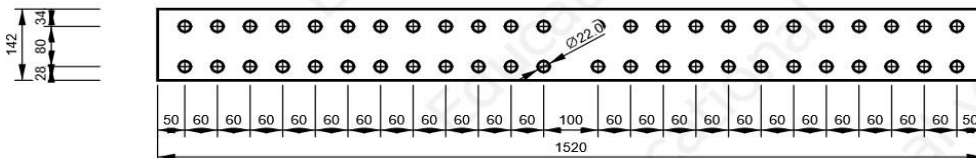
SPL1 - SPL1b

P25.0x142-1520 (S 355)



SPL1 - SPL1c

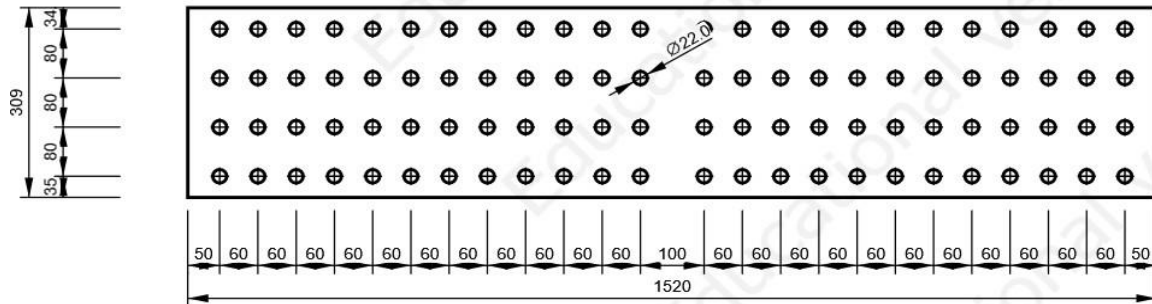
P25.0x142-1520 (S 355)





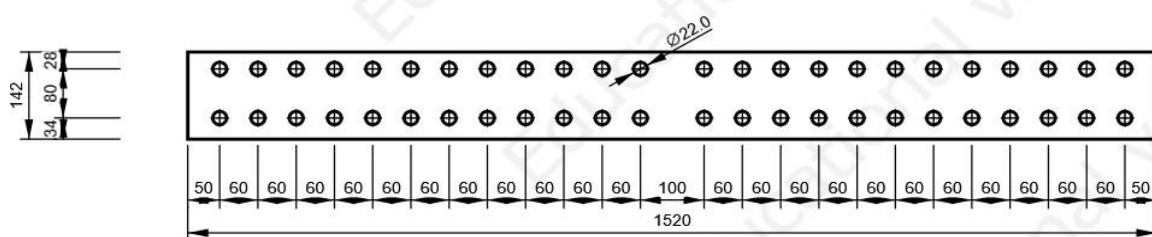
SPL2 - SPL2a

P25.0x309-1520 (S 355)



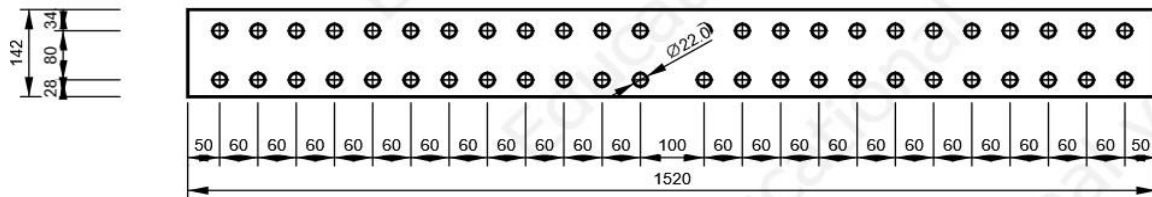
SPL2 - SPL2b

P25.0x142-1520 (S 355)



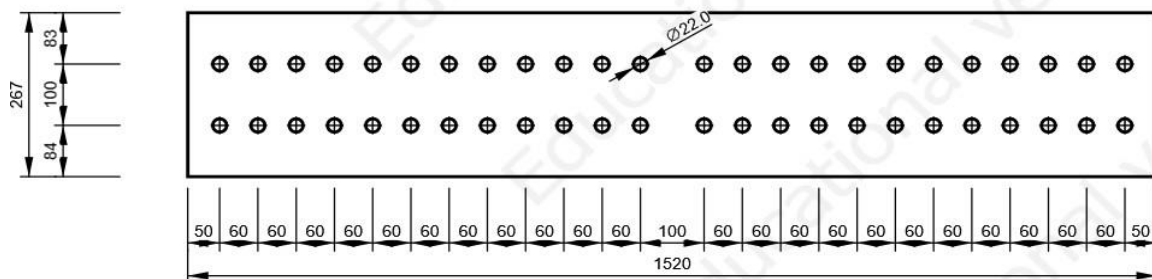
SPL2 - SPL2c

P25.0x142-1520 (S 355)



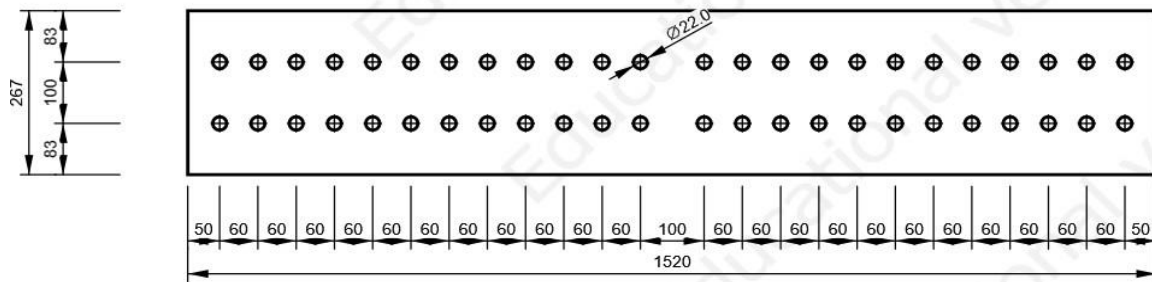
SPL3 - SPL3a

P15.0x267-1520 (S 355)

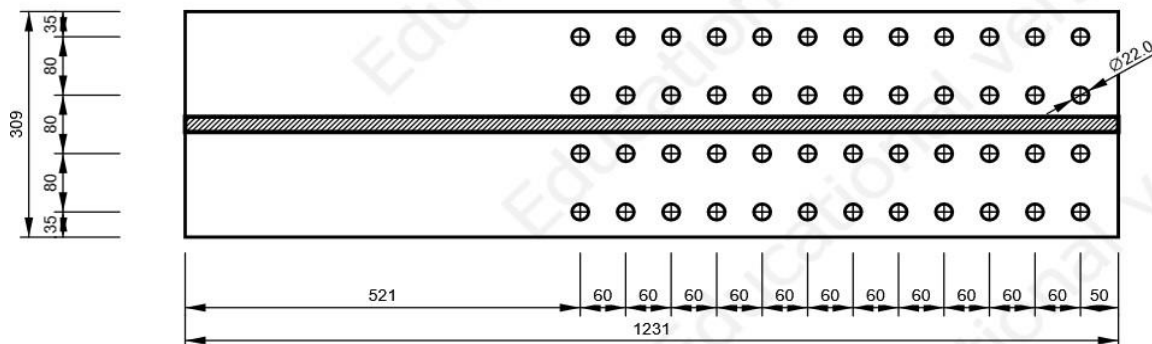


SPL3 - SPL3b

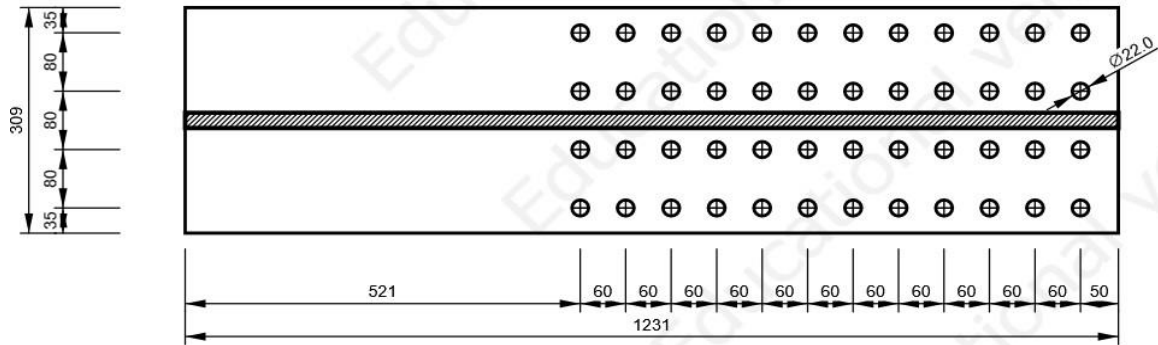
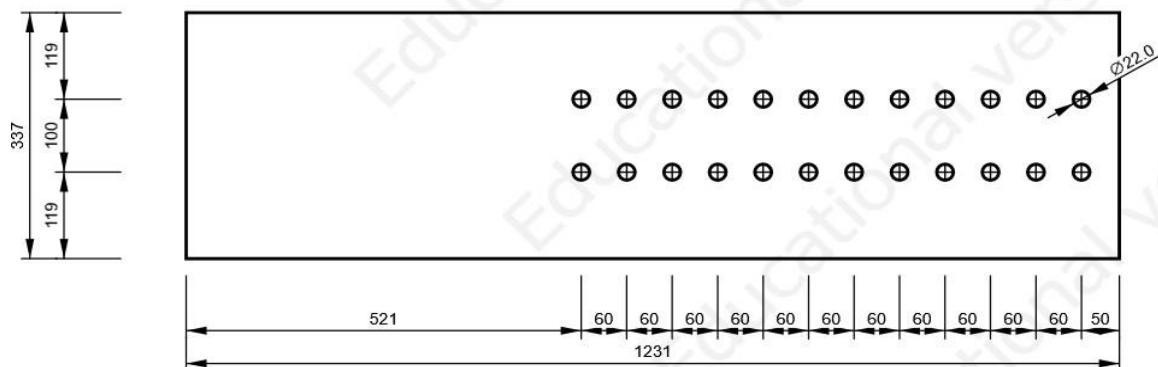
P15.0x267-1520 (S 355)



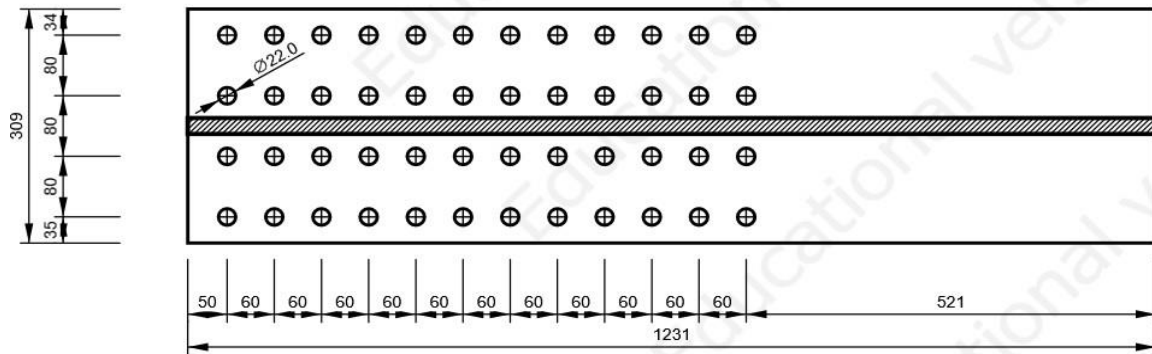
B623, HEM340 - Bottom flange 1:



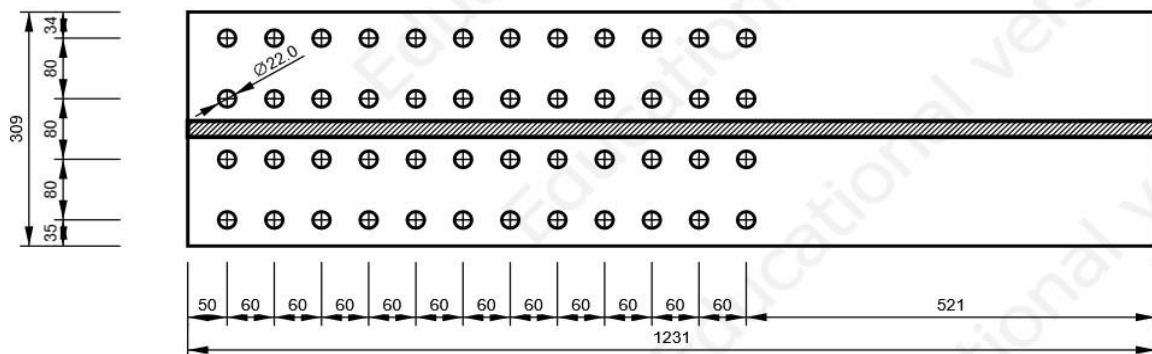
B623, HEM340 - Top flange 1:

**B623, HEM340 - Web 1:**

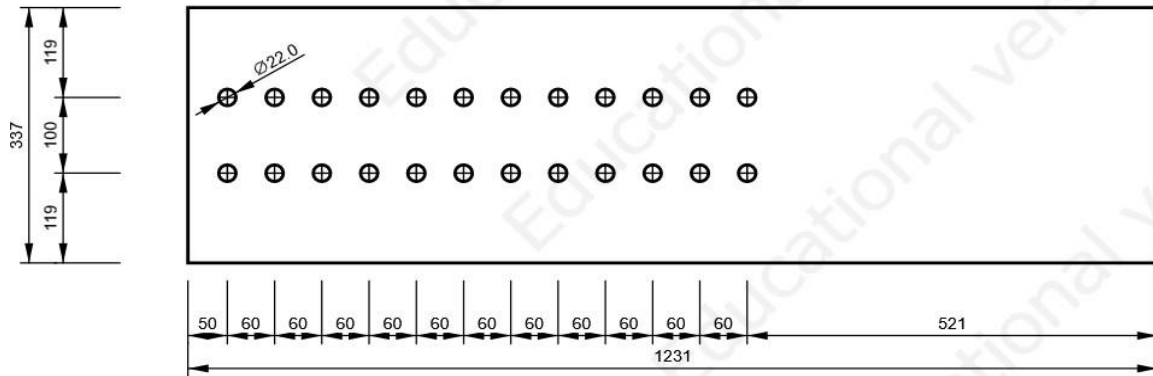
## B624, HEM340 - Bottom flange 1:



## B624, HEM340 - Top flange 1:



## B624, HEM340 - Web 1:



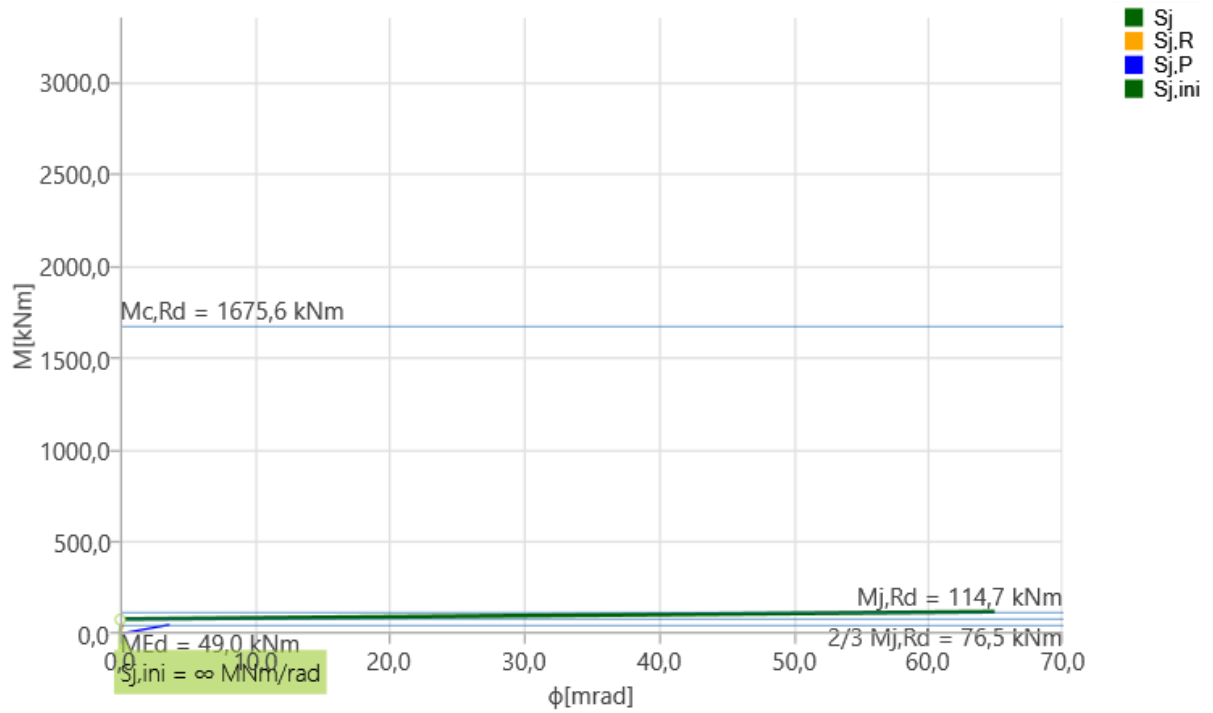
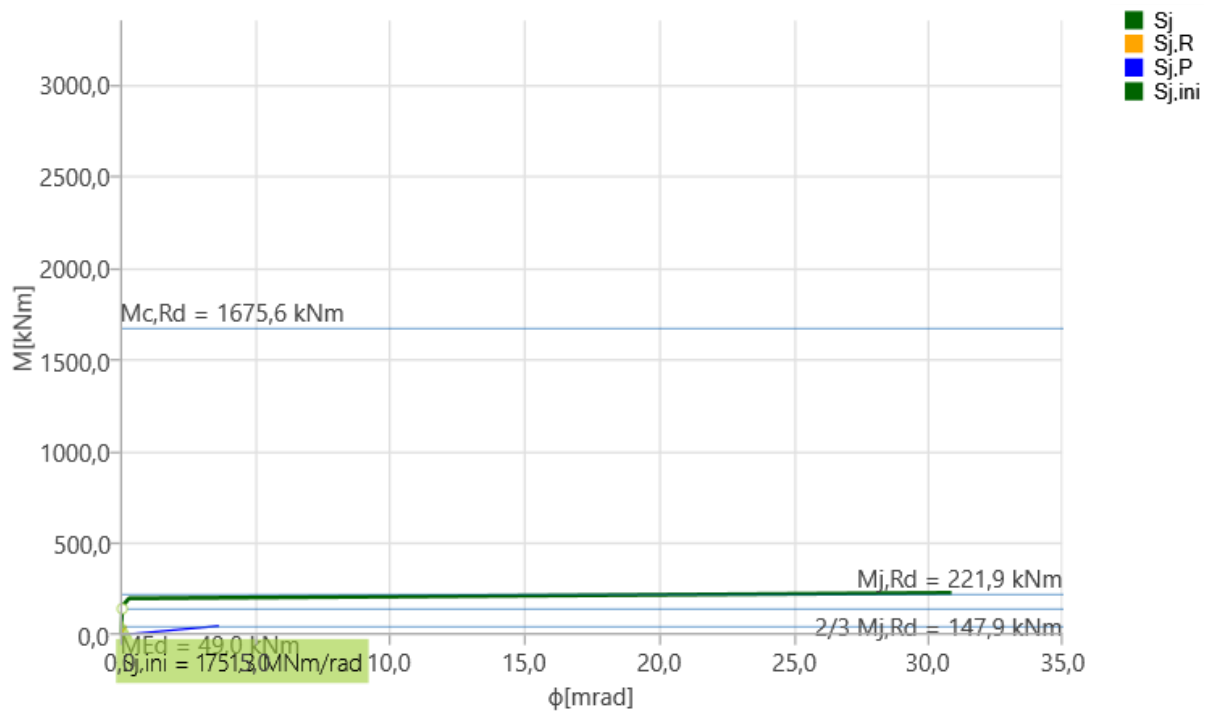
## Check

### Rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
B623	My	LE1	114.7	$\infty$	0.0	6.00	213.8	13.4	Rigid
	My	LE2	221.9	1751.3	1.4	6.00	213.8	13.4	Rigid

### Secant rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	M [kNm]	$S_{j,s}$ [MNm/rad]	$\phi$ [mrad]
B623	My	LE1	49.0	$\infty$	0.0
	My	LE2	49.0	1903.3	0.0

Stiffness diagram  $M_y - \phi$ , LE1Stiffness diagram  $M_y - \phi$ , LE2

## 7.8. Nastavak stupa A1

### Design

Name	N556
Description	
Analysis	Stress, strain/ simplified loading

### Members

### Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ - Direction [°]	$\gamma$ - Pitch [°]	$\alpha$ - Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
B622	6 - HEA280	0.0	90.0	0.0	0	0	0
B623	6 - HEA280	0.0	90.0	0.0	0	0	0

### Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [m m]
B622 / begin	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz	Position	0
B623 / end		Position	0





## Cross-sections

Name	Material
6- HEA280	S 355

## Bolts

Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M16 10.9	16	900.0	1000.0	201

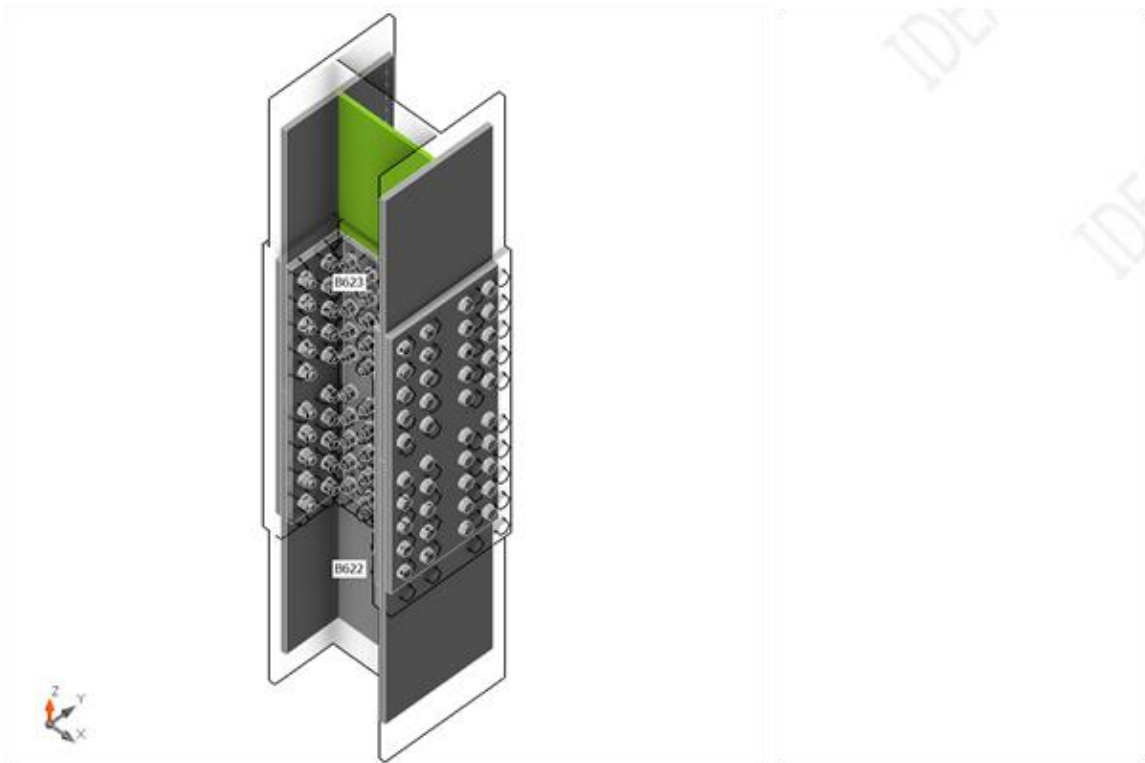
## Load effects (Equilibrium not required)

Name	Member	N [kN]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE3	B623 / End	1790.0	0.0	39.0	0.0	50.0	0.0

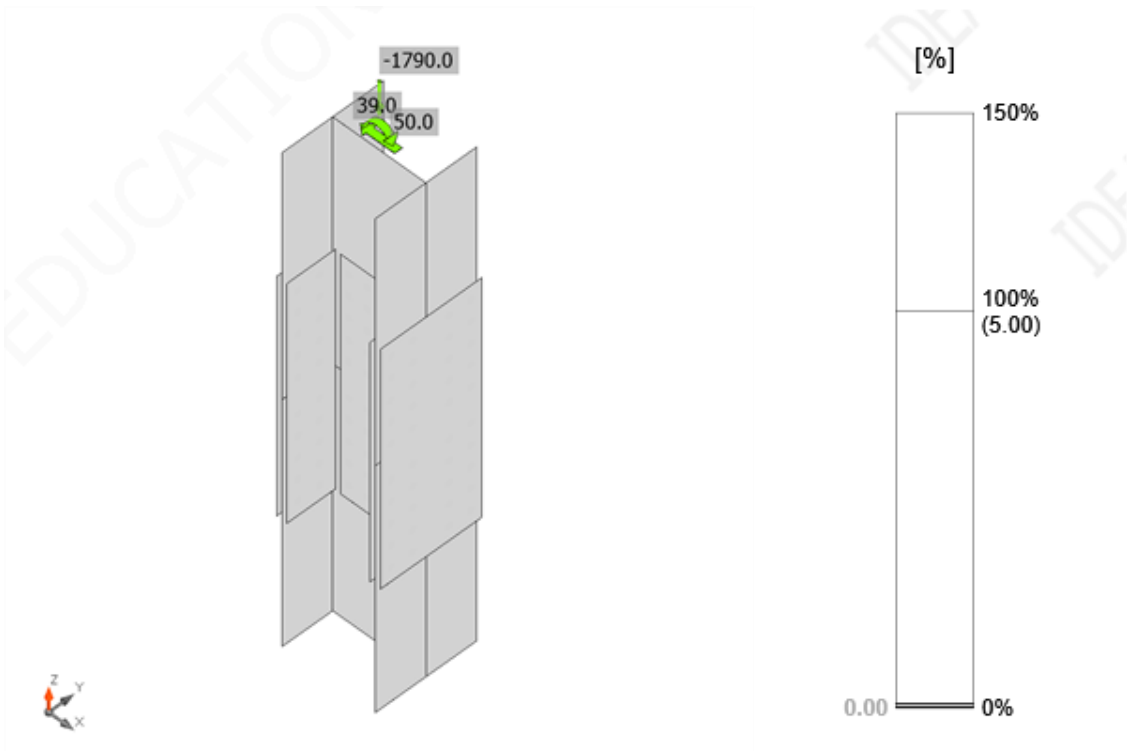
## Check

### Summary

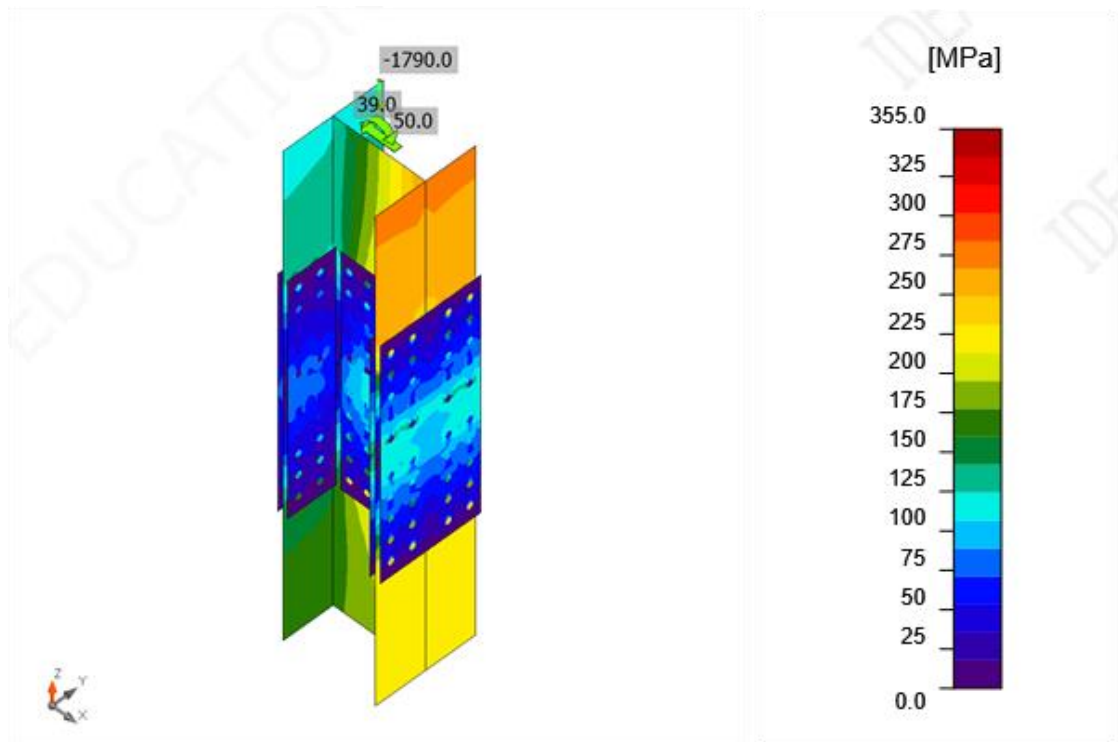
Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	0.0 < 5.0%	OK
Bolts	41.6 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	



Overall check, LE3



Strain check, LE3



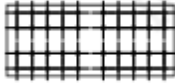
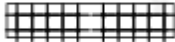

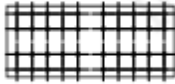


*Equivalent stress, LE3*

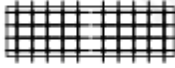
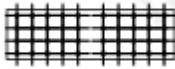
**Buckling**

Buckling analysis was not calculated.

## Bill of material

## Manufacturing operation

Name	Plates[mm]	Shape	Nr.	Welds Throat thickness [mm]	Length [mm]	Bolts	Nr.
SPL1	P15.0x660.0-280.0(S 355)		1			M16 10.9	40
	P15.0x660.0-134.0(S 355)		1				
	P15.0x660.0-134.0(S 355)		1				
SPL2	P15.0x660.0-280.0(S 355)		1			M16 10.9	40
	P15.0x660.0-134.0(S 355)		1				
	P15.0x660.0-134.0(S 355)		1				

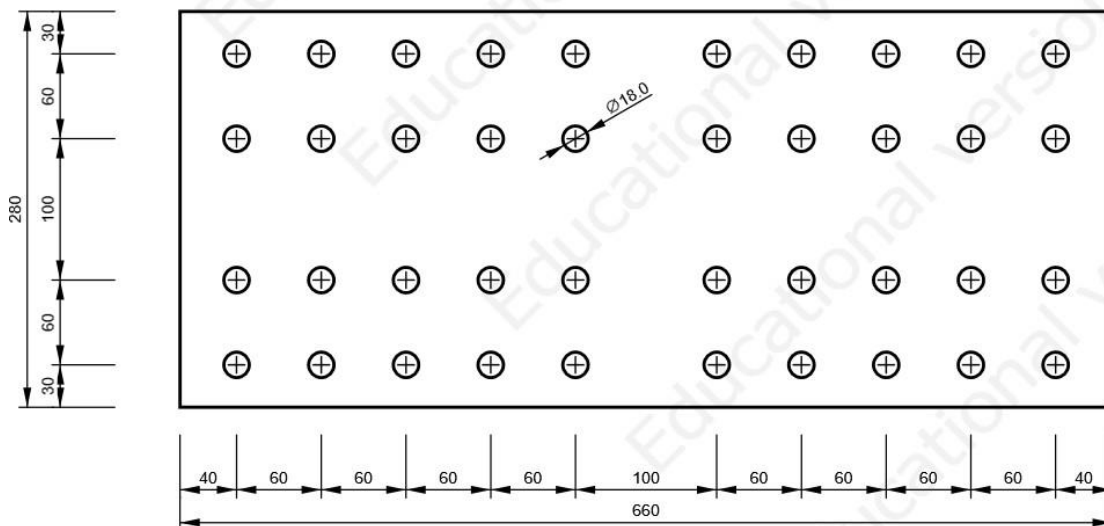
SPL3	P10.0x660.0-197.0(S 355)		1			M16 10.9	40
	P10.0x660.0-197.0(S 355)		1				

## Bolts

Naime	Grip length [mm]	Count
M16 10.9	43	80
M16 10.9	28	40

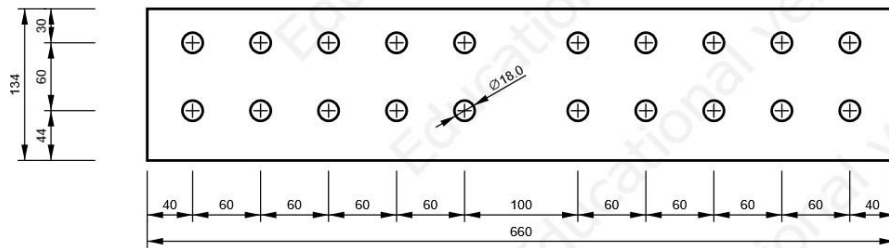
## SPL1 - SPL1b

## P15.0x134-660(S 355)

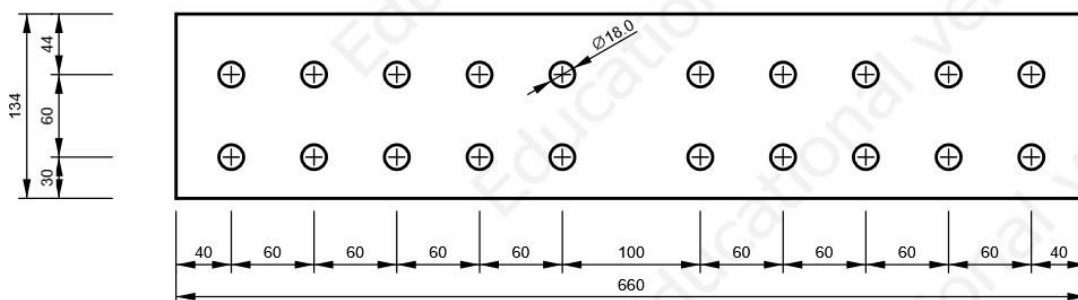


SPL1 - SPL1b

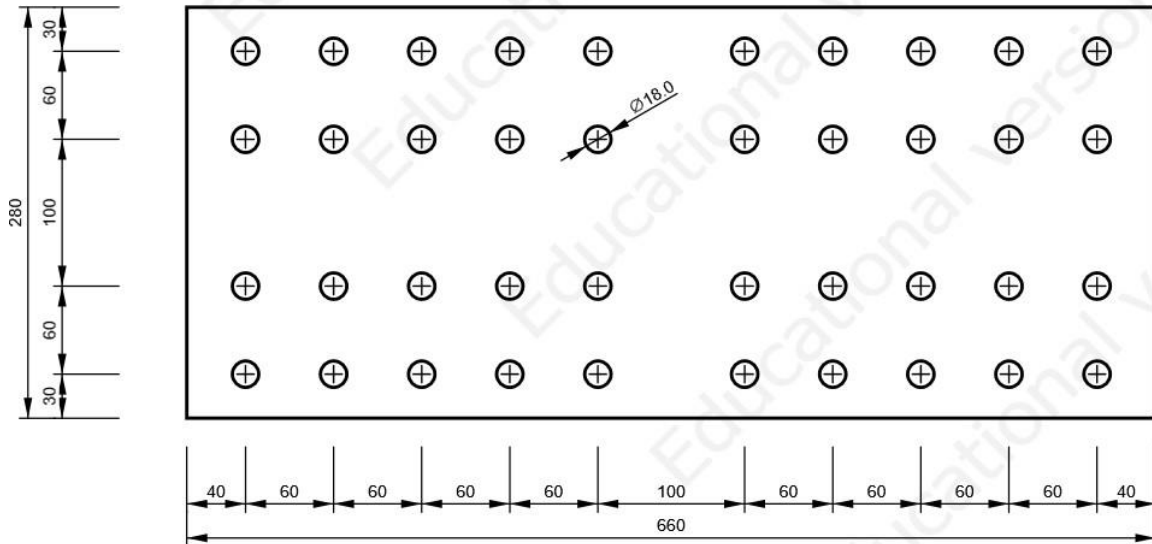
P15.0x134-660 (S 355)



SPL1 - SPL1c P15.0x134-660 (S 355)

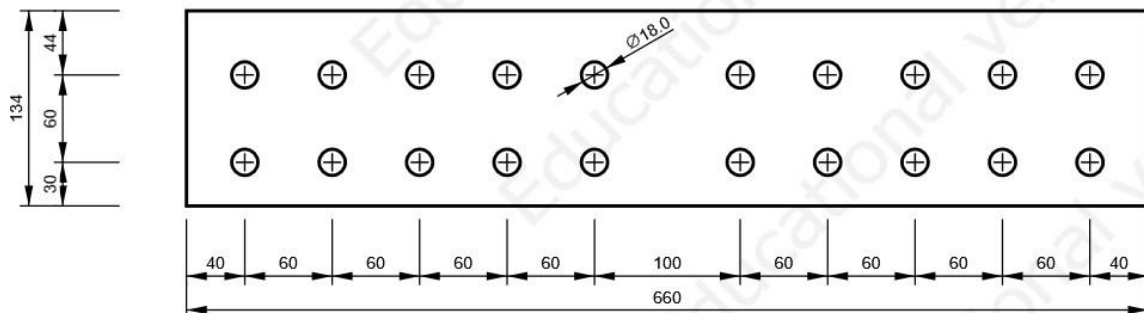


## SPL1 - SPL1c P15.0x134-660 (S 355)



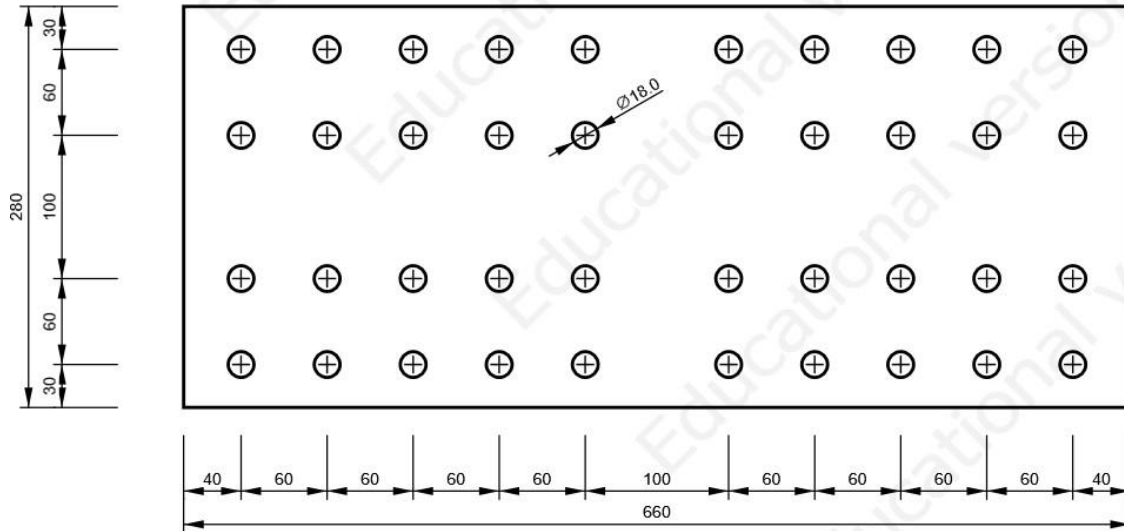
## SPL2 - SPL2a

P15.0x280-660 (S 355)



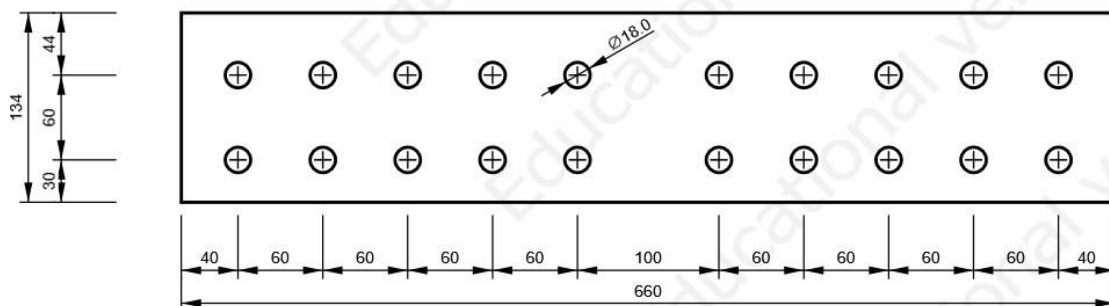
SPL2 - SPL2a

P15.0x280-660 (S 355)



SPL2 - SPL2b

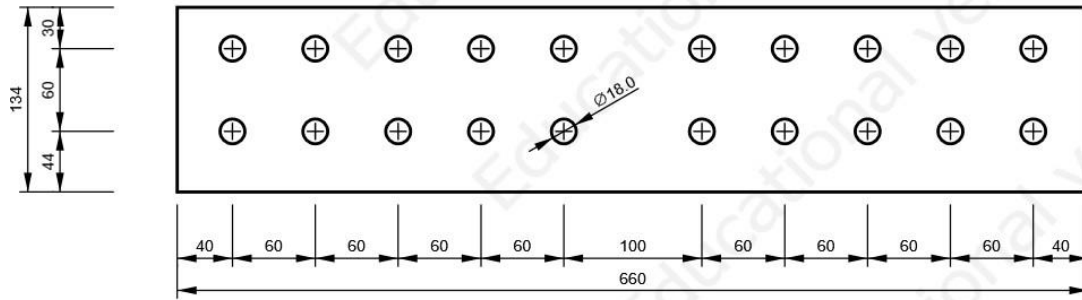
P15.0x134-660 (S 355)





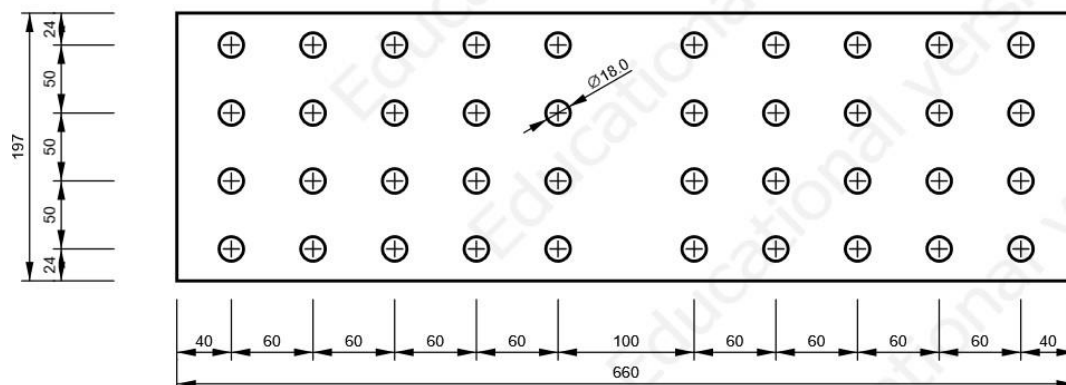
## SPL2 - SPL2c

P15.0x134-660 (S 355)



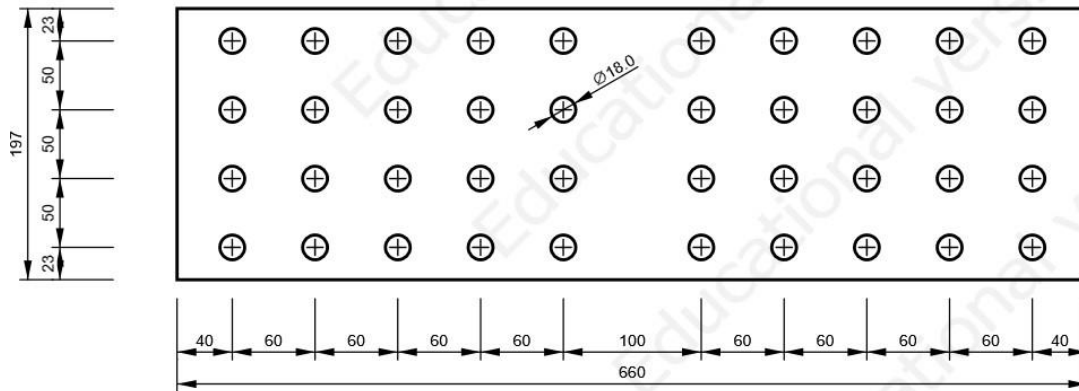
## SPL3 - SPL3a

P10.0x197-660 (S 355)

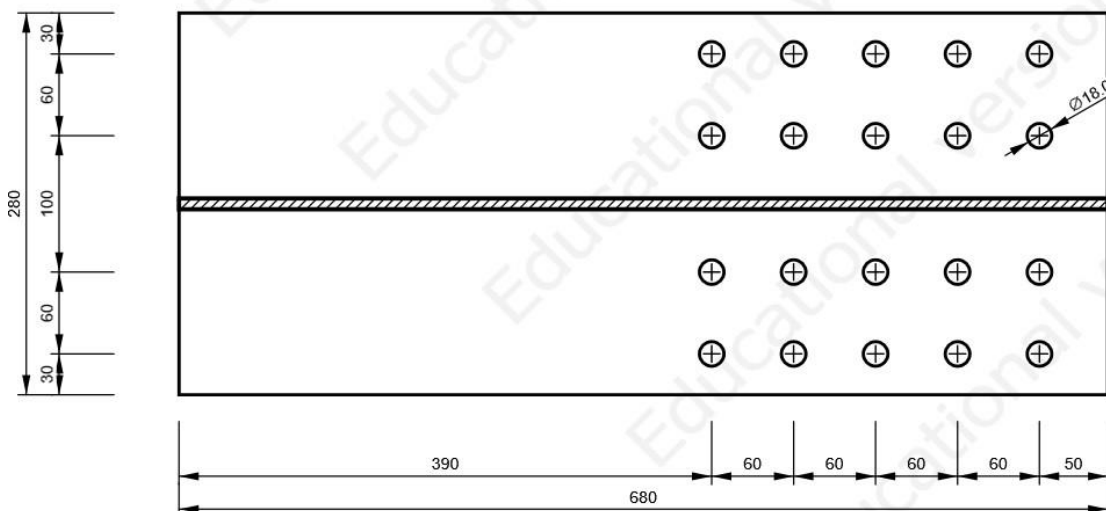


SPL3 - SPL3b

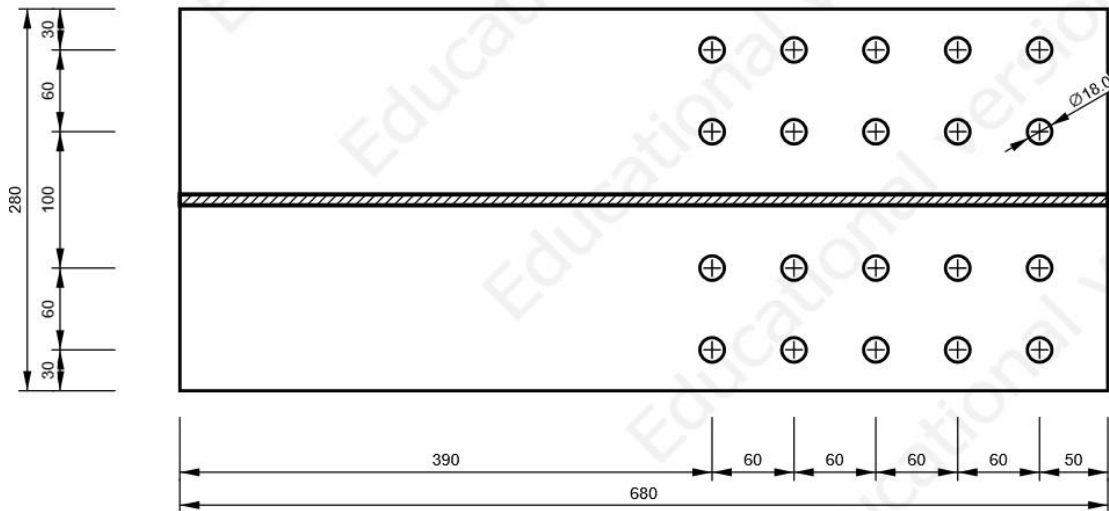
P10.0x197-660 (S 355)



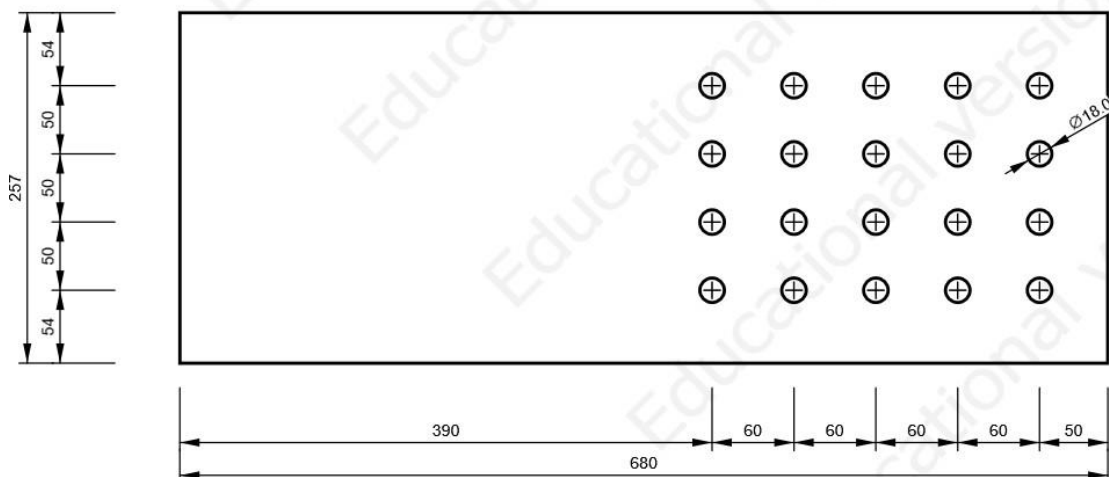
B622, HEA280 - Bottom flange 1:



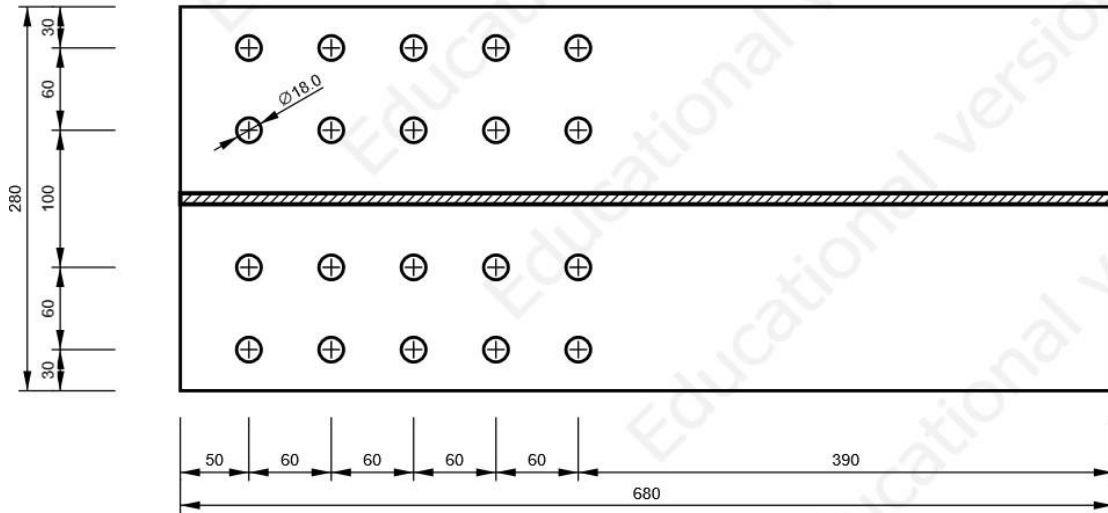
## B622, HEA280 - Top flange 1:



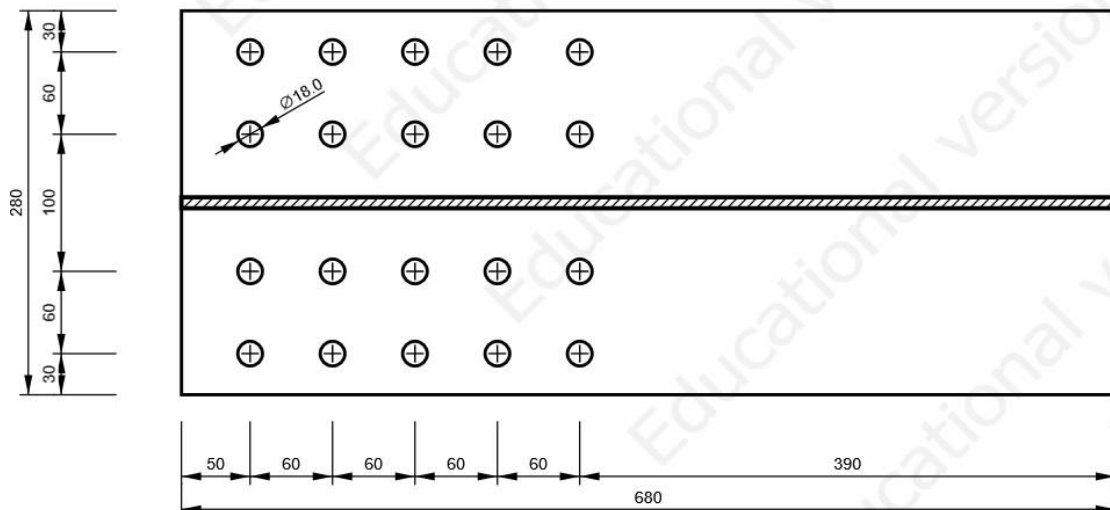
## B622, HEA280 - Web 1:



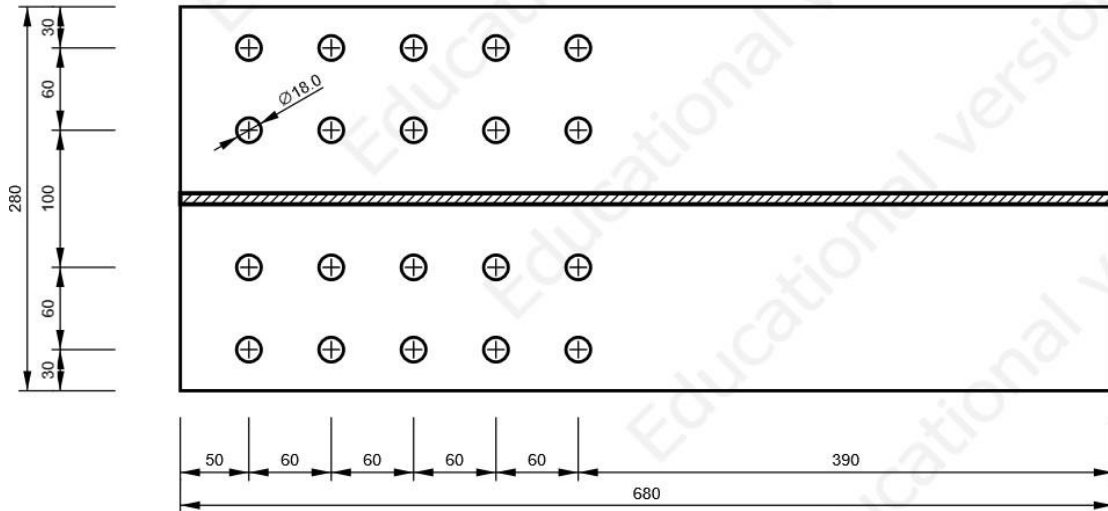
## B623, HEA280 - Bottom flange 1:



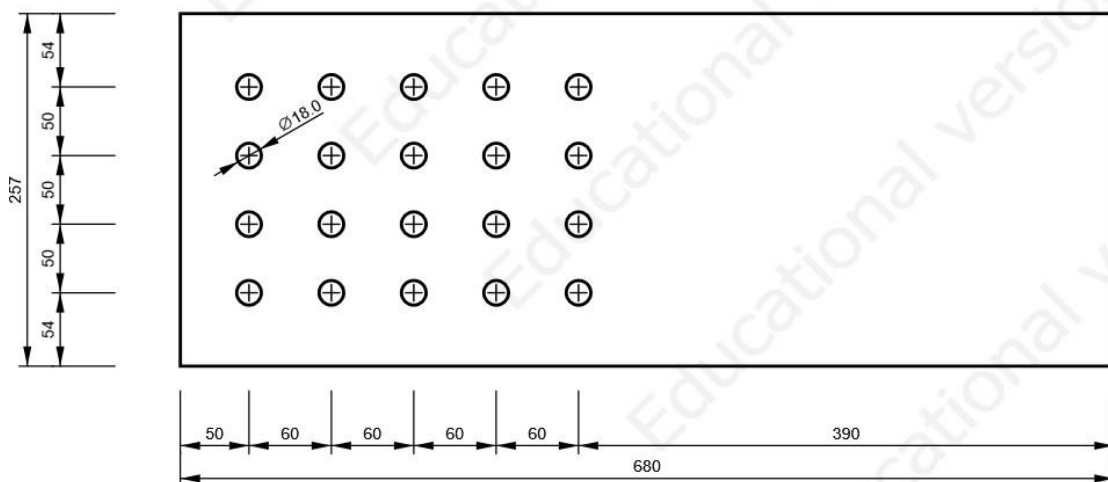
## B623, HEA280 - Bottom flange 1:



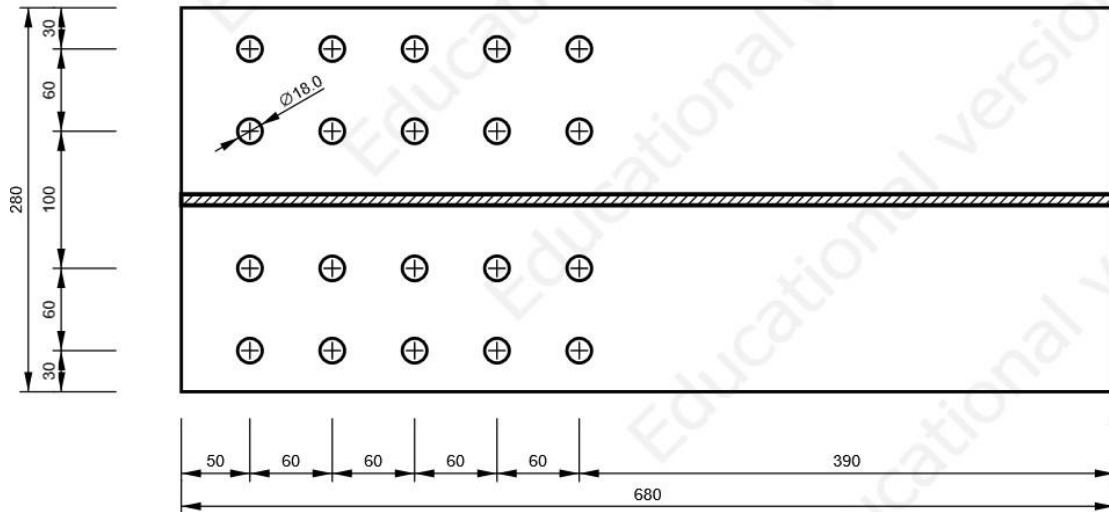
## B623, HEA280 - Bottom flange 1:



## B623, HEA280 - Top flange 1:



## B623, HEA280 - Web 1:



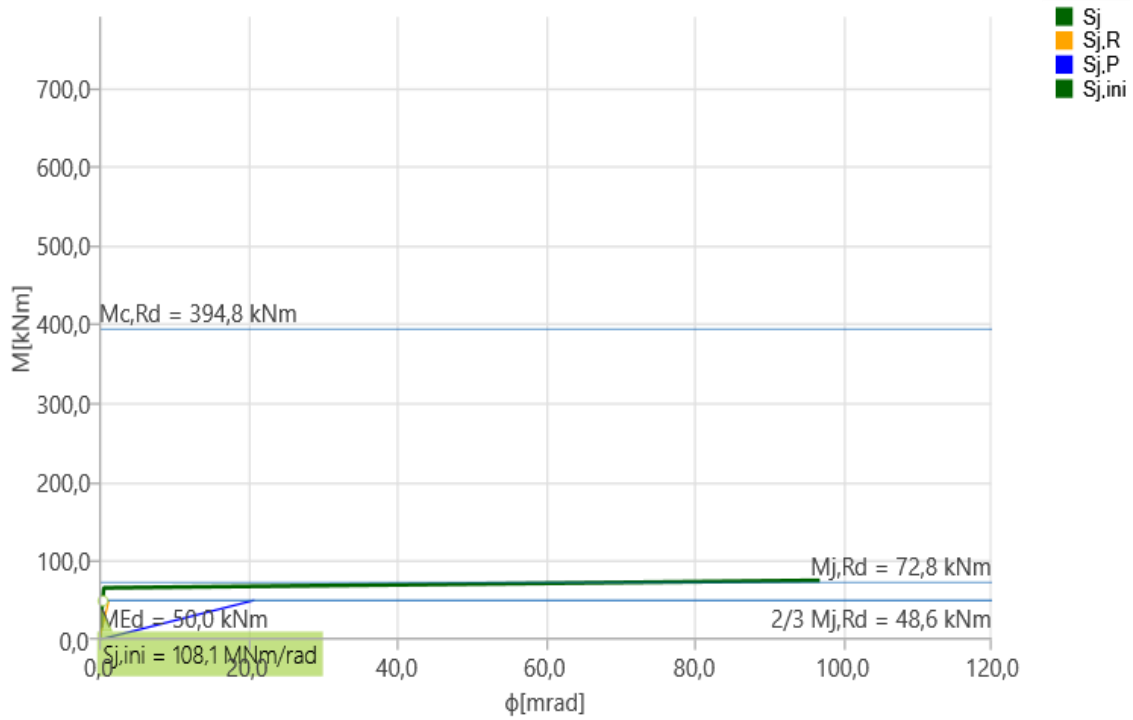
## Check

## Rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
B623	My	LE3	72. 8	108. 1	2. 7	6.00	38.4	2.4	Rigid

## Secant rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	M [kNm]	$S_{j,s}$ [MNm/rad]	$\phi$ [mrad]
B623	My	LE3	50.0	108.1	0.5

Stiffness diagram  $M_\gamma - \phi_\gamma$ , LE3

## 7.9. Nastavak stupa B4

### Design

Name	N556Description
Analysis	Stress, strain/ simplified loading

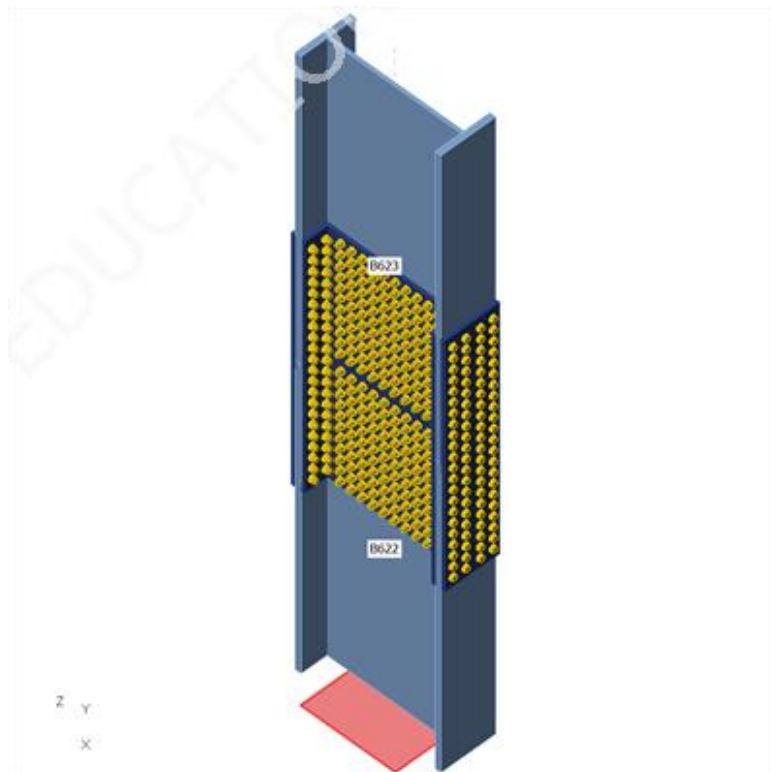
### Members

### Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ - Direction [°]	$\gamma$ - Pitch [°]	$\alpha$ - Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
B622	7 - HEB800	0.0	90.0	0.0	0	0	0
B623	7 - HEB800	0.0	90.0	0.0	0	0	0

### Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [m]
B622 / begin	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz	Position	0
B623 / end		Position	0





**Cross-sections**

Name	Material
7 - HEB800	S 355

**Bolts**

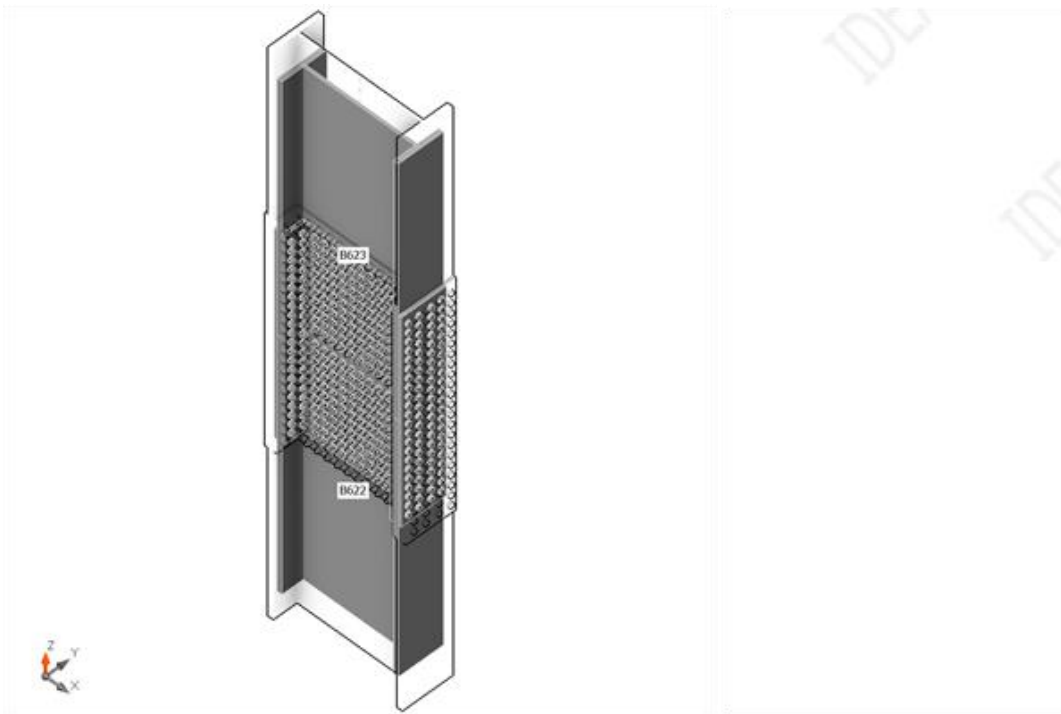
Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M20 10.9	20	900 .0	1000 .0	314

**Load effects (Equilibrium not required)**

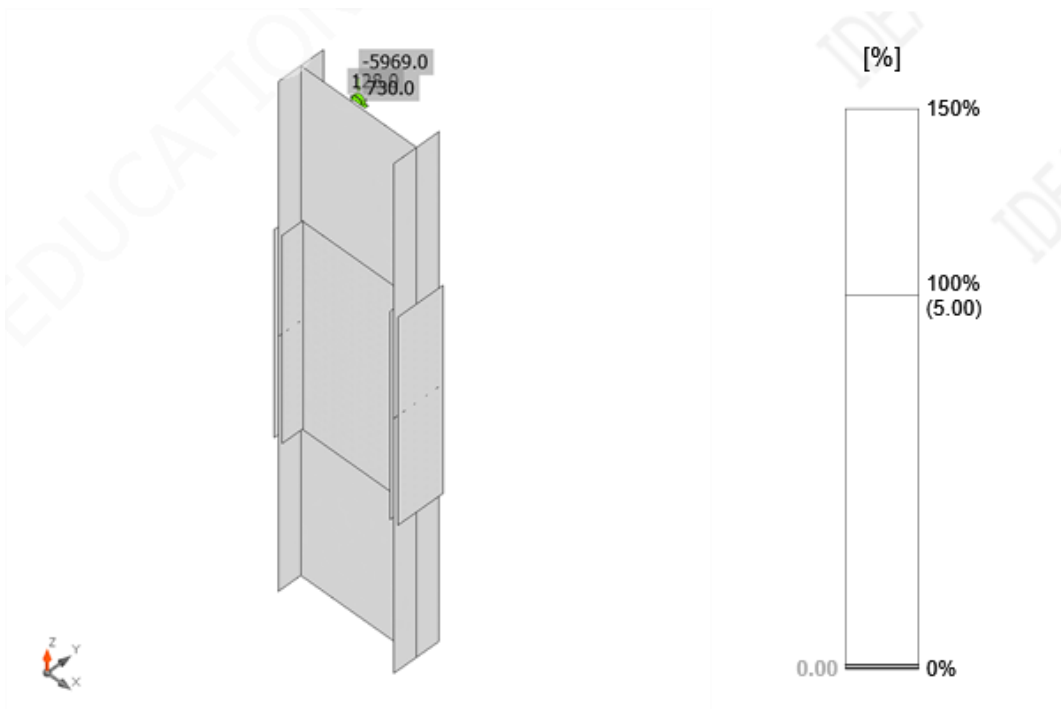
Name	Member	N [kN]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
LE3	B623 / End	5969.0	0.0	128.0	0.0	730.0	0.0

**Check****Summary**

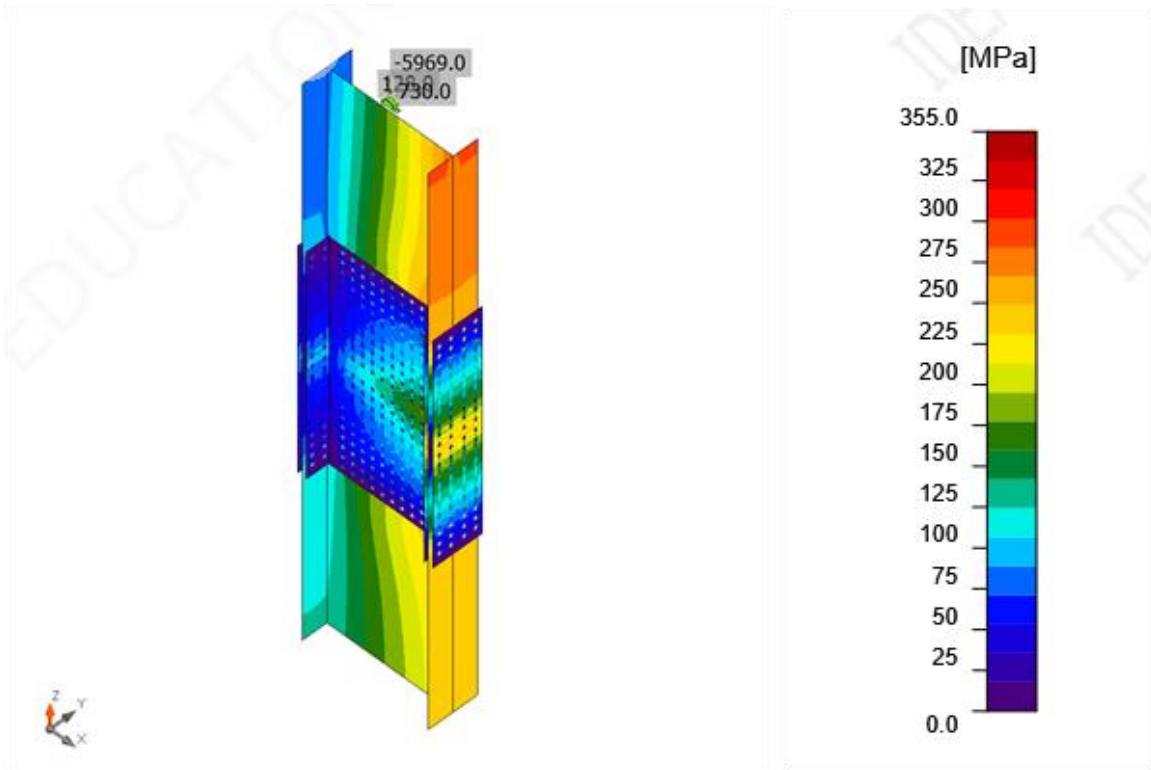
Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	0.0 < 5.0%	OK
Bolts	42.4 < 100%	OK
Buckling	Notcalculated	



Overall check, LE3



Strain check, LE3

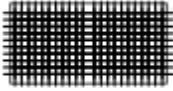
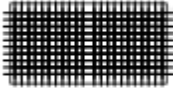


*Equivalent stress, LE3*

## Bill of materials

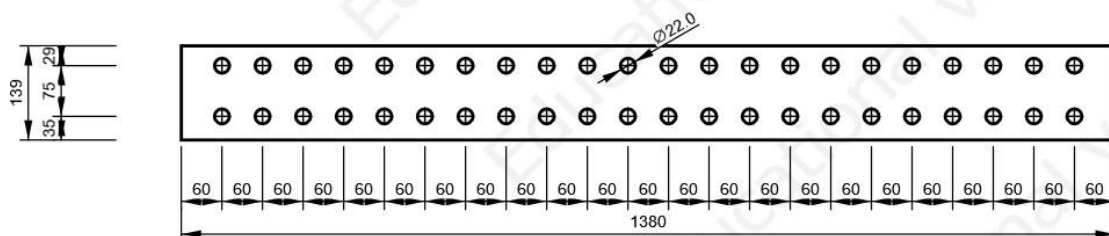
### Manufacturing operations

Name	Plates [mm]	Shape	Nr.	Welds Throat thickness [mm]	Length [mm]	Bolts	Nr.
SPL1	P20.0x1380.0-300.0(S 355)		1			M20 10.9	88
	P20.0x1380.0-139.3(S 355)		1				
	P20.0x1380.0-139.3(S 355)		1				
SPL2	P20.0x1380.0-300.0(S 355)		1			M20 10.9	88
	P20.0x1380.0-139.3(S 355)		1				
	P20.0x1380.0-139.3(S 355)		1				

SPL3	P15.0x1380.0-707.0(S 355)		1			M20 10.9	220
	P15.0x1380.0-707.0(S 355)		1				

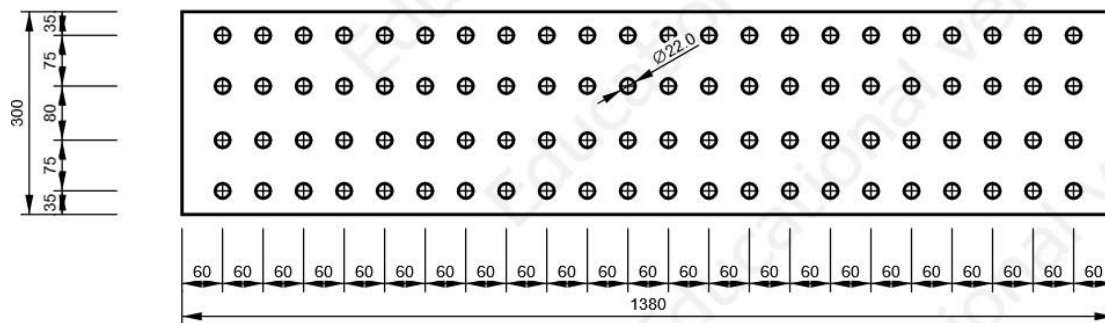
Drawing SPL1-SPL1a

P20.0x300-1380 (S 355)



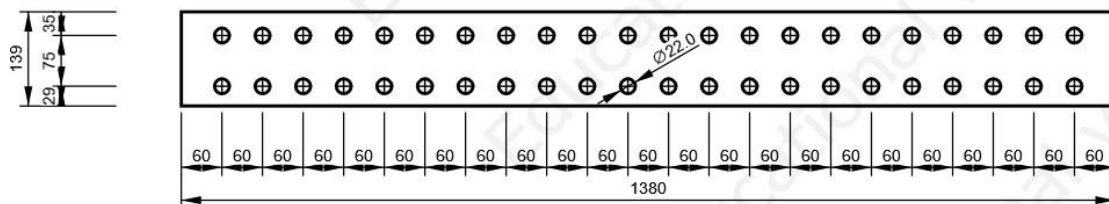
SPL1 - SPL1b

P20.0x139-1380 (S 355)



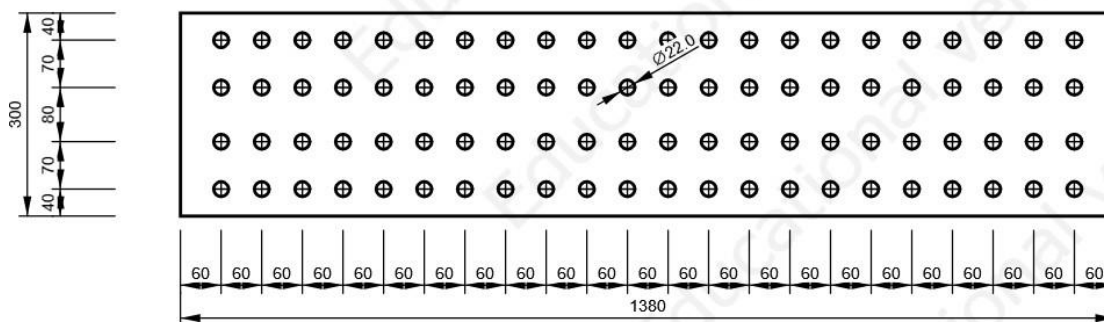
SPL1 - SPL1c

P20.0x139-1380 (S 355)



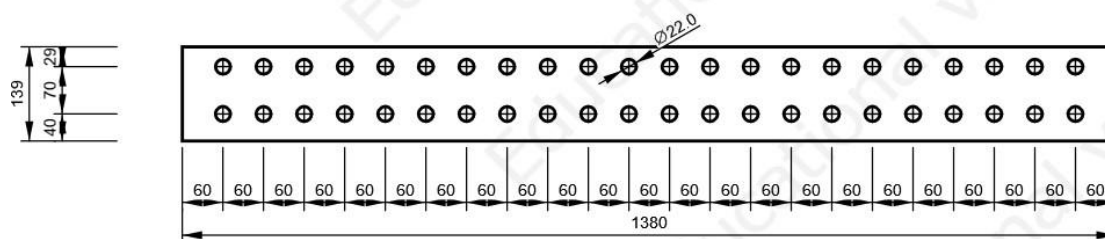
SPL2 - SPL2a

P20.0x300-1380 (S 355)



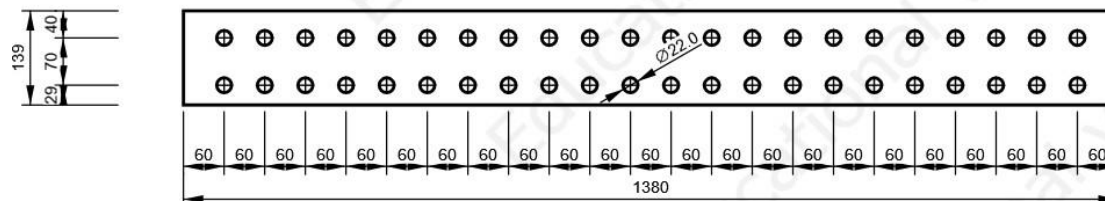
SPL2 - SPL2b

P20.0x139-1380 (S 355)



SPL2 - SPL2c

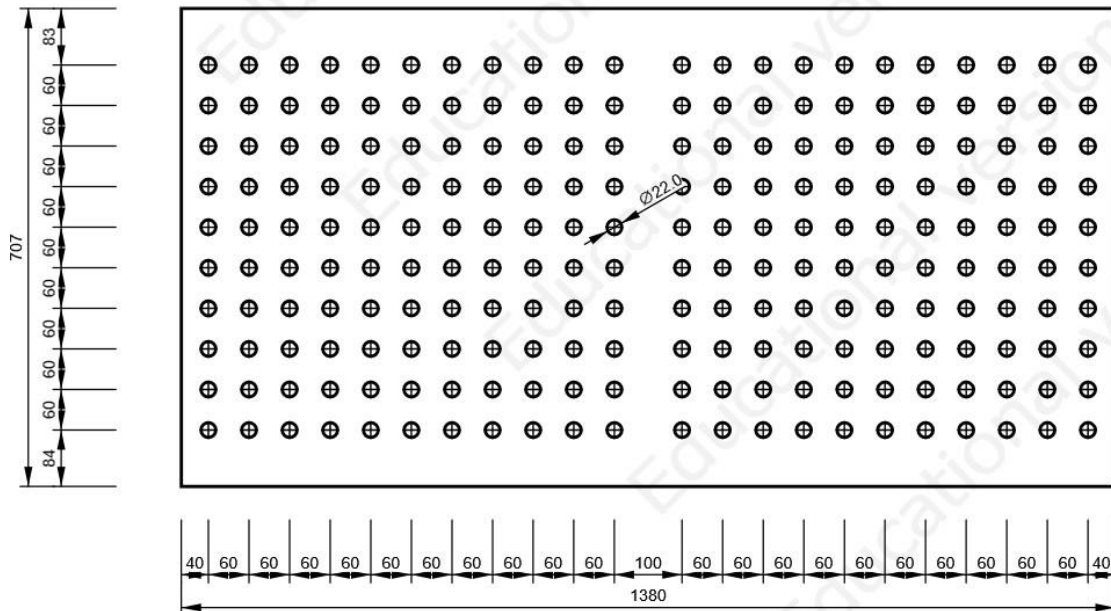
P20.0x139-1380





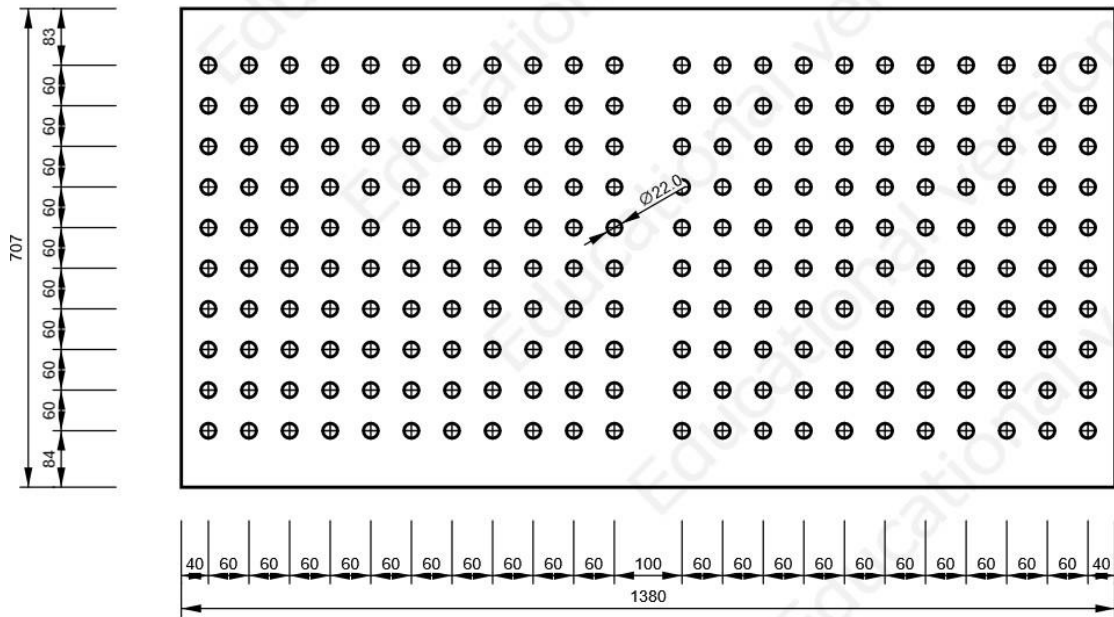
SPL3 - SPL3a

P15.0x707-1380 (S 355)

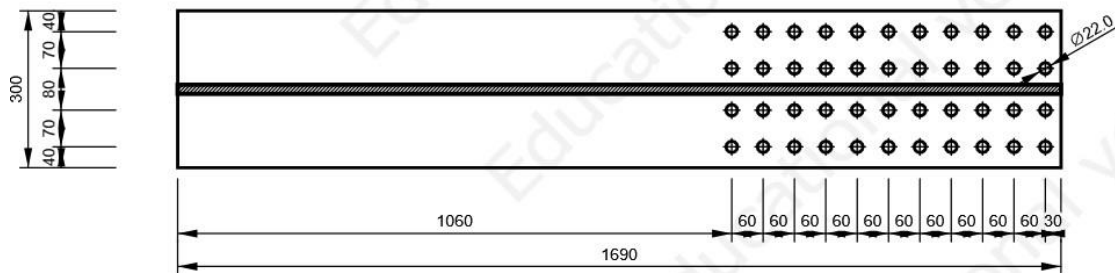


SPL3 - SPL3b

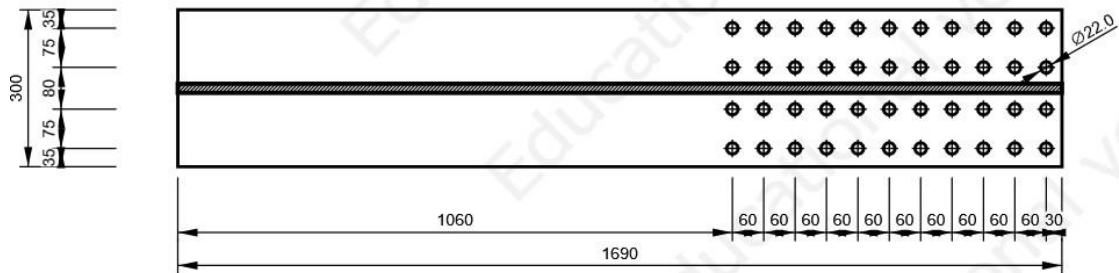
## P15.0x707-1380



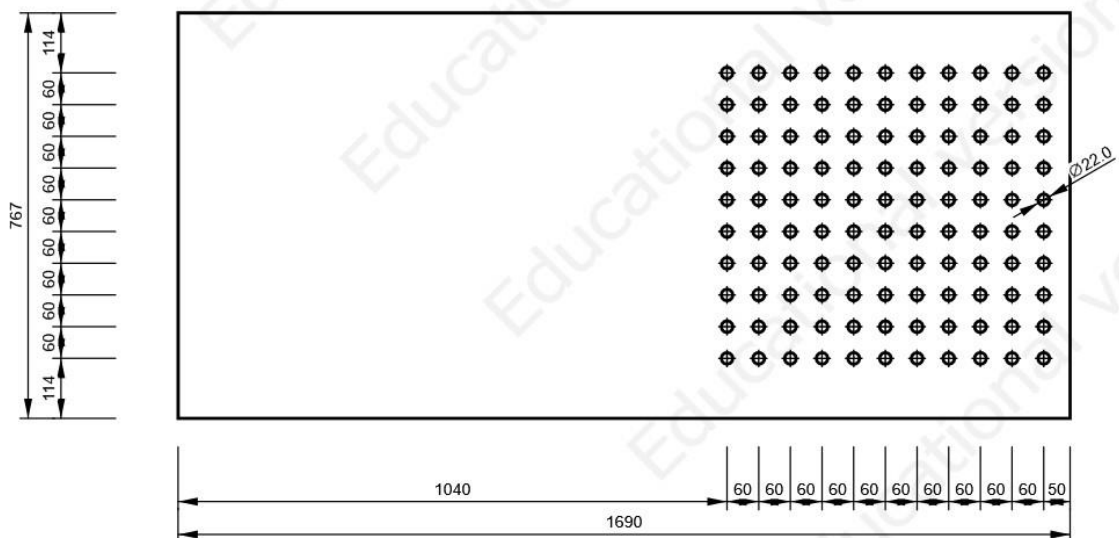
## B622, HEB800 - Bottom flange 1:



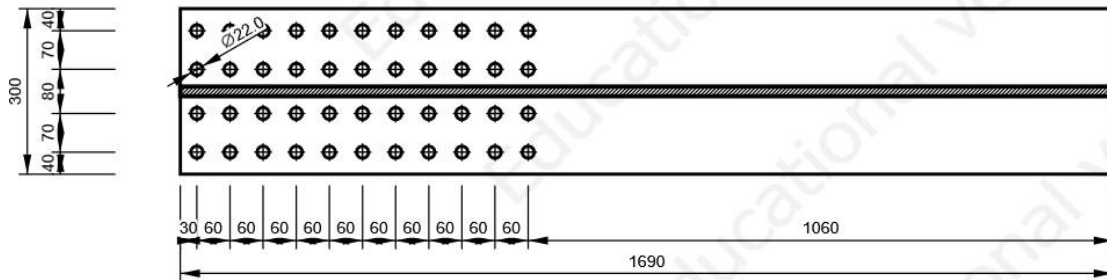
## B622, HEB800 - Top flange 1:



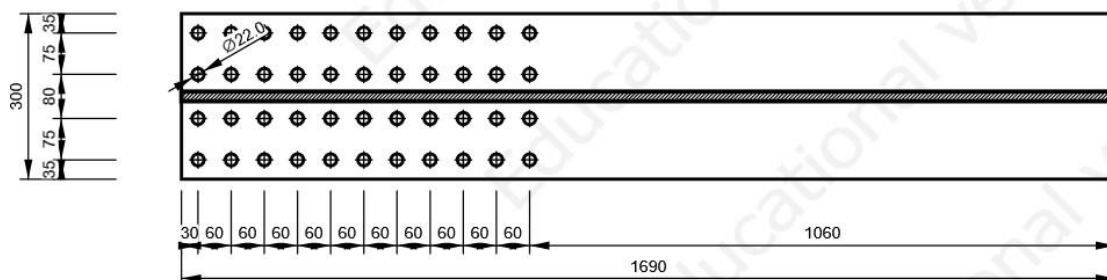
## B622, HEB800 - Web 1:



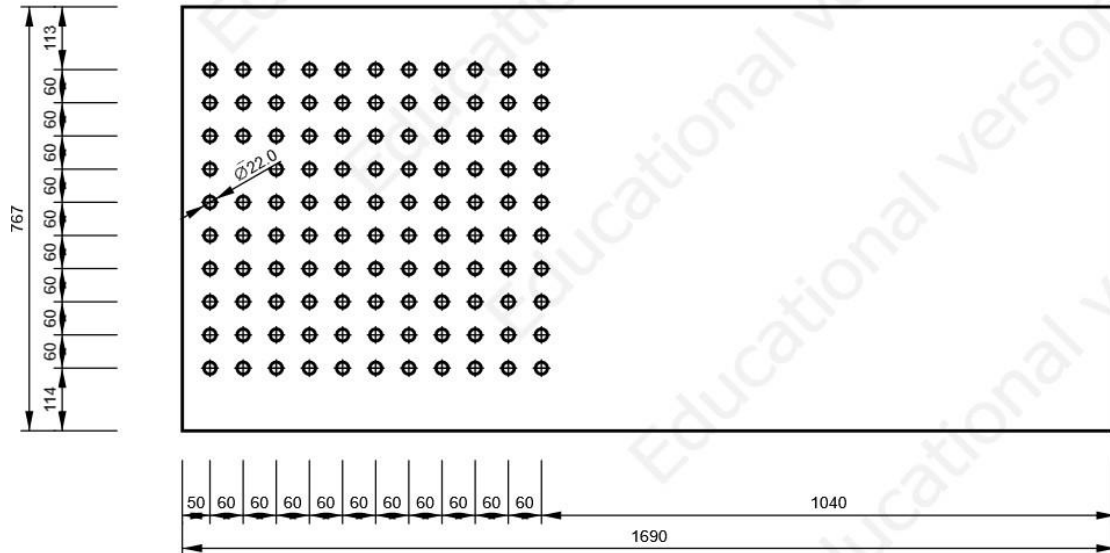
## B623, HEB800 - Bottom flange 1:



## B623, HEB800 - Top flange 1:



## B623, HEB800 - Web 1:



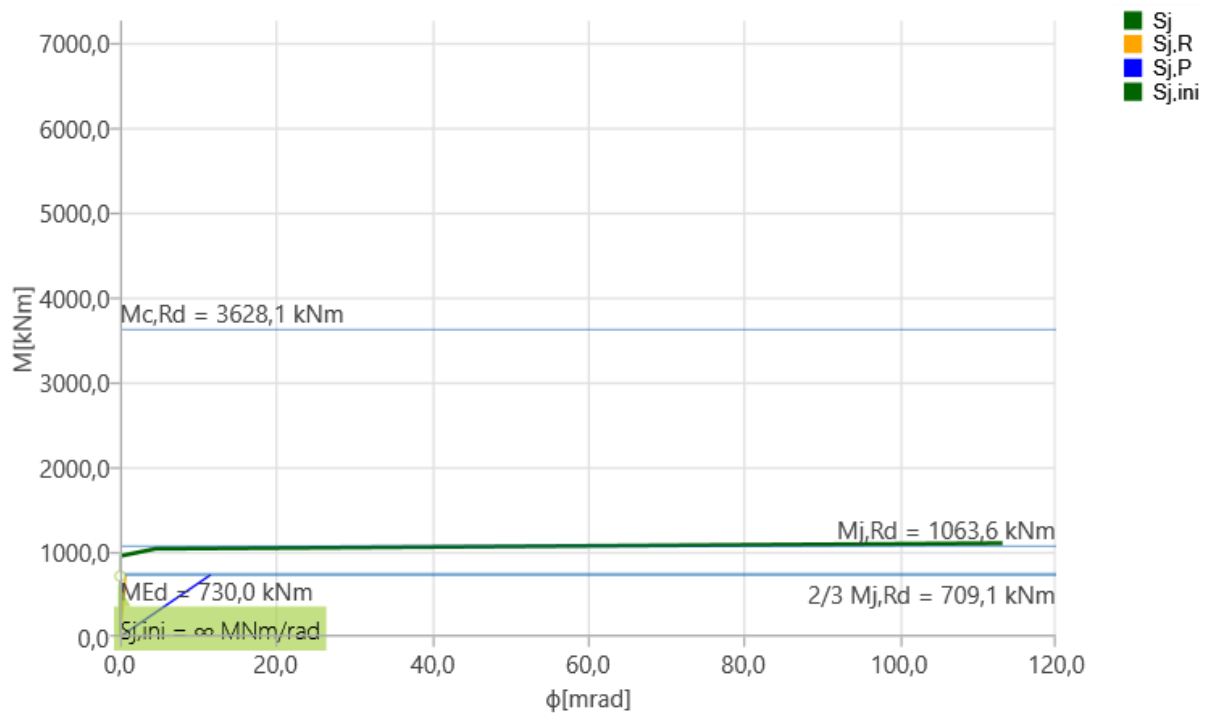
## Check

## Rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	$S_{j,R}$ [MNm/rad]	$S_{j,P}$ [MNm/rad]	Class.
B623	My	LE3	1063.6	$\infty$	7.8	6.0	1005.5	62.8	Rigid

## Secant rotational stiffness

Name	Comp.	Loads	M [kNm]	$S_{j,s}$ [MNm/rad]	$\phi$ [mrad]
B623	My	LE3	730.0	$\infty$	0.0

Stiffness diagram  $M_y - \phi$ , LE3

## 8. ZAKLJUČAK

Diplomski rad obrađuje višekatnu čeličnu zgradu stabiliziranu inovativnim dvojnim sustavom koji se sastoji od okvira i posmičnih zidova izvedenom od hladno oblikovanih čeličnih limova ispunjenih betonom. Razmatrana su tri ključna koncepta. Polazište analize je norma EN 1998 u kojoj se proračun bazira na disipaciji seizmičke energije plastičnim deformiranjem što znači da se oštećenja konstrukcije prihvaćaju. Drugi koncept je kapacitativno projektiranje kojim se točno odrede mjesta na konstrukciji u kojima će se seizmička energija disipirati. Treći koncept je dvojni sustav. Ideja dvojnih sustava je kombinacija sustava u kojemu jedan sustav služi za disipaciju seizmičke energije plastičnim deformiranjem, a drugi sustav ostaje u elastičnom području te osigurava povratne sile za recentriranje konstrukcije nakon zamjene oštećenih dijelova novima.

Dvojni sustav koji se analizira u radu sastoji od okvirnog sustav, lateralno stabiliziran spregnutim posmičnim zidovima. Cilj je da se energija disipira plastičnim deformiranjem posmičnih zidova, koji se nakon oštećenja mijenjaju novima, dok je okvir ostao u elastičnom području te omogućuje recentriranje konstrukcije.

Prvo je proveden linearni elastični proračun prostornog modela u programu SCIA Enginner te su dimenzionirani elementi konstrukcije. U sljedećem koraku, u programu Abaqus provedena je analiza posmičnog zida čime je dobivena krivulja koja opisuje vezu između pomaka vrha zida i poprečne reakcije. Time je određeno sve potrebno za provedbu nelinearne statičke metode postupnog guranja. Metoda postupnog guranja se primijenila na ravninskom modelu u kojemu je bio izoliran jedan okvir razmatrane konstrukcije. Analiza je provedena u programu Sap 2000. Posmični zid je modeliran pomoću link elemenata u kojima je zadano nelinearno ponašanje pomoću krivulje sila-pomak dobivene analizom zida u programu Abaqus. Provedbom analize ustanovljeno je kako je uvjet dvojnosti sustava zadovoljen. Nosači, a još bitnije i stupovi su ostali u elastičnom području dok su zidovi doživjeli plastične deformacije. Analizom je određen faktor prekogranične čvrstoće koji iznosi 1,18, a usvojeni faktor ponašanja, određen prema EN 1998, iznosi 5. Analizom postupnog guranja potvrđena je dvojnost sustava te njegova duktilnost što se najbolje vidi oblikom krivulje kapaciteta.

U radu je pokazana kako dvojni sustav sa inovativnim spregnutim posmičnim zidom ima traženu lateralnu stabilnost, čvrstoću i duktilnost. Osim toga značajan je ekonomski aspekt ovakve konstrukcije u kojoj se elementi namijenjeni za disipaciju energije mogu zamijeniti nakon oštećenja dok je ostatak konstrukcije neoštećen. Svakako vrijedi nastaviti istraživanje

i razvoj spregnutih posmičnih zidova kao sustav lateralne stabilizacije dvojnih sustava jer pokazuju veliki potencijal, u konstruktivnom i ekonomskom smislu.



---

## POPIS LITERATURE

- [1] Vayas, I. ed., (2017), Innovative anti-seismic devices and systems, Maia : Empresa Grafica Lda.
- [2] Maleta, T., Dujmović. D. (mentor); Lukačević, I. (mentor); (2018), Nelinearno ponašanje čeličnog višekatnog okvira s inovativnim sustavima vertikalne stabilizacije, Građevinski fakultet, Zagreb
- [3] Maleta, T., Dujmović. D. ; Lukačević, I. ; Behaviour of dual eccentrically braced steel frames with short and long seismic links 2019 IABSE Congress – The Evolving Metropolis , September 4-6, 2019, New York City, 2019
- [4] Žuvelek, V. et al. (2024), Numerical Investigation of Double-Skin Cold-Formed Steel Shear Wall Filled with Concrete, In: 4th International Conference “Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience” & Midterm Conference of CircularB “Implementation of Circular Economy in the Built Environment” 105:114
- [5] Fülöp LA, Dubina D (2004) Performance of wall-stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading – Part I: experimental research. Thin-WalledStruct. 42:321–338
- [6] Tipping S, Stojadinovic B (2008) Innovative Corrugated Steel Shear Walls for Multi-Story Residential Buildings, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China
- [7] Yu C, Huang Z, Vora HD (2009) Cold-formed steel framed shear wall assemblies with corrugated sheet steel sheathing. In: Proceedings of the Annual Stability Conference, Structural Stability Research, pp 257–276, Phoenix, United States
- [8] Zhang W, Mahdavian M, Li Y, Yu C (2017) Experiments and simulations of cold-formed steel wall assemblies using corrugated steel sheathing subjected to shear and gravity loads. J Struct Eng 143:1–13
- [9] Mahdavian M (2016) Innovative Cold-Formed Steel Shear Walls With Corrugated Steel Sheathing. Master Thesis
- [10] HRN EN 1990, Eurokod : Osnove projektiranja konstrukcija
- [11] HRN EN 1998 - 1, Eurokod 8 : Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade

- 
- [12] HRN EN 1991 - 1 - 1, Eurokod 1 : Djelovanja na konstrukcije - Dio 1 - 1 : Opća djelovanja - Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada
- [13] HRN EN 1991 - 1 - 1, Eurokod 1 : Djelovanja na konstrukcije - Dio 1 - 1 : Opća djelovanja- Opterećenje snijegom
- [14] HRN EN 1991 - 1 - 1, Eurokod 1 : Djelovanja na konstrukcije - Dio 1 - 1 : Opća djelovanja- Djelovanje vjetra
- [15] Hrvatski zavod za norme, >> Karte potresnih područja Republike Hrvatske << [Mrežno]. Dostupno : <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php>.
- [16] HRN EN 1994 - 1 - 1, Eurokod 4 : Projektiranje spregnutih čelično-betonskih konstrukcija - Dio 1 - 1 : Opća pravila i pravila za zgrade
- [17] HRN EN 1993 - 1 - 1, Eurokod 3 : Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1 – 8: Opća pravila i pravila za zgrade
- [18] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I., : Metalne konstrukcije 3, Zagreb : IA Projektiranje, 1998
- [19] HRN EN 1993 - 1 - 8, Eurokod 3 : Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1 - 8 : Proračun priključaka
- [19] Lukačević, I., Ćurković, I., Rajić, A., Baertolac, M., Lightweight Composite Floor System—Cold-Formed Steel and Concrete—LWT-FLOOR Project (mrežne stranice), Basel, Switzerland, (ažurirano: 12. veljače 2021.; citirano: 16. rujna 2024.). Dostupno na: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/2/209>
- [20] Fajfar, P.: Structural analysis in earthquake engineering – a breakthrough of simplified non-linear methods, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd., 2002.

## POPIS SLIKA

SLIKA 1.1 USPOREDBA EKSPERIMENTALNE I NUMERIČKE KRKRVULJE (IZVOR: [3]) .....	3
SLIKA 1.2 RASPORED MOŽDANIKA (IZVOR: [3]).....	4
SLIKA 1.3 RASPORED MOŽDANIKA (IZVOR: [3]).....	5
SLIKA 1.4 TLAČNA OŠTĆENJA U BETONU (IZVOR: [3]) .....	5
SLIKA 2.1 ZONE KARAKTERISTIČNOG OPTEREĆENJA SNIJEGOM $S_k$ (IZVOR: [12]) .....	9
SLIKA 2.2 RASPODJELA TLAKA VJETRA PO VISINI (IZVOR: [13]) .....	12
SLIKA 2.3 GRAFIČKI PRIKAZ FAKTORA IZLOŽENOSTI $C_e(z)$ ZA $C_o=1,0$ , $K_L=1,0$ (IZVOR: [13]).....	12
SLIKA 2.4 KOEFICIJENT SILE ZA PRAVOKUTNE POPREČNE PRESJEKE BEZ SLOBODNOG PROTOKA (IZVOR: [13]) .....	16
SLIKA 2.5 PODJELA VERTIKALNIH POVRŠINA U TLOCRTU.....	18
SLIKA 2.6 PODJELA VERTIKALNIH POVRŠINA U POGLEDU .....	19
SLIKA 2.7 UKUPNI TLAK ZA $C_{pi} = +0,2$ .....	22
SLIKA 2.8 UKUPNI TLAK ZA $C_{pi} = -0,3$ .....	23
SLIKA 3.1 OZNAKE ELEMENATA (IZVOR: [2]) .....	24
SLIKA 3.2 OZNAKE STUPOVA (IZVOR: [3]) .....	28
SLIKA 4.1 3D MODEL.....	33
SLIKA 4.2 POGLED X-Z.....	34
SLIKA 4.3 POGLED Y-Z .....	34
SLIKA 4.4 PRORAČUNSKI SPEKTAR.....	38
SLIKA 4.5 MASE PO ETAŽAMA.....	41
SLIKA 4.6 1. TON – TRANSLACIJA U X SMJERU .....	42
SLIKA 4.7 2. TON – TRANSLACIJA U Y SMJERU .....	43
SLIKA 4.8 3. TON – TORZIJA.....	43
SLIKA 4.9 GLOBALNI MOD IZVIJANJA.....	46
SLIKA 4.10 NOSIVOST PLOČE HOESCH ADDITIVE FLOORE.....	50
SLIKA 4.11 ODABIR DEBLJINE BETONA ZA ODABRANI RASPON .....	52
SLIKA 4.12 MJERODAVNA VRIJEDNOST MOMENTA SAVIJANJA NOSAČ A2-B2.....	57
SLIKA 4.13 MJERODAVNA VRIJEDNOST POPREČNE SILE A2-B2 .....	57
SLIKA 4.14 MJERODAVNA VRIJEDNOST MOMENTA SAVIJANJA A1-B1 .....	60
SLIKA 4.15 MJERODAVNA VRIJEDNOST POPREČNE SILE A1-B1 .....	60
SLIKA 4.16 MJERODAVNA VRIJEDNOST MOMENTA SAVIJANJA B1-B4 .....	63
SLIKA 4.17 MJERODAVNA VRIJEDNOST POPREČNE SILE B1-B4.....	63

SLIKA 4.18 MJERODAVNA VRIJEDNOST MOMENTA SAVIJANJA ZA NOSAČ OKVIRA A4-A7.....	67
SLIKA 4.19 MJERODAVNA VRIJEDNOST POPREČNE SILE ZA NOSAČ OKVIRA A4-A7 .....	67
SLIKA 4.20 MJERODAVNA VRIJEDNOST MOMENTA SAVIJANJA STUPA OKVIRA A4-A7 .....	74
SLIKA 4.21 MJERODAVNA VRIJEDNOST POPREČNE SILE STUPA OKVIRA A4-A7.....	75
SLIKA 4.22 MJERODAVNA VRIJEDNOST MOMENTA SAVIJANJA ZA NOSAČ OKVIRA A7 – A10.....	82
SLIKA 4.23 MJERODAVNA VRIJEDNOST POPREČNE SILE ZA NOSAČ OKVIRA A7 – A10 .....	82
SLIKA 4.24 MJERODAVNA VRIJEDNOST MOMENTA SAVIJANJA ZA STUP OKVIRA A7 – A10.....	86
SLIKA 4.25 MJERODAVNA VRIJEDNOST POPREČNE SILE ZA NOSAČ OKVIRA A7 – A10 .....	87
SLIKA 4.26 MJERODAVNA VRIJEDNOST POPREČNE SILE ZA NOSAČ OKVIRA A7 – A1.....	87
SLIKA 4.27 MJERODAVNA VRIJEDNOST MOMENTA SAVIJANJA ZA NOSAČ OKVIRA B4 – C4 .....	94
SLIKA 4.28 MJERODAVNA VRIJEDNOST POPREČNE SILE ZA NOSAČ OKVIRA B4 – C4.....	95
SLIKA 4.29 ODREĐIVANJE POLOŽAJA NUL-TOČKE MOMENTNOG DIJAGRAMA .....	97
SLIKA 4.30 POLOŽAJ NUL-TOČKE MOMENTNOG DIJAGRAMA .....	97
SLIKA 4.31 C1 – MOMENTI NA KRAJEVIMA I JEDNOLIKO RASPODIJELJENO OPTEREĆENJE.....	98
SLIKA 4.32 C2 – MOMENTI NA KRAJEVIMA I JEDNOLIKO RASPODIJELJENO OPTEREĆENJE.....	98
SLIKA 4.33 MJERODAVNA VRIJEDNOST MOMENTA SAVIJANJA ZA STUP OKVIRA B4 – C4.....	100
SLIKA 4.34 MJERODAVNA VRIJEDNOST UZDUŽNE SILE ZA STUP OKVIRA (B4 – C4).....	101
SLIKA 4.35 MJERODAVNA VRIJEDNOST UZDUŽNE SILE ZA STUP OKVIRA B4 – C4 .....	101
SLIKA 5.1 POPREČNI PRESJEK POSMIČNOG ZIDA.....	109
SLIKA 5.2 KARAKTERISTIKE PROFILIRANOG LIMA .....	110
SLIKA 5.3 PROFILIRANI LIMA.....	110
SLIKA 5.4 KARAKTERISTIKE BETONSKE ISPUNE.....	110
SLIKA 5.5 BETONSKA ISPUNA.....	111
SLIKA 5.6 VEZA IZMEĐU PROFILIRANOG LIMA I BETONA .....	111
SLIKA 5.7 RUBNI UVJETI NA DNU ZIDA.....	112
SLIKA 5.8 RUBNI UVJETI NA VRHU ZIDA.....	112
SLIKA 5.9 DIJAGRAM SILA-POMAK .....	113
SLIKA 6.1 ELASTIČNI SPEKTAR POMAKA I UBRZANJA U KLASIČNOM I AD FORMATU (IZVOR: [19]) .....	115
SLIKA 6.2 ELASTIČNI I PRIPADNI NEELASTIČNI SPEKTRI OVISNO O FAKTORU DUKTILNOSTI (IZVOR: [19]) .	116
SLIKA 6.3 ELASTIČNI I NEELASTIČNI SPEKTAR I DIJAGRAM KAPACITETA (IZVOR: [19]).....	118
SLIKA 6.4 2D MODEL.....	120
SLIKA 6.5 ZADAVANJE KARAKTERISTIKA LINK ELEMENATA .....	121
SLIKA 6.6 1. KORAK.....	122
SLIKA 6.7 2. KORAK.....	122
SLIKA 6.8 3. KORAK.....	123
SLIKA 6.9 4. KORAK.....	123

---

SLIKA 6.10 5. KORAK .....	124
SLIKA 6.11 6. KORAK .....	124
SLIKA 6.12 7. KORAK .....	125
SLIKA 6.13 8. KORAK .....	125
SLIKA 6.14 9. KORAK .....	126
SLIKA 6.15 10. KORAK.....	126
SLIKA 6.16 11. KORAK.....	127
SLIKA 6.17 12. KORAK.....	127
SLIKA 6.18 13. KORAK.....	128
SLIKA 6.19 14. KORAK.....	128
SLIKA 6.20 15. KORAK.....	129
SLIKA 6.21 16. KORAK.....	129
SLIKA 6.22 17. KORAK.....	130
SLIKA 6.23 18. KORAK.....	130
SLIKA 6.24 19. KORAK.....	131
SLIKA 6.25 20. KORAK.....	131
SLIKA 6.26 21. KORAK.....	132
SLIKA 6.27 22. KORAK.....	132
SLIKA 6.28 23. KORAK.....	133
SLIKA 6.29 24. KORAK.....	133
SLIKA 6.30 25. KORAK.....	134
SLIKA 6.31 26. KORAK.....	134
SLIKA 6.32 27. KORAK.....	135
SLIKA 6.33 28. KORAK.....	135
SLIKA 6.34 29. KORAK.....	136
SLIKA 6.35 30. KORAK.....	136
SLIKA 6.36 31. KORAK.....	137
SLIKA 6.37 32. KORAK.....	137
SLIKA 6.38 33. KORAK.....	138
SLIKA 6.39 34. KORAK.....	138
SLIKA 6.40 35. KORAK.....	139
SLIKA 6.41 36. KORAK.....	139
SLIKA 6.42 37. KORAK.....	140
SLIKA 6.43 38. KORAK.....	140
SLIKA 6.44 39. KORAK.....	141
SLIKA 6.45 40. KORAK.....	141

---

SLIKA 6.46 41. KORAK.....	142
SLIKA 6.47 42. KORAK.....	142
SLIKA 6.48 43. KORAK.....	143
SLIKA 6.49 44. KORAK.....	143
SLIKA 6.50 45. KORAK.....	144
SLIKA 6.51 46. KORAK.....	144
SLIKA 6.52 47. KORAK.....	145
SLIKA 6.53 48. KORAK.....	145
SLIKA 6.54 49. KORAK.....	146
SLIKA 6.55 50. KORAK.....	146
SLIKA 6.56 KRIVULJA POPREČNA REAKCIJA-POMAK MDOF SUSTAVA .....	147
SLIKA 6.57 DIJAGRAM POPREČNA SILA-POMAK MDOF SUSTAVA .....	148
SLIKA 6.58 DIJAGRAM POPREČNA SILA-POMAK EKVIVALENTNOG SDOF SUSTAVA.....	149
SLIKA 6.59 BILINEARNA KRIVULJA SILA-POMAK SDOF SUSTAVA PO PRINCIPU JEDNAKOSTI ENERGIJE (IZVOR:[11]) .....	149
SLIKA 6.60 BILINEARNA KRIVULJA SILA-POMAK SDOF EKVIVALENTNOG SUSTAVA.....	149
SLIKA 6.61 POMACI SUSTAVA BEZ POSMIČNIH ZIDOVA I S POSMIČNIM ZIDOVIMA.....	152

## POPIS TABLICA

TABLICA 1.1 USPOREDBA EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH REZULTATA (IZVOR: [3]) .....	3
TABLICA 1.2 PARAMETRI KOJI SU SE MIJENJALI U ANALIZI (IZVOR: [3]) .....	4
TABLICA 2.1 KARAKTERISTIČNA OPTEREĆENJA SNIJEGOM NA TLU ZA RAZLIČITE GEOGRAFSKE LOKACIJE I NADMORSKE VISINE (IZVOR: [12]) .....	10
TABLICA 2.2 PREPORUČENE VRIJEDNOSTI KOEFICIJENATA VANJSKOG TLAKA ZA VERTIKALNE ZIDOVE TLOCRTNO PRAVOKUTNIH ZGRADA (IZVOR: [13]).....	18
TABLICA 2.3 VRIJEDNOSTI VANJSKOG TLAKA NA VERTIKALNE POVRŠINE D I E .....	20
TABLICA 2.4 VRIJEDNOSTI VANJSKOG TLAKA NA VERTIKALNE POVRŠINE A I B .....	20
TABLICA 2.5 PREPORUČENE VRIJEDNOSTI KOEFICIJENATA VANJSKOG TLAKA ZA RAVNE KROVOVE (IZVOR: [13]) .....	20
TABLICA 3.1 PRELIMINARNI PROFILI NOSAČA .....	32
TABLICA 3.2 PRELIMINARNI PROFILI STUPOVA.....	32
TABLICA 4.1 OPTEREĆENJA.....	35
TABLICA 4.2 DINAMIČKI ODGOVOR KONSTRUKCIJE ZA PRVIH 10 MODOVA.....	42
TABLICA 4.3 UKUPNA SEIZMIČKA SILA $V_{TOT}$ , GRAVITACIJSKO $P_{TOT}$ , POMACI KATOVA $D_R$ U SMJERU OSI X TE KOEFICIJENT SENZIBILNOSTI ZA MJERODAVNU PRORAČUNSKU KOMBINACIJU.....	47
TABLICA 4.4 UKUPNA SEIZMIČKA SILA $V_{TOT}$ , GRAVITACIJSKO $P_{TOT}$ , POMACI KATOVA $D_R$ U SMJERU OSI Y TE KOEFICIJENT SENZIBILNOSTI ZA MJERODAVNU PRORAČUNSKU KOMBINACIJU.....	48
TABLICA 4.5 MEĐUKATNI POMAK Y SMJER .....	48
TABLICA 4.6 MEĐUKATNI POMAK X SMJER .....	48