

# Projektiranje i ocjena životnog cikula spregnute konstrukcije višekatne zgrade

---

Miljanić, Patricija

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:237:534376>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Patricija Miljanić

**PROJEKTIRANJE I OCJENA ŽIVOTNOG  
CIKLUSA SPREGNUTE KONSTRUKCIJE  
VIŠEKATNE ZGRADE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Patricija Miljanić

**PROJEKTIRANJE I OCJENA ŽIVOTNOG  
CIKLUSA SPREGNUTE KONSTRUKCIJE  
VIŠEKATNE ZGRADE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivan Lukačević

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Patricija Miljanić

**DESIGN AND LIFE CYCLE ASSESSMENT OF  
COMPOSITE STEEL-CONCRETE MULTI-STOREY  
BUILDING**

MASTER THESIS

Supervisor: 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)

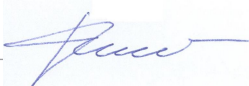
Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

 Digitally signed by IVAN  
LUKAČEVIĆ  
Date: 2024.09.17 21:15:40 +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:

## SAŽETAK

Tema ovog rada je analiza višekratne spregnute zgrade, dimenzioniranje njenih elemenata te procjena životnog ciklusa građevine. Rad se može podijeliti u tri cjeline. Prvi dio obuhvaća teorijski pregled spregnutih konstrukcija, s analizom njihovih prednosti i nedostataka. Također, razrađena je važnost i metodologija provođenja analize životnog ciklusa (LCA), uz naglasak na održivo projektiranje. Obradena su i temeljna načela i kriteriji koji su korišteni u proračunu konstrukcije. Drugi dio rada posvećen je praktičnoj primjeni proračuna. Uključuje analizu opterećenja, globalnu analizu konstrukcije te preliminarni izbor elemenata za numerički model. Posebna pažnja posvećena je proračunu konstrukcije na granična stanja nosivosti i uporabivosti, uz detaljnu analizu seizmičkih djelovanja. Uz to, proveden je proračun karakterističnih priključaka. Završni dio rada odnosi se na primjenu LCA analize. U ovoj fazi, uspoređene su tri različite konstrukcije istih tlocrtnih dimenzija, ali izrađene od različitih materijala. Analiza je usmjerena na kvantificiranje utjecaja konstrukcije na okoliš kroz njen cijeli životni ciklus, od faze proizvodnje materijala do krajnjeg zbrinjavanja, s posebnim naglaskom na ekološku održivost.

### **Ključne riječi:**

spregnuta konstrukcija, višekratna zgrada, statička analiza, seizmička analiza, analiza životnog ciklusa (LCA), održivo projektiranje, GaBi softver



## SUMMARY

The topic of this master thesis is the analysis of a multi-story structure building, the dimensioning of its elements, and the life cycle assessment (LCA) of the structure. The paper is divided into three sections. The first part provides a theoretical overview of composite structures, analyzing their advantages and disadvantages. Additionally, it elaborates on the importance and methodology of conducting a life cycle assessment (LCA), with an emphasis on sustainable design. Fundamental principles and criteria used in the structural design are also addressed. The second part focuses on the practical application of the structural design. It includes load analysis, a global structural analysis, and the preliminary selection of elements for the numerical model. Special attention is given to the design of the structure concerning ultimate and serviceability limit states, alongside a detailed analysis of seismic actions. Furthermore, a calculation of characteristic connections is performed. The final section of the paper covers the application of LCA analysis. In this stage, three different structures of identical floor plan dimensions but made from different materials are compared. The analysis focuses on quantifying the environmental impact of the structure throughout its entire life cycle, from material production to final disposal, with a particular emphasis on ecological sustainability.

### **Keywords:**

structure building, multi-storey frame, static analysis, seismic analysis, life cycle analysis (LCA), sustainable design, GaBi software

## SADRŽAJ

SAŽETAK .....	i
SUMMARY .....	ii
SADRŽAJ .....	iii
<b>1 UVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2 SPREGNUTE KONSTRUKCIJE .....</b>	<b>10</b>
2.1 Općenito.....	10
2.2 Prednosti i mane.....	11
2.2.1 Prednosti .....	11
2.2.2 Mane .....	12
2.3 Karakteristike materijala .....	12
2.4 Spregnute nosači .....	13
2.4.1 Izvedba spregnutih nosača .....	13
2.4.2 Efektivna širina.....	15
2.5 Spregnute ploče.....	17
<b>3 ŽIVOTNI CIKLUS GRAĐEVINE .....</b>	<b>19</b>
3.1 Općenito.....	19
3.2 Održivost životnog ciklusa građevine .....	19
3.2.1 Oblici degradacije konstrukcije.....	21
3.2.2 Pregledi i sanacije .....	21
3.3 Utjecaj okoliša na životni ciklus građevine-LCA.....	22
3.4 Troškovi životnog ciklusa-LCC .....	23
3.5 Analiza socijalnih komponenata životnog ciklusa-LCS .....	25
3.6 Projektantski pristup održive konstrukcije.....	26
<b>4 TEMELJNA NAČELA I KRITERIJ PRORAČUNA EUROCODA .....</b>	<b>27</b>
4.1 Proračunske situacije .....	27
4.2 Proračun graničnih stanja .....	28
4.2.1 Granično stanje nosivosti .....	28
4.2.2 Granično stanje uporabljivosti.....	29

---

4.3	Kriterij za potresno aktivna područja .....	30
4.3.1	Temeljni zahtjevi .....	30
4.3.2	Kombinacije pri potresnoj proračunskoj situaciji .....	31
4.3.3	Tipovi temeljnog tla.....	33
4.3.4	Klasa važnosti građevine .....	33
4.3.5	Faktor ponašanja .....	34
4.3.6	Slučajni torzijski učinci .....	35
4.3.7	Posebna pravila za čelične zgrade .....	35
4.3.7.1	Kriterij proračuna okvirnih sustava .....	36
4.3.7.2	Kriterij proračuna jednostavnih okvirnih sustava s centričnim vezama .....	39
<b>5</b>	<b>GLOBALNA ANALIZA KONSTRUKCIJE.....</b>	<b>41</b>
5.1	Imperfekcija okvira .....	41
5.2	Klasifikacija čeličnih konstrukcija.....	42
5.2.1	Klasifikacija za stalne i prolazne proračunske situacije .....	42
5.2.2	Klasifikacija za potresnu proračunsku situaciju .....	43
<b>6</b>	<b>ANALIZA OPTEREĆENJA .....</b>	<b>44</b>
6.1	Opterećenje u fazi izvođenja .....	44
6.1.1	Stalno opterećenje .....	44
6.1.2	Uporabno opterećenje .....	44
6.2	Opterećenje u uporabnoj fazi .....	44
6.2.1	Stalno opterećenje .....	44
6.2.2	Uporabno opterećenje .....	45
6.2.3	Opterećenje snijegom .....	46
6.2.4	Opterećenje vjetrom .....	47
6.2.4.1	Vršni tlak uslijed brzine vjetra pri udaru.....	47
6.2.4.2	Djelovanje vjetra na uzdužnu stranu objekta.....	49
6.2.4.3	Djelovanje vjetra na poprečnu stranu objekta.....	65
6.2.5	Proračun sile vjetra pomoću koeficijenta sile .....	82
<b>7</b>	<b>PRELIMINARNO DIMENZIONIRANJE .....</b>	<b>83</b>
7.1	Međukatna konstrukcija .....	84
7.2	Sekundarni nosač .....	85

---

7.3	Glavni nosač.....	86
7.4	Stup .....	87
7.5	Vertikalni uzdužni vez.....	88
<b>8</b>	<b>NUMERIČKO MODELIRANJE .....</b>	<b>89</b>
8.1	Imperfekcije .....	90
8.1.1	Imperfekcije od vlastite težine .....	90
8.1.2	Imperfekcije od dodatno stalnog opterećenja .....	91
8.1.3	Imperfekcije od korisnog opterećenja .....	92
8.1.4	Imperfekcije od snijega .....	93
8.2	Ulazni podaci za provedbu analize .....	94
8.3	Klasifikacija okvira .....	96
<b>9</b>	<b>STATIČKI PRORAČUN KONSTRUKCIJE .....</b>	<b>97</b>
9.1	Dimenzioniranje stupa .....	97
9.1.1	Klasifikacija poprečnog presjeka .....	98
9.1.2	Otpornost poprečnog presjeka .....	98
9.1.3	Otpornost elementa.....	100
9.1.4	Kontrola pomaka (GSU).....	105
9.2	Dimenzioniranje glavnog nosača.....	106
9.2.1	Klasifikacija poprečnog presjeka .....	107
9.2.2	Otpornost poprečnog presjeka .....	107
9.2.3	Otpornost elementa.....	109
9.2.4	Kontrola pomaka (GSU).....	114
9.3	Dimenzioniranje veza .....	115
9.3.1	Klasifikacija poprečnog presjeka .....	115
9.3.2	Otpornost poprečnog presjeka .....	116
9.3.3	Otpornost elementa.....	116
9.4	Dimenzioniranje sekundarnog nosača .....	117
9.4.1	Proračun za fazu izvedbe .....	119
9.4.1.1	Klasifikacija poprečnog presjeka .....	119
9.4.1.2	Otpornost poprečnog presjeka .....	120
9.4.1.3	Otpornost elementa.....	121

9.4.2	Proračun za uporabnu fazu .....	123
9.4.2.1	Efektivna širina betonske ploče: .....	123
9.4.2.2	Plastična otpornost na savijanje spregnutog presjeka .....	125
9.4.2.3	Posmična otpornost spregnutog presjeka .....	125
9.4.2.4	Provjera uzdužne posmične otpornost betonske pojasnice .....	127
9.4.2.5	Provjera betona u tlačnoj dijagonali .....	128
9.4.3	Granično stanje uporabljivosti .....	128
9.4.3.1	Progib kod faze izvedbe .....	128
9.4.3.2	Progib kod uporabne faze .....	129
9.4.3.3	Nadvišenje čeličnog nosača .....	132
9.4.3.4	Dokaz vibracije nosača .....	132
9.4.3.5	Dokaz pukotina u betonu .....	133
9.5	Dimenzioniranje ploče .....	133
9.5.1	Konstruktivski detalji spregnute ploče .....	135
9.5.2	Granično stanje nosivosti .....	136
9.5.2.1	Faza izvedbe .....	136
9.5.2.2	Uporabna faza .....	138
9.5.3	Granično stanje uporabljivosti .....	141
9.5.3.1	Proračun progiba .....	141
9.6	Granično stanje uporabljivosti konstrukcije .....	144
9.6.1	Kontrola pomaka za x smjer .....	145
9.6.2	Kontrola pomaka za y smjer .....	146
<b>10</b>	<b>PRORAČUN KONSTRUKCIJE NA DJELOVANJE POTRESA .....</b>	<b>147</b>
10.1	Seizmička analiza .....	147
10.1.1	Linearna dinamička metoda spektra odziva .....	147
10.2	Potresno djelovanje .....	152
10.3	Dinamički odgovor konstrukcije .....	153
10.4	Klasifikacija okvira .....	155
10.5	Ograničenje međukatnog pomaka .....	156
10.6	Proračun jednostavnog okvirnog sustava s centričnim vezama .....	157
10.6.1	Dimenzioniranje X vezova .....	157

---

10.6.2	Dimenzioniranje stupova .....	159
10.6.2.1	Klasifikacija poprečnog presjeka .....	160
10.6.2.2	Otpornost poprečnog presjeka .....	161
10.6.2.3	Otpornost elementa .....	161
10.7	Proračun okvirnog sustava .....	165
10.7.1	Dimenzioniranje glavnog nosača .....	165
10.7.2	Dimenzioniranje stupa .....	167
10.7.2.1	Klasifikacija poprečnog presjeka .....	168
10.7.2.2	Otpornost poprečnog presjeka .....	169
10.7.2.3	Otpornost elementa .....	171
<b>11</b>	<b>PRIMJENA LCA ANALIZE .....</b>	<b>177</b>
11.1	Motivacija i formulacija problema .....	177
11.2	Softver Gabi .....	178
11.3	Prikupljanje podataka .....	179
11.4	Modeliranje životnog ciklusa .....	179
11.5	Ulazni podaci .....	179
11.5.1	Nabava sirovina .....	179
11.5.2	Proizvodnja materijala .....	180
11.5.3	Faza izgradnje .....	180
11.5.4	Faza uporabe .....	181
11.5.5	Faza kraja životnog vijeka .....	181
11.6	Analiza rezultata .....	183
11.7	Zaključak .....	188
<b>12</b>	<b>PRORAČUN PRIKLJUČAKA .....</b>	<b>190</b>
12.1	Priključak stope stupa .....	191
12.2	Priključak glavnog i sekundarnog nosača .....	198
12.3	Priključak glavnog i sekundarnog nosača na stup .....	204
12.4	Priključak dijagonala na sekundarni nosač i stup .....	213
<b>13</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>220</b>
	POPIS LITERATURE .....	221
	PRILOG A .....	222

POPIS SLIKA.....	224
POPIS TABLICA .....	227
NACRTI: .....	229

## 1 UVOD

Spregnute konstrukcije predstavljaju inovativno rješenje u građevinarstvu koje spaja najbolje osobine dvaju najčešće korištenih građevinskih materijala – čelika i betona. Čelik, poznat po svojoj visokoj čvrstoći, duktilnosti i otpornosti na savijanje, te beton, koji pruža izvrsnu tlačnu otpornost i izdržljivost, u kombinaciji stvaraju konstrukcijski sustav s poboljšanim svojstvima. Spregnuta konstrukcija koristi se za prijenos opterećenja kroz sinergiju ta dva materijala, omogućujući optimalno iskorištavanje njihovih karakteristika.

Životni ciklus građevine sve više dobiva na važnosti u kontekstu smanjenja troškova i emisije štetnih tvari. Spregnute konstrukcije, pružaju značajan doprinos održivom građevinarstvu. Čelik, smanjuje težinu konstrukcije i potrebu za materijalima, dok beton osigurava otpornost i trajnost. Ova kombinacija smanjuje emisije CO<sub>2</sub> i povećava energetska učinkovitost, čineći spregnute konstrukcije ekonomičnim i ekološki prihvatljivim rješenjem. U ovom radu obrađena je konstrukcija višekratne zgrade tlocrtnih dimenzija 18,0 x 40,0 m, ukupne visine 21,6 m, koja se sastoji od šest etaža, svaka visine 3,6 m. Zgrada je smještena u Zagrebu, a dispozicijsko rješenje sadrži dva različita sustava stabilizacije, okvirni sustav u poprečnom smjeru i jednostavni okvir s centričnim X vezama u uzdužnom smjeru. Razrada konstrukcije započinje analizom opterećenja koja uključuje stalno opterećenje, dodatno stalno opterećenje, uporabno opterećenje, te opterećenja snijegom, vjetrom i potresom prema normi HRN EN 1991. Na temelju dobivenih opterećenja preliminarno se dimenzioniraju elementi konstrukcije, nakon čega se izrađuje 3D numerički model konstrukcije u računalnom programu "SCIA" za analizu globalnog ponašanja konstrukcije. Provedena je statička analiza i dokazi pouzdanosti prema normi za spregnute konstrukcije HRN EN 1994, kao i seizmička analiza s dokazima pouzdanosti prema normi HRN EN 1998. Budući da je seizmička analiza mjerodavna, usvojeni su dodatni kriteriji pouzdanosti prema HRN EN 1998, što je dovelo do povećanja poprečnih presjeka elemenata.

Nakon definiranja profila konstrukcijskih elemenata, provedena je analiza životnog ciklusa u računalnom programu "GaBi". Uspoređene su tri višekratnice istih dimenzija, izvedene od različitih materijala odnosno spregnuta, čelična i betonska konstrukcija.

U završnom dijelu rada izvedeno je dimenzioniranje karakterističnih priključaka konstrukcijskih elemenata koristeći programski paket "IDEA StatiCa".



## 2 SPREGNUTE KONSTRUKCIJE

### 2.1 Općenito

Pojam spregnutih konstrukcija danas se primarno odnosi na povezivanje elemenata izrađenih od čelika i betona, iako u širem smislu može obuhvatiti sprezanje elemenata izrađenih od istovrsnih ili različitih materijala [1]. Odnosno konstrukcije kod kojih su elementi integrirani u jedinstvenu cjelinu te u zajedničkom djelovanju prenose opterećenja nazivaju se spregnute konstrukcije. Pored tradicionalnih metoda gradnje korištenjem čelika ili armiranog betona, razvoj i primjena kombiniranih konstrukcija, sastavljenih od čelika i betona, rezultiraju novim tipom međusobnog djelovanja između tih materijala. Ovo međudjelovanje više se ne temelji isključivo na ostvarivanju posmične veze između čelika i betona, već na njihovoj zajedničkoj suradnji, uzimajući u obzir različita mehanička svojstva svakog materijala. Važan faktor u osiguranju povezanosti čeličnih i betonskih dijelova poprečnog presjeka predstavljaju spojna sredstva, među kojima su najčešći moždanici s glavom, odnosno valjkasti moždanici. Osim ovih spojnih sredstava, veza između čelika i betona može se postići i uporabom ljepila ili drugih metoda, iako se ovaj aspekt ne razmatra detaljno u normama iz skupine HRN EN 1994 [2].

Opće ponašanje nosača ili ploča izrađenih od čelika i betona uvelike ovisi o početnoj krutosti, otpornosti na opterećenja, sposobnosti deformacije, te utjecaju dugotrajnih deformacija betona, proklizavanju moždanika i sličnim čimbenicima.

Kod spregnutih konstrukcija bitno je razlikovati stupanj posmične veze ili stupanj sprezanja sa posmičnom krutosti ili posmičnom interakcijom.

Stupanj posmične veze  $\eta$  je odnos između otpornosti posmične veze i otpornosti sastavljenog poprečnog presjeka (mjerodavan je slabiji dio). U kontekstu nosača, stupanj posmične veze ovisi o broju moždanika odnosno o otpornosti pojedinog moždanika. [spreg.]Razlikuju se tri osnovna stupnja sprezanja  $\eta$  :

**Nepotpuno sprezanje** ( $\eta = 0$ ), gdje veza između čelika i betona nije dovoljno jaka da prenese sva opterećenja koja djeluju na konstrukciju te zbog toga dolazi do proklizavanja između elemenata, što rezultira smanjenom nosivošću i krutošću konstrukcije.

**Djelomično sprezanje** ( $0 < \eta < 1$ ), gdje veza između čelika i betona je jača nego kod nepotpunog sprezanja, ali nije u potpunosti učinkovita. Opterećenja se djelomično prenose između dva materijala, što omogućava djelomični zajednički rad. Ova vrsta sprezanja često se koristi kada je potrebno balansirati između troškova i performansi konstrukcije. Ova vrsta

sprezanja primjenjuje se isključivo kod spregnutih nosača s presjecima klase 1 ili 2, prema važećim standardima

**Potpuno sprezanje** ( $\eta = 1$ ), označava situaciju u kojoj je veza između čelika i betona maksimalno učinkovita, što omogućava optimalan prijenos opterećenja i zajednički rad oba materijala. Kod potpunog sprezanja, konstrukcija postiže najvišu razinu nosivosti i krutosti, što je idealno za većinu inženjerskih primjena.

Svaki od ovih stupnjeva sprezanja ima specifičnu primjenu, ovisno o potrebama konstrukcije, zahtjevima projekta i ekonomskim faktorima.

*Posmična krutost* ovisi od broja moždanika i početne krutosti primijenjenih moždanika. Može biti potpuna (kruta), djelomična ili nepotpuna (podatljiva).

Idealno kruto međudjelovanje podrazumijeva da između spregnutih elemenata nema relativnog pomaka, te da moždanici u potpunosti prenose posmičnu silu. Međutim, takva situacija je teoretska, jer bi za njezino ostvarenje bilo potrebno da moždanici budu beskonačno kruti ili da ih bude vrlo velik broj, što u praksi nije izvedivo.

U slučajevima kada moždanici ne uspijevaju prenijeti posmičnu silu, te svaki element djeluje neovisno jedan o drugome, ne dolazi do stvaranja posmične krutosti, što je karakteristično za ne spregnute nosače.

U realnim uvjetima, često se susreće djelomična posmična krutost, pri kojoj dolazi do relativnog pomaka između elemenata, ali taj pomak je značajno manji nego kod ne spregnutih konstrukcija. U takvim situacijama moždanici preuzimaju samo dio posmične sile, ali ne u cijelosti. [3]

Drugim riječima posmična krutost odnosi se na relativne deformacije dok stupanj sprezanja na napone.

## 2.2 Prednosti i mane

### 2.2.1 Prednosti

Spregnute konstrukcije, koje kombiniraju čelik i beton, donose brojne prednosti u građevinskoj praksi.

Osnovna prednost spregnute konstrukcije je povećanje krutosti protiv savijanja što rezultira smanjenjem deformacija i progiba. Ova povećana krutost omogućava upotrebu tanjih elemenata i smanjuje ukupnu masu konstrukcije. Korištenjem manje čelika u odnosu na potpuno čelične konstrukcije postiže značajne uštede u materijalima i samim tim su smanjeni troškovi i povećavanju ekonomičnosti.

Osim veće krutosti spregnute konstrukcije imaju veću nosivost, u usporedbi s primjenom svakog materijala pojedinačno, zbog boljeg iskorištavanja betona i čelika

Beton, koji okružuje čelične elemente, djeluje kao zaštitni sloj, povećavajući otpornost konstrukcije na visoke temperature i požare. Ova zaštita smanjuje potrebu za dodatnim vatrozaštitnim premazima ili izolacijom čelika, čime se dodatno smanjuju troškovi.

Spregnute konstrukcije omogućavaju veću fleksibilnost u projektiranju zahvaljujući sposobnosti prilagodbe specifičnim zahtjevima projekta. Ova fleksibilnost omogućava postizanje velikih raspona i kompleksnih geometrijskih oblika, čime se proširuju mogućnosti arhitektonskih i inženjerskih rješenja.

Sprezati se mogu gotovi svi konstrukcijski dijelovi čelika i betona, nosači, stupovi i ploče.

### **2.2.2 Mane**

Uz brojne prednosti, spregnute konstrukcije imaju i određene mane koje se odnose na kompleksnost analize i izvedbe ovakvog sustava.

Kompleksnost analize nastaje zbog nelinearnih odnosa između naprezanja i deformacija u spregnutim konstrukcijama. Analiza zahtijeva detaljne i opsežne proračune kako bi se osigurala pouzdanost konstrukcije.

Održavanje spregnutih konstrukcija tijekom njihove uporabe je složenije u usporedbi s čeličnim ili armirano-betonskim konstrukcijama. Potrebno je pažljivo praćenje i redovito inspekcija kako bi se osiguralo pravilno funkcioniranje svih elemenata i spriječila degradacija performansi.

Tijekom izvedbe i uporabe spregnutih konstrukcija može doći do trajnih deformacija. Ove deformacije mogu nastati zbog različitih čimbenika, uključujući nepravilnosti u izvedbi ili promjene u opterećenju, što može utjecati na dugoročnu stabilnost i pouzdanost konstrukcije.

## **2.3 Karakteristike materijala**

Za izvedbu spregnutih konstrukcija koristi se konstrukcijski čelik, beton, armatura, čelik za moždanike, profilirani čelik za ploče i čelici za spajanje [4].

Beton u spregnutim konstrukcijama može biti ili normalne težine ili lako agregatni, no klasa betona mora biti unutar raspona od C20/25 do C50/60. Ove specifikacije osiguravaju potrebnu čvrstoću i dugovječnost konstrukcije.

Konstrukcijski čelik, prema normi EN 1993-1-1, treba imati čvrstoću u rasponu od S235 do S460. Međutim, čelici klase S420 i S460 rijetko se koriste u visokogradnji zbog specifičnih

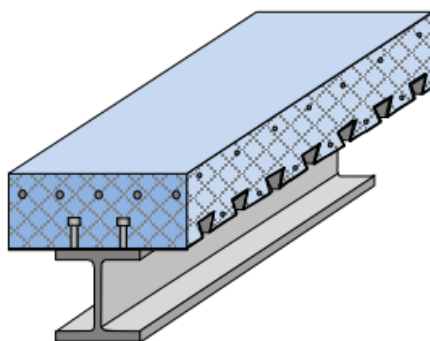
ograničenja koja se primjenjuju pri njihovom proračunu otpornosti. Stoga je važno pažljivo razmotriti ova ograničenja pri odabiru čelika za specifične primjene.

Za čelik namijenjen armaturi, granica popuštanja ne smije prelaziti  $600 \text{ N/mm}^2$ . Kada se koriste presjeci klase 1 i 2, dopušteno je koristiti čelik s duktilnošću koji odgovara klasi B ili C, što osigurava adekvatnu plastičnost i otpornost na lom.

## 2.4 Spregnuti nosači

Spregnuti nosači u visokogradnji najčešće se sastoje od valjanih I-profila, poput IPE, HEA ili HEB, koji su kombinirani s monolitnom betonskom pločom. U nekim slučajevima, čelični profil može biti djelomično ispunjen betonom, pri čemu beton popunjava prostor između pojasnica čeličnog profila.

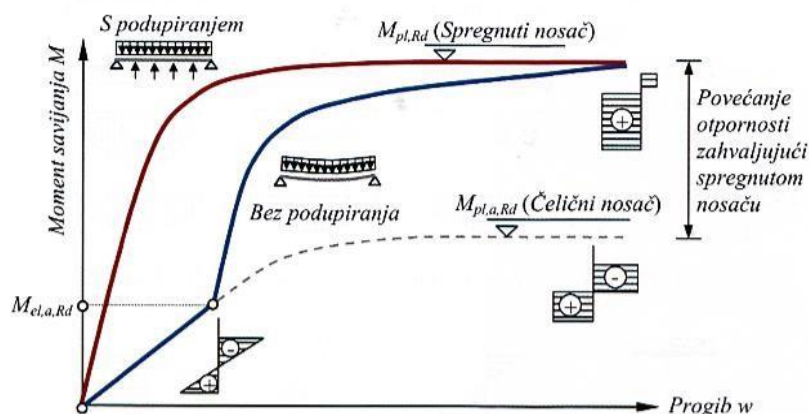
Ovi nosači moraju udovoljavati svim zahtjevima vezanim uz granično stanje nosivosti i uporabljivosti. To uključuje osiguranje da konstrukcija ne samo da podnosi predviđena opterećenja, već i da ispunjava kriterije za dugoročnu funkcionalnost i sigurnost, uz minimiziranje deformacija i osiguranje stabilnosti u svim predviđenim uvjetima uporabe. Na slici 1. prikazan je primjer spregnutog nosača.



**Slika 1.** Karakteristični poprečni presjek spregnutog nosača [3]

### 2.4.1 Izvedba spregnutih nosača

U fazi izvedbe spregnutih nosača čelični nosač se može poduprijeti ili betoniranje može biti provedeno bez podupiranja. U oba slučaja, proračunska plastična otpornost nosača bit će postignuta. Međutim, postoji razlika u veličini progiba za istu razinu momenta savijanja. Ova razlika u ponašanju prikazana na slici 2.



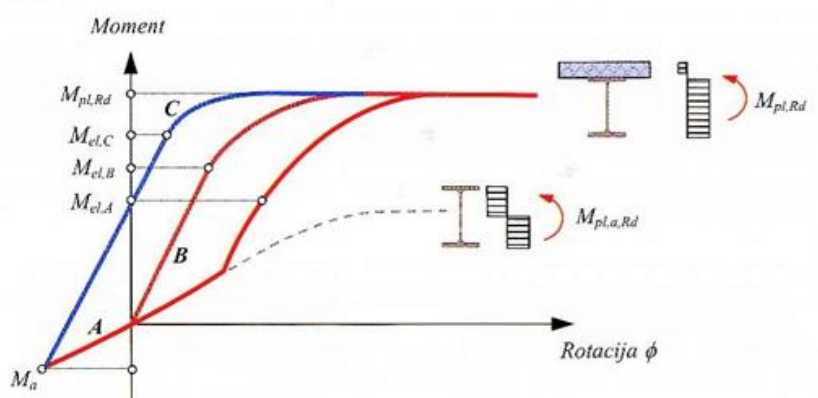
**Slika 2.** Ovisnost momenta savijanja i progiba za slučajeve izvedbe sa i bez podupiranja prije betoniranja[3]

Kod nepoduprtih spregnutih nosača, tijekom faze izvođenja, čelični nosač nosi vlastitu težinu, težinu svježeg betona, montažno opterećenje te težinu oplata. Nakon što beton očvrstne, sva opterećenja preuzima spregnuti nosač, koji sada raspodjeljuje teret ravnomjernije između čeličnih i betonskih elemenata.

S druge strane, kod poduprtih čeličnih nosača, čelični nosač je neopterećen tijekom faze izvođenja, budući da su opterećenja prenesena na podupore. Nakon što beton očvrstne, podupore se uklanjaju i sva opterećenja počinju djelovati na spregnuti nosač. Ako je nosač bio poduprt s jednim ili dva pomoćna stupa, nakon uklanjanja tih podupora, na mjestu gdje su stajali stupovi, na spregnuti nosač prenose se njihove reakcije kako dodatno opterećenje.

Ako se čelični nosač prije betoniranja izvede s nadvišenjem, poznatim i kao "fleksijsko prednapinjanje", nastaje negativni moment  $M_a$ . Ova metoda izvedbe je slična onoj koja se koristi za poduprte nosače.

Ovisnost između momenta  $M$  i kuta rotacije  $\phi$  za sve slučajeve izvedbe prikazana je na slici 3.



**Slika 3.** Ovisnost momenta savijanja i kuta rotacije za tri slučaja izvedbe spregnutog nosača [3]

Sa slike 3. možemo uočiti kako početak plastifikacije donjeg pojasa čeličnog nosača varira ovisno o načinu izvedbe, dok plastična otpornost spregnutog nosača  $M_{pl,Rd}$  ostaje konstantna za sve prikazane slučajeve.

Kod nosača koji nije poduprt tijekom izgradnje, plastifikacija donjeg pojasa započinje vrlo rano jer čelični nosač preuzima svu vlastitu težinu. Nasuprot tome, kod poduprtog nosača, plastifikacija donjeg pojasa počinje pri višoj razini opterećenja budući da sva opterećenja djeluju na spregnuti nosač.

Kod nosača s prethodno izvedenim "fleksijskim prednapinjanjem", u donjoj pojasnici nastaju tlačna naprezanja uslijed "podizanja" privremenih stupova. Stoga plastifikacija donje pojasnice nastaje tek pri višoj razini opterećenja. Plastična otpornost se postiže nakon "razgradnje" tlačnih naprezanja u donjem pojasu čeličnog nosača.

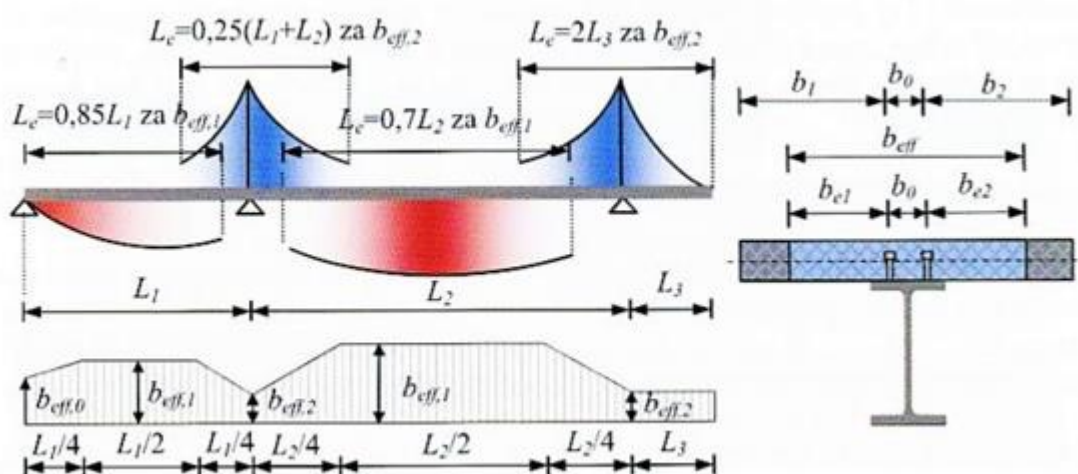
Važno je napomenuti da ponašanje nosača prikazano na slici 2 pretpostavlja da pri dosezanju  $M_{pl,Rd}$  ne dođe do pojave lokalne nestabilnosti.

### 2.4.2 Efektivna širina

Efektivna širina nastaje kao posljedica zaostajanje posmika u pločastim elementima.

Kod spregnutih nosača na efektivnu širinu betonske ploče utječu geometrija poprečnog presjeka, mala posmična krutost pojasnice, plastično ponašanje materijala, popustljivost moždanika, te stanje pukotina u betonu u području negativnih momenata savijanja [3].

Proračunska širina ovisi o razmaku nultih točaka momentnog dijagrama  $L_e$ , poznatom kao "ekvivalentni raspon". Raspodjelu proračunske širine nad osloncima i u rasponima kontinuiranog nosača prikazuje slika 4.



Slika 4. Efektivni rasponi za određivanje efektivne širine betonske pojasnice [3]

Efektivna širina za područje u polju i nad središnjim osloncima izračunava se prema izrazu:

$$b_{eff} = b_0 + \sum b_{ei} = b_0 + b_{e1} + b_{e2} \quad (1)$$

$$b_{ei} = \frac{L_e}{8} \quad (2)$$

gdje su:

$b_0$  - razmak krajnjih moždanika u poprečnom presjeku.

$b_{ei}$  - efektivna širina armiranobetonske ploče sa svake strane hrpta čeličnog nosača od osi rubnog moždanika do slobodnog ruba armiranobetonske ploče.

$L_e$  - približan razmak između nul točaka momentnog dijagrama

$b_i$  - razmak od osi rubnog moždanika do sredine razmaka između susjednih hrptova. Kod rubnog nosača to je udaljenost od osi rubnog moždanika do ruba armiranobetonske ploče.

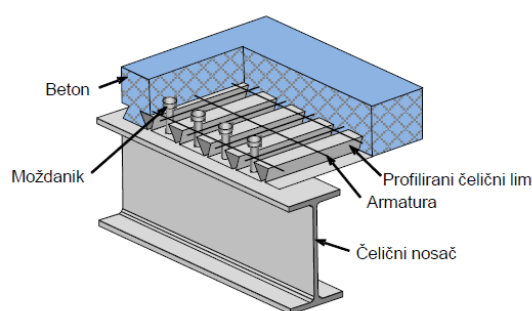
Efektivna širina nad krajnjim osloncima izračunava se prema izrazu:

$$b_{eff} = b_0 + \sum \beta_i \cdot b_{ei} \quad (3)$$

$$\beta_i = (0,55 + 0,025 \cdot L_e / b_{ei}) \leq 1,0 \quad (4)$$

## 2.5 Spregnute ploče

Spregnute ploče od profiliranih čeličnih limova i betona često se primjenjuju u višekatnim zgradama zbog njihove učinkovitosti. Glavne prednosti spregnutih ploča s čeličnim limovima uključuju bržu izgradnju, mogućnost premošćivanja većih raspona, smanjenje konstrukcijske visine i manju vlastitu težinu u usporedbi s klasičnim armirano-betonskim pločama. Profilirani čelični lim može služiti kao oplata, preuzeti sva opterećenja ploče, djelovati kao radna platforma tijekom gradnje. Na slici 5. prikazana je karakteristična spregnuta ploča koja se oslanja na spregnuti nosač

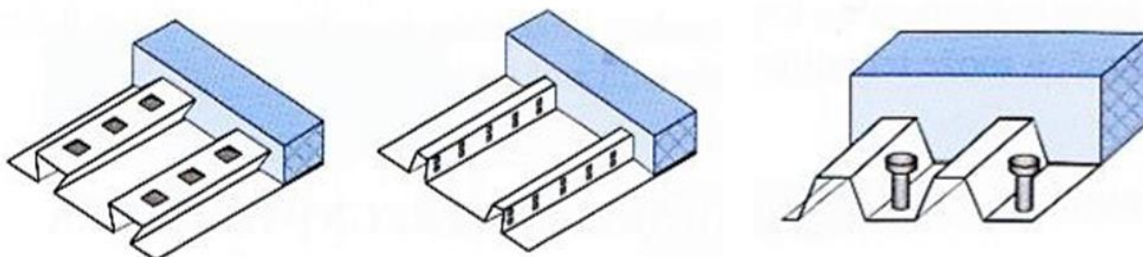


**Slika 5.** Karakteristična spregnuta ploča koja se oslanja na spregnuti nosač [3]

Dimenzioniranje spregnutih ploča odvija se u dvije faze.

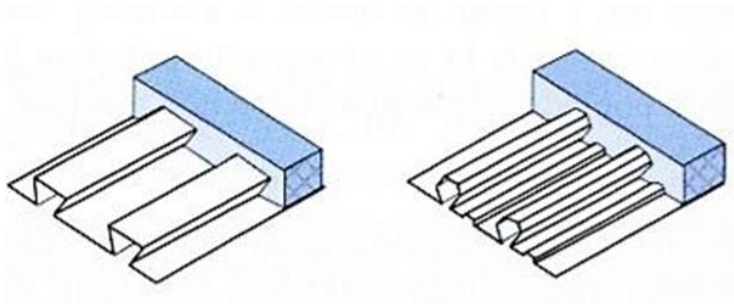
U prvoj fazi čelični lim nosi svježu betonsku masu i servisno opterećenje te služi kao oplata za svježi beton. U drugoj fazi spregnuta ploča prenosi korisno opterećenje.

Trajna posmična veza između betona i čeličnog profila može se osigurati mehaničkim sprežanjem, moždanicima na krajevima, trenjem ili sidrima oblikovanim deformiranim limom na krajevima. Prema HRN EN 1994-1-1:2012 prijanjanje između čelika i betona nije pouzdana metoda za posmičnu vezu jer rezultira ne duktilnim ponašanjem što dovodi do koncentracije posmičnih naprezanja koje mogu uzrokovati iznenadno otkazivanje.

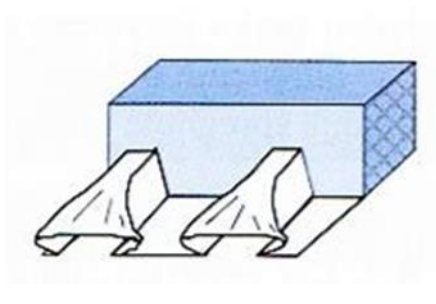




a) Mehaničko sprezanje



b) Sprezanje s moždanicima na krajevima



c) Sprezanje pomoću trenja



d) Sprezanje pomoću sidara izvedenog deformiranim limom na krajevima

**Slika 6.** Karakteristične posmične veze kod spregnutih ploča [3]

### 3 ŽIVOTNI CIKLUS GRAĐEVINE

#### 3.1 Općenito

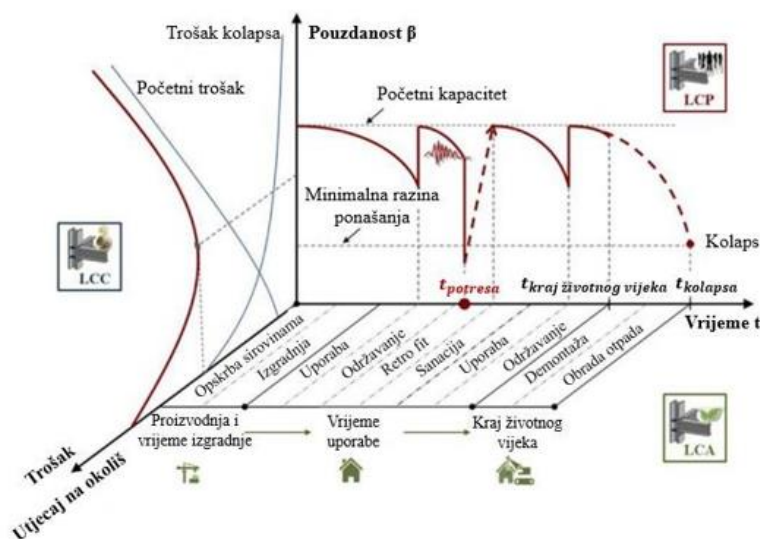
Životni ciklus građevine obuhvaća sve faze njezina postojanja, od projektiranja i gradnje, preko korištenja i održavanja, do konačnog rušenja i reciklaže. Svaka od tih faza ima značajan utjecaj na okoliš, ekonomiju i društvo. Prilikom projektiranja i gradnje, ključna je pažnja posvećena izboru materijala i tehnologija koje mogu smanjiti potrošnju resursa, troškove izgradnje i emisije štetnih tvari. U fazi korištenja, osiguravanje energetske učinkovitosti, održavanje i prilagodljivost građevine novim potrebama produljuje njezin vijek trajanja i smanjuje troškove eksploatacije.

Na završetku životnog ciklusa, reciklaža i ponovna upotreba materijala postaju presudni za smanjenje otpada i daljnje smanjenje emisija. Cjelokupni proces usmjeren je na optimizaciju troškova tijekom vijeka trajanja građevine te na smanjenje njezina ukupnog ugljičnog otiska. U tom kontekstu, analiza životnog ciklusa (LCA) predstavlja ključnu metodologiju za procjenu utjecaja građevine na okoliš kroz sve faze njezina vijeka, uključujući proizvodnju, vađenje sirovina, korištenje, održavanje te reciklažu ili odlaganje na kraju životnog vijeka.

LCA postupci dio su normi Međunarodne organizacije za normizaciju, koje omogućuju usporedbu različitih rješenja i identifikaciju optimalne varijante. Unutar LCA analize, objedinjuju se tri ključna aspekta: analiza utjecaja na okoliš (LCA), analiza troškova (LCC) i analiza društvenog odnosno funkcionalnog aspekta (LCS) (slika 7). Ove analize pružaju sveobuhvatan pristup procjeni građevine, omogućujući inženjerima da donesu odluke usmjerene prema održivosti i dugovječnosti konstrukcije.

#### 3.2 Održivost životnog ciklusa građevine

Održivost građevina obuhvaća ekološke, ekonomske i društvene aspekte te je ključna za postizanje dugoročnog razvoja društva. Osnovna pretpostavka svih analiza vezanih za održivost jest da konstrukcija zadovoljava sve propise i norme, te da su granična stanja nosivosti i uporabivosti ispunjena. Uporabni vijek građevine odnosi se na razdoblje tijekom kojeg građevina, uz redovito održavanje, zadržava potrebnu razinu pouzdanosti i funkcionalnosti. Ključno je pitanje optimalne trajnosti, koja se definira kao sposobnost građevine da zadrži ove karakteristike unatoč utjecaju vanjskih čimbenika.



Slika 7. Analiza životnog ciklusa [5]

Od trenutka kada građevina postane operativna, potrebno je redovito pratiti njezino stanje, budući da je tijekom životnog vijeka izložena raznim oblicima degradacije, poput umora materijala, korozije i karbonizacije. Pravovremeno i učinkovito održavanje, uključujući rješenja za odvodnju, ključno je za produljenje vijeka trajanja i smanjenje troškova životnog ciklusa. Nakon svake intervencije na konstrukciji provode se analize poput LCA (analiza životnog ciklusa), LCC (analiza troškova) i LCS (socijalna analiza) kako bi se procijenio učinak izvršenih radova.

Procjena životnog ciklusa u kontekstu održive gradnje nužna je za postizanje ravnoteže između ekoloških i ekonomskih zahtjeva. Iako ne postoji normirani postupak za provedbu cjelovite analize, postoje koraci i metode koje su trenutno prihvaćene i primjenjuju se u praksi.

Holistički pristup analizi životnog ciklusa obuhvaća ekološke, ekonomske i društvene aspekte, te se fokusira na prelazak s projektiranja vođenog troškovima na projektiranje usmjereno prema održivosti konstrukcije. Redoviti pregledi i održavanje građevine ključni su za očuvanje njezine funkcionalnosti i sigurnosti tijekom vremena. Procjena ponašanja građevine provodi se kroz sve faze njezina životnog ciklusa, od izgradnje do kraja uporabe. Poznavanje kritičnih točaka konstrukcije i redoviti pregledi omogućuju smanjenje troškova životnog ciklusa i optimizaciju održivosti građevine.

Održiva gradnja suočava se s nizom izazova, uključujući potrebu za dugoročnim prognozama, sveobuhvatnim pristupom ocjeni održivosti, poznavanjem konstrukcije i vještinama za procjenu utjecaja na društvo, ekonomiju i okoliš. Nerazorne metode ispitivanja, koje

omogućuju rano otkrivanje nepravilnosti, mogu značajno smanjiti troškove i intervencije tijekom životnog vijeka građevine.

### 3.2.1 Oblici degradacije konstrukcije

Korozija je jedan od ključnih procesa degradacije čelika, koji može značajno smanjiti trajnost i sigurnost čeličnih konstrukcija. Ona se manifestira u nekoliko oblika, uključujući opću, lokalnu i interkristalnu koroziju. Prema mehanizmu, korozija može biti kemijska ili elektrokemijska. Uobičajeni oblici korozije na čeličnim profilima uključuju točkastu, pukotinsku, naponsku koroziju raspucavanja, opću i bimetalnu koroziju. Posebni oblici korozije javljaju se kada korozija djeluje u kombinaciji s mehaničkim, biološkim ili električnim čimbenicima, kao što su naponska, erozijska, kavitacijska, tarna i biokorozija. Za sprječavanje korozije koriste se organski premazi, anorganske presvlake poput emajliranja i fosfatiranja, te metalne presvlake poput cinčanja i galvaniziranja.

Karbonatizacija je proces koji je usko povezan s degradacijom betona, osobito u spregnutim konstrukcijama gdje beton štiti čelik. Ovaj proces uključuje reakciju između ugljičnog dioksida iz zraka i kalcijevog hidroksida u betonu, što smanjuje pH vrijednost betona i omogućava koroziju armature. Kvantifikacija mehanizama karbonatizacije, zajedno s korozijom, postaje sve važnija kako bi se predvidjelo kada će korozija postati aktivna na površini čeličnih elemenata. Iako deterministički modeli pokušavaju predvidjeti ove trenutke, varijabilnost ulaznih podataka otežava postizanje apsolutne pouzdanosti. Karbonatizacija se sprječava korištenjem kvalitetnih betonskih smjesa s dodatnim cementnim materijalima, dizajnom koji smanjuje poroznost i propusnost betona te povećanjem debljine zaštitnog sloja betona kako bi se produljilo vrijeme do inicijacije korozije armature.

Umor je još jedan kritičan čimbenik degradacije čelika koji se javlja uslijed ponavljajućih opterećenja tijekom životnog vijeka konstrukcije. Umor može inducirati oštećenje ili pogoršati postojeća oštećenja, osobito na najkritičnijim detaljima konstrukcije. U čeličnim konstrukcijama, poprečna ukrućenja često se koriste kao detalji za smanjenje utjecaja umora. Otpornost na umor može se dodatno poboljšati tretmanom visokofrekventnim čekićem nakon zavarivanja, što značajno povećava otpornost ukrućenja i produžava životni vijek konstrukcije.

### 3.2.2 Pregledi i sanacije

Održavanje građevine obuhvaća aktivnosti usmjerene na očuvanje ili obnovu potrebnih svojstava konstrukcije. Ovaj pojam nadilazi samo radove na konstrukciji i postaje sustav gospodarenja građevinama. Neposredne aktivnosti održavanja uključuju kontinuirano čišćenje, periodične radove kao što su obnova zaštite i zamjena dijelova. Pregledi se provode kako bi se utvrdilo trenutno stanje konstrukcije i identificirala potrebna poboljšanja. Razlozi

za pregled uključuju nedostatak informacija o stanju građevine, sumnju na propadanje materijala i potrebu za procjenom preostalog životnog vijeka.

Vrste pregleda građevine su: rutinski, opći, glavni i posebni.

Rutinski pregled je vizualni pregled svakih godinu dana za otkrivanje manjih nepravilnosti.

Opći pregled se provodi se svake 2-3 godine i uključuje vizualni pregled i jednostavna ispitivanja. Cilj je identificirati oštećenja koja utječu na nosivost i uporabivost.

Glavni pregled se obavlja svake 5-6 godina uz specijalizirane metode i opremu. Prikuplja detaljne informacije o stanju građevine i preporučuje održavanje.

Posebni pregled se provodi kada opći ili glavni pregled otkrije značajnu štetu. Omogućuje detaljno istraživanje i procjenu oštećenja.

Preventivno održavanje može biti unaprijed definirano, kada se provodi prema planu ili reaktivno, kada se poduzima zbog značajnog narušavanja svojstava konstrukcije.

Popravak građevine može biti sanacija, kada je sigurnost ugrožena, ili rekonstrukcija, kada je potrebno promijeniti ili nadograditi građevinu. Rezultati pregleda trebaju uključivati plan dodatnih ispitivanja, troškovnik popravaka i preporuke za ograničenje uporabe.

Postoje tri scenarija održavanja građevine: standardni scenarij, scenarij nedostatka novca i scenarij produženog životnog vijeka.

Standardni scenarij predviđa dovoljna sredstva za preglede i sanacije tijekom životnog vijeka građevine.

Scenarij nedostatka novca nastaje kada tijekom životnog vijeka građevine nedostaju sredstva za potrebne radnje održavanja. Zbog toga će stanje građevine postupno propadati.

Scenarij produženog životnog vijeka Omogućuje dodatne godine održavanja nakon isteka teoretskog vijeka građevine, uz prilagođene mjere održavanja.

### **3.3 Utjecaj okoliša na životni ciklus građevine-LCA**

Gradnja neizbježno utječe na prirodni okoliš, stoga svi sudionici u procesu gradnje trebaju biti svjesni ekoloških aspekata, uključujući prilagodbu građevine krajoliku, sprečavanje ispuštanja štetnih tvari u okoliš i mogućnost reciklaže.

Analiza okoliša u životnom ciklusu (LCA) obuhvaća četiri glavne faze. Prva faza je definiranje cilja i granica studije, pri čemu se određuje svrha analize i granice koje će obuhvatiti. Druga faza, inventar životnog ciklusa, uključuje prikupljanje podataka o materijalima, energiji i emisijama povezanim s proizvodom ili sustavom te izradu inventara ulaznih i izlaznih podataka. Treća faza, procjena utjecaja životnog ciklusa, kvantificira potencijalne ekološke utjecaje na temelju podataka iz inventara, uključujući mjerenje potencijala globalnog

zagrijavanja (GWP), iscrpljivanja ozona, fotokemijskog stvaranja ozona, zakiseljavanja, eutrofikacije i abiotskog iscrpljivanja. Četvrta faza, tumačenje rezultata, uključuje identificiranje značaja ekoloških utjecaja, donošenje zaključaka i formuliranje preporuka za poboljšanje.

Cilj LCA analize je utvrditi ekološko ponašanje građevine tijekom cijelog životnog vijeka, kako bi se identificirale prednosti i nedostaci te omogućila optimizacija budućih projekata.

Pokazatelji održivosti obuhvaćaju potrošnju materijala, vode i zemljišta tijekom gradnje, te primarnu energiju potrebnu za proizvodnju materijala, transport i ugradnju. Analiziraju se i toksičnost, uključujući bio toksičnost i toksičnost za ljude, te štetne emisije kao što su potencijal globalnog zagrijavanja (GWP), iscrpljivanje ozona (ODP), fotokemijsko stvaranje ozona (POCP), zakiseljavanje (AP), eutrofikacija (EP) i abiotsko iscrpljivanje (ADP).

Zaključci analize trebaju se fokusirati na smanjenje emisije štetnih plinova, minimiziranje potrošnje dobara, mogućnost reciklaže i pravilno upravljanje otpadom.

### 3.4 Troškovi životnog ciklusa-LCC

Troškovi životnog ciklusa (LCC) predstavljaju metodu ekonomske analize koja obuhvaća sve relevantne troškove tijekom životnog vijeka građevine, pri čemu se uzima u obzir vremenska vrijednost novca. Ova analiza ne uključuje samo troškove izgradnje, već i troškove vezane uz projektiranje, održavanje i demontažu, koji mogu činiti značajan udio ukupnih troškova životnog ciklusa.



Slika 8. Životni ciklus građevine [6]

Ključni cilj LCC analize je postići ravnotežu između početnih troškova i troškova tijekom uporabe, uzimajući u obzir da veća početna ulaganja mogu smanjiti troškove održavanja. Sukob između investitora, koji želi minimizirati troškove izgradnje, i korisnika, koji teži smanjenju troškova uporabe, često je prisutan. Nakon faze projektiranja, intervencije su otežane, a tržište može motivirati investitore da udovolje zahtjevima održivosti. Koncept troškova cijelog životnog vijeka detaljno je prikazan na slici 9.



Slika 9. Koncept “trošak cijelog životnog vijeka” i “trošak životnog ciklusa” [6]

Troškovi izgradnje spregnute konstrukcije obuhvaćaju radnje poput iskopavanja, temeljenja, izrade čeličnih okvira i spregova, izgradnje betonske ploče i fasadnih panela. Ovi troškovi uključuju materijale, proizvodnju komponenata, transport i radnu snagu.

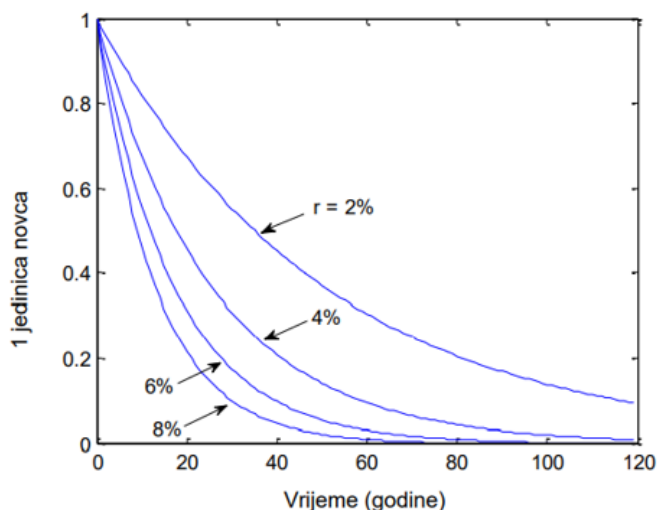
Energetska potrošnja za proizvodnju i transport materijala također se uzima u obzir, kao i pitanje je li materijal obnovljiv te što se događa s njim nakon demontaže. Troškovi tijekom uporabe uključuju redovito održavanje i inspekcije, čiji intervali variraju ovisno o funkciji građevine, lokalnim praksama i ekonomskim resursima.

Na kraju životnog vijeka, troškovi uključuju demontažu konstrukcije, transport i odlaganje materijala. Čelične komponente spregnute konstrukcije često se recikliraju, dok se betonski materijali obično odvoze na deponije. Procjena svih troškova omogućava donošenje odluka koje balansiraju početne troškove s dugoročnim ekonomskim prednostima. Analizom troškova životnog ciklusa, uključujući energetske troškove i mogućnost recikliranja, može se optimizirati ekonomsku isplativost i održivost projekta.

Cilj ekonomske metode troška je uskladiti sve troškove u zajedničku vremensku točku, s obzirom na to da se vrijednost novca mijenja tijekom vremena. Različite metode ekonomske procjene koriste se za ovaj cilj:

Metoda povrata (Payback Method) određuje vrijeme potrebno za povratak početnog ulaganja. Metoda ekvivalentnih godišnjih troškova (Equivalent Annual Costs) izražava godišnje troškove posjedovanja i upravljanja imovinom tijekom cijelog životnog vijeka. Metoda interne stope povrata (Internal Rate of Return) predstavlja diskontnu stopu pri kojoj je neto sadašnja vrijednost troškova jednaka neto sadašnjoj vrijednosti dobiti. Metoda neto sadašnje vrijednosti (Net Present Value) primjenjuje faktore smanjenja za svaku godinu predviđenog tijeka novca, što omogućuje usporedbu trenutnih, prošlih i budućih novčanih tokova. [6]

Sve ove metode prilagođavaju troškove na zajedničku vremensku točku kako bi ih se moglo usporediti. Diskontna stopa, koja odražava trošak novca tijekom vremena, ključna je za preciznost analize. Visoke diskontne stope dovode do značajnog smanjenja sadašnje vrijednosti budućih troškova. Na primjer, stope od 6% ili 8% mogu značajno smanjiti vrijednost troškova nakon 60 godina. Odabir diskontne stope utječe na strategije upravljanja troškovima i treba biti usklađen s vremenskim horizontom analize. Slika 10 prikazuje profil jedne jedinice novca za različite vrijednosti.



Slika 10. Profil jedne jedinice novca za različite vrijednosti  $r$  [6]

### 3.5 Analiza socijalnih komponenata životnog ciklusa-LCS

Analiza socijalnih komponenata životnog ciklusa građevine procjenjuje utjecaj građevine na društvo tijekom njenog cijelog vijeka trajanja, uključujući faze projektiranja, izgradnje, uporabe, održavanja i uklanjanja. Ova analiza obuhvaća utjecaj na lokalnu zajednicu, radnu snagu i šire društvene aspekte.



Za analizu socijalnih komponenata životnog ciklusa razmatraju se dvije vrste indikatora: obvezni, koji su ključni i trebaju biti uvijek uključeni u analizu, te opcionalni, koji se mogu dodati prema potrebi, ovisno o specifičnom cilju analize. [6]

Obvezni indikatori su oni koji kvantificiraju učinke građevinskih aktivnosti na korisnike.

Neobavezni indikatori uključuju buku i estetiku. Buka postaje relevantan indikator ako se radovi odvijaju u blizini osjetljivih područja ili noću, jer može negativno utjecati na ljude fiziološki i psihološki, ometajući osnovne aktivnosti poput spavanja i komunikacije. Smatra se jednim od većih ekoloških problema. Estetika, kao drugi neobavezni indikator, odnosi se na vizualnu privlačnost građevine u urbanom okruženju. Budući da je percepcija ljepote subjektivna, ono što je nekima prihvatljivo, drugima može biti uvredljivo. Kako građevina stari, njena estetska vrijednost može se promijeniti, a u iznimnim slučajevima, estetika može postati presudna za njezinu trajnost. Oba indikatora se ne procjenjuju uvijek u okviru životnog ciklusa jer imaju subjektivnu prirodu, koja zahtijeva poseban pristup pri kvantifikaciji i interpretaciji.

### **3.6 Projektantski pristup održive konstrukcije**

Projektantski pristup održivoj konstrukciji temelji se na odabiru materijala i rješenja konstrukcije koji minimiziraju negativne utjecaje na okoliš, društvo i ekonomiju. Projektanti imaju ključnu ulogu u odabiru materijala, tehnologija i metoda gradnje koje mogu značajno utjecati na održivost građevine tijekom njenog životnog ciklusa.

Odabir materijala je jedan od najvažnijih aspekata održivog projektiranja. Korištenje materijala s niskim utjecajem na okoliš, kao što su reciklirani ili obnovljivi materijali, može smanjiti emisiju CO<sub>2</sub> i potrošnju energije tijekom proizvodnje i transporta. Također, izbor materijala s dugim vijekom trajanja i niskim zahtjevima za održavanje doprinosi smanjenju troškova tijekom životnog ciklusa građevine. Održivim projektiranjem može se postići smanjenje potrošnje energije i emisija stakleničkih plinova, čime se doprinosi očuvanju okoliša.

Sve ove odluke imaju dugoročne posljedice na održivost građevine, utječući na njen ekološki otisak, ekonomsku isplativost i društvene aspekte. Projektant koji razmatra ove čimbenike može značajno pridonijeti stvaranju održivih i ekološki prihvatljivih građevinskih rješenja.

## 4 TEMELJNA NAČELA I KRITERIJ PRORAČUNA EUROCODA

### 4.1 Proračunske situacije

Odabir proračunske situacije određuje se na temelju specifičnih zahtjeva koje konstrukcija mora zadovoljiti u različitim uvjetima (tablica 1).

Vrste proračunskih situacija:

- stalna proračunska situacija
- prolazna proračunska situacija
- izvanredna proračunska situacija
- potresna proračunska situacija

**Tablica 1.** Preporučene vrijednosti faktora  $\psi$  [7]

Djelovanje	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Uporabna opterećenja u zgradama kategorije (vidjeti normu EN 1991-1-1):			
Kategorija A: kuće, stambene zgrade	0,7	0,5	0,3
Kategorija B: uredi	0,7	0,5	0,3
Kategorija C: područja za skupove	0,7	0,7	0,6
Kategorija D: trgovine	0,7	0,7	0,6
Kategorija E: skladišta	1,0	0,9	0,8
Kategorija F: prometna područja, težina vozila $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Kategorija G: prometna područja, $30$ kN $\leq$ težina vozila $\leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Kategorija H: krovovi	0	0	0
Opterećenja snijegom u zgradama (vidjeti normu EN 1991-1-3)*:			
– Finska, Island, Norveška, Švedska	0,70	0,50	0,20
– Ostale države članice CEN-a za gradilišta na visini $H > 1000$ m n.m.	0,70	0,50	0,20
– Ostale države članice CEN-a za gradilišta na visini $H \leq 1000$ m n.m.	0,50	0,20	0
Opterećenja vjetrom na zgrade (vidjeti normu EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (osim požara) u zgradama (vidjeti normu EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
NAPOMENA: Vrijednosti $\psi$ mogu se odrediti u nacionalnom dodatku. * Za države koje nisu navedene, vidjeti odgovarajuće mjesne uvjete.			

## 4.2 Proračun graničnih stanja

### 4.2.1 Granično stanje nosivosti

Granično stanje nosivosti ili krajnje granično stanje odnosi se na stanja koja ugrožavaju sigurnost ljudi i konstrukcije. Ovo granično stanje obuhvaća situacije u kojima konstrukcija ili njezin dio gubi ravnotežu, dolazi do sloma zbog prekomjernih deformacija, stvaranja mehanizma unutar konstrukcije, ili sloma izazvanog umorom materijala.

U analizi graničnih stanja nosivosti potrebno je razmotriti specifična stanja, uključujući:

- Gubitak statičke ravnoteže konstrukcije (EQU),
- Unutarnji slom ili prekomjerno deformiranje konstrukcije (STR)
- Slom ili prekomjerno deformiranje temeljnog tla (GEO)
- Slom zbog umora materijala (FAT)
- Gubitak ravnoteže zbog tlaka vode (UPL)
- Hidrauličko izdizanje u temeljnom tlu (HYD)

Ova stanja su ključna za osiguranje da konstrukcija ostane sigurna i funkcionalna kroz cijeli njen životni vijek.

Uvjet pouzdanosti glasi:

$$E_d \leq R_d$$

(5)

gdje je :

$E_d$  - proračunska vrijednost odgovarajuće otpornosti

$R_d$  - proračunska vrijednost odgovarajuće otpornosti

Proračunski učinak djelovanja:

$$E_d = \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

(6)

Koeficijenti kombinacije za preteća djelovanja navedeni su u tablici 1.

#### 4.2.2 Granično stanje uporabljivosti

Granična stanja uporabljivosti odnose se na uvjete koje konstrukcija ili njezini elementi moraju ispunjavati kako bi se osigurala njihova pravilna funkcionalnost, udobnost korisnika i estetski izgled tijekom njihove uobičajene uporabe.

Ova stanja uključuju:

- Deformacije koje utječu na izgled ili udobnost.
- Vibracije koje uzrokuju nelagodu ili ograničavaju funkcionalnost.
- Oštećenja koja utječu na izgled, trajnost ili funkcionalnost konstrukcije.

Cilj je osigurati da konstrukcija ostane funkcionalna i udobna za korisnike, te da zadrži estetski prihvatljiv izgled.

Uvjet pouzdanosti glasi:

$$E_d \leq C_d \quad (7)$$

gdje je :

$E_d$  - proračunski učinak djelovanja

$C_d$  - granična vrijednost kriterija uporabljivosti

Kombinacije djelovanja:

- karakteristična kombinacija:

$$E_d = \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (8)$$

- česta kombinacija:

$$E_d = \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,i} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (9)$$

- nazovistalna kombinacija :

$$E_d = \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (10)$$

Koeficijenti kombinacije za prateća djelovanja navedeni su u tablici 1.

### 4.3 Kriterij za potresno aktivna područja

Kriteriji za projektiranje u potresno aktivnim područjima usmjereni su na osiguranje sigurnosti i funkcionalnosti građevina u slučaju potresa. Ključni kriteriji uključuju:

- Sprječavanje ozbiljnih oštećenja ili stanja koja prethode rušenju: konstrukcija treba biti projektirana da izdrži rijetke, značajne seizmičke aktivnosti bez ozbiljnih oštećenja ili potpune propasti.
- Minimiziranje oštećenja kod umjerenih seizmičkih aktivnosti: konstrukcija treba biti dovoljno jaka da izdrži umjerene seizmičke događaje s minimalnim oštećenjima, uključujući oštećenja ne konstrukcijskih elemenata.
- Zaštita ne konstrukcijskih komponenti: kod čestih manjih potresa, cilj je minimizirati oštećenja ne konstrukcijskih komponenti poput pregradnih zidova.

#### 4.3.1 Temeljni zahtjevi

Temeljni zahtjevi za projektiranje u potresnim područjima osiguravaju da građevine budu otporne na seizmičke aktivnosti i da minimiziraju rizik od ozbiljnih oštećenja i rušenja. Ključni zahtjevi uključuju:

- Zahtjev da ne smije doći do rušenja (No-Collapse Requirement): konstrukcija mora biti projektirana da izdrži potres bez globalnih i lokalnih urušavanja
- Zahtjev ograničenja oštećenja (Damage Limitation Requirement): konstrukcija treba izdržati umjerene potrese uz minimalna oštećenja koja ne ugrožavaju njezinu osnovnu funkciju i stabilnost [8]

#### Zahtjev da ne smije doći do rušenja

Konstrukcija mora biti projektirana da izdrže potresne sile bez globalnog ili lokalnog urušavanja, osiguravajući da se ne dogodi ozbiljno oštećenje ili rušenje koje bi moglo ugroziti sigurnost korisnika. Proračun se provodi na povratni period potresa od 475 godina ili vjerojatnost prekoračenja od 10% u 50 godina. [8] Zahtjev povezujemo sa graničnim stanjem nosivosti.

Zahtjev da ne smije doći do rušenja smatramo zadovoljenim ako su ispunjeni sljedeći kriteriji:

- otpornost
- lokalna i globalna duktilnost

- ravnoteža
- otpornost stropnih dijafragmi
- otpornost temelja
- seizmička otpornost spojeva

### **Zahtjev ograničenje oštećenja**

Ovaj zahtjev propisuje da konstrukcija mora biti projektirana i izvedena tako da izdrži potresna djelovanja s većom vjerojatnošću pojave od onih predviđenih projektnim potresom, a pritom ne smije pretrpjeti značajna oštećenja ili izgubiti funkcionalnost. Očekivana šteta, ako se pojavi, uglavnom će biti ograničena na ne konstrukcijske elemente, a njezin opseg će ovisiti o interakciji s deformacijom konstrukcije. Proračun se temelji na potresu s povratnim periodom od 95 godina, odnosno s vjerojatnošću prekoračenja od 10% u 10 godina. Ovaj zahtjev osigurava da konstrukcija ostane funkcionalna nakon čestih seizmičkih aktivnosti i minimizira troškove popravaka nakon ozbiljnijih potresa. Učinkovita provedba ovog zahtjeva može utjecati na dimenzioniranje elemenata konstrukcije, pa se preporučuje njegovo razmatranje u ranoj fazi projektiranja. Ovaj zahtjev možemo povezati sa graničnim stanjem uporabljivosti.

### **4.3.2 Kombinacije pri potresnoj proračunskoj situaciji**

#### **Kombinacija djelovanja za potresnu proračunsku situaciju**

Izraz za kombinaciju djelovanja je:

$$E_d = \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (11)$$

Koeficijent kombinacije za prateća djelovanja navedeni su u tablici 1.

#### **Kombinacije učinaka komponenata potresnog djelovanja**

U proračunu potresnog djelovanja obično se pretpostavlja da horizontalne komponente djeluju zajedno. Kombinacija učinaka ovih komponenata provodi se zbrajanjem 100% vrijednosti u glavnom smjeru i 30% vrijednosti u ostalim smjerovima:

$$A_{Ed} = E_{Edx} + 0,3 \cdot E_{Edy} + 0,3 \cdot E_{Edz} \quad (12)$$

$$A_{Ed} = 0,3 \cdot E_{Edx} + E_{Edy} + 0,3 \cdot E_{Edz} \quad (13)$$

$$A_{Ed} = 0,3 \cdot E_{Edx} + 0,3 \cdot E_{Edy} + E_{Edz}$$

(14)

gdje je:

$A_{Ed}$  - proračunski učinak djelovanja seizmičkih komponenti u potresnoj proračunskoj kombinaciji

$E_{Edx}$  - proračunski učinak djelovanja seizmičke komponente u potresnoj proračunskoj kombinaciji za smjer x

$E_{Edy}$  - proračunski učinak djelovanja seizmičke komponente u potresnoj proračunskoj kombinaciji za smjer y

$E_{Edz}$  - proračunski učinak djelovanja seizmičke komponente u potresnoj proračunskoj kombinaciji za smjer z

### **Kombinacije potresnog djelovanja sa drugim djelovanjima**

Inercijski učinci proračunskog potresnog djelovanja trebaju se odrediti uzimajući u obzir prisutnost masa povezanih sa svim gravitacijskim opterećenjima prema [8]:

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i}$$

(15)

$$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i}$$

(16)

gdje je:

$\psi_{E,i}$  - koeficijent kombinacije za promjenjivo djelovanje

$\psi_{2,i}$  i  $\varphi$  - koeficijenti propisani tablicama 1 i 2

**Tablica 2.** Vrijednosti  $\varphi$  pri proračunu  $\psi_{E,i}$  [8]

Tip promjenjivog djelovanja	Kat	$\varphi$
Kategorije A – C*	Krov	1,0
	Katovi s povezanom zauzetošću	0,8
	Neovisno zauzeti katovi	0,5
Kategorije D – F* i arhivi		1,0

\* Kategorije su definirane u normi EN 1991-1-1:2002.

#### 4.3.3 Tipovi temeljnog tla

Prema EN 1998-1, definirano je pet različitih tipova tla, od kojih svaki ima specifična svojstva (Tablica 3). Tlo, poput konstrukcije, posjeduje vlastita dinamička svojstva, uključujući prvi vlastiti period i prigušenje. Iz tog razloga važno je uzeti u obzir tip tla na kojem se nalazi konstrukcija prilikom analize. Konstrukcija koja se proračunava nalazi se na tlu tipa C.

**Tablica 3.** Tipovi temeljnog tla [8]

Tip temeljnog tla	Opis stratigrafskog profila	Parametri		
		$v_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (udara/ 30 cm)	$c_u$ (kPa)
A	Stijena ili druga geološka formacija poput stijene uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini	> 800	–	–
B	Nanosi vrlo gustog pijeska, šljunka ili vrlo krute gline, debljine najmanje nekoliko desetaka metara, s postupnim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom	360-800	> 50	> 250
C	Duboki nanosi gustog ili srednje gustog pijeska, šljunka ili krute gline debljine od nekoliko desetaka metara do više stotina metara	180-360	15-50	70-250
D	Nanosi rahlog do srednje zbijenog nekoherentnog tla (s nešto mekih koherentnih slojeva ili bez njih), ili pretežno meko do dobro koherentno tlo	< 180	< 15	< 70
E	Profil tla koji se sastoji od površinskog aluvijskog sloja s vrijednostima $v_s$ za tipove C ili D i debljinom između 5 i 20 m ispod kojeg je krući materijal s $v_s > 800$ m/s			
S <sub>1</sub>	Nanosi koji se sastoje od, ili sadrže, sloj debljine najmanje 10 m mekih glina/praha s velikim indeksom plastičnosti ( $PI > 40$ ) i velikim sadržajem vode	< 100 (približno)	–	10-20
S <sub>2</sub>	Nanosi tla podložnih likvefakciji, osjetljivih glina ili svaki drugi profil tla koji nije obuhvaćen tipovima A do E ili S <sub>1</sub>			

#### 4.3.4 Klasa važnosti građevine

Građevine se razvrstavaju u jednu od četiri klase važnosti, temeljem potencijalnih posljedica njihovog rušenja tijekom potresa, uključujući utjecaj na ljudske živote i funkcionalnost zgrade nakon potresa. Ove klase važnosti definirane su prema namjeni građevine, a svakoj klasi dodijeljen je odgovarajući faktor važnosti (prikazano u Tablici 4). Građevina koja je predmet analize koristi se kao poslovni prostor i uredi, stoga spada u klasu važnosti II, s pripadajućim faktorom važnosti  $\gamma_1 = 1,0$ .



**Tablica 4.** Klase važnosti građevine [8]

Klasa važnosti	Građevina prema namjeni	Faktor važnosti $\gamma_f$
I	Zgrade manje važnosti za javnu sigurnost (poljoprivredni objekti)	0,8
II	Obične građevine koje ne pripadaju u ostale skuine (hoteli, stambene i poslovne zgrade)	1,0
III	Građevine čija je potresna otpornost važna zbog posljedica vezanih uz rušenje (škole, zgrade s dvoranama za skupove veće od 100 ljudi)	1,2
IV	Građevine čija je cjelovitost za vrijeme potresa od životne važnosti za zaštitu ljudi (bolnice, policijske i vatrogasne postaje, energetska postrojenja)	1,4

#### 4.3.5 Faktor ponašanja

Faktor ponašanja je koeficijent u seizmičkom projektiranju koji se koristi za smanjenje proračunskih seizmičkih sila, uzimajući u obzir sposobnost konstrukcije da apsorbira i disipira energiju putem plastičnih deformacija bez potpunog urušavanja. Vrijednosti faktora ponašanja prikazani su u tablici 5.

**Tablica 5.** Granične vrijednosti faktora ponašanja [8]

Tip konstrukcije	Razred duktilnosti	
	DCM	DCH
a) okvirne konstrukcije	4	5 $\alpha_2 / \alpha_1$
b) okvir s centričnim ukrućenjima		
– dijagonalna ukrućenja	4	4
– ukrućenja u obliku slova V	2	2,5
c) okvir s ekscentričnim ukrućenjima	4	5 $\alpha_2 / \alpha_1$
d) obrnuto njihalo	2	2 $\alpha_2 / \alpha_1$
e) konstrukcije s betonskim jezgrama ili betonskim zidovima	vidjeti 5. poglavlje	
f) okvir s centričnim ukrućenjem	4	4 $\alpha_2 / \alpha_1$
g) okvirne konstrukcije s ispunskim zidom		
– nespojeno betonsko ili zidano zide u dodiru s okvirom	2	2
– spojeni armiranobetonski ispunski elementi	vidjeti 7. poglavlje	
– ispunski elementi izolirani od okvira (vidjeti okvire)	4	5 $\alpha_2 / \alpha_1$

U ovom radu odabran je srednji razred duktilnosti (DCM). Budući da se radi o okvirnom sustavu konstrukcije u y smjeru i sustavu okvira s centričnim dijagonalnim ukrućenjima u x smjeru, faktor ponašanja u oba smjera iznosi  $q = 4,0$ , prema tablici 5.

#### 4.3.6 Slučajni torzijski učinci

Slučajni torzijski učinci nastaju kao nepredviđeni rotacijski momenti u konstrukcijama zbog nejednake raspodjele mase ili nehomogenosti materijala. Ovi učinci se javljaju kada stvarni centar mase (težište) konstrukcije nije usklađen s centrom krutosti, što dovodi do rotacije konstrukcije oko vertikalne osi tijekom potresa. Kako bi se u proračunu obuhvatile ove nesavršenosti, uzima se u obzir slučajni ekscentricitet, koji pomiče proračunski centar mase svakog kata od njegovog nominalnog položaja u oba smjera prema izrazu:

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

(17)

gdje je:

$e_{ai}$  - slučajni ekscentricitet centra masa

$L_i$  - širina građevine okomita na smjer seizmičke aktivnosti

#### 4.3.7 Posebna pravila za čelične zgrade

Konstrukcija i njezini elementi moraju biti projektirani s odgovarajućom duktilnošću, koja ovisi o odabranom statičkom sustavu i faktoru ponašanja. Konstrukcija treba biti proračunata i dimenzionirana s precizno razrađenim elementima, u skladu s posebnim odredbama za potresnu otpornost, što omogućava razvoj mehanizama za disipaciju energije. Prema tome, zgrade se svrstavaju u razrede duktilnosti DCM i DCH (tablica 6). Materijali korišteni u konstrukciji moraju omogućiti stvaranje duktilnih područja na predviđenim mjestima. U tim duktilnim zonama očekuje se da granica popuštanja bude dosegnuta prije nego što ostali dijelovi konstrukcije dosegnu svoju elastičnu granicu.

Tablica 6. Zahtijevani razred presjeka [8]

Razred duktilnosti	Referencijska vrijednost faktora ponašanja $q$	Zahtijevani razred presjeka
DCM	$1,5 < q \leq 2$	razred 1, 2 ili 3
	$2 < q \leq 4$	razred 1 ili 2
DCH	$q > 4$	razred 1

Zone disipacije energije mogu biti smještene u konstrukcijskim elementima ili priključcima. Ako su unutar elemenata, ne duktilni dijelovi i priključci moraju imati povećanu čvrstoću kako bi omogućili ciklično popuštanje u duktilnim dijelovima. Ako su u priključcima, oni moraju imati povećanu otpornost kako bi omogućili ciklično trošenje energije.

Za osiguranje cjelokupnog duktilnog ponašanja, preporučuje se primjena načela "jakih stupova – slabih greda". Ovo načelo osigurava globalni način otkazivanja kroz formiranje

plastičnih zglobova na krajevima greda, dok stupovi ostaju u elastičnom području, osim na razini temelja ili vrha zgrade, gdje su plastični zglobovi prihvatljivi. Ovo načelo je ispunjeno ako vrijedi uvjet:

$$\sum M_{Rc} \geq 1,3 \cdot \sum M_{Rb} \quad (18)$$

gdje je:

$\sum M_{Rc}$  - zbroj proračunskih vrijednosti momenata otpornosti stupa u promatranom čvoru

$\sum M_{Rb}$  - zbroj proračunskih vrijednosti momenata otpornosti greda u promatranom čvoru

Kod projektiranja čeličnih konstrukcija za seizmička opterećenja, ključno je znati maksimalnu vrijednost granice popuštanja čelika. Ova vrijednost je važna jer omogućuje povećanje kapaciteta konstrukcije za disipaciju seizmičke energije. Maksimalna granica popuštanja određuje se sljedećim izrazom:

$$f_{ymax} \leq 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot f_y \quad (19)$$

gdje je:

$\gamma_{ov}$  - koeficijent povećane čvrstoće, iznosi 1,25

$f_y$  - nazivna granica popuštanja čelika

#### 4.3.7.1 Kriterij proračuna okvirnih sustava

##### Zahtjevi za nosače

Okvirne konstrukcije projektiraju se tako da se plastični zglobovi formiraju u nosačima ili na spojevima nosača i stupova, dok se izbjegava njihovo stvaranje u stupovima kako bi se spriječilo nastajanje mekog kata (slika 11). Za grede se zahtijeva otpornost na bočno-torzijsko izvijanje, s pretpostavkom da će se plastični zglob pojaviti na jednom kraju nosača. Ključno je provjeriti da puni plastični moment otpornosti i sposobnost rotacije nisu smanjeni djelovanjem tlačnih i posmičnih sila. Profili klase 1 i 2 moraju se stoga provjeriti prema sljedećim izrazima:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad (20)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 0,15$$

(21)

$$\frac{V_{Ed,G} + V_{Ed,M}}{V_{pl,Rd}} \leq 0,5$$

(22)

gdje je:

$M_{Ed}, N_{Ed}, V_{Ed}$  – računske vrijednosti momenta savijanja i unutarnjih sila

$M_{pl,Rd}, N_{pl,Rd}, V_{pl,Rd}$  računske otpornosti

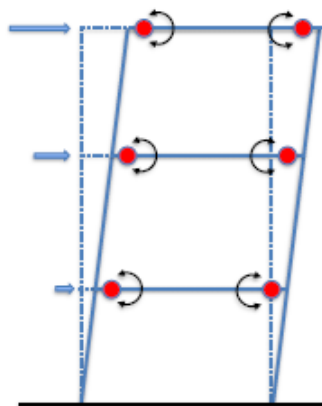
–

$V_{Ed,G}$  proračunska poprečna sila za nepotresna djelovanja

–

$V_{Ed,M}$  proračunska poprečna sila pri djelovanju plastičnih momenata

–



Slika 11. Prikaz formiranja plastičnih zglobova u nosačima [9]

### Zahtjevi za stupove

Kako bi se osiguralo ponašanje „jakog stupa-slabe grede“, sile koje djeluju na stup, izračunate prema elastičnom modelu, trebaju se pomnožiti koeficijentom  $\Omega$  koji se izračunava prema sljedećem izrazu:

$$\Omega = \min \left( \frac{M_{pl,Rd,i}}{M_{Ed,i}} \right)$$

(23)

gdje je:

$M_{Ed,i}$  proračunska vrijednost momenta savijanja grede i u potresnoj proračunskoj situaciji

$M_{pl,Rd,i}$  – plastična otpornost momenta savijanja grede i

Za proračun se uzima u obzir najnepovoljnija kombinacija uzdužne sile i momenta savijanja s računskim vrijednostima:

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

(24)

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + \alpha \cdot 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot M_{Ed,E}$$

(25)

$$V_{Ed} = V_{Ed,G} + \alpha \cdot 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot V_{Ed,E}$$

(26)

gdje je:

$M_{Ed,G}$ ,  $N_{Ed,G}$ ,  $V_{Ed,G}$  računске vrijednosti učinaka uslijed nepotresnih djelovanja

-

$M_{Ed,E}$ ,  $N_{Ed,E}$ ,  $V_{Ed,E}$  računске vrijednosti učinaka uslijed potresnog djelovanja

-

$\gamma_{ov}$  - koeficijent povećane čvrstoće

$\Omega$  koeficijent propisan izrazom (23)

-

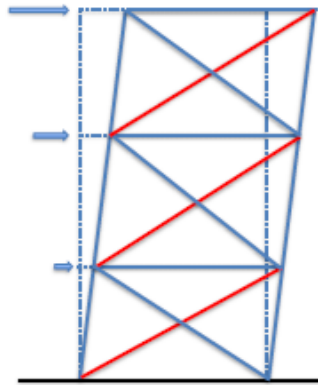
Poprečna sila u stupu treba zadovoljiti izraz:

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

(27)

#### 4.3.7.2 Kriterij proračuna jednostavnih okvirnih sustava s centričnim vezama

Jednostavni okvirni sustavi s centričnim vezovima projektiraju se tako da se energija disipira kroz dijagonalne elemente u vlaku (slika 12). Time se osigurava da se popuštanje dijagonalnih elemenata u vlaku dogodi prije nego što dođe do otkazivanja spojeva, popuštanja ili izvijanja nosača ili stupova [9].



Slika 12. Prikaz razgradnje energije u dijagonalama [9]

#### Zahtjevi za dijagonale vezova

Prema kriteriju proračuna kapaciteta, horizontalnim silama se odupiru samo u dijagonale u vlaku, stoga se doprinos otpornosti tlačnih dijagonala ne uzima u obzir. Ipak, tlačne dijagonale trebaju biti uključene u izračunavanje vlastitih frekvencija i oblika modova konstrukcije te u određivanje seizmičkih sila, uz obaveznu provjeru njihove stabilnosti.

Bez obzira na to jesu li tlačne dijagonale uključene u modelu, potrebno je provjeriti njihovu otpornost na izvijanje. Dijagonale u vlaku moraju imati dovoljnu otpornost da izdrže prethodno određene seizmičke sile.

Konstrukcije koje imaju visinu veću od dva kata bezdimenzijska vitkost dijagonala X vezova mora biti:

$$1,3 \leq \bar{\lambda} \leq 2,0 \quad (28)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad (29)$$

$$\lambda_p = \frac{0,5 \cdot I_d}{i_p} \quad (30)$$

$$\lambda_{op} = \frac{L_d}{i_{op}}$$

(31)

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \cdot \varepsilon$$

(32)

gdje je:

 $\bar{\lambda}$  - bezdimenzijska vitkost

 $\lambda_p$  - geometrijska vitkost u ravnini

 $\lambda_{op}$  - geometrijska vitkost izvan ravnine

 $\lambda_1$  - elastična kritična vitkost

Faktor povećanja  $\Omega$  računa se za sve dijagonale veznog sustava kako bi se osiguralo ujednačeno ponašanje pri razgradnji energije. Razlika između minimalne i maksimalne vrijednosti faktora povećanja ne smije biti veća od 25%. [9]

$$\Omega = \frac{N_{pl,Rd,i}}{N_{Ed,i}}$$

(33)

### **Zahtjevi za grede i stupove**

Stupovi i nosači u jednostavnim okvirnim sustavi s centričnim vezovima moraju zadovoljiti uvjete:

$$N_{pl,Rd}(M_{Ed}) \geq N_{Ed,G} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot N_{Ed,E}$$

(34)

gdje je:

 $N_{pl,Rd}(M_{Ed})$  - proračunska otpornost na izvijanje grede ili stupa

 $N_{Ed,G}$  - uzdužna sila u stupu za nepotresno djelovanje

-

 $N_{Ed,E}$  - uzdužna sila u gredi ili stupu za proračunsko potresno djelovanje

 $\gamma_{ov}$  - koeficijent povećane čvrstoće

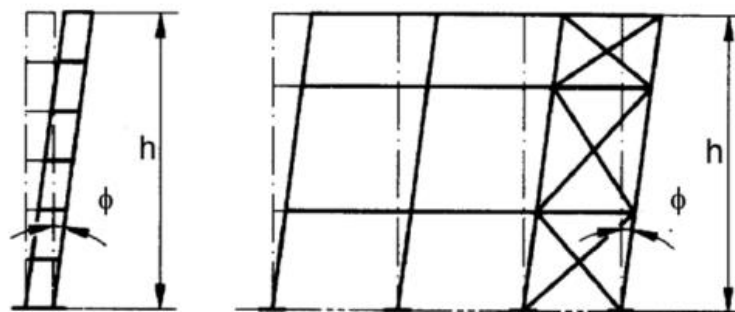
 $\Omega$  - najmanja vrijednost faktora ponašanja iz izraza (33)

## 5 GLOBALNA ANALIZA KONSTRUKCIJE

### 5.1 Imperfekcija okvira

Unatoč preciznosti izvedbe, čelične konstrukcije uvijek sadrže određene nesavršenosti, poput rezidualnih napona, ekscentriciteta u spojevima i opterećenjima, te odstupanja od vertikalnosti i linearnosti elemenata. Ove nesavršenosti uzrokuju dodatne unutarnje sile koje treba uzeti u obzir pri globalnoj analizi i proračunu konstrukcijskih elemenata. Prema EC3-1-1, nesavršenosti se obračunavaju u obliku ekvivalentnih geometrijskih imperfekcija, čije vrijednosti predstavljaju učinke svih mogućih nesavršenosti.

Imperfekcije se u globalnoj analizi uzimaju preko početnog kuta rotacije okvira  $\phi$  u odnosu na stopu stupa i oni odgovaraju nedostatku vertikalnosti konstrukcije (slika 13).



Slika 13. Istovrijedne nesavršenosti zbog bočnog pomaka [10]

$$\phi = \alpha_n \cdot \alpha_m \cdot \phi_0 \quad (35)$$

$$\alpha_n = \frac{2}{\sqrt{h}}; \text{ ali } \frac{2}{3} \leq \alpha_n \leq 1,0 \quad (36)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad (37)$$

gdje je:



$\alpha_h$  - faktor redukcije visine

$h$  - visina stupa

$\alpha_m$  - reduksijski faktor broja stupova u redu

$m$  - broj stupova u redu uključujući samo one stupove koji prenose vertikalno opterećenje ne manje od 50% prosječne vrijednosti opterećenja stupa u promatranoj vertikalnoj ravnini

$\phi_0$  - osnovna vrijednost 1/ 200

Relativne početne lokalne nesavršenosti za elemente iznose (tablica 7):

$$e_0 / L$$

(38)

gdje je:

$e_0$  - maksimalna amplituda početnog bočnog pomaka

$L$  - duljina elementa

**Tablica 7.** Početne lokalne imperfekcije oblika luka [10]

<small>AD</small> Krivulja izvijanja u skladu s tablicom 6.2 <small>AC</small>	Elastični proračun	Plastični proračun
	$e_0 / L$	$e_0 / L$
$a_0$	1 / 350	1 / 300
a	1 / 300	1 / 250
b	1 / 250	1 / 200
c	1 / 200	1 / 150
d	1 / 150	1 / 100

## 5.2 Klasifikacija čeličnih konstrukcija

### 5.2.1 Klasifikacija za stalne i prolazne proračunske situacije

Unutarnje sile i momenti mogu se odrediti:

- analizom prvoga reda pomoću početne geometrije konstrukcije,
- analizom drugoga reda, uzimajući u obzir utjecaj deformiranja konstrukcije, ( $P - \Delta$ ) učinci.

Učinke deformirane geometrije (učinke drugog reda) potrebno je uzeti u obzir ako značajno doprinose povećanju unutarnjih sila ili utječu na ponašanje sustava. Globalna analiza prvog reda može se primijeniti samo ako je povećanje unutarnjih sila, uzrokovano deformacijama, zanemarivo.[10] Ovaj uvjet je ispunjen ako se zadovolji sljedeći izrazi:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10, \quad \text{za} \quad \text{elastični} \quad \text{proračun}$$

(39)

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15, \quad \text{za} \quad \text{plastični} \quad \text{proračun}$$

(40)

gdje je:

$\alpha_{cr}$  - faktor kojim bi se moglo povećati proračunsko opterećenje tako da prouzroči opću (ukupnu) elastičnu nestabilnost

$F_{cr}$  - elastično kritično opterećenje (sila) izvijanja za opći (ukupni) način nestabilnosti utemeljen na početnoj elastičnoj krutosti

$F_{Ed}$  - proračunsko opterećenje (proračunska sila) konstrukcije

## 5.2.2 Klasifikacija za potresnu proračunsku situaciju

Učinci drugog mogu se zanemariti ako je na svakom katu zadovoljen izraz:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,1$$

(41)

gdje je:

$\theta$  - koeficijent osjetljivosti međukatnog pomaka

$P_{tot}$  - ukupno gravitacijsko opterećenje na promatranom katu i iznad njega u proračunskoj potresnoj situaciji

$d_r$  - proračunski katni pomak određen kao razlika prosječnih bočnih pomaka  $d_s$  na vrhu i pri podnožju promatranog kata proračunat u skladu.

$V_{tot}$  - ukupna katna potresna proračunska sila

$h$  - međukatna visina

Ako je  $0,1 \leq \theta \leq 0,2$  učinci drugog reda se mogu približno uzeti u obzir množenjem odgovarajućih potresnih unutarnjih sila faktorom  $1 / (1 - \theta)$ . Vrijednost koeficijenta  $\theta$  ne smije premašiti vrijednost 0,3.

## 6 ANALIZA OPTEREĆENJA

### 6.1 Opterećenje u fazi izvođenja

#### 6.1.1 Stalno opterećenje

Vlastita težina elemenata konstrukcije uzima se automatski iz računalnog programa "SCIA".

AB ploča (mokro stanje)	<i>software</i>
Čelični profilirani lim	<i>software</i>
Čelični nosači	<i>software</i>

---

Ukupno: /

#### 6.1.2 Uporabno opterećenje

Oprema za betoniranje	0,75 kN/m <sup>2</sup>
-----------------------	------------------------

---

Ukupno: 0,75 kN/m<sup>2</sup>

### 6.2 Opterećenje u uporabnoj fazi

#### 6.2.1 Stalno opterećenje

Vlastita težina elemenata konstrukcije uzima se automatski iz računalnog programa "SCIA".

##### Međukatna konstrukcija

AB ploča (suho stanje)	<i>software</i>
Čelični profilirani lim	<i>software</i>
Dodatno stalno (slojevi poda, pregradni zidovi...)	1,5 kN/m <sup>2</sup>
Završni radovi (glazura, instalacije...)	1,5 kN/m <sup>2</sup>

---

Ukupno: 3,0 kN/m<sup>2</sup>

##### Konstrukcija krova

AB ploča (suho stanje)	<i>software</i>
Čelični profilirani lim	<i>software</i>

Dodatno stalno (slojevi pokrova)	1,5 kN/m <sup>2</sup>
Završni radovi (instalacije)	0,5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Ukupno:</b>	<b>2,0 kN/m<sup>2</sup></b>

### 6.2.2 Uporabno opterećenje

**Tablica 8.** Uporabno opterećenja stropova [11]

Stupac	1	2	3	4	5
Redak	Kategorija	Namjena	Primjer	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k^a$ [kN]
4	B	B1	Hodnici u uredskim zgradama, uredi, medicinske ordinacije bez teške opreme, bolnički odjeli, čekaonice i hodnici, stajanje sa sitnom stokom	2	2
5		B2	Hodnici i kuhinje u bolnicama, hotelima, staračkim domovima, hodnici u internatima i sl., prostori za medicinske tretmane u bolnicama, uključujući i operacijske dvorane bez teške opreme, podrumске prostorije u stambenim zgradama	3	3
6		B3	Svi prostori navedeni u B1 i B2, ali s teškom opremom <sup>d</sup>	5	4

Za poslovne građevine kategorije B1 karakteristično uporabno opterećenje, prema tablici 8 iznosi  $q_{k,i} = 2,0 \text{ kN/m}^2$ .

#### Međukatna konstrukcija

Poslovne građevine kategorije B1	2,0 kN/m <sup>2</sup>
<b>Ukupno:</b>	<b>2,0 kN/m<sup>2</sup></b>

Ravni krov konstrukcije svrstavamo u kategoriju H pod nagib krova  $\alpha \leq 20^\circ$  (tablica 9) Karakteristično uporabno opterećenje iznosi  $q_{k,krov} = 0,6 \text{ kN/m}^2$ .

#### Konstrukcija krova

Krov kategorije H	0,6 kN/m <sup>2</sup>
<b>Ukupno:</b>	<b>0,6 kN/m<sup>2</sup></b>

**Tablica 9.** Karakteristična uporabna opterećenja za krov [11]

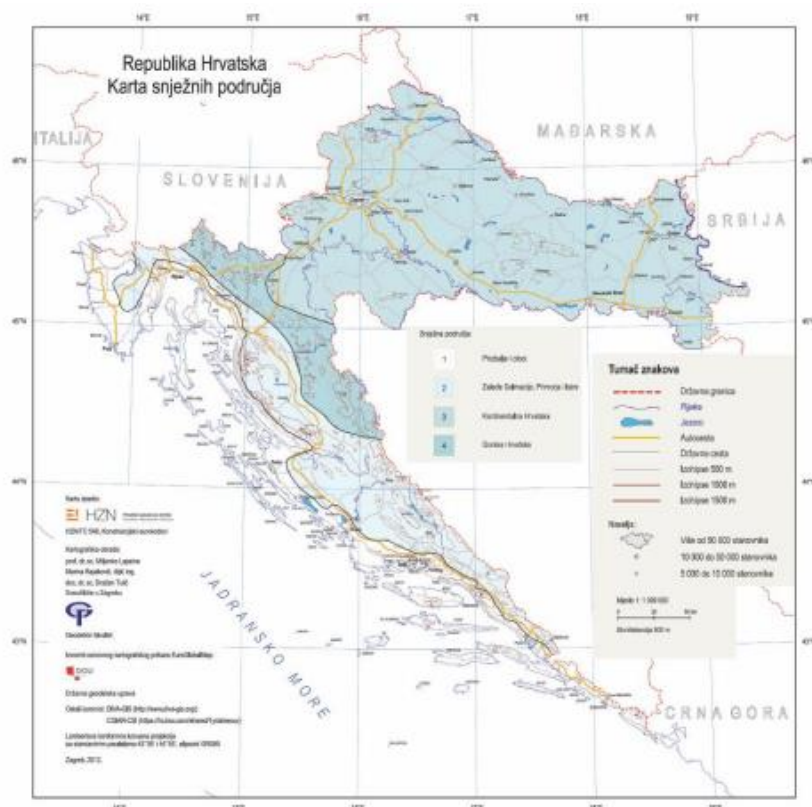
Krov		$q_k^s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k$ [kN]
Kategorija H	nagib krova $\leq 20^\circ$	0,6	1,0
	nagib krova $\geq 40^\circ$	0,0	1,0

<sup>a</sup> Za nagibe između  $20^\circ$  i  $40^\circ$  vrijednost  $q_k$  može se odrediti linearnom interpolacijom.

NAPOMENA 1: Opterećenje  $q_k$  djeluje na ploštinu  $A$  koja predstavlja cijelu ploštinu krova.

NAPOMENA 2: Svi nagibi krova mjere se u odnosu na horizontalu, a opterećenja djeluju vertikalno na horizontalnu projekciju krovnih plohe.

### 6.2.3 Opterećenje snijegom



Slika 14. Karta snježnih područja [11]

Konstrukcija je smještena u Zagrebu na nadmorskoj visini 158m. Prema karti snjegova (slika 14) Zagreb svrstavamo u III. zonu (kontinentalna Hrvatska).

Karakteristično opterećenje snijegom iznosi  $s'_k = 1,25 \text{ kN/m}^2$

Opterećenje snijegom na krovu određuje se izrazom:

$$s = s'_k \cdot \mu_t \cdot C_e \cdot C_t \tag{42}$$

gdje je:

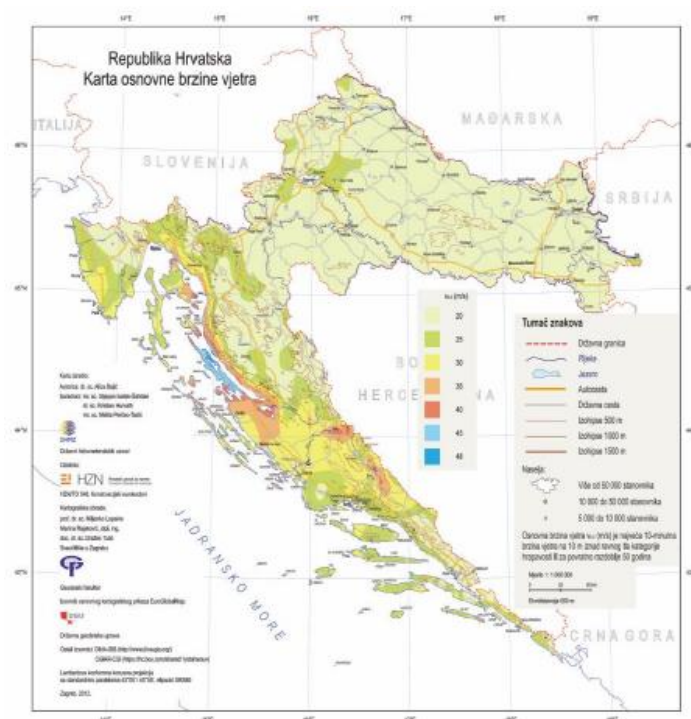
- $s'_k$  - karakteristično opterećenje snijegom
- $\mu_t$  - koeficijent oblika opterećenja snijegom na krovu;  $\mu_t = 0,8$
- $C_e$  - koeficijent izloženosti;  $C_e = 1,0$
- $C_t$  - toplinski koeficijent zbog zagrijavanja zgrade;  $C_t = 1,0$

Opterećenje snijegom iznosi:

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

## 6.2.4 Opterećenje vjetrom

Opterećenje vjetrom odnosi se na sile koje vjetar generira na građevinskim konstrukcijama. Faktori poput brzine vjetra, topografije, visine zgrade, i oblika konstrukcije igraju ključnu ulogu u određivanju intenziteta i smjera opterećenja vjetrom. Projektiranje konstrukcija koje su izložene opterećenju vjetrom provodi se prema normi EN 1991-1-4.



Slika 15. Karta osnovne brzine vjetra za Republiku Hrvatsku [11]

### 6.2.4.1 Vršni tlak uslijed brzine vjetra pri udaru

Osnovna brzina vjetra:

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0}$$

(43)

gdje je :

$C_{dir}$  koeficijent smjera vjetra;  $C_{dir}=1,0$

-

$C_{season}$  - koeficijent godišnjeg doba;  $C_{season}=1,0$

$V_{b,0}$  - temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra, najveća 10 – minutna brzina vjetra na 10,0 m iznad ravnog tla kategorije hrapavosti II za povratno razdoblje od 50 godina

Očitana vrijednost  $v_{b,0}$  za Zagreb iznosi  $v_{b,0} = 25,0$  m/s (slika 15)

Osnovna brzina vjetra iznosi:

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

Osnovni tlak uslijed brzine vjetra:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot q_{zrak} \cdot v_b^2$$

(44)

gdje je:

$q_{zrak}$  - gustoća zraka, uzeta sa vrijednošću  $1,25 \text{ kg/m}^3$

Osnovni tlak uslijed brzine vjetra iznosi:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25,0^2 = 390,63 \text{ N / m}^2 = 0,39 \text{ kN / m}^2$$

Vršni tlak uslijed brzine vjetra:

$$q_p = \left[ 1 + 7 \cdot \frac{I_v(z)}{v_m(z)} \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{zrak} \cdot v_m^2(z) = C_e(z) \cdot q_b$$

(45)

gdje je:

$I_v(z)$  intenzitet turbulencije vjetra

-

$v_m(z)$  - srednje brzina vjetra na visini z iznad terena

$c_e(z)$  - koeficijent izloženosti koji uzima u obzir neravnost terena, topografiju i visinu iznad tla

Srednja brzina vjetra na visini  $z$  iznad terena:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

(46)

gdje je:

$c_r(z)$  - faktor hrapavosti

$c_0(z)$  - faktor orografije, koje je prema Nacionalnom dodatku 1,0

Prema tablici 10 konstrukcija se nalazi na terenu IV. kategorije (najmanje 15% površine prekriveno zgradama prosječne visine 15 m).

**Tablica 10.** Kategorije terena i parametri terena [11]

Kategorija terena	Karakteristike terena	$z_0(\text{m})$	$z_{\text{min}}(\text{m})$
<b>0</b>	- more i površine obale	0,003	1,0
<b>I</b>	- jezera - nema zapreka	0,01	1,0
<b>II</b>	- slaba vegetacija - pojedine zapreke s razmakom najmanje 20x visine zapreke	0,05	2,0
<b>III</b>	- normalna vegetacija, šume i predgrađa	0,3	5,0
<b>IV</b>	- najmanje 15% površine pokriveno je zgradama prosječne visine 15 m	1,0	10,0

Konstrukcija je pravokutnog tlocrta, što uzrokuje različito opterećenje vjetrom u različitim smjerovima. Referentna visina  $z_e$  ovisi o visini zgrade  $h$ , širini  $b$ , te parametru tlaka uzrokovanom brzinom vjetra. Ta visina se određuje prema sljedećem izrazu:

$$z_e = f_c \left( \frac{h}{c} \right)$$

(47)

#### 6.2.4.2 Djelovanje vjetra na uzdužnu stranu objekta



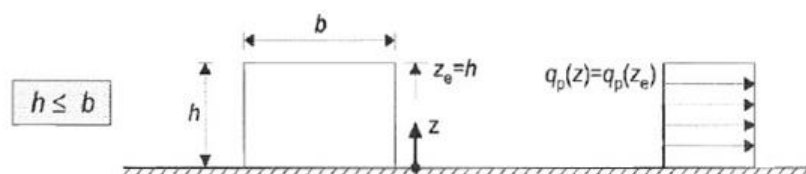
Referentna visina:

$$z_e = f_c \left( \frac{h}{c} \right)$$

$$b = 40,0 \text{ m}$$

$$h = 21,6 \text{ m}$$

$$h \leq b \rightarrow z_e = h = 21,6 \text{ m}$$



**Slika 16.** Referentna visina  $z_e$  i raspodjela vršnog tlaka po visini konstrukcije za slučaj kada je  $h \leq b$

[11]

Faktor hrapavosti iznosi:

$$C_r(z) = k_r \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \rightarrow \text{za } z_{\min} < z < z_{\max}$$

(48)

gdje je:

$z_{\min}, z_0$  - vrijednosti koje ovise o kategoriji terena (tablica 10)

$z$  - referentna visina

$k_r$  - faktor terena

$z_{\max}$  - uzima se vrijednost 200 m

Vrijednost za IV. kategoriju terena:

$$z_{\min} = 10,0 \text{ m}$$

$$z_0 = 1,0 \text{ m}$$

Faktor terena:

$$k_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z}{z_0} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left( \frac{1,0}{0,05} \right)^{0,07} = 0,23$$

Uvjet  $z_{\min} = 10,0 < 21,6 \text{ m} < 200 \text{ m}$  je zadovoljen prema izrazu (48).

Faktor hrapavosti iznosi:

$$c_r(z) = 0,23 \cdot \ln\left(\frac{21,6}{1,0}\right) = 0,719$$

Srednja brzina vjetra prema izrazu (46) iznosi:

$$v_m(z) = 0,719 \cdot 1,0 \cdot 25,0 = 17,98 \text{ m/s}$$

Intenzitet turbulencije vjetra prema uvjetu  $z_{\min} = 10,0 < 21,6 \text{ m} < 200 \text{ m}$  računa se prema izrazu :

$$I_v(z) = \frac{k_1}{\left[ c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]}$$

(49)

gdje je:

$k_1=1,0$  - faktor turbulencije

Intenzitet turbulencije vjetra iznosi:

$$I_v(z) = \frac{1,0}{\left[ 1,0 \cdot \ln\left(\frac{21,6}{1,0}\right) \right]} = 0,325$$

Vršni tlak uslijed brzine vjetra prema izrazu (45) iznosi:

$$q_p = \left[ 1 + 7 \cdot 0,325 \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 17,98^2 = 661,41 \text{ N/m}^2 = 0,661 \text{ kN/m}^2$$

### **Tlak vjetra na plohe građevine**

Tlak vjetra na površinu je algebarski zbroj vanjskog i unutarnjeg tlaka, koji djeluju istovremeno.

Tlak vjetra na vanjske površine konstrukcije određuju se prema izrazu:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

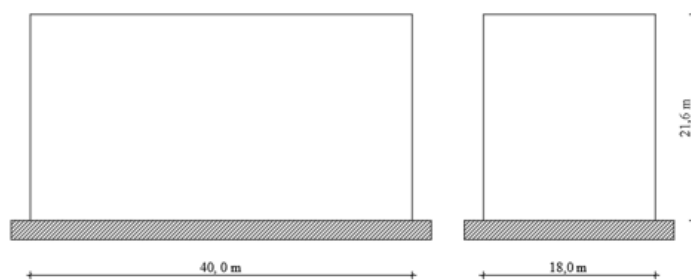
(50)

Tlak vjetra na unutarnje površine konstrukcije:

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi}$$

(51)

### Koeficijenti $c_{pe}$ vanjskog tlaka na vertikalne stijene



Slika 17. Dimenzije konstrukcije

Prema slici 17:

$$b = 40,0 \text{ m}$$

$$h = 21,6 \text{ m}$$

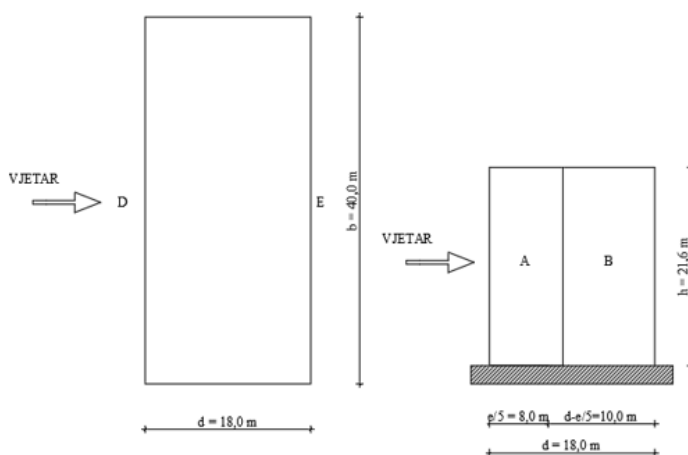
$$d = 18,0 \text{ m}$$

$$h \leq b \rightarrow z_e = h = 21,6 \text{ m}$$

### Koeficijenti vanjskog tlaka na vertikalne stijene

$$e = \min(b; 2h) = \min(40; 43,2) = 40 \text{ m}$$

$$d = 18 \text{ m} \rightarrow e > d$$



Slika 18. Shema opterećenja vjetra na vertikalne stijene

Površine vertikalnih stijena (slika 18):

$$A^A = \left(\frac{e}{5}\right) \cdot h = \left(\frac{40,0}{5}\right) \cdot 21,6 = 172,8 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$A^B = \left(d - \frac{e}{5}\right) \cdot h = \left(18,0 - \frac{40,0}{5}\right) \cdot 21,6 = 216,0 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$A^D = b \cdot h = 40,0 \cdot 21,6 = 864,0 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$A^E = b \cdot h = 40,0 \cdot 21,6 = 864,0 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$A > 10 \text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10}$$

**Tablica 11.** Preporučene vrijednosti koeficijenta vanjskog tlaka za vertikalne zidove tlocrtno pravokutne zgrade [11]

Područje	A		B		C		D		E	
$h/d$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-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	

Za  $\frac{h}{d} = \frac{21,6}{18,0} = 1,2$  očitani su koeficijenti vanjskog tlaka za površine pomoću interpolacije

(tablica 11):

$$c_{pe,10}^A = -1,2$$

$$c_{pe,10}^B = -0,8$$

$$c_{pe,10}^D = +0,8$$

$$c_{pe,10}^E = -0,51$$

Konstruktivski faktor:

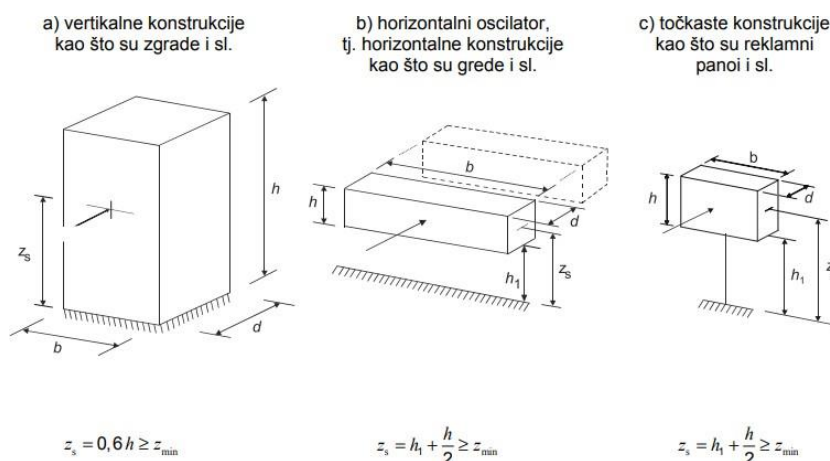
$$c_s c_d = \frac{1 + 2k_p \cdot \frac{I_v(z_s)}{V} \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot \frac{I_v(z_s)}{V}}$$

(52)

gdje je:

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

- $B^2$  - 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 vlastitog oblika vibracija
- $z_s$  - referentna visina (slika 19)



Slika 19. Osnovni oblici konstrukcija i referentne visine  $z_s$  [11]

Referentna visina iznosi:

$$z_s = 0,6 \cdot h = 0,6 \cdot 21,6 = 12,96 > z_{\min} = 10,0 \text{ m}$$

Iz uvjeta  $z_{\min} < z < z_{\max}$  faktor hrapavosti iznosi:

$$c_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \cdot \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right) = 0,19 \cdot \left( \frac{1,0}{0,05} \right)^{0,07} \cdot \ln \left( \frac{12,96}{1,0} \right) = 0,6$$

Intenzitet turbulencije vjetra prema izrazu (49) iznosi:

$$I_v(z_s) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right)} = \frac{1,0}{1,0 \cdot \ln \left( \frac{12,96}{1,0} \right)} = 0,39$$

Faktor pozadine računa se prema izrazu:

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

(53)

gdje je:

$L(z_s)$  - dužina turbulencije za referentnu visinu  $z_s$

Dužina turbulencije se računa prema izrazu :

$$L(z_s) = L_t \cdot \left( \frac{z}{z_t} \right)^\alpha \quad \text{za } z \geq z_{min}$$

(54)

gdje je:

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

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

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \cdot \ln(z_0) = 0,67 + 0,05 \cdot \ln(1,0) = 0,67$$

$$L(z_s) = 300 \cdot \left( \frac{12,96}{200} \right)^{0,67} = 48,0 \text{ m}$$

Faktor pozadine prema izrazu (53) iznosi:

$$B^2 = \frac{1,0}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} = \frac{1,0}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{40,0 + 21,6}{48,0} \right)^{0,63}} = 0,48$$

Faktor rezonantnog odziva računa se prema izrazu:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, \eta_{1x}) \cdot R_h \cdot R_b$$

(55)

gdje je:

$S_L(z_s, \eta_{1x})$  - bezdimenzijska funkcija spektralne gustoće snage

$\delta$  - logaritamski dekrement prigušenja

$R_h \cdot R_b$  - funkcija aerodinamičke vodljivosti

Bezdimenzijska funkcija spektralne gustoće snage računa se prema izrazu:

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

(56)

gdje se bezdimenzijska frekvencija  $f_L(z_s, \eta_{1x})$  računa izrazom:

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

(57)

Osnovna frekvencija (frekvencija prvog tona) konstrukcije procjenjuje se po formuli :

$$\eta_{1x} = \frac{\sqrt{d}}{0,1 \cdot h} = \frac{\sqrt{18,0}}{0,1 \cdot 21,6} = 1,96 \text{ Hz}$$

Srednja brzina vjetra na referentnoj visini  $z_s$  prema izrazu (46) iznosi:

$$v_m(z) = c_r(z_s) \cdot v_b = 0,6 \cdot 25,0 = 15,0 \text{ m/s}$$

Bezdimenzijska frekvencija prema izrazu (57) iznosi:

$$f_L(z_s, \eta_{1x}) = \frac{\eta_{1x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} = \frac{1,96 \cdot 48,0}{15,0} = 6,27$$

Bezdimenzijska funkcija spektralne gustoće prema izrazu (56) iznosi:

$$S_L(z_s, \eta_{1x}) = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, \eta_{1x})}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z_s, \eta_{1x}))^{\frac{5}{2}}} = \frac{6,8 \cdot 6,27}{(1 + 10,2 \cdot 6,27)^{\frac{5}{2}}} = 0,04$$

Logaritamski dekrement prigušenja se računa prema izrazu:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$$

(58)

gdje je:

$\delta_s$  - logaritamsko opadanje konstrukcijskog prigušenja

$\delta_a$  - logaritamsko opadanje aerodinamičkoga prigušenja

$\delta_d$  - logaritamsko opadanje prigušenja uslijed specijalnih uređaja;  $\delta_d = 0,05$

Logaritamski dekrement aerodinamičkoga prigušenja računa se prema izrazu:

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

(59)

gdje je:

$c_f$  - koeficijent sile za pravokutne i poligonalne oblike

$m_e$  - ekvivalentna masa po jedinici dužine

Logaritamski dekrement prigušenja prema izrazu (58) iznosi:

$$\delta = 0,05$$

Koeficijent sile za pravokutne i poligonalne oblike računa se prema izrazu:

$$C_f = C_{f0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda$$

(60)

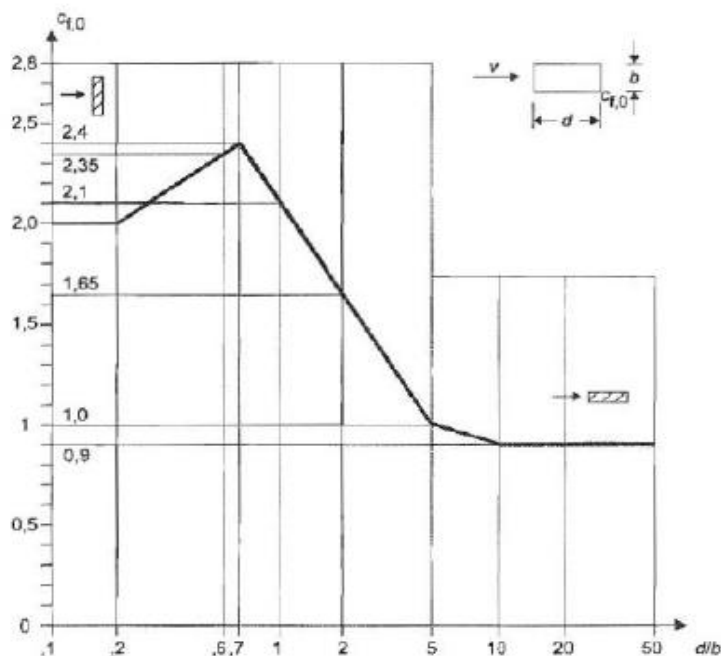
gdje je:

$C_{f0}$  - koeficijent sile za oblike s oštrim rubovima bez slobodnog protoka kroz presjek

$\psi_r$  - faktor redukcije za zaobljene rubove kod pravokutnih konstrukcija

$\psi_\lambda$  - faktor koji uzima u obzir smanjenje tlaka vjetra na vrhove konstrukcije

Koeficijent  $C_{f0}$  za  $\frac{d}{b} = \frac{18,0}{40,0} = 0,45$  iznosi 2,15 (slika 20)



**Slika 20.** Koeficijent sile za pravokutne presjeke sa oštrim rubovima bez strujanja vjetra na slobodnom kraju [11]



Koeficijent sile prema izrazu (60) iznosi:

$$C_f = C_{f\rho} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda = 2,15 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 2,15$$

Aerodinamički prijenos funkcije za osnovni oblik titranja računaju se prema izrazu:

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

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

(61)

$\eta_h$  i  $\eta_b$  iz izraza (61) računaju se:

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(\xi_s)} \cdot f_L(\xi_s, \eta_{1x}) = \frac{4,6 \cdot 21,6}{48,0} \cdot 6,27 = 12,98$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(\xi_s)} \cdot f_L(\xi_s, \eta_{1x}) = \frac{4,6 \cdot 40,0}{48,0} \cdot 6,27 = 24,04$$

Prema izrazu (61) aerodinamički prijenos funkcije za osnovni oblik titranja iznosi:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} \cdot (1 - e^{-2\eta_h}) = \frac{1}{12,98} - \frac{1}{2 \cdot 12,98^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 12,98}) = 0,07$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} \cdot (1 - e^{-2\eta_b}) = \frac{1}{24,04} - \frac{1}{2 \cdot 24,04^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 24,04}) = 0,04$$

Faktor rezonantnog odziva prema izrazu (55) iznosi:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(\xi_s, \eta_{1x}) \cdot R_h \cdot R_b = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,05} \cdot 0,04 \cdot 0,07 \cdot 0,04 = 0,01$$

Vršni faktor se računa prema izrazu:

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

(62)

U izrazu (62) očekivana frekvencija  $v$  i vrijeme  $T$  iznose:

$$v = \eta_{1x} \cdot \sqrt{\frac{B^2}{B^2 + R^2}} \geq 0,08 \text{ Hz}, a T = 600 \text{ s}$$

$$v = 1,67 \cdot \sqrt{\frac{0,48}{0,48 + 0,01}} = 1,65 \text{ Hz} > 0,08 \text{ Hz}$$

Vršni faktor prema izrazu (62) iznosi:

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(1,65 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(1,65 \cdot 600)}} = 3,88 \geq 3,0$$

Konstruktivski faktor kad vjetar puše okomito na uzdužnu stranu objekta iznosi:

$$c_{s,c_d} = \frac{1 + 2 \cdot 3,88 \cdot 0,39 \cdot \sqrt{0,48 + 0,01}}{1 + 7 \cdot 0,39} = 0,84$$

Djelovanje vjetra na uzdužni stranu objekta :

- SLUČAJ I ( $c_{pi} = +0,2$ )

$$q_p = 0,661 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Djelovanje vjetra na vertikalne plohe:

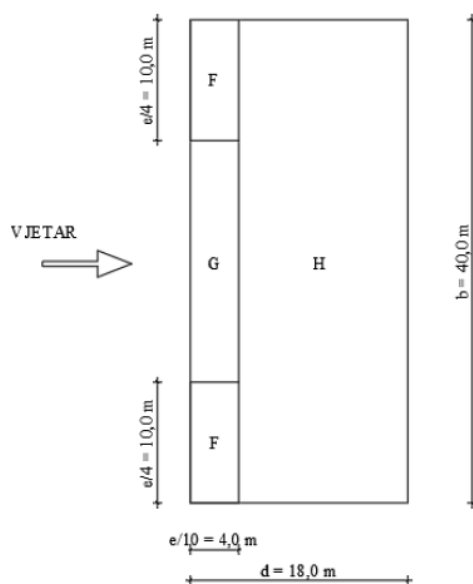
$$w_e^A = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-1,2) = -0,67 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$w_e^B = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-0,8) = -0,44 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$w_e^D = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (+0,8) = +0,44 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$w_e^E = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-0,51) = -0,28 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Koeficijent  $c_{pe}$  vanjskog tlaka za ravni krov



Slika 21. Shema opterećenja vjetra na ravni krov

b= 40,0 m

$$h=21,6 \text{ m}$$

$$d= 18,0 \text{ m}$$

$$h \leq b \rightarrow z_e = h = 21,6 \text{ m}$$

$$e = \min (b ; 2h) = \min (40 ; 43,2) = 40 \text{ m}$$

$$d = 18 \text{ m} \rightarrow e > d$$

Površine vertikalnih stijena:

$$A^F = \left(\frac{e}{4}\right) \cdot \left(\frac{e}{10}\right) = \left(\frac{40,0}{4}\right) \cdot \left(\frac{40,0}{10}\right) = 40,0 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$A^G = \left(b - \frac{e}{2}\right) \cdot \frac{e}{10} = \left(40,0 - \frac{40,0}{2}\right) \cdot \frac{40,0}{10} = 80,0 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$A^H = b \cdot \left(d - \frac{e}{10}\right) = 40,0 \cdot \left(18,0 - \frac{40,0}{10}\right) = 586,67 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

**Tablica 12.** Preporučene vrijednosti koeficijenta vanjskog tlaka za ravne krovove s oštrim zabatom [11]

Vrsta krova	Područje							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
Oštri zabati	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	
							-0,2	

Za  $\frac{h}{d} = \frac{21,6}{18,0} = 1,2$  očitani su koeficijenti vanjskog tlaka za površine pomoću interpolacije :

$$c_{pe,10}^F = -1,8$$

$$c_{pe,10}^G = -1,2$$

$$c_{pe,10}^H = -0,7$$

**Djelovanje vjetra na krovne plohe:**

$$w_e^F = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-1,8) = -1,00 \text{ kN / m}^2$$

$$w_e^G = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-1,2) = -0,67 \text{ kN / m}^2$$

$$w_e^H = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-0,7) = -0,39 \text{ kN / m}^2$$

**Unutarnji tlakovi vjetra:**

$$w_i = 0,661 \cdot (+0,2) = +0,13 \text{ kN / m}^2$$

**Ukupni tlakovi vjetra:****VERTIKALNE PLOHE:**

$$w_k^A = w_e^A - w_i = -0,67 - (+0,13) = -0,8 \text{ kN / m}^2$$

$$w_k^B = w_e^B - w_i = -0,44 - (+0,13) = -0,57 \text{ kN / m}^2$$

$$w_k^D = w_e^D - w_i = +0,44 - (+0,13) = +0,31 \text{ kN / m}^2$$

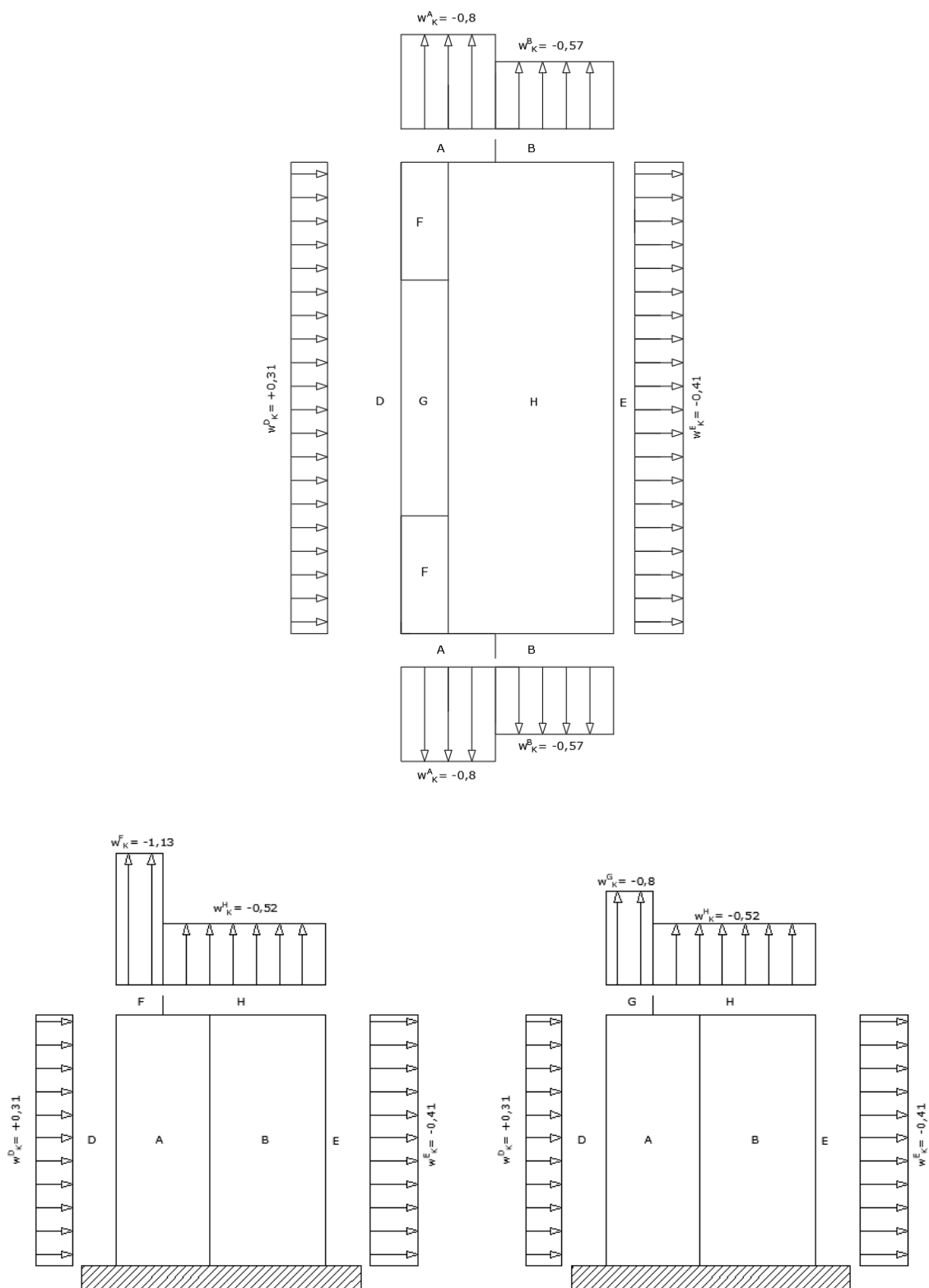
$$w_k^E = w_e^E - w_i = -0,28 - (+0,13) = -0,41 \text{ kN / m}^2$$

**KROVNE PLOHE:**

$$w_k^F = w_e^F - w_i = -1,00 - (+0,13) = -1,13 \text{ kN / m}^2$$

$$w_k^G = w_e^G - w_i = -0,67 - (+0,13) = -0,8 \text{ kN / m}^2$$

$$w_k^H = w_e^H - w_i = -0,39 - (+0,13) = -0,52 \text{ kN / m}^2$$



Slika 22. Tlakovi vjetra za slučaj I opterećenja vjetrom

- SLUČAJ II ( $c_{pi} = -0,3$ )

$$q_p = 0,661 \text{ kN / m}^2$$

Djelovanje vjetra na vertikalne plohe:

$$w_e^A = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-1,2) = -0,67 \text{ kN / m}^2$$

$$w_e^B = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-0,8) = -0,44 \text{ kN / m}^2$$

$$w_e^D = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (+0,8) = +0,44 \text{ kN / m}^2$$

$$w_e^E = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-0,51) = -0,28 \text{ kN / m}^2$$

Djelovanje vjetra na krovne plohe:

$$w_e^F = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-1,8) = -1,00 \text{ kN / m}^2$$

$$w_e^G = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-1,2) = -0,67 \text{ kN / m}^2$$

$$w_e^H = 0,84 \cdot 0,661 \cdot (-0,7) = -0,39 \text{ kN / m}^2$$

Unutarnji tlakovi vjetra:

$$w_i = 0,661 \cdot (-0,3) = -0,2 \text{ kN / m}^2$$

**Ukupni tlakovi vjetra:**

VERTIKALNE PLOHE:

$$w_k^A = w_e^A - w_i = -0,67 - (-0,2) = -0,47 \text{ kN / m}^2$$

$$w_k^B = w_e^B - w_i = -0,44 - (-0,2) = -0,24 \text{ kN / m}^2$$

$$w_k^D = w_e^D - w_i = +0,44 - (-0,2) = +0,64 \text{ kN / m}^2$$

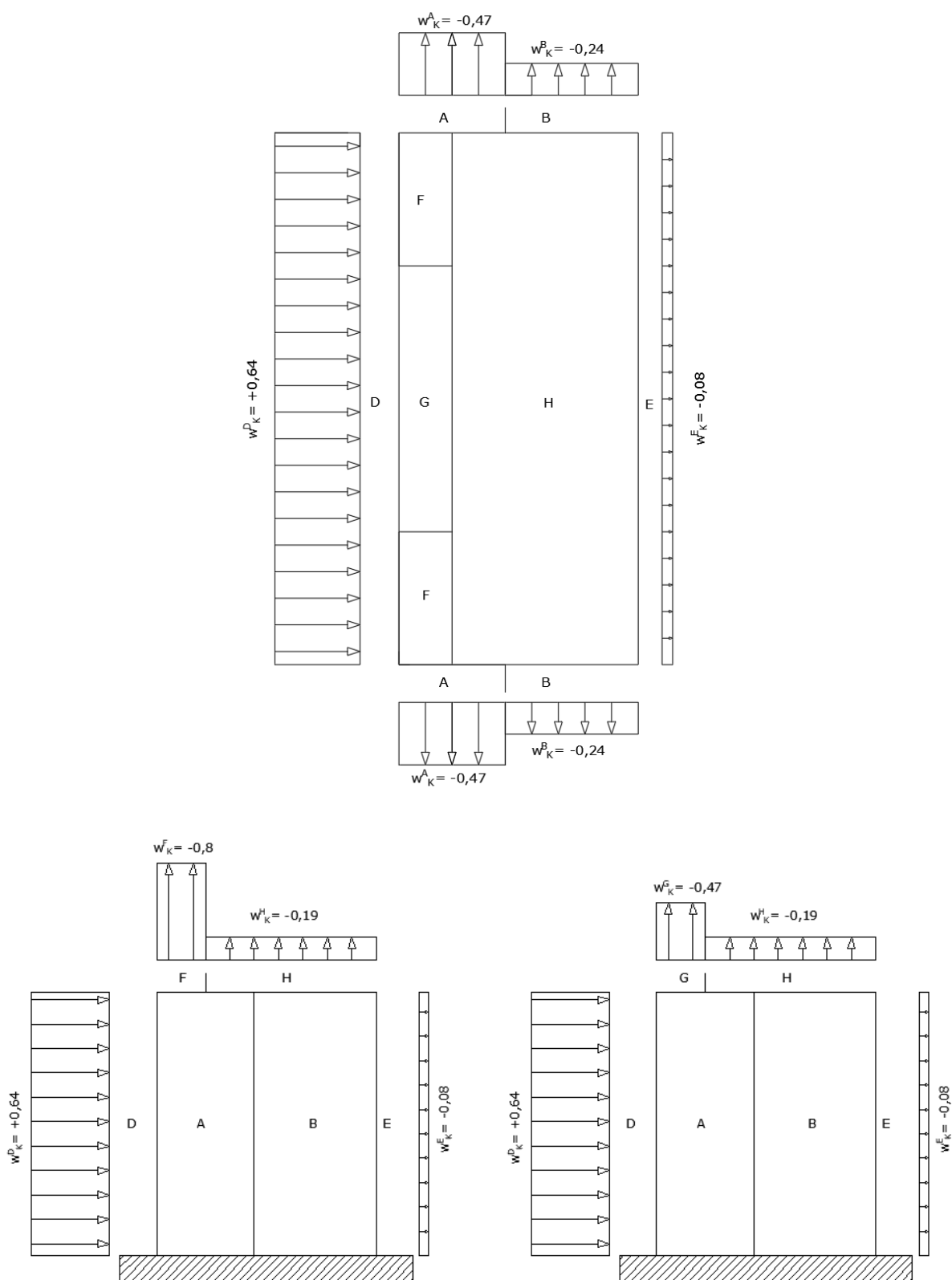
$$w_k^E = w_e^E - w_i = -0,28 - (-0,2) = -0,08 \text{ kN / m}^2$$

KROVNE PLOHE:

$$w_k^F = w_e^F - w_i = -1,00 - (-0,2) = -0,8 \text{ kN / m}^2$$

$$w_k^G = w_e^G - w_i = -0,67 - (-0,2) = -0,47 \text{ kN / m}^2$$

$$w_k^H = w_e^H - w_i = -0,39 - (-0,2) = -0,19 \text{ kN / m}^2$$



Slika 23. Tlakovi vjetra za slučaj I opterećenja vjetrom

### 6.2.4.3 Djelovanje vjetra na poprečnu stranu objekta

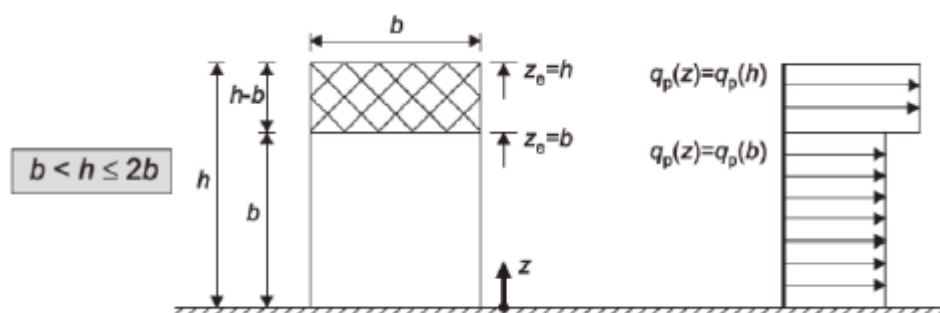
$h = 21,6 \text{ m}$

$b = 18 \text{ m}$  (širina površine na koju puše vjetar)

$h > b$

Poredbena visina objekta ( $b=18\text{m} < h=21,6 < 2 \cdot b=36$ ) -> podjela na dva visinska područja:

- Niži dio koji se proteže na visinu jednaku  $b$ , u kojem je poredbena visina jednaka  $z_e=b=18\text{m}$
- Viši dio koji se proteže od vrha zgrade prema dolje za visinu jednaku  $h-b$ , u kojem je poredbena visina jednaka  $z_e=h=21,6\text{m}$



Slika 24. Raspored opterećenja vjetra po visini [11]

Za IV. kategoriju terena vrijedi:

$z_{\min} = 10,0 \text{ m}$

$z_0 = 1,0 \text{ m}$

Faktor terena:

$$k_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z}{z_0} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left( \frac{1,0}{0,05} \right)^{0,07} = 0,23$$

Prema uvjetu  $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$  faktor hrapavosti prema izrazu (48) iznosi:

1.  $z_e = b = 18\text{m}$

$$c_{r,1}(z) = k_r \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) = 0,23 \cdot \ln \left( \frac{18,0}{1,0} \right) = 0,676$$

2.  $z_e = h = 21,6\text{m}$



$$c_{r2}(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,23 \cdot \ln\left(\frac{21,6}{1,0}\right) = 0,719$$

Srednja brzina vjetra prema izrazu (46) iznosi:

$$v_{m1}(z) = 0,676 \cdot 1,0 \cdot 25,0 = 16,90 \text{ m/s}$$

$$v_{m2}(z) = 0,719 \cdot 1,0 \cdot 25,0 = 17,98 \text{ m/s}$$

Prema izrazu (49) intenzitet turbulencije vjetra prema uvjetu  $z_{min} \leq z \leq z_{max}$  iznosi :

1.  $z_e = b = 18 \text{ m}$

$$I_{v1}(z) = \frac{k_1}{\left[ c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]} = \frac{1,0}{\left[ 1,0 \cdot \ln\left(\frac{18,0}{1,0}\right) \right]} = 0,346$$

2.  $z_e = h = 21,6 \text{ m}$

$$I_{v2}(z) = \frac{k_1}{\left[ c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]} = \frac{1,0}{\left[ 1,0 \cdot \ln\left(\frac{21,6}{1,0}\right) \right]} = 0,325$$

Vršni tlak uslijed brzine vjetra prema izrazu (45) iznosi:

$$q_{p1} = \left[ 1 + 7 \cdot 0,346 \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 16,90^2 = 610,85 \text{ N/m}^2 = 0,61 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{p2} = \left[ 1 + 7 \cdot 0,325 \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 17,98^2 = 661,71 \text{ N/m}^2 = 0,662 \text{ kN/m}^2$$

### Koeficijent vanjskog tlaka na vertikalne stijene

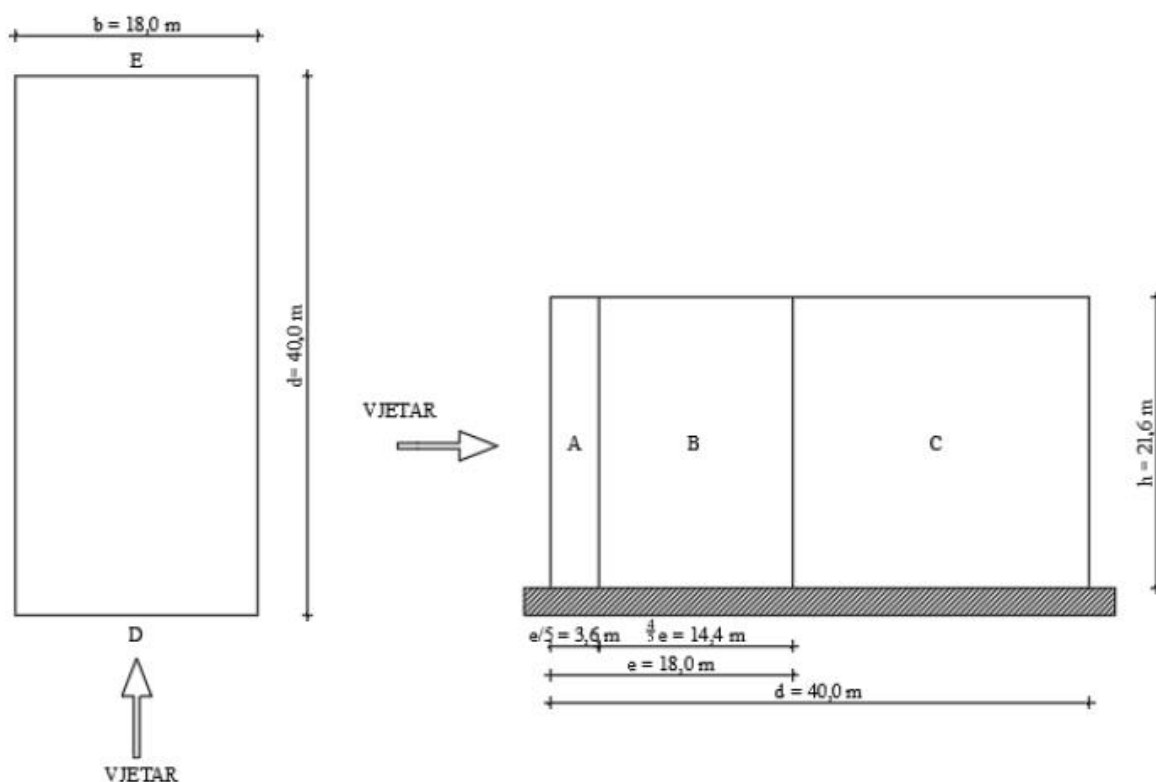
$b = 18,0 \text{ m}$

$h = 21,6 \text{ m}$

$d = 40,0 \text{ m}$

$e = \min(b; 2h) = \min(18,0; 43,2) = 18,0 \text{ m}$

$d = 40,0 \text{ m} \rightarrow d > e$



Slika 25. Shema opterećenja vjetra na vertikalne stijene

Izložene površine vertikalnih stijena:

$$A^A = \left(\frac{e}{5}\right) \cdot h = \left(\frac{18,0}{5}\right) \cdot 21,6 = 77,8 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$A^B = \left(\frac{4}{5} \cdot e\right) \cdot h = \left(\frac{4}{5} \cdot 18,0\right) \cdot 21,6 = 311,0 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$A^C = (d - e) \cdot h = (40,0 - 18,0) \cdot 21,6 = 475,2 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$A^D = b \cdot h = 18,0 \cdot 21,6 = 388,8 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

$$A^E = b \cdot h = 40,0 \cdot 21,6 = 864,0 \text{ m}^2 > 10 \text{ m}^2$$

Za  $\frac{h}{d} = \frac{21,6}{40,0} = 0,54$ , koeficijenti vanjskog tlaka za površine iznose:

$$c_{pe,10}^A = -1,2$$

$$c_{pe,10}^B = -0,8$$

$$c_{pe,10}^C = -0,5$$

$$c_{pe,10}^D = +0,8$$

$$c_{pe,10}^E = -0,38$$

Konstruktivski faktor možemo izračunati prema izrazu (52):

$$C_{s,C_d} = \frac{1 + 2k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)}$$

$$z_s = 0,6 \cdot h = 0,6 \cdot 21,6 = 12,96 > z_{min} = 10,0 \text{ m}$$

Iz uvjeta  $z_{min} < z < z_{max}$  faktor hrapavosti iznosi:

$$C_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \cdot \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right) = 0,19 \cdot \left( \frac{1,0}{0,05} \right)^{0,07} \cdot \ln \left( \frac{12,96}{1,0} \right) = 0,6$$

Intenzitet turbulencije prema izrazu (49) iznosi:

$$I_v(z_s) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right)} = \frac{1,0}{1,0 \cdot \ln \left( \frac{12,96}{1,0} \right)} = 0,39$$

Za  $z_s \geq z_{min}$

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

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

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \cdot \ln(z_0) = 0,67 + 0,05 \cdot \ln(1,0) = 0,67$$

Dužina turbulencije prema izrazu (54) iznosi:

$$L(z_s) = L_t \cdot \left( \frac{z}{z_t} \right)^\alpha = 300 \cdot \left( \frac{12,96}{200} \right)^{0,67} = 48,0 \text{ m}$$

Faktor pozadine prema izrazu (53) iznosi:

$$B^2 = \frac{1,0}{1+0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0,63}} = \frac{1,0}{1+0,9 \cdot \left(\frac{18,0+21,6}{48,0}\right)^{0,63}} = 0,56$$

Osnovna frekvencija konstrukcije se procjenjuje po formuli:

$$\eta_{1x} = \frac{\sqrt{d}}{0,1 \cdot h} = \frac{\sqrt{40,0}}{0,1 \cdot 21,6} = 2,93 \text{ Hz}$$

Srednja brzina vjetra na referentnoj visini prema izrazu (46) iznosi:

$$v_m(z) = c_r(z_s) \cdot v_b = 0,6 \cdot 25,0 = 15,0 \text{ m/s}$$

Bezdimenzijska frekvencija prema izrazu (57) iznosi:

$$f_L(z_s, \eta_{1x}) = \frac{\eta_{1x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} = \frac{2,93 \cdot 48,0}{15,0} = 9,38$$

Bezdimenzijska funkcija spektralne gustoće prema izrazu (56) iznosi:

$$S_L(z_s, \eta_{1x}) = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, \eta_{1x})}{(1+10,2 \cdot f_L(z_s, \eta_{1x}))^{\frac{5}{3}}} = \frac{6,8 \cdot 9,38}{(1+10,2 \cdot 9,38)^{\frac{5}{3}}} = 0,03$$

Logaritamski dekrement prigušenja iznosi  $\delta = 0,05$

Koeficijent  $c_{f,0}$  za  $\frac{d}{b} = \frac{40,0}{18,0} = 2,22$  iznosi 1,5

Koeficijent sile prema izrazu (60) iznosi:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda = 1,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,5$$

Aerodinamički prijenos funkcije za osnovni oblik titranja prema izrazu (61) iznosi:

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, \eta_{1x}) = \frac{4,6 \cdot 21,6}{48,0} \cdot 9,38 = 19,42$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} \cdot (1 - e^{-2\eta_h}) = \frac{1}{19,42} - \frac{1}{2 \cdot 19,42^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 19,42}) = 0,05$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, \eta_{1x}) = \frac{4,6 \cdot 18,0}{48,0} \cdot 9,38 = 16,18$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} \cdot (1 - e^{-2\eta_b}) = \frac{1}{16,18} - \frac{1}{2 \cdot 16,18^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 16,18}) = 0,06$$

Prema izrazu (55) rezonantni udio odziva iznosi:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, \eta_{1x}) \cdot R_n \cdot R_b = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,05} \cdot 0,03 \cdot 0,05 \cdot 0,06 = 0,009$$

Očekivana frekvencija  $v$  i vrijeme  $T$  za vršni faktor iznose:

$$v = \eta_{1x} \cdot \sqrt{\frac{B^2}{B^2 + R^2}} \geq 0,08 \text{ Hz}$$

$$v = 2,93 \cdot \sqrt{\frac{0,56}{0,56 + 0,009}} = 2,9 \text{ Hz} > 0,08 \text{ Hz}$$

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

Vršni faktor prema izrazu (62) iznosi:

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

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(2,9 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(2,9 \cdot 600)}} = 4,02 \geq 3,0$$

Konstruktivski faktor kad vjetar puše okomito na poprečnu stranu prema izrazu (52) iznosi:

$$C_{s,d} = \frac{1 + 2 \cdot 4,02 \cdot 0,39 \cdot \sqrt{0,56 + 0,009}}{1 + 7 \cdot 0,39} = 0,90$$

### Djelovanje vjetra na poprečnu stranu objekta :

- SLUČAJ III ( $c_{pi} = +0,2$ )

Djelovanje vjetra na vertikalne plohe:

$$q_{p,1} = 0,61 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^A = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-1,2) = -0,66 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^B = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-0,8) = -0,44 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^C = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-0,5) = -0,27 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^D = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (+0,8) = +0,44 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^E = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-0,38) = -0,21 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{p,2} = 0,661 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^A = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-1,2) = -0,71 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$w_e^B = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-0,8) = -0,48 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$w_e^C = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-0,5) = -0,30 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$w_e^D = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (+0,8) = +0,48 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$w_e^E = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-0,38) = -0,23 \text{ kN} / \text{m}^2$$

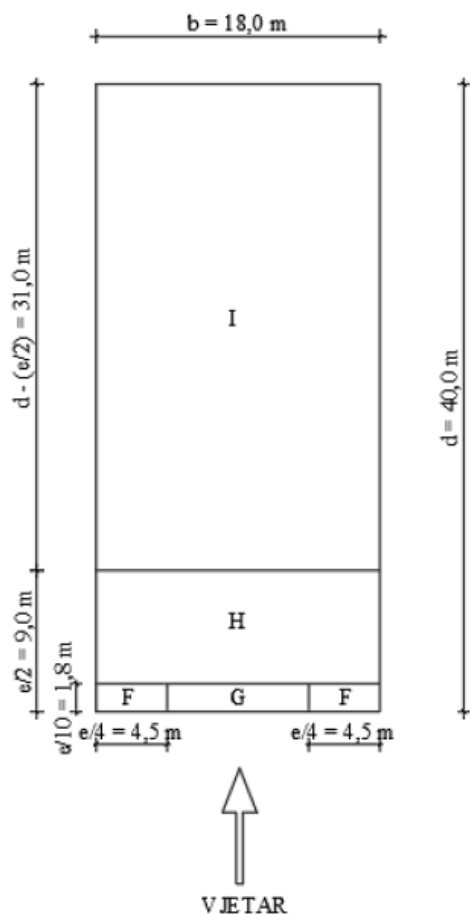
**Koeficijent  $c_{pe}$  vanjskog tlaka za ravni krov:**

$b = 18,0 \text{ m}$

$h = 21,6 \text{ m}$

$d = 40,0 \text{ m}$

$e = \min(b; 2h) = \min(18,0; 43,2) = 18,0 \text{ m}$



**Slika 26.** Shema opterećenja vjetra na ravni krov

$$A^F = \left(\frac{e}{4}\right) \cdot \left(\frac{e}{10}\right) = \left(\frac{18,0}{4}\right) \cdot \left(\frac{18,0}{10}\right) = 8,1 m^2 < 10 m^2$$

$$A^G = \left(b - \frac{e}{2}\right) \cdot \frac{e}{10} = \left(18,0 - \frac{18,0}{2}\right) \cdot \frac{18,0}{10} = 16,2 m^2 > 10 m^2$$

$$A^H = b \cdot \left(\frac{e}{2} - \frac{e}{10}\right) = 18,0 \cdot \left(\frac{18,0}{2} - \frac{18,0}{10}\right) = 130,0 m^2 > 10 m^2$$

$$A^I = b \cdot \left(d - \frac{e}{2}\right) = 18,0 \cdot \left(18,0 - \frac{18,0}{2}\right) = 558,0 m^2 > 10 m^2$$

Koeficijenti vanjskog tlaka za površine iznose:

$$c_{pe}^F = c_{pe1}^F + (c_{pe10}^F - c_{pe1}^F) \cdot \lg_{10} A^F = -2,5 + (-1,8 + 2,5) \cdot \lg_{10} 8,1 = -1,864$$

$$c_{pe,10}^G = -1,2$$

$$c_{pe,10}^H = -0,7$$

$$c_{pe,10}^I = \pm 0,2$$

Djelovanje vjetra na krovne plohe:

$$q_{p,1} = 0,61 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^F = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-1,86) = -1,02 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^G = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-1,2) = -0,66 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^H = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-0,7) = -0,38 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^I = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (\pm 0,2) = \pm 0,11 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{p,2} = 0,661 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^F = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-1,8) = -1,07 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^G = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-1,2) = -0,71 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^H = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-0,7) = -0,42 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^I = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (\pm 0,2) = \pm 0,12 \text{ kN/m}^2$$

Unutarnji tlakovi vjetra:

$$w_{i1} = 0,61 \cdot (\pm 0,2) = \pm 0,12 \text{ kN/m}^2$$

$$w_{i2} = 0,661 \cdot (\pm 0,2) = \pm 0,13 \text{ kN/m}^2$$

**Ukupni tlakovi vjetra:****VERTIKALNE PLOHE:**

$$q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^A = -0,66 - (+0,12) = -0,78 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^B = -0,44 - (+0,12) = -0,56 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^C = -0,27 - (+0,12) = -0,39 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^D = +0,44 - (+0,12) = +0,32 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^E = -0,21 - (+0,12) = -0,33 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^A = -0,71 - (+0,13) = -0,84 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^B = -0,48 - (+0,13) = -0,61 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^C = -0,30 - (+0,13) = -0,43 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^D = +0,48 - (+0,13) = +0,35 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^E = -0,23 - (+0,13) = -0,36 \text{ kN/m}^2$$

**KROVNE PLOHE:**

$$q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^F = -1,02 - (+0,12) = -1,14 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^G = -0,66 - (+0,12) = -0,78 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^H = -0,38 - (+0,12) = -0,5 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^I = -0,11 - (+0,12) = -0,23 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^J = +0,11 - (+0,12) = -0,01 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^F = -1,07 - (+0,13) = -1,2 \text{ kN/m}^2$$

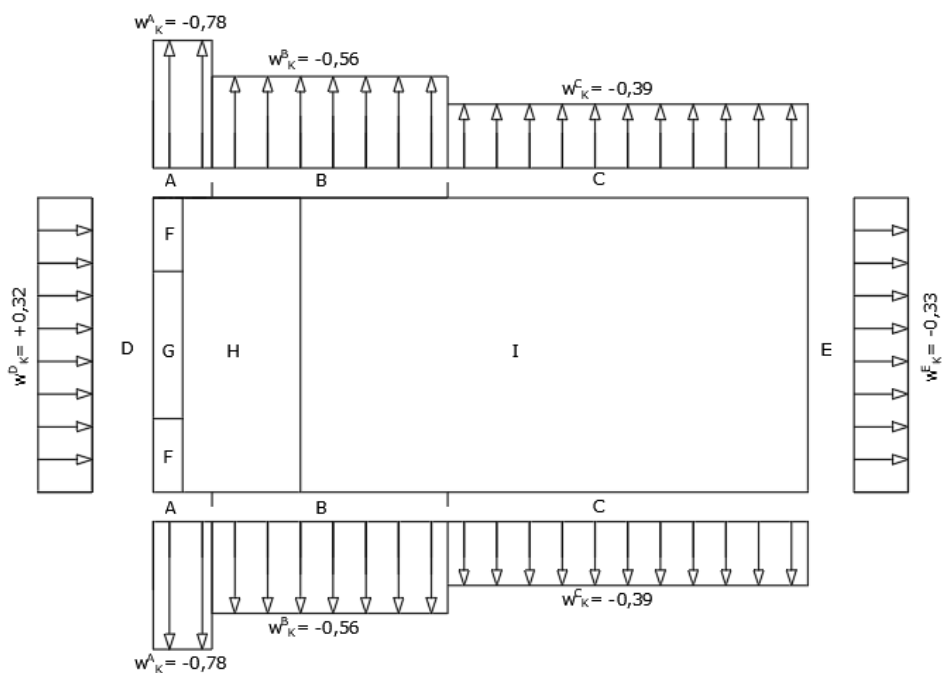
$$w_k^G = -0,71 - (+0,13) = -0,84 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^H = -0,42 - (+0,13) = -0,55 \text{ kN/m}^2$$

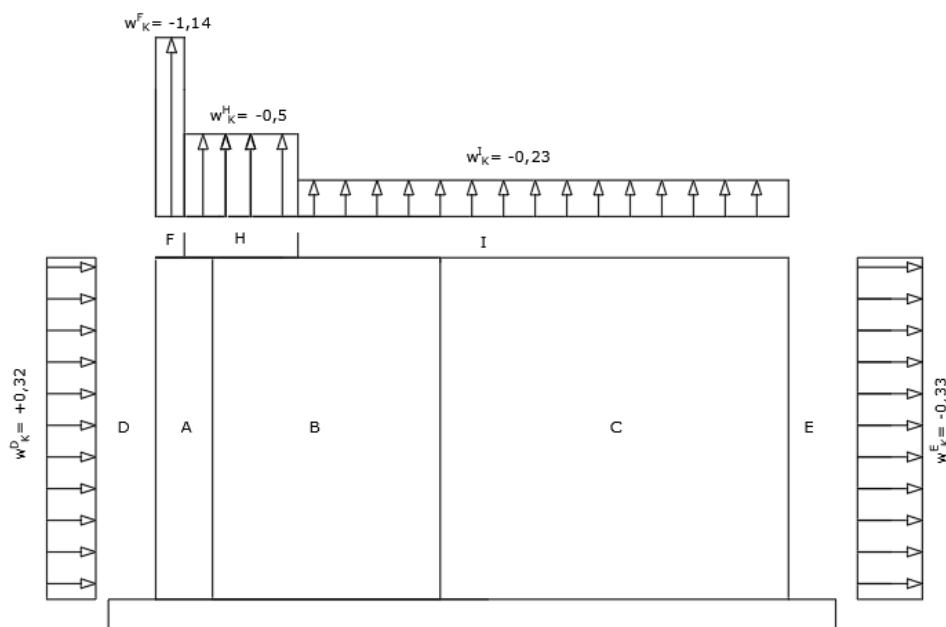
$$w_k^I = -0,12 - (+0,13) = -0,25 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^J = +0,12 - (+0,13) = -0,01 \text{ kN/m}^2$$

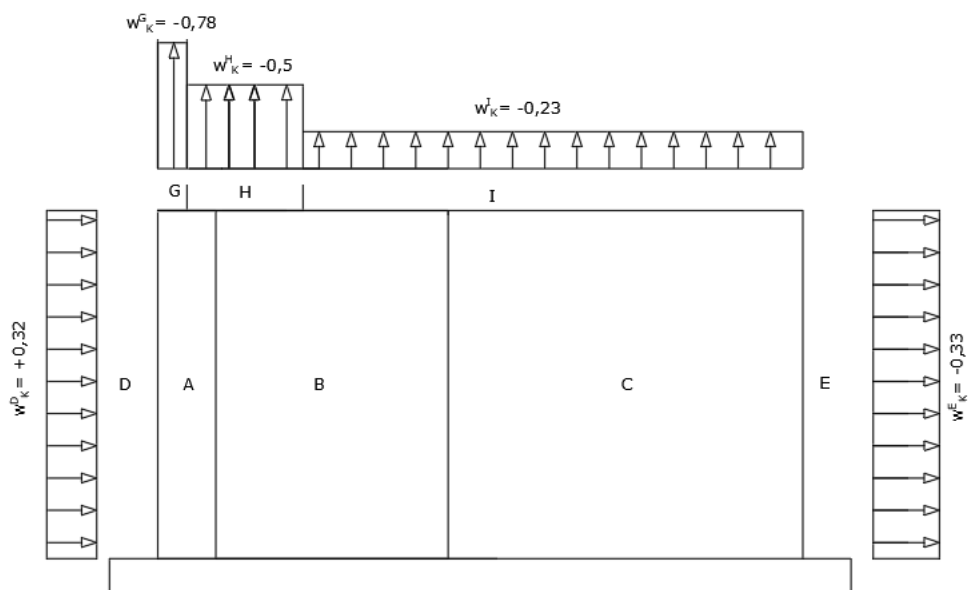




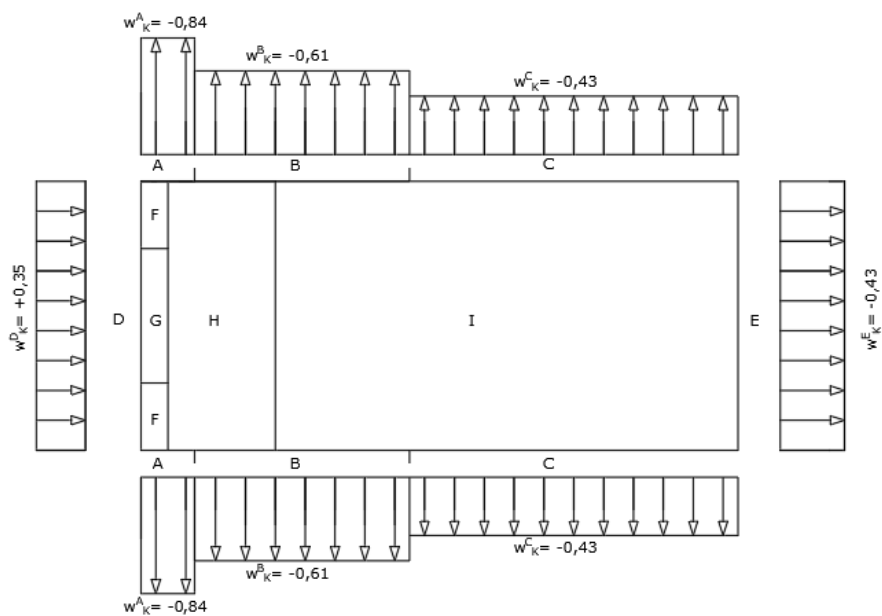
Slika 27. Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za  $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$



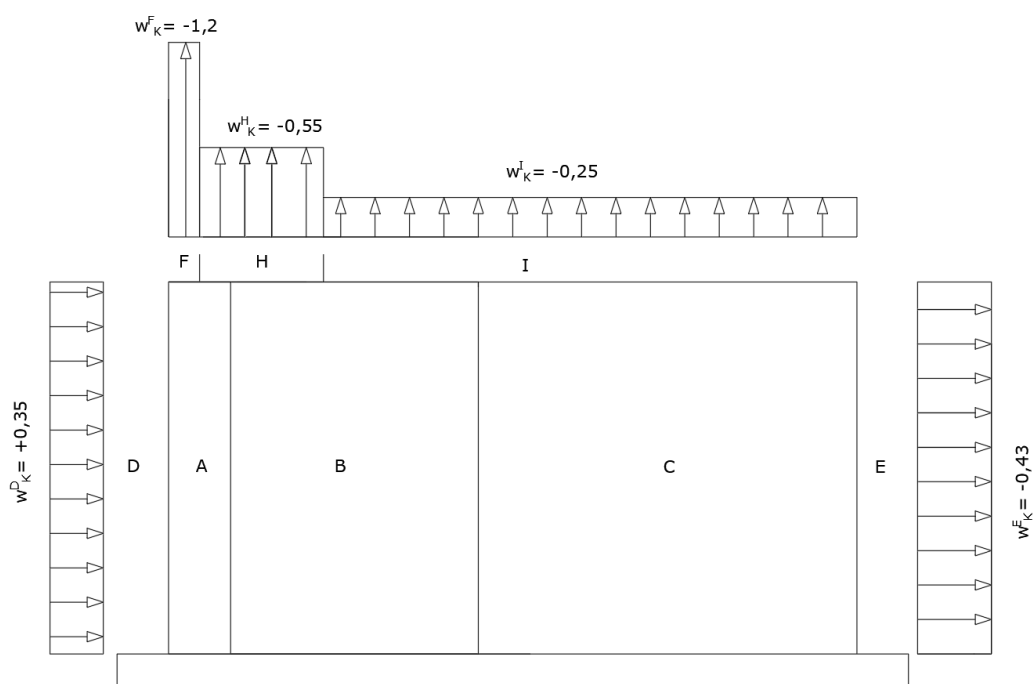
Slika 28. Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za  $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$



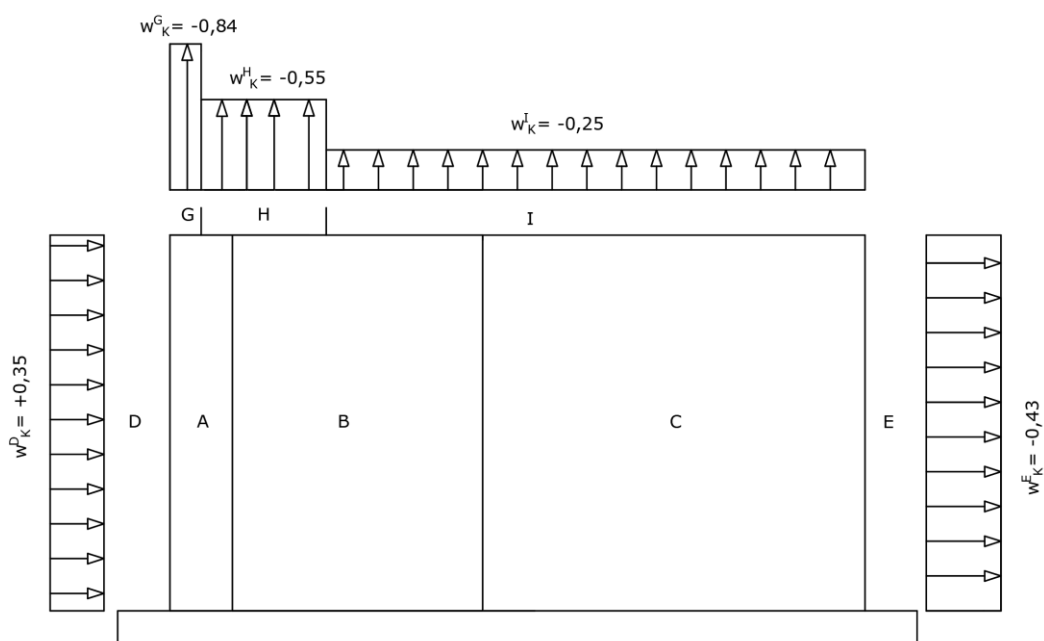
Slika 29. Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za  $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$



Slika 30. Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za  $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$



Slika 31. Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za  $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$



Slika 32. Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za  $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$

- SLUČAJ IV ( $c_{pi} = -0,3$ )

**Djelovanje vjetra na vertikalne plohe:**

$$q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^A = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-1,2) = -0,66 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^B = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-0,8) = -0,44 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^C = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-0,5) = -0,27 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^D = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (+0,8) = +0,44 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^E = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-0,38) = -0,21 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^A = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-1,2) = -0,71 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^B = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-0,8) = -0,48 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^C = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-0,5) = -0,30 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^D = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (+0,8) = +0,48 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^E = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-0,38) = -0,23 \text{ kN/m}^2$$

**Djelovanje vjetra na krovne plohe:**

$$q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^F = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-1,86) = -1,02 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^G = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-1,2) = -0,66 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^H = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (-0,7) = -0,38 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^I = 0,9 \cdot 0,61 \cdot (\pm 0,2) = \pm 0,11 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^F = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-1,8) = -1,07 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^G = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-1,2) = -0,71 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^H = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (-0,7) = -0,42 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^I = 0,9 \cdot 0,661 \cdot (\pm 0,2) = \pm 0,12 \text{ kN/m}^2$$

**Unutarnji tlakovi vjetra:**

$$w_{i1} = 0,61 \cdot (-0,3) = -0,18 \text{ kN/m}^2$$

$$w_{i2} = 0,661 \cdot (-0,3) = -0,2 \text{ kN/m}^2$$

**Ukupni tlakovi vjetra:****VERTIKALNE PLOHE:**

$$q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^A = -0,66 - (-0,18) = -0,48 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^B = -0,44 - (-0,18) = -0,26 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^C = -0,27 - (-0,18) = -0,09 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^D = +0,44 - (-0,18) = +0,62 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k^E = -0,21 - (-0,18) = -0,03 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^A = -0,71 - (-0,2) = -0,51 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^B = -0,48 - (-0,2) = -0,28 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^C = -0,30 - (-0,2) = -0,1 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^D = +0,48 - (-0,2) = +0,68 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^E = -0,23 - (-0,2) = -0,03 \text{ kN/m}^2$$

#### KROVNE PLOHE:

$$q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^F = -1,02 - (-0,18) = -0,84 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^G = -0,66 - (-0,18) = -0,48 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^H = -0,38 - (-0,18) = -0,2 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^I = -0,11 - (-0,18) = +0,07 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^J = +0,11 - (-0,18) = +0,29 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$$

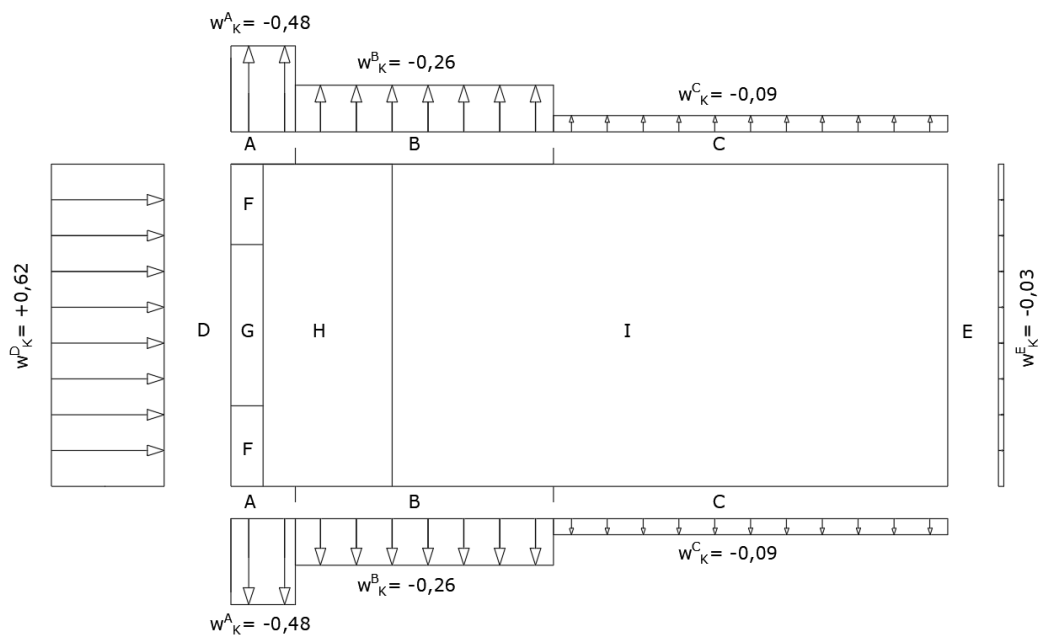
$$w_e^F = -1,07 - (-0,2) = -0,87 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^G = -0,71 - (-0,2) = -0,51 \text{ kN/m}^2$$

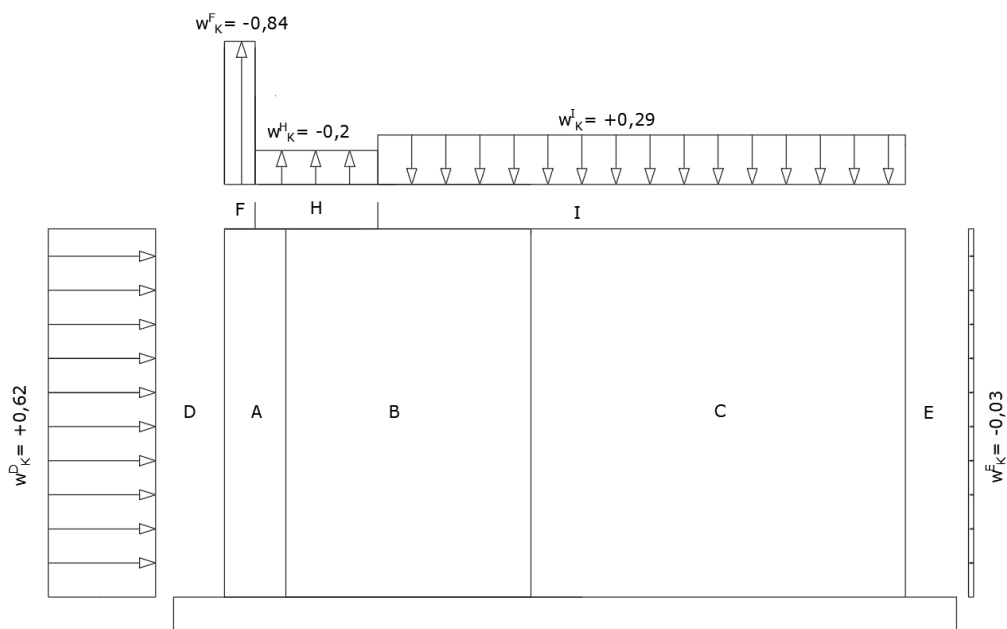
$$w_e^H = -0,42 - (-0,2) = -0,22 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e^I = -0,12 - (-0,2) = +0,08 \text{ kN/m}^2$$

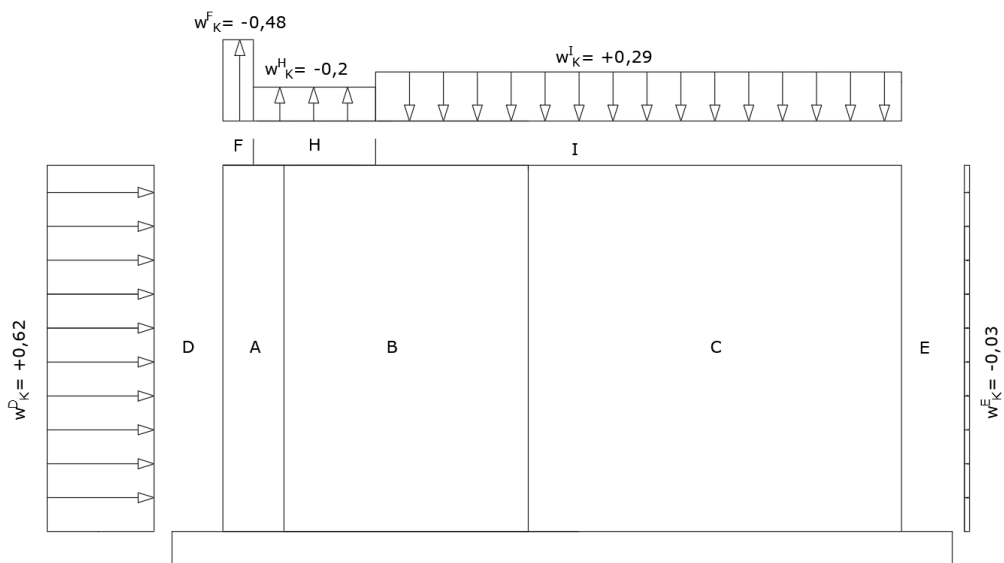
$$w_e^J = +0,12 - (-0,2) = +0,32 \text{ kN/m}^2$$



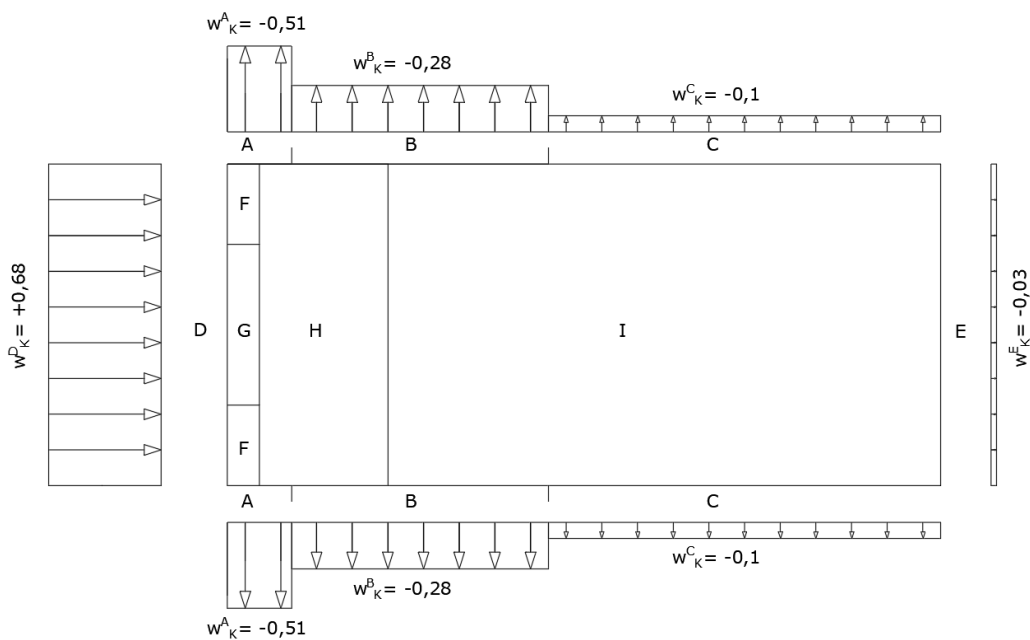
Slika 33. Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za  $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$



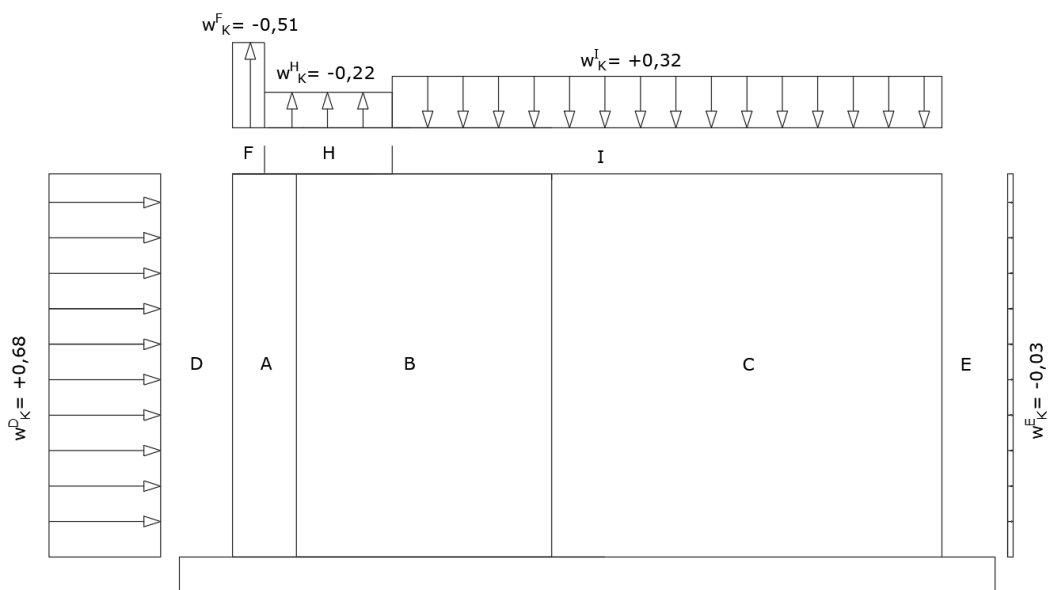
Slika 34. Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za  $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$



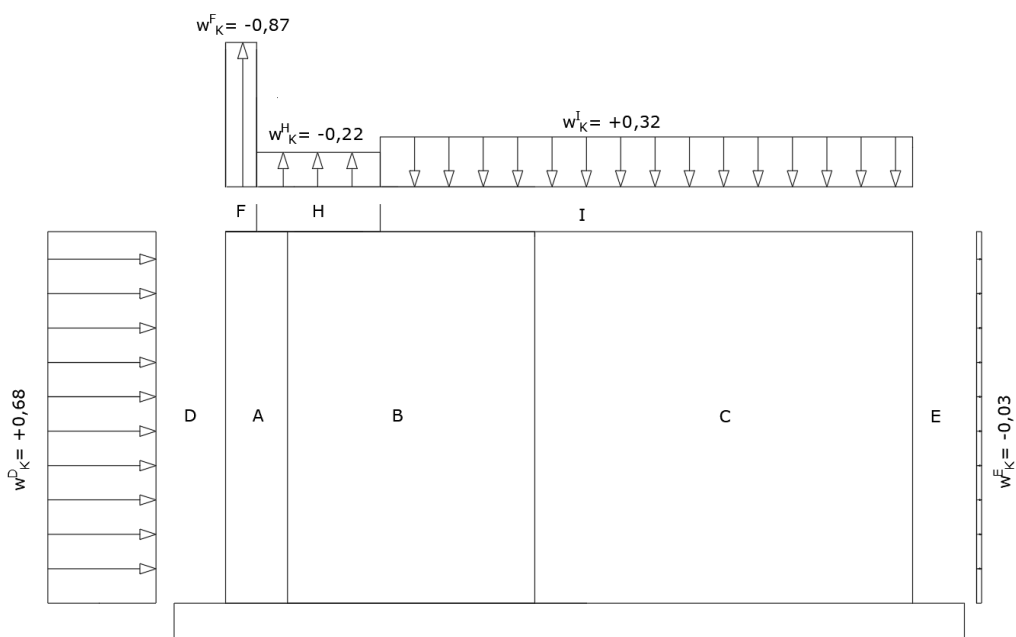
Slika 35. Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za  $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$



Slika 36. Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za  $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$



Slika 37. Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za  $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$



Slika 38. Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za  $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$



### 6.2.5 Proračun sile vjetra pomoću koeficijenta sile

Sila vjetra na konstrukciju može se izračunati koristeći koeficijent sile ili koeficijent tlaka. Proračun prema koeficijentu tlaka omogućuje preciznu analizu djelovanja vjetra na pojedine površine konstrukcije. Proračun koristeći koeficijent sile prikladan je za procjenu ukupnog učinka vjetra na cijelu konstrukciju. Sila vjetra na konstrukciju određuje se uzimajući u obzir vanjske i unutarnje tlakove vjetra i može se odrediti prema izrazu:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot A_{ref} \quad (63)$$

gdje je:

$c_s c_d$  - faktor konstrukcije

$c_f$  - koeficijent sile za konstrukciju ili konstrukcijski element

$A_{ref}$  - referentna površina konstrukcije ili konstrukcijskog elementa

**Tablica 13.** Sila vjetra kada vjetra djeluje okomito na uzdužnu stranu objekta

Etaža	h [m]	b [m]	$q_p(z)$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c_s c_d$	$c_f$	$F_w$ [kN]
1	3,6	40	0,661	0,84	2,15	172,16
2	3,6	40	0,661	0,84	2,15	172,16
3	3,6	40	0,661	0,84	2,15	172,16
4	3,6	40	0,661	0,84	2,15	172,16
5	3,6	40	0,661	0,84	2,15	172,16
6	3,6	40	0,661	0,84	2,15	172,16

**Tablica 14.** Sila vjetra kada vjetra djeluje okomito na poprečnu stranu objekta

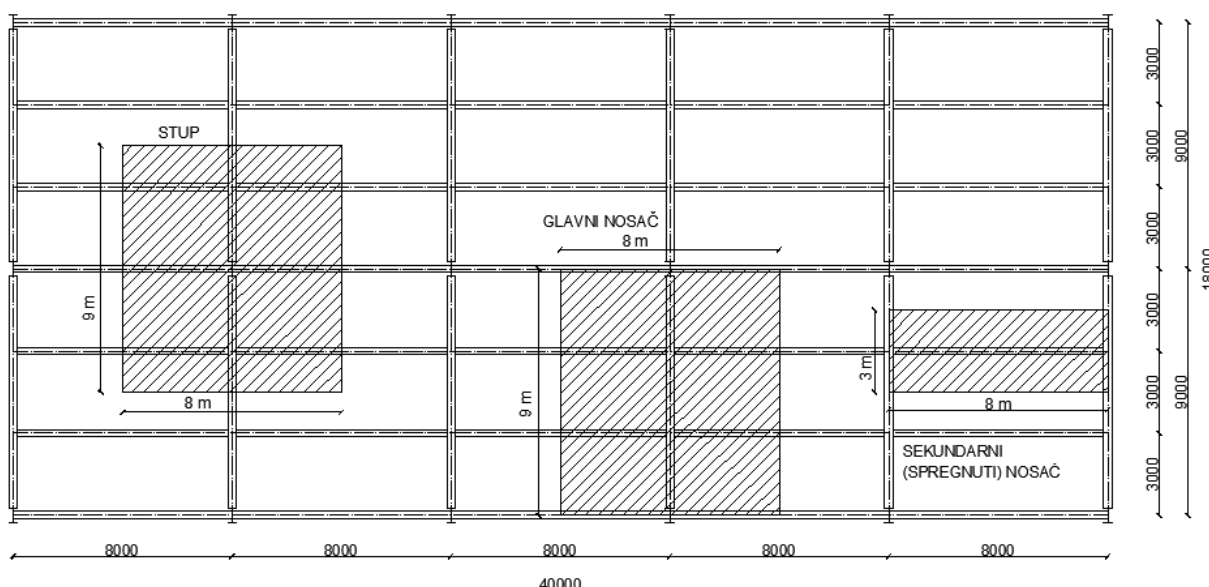
Etaža	h [m]	b [m]	$q_{p,1}(z)$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{p,2}(z)$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c_s c_d$	$c_f$	$F_{w,1}$ [kN]	$F_{w,2}$ [kN]
1	3,6	18	0,61	0,661	0,9	1,5	49,80	53,96
2	3,6	18	0,61	0,661	0,9	1,5	49,80	53,96
3	3,6	18	0,61	0,661	0,9	1,5	49,80	53,96
4	3,6	18	0,61	0,661	0,9	1,5	49,80	53,96
5	3,6	18	0,61	0,661	0,9	1,5	49,80	53,96
6	3,6	18	0,61	0,661	0,9	1,5	49,80	53,96

## 7 PRELIMINARNO DIMENZIONIRANJE

Kako bi se odabrale optimalne dimenzije čeličnih profila za dimenzioniranje konstrukcije, potrebno je provesti preliminarni proračun za određivanje aproksimativnih profila. Ovaj proračun bit će izveden na konzervativan način. Dimenzije profila bit će odabrane na temelju momenta savijanja za međukatne i krovne nosače, dok će za stupove biti odabrani prema vrijednostima uzdužnih sila. Uzeta kvaliteta čelika je S355.

Nosače dijelimo na glavne koji su upeto spojeni sa stupom (okvirni sustav) i sekundarne nosače koji su ujedno i spregnuti i zglobno povezani sa stupovima (jednostavni okvirni sustav s centričnim vezom). Međukatna konstrukcija je spregnuta ploča koja se u preliminarnom dimenzioniranju odabire kataloški prema dobivenim opterećenjima.

Preliminarno dimenzioniranje će se provesti na vertikalno gravitacijsko opterećenje, a to su stalno, uporabno i snijeg. Horizontalna opterećenja, vjetar i potres, su u ovom proračunu zanemarene.



Slika 39. Elementi za preliminarno dimenzioniranje

## 7.1 Međukatna konstrukcija

Preliminarni odabir spregnute ploče:

Međukatna konstrukcija:

$$g_{p.b.č.a}^{m.eđukatna} = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k$$

$$g_{p.b.č.a}^{m.eđukatna} = 1,35 \cdot 5,24 + 1,5 \cdot 2$$

$$g_{p.b.č.a}^{m.eđukatna} = 10,07 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Krovna konstrukcija:

$$g_{p.b.č.a}^{krovna} = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k + \psi_i \cdot \gamma_Q \cdot s_k$$

$$g_{p.b.č.a}^{krovna} = 1,35 \cdot 4,24 + 1,5 \cdot 0,6 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 1,0$$

$$g_{p.b.č.a}^{krovna} = 7,38 \text{ kN} / \text{m}^2$$

**Tablica 15.** Karakteristike profiliranog lima

Normal Thickness (mm)	Self Weight		Height to Neutral Axis Sagging (mm)	Second Moment of Area (cm <sup>4</sup> /m)	Steel Area (mm <sup>2</sup> /m)	Ultimate Moment Capacity (kNm/m)	
	(kg/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )				Sagging	Hogging
0.85	11.42	0.112	16.10	56.58	1418	6.47	6.30
0.90	12.89	0.126	16.50	66.15	1605	7.72	7.22
1.00	14.36	0.141	16.60	75.90	1792	8.97	7.99
1.10	15.83	0.155	16.70	83.99	1979	10.17	8.82
1.20	17.29	0.170	16.70	92.16	2165	11.31	9.55

**Tablica 16.** Karakteristike spregnute ploče

Slab Depth (mm)	Concrete Volume (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Weight (kN/m <sup>2</sup> )			
		Normal Weight Concrete		Lightweight Concrete	
		Wet	Dry	Wet	Dry
100	0.091	2.14	2.10	1.70	1.61
110	0.101	2.38	2.33	1.88	1.78
120	0.111	2.61	2.56	2.07	1.96
125	0.116	2.73	2.67	2.16	2.05
130	0.121	2.85	2.79	2.26	2.14
140	0.131	3.08	3.02	2.44	2.31
150	0.141	3.32	3.25	2.63	2.49

**Tablica 17.** Rasponi ovisni o debljini ploče i opterećenju

Span Type (support condition)	Slab Depth (mm)	Min Mesh Size	Gauge - 1.00mm					
			Total Applied Load (kN/m <sup>2</sup> ) SLS					
			4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0
			Span (m)					
	100	A142	3.30	3.30	3.22	3.00	3.00	3.00
	110	A142	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22
	120	A142	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14
	130	A142	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07
	140	A142	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	150	A142	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94
	160	A193	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89
	175	A193	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81
	200	A193	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
	250	A252	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53

Na temelju dopuštenog opterećenja (tablica 17.) za međukatnu konstrukciju raspona 3 m preliminarno je odabrana spregnuta ploča **Multideck 50**.

## 7.2 Sekundarni nosač

Opterećenja:  $g_{k,sek.nosača} = 0,9 \text{ kN/m}$

$g_{k,međ.ploča} = 5,24 \text{ kN/m}^2$

$q_{k,međ.ploča} = 2 \text{ kN/m}^2$

Širina opterećenja koja otpada na nosač : 3 m

Kombinacija opterećenja:

$$g_{Ed} = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k = \gamma_G \cdot \left[ \frac{e \cdot l \cdot g_{k,međ}}{l_{sek}} + g_{k,sek.nosač} \right] + \gamma_Q \cdot \frac{e \cdot l \cdot q_{k,međ}}{l_{sek}}$$

$$g_{Ed} = 1,35 \cdot \left[ \frac{3 \cdot 8 \cdot 5,24}{8} + 0,9 \right] + 1,5 \cdot \frac{3 \cdot 8 \cdot 2}{8} = 31,71 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = \frac{g_{Ed} \cdot l^2}{8} = \frac{31,71 \cdot 8^2}{8} = 253,68 \text{ kNm}$$

Otpornost elementa na savijanje iznosi:

$$M_{y,Rd} = \frac{f_y \cdot W_{pl,y}}{\gamma_{M1}} = \frac{275 \cdot 1380}{1,1} = 345,00 \text{ kNm} > M_{Ed} = 253,68 \text{ kNm}$$

Kontrola progiba:

$$g_{Ed} = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k = \gamma_G \cdot \left[ \frac{e \cdot l \cdot g_{k,med}}{l_{sek}} + g_{k,sek,nosač} \right] + \gamma_Q \cdot \frac{e \cdot l \cdot q_{k,med}}{l_{sek}}$$

$$g_{Ed} = 1,0 \cdot \left[ \frac{3 \cdot 8 \cdot 5,24}{8} + 0,9 \right] + 1,0 \cdot \frac{3 \cdot 8 \cdot 2}{8} = 21,72 \text{ kN/m}$$

$$w = \frac{5}{384} \cdot \frac{g_{Ed} \cdot l^4}{E \cdot I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{21,72 \cdot 10^{-2} \cdot 800^4}{21000 \cdot 18300} = 3,01 \text{ cm}$$

Ograničenje veličine progiba:

$$w_{max} = \frac{L}{200} = \frac{800}{200} = 4 \text{ cm} > 3,01 \text{ cm}$$

Preliminarno odabrani profil: **HEA 300**

### 7.3 Glavni nosač

Opterećenja:  $g_{k,gl.,nosača} = 1,1 \text{ kN/m}$

$$g_{k,sek.,nosača} = 0,9 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,med,ploča} = 5,24 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{k,med,ploča} = 2 \text{ kN/m}^2$$

Širina opterećenja koja otpada na nosač : 8 m

Kombinacija opterećenja:

$$g_{Ed} = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k = \gamma_G \cdot \left[ \frac{e \cdot l \cdot g_{k,med}}{l_{gl}} + \frac{n \cdot l_{sek} \cdot g_{k,sek,nosač}}{l_{gl}} + g_{k,gl,nosač} \right] + \gamma_Q \cdot \frac{e \cdot l \cdot q_{k,med}}{l_{gl}}$$

$$g_{Ed} = 1,35 \cdot \left[ \frac{8 \cdot 6 \cdot 5,24}{9} + \frac{2 \cdot 8 \cdot 0,9}{9} + 1,1 \right] + 1,5 \cdot \frac{8 \cdot 6 \cdot 2}{9} = 57,37 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = \frac{g_{Ed} \cdot l^2}{8} = \frac{57,37 \cdot 9^2}{8} = 580,87 \text{ kNm}$$

Otpornost elementa na savijanje iznosi:

$$M_{y,Rd} = \frac{f_y \cdot W_{pl,y}}{\gamma_{M1}} = \frac{27,5 \cdot 2560}{1,1} = 640,0 \text{ kNm} > M_{Ed} = 580,87 \text{ kNm}$$

Kontrola progiba:

$$g_{Ed} = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k = \gamma_G \cdot \left[ \frac{e \cdot l \cdot g_{k,med}}{l_{gl}} + \frac{n \cdot l_{sek} \cdot g_{k,sek,nosač}}{l_{gl}} + g_{k,plnosač} \right] + \gamma_Q \cdot \frac{e \cdot l \cdot g_{k,med}}{l_{gl}}$$

$$g_{Ed} = 1,0 \cdot \left[ \frac{8 \cdot 6 \cdot 5,24}{9} + \frac{2 \cdot 8 \cdot 0,9}{9} + 1,1 \right] + 1,0 \cdot \frac{8 \cdot 6 \cdot 2}{9} = 41,31 \text{ kN/m}$$

$$w = \frac{5}{384} \cdot \frac{g_{Ed} \cdot L^4}{E \cdot I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{41,31 \cdot 10^{-2} \cdot 900^4}{21000 \cdot 45100} = 3,73 \text{ cm}$$

Ograničenje veličine progiba:

$$w_{max} = \frac{L}{200} = \frac{900}{200} = 4,5 \text{ cm} > 3,73 \text{ cm}$$

Preliminarno odabrani profil: **HEA 400**

## 7.4 Stup

Opterećenja:  $g_{k,stup} = 1,7 \text{ kN/m}$

$$g_{k,gl,nosača} = 1,1 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,sek,nosača} = 0,9 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,med,ploča} = 5,24 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{k,krov,ploča} = 4,24 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{k,med,ploča} = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{k,krov,ploča} = 0,6 \text{ kN/m}^2$$

$$s_k = 1,0 \text{ kN/m}^2$$

Opterećenje na stup prizemlja:

$$G_{stup} = h \cdot g_{k,stup} = 3,6 \cdot 1,7 = 6,12 \text{ kN}$$

$$G_{gl,nosač} = L \cdot g_{k,gl,nosač} = 9,0 \cdot 1,1 = 9,9 \text{ kN}$$

$$G_{sek,nosač} = L \cdot g_{k,sek,nosač} = 24,0 \cdot 0,9 = 21,6 \text{ kN}$$

$$G_{med,pbča} = A \cdot g_{k,med,pbča} = 72,0 \cdot 5,24 = 377,28 \text{ kN}$$

$$G_{krov,pbča} = A \cdot g_{k,krov,pbča} = 72,0 \cdot 4,24 = 305,28 \text{ kN}$$

$$Q_{med,pbča} = A \cdot g_{k,med,pbča} = 72,0 \cdot 2,0 = 144,0 \text{ kN}$$

$$Q_{krov,pbča} = A \cdot g_{k,krov,pbča} = 72,0 \cdot 0,6 = 43,2 \text{ kN}$$

$$S = A \cdot s_k = 72,0 \cdot 1,0 = 72,0 \text{ kN}$$

Otpornost stupa na (tlačnu) uzdužnu silu:

$$N_{G,k} = n \cdot (G_{stup} + G_{gl.nosač} + G_{sek.nosač}) + (n-1) \cdot G_{med.p.bča} + G_{krov.p.bča}$$

$$N_{G,k} = 6 \cdot (6,12 + 9,9 + 21,6) + 5 \cdot 377,28 + 305,28 = 2417,4 \text{ kN}$$

$$N_{Q,k} = (n-1) \cdot Q_{med.p.bča} + Q_{krov.p.bča} + \psi_i \cdot S_k$$

$$N_{Q,k} = 5 \cdot 144,0 + 43,2 + 0,5 \cdot 72,0 = 799,2 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = \gamma_G \cdot N_{G,k} + \gamma_Q \cdot N_{Q,k} = 1,35 \cdot 2417,4 + 1,5 \cdot 799,2 = 4462,29 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{218,0 \cdot 27,5}{1,0} = 5995 \text{ kN} > 4462,29 \text{ kN}$$

Preliminarno odabrani profil: **HEB 450**

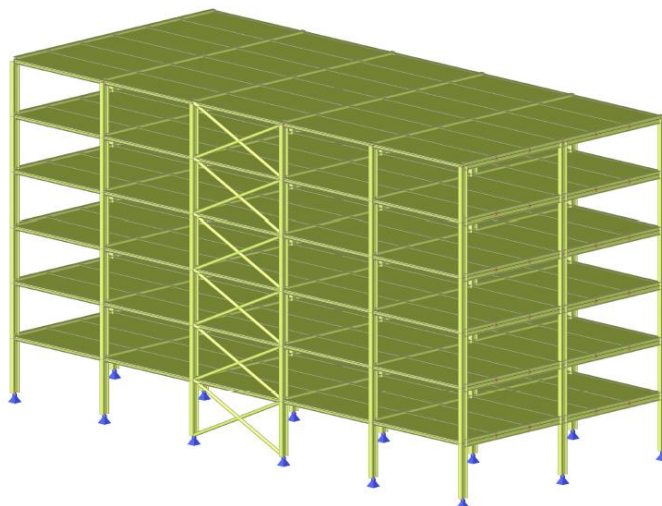
## 7.5 Vertikalni uzdužni vez

Preliminarni odabir poprečnog presjeka proveden je na temelju seizmičkog zahtjeva prema kojem svedena vitkost dijagonala "X" oblika mora biti između vrijednosti  $1,3 < \bar{\lambda} \leq 2,0$

	OS Y-Y	OS Z-Z
KRITIČNA SILA:	$N_{crY} = 237,68 \text{ kN}$	$N_{crZ} = 237,68 \text{ kN}$
SVEDENA VITKOST	$\bar{\lambda}_y = 1,87$	$\bar{\lambda}_z = 1,87$

Preliminarno odabrani profil: **CHS 159x6,3**

## 8 NUMERIČKO MODELIRANJE



Slika 40. 3D model konstrukcije

U programu "SCIA" izrađen je 3D model konstrukcije (slika 40), na kojem je provedena analiza opterećenja izračunatih u poglavlju 6. Vlastita težina elemenata automatski se uzima u obzir pomoću softvera.

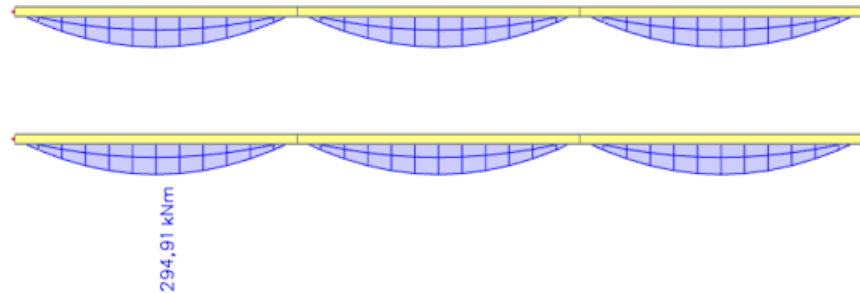
Tijekom modeliranja međukatne konstrukcije bilo je potrebno postići što realnije ponašanje spregnute ploče. "SCIA" nudi nekoliko opcija za definiranje ponašanja elementa spregnute ploče:

- Standardni FEM: ploča ima krutost na savijanje, unutar i izvan ravnine, te koristi konačnu elementnu mrežu.
- Fleksibilna dijafragma: nema krutost na savijanje unutar ravnine niti na smicanje; opterećenja unutar ravnine prenosi isključivo aksijalno.
- Kruta dijafragma: ne koristi mrežu konačnih elemenata. Ima svojstva fleksibilne dijafragme, ali s dodatkom krutosti unutar ravnine, dok izvan ravnine djeluje potpuno fleksibilno.
- Polukruta dijafragma: kombinira svojstva fleksibilne dijafragme i standardne FEM ploče; ima stvarnu krutost unutar ravnine, ali nema krutost na savijanje.

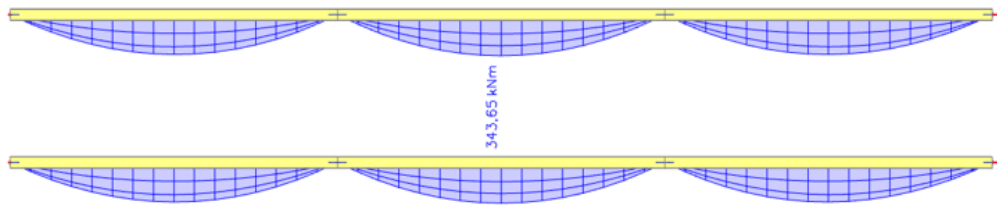
Kako bi se odabrala odgovarajuća opcija, provedena je analiza na pojednostavljenom modelu za standardni FEM i krutu dijafragmu. Mjerodavni rezultat bio je moment savijanja, pri čemu



je odabran pristup koji je dao veći moment. Prema rezultatima analize, odabrana je opcija standardnog FEM-a (slika 40. i 41.).



Slika 41. Moment savijanja za model "Kruta dijafragma"



Slika 42. Moment savijanja za model "Standardni FEM"

## 8.1 Imperfekcije

Imperfekcije su uzete u obzir kutom  $\phi_i$  prema formuli (35):

### X smjer

$$\phi_i = \alpha_h \cdot \alpha_m \cdot \phi_0$$

$$\phi = 1,0 \cdot 0,764 \cdot \frac{1}{200} = 0,0038$$

### Y smjer

$$\phi = 1,0 \cdot 0,82 \cdot \frac{1}{200} = 0,0041$$

### 8.1.1 Imperfekcije od vlastite težine

**Tablica 18.** Tlačne sile u stupovima po etažama za opterećenje od vlastite težine

Etaža	$N_{Ed}$ [kN]
6	4852,06
5	4852,06
4	4852,06
3	4852,06
2	4852,06
1	4852,06

Ekvivalentna sila za vlastitu težinu u x smjeru:

$$\Delta H_1 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,1} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 4852,06 = 110,63 \text{ kN}$$

$$\Delta H_2 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,2} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 4852,06 = 110,63 \text{ kN}$$

$$\Delta H_3 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,3} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 4852,06 = 110,63 \text{ kN}$$

$$\Delta H_4 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,4} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 4852,06 = 110,63 \text{ kN}$$

$$\Delta H_5 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,5} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 4852,06 = 110,63 \text{ kN}$$

$$\Delta H_6 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,6} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 4852,06 = 110,63 \text{ kN}$$

Ekvivalentna sila za vlastitu težinu u y smjeru:

$$\Delta H_1 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,1} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 4852,06 = 59,68 \text{ kN}$$

$$\Delta H_2 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,2} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 4852,06 = 59,68 \text{ kN}$$

$$\Delta H_3 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,3} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 4852,06 = 59,68 \text{ kN}$$

$$\Delta H_4 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,4} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 4852,06 = 59,68 \text{ kN}$$

$$\Delta H_5 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,5} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 4852,06 = 59,68 \text{ kN}$$

$$\Delta H_6 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,6} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 4852,06 = 59,68 \text{ kN}$$

### 8.1.2 Imperfekcije od dodatno stalnog opterećenja

Tablica 19. Tlačne sile u stupovima po etažama za dodatno stalno opterećenje

Etaža	$N_{Ed}$ [kN]
6	1440,0
5	2160,0

4	2160,0
3	2160,0
2	2160,0
1	2160,0

Ekvivalentna sila za dodatno stalno opterećenje u x smjeru:

$$\Delta H_1 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,1} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 2160,0 = 49,25 \text{ kN}$$

$$\Delta H_2 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,2} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 2160,0 = 49,25 \text{ kN}$$

$$\Delta H_3 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,3} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 2160,0 = 49,25 \text{ kN}$$

$$\Delta H_4 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,4} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 2160,0 = 49,25 \text{ kN}$$

$$\Delta H_5 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,5} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 2160,0 = 49,25 \text{ kN}$$

$$\Delta H_6 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,6} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 1440,0 = 32,83 \text{ kN}$$

Ekvivalentna sila za dodatno stalno opterećenje u y smjeru:

$$\Delta H_1 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,1} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 2160,0 = 26,57 \text{ kN}$$

$$\Delta H_2 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,2} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 2160,0 = 26,57 \text{ kN}$$

$$\Delta H_3 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,3} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 2160,0 = 26,57 \text{ kN}$$

$$\Delta H_4 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,4} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 2160,0 = 26,57 \text{ kN}$$

$$\Delta H_5 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,5} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 2160,0 = 26,57 \text{ kN}$$

$$\Delta H_6 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,6} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 1440,0 = 17,71 \text{ kN}$$

### 8.1.3 Imperfekcije od korisnog opterećenja

Tablica 20. Tlačne sile u stupovima po etažama za korisno opterećenje

Etaža	$N_{Ed}$ [kN]
6	432,0
5	1008,0
4	1440,0
3	1440,0
2	1440,0

1	1440,0
---	--------

Ekvivalentna sila za uporabno opterećenje u x smjeru:

$$\Delta H_1 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,1} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 1440,0 = 32,83 \text{ kN}$$

$$\Delta H_2 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,2} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 1440,0 = 32,83 \text{ kN}$$

$$\Delta H_3 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,3} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 1440,0 = 32,83 \text{ kN}$$

$$\Delta H_4 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,4} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 1440,0 = 32,83 \text{ kN}$$

$$\Delta H_5 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,5} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 1008,0 = 22,98 \text{ kN}$$

$$\Delta H_6 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,6} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 432,0 = 9,85 \text{ kN}$$

Ekvivalentna sila za uporabno opterećenje u y smjeru:

$$\Delta H_1 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,1} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 1440,0 = 17,71 \text{ kN}$$

$$\Delta H_2 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,2} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 1440,0 = 17,71 \text{ kN}$$

$$\Delta H_3 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,3} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 1440,0 = 17,71 \text{ kN}$$

$$\Delta H_4 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,4} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 1440,0 = 17,71 \text{ kN}$$

$$\Delta H_5 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,5} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 1008,0 = 12,40 \text{ kN}$$

$$\Delta H_6 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,6} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 432,0 = 5,31 \text{ kN}$$

#### 8.1.4 Imperfekcije od snijega

**Tablica 21.** Tlačne sile u stupovima po etažama za korisno opterećenje

Etaža	$N_{Ed}$ [kN]
6	720,0
5	0,0
4	0,0
3	0,0
2	0,0
1	0,0

Ekvivalentna sila za stalno opterećenje u x smjeru:

$$\Delta H_6 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,6} = 0,0038 \cdot 6 \cdot 720,0 = 16,42 \text{ kN}$$

Ekvivalentna sila za stalno opterećenje u y smjeru:

$$\Delta H_6 = \phi \cdot m \cdot N_{Ed,6} = 0,0041 \cdot 3 \cdot 720,0 = 8,86 \text{ kN}$$

Sile  $H_i$  dodaju se ostalim horizontalnim djelovanjima. Mogu se raspodijeliti po rubovima okomitima na smjer djelovanja sile i-te etaže.

$$Q_{Edx,i} = \frac{H_{xi}}{L_y}, \text{ odnosno } Q_{Edy,i} = \frac{H_{yi}}{L_x}$$

Opterećenje po etaži:

$$L_x = 40 \text{ m}$$

$$L_y = 18 \text{ m}$$

## 8.2 Ulazni podaci za provedbu analize

Tablica 22. Opterećenja na konstrukciju

Naziv	Spec	Grupa opterećenja
vlastita težina		stalno
vlastita težina1		stalno
svježi beton		Construction
suhi beton		stalno
uporabno	Standardno	uporabno
uporabno međukatna	Standardno	uporabno
stalno		stalno
snijeg	Snijeg	snijeg
vjetar slučaj 1	Standardno	vjetar
vjetar slučaj 2	Standardno	vjetar
vjetar slučaj 3	Standardno	vjetar
vjetar slučaj 4	Standardno	vjetar
uporabno krov	Standardno	uporabno
Imperfekcija_stalno x		stalno
Imperfekcija_stalno y		stalno
Imperfekcija_uporabno x	Standardno	uporabno
Imperfekcija_uporabno y	Standardno	uporabno
Imperfekcija_snijeg x	Standardno	snijeg
Imperfekcija_snijeg y	Standardno	snijeg
potres x	Seizmičnost	potres
potres x_AE	Seizmički izvanredni ekscentricitet	potres x_AE
potres y	Seizmičnost	potres
potres y_AE	Seizmički izvanredni ekscentricitet	potres y_AE
potres x1	Seizmičnost	potres
potres x1_AE	Seizmički izvanredni ekscentricitet	potres x1_AE
potres y1	Seizmičnost	potres
potres y1_AE	Seizmički izvanredni ekscentricitet	potres y1_AE

**Tablica 23.** Slučaj opterećenja za kombinaciju mase

Naziv	Slučaj opterećenja
M_DS	stalno - uporabna faza
M_SB	suhi beton - uporabno
M_Q	uporabno međukatna - uporabna faza
M_VT	vlastita težina1 - uporabna faza
M_Q2	uporabno krov - uporabna faza

**Tablica 24.** Kombinacija mase

Naziv	Grupa mase	Koef. [-]
Kombinacija masa	M_VT	1,000
	M_DS	1,000
	M_SB	1,000
	M_Q	0,300
	M_Q2	0,300

Zbog velikog broja kombinacija opterećenja njihov ispis je dan u prilogu A na kraju rada.

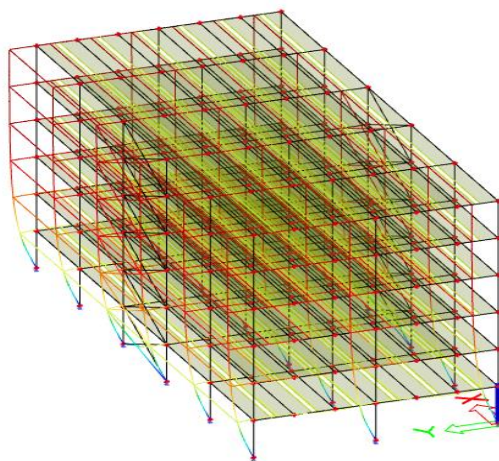
### 8.3 Klasifikacija okvira

Klasifikacija okvira provedena je na temelju kriterija pomičnosti, razlikujući pomični i nepomični okvir. Prema EC3, konstrukcija se smatra nepomičnom ako je zadovoljen uvjet  $\alpha_{cr} \geq 10$  za elastičnu analizu i  $\alpha_{cr} \geq 15$  za plastičnu analizu.

Analiza je provedena za sve kombinacije graničnog stanja nosivosti te je ispalo kako je kritični množitelj za prvi globalni mod izvijanja unutar raspona  $3 < \alpha_{cr} < 10$ .

Prema tome konstrukcija se klasificira kao pomična te se u proračunu moraju uzeti učinci drugog reda.  $P - \Delta$  učinci se uzimaju u obzir numeričkim putem.

Za kombinaciju CO7 prvi globalni mod izvijanja je Mod 1, a faktor elastičnog kritičnog opterećenja iznosi  $\alpha_{cr} = 4,13$



Slika 43. Globalni mod izvijanja za kombinaciju CO7

## 9 STATIČKI PRORAČUN KONSTRUKCIJE

### 9.1 Dimenzioniranje stupa

**Tablica 25.** Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka

Duljina elementa:	L=3,6 m		
Poprečni presjek:	HEM 450		
Tip profila:	Topb dogotovljeni		
Visina profila:	h= 478 m m		
Širina profila:	b= 307 m m		
Debljina pojasnice:	$t_f = 40,0$ m m		
Debljina hrpta:	$t_w = 21,0$ m m		
Radijus zaobljenja:	r= 27 m m		
Težina po m ':	G= 263 kg/m '		
Površina poprečnog presjeka:	A= 335 cm <sup>2</sup>		
Torzijska konstanta:	$I_t = 1530$ cm <sup>4</sup>		
Konstanta krivljenja:	$I_w = 9250000$ cm <sup>6</sup>		
Moment inercije:	$I_y = 132000$ cm <sup>4</sup>		$I_z = 19300$ cm <sup>4</sup>
Moment otpora:	$W_y = 5500$ cm <sup>3</sup>		$W_z = 1260$ cm <sup>3</sup>
Plastični moment otpora:	$W_{ply} = 6330$ cm <sup>3</sup>		$W_{plz} = 1940$ cm <sup>3</sup>
Radijus tromosti:	$i_y = 19,8$ cm		$i_z = 7,59$ cm

Čelik: S355

$$f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$$

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

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

$$G = 8100 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} = \sqrt{235 / 355} = 0,81$$

$$\nu = 0,3$$

**Tablica 26.** Mjerodavne sile za dimenzioniranje stupa



Tip opterećenja	Slučaj	Iznos
Uzdužna sila $N_{Ed}$	CO7	6968,17 kN
Poprečna sila $V_{Ed,z}$	CO7	105,71 kN
Moment savijanja $M_{Ed,y}$	CO24	380,56 kNm
Pomak $u_x$	CO29	4,1 mm
Pomak $u_y$	CO26	11,1 mm

### 9.1.1 Klasifikacija poprečnog presjeka

#### Hrbat

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r}{t_w} = \frac{478,0 - 2 \cdot 40,0 - 2 \cdot 27,0}{21,0} = 16,38$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{c}{t} = 16,38 \leq 33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73$$

Hrbat je klase 1.

#### Pojasnica

$$\frac{c}{t} = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{t_f} = \frac{307,0 - 21,0 - 2 \cdot 27,0}{40,0} = 2,9$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{c}{t} = 2,9 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klase 1.

**Poprečni presjek je klase 1.**

### 9.1.2 Otpornost poprečnog presjeka

#### Otpornost poprečnog presjeka u tlaku

$$N_{c,Rd} = N_{pl,y,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{335,0 \cdot 35,5}{1,0} = 11892,5 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{cRd}} = \frac{6968,17}{11892,5} = 0,59 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{cNRd} = M_{plyRd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{6330 \cdot 35,5}{1,0} = 224715 \text{ kNcm} = 2247,15 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cNRd}} = \frac{380,56}{2247,15} = 0,17 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### Otpornost poprečnog presjeka na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$h_w = h - 2 \cdot t_f = 478,0 - 2 \cdot 40,0 = 398,0 \text{ mm}$$

$$\eta = 1,2$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{398,0}{21,0} = 18,95 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

**Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik**

Plastična posmična otpornost:

$$V_{cRd} = V_{plzRd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$\eta = 1,2$$

$$A_v = 335,0 - 2 \cdot 30,7 \cdot 4,0 + (21 + 2 \cdot 2,7) \cdot 4,0 = 119,4 \text{ cm}^2 \geq 1,2 \cdot 39,8 \cdot 2,1 = 100,3 \text{ cm}^2$$

$$V_{cRd} = V_{plzRd} = \frac{119,4 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 2447,21$$

Uvjet:

$$\frac{V_{zEd}}{V_{plzRd}} = \frac{105,71}{2447,21} = 0,04 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### Interakcija N/V/M

#### Poprečna sila:

Uvjet reduciranja plastične otpornosti savijanja:

$$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{plRd}$$

$$V_{zEd} = 105,71 < 0,5 \cdot 2447,21 = 11223,61$$

Uvjet je zadovoljen, otpornost poprečnog presjeka se ne smanjuje!

#### Uzdužna sila:

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{cRd}$$

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

$$N_{Ed} = 6968,17 > 0,25 \cdot 11892,5 = 2973,13$$

$$N_{Ed} = 6968,17 > \frac{0,5 \cdot 39,8 \cdot 21 \cdot 35,5}{1,0} = 1483,55$$

Uvjeti nisu zadovoljeni, s toga vrijedi:

$$M_{yVNRd} = M_{plYRd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a} \leq M_{plYRd}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{cRd}} = \frac{6968,17}{11892,5} = 0,59$$

$$a = \frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A} = \frac{335 - 2 \cdot 30,7 \cdot 4,0}{335} = 0,27 < 0,5$$

$$M_{yVNRd} = 2247,15 \cdot \frac{1-0,59}{1-0,5 \cdot 0,27} = 1065,12 \leq 2247,15$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{yVNRd}} = \frac{380,56}{1065,12} = 0,36 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### 9.1.3 Otpornost elementa

#### Otpornost elementa na izvijanje:

Elastična kritična sila:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{cr}^2}$$

Bezdimenzijska vitkost:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

Izvijanje oko osi y

Kritična dužina izvijanja  $L_{cr,y} = 360$  cm

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 132000}{360^2} = 211099 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{335 \cdot 35,5}{211099}} = 0,24$$

Mjerodavna krivulja izvijanja:

$$\frac{h}{b} = \frac{478,0}{307,0} = 1,56 > 1,2$$

$$t_f = 40,0 \text{ mm} \leq 40,0 \text{ mm}$$

Krivulja izvijanja: a → faktor imperfekcije  $\alpha = 0,21$

Pomoćna veličina:

$$\phi_y = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^{-2} \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,21 \cdot (0,24 - 0,2) + 0,24^2 \right] = 0,53$$

Faktor redukcije:

$$\chi_y = \frac{1,0}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1,0}{0,53 + \sqrt{0,53^2 - 0,24^2}} = 0,98 \leq 1,0$$

Proračunska otpornost

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,98 \cdot \frac{335,0 \cdot 35,5}{1,1} = 10595,14 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} = \frac{6968,17}{10595,14} = 0,66 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

Izvijanje oko osi z

Kritična dužina izvijanja  $L_{cr,z} = 360 \text{ cm}$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 19300}{360^2} = 30865,36 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{335 \cdot 35,5}{30865}} = 0,61$$

Mjerodavna krivulja izvijanja:

$$\frac{h}{b} = \frac{478,0}{307,0} = 1,56 > 1,2$$

$$t_f = 40,0 \text{ mm} \leq 40,0 \text{ mm}$$

Krivulja izvijanja:  $b \rightarrow$  faktor imperfekcije  $\alpha = 0,34$

Pomoćna veličina:

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,34 \cdot (0,61 - 0,2) + 0,61^2 \right] = 0,76$$

Faktor redukcije:

$$\chi_z = \frac{1,0}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1,0}{0,76 + \sqrt{0,76^2 - 0,61^2}} = 0,9 \leq 1,0$$

Proračunska otpornost

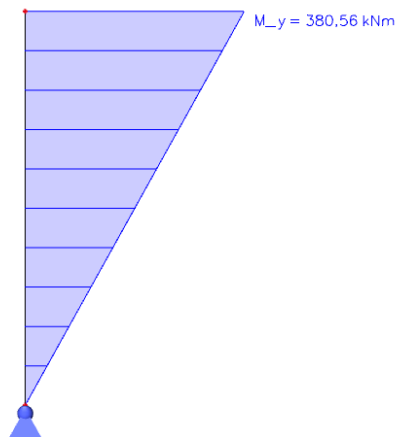
$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,9 \cdot \frac{335,0 \cdot 35,5}{1,1} = 9730,23 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{6968,17}{9730,23} = 0,72 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

Otpornost elementa na savijanje:



Slika 44. Dijagram momenta savijanja  $M_{Ed,y}$  stupa

Elastični kritični moment:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(k \cdot L_{cr})^2} \left[ \sqrt{\left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L_{cr})^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot EI_z} + C_2 \cdot z_g} - C_2 \cdot z_g \right]$$

Razmak bočnog pridržanja:  $L_{cr} = 360 \text{ cm}$

Mjesto unosa sile:  $z_g = 0$

Faktor efektivne dužine:  $k = 1,0; k_w = 1,0$

Faktori ovisni o uvjetima opterećenja ( $\psi = 0$ ):  $C_1 = 1,77$

$$M_{cr} = 1,77 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 19300}{(1,0 \cdot 360)^2} \left[ \sqrt{\left( \frac{1,0}{1,0} \right)^2 \cdot \frac{9250000}{19300} + \frac{(1,0 \cdot 360)^2 \cdot 8100 \cdot 1530}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 19300}} \right] =$$

$$= 1621367,5 \text{ kNm} = 16213,68 \text{ kNm}$$

Bezdimenzijska vitkost:

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{6330 \cdot 35,5}{16213,68}} = 0,36 \leq \overline{\lambda}_{LT, \rho} = 0,4$$

Ne zahtijeva provjeru elementa na BTI.

Za valjani profil  $\frac{h}{b} = \frac{478,0}{307,0} = 1,56 \leq 2,0$ , mjerodavna krivulja izvijanja je a  $\rightarrow \alpha_{LT} = 0,21$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$$

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

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

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,58 + \sqrt{0,58^2 - 0,36^2}} = 0,98 \leq 1,0$$

Otpornost na savijanje:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,98 \cdot \frac{6330 \cdot 35,5}{1,1} = 200200 \text{ kNcm} = 2002,0 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{380,56}{2002,0} = 0,19 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### Otpornost elementa na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile (Metoda 2)

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

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

$$\psi = 0$$

$$C_{m,y} = C_{m,LT} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi = 0,6 + 0,4 \cdot 0 = 0,6 \geq 0,4$$

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

$$k_{yy} = 0,6 \cdot \left( 1 + (0,24 - 0,2) \cdot 0,66 \right) = 0,62 \leq 0,6 \cdot \left( 1 + 0,8 \cdot 0,66 \right) = 0,92$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,62 = 0,37$$

Uvjet:

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

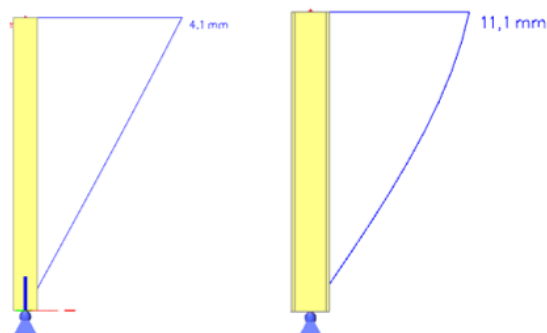
$$0,66 + 0,62 \cdot 0,19 = 0,78 \leq 1,0$$

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

$$0,72 + 0,37 \cdot 0,19 = 0,79 \leq 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

#### 9.1.4 Kontrola pomaka (GSU)



Slika 45. Pomak stupa u smjeru x i y

Maksimalni dopušteni pomak:

$$u_{m,ax,dop} = \frac{h}{150} = \frac{3600}{150} = 24 \text{ mm}$$

Uvjet:

$$u_{x,m,ax} = 4,1 \text{ mm} < u_{m,ax,dop} = 24 \text{ mm}$$

$$u_{y,m,ax} = 11,1 \text{ mm} < u_{m,ax,dop} = 24 \text{ mm}$$

Uvjeti je zadovoljeni!



Usvojen profil stupa: HEM450.

## 9.2 Dimenzioniranje glavnog nosača

Tablica 27. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka

Duljina elementa:	L=9 m		
Poprečni presjek:	HEB 450		
Tip profila:	Topb dogotovljeni		
Visina profila:	h= 450 m m		
Širina profila:	b= 300 m m		
Debljina pojasnice:	$t_f = 26,0$ m m		
Debljina hrpta:	$t_w = 14,0$ m m		
Radijus zaobljenja:	r= 27 m m		
Težina po m ':	G= 171 kg/m '		
Površina poprečnog presjeka:	A= 218 cm <sup>2</sup>		
Torzijska konstanta:	$I_t = 448$ cm <sup>4</sup>		
Konstanta krivljenja:	$I_w = 5260000$ cm <sup>6</sup>		
Moment inercije:	$I_y = 79900$ cm <sup>4</sup>		$I_z = 11700$ cm <sup>4</sup>
Moment otpora:	$W_y = 3550$ cm <sup>3</sup>		$W_z = 1781$ cm <sup>3</sup>
Plastični moment otpora:	$W_{ply} = 3980$ cm <sup>3</sup>		$W_{plz} = 1200$ cm <sup>3</sup>
Radijus tromosti:	$i_y = 19,1$ cm		$i_z = 7,33$ cm

Čelik: S355

$$f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$$

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

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

$$G = 8100 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} = \sqrt{235 / 355} = 0,81$$

$$\nu = 0,3$$

**Tablica 28.** Mjerodavne sile za dimenzioniranje glavnog nosača

Tip opterećenja	Slučaj	Iznos
Uzdužna sila $N_{Ed}$	CO2	267,6 kN
Poprečna sila $V_{Ed,z}$	CO2	395,76 kN
Moment savijanja $M_{Ed,y}$	CO2	950,66 kNm
Pomak $u_z$	CO39	17,9 mm

### 9.2.1 Klasifikacija poprečnog presjeka

#### Hrbat

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r}{t_w} = \frac{450,0 - 2 \cdot 26,0 - 2 \cdot 27,0}{14,0} = 24,57$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{c}{t} = 24,57 \leq 38 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73$$

Hrbat je klase 1.

#### Pojasnica

$$\frac{c}{t} = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{t_f} = \frac{300,0 - 14,0 - 2 \cdot 27,0}{26,0} = 4,46$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{c}{t} = 4,46 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klase 1.

**Poprečni presjek je klase 1.**

### 9.2.2 Otpornost poprečnog presjeka

#### Otpornost poprečnog presjeka u tlaku

$$N_{c,Rd} = N_{ply,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{218,0 \cdot 35,5}{1,0} = 7739,0 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{cRd}} = \frac{267,6}{7739,0} = 0,03 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{cNRd} = M_{plNRd} = \frac{W_{plW} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3980,0 \cdot 35,5}{1,0} = 141290 \text{ kNm} = 1412,9 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cNRd}} = \frac{950,66}{1412,9} = 0,67 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### Otpornost poprečnog presjeka na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$h_w = h - 2 \cdot t_f = 450,0 - 2 \cdot 26,0 = 398,0 \text{ mm}$$

$$\eta = 1,2$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{398,0}{14,0} = 28,43 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik

Plastična posmična otpornost:

$$V_{cRd} = V_{plzRd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$\eta = 1,2$$

$$A_v = 218,0 - 2 \cdot 30,0 \cdot 2,6 + (1,4 + 2 \cdot 2,7) \cdot 2,6 = 79,68 \text{ cm}^2 \geq 1,2 \cdot 39,8 \cdot 1,4 = 66,86 \text{ cm}^2$$

$$V_{cRd} = V_{plzRd} = \frac{79,68 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 1633,12$$

Uvjet:

$$\frac{V_{zEd}}{V_{plzRd}} = \frac{395,76}{1633,12} = 0,24 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### Interakcija N/V/M

#### Poprečna sila:

Uvjet reduciranja plastične otpornosti savijanja:

$$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{plzRd}$$

$$V_{zEd} = 395,76 < 0,5 \cdot 1633,12 = 816,56$$

**Uvjet je zadovoljen**, otpornost poprečnog presjeka se ne smanjuje

#### Uzdužna sila:

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{cRd}$$

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

$$N_{Ed} = 267,6 < 0,25 \cdot 7739,0 = 1934,75$$

$$N_{Ed} = 265,74 < \frac{0,5 \cdot 39,8 \cdot 1,4 \cdot 35,5}{1,0} = 989,03$$

Uvjeti su zadovoljeni!

$$M_{yVNRd} = M_{pl,yRd} = 1412,9 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,yRd}} = \frac{950,66}{1412,9} = 0,67 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### 9.2.3 Otpornost elementa

#### Otpornost elementa na izvijanje:

Elastična kritična sila:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{cr}^2}$$

Bezdimenzijska vitkost:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

### Izvijanje oko osi y

Kritična dužina izvijanja  $L_{cr,y} = 900 \text{ cm}$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 79900}{900^2} = 20444,7 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{218,0 \cdot 35,5}{20444,7}} = 0,62$$

Mjerodavna krivulja izvijanja:

$$\frac{h}{b} = \frac{450}{300,0} = 1,5 > 1,2$$

$$t_f = 26,0 \text{ mm} \leq 40,0 \text{ mm}$$

Krivulja izvijanja: a → faktor imperfekcije  $\alpha = 0,21$

Pomoćna veličina:

$$\phi_y = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,21 \cdot (0,62 - 0,2) + 0,62^2 \right] = 0,74$$

Faktor redukcije:

$$\chi_y = \frac{1,0}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1,0}{0,74 + \sqrt{0,74^2 - 0,62^2}} = 0,87 \leq 1,0$$

Proračunska otpornost

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,87 \cdot \frac{218 \cdot 35,5}{1,1} = 6120,85 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} = \frac{267,6}{6120,85} = 0,04 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### Izvijanje oko osi z

Kritična dužina izvijanja  $L_{cr,z} = 300 \text{ cm}$

$$N_{crz} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{crz}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 11700}{300^2} = 26944,02 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{crz}}} = \sqrt{\frac{218 \cdot 35,5}{26944,02}} = 0,54$$

Mjerodavna krivulja izvijanja:

$$\frac{h}{b} = \frac{450}{300,0} = 1,5 > 1,2$$

$$t_f = 26,0 \text{ mm} \leq 40,0 \text{ mm}$$

Krivulja izvijanja: b → faktor imperfekcije  $\alpha = 0,34$

Pomoćna veličina:

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,34 \cdot (0,54 - 0,2) + 0,54^2 \right] = 0,7$$

Faktor redukcije:

$$\chi_z = \frac{1,0}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1,0}{0,7 + \sqrt{0,7^2 - 0,54^2}} = 0,87 \leq 1,0$$

Proračunska otpornost:

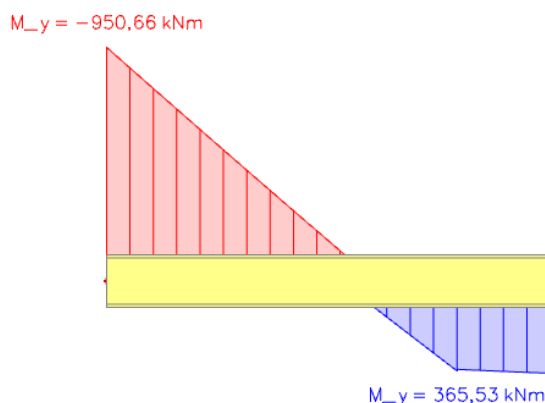
$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,87 \cdot \frac{218,0 \cdot 35,5}{1,1} = 6120,85 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{267,6}{6120,85} = 0,04 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

**Otpornost elementa na savijanje:**


 Slika 46. Dijagram momenta savijanja  $M_{Ed,y}$  glavnog nosača

Elastični kritični moment:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(\kappa \cdot L_{cr})^2} \left[ \sqrt{\left( \frac{\kappa}{\kappa_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(\kappa \cdot L_{cr})^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot EI_z} + C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

Razmak bočnog pridržanja:  $L_{cr} = 300 \text{ cm}$

Mjesto unosa sile:  $z_g = h/2 = 25 \text{ cm}$

Faktor efektivne dužine:  $k = 1,0$ ;  $k_w = 1,0$

Faktori ovisni o uvjetima opterećenja ( $\psi = -0,38$ ):  $C_1 = 2,19$ ;  $C_2 = 0$

$$M_{cr} = 2,19 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 11700}{(1,0 \cdot 300)^2} \left[ \sqrt{\left( \frac{1,0}{1,0} \right)^2 \cdot \frac{5260000}{11700} + \frac{(1,0 \cdot 300)^2 \cdot 8100 \cdot 448}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 11700}} \right] =$$

$$= 1426285 \text{ kNcm} = 14263 \text{ kNm}$$

Bezdimenzijska vitkost:

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{3980 \cdot 35,5}{1426285}} = 0,31 < \overline{\lambda}_{LT,\rho} = 0,4$$

Element ne zahtjeva provjeru na BTI.

Za valjani profil  $\frac{h}{b} = \frac{450,0}{300,0} = 1,5 \leq 2,0$ , mjerodavna krivulja izvijanja je  $a \rightarrow \alpha_{LT} = 0,21$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$$

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

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,21 \cdot (0,31 - 0,2) + 0,31^2 \right] = 0,56$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,56 + \sqrt{0,56^2 - 0,31^2}} = 0,97 \leq 1,0$$

Otpornost na savijanje:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,97 \cdot \frac{3980,0 \cdot 35,5}{1,1} = 124592 \text{ kNcm} = 1245,92 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{950,66}{1245,92} = 0,76 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### Otpornost elementa na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile (Metoda 2)

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

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

$$\psi = \frac{-950,66}{365,53} = -0,38$$

$$C_{m,y} = C_{m,LT} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,38) = 0,45 \geq 0,4$$



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

$$k_{yy} = 0,45 \cdot \left( 1 + \left( 0,62 - 0,2 \right) \cdot 0,04 \right) = 0,45 \leq 0,45 \cdot \left( 1 + 0,8 \cdot 0,04 \right) = 0,46$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,46 = 0,28$$

Uvjet:

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

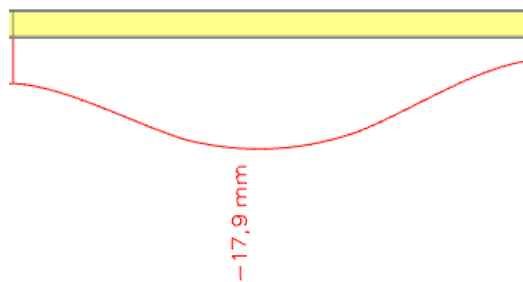
$$0,04 + 0,46 \cdot 0,76 = 0,39 \leq 1,0$$

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

$$0,04 + 0,28 \cdot 0,76 = 0,25 \leq 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### 9.2.4 Kontrola pomaka (GSU)



Slika 47. Progib glavnog nosača

Maksimalni dopušteni pomak:

$$u_{m, \text{ax, dop}} = \frac{L}{250} = \frac{9000}{250} = 36 \text{ mm}$$

Uvjet:

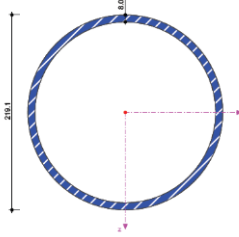
$$f = 17,9 \text{ mm} < u_{m,ax,dop} = 36 \text{ mm}$$

Uvjeti je zadovoljen!

**Usvojen profil glavnog nosača: HEM450.**

### 9.3 Dimenzioniranje veza

**Tablica 29.** Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka

Duljina elementa:	$L = 8,77 \text{ m}$	
Poprečni presjek:	CHS 219,1x8,0	
Tip profila:	Topb dogotovljeni	
Težina po m':	$G = 41,6 \text{ kg/m'}$	
Površina poprečnog presjeka:	$A = 53,1 \text{ cm}^2$	
Moment tromosti:	$I = 2960 \text{ cm}^4$	
Moment otpora:	$W = 270 \text{ cm}^4$	
Plastični moment otpora:	$W_{pl} = 357 \text{ cm}^4$	
Radius tromosti:	$i = 7,47 \text{ cm}$	

Čelik: S355

$$f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$$

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

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

$$G = 8100 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} = \sqrt{235 / 355} = 0,81$$

$$\nu = 0,3$$

**Tablica 30.** Mjerodavne sile za dimenzioniranje sprega

Tip opterećenja	Slučaj	Iznos
Uzdužna sila $N_{ed}$	CO13	585,12 kN

#### 9.3.1 Klasifikacija poprečnog presjeka

$$\frac{d}{t} = \frac{219,1}{8,0} = 27,39$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{d}{t} = 27,39 \leq 50 \cdot \varepsilon^2 = 50 \cdot 0,81^2 = 32,81$$

Poprečni presjek je klase 1.

### 9.3.2 Otpornost poprečnog presjeka

#### Otpornost poprečnog presjeka u tlaku

$$N_{cRd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{531 \cdot 35,5}{1,0} = 1885,05 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{cRd}} = \frac{585,12}{1885,05} = 0,31 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### 9.3.3 Otpornost elementa

#### Otpornost elementa na izvijanje:

Elastična kritična sila:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{cr}^2}$$

Bezdimenzijska vitkost:

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

#### Izvijanje oko osi y

Kritična dužina izvijanja  $L_{cr,y} = 877 \text{ cm}$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 2960}{877^2} = 797,65 \text{ kN}$$

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{531 \cdot 35,5}{797,65}} = 1,54$$

Krivulja izvijanja: a → faktor imperfekcije  $\alpha = 0,21$

Pomoćna veličina:

$$\phi_y = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,21 \cdot (1,54 - 0,2) + 1,54^2 \right] = 1,82$$

Faktor redukcije:

$$\chi_y = \frac{1,0}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1,0}{1,82 + \sqrt{1,82^2 - 1,54^2}} = 0,35 \leq 1,0$$

Proračunska otpornost

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,35 \cdot \frac{531 \cdot 35,5}{1,1} = 599,79 \text{ kN}$$

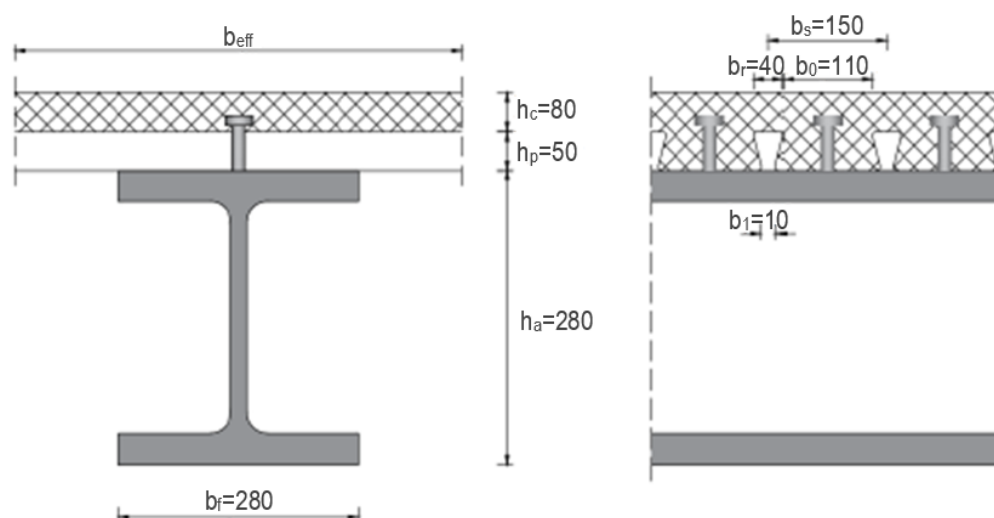
Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} = \frac{585,12}{599,79} = 0,98 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

Usvojen profil sprega je: CHS 219,1x8.

#### 9.4 Dimenzioniranje sekundarnog nosača



Slika 48. Poprečni presjek spregnutog nosača [12]

Tablica 31. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka

Duljina elementa:	$L=8\text{ m}$		
Poprečni presjek:	HEB 280		
Tip profila:	Topb dogotovljeni		
Visina profila:	$h=280\text{ m m}$		
Širina profila:	$b=280\text{ m m}$		
Debljina pojasnice:	$t_f=18,0\text{ m m}$		
Debljina hrpta:	$t_w=10,5\text{ m m}$		
Radijus zaobljenja:	$r=24\text{ m m}$		
Težina po m':	$G=103\text{ kg/m '}$		
Površina poprečnog presjeka:	$A=103\text{ cm}^2$		
Torzijska konstanta:	$I_t=146\text{ cm}^4$		
Konstanta krivljenja:	$I_w=1130000\text{ cm}^6$		
Moment inercije:	$I_y=19300\text{ cm}^4$		$I_z=6600\text{ cm}^4$
Moment otpora:	$W_y=1380\text{ cm}^3$		$W_z=471\text{ cm}^3$
Plastični moment otpora:	$W_{pl,y}=1530\text{ cm}^3$		$W_{pl,z}=718\text{ cm}^3$
Radijus tromosti:	$i_y=12,1\text{ cm}$		$i_z=7,09\text{ cm}$

Tablica 32. Mjerodavne sile za dimenzioniranje sekundarnog nosača u fazi izvedbe

Tip opterećenja	Slučaj	Iznos
Poprečna sila $V_{Ed,z}$	CO 65	73,68 kN
Moment savijanja $M_{Ed,y}$	CO 65	148,32 kNm

**Karakteristike materijala:**

Beton C25/30 :	$f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$
	$f_{cd} = 16,7 \text{ N/mm}^2$
	$E_{cm} = 31000 \text{ N/mm}^2$
Armatura:	$f_{sk} = 500 \text{ N/mm}^2$
	$f_{sd} = f_{sk} / \gamma_s = 500 / 1,15 = 435 \text{ N/mm}^2$
Konstruktivski čelik:	$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$
	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_M = 355 / 1,0 = 355 \text{ N/mm}^2$
	$E_a = 210000 \text{ N/mm}^2/m$
Moždanci:	$f_u = 450 \text{ N/mm}^2$
	$d = 20 \text{ mm}$
	$h_{sc} = 80 \text{ mm}$

**9.4.1 Proračun za fazu izvedbe**

Čelični nosač nije poduprt tijekom izvođenja

**9.4.1.1 Klasifikacija poprečnog presjeka**

**Hrbat**

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r}{t_w} = \frac{280,0 - 2 \cdot 18,0 - 2 \cdot 24,0}{10,5} = 18,67$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{c}{t} = 18,67 \leq 33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73$$

**Hrbat je klase 1.**

**Pojasnica**

$$\frac{c}{t} = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{t_f} = \frac{280,0 - 10,5 - 2 \cdot 24,0}{18,0} = 6,15$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{c}{t} = 6,15 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klase 1.

**Poprečni presjek je klase 1.**

#### 9.4.1.2 Otpornost poprečnog presjeka

##### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{cNyRd} = M_{plNyRd} = \frac{W_{plY} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1530 \cdot 35,5}{1,0} = 54315 \text{ kNcm} = 543,15 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cNyRd}} = \frac{148,32}{543,15} = 0,26 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

##### Otpornost poprečnog presjeka na posmik

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$h_w = h - 2 \cdot t_f = 280,0 - 2 \cdot 18,0 = 244,0 \text{ mm}$$

$$\eta = 1,2$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{244,0}{10,5} = 23,24 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

**Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik**

Plastična posmična otpornost:

$$V_{cRd} = V_{plzRd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$\eta = 1,2$$

$$A_v = 131,0 - 2 \cdot 28,0 \cdot 1,8 + (1,05 + 2 \cdot 2,4) \cdot 1,8 = 40,73 \text{ cm}^2 \geq 1,2 \cdot 24,4 \cdot 1,05 = 30,74 \text{ cm}^2$$

$$V_{cRd} = V_{plzRd} = \frac{40,73 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 834,8$$

Uvjet:

$$\frac{V_{zEd}}{V_{plzRd}} = \frac{73,68}{834,8} = 0,09 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### Interakcija M/V

#### Poprečna sila:

Uvjet reduciranja plastične otpornosti savijanja:

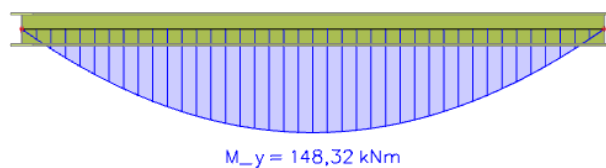
$$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{plRd}$$

$$V_{zEd} = 73,68 < 0,5 \cdot 834,8 = 417,4$$

Uvjet je zadovoljen, otpornost poprečnog presjeka se ne smanjuje

$$M_{yVNRd} = M_{plYRd} = 543,15 \text{ kNm}$$

#### 9.4.1.3 Otpornost elementa



Slika 49. Dijagram moment savijanja  $M_{Ed,y}$  sekundarnog nosača u fazi izvedbe



**Otpornost elementa na savijanje:**

Elastični kritični moment:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(k \cdot L_{cr})^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L_{cr})^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot EI_z} + C_2 \cdot z_g} - C_2 \cdot z_g \right]$$

Razmak bočnog pridržanja:  $L_{cr} = 800 \text{ cm}$

Mjesto unosa sile:  $z_g = h/2 = 14 \text{ cm}$

Faktor efektivne dužine:  $k = 1,0; k_w = 1,0$

Faktori ovisni o uvjetima opterećenja :  $C_1 = 1,127; C_2 = 0,454$

$$M_{cr} = 1,127 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 6600}{(1,0 \cdot 800)^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{1,0}{1,0}\right)^2 \cdot \frac{1130000}{6600} + \frac{(1,0 \cdot 800)^2 \cdot 8100 \cdot 146}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 6600} + 0,454 \cdot 14} - 0,454 \cdot 14 \right]$$

$= 51310,3 \text{ kNm} = 513,1 \text{ kNm}$

Bezdimenzijska vitkost:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{ply} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1530 \cdot 35,5}{51310,3}} = 1,03 > \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

Za valjani profil  $\frac{h}{b} = \frac{280,0}{280,0} = 1,0 \leq 2,0$ , mjerodavna krivulja izvijanja je a  $\rightarrow \alpha_{LT} = 0,21$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$$

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

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,21 \cdot (1,03 - 0,2) + 1,03^2 \right] = 1,1$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,1 + \sqrt{1,1^2 - 1,03^2}} = 0,67 \leq 1,0$$

Otpornost na savijanje:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,67 \cdot \frac{1530 \cdot 35,5}{1,1} = 33082,77 \text{ kNm} = 330,83 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{145,77}{330,83} = 0,44 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### 9.4.2 Proračun za uporabnu fazu

**Tablica 33.** Mjerodavne sile za dimenzioniranje sekundarnog nosača u uporabnoj fazi

Tip opterećenja	Slučaj	Iznos
Poprečna sila $V_{Ed,z}$	CO 5	210,98 kN
Moment savijanja $M_{Ed,y}$	CO 5	420,81 kNm

#### 9.4.2.1 Efektivna širina betonske ploče:

$$b_{eff} = b_0 + b_{e1} + b_{e2}$$

$$b_0 = 0$$

$$b_{e1} = b_{e2} = \frac{L}{8} = \frac{8}{8} = 1\text{ m}$$

$$b_{eff} = 0,0 + 1,0 + 1,0 = 2,0\text{ m} < b = 3,0\text{ m}$$

#### Dokaz uzdužne posmične veze:

Za potpunu posmičnu vezu mjerodavna je manja vrijednost:

$$V_{L,Ed} = \min(N_{cf}; N_{plA})$$

$$N_{cf} = b_{eff} \cdot h_c \cdot 0,85 \cdot f_{cd} = 200 \cdot 8 \cdot 0,85 \cdot 1,67 = 2271,2\text{ kN}$$

$$N_{plA} = A_a \cdot f_{yd} = 131 \cdot 35,5 = 4650,5\text{ kN}$$

Slijedi:

$$V_{L,Ed} = N_{cf} = 2271,2\text{ kN}$$

Potreban broj moždanika za potpunu posmičnu vezu je:

$$n_f = \frac{N_{cf}}{P_{Rd}}$$

$$P_{Rd} = \frac{0,8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot d^4 / 4}{\gamma_v} = \frac{0,8 \cdot 45,0 \cdot \pi \cdot 2,0^4 / 4}{1,25} = 361,91 \text{ kN}$$

$$P_{Rd} = \frac{0,29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v} = \frac{0,29 \cdot 1,0 \cdot 2^2 \cdot \sqrt{2,5 \cdot 3300}}{1,25} = 84,29 \text{ kN}$$

$$\alpha = 1 \rightarrow \frac{h_{sc}}{d} = \frac{80}{20} = 4 \geq 4$$

$$n_f = \frac{2271,2}{84,29} = 26,95$$

Zahtijevani minimalni stupanj spreznja:

$$L < 25,0 \text{ m}$$

$$\eta = 1 - \left( \frac{355}{f_{yk}} \right) \cdot (0,75 - 0,03 \cdot L_e) \geq 0,4$$

$$\eta = 1 - \left( \frac{355}{355} \right) \cdot (0,75 - 0,03 \cdot 8) = 0,49 \geq 0,4$$

S obzirom na minimalni stupanj spreznja potrebni broj moždanika iznosi:

$$n = \eta \cdot n_f = 0,49 \cdot 26,95 = 13,2$$

Odabrano je  $n=20$ , te stupanj spreznja iznosi:

$$\eta = \frac{20}{26,95} = 0,74 \geq 0,49$$

Računska uzdužna sila u sljubnici iznosi:

$$V_{L,Ed} = n \cdot P_{Rd} = 20 \cdot 84,29 = 1685,8 \text{ kN}$$

Odabrani su sljedeći razmaci moždanika u uzdužnom smjeru:

$$e_L = 300 \text{ mm}$$

Provjera kriterija za razmake moždanika:

$$e_L = 300 \text{ mm} > 5 \cdot d = 5 \cdot 20 = 100 \text{ mm}$$

$$e_L = 300 \text{ mm} < 800 \text{ mm}$$

$$e_L = 300 \text{ mm} < 6 \cdot h = 5 \cdot 130 = 650 \text{ mm}$$

**Položaj neutralne osi:**

Uvjet da plastična neutralna os leži u pojasnici čeličnog nosača:

$$N_c < N_{pl,a}$$

$$N_{pl,a} = \frac{A_a \cdot f_{yd}}{\gamma_{M0}} = \frac{131 \cdot 35,5}{1,0} = 4650,5 \text{ kN}$$

$$N_c = \eta \cdot N_{c,f} = \Sigma P_{Rd} = 20 \cdot 84,29 = 1685,8 \text{ kN}$$

$$1685,8 \text{ kN} < 4650,5 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen!

#### 9.4.2.2 Plastična otpornost na savijanje spregnutog presjeka

$$N_{pl,a} = A_a \cdot f_{yd} = 4650,5 \text{ kN}$$

$$N_{pl,f} = \frac{N_{pl,a} - N_c}{2} = \frac{4650,5 - 1685,8}{2} = 1482,35 \text{ kN}$$

$$x_1 = \frac{N_c}{b_{eff} \cdot f_{cd}} = \frac{1685,8}{200 \cdot 0,85 \cdot 1,67} = 5,94 \text{ cm} < h_c = 8 \text{ cm}$$

$$x_2 = \frac{N_{pl,f}}{b_f \cdot f_{yd}} = \frac{1482,35}{28 \cdot 35,5} = 1,49 \text{ cm} < 1,8 \text{ cm}$$

$$z = h_c + h_p + \frac{h_a}{2} - \frac{x_1}{2} = 8,0 + 5,0 + \frac{28}{2} - \frac{5,94}{2} = 24,03 \text{ cm}$$

Otpornost poprečnog presjeka:

$$M_{Rd} = N_c \cdot z + N_{pl,f} \cdot (h_a - x_2) = 1685,8 \cdot 0,24 + 1482 \cdot (0,28 - 0,015) = 797,32 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{420,81}{797,32} = 0,53$$

Uvjet je zadovoljen!

#### 9.4.2.3 Posmična otpornost spregnutog presjeka

Provjera izbočavanja hrpta:

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$h_w = h - 2 \cdot t_f = 280,0 - 2 \cdot 18,0 = 244,0 \text{ mm}$$

$$\eta = 1,2$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{244,0}{10,5} = 23,24 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

**Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik**

Plastična posmična otpornost:

$$V_{cRd} = V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$\eta = 1,2$$

$$A_v = 131,0 - 2 \cdot 28,0 \cdot 1,8 + (10,5 + 2 \cdot 2,4) \cdot 1,8 = 40,73 \text{ cm}^2 \geq 1,2 \cdot 24,4 \cdot 1,05 = 30,74 \text{ cm}^2$$

$$V_{cRd} = V_{pl,z,Rd} = \frac{40,73 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 834,8$$

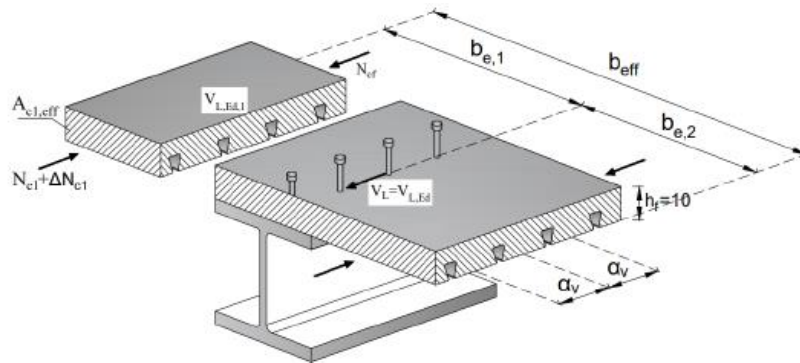
Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{210,98}{834,8} = 0,25 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

Kako na mjestu maksimalnog momenta savijanja nema poprečne sile nije potrebno provoditi M/V interakciju.

#### 9.4.2.4 Provjera uzdužne posmične otpornost betonske pojasnice



Slika 50. Određivanje uzdužnog posmika u betonskoj pojasnici [13]

#### Površina poprečne armature

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \cdot f_{sd} \geq v_{L,Ed} \cdot \frac{h_f}{\cot \theta}$$

Kad je betonska pojasnica u tlaku, uzdužni posmični tok može se odrediti kao:

$$v_{L,Ed} = \frac{\Delta N_{c1}}{a_v} = \frac{V_{L,Ed} \cdot A_{c1,eff}}{a_v \cdot A_{c,eff}}$$

$$V_{L,Ed} = m \cdot \ln(N_{plA}, N_c, \Sigma P_{Rd})$$

$$N_{plA} = 4650,5 \text{ kN}$$

$$\Sigma P_{Rd} = 1685,8 \text{ kN}$$

$$N_{c,f} = 2271,2 \text{ kN}$$

$$v_{L,Ed} = \frac{\Delta N_{c1}}{h_f \cdot a_v} = \frac{V_{L,Ed}}{a_v \cdot 2 \cdot h_f} = \frac{1685,8 \cdot 10^3}{4000 \cdot 2 \cdot 80} = 2,63 \text{ N/mm}^2$$

$a_v$  iznosi  $L/2$  odnosno udaljenost između maksimalnog momenta i ležaja

$$h_f = h_c = 80 \text{ mm}$$

Kako bi se minimalizirala površina poprečne armature odabire se minimalni kut nagiba dijagonale, betonska pojasnica je u tlaku.

$$\theta = 26,5^\circ$$

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \geq \frac{v_{L,Ed}}{f_{sd}} \cdot \frac{h_f}{\cot \theta}$$

Za poprečnu armaturu odabrane su šipke  $\phi 8 / 15 \text{ cm}$  ( $335 \text{ mm}^2/\text{m}$ )

$$335 \text{ mm}^2 / \text{m} \geq \frac{2,63}{435} \cdot \frac{80}{\cot(26,5^\circ)} \cdot 10^3 = 241,15 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

Minimalna poprečna armatura:

$$\rho_{w \text{ min}} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{25}}{500} = 0,0008$$

$$A_c = h_c \cdot b = 80 \cdot 1000 = 80000 \text{ mm}^2$$

$$A_{t \text{ min}} = A_c \cdot \rho_{w \text{ min}} = 80000 \cdot 0,0008 = 64 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$A_{\text{pov}} = 335 \text{ mm}^2 / \text{m} > A_{t \text{ min}} = 64 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

Uvjet je zadovoljen!

#### 9.4.2.5 Provjera betona u tlačnoj dijagonali

$$v_{L \text{ Ed}} \leq v_{Rd} = v \cdot f_{ctd} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$$

$$\text{gdje je } v = 0,6 \cdot \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right)$$

$$v_{Rd} = 0,6 \cdot \left( 1 - \frac{25}{250} \right) \cdot 1,67 \cdot \sin(26,5^\circ) \cdot \cos(26,5^\circ) = 3,6 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$2,63 \text{ N} / \text{mm}^2 \leq 3,6 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Uvjet je zadovoljen!

#### 9.4.3 Granično stanje uporabljivosti

##### 9.4.3.1 Progib kod faze izvedbe

Djelovanja:

AB ploča (mokro stanje)  $g_{c,1} = 2,85 \text{ kN/m}^2$

Čelični profilirani lim  $g_p = 0,141 \text{ kN/m}^2$

Čelični nosači  $g_n = 0,34 \text{ kN/m}^2$

---

Ukupno:  $g_{k,1} = 3,33 \text{ kN/m}^2$

Uporabno opterećenje:  $q_{k,1} = 0,75 \text{ kN/m}^2$

Granična vrijednost progiba:

$$\delta_{\text{tot}} \leq \frac{L}{250} \quad \delta_{\text{var}} \leq \frac{L}{360}$$

**Progib zbog stalnog i promjenjivog djelovanja:**

$$e_d = b \cdot (\gamma_G \cdot g_{k1} + \gamma_Q \cdot q_{k1}) = 3,0 \cdot (1,0 \cdot 3,33 + 1 \cdot 0,75) = 12,24 \text{ kN/m}$$

$$E_a = 21000 \text{ kN/cm}^2 \quad I_a = 19300 \text{ cm}^4$$

$$E_a I_a = 40530 \text{ kNm}^2$$

$$\delta_{0,tot} = \frac{5}{384} \cdot \frac{e_d \cdot l^4}{E_a I_a} = \frac{5}{384} \cdot \frac{12,24 \cdot 8,0^4}{40530} = 0,016 \text{ m} = 16 \text{ mm}$$

$$16,0 \text{ mm} \leq \frac{8000}{250} = 32 \text{ mm}$$

Uvjet je ispunjen!

**Progib zbog promjenjivog djelovanja:**

$$e_d = b \cdot (\gamma_Q \cdot q_{k1}) = 3,0 \cdot (1 \cdot 0,75) = 2,25 \text{ kN/m}$$

$$E_a = 21000 \text{ kN/cm}^2 \quad I_a = 19300 \text{ cm}^4$$

$$E_a I_a = 40530 \text{ kNm}^2$$

$$\delta_{0,tot} = \frac{5}{384} \cdot \frac{e_d \cdot l^4}{E_a I_a} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2,25 \cdot 8,0^4}{40530} = 0,0029 \text{ m} = 2,9 \text{ mm}$$

$$2,9 \text{ mm} \leq \frac{8000}{360} = 22,2 \text{ mm}$$

Uvjet je ispunjen!

**9.4.3.2 Progib kod uporabne faze**

**Djelovanja:**

AB ploča (suho stanje)	$g_{c,2} = 2,79 \text{ kN/m}^2$
Čelični profilirani lim	$g_p = 0,141 \text{ kN/m}^2$
Čelični nosač	$g_n = 0,34 \text{ kN/m}^2$
Dodatno stalno (slojevi poda, pregradni zidovi...)	$1,5 \text{ kN/m}^2$
Završni radovi (glazura, instalacije...)	$1,5 \text{ kN/m}^2$
<b>Ukupno:</b>	<b><math>g_{k,2} = 6,27 \text{ kN/m}^2</math></b>
<b>Uporabno opterećenje:</b>	<b><math>q_{k,2} = 2,0 \text{ kN/m}^2</math></b>



**Određivanje koeficijenta puzanja i skupljanja:**

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot h_c \cdot b}{b} = 2 \cdot h_c = 160 \text{ mm}$$

Za relativnu vlažnost RH 50%, razred betona C25/30, tip cementa S koeficijenti puzanja su:

$$\rho_t = \rho (\varphi, t_0 = 1 \text{ dan}) = 5,8$$

$$\rho_t = \rho (\varphi, t_0 = 28 \text{ dana}) = 2,8$$

**Efektivna krutost spregnutog nosača:**

$$EI = E_a \cdot I_a + E_L \cdot I_c + \frac{E_a \cdot A_a \cdot E_L \cdot A_c}{E_a \cdot A_a + E_L \cdot A_c} \cdot a^2$$

**Kratkotrajno opterećenje:**

$$E_a = 21000 \text{ kN/cm}^2 \quad I_a = 19300 \text{ cm}^4 \quad A_a = 131,0 \text{ cm}^2$$

$$I_c = \frac{b_{\text{eff}} \cdot h^3}{12} = \frac{200 \cdot 13^3}{12} = 36616,67 \text{ cm}^4$$

$$A_c = b_{\text{eff}} \cdot h = 200 \cdot 13 = 2600 \text{ cm}^2$$

Razmak između težišta betonske pojasnice i čeličnog nosača:

$$a = 0,5 \cdot (h + h_a) = 0,5 \cdot (13 + 28) = 20,5 \text{ cm}$$

$$n_c = 1,0$$

$$E_0 = \frac{E_{\text{cm}}}{n_c} = \frac{3100,0}{1,0} = 3100 \text{ kN/cm}^2, E_L = E_0$$

$$EI_0 = 21000 \cdot 19300 + 3100 \cdot 36616,67 + \frac{21000 \cdot 131 \cdot 3100 \cdot 2600}{21000 \cdot 131 + 3100 \cdot 2600} \cdot 20,5^2$$

$$EI_0 = 520862649 \text{ kNcm}^2 = 52086 \text{ kNm}^2$$

**Konstantno stalno opterećenje:**

$$n_c = 1,0 + 1,1 \cdot \varphi (\varphi, t_0) = 1,0 + 1,1 \cdot 2,8 = 4,08$$

$$E_p = \frac{E_{\text{cm}}}{n_c} = \frac{3100,0}{4,08} = 760 \text{ kN/cm}^2, E_L = E_p$$

$$EI_p = 21000 \cdot 19300 + 760 \cdot 36616,67 + \frac{21000 \cdot 131 \cdot 760 \cdot 2600}{21000 \cdot 131 + 760 \cdot 2600} \cdot 20,5^2$$

$$EI_p = 916409590 \text{ kNcm}^2 = 91641 \text{ kNm}^2$$

**Primarno naprezanje od skupljanja:**

$$n_c = 1,0 + 0,55 \cdot \varphi(\infty, t_0) = 1,0 + 0,55 \cdot 5,8 = 4,19$$

$$E_s = \frac{E_{cm}}{n_c} = \frac{3100,0}{4,19} = 740 \text{ kN/cm}^2, E_L = E_s$$

$$EI_s = 21000 \cdot 19300 + 740 \cdot 36616,67 + \frac{21000 \cdot 131 \cdot 740 \cdot 2600}{21000 \cdot 131 + 740 \cdot 2600} \cdot 20,5^2$$

$$EI_s = 908193407 \text{ kNcm}^2 = 90819 \text{ kNm}^2$$

### Proračun pojedinih udjela progiba:

#### **Stalno djelovanje za vrijeme $t=0$ (početak opterećivanja):**

$$e_d = b \cdot g_{k,2} = 3,0 \cdot 6,27 = 18,81 \text{ kN/m}$$

$$EI_0 = 52086 \text{ kNm}^2$$

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{e_d \cdot l^4}{EI_0} = \frac{5}{384} \cdot \frac{18,81 \cdot 8,0^4}{52086} = 0,019 \text{ m} = 19 \text{ mm}$$

#### **Promjenjivo djelovanje od učestale kombinacije za vrijeme početka opterećivanja $t=0$**

za poslovne prostore  $\psi = 0,5$

$$e_d = b \cdot \psi_1 \cdot q_{k,2} = 3 \cdot 0,5 \cdot 2,0 = 3,0 \text{ kN/m}$$

$$EI_0 = 52086 \text{ kNm}^2$$

$$\delta_{2,1} = \frac{5}{384} \cdot \frac{e_d \cdot l^4}{EI_0} = \frac{5}{384} \cdot \frac{3,0 \cdot 8,0^4}{52086} = 0,003 \text{ m} = 3 \text{ mm}$$

#### **Puzanja pod kvazistalnim djelovanjem za vrijeme $t=\infty$**

$$e_d = b \cdot g_{k,2} + b \cdot \psi_1 \cdot q_{k,2} = 3,0 \cdot 6,27 + 3,0 \cdot 0,5 \cdot 2,0 = 21,81 \text{ kN/m}$$

$$EI_0 = 52086 \text{ kNm}^2$$

$$EI_p = 91641 \text{ kNm}^2$$

$$\delta_{2,2} = \frac{5}{384} \cdot \frac{e_d \cdot l^4}{EI_0} - \frac{5}{384} \cdot \frac{e_d \cdot l^4}{EI_p} = \frac{5}{384} \cdot \frac{21,81 \cdot 8,0^4}{52086} - \frac{5}{384} \cdot \frac{21,81 \cdot 8,0^4}{91641}$$

$$\delta_{2,2} = 0,009 = 9 \text{ mm}$$

### **Skupljanje**

$$\varepsilon_{cs}(\infty) = 4,14 \cdot 10^{-4}$$

$$N_{cs} = \varepsilon_{cs}(\infty) \cdot E_s \cdot A_c = 4,14 \cdot 10^{-4} \cdot 740 \cdot 2600 = 796,54 \text{ kN}$$

$$a_c = \frac{E_a \cdot A_a}{E_a \cdot A_a + E_s \cdot A_c} \cdot a = \frac{21000 \cdot 131}{21000 \cdot 131 + 740 \cdot 2600} \cdot 20,5 = 12,06 \text{ cm}$$

$$M_{cs} = N_{cs} \cdot a_c = 796,54 \cdot \frac{12,06}{100} = 96,06 \text{ kNm}$$

$$\delta_{2,3} = \frac{1}{8} \cdot \frac{M_{cs} \cdot L^2}{EI_s} = \frac{1}{8} \cdot \frac{96,06 \cdot 8,0^2}{90819} = 0,008 \text{ m} = 8 \text{ mm}$$

Utjecaj posmične veze na proračun progiba možemo zanemariti jer je zadovoljen uvjet  $n/n_f \geq 0,5$

#### Progib od stalnog opterećenja:

$$\delta_1 = 19 \text{ mm}$$

#### Progib od promjenjivog opterećenja:

$$\delta_2 = \sum \delta_{2,i} = 3,0 + 9,0 + 8,0 = 20 \text{ mm}$$

#### Ukupni progib od svih djelovanja:

$$\delta_{tot} = \delta_1 + \delta_2 = 20,0 + 19,0 = 39,0 \text{ mm} > \frac{L}{250} = \frac{8000}{250} = 32 \text{ mm}$$

**Progib ne zadovoljava uvjet**, ali kad se uzme u obzir nadvišenje nosača uvjet je zadovoljen

#### Ukupni progib od promjenjivog djelovanja:

$$\delta_{var} = 20 \text{ mm} \leq \frac{L}{360} = \frac{8000}{360} = 22,2 \text{ mm}$$

Progib zadovoljava uvjet!

### 9.4.3.3 Nadvišenje čeličnog nosača

Nadvišenje se izvodi za stalno opterećenje, puzanje i skupljanje

$$\delta_P = \delta_1 + \delta_{2,2} + \delta_{2,3} = 19 + 9 + 8 = 36 \text{ mm}$$

### 9.4.3.4 Dokaz vibracije nosača

Za proračun vibracije nosača uzima se vlastita težina za spregnuto stanje i pojednostavljena krutost na savijanje za kratkotrajno opterećenje

$$e_d = b \cdot g_{k2} = 3,0 \cdot 6,27 = 18,81 \text{ kN/m}$$

$$EI_0 = 52086 \text{ kNm}^2$$

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{e_d \cdot l^4}{EI_0} = \frac{5}{384} \cdot \frac{18,81 \cdot 8,0^4}{52086} = 0,019 \text{ m} = 19 \text{ mm}$$

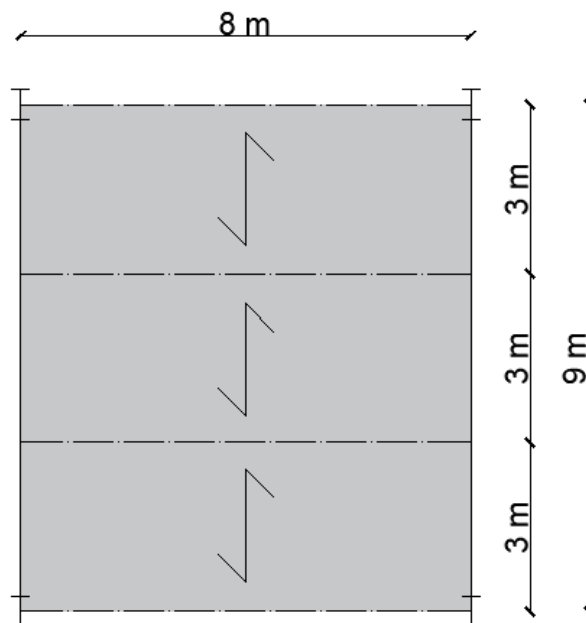
$$f = \frac{18}{\sqrt{\delta_1}} = \frac{18}{\sqrt{19}} = 4,1 \geq 4 \text{ Hz}$$

#### 9.4.3.5 Dokaz pukotina u betonu

Dokaz ograničenja širine pukotina kod jednostavno oslonjenih nosača nije potrebno provesti i samo se predviđa minimalno armiranje.

Usvojen profil sekundarnog nosača je: HEB280

### 9.5 Dimenzioniranje ploče



Slika 51. Statički sustav i položaj spregnute ploče

Djelovanja za fazu izvedbe:

AB ploča (mokro stanje)

$$g_{c,1} = 2,85 \text{ kN/m}^2$$

Čelični profilirani lim  $g_p=0,141 \text{ kN/m}^2$

Ukupno:  $g_{k,1}=3,0 \text{ kN/m}^2$

Uporabno opterećenje:  $q_{k,1}=0,75 \text{ kN/m}^2$

Djelovanja za uporabnu fazu:

AB ploča (suho stanje)  $g_{c,2}=2,79 \text{ kN/m}^2$

Čelični profilirani lim  $g_p=0,141 \text{ kN/m}^2$

Dodatno stalno (slojevi poda, pregradni zidovi...)  $1,5 \text{ kN/m}^2$

Završni radovi (glazura, instalacije...)  $1,5 \text{ kN/m}^2$

Ukupno:  $g_{k,2}=5,93 \text{ kN/m}^2$

Uporabno opterećenje:  $q_{k,2}=2,0 \text{ kN/m}^2$

Karakteristike materijala:

Beton C25/30 :  $f_{ck}=25 \text{ N/mm}^2$

$f_{cd}=16,7 \text{ N/mm}^2$

$0,85 \cdot f_{cd}=17 \text{ N/mm}^2$

$E_{cm}=31000 \text{ N/mm}^2$

Armatura:  $f_{sk}=500 \text{ N/mm}^2$

$f_{sd}=500/1,15=435 \text{ N/mm}^2$

Profilirani lim:  $t=1 \text{ mm}$

$h_p=50 \text{ mm}$

$A_p=A_{pe}=17,92 \text{ cm}^2/\text{m}$

$I_p=75,90 \text{ cm}^4/\text{m}$

$E_p=E_a=210000 \text{ N/mm}^2/\text{m}$

$f_{yp,k}=450 \text{ N/mm}^2$

$f_{yp,d}=450 \text{ N/mm}^2$

Plastični moment otpora:  $M_{pa,rk}=450 \text{ kNm/m}$

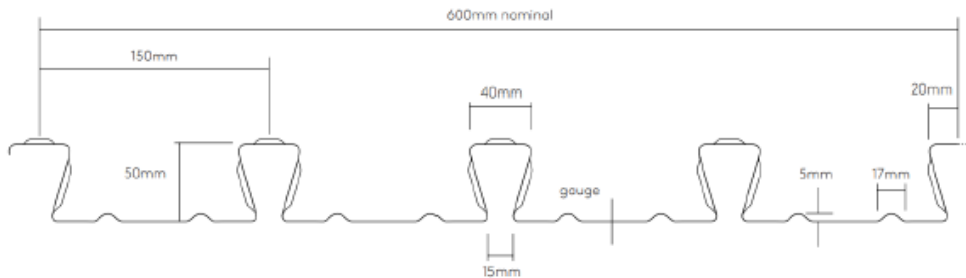
Moment otpora:  $M^+_{Rk}=8,97 \text{ kNm/m}$

$$M_{Rk} = 7,99 \text{ kNm/m}$$

Uzdužna posmična otpornost:

$$\tau_{cRk} = 0,280 \text{ n/mm}^2$$

### 9.5.1 Konstruktivski detalji spregnute ploče



Slika 52. Profil i dimenzije profiliranog lima "Multideck 50"

#### Debljina ploče i armatura

Ukupna visina ploče:

$$h = 130 \text{ mm} \geq 80 \text{ mm} \text{ (zadovoljava)}$$

Debljina betonske pojasnice iznad gornje točke profiliranog lima:

$$h_c = 80 \text{ mm} \geq 40 \text{ mm} \text{ (zadovoljava)}$$

Omjer širine rebara profiliranog lima i razmaka rebara:

$$\frac{b_r}{b_s} = \frac{40}{150} = 0,27 \leq 0,6 \text{ (zadovoljava)}$$

Minimalna armatura u oba smjera ne smije biti manja od:

$$A_s = 80 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$A_{s_{min}} = 0,004 \cdot h_c \cdot b = 0,004 \cdot 80 \cdot 1000 = 320 \text{ mm}^2 / \text{m} \rightarrow m \text{ prodavno}$$

Pretpostavka :  $\phi 10 / 160 \text{ mm}$

$$A_s = \frac{1^2 \pi}{4} \cdot \frac{1000}{160} = 491 \text{ mm}^2 / \text{m} > A_{s_{min}}$$

Razmak šipki armature:

$$e = 160 \text{ mm} < 2 \cdot h = 2 \cdot 130 = 260 \text{ mm ili } < 350 \text{ mm (zadovoljava)}$$

### Dužine oslanjanja i preklapanja limova:

**Tablica 34.** Minimalne duljine oslanjanja profiliranog lima

Duljine ležajeva:	$l_{bs}$ (mm)	$l_{bc}$ (mm)
čelik ili beton	50	75
ostali materijali	70	100

Za spregnute ploče, minimalna duljina oslanjanja profiliranog lima na čelični ležaj iznosi  $l_{bs}=50$  mm (tablica 34). Spregnuta ploča se oslanja na čelične nosače HEB280, čija je gornja pojasnica ( $b_f=280$  mm) šira od zahtijevanih 50 mm, stoga je ovaj uvjet zadovoljen.

## 9.5.2 Granično stanje nosivosti

### 9.5.2.1 Faza izvedbe

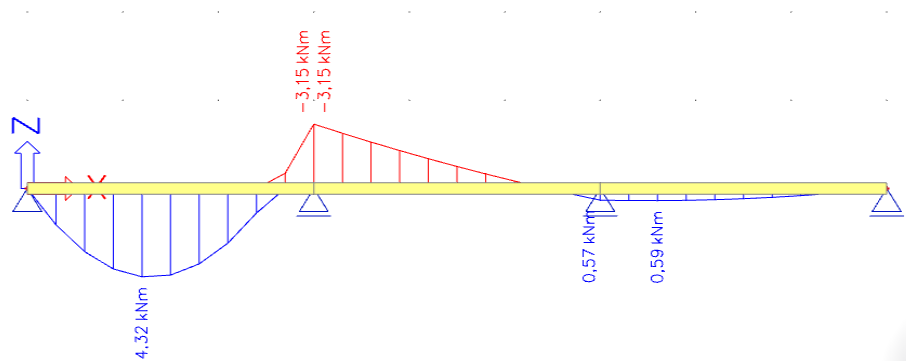
Profilirani čelični lim djeluje kao oplata i nosi vlastitu težinu, težinu svježeg betona te servisno opterećenje.

#### Maksimalni pozitivni moment savijanja:

$$e_{d,p} = \gamma_G \cdot g_p = 1,35 \cdot 0,141 = 0,19 \text{ kN / m}^2$$

$$e_{d,c1} = \gamma_G \cdot g_{c1} = 1,35 \cdot 2,85 = 3,85 \text{ kN / m}^2$$

$$e_{d,k1} = \gamma_Q \cdot g_{k1} = 1,5 \cdot 0,75 = 1,13 \text{ kN / m}^2$$



**Slika 53.** Dijagram maksimalnog pozitivnog momenta savijanja

Karakteristična vrijednost momenta otpornosti profiliranog lima je propisana od proizvođača. Dokaz pouzdanosti provodi se u skladu sa EN 1993-1-3, te vrijedi:

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{8,97}{1,0} = 8,97 \text{ kNm / m}$$

Dokaz pouzdanosti:

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

$$\frac{4,32}{8,97} = 0,48 \leq 1,0$$

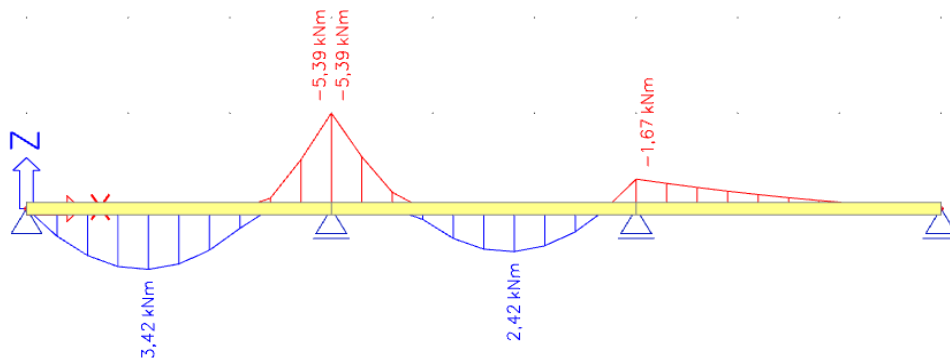
Uvjet je zadovoljen!

Maksimalni negativni moment savijanja:

$$e_{d,p} = \gamma_G \cdot g_p = 1,35 \cdot 0,141 = 0,19 \text{ kN / m}^2$$

$$e_{d,c1} = \gamma_G \cdot g_{c1} = 1,35 \cdot 2,85 = 3,85 \text{ kN / m}^2$$

$$e_{d,k1} = \gamma_Q \cdot g_{k1} = 1,5 \cdot 0,75 = 1,13 \text{ kN / m}^2$$



Slika 54. Dijagram maksimalnog negativnog momenta savijanja

Karakteristična vrijednost momenta otpornosti profiliranog lima je propisana od proizvođača. Dokaz pouzdanosti provodi se u skladu sa EN 1993-1-3, te vrijedi:

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{7,99}{1,0} = 7,99 \text{ kNm / m}$$

Dokaz pouzdanosti:



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

$$\frac{5,39}{7,99} = 0,67 \leq 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### 9.5.2.2 Uporabna faza

Kontinuirane spregnute ploče možemo promatrati kao niz jednostavno oslonjenih nosača.

$$M_{Ed} = \frac{(\gamma_G \cdot \Sigma g_k + \gamma_Q \cdot q_k) \cdot L^2}{8}$$

$$M_{Ed} = \frac{(1,35 \cdot 5,93 + 1,5 \cdot 2,0) \cdot 3,0^2}{8} = 12,38 \text{ kNm /m}$$

$$V_{Ed} = \frac{(\gamma_G \cdot \Sigma g_k + \gamma_Q \cdot q_k) \cdot L}{2}$$

$$V_{Ed} = \frac{(1,35 \cdot 5,93 + 1,5 \cdot 2,0) \cdot 3,0}{2} = 16,51 \text{ kN /m}$$

#### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje:

Pretpostavlja se da neutralna os leži na gornjem rubu profiliranog čeličnog lima. Proračunska vrijednost uzdužne sile  $N_{c,f}$  iznosi:

$$N_{c,f} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot h_c \cdot b$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$N_{c,f} = 0,85 \cdot 16,7 \cdot 80,0 \cdot 1000 \cdot 10^{-3} = 1135,6 \text{ kN /m}$$

Maksimalna vlačna otpornost profiliranog lima:

$$N_p = f_{yp,d} \cdot A_{pe}$$

$$N_p = 450,0 \cdot 1792 \cdot 10^{-3} = 806,4 \text{ kN /m}$$

Budući da je  $N_p < N_{c,f}$ , plastična neutralna os leži u betonu.

Položaj plastične neutralne osi u spregnutom presjeku  $x_{pl}$  je:

$$x_{pl} = \frac{A_p \cdot f_{yp,d}}{0,85 \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{806400}{0,85 \cdot 1000 \cdot 16,7} = 56,0 \text{ mm} < h_c = 80,0 \text{ mm}$$

#### Plastična otpornost na savijanje:

$$M_{pl,Rd} = m \cdot \ln(N_{c,f} \cdot N_p) \cdot z$$

$$M_{pl,Rd} = N_p \cdot \left( d_p - \frac{x_{pl}}{2} \right) = 806,4 \cdot \left( 113,9 - \frac{56,0}{2} \right) \cdot 10^{-3} = 68,54 \text{ kNm /m}$$

Uvjet:

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

$$\frac{12,38}{68,54} = 0,18 \leq 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### **Uzdužna posmična otpornost:**

Zahtijevan posmični raspon za puno sprezanje određuje se prema izrazu:

$$N_c = \tau_{u,Rd} \cdot b \cdot L_x \leq N_{c,f}$$

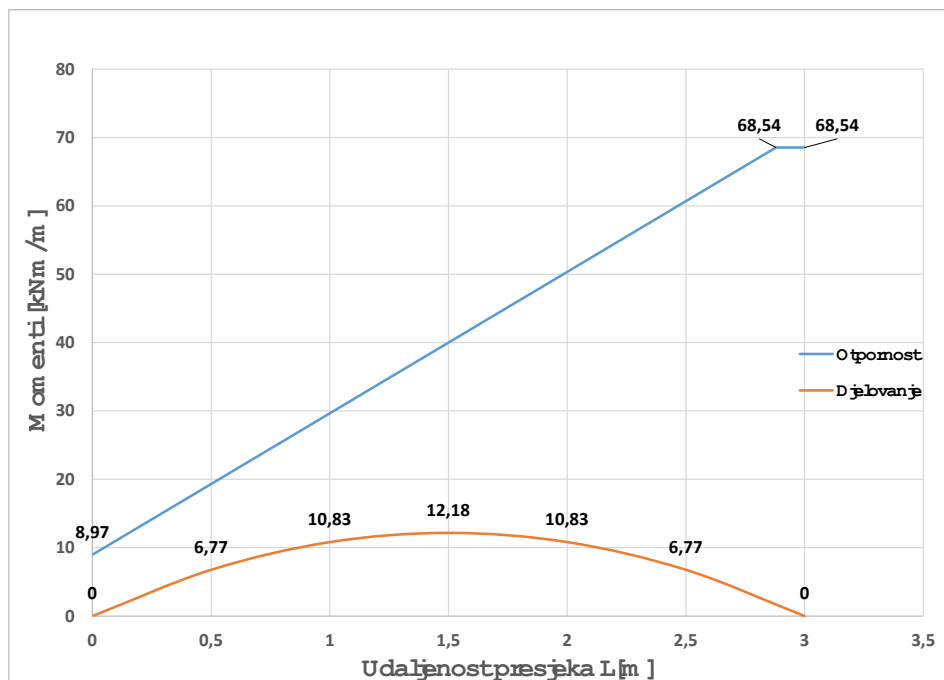
Proračunska posmična čvrstoća:

$$\tau_{u,Rd} = \frac{\tau_{u,Rk}}{\gamma_{vs}} = \frac{0,280}{1,0} = 0,280 \text{ N /mm}^2$$

Udaljenost do najbližeg ležaja  $L_x$ , za ostvarenje pune posmične veze:

$$L_x = \frac{N_c}{\tau_{u,Rd} \cdot b} = \frac{A_p \cdot f_{yd}}{\tau_{u,Rd} \cdot b}$$

$$L_x = \frac{1792 \cdot 450}{0,280 \cdot 1000} = 2880 \text{ mm} > L/2 = 3000/2 = 1500 \text{ mm}$$



Slika 55. Dokaz nosivosti na uzdužni posmik

Uvjet nosivosti na uzdužni posmik je zadovoljen (slika 55.)

#### Vertikalna posmična otpornost:

$$V_{Rd,c} = (C_{Rd,c} \cdot k \cdot 100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \geq v_{min} \cdot b_w \cdot d$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_p}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{113,9}} = 2,33 \rightarrow k \leq 2,0$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d_p} \leq 0,02$$

$$b_w = \frac{b}{b_s} \cdot b_0 = \frac{1000}{150} \cdot 110 = 733,33 \text{ mm / m}$$

$$\rho_1 = \frac{1792}{733,33 \cdot 113,9} = 0,02 = 0,02$$

$$\text{Usvojeno } \rho_1 = 0,02$$

$$\sigma_{\varphi} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = 0$$

$$k_1 = 0,15$$

Računska vrijednost posmične otpornosti  $V_{V,Rd}$

$$V_{v,Rd} = V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \cdot k \cdot \rho_1 \cdot f_{ck}^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d_p$$

$$V_{v,Rd} = \left[ 0,12 \cdot 2,0 \cdot 100 \cdot 0,02 \cdot 25^{1/3} + 0,15 \cdot 0 \right] \cdot 733,33 \cdot 113,9 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{v,Rd} = 73,85 \text{ kN / m}$$

$$V_{v,Rd,min} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d_p$$

$$v_{min} = 0,035 k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,035 \cdot 2,0^{3/2} \cdot 25^{1/2} = 0,49 \text{ N / m m}^2$$

$$V_{v,Rd,min} = (0,49 + 0,15 \cdot 0) \cdot 733,33 \cdot 113,9 \cdot 10^{-3} = 40,9 \text{ kN / m} < V_{v,Rd} = 73,85 \text{ kN / m}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{v,Rd}} = \frac{16,51}{73,85} = 0,22 \leq 1,0$$

Uvjet zadovoljen!

### 9.5.3 Granično stanje uporabljivosti

#### Provjera raspucavanja betona

Ploča se proračunava kao jednostavno oslonjena te zahtijeva se samo armatura za ograničenje širine pukotina.

Minimalna površina poprečnog presjeka armature  $A_s$  iznad rebra profiliranog čeličnog lima ne smije biti manja od 0,4% površine betona iznad rebara:

$$m_{in} A_s = 0,004 \cdot b \cdot h_c = 0,004 \cdot 1000 \cdot 80 = 320,0 \text{ mm}^2 / m$$

$$\text{Odabrano je: } \phi 10 / 160 = 491 \text{ mm}^2 / m > m_{in} A_s = 320 \text{ mm}^2 / m$$

#### Ograničenje vitkosti ploče

Proračun progiba se može zanemariti ako su ispunjeni sljedeću uvjeti:

- $\frac{L}{d} < 26$  za vanjska polja kontinuirane ploče
- $\frac{L}{d} < 30$  za unutarnje polje kontinuirane ploče

$$\frac{L}{d} = \frac{3000}{113,9} = 26,34 > 26$$

$$\frac{L}{d} = \frac{3000}{113,9} = 26,34 < 30$$

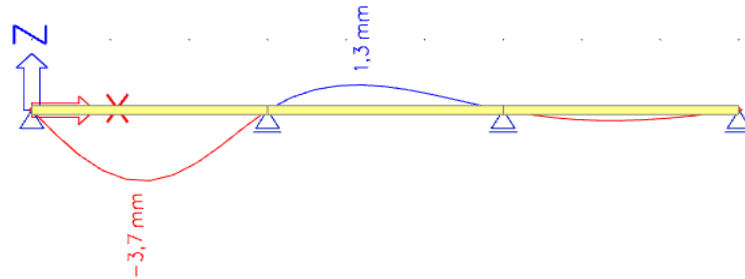
Prvi uvjet nije zadovoljen znači da se ne može izostaviti provjera progiba.

#### 9.5.3.1 Proračun progiba

#### Faza izvedbe:

$$e_{d,p} = \gamma_G \cdot g_p = 1,0 \cdot 0,141 = 0,141 \text{ kN / m}^2$$

$$e_{d,c} = \gamma_G \cdot g_c = 1,0 \cdot 2,85 = 2,85 \text{ kN / m}^2$$



Slika 56. Deformacija za fazu izvedbe

Progib profiliranog lima ne smije biti veća od:

$$\delta_{m \max} = \frac{L}{180} = \frac{3000}{180} = 16,66 \text{ mm}$$

$$\delta_s = 3,7 \text{ mm} < 16,66 \text{ mm}$$

Uvjet je zadovoljen!

**Uporabna faza:**

$$n = \frac{E_a}{E'_{cm}} = \frac{210000}{\frac{2}{3} \cdot 31000} = 10,2$$

Moment površine drugog stupnja za raspucani poprečni presjek proračunava se prema izrazu:

$$I_{\text{cc}} = \frac{b \cdot x_c^3}{3 \cdot n} + A_p \cdot (d_p - x_c)^2 + I_p$$

$$x_c = \frac{\sum A_i \cdot z_i}{\sum A_i} = \frac{n \cdot A_p}{b} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot d_p}{n \cdot A_p}} - 1 \right)$$

$$x_c = \frac{10,2 \cdot 1792}{1000} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 1000 \cdot 113,9}{10,2 \cdot 1792}} - 1 \right) = 48,79 \text{ mm}$$

$$I_{\text{cc}} = \frac{1000 \cdot 48,79^3}{3 \cdot 10,2} + 1792 \cdot (113,9 - 48,79)^2 + 75,9 \cdot 10^4 = 12,15 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 / \text{m}$$

Moment površine drugog stupnja za neraspucani poprečni presjek proračunava se prema izrazu:

$$I_{\text{cu}} = \frac{b \cdot h_c^3}{12 \cdot n} + \frac{b \cdot h_c}{n} \cdot \left( x_u - \frac{h_c}{2} \right)^2 + \frac{b_m \cdot h_p^3}{12 \cdot n} + \frac{b_m \cdot h_p}{n} \cdot \left( h - x_u - \frac{h_p}{2} \right)^2 + A_p \cdot (d_p - x_u)^2 + I_p$$

$$x_u = \frac{b \cdot \frac{h_c^2}{2} + b_m \cdot h_p \cdot \left( h - \frac{h_p}{2} \right) + n \cdot A_p \cdot d_p}{b \cdot h_c + b_m \cdot h_p + n \cdot A_p}$$

$$b_0 = 150 - 40 = 110 \text{ mm}$$

$$b_m = \frac{b}{b_s} \cdot b_0 = \frac{1000}{150} \cdot 110 = 733,33 \text{ mm} / \text{m}$$

$$x_u = \frac{1000 \cdot \frac{80,0^2}{2} + 733,33 \cdot 50,0 \cdot \left( 130,0 - \frac{50,0}{2} \right) + 10,2 \cdot 1792 \cdot 113,9}{1000 \cdot 80,0 + 733,33 \cdot 50,0 + 10,2 \cdot 1792} = 67,67 \text{ mm}$$

$$I_{\text{cu}} = \frac{1000 \cdot 80^3}{12 \cdot 10,2} + \frac{1000 \cdot 80}{10,2} \cdot \left( 67,67 - \frac{80}{2} \right)^2 + \frac{733,33 \cdot 50,0^3}{12 \cdot 10,2} +$$

$$\frac{733,33 \cdot 50,0}{10,2} \cdot \left( 130,0 - 67,67 - \frac{50,0}{2} \right)^2 + 1792 \cdot (113,9 - 67,67)^2 + 75,9 \cdot 10^4$$

$$I_{\text{cu}} = 20,51 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 / \text{m}$$

Srednja vrijednost momenta površine 2. stupnja betonskog presjeka:

$$I_c = \frac{I_{\text{cc}} + I_{\text{cu}}}{2} = \frac{12,15 \cdot 10^6 + 20,51 \cdot 10^6}{2} = 16,33 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 / \text{m}$$

Progib za korisno opterećenje:

$$q_d = \gamma_Q \cdot q_{k1} = 1,0 \cdot 2,0 = 2,0 \text{ kN / m}^2$$

$$\delta_1 = \frac{0,0099 \cdot q_d \cdot L^4}{E \cdot I_c} = \frac{0,0099 \cdot 2,0 \cdot 3000^4}{210000 \cdot 16,33 \cdot 10^6} = 0,46 \text{ mm}$$

**Progib za stalno opterećenje:**

$$e_{d,c} = \gamma_Q \cdot g_{k2} = 1,0 \cdot 5,93 = 5,93 \text{ kN / m}^2$$

$$\delta_2 = \frac{0,0068 \cdot g_{k2} \cdot L^4}{E \cdot I_c} = \frac{0,0068 \cdot 5,93 \cdot 3000^4}{210000 \cdot 16,33 \cdot 10^6} = 0,95 \text{ mm}$$

**Ukupni progib:**

$$\delta_{ukupno} = \delta_1 + \delta_2 = 0,46 + 0,95 = 1,41 \text{ mm}$$

$$\delta_{ukupno} = 1,41 \text{ mm} \leq \frac{L}{250} = \frac{3000}{250} = 12 \text{ mm}$$

Uvjet je zadovoljen!

**Usvojen profil ploče je: "Multideck 50" debljine 13 cm.**

**Tablica 35.** Iskoristivost odabranih profila

Element konstrukcije:	Profil:	Iskoristivost
Stup	HEM 450	79% (GSN)
Glavni nosač	HEB 450	76% (GSN)
Stabilizacija	CHS 219,1x8	98% (GSN)
Sekundarni nosač	HEB 280	99% (GSU)
Ploča	Multideck 50, d=13 cm	67% (GSN)

## 9.6 Granično stanje uporabljivosti konstrukcije

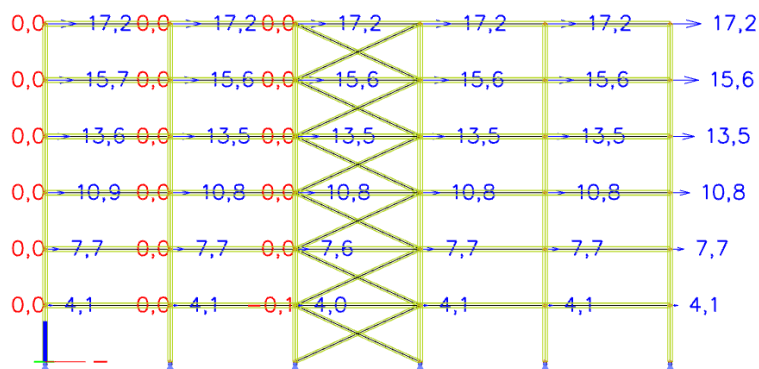
Maksimalni dopušteni međukatni pomak konstrukcije iznosi:

$$d_{m \text{ ax}} = \frac{h}{300} = \frac{3600}{300} = 12 \text{ mm}$$

Maksimalni dopušteni ukupni pomak konstrukcije iznosi:

$$U_{m \max} = \frac{H}{500} = \frac{21600}{500} = 43,2 \text{ mm}$$

### 9.6.1 Kontrola pomaka za x smjer



Slika 57. Pomak konstrukcije u x smjeru

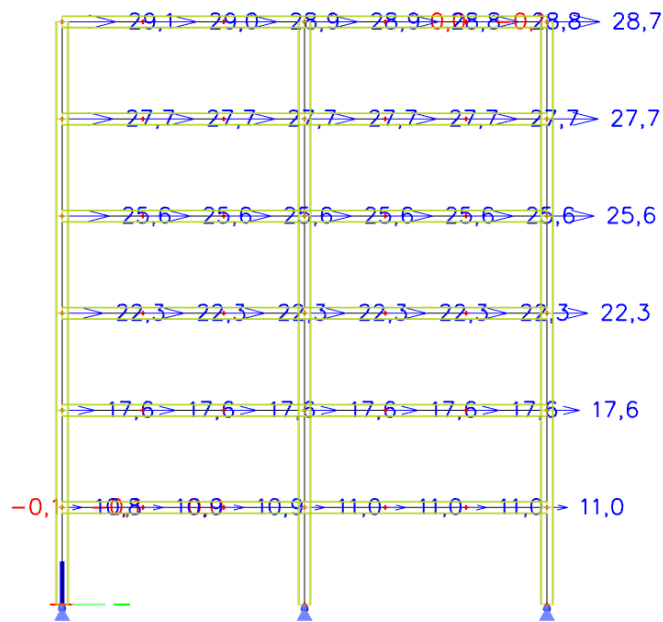
Tablica 36. Maksimalni pomaci konstrukcije u x smjeru

Razina [m]	$U_x$ [mm]	$drU_x$ [mm]
+3,6	4,1	4,1
+7,2	7,7	3,6
+10,8	10,8	3,1
+14,4	13,5	2,7
+18,0	15,6	2,1
+21,6	17,2	1,6

Međukatni i ukupni pomak konstrukcije u smjeru x je manji od maksimalno dopuštenog. (tablica 36)



### 9.6.2 Kontrola pomaka za y smjer



Slika 58. Pomak konstrukcije u y smjeru

Tablica 37. Maksimalni pomaci konstrukcije u x smjeru

Razina [m]	U <sub>y</sub> [mm]	drU <sub>y</sub> [mm]
+3,6	11,0	11,0
+7,2	17,6	7,6
+10,8	22,3	4,7
+14,4	25,6	3,3
+18,0	27,7	1,1
+21,6	28,7	1,0

Međukatni i ukupni pomak konstrukcije u smjeru y je manji od maksimalno dopuštenog. (tablica 37)

## 10 PRORAČUN KONSTRUKCIJE NA DJELOVANJE POTRESA

### 10.1 Seizmička analiza

Seizmička analiza je proces procjene odgovora konstrukcije na seizmička djelovanja, odnosno potrese. Cilj seizmičke analize je osigurati da konstrukcija može izdržati potresna opterećenja bez značajnih oštećenja ili kolapsa.

Od četiri metode seizmičke analize navedene u normi mogu se istaknuti dvije osnovne metode:

- Linearna statička analiza
- Linearna dinamička analiza

**Linearna statička analiza** (ekvivalentna statička metoda) temelji se na pretpostavci da se seizmičko opterećenje može prikazati kao statička sila raspoređena na konstrukciju. Koristi se za jednostavne, manje fleksibilne zgrade u područjima nižeg seizmičkog rizika. Statičko opterećenje računa se prema masi zgrade i seizmičkom koeficijentu, ali metoda ne uzima u obzir složene dinamičke efekte, čineći je pogodnom za brze procjene stabilnosti.

**Linearna dinamička seizmička analiza** preciznija je jer uzima u obzir stvarno ponašanje konstrukcije pod seizmičkim utjecajem, uključujući prirodne frekvencije i modove vibracija. Ova metoda koristi se za kompleksne konstrukcije i one u visoko rizičnim područjima. Dva glavna pristupa su spektralna analiza, koja procjenjuje odziv konstrukcije koristeći spektralne razdiobe ubrzanja, te nelinearna vremenska analiza, koja simulira stvarni tijek potresa radi visoke preciznosti kod kritičnih objekata.

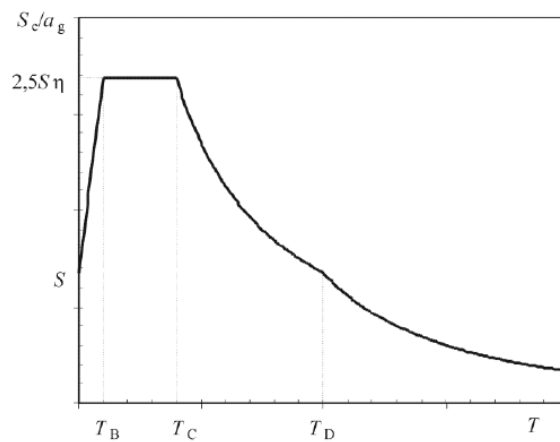
Obje metode su definirane i specificirane u normama poput HRN EN 1998, koje pružaju smjernice za projektiranje konstrukcija otpornih na potres.

U ovom radu primijenjena je linearna dinamička metoda spektra odziva (modalna analiza).

#### 10.1.1 Linearna dinamička metoda spektra odziva

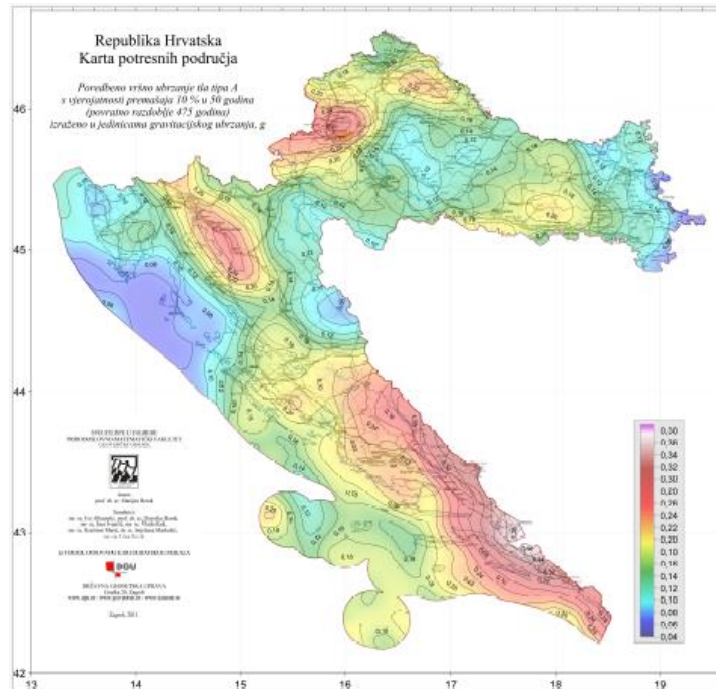
Linearna dinamička metoda spektra odziva koristi se za seizmičku analizu konstrukcija uzimajući u obzir dinamičke karakteristike sustava, kao što su prirodne frekvencije i modalni oblici vibracija. Temelji se na spektru odziva, koji definira maksimalne odzive konstrukcije na seizmička djelovanja u odnosu na njezine vlastite frekvencije. Modalna analiza se provodi kako bi se identificirali ključni modovi vibracija, pri čemu se svaki mod posebno analizira, a

rezultati se kasnije kombiniraju u skladu s propisanim normama za seizmički proračun. Metoda pretpostavlja linearnost, što znači da se ponašanje konstrukcije na potresna opterećenja smatra proporcionalnim, odnosno da su sila i pomaci linearno povezani. Spektar odziva koristi se za izračun seizmičkih sila u svakom od modalnih oblika, omogućujući analizu odziva konstrukcije pod utjecajem različitih frekvencija potresa. Ova metoda prikladna je za analize složenijih konstrukcija, višekatnica te objekata smještenih u područjima s visokim seizmičkim rizikom, jer omogućuje preciznu procjenu ponašanja konstrukcije tijekom potresa, uzimajući u obzir njezine realnije dinamičke karakteristike, te je posebno korisna za složenije i kritične inženjerske objekte. [8]



Slika 59. Elastični spektar odziva [8]

U postupku projektiranja koristi se seizmološka karta koja prikazuje područja s očekivanom intenzitetom potresa. Te karte temelje se na povijesnim podacima o potresima te na geološkim i tektonskim značajkama karakterističnim za određeno područje. Karte su prilagođene različitim povratnim razdobljima za koja su prognozirane, omogućujući projektantima da uzmu u obzir vjerojatnost pojave potresa tijekom vijeka trajanja građevine.



Slika 60. Karta potresnih područja za povratno razdoblje od 475 godina

Pri analizi seizmičkih utjecaja uzimaju se u obzir tri komponente: dvije horizontalne, koje su međusobno okomite, te jedna vertikalna komponenta. U praksi se vertikalna komponenta ubrzanja potresa rijetko koristi, zbog čega se često zanemaruje.

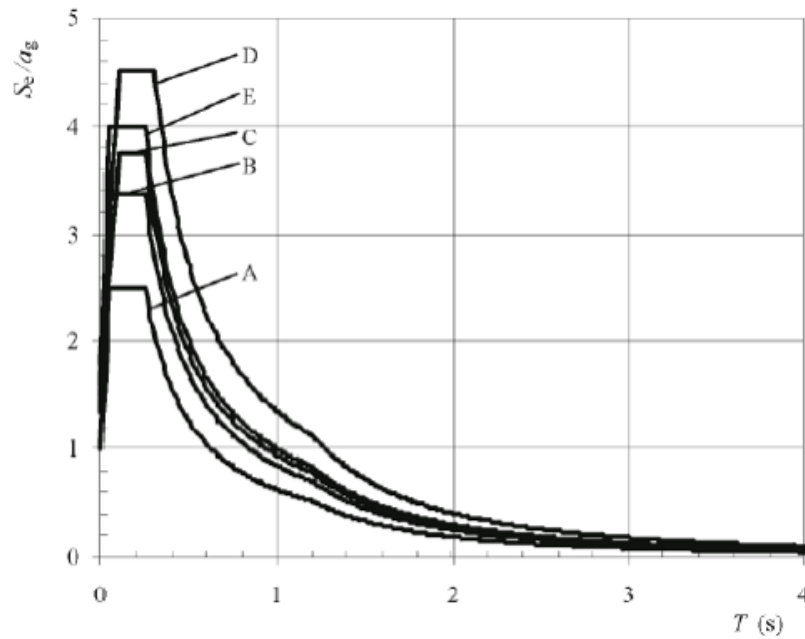
Oblik elastičnog spektra odziva određuju parametri kao što su periodi osciliranja  $T_B$ ,  $T_C$  i  $T_D$ , te parametar tla  $S$ , koji variraju ovisno o vrsti tla. Na primjer, mekana tla imaju dulje periode osciliranja, dok kruta tla imaju kraće periode. Razlikujemo nekoliko vrsta perioda: period potresa (vrijeme trajanja seizmičkog vala), period lokacije (koji uključuje lokalnu geologiju i površinske slojeve tla) te period konstrukcije (koji se odnosi na samu građevinu). Osnovni period konstrukcije definira vrijeme potrebno da se konstrukcija vrati u svoj početni položaj nakon potresa.

U slučaju nedostatka detaljnih geoloških istraživanja, preporučuje se korištenje dviju vrsta spektra odziva: Tip 1 i Tip 2. Ako je očekivana magnituda potresa veća od 5,5, preporučuje se korištenje spektra Tip 1 (tablica 38. i slika 61.). Za manju magnitudu preporučuje se spektralni Tip 2 (tablica 39. i slika 62.).

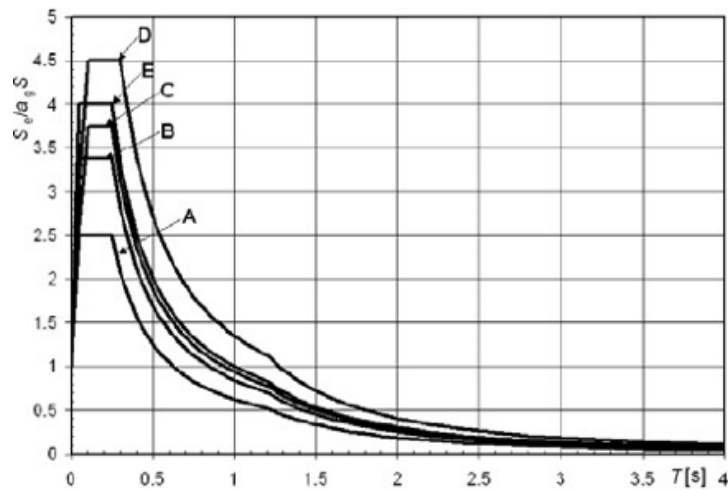
I tlo i građevina posjeduju dinamička svojstva, uključujući vlastiti period i prigušenje. Prema EC 8, koji je korišten u ovom radu, postoji pet tipova tla - od stijene (Tip A) do gline (Tip E). Oštećenja konstrukcija uslijed potresa ovise o ubrzanju tla, trajanju pomaka, frekvencijama, lokalnim uvjetima tla, periodu lokacije, udaljenosti od epicentra, geološkim formacijama, vlastitoj frekvenciji konstrukcije i prigušenju. [8]

**Tablica 38.** Parametri temeljnog tla za horizontalni tip spektra 1 [8]

<i>Kat. tla</i>	<i>S</i>	<i>T<sub>B</sub> [s]</i>	<i>T<sub>C</sub> [s]</i>	<i>T<sub>D</sub> [s]</i>
A	1.0	0.15	0.4	2.0
B	1.2	0.15	0.5	2.0
C	1.15	0.20	0.6	2.0
D	1.35	0.20	0.8	2.0
E	1.4	0.15	0.5	2.0

**Slika 61.** Elastični spektar tipa 1 ovisno o tipu tla uz 5% prigušenja [8]**Tablica 39.** Parametri temeljnog tla za horizontalni tip spektra 2 [8]

<i>Kat. tla</i>	<i>S</i>	<i>T<sub>B</sub> [s]</i>	<i>T<sub>C</sub> [s]</i>	<i>T<sub>D</sub> [s]</i>
A	1.0	0.05	0.25	1.2
B	1.35	0.05	0.25	1.2
C	1.5	0.10	0.25	2.0
D	1.8	0.10	0.30	2.0
E	1.6	0.05	0.25	2.0



Slika 62. Elastični spektar tipa 2 ovisno o tipu tla uz 5% prigušenja [8]

Horizontalna komponenta potresnog djelovanja definira se:

$$0 \leq T \leq T_B; S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left( \frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

(64)

$$T_B \leq T \leq T_C; S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q}$$

(65)

$$T_C \leq T \leq T_D; S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right] \geq \beta \cdot a_g$$

(66)

$$T_D \leq T; S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \geq \beta \cdot a_g$$

(67)

gdje je:

$S_d(T)$  - projektni spektar

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

$a_g$  - projektno ubrzanje tla;  $a_g = \gamma_i \cdot a_{gR}$

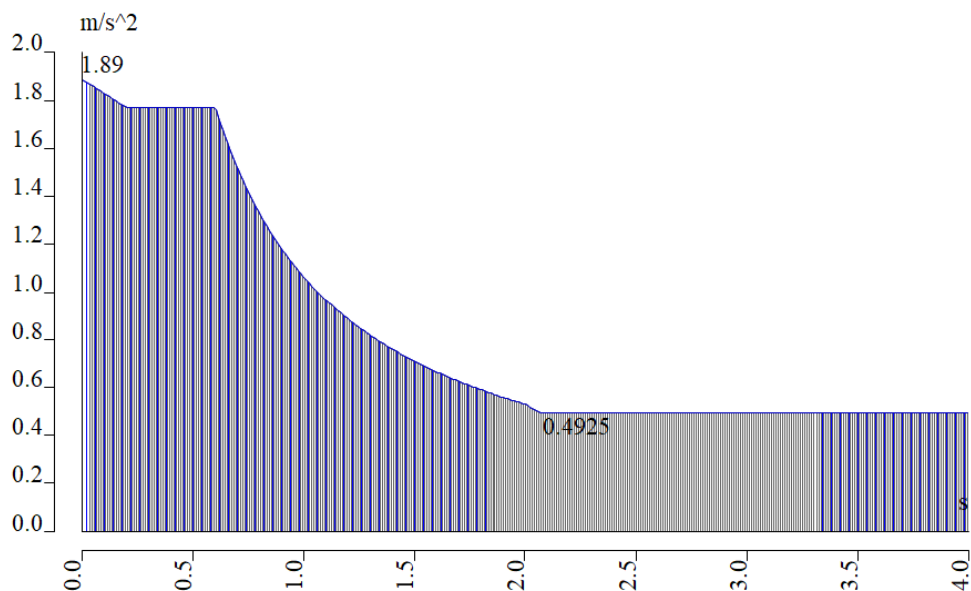
$\gamma_i$  - faktor važnosti građevine

- $a_{gR}$  - vršna akceleracija tla  
 $T_B, T_C, T_D$  - točke (vrijednosti perioda) koje definiraju pojedini dio spektra odziva  
 $S$  - parametar tla  
 $q$  - faktor ponašanja  
 $\beta$  - donja vrijednost faktora horizontalnog spektra odziva;  $\beta = 0,2$

## 10.2 Potresno djelovanje

Za potresno djelovanje konstrukcije korištena su dva horizontalna proračunska spektra odziva, za x i y smjer (slika 63). Ovi spektri temelje se na proračunskom ubrzanju tla od 0,25g, što odgovara povratnom periodu potresa od 475 godina za lokaciju na kojoj se nalazi konstrukcija. Tip tla je C, a primijenjen je spektar tipa 1. Kategorija važnosti građevine je 2, što rezultira faktorom važnosti od 1,0 (vidi Tablicu 4).

Elastični spektar odziva se umanjuje faktorom ponašanja  $q$ , čime se dobiva projektni spektar odziva. Za ovu konstrukciju odabran je srednji razred duktilnosti (DCM), a za oba smjera očitane su vrijednosti faktora ponašanja. Za smjerove x i y, faktor ponašanja  $q$  iznosi 4,0 (vidi Tablicu 5).



Slika 63. Horizontalni proračun spektra odziva za x i y smjer

### 10.3 Dinamički odgovor konstrukcije

Modalna analiza izvedena je korištenjem računalnog programa "SCIA". Rezultati modalne analize prikazani su tablicama 40 i 41. Analizirani su prvih 20 modova vlastitog osciliranja, uz uvjet da udio mase koji se uzima u obzir mora biti veći od 90% ukupne mase konstrukcije. U smjeru x, udio mase iznosi 98,35%, dok je u smjeru y udio mase 99,0%. Također su prikazani prvi tri moda vibracija i pripadajući periodi oscilacija konstrukcije (slika 64., slika 65. i slika 66.).

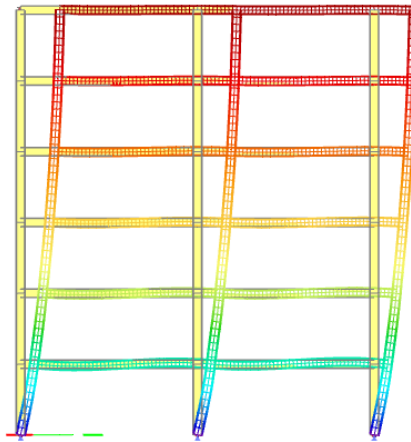
**Tablica 40.** Rezultati modalne analize

Mode	$\omega$ [rad/s]	Period [s]	Freq. [Hz]	$W_x/W_{xtot}$	$W_y/W_{ytot}$	$W_z/W_{ztot}$	$W_{x,R}/W_{xtot,R}$	$W_{y,R}/W_{ytot,R}$	$W_{z,R}/W_{ztot,R}$
1	3.74638	1,68	0,60	0,0000	0,9108	0,0000	0,0462	0,0000	0,0000
2	5.03169	1,25	0,80	0,8250	0,0000	0,0000	0,0000	0,0391	0,0000
3	5.4647	1,15	0,87	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,8809
4	12.792	0,49	2,04	0,0000	0,0634	0,0000	0,4562	0,0000	0,0000
5	15.2635	0,41	2,43	0,1289	0,0000	0,0000	0,0000	0,1564	0,0000
6	17.3696	0,36	2,76	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0876
7	24.4014	0,26	3,88	0,0000	0,0000	0,7938	0,0000	0,0000	0,0000
8	24.7757	0,25	3,94	0,0000	0,0152	0,0000	0,0266	0,0000	0,0000
9	25.5939	0,25	4,07	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,5499	0,0000
10	26.3746	0,24	4,20	0,0291	0,0000	0,0000	0,0000	0,0491	0,0000
11	27.0206	0,23	4,30	0,0000	0,0000	0,0000	0,3167	0,0000	0,0000
12	27.1859	0,23	4,33	0,0000	0,0000	0,0000	0,0619	0,0000	0,0000
13	27.2367	0,23	4,33	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
14	27.3009	0,23	4,35	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
15	27.3384	0,23	4,35	0,0000	0,0000	0,0000	0,0227	0,0000	0,0000
16	27.461	0,23	4,37	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006	0,0000	0,0000
17	27.663	0,23	4,40	0,0000	0,0000	0,0000	0,0064	0,0000	0,0000
18	28.0034	0,22	4,46	0,0000	0,0005	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000
19	28.027	0,22	4,46	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0440	0,0000
20	28.0692	0,22	4,47	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0068	0,0000
				0,9835	0,9900	0,8872	0,8528	0,8452	0,9685

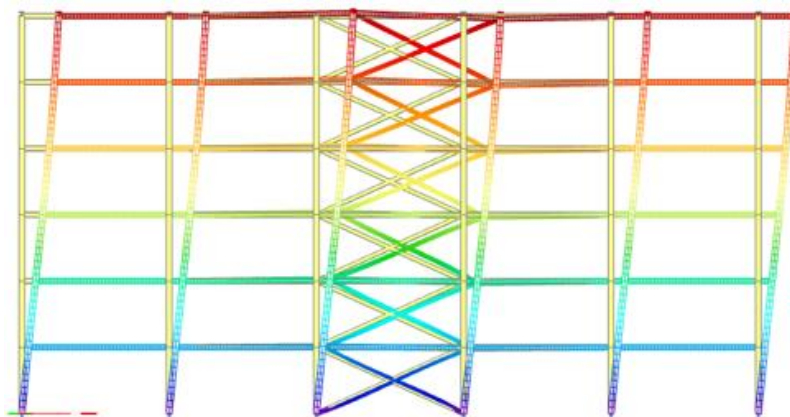
**Tablica 41.** Rezultati modalne analize



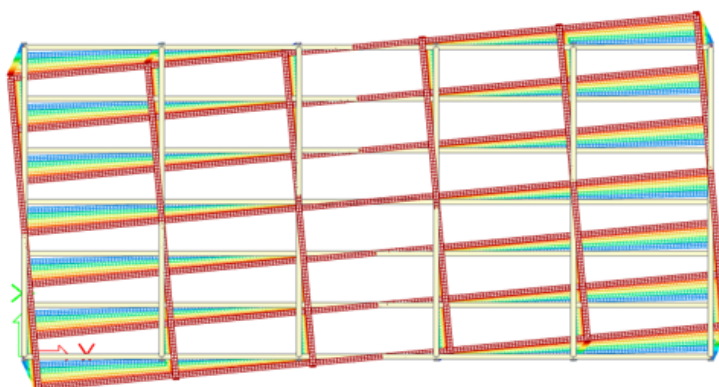
N	f [Hz]	$\omega$ [1/s]	$\omega^2$ [1/s <sup>2</sup> ]	T [s]
<b>Mass combination : Kombinacija masa</b>				
1	0,60	3,75	14,03	1,68
2	0,80	5,03	25,32	1,25
3	0,87	5,46	29,86	1,15
4	2,04	12,79	163,63	0,49
5	2,43	15,26	232,96	0,41
6	2,76	17,37	301,69	0,36
7	3,88	24,40	595,40	0,26
8	3,94	24,78	613,80	0,25
9	4,07	25,59	655,01	0,25
10	4,20	26,37	695,58	0,24
11	4,30	27,02	730,07	0,23
12	4,33	27,19	739,03	0,23
13	4,33	27,24	741,79	0,23
14	4,35	27,30	745,29	0,23
15	4,35	27,34	747,34	0,23
16	4,37	27,46	754,06	0,23
17	4,40	27,66	765,20	0,23
18	4,46	28,00	784,14	0,22
19	4,46	28,03	785,47	0,22
20	4,47	28,07	787,83	0,22



Slika 64. Prvi mod osciliranja- y smjer, T=1,68 s



Slika 65. Drugi mod osciliranja- x smjer, T=1,25 s



Slika 66. Treći mod osciliranja- torzija, T= 1,15 s

Tablica 42. Aktivirane mase u modalnoj analizi

	Mass type	X [kg]	Y [kg]	Z [kg]
1	Moving mass	4554539,05	4554539,05	4554539,05
1	Total mass	4556436,70	4556436,70	4556436,70

Ručna kontrola mase:

$$1 \cdot sta\ lno + 0,3 \cdot uporabno = 1 \cdot 43178,7 + 0,3 \cdot 7632 = 45468,3\ kN$$

Aktivirana masa u modalnoj analizi:

$$m_{ukupno} = 455439,05\ kg = 455439,05 \cdot \frac{9,81}{1000} = 45454,3\ kN$$

#### 10.4 Klasifikacija okvira

Kako bi se učinci drugog mogli zanemariti, u seizmičkoj analizi, na svakom katu treba biti zadovoljen izraz:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{v_{tot} \cdot h} \leq 0,1$$

(68)

gdje je:

$\theta$  - koeficijenti osjetljivosti za vrijednosti međukatnog pomaka

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

proračunsku situaciju

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

$h$  - visina kata

$d_r$  - proračunski katni pomak određen kao razlika prosječnih bočnih pomaka  $d_s$  na vrhu i pri podnožju promatranog kata

Proračunski pomak  $d_r$  računa se prema izrazu:

$$d_r = q_d \cdot d_e \quad (69)$$

gdje je:

$q_d$  - faktor ponašanja na pomak

$d_e$  - pomak dobiven elastičnom analizom na temelju proračunskog spektra odgovora

Ako je  $0,1 \leq \theta \leq 0,2$  učinci drugog reda se mogu približno uzeti u obzir množenjem odgovarajućih potresnih unutarnjih sila faktorom  $1 / (1 - \theta)$ . Vrijednost koeficijenta  $\theta$  ne smije premašiti vrijednost 0,3.

**Tablica 43.** Proračun koeficijenta osjetljivosti

Etaža	$P_{tot}$ [kN]	$V_{tot,x}$ [kN]	$V_{tot,y}$ [kN]	$d_{e,x}$ [m]	$d_{e,y}$ [m]	$d_{r,x}$ [m]	$d_{r,y}$ [m]	$h$ [m]	$\theta_x$	$\theta_y$
Prizemlje	44512	3374	2679	3,2	6,7	0,01	0,03	3,60	0,05	0,12
1 kat	36892	3095	2421	4,7	6,6	0,02	0,03	3,60	0,06	0,11
2 kat	29272	2714	2099	4,6	5	0,02	0,02	3,60	0,06	0,08
3 kat	21652	2287	1735	4,3	4	0,02	0,02	3,60	0,05	0,06
4 kat	14032	1747	1286	3,8	2,9	0,02	0,01	3,60	0,03	0,04
5 kat	6412	956	678	2,8	1,8	0,01	0,01	3,60	0,02	0,02

Učinci 2. reda se ne smiju zanemariti u y smjeru (tablica 43.), te se kombinacija opterećenja povećava sa najvećim dobivenim faktorom uvećanja  $\theta = 0,12$ :

$$\alpha_y = \frac{1}{(1 - \theta)} = \frac{1}{(1 - 0,12)} = 1,14$$

## 10.5 Ograničenje međukatnog pomaka

Za zgrade koje imaju nekonstrukcijske elemente pričvršćene ili zgrade bez nekonstrukcijskih elemenata ograničenje međukatnog pomaka je:

$$d_r \cdot v \leq 0,010 h$$

(70)

gdje je:

$d_r$  - proračunski katni pomak

$v$  - faktor smanjenja;  $v = 1,0$

Ograničenje za karakterističnu etažu zgrade:

$$0,01 \cdot h = 0,01 \cdot 360 = 3,6 \text{ cm}$$

**Tablica 44.** Prikaz zahtjeva ograničenja pomaka po katovima u x i y smjeru

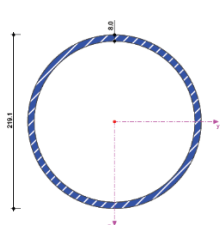
Etaža	$d_{rx}$ [m ]	$d_{ry}$ [m ]	h [m ]	0,01 h
Prizemlje	0,01	0,03	3,60	0,036
1 kat	0,02	0,03	3,60	0,036
2 kat	0,02	0,02	3,60	0,036
3 kat	0,02	0,02	3,60	0,036
4 kat	0,02	0,01	3,60	0,036
5 kat	0,01	0,01	3,60	0,036

Iz tablice 44. možemo vidjeti kako su pomaci zadovoljeni i u x i y smjeru.

## 10.6 Proračun jednostavnog okvirnog sustava s centričnim vezama

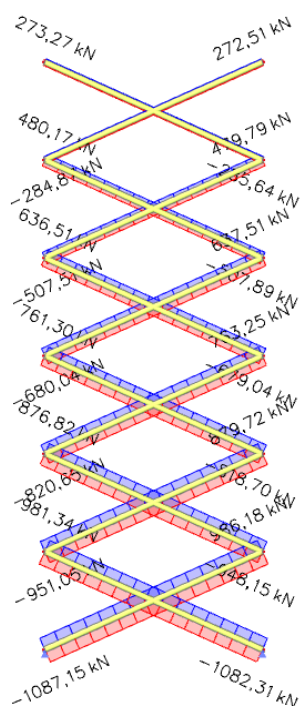
### 10.6.1 Dimenzioniranje X vezova

**Tablica 45.** Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka

Duljina elementa:	$L=8,77 \text{ m}$	
Poprečni presjek:	CHS 219,1x8,0	
Tip profila:	Topb dogotovljeni	
Težina po m ':	$G=41,6 \text{ kg/m '}$	
Površina poprečnog presjeka:	$A=53,1 \text{ cm}^2$	
Moment tromosti:	$I=2960 \text{ cm}^4$	
Moment otpora	$W=270 \text{ cm}^4$	
Plastični moment otpora:	$W_{pl}=357 \text{ cm}^4$	
Radius tromosti:	$i=7,47 \text{ cm}$	

Kod okvira s X dijagonalama vitkost mora biti u granicama  $1,3 \leq \bar{\lambda} \leq 2,0$

Horizontalne sile se prenose preko dijagonalnih elemenata u vlaku



Slika 67. Dijagram uzdužne sile  $N_{Ed}$  za spektralnu analizu

### Homogeno trošenje energije:

Da bi se osiguralo homogeno trošenje energije u dijagonalama najveća vrijednost faktor povećanja otpornosti ne smije se razlikovati više od 25% od najmanje vrijednosti. Faktor povećanja otpornosti računa se izrazom:

$$\Omega = \frac{N_{pl,Rd,i}}{N_{Ed,i}} \quad (71)$$

Tablica 46. Prikaz uvjeta homogenog trošenja energije dijagonala katova

Etaža	Diagonala	A [cm <sup>2</sup> ]	f <sub>y</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	N <sub>pl,Rd</sub> [kN]	N <sub>Ed</sub> [kN]	$\Omega_i = \frac{N_{pl,Rd,i}}{N_{Ed,i}}$	$\frac{\Omega_i - \Omega}{\Omega} \cdot 100$
5 kat	219,1x2,5	16,8	35,5	596,4	273	2,18	14%
4 kat	219,1x4,0	27	35,5	958,5	480	2	5%
3 kat	219,1x5,6	37,6	35,5	1334,8	638	2,09	10%
2 kat	219,1x6,3	42,1	35,5	1494,55	763	1,96	3%
1 kat	219,1x7,1	57,3	35,5	1679,15	880	1,91	0%
Prizemlje	219,1x8	53,1	35,5	1885,05	986	1,91	0%

**Otpornost na vlačnu silu:**

$$N_{c,Rd} = N_{pl,y,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{53,1 \cdot 35,5}{1,0} = 1885,05 \text{ kN}$$

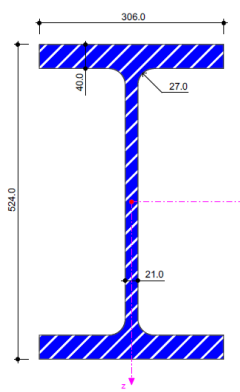
Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{986,18}{1885,05} = 0,52 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

**10.6.2 Dimenzioniranje stupova****Tablica 47.** Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka

Duljina elementa:	L=3,6 m	
Poprečni presjek:	HEM 500	
Tip profila:	Topb dogotovljeni	
Visina profila:	h= 524 m m	
Širina profila:	b= 306 m m	
Debljina pojasnice:	t <sub>f</sub> = 40,0 m m	
Debljina hrpta:	t <sub>w</sub> = 21,0 m m	
Radius zaobljenja:	r= 27 m m	
Težina po m <sup>1</sup> :	G= 270 kg/m <sup>1</sup>	
Površina poprečnog presjeka:	A= 344 cm <sup>2</sup>	
Torzijska konstanta:	I <sub>t</sub> = 1540 cm <sup>4</sup>	
Konstanta krivljenja:	I <sub>w</sub> = 11200000 cm <sup>6</sup>	
Moment inercije:	I <sub>y</sub> = 162000 cm <sup>4</sup>	I <sub>z</sub> = 19200 cm <sup>4</sup>
Moment otpora:	W <sub>y</sub> = 6180 cm <sup>3</sup>	W <sub>z</sub> = 1250 cm <sup>3</sup>
Plastični moment otpora:	W <sub>ply</sub> = 7090 cm <sup>3</sup>	W <sub>plz</sub> = 1930 cm <sup>3</sup>
Radius tromosti:	i <sub>y</sub> = 21,7 cm	i <sub>z</sub> = 7,46 cm



Stupovi s uzdužnim silama trebaju ispuniti uvjet najmanje otpornosti:

$$N_{Ed} \leq N_{Ed,G} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot N_{Ed,E}$$

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

$$\Omega = 1,91$$

$$N_{Ed,G} = N_{Sc} - N_{Ed,E} = 5110,1 - 2897,04 = 2213,06 \text{ kN}$$

Računska uzdužna sila:

$$N_{Ed} = 2213,06 + 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,91 \cdot 2897,04 = 9821,41 \text{ kN}$$

Računski moment savijanja:

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot M_{Ed,E}$$

$$\Omega = 1,91$$

$$M_{Ed,G} = M_{Sc} - M_{Ed,E} = 13,21 - 4,97 = 8,24 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 8,24 + 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,91 \cdot 4,97 = 21,29 \text{ kNm}$$

### 10.6.2.1 Klasifikacija poprečnog presjeka

Hrbat

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r}{t_w} = \frac{524,0 - 2 \cdot 40,0 - 2 \cdot 27,0}{21,0} = 18,57$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{c}{t} = 18,57 \leq 33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73$$

Hrbat je klase 1.

Pojasnica

$$\frac{c}{t} = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{t_f} = \frac{306,0 - 21,0 - 2 \cdot 27,0}{40,0} = 2,9$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{c}{t} = 2,9 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klase 1.

Poprečni presjek je klase 1.

### 10.6.2.2 Otpornost poprečnog presjeka

#### Otpornost poprečnog presjeka u tlaku:

$$N_{cRd} = N_{plyRd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{344,0 \cdot 35,5}{1,0} = 12212 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{cRd}} = \frac{9821,41}{12212} = 0,8 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

#### Otpornost poprečnog presjeka na savijanje:

$$M_{cRd} = M_{plyRd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{7090 \cdot 35,5}{1,0} = 251695 \text{ kNcm} = 2516,95 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} = \frac{21,29}{2516,95} = 0,01 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### 10.6.2.3 Otpornost elementa

#### Otpornost elementa na izvijanje:

Elastična kritična sila:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{cr}^2}$$

Bezdimenzijska vitkost:

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

#### Izvijanje oko osi y

Kritična dužina izvijanja  $L_{cr,y} = 360 \text{ cm}$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 162000}{360^2} = 259077 \text{ kN}$$



$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{344 \cdot 35,5}{259077}} = 0,22$$

Mjerodavna krivulja izvijanja:

$$\frac{h}{b} = \frac{524,0}{306,0} = 1,71 > 1,2$$

$$t_f = 40,0 \text{ mm} \leq 40,0 \text{ mm}$$

Krivulja izvijanja: a → faktor imperfekcije  $\alpha = 0,21$

Pomoćna veličina:

$$\phi_y = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,21 \cdot (0,22 - 0,2) + 0,22^2 \right] = 0,53$$

Faktor redukcije:

$$\chi_y = \frac{1,0}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1,0}{0,53 + \sqrt{0,53^2 - 0,22^2}} = 0,99 \leq 1,0$$

Proračunska otpornost:

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,99 \cdot \frac{344,0 \cdot 35,5}{1,1} = 10990,8 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} = \frac{9821,41}{10990,8} = 0,89 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

Izvijanje oko osi z

Kritična dužina izvijanja  $L_{cr,z} = 360 \text{ cm}$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 19200}{360^2} = 30865,36 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{344 \cdot 35,5}{30865}} = 0,63$$

Mjerodavna krivulja izvijanja:

$$\frac{h}{b} = \frac{524,0}{306,0} = 1,71 > 1,2$$

$$t_f = 40,0 \text{ mm} \leq 40,0 \text{ mm}$$

Krivulja izvijanja:  $b \rightarrow$  faktor imperfekcije  $\alpha = 0,34$

Pomoćna veličina:

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,34 \cdot (0,63 - 0,2) + 0,63^2 \right] = 0,77$$

Faktor redukcije:

$$\chi_z = \frac{1,0}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^2}} = \frac{1,0}{0,77 + \sqrt{0,77^2 - 0,63^2}} = 0,9 \leq 1,0$$

Proračunska otpornost

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,9 \cdot \frac{344,0 \cdot 35,5}{1,1} = 9991,64 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{9821,41}{9991,64} = 0,98 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

**Otpornost elementa na savijanje:**

Elastični kritični moment:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(k \cdot L_{cr})^2} \left[ \sqrt{\left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L_{cr})^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot EI_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

Razmak bočnog pridržanja:  $L_{cr} = 360 \text{ cm}$

Mjesto unosa sile:  $z_g = 0$

Faktor efektivne dužine:  $k = 1,0; k_w = 1,0$

Faktori ovisni o uvjetima opterećenja ( $\psi = 0$ ):  $C_1 = 1,77; C_2 = 0$

$$M_{cr} = 1,77 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 19200}{(1,0 \cdot 360)^2} \left[ \sqrt{\left( \frac{1,0}{1,0} \right)^2 \cdot \frac{11200000}{19200} + \frac{(1,0 \cdot 360)^2 \cdot 8100 \cdot 1540}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 19200}} \right] =$$

$$= 1709677,22 \text{ kNcm} = 17096,77 \text{ kNm}$$

**Bezdimenzijska vitkost:**

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{plY} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{7090 \cdot 35,5}{1709677}} = 0,38 \leq \bar{\lambda}_{LT,\rho} = 0,4$$

Ne zahtijeva provjeru elementa na BTI

Za valjani profil  $\frac{h}{b} = \frac{524,0}{306,0} = 1,71 < 2,0$ , mjerodavna krivulja izvijanja je a  $\rightarrow \alpha_{LT} = 0,21$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$$

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

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,21 \cdot (0,38 - 0,2) + 0,38^2 \right] = 0,59$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,59 + \sqrt{0,59^2 - 0,38^2}} = 0,98 \leq 1,0$$

Otpornost na savijanje:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_{plY} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,98 \cdot \frac{7090 \cdot 35,5}{1,1} = 224237 \text{ kNcm} = 2242,37 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{21,29}{2242,37} = 0,01 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

**Otpornost elementa na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile (Metoda 2):**

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

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

$$\psi = 0$$

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

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

$$k_{yy} = 0,6 \cdot \left( 1 + \left( 0,22 - 0,2 \right) \cdot 0,81 \right) = 0,61 \leq 0,6 \cdot \left( 1 + 0,8 \cdot 0,81 \right) = 0,99$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,61 = 0,37$$

Uvjet:

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

$$0,81 + 0,61 \cdot 0,01 = 0,82 \leq 1,0$$

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

$$0,98 + 0,37 \cdot 0,01 = 0,98 \leq 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

## 10.7 Proračun okvirnog sustava

### 10.7.1 Dimenzioniranje glavnog nosača

Tablica 48. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka

Duljina elementa:	L=9 m		
Poprečni presjek:	HEB 500		
Tip profila:	Toplo dogotovljeni		
Visina profila:	h= 500 mm		
Širina profila:	b= 300 mm		
Debljina pojasnice:	t <sub>f</sub> = 28,0 mm		
Debljina hrpta:	t <sub>w</sub> =14,5 mm		
Radijus zaobljenja:	r= 27 mm		
Težina po m <sup>1</sup> :	G= 187 kg/m <sup>1</sup>		
Površina poprečnog presjeka:	A= 239 cm <sup>2</sup>		
Torzijska konstanta:	I <sub>t</sub> = 548 cm <sup>4</sup>		
Konstanta krivljenja:	I <sub>w</sub> = 7020000 cm <sup>6</sup>		
Moment inercije:	I <sub>y</sub> = 107000 cm <sup>4</sup>		I <sub>z</sub> = 12600 cm <sup>4</sup>
Moment otpora:	W <sub>y</sub> = 4290 cm <sup>3</sup>		W <sub>z</sub> = 842 cm <sup>3</sup>
Plastični moment otpora:	W <sub>ply</sub> = 4820 cm <sup>3</sup>		W <sub>plz</sub> = 1290 cm <sup>3</sup>
Radijus tromosti:	i <sub>y</sub> = 21,2 cm		i <sub>z</sub> = 7,27 cm

Prema pravilima za okvirne konstrukcije u nosačima je potrebno provjeriti da plastična otpornost na savijanje i rotacijski kapacitet nisu smanjeni uslijed tlaka i poprečne sile.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 0,15 \quad \frac{V_{Ed,G} + V_{Ed,M}}{V_{pl,Rd}} \leq 0,5$$

#### Računska uzdužna sila:

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + \alpha \cdot N_{Ed,E}$$

$$\alpha = 1,14$$

$$N_{Ed,G} = N_{Sc} - N_{Ed,E} = 201,96 - 39,07 = 162,89 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 162,89 + 1,14 \cdot 39,07 = 207,43 \text{ kN}$$

#### Računski moment savijanja:

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + \alpha \cdot M_{Ed,E}$$

$$\alpha = 1,14$$

$$M_{Ed,G} = M_{Sc} - M_{Ed,E} = 985,45 - 562,67 = 422,78 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 422,78 + 1,14 \cdot 562,67 = 1064,22 \text{ kNm}$$

**Računska poprečna sila:**

$$V_{Ed} = V_{Ed\beta} + V_{EdM} = V_{Ed\beta} + \frac{M_{pl,Rd,A} + M_{pl,Rd,B}}{L}$$

$$V_{Ed\beta} = V_{Sc} - V_{Ed,E} = 338,4 - 114,77 = 223,63 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 223,63 + \frac{1711,1 + 1711,1}{9,0} = 603,87 \text{ kN}$$

**Proračunske otpornosti:**

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4820 \cdot 35,5}{1,0} = 171110 \text{ kNcm} = 1711,1 \text{ kNm}$$

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{239 \cdot 35,5}{1,0} = 8484,5 \text{ kN}$$

$$V_{c,Rd} = V_{plz,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$\eta = 1,2$$

$$h_w = h - 2 \cdot t_f = 500,0 - 2 \cdot 28,0 = 444,0 \text{ mm}$$

$$A_v = 239,0 - 2 \cdot 30,0 \cdot 2,8 + (1,45 + 2 \cdot 2,7) \cdot 2,8 = 95,98 \text{ cm}^2 \geq 1,2 \cdot 44,4 \cdot 1,45 = 77,26 \text{ cm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{plz,Rd} = \frac{95,98 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 1967,2 \text{ kN}$$

**Uvjet:**

$$\frac{1064,22}{1711,1} = 0,62 \leq 1,0 \quad \frac{207,43}{8484,5} = 0,02 \leq 0,15 \quad \frac{603,87}{1967,2} = 0,31 \leq 0,5$$

Uvjeti su zadovoljeni!

**10.7.2 Dimenzioniranje stupa**

**Tablica 49.** Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka

Duljina elementa:	$L=3,6$ m		
Poprečni presjek:	HEM 500		
Tip profila:	Toplo dogotovljeni		
Visina profila:	$h=524$ mm		
Širina profila:	$b=306$ mm		
Debljina pojasnice:	$t_f=40,0$ mm		
Debljina hrpta:	$t_w=21,0$ mm		
Radius zaobljenja:	$r=27$ mm		
Težina po m':	$G=270$ kg/m		
Površina poprečnog presjeka:	$A=344$ cm <sup>2</sup>		
Torzijska konstanta:	$I_t=1540$ cm <sup>4</sup>		
Konstanta krivljenja:	$I_w=11200000$ cm <sup>6</sup>		
Moment inercije:	$I_y=162000$ cm <sup>4</sup>		$I_z=19200$ cm <sup>4</sup>
Moment otpora:	$W_y=6180$ cm <sup>3</sup>		$W_z=1250$ cm <sup>3</sup>
Plastični moment otpora:	$W_{ply}=7090$ cm <sup>3</sup>		$W_{plz}=1930$ cm <sup>3</sup>
Radius tromosti:	$i_y=21,7$ cm		$i_z=7,46$ cm

Za proračun se uzima u obzir najnepovoljnija kombinacija uzdužne sile i momenta savijanja s računskim vrijednostima:

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

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + \alpha \cdot 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot M_{Ed,E}$$

$$V_{Ed} = V_{Ed,G} + \alpha \cdot 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot V_{Ed,E}$$

Poprečna sila u stupu također treba zadovoljiti uvjet:

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

$$\Omega = \frac{17111,1}{1064,22} = 1,61$$

$$N_{Ed,G} = 2213,06 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,G} = 8,24 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,G} = 6,43 - 5,08 = 1,35 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 2213,06 + 1,14 \cdot 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,61 \cdot 2897,04 = 9524,25 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 8,24 + 1,14 \cdot 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,61 \cdot 4,97 = 20,78 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 1,35 + 1,14 \cdot 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,61 \cdot 5,08 = 14,17 \text{ kN}$$

### 10.7.2.1 Klasifikacija poprečnog presjeka

#### Hrbat

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r}{t_w} = \frac{524,0 - 2 \cdot 40,0 - 2 \cdot 27,0}{21,0} = 18,57$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{c}{t} = 18,57 \leq 33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73$$

Hrbat je klase 1.

Pojasnica

$$\frac{c}{t} = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{t_f} = \frac{306,0 - 21,0 - 2 \cdot 27,0}{40,0} = 2,9$$

Uvjet za klasu 1.:

$$\frac{c}{t} = 2,9 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29$$

Pojasnica je klase 1.

**Poprečni presjek je klase 1.**

### 10.7.2.2 Otpornost poprečnog presjeka

**Otpornost poprečnog presjeka u tlaku:**

$$N_{cRd} = N_{p1yRd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{344,0 \cdot 35,5}{1,0} = 12212 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{cRd}} = \frac{9524,25}{12212} = 0,78 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

**Otpornost poprečnog presjeka na savijanje:**

$$M_{cNRd} = M_{p1yRd} = \frac{W_{p1y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{7090 \cdot 35,5}{1,0} = 251695 \text{ kNm} = 2516,95 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cNRd}} = \frac{20,78}{2516,95} = 0,01 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!



**Otpornost poprečnog presjeka na posmik:**

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$h_w = h - 2 \cdot t_f = 524,0 - 2 \cdot 40,0 = 444,0 \text{ mm}$$

$$\eta = 1,2$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{444,0}{21,0} = 21,14 < 72 \cdot \frac{0,81}{1,2} = 48,6$$

**Nije potrebna provjera izbočavanja hrpta na posmik**

Plastična posmična otpornost:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$\eta = 1,2$$

$$A_v = 344,0 - 2 \cdot 30,6 \cdot 4,0 + (21,0 + 2 \cdot 2,7) \cdot 4,0 = 129,2 \text{ cm}^2 \geq 1,2 \cdot 44,4 \cdot 2,1 = 111,8 \text{ cm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,z,Rd} = \frac{129,2 \cdot \frac{35,5}{\sqrt{3}}}{1,0} = 2648,07$$

Uvjet:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{14,17}{2648,07} = 0,01 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

**Interakcija N/V/M:**Poprečna sila:

Uvjet reduciranja plastične otpornosti savijanja:

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

$$V_{z,Ed} = 14,17 < 0,5 \cdot 2648,07 = 1324,04 \text{ kN}$$

**Uvjet je zadovoljen, otpornost poprečnog presjeka se ne smanjuje**Uzdužna sila:

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

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

$$N_{Ed} = 9524,25 \text{ kN} > 0,25 \cdot 12212 = 3053,0 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 9524,25 \text{ kN} > \frac{0,5 \cdot 44,4 \cdot 2,1 \cdot 35,5}{1,0} = 1655,01 \text{ kN}$$

**Uvjeti nisu zadovoljeni, s toga vrijedi:**

$$M_{yV,N,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a} \leq M_{pl,y,Rd}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{9524,25}{12212} = 0,78$$

$$a = \frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A} = \frac{344 - 2 \cdot 30,6 \cdot 4,0}{344} = 0,29 < 0,5$$

$$M_{yV,N,Rd} = 2516,95 \cdot \frac{1-0,78}{1-0,5 \cdot 0,29} = 647,64 \text{ kNm} \leq 2516,95 \text{ kNm}$$

**Uvjet:**

$$\frac{M_{Ed}}{M_{yV,N,Rd}} = \frac{20,78}{647,64} = 0,03 < 1,0$$

**Uvjet je zadovoljen!**

### 10.7.2.3 Otpornost elementa

#### Otpornost elementa na izvijanje:

Elastična kritična sila:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{cr}^2}$$

Bezdimenzijska vitkost:

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

#### Izvijanje oko osi y

Kritična dužina izvijanja  $L_{cr,y} = 360 \text{ cm}$

$$N_{crY} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{crY}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 162000}{360^2} = 259077 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{crY}}} = \sqrt{\frac{344 \cdot 35,5}{259077}} = 0,22$$

Mjerodavna krivulja izvijanja:

$$\frac{h}{b} = \frac{524,0}{306,0} = 1,71 > 1,2$$

$$t_f = 40,0 \text{ mm} \leq 40,0 \text{ mm}$$

Krivulja izvijanja: a → faktor imperfekcije  $\alpha = 0,21$

Pomoćna veličina:

$$\phi_y = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,21 \cdot (0,22 - 0,2) + 0,22^2 \right] = 0,53$$

Faktor redukcije:

$$\chi_y = \frac{1,0}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1,0}{0,53 + \sqrt{0,53^2 - 0,22^2}} = 0,99 \leq 1,0$$

Proračunska otpornost:

$$N_{bY,Rd} = \chi_y \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,99 \cdot \frac{344,0 \cdot 35,5}{1,1} = 10990,8 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{bY,Rd}} = \frac{9524,25}{10990,8} = 0,87 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

Izvijanje oko osi z

Kritična dužina izvijanja  $L_{cr,z} = 360 \text{ cm}$

$$N_{crz} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{crz}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 19200}{360^2} = 30865,36 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{crz}}} = \sqrt{\frac{344 \cdot 35,5}{30865}} = 0,63$$

Mjerodavna krivulja izvijanja:

$$\frac{h}{b} = \frac{524,0}{306,0} = 1,71 > 1,2$$

$$t_f = 40,0 \text{ mm} \leq 40,0 \text{ mm}$$

Krivulja izvijanja: b → faktor imperfekcije  $\alpha = 0,34$

Pomoćna veličina:

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,34 \cdot (0,63 - 0,2) + 0,63^2 \right] = 0,77$$

Faktor redukcije:

$$\chi_z = \frac{1,0}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1,0}{0,77 + \sqrt{0,77^2 - 0,63^2}} = 0,9 \leq 1,0$$

Proračunska otpornost:

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,9 \cdot \frac{344,0 \cdot 35,5}{1,1} = 9991,64 \text{ kN}$$

Uvjet:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{9524,25}{9991,64} = 0,95 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

### **Otpornost elementa na savijanje:**

Elastični kritični moment:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(k \cdot L_{cr})^2} \left[ \sqrt{\left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L_{cr})^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot EI_z} + C_2 \cdot z_g} \right]^2 - C_2 \cdot z_g$$

Razmak bočnog pridržanja:  $L_{cr} = 360 \text{ cm}$

Mjesto unosa sile:  $z_g = 0$

Faktor efektivne dužine:  $k = 1,0; k_w = 1,0$

Faktori ovisni o uvjetima opterećenja ( $\psi = 0$ ):  $C_1 = 1,77$ ;  $C_2 = 0$

$$M_{cr} = 1,77 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 19200}{(1,0 \cdot 360)^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{1,0}{1,0}\right)^2 \cdot \frac{11200000}{19200} + \frac{(1,0 \cdot 360)^2 \cdot 8100 \cdot 1540}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 19200}} \right] =$$

$$= 1709677,22 \text{ kNcm} = 17096,77 \text{ kNm}$$

**Bezdimenzijska vitkost:**

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{7090 \cdot 35,5}{1709677}} = 0,38 \leq \bar{\lambda}_{LT,\rho} = 0,4$$

Ne zahtijeva provjeru elementa na BTI

Za valjani profil  $\frac{h}{b} = \frac{524,0}{306,0} = 1,71 < 2,0$ , mjerodavna krivulja izvijanja je a  $\rightarrow \alpha_{LT} = 0,21$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$$

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

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,21 \cdot (0,38 - 0,2) + 0,38^2 \right] = 0,59$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,59 + \sqrt{0,59^2 - 0,38^2}} = 0,98 \leq 1,0$$

Otpornost na savijanje:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,98 \cdot \frac{7090 \cdot 35,5}{1,1} = 224237 \text{ kNcm} = 2242,37 \text{ kNm}$$

Uvjet:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{20,78}{2242,37} = 0,01 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

**Otpornost elementa na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile (Metoda 2):**

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

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

$$\psi = 0$$

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

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

$$k_{yy} = 0,6 \cdot \left( 1 + \left( 0,22 - 0,2 \right) \cdot 0,87 \right) = 0,61 \leq 0,6 \cdot \left( 1 + 0,8 \cdot 0,87 \right) = 0,99$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,61 = 0,37$$

Uvjet:

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

$$0,87 + 0,61 \cdot 0,01 = 0,88 \leq 1,0$$

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

$$0,95 + 0,37 \cdot 0,01 = 0,95 \leq 1,0$$

Uvjet je zadovoljen!

Tablica 50. Iskoristivost odabranih profila

Element konstrukcije:	Profil:	Iskoristivost
Stup	HEM 500	98%
Glavni nosač	HEB 500	81%
Stabilizacija	CHS 219,1x8	52%



## 11 PRIMJENA LCA ANALIZE

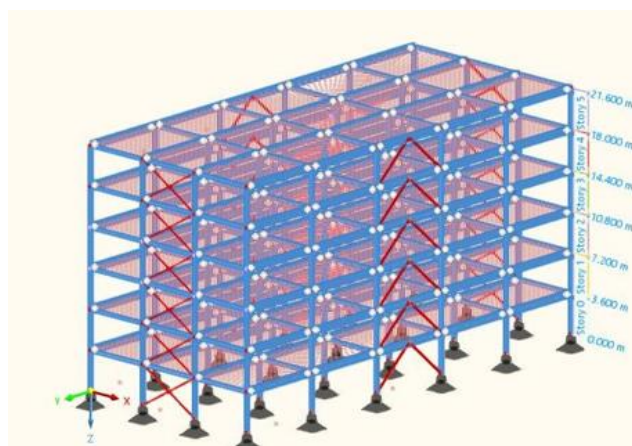
### 11.1 Motivacija i formulacija problema

Razvoj industrije i gospodarstva doveo je do ubrzane urbanizacije i porasta potražnje za infrastrukturom i stambenim objektima. Ovaj rast građevinskog sektora, uz sve veće potrebe za građevinskim materijalima, značajno je pridonio onečišćenju okoliša. Jedan od glavnih izvora zagađenja su emisije stakleničkih plinova, posebno CO<sub>2</sub>, koji nastaje tijekom proizvodnje ključnih građevinskih materijala poput cementa i čelika. Istraživanja pokazuju da cementna industrija sama generira oko 7% globalne emisije CO<sub>2</sub>, što znatno ubrzava proces globalnog zagrijavanja. Osim emisija, građevinski sektor troši ogromne količine prirodnih resursa poput vode, šljunka, pijeska, kamena i drva. Intenzivna eksploatacija tih sirovina dovodi do iscrpljivanja prirodnih resursa i degradacije ekosustava, čime se narušava bioraznolikost. Također, građevinski otpad predstavlja ozbiljan problem jer mnogi materijali nisu biorazgradivi, a završavaju na odlagalištima, pridonoseći zagađenju tla i podzemnih voda. Kako bi se smanjio negativan utjecaj na okoliš, sve je veći fokus na održivim rješenjima, uključujući energetske učinkovite dizajne, recikliranje građevinskog otpada te korištenje ekološki prihvatljivih materijala i tehnologija s niskim emisijama. [14]

U ovom istraživanju analizirane su tri višekratnice kako bi se usporedili ekološki utjecaji različitih materijala. Prva zgrada je izrađena od betonskih okvira, druga od čeličnih okvira, a treća koristi spregnutu konstrukciju. Sve zgrade imaju iste tlocrtne dimenzije od 40,0 x 18,0 metara i visinu od 21,6 metara, s ukupno šest etaža. Razlikuju se ne samo po vrsti materijala, već i po dispozicijskom rješenju: čelični okvir projektiran je kao jednostavni okvirni sustav s centričnim vezovima (slika 68.), dok je spregnuta konstrukcija u x smjeru također jednostavni okvirni sustav s centričnim vezovima, dok u y smjeru koristi okvirni sustav (slika 40.).

Analizom životnog ciklusa svake građevine obuhvaćene su sve faze, od nabave sirovina do rušenja i recikliranja otpada. Istraživanje je obuhvatilo nekoliko ekoloških utjecaja, uključujući potencijal globalnog zatopljenja u periodu od 100 godina, klimatske promjene, zakiseljavanje, eutrofikaciju, toksičnost za ljude (kancerogena i nekancerogena), zagađenje zraka te potencijal stvaranja ozona. Rezultati pokazuju da beton ima značajnije nepovoljne utjecaje na okoliš u usporedbi s drugim materijalima. S druge strane, spregnuta konstrukcija pokazuje najbolje rezultate zahvaljujući prednostima oba materijala, što omogućava smanjenje presjeka elemenata i, time, manji utrošak materijala.



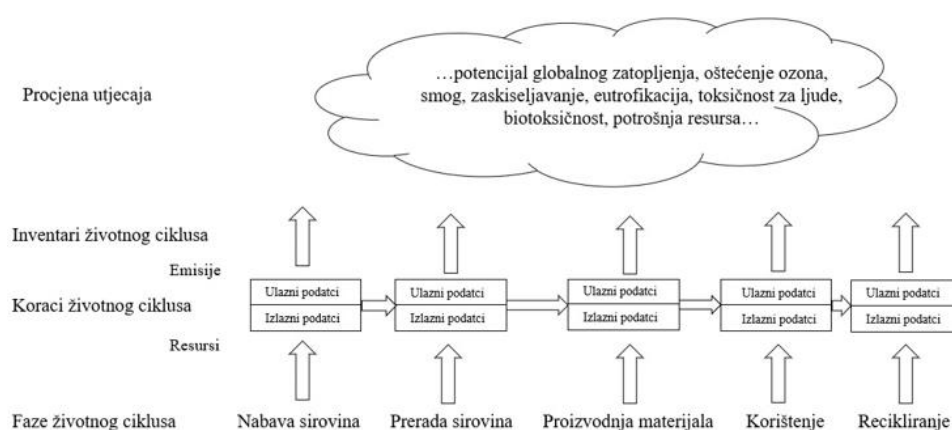


Slika 68. 3D model čeličnog okvira [15]

## 11.2 Softver Gabi

Program GABI (GABI Software for Life Cycle Assessment) koristi se za detaljnu procjenu životnog ciklusa (LCA) proizvoda i procesa. Ovaj sofisticirani alat omogućuje analizu ekoloških utjecaja kroz sve faze životnog ciklusa, uključujući proizvodnju, upotrebu i završnu obradbu proizvoda ili usluge. Korištenje GABI softvera omogućuje identifikaciju područja za poboljšanje održivosti te optimizaciju procesa i materijala, čime se značajno smanjuju negativni utjecaji na okoliš. Zbog svojih sveobuhvatnih funkcionalnosti i preciznosti u analizi, GABI je odabran za ovo istraživanje.

Program GaBi omogućuje strukturiranje kroz detaljan plan u kojem se definiraju procesi, uključujući njihove ulazne i izlazne podatke. Program omogućuje uspostavljanje veza između različitih procesa, što omogućava formiranje sveobuhvatnog opskrbnog lanca (slika 69.).



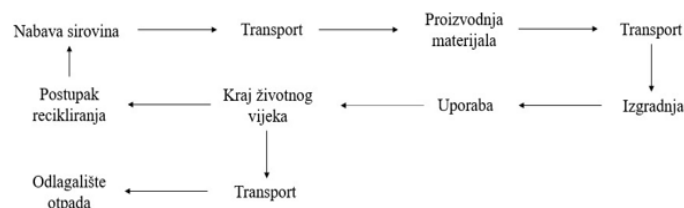
Slika 69. Način rada softvera GaBi [15]

### 11.3 Prikupljanje podataka

Podaci za nabavu sirovina, proizvodnju materijala i završne faze životnog ciklusa prikupljeni su iz različitih izvora, uključujući međunarodne standarde i smjernice, kao i lokalne izvore poput nacionalnih standarda, smjernica i industrijskih izvještaja.

### 11.4 Modeliranje životnog ciklusa

Modeliranje životnog ciklusa provedeno je prema postupku prikazanom na slici 70. Proces započinje nabavom sirovina koje se prevoze do proizvodnog pogona, gdje se prerađuju u materijale namijenjene izradi konstrukcije. Ovi materijali zatim se prevoze na gradilište, gdje se provodi gradnja objekta. Nakon završetka izgradnje, građevina se pušta u uporabu. Na kraju svog životnog vijeka, građevina se ruši. Prema vrsti otpada koji nastaje pri rušenju, materijali poput betona odlaze na odlagalište, dok se materijali kao što su čelik i armaturni čelik recikliraju i ponovno koriste u proizvodnom procesu.



Slika 70. Modeliranje životnog ciklusa [15]

### 11.5 Ulazni podaci

#### 11.5.1 Nabava sirovina

Materijali korišteni za proizvodnju navedenih konstrukcija su beton, čelik i čelična armatura. Na temelju globalnih podataka o proizvodnji čelika, za proizvodnju jedne tone čelika koristi se 56% željezne rude, 28% metalurškog koksa i 16% čeličnog otpada. S druge strane, za proizvodnju jednog kubičnog metra betona, potrebno je približno 76% šljunka i 24% portland cementa. Detaljni podaci o količinama potrebnih sirovina za spregnutu konstrukciju navedeni su u tablici 51. Potrebna količina sirovina i materijala za izvedbu čeličnog i betonskog okvira preuzeti su iz diplomskog rada [15].

Tablica 51. Količina potrebnih sirovina

Spregnuta konstrukcija	
M aterijal	M asa [kg]
Željezna nudača	263296
M etalurškikoks	131648
Čelčniotpad	75228
Portland cem ent	312725
Agregat	990295

### 11.5.2 Proizvodnja materijala

Tijekom ove faze, sirovine se transportiraju do proizvodnih pogona gdje se proizvode građevinski materijali, a zatim se gotovi proizvodi dostavljaju na gradilište. Udaljenosti transporta materijala i vrsta vozila korištenih za prijevoz prikazani su u tablici 52. Važno je napomenuti da se zbog ograničenja u GaBi bazi podataka, za prijevoz betona korišten je kamion umjesto miješalice.

**Tablica 52.** Udaljenost transporta i vrsta prijevoznog sredstva

Spregnuta konstrukcija		
M aterijal	Udaljenost [km ]	Prijevozno sredstvo
Željezna nudača	40	Kam ion
M etalurškikoks	40	Kam ion
Čelčniotpad	40	Kam ion
Portland cem ent	10	Kam ion
Agregat	10	Kam ion

### 11.5.3 Faza izgradnje

Faza izgradnje definira se kao proces dostave materijala iz proizvodnih pogona na gradilište, pri čemu su ostale građevinske aktivnosti isključene iz modela. To je zbog činjenice da GaBi softver fokusira analizu isključivo na materijale i njihov transport, dok civilne operacije nisu obuhvaćene. Rezultat ove faze je spregnuta konstrukcija. Količine materijala potrebne za spregnutu konstrukciju prikazane su u tablici 53, a informacije o transportu svakog građevinskog materijala nalaze se u tablici 54.

**Tablica 53.** Količine materijala

Spregnuta konstrukcija	
Materijal	Masa [kg]
Beton	1303020
Armatura	34106
Čelik	470172

**Tablica 54.** Udaljenost transporta i vrsta prijevoznog sredstva

Spregnuta konstrukcija		
Materijal	Udaljenost [km]	Prijevozno sredstvo
Beton	10	Kamion
Armatura	40	Kamion
Čelik	40	Kamion

#### 11.5.4 Faza uporabe

Predviđeni životni vijek konstrukcija iznosi 50 godina. Tijekom ovog razdoblja, istraživanje ne uključuje značajnije radove na obnovi ili održavanju.

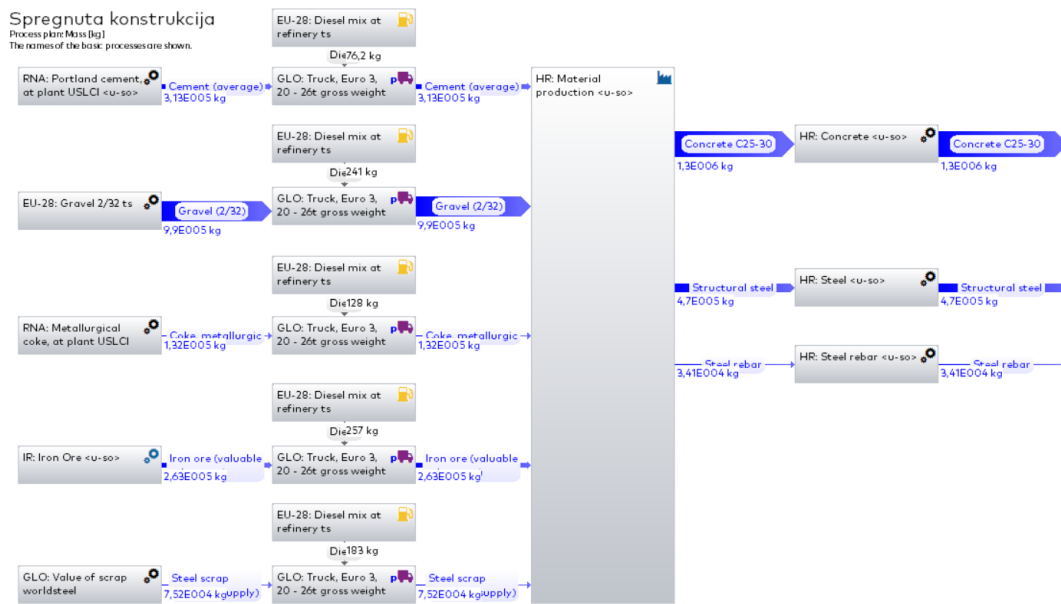
#### 11.5.5 Faza kraja životnog vijeka

S obzirom na predviđeni životni vijek konstrukcija od 50 godina, nakon isteka tog razdoblja planirano je njihovo rušenje i zbrinjavanje otpada prema utvrđenim procedurama. Čelični otpad, uključujući čeličnu armaturu, potpuno se reciklira, dok se sav betonski otpad odvozi na odlagalište. Udaljenost između mjesta rušenja i odlagališta betona iznosi 50 km, dok je udaljenost za reciklažu čeličnog otpada 10 km. Podaci o količinama otpada navedeni su u tablici 55.

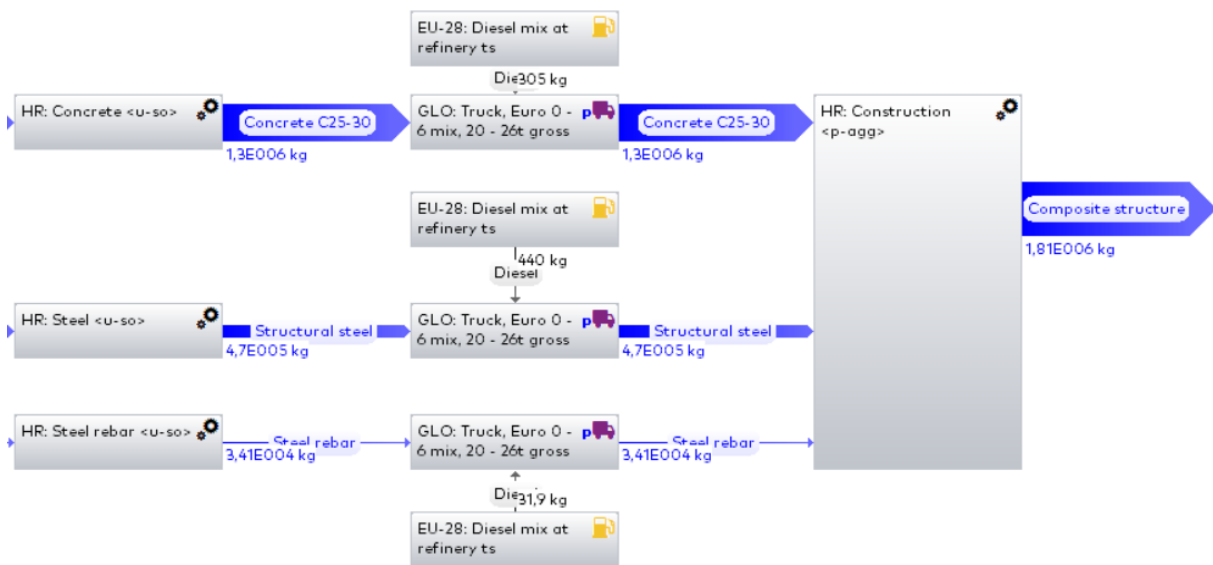
**Tablica 55.** Udaljenost transporta i vrsta prijevoznog sredstva

Spregnuta konstrukcija	
Materijal	Masa [kg]
Betonski otpad	1303020
Čelični otpad	504278

Cjelokupni proces životnog ciklusa spregnute konstrukcije prikazan je slikama 71-73.



Slika 71. Proces životnog ciklusa spregnute konstrukcije



Slika 72. Proces životnog ciklusa spregnute konstrukcije- nastavak



Slika 73. Proces životnog ciklusa spregnute konstrukcije- nastavak

## 11.6 Analiza rezultata

Kako je navedeno u uvodu poglavlja, analiza se fokusira na sljedeće utjecaje na okoliš: potencijal globalnog zatopljenja tijekom 100 godina, klimatske promjene, zakiseljavanje, eutrofikaciju, toksičnost za ljude (kancerogene i nekancerogene), zagađenje zraka, anorganske respiratorne tvari te potencijal stvaranja ozona. Ovi utjecaji razmatrani su za tri vrste konstrukcija: betonsku, čeličnu i spregnutu.

Analizom rezultata utvrđeno je da betonski okvir ima najveći negativan utjecaj na okoliš, slijedi čelični okvir, dok spregnuti okvir ima najmanji utjecaj. Konkretno, betonski okvir doprinosi globalnom zatopljenju i klimatskim promjenama emisijom CO<sub>2</sub> 52% više nego spregnuti okvir, i 42% više u usporedbi s čeličnim okvirom. Razlika između čeličnog i spregnutog okvira iznosi 16%.

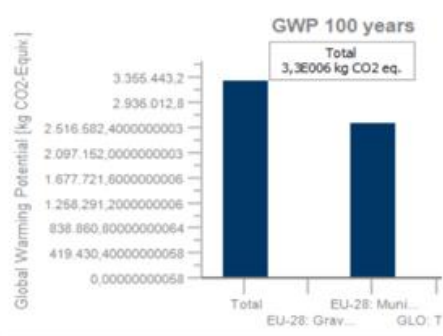
Što se tiče zakiseljavanja, izraženog količinom emisije SO<sub>2</sub>, betonski okvir stvara 30% više emisije u odnosu na čelični ili spregnuti okvir, pri čemu je razlika između čeličnog i spregnutog okvira zanemariva.

U pogledu eutrofikacije, betonski okvir ispušta 46% više dušičnih oksida nego spregnuti okvir, odnosno 42% više nego čelični okvir, dok je razlika između spregnutog i čeličnog okvira 7%.

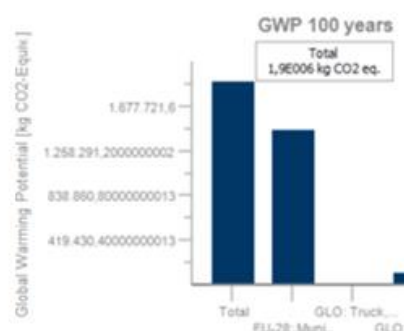
Za toksičnost prema ljudima, kancerogena i nekancerogena, betonska konstrukcija proizvodi 63% više toksičnih tvari nego spregnuta konstrukcija i 54% više nego čelična konstrukcija, dok čelična konstrukcija ispušta 19% više toksičnih tvari nego spregnuta.

U kontekstu zagađenja zraka, betonski okvir ispušta 42% više ozona (O<sub>3</sub>) nego spregnuti i čelični okvir. Razlika u potencijalu stvaranja ozona između betonske i spregnute konstrukcije iznosi 38%, između betonske i čelične 31%, dok je razlika između čelične i spregnute konstrukcije 10%.

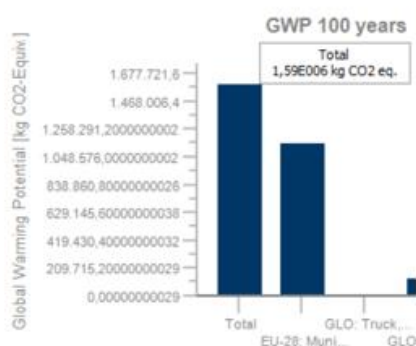
Konačno, betonski okvir ispušta oko 40% više anorganskih respiratornih tvari nego spregnuta ili čelična konstrukcija, pri čemu je razlika između njih 3%.



a) Betonska konstrukcija

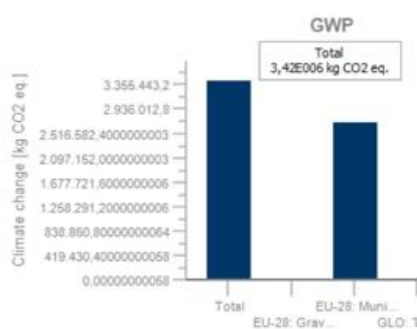


b) Čelična konstrukcija

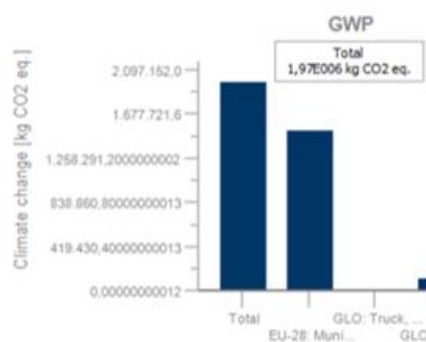


c) Spregnuta konstrukcija

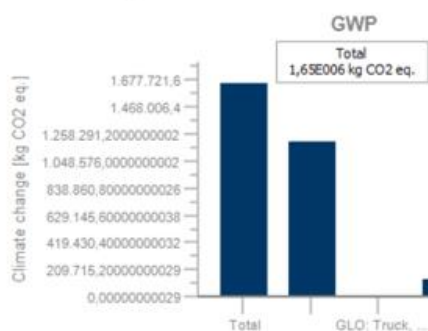
Slika 74. Utjecaj na globalno zatopljenje



a) Betonska konstrukcija

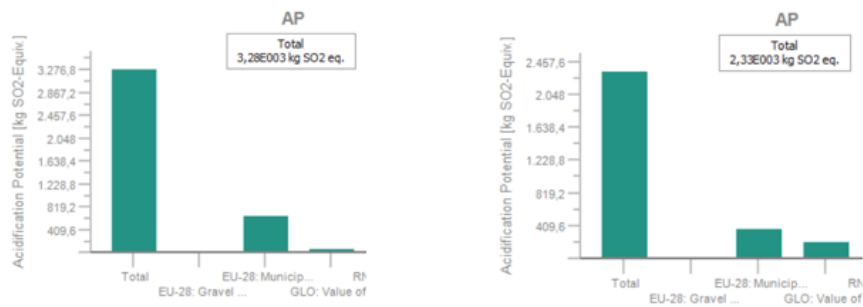


b) Čelična konstrukcija



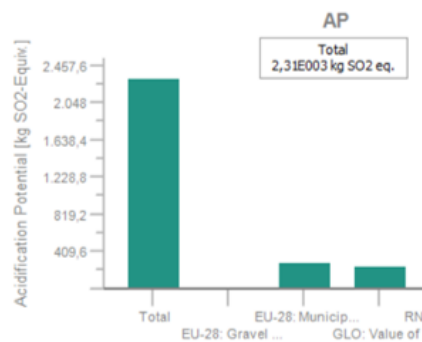
c) Spregnuta konstrukcija

Slika 75. Utjecaj na klimatske promjene



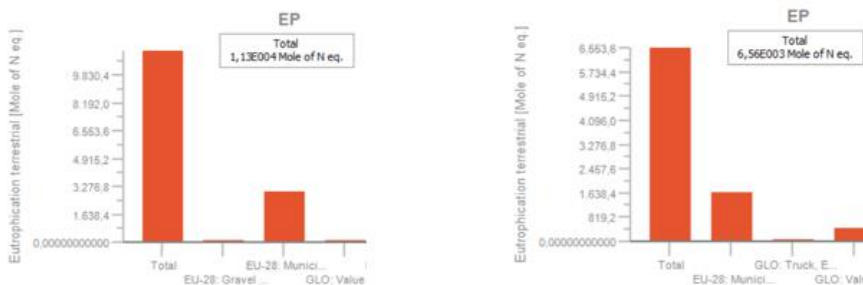
a) Betonska konstrukcija

b) Čelična konstrukcija



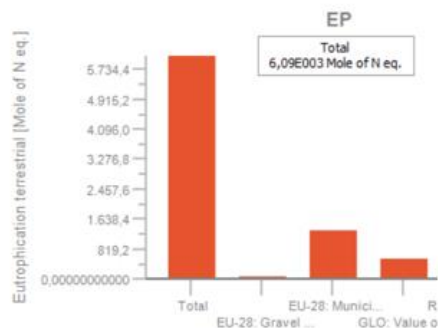
c) Spregnuta konstrukcija

Slika 76. Utjecaj zakiseljavanja



a) Betonska konstrukcija

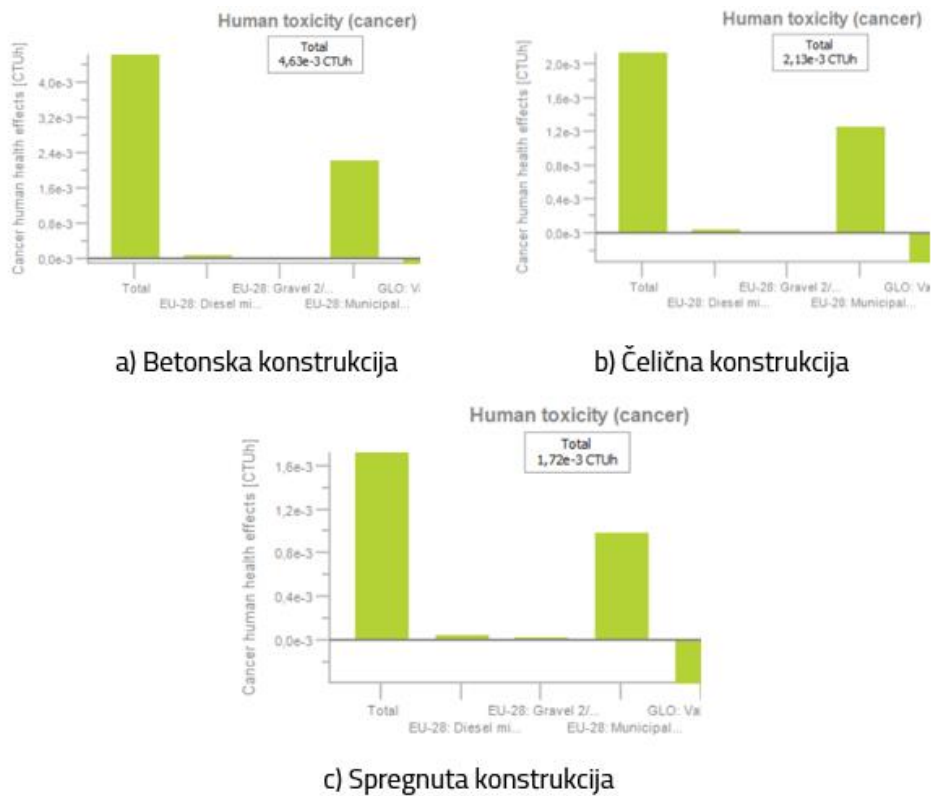
b) Čelična konstrukcija



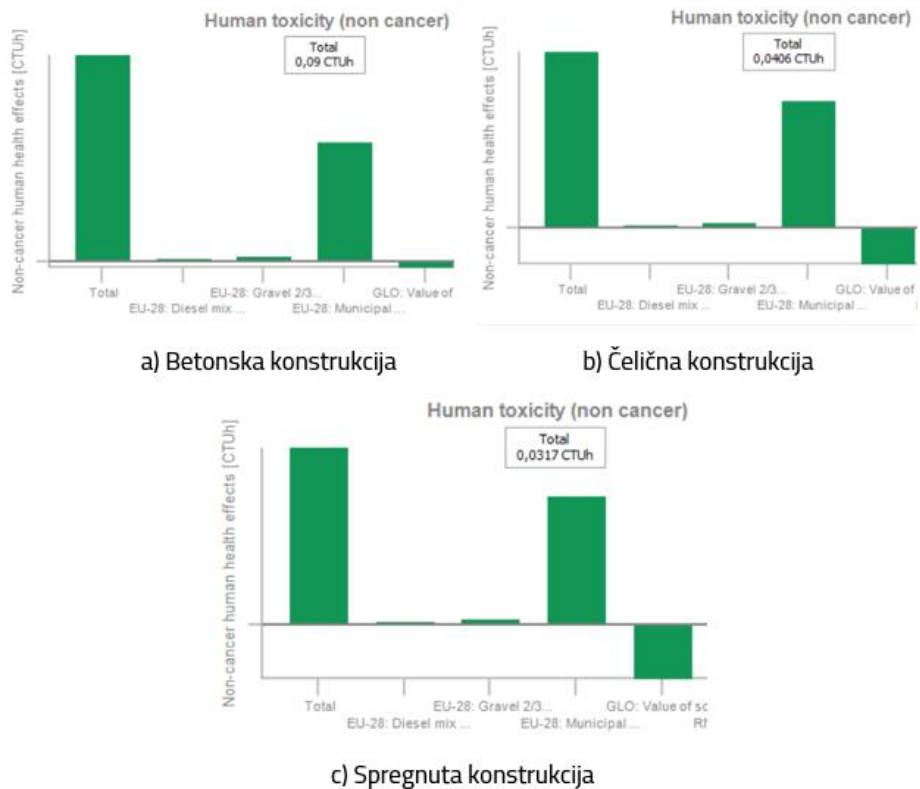
c) Spregnuta konstrukcija

Slika 77. Utjecaj eutrofikacije

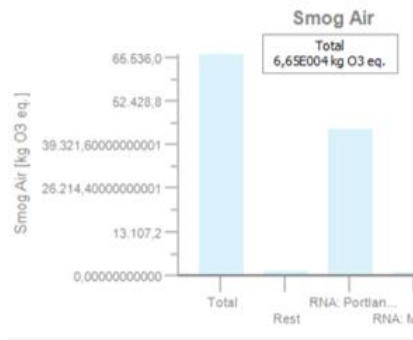




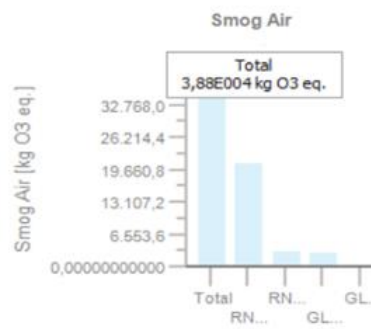
Slika 78. Utjecaj toksičnosti za ljude (kancerogena)



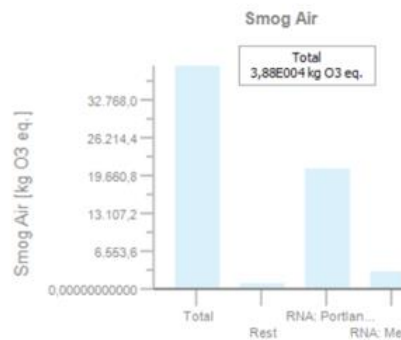
Slika 79. Utjecaj toksičnosti za ljude (nekancerogena)



a) Betonska konstrukcija

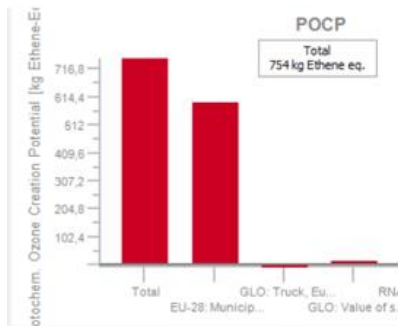


b) Čelična konstrukcija

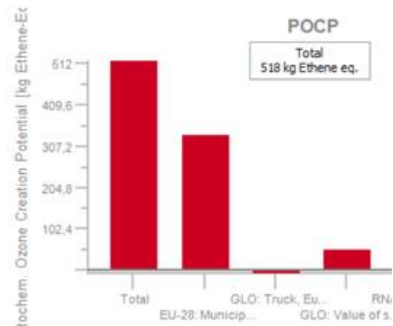


c) Spregnuta konstrukcija

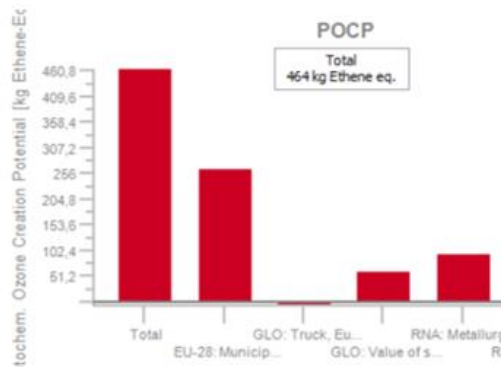
Slika 80. Zagađenost zraka



a) Betonska konstrukcija

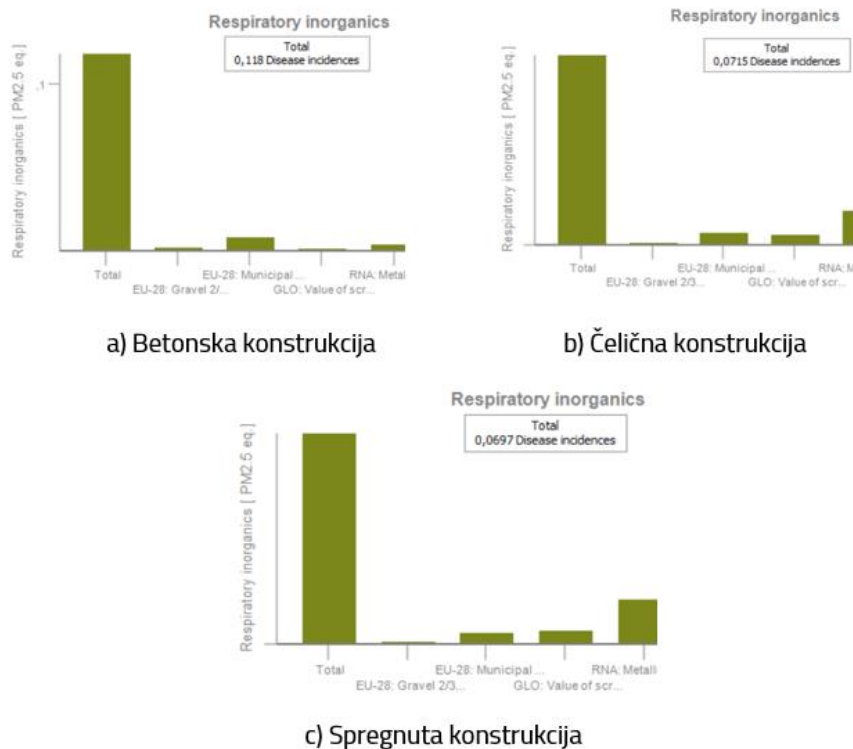


b) Čelična konstrukcija



c) Spregnuta konstrukcija

Slika 81. Potencijal stvaranja ozona



Slika 82. Utjecaj na anorganske respiratorne tvari

## 11.7 Zaključak

Ovim istraživanjem analiziralo se utjecaj životnog ciklusa triju višekatnih poslovnih zgrada kod kojih su korišteni različiti materijali za nosivu konstrukciju: armirani beton, čelik i spregnuta konstrukcija čelik-beton. Rezultati su jasno pokazali da vrsta materijala značajno utječe na ekološku održivost, pri čemu armirano betonska konstrukcija uzrokuje daleko veće zagađenje u odnosu na čeličnu i spregnutu konstrukciju. Faze s najvećim doprinosom onečišćenju su nabava sirovina i zbrinjavanje otpada nakon isteka životnog vijeka građevine.

Betonski otpad predstavlja veći ekološki problem jer se, za razliku od čelika, ne može reciklirati te završava na odlagalištima, čime dodatno opterećuje okoliš. Također, rezultati su pokazali da je i dispozicijski rješenje konstrukcija imao značajan utjecaj na razlike u ekološkom učinku između spregnutih i čeličnih konstrukcija. Da su konstrukcije bile projektirane na isti način, rezultati bi vjerojatno više varirali u korist spregnute konstrukcije.

LCA analiza potvrđuje da je čelik, kao materijal, ekološki prihvatljiviji od betona. No, za potpuni uvid u održivost konstrukcijskih rješenja potrebno je razmotriti i ekonomske te društvene čimbenike, budući da oni također utječu na konačni izbor materijala za izvedbu nosive konstrukcije.

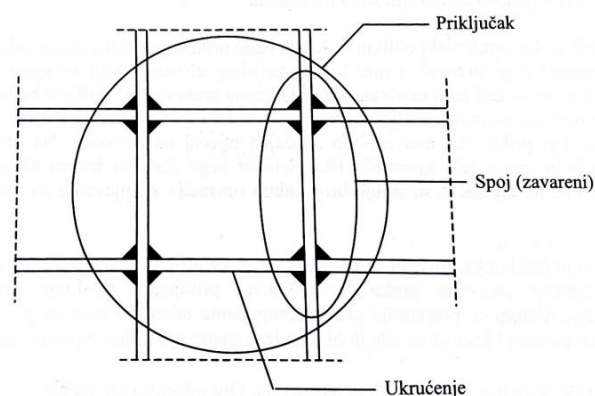


## 12 PRORAČUN PRIKLJUČAKA

Priključci u građevinskim konstrukcijama predstavljaju ključne komponente koje osiguravaju prijenos sila između elemenata te stabilnost i cjelovitost sustava. Kod projektiranja priključaka, posebnu pozornost potrebno je posvetiti izboru materijala, metodama spajanja i detaljima izvedbe. Priključci mogu biti izvedeni kao zavareni, vijčani ili kombinirani spojevi, a njihova izvedba ovisi o vrsti opterećenja, tipu konstrukcije i zahtjevima normi.

Pojmovi "priključak" i "spoj" često se pogrešno koriste kao sinonimi, no među njima postoji bitna razlika. Spoj se odnosi na samu tehniku spajanja, odnosno na spojna sredstva poput vijaka, zakovica ili varova te na dijelove konstrukcijskih elemenata koji su međusobno povezani tim sredstvima. S druge strane, priključak obuhvaća širu zonu u kojoj se elementi konstrukcije povezuju. On uključuje ne samo spojna sredstva, već i dijelove konstrukcijskih elemenata koji sudjeluju u prijenosu unutarnjih sila i momenata, čime osigurava cjelokupnu stabilnost i funkcionalnost spoja [1].

S obzirom na sve veće zahtjeve za efikasnošću i održivošću u građevinarstvu, moderni pristupi projektiranju priključaka nastoje smanjiti uporabu materijala, optimizirati izvedbu i omogućiti lakšu montažu te održavanje konstrukcija.



Slika 83. Priključak i komponente priključka [1]

## 12.1 Priključak stope stupa

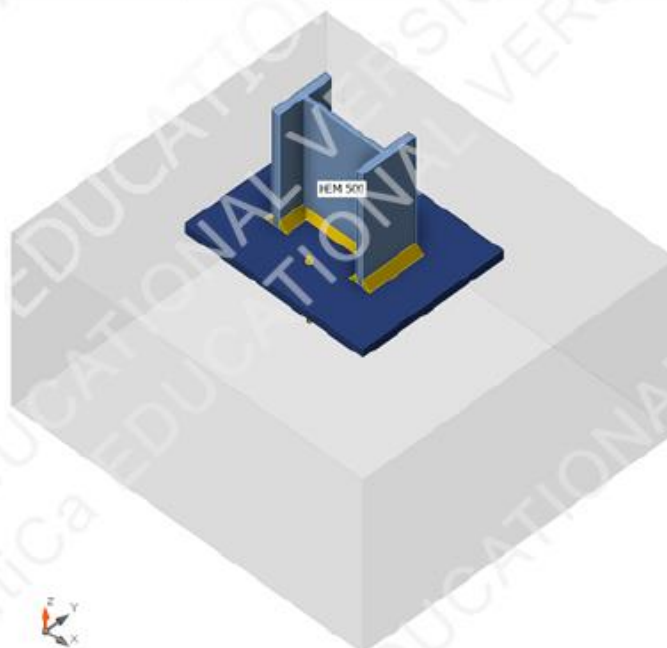
### Members

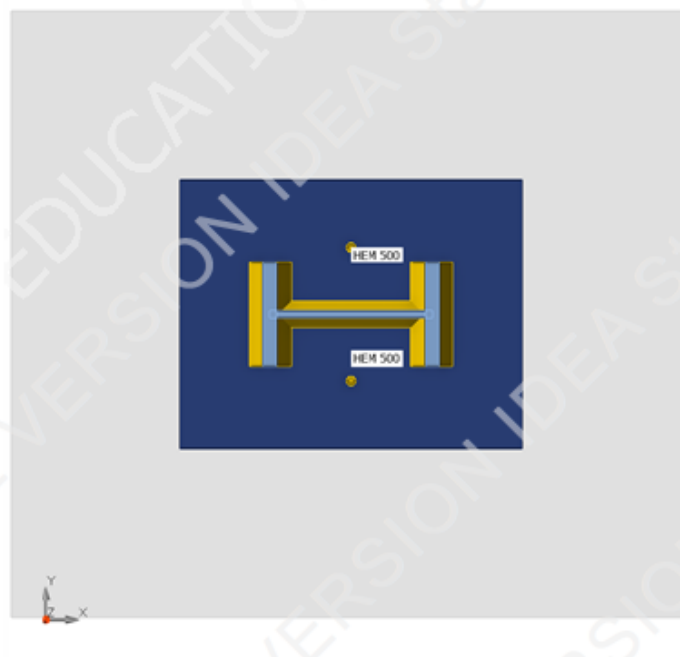
#### Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ - Direction [°]	$\gamma$ - Pitch [°]	$\alpha$ - Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
HEM 500	1 - stup(HEM500)	0.0	90.0	0.0	0	0	0

#### Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [mm]
HEM 500 / end		Node	0





#### Cross-sections

Name	Material
1 - stup(HEM500)	S 355

#### Anchors

Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M16 8.8	16	640.0	800.0	201

#### 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	HEM 500 / End	-9524.3	14.2	0.0	0.0	0.0	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	14.2	-9524.3	0.0	0.0	0.0

**Foundation block**

Item	Value	Unit
CB 1		
Dimensions	1806 x 2024	mm
Depth	1000	mm
Anchor	M16 8.8	
Anchoring length	300	mm
Shear force transfer	Friction	

**Check****Summary**

Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	0.4 < 5.0%	OK
Anchors	0.0 < 100%	OK
Welds	98.0 < 100%	OK
Concrete block	96.1 < 100%	OK
Shear	0.6 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	

**Plates**

Name	Material	$t_p$ [mm]	Loads	$\sigma_{Ed}$ [MPa]	$\epsilon_{Pl}$ [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
HEM 500-bfl 1	S 355	40.0	LE1	355.8	0.4	0.0	OK
HEM 500-tfl 1	S 355	40.0	LE1	355.8	0.4	0.0	OK
HEM 500-w 1	S 355	21.0	LE1	355.0	0.0	0.0	OK
BP1	S 355 - 1	50.0	LE1	335.1	0.1	0.0	OK

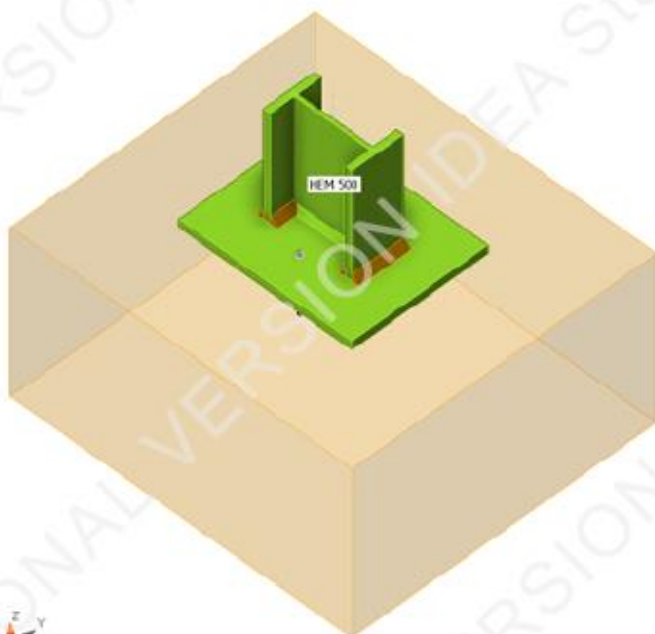
**Design data**

Material	$f_y$ [MPa]	$\epsilon_{lim}$ [%]
S 355	355.0	5.0

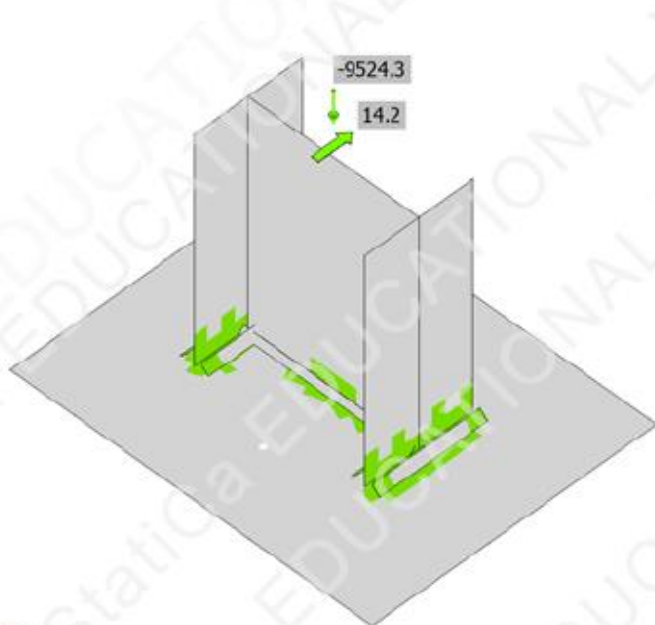
**Symbol explanation**

$t_p$	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

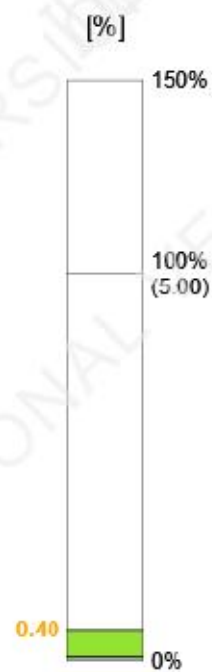


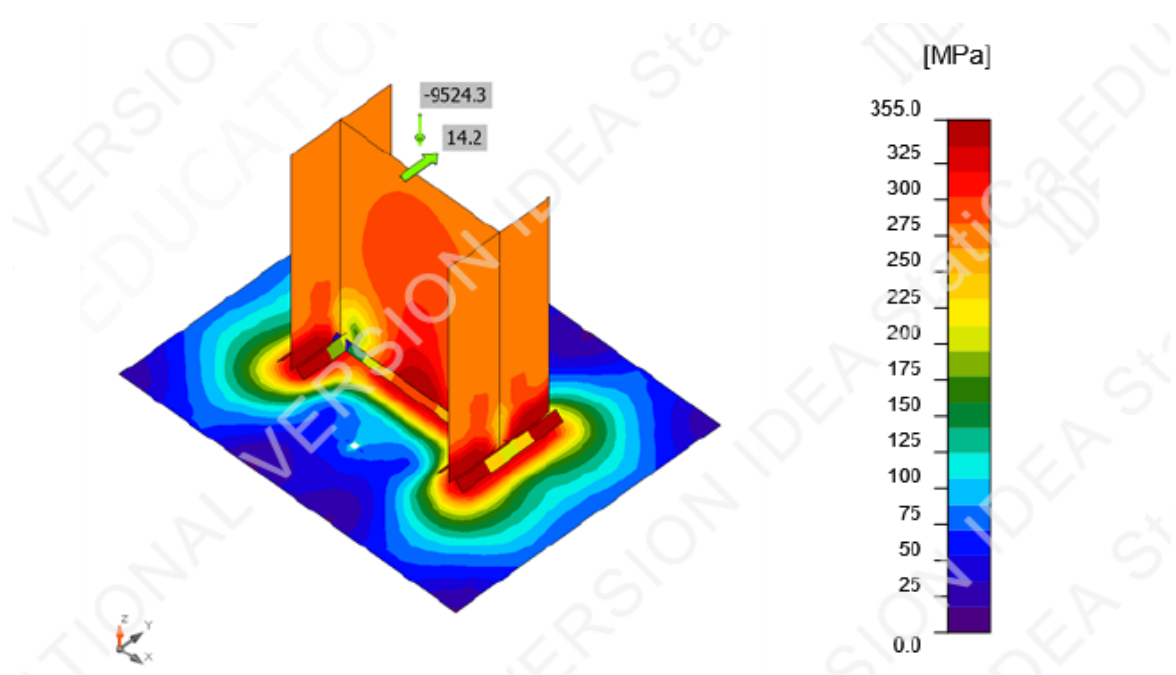


Overall check, LE1



Strain check, LE1





Equivalent stress, LE1

**Anchors**

Shape	Item	Loads	$N_{Ed}$ [kN]	$V_{Ed}$ [kN]	$V_{Rd,cp}$ [kN]	$U_t$ [%]	$U_s$ [%]	$U_{ts}$ [%]	Detailing	Status
	A1	LE1	0.0	0.0	421.3	0.0	0.0	0.0	OK	OK
	A2	LE1	0.0	0.0	421.3	0.0	0.0	0.0	OK	OK

**Design data**

Grade	$N_{Rd,s}$ [kN]	$V_{Rd,s}$ [kN]
M16 8.8 - 1	71.2	64.3

**Symbol explanation**

- $N_{Ed}$  Tension force
- $V_{Ed}$  Resultant of bolt shear forces  $V_y$  and  $V_z$  in shear planes
- $V_{Rd,cp}$  Design resistance in case of concrete pryout failure - EN 1992-4 – 7.2.2.4
- $U_t$  Utilization in tension
- $U_s$  Utilization in shear
- $U_{ts}$  Utilization in tension and shear
- $N_{Rd,s}$  Design tensile resistance of a fastener in case of steel failure - EN 1992-4 – 7.2.1.3
- $V_{Rd,s}$  Design shear resistance of a fastener in case of steel failure - EN 1992-4 – 7.2.2.3.1

## Welds

Item	Edge	$T_w$ [mm]	L [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$ [%]	$\sigma_{\perp}$ [MPa]	$\tau_{\perp}$ [MPa]	$\tau_{\parallel}$ [MPa]	Ut [%]	Ut <sub>c</sub> [%]	Detailing	Status
BP1	HEM 500-bfl 1	▲ 30.0 ▼	306	LE1	396.7	0.0	-172.8	-161.3	128.3	98.0	89.6	OK	OK
		▲ 30.0 ▼	306	LE1	396.7	0.1	-161.4	171.9	-119.3	98.0	89.5	OK	OK
BP1	HEM 500-tfl 1	▲ 30.0 ▼	306	LE1	396.7	0.1	-161.2	-171.8	-119.5	98.0	89.5	OK	OK
		▲ 30.0 ▼	306	LE1	396.7	0.0	-172.7	161.2	128.5	98.0	89.7	OK	OK
BP1	HEM 500-w 1	▲ 20.0 ▼	483	LE1	287.6	0.0	-143.6	-143.8	-0.1	71.1	33.1	OK	OK
		▲ 20.0 ▼	483	LE1	287.4	0.0	-143.9	143.7	0.1	71.0	33.0	OK	OK

## Design data

Material	$f_u$ [MPa]	$\beta_w$ [-]	$\sigma_{w,Rd}$ [MPa]	0.9 $\sigma$ [MPa]
S 275	430.0	0.85	404.7	309.6

## Symbol explanation

$T_w$	Throat thickness a
L	Length
$\sigma_{w,Ed}$	Equivalent stress
$\epsilon_{pl}$	Strain
$\sigma_{\perp}$	Perpendicular stress
$\tau_{\perp}$	Shear stress perpendicular to weld axis
$\tau_{\parallel}$	Shear stress parallel to weld axis
Ut	Utilization
Ut <sub>c</sub>	Weld capacity estimation
▲	Fillet weld
$f_u$	Ultimate strength of weld
$\beta_w$	Correlation factor EN 1993-1-8 – Tab. 4.1
$\sigma_{w,Rd}$	Equivalent stress resistance
0.9 $\sigma$	Perpendicular stress resistance: $0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2}$

## Concrete block

Item	Loads	c [mm]	$A_{eff}$ [mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [MPa]	$k_j$ [-]	$f_{jd}$ [MPa]	Ut [%]	Status
CB 1	LE1	83	247332	38.6	3.00	40.2	96.1	OK

## Symbol explanation

c	Bearing width
$A_{eff}$	Effective area
$\sigma$	Average stress in concrete
$k_j$	Concentration factor
$f_{jd}$	The ultimate bearing strength of the concrete block
Ut	Utilization

## Shear in contact plane

Name	Loads	$V_y$ [kN]	$V_z$ [kN]	$V_{Rd,y}$ [kN]	$V_{Rd,z}$ [kN]	$U_t$ [%]	Status
BP1	LE1	14.2	0.0	2388.9	2388.9	0.6	OK

## Symbol explanation

$V_y$	Shear force in base plate $V_y$
$V_z$	Shear force in base plate $V_z$
$V_{Rd,y}$	Shear resistance
$V_{Rd,z}$	Shear resistance
$U_t$	Utilization

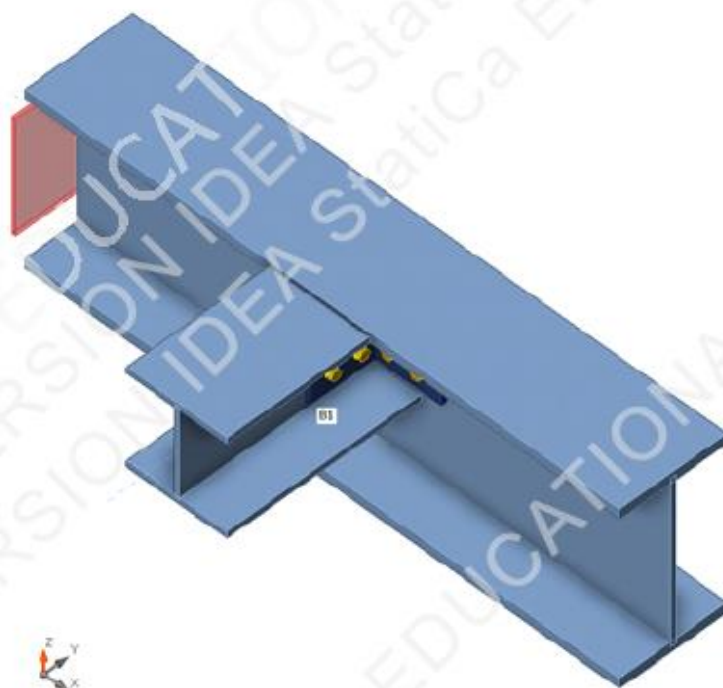
## 12.2 Priključak glavnog i sekundarnog nosača

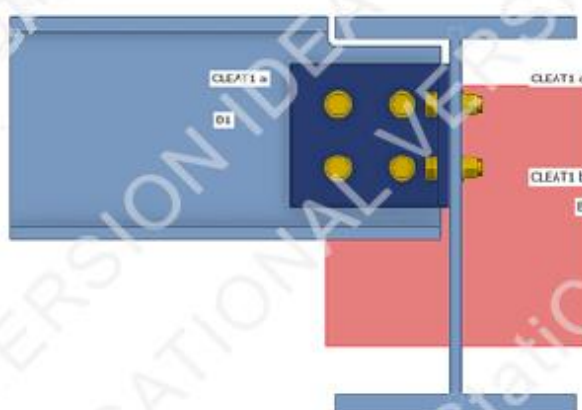
### Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ - Direction [°]	$\gamma$ - Pitch [°]	$\alpha$ - Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
B	1 - glavni nosac(HEB500)	0.0	0.0	0.0	0	0	0
B1	3 - sekundami(HEB280)	-90.0	0.0	0.0	0	0	110

### Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [mm]
B / begin	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz	Node	0
B / end		Node	0
B1 / end		Bolts	107





### Cross-sections

Name	Material
1 - glavni nosac(HEB500)	S 355
3 - sekundarni(HEB280)	S 355
4 - L200X16	S 355

**Bolts**

Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M18 8.8	18	640.0	800.0	254

**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	B / Begin	-90.0	0.0	-506.0	0.0	-384.0	0.0
	B / End	90.0	0.0	253.0	0.0	384.0	0.0
	B1 / End	0.0	0.0	-180.0	0.0	0.0	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	-433.0	19.3	0.0	0.0

**Check****Summary**

Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	0.5 < 5.0%	OK
Bolts	88.2 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	

**Plates**

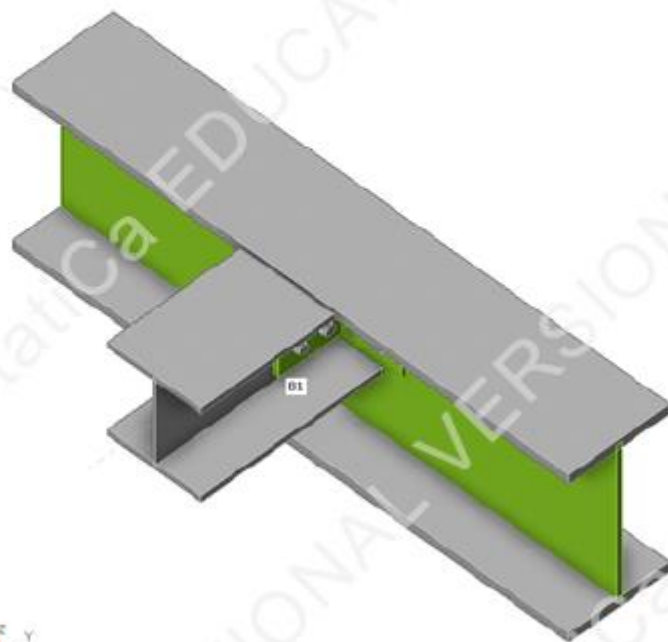
Name	$t_p$ [mm]	Loads	$\sigma_{Ed}$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$ [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
B-bfl 1	28.0	LE1	172.3	0.0	0.0	OK
B-tfl 1	28.0	LE1	179.3	0.0	0.0	OK
B-w 1	14.5	LE1	356.0	0.5	59.7	OK
B1-bfl 1	18.0	LE1	64.4	0.0	0.0	OK
B1-tfl 1	18.0	LE1	65.2	0.0	0.0	OK
B1-w 1	10.5	LE1	266.4	0.0	153.2	OK
CLEAT1 a-bfl 1	16.0	LE1	355.2	0.1	303.7	OK
CLEAT1 a-w 1	16.0	LE1	355.1	0.1	303.7	OK
CLEAT1 b-bfl 1	16.0	LE1	355.3	0.1	294.5	OK
CLEAT1 b-w 1	16.0	LE1	355.2	0.1	294.5	OK

**Design data**

Material	$f_y$ [MPa]	$\epsilon_{lim}$ [%]
S 355	355.0	5.0

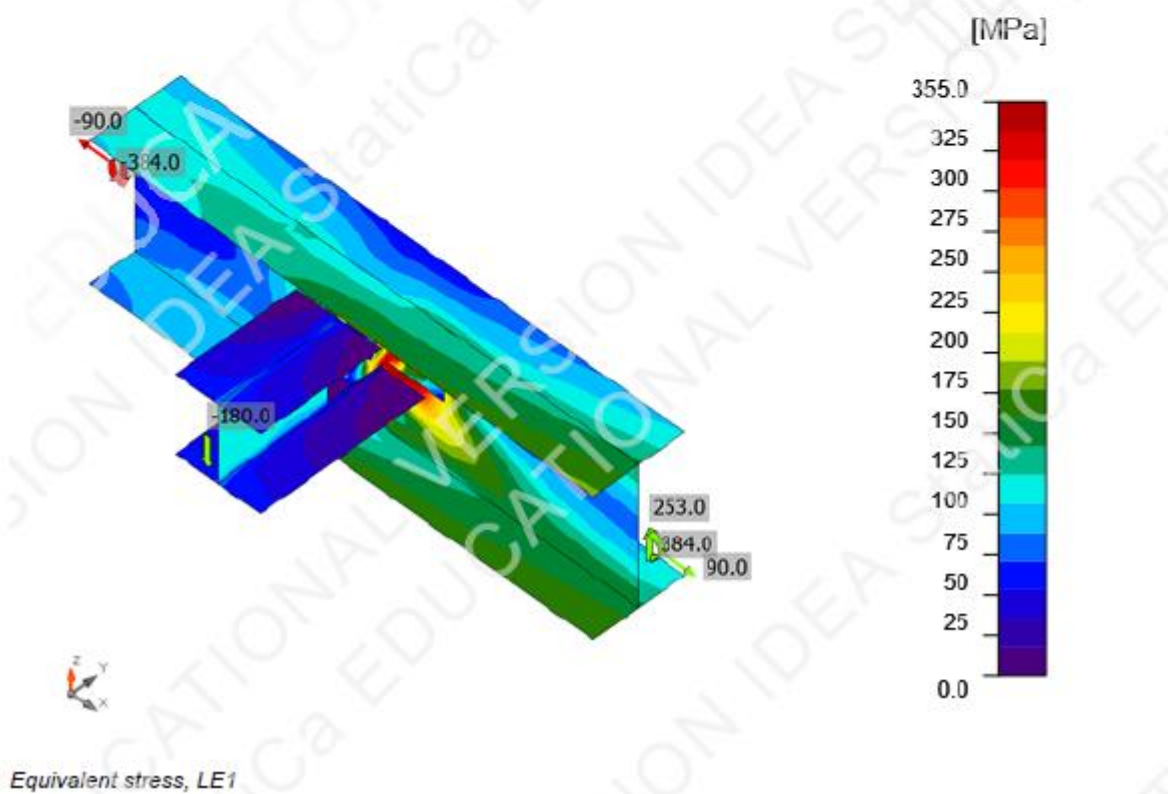
## Symbol explanation

$t_p$	Plate thickness
$\sigma_{Ed}$	Equivalent stress
$\epsilon_{Pl}$	Plastic strain
$\sigma_{o,Ed}$	Contact stress
$f_y$	Yield strength
$\epsilon_{lim}$	Limit of plastic strain






Overall check, LE1





## Bolts

Shape	Item	Grade	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	$U_{t_t}$ [%]	$U_{t_s}$ [%]	$U_{t_{ts}}$ [%]	Detailing	Status
	B1	M18 8.8 - 1	LE1	29.9	22.5	185.2	27.0	30.5	49.8	OK	OK
	B2	M18 8.8 - 1	LE1	20.3	22.2	185.2	18.3	30.1	43.2	OK	OK
	B3	M18 8.8 - 1	LE1	0.4	23.6	185.2	0.4	32.0	32.2	OK	OK
	B4	M18 8.8 - 1	LE1	0.7	23.8	185.2	0.7	32.3	32.8	OK	OK
	B5	M18 8.8 - 2	LE1	27.5	34.4	255.8	24.9	46.7	64.5	OK	OK
	B6	M18 8.8 - 2	LE1	75.2	29.0	235.2	68.0	39.3	87.9	OK	OK
	B7	M18 8.8 - 2	LE1	11.7	25.5	255.8	10.6	34.5	42.1	OK	OK
	B8	M18 8.8 - 2	LE1	19.4	16.0	235.2	17.6	21.7	34.3	OK	OK
	B9	M18 8.8 - 2	LE1	27.8	35.8	255.8	25.1	48.6	66.5	OK	OK
	B10	M18 8.8 - 2	LE1	73.9	29.9	235.2	66.8	40.5	88.2	OK	OK
	B11	M18 8.8 - 2	LE1	12.6	26.4	255.8	11.4	35.8	43.9	OK	OK
	B12	M18 8.8 - 2	LE1	24.8	16.6	235.2	22.4	22.5	38.4	OK	OK

## Design data

Grade	$F_{t,Rd}$ [kN]	$B_{p,Rd}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]
M18 8.8 - 1	110.6	337.8	73.7
M18 8.8 - 2	110.6	306.1	73.7

## Symbol explanation

$F_{t,Ed}$	Tension force
$F_{v,Ed}$	Resultant of bolt shear forces $V_y$ and $V_z$ in shear planes
$F_{b,Rd}$	Plate bearing resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$U_{t_t}$	Utilization in tension
$U_{t_s}$	Utilization in shear
$U_{t_{ts}}$	Interaction of tension and shear EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$F_{t,Rd}$	Bolt tension resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$B_{p,Rd}$	Punching shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$F_{v,Rd}$	Bolt shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4

### 12.3 Priključak glavnog i sekundarnog nosača na stup

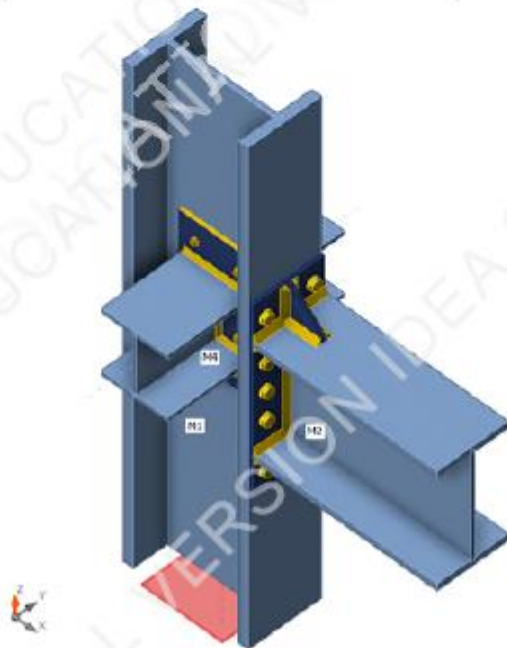
#### Members

#### Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ - Direction [°]	$\gamma$ - Pitch [°]	$\alpha$ - Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
M1	8 - stup(HEM500)	0.0	90.0	0.0	0	0	0
M2	1 - glavni nosač(HEB500)	0.0	0.0	0.0	0	0	0
M3	3 - sekundarni(HEB280)	90.0	0.0	0.0	0	0	110
M4	3 - sekundarni(HEB280)	-90.0	0.0	0.0	0	0	110

#### Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [mm]
M1 / begin	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz	Node	0
M1 / end		Node	0
M2 / end		Node	0
M3 / end		Node	0
M4 / end		Node	0





## Cross-sections

Name	Material
8 - stup(HEM500)	S 355
1 - glavni nosac(HEB500)	S 355
3 - sekundarni(HEB280)	S 355

## Bolts

Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M27 8.8	27	640.0	800.0	573
M18 8.8	18	640.0	800.0	254

## Load effects (forces in equilibrium)

Name	Member	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	M1 / Begin	9524.3	0.0	14.0	0.0	21.0	0.0
	M1 / End	-8384.0	0.0	-14.0	0.0	-21.0	0.0
	M2 / End	-504.0	0.0	-603.0	0.0	964.0	0.0
	M3 / End	73.0	0.0	-107.0	0.0	-20.0	0.0
	M4 / End	-117.0	0.0	107.0	0.0	-20.0	0.0

## Unbalanced forces

Name	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	-504.0	180.0	537.3	-20.9	964.0	0.0

## Check

## Summary

Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	3.2 < 5.0%	OK
Bolts	71.3 < 100%	OK
Welds	99.2 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	

## Plates

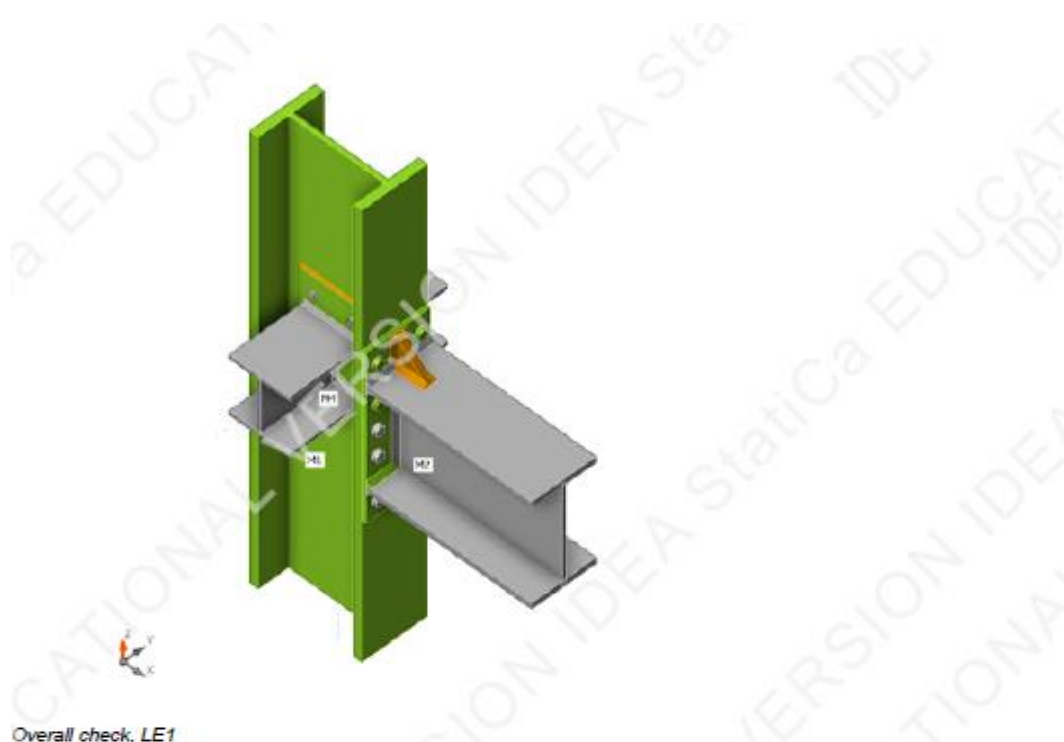
Name	Material	$t_p$ [mm]	Loads	$\sigma_{Ed}$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$ [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
M1-bfl 1	S 355	40.0	LE1	356.2	0.6	99.2	OK
M1-tfl 1	S 355	40.0	LE1	355.1	0.0	0.0	OK
M1-w 1	S 355	21.0	LE1	355.7	0.3	99.2	OK
M2-bfl 1	S 355	28.0	LE1	338.7	0.0	0.0	OK
M2-tfl 1	S 355	28.0	LE1	295.9	0.0	0.0	OK
M2-w 1	S 355	14.5	LE1	299.9	0.0	0.0	OK
M3-bfl 1	S 355	18.0	LE1	63.9	0.0	0.0	OK
M3-tfl 1	S 355	18.0	LE1	51.0	0.0	0.0	OK
M3-w 1	S 355	10.5	LE1	142.5	0.0	0.0	OK
M4-bfl 1	S 355	18.0	LE1	88.4	0.0	0.0	OK
M4-tfl 1	S 355	18.0	LE1	212.7	0.0	0.0	OK
M4-w 1	S 355	10.5	LE1	224.9	0.0	0.0	OK
EP1	S 355	16.0	LE1	355.3	0.1	88.4	OK
EP2	S 355	10.0	LE1	355.2	0.1	63.8	OK
EP3	S 355	10.0	LE1	355.0	0.0	24.5	OK
WID1a	S 420 NH/NLH	30.0	LE1	426.7	3.2	0.0	OK
WID1b	S 420 NH/NLH	30.0	LE1	424.0	1.9	0.0	OK

## Design data

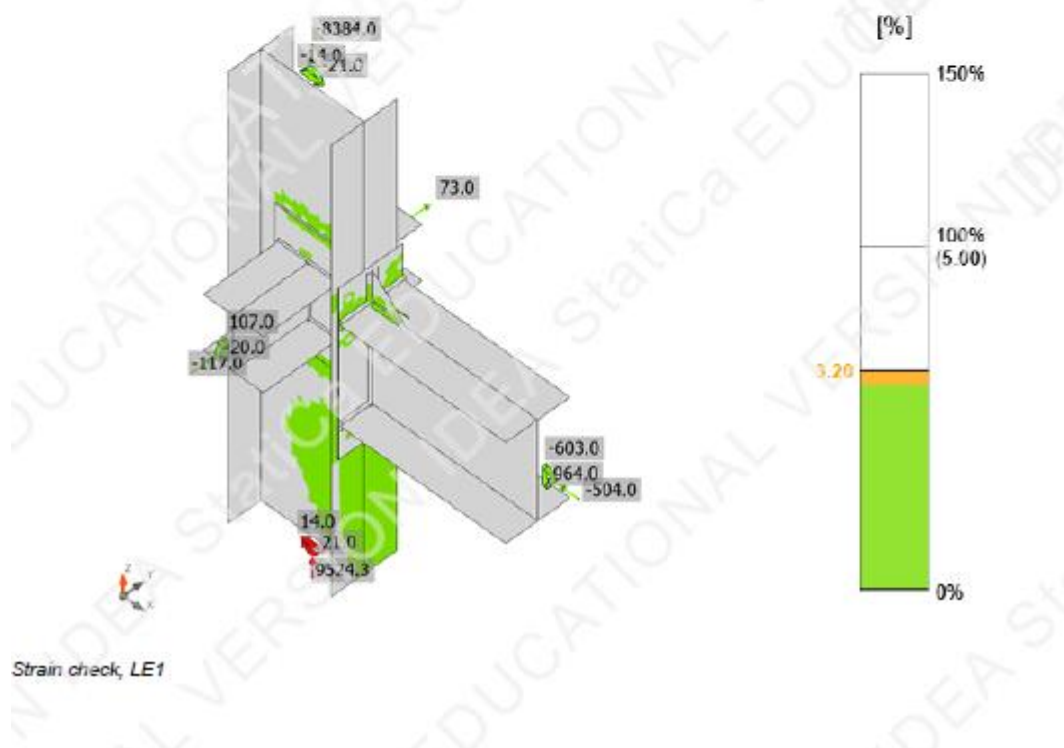
Material	$f_y$ [MPa]	$\epsilon_{lim}$ [%]
S 355	355.0	5.0
S 420 NH/NLH	420.0	5.0

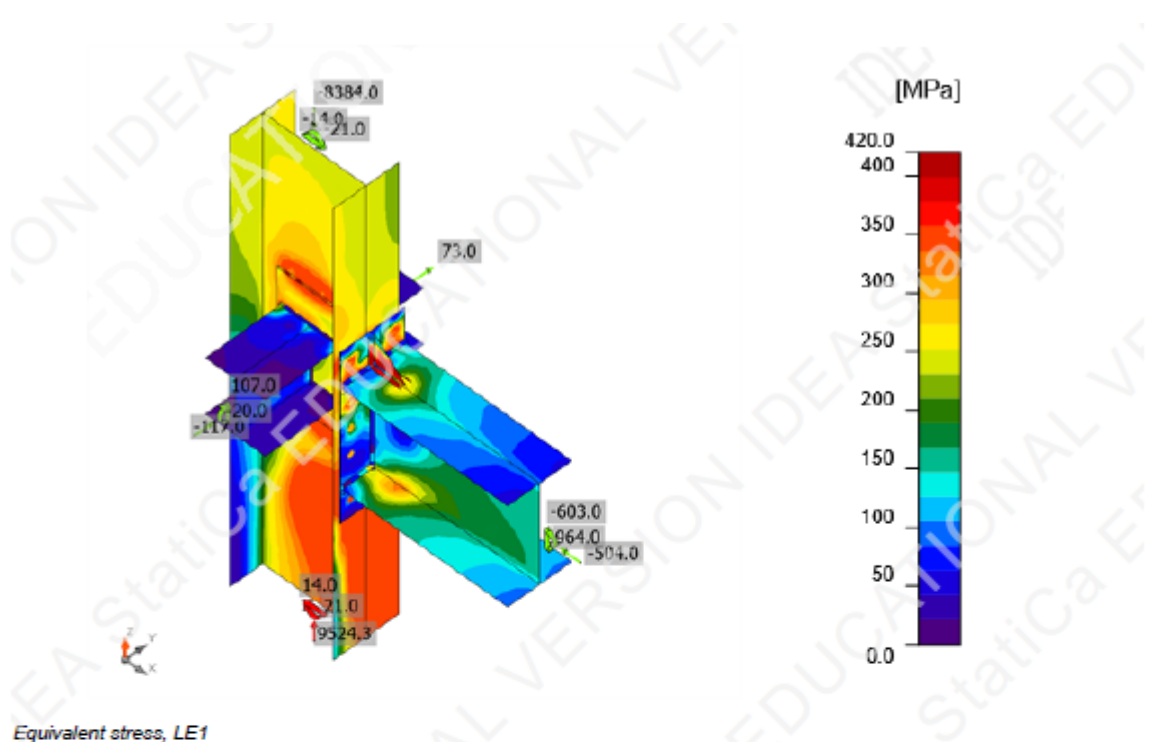
## Symbol explanation

$t_p$	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





**Bolts**

Shape	Item	Grade	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	$U_t$ [%]	$U_s$ [%]	$U_{ts}$ [%]	Detailing	Status
	B1	M27 8.8 - 1	LE1	168.2	41.4	423.4	63.6	23.5	69.0	OK	OK
	B2	M27 8.8 - 1	LE1	156.4	51.2	423.4	59.2	29.1	71.3	OK	OK
	B3	M27 8.8 - 1	LE1	134.1	53.3	423.4	50.7	30.3	66.5	OK	OK
	B4	M27 8.8 - 1	LE1	130.3	57.4	423.4	49.3	32.5	67.7	OK	OK
	B5	M27 8.8 - 1	LE1	40.3	31.0	353.5	15.2	17.8	28.5	OK	OK
	B6	M27 8.8 - 1	LE1	41.2	34.0	366.3	15.6	19.3	30.4	OK	OK
	B7	M27 8.8 - 1	LE1	6.2	18.4	274.5	2.3	10.5	12.1	OK	OK
	B8	M27 8.8 - 1	LE1	7.1	19.3	280.7	2.7	10.9	12.9	OK	OK
	B9	M27 8.8 - 1	LE1	13.0	43.2	284.3	4.0	24.5	28.0	OK	OK
	B10	M27 8.8 - 1	LE1	11.0	42.3	282.1	4.1	24.0	27.0	OK	OK
	B11	M18 8.8 - 2	LE1	5.8	7.6	176.4	5.3	10.3	14.1	OK	OK
	B12	M18 8.8 - 2	LE1	5.3	14.5	176.4	4.8	19.6	23.1	OK	OK
	B13	M18 8.8 - 2	LE1	5.2	3.6	176.4	4.7	4.9	8.2	OK	OK
	B14	M18 8.8 - 2	LE1	3.9	6.9	176.4	3.5	9.3	11.8	OK	OK
	B15	M18 8.8 - 2	LE1	42.7	17.7	176.4	38.6	23.9	51.5	OK	OK
	B16	M18 8.8 - 2	LE1	49.9	24.0	176.4	45.1	32.6	64.8	OK	OK
	B17	M18 8.8 - 2	LE1	41.8	20.0	176.4	37.8	27.1	54.1	OK	OK
	B18	M18 8.8 - 2	LE1	50.6	26.8	176.4	45.7	36.3	69.0	OK	OK



## Design data

Grade	$F_{t,Rd}$ [kN]	$B_{p,Rd}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]
M27 8.8 - 1	284.4	509.5	176.3
M18 8.8 - 2	110.6	211.1	73.7

## Symbol explanation

$F_{t,Ed}$	Tension force
$F_{v,Ed}$	Resultant of bolt shear forces $V_y$ and $V_z$ in shear planes
$F_{b,Rd}$	Plate bearing resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$U_t$	Utilization in tension
$U_s$	Utilization in shear
$U_{ts}$	Interaction of tension and shear EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$F_{t,Rd}$	Bolt tension resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$B_{p,Rd}$	Punching shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$F_{v,Rd}$	Bolt shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4

## Welds

Item	Edge	Material	$T_w$ [mm]	L [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$ [%]	$\sigma_{\perp}$ [MPa]	$\tau_{\perp}$ [MPa]	$\tau_{\parallel}$ [MPa]	Ut [%]	Ut <sub>c</sub> [%]	Detailing	Status
EP1	M2-bfl 1	S 275	▲ 15.0 ▲	299	LE1	267.3	0.0	-139.9	-127.4	32.7	66.0	32.0	OK	OK
		S 275	▲ 15.0 ▲	299	LE1	326.5	0.0	-151.1	163.7	-33.6	80.7	38.6	OK	OK
EP1	M2-tfl 1	S 275	▲ 15.0 ▲	299	LE1	155.0	0.0	83.6	57.1	49.2	38.3	16.2	OK	OK
		S 275	▲ 15.0 ▲	299	LE1	146.7	0.0	-11.8	-74.3	40.2	36.3	17.2	OK	OK
EP1	M2-w 1	S 275	▲ 15.0 ▲	471	LE1	190.0	0.0	-87.7	-92.6	29.8	46.9	31.6	OK	OK
		S 275	▲ 15.0 ▲	471	LE1	191.1	0.0	-95.6	90.6	-30.1	47.2	31.7	OK	OK
EP2	M3-bfl 1	S 275	▲ 10.0 ▲	279	LE1	50.0	0.0	21.1	18.3	18.7	12.4	11.4	OK	OK
		S 275	▲ 10.0 ▲	279	LE1	72.3	0.0	38.0	-26.4	23.7	17.9	14.0	OK	OK
EP2	M3-tfl 1	S 275	▲ 10.0 ▲	279	LE1	62.1	0.0	-31.3	-29.6	9.1	15.4	9.6	OK	OK
		S 275	▲ 10.0 ▲	279	LE1	50.3	0.0	-22.1	23.8	-10.5	12.4	8.7	OK	OK
EP2	M3-w 1	S 275	▲ 10.0 ▲	261	LE1	84.4	0.0	-18.4	-14.2	-45.4	20.9	16.1	OK	OK
		S 275	▲ 10.0 ▲	261	LE1	85.4	0.0	-11.2	15.4	46.4	21.1	16.2	OK	OK
EP3	M4-bfl 1	S 275	▲ 10.0 ▲	279	LE1	95.8	0.0	16.8	23.5	-49.1	23.7	17.2	OK	OK
		S 275	▲ 10.0 ▲	279	LE1	118.2	0.0	35.7	-29.0	58.2	29.2	18.8	OK	OK
EP3	M4-tfl 1	S 275	▲ 10.0 ▲	279	LE1	221.9	0.0	-107.7	-90.8	65.6	54.8	30.8	OK	OK
		S 275	▲ 10.0 ▲	279	LE1	146.0	0.0	-51.7	68.7	-38.8	36.1	26.0	OK	OK
EP3	M4-w 1	S 275	▲ 10.0 ▲	261	LE1	122.1	0.0	-9.4	-13.6	68.9	30.2	17.0	OK	OK

Item	Edge	Material	$T_w$ [mm]	L [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$ [%]	$\sigma_{\perp}$ [MPa]	$\tau_{\perp}$ [MPa]	$\tau_{\parallel}$ [MPa]	Ut [%]	Ut <sub>c</sub> [%]	Detailing	Status
		S 275	▲ 10.0 ▲	261	LE1	96.6	0.0	-9.1	4.9	-55.3	23.9	15.9	OK	OK
M1-w 1	EP3	S 355	▲7.0	319	LE1	427.3	0.3	-147.2	161.4	-166.1	98.1	74.0	OK	OK
M1-w 1	EP3	S 355	▲7.0	579	LE1	427.2	0.2	-152.7	130.6	189.8	98.1	76.4	OK	OK
M1-w 1	EP3	S 355	▲7.0	319	LE1	426.8	0.0	-198.1	188.8	-109.5	98.0	56.1	OK	OK
M1-w 1	EP3	S 355	▲7.0	579	LE1	372.1	0.0	-93.7	79.7	192.0	85.4	57.0	OK	OK
M1- bfl 1	WID1a	S 275	▲ 15.0 ▲	138	LE1	401.4	3.0	200.9	200.0	-15.6	99.2	88.6	OK	OK
		S 275	▲ 15.0 ▲	138	LE1	401.3	2.9	199.7	-200.7	10.7	99.2	88.2	OK	OK
M2-tfl 1	WID1a	S 275	▲ 15.0 ▲	148	LE1	401.1	2.8	132.7	133.0	173.4	99.1	88.0	OK	OK
		S 275	▲ 15.0 ▲	148	LE1	401.2	2.8	134.0	-133.7	-172.6	99.1	88.4	OK	OK
M1- bfl 1	WID1b	S 275	▲ 15.0 ▲	139	LE1	401.3	2.9	-121.3	-121.1	184.7	99.2	99.2	OK	OK
		S 275	▲ 15.0 ▲	139	LE1	401.4	2.9	-120.5	120.7	-185.2	99.2	99.2	OK	OK
M2- bfl 1	WID1b	S 275	▲ 15.0 ▲	149	LE1	397.8	0.7	-116.5	-116.4	-186.2	98.3	83.8	OK	OK
		S 275	▲ 15.0 ▲	149	LE1	397.8	0.7	-116.8	116.8	185.9	98.3	84.0	OK	OK

## Design data

Material	$f_u$ [MPa]	$\beta_w$ [-]	$\sigma_{w,Rd}$ [MPa]	$0.9 \sigma$ [MPa]
S 275	430.0	0.85	404.7	309.6
S 355	490.0	0.90	435.6	352.8

## 12.4 Priključak dijagonala na sekundarni nosač i stup

### Members

#### Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ - Direction [°]	$\gamma$ - Pitch [°]	$\alpha$ - Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]
C	8 - stup(HEM500)	0.0	90.0	90.0	0	0	0
B	3 - sekundarni(HEB280)	0.0	0.0	0.0	0	0	0
D1	12 - CHS219. 1/8.0	0.0	24.0	0.0	350	0	220
D2	12 - CHS219. 1/8.0	0.0	-24.0	0.0	350	0	-220

#### Supports and forces

Name	Support	Forces in	X [mm]
C / begin	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz	Node	0
C / end		Node	0
B / end		Node	0
D1 / end		Node	0
D2 / end		Node	0





## Cross-sections

Name	Material
8 - stup(HEM500)	S 355
3 - sekundarni(HEB280)	S 355
12 - CHS219.1/8.0	S 355

## Bolts

Name	Diameter [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	Gross area [mm <sup>2</sup> ]
M27 8.8	27	640.0	800.0	573
M20 8.8	20	640.0	800.0	314

## Load effects (forces in equilibrium)

Name	Member	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	C / Begin	9524.0	0.0	0.0	0.0	16.0	0.0
	C / End	-8384.0	0.0	0.0	0.0	-20.8	0.0
	B / End	117.0	0.0	107.5	0.0	0.0	0.0
	D1 / End	880.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D2 / End	-1082.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
LE3	C / Begin	9524.0	0.0	0.0	0.0	16.0	0.0
	C / End	-8384.0	0.0	0.0	0.0	-20.8	0.0
	B / End	117.0	0.0	107.5	0.0	0.0	0.0
	D1 / End	-950.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D2 / End	980.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

## Unbalanced forces

Name	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	-87.5	0.0	2045.5	4.8	431.6	0.0
LE3	144.4	0.0	482.5	4.8	-424.6	0.0

## Check

## Summary

Name	Value	Check status
Analysis	100.0%	OK
Plates	2.2 < 5.0%	OK
Loc. deformation	0.3 < 3%	OK
Bolts	99.7 < 100%	OK
Welds	88.5 < 100%	OK
Buckling	Not calculated	

## Plates

Name	$t_p$ [mm]	Loads	$\sigma_{Ed}$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$ [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
C-bfl 1	40.0	LE3	355.8	0.4	0.0	OK
C-tfl 1	40.0	LE3	355.9	0.4	0.0	OK
C-w 1	21.0	LE3	359.7	2.2	164.3	OK
B-bfl 1	18.0	LE1	176.5	0.0	0.0	OK
B-tfl 1	18.0	LE3	104.0	0.0	0.0	OK
B-w 1	10.5	LE1	250.2	0.0	0.0	OK
D1	8.0	LE3	357.2	1.0	0.0	OK
D2	8.0	LE1	359.4	2.1	0.0	OK
EP1	20.0	LE3	356.5	0.7	164.3	OK
WID1a	25.0	LE3	287.1	0.0	12.5	OK
WID1b	25.0	LE1	344.5	0.2	10.9	OK
CPL3a	20.0	LE3	330.3	0.0	0.0	OK
CPL3b	20.0	LE1	212.1	0.0	13.3	OK
CPL3c	20.0	LE1	212.0	0.0	13.2	OK
CPL2a	20.0	LE1	355.1	0.1	0.0	OK
CPL2b	20.0	LE3	236.4	0.0	14.9	OK
CPL2c	20.0	LE3	236.0	0.0	15.0	OK

## Design data

Material	$f_y$ [MPa]	$\epsilon_{lim}$ [%]
S 355	355.0	5.0

## Symbol explanation

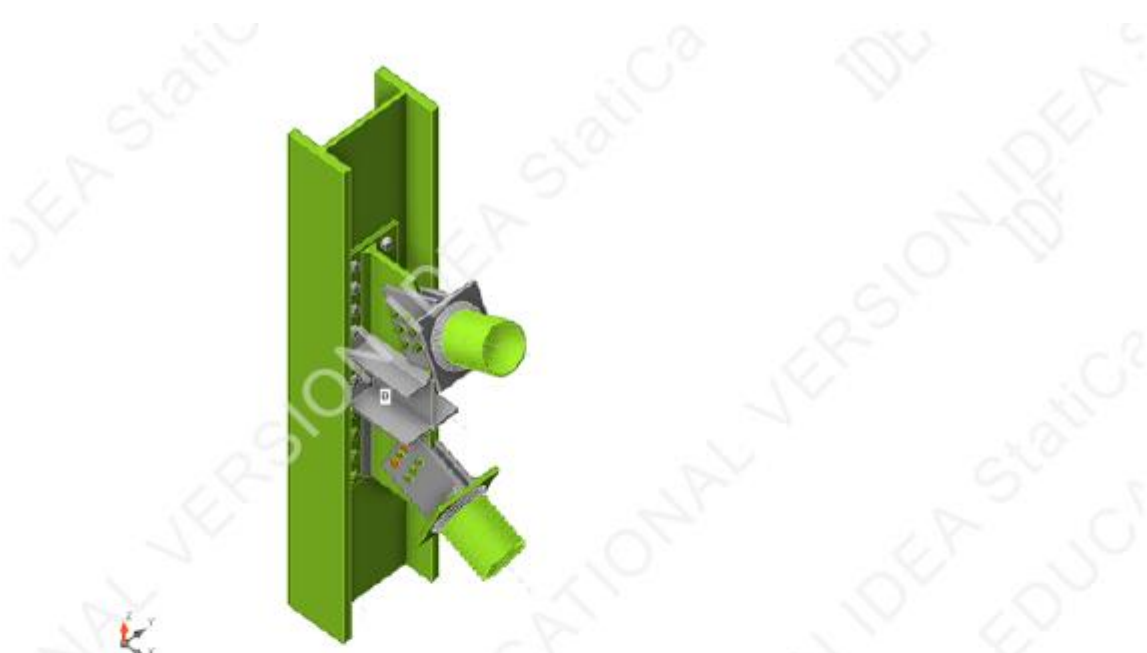
$t_p$	Plate thickness
$\sigma_{Ed}$	Equivalent stress
$\epsilon_{pl}$	Plastic strain
$\sigma_{c,Ed}$	Contact stress
$f_y$	Yield strength
$\epsilon_{lim}$	Limit of plastic strain

## Loc. deformation

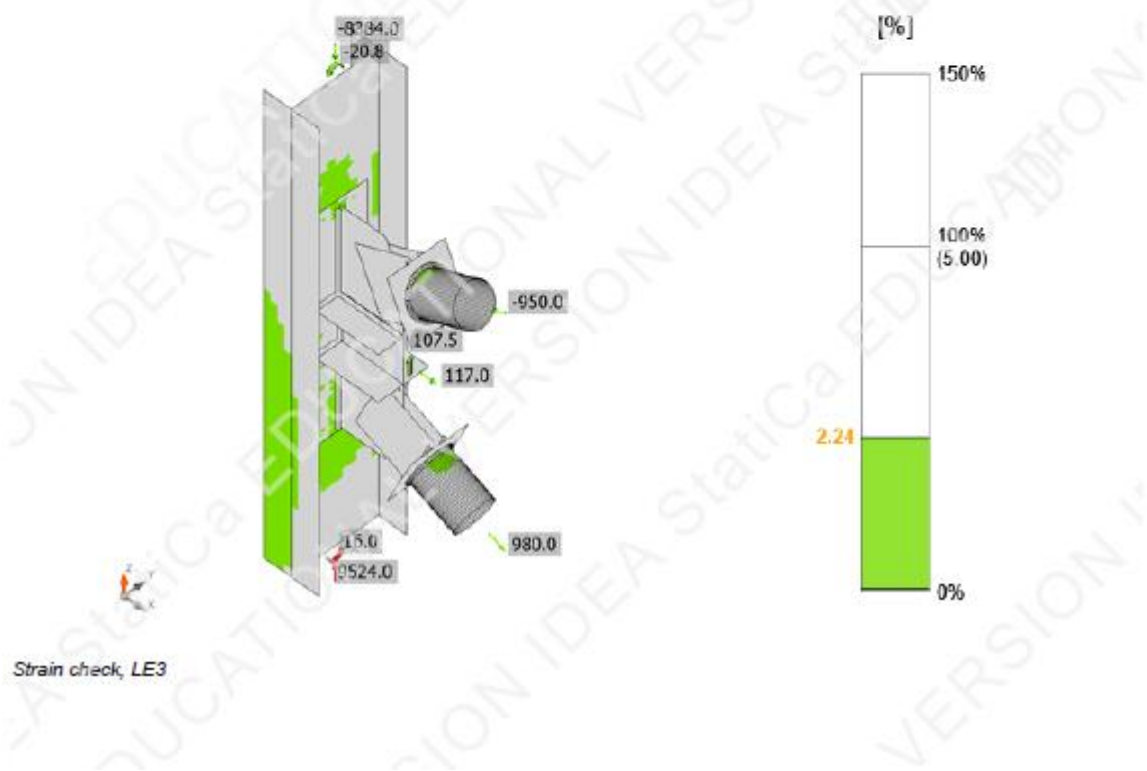
Name	$d_0$ [mm]	Loads	$\delta$ [mm]	$\delta_{lim}$ [mm]	$\delta/d_0$ [%]	Check status
D1	219	LE3	1	7	0.3	OK
D2	219	LE1	1	7	0.3	OK

## Symbol explanation

$d_0$	Cross-section size
$\delta$	Local cross-section deformation
$\delta_{lim}$	Allowed deformation

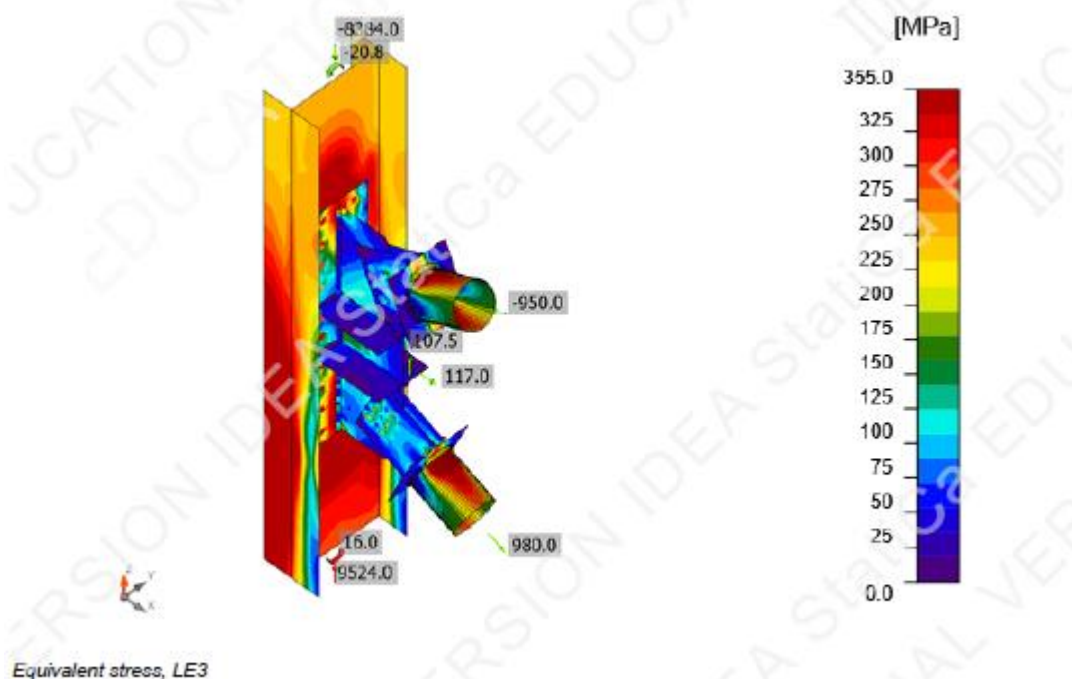


Overall check, LE3



Strain check, LE3





#### Symbol explanation

$F_{T,Ed}$	Tension force
$F_{V,Ed}$	Resultant of bolt shear forces $V_y$ and $V_z$ in shear planes
$F_{D,Rd}$	Plate bearing resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$U_t$	Utilization in tension
$U_s$	Utilization in shear
$U_{ts}$	Interaction of tension and shear EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$F_{T,Rd}$	Bolt tension resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$B_{p,Rd}$	Punching shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4
$F_{V,Rd}$	Bolt shear resistance EN 1993-1-8 – Tab. 3.4

## Bolts

Shape	Item	Grade	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	$U_{t1}$ [%]	$U_{t2}$ [%]	$U_{t3}$ [%]	Detailing	Status
	B1	M27 8.8 - 1	LE1	57.4	67.6	455.7	21.7	38.4	53.9	OK	OK
	B2	M27 8.8 - 1	LE1	56.0	67.8	455.7	21.2	38.4	53.6	OK	OK
	B3	M27 8.8 - 1	LE1	76.4	79.4	529.2	28.9	45.0	65.7	OK	OK
	B4	M27 8.8 - 1	LE1	75.0	79.9	529.2	28.4	45.3	65.6	OK	OK
	B5	M27 8.8 - 1	LE1	48.2	93.3	529.2	18.2	52.9	66.0	OK	OK
	B6	M27 8.8 - 1	LE1	48.5	93.8	529.2	18.3	53.2	66.3	OK	OK
	B7	M27 8.8 - 1	LE1	41.1	105.5	529.2	15.5	59.8	70.9	OK	OK
	B8	M27 8.8 - 1	LE1	41.5	106.0	529.2	15.7	60.1	71.3	OK	OK
	B9	M27 8.8 - 1	LE1	106.5	112.8	529.2	40.3	64.0	92.8	OK	OK
	B10	M27 8.8 - 1	LE1	105.8	113.2	529.2	40.0	64.2	92.8	OK	OK
	B11	M27 8.8 - 1	LE3	71.6	54.2	455.7	27.1	30.7	50.1	OK	OK
	B12	M27 8.8 - 1	LE3	69.6	54.6	455.7	26.3	31.0	49.8	OK	OK
	B13	M27 8.8 - 1	LE3	96.6	71.6	529.2	36.6	40.6	66.7	OK	OK
	B14	M27 8.8 - 1	LE3	94.6	72.5	529.2	35.8	41.2	66.7	OK	OK
	B15	M27 8.8 - 1	LE3	72.5	91.7	498.1	27.4	52.1	71.6	OK	OK
	B16	M27 8.8 - 1	LE3	71.5	92.8	500.6	27.0	52.7	72.0	OK	OK
	B17	M27 8.8 - 1	LE3	71.1	114.3	473.7	26.9	64.9	84.1	OK	OK
	B18	M27 8.8 - 1	LE3	71.6	115.8	475.5	27.1	65.7	85.1	OK	OK
	B19	M27 8.8 - 1	LE3	148.6	91.4	455.8	56.2	51.8	92.0	OK	OK
	B20	M27 8.8 - 1	LE3	148.5	91.8	457.1	56.2	52.1	92.2	OK	OK
	B21	M20 8.8 - 2	LE3	2.8	77.4	490.0	2.0	82.3	83.7	OK	OK
	B22	M20 8.8 - 2	LE3	11.8	77.1	471.4	8.4	81.9	87.9	OK	OK
	B23	M20 8.8 - 2	LE1	16.3	74.2	471.4	11.5	78.9	87.1	OK	OK
	B24	M20 8.8 - 2	LE3	12.2	80.5	471.4	8.6	85.6	91.8	OK	OK
	B25	M20 8.8 - 2	LE1	16.2	74.4	471.4	11.5	79.1	87.3	OK	OK
	B26	M20 8.8 - 2	LE3	12.0	79.9	471.4	8.5	84.9	91.0	OK	OK
	B27	M20 8.8 - 2	LE1	3.0	92.4	490.0	2.2	98.2	99.7	OK	OK
	B28	M20 8.8 - 2	LE1	11.4	87.8	471.4	8.0	93.4	99.1	OK	OK
	B29	M20 8.8 - 2	LE1	3.1	92.4	490.0	2.2	98.2	99.7	OK	OK
	B30	M20 8.8 - 2	LE1	11.0	88.0	471.4	7.8	93.6	99.2	OK	OK
	B31	M20 8.8 - 2	LE1	3.1	92.3	490.0	2.2	98.1	99.7	OK	OK
	B32	M20 8.8 - 2	LE1	11.0	88.1	471.4	7.8	93.6	99.2	OK	OK

## Design data

Grade	$F_{t,Rd}$ [kN]	$B_{p,Rd}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]
M27 8.8 - 1	264.4	636.9	176.3
M20 8.8 - 2	141.1	469.4	94.1

## 13 ZAKLJUČAK

Spregnute konstrukcije predstavljaju učinkovito rješenje koje kombinira prednosti betona i čelika, omogućujući optimalnu raspodjelu opterećenja i smanjenje količine materijala. U seizmički aktivnim područjima, poput Hrvatske, djelovanje potresa je ključno i često presudno za dimenzioniranje konstrukcija. Potresi uzrokuju dinamička opterećenja koja značajno utječu na konstrukciju, pri čemu se posebna pažnja mora posvetiti otpornosti na horizontalne sile. Upravo seizmičko opterećenje, koje generira kombinaciju horizontalnih pomaka i momenata savijanja, često definira dimenzije konstrukcijskih elemenata, kao i njihovih spojeva, te diktira raspored i izvedbu nosivih sustava kako bi se osigurala potrebna pouzdanost i stabilnost građevine.

U projektiranju je važno integrirati aspekte održivosti, gdje analiza životnog ciklusa (LCA) igra ključnu ulogu. LCA omogućuje sveobuhvatnu procjenu ekoloških utjecaja građevine, od faze proizvodnje materijala do rušenja i recikliranja. Održivost postaje sve važniji kriterij pri odabiru materijala i rješenja, osiguravajući smanjenje emisija i racionalnu upotrebu resursa. Na taj način, građevine se ne samo prilagođavaju zahtjevima otpornosti na potrese, već i dugoročno pridonose očuvanju okoliša kroz održivo projektiranje.

## POPIS LITERATURE

- [1] Androić, B.; Dujmović, D.; Džeba, I.: „Čelične konstrukcije 1“, Zagreb: IA Projektiranje; 2009.
- [2] HRN EN 1994
- [3] Androić, B.; Dujmović, D.; Lukačević, I.: „Projektiranje spregnutih konstrukcija prema Eurocode 4“, Zagreb: IA Projektiranje; 2012.
- [4] Horvatić D. „Spregnute konstrukcije ČELIK-BETON“, Zagreb: Masmedia; 2003.
- [5] <https://worldsteel.org/steel-topics/life-cycle-thinking/> (pristupano dana 9. rujna 2024.)
- [6] Rigueiro C.: „SBRI+: Valorizacija spoznaja o održivosti spregnutih mostova u izgrađenom okolišu - Priručnik za projektiranje I: Opće informacije i riješeni primjeri“ / Dujmović, D. ; Lukačević, I. (ur.). Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2018
- [7] HRN EN 1990
- [8] HRN EN 1998
- [9] Lukačević, I. „Osobitost projektiranja čeličnih visokih zgrada kod potresa“, Prezentacija s kolegija Visoke građevine, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
- [10] HRN EN 1993
- [11] HRN EN 1991
- [12] Biškup, D. „Nelinearna seizmička analiza visoke čelične građevine s konstrukcijskim sustavima potpornih rešetki“; Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2021.
- [13] Dujmović, D.; Androić, B. ; Lukačević, I. : „Primjeri proračuna spregnutih konstrukcija prema Eurocode 4. “, Zagreb: IA Projektiranje, 2014
- [14] Štirmer, N. „Utjecaj građevnog materijala na okoliš“, Radovi Zavoda za znanstveni i umjetnički rad u Požegi, 2012. (1), str. 293-311
- [15] Potočki, M. „Projektiranje i ocjena životnog ciklusa čelične višekatne zgrade sa različitim sustavima stabilizacije“; Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2022.

## PRILOG A

Kombinacije opterećenja za granično stanje nosivosti, granično stanje uporabljivosti i potresno djelovanje:

CO1 - 1,35 stalno+1,5 korisno+0,9 vjetar1+0,75 snijeg+1 imp X  
CO2 - 1,35 stalno+1,5 korisno+0,9 vjetar1+0,75 snijeg+1 imp Y  
CO3 - 1,35 stalno+1,5 korisno+0,9 vjetar2+0,75 snijeg+1 imp X  
CO4 - 1,35 stalno+1,5 korisno+0,9 vjetar2+0,75 snijeg+1 imp Y  
CO5 - 1,35 stalno+1,5 korisno+0,9 vjetar3+0,75 snijeg+1 imp X  
CO6 - 1,35 stalno+1,5 korisno+0,9 vjetar3+0,75 snijeg+1 imp Y  
CO7 - 1,35 stalno+1,5 korisno+0,9 vjetar4+0,75 snijeg+1 imp X  
CO8 - 1,35 stalno+1,5 korisno+0,9 vjetar4+0,75 snijeg+1 imp Y  
CO9 - 1,35 stalno+1,05 korisno+1,5 vjetar1+0,75 snijeg+1 imp X  
CO10 - 1,35 stalno+1,05 korisno+1,5 vjetar1+0,75 snijeg+1 imp Y  
CO11 - 1,35 stalno+1,05 korisno+1,5 vjetar2+0,75 snijeg+1 imp X  
CO12 - 1,35 stalno+1,05 korisno+1,5 vjetar2+0,75 snijeg+1 imp Y  
CO13 - 1,35 stalno+1,05 korisno+1,5 vjetar3+0,75 snijeg+1 imp X  
CO14 - 1,35 stalno+1,05 korisno+1,5 vjetar3+0,75 snijeg+1 imp Y  
CO15 - 1,35 stalno+1,05 korisno+1,5 vjetar4+0,75 snijeg+1 imp X  
CO16 - 1,35 stalno+1,05 korisno+1,5 vjetar4+0,75 snijeg+1 imp Y  
CO17 - 1,35 stalno+1,05 korisno+0,9 vjetar1+1,5 snijeg+1 imp X  
CO18 - 1,35 stalno+1,05 korisno+0,9 vjetar1+1,5 snijeg+1 imp Y  
CO19 - 1,35 stalno+1,05 korisno+0,9 vjetar2+1,5 snijeg+1 imp X  
CO20 - 1,35 stalno+1,05 korisno+0,9 vjetar2+1,5 snijeg+1 imp Y  
CO21 - 1,35 stalno+1,05 korisno+0,9 vjetar3+1,5 snijeg+1 imp X  
CO22 - 1,35 stalno+1,05 korisno+0,9 vjetar3+1,5 snijeg+1 imp Y  
CO23 - 1,35 stalno+1,05 korisno+0,9 vjetar4+1,5 snijeg+1 imp X  
CO24 - 1,35 stalno+1,05 korisno+0,9 vjetar4+1,5 snijeg+1 imp Y  
CO25 - 1 stalno+0,7 korisno+1 vjetar1+0,5 snijeg+1 imp X  
CO26 - 1 stalno+0,7 korisno+1 vjetar1+0,5 snijeg+1 imp Y  
CO27 - 1 stalno+0,7 korisno+1 vjetar2+0,5 snijeg+1 imp X  
CO28 - 1 stalno+0,7 korisno+1 vjetar2+0,5 snijeg+1 imp Y

CO29 - 1 stalno+0,7 korisno+1 vjetar3+0,5 snijeg+1 imp X  
CO30 - 1 stalno+0,7 korisno+1 vjetar3+0,5 snijeg+1 imp Y  
CO31 - 1 stalno+0,7 korisno+1 vjetar4+0,5 snijeg+1 imp X  
CO32 - 1 stalno+0,7 korisno+1 vjetar4+0,5 snijeg+1 imp Y  
CO33 - 1 stalno+1 korisno+0,6 vjetar1+0,5 snijeg+1 imp X  
CO34 - 1 stalno+1 korisno+0,6 vjetar1+0,5 snijeg+1 imp Y  
CO35 - 1 stalno+1 korisno+0,6 vjetar2+0,5 snijeg+1 imp X  
CO36 - 1 stalno+1 korisno+0,6 vjetar2+0,5 snijeg+1 imp Y  
CO37 - 1 stalno+1 korisno+0,6 vjetar3+0,5 snijeg+1 imp X  
CO38 - 1 stalno+1 korisno+0,6 vjetar3+0,5 snijeg+1 imp Y  
CO39 - 1 stalno+1 korisno+0,6 vjetar4+0,5 snijeg+1 imp X  
CO40 - 1 stalno+1 korisno+0,6 vjetar4+0,5 snijeg+1 imp Y  
CO41 - 1 stalno+0,7 korisno+0,6 vjetar1+1 snijeg+1 imp X  
CO42 - 1 stalno+0,7 korisno+0,6 vjetar1+1 snijeg+1 imp Y  
CO43 - 1 stalno+0,7 korisno+0,6 vjetar2+1 snijeg+1 imp X  
CO44 - 1 stalno+0,7 korisno+0,6 vjetar2+1 snijeg+1 imp Y  
CO45 - 1 stalno+0,7 korisno+0,6 vjetar3+1 snijeg+1 imp X  
CO46 - 1 stalno+0,7 korisno+0,6 vjetar3+1 snijeg+1 imp Y  
CO47 - 1 stalno+0,7 korisno+0,6 vjetar4+1 snijeg+1 imp X  
CO48 - 1 stalno+0,7 korisno+0,6 vjetar4+1 snijeg+1 imp Y  
CO49 - 1 stalno+0,3 uporabno+ 1 potres X+0,3 potres Y  
CO50 - 1 stalno+0,3 uporabno+ 0,3 potres X+1 potres Y  
CO51 - 1 stalno+0,3 uporabno- 1 potres X+0,3 potres Y  
CO52 - 1 stalno+0,3 uporabno+1 potres X-0,3 potres Y  
CO53 - 1 stalno+0,3 uporabno-1 potres X-0,3 potres Y  
CO54 - 1 stalno+0,3 uporabno-1 potres Y+0,3 potres X  
CO55 - 1 stalno+0,3 uporabno+1 potres Y-0,3 potres X  
CO56 - 1 stalno+0,3 uporabno-1 potres Y-0,3 potres X  
CO57 - GSU:1 stalno+0,3 uporabno+ 1 potres X+0,3 potres Y  
CO58 - GSU:1 stalno+0,3 uporabno+ 0,3 potres X+1 potres Y  
CO59 - GSU:1 stalno+0,3 uporabno- 1 potres X+0,3 potres Y  
CO60 - GSU:1 stalno+0,3 uporabno+1 potres X-0,3 potres Y  
CO61 - GSU:1 stalno+0,3 uporabno-1 potres X-0,3 potres Y  
CO62 - GSU:1 stalno+0,3 uporabno-1 potres Y+0,3 potres X  
CO63 - GSU:1 stalno+0,3 uporabno+1 potres Y-0,3 potres X  
CO64 - GSU:1 stalno+0,3 uporabno-1 potres Y-0,3 potres X  
CO65- izvođenje - GSN-izvođenje  
CO65- izvođenje1 - GSU-izvođenje

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Karakteristični poprečni presjek spregnutog nosača [3] .....	13
<b>Slika 2.</b> Ovisnost momenta savijanja i progiba za slučajeve izvedbe sa i bez podupiranja prije betoniranja[3] .....	14
<b>Slika 3.</b> Ovisnost momenta savijanja i kuta rotacije za tri slučaja izvedbe spregnutog nosača [3] .....	15
<b>Slika 4.</b> Efektivni rasponi za određivanje efektivne širine betonske pojasnice [3].....	16
<b>Slika 5.</b> Karakteristična spregnuta ploča koja se oslanja na spregnuti nosač [3] .....	17
<b>Slika 6.</b> Karakteristične posmične veze kod spregnutih ploča [3] .....	18
Slika 7. Analiza životnog ciklusa [5] .....	20
Slika 8. Životni ciklus građevine [6] .....	23
<b>Slika 9.</b> Koncept "trošak cijelog životnog vijeka" i "trošak životnog ciklusa" [6] .....	24
<b>Slika 10.</b> Profil jedne jedinice novca za različite vrijednosti $r$ [6] .....	25
<b>Slika 11.</b> Prikaz formiranja plastičnih zglobova u nosačima [9] .....	37
<b>Slika 12.</b> Prikaz razgradnje energije u dijagonalama [9] .....	39
<b>Slika 13.</b> Istovrijedne nesavršenosti zbog bočnog pomaka [10] .....	41
<b>Slika 14.</b> Karta snježnih područja [11] .....	46
<b>Slika 15.</b> Karta osnovne brzine vjetra za Republiku Hrvatsku [11].....	47
<b>Slika 16.</b> Referentna visina $z_e$ i raspodjela vršnog tlaka po visini konstrukcije za slučaj kada je $h \leq b$ [11] .....	50
<b>Slika 17.</b> Dimenzije konstrukcije.....	52
<b>Slika 18.</b> Shema opterećenja vjetra na vertikalne stijene .....	52
<b>Slika 19.</b> Osnovni oblici konstrukcija i referentne visine $z_s$ [11].....	54
<b>Slika 20.</b> Koeficijent sile za pravokutne presjeke sa oštrim rubovima bez strujanja vjetra na slobodnom kraju [11] .....	57
<b>Slika 21.</b> Shema opterećenja vjetra na ravni krov .....	59
<b>Slika 22.</b> Tlakovi vjetra za slučaj I opterećenja vjetrom .....	62
<b>Slika 23.</b> Tlakovi vjetra za slučaj I opterećenja vjetrom .....	64
<b>Slika 24.</b> Raspored opterećenja vjetra po visini [11] .....	65
<b>Slika 25.</b> Shema opterećenja vjetra na vertikalne stijene .....	67
<b>Slika 26.</b> Shema opterećenja vjetra na ravni krov .....	71
<b>Slika 27.</b> Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$ .....	74
<b>Slika 28.</b> Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$ .....	74
<b>Slika 29.</b> Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$ .....	75
<b>Slika 30.</b> Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$ .....	75
<b>Slika 31.</b> Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$ .....	76
<b>Slika 32.</b> Tlakovi vjetra za slučaj III opterećenja vjetrom za $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$ .....	76
<b>Slika 33.</b> Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$ .....	79

<b>Slika 34.</b> Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$ .....	79
<b>Slika 35.</b> Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za $q_{p,1}=0,61 \text{ kN/m}^2$ .....	80
<b>Slika 36.</b> Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$ .....	80
<b>Slika 37.</b> Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$ .....	81
<b>Slika 38.</b> Tlakovi vjetra za slučaj IV opterećenja vjetrom za $q_{p,2}=0,661 \text{ kN/m}^2$ .....	81
<b>Slika 39.</b> Elementi za preliminarno dimenzioniranje .....	83
<b>Slika 40.</b> 3D model konstrukcije .....	89
<b>Slika 41.</b> Moment savijanja za model "Kruta dijafragma" .....	90
<b>Slika 42.</b> Moment savijanja za model "Standardni FEM" .....	90
<b>Slika 43.</b> Globalni mod izvijanja za kombinaciju CO7 .....	96
<b>Slika 44.</b> Dijagram momenta savijanja $M_{Ed,y}$ stupa .....	103
<b>Slika 45.</b> Pomak stupa u smjeru x i y .....	105
<b>Slika 46.</b> Dijagram momenta savijanja $M_{Ed,y}$ glavnog nosača .....	112
<b>Slika 47.</b> Progib glavnog nosača .....	114
<b>Slika 48.</b> Poprečni presjek spregnutog nosača [12] .....	118
<b>Slika 49.</b> Dijagram moment savijanja $M_{Ed,y}$ sekundarnog nosača u fazi izvedbe .....	121
<b>Slika 50.</b> Određivanje uzdužnog posmika u betonskoj pojasnici [13] .....	127
<b>Slika 51.</b> Statički sustav i položaj spregnute ploče .....	133
<b>Slika 52.</b> Profil i dimenzije profiliranog lima "Multideck 50" .....	135
<b>Slika 53.</b> Dijagram maksimalnog pozitivnog momenta savijanja .....	136
<b>Slika 54.</b> Dijagram maksimalnog negativnog momenta savijanja .....	137
<b>Slika 55.</b> Dokaz nosivosti na uzdužni posmik .....	140
<b>Slika 56.</b> Deformacija za fazu izvedbe .....	142
<b>Slika 57.</b> Pomak konstrukcije u x smjeru .....	145
<b>Slika 58.</b> Pomak konstrukcije u y smjeru .....	146
<b>Slika 59.</b> Elastični spektar odziva [8] .....	148
<b>Slika 60.</b> Karta potresnih područja za povratno razdoblje od 475 godina .....	149
<b>Slika 61.</b> Elastični spektar tipa 1 ovisno o tipu tla uz 5% prigušenja [8] .....	150
<b>Slika 62.</b> Elastični spektar tipa 2 ovisno o tipu tla uz 5% prigušenja [8] .....	151
<b>Slika 63.</b> Horizontalni proračun spektra odziva za x i y smjer .....	152
<b>Slika 64.</b> Prvi mod osciliranja- y smjer, $T=1,68 \text{ s}$ .....	154
<b>Slika 65.</b> Drugi mod osciliranja- x smjer, $T=1,25 \text{ s}$ .....	154
<b>Slika 66.</b> Treći mod osciliranja- torzija, $T= 1,15 \text{ s}$ .....	155
<b>Slika 67.</b> Dijagram uzdužne sile $N_{Ed}$ za spektralnu analizu.....	158
<b>Slika 68.</b> 3D model čeličnog okvira [15] .....	178
<b>Slika 69.</b> Način rada softvera GaBi [15] .....	178
<b>Slika 70.</b> Modeliranje životnog ciklusa [15] .....	179
<b>Slika 71.</b> Proces životnog ciklusa spregnute konstrukcije .....	182
<b>Slika 72.</b> Proces životnog ciklusa spregnute konstrukcije- nastavak.....	182
<b>Slika 73.</b> Proces životnog ciklusa spregnute konstrukcije- nastavak.....	182



---

<b>Slika 74.</b> Utjecaj na globalno zatopljenje .....	184
<b>Slika 75.</b> Utjecaj na klimatske promjene.....	185
<b>Slika 76.</b> Utjecaj zakiseljavanja .....	185
<b>Slika 77.</b> Utjecaj eutrofikacije .....	185
<b>Slika 78.</b> Utjecaj toksičnosti za ljude (kancerogena) .....	186
<b>Slika 79.</b> Utjecaj toksičnosti za ljude (nekancerogena).....	186
<b>Slika 80.</b> Zagađenost zraka .....	187
<b>Slika 81.</b> Potencijal stvaranja ozona .....	188
<b>Slika 82.</b> Utjecaj na anorganske respiratorne tvari .....	188
<b>Slika 83.</b> Priključak i komponente priključka [1] .....	190

## POPIS TABLICA

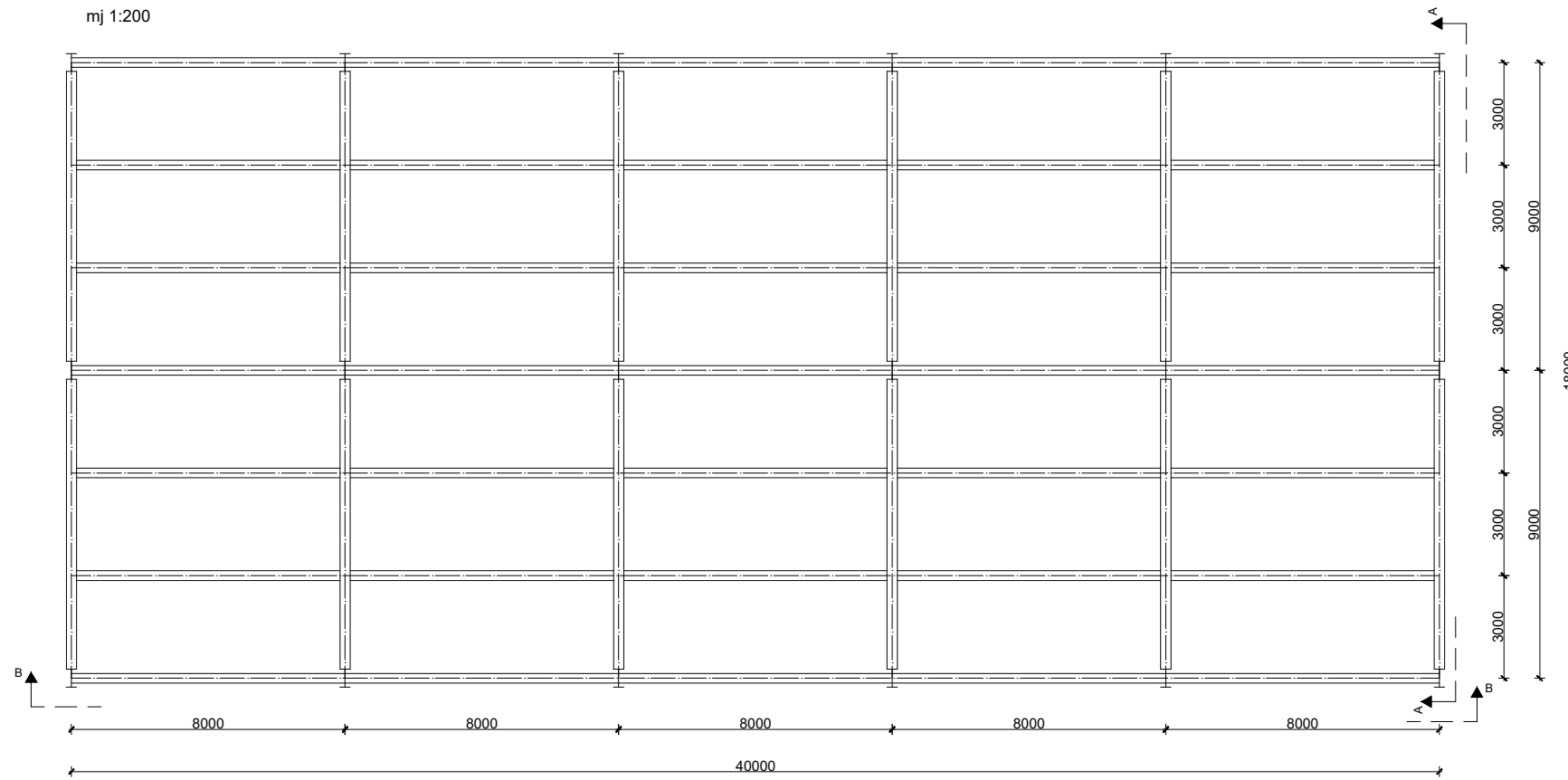
<b>Tablica 1.</b> Preporučene vrijednosti faktora $\psi$ [7] .....	27
<b>Tablica 2.</b> Vrijednosti $\varphi$ pri proračunu $\psi_{E,i}$ [8] .....	33
<b>Tablica 3.</b> Tipovi temeljnog tla [8] .....	33
<b>Tablica 4.</b> Klase važnosti građevine [8] .....	34
<b>Tablica 5.</b> Granične vrijednosti faktora ponašanja [8] .....	34
<b>Tablica 6.</b> Zahtijevani razred presjeka [8] .....	35
<b>Tablica 7.</b> Početne lokalne imperfekcije oblika luka [10] .....	42
<b>Tablica 8.</b> Uporabno opterećenja stropova [11] .....	45
<b>Tablica 9.</b> Karakteristična uporabna opterećenja za krov [11] .....	45
<b>Tablica 10.</b> Kategorije terena i parametri terena [11] .....	49
<b>Tablica 11.</b> Preporučene vrijednosti koeficijenta vanjskog tlaka za vertikalne zidove tlocrtno pravokutne zgrade [11] .....	53
<b>Tablica 12.</b> Preporučene vrijednosti koeficijenta vanjskog tlaka za ravne krovove s oštrim zabatom [11] .....	60
<b>Tablica 13.</b> Sila vjetra kada vjetra djeluje okomito na uzdužnu stranu objekta .....	82
<b>Tablica 14.</b> Sila vjetra kada vjetra djeluje okomito na poprečnu stranu objekta .....	82
<b>Tablica 15.</b> Karakteristike profiliranog lima .....	84
<b>Tablica 16.</b> Karakteristike spregnute ploče .....	84
<b>Tablica 17.</b> Rasponi ovisni o debljini ploče i opterećenju .....	84
<b>Tablica 18.</b> Tlačne sile u stupovima po etažama za opterećenje od vlastite težine .....	90
<b>Tablica 19.</b> Tlačne sile u stupovima po etažama za dodatno stalno opterećenje .....	91
<b>Tablica 20.</b> Tlačne sile u stupovima po etažama za korisno opterećenje .....	92
<b>Tablica 21.</b> Tlačne sile u stupovima po etažama za korisno opterećenje .....	93
<b>Tablica 22.</b> Opterećenja na konstrukciju .....	94
<b>Tablica 23.</b> Slučaj opterećenja za kombinaciju mase .....	95
<b>Tablica 24.</b> Kombinacija mase .....	95
<b>Tablica 25.</b> Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka .....	97
<b>Tablica 26.</b> Mjerodavne sile za dimenzioniranje stupa .....	97
<b>Tablica 27.</b> Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka .....	106
<b>Tablica 28.</b> Mjerodavne sile za dimenzioniranje glavnog nosača .....	107
<b>Tablica 29.</b> Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka .....	115
<b>Tablica 30.</b> Mjerodavne sile za dimenzioniranje sprega .....	115
<b>Tablica 31.</b> Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka .....	118
<b>Tablica 32.</b> Mjerodavne sile za dimenzioniranje sekundarnog nosača u fazi izvedbe .....	118
<b>Tablica 33.</b> Mjerodavne sile za dimenzioniranje sekundarnog nosača u uporabnoj fazi .....	123
<b>Tablica 34.</b> Minimalne duljine oslanjanja profiliranog lima .....	136

---

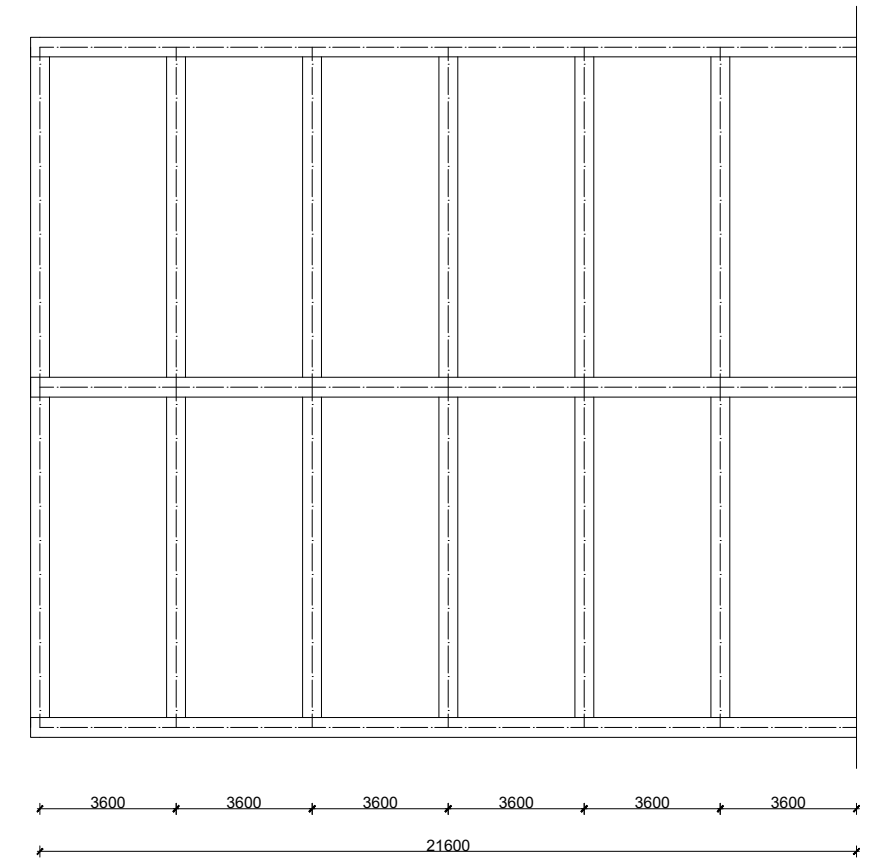
<b>Tablica 35.</b> Iskoristivost odabranih profila .....	144
<b>Tablica 36.</b> Maksimalni pomaci konstrukcije u x smjeru .....	145
<b>Tablica 37.</b> Maksimalni pomaci konstrukcije u x smjeru .....	146
<b>Tablica 38.</b> Parametri temeljnog tla za horizontalni tip spektra 1 [8] .....	150
<b>Tablica 39.</b> Parametri temeljnog tla za horizontalni tip spektra 2 [8] .....	150
<b>Tablica 40.</b> Rezultati modalne analize .....	153
<b>Tablica 41.</b> Rezultati modalne analize .....	153
<b>Tablica 42.</b> Aktivirane mase u modalnoj analizi .....	155
<b>Tablica 43.</b> Proračun koeficijenta osjetljivosti .....	156
<b>Tablica 44.</b> Prikaz zahtjeva ograničenja pomaka po katovima u x i y smjeru .....	157
<b>Tablica 45.</b> Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka .....	157
<b>Tablica 46.</b> Prikaz uvjeta homogenog trošenja energije dijagonala katova .....	158
<b>Tablica 47.</b> Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka .....	159
<b>Tablica 48.</b> Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka .....	165
<b>Tablica 49.</b> Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka .....	167
<b>Tablica 50.</b> Iskoristivost odabranih profila .....	175
<b>Tablica 51.</b> Količina potrebnih sirovina .....	179
<b>Tablica 52.</b> Udaljenost transporta i vrsta prijevoznog sredstva .....	180
<b>Tablica 53.</b> Količine materijala .....	181
<b>Tablica 54.</b> Udaljenost transporta i vrsta prijevoznog sredstva .....	181
<b>Tablica 55.</b> Udaljenost transporta i vrsta prijevoznog sredstva .....	181

**NACRTI:**

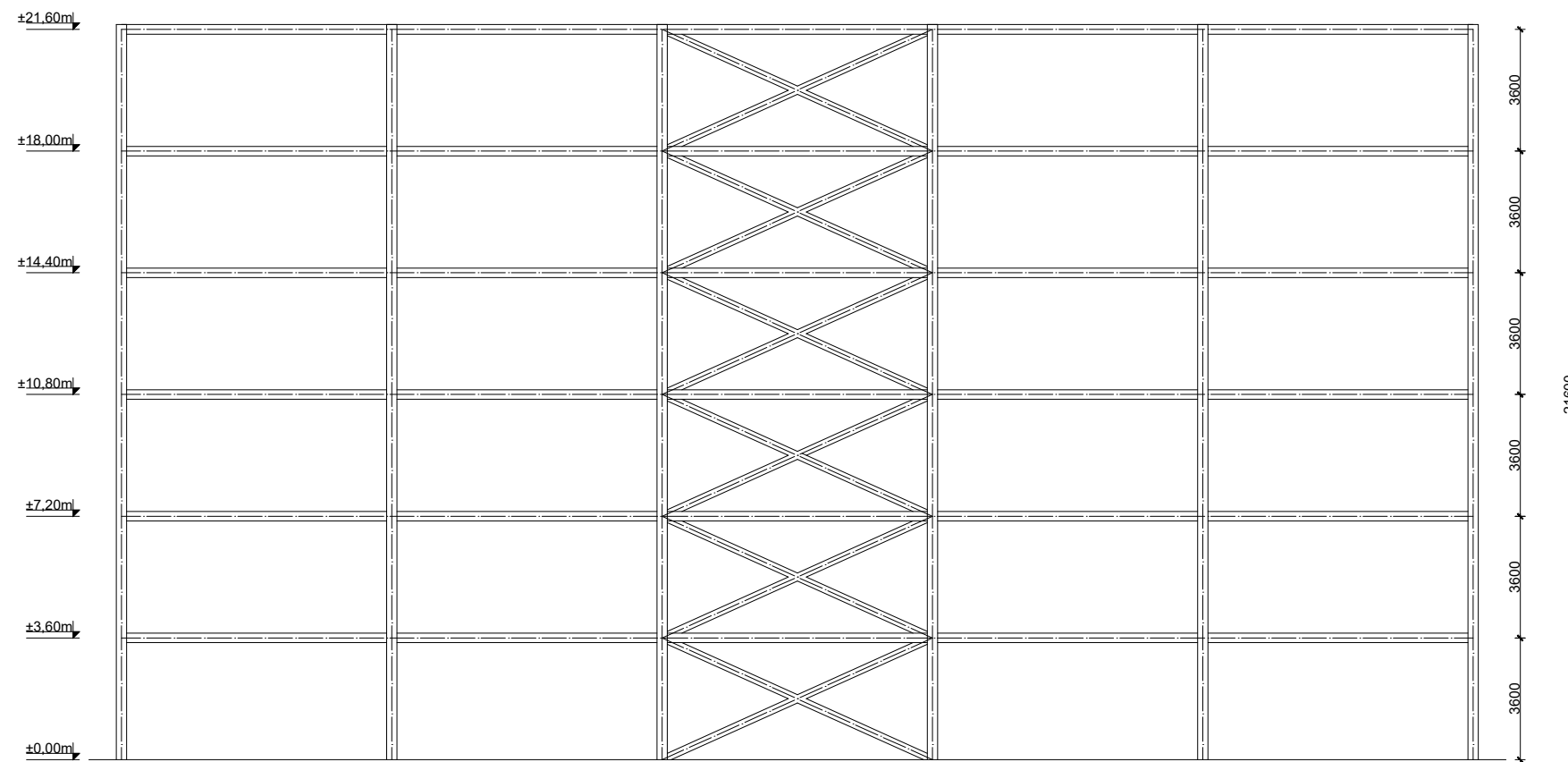
TLOCRT  
mj 1:200



POGLED A-A



POGLED B-B



GRAĐEVINSKI FAKULTET  
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

Spregnuta konstrukcija  
višekatne zgrade

Diplomski rad

Patricija Miljanić

mj 1:200

Dispozicija višekatne zgrade