

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Košir, T., 2015. Zasnova in dimenzioniranje jeklenega razglednega stolpa. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Može, P.): 71 str.

Datum arhiviranja: 28-09-2015

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Košir, T., 2015. Zasnova in dimenzioniranje jeklenega razglednega stolpa. B.Sc Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Može, P.): 71 pp.

Archiving Date: 28-09-2015

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI STROKOVNI  
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE  
STOPNJE OPERATIVNO  
GRADBENIŠTVO**

Kandidatka:

**TADEJA KOŠIR**

**ZASNOVA IN DIMENZIONIRANJE JEKLENEGA  
RAZGLEDNEGA STOLPA**

Diplomska naloga št.: 102/OG-MK

**DESIGN OF OBSERVATION TOWER IN STEEL**

Graduation thesis No.: 102/OG-MK

**Mentor:**

doc. dr. Primož Može

Ljubljana, 17. 09. 2015

## **IZJAVE**

Podpisana Tadeja Košir izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »Zasnova in dimenzioniranje jeklenega razglednega stolpa«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 2015

Tadeja Košir

**BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK****UDK: 624.014.2:624.9(497.4)(043.2)****Avtor: Tadeja Košir****Mentor: doc. dr. Primož Može****Naslov: Zasnova in dimenzioniranje jeklenega razglednega stolpa****Tip dokumenta: Diplomaska naloga - visokošolski strokovni študij****Obseg in oprema: 71 str., 10. pregl., 53 sl., 5 pril.****Ključne besede: jekleni stolp, dimenzioniranje, veter, uklon****IZVLEČEK**

Diplomska naloga obsega zasnovo in dimenzioniranje jeklenega razglednega stolpa, tloris katerega je enakostraničen trikotnik s stranico 7,7 m in višino 36,4 m. Osnovno konstrukcijo predstavljajo kotni profili. Stebri so spojeni iz dveh kotnikov, tako da je vmesni kot med profiloma  $60^\circ$ , ki omogoča pritrjevanje diagonal in horizontal na steber. Horizontale so škatlastega profila, da so dovolj toge. Stopnišče poteka po obodu trikotnika, ki se na vrhu konča s razgledno ploščadjo, ki konzolno visi 1 m čez rob konstrukcije. Določila sem obtežbe na objekt. Veter, merodajna obtežba za dimenzioniranje, je določen po standardih SIST EN 1991-1-4 in SIST EN 1993-3-1:2007. Kritičen je izračun po zadnjem standardu. Določila sem notranje sile s pomočjo programa Scia Engineer in kotnike posebej preverila na uklon, saj ta program ne upošteva vseh dejavnikov za izračun uklona kotnikov. Zdimenzionirani so tipični spoji elementov, ki so večinoma členkasti in na koncu zbrani v detajlnih risbah.

## **BIBLIOGRAPHIC- DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC: 624.014.2:624.9(497.4)(043.2)**

**Author: Tadeja Košir**

**Supervisor: Assist. Prof. Primož Može, Ph.D.**

**Title: Design of observation tower in steel**

**Document type: Graduation Thesis – Higher professional studies**

**Notes: 71 p., 10. tab., 53 fig., 5 ann.**

**Key words: steel tower, design, wind, buckling**

### **ABSTRACT**

Graduation thesis design of steel observation tower, ground plan is equilateral triangle, which measures 7,7 m in length and 36,4m in height. The basic structure is made of elements with equilateral angle profiles. The columns are assembled of two profiles at an angle  $60^\circ$  that enables the connection between horizontal and diagonal on the column. The horizontal member is box profile which prevents large deflections. The staircase is extended in the rim of the triangle, which ends at the top with the observation platform 1 m over the structure. Wind had the biggest influence and is calculated according two standards SIST EN 1991-1-4 and SIST EN 1993-3-1:2007. The last one is relevant for the design. Internal forces are calculated by finite elements software Scia Engineer. The angle profiles are separately checked for buckling, because programe does not consider all parameters to properly calculate buckling. Typical connections are designed. They are mostly pinned. The detailed drawings are collected at the end.

## ZAHVALA

Za moje diplomsko delo ste zaslužni moja družina, sošolci in prijatelji, saj ste bili z mano v lepih in težjih obdobjih življenja.

Brez mentorja Primoža Možeta tudi ne bi šlo, v veliko pomoč so bili vaši številni napotki in razlage.

## KAZALO VSEBINE

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. ZASNOVA KONSTRUKCIJE</b> .....	2
<b>3. OBTEŽBE</b> .....	5
<b>4. ANALIZA OBTEŽB</b> .....	6
4.1. LASTNA IN STALNA OBTEŽBA.....	6
4.2. KORISTNA OBTEŽBA.....	8
4.3. VETER .....	10
4.3.1 Sila vetra $F_w$ po SIST EN 1991-1-4:2005 .....	13
4.3.2 Sila vetra $F_w$ po SIST EN 1993-3-1:2007 .....	18
4.4. VETER Z LEDOM.....	24
4.4.1 Sila vetra z ledom $F_{w,l}$ po SIST EN 1991-1-4:2005.....	25
4.4.2 Sila vetra z ledom $F_{w,l}$ po SIST EN 1993-3-1:2007.....	28
4.5. LED .....	34
4.6. SNEG .....	36
<b>5. OBTEŽNE KOMBINACIJE</b> .....	37
5.1. KONTROLA MEJNEGA STANJA NOSILNOSTI – MSN .....	38
5.2. KONTROLA MEJNEGA STANJA UPORABNOSTI – MSU.....	39
<b>6. PREVERJANJE STABILNOSTI ELEMENTOV</b> .....	40
6.1. Steber.....	42
6.2. Horizontala .....	45
6.3. Diagonala .....	48
6.4. Temelj.....	51
<b>7. DIMENZIONIRANJE SPOJEV</b> .....	53
7.1. Priključek stebra na temelj .....	53
7.2. Priključek stebra na steber.....	56
7.2.1. Sestavljen prečni prerez stebra .....	60
7.3. Priključek horizontale na steber .....	61
7.4. Priključek diagonale na steber .....	64
<b>8. KOSOVNICA</b> .....	69
<b>9. ZAKLJUČEK</b> .....	70
<b>VIRI</b> .....	71

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Konstrukcija razglednega stolpa s stopniščem in ploščadjo.....	2
Slika 2: Tloris razglednega stolpa, dimenzije v metrih .....	3
Slika 3: Konstrukcija razglednega stolpa brez stopnišča in ploščadi, dimenzije v metrih .....	3
Slika 4: Ploščad, pogled zgoraj .....	6
Slika 5: Ploščad, sekundarna nosilna konstrukcija .....	7
Slika 6: Stopnišče .....	7
Slika 7: Stalna teža stopnic in ploščadi .....	8
Slika 8: Koristna obtežba .....	9
Slika 9: Kategorija terena II (Vir: SIST EN 1991-1-4:2005; Dodatek A: A.1: Prikaz največje hrapavosti različnih kategorij terena.).....	10
Slika 10: Največji tlak pri sunkih vetra .....	12
Slika 11: Smeri vetra: primer 1, primer 2 in primer 3 .....	13
Slika 12: Določitev efektivne vitkosti $\lambda$ (Vir: SIST EN 1991-1-4:2005; Preglednica 7.16) .....	13
Slika 13: Primer 1.....	14
Slika 14: Primer 2.....	14
Slika 15: Primer 3.....	15
Slika 16: Določitev vrednosti faktorja vitkosti $\Psi_\lambda$ (Vir: SIST EN 1991-1-4:2005; slika 7.36)... ..	16
Slika 17: Določitev koeficienta sile brez vpliva vitkosti $c_{f,o}$ (Vir: SIST EN 1991-1-4:2005; Slika 7.34) .....	16
Slika 18: Primerjava vrednosti sil vetra $F_w$ v obravnavanih smereh po SIST EN 1991-1-4....	18
Slika 19: Vrednost faktorja pogostosti $K_\phi$ , za obravnavane smeri vetra (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: slika B.2.2) .....	20
Slika 20: Vrednosti faktorja koeficienta sile $c_{f,s,o}(\varphi)$ za trikotno konstrukcijo, za ostrorobe prereze velja linija 1 (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: slika B.2.3 (b)).....	21
Slika 21: Primerjava vrednosti sil vetra $F_w$ v obravnavanih smereh .....	23
Slika 22: Primerjava izračuna vetra po obeh standardih.....	23
Slika 23: Obtežba vetra.....	24
Slika 24: Primer 1.....	25
Slika 25: Primer 2.....	25
Slika 26: Primer 3.....	26
Slika 27: Primerjava vrednosti sil vetra $F_{w,l}$ v obravnavanih smereh .....	28
Slika 28: Primerjava vrednosti sil vetra $F_{w,l}$ v obravnavanih smereh .....	32
Slika 29: Primerjava izračuna vetra $F_{w,l}$ po obeh standardih.....	32
Slika 30: Obtežba vetra z ledom, primer 3.....	33
Slika 31: Primerjava vseh sil vetra .....	34
Slika 32: Debelina ledu na elementu (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007: aneks C: slika C.1) .....	34
Slika 33: Obtežba ledu.....	35
Slika 34: Obtežba snega .....	36
Slika 35: Obtežne kombinacije – MSN .....	38
Slika 36: Obtežne kombinacije – MSU .....	39
Slika 37: Enakokraki kotnik z označenimi osmi (SIST EN 1993-1-1: slika 1) .....	40
Slika 38: FGG: Katedra za metalne konstrukcije: osnove jeklenih konstrukcij: 5.0 uvod v stabilnost jeklenih konstrukcij.....	41
Slika 39: Prečni prerez sestavljenega stebra iz dveh kotnih profilov 180/180/18, z označeno šibko v-v in močno osjo u-u.....	42
Slika 40: Faktor efektivne vitkosti $k$ , (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007: preglednica G1) .....	44



Slika 41: Določanje uklonske dolžine horizontale (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007: slika H.4) ..	46
Slika 42: Uklonska dolžina diagonal. Nepovezane opore z zveznimi horizontalnimi elementi, v presečišču diagonal. (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007: slika H.1).....	49
Slika 43: Določanje faktorja vitkosti $k$ za diagonale pri dvojnem vijačenju na obeh straneh za kotne profile. (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007: preglednica G.2).....	49
Slika 44: Spoj stebra na temelj.....	53
Slika 45: Spoj stebra na steber .....	56
Slika 46: Označeni razdalji $r_1$ , $r_2$ in težišče $T$ .....	59
Slika 47: Sestavljeni prečni prerez stebra z veznima pločevinama (pločevina 1 je spodaj, pločevina 2 pa zgoraj).....	60
Slika 48: Notranje statične količine sestavljenega prečnega prereza (Vir: SIST EN 1993-1-1:2005: slika 6.11) .....	61
Slika 49: Spoj horizontale na steber.....	62
Slika 50: Določitev površin $A_{nv}$ in $A_{nt}$ .....	64
Slika 51: Spoj diagonale na steber.....	65
Slika 52: Označene vrednosti $e_1$ , $e_2$ , $f_1$ , $f_2$ in $f_3$ .....	66
Slika 53: Določitev površin $A_{nv}$ in $A_{nt}$ .....	67

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Določitev $q_p$ .....	12
Preglednica 2: Izračun sile vetra $F_w$ po SIST EN 1991-1-1:2004 .....	17
Preglednica 3: Izračun sile vetra $F_w$ po SIST EN 1993-3-1:2007 .....	22
Preglednica 4: Izračun sile vetra z ledom $F_{w,l}$ po SIST EN 1991-1-1:2004 .....	27
Preglednica 5: Izračun sile vetra $F_{w,l}$ po SIST EN 1993-3-1:2007 .....	31
Preglednica 6: Faktorji za kombinacijsko vrednost spremenljivega vpliva $\Psi_0$ .....	37
Preglednica 7: Lastnosti prečnega prereza kotnika 180/180/18 .....	43
Preglednica 8: Lastnosti prečnega prereza stebra iz dveh kotnikov 180/180/17 .....	43
Preglednica 9: Lastnosti prečnega škatlastega profila 250/250/12,5 .....	45
Preglednica 10: Lastnosti prečnega prereza kotnika 160/160/17 .....	48

## 1. UVOD

Stolp je visoka zgradba z majhnim tlorisom, lahko je samostoječ ali kot sestavni del objekta. Največkrat je lociran na vrhu hriba. Razgledni stolp omogoča opazovanje okolice v vse smeri; ker je dvignjen, bližnji objekti ne ovirajo vidnega polja. Danes so stolpi turistična znamenitost, včasih pa so bili namenjeni opazovanju sovražnikov.

Lahko je poljubne oblike; npr. okrogel, stopničast ali trapezen; zgrajen iz različnih materialov kot so jeklo, les, kamen in opeka; z različnimi funkcijami in nameni: razgledni, cerkveni, obrambni, stražni, antenski, kontrolni, hladilni stolp, vrtalni stolp za črpanje nafte... Znani primeri stolpov so npr. Eifflov stolp, Aljažev stolp na Triglavu...

Arhitekti prihajajo z raznolikimi idejami, vendar sem jaz načrtovala v smislu gradbeništva — zasnova čim lažjega in konstrukcijsko učinkovitega stolpa. Potrebno je upoštevati tudi ekonomski in trajnostni vidik ter potek gradnje ob upoštevanju vseh predpisov in lastnosti materiala. Konstrukcija, njeni elementi in spoji morajo biti zasnovani tako, da prevzamejo vse predvidene obtežbe, brez da bi se pri tem porušili ali preveč poškodovali.

Sestavljen je iz nosilne konstrukcije — temelji, jeklena konstrukcija, stopnice za dostop do vrha in razgledne ploščadi. Izbran material, jeklo, ima veliko togost in elastičnost ter majhno težo v primerjavi z nosilnostjo.

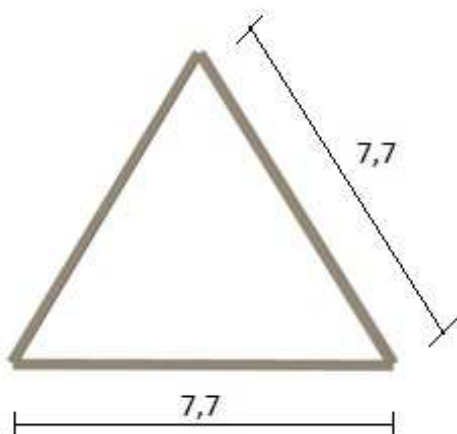
## 2. ZASNOVA KONSTRUKCIJE

Objekt je postavljen na območju Škofje Loke v hriboviti pokrajini na nadmorski višini 900 m. Njegova višina znaša 36,4 m; tloris je enakostranični trikotnik s stranico dolgo 7,7 m. (Slika 1,2) Podane dimenzije so merjene v osi elementov. Obtežbe so določene za območje Škofje Loke in ustrezno združene v obtežne kombinacije. Notranje sile so izračunane s programom Scia Engineer.

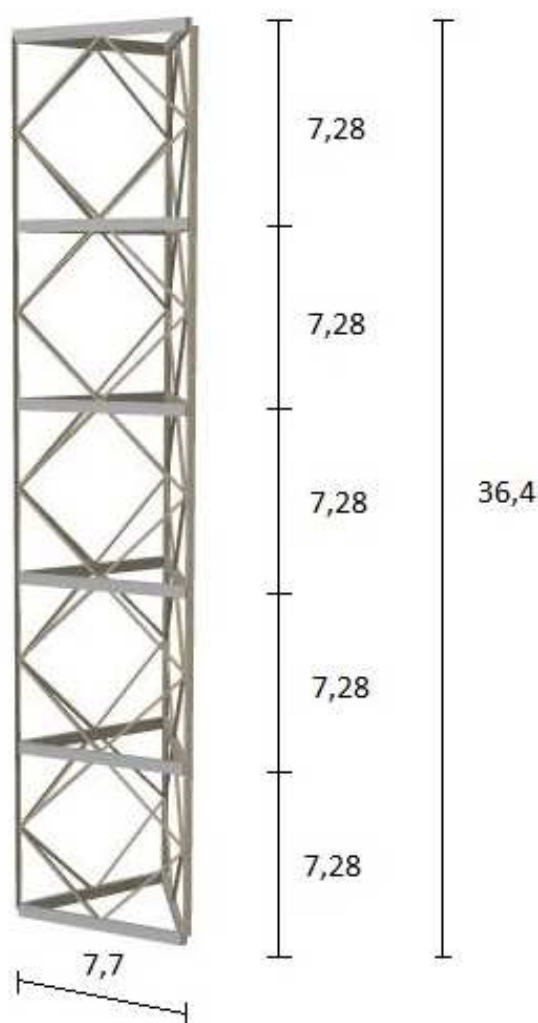


Slika 1: Konstrukcija razglednega stolpa s stopniščem in ploščadjo

Sestavni elementi so enakokraki kotniki. Konstrukcijski sistem tvorijo stebri z diagonalami v kombinaciji V in K povezja z vmesnimi horizontalami. Za dimenzioniranje elementov, razen škatlastega profila, je uklon merodajen. Diagonale kotnega profila 160/160/17 dolžine 5,3 m so členkasto pripete na steber in horizontalo pod kotom  $46,6^\circ$ . Togo povezujejo konstrukcijo, prenašajo horizontalne obremenitve z osno silo. Horizontale škatlastega prečnega prereza 250/250/12,5, ne smejo dopuščati prevelikega povesa, so pozicionirane na razdaljah 7,28 m z dolžino 7,7 m. Ravno tako kot pri diagonalah je tu bistvena osna obremenitev. Nudijo horizontalno togost konstrukcije in uklonsko podpirajo diagonale. Diagonale in horizontale zmanjšujejo uklonsko dolžino stebrov in so členkasto pripete nanj. Stebri kontinuirano potekajo do dolžine 36,4 m. Profil stebra je sestavljen iz dveh kotnikov 180/180/18 z vmesnim kotom  $60^\circ$ , kar omogoča lažje pritrjevanje horizontal in diagonal. Preko osne sile prevzemajo vertikalne obremenitve.



Slika 2: Tloris razglednega stolpa, dimenzije v metrih



Slika 3: Konstrukcija razglednega stolpa brez stopnišča in ploščadi, dimenzije v metrih

Vertikalna komunikacija zasede prostor za varovanje elementov v horizontalni ravnini, zato ni možno dodatno zmanjšati uklonske dolžine elementov z manjšimi diagonalami. Stopnišče poteka po obodu konstrukcije in je sestavljeno iz 20 stopniščnih ram z vmesnimi podesti. Na vrhu se nahaja razgledna ploščad, ki konzolno visi 1 m čez rob konstrukcije. Večina spojev elementov je vijachenih; le stebri, ki so sestavljeni iz dveh kotnih profilov, imajo privarjene čelne pločevine.

Nosilna konstrukcija stopnišča je profil U160, v katerega so vpete pohodne rešetke za stopnice in podest. Objekt ustrezno opremljen z varovalno ograjo višine 1,1 m, ker gre za višjo konstrukcijo, med vzdolžnimi stebrički ograje pa ne sme biti več kot 0,11 m.

Razgledni stolp je potrebno ustrezno zaščiti pred udarci strel ter s premazi ustvariti protikorozijsko zaščito jeklenih elementov.

Materiali uporabljenih elementov morajo biti ustrezno izdelani in certificirani ob upoštevanju veljavnih predpisov.

Izbran material je jeklo S275.

- Karakteristična natezna trdnost:  $f_{yk} = 27,5 \text{ kN/cm}^2$
- Elastični modul jekla:  $E_s = 21\,000 \text{ kN/cm}^2$
- Gostota jekla:  $\gamma_s = 78,5 \text{ kN/cm}^3$
- Poissonov količnik:  $\nu = 0,3$
- Strižni modul:  $G = 8100 \text{ kN/cm}^2$

### 3. OBTEŽBE

Določila sem stalne in spremenljive vplive, ki so odvisni od lokacije ter z njo povezanega podnebja in namena uporabe objekta. Lastna in stalna ter koristna obtežba so vzete za stavbe, ker za stolpe niso definirane. Obtežba potresa ni kritična, saj ima konstrukcija majhno maso, torej so potresne sile majhne.

Obtežbo na konstrukcijo predstavljajo:

- Lastna in stalna obtežba je stalen nespremenljiv vpliv, sestavljen iz konstrukcijskih in nekonstrukcijskih elementov.
- Koristna obtežba izhaja iz namena uporabe objekta. Določena je za stopnice in razgledno ploščad, za katero ne predvidevam večje gneče ljudi.
- Veter je najpomembnejša izmed obtežb, saj je v vseh merodajnih obtežnih kombinacijah glavni vpliv za dimenzioniranje elementov. Izračunan je po principu za palične konstrukcije oziroma odre najprej po SIST EN 1991-1-4: Splošni vplivi – Vplivi vetra; nato po SIST EN 1993-3-1:2007: Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 3-1. del: Stolpi, jambori in dimniki - Stolpi in jambori.
- Sneg je vertikalna obtežba, ki deluje na ploščad. Glede na lokacijo objekta, določim cono A3.

## 4. ANALIZA OBTEŽB

Za izračun notranjih sil je bil uporabljen Nemetschekov program Scia Engineer. Z njim lahko modeliramo konstrukcijo, določimo obtežbe, izračunamo notranje statične količine in preverimo nosilnost po standardih Evrokod (jeklo, beton..). Na koncu omogoča še izdelavo projektne dokumentacije.

### 4.1. LASTNA IN STALNA OBTEŽBA

#### **Konstrukcija**

Gostota materiala  $\rho = 7,850 \text{ t/m}^3$  je povečana za 5 % na  $\rho = 8,24 \text{ t/m}^3$ , da je zajeta dodatna obtežba zaradi veznih elementov in pločevin. V programu Scia Engineer je določeno, da program samodejno upošteva težo elementov kot enakomerno zvezno obtežbo.

Stebri: dva kotnika 180/180/17, pritrjena pod kotom  $60^\circ$

- $g = 0,96 \text{ kN/m}$

Horizontale: škatlasti profil 250/250/12,5

- $g = 0,90 \text{ kN/m}$

Diagonale kotnik 160/160/17

- $g = 0,40 \text{ kN/m}$

#### **Razgledna ploščad (brez škatlastih nosilcev)**

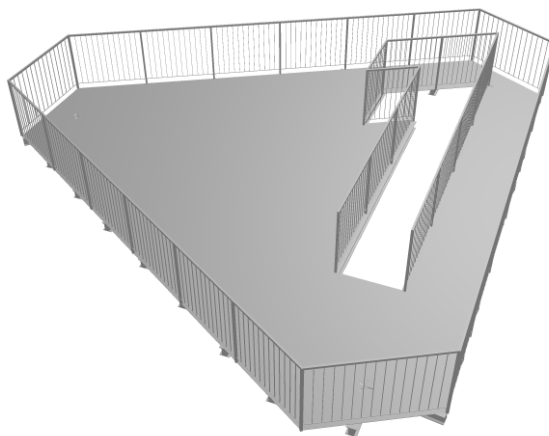
Njeno težo predstavlja vsota tež sekundarnih nosilcev, pohodnih rešetk in ograje in je enakomerno porazdeljena na tri stebre. Podana je točkovno.

- $g = 23,21 \text{ kN}$

#### **Stopnišče (eno stopnišče in podest)**

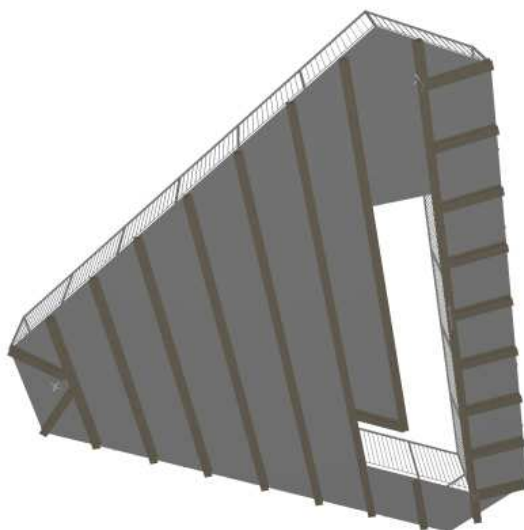
Težo stopnic prav tako sestavlja vsota tež sekundarnih nosilcev, pohodnih rešetk in ograje. V programu Scia Engineer je podana kot točkovna obtežba na mestih priključitve stopnic na steber.

- $g = 15,56 \text{ kN}$

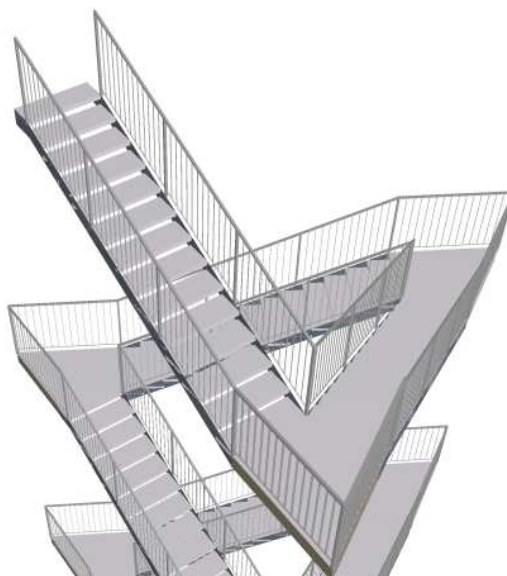


Slika 1: Ploščad, pogled zgoraj

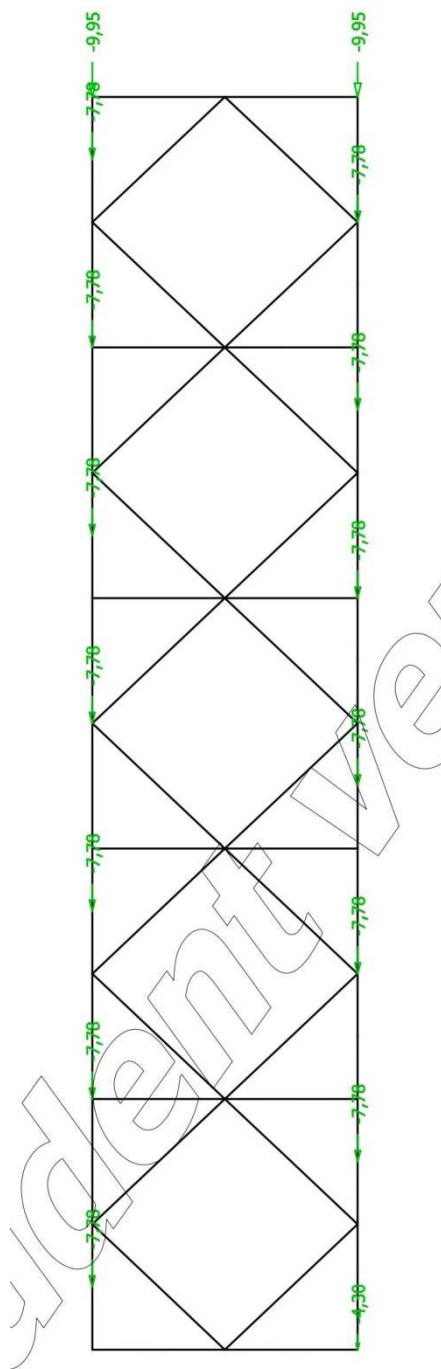




*Slika 2: Ploščad, sekundarna nosilna konstrukcija*



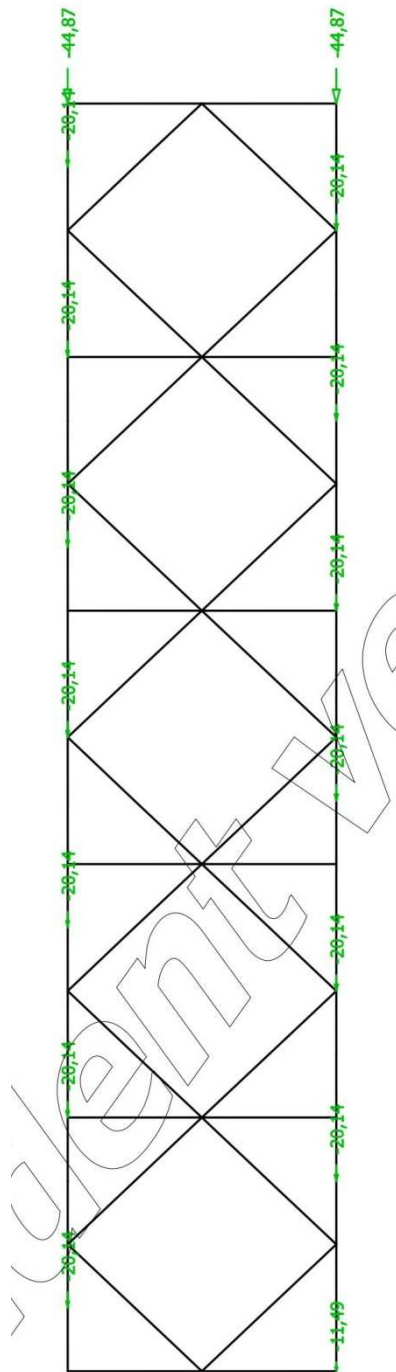
*Slika 3: Stopnišče*



Slika 4: Stalna teža stopnic in ploščadi

## 4.2. KORISTNA OBTEŽBA

Izhajam iz standarda za objekte 1991-1-1:2004, saj za stolpe ne obstaja. Določena je za stopnice in razgledno ploščad, za katero ne predvidevam večje gneče ljudi in jo obravnavam kot površino kategorije C3 (površine brez ovir za gibanje ljudi, npr. v muzejih, razstaviščih, dostopnih prostorih v javnih in upravnih stavbah, hotelih, bolnišnicah, predzvezjih železniških postaj). Za stopnice in podeste je predpostavljena površina kategorije A, ki je običajna za stanovanjske objekte. V programu Scia Engineer je podana točkovno – obtežba podesta je enakomerno porazdeljena na stebre in na mestih priključitve stopnic na stebre obtežba, ki jo doprinesejo stopnice (slika 8).



Slika 5: Koristna obtežba

Globalna analiza razglednega stolpa:

- $q_k, \text{ ploščad} = 3 \text{ kN/m}^2$  ( $A_{\text{ploščad}} = 44,87 \text{ m}^2$ )
- $q_k, \text{ stopnišče} = 3 \text{ kN/m}^2$  ( $A_{\text{stopnišče}} = 90,93 \text{ m}^2$ )

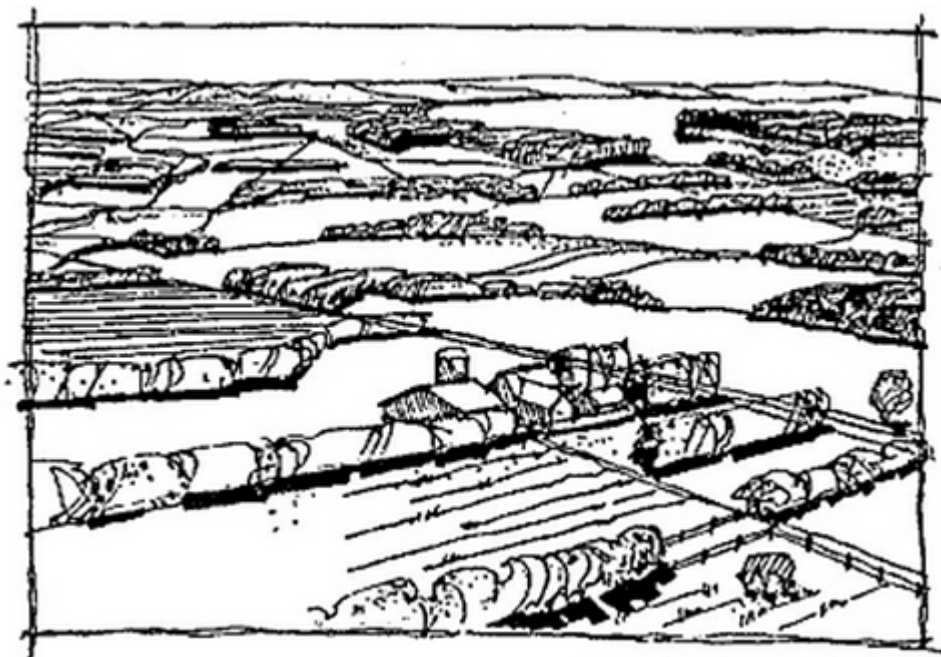
Lokalna analiza nosilne konstrukcije ploščadi in stopnic:

- $Q_k, \text{ ploščad} = 4,5 \text{ kN}$
- $Q_k, \text{ stopnišče} = 3 \text{ kN}$

### 4.3. VETER

Vpliv vetra, ki je izračunan po SIST EN 1991-1-4:2005, je merodajen za dimenzioniranje elementov. Pogojen je z lokacijo, dimenzijo in obliko objekta ter deluje pravokotno na projekcijo površine objekta. Poenostavljeno je obravnavan kot statičen vpliv, vendar mora učinkovito zajeti vse dinamične vplive.

Obravnavan objekt spada v cono 1 (večina Slovenije) in je propusten (SIST EN 1991-1-4:2005/oA101: 4.3.3 (1), torej so obremenjeni tudi notranji deli konstrukcije. Postavljen je v valovitem Škofjeloškem hribovju. Določena je kategorija terena II, (to so področja z nizkim rastlinjem kot je npr. trava; in posameznimi ovirami, kot so drevesa ali stavbe na razdalji najmanj 20 višin ovir). (Dodatek A: A1)



Slika 6: Kategorija terena II (Vir: SIST EN 1991-1-4:2005; Dodatek A: A.1: Prikaz največje hrapavosti različnih kategorij terena.)

Določitev osnovnih karakteristik obtežbe vetra, ki omogočajo opredelitev odziva konstrukcije v odvisnosti od klimatskih pogojev, koeficientov in razgibanosti terena. Temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra  $v_{b0}$  je desetminutna srednja vrednost hitrosti. Skupaj s smernim faktorjem  $c_{dir}$  in faktorjem letnih časov  $c_{season}$ , ki imata priporočeno vrednost 1, opredeli osnovno hitrost vetra  $v_b$ .

Faktor terena  $k_r$  določi faktor hrapavosti terena  $c_r$ , ki upošteva vpliv hrapavosti tal na spreminjanje hitrosti vetra za referenčno višino  $z_e$ . Objekt je razdeljen na več panelov s približno enako površino in ga določi  $z_e$  - merjena na najvišjem delu panela. Vzeta je priporočena vrednost faktorja hribovitosti terena  $c_0 = 1$ , ker je objekt postavljen na valovito hribovje.  $c_0$  je večji v primerih ločenih hribov, strmih pobočij ali pečin. Sledi izračun srednje hitrosti vetra, ki je odvisen od faktorja hribovitosti  $c_0$ , hrapavosti terena  $c_r$  in osnovne hitrosti vetra  $v_b$ .

Osnovna hitrost vetra:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{bo} = 1 \cdot 1 \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$c_{dir} = 1$  smerni faktor

$c_{season} = 1$  faktor letnih časov

$v_{bo} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$  temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra (cona1; nmv. od 800 m do 1600 m)

Faktor terena:

$$k_r = 0,19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$$

Faktor hrapavosti:

$c_r(z_e) = c_r(z_{min})$  za  $z_e < z_{min}$ ;  $z_e < 2$  m

$c_r(z_e) = k_r \cdot \ln \left( \frac{z_e}{z_0} \right)$  za  $z_{min} \leq z_e \leq z_{max}$ ;  $2 \text{ m} \leq z_e \leq 200$  m

Srednja hitrost vetra:

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

Izračunana je standardna deviacija turbulence  $\sigma_v$  in intenziteta turbulence  $I_v$  ter največji tlak pri sunkih vetra  $q_p$ , ki je odvisen od intenzitete turbulence, gostote zraka in srednje hitrosti vetra  $v_m$ . Rezultati izračunov so zbrani v preglednici 1 in izrisan je graf za največji tlak pri sunkih vetra  $q_p$  v odvisnosti od referenčne višine  $z_e$  - slika 10. Tlak narašča parabolčno.

Standardna deviacija turbulence:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_l$$

Intenziteta turbulence:

$$I_v = \frac{\sigma_v}{v_m(z_e)}$$

Največji tlak pri sunkih vetra:

$$q_p(z_e) = [1 + 7I_v(z_e)] \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z_e)$$

$z = 36,4$  m

$z_e$

$z_{min} = 2$  m

$z_0 = 0,05$  m

$z_{0,II} = 0,05$  m

$c_0 = 1$

$k_l = 1$

$\rho = 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

višina objekta

referenčna višina

najmanjša višina; SIST EN 1991-1-4:2005: preglednica 4.1

hrapavostna dolžina, SIST EN 1991-1-4:2005: preglednica 4.1

faktor hribovitosti (za valovit teren)

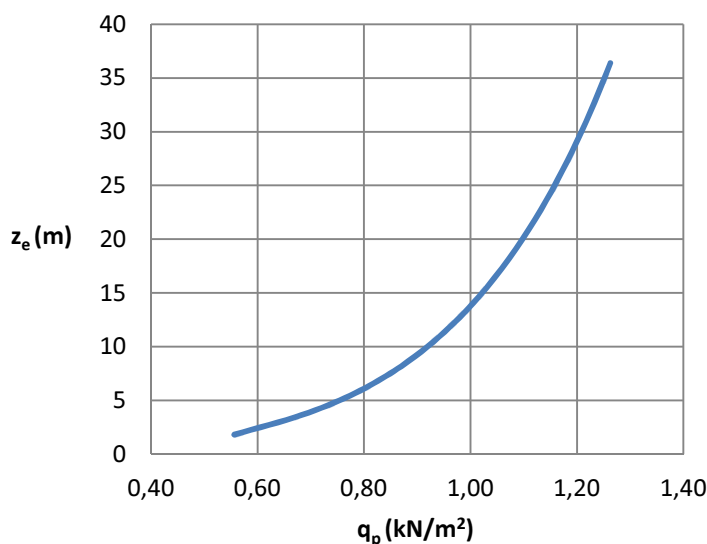
turbulentni faktor

gostota zraka

Preglednica 1: Določitev  $q_p$ 

Panel	$z_e$ (m)	$c_r$	$v_m$ (m/s)	$I_v$	$q_p$ (kN/m <sup>2</sup> )
1	1,82	0,70	17,52	0,27	0,56
2	3,64	0,81	20,37	0,23	0,68
3	5,46	0,89	22,29	0,21	0,77
4	7,28	0,95	23,66	0,20	0,84
5	9,1	0,99	24,72	0,19	0,90
6	10,92	1,02	25,59	0,19	0,94
7	12,74	1,05	26,32	0,18	0,98
8	14,56	1,08	26,95	0,18	1,01
9	16,38	1,10	27,51	0,17	1,04
10	18,2	1,12	28,01	0,17	1,07
11	20,02	1,14	28,46	0,17	1,10
12	21,84	1,16	28,88	0,16	1,12
13	23,66	1,17	29,26	0,16	1,14
14	25,48	1,18	29,61	0,16	1,16
15	27,3	1,20	29,94	0,16	1,18
16	29,12	1,21	30,24	0,16	1,20
17	30,94	1,22	30,53	0,16	1,22
18	32,76	1,23	30,80	0,15	1,23
19	34,58	1,24	31,06	0,15	1,25
20	36,4	1,25	31,30	0,15	1,26
21	37,5	1,26	31,45	0,15	1,27

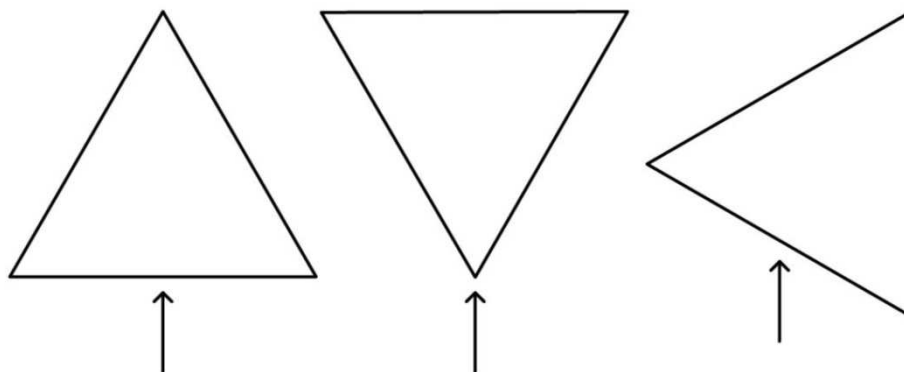
## Največji tlak pri sunkih vetra



Slika 7: Največji tlak pri sunkih vetra

Koeficient sile vetra  $c_f$  in posledično sila vetra  $F_w$  sta izračunana dveh po standardih SIST EN 1991-1-4:2005 (vplivi vetra) in SIST EN 1993-3-1:2007 (stolpi in jambori). Obravnavane so tri različne smeri vetra (slika 11), ki so odvisne od stopnje zapolnjenosti objekta  $\phi$ . Veter deluje

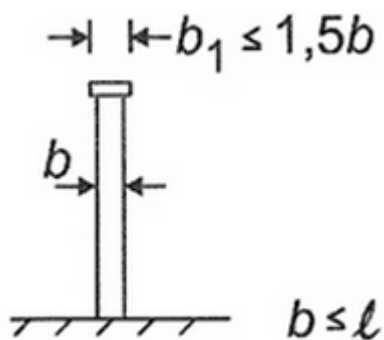
pravokotno na projekcijo površine elementov – referenčna površina  $A_{ref}$ , ki da vrednost koeficienta vetra  $c_f$ . Največji tlak vetra pri sunkih vetra  $q_p$  je enak za določanje koeficienta sile  $c_f$  v obeh računskih postopkih.



Slika 8: Smeri vetra: primer 1, primer 2 in primer 3

#### 4.3.1 Sila vetra $F_w$ po SIST EN 1991-1-4:2005

Izračun koeficienta sile vetra  $c_f$  za konstrukcijo je najprej potekal po standardu SIST EN 1991-1-4:2005 po postopku za palične konstrukcije in odre. Zapolnjenost objekta  $\phi$  je definirana z razmerjem na čelno ravnino projicirane površine elementov konstrukcije  $A_{sk}$  in ovojne površine  $A_c$ . Efektivna vitkost  $\lambda$  je odvisna od lege in dimenzij konstrukcije; v tem primeru je to priporočena vrednost št. 2 za ostrorobe prereze in palične konstrukcije (slika 12). Ker je višina stolpa med 15 in 50 m so dane enačbe linearno interpolirane, vrednost je  $\lambda = 1,65 \cdot H/b$ .



za  $l \geq 50$  m,  $\lambda = 1,4 \frac{l}{b}$  ali  $\lambda = 70$ ; kar je manjše  
za  $l < 15$  m,  $\lambda = 2 \frac{l}{b}$  ali  $\lambda = 70$ ; kar je manjše

Slika 9: Določitev efektivne vitkosti  $\lambda$  (Vir: SIST EN 1991-1-4:2005; Preglednica 7.16)

Zapolnjenost objekta  $\phi$  in efektivna vitkost  $\lambda$  nadalje opredelita faktor vitkosti  $\Psi_\lambda$ , ki upošteva zmanjšan upor konstrukcije zaradi vpliva tal.

Koeficient sile brez vpliva vitkosti  $c_{f,0}$  (različen je za različne smeri vetra in različne oblike tlorisa) določajo meritve obtokov zraka mimo prostih robov konstrukcije, na višini kjer ni vpliva tal. Večja kot je zapolnjenost objekta, manjši je  $c_{f,0}$  in obratno. Enako velja za  $\Psi_\lambda$ .

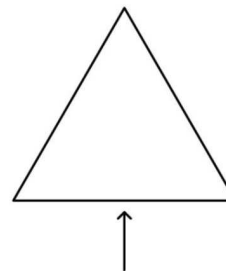
**Primer 1 – veter pravokoten na stranico**

Površina omejena z robovi konstrukcije, ki je projicirana na čelno ravnino:

$$A_c = b \cdot H = 7,7 \text{ m} \cdot 36,4 \text{ m} = 288,75 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin elementov celotne konstrukcije, tudi stopnišča in podesta ( $A_{\text{ref}}$ ):

$$A_{\text{sk}} = 144,05 \text{ m}^2$$



Slika 10: Primer 1

Zapolnjenost:

$$\varphi = \frac{A_{\text{sk}}}{A_c} = \frac{144,05 \text{ m}^2}{288,75 \text{ m}^2} = 0,50$$

Efektivna vitkost (slika 12):

$$\lambda = 1,65 \frac{H}{b} = 1,65 \frac{36,4 \text{ m}}{7,7 \text{ m}} = 8,04$$

Faktor vitkosti (slika 16):

$$\psi_\lambda = 0,91$$

Koeficient sile brez vpliva vitkosti (slika 17):

$$c_{f,0} = 1,4$$

Koeficient sile za palične konstrukcije in odre:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 1,4 \cdot 0,91 = 1,27$$

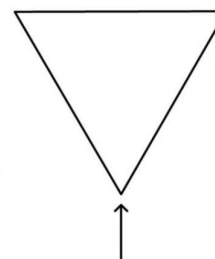
**Primer 2 – veter na stranici pod kotom 30 °**

Površina omejena z robovi konstrukcije, ki je projicirana na čelno ravnino:

$$A_c = b \cdot H = 7,7 \text{ m} \cdot 36,4 \text{ m} = 288,75 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin elementov celotne konstrukcije, tudi stopnišča in podesta ( $A_{\text{ref}}$ ):

$$A_{\text{sk}} = 147,09 \text{ m}^2$$



Slika 11: Primer 2

Zapolnjenost:

$$\varphi = \frac{A_{\text{sk}}}{A_c} = \frac{147,09 \text{ m}^2}{288,75 \text{ m}^2} = 0,51$$

Efektivna vitkost (slika 12):

$$\lambda = 1,65 \frac{H}{b} = 1,65 \frac{36,4 \text{ m}}{7,7 \text{ m}} = 8,04$$



Faktor vitkosti (slika 16):

$$\psi_{\lambda} = 0,91$$

Koeficient sile brez vpliva vitkosti (slika 17):

$$c_{f,0} = 1,40$$

Koeficient sile za palične konstrukcije in odre:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_{\lambda} = 1,4 \cdot 0,91 = 1,27$$

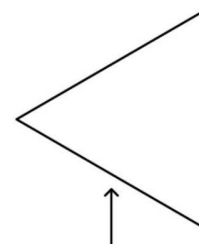
### **Primer 3 – veter na stranico pod kotom 60 °**

Površina omejena z robovi konstrukcije, ki je projicirana na čelno ravnino:

$$A_c = b \cdot \sin\alpha \cdot H = 7,7 \text{ m} \cdot \sin(60^\circ) \cdot 36,4 \text{ m} = 250,06 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin elementov celotne konstrukcije, tudi stopnišča in podesta ( $A_{sk}$ ):

$$A_{sk} = 132,71 \text{ m}^2$$



Slika 12: Primer 3

Zapolnjenost:

$$\varphi = \frac{A_{sk}}{A_c} = \frac{132,71 \text{ m}^2}{250,06 \text{ m}^2} = 0,53$$

Efektivna vitkost (slika 12):

$$\lambda = 1,65 \frac{H}{b \cdot \sin\alpha} = 1,65 \frac{36,4 \text{ m}}{7,7 \text{ m} \cdot \sin(60^\circ)} = 9,28$$

Faktor vitkosti (slika 16):

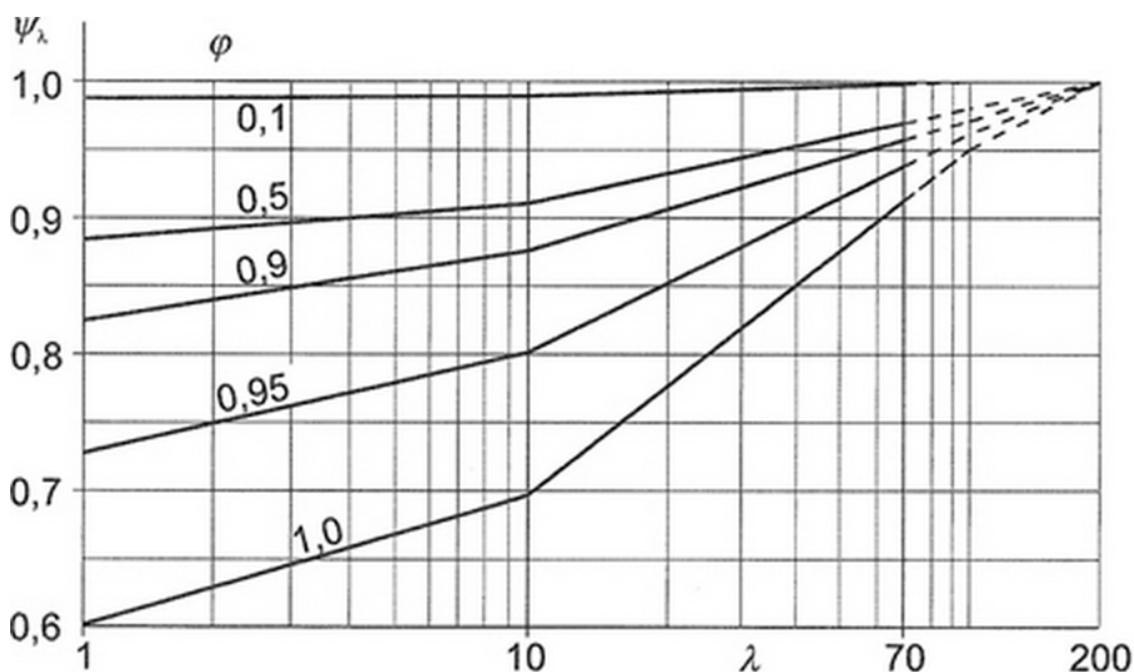
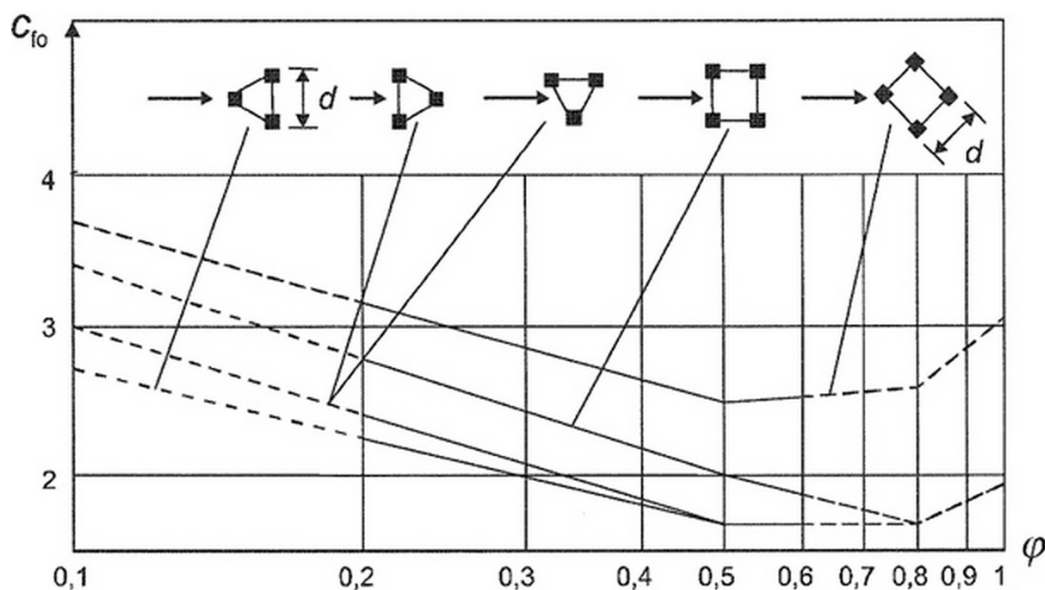
$$\psi_{\lambda} = 0,92$$

Koeficient sile brez vpliva vitkosti (slika 17):

$$c_{f,0} = 1,40$$

Koeficient sile za palične konstrukcije in odre:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_{\lambda} = 1,4 \cdot 0,92 = 1,29$$

Slika 13: Določitev vrednosti faktorja vitkosti  $\psi_\lambda$  (Vir: SIST EN 1991-1-4:2005; slika 7.36)Slika 14: Določitev koeficienta sile brez vpliva vitkosti  $c_{t0}$  (Vir: SIST EN 1991-1-4:2005; Slika 7.34)

Določena je referenčna površina  $A_{sk}$  za posamezno smer in tlak vetra  $q_p$  za vsako referenčno višino  $z_e$ . Za izračun sile vetra  $F_w$  potrebujemo še konstrukcijski faktor  $c_{sCd}$ , ki zajame vpliv nesočasnega nastopa največjih tlakov pri sunkih vetra na ploskve in nihanje konstrukcije zaradi turbulence. Njegova privzeta vrednost znaša 1. Izračuni sile vetra  $F_w$  so prikazani v preglednici 2 in za lažjo primerjavo velikosti sil v različnih smereh zbrani v grafu na sliki 13. Merodajna je sila vetra v primeru 2, vendar se le malo razlikuje od ostalih dveh.

Rezultirajoča sila vetra:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

$c_s c_d = 1$

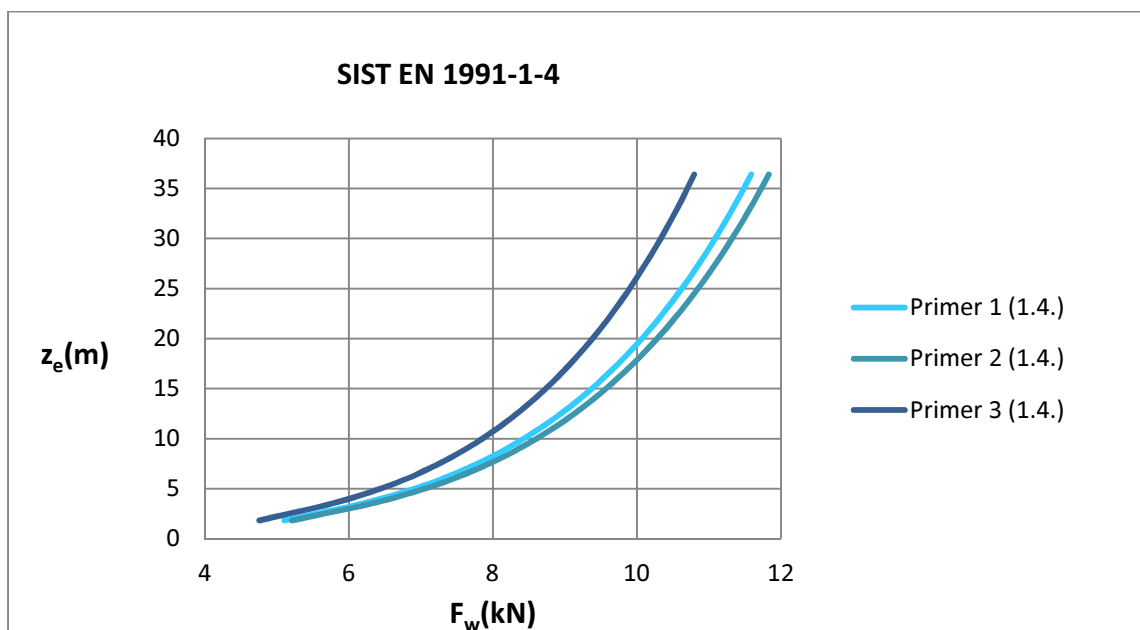
$A_{ref}$

Konstruktivni faktor

Referenčna površina konstrukcije

*Preglednica 2: Izračun sile vetra  $F_w$  po SIST EN 1991-1-1:2004*

		<b>Primer 1</b>	<b>Primer 2</b>	<b>Primer 3</b>
<b>panel</b>	<b>ze (m)</b>	<b><math>F_w</math> (kN)</b>	<b><math>F_w</math> (kN)</b>	<b><math>F_w</math> (kN)</b>
1	1,82	5,10	5,21	4,75
2	3,64	6,26	6,39	5,83
3	5,46	7,10	7,25	6,61
4	7,28	7,72	7,88	7,19
5	9,1	8,22	8,39	7,65
6	10,92	8,63	8,82	8,04
7	12,74	8,99	9,18	8,37
8	14,56	9,31	9,50	8,67
9	16,38	9,59	9,79	8,93
10	18,2	9,84	10,05	9,17
11	20,02	10,07	10,29	9,38
12	21,84	10,29	10,51	9,58
13	23,66	10,49	10,71	9,77
14	25,48	10,67	10,90	9,94
15	27,3	10,85	11,08	10,10
16	29,12	11,01	11,25	10,26
17	30,94	11,17	11,40	10,40
18	32,76	11,32	11,55	10,54
19	34,58	11,46	11,70	10,67
20	36,4	11,59	11,83	10,79
21	37,5	8,34	8,34	6,82



Slika 15: Primerjava vrednosti sil vetra  $F_w$  v obravnavanih smereh po SIST EN 1991-1-4

#### 4.3.2 Sila vetra $F_w$ po SIST EN 1993-3-1:2007

Izračun koeficienta sile vetra  $c_f$  po standardu SIST EN 1993-3-1:2007 je kompleksnejši kot po SIST EN 1991-1-1:2004. Dodatna informativna navodila za vplive vetra na stolpe, jambore in dimnike so zbrana v Aneks B: Modeling of meteorological actions.

Konstrukcijo razdelimo na enake panele, da primerno zajamemo vpliv vetra za globalno analizo. Metoda, opisana spodaj, velja za določanje sile vetra v primeru kvadratnega ali enakostraničnega trikotnega tlorisa.

Elemente razdelimo na konstrukcijske in nekonstrukcijske ter za vsake posebej izračunamo  $c_f$  in ju seštejemo. Neonstrukcijski elementi so zaključni elementi, povezani s konstrukcijo (npr. kritina, obloge, opaži, podlage, vključno z napeljavo in strojno opremo); v primeru te diplomske naloge je to stopnišče in razgledna ploščad. Konstrukcijski elementi so nosilni elementi: stebri, horizontale in diagonale.

Določena je površina pravokotno projiciranih ostrorobnih konstrukcijskih elementov  $A_s$  na smer vetra. Ta površina je enaka vsoti projiciranih konstrukcijskih elementov ostrorobnih  $A_f$  in okroglih prerezov  $A_c = 0$  in  $A_{c,sup} = 0$ , saj so sestavni deli obravnavane konstrukcije le ostrorobi prerezi. Kot  $\theta$  določa smer vetra na konstrukcijo, zapolnjenost  $\phi$  je definirana že pri SIST EN 1991-1-1:2004. Vrednost faktorja pogostosti vetra  $K_\phi$  je odvisna od treh faktorjev: oblike tlorisa objekta, razmerja  $A_f/A_s$  in smeri vetra  $\theta$ . Lahko ga odčitamo iz preglednice (slika 19). Za konstrukcije s kvadratnim in trikotnim tlorisom potrebujemo še skupni normalni koeficient sile  $c_{f,s,o}$ , ki ga lahko odčitamo iz slike 20. Koeficient sile vetra za golo konstrukcijo  $c_{f,s}$  je odvisen od faktorja pogostosti  $K_\phi$  in skupnega normalnega koeficienta sile  $c_{f,s,o}$ .

### **Primer 1 – veter pravokoten na stranico**

Površina pravokotno projiciranih konstrukcijskih elementov:

$$A_f = 79,70 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin ostrorobnih in okroglih konstrukcijskih elementov:

$$A_s = A_f + A_c + A_{c,\text{sup}} = 79,70 \text{ m}^2$$

Razmerje:

$$\frac{A_f}{A_s} = 1, \quad A_f = A_s$$

Faktor pogostosti (slika 19):

$$K_\phi = 1$$

Zapolnjenost:

$$\varphi = 0,50$$

Skupni normalni koeficient sile (slika 20):

$$c_{f,s,o} = 1,85$$

Koeficient sile vetra za golo konstrukcijo objekta:

$$c_{f,s} = K_\phi \cdot c_{f,s,o} = 1 \cdot 1,85 = 1,85$$

### **Primer 2 – veter na stranici pod kotom 30 °**

Površina pravokotno projiciranih konstrukcijskih elementov:

$$A_f = 82,74 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin ostrorobnih in okroglih konstrukcijskih elementov:

$$A_s = 82,74 \text{ m}^2$$

Razmerje:

$$\frac{A_f}{A_s} = 1, \quad A_f = A_s$$

Faktor pogostosti (slika 19):

$$K_\phi = 0,90$$

Zapolnjenost:

$$\varphi = 0,51$$

Skupni normalni koeficient sile (slika 20):

$$c_{f,s,o} = 1,80$$

Koeficient sile vetra za golo konstrukcijo objekta:

$$c_{f,s} = K_\phi \cdot c_{f,s,o} = 0,90 \cdot 1,80 = 1,62$$

**Primer 3 – veter na stranico pod kotom 60 °**

Površina pravokotno projiciranih konstrukcijskih elementov:

$$A_f = 75,70 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin ostrorobnih in okroglih konstrukcijskih elementov:

$$A_s = 75,70 \text{ m}^2$$

Razmerje:

$$\frac{A_f}{A_s} = 1, \quad A_f = A_s$$

Faktor pogostosti (slika 19):

$$K_\phi = 0,95$$

Zapolnjenost:

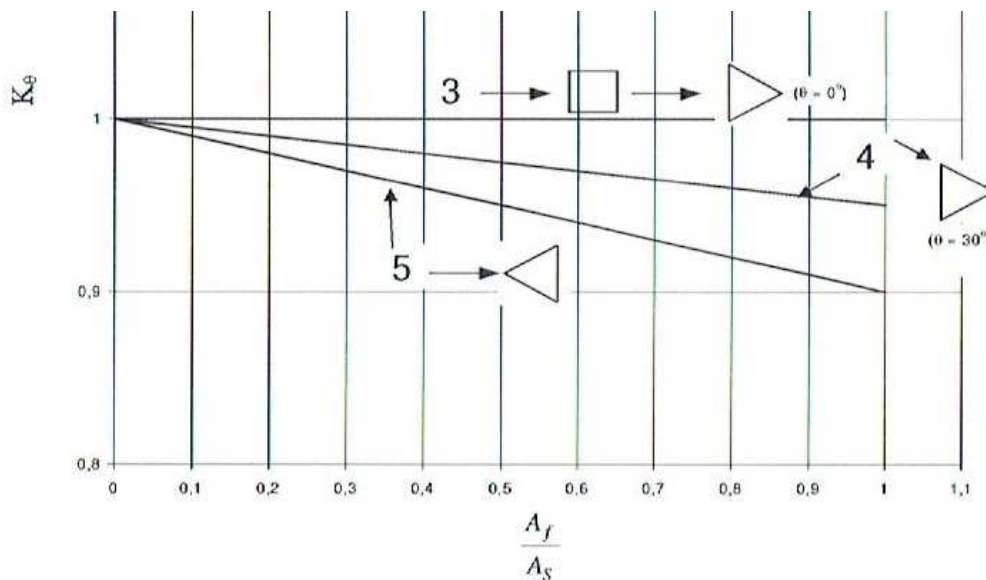
$$\varphi = 0,53$$

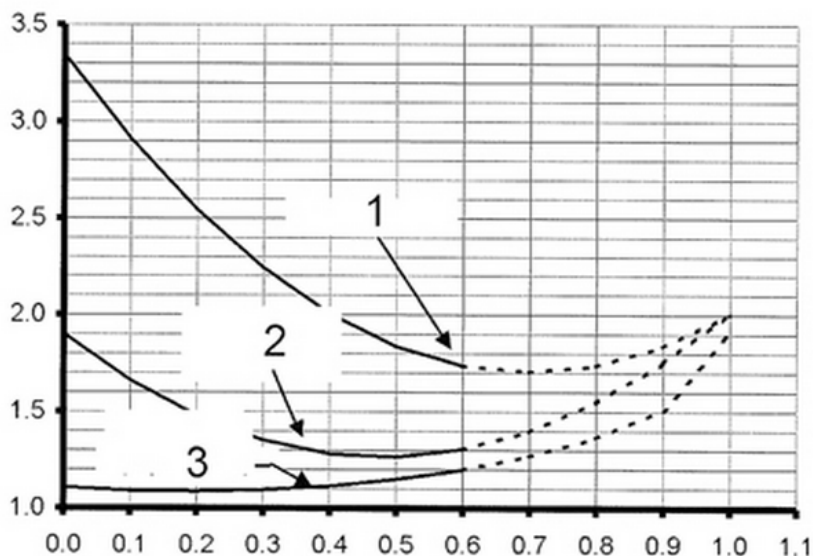
Skupni normalni koeficient sile (slika 20):

$$c_{f,s,0} = 1,80$$

Koeficient sile vetra za golo konstrukcijo objekta:

$$c_{f,s} = K_\phi \cdot c_{f,s,0} = 0,95 \cdot 1,80 = 1,71$$

Slika 16: Vrednost faktorja pogostosti  $K_\phi$ , za obravnavane smeri vetra (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: slika B.2.2)



Slika 17: Vrednosti faktorja koeficienta sile  $c_{f,s,o}(\varphi)$  za trikotno konstrukcijo, za ostrorobe prereze velja linija 1 (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: slika B.2.3 (b))

Faktor koeficienta sile za nekonstrukcijske elemente  $c_{f,A}$  je povezan z reducirnim faktorjem  $K_A$  in s skupnim normalnim koeficientom sile  $c_{f,A,o}$ , katerega vrednost za kotnike znaša 2. Za ostrorobe elemente je enaka pri vseh Reynoldsovih številih (SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: preglednica B.2.1). Reducirni faktor  $K_A$  upošteva prekrivanje komponent konstrukcije in znaša 0,8. Če bi bil delež nekonstrukcijskih elementov majhen v primerjavi z konstrukcijskimi, bi bila njegova vrednost 1. Ker sta faktorja enaka, je vrednost koeficienta sile  $c_{f,A}$  enaka v vseh treh primerih.

Površina pravokotno projiciranih konstrukcijskih elementov:

**Primer 1 – veter pravokoten na stranico**

$$A_A = 64,35 \text{ m}^2$$

**Primer 2 – veter na stranici pod kotom 30 °**

$$A_A = 64,35 \text{ m}^2$$

**Primer 3 – veter na stranico pod kotom 60 °**

$$A_A = 57,14 \text{ m}^2$$

Skupni normalni koeficient sile (SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: preglednica B.2.1):

$$c_{f,A,o} = 2$$

Reducirni faktor (SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: preglednica B.2.2):

$$K_A = 0,8$$

Kot med smerjo vetra in čelno ravnino konstrukcijskih elementov:

$$\Psi = 90^\circ$$

Koeficient sile vetra pomožnih elementov objekta (stopnišče, ploščad)

$$c_{f,A} = c_{f,A,o} \cdot K_A \cdot \sin^2 \Psi = 2 \cdot 0,8 \cdot \sin^2 90^\circ = 1,6$$

Vsota dobljenih koeficientov sile vetra za konstrukcijske  $c_{f,s}$  in nekonstrukcijske elemente  $c_{f,A}$ , da koeficient sile vetra  $c_f$  izračunan po SIST EN 1993-3-1:2007. Ta omogoči izračun sil vetra  $F_w$ . Do največjih sil tokrat pride v primeru 2, ampak se malo razlikuje od primera 1. Rezultati so zbrani v preglednicah in na grafu.

Koeficient sile vetra:

**Primer 1 – veter pravokoten na stranico**

$$\sum c_f = c_{f,s} + c_{f,A} = 1,85 + 1,6 = 3,45$$

**Primer 2 – veter na stranici pod kotom 30 °**

$$\sum c_f = c_{f,s} + c_{f,A} = 1,67 + 1,6 = 3,27$$

**Primer 3 – veter na stranico pod kotom 60 °**

$$\sum c_f = c_{f,s} + c_{f,A} = 1,71 + 1,6 = 3,31$$

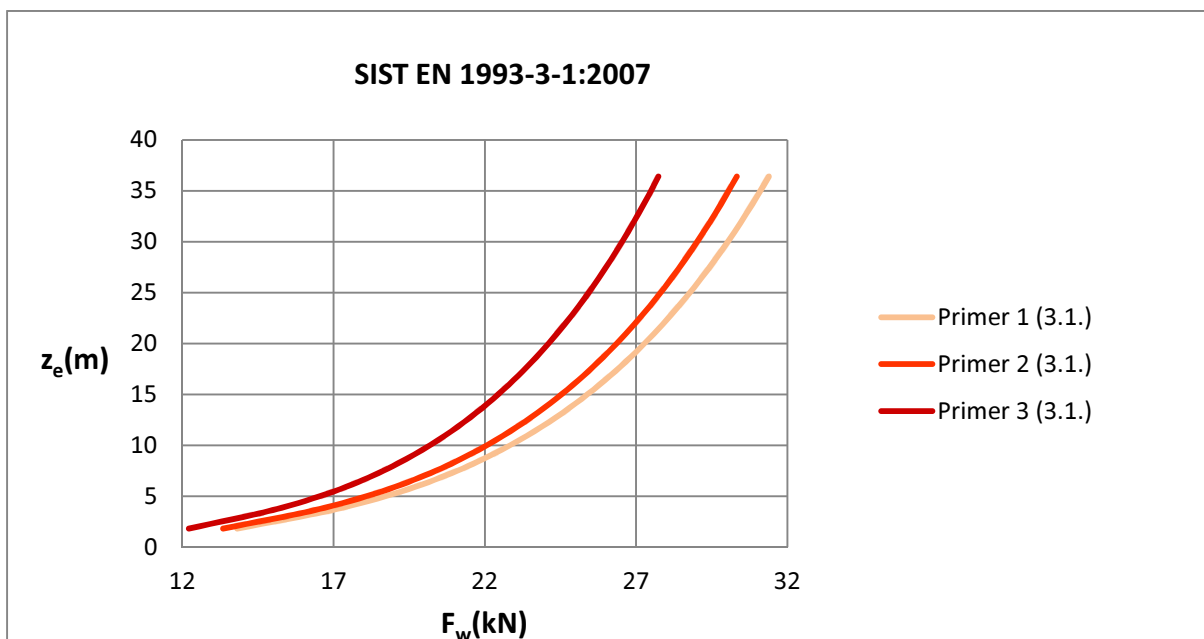
Rezultirajoča sila vetra:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

Preglednica 3: Izračun sile vetra  $F_w$  po SIST EN 1993-3-1:2007

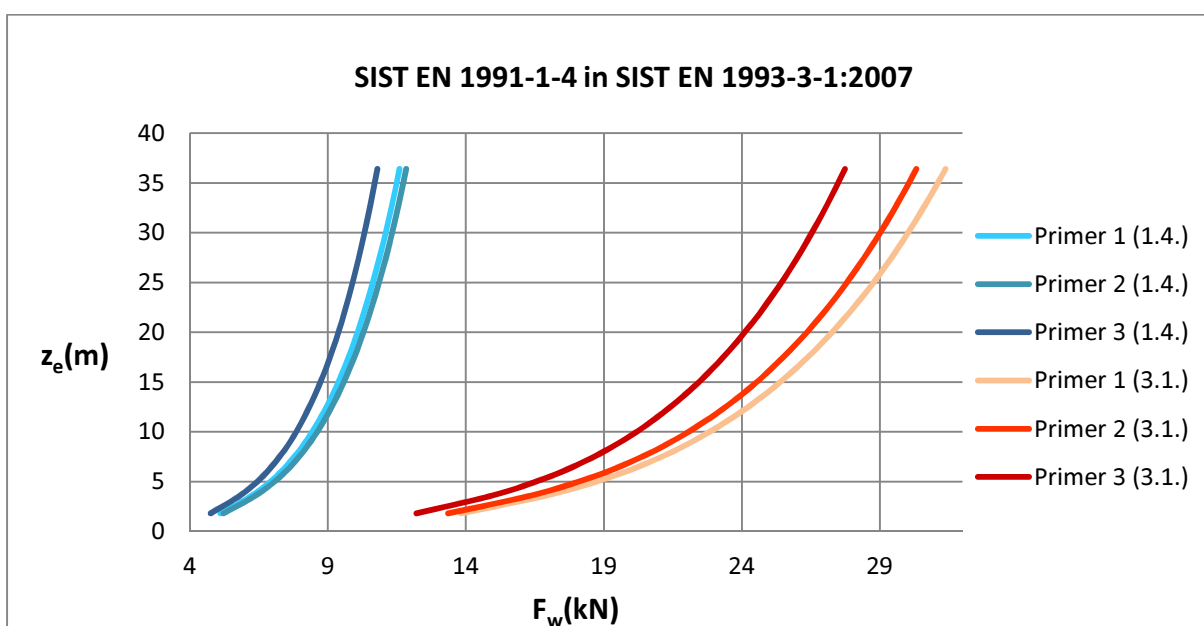
		<b>Primer 1</b>	<b>Primer 2</b>	<b>Primer 3</b>
<b>panel</b>	<b>ze (m)</b>	<b><math>F_w</math> (kN)</b>	<b><math>F_w</math> (kN)</b>	<b><math>F_w</math> (kN)</b>
1	1,82	13,82	13,35	12,21
2	3,64	16,96	16,39	14,99
3	5,46	19,23	18,58	17,00
4	7,28	20,91	20,21	18,48
5	9,1	22,25	21,51	19,67
6	10,92	23,38	22,59	20,66
7	12,74	24,35	23,53	21,52
8	14,56	25,20	24,35	22,27
9	16,38	25,96	25,09	22,95
10	18,2	26,65	25,75	23,56
11	20,02	27,28	26,36	24,11
12	21,84	27,86	26,93	24,63
13	23,66	28,40	27,45	25,11
14	25,48	28,91	27,93	25,55
15	27,3	29,38	28,39	25,97
16	29,12	29,82	28,82	26,36
17	30,94	30,24	29,23	26,73
18	32,76	30,64	29,61	27,09
19	34,58	31,02	29,98	27,42
20	36,4	31,38	30,33	27,74
21	37,5	22,60	21,39	17,52





Slika 18: Primerjava vrednosti sil vetra  $F_w$  v obravnavanih smereh

Na koncu sledi primerjava zgoraj izvedenih izračunov po različnih standardih. Kot pričakovano drugi standard, ki obravnava stolpe in zahteva kompleksnejši izračun, da večje vrednosti sil vetra. Te so za skoraj 40 % večje kot po prvem standardu. Spodaj so sile vetra zbrane v skupnem grafu. Opažam, da ima parabola v prvem primeru strmejši naklon kot v drugem, torej se velikost sile z naraščanjem višine bolj malo spreminja. Večje vrednosti sile vetra  $F_w$  so po zadnjem standardu SIST EN 1993-3-1:2007, torej je stolp dimenzioniran na obtežbe dobljene iz slednjega. Čeprav so sile vetra večje v primeru 1, nam da veter v smeri 3 kritične obremenitve za horizontale in diagonale.



Slika 19: Primerjava izračuna vetra po obeh standardih

Veter je vnesen v program Scia Engineer kot točkovna obtežba v vozliščih stebra in horizontal (slika 23).



Slika 20: Obtežba vetra

#### 4.4. VETER Z LEDOM

Izračuna se na isti način kot v poglavju veter, vendar je upoštevana za debelino ledu povečana referenčna površina  $A_{ref}$ . Posledično se spremeni koeficient sile  $c_f$ . Veter z ledom pri obtežnih kombinacijah se združuje le z lastno in stalno težo ter z ledom. Zmanjšan je z reducirnim faktorjem  $k$  določenim v poglavju 4.5, torej veter z ledom ni kritičen obtežni primer. Tu se velikosti referenčnih površin bolj razlikujejo, posledično se bolj razlikujejo tudi velikosti sil vetra  $F_{w,l}$ . Po obeh standardih so največje sile v primeru 2, razlike med velikostjo sil po prvem in drugem standardu so 15-25 %.

#### 4.4.1 Sila vetra z ledom $F_{w,l}$ po SIST EN 1991-1-4:2005

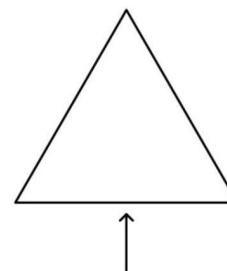
##### **Primer 1 – veter pravokoten na stranico**

Površina omejena z robovi konstrukcije, ki je projicirana na čelno ravnino:

$$A_c = b \cdot H = 7,7 \text{ m} \cdot 36,4 \text{ m} = 288,75 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin elementov celotne konstrukcije, tudi stopnišča in podesta ( $A_{ref}$ ):

$$A_{sk} = 239,51 \text{ m}^2$$



Slika 21: Primer 1

Zapolnjenost:

$$\varphi = \frac{A_{sk}}{A_c} = \frac{239,51 \text{ m}^2}{288,75 \text{ m}^2} = 0,83$$

Efektivna vitkost (slika 12):

$$\lambda = 1,65 \frac{H}{b} = 1,65 \frac{36,4 \text{ m}}{7,7 \text{ m}} = 8,04$$

Faktor vitkosti (slika 16):

$$\psi_\lambda = 0,88$$

Koeficient sile brez vpliva vitkosti (slika 17):

$$c_{f,o} = 1,45$$

Koeficient sile za palične konstrukcije in odre:

$$c_f = c_{f,o} \cdot \psi_\lambda = 1,45 \cdot 0,88 = 1,28$$

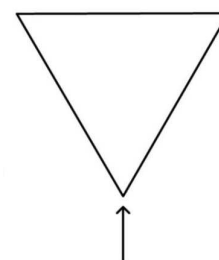
##### **Primer 2 – veter na stranici pod kotom 30 °**

Površina omejena z robovi konstrukcije, ki je projicirana na čelno ravnino:

$$A_c = b \cdot H = 7,7 \text{ m} \cdot 36,4 \text{ m} = 288,75 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin elementov celotne konstrukcije, tudi stopnišča in podesta ( $A_{ref}$ ):

$$A_{sk} = 253,71 \text{ m}^2$$



Slika 22: Primer 2

Zapolnjenost:

$$\varphi = \frac{A_{sk}}{A_c} = \frac{253,71 \text{ m}^2}{288,75 \text{ m}^2} = 0,88$$

Efektivna vitkost (slika 12):

$$\lambda = 1,65 \frac{H}{b} = 1,65 \frac{36,4 \text{ m}}{7,7 \text{ m}} = 8,04$$

Faktor vitkosti (slika 16):

$$\psi_{\lambda} = 0,88$$

Koeficient sile brez vpliva vitkosti (slika 17):

$$c_{f,0} = 1,65$$

Koeficient sile za palične konstrukcije in odre:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_{\lambda} = 1,65 \cdot 0,88 = 1,45$$

### **Primer 3 – veter na stranico pod kotom 60 °**

Površina omejena z robovi konstrukcije, ki je projicirana na čelno ravnino:

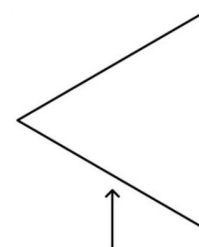
$$A_c = b \cdot \sin \alpha \cdot H = 7,7 \text{ m} \cdot \sin(60^\circ) \cdot 36,4 \text{ m} = 250,06 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin elementov celotne konstrukcije, tudi stopnišča in podesta ( $A_{\text{ref}}$ ):

$$A_{\text{sk}} = 195,89 \text{ m}^2$$

Zapolnjenost:

$$\varphi = \frac{A_{\text{sk}}}{A_c} = \frac{195,89 \text{ m}^2}{250,06 \text{ m}^2} = 0,78$$



Slika 23: Primer 3

Efektivna vitkost (slika 12):

$$\lambda = 1,65 \frac{H}{b \cdot \sin \alpha} = 1,65 \frac{36,4 \text{ m}}{7,7 \text{ m} \cdot \sin(60^\circ)} = 9,28$$

Faktor vitkosti (slika 16):

$$\psi_{\lambda} = 0,88$$

Koeficient sile brez vpliva vitkosti (slika 17):

$$c_{f,0} = 1,40$$

Koeficient sile za palične konstrukcije in odre:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_{\lambda} = 1,40 \cdot 0,88 = 1,23$$

Silo vetra v obtežni kombinaciji z ledom zmanjšam z reducirnim faktorjem  $k$ , in v primeru ko ne prevladuje zmanjšam še z faktorjem za kombinacijsko vrednost spremenljivega vpliva  $\psi_w$ .

$k = 0,5$

Reducirni faktor za pritisk vetra, razred G3 (ES ISO 12494: 2012: preglednica 27)

$\psi_w = 0,5$

Faktor za kombinacijsko vrednost spremenljivega vpliva (SIST EN 1991-1-4:2005; C.6)

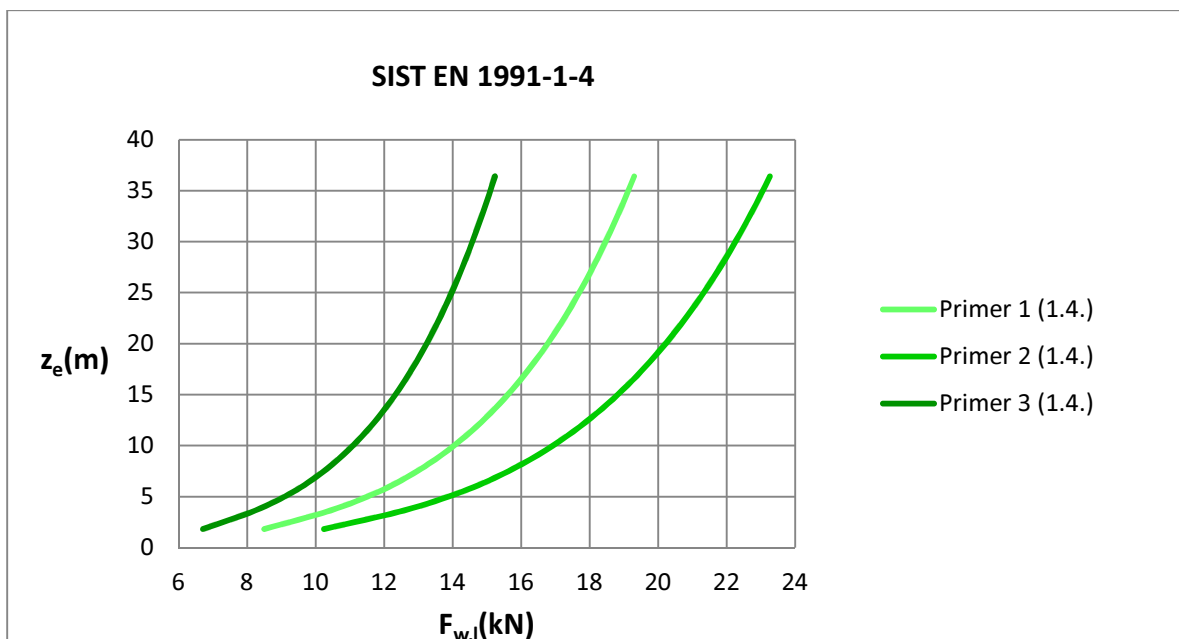
V primeru vetra z ledom se referenčne površine  $A_{\text{ref}}$  med seboj bolj razlikujejo kot pri vetru posledično tudi velikosti sil  $F_{w,l}$ . Največje vrednosti so v primeru 2.

Rezultirajoča sila vetra:

$$F_{w,l} = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

*Preglednica 4: Izračun sile vetra z ledom  $F_{w,l}$  po SIST EN 1991-1-1:2004*

		<b>Primer 1</b>	<b>Primer 2</b>	<b>Primer 3</b>
<b>panel</b>	<b>ze (m)</b>	<b><math>F_{w,l}</math> (kN)</b>	<b><math>F_{w,l}</math> (kN)</b>	<b><math>F_{w,l}</math> (kN)</b>
1	1,82	8,50	10,24	6,71
2	3,64	10,43	12,57	8,24
3	5,46	11,83	14,25	9,34
4	7,28	12,86	15,50	10,15
5	9,1	13,69	16,50	10,81
6	10,92	14,38	17,33	11,35
7	12,74	14,97	18,05	11,82
8	14,56	15,50	18,68	12,24
9	16,38	15,96	19,24	12,61
10	18,2	16,39	19,76	12,94
11	20,02	16,78	20,22	13,25
12	21,84	17,13	20,65	13,53
13	23,66	17,47	21,05	13,79
14	25,48	17,78	21,43	14,04
15	27,3	18,07	21,78	14,27
16	29,12	18,34	22,11	14,48
17	30,94	18,60	22,42	14,69
18	32,76	18,84	22,71	14,88
19	34,58	19,08	23,00	15,06
20	36,4	19,30	23,26	15,24
21	37,5	51,49	58,59	38,95



Slika 24: Primerjava vrednosti sil vetra  $F_{w,l}$  v obravnavanih smereh

#### 4.4.2 Sila vetra z ledom $F_{w,l}$ po SIST EN 1993-3-1:2007

V primeru vetra z ledom, kjer je površina nekonstrukcijskih elementov večja kot površina konstrukcijskih elementov, se izračun koeficientov spremeni. Tokrat reducirni faktor  $K_\phi$  zmanjša koeficient sile  $c_{f,s}$  za konstrukcijske elemente in ne za nekonstrukcijske elemente  $C_{f,A}$ .

##### **Primer 1 – veter pravokoten na stranico**

Površina pravokotno projiciranih konstrukcijskih elementov:

$$A_f = 102,99 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin ostrorobnih in okroglih konstrukcijskih elementov:

$$A_s = 102,99 \text{ m}^2$$

Razmerje:

$$\frac{A_f}{A_s} = 1, \quad A_f = A_s$$

Faktor pogostosti (slika 19):

$$K_\phi = 1$$

Zapolnjenost:

$$\varphi = 0,83$$

Skupni normalni koeficient sile (slika 20):

$$c_{f,s,o} = 1,75$$

Reducirni faktor (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: tabela B.2.2):

$$K_A = 0,8$$

Koeficient sile vetra za golo konstrukcijo objekta:

$$c_{f,s} = K_\phi \cdot c_{f,s,o} \cdot K_A = 1 \cdot 1,75 \cdot 0,8 = 1,40$$

### **Primer 2 – veter na stranici pod kotom 30 °**

Površina pravokotno projiciranih konstrukcijskih elementov:

$$A_f = 102,99 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin ostrorobnih in okroglih konstrukcijskih elementov:

$$A_s = 102,99 \text{ m}^2$$

Razmerje:

$$\frac{A_f}{A_s} = 1, \quad A_f = A_s$$

Faktor pogostosti (slika 19):

$$K_\phi = 0,90$$

Zapolnjenost:

$$\varphi = 0,88$$

Skupni normalni koeficient sile (slika 20):

$$c_{f,s,o} = 1,80$$

Reducirni faktor (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: tabela B.2.2):

$$K_A = 0,8$$

Koeficient sile vetra za golo konstrukcijo objekta:

$$c_{f,s} = K_\phi \cdot c_{f,s,o} \cdot K_A = 0,90 \cdot 1,8 \cdot 0,8 = 1,3$$

### **Primer 3 – veter na stranico pod kotom 60 °**

Površina pravokotno projiciranih konstrukcijskih elementov:

$$A_f = 94,02 \text{ m}^2$$

Vsota pravokotno projiciranih površin ostrorobnih in okroglih konstrukcijskih elementov:

$$A_s = 94,02 \text{ m}^2$$

Razmerje:

$$\frac{A_f}{A_s} = 1, \quad A_f = A_s$$

Faktor pogostosti (slika 19):

$$K_\phi = 0,95$$

Zapolnjenost:

$$\varphi = 0,78$$

Reducirni faktor (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: tabela B.2.2):

$$K_A = 0,8$$

Skupni normalni koeficient sile (slika 20):

$$c_{f,s,o} = 1,75$$

Koeficient sile vetra za golo konstrukcijo objekta:

$$c_{f,s} = K_\phi \cdot c_{f,s,o} \cdot K_A = 0,95 \cdot 1,75 \cdot 0,8 = 1,33$$

Površina pravokotno projiciranih nekonstrukcijskih elementov:

**Primer 1 – veter pravokoten na stranico**

$$A_A = 136,52 \text{ m}^2$$

**Primer 2 – veter na stranici pod kotom 30 °**

$$A_A = 150,72 \text{ m}^2$$

**Primer 3 – veter na stranico pod kotom 60 °**

$$A_A = 101,87 \text{ m}^2$$

Skupni normalni koeficient sile (SIST EN 1993-3-1:2007, aneks B: preglednica B.2.1):

$$c_{f,A,o} = 2$$

Kot med smerjo vetra in čelno ravnino konstrukcijskih elementov:

$$\psi = 90^\circ$$

Koeficient sile vetra pomožnih elementov objekta (stopnišče, ploščad)

$$c_{f,A} = c_{f,A,o} \sin^2 \psi = 2 \cdot \sin^2 90^\circ = 2$$

Sledi seštevek koeficientov sile vetra za konstrukcijske  $c_{f,s}$  in nekonstrukcijske  $c_{f,A}$  elemente.

Koeficient sile vetra:

**Primer 1 – veter pravokoten na stranico**

$$\sum c_f = c_{f,s} + c_{f,A} = 1,40 + 2 = 3,4$$

**Primer 2 – veter na stranici pod kotom 30 °**

$$\sum c_f = c_{f,s} + c_{f,A} = 1,30 + 2 = 3,30$$

**Primer 3 – veter na stranico pod kotom 60 °**

$$\sum c_f = c_{f,s} + c_{f,A} = 1,22 + 2 = 3,22$$



Sila vetra v obtežni kombinaciji z ledom je zmanjšana z reducirnim faktorjem  $k$  in v primeru, ko ne prevladuje, je zmanjšana še s faktorjem za kombinacijsko vrednost spremenljivega vpliva  $\psi_w$ .

$k = 0,5$  Reduirni faktor za pritisk vetra, razred G3 (ES ISO 12494: 2012: preglednica 27)  
 $\psi_w = 0,5$  Faktor za kombinacijsko vrednost spremenljivega vpliva (SIST EN 1991-1-4:2005; C.6)

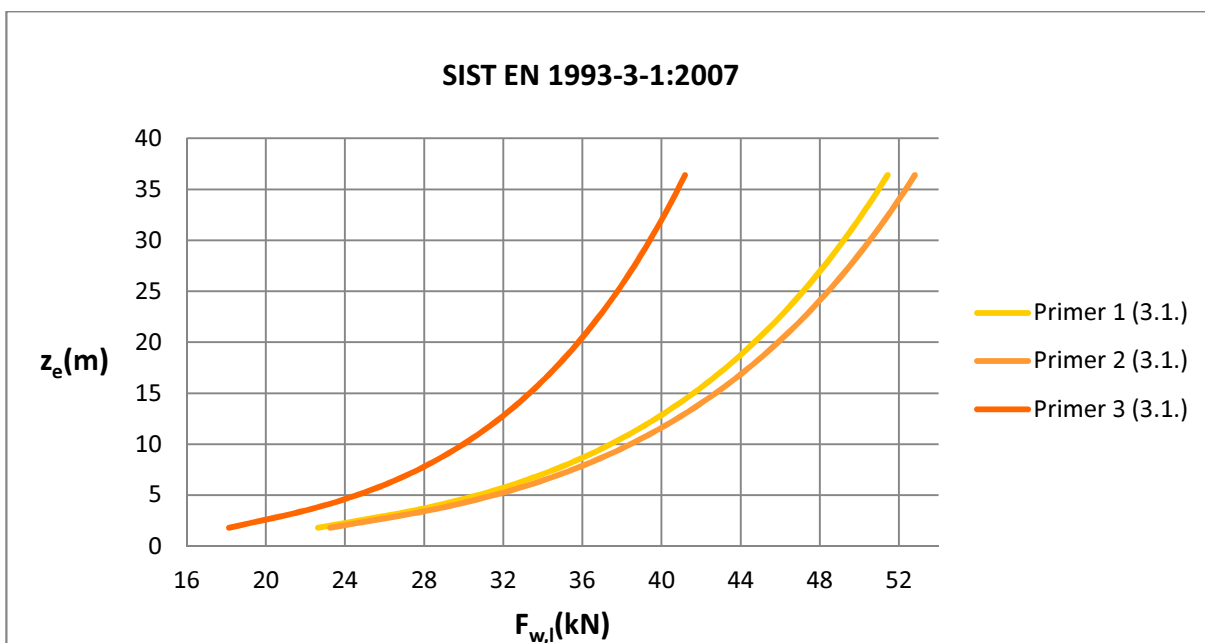
Največji vpliv doprinese obtežba v primeru 2.

Rezultirajoča sila vetra:

$$F_{w,l} = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

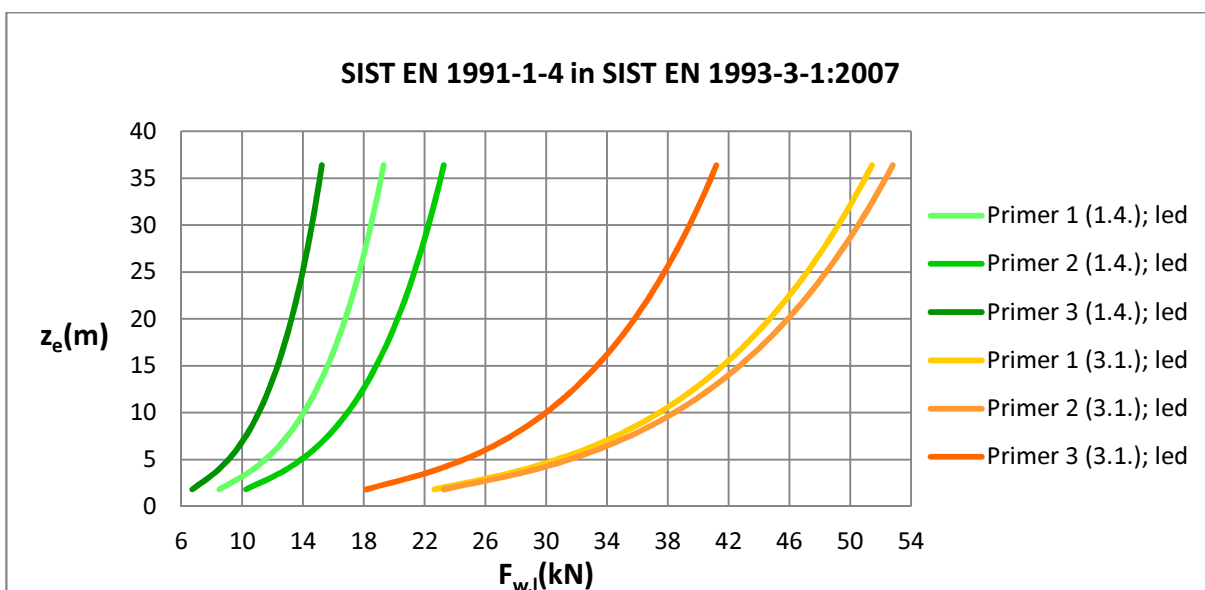
Preglednica 5: Izračun sile vetra  $F_{w,l}$  po SIST EN 1993-3-1:2007

		<b>Primer 1</b>	<b>Primer 2</b>	<b>Primer 3</b>
<b>panel</b>	<b>ze (m)</b>	<b><math>F_{w,l}</math> (kN)</b>	<b><math>F_{w,l}</math> (kN)</b>	<b><math>F_{w,l}</math> (kN)</b>
1	1,82	22,64	23,25	18,14
2	3,64	27,79	28,54	22,26
3	5,46	31,51	32,36	25,24
4	7,28	34,26	35,18	27,45
5	9,1	36,46	37,45	29,21
6	10,92	38,31	39,34	30,69
7	12,74	39,89	40,97	31,96
8	14,56	41,29	42,40	33,07
9	16,38	42,54	43,68	34,08
10	18,2	43,67	44,84	34,98
11	20,02	44,70	45,91	35,81
12	21,84	45,66	46,88	36,57
13	23,66	46,54	47,79	37,28
14	25,48	47,36	48,64	37,94
15	27,3	48,14	49,43	38,56
16	29,12	48,87	50,18	39,15
17	30,94	49,56	50,89	39,70
18	32,76	50,21	51,56	40,22
19	34,58	50,83	52,20	40,72
20	36,4	51,42	52,81	41,19
21	37,5	137,19	132,99	105,27



Slika 25: Primerjava vrednosti sil vetra  $F_{w,l}$  v obravnavanih smereh

Tudi tokrat je parabola v izračunu po prvem standardu strmejša kot v drugem. Sile  $F_{w,l}$  so približno 35-45% večje po SIST EN 1993-3-1:2007. Veter z ledom je vnesen v Scia Engineer kot točkovna obtežba v vozlišču stebra in horizontal (slika 30).

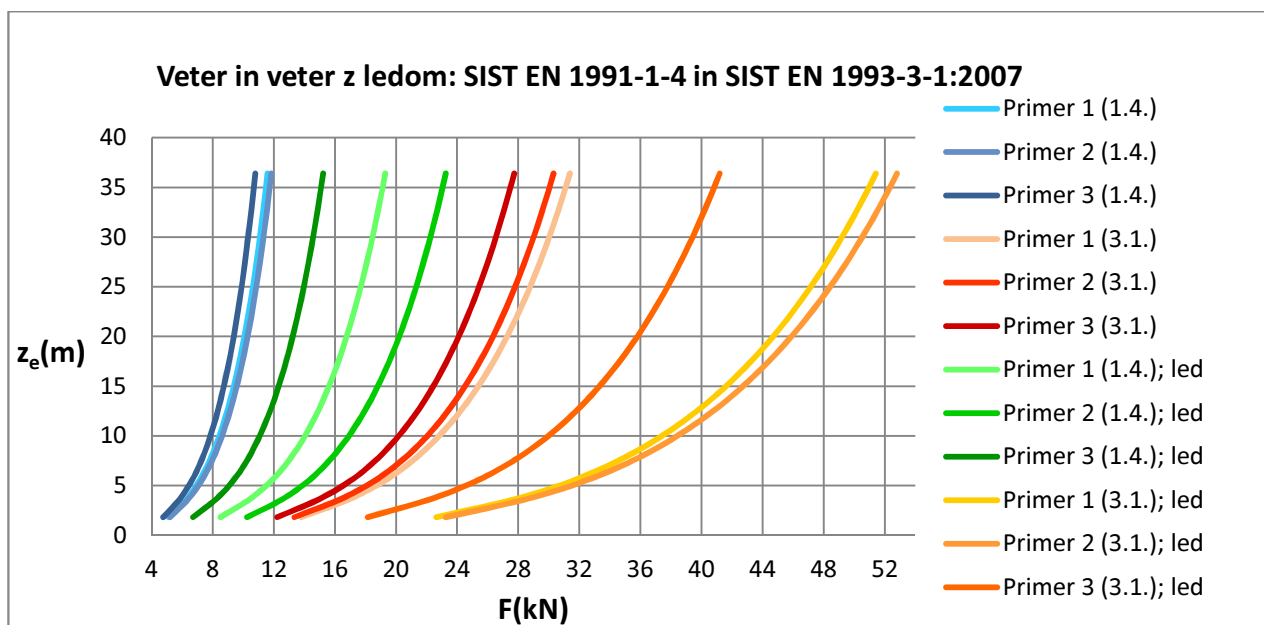


Slika 26: Primerjava izračuna vetra  $F_{w,l}$  po obeh standardih



Slika 27: Obtežba vetra z ledom, primer 3

Na koncu sledi še primerjava vseh izračunanih sil v vseh primerih vetra in vetra z ledom. najmanjše so sile po prvem standardu v primeru vetra, nato veter z ledom, nadalje veter po drugem standardu in veter z ledom. Z večanjem sil se manjša naklon parabole. Obremenitve pri vetru z ledom so približno 30-40 % večje kot pri vetru, če sta med seboj primerjana izračuna po istem standardu.



Slika 28: Primerjava vseh sil vetra

#### 4.5. LED

Napotki za izračun so v standardu SIST EN 1993-3-1:2007, vrednosti faktorjev pa so pridobljeni v ES ISO 12494: 2012. Velikost in oblika obtežbe ledu je odvisna od lokacijskih pogojev, gostote ledu in same oblike konstrukcije. Predpostavljeno je, da območje Škofje Loke spada v srednjo ledno cono - razred G3. Ta razred določa debelino ledu  $t_{led}$  in reducirni faktor  $k$  za vpliv vetra z ledom pri obtežni kombinaciji z ledom.

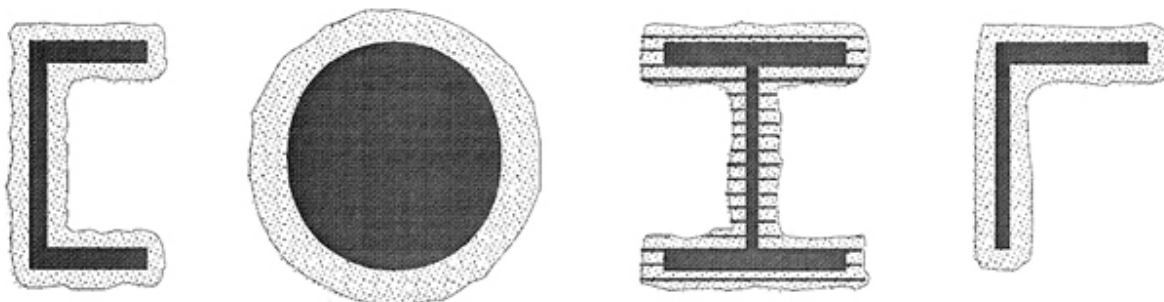
Za izračun ledu se privzame, da se ta enakomerno nabere okrog celotnega elementa, kar omogoča določitev teže ledu in velikost referenčne ploskve za veter. Kjer je med komponentami razmik manjši kot 7,5 cm se domneva, da led zapolni ves vmesni prostor. Izračunana teža ledu  $\gamma_{led}$  je vnesena v program Scia Engineer kot enakomerno porazdeljena obtežba na vsak element. Led je upoštevan le v kombinaciji z lastno in stalno težo ter vetrom z ledom. Silo ledu v obtežni kombinaciji z vetrom z ledom, ko ne prevladuje zmanjšam z faktorjem  $\psi_{led} = 0,5$ .

$$\varphi_{led} = 900 \text{ kg/m}^3$$

debelina ledu za razred G3 (ES ISO 12494: 2012: preglednica 3)

$$t_{led} = 30 \text{ mm}$$

gostota ledu (ES ISO 12494: 2012: preglednica 1)



Slika 29: Debelina ledu na elementu (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007: aneks C: slika C.1)



#### 4.6. SNEG

Objekt se nahaja v snežni coni A3. Njegov vpliv odpade na le na razgledno ploščad in je enakomerno porazdeljen kot točkovna obtežba na stebre.

Karakteristično obtežbo snega na tleh je določena po enačbi:

$$s_k = 1,935 \left[ 1 + \left( \frac{A}{728} \right)^2 \right] = 1,935 \left[ 1 + \left( \frac{900 \text{ m}}{728} \right)^2 \right] = 4,89 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$A = 900 \text{ m}$

Nadmorska višina kraja

Obtežba snega na strehi:

$$s = \mu C_e C_t s_k = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 4,89 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 3,91 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$\mu = 0,8$

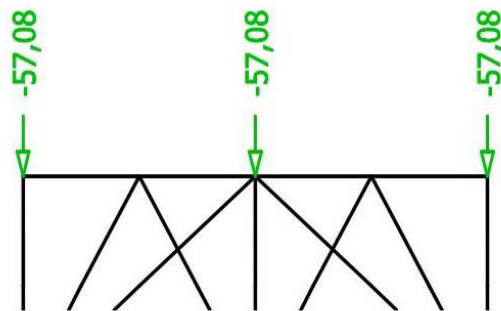
Oblikovni koeficient obtežbe snega ( $\alpha = 0^\circ$ )

$C_e = 1$

Koeficient izpostavljenosti (običajna izpostavljenost)

$C_t = 1$

Toplotni koeficient



Slika 31: Obtežba snega

## 5. OBTEŽNE KOMBINACIJE

Mejna stanja nosilnosti so povezana s poružitvijo ali z drugimi oblikami odpovedi konstrukcije, ki lahko ogrozijo varnost ljudi, mejna stanja uporabnosti pa s poškodbami na meji uporabnosti. Pri večjih poškodbah od predpisanih pogoji za obratovanje niso več izpolnjeni. Razgledni stolp spada v zanesljivosti razred 2, ker se ne nahaja v urbani lokaciji, in ni namenjen za telekomunikacijo, a se vseeno lahko kdo poškoduje, saj se bodo okrog njega in na njem zadrževali ljudje. Glede na ta razred so določeni delni varnostni faktorji  $\gamma_G$  in  $\gamma_Q$ . (SIST EN 1993-3-1:2007: aneks A)

Neugoden vpliv:

$$\gamma_G = 1,1$$

Delni varnostni faktor za stalne

$$\gamma_Q = 1,4$$

Delni varnostni faktor za spremenljive

Ugoden vpliv:

$$\gamma_G = 1,0$$

Delni varnostni faktor za stalne

$$\gamma_Q = 0$$

Delni varnostni faktor za spremenljive vplive

Splošna enačba za obtežne kombinacije:

$$\sum \gamma_G \cdot G + \gamma_{Qi} \cdot Q_i + \sum \Psi \gamma_{Qi} \cdot Q_i$$

Preglednica 6: Faktorji za kombinacijsko vrednost spremenljivega vpliva  $\psi_0$

Obtežni primer	$\psi_0$
veter	0,6
veter,led	0,5
led	0,5
koristna,stopnice	0,7
koristna, ploščad	0,7
sneg	0,5

## 5.1. KONTROLA MEJNEGA STANJA NOSILNOSTI – MSN

Obtežne kombinacije pri MSN dajo projektno obtežbo za dimenzioniranje nosilnih elementov.

Name	Type	Load cases	Coeff. [-]
1,1g+1,4w1+1,4*0,7*q	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		veter, primer 2	1,40
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		koristna	0,98
1,1g+1,4w1	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		veter, primer 2	1,40
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
1,1g+1,4q+1,4*0,6*w1	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		veter, primer 2	0,84
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		koristna	1,40
1,1g+1,4w1+1,4*0,5*s	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		veter, primer 2	1,40
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		sneg	0,70
1,1g+1,4s+1,4*0,6*w1	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		veter, primer 2	0,84
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		sneg	1,40
1,1g+1,4w3	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		veter, primer 3	1,40
1,1g+1,4w3+1,4*0,7*q	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		sneg	1,40
		veter, primer 3	0,84
1,1g+1,4q+1,4*0,6*w3	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		sneg	1,40
		veter, primer 3	0,84
1,1g+1,4w3+1,4*0,5*s	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		sneg	0,70
		veter, primer 3	1,40
1,1g+1,4w2,+1,4*0,5*1	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		veter pri ledu, primer 2	0,70
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		led	0,70
1,1g+1,4l+1,4*0,5*0,5*w2,l	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		veter pri ledu, primer 2	0,35
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		led	1,40
1,1g+1,4w3,+1,4*0,5*1	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		led	0,70
		veter pri ledu, primer 3	0,70
1,1g+1,4l+1,4*0,5*0,5*w1,l1	Linear - ultimate	lastna teža	1,10
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		led	1,40
		veter pri ledu, primer 3	0,35

Slika 32: Obtežne kombinacije – MSN



## 5.2. KONTROLA MEJNEGA STANJA UPORABNOSTI – MSU

g+w1+*ψ*q	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		veter, primer 2	1,00
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,00
		koristna	0,60
g+w2,l	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		veter pri ledu, primer 2	0,50
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,00
		led	0,00
g+q+*ψ*w1	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		veter, primer 2	0,60
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,00
		koristna	1,00
g+w1+*ψ*s	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		veter, primer 2	1,00
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,00
		sneg	0,50
g+s+*ψ*w1	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		veter, primer 2	0,60
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		sneg	1,00
g+w1,l+*ψ*l	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		veter pri ledu, primer 2	0,50
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,00
		led	0,50
g+l+*ψ*w1,l	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		veter pri ledu, primer 2	0,25
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,10
		led	1,00
g+w3+*ψ*s	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,00
		sneg	1,00
		veter, primer 3	0,60
g+q+*ψ*w3	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,00
		sneg	1,00
		veter, primer 3	0,60
g+w3+*ψ*q	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,00
		koristna	0,70
		veter, primer 3	1,00
g+w3	Linear - serviceability	lastna teža	1,00
		stalna teža stopnic,ploščadi	1,00
		sneg	0,00
		veter, primer 3	1,00

Slika 33: Obtežne kombinacije – MSU

Mejno stanje uporabnosti se preverja z kontrolo pomikov. Omejitev pomikov izhaja iz občutka varnosti in udobja uporabnikov. Velikosti dovoljenega pomika ponavadi določi investitor; v diplomski nalogi je določen iz priporočenih omejitev za stavbe (SIST EN 1990:2004; poglavje: 3.4).  $u_{dej}$  je izračunan pri obtežni kombinaciji v MSU s kombinacijskimi vrednostmi vplivov in ne prevladujoči vplivi zmanjšani s faktorjem za kombinacijsko vrednost spremenljivega vpliva  $\psi_0$  (priloga A1, maksimalni pomiki). To pomeni, da se maksimalen vpliv lahko zgodi z verjetnostjo 0,02 – tak dogodek se v povprečju pripeti enkrat na 50 let.

$$u_{maks} = \frac{h}{150} = \frac{36,4 \text{ m}}{150} = 0,243 \text{ m} = 24,3 \text{ cm}$$

$h = 36,4 \text{ m}$

višina stolpa

$u_{dej} = 6,8 \text{ cm}$

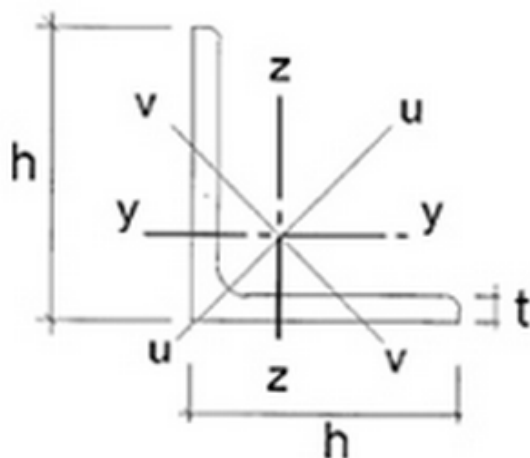
izračunan s programom Scia Engineer (priloga A2, maksimalni pomiki vozlišč)

## 6. PREVERJANJE STABILNOSTI ELEMENTOV

Bistveno obremenitev elementov predstavlja tlačna sila, zato je problem stabilnosti uklon elementov. Izjema so nosilci podesta (horizontale v najvišji legi), kjer prevladuje torzijski moment.

### Preverjanje uklona

Uklon za dimenzioniranje stolpov je obravnavan po SIST EN 1993-3-1:2007 v aneksih G in H. Ta standard podaja drugačne pogoje za določevanje relativne vitkosti  $\lambda$  kot SIST EN 1993-1-1, s katero izračunamo redukcijski faktor  $\chi$ . Notranje statične količine elementov so izračunane s programom Scia Engineer. Posebej je preverjen uklon elementov, saj program ne izračuna uklona po standardu SIST EN 1993-3-1:2007.



Slika 34: Enakokraki kotnik z označenimi osmi (SIST EN 1993-1-1: slika 1)

Kompaktnost prečnega prereza pove, če je prerez kompakten (3. razred) ali vitek (4. razred kompaktnosti). Spodaj je primerjava določanja kompaktnosti prereza za 3. razred po dveh standardih SIST EN 1993-1-1:2005 in SIST EN 1993-3-1:2007. Slednji standard določa priporočljive pogoje za stolpe, zato upoštevam ta pogoj.

SIST EN 1993-1-1:2005

Kontrola previsnega dela:

$$\frac{c}{t} \leq 14\epsilon; \quad c = h-t-r$$

Za vse kotnike:

$$\frac{b}{t} \leq 15\epsilon$$

$$\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$$

EN 1993-3-1:2007:

Za vse kotnike

$$\frac{h-2t}{t} \leq 15\epsilon$$

h	daljša stranica kotnika
b	krajša stranica kotnika
t	debelina elementa
$\varepsilon = 0,92$	za jeklo S275

V obeh načinih upoštevamo kriterij za določevanje kompaktnosti iz istega standarda, kot je potem računanje uklona. Po prvem standardu (SIST EN 1993-1-1:2005) je potrebno pri tlačno obremenjenih elementih preveriti:

Upogibni uklon:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,F}}}$$

$$N_{cr,F} = \frac{\pi^2 E I_{\eta}}{l^2}$$

Upogibno – torzijski in torzijski uklon:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,TF}}}$$

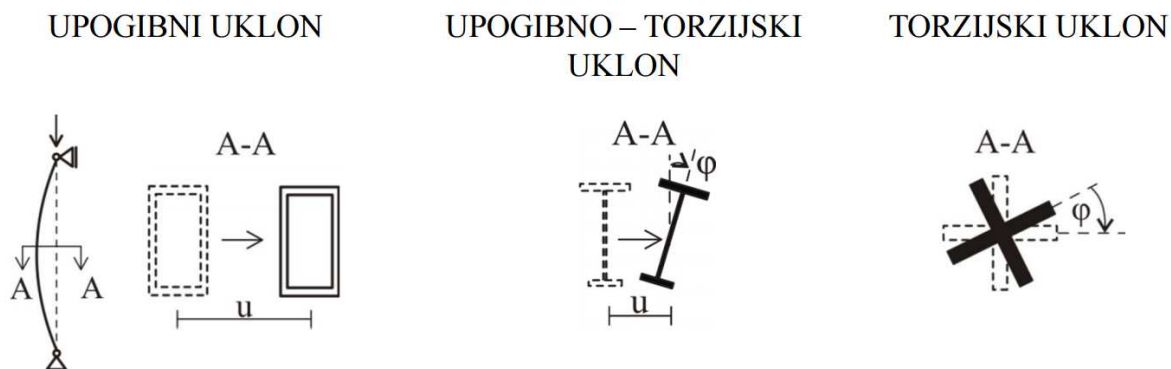
$N_{cr,TF}$	elastična kritična sila za torzijsko – upogibni uklon
$N_{cr,F}$	elastična kritična sila za upogibni uklon

SIST EN 1993-3-1:2007 zajame vse tri vrste nestabilnosti s preverjanjem upogibnega uklona:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,F}}}$$

$$N_{cr,F} = \frac{\pi^2 E I_{\eta}}{l^2}$$

Vrsta nestabilnosti je odvisna od uklonske dolžine elementa, pri zelo kratkih je kritičen torzijski, pri daljših elementih upogibni, pri vmesnih pa upogibno torzijski uklon. Upogibno torzijski uklon je potrebno preveriti za odprte prereze.



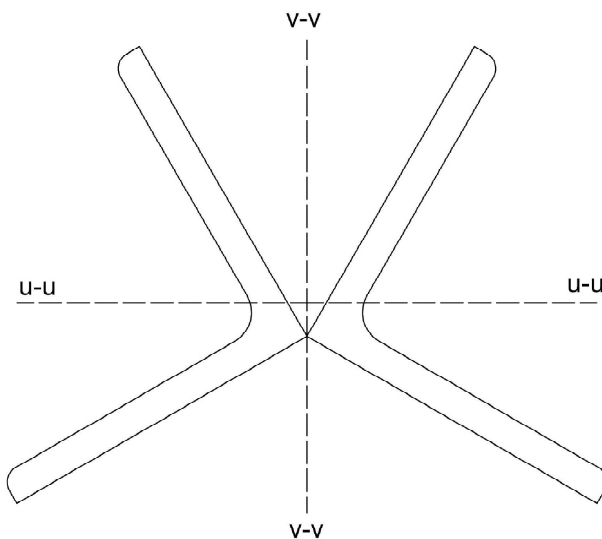
Slika 35: FGG: Katedra za metalne konstrukcije: osnove jeklenih konstrukcij: 5.0 uvod v stabilnost jeklenih konstrukcij

Uklonski redukcijski faktor  $\chi$  je brezdimenzionalna mejna nosilnost tlačnih elementov, odvisen od vitkosti  $\bar{\lambda}$  in faktorja nepopolnosti  $\alpha$ , ki zajame vpliv geometrijskih nepopolnosti ter zaostalih napetosti. Za kotne profile je določen z uklonsko krivuljo b. Po obeh standardih je relativna vitkost  $\bar{\lambda}$  odvisna od uklonske dolžine elementa  $l_u$ , vztrajnostnega polmera  $i$  in kvalitete materiala  $\epsilon$ . (SIST EN 1993-1-1:2005).

Vendar je za izračun redukcije  $\chi$  po drugem primeru uporabljena efektivno vitkost  $\bar{\lambda}_{\text{eff}}$ , ki je vitkost  $\lambda$  zmanjšana z efektivnim faktorjem vitkosti  $k$ , s katerim zajamemo vpliv treh nestabilnosti: upogibni, upogibno – torzijski in torzijski uklon. S faktorjem efektivne vitkosti  $k$  je zajet učinek načina priključitve elementa, ki je odvisen od njegove konfiguracije v konstrukciji. Ravno tako je za vsak element potrebno določiti uklonsko dolžino  $l_u$ , ki je odvisna od načina podpiranja elementa. Ponavadi je merodajen primer uklon izven ravnine okrog šibke osi  $i_{v-v}$ .

### 6.1. Steber

Stolp je oblike enakostraničnega trikotnika, zato je steber kompozit dveh kotnikov 180/180/17, ki tvorita medsebojni kot  $60^\circ$ , da se nanj lažje pripne horizontale in diagonale. Privijačeni horizontala in diagonala predstavljata bočno podporo stebra, torej je uklonska dolžina stebra razdalja stebra med spojem horizontale in diagonale. Vitkost za stebre  $\lambda$  ne sme biti večja od 120. Določanje faktorja efektivne vitkosti  $k$  je prikazan spodaj. Uklon je preverjen le v šibki smeri  $i_{v-v}$ .



7.

Slika 36: Prečni prerez sestavljenega stebra iz dveh kotnih profilov 180/180/18, z označeno šibko v-v in močno osjo u-u

Preglednica 7: Lastnosti prečnega prereza kotnika 180/180/18

h	18	cm
t	1,8	cm
r	1,8	cm
r <sub>1</sub>	0,9	cm

Preglednica 8: Lastnosti prečnega prereza stebra iz dveh kotnikov 180/180/17

A	124,5	cm <sup>2</sup>
y <sub>t</sub>	10,9	cm
x <sub>t</sub>	15,6	cm
I <sub>v-v</sub>	5731,5	cm <sup>4</sup>
I <sub>u-u</sub>	7976,9	cm <sup>4</sup>
i <sub>v-v</sub>	6,8	cm
i <sub>u-u</sub>	8	cm

Kompaktnost prečnega prereza, element spada v 3. razred kompaktnosti:

$$\frac{h-2t}{t} \leq 15\varepsilon = 15 \cdot 0,92 = 13,8$$
$$\frac{180-18}{18} = 9 \leq 13,8$$

**Uklon smer v-v:**

Vitkost za relevanten primer uklona-določen v aneksu H; za stebre  $\lambda \leq 120$ :

$$\lambda = \frac{l_u}{i} = \frac{364 \text{ cm}}{6,8 \text{ cm}} = 53,53$$

$l_u = 3,64 \text{ m}$

uklonska dolžina, odvisna od načina podpiranja konstrukcijskih elementov

$i_{v-v} = 6,8 \text{ cm}$

vztrajnostni polmer okrog šibke osi

Relativna vitkost

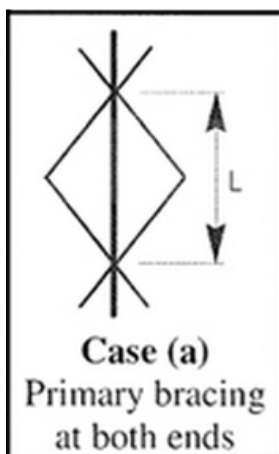
$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{\lambda}{93,9\varepsilon} = \frac{53,53}{93,9 \cdot 0,92} = 0,62$$

$\varepsilon = 0,92$

deformacija pri doseženi napetosti tečenja za S275

Efektivni faktor vitkosti k je odvisen od funkcije elementa v konstrukciji (slika 39):

$$k = 0,8 + \frac{\bar{\lambda}}{10} = 0,8 + \frac{0,62}{10} = 0,86 \approx 0,9; \text{ ampak } 0,9 \leq \bar{\lambda} \leq 1$$

Slika 37: Faktor efektivne vitkosti  $k$ , (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007: preglednica G1)

Efektivna relativna vitkost:

$$\bar{\lambda}_{\text{eff}} = k\bar{\lambda} = 0,86 \cdot 0,62 = 0,53$$

Določanje redukcijskega faktorja  $\chi$  po SIST EN 1993-1-1:2005:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2}} = \frac{1}{0,76 + \sqrt{0,76^2 - 0,53^2}} = 0,83 \quad \text{vendar: } \chi \leq 1 \text{ in } \bar{\lambda}_{\text{eff}} > 0,2$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\text{eff}} - 0,2) + \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2) = 0,5(1 + 0,34(0,53 - 0,2) + 0,53^2) = 0,76$$

$\alpha = 0,34$

faktor nepopolnosti za krivuljo b

Ker so elementi pripeti togo (z vsaj dvema vijakoma), ni potrebno upoštevati dodatne redukcije nosilnosti. Projektna uklonska nosilnost tlačeno obremenjenega elementa za 1., 2. in 3. razred kompaktnosti:

$$N_b = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{m1}} = \frac{0,83 \cdot 124,5 \text{ cm}^2 \cdot 27,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 2832,63 \text{ kN}$$

$\chi = 0,83$

Uklonski redukcijski faktor

$A = 124,5 \text{ cm}^2$

Površina prečnega prereza, ne odštejejo se luknje za vijake

$f_y = 27,5 \text{ kN/cm}^2$

Napetost tečenja

$\gamma_{m1} = 1$

Delni varnostni faktor odpornosti pri stabilnosti

Projektna tlačna osna sila izračunana s programom Scia Engineer, pri obtežni kombinaciji 1,1g+1,4w2,1+1,4·0,5l (priloga A2, maksimalne notranje sile – stebra):

$$N_{Ed} = 2677,99 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq N_{b, Rd}$$

$$2677,99 \text{ kN} \leq 2832,63 \text{ kN}$$

Natezna nosilnost:

Projektna natezna osna sila izračunana s programom Scia Engineer, pri obtežni kombinaciji 1,1g+1,4w3 (priloga A2, maksimalne notranje sile – stebra):

$$N_{Ed} = 1616,33 \text{ kN}$$

Projektna natezna nosilnost bruto prereza:

$$N_{pl, Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{m1}} = \frac{124,5 \text{ cm}^2 \cdot 27,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 3423,75 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq N_{pl, Rd}$$
$$1616,33 \text{ kN} \leq 3423,75 \text{ kN}$$

Projektna natezna nosilnost neto prereza:

$$N_{u, Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{m2}} = \frac{0,9 \cdot 115,14 \text{ cm}^2 \cdot 43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} = 3564,73 \text{ kN}$$

$$A_{net} = A_{stebra} - 4 d_0 t = 124,5 \text{ cm}^2 - 4 \cdot 1,3 \text{ cm} \cdot 1,8 \text{ cm} = 115,14 \text{ cm}^2$$

premer luknje

$d_0 = 13 \text{ mm}$

$$N_{Ed} \leq N_{u, Rd}$$
$$1616,33 \text{ kN} \leq 3564,73 \text{ kN}$$

Izkoriščenost elementa:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b, Rd}} \cdot 100 \% = \frac{2677,99 \text{ kN}}{2832,63 \text{ kN}} \cdot 100 \% = 94,54 \%$$

## 6.2. Horizontala

Horizontala in diagonala sta palici, saj prevladuje le osna sila, ostale obremenitve pa so zanemarljivo majhne.

V tem konstrukcijskem sistemu mora horizontala zagotavljati zadostno prečno togost, da omogoča uklonsko podpiranje diagonal, ko je v eni diagonalni nateg in v drugi tlak, ter ko sta obe tlačno obremenjeni. Horizontala mora biti sposobna prevzeti maksimalno izračunano obremenitev in dodaten delež osne sile stebra  $p$ , da prepreči uklon diagonal izven ravnine. Uklonska dolžina  $l_u$  je odvisna od načina podpiranja konstrukcijskih elementov; znaša celotno dolžino horizontale za uklon izven ravnine in v ravnini. Horizontala ni podprta izven ravnine, ker ni prostora za podprtje. Vitkost  $\lambda$  horizontal in diagonal ne sme biti večja od 180. Horizontala ne sme imeti povesa večjega kot  $L/500$  pod obtežbo  $p$ , ta poves je merodajen za dimenzioniranje elementa (SIST EN 1993-3-1:2007, H 3.9). Prečni prerez horizontale je škatlasti profil 250/250/12,5; z njim je zagotovljena zadostna togost proti prevelikemu povesu.

Preglednica 9: Lastnosti prečnega škatlastega profila 250/250/12,5

h	25	cm
t	1,25	cm
r	1,9	cm
$r_1$	1,3	cm
A	117,07	cm <sup>2</sup>

Kompaktnost prečnega prereza, element spada v 3. razred kompaktnosti:

$$\frac{c}{t} \leq 42\varepsilon = 42 \cdot 0,92 = 38,64$$

$$\frac{119 \text{ mm}}{12,5 \text{ mm}} = 9,52 \leq 38,64$$

$$c = h - 2t - 2r_1 = 250 \text{ mm} - 2 \cdot 12,5 \text{ mm} - 2 \cdot 13 \text{ mm} = 199 \text{ mm}$$

### Uklon smer y-y

Uklon v ravnini in izven ravnine se razlikujeta le v efektivnem faktorju vitkosti  $k$ , ki je za prvo  $k_{y-y} = 0,85$  in za drugo  $k_{z-z} = 0,95$  (SIST EN 1993-3-1:2007, tabela G2), za cevi in palice. Uklon je preverjen le v ravnini, ker je bolj kritičen primer.

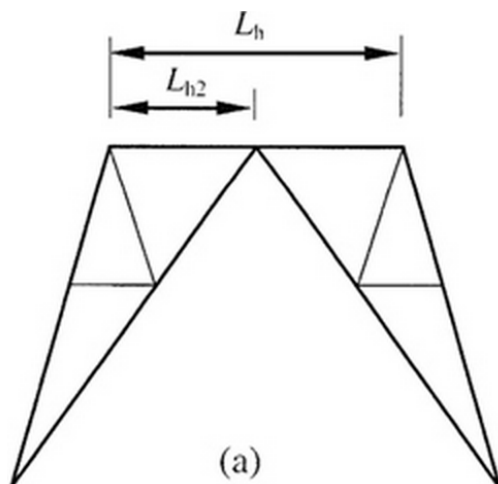
Vitkost za relevanten primer uklona, določen v aneksu H; za horizontale velja  $\lambda \leq 180$ :

$$\lambda = \frac{l_u}{i} = \frac{770 \text{ cm}}{9,6 \text{ cm}} = 80,21$$

$$l_u = 7,7 \text{ m}$$

uklonska dolžina v smeri v-v, odvisna od načina podpiranja  
konstrukcijskih elementov  
vztrajnostni polmer okrog šibke osi

$$i_{y-y} = 9,6 \text{ cm}$$



Slika 38: Določanje uklonske dolžine horizontale (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007: slika H.4)

Relativna vitkost:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{\lambda}{93,9\varepsilon} = \frac{80,21}{93,9 \cdot 0,92} = 0,93$$

$$\varepsilon = 0,92$$

deformacija pri doseženi napetosti tečenja za S275

Efektivni faktor vitkosti  $k$  je odvisen od funkcije elementa v konstrukciji, v primeru ko je v eni polovici horizontale tlak in v drugi nateg, ga moramo zmanjšati z modifikacijskim faktorjem  $k_1$ , ki ga definira razmerje tlačne in osne sile. Modificirni faktor za reduciranje faktorja efektivne vitkosti  $k_1$  je odvisen od razmerja največje natezne  $N_t$  in tlačne osne sile  $N_c$  v elementu.

$$\frac{N_t}{N_c} = \frac{213,18 \text{ kN}}{213,18 \text{ kN}} = 1$$



Maksimalni vplivi pri obtežni kombinaciji 1,1g+1,4w3+1,4·0,5s (Priloga A2, maksimalne notranje sile –horizontale):

$$N_t = 213,18 \text{ kN} \quad \text{največja natezna obremenitev}$$
$$N_c = 213,18 \text{ kN} \quad \text{največja tlačna obremenitev}$$

Razmerje je 1, torej modificirni faktor  $k_1$  znaša 0,5 (SIST EN 1993-3-1:2007: preglednica G.3).

Efektivni faktor vitkosti za smer y-y (SIST EN 1993-3-1:2007: preglednica G.2):  
 $k = 0,85$

Efektivna relativna vitkost:

$$\bar{\lambda}_{\text{eff}} = k\bar{\lambda} = 0,85 \cdot 0,93 = 0,79$$

Določanje redukcijskega faktorja  $\chi$  po SIST EN 1993-1-1:2005:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2}} = \frac{1}{1,05 + \sqrt{1,05^2 - 0,79^2}} = 0,64 \quad \text{vendar: } \chi \leq 1 \text{ in } \bar{\lambda}_{\text{eff}} > 0,2$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\text{eff}} - 0,2) + \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2) = 0,5(1 + 0,34(0,79 - 0,2) + 0,79^2) = 1,05$$

$\alpha = 0,34$  faktor nepopolnosti za krivuljo b

Ker so elementi pripeti togo (z vsaj dvema vijakoma), ni potrebno upoštevati dodatne redukcije nosilnosti. Projektna uklonska nosilnost tlačeno obremenjenega elementa za 1., 2. in 3. razred kompaktnosti:

$$N_{b, Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{m1}} = \frac{0,64 \cdot 117,07 \text{ cm}^2 \cdot 27,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 2069,64 \text{ kN}$$

$\chi = 0,64$  Uklonski redukcijski faktor  
 $A = 117,07 \text{ cm}^2$  Površina prečnega prereza, ne odštejejo se luknje za vijake  
 $f_y = 27,5 \text{ kN/cm}^2$  Napetost tečenja  
 $\gamma_{m1} = 1$  Delni varnostni faktor odpornosti pri stabilnosti

Izkoriščenost elementa:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b, Rd}} \cdot 100 \% = \frac{213,19 \text{ kN}}{2069,64 \text{ kN}} \cdot 100 \% = 10,3 \%$$

V tem primeru je kritičen uklon v smeri y-y, saj je dvakrat večja uklonska dolžina  $l_u$ , kot v drugi smeri. Dodatne kontrole so izvedene v tem primeru. Da zagotovimo zadostno togost elementa, je potreben dodaten delež osne sile stebra p za horizontalni element Zmanjšan je s faktorjem  $\sqrt{2}$ , ker je uklon izven ravnine.

$$p = 1,41; \text{ ko } \lambda < 30$$

$$p = \frac{40 + \lambda}{50}; \text{ ko } 30 \leq \lambda < 135$$

$$p = 3,5; \text{ ko } \lambda > 135$$

$$\lambda_{\text{stebra}} = 53,53; \quad p = \frac{40 + \lambda}{50} = \frac{40 + 53,53}{50 \cdot \sqrt{2}} = 1,32$$

Horizontale mora prevzeti dodatni delež maksimalne tlačne osne sile stebra  $p \cdot N_{Ed, \text{stebra}}$ , ki jo postavimo prečno na sredini elementa, da se izognemo uklonu in zagotovimo zadostno togost, pod to obtežbo povprečna  $u_{\max}$  ne sme biti večja kot  $L/500$ . Element mora prenesti projektno obremenitev  $N_{Ed}$  in dodaten delež osne sile  $p$ . Projektna osna sila je izračunana s programom Scia Engineer, pri obtežni kombinaciji 1,1g+1,4w3+1,4·0,5s (priloga A2, maksimalne notranje sile – horizontale):

$$N_{Ed} = 213,18 \text{ kN}$$

$$N = p \cdot N_{Ed, \text{stebra}} = \frac{1,32}{100} \cdot 2677,99 \text{ kN} = 35,42 \text{ kN}$$

$$u_{\max} = \frac{L}{500} = \frac{770 \text{ cm}}{500} = 1,54 \text{ cm}$$

$$u_{\text{dej}} = \frac{NL^3}{48EI} = \frac{35,42 \text{ kN} \cdot (770 \text{ cm})^3}{48 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 10900 \text{ cm}^4} = 1,47 \text{ cm}$$

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

Elastični modul

$$I = 10900 \text{ cm}^4$$

Vztrajnostni polmer

### 6.3. Diagonala

Pogoji za preverjanje diagonale so enaki kot za horizontalo, vendar deleža osne sile  $p$  ni potrebno upoštevati. Za vrednost vitkosti ni priporočljivo, da je večja kot  $\lambda \leq 180$ .

Preglednica 10: Lastnosti prečnega prereza kotnika 160/160/17

h	16	cm
t	1,7	cm
r	1,7	cm
r <sub>1</sub>	0,9	cm
A	51,8	cm <sup>2</sup>

Kompaktnost prečnega prereza, element spada v 3. razred kompaktnosti:

$$\frac{h-2t}{t} \leq 15\varepsilon = 15 \cdot 0,92 = 13,8$$

$$\frac{160-17}{17} = 7,41 \leq 13,8$$

#### Uklon smer v-v:

Vitkost za relevanten primer uklona, določen v aneksu H; za diagonale velja  $\lambda \leq 180$ :

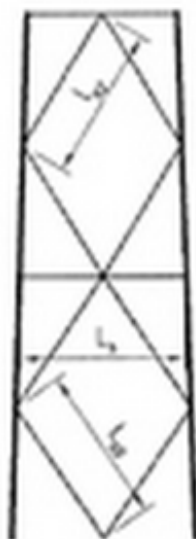
$$\lambda = \frac{l_u}{i} = \frac{530 \text{ cm}}{3,1 \text{ cm}} = 170,91$$

$$l_u = 5,30 \text{ m}$$

uklonska dolžina v smeri v-v, odvisna od načina podpiranja konstrukcijskih elementov

$$i_{v-v} = 3,1 \text{ cm}$$

vztrajnostni polmer okrog šibke osi



Slika 39: Uklonska dolžina diagonal. Nepovezane opore z zveznimi horizontalnimi elementi, v presečišču diagonal. (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007: slika H.1)

Relativna vitkost:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{\lambda}{93,9\epsilon} = \frac{170,91}{93,9 \cdot 0,92} = 1,98$$

$\epsilon = 0,92$

deformacija pri doseženi napetosti tečenja za S275

Sledi izračun efektivnega faktorja vitkosti za smer (slika 43) :

$$k = 0,7 + \frac{0,35}{\bar{\lambda}} = 0,7 + \frac{0,35}{1,98} = 0,88$$

	v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\lambda_v}$
	y-y	$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_y}$
	z-z	$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_z}$

Slika 40: Določanje faktorja vitkosti k za diagonale pri dvojnem vijačenju na obeh straneh za kotne profile. (Vir: SIST EN 1993-3-1:2007: preglednica G.2)

Efektivna relativna vitkost:

$$\bar{\lambda}_{\text{eff}} = k\bar{\lambda} = 0,88 \cdot 1,98 = 1,73$$

Določanje redukcijskega faktorja  $\chi$  po SIST EN 1993-1-1:2005:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2}} = \frac{1}{2,76 + \sqrt{2,76^2 - 1,73^2}} = 0,21 \quad \text{vendar: } \chi \leq 1 \text{ in } \bar{\lambda}_{\text{eff}} > 0,2$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\text{eff}} - 0,2) + \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2) = 0,5(1 + 0,34(1,73 - 0,2) + 1,73^2) = 2,76$$

$\alpha = 0,34$

Faktor nepopolnosti za krivuljo b

Ker so elementi pripeti togo (z vsaj dvema vijakoma), ni potrebno upoštevati dodatne redukcije nosilnosti. Projektna uklonska nosilnost tlačeno obremenjenega elementa za 1., 2. in 3. razred kompaktnosti:

$$N_{b, Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{m1}} = \frac{0,21 \cdot 51,80 \text{ cm}^2 \cdot 27,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 304,18 \text{ kN}$$

$\chi = 0,21$

Uklonski redukcijski faktor

$A = 51,80 \text{ cm}^2$

Površina prečnega prereza, ne odštejejo se luknje za vijake

$f_y = 27,5 \text{ kN/cm}^2$

Napetost tečenja

$\gamma_{m1} = 1$

Delni varnostni faktor odpornosti pri stabilnosti

### Uklon smer y-y:

Vitkost za relevanten primer uklona, določen v aneksu H; za horizontale velja  $\lambda \leq 180$ :

$$\lambda = \frac{l_u}{i} = \frac{530 \text{ cm}}{4,86 \text{ cm}} = 109,02$$

$l_u = 5,3 \text{ m}$

uklonska dolžina v smeri y-y, odvisna od načina podpiranja konstrukcijskih elementov

$i_{y-y} = 4,89 \text{ cm}$

vztrajnostni polmer okrog šibke osi

Relativna vitkost

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{\lambda}{93,9\epsilon} = \frac{109,02}{93,9 \cdot 0,92} = 1,26$$

$\epsilon = 0,92$

deformacija pri doseženi napetosti tečenja za S275

Efektivni faktor vitkosti  $k$  je odvisen od funkcije elementa v konstrukciji (slika 43):

$$k = 0,7 + \frac{0,40}{\bar{\lambda}} = 0,7 + \frac{0,40}{1,26} = 1,02$$

Efektivna relativna vitkost:

$$\bar{\lambda}_{\text{eff}} = k\bar{\lambda} = 1,02 \cdot 1,26 = 1,28$$

Določanje redukcijskega faktorja  $\chi$  po SIST EN 1993-1-1:2005:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2}} = \frac{1}{1,48 + \sqrt{1,48^2 - 1,28^2}} = 0,45 \quad \text{vendar: } \chi \leq 1 \text{ in } \bar{\lambda}_{\text{eff}} > 0,2$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\text{eff}} - 0,2) + \bar{\lambda}_{\text{eff}}^2) = 0,5(1 + 0,34(1,28 - 0,2) + 1,28^2) = 1,48$$

$\alpha = 0,34$

Faktor nepopolnosti za krivuljo b

Ker so elementi pripeti togo (z vsaj dvema vijakoma), ni potrebno upoštevati dodatne redukcije nosilnosti. Projektna uklonska nosilnost tlačeno obremenjenega elementa za 1., 2. in 3. razred kompaktnosti:

$$N_{b, Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{m1}} = \frac{0,45 \cdot 51,80 \text{ cm}^2 \cdot 27,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 634,83 \text{ kN}$$

$$\chi = 0,45$$

Uklonski redukcijski faktor

$$A = 51,80 \text{ cm}^2$$

Površina prečnega prereza, ne odštejejo se luknje za vijake

$$f_y = 27,5 \text{ kN/cm}^2$$

Napetost tečenja

$$\gamma_{m1} = 1$$

Delni varnostni faktor odpornosti pri stabilnosti

Element mora prenesti dejansko obremenitev  $N_{Ed}$ , ki je izračunana s programom Scia Engineer, pri obtežni kombinaciji 1,1g+1,4w3+1,4·0,5s (Priloga A2, maksimalne notranje sile – diagonale). Preverim odpornost elementa v smeri v-v, ki ima manjšo odpornost:

$$N_{Ed} = 300,56 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq N_{b, Rd}$$
$$299,33 \text{ kN} \leq 304,18 \text{ kN}$$

Izkoriščenost elementa:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b, Rd}} \cdot 100 \% = \frac{299,33 \text{ kN}}{304,18 \text{ kN}} \cdot 100 \% = 98,41 \%$$

#### 6.4. Temelj

Stabilnost betonskega temelja je preverjena za prevrnitev in zdrs temelja. Uporabljen je beton kvalitete C25/30. Za stabilnostne vplive je upoštevana le lastna teža temelja in konstrukcija stolpa. Za nestabilnostne vplive pa upoštevam veter primeru 3, ker ima največji vpliv. Minimalna globina temeljenja mora biti pod cono zmrzovanja tal, za področje Škofje Loke to pomeni vsaj 0,6 m. Da je zagotovljena stabilnost konstrukcije, je temelj 1, 5 m globoko.

$$G = mg = \rho \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot v = 2,5 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\pi 9,5^2}{4} \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 9,81 \frac{\text{kg}}{\text{ms}^2} = 2607,58 \text{ kN}$$

$$\rho = 2,5 \text{ t/m}^3$$

gostota betona

$$d = 9,5 \text{ m}$$

premer temelja

$$v = 1,8 \text{ m}$$

višina temelja

Reakcije za eno podporo

Lastna in stalna teža:

$$N_{k, \min} = 183,53 \text{ kN}$$

Veter primer 3

$$N_{k, \max} = 1290,6 \text{ kN}$$

$$V_{k, xk, \max} = 200,5 \text{ kN}$$

$$V_{k, y, \max} = 66,63 \text{ kN}$$

$$V_k = \sqrt{V_{k, x, \max}^2 + V_{k, y, \max}^2} = \sqrt{(200,5 \text{ kN})^2 + (66,63 \text{ kN})^2} = 291,27 \text{ kN}$$

**Prevrnitev temelja**

Stabilnostni vplivi:

$$M_{st} = \gamma_G Gr_G + \gamma_G N_{k,min} r_{min}$$

$$M_{st} = 1 \cdot 3129,09 \text{ kN} \cdot \frac{9,5\text{m}}{2} + 1 \cdot 183,53 \text{ kN} \cdot (7,7+0,9)\text{m} \cdot 2 + 1 \cdot 183,53 \text{ kN} \cdot 0,9 \text{ m}$$

$$M_{st} = 15707,9 \text{ kNm}$$

$$\gamma_G = 1$$

Nestabilnostni vplivi:

$$M_{dst} = \sum \gamma_Q Q r_Q$$

$$M_{dst} = 1,3 \cdot 1290,6 \text{ kN} \cdot (7,7+0,9)\text{m} + 1,3 \cdot 291,27 \text{ kN} \cdot 1,5 \text{ m} = 14071,5 \text{ kNm}$$

$$\gamma_G = 1,3$$

$$M_{st} \geq M_{dst}$$

Zdrs:

$$F_{tr} = \mu(G + 3N_{k,min}) = 0,2 \cdot (2607,6 \text{ kN} + 3 \cdot 183,53 \text{ kN}) = 632,84 \text{ kN}$$

$$V = 291,27 \text{ kN}$$

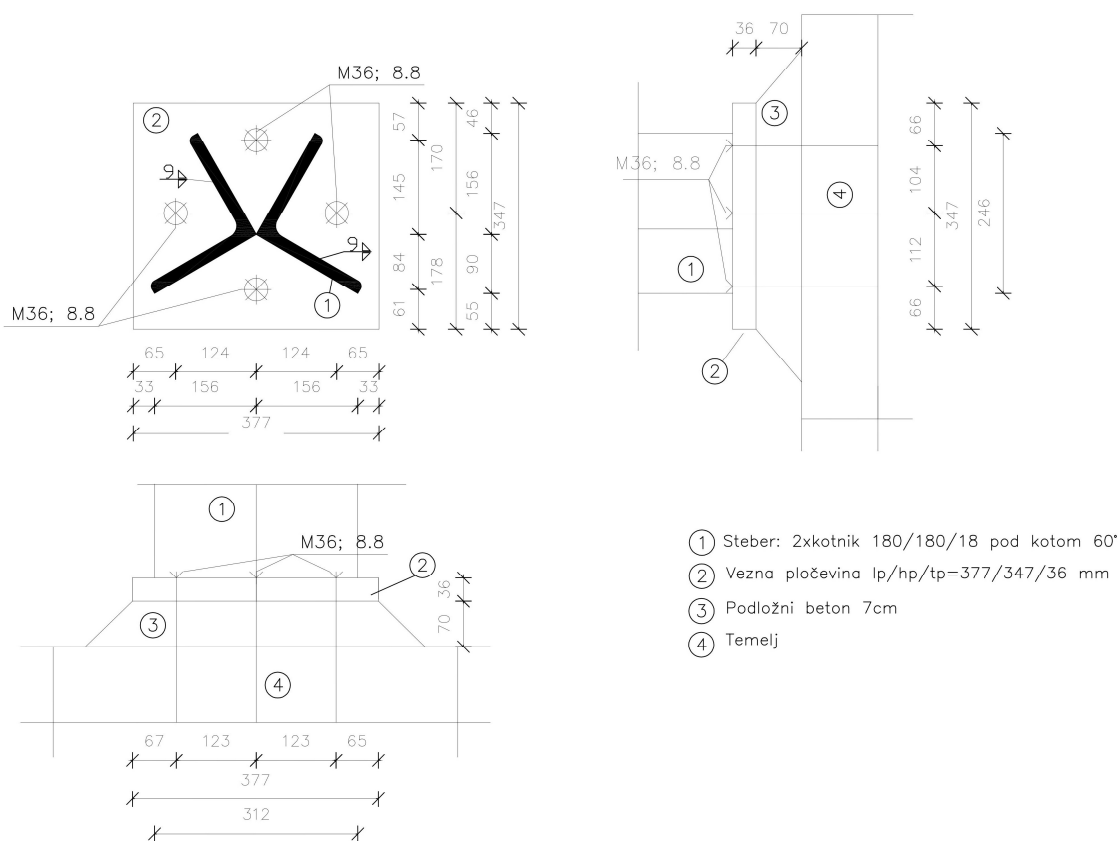
$$V \leq F_{tr}$$

## 7. DIMENZIONIRANJE SPOJEV

Spoji povezujejo konstrukcijske elemente v celoto, morajo biti sposobni prenašati notranje sile ene komponente na drugo ob upoštevanju vseh kontrol in ob pogoju da se izogibamo številnim točkovnim obremenitvam. Imajo velik vpliv na obnašanje celotne konstrukcije - na njeno trdnost, togost in stabilnost. Če je spoj ustrezno zasnovan, se pravi da je čim bolj simetričen in ne kompleksen, ter da se da je možno čim več detaljev izdelati v tovarni, to zmanjšuje stroške dela ter načrtovanja. Povezave so lahko toge, delno toge ali pa členkaste. V tej diplomski nalogi so členkasto pripete horizontale in diagonale ter stebri na temelj, momentni spoj pa je spoj stebra na steber.

### 7.1. Priključek stebra na temelj

Čelna pločevina je privarjena na steber, in vijačena v betonski temelj s sidrnimi vijaki 4xM36, 8.8. Za dimenzioniranje vijakov je merodajna interakcija striga in natega. Stebri so členkasto pripeti na temelje, ki so na dobro nosilnih tleh. Temeljna plošča je okrogle oblike s premerom 9,5 m. (Priloga B1)



Slika 41: Spoj stebra na temelj

Bistvene obremenitve (Priloga A2, reakcije):

$$N_{Ed, \max} = 1601,05 \text{ kN}$$

$$N_{Ed, \min} = -2685,64 \text{ kN}$$

$$V_{Ed, \max} = 368,50 \text{ kN}$$

Kotni zvar med čelno pločevino in stebrom:

$$a = 0,48 \cdot t = 0,48 \cdot 18 \text{ mm} = 8,64 \text{ mm}$$

$t_p = 33 \text{ mm}$  izbrana debelina pločevine ( $t_p = d_{vijaka}$ )  
 $a_{max}/t = 0,48$  za S275

Polno nosilni kotni zvar:

$$a = 9 \text{ mm}$$

Izbrani vijaki 4xM36, kvaliteta 8.8:

$$F_{t,Rd} = 470,6 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = 313,7 \text{ kN} \text{ (Strižna nosilnost vijaka za eno strižno ravnino-skozi navoj)}$$

$$f_{yb} = 64 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN/cm}^2$$

$d_o = 39 \text{ mm}$  premer luknje  
 $d_m^1 = 57,30 \text{ mm}$  manjši premer matice  
 $d_m^2 = 62,62 \text{ mm}$  večji premer matice  
 $t = 18 \text{ mm}$  debelina profila  
 $r = 18 \text{ mm}$  polmer  
 $a = 9 \text{ mm}$  debelina zvara  
 $\Delta = 2 \text{ mm}$  toleranca

Izbrane oddaljenosti vijakov:

$$e_1 = 58 \text{ mm}$$

$$f_1 = 145 \text{ mm}$$

$$f_2 = 124 \text{ mm}$$

$$f_3 = 84 \text{ mm}$$

$$p_1 = f_1 + f_3 = 145 \text{ mm} + 84 \text{ mm} = 229 \text{ mm}$$

$$p_2 = 2f_2 = 2 \cdot 124 \text{ mm} = 248 \text{ mm}$$

Natezno obremenjen spoj: vijaki niso prednapeti; kategorija spoja D (uporaba za spoje z običajno obtežbo vetra)

Natezna nosilnost vijaka:

$$\frac{F_{t,Ed}}{n} \leq F_{t,Rd}$$

$$\frac{1601,05 \text{ kN}}{4} = 400,26 \text{ kN} \leq 470,6 \text{ kN}$$

Odpornost proti preboju pločevine:

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6\pi d_m t_p f_u}{Y_{M2}} = \frac{0,6\pi \cdot 5,996 \text{ cm} \cdot 3,6 \text{ cm} \cdot 43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} = 1400,6 \text{ kN}$$



$$\frac{F_{t,Ed}}{n} \leq B_{p,Rd}$$

$$\frac{1601,05 \text{ kN}}{4} = 400,26 \text{ kN} \leq 1400,6 \text{ kN}$$

$f_u = 43 \text{ kN/cm}^2$                       natezna trdnost osnovnega materiala  
 $t_p = 36 \text{ mm}$                               debelina pločevine  
 $Y_{m2} = 1,25$                               delni faktor odpornosti za določanje projektne nosilnosti vijakov  
 $n = 4$     število veznih sredstev

Pri preverjanju nosilnosti sidrnega vijaka je potrebno preveriti dve kontroli. Napetost tečenja  $f_y$  sidrnega vijaka ne sme biti večja kot  $640 \text{ kN/mm}^2$ .

Strižno obremenjen spoj: običajni strižni spoj, kategorija spoja A

$$\frac{F_{v,Ed}}{n} \leq F_{v1,Rd}$$

$$\frac{368,50 \text{ kN}}{4} = 96,63 \text{ kN} \leq 313,7 \text{ kN}$$

Strižna nosilnost:

$$\alpha = 0,444 - 0,0003 \cdot f_{yb} = 0,444 - 0,0003 \cdot 640 = 0,248$$

$$F_{v2,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A_s}{Y_{Mb}} = \frac{0,248 \cdot 80 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 8,17 \text{ cm}^2}{1,25} = 129,67 \text{ kN}$$

$A_s = 8,17 \text{ cm}^2$                               površina vijaka, kjer je vrezan navoj

$$\frac{F_{v,Ed}}{n} \leq F_{v2,Rd}$$

$$\frac{368,50 \text{ kN}}{4} = 96,63 \text{ kN} \leq 129,67 \text{ kN}$$

Nosilnost na bočni pritisk:

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \frac{e_1}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{58 \text{ mm}}{36 \text{ mm}} - 1,7 = 2,8 \leq 2,5 \\ 1,4 \frac{p_1}{d_0} - 1,7 = 1,4 \frac{229 \text{ mm}}{36 \text{ mm}} - 1,7 = 7,21 \leq 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0} = \frac{58 \text{ mm}}{3 \cdot 39 \text{ mm}} = 0,5; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 1,86; 1,0 \right\} = 0,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{Y_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,5 \cdot 43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 3,6 \text{ cm} \cdot 1,8 \text{ cm}}{1,25} = 278,64 \text{ kN}$$

$d = 36 \text{ mm}$                                   premer vijaka  
 $t = 18 \text{ mm}$                               najmanjša debelina

$$\frac{F_{v,Ed}}{n} \leq F_{b,Rd}$$

$$\frac{368,50 \text{ kN}}{4} = 96,63 \text{ kN} \leq 278,64 \text{ kN}$$

Interakcija strig-upogib:

$$F_{v,Ed} \geq 0,286F_{v,Rd}$$

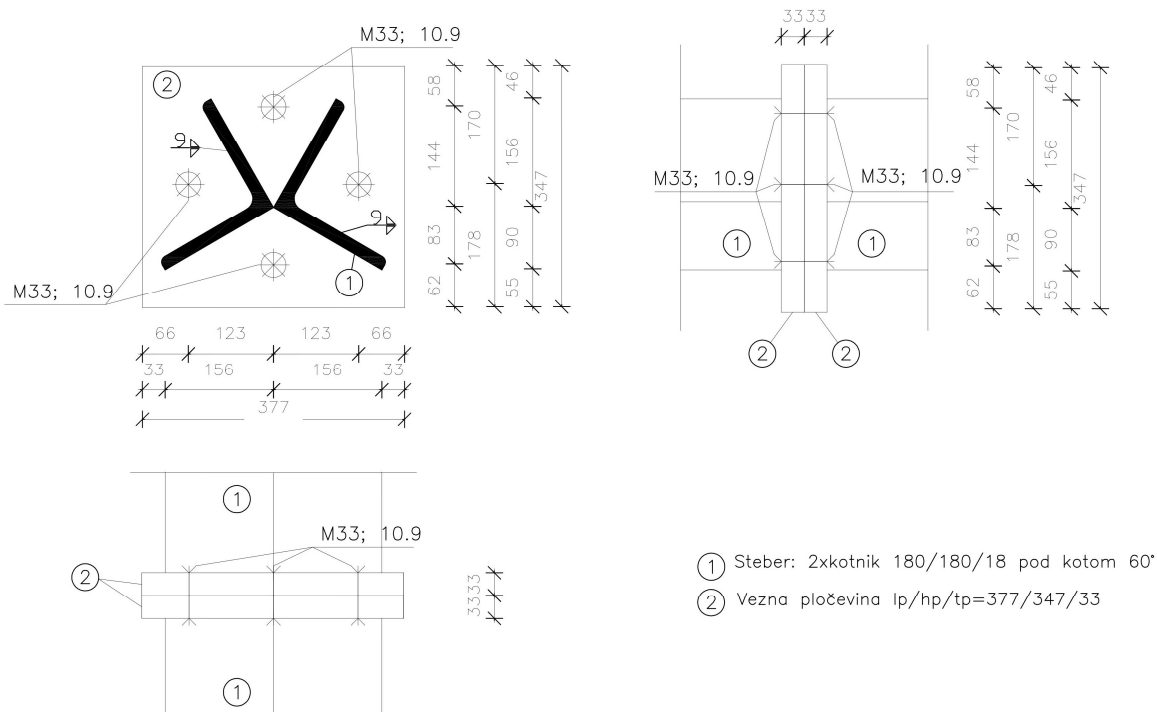
$$96,63 \text{ kN} \geq 0,286 \cdot 129,67 \text{ kN} = 37,09 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{96,63 \text{ kN}}{313,7 \text{ kN}} + \frac{400,26 \text{ kN}}{1,4 \cdot 470,6 \text{ kN}} = 0,92 \leq 1,0$$

## 7.2. Priključek stebra na steber

Spoji stebra na steber so porazdeljeni tako, da spoj ne pride na mestu priključkov diagonal in horizontal. Prvi spoj je na 10 m, ostali so porazdeljeni na 8,8 m višine stebra. Zaradi možnosti uklona elementa, mora biti spoj sposoben prenesti upogibni moment  $M_{ed} = 0.25 M_{el}$  In prečno silo  $V_{ed} = 0.025 N_{pl,Rd}$ . To je vijачeni čelni spoj (4xM33, 10.9), s privarjeno čelno pločevino. Za dimenzioniranje je merodajna natezna obremenitev vijaka, da je zagotovljena boljša upogibna nosilnost je večji razmik med vijaki. Uporabljeni so prednapeti vijaki kategorije E. Strižna nosilnost ni preverjena, saj so obremenitve majhne. (Priloga B2)



Slika 42: Spoj stebra na steber

### **Šibka smer v-v**

Višina profila:

$$h_{v-v} = \frac{\sqrt{3}+1}{2}b = \frac{\sqrt{3}+1}{2} 18 \text{ cm} = 24,59 \text{ cm}$$

Odpornostni moment:

$$W_{el} = \frac{I_{v-v}}{h} = \frac{5731,5 \text{ cm}^4}{24,59 \text{ cm}} = 233,08 \text{ cm}^3$$

Upogibna nosilnost prereza:

$$M_{el} = \frac{W_{el}f_y}{Y_{M1}} = \frac{233,08 \text{ cm}^3 \cdot 27,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 6409,1 \text{ kNcm}$$

Projektni upogibni moment:

$$M_{Ed} = 0,25M_{el} = 0,25 \cdot 6409,1 \text{ kNcm} = 1602,43 \text{ kNcm}$$

### **Močna smer u-u**

Širina profila:

$$h_{v-v} = \sqrt{3}b = \sqrt{3} \cdot 18 \text{ cm} = 31,18 \text{ cm}$$

Odpornostni moment:

$$W_{el} = \frac{I_{v-v}}{h} = \frac{7976,9 \text{ cm}^4}{31,18 \text{ cm}} = 255,83 \text{ cm}^3$$

Upogibna nosilnost prereza:

$$M_{el} = \frac{W_{el}f_y}{Y_{M1}} = \frac{255,83 \text{ cm}^3 \cdot 27,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 7035,33 \text{ kNcm}$$

Projektni upogibni moment:

$$M_{Ed} = 0,25M_{el} = 0,25 \cdot 7035,33 \text{ kNcm} = 1758,33 \text{ kNcm}$$

### **Osna nosilnost prereza**

$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{Y_{M1}} = \frac{124,5 \text{ cm}^2 \cdot 27,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 3423,75 \text{ kN}$$

### **Projektna strižna obremenitev**

$$V_{Ed} = 0,025N_{pl,Rd} = 0,025 \cdot 3423,75 \text{ kN} = 85,59 \text{ kN}$$

Bistvene obremenitve (Priloga A2, maksimalne notranje sile – stebri, čelni spoj):

$$N_{Ed,max} = 1038,76 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,min} = -1858,7 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,v-v} = 1602,43 \text{ kNcm}$$

$$M_{Ed,u-u} = 1758,33 \text{ kNcm}$$

$$V_{Ed} = 85,59 \text{ kN}$$

Kotni zvar med čelno pločevino in stebrom:

$$a = 0,48 \cdot t = 0,48 \cdot 18 \text{ mm} = 8,64 \text{ mm}$$

$$t_p = 30 \text{ mm}$$

izbrana debelina pločevine ( $t_p = d_{vijaka}$ )

$$a_{max}/t = 0,48$$

za S275

Izbrana debelina zvara:

$$a = 9 \text{ mm}$$

Izbrani vijaki 4xM33, kvaliteta 10.9:

$$F_{t,Rd} = 499,7 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = 277,6 \text{ kN (Strižna nosilnost vijaka za eno strižno ravnino – skozi navoj)}$$

$$f_{yb} = 90 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ub} = 100 \text{ kN/cm}^2$$

Dimenzije pločevine ( $t_p = d_{vijaka}$ ):

$$l_p/h_p/t_p = 377/354/30 \text{ mm}$$

$$t = 18 \text{ mm}$$

debelina profila

Izbrane oddaljenosti vijakov:

$$e_1 = 58 \text{ mm}$$

$$f_1 = 144 \text{ mm}$$

$$f_2 = 123 \text{ mm}$$

$$f_3 = 83 \text{ mm}$$

$$p_1 = f_1 + f_3 = 144 \text{ mm} + 83 \text{ mm} = 227 \text{ mm}$$

$$p_2 = 2f_2 = 2 \cdot 123 \text{ mm} = 246 \text{ mm}$$

Natezno obremenjen spoj: vijaki so prednapeti; kategorija spoja E (uporaba za spoje z običajno obtežbo vetra). Kritičen je upogib v močni smeri.

Upogibni moment v močni smeri u-u:

$\bar{\phi}$

$$\frac{N_{Ed,max}}{n} + \frac{M_{Ed,u-u}}{f_2 \cdot n} \leq F_{t,Rd}$$

$$\frac{1048,12 \text{ kN}}{4} + \frac{58,33 \text{ kNm}}{8,3 \text{ cm}} = 473,88 \text{ kN} \leq 499,7 \text{ kN}$$

Upogibni moment v šibki smeri v-v:

$$\frac{N_{Ed,max}}{n} + \frac{M_{Ed,v-v}}{f_3} \leq F_{t,Rd}$$

$$\frac{1048,12 \text{ kN}}{4} + \frac{1602,43 \text{ kNcm}}{12,3 \text{ cm}} = 392,31 \text{ kN} \leq 499,7 \text{ kN}$$

Upogibna nosilnost spoja v smeri v-v:

$$M = F_{t,Rd} \cdot r_2 = 499,7 \text{ kN} \cdot 12,3 \text{ cm} = 6146,31 \text{ kNcm}$$

$r_2 = f_2 = 12,3 \text{ cm}$                       razdalja med vijakom in težiščem prereza

$$M \geq 0,25M_{eI}$$

$$6146,31 \text{ kNcm} \geq 1602,43 \text{ kNcm}$$

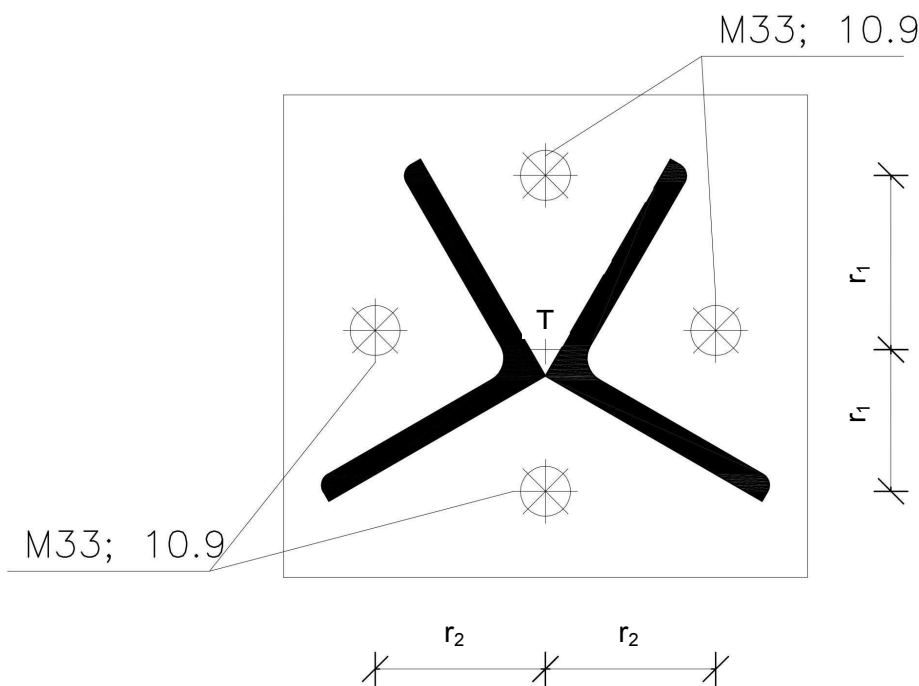
Upogibna nosilnost spoja v smeri v-v:

$$M = F_{t,Rd} \cdot r_1 = 499,7 \text{ kN} \cdot 9,9 \text{ cm} = 4947,03 \text{ kNcm}$$

$r_1 = 9,9 \text{ cm}$                               razdalja med vijakom in težiščem prereza

$$M \geq 0,25M_{eI}$$

$$4947,03 \text{ kNcm} \geq 1602,43 \text{ kNcm}$$



Slika 43: Označeni razdalji  $r_1$ ,  $r_2$  in težišče T

Odpornost proti preboju pločevine:

$$d_m = \frac{d_m^1 + d_m^2}{2} = \frac{52,19 \text{ mm} + 57,30 \text{ mm}}{2} = 54,75 \text{ mm}$$

$d_m^1 = 52,19 \text{ mm}$                       manjši premer matice  
 $d_m^2 = 57,3 \text{ mm}$                       manjši premer matice

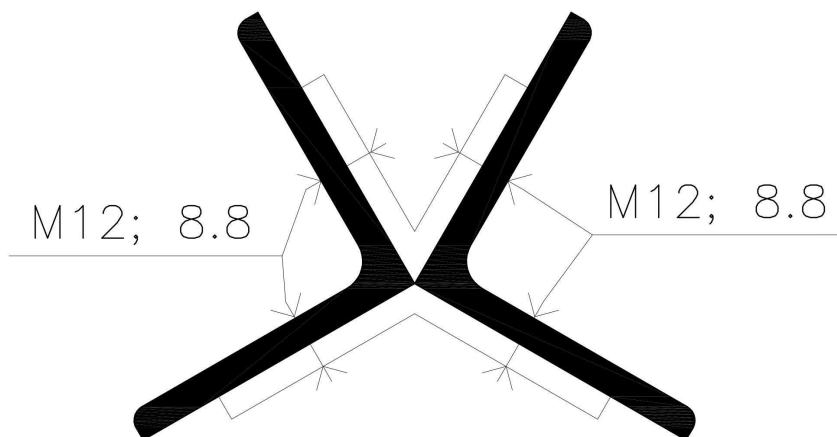
$$B_{p,Rd} = \frac{0,6\pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6\pi \cdot 5,48 \text{ cm} \cdot 3,3 \text{ cm} \cdot 43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} = 1172,61 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,max}}{n} + \frac{M_{Ed,u-u}}{f_3} \leq B_{p,Rd}$$

$$\frac{1048,12 \text{ kN}}{4} + \frac{1758,33 \text{ kNcm}}{8,3 \text{ cm}} = 473,88 \text{ kN} \leq 1172,61 \text{ kN}$$

### 7.2.1. Sestavljen prečni prerez stebra

Kot že omenjeno stebel tvorita dva kotnika z medsebojnim kotom  $60^\circ$ , ki pri katerem so pasovi na majhni razdalji in povezani z pločevino na razdalji 1,25 m. (SIST EN 1993-1-1:2005, poglavje 6.4.4). Za uklon ni potrebno preverjati strižne togosti  $S_v = \infty$ , če je največji razmik med sosednjima veznima pločevina omejen z razdaljo  $a \leq 70i_{min}$ , kjer je  $i_{min}$  najmanjši vztrajnostni polmer posameznega pasu ali kotnika. Način izračuna notranjih sil elementov sestavljenega prereza je prikazan spodaj na sliki. Kontrole veznih pločevin niso potrebne.



Slika 44: Sestavljeni prečni prerez stebra z veznima pločevinama (pločevina 1 je spodaj, pločevina 2 pa zgoraj)

Dimenzije veznih pločevin:

$$l/d/h = 130/15/100 \text{ mm}$$

Razdalja med sosednjimi veznimi pločevinami:

$$a \leq 70i_{min} = 70 \cdot 1,9 \text{ cm} = 133 \text{ cm}$$

$$a = 125 \text{ cm}$$

$$i = 6,8 \text{ cm}$$

vztrajnostni polmer kotnika

$$i_1 = 3 \text{ cm}$$

vztrajnostni polmer pločevine 1

$$i_2 = 1,9 \text{ cm}$$

vztrajnostni polmer pločevine 2 ( $i_{min}$ )

Razdalja med težiščema pasov:

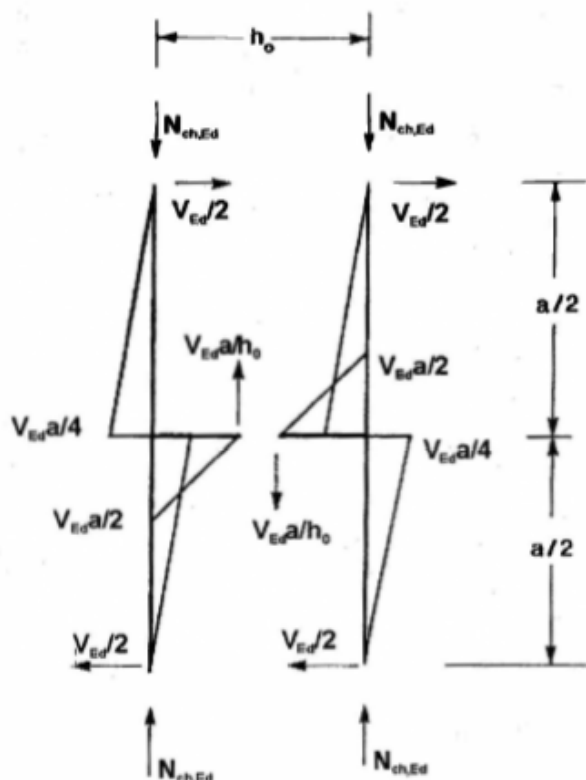
$$h_0 = y_{T1} + y_{T2} = 6,5 \text{ cm} + 3,8 \text{ cm} = 10,3 \text{ cm}$$

$$y_{T1} = 6,5 \text{ cm}$$

razdalja do težišča vezne pločevine 1

$$y_{T2} = 3,8 \text{ cm}$$

razdalja do težišča vezne pločevine 2



Slika 45: Notranje statične količine sestavljenega prečnega prereza (Vir: SIST EN 1993-1-1:2005: slika 6.11)

Izračun notranjih statičnih količin:

$$N_{ch,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} = \frac{1821,65 \text{ kN}}{2} = 910,83 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{2} = \frac{85,59 \text{ kN}}{2} = 42,8 \text{ kN}$$

Izbrani vijaki 4xM12, kvaliteta 8.8:

$$F_{t,Rd} = 48,6 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = 32,4 \text{ kN (Strižna nosilnost vijaka za eno strižno ravnino-skozi navoj)}$$

$$f_{yb} = 64 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN/cm}^2$$

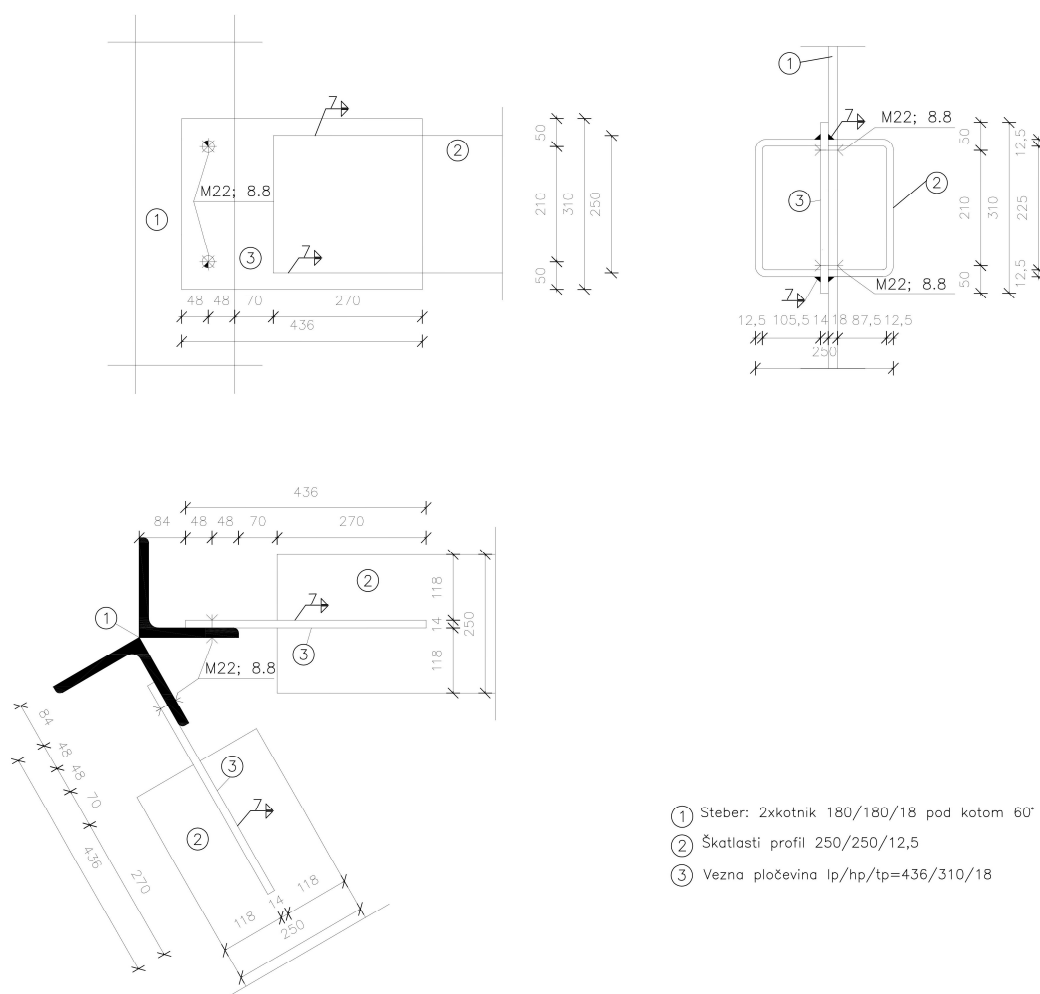
### 7.3. Priključek horizontale na steber

Horizontala, škatlasti profil 250/250/12,5; je priključena z dvema vijakoma M22, kvalitete 8.8, preko vezne pločevine na steber. Za dimenzioniranje je merodajen prestrig vijaka. (Priloga B3)

Bistvene obremenitve (priloga A2, maksimalne notranje sile – horizontale):

$$N_{Ed,max} = 213,18 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,min} = -213,18 \text{ kN}$$



Slika 46: Spoj horizontale na steber

Kotni zvar med čelno pločevino in stebrom:

$$a = 0,48 \cdot t = 0,48 \cdot 14 \text{ mm} = 6,72 \text{ mm}$$

izbrana debelina pločevine  
za S275

$$t_p = 14 \text{ mm}$$

$$a_{\max}/t = 0,48$$

Izbrana debelina zvara:

$$a = 7 \text{ mm}$$

Dolžina zvara (raznos obtežbe je pod kotom 30 °):

$$l_z \geq \frac{h}{2 \cdot \tan(30^\circ)} = \frac{250 \text{ mm}}{2 \cdot \tan(30^\circ)} = 216,51 \text{ mm}$$

$$l_z \geq h = 250 \text{ mm}$$

$$l_z = 260 \text{ mm}$$

Izbrani vijaki 2xM22, kvaliteta 8.8:

$$F_{t,Rd} = 174,5 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = 116,4 \text{ kN} \text{ (Strižna nosilnost vijaka za eno strižno ravnino – skozi navoj)}$$

$$f_{yb} = 64 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN/cm}^2$$



Izbrane dimenzije preklapne pločevine

$$l_p/h_p/t_p = 436/310/18 \text{ mm}$$

Strižno obremenjen spoj: običajni strižni spoj, kategorija spoja A

$$\frac{F_{v,Ed}}{n} \leq F_{v,Rd}$$
$$\frac{213,18 \text{ kN}}{2} = 106,6 \text{ kN} \leq 116,4 \text{ kN}$$

$n = 2$

število veznih sredstev

Dejanske razdalje za vijake:

$$e_1 = 48 \text{ mm}$$

$$e_2 = 50 \text{ mm}$$

$$p_2 = 210 \text{ mm}$$

$$f_u = 43 \text{ kN/cm}^2$$

$$Y_{m2} = 1,25$$

natezna trdnost osnovnega materiala

delni faktor odpornosti za določanje projektne nosilnosti vijakov

Nosilnost na bočni pritisk:

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{50 \text{ mm}}{24 \text{ mm}} - 1,7 = 4,13 \leq 2,5 \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \frac{210 \text{ mm}}{24 \text{ mm}} - 1,7 = 10,58 \leq 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$
$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3d_0} = \frac{48 \text{ mm}}{3 \cdot 24 \text{ mm}} = 0,67; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 1,86; 1,0 \end{array} \right\} = 0,67$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{Y_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,67 \cdot 43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 2,2 \text{ cm} \cdot 1,4 \text{ cm}}{1,25} = 177,47 \text{ kN}$$

$$d = 22 \text{ mm}$$

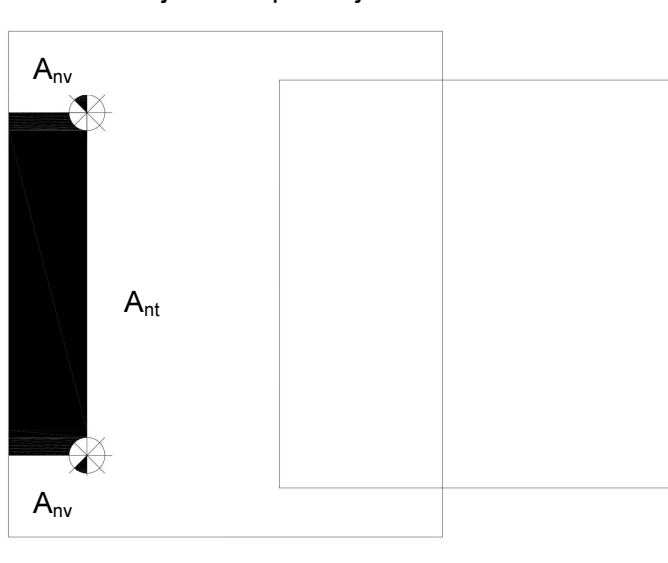
$$t = 14 \text{ mm}$$

premer vijaka

najmanjša debelina

$$\frac{F_{v,Ed}}{n} \leq F_{b,Rd}$$
$$\frac{213,18 \text{ kN}}{2} = 106,6 \text{ kN} \leq 177,47 \text{ kN}$$

Strižni iztrg za centrično obremenjeno skupino vijakov



Slika 47: Določitev površin  $A_{nv}$  in  $A_{nt}$

Neto prerez območja pločevine v strigu:

$$A_{nv} = (e_1 - d_0)t = (4,8 - 2,4) \text{ cm} \cdot 1,4 \text{ cm} = 3,36 \text{ cm}^2$$

Neto prerez območja pločevine v nategu:

$$A_{nt} = (p_2 - 2d_0)t = (21 - 2 \cdot 2,4) \text{ cm} \cdot 1,4 \text{ cm} = 22,68 \text{ cm}^2$$

Projektna nosilnost na strižni iztrg:

$$V_{\text{eff}} = A_{nt} \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} \frac{f_y}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} = 22,68 \text{ cm}^2 \frac{43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} + 2 \cdot 3,36 \text{ cm}^2 \frac{27,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 964,99 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} \leq V_{\text{eff}}$$

$$213,18 \text{ kN} \leq 964,99 \text{ kN}$$

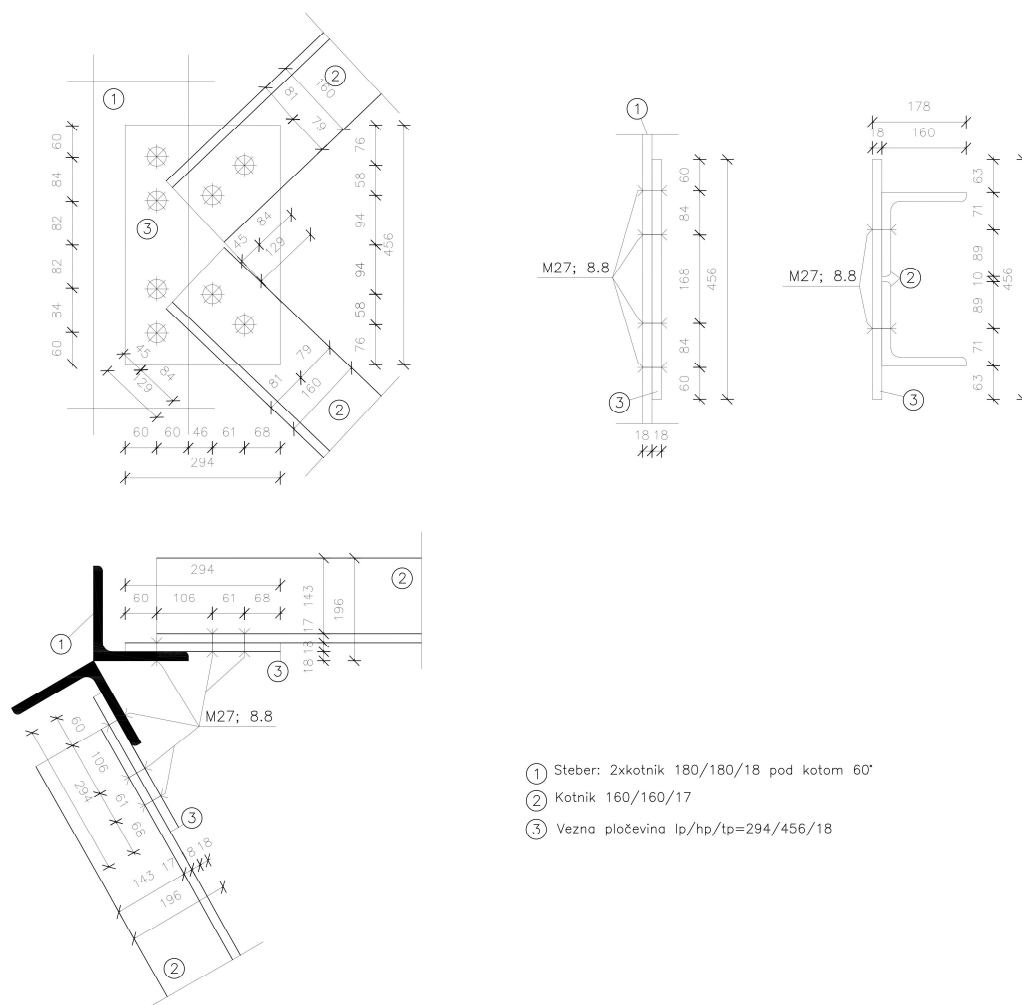
#### 7.4. Priključek diagonale na steber

Diagonala je preko vezne pločevine priključena z dvema vijakoma M27, kvalitete 8.8. Prestrig vijaka je merodajen za dimenzioniranje. (Priloga B4)

Bistvene obremenitve (priloga A2, maksimalne notranje sile – diagonale):

$$N_{\text{max}} = 299,39 \text{ kN}$$

$$N_{\text{min}} = -299,33 \text{ kN}$$



Slika 48: Spoj diagonale na steber

Izbrani vijaki 2xM27, kvaliteta 8.8:

$$F_{t,Rd} = 264,4 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = 176,3 \text{ kN}$$

$$f_{yb} = 64 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN/cm}^2$$

Izbrane dimenzije preklapne ploščevine

$$l_p/h_p/t_p = 294/456/16 \text{ mm}$$

Strižno obremenjen spoj: običajni strižni spoj, kategorija spoja A

$$\frac{F_{v,Ed}}{n} \leq F_{v,Rd}$$

$$\frac{299,33 \text{ kN}}{2} = 149,67 \text{ kN} \leq 176,3 \text{ kN}$$

$$n = 2$$

število veznih sredstev

Razpored lukenj za vijake:

$$e_1 \approx 1, 2d_0 = 1,2 \cdot 30 \text{ mm} = 45 \text{ mm}$$

$$d_m = \frac{d_m^1 + d_m^2}{2} = \frac{42,6 \text{ mm} + 47,93 \text{ mm}}{2} = 45,27 \text{ mm}$$

$$f_1 \geq t + r + d_m + \Delta = 17 \text{ mm} + 17 \text{ mm} + 45,27 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = 81,27 \text{ mm}$$

$$e_2 = h - f_1 = 160 \text{ mm} - 70 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$$

$$p_1 \approx 3d_0 = 3 \cdot 30 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$$

$$d_0 = 30 \text{ mm}$$

$$d_m^1 = 42,6 \text{ mm}$$

$$d_m^2 = 47,93 \text{ mm}$$

$$t = 17 \text{ mm}$$

$$r = 17 \text{ mm}$$

$$\Delta = 2 \text{ mm}$$

premer luknje

manjši premer matice

večji premer matice

debelina profila

polmer

toleranca

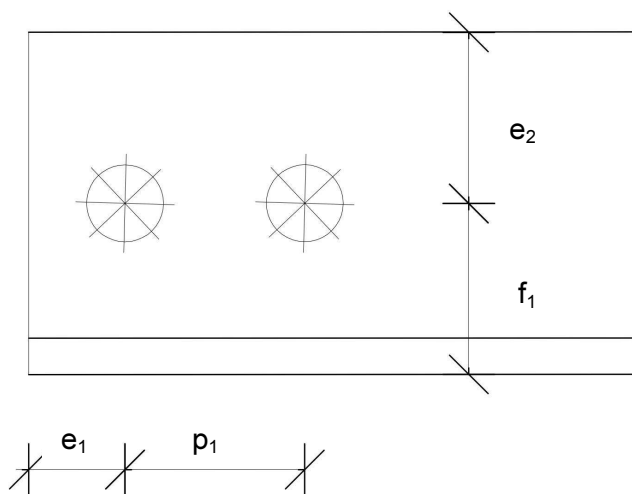
Dejanske razdalje za vijake:

$$e_1 = 45 \text{ mm}$$

$$e_2 = 79 \text{ mm}$$

$$f_1 = 81 \text{ mm}$$

$$p_1 = 84 \text{ mm} (\beta_2 = 0,53)$$

Slika 49: Označene vrednosti  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  in  $f_3$ 

Kotniki so priključeni preko enega kraka z dvema vijakoma -upoštevati je potrebno ekscentrično obremenitev.

Neto prečni prerez kotnika:

$$A_{\text{net}} = (h - 2d_0)t = (16 - 3) \text{ cm} \cdot 1,7 \text{ cm} = 22,1 \text{ cm}^2$$

Projektna natezna nosilnost kotnika:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{\text{net}} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,53 \cdot 22,1 \text{ cm}^2 \cdot 43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} = 402,93 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} \leq N_{u,Rd}$$

$$299,33 \text{ kN} \leq 304,1 \text{ kN}$$

$$\beta_2 = 0,4$$

redukcijski faktor odvisen od razmika med vijakoma  $p_1$

( $p_1 \leq 2,5d_0$ )

$$f_u = 43 \text{ kN/cm}^2$$

natezna trdnost osnovnega materiala

$$Y_{m2} = 1,25$$

delni faktor odpornosti za določanje projektne nosilnosti vijakov

Nosilnost na bočni pritisk:

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_1}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{79 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} - 1,7 = 5,7 \leq 2,5 \right\} = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0} = \frac{45 \text{ mm}}{3 \cdot 30 \text{ mm}} = 0,5; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 1,86; 1,0 \right\} = 0,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{Y_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,5 \cdot 43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 2,7 \text{ cm} \cdot 1,7 \text{ cm}}{1,25} = 197,37 \text{ kN}$$

$$d = 27 \text{ mm}$$

premer vijaka

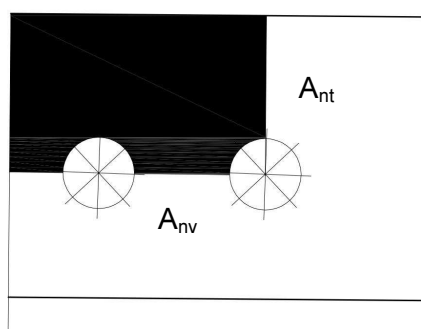
$$t = 17 \text{ mm}$$

najmanjša debelina

$$\frac{F_{v,Ed}}{n} \leq F_{b,Rd}$$

$$\frac{299,33 \text{ kN}}{2} = 149,67 \text{ kN} \leq 197,37 \text{ kN}$$

Strižni iztrg za ekscentrično obremenjeno skupino vijakov



Slika 50: Določitev površin  $A_{nv}$  in  $A_{nt}$

Neto prerez območja pločevine v strigu:

$$A_{nt} = (e_2 - d_0)t = (7,9 - 3) \text{ cm} \cdot 1,7 \text{ cm} = 8,33 \text{ cm}^2$$

Neto prerez območja pločevine v nategu:

$$A_{nt} = (e_1 + p_1 - 2d_0)t = (4,5 + 7,5 - 2 \cdot 3) \text{ cm} \cdot 1,7 \text{ cm} = 10,2 \text{ cm}^2$$

Projektna nosilnost na strižni iztrg:

$$V_{\text{eff}} = 0,5A_{\text{nt}} \frac{f_u}{Y_{M2}} + A_{\text{nv}} \frac{f_y}{\sqrt{3}Y_{M0}} = 0,5 \cdot 8,33 \text{ cm}^2 \frac{43 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} + 10,2 \text{ cm}^2 \frac{27,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 423,78 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} \leq V_{\text{eff}}$$
$$299,39 \text{ kN} \leq 423,78 \text{ kN}$$

## 8. KOSOVNICA

Element	količina	enota	masa (t)
škatlasti profil 250/250/12,5	277,2	m	32,45
kotnik 160/160/17	317,8987	m	16,47
kotnik 180/180/18	218,40	m	13,52
Pohodne rešetke 40x4	177,23	m <sup>2</sup>	8,15
U160	328,08	m	0,59
škatlasti profil 50x50x2,5	152,9	m	0,55
škatlasti profil 30x30x3	538,17	m	1,27
palica 20x0,5	850	m	0,64
		<b>SKUPAJ:</b>	<b>73,64</b>

Vijaki	št. vijakov
M12, 8.8	100
M22, 8.8	72
M27, 8.8	480
M33, 10.9	36
M36, 8.8	12

## 9. ZAKLJUČEK

Za diplomsko nalogo sem izvedla zasnovo in dimenzioniranje jeklenega razglednega stolpa, ki se nanaša na pravila v standardih Evrokod. Naučila sem se uporabljati standarde in ugotovila sem, da se stalno sklicujejo na druga poglavja istega standarda oz na druge standarde, kar upočasnjuje iskanje podatkov.

Najprej sem ocenila dimenzije konstrukcije, glede na katere, sem določila obtežbo vetra, saj se ta spreminja z referenčno površino  $A_{ref}$ . Določila sem obtežbe in s programom Scia Engineer izračunala obremenitve na konstrukcijo. Nato preverila uklon elementov, ker se kontrole niso izšle, sem spremenila dimenzije profilov in ponavljala postopek, dokler konstrukcija ni bila optimizirana. Pri določanju vpliva vetra in preverjanju uklona elementov sem si pomagala z programom Excel.

Elemente sem dimenzionirala le na maksimalne obremenitve, torej je večina elementov predimenzioniranih in bi bilo mogoče zasnovati učinkovitejšo in cenejšo konstrukcijo.



## VIRI

SIST EN 1990:2004. Evrokod: - Osnove projektiranja konstrukcij (istosveten EN 1990:2000).

SIST EN 1991-1-1:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-1. del: Splošni vplivi – Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb (istosveten z EN 1991-1-1:2000).

SIST EN 1991-1-4:2005. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Vplivi vetra.

SIST EN 1991-1-4:2005/oA101. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Vplivi vetra – Nacionalni dodatek.

SIST EN 1993-3-1:2007. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 3-1. del: Stolpi, jambori in dimniki - Stolpi in jambori.

SIST EN 1993-1-1:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

ES ISO 12494: 2012 Atmospheric icing of structures (identical with ISO 12494:2001)

SIST EN 1991-1-3:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega.

SIST EN 1991-1-3:2004 /A101. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-3. del: Splošni vplivi - Obtežba snega – Nacionalni dodatek.

SIST EN 1992-1-1:2005. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

Stolp (179). 2015. Iskanje po Slovarju slovenskega knjižnega jezika. Ljubljana, Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU.

[http://bos.zrc-sazu.si/cgi/a03.exe?name=sskj\\_testa&expression=stolp&hs=1](http://bos.zrc-sazu.si/cgi/a03.exe?name=sskj_testa&expression=stolp&hs=1)

(Pridobljeno 2. 3. 2015.)

Sinur, F., Može, P., Jursinovič, B., Beg, D. 2013. Stabilnost tlačno obremenjenih kotnih profilov. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Zbornik 35. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 22. november, 2013. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 125-132.

Sinur, F., Može, P. Buckling behaviour of hot-rolled steel angles. Open Civil Engineering Journal (v tisku)



a

## **PRILOGE**

Priloga A1: Analiza obtežbe stolpa (izpisi iz programa Scia Engineer)

Priloga B1: Spoj stebra na temelj

Priloga B2: Spoj stebra na steber

Priloga B3: Spoj horizontale na steber

Priloga B4: Spoj diagonale na steber