

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo
in geodezijo



URBAN KASTELIC

**ANALIZA JEKLENEGA PALIČNEGA NOSILCA Z
RAZPONOM 40 METROV**

DIPLOMSKA NALOGA

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE GRADBENIŠTVO**

Ljubljana, 2019

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo
in geodezijo



URBAN KASTELIC

**ANALIZA JEKLENEGA PALIČNEGA NOSILCA Z
RAZPONOM 40 METROV**

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE GRADBENIŠTVO**

**ANALYSIS OF STEEL TRUSS WITH SPAN OF 40
METRES**

Mentor: doc. dr. Primož Može

Predsednik komisije:

Član komisije:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.014.2:006.3(043.2)

Avtor: Urban Kastelic

Mentor: doc. dr. Primož Može

Naslov: Analiza jeklenega paličnega nosilca z razponom 40 metrov

Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij

Obseg in oprema: 38 str., 49 pregl., 27 sl.

Ključne besede: palični nosilec, tradicionalna zasnova, cevi, vijačeni spoji, zvari, analiza

IZVLEČEK

V diplomski nalogi sem obravnaval dve definirani paličji, kjer so prvo paličje sestavljali odprti prerezi z vijačenimi spoji (tradicionalna zasnova). Drugo paličje so sestavljali zaprti prerezi (cevi) z varjenimi spoji. Paličji sem analiziral z globalno elastično analizo. Pri modeliranju vozlišč sem vsako paličje razširil na tri različne tipe vozlišč. Prvi model je temeljil na principu togih vozlišč z oznako (RMT), drugi model na principu togega pasu po celotni dolžini, kjer so polnilni elementi priključeni členkasto (RMK), tretji model pa je na principu členkastih vozlišč (RMČ). Zasnoval in dimenzioniral sem elemente in vozlišča vseh modelov. Obtežba je bila podana in je bila enaka za vse modele. Namen te diplomske naloge je bila primerjava rezultatov pri dveh različnih zasnovah s tremi različnimi modelirani vozlišč. Postopki kontrol pri nosilcu iz cevi so veliko bolj enostavni in transparentni kot pri tradicionalni zasnovi. Pri modeliranju vozlišč se notranje statične veličine in rezultati kontrol nosilnosti ne razlikujejo veliko glede na različne modele. Vsi modeli imajo zadostno duktilnost za razvoj rotacij, ki so majhne. Kontrole nosilnosti pri modelu s togimi vozlišči se ponekod zapletejo na račun razvoja sekundarnih momentov, ki so majhni. Najboljša opcija za projektiranje je bilo paličje sestavljeno iz cevi po modelu (RMK).

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.014.2:006.3(043.2)

Author: Urban Kastelic

Supervisor: Assist. prof. Primož Može, Ph.D.

Title: Analysis of steel truss with span of 40 meters

Document type: Graduation Thesis – University Studies

Notes: 38 p., 49 tab., 27 fig.

Key words: truss, traditional design, tubes, bolted connections, welds, analysis

ABSTRACT

The diploma thesis deals with analysis of two defined trusses. The first truss is assembled with open cross sections with bolted connections (traditional design), while the second one is assembled with welded tubes. Both trusses were analysed with the elastic global analysis. While designing the trusses, each truss was expanded according to three different types of nodes. The first design was based on the numerical model with rigid nodes (RMT), the second design on the model with continuous upper and lower chords, while the verticals and diagonals were hinged to the chords (RMK), the third design was based on the model considering ideal truss system (RMČ). The purpose of this thesis was to compare the results of two different truss structures with three different numerical models. The control procedures for the tubular truss beam were much simpler and more transparent in comparison to the structure with angle and U profiles. The internal forces were similar in all cases. Both structural systems had sufficient ductility to develop rotations and therefore reduce the secondary moments. The design of bolted joint was complicated, because the secondary moments and the moments due to load eccentricity had to be taken into account. For this reason, the truss made of tubes was better option.

ZAHVALA

Za vsa navodila, razlage in podarjen čas pri nastajanju diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Primožu Možetu. Zahvaljujem se sošolcema

KAZALO VSEBINE

IZVLEČEK	VI
1 UVOD	1
2 TEHNIČNI OPIS KONSTRUKCIJE.....	2
2.1 Zasnova konstrukcije.....	2
2.2 Material	3
2.3 Analiza obtežbe	3
2.3.1 Stalna teža	3
2.3.2 Obtežba snega	3
2.3.3 Obtežne kombinacije.....	4
3 ANALIZA NOSILCA.....	4
3.1 Računski model.....	4
3.2 Notranje statične količine.....	5
3.3 Kontrola stabilnosti in nosilnosti.....	7
3.3.1 Obremenitev	8
3.3.2 Geometrija.....	9
3.3.3 Kompaktnost	9
3.3.4 Kontrola normalnih napetosti.....	10
3.3.5 Kontrola striga.....	10
3.3.6 Kontrola upogibnega uklona	10
3.3.7 Kontrola bočne zvrnitve	11
3.3.8 Kontrola stabilnosti tlačno in upogibno obremenjenega elementa.....	12
4 KONTROLA SPOJEV NOSILCA Z ODPRTIMI PROFILI.....	13
4.1 Detajli vozlišč.....	14
4.2. Obremenitve	15
4.3 Ekscentričnost	16
4.4 Geometrija stikov	17
4.5 Kontrole nosilnosti	17
4.5.1 Sila, ki deluje na vijak	17
4.5.2 Nosilnost na bočni pritisk.....	19
4.5.3 Strižni iztrg.....	21
4.5.4 Kontrola neto prereza	22
4.6 Vozliščna pločevina	23
4.6.1 Nosilnost na bočni pritisk.....	23
4.6.2 Kontrola neto prereza	25
4.6.3 Sestavljeni prečni elementi s pasovi, na majhni razdalji	25

5 KONTROLA SPOJEV NOSILCA S CEVMI.....	27
5.1 Detajli vozlišč.....	28
5.2 Obremenitev	29
5.3 Območje veljavnosti.....	30
5.4 Ekscentričnost.....	31
5.5 Kontrole nosilnosti	31
5.5.1 Porušitev stene pasu v stiku s polnilnimi palicami	31
5.5.2 Nosilnost proti strižnem preboju	33
5.5.3 Kontrola napetosti.....	34
5.6 Zvari	35
6 KONTROLA POMIKOV.....	36
DISKUSIJA.....	37
VIRI.....	38

KAZALO SLIK

<i>Slika 1 Geometrija nosilca</i>	<i>2</i>
<i>Slika 2 Pozicija elementov.....</i>	<i>2</i>
<i>Slika 3 Oznaka vozlišč</i>	<i>2</i>
<i>Slika 4 Prerez elementov</i>	<i>3</i>
<i>Slika 5 Računski model RMT.....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 6 Računski model RMK</i>	<i>5</i>
<i>Slika 7 Računski model RMČ</i>	<i>5</i>
<i>Slika 8 Osna sila RMT.....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 9 Moment RMT</i>	<i>5</i>
<i>Slika 10 Prečna sila RMT.....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 11 Osna sila RMK</i>	<i>5</i>
<i>Slika 12 Moment RMK.....</i>	<i>6</i>
<i>Slika 13 Prečna sila RMK</i>	<i>6</i>
<i>Slika 14 Osna sila RMČ</i>	<i>6</i>
<i>Slika 15 Detajl vozlišča 1 za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>14</i>
<i>Slika 16 Detajl vozlišča 24 za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>14</i>
<i>Slika 17 Detajl vozlišča 28 za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>15</i>
<i>Slika 18 Vplivi na vozlišča za nosilec z odprtimi profili.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 19 Smeri delovanja momenta zaradi ekscentričnosti za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>16</i>
<i>Slika 20 Prikaz ekscentričnosti za nosilec z odprtimi profili.....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 21 Razpored vpliva ekscentričnosti za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>18</i>
<i>Slika 22 Prikaz površin za strižni iztrg za nosilec z odprtimi profili.....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 23 Geometrija vozliščne pločevine s prikazanim efektivnim prerezom za izračun neto prereza za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>23</i>
<i>Slika 24 Detajl vozlišča 1 za nosilec s cevmi.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 25 Detajl vozlišča 24 za nosilec s cevmi.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 26 Detajl vozlišče 28 za nosilec s cevmi.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 27 Vplivi na vozlišča za nosilec s cevmi</i>	<i>29</i>

KAZALO TABEL

<i>Preglednica 1 Vrsta računskega modela vozlišča SIST EN 1993-1-8 Preglednica 5.1</i>	<i>1</i>
<i>Preglednica 2 Upoštevanje vpliva upogibnih momentov SIST EN 1993-1-8 Preglednica 5.3</i>	<i>1</i>
<i>Preglednica 3 Napetosti v posameznih prerezih</i>	<i>6</i>
<i>Preglednica 4 Normirane napetosti računskega modela glede na napetosti modela (RMK)</i>	<i>7</i>
<i>Preglednica 5 Upogibki</i>	<i>7</i>
<i>Preglednica 6 Projektne statične veličine za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>8</i>
<i>Preglednica 7 Projektne statične veličine za nosilec s cevmi</i>	<i>8</i>
<i>Preglednica 8 Karakteristike pasov za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>9</i>
<i>Preglednica 9 Karakteristike diagonal za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>9</i>
<i>Preglednica 10 Karakteristike vertikal za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>9</i>
<i>Preglednica 11 Karakteristike za nosilec s cevmi</i>	<i>9</i>
<i>Preglednica 12 Kontrola normalnih napetosti</i>	<i>10</i>
<i>Preglednica 13 Kontrola upogibnega uklona</i>	<i>11</i>
<i>Preglednica 14 Izkoriščenost na upogibni uklon</i>	<i>11</i>
<i>Preglednica 15 Obremenitve v vozliščih za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>16</i>
<i>Preglednica 16 Moment zaradi ekscentričnosti za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>17</i>
<i>Preglednica 17 Izbira lukenj vijakov za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>17</i>
<i>Preglednica 18 Obremenitev na najbolj obremenjen vijak za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>18</i>
<i>Preglednica 19 Kontrola strižne nosilnosti vijaka za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>19</i>
<i>Preglednica 20 Podatki pri nosilnosti na bočni pritisk vzporedno robu za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>19</i>
<i>Preglednica 21 Podatki pri nosilnosti na bočni pritisk pravokotno na rob za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>20</i>
<i>Preglednica 22 Nosilnost na bočni pritisk vzporedno robu za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>20</i>
<i>Preglednica 23 Nosilnost na bočni pritisk pravokotno na rob za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>20</i>
<i>Preglednica 24 Kontrola duktilnosti spojev za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>21</i>
<i>Preglednica 25 Kontrola nosilnosti na strižni iztrg za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>22</i>
<i>Preglednica 26 Strižni iztrg enačbe za izračun površin za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>22</i>
<i>Preglednica 27 Kontrola neto prereza za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>22</i>
<i>Preglednica 28 Enačbe za izračun neto površine za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>23</i>
<i>Preglednica 29 Vozliščna pločevina. Podatki za izračun nosilnost na bočni pritisk vzporedno k robu za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>24</i>
<i>Preglednica 30 Vozliščna pločevina. Podatki za izračun nosilnost na bočni pritisk pravokotno na rob za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>24</i>
<i>Preglednica 31 Vozliščna pločevina. Kontrola nosilnost na bočni pritisk vzporedno robu za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>24</i>
<i>Preglednica 32 Vozliščna pločevina. Kontrola nosilnost na bočni pritisk pravokotno na rob za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>25</i>
<i>Preglednica 33 Vozliščna pločevina. Kontrola neto prereza za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>25</i>
<i>Preglednica 34 Vozliščna pločevina. Izkoriščenost neto prereza za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>25</i>
<i>Preglednica 35 Dolžine med povezavami elementov za nosilec z odprtimi profili</i>	<i>26</i>
<i>Preglednica 36 Obremenitev vozlišč za nosilec s cevmi</i>	<i>30</i>
<i>Preglednica 37 Območje veljavnosti SIST EN 1993-1-8 Preglednica 7.1</i>	<i>30</i>
<i>Preglednica 38 Območje veljavnosti za nosilec s cevmi</i>	<i>30</i>
<i>Preglednica 39 Kontrola osne nosilnost stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi</i>	<i>32</i>
<i>Preglednica 40 Podatki za kontrola upogibne nosilnost stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi</i>	<i>32</i>

<i>Preglednica 41 Kontrola upogibne nosilnost stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi....</i>	<i>33</i>
<i>Preglednica 42 Podatki za kontrolo osne nosilnosti proti preboju stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi</i>	<i>33</i>
<i>Preglednica 43 Kontrola osne nosilnosti proti preboju stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi</i>	<i>33</i>
<i>Preglednica 44 Podatki za kontrolo upogibne nosilnosti proti preboju stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi</i>	<i>34</i>
<i>Preglednica 45 Kontrola upogibne nosilnosti proti preboju stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi</i>	<i>34</i>
<i>Preglednica 46 Kontrola kombiniranega delovanja napetosti pri modelu RMT za nosilec s cevmi.</i>	<i>34</i>
<i>Preglednica 47 Kontrola kombiniranega delovanja napetosti pri modelu RMK za nosilec s cevmi. ..</i>	<i>35</i>
<i>Preglednica 48 Kontrola kombiniranega delovanja napetosti pri modelu RMČ za nosilec s cevmi. ..</i>	<i>35</i>
<i>Preglednica 49 Kontrola upogibkov.....</i>	<i>36</i>

1 UVOD

V splošnem SIST EN 1993-1-8 za projektiranje spojev obravnava tri vrste globalne analize in tri vrste razvrstitve vozlišč. Za vsako kombinacijo globalne analize in razvrstitve vozlišč standard zahteva klasifikacijo vozlišč glede na togost in nosilnost. Vplive obnašanja vozlišč se lahko zanemari, če lokalna duktilnost omogoča prevzem sekundarnih momentov. V spodnji preglednici prikazujem možne kombinacije globalne analize, računskih modelov vozlišč in zahteve preverjanja glede njihove razvrstitve iz SIST EN 1993-1-8 (Preglednica 5.1).

Preglednica 1 Vrsta računskega modela vozlišča SIST EN 1993-1-8 Preglednica 5.1

Metoda globalne analize	Razvrstitev vozlišča		
Elastična	Nominalno členkasto	Togo	Delno togo
Togo-plastična	Nominalno členkasto	Polno nosilno	Delno nosilno
Elastično-plastična	Nominalno členkasto	Togo in polno nosilno	Delno togo in delno nosilno, Delno togo in polno nosilno, Togo in delno nosilno
Vrsta računskega modela	Členkasto	Kontinuirno	Delno kontinuirno

Standard SIST EN 1993-1-8 v poglavju 5.1.5 obravnava globalno analizo paličnih nosilcev samo za nosilce sestavljene iz votlih profilov. Pri tem zahteva, da je:

- razporeditev osnih sil dovoljena na podlagi kot, da so elementi v vozliščih priključeno členkasto,
- vpliv sekundarnih momentov zaradi togosti vozlišč se lahko zanemari, če se geometrija vozlišč nahaja v območju veljavnosti iz preglednic 7.1, 7.8, 7.9 ali 7.20 v SIST EN 1993-1-8,
- upogibne momente zaradi prečne obtežbe, ki delujejo med vozlišči moramo upoštevati pri dimenzioniranju elementov. Če se geometrija vozlišč nahaja v območju veljavnosti iz preglednic 7.1, 7.8, 7.9 ali 7.20 v SIST EN 1993-1-8, se lahko polnilne palice obravnavajo kot členkasto priključene na pasove. Pasovi pa se lahko obravnavajo kot kontinuirni nosilci,
- upogibni momenti zaradi ekscentričnosti se lahko zanemarijo pri natezno obremenjenih elementih. V spojih pa se lahko zanemarijo, če je ekscentričnost znotraj omejitev navedenih v SIST EN 1993-1-8 točki 5.1.5(5).

V spodnji preglednici prikazujem upoštevanje vpliva upogibnih momentov iz SIST EN 1993-1-8.

Preglednica 2 Upoštevanje vpliva upogibnih momentov SIST EN 1993-1-8 Preglednica 5.3

Vrsta komponente	Vzroki nastanka upogibnega momenta		
	Sekundarni vplivi	Prečna obtežba	Ekscentričnost
Tlačeni pas	Ne, če je zadoščeno geometriji	Da	Da
Natezni pas			Ne

se nadaljuje...

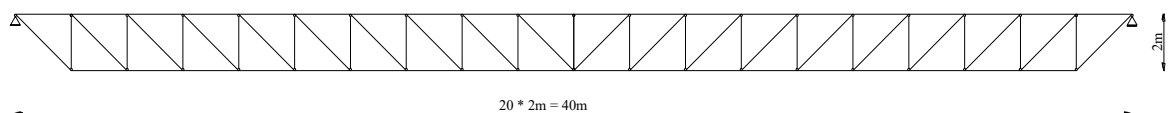
... nadaljevanje preglednice 2

Polnilna palica			Ne
Vozlišče			Ne, če je zadoščeno geometriji

2 TEHNIČNI OPIS KONSTRUKCIJE

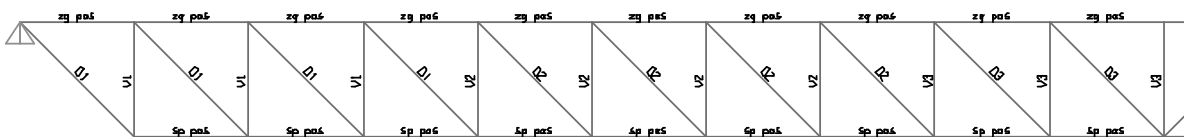
2.1 Zasnova konstrukcije

Obravnavam jekleni palični nosilec z razponom 40 m, ki je obremenjen s stalno obtežbo in s snegom. Nosilci so na medsebojni razdalji 10 m. Nosilec je v zgornjem pasu bočno podprt razdalji 2 m s sekundarno konstrukcijo (legami). Izbočne sile prevzamem s horizontalnim povezjem. Lege in horizontalno povezje niso predmet te naloge. Obtežba preko leg deluje točkovno na vozlišča zgornjega pasu. Obravnavam dva primera nosilca. V prvem delu naloge obravnavam nosilec z odprtimi profili. Elementi zgornjega in spodnjega pasu so sestavljeni iz dveh med seboj povezanih U profilov, polnilne palice pa iz dveh povezanih L profilov. Vozlišča so sestavljena iz pasu, polnilnih elementov in vozliščne pločevine. Elementi so na vozliščno pločevino pritrjeni z vijačnimi veznimi sredstvi. V drugem delu naloge pa je nosilec sestavljen iz cevastih profilov. Spoji so med seboj varjeni direktno element na element. Vsi elementi so iz jekla enake kvalitete. Na sliki 1 prikazujem geometrijo nosilca.

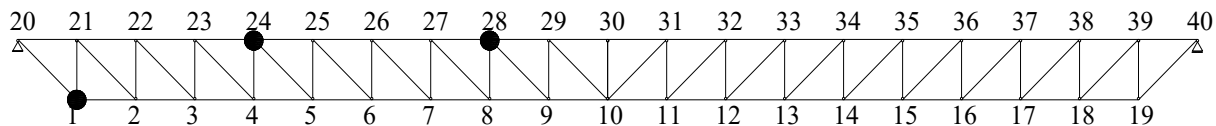


Slika 1 Geometrija nosilca

Na sliki 2 prikazujem pozicije elementov. Oznake vozlišč prikazujem na sliki 3, kjer so s piko označena podrobneje obravnavana vozlišča. Na sliki 4 so prikazani prerezi elementov.

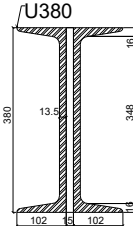
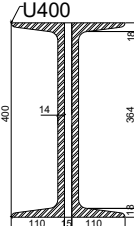
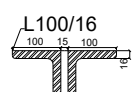
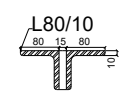
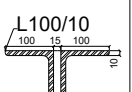
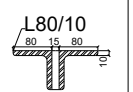
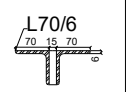
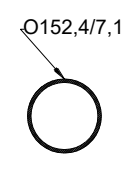
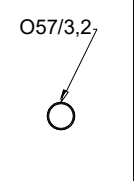
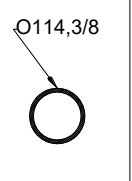
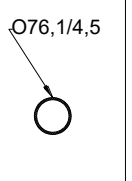


Slika 2 Pozicija elementov



Slika 3 Oznaka vozlišč

Vozlišča, ki so podrobneje obravnavana v nadaljevanju so 1, 24 in 28.

NOSILEC IZ ODPRTIH PROFILOV							
SP. PAS	ZG. PAS	D1	D2	D3	V1	V2	V3
							
NOSILEC IZ CEVASTIH PROFILOV							
SP. PAS	ZG. PAS	D1	D2	D3	V1	V2	V3
							

Slika 4 Prerez elementov

2.2 Material

Za analizo nosilca sem skladno s SIST EN 1993-1-1 izbral jeklo S355J0.

2.3 Analiza obtežbe

2.3.1 Stalna teža

Stalna teža znaša $g_k = 0,5 \text{ kN/m}^2$. V stalni teži je zajeta lastna teža nosilca, teža kritine, teža vseh podkonstrukcij, vzliščnih pločevin, vijakov ter dodatnega materiala. Za maksimalno obremenitev nosilca smo pri izračunu nosilnosti in stabilnost kot pri preverjanju pomikov vpliv stalne teže točkovno porazdeli na mestu vzlišč zgornjega pasu. Točkovni vpliv stalne teže znaša:

$$0,5 \text{ kN/m}^2 \times 10 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 10 \text{ kN}$$

2.3.2 Obtežba snega

Karakteristična obtežba snega na strehi znaša $q_k = 2 \text{ kN/m}^2$. Točkovni vpliv snega znaša:

$$2 \text{ kN/m}^2 \times 10 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 40 \text{ kN}$$

2.3.3 Obtežne kombinacije

MSN

Pri določanju stabilnosti in nosilnosti nosilca smo po metodi mejnih stanj upoštevali karakteristično kombinacijo vplivov v mejnem stanju nosilnosti s prevladujočim vplivom snega.

$$1,35 \times g_k + 1,5 \times q_k$$

MSU

Slovenski nacionalni dokument k SIST EN 1990 predvideva kontrolo pomikov pri pogosti kombinaciji.

$$1,0 \times g_k + 1,0 \times 0,5 \times q_k$$

$$\Psi_{1,1} = 0,5$$

3 ANALIZA NOSILCA

SIST EN 1993-1-8 podaja navodila za elastično, elasto-plastično in togo-plastično globalno analizo. Obravnavani nosilec je analiziran z elastično globalno analizo.

3.1 Računski model

V nalogi študiram vpliv sekundarnih momentov na dimenzioniranje elementov in spojev paličnih nosilcev. Sekundarni momenti so v paličnih nosilcih prisotni zaradi vpetosti elementov v vozliščih, kar je bolj izrazito pri varjenih spojih. V računskem modelu se sekundarni momenti ne razvijejo, če so polnilni elementi (vertikale, diagonale) pripeti členkasto. Ta poenostavitev bistveno poenostavi dimenzioniranje elementov in spojev. Vendar je potrebno na nivoju spojev zagotoviti lokalno duktilnost. Varjeni spoji cev na cev izkazujejo zadostno lokalno duktilnost. S tem je predpostavka glede členkasto pripetih polnilnih palicah upravičena.

Da bi ugotovili vplive sekundarnih momentov smo obravnavali tri različne računske modele, ki se med seboj razlikujejo po sprostitvi rotacije v vozliščih.

- 1) RMT - Kontinuirni računski model. Vozlišča so toga vpeta.
- 2) RMK - Modificirani kontinuirni računski model. Spodnji in zgornji pas sta kontinuirna, diagonale in vertikale pa so členkasto pripete na pasova.
- 3) RMČ – Členkasti računski model, kjer so vozlišča modelirana s členki.

Tri računske modele prikazujem na sliki 5 do 7.



Slika 5 Računski model RMT



Slika 6 Računski model RMK

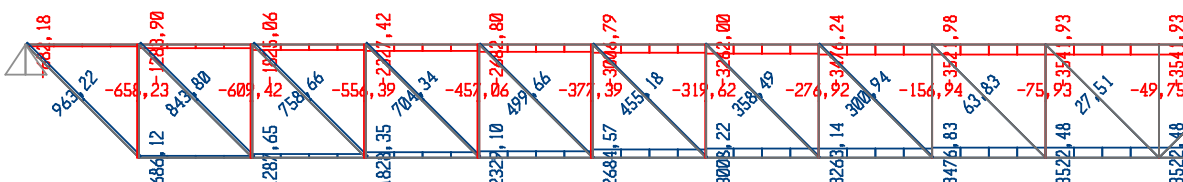


Slika 7 Računski model RMČ

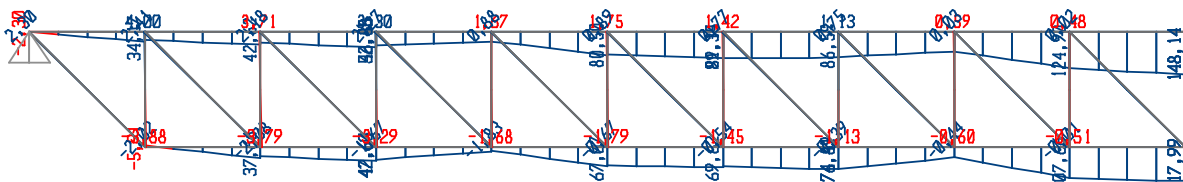
3.2 Notranje statične količine

Na sliki 8 do 14 prikazujem osne sile, momente in prečne sile za posamezne računske modele. Statične veličine so zaradi preglednosti prikazane na polovici nosilca. Vrednosti so navedene v [kN] in [kN · m].

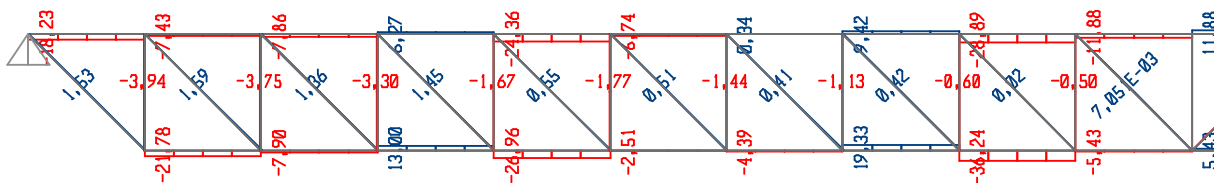
RMT



Slika 8 Osna sila RMT

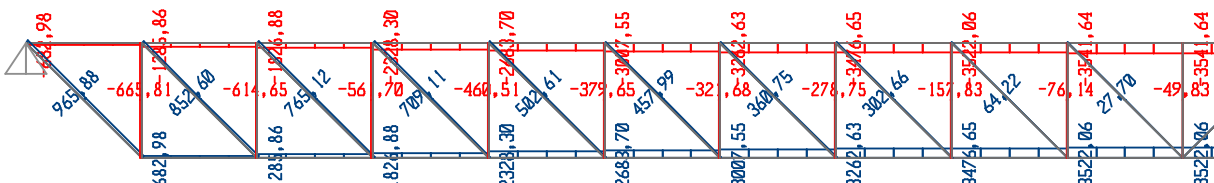


Slika 9 Moment RMT

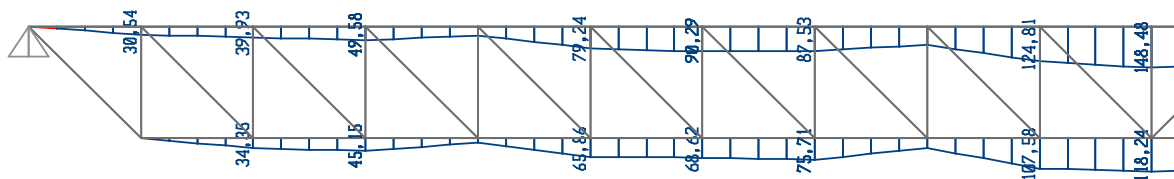


Slika 10 Prečna sila RMT

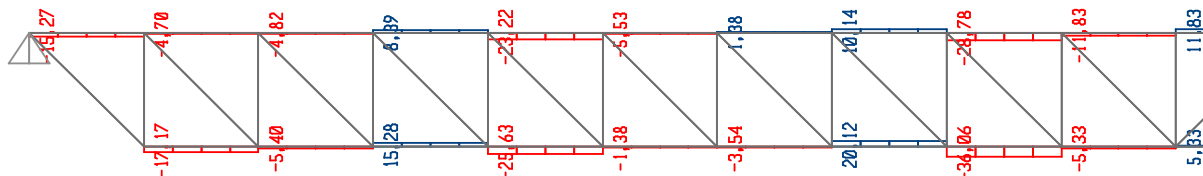
RMK



Slika 11 Osna sila RMK

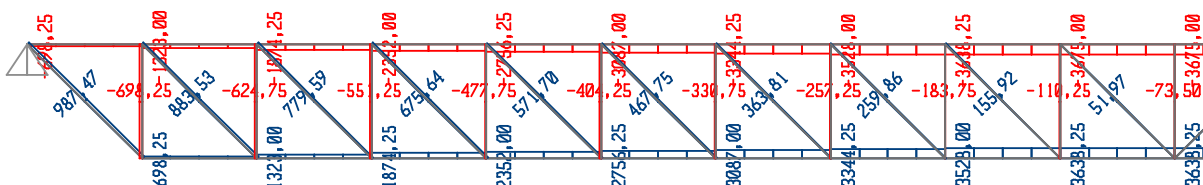


Slika 12 Moment RMK



Slika 13 Prečna sila RMK

RMČ



Slika 14 Osna sila RMČ

V preglednicama 3 in 4 prikazujem normalne strižne in primerjalne napetosti v najbolj obremenjenih prerezi posameznih elementov po spodnji enačbi. Rezultati tudi odkrivajo vpliv obnašanja različnih vozlišč na razpored notranjih sil v konstrukciji.

$$\sigma_{ey} = \sqrt{\left[\frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{A} + \frac{M_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{W_{el}} \right]^2 + \left[\frac{V_{Ed} \cdot \sqrt{3}}{A_v} \right]^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad n = \sigma_{ey} / \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Preglednica 3 Napetosti v posameznih prerezih

Element	Nosilec z odprtimi profili						Nosilec s cevmi					
	RMK		RMT		RMČ		RMK		RMT		RMČ	
	$\sigma_{ey} [\text{kN/cm}^2]$	n	σ_{ey}	n	σ_{ey}	n	σ_{ey}	n	σ_{ey}	n	σ_{ey}	n
Zg. pas	31,9	0,90	26,6	0,75	20,1	0,57	29,6	0,83	29,6	0,83	23,7	0,67
Sp. pas	29,0	0,82	29,0	0,82	22,6	0,64	29,7	0,84	29,7	0,84	23,4	0,66
D1	16,3	0,46	19,0	0,53	16,7	0,47	30,2	0,85	36,7	1,03	30,5	0,86
D2	16,6	0,47	18,7	0,53	18,9	0,53	26,4	0,74	29,7	0,84	28,1	0,79
D3	10,4	0,29	10,7	0,30	25,3	0,71	19,4	0,55	20,4	0,57	28,8	0,81
V1	17,3	0,49	25,2	0,71	18,2	0,51	25,6	0,72	37,5	1,06	26,1	0,74
V2	15,3	0,43	20,5	0,58	15,8	0,45	23,0	0,65	31,6	0,89	23,5	0,66
V3	9,7	0,27	13,6	0,38	11,3	0,32	16,4	0,46	21,6	0,61	18,2	0,51

Preglednica 4 Normirane napetosti računskega modela glede na napetosti modela (RMK)

Element	Nosilec z odprtimi profili			Nosilec s cevmi		
	RMK	RMT	RMČ	RMK	RMT	RMČ
	$\sigma_{ey}/\sigma_{ey}^{RMK}$	$\sigma_{ey}/\sigma_{ey}^{RMK}$	$\sigma_{ey}/\sigma_{ey}^{RMK}$	$\sigma_{ey}/\sigma_{ey}^{RMK}$	$\sigma_{ey}/\sigma_{ey}^{RMK}$	$\sigma_{ey}/\sigma_{ey}^{RMK}$
Zg. pas	1,00	0,83	0,63	1,00	1,00	0,80
Sp. pas	1,00	1,00	0,78	1,00	1,00	0,79
D1	1,00	1,16	1,02	1,00	1,21	1,01
D2	1,00	1,12	1,14	1,00	1,12	1,06
D3	1,00	1,02	2,43	1,00	1,05	1,48
V1	1,00	1,46	1,05	1,00	1,47	1,02
V2	1,00	1,35	1,04	1,00	1,37	1,02
V3	1,00	1,40	1,16	1,00	1,32	1,11

Pri členkastem računskem modelu (RMČ) so osne sile v pasovih nekoliko manjše. Na račun tega se osne sile v polnilnih elementih nekoliko povečajo. Pri togem računskem modelu (RMT) je razviden porast normalnih napetosti v polnilnih elementih. To lahko pripišemo vplivu sekundarnih momentov, ki se v le teh razvijejo. Večje odstopanje se pojavi predvsem pri vitkejših tlačnih elementih zaradi pojava uklona.

V preglednici 5 primerjam največji upogibek na sredini nosilca pri pogosti kombinaciji v MSU.

Preglednica 5 Upogibki

Nosilec z odprtimi profili	
	w[cm]
RMT	8,76
RMK	8,78
RMČ	9,21
Nosilec s cevmi	
RMT	9,86
RMK	9,90
RMČ	10,10

Pomik se povečuje s sproščenostjo prostostnih stopenj v vozliščih. Nekoliko večji skok se pokaže pri modelu (RMČ). Pomiki pri cevastem nosilcu so nekoliko večji.

3.3 Kontrola stabilnosti in nosilnosti

Preverili smo naslednje kontrole:

- 1.) nosilnost prečnih prerezov,
 - razvrščanje prečnih prerezov,
 - prečni prerezi v nategu,

- prečni prerezi v tlaku,
 - prečni prerezi v enosnem upogibu,
 - prečni prerezi v strigu,
 - prečni prerezi obremenjeni z upogibnim momentom in osno silo,
- 2.) nosilnost elementov,
- uklon tlačnih palic,
 - bočna zvrnitev upogibnih nosilcev,
 - tlačno in upogibno obremenjeni elementi.

3.3.1 Obremenitev

V preglednicah 6 in 7 prikazujem maksimalen vpliv osne sile s pripadajočim momentom in prečno silo v posameznih elementih.

Preglednica 6 Projektne statične veličine za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili							
Model	RMT			RMK			RMČ
	$N_{Ed}[\text{kN}]$	$M_{y,Ed}[\text{kNcm}]$	$V_{Ed}[\text{kN}]$	$N_{Ed}[\text{kN}]$	$M_{y,Ed}[\text{kNcm}]$	$V_{Ed}[\text{kN}]$	$N_{Ed}[\text{kN}]$
Zg. pas	3541,93	14814	11,9	3541,62	14848	11,8	3675,00
Sp. pas	3522,48	11800	5,5	3522,06	11824	5,3	3638,25
D1	963,22	202	1,5	965,88	0	0	987,46
D2	499,67	67	0,6	502,62	0	0	571,70
D3	63,83	2	0	64,22	0	0	155,92
V1	658,23	400	4	665,81	0	0	698,25
V2	457,06	167	1,7	460,51	0	0	477,75
V3	156,94	58	0,6	157,83	0	0	183,75

Preglednica 7 Projektne statične veličine za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi							
Model	RMT			RMK			RMČ
	$N_{Ed}[\text{kN}]$	$M_{y,Ed}[\text{kNcm}]$	$V_{Ed}[\text{kN}]$	$N_{Ed}[\text{kN}]$	$M_{y,Ed}[\text{kNcm}]$	$V_{Ed}[\text{kN}]$	$N_{Ed}[\text{kN}]$
Zg. pas	3617,78	5599	5,1	3617,63	5614	5	3675,00
Sp. pas	3589,57	5843	3,5	3589,08	5860	3,3	3638,25
D1	971,55	753	5,8	978,84	0	0	987,48
D2	530,63	137	1,1	537,43	0	0	571,70
D3	104,04	8	0	105,08	0	0	155,92
V1	661,91	847	8,3	683,79	0	0	698,25
V2	458,75	343	3,4	467,39	0	0	477,75
V3	164,54	92	1	166,24	0	0	183,75

3.3.2 Geometrija

V preglednicah 8 do 11 prikazujem geometrijske karakteristike elementov.

Preglednica 8 Karakteristike pasov za nosilec z odprtimi profili

Zg. pas 2 × U400							
A	G	I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z
[cm ²]	[kg/m]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm]
183	143,6	40700	2040	14,9	3807	324	4,56
Sp. pas 2 × U380							
160,8	126,2	31520	1685				

Preglednica 9 Karakteristike diagonal za nosilec z odprtimi profili

Diagonale		a[mm]	d[mm]	A[cm²]	G[kg/m]
D1	2 × L100/16	100,00	16,00	59,2	46,4
D2	2 × L80/10	80,00	10,00	30,2	23,8
D3	2 × L40/4	40,00	4,00	6,16	4,84

Preglednica 10 Karakteristike vertikal za nosilec z odprtimi profili

Vertikale		a[mm]	d[mm]	A[cm²]	G[kg/m]
V1	2 × L100/10	100,00	10,00	38,40	30,20
V2	2 × L80/10	80,00	10,00	30,20	23,80
V3	2 × L70/6	70,00	6,00	16,26	12,76

Preglednica 11 Karakteristike za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi								
	Profil	D[mm]	t[mm]	A[cm²]	G[kg/m]	I[cm⁴]	W[cm³]	i[cm]
Zg. pas	O267/20	267	20	155,2	121,8	11913	892,4	8,761
Sp. pas	O267/20	267	20	155,2	121,8	11913	892,4	8,761
D1	O152,4/7,1	152,40	7,10	32,41	25,44	857,30	112,5	5,14
D2	O889/8	88,90	8,00	20,33	15,96	168,00	37,97	2,97
D3	O57/3,2	57,00	3,20	5,41	4,25	19,64	6,89	1,91
V1	O114,3/8	114,30	8,00	26,72	20,97	379,50	66,40	3,77
V2	O889/8	88,90	8,00	20,33	15,96	168,00	37,97	2,97
V3	O76,1/4,5	76,10	4,50	10,12	7,95	65,12	17,11	2,54

3.3.3 Kompaktnost

Vsi prerezi so vsaj v 3. Razredu kompaktnosti. V računu upoštevamo polne prereze in elastične odpornostne momente.

3.3.4 Kontrola normalnih napetosti

V preglednici 12 prikazujem kontrole normalnih napetosti po spodnji enačbi.

$$n = \frac{N_{Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed}}{W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0}} \leq 1,0$$

Preglednica 12 Kontrola normalnih napetosti

Nosilec z odprtimi profili			
Element	RMT	RMK	RMČ
	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>
Zg. pas	0,75	0,75	0,57
Sp. pas	0,82	0,82	0,64
D1	0,53	0,46	0,47
D2	0,53	0,47	0,53
D3	0,30	0,29	0,71
V1	0,71	0,49	0,51
V2	0,58	0,43	0,45
V3	0,38	0,27	0,32
Nosilec s cevmi			
Zg. pas	0,83	0,83	0,67
Sp. pas	0,84	0,84	0,66
D1	1,03	0,85	0,86
D2	0,84	0,74	0,79
D3	0,57	0,55	0,81
V1	1,06	0,72	0,74
V2	0,89	0,65	0,66
V3	0,61	0,46	0,51

3.3.5 Kontrola striga

V računskih modelih RMT in RMK se strižna napetost pojavi zaradi razvoja sekundarnih momentov. Ker so ti momenti majhni in je njihov gradient prav tako majhen, so posledično strižne napetosti zelo majhne in jih zanemarim. Glej tudi preglednici 6 in 7.

3.3.6 Kontrola upogibnega uklona

V preglednicah 13 in 14 prikazujem rezultate upogibnega uklona in nekatere podatke. Spodaj navajam osnovno enačbo.

$$N_{Ed} \leq N_{bd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}$$

Preglednica 13 Kontrola upogibnega uklona

Nosilec z odprtimi profili								
	λ_1	i_i [cm]	l_u [cm]	ϕ	$\bar{\lambda}_i$	α	χ_i	$N_{b,Rd}$ [kN]
Zg. pas Y os.	76,40	14,90	200,00	0,51	0,18	0,34	1,01	6552,40
Zg. pas Z os.	76,40	4,98	200,00	0,72	0,53	0,49	0,83	5382,55
V1	76,40	3,77	200,00	1,03	0,69	0,21	0,85	775,20
V2	76,40	3,85	200,00	1,31	0,68	0,21	0,86	537,43
V3	76,40	2,54	200,00	1,51	1,03	0,21	0,64	185,80
Nosilec s cevmi								
Zg. pas	8,76	76,40	200,00	0,56	0,30	0,21	0,98	5387,13
V1	3,77	76,40	200,00	0,79	0,69	0,21	0,85	806,54
V2	2,97	76,40	200,00	0,96	0,88	0,21	0,75	538,99
V3	2,54	76,40	200,00	1,12	1,03	0,21	0,64	231,01

Preglednica 14 Izkoriščenost na upogibni uklon

Model	Nosilec z odprtimi profili			Nosilec s cevmi		
	RMT	RMK	RMČ	RMT	RMK	RMČ
	n	n	n	n	n	n
Zg. pas Y os.	0,54	0,54	0,56	0,67	0,67	0,68
Zg. pas Z os.	0,66	0,66	0,68	0,74	0,74	0,75
V1	0,85	0,86	0,90	0,82	0,85	0,87
V2	0,85	0,86	0,89	0,85	0,87	0,89
V3	0,84	0,85	0,99	0,71	0,72	0,80

3.3.7 Kontrola bočne zvrnitve

Po 6.3.2.2(4), SIST EN 1993-1-1, se lahko vpliv bočne zvrnitve zanemari, če velja $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$. Vpliv bočne zvrnitve lahko zanemarim v vseh primerih. Največji $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}}$ se pojavi v zgornjem pasu na razdalji 19 metrov pri modelu RMT. Prikazujem izračun:

$$0,036 = \frac{14814}{407411,67} = \frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2 = 0,16$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi}{k_z L} \sqrt{EI_z G I_t + \frac{\pi^2 E I_z E I_\omega}{(k_\omega L)^2}} = 407411,67 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_{cr} = 1,0 \frac{3,14}{1,0 \cdot 200} \sqrt{21000 \cdot 3807,48 \cdot 8100 \cdot 152,1 + \frac{3,14^2 \cdot 21000^2 \cdot 3807,48 \cdot 1389006,78}{(1,0 \cdot 200)^2}}$$

$$I_t = \sum_i \frac{b_i t_i^3}{3} \quad I_\omega = \frac{I_z}{4} \cdot h_T^2$$

3.3.8 Kontrola stabilnosti tlačno in upogibno obremenjenega elementa

SIST 1993-1-1 v poglavju 6.3.3 podaja metodo za kontrolo stabilnosti tlačno in upogibno obremenjenih elementov, ki je veljavna samo za dvojno simetrične prereze. V elementih, kjer se pojavijo upogibni momenti, jih je načeloma potrebno upoštevati pri interakciji z uklonom, čeprav so majhni. Kontrole vertikal bi se na ta način zelo zakomplicirale, saj je metoda podana v 6.3.3, SIST EN 1993-1-1 veljavna le za dvojno simetrične prereze. Ker so momenti majhni, nevarnost bočne zvrnitve ni prisotna in ker imajo prerezi upogibno odpornost zaključim, da interakcija uklona in upogiba ni merodajna.

4 KONTROLA SPOJEV NOSILCA Z ODPRTIMI PROFILI

Kontrole spojev sem naredil v celoti skladno s SIST EN 1993-1-8. V nadaljevanju sem se osredotočil na tri najbolj obremenjena vozlišča. Vozlišče V1, V24 in V28. Lokacija vozlišč je prikazana na sliki 3. S tem sem zajel vse različne tipe polnilnih elementov z njihovo maksimalno obremenjenostjo tako po elementih kot v posameznih spojih. Uporabil sem vijake trdnostnega razreda 8.8. Luknje za vijake so navadne. Polnilni elementi so priključeni na vozliščno pločevino. Upošteval sem naslednje zahteve:

- vpliv momenta zaradi ekscentričnosti osne sile glede na vezna sredstva,
- vpliv momentov in prečnih sil pri obremenitvi na vijake pri RMT in RMK.

Preveril sem naslednje kontrole:

- kontrola prestriga vijaka,
- kontrola pločevine na bočni pritisk,
- kontrola na strižni iztrg,
- kontrola neto prerezov.

Rezultati analiz:

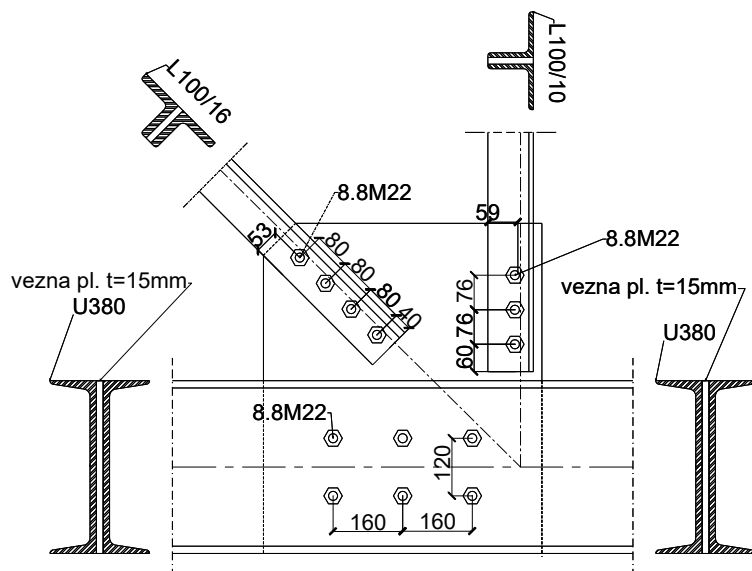
- RMT osne sile in sekundarni momenti,
- RMK in RMČ. V diagonalah in vertikalah so samo osne sile.

Pri rezultatih RMT je potrebno sekundarne momente direktno upoštevati pri analizi spojev. To je precej kompleksno, hkrati pa v določenih primerih ni navodil kako narediti kontrolo nosilnosti. Na primer vpliv momenta na strižni iztrg. Pri RMK in RMČ se sekundarni momenti ne razvijejo. Namesto njih v vozliščih nastanejo rotacije. Zato morajo biti spoji zasnovani tako, da ne inducirajo momentov in omogočajo rotacije. V spojih, ki sem jih zasnoval (slika 15 do 17) se rotacija lahko razvije na račun lukenj za vijake ob delovanju bočnega pritiska. Potrebno pa je preprečiti prestrig vijaka. Pri načrtovanju spojev moram torej upoštevati duktilno porušitev, v smislu, da je nosilnost pločevine v bočnem pritisku manjša od strižne nosilnosti vijaka. Poglavje 3.10.3 v SIST EN 1993-1-8 navaja, da se lahko vpliv ekscentričnosti veznih sredstev pri natezno obremenjenih kotnikih priključenih preko enega kraka, zanemari.

4.1 Detajli vozlišč

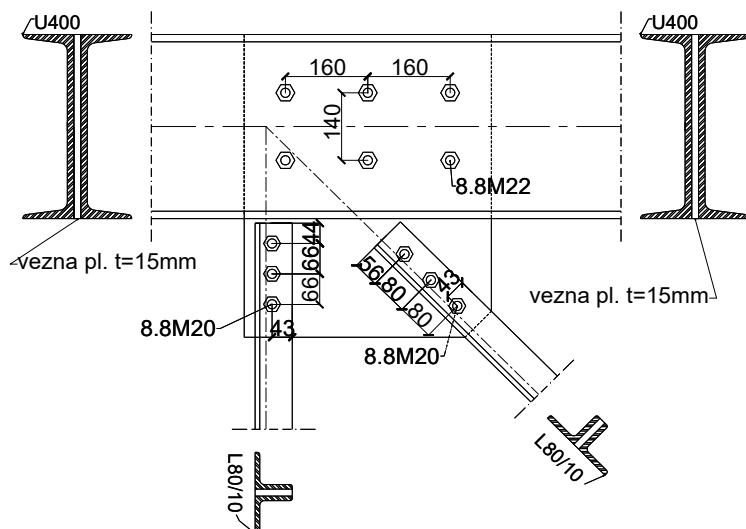
Detajle vozlišč prikazujem na slikah 15 do 17.

Vozlišče 1



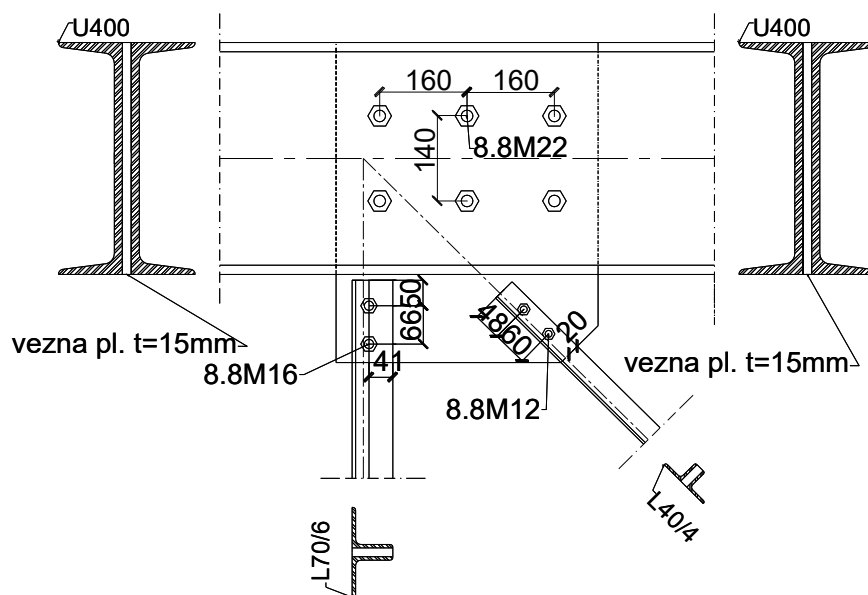
Slika 15 Detajl vozlišča 1 za nosilec z odprtimi profili

Vozlišče 24



Slika 16 Detajl vozlišča 24 za nosilec z odprtimi profili

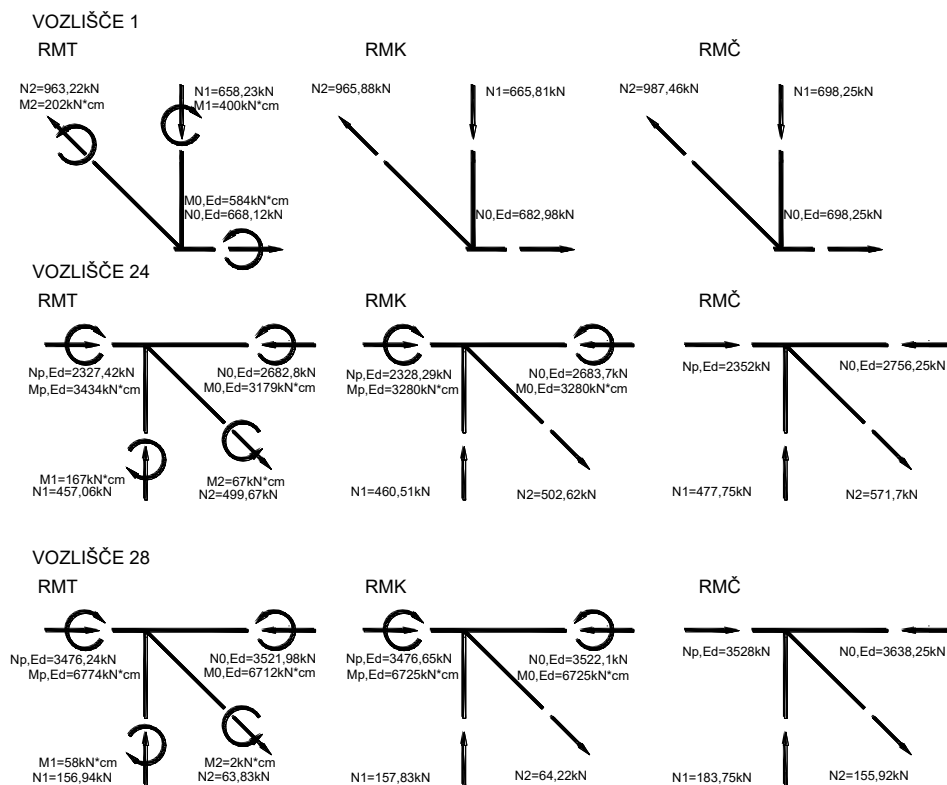
Vozlišče 28



Slika 17 Detajl vozlišča 28 za nosilec z odprtimi profili

4.2. Obremenitve

V preglednici 15 in na sliki 18 prikazujem vplive na vozlišča 1, 24 in 28.



Slika 18 Vplivi na vozlišča za nosilec z odprtimi profili

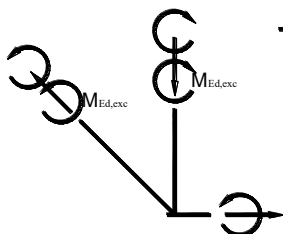
Preglednica 15 Obremenitve v vozliščih za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili						
Vozlišče	El.	RMT			RMK	RMČ
		$N_{Ed}[\text{kN}]$	$M_{y,Ed}[\text{kNcm}]$	$V_{Ed}[\text{kN}]$	$N_{Ed}[\text{kN}]$	$N_{Ed}[\text{kN}]$
V1	D1	963	202	2	966	987
	V1	658	400	4	666	698
V24	D2	500	67	1	503	572
	V2	457	167	2	461	478
V28	D3	64	2	0	64	156
	V3	157	58	1	158	184

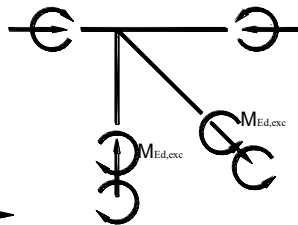
4.3 Ekscentričnost

Vpliv momenta zaradi ekscentričnosti osne sile glede na vezna sredstva upoštevam pri modelu RMT pri tlačnih in nateznih polnilnih elementih, čeprav (SIST EN 1993-1-8 Poglavje 2.7) navaja, da se lahko vpliv ekscentričnosti pri natezno obremenjenih kotnikih priključenih z eno vrsto vijakov preko enega kraka zanemari. Na sliki 19 prikazujem smeri momentov, ki nastanejo zaradi ekscentričnosti osne sile glede na vezna sredstva.

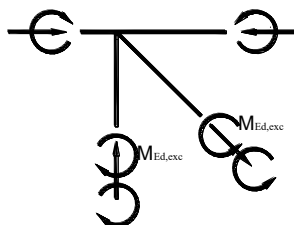
RAČUNSKI MODEL RMT
VOZLIŠČE 1



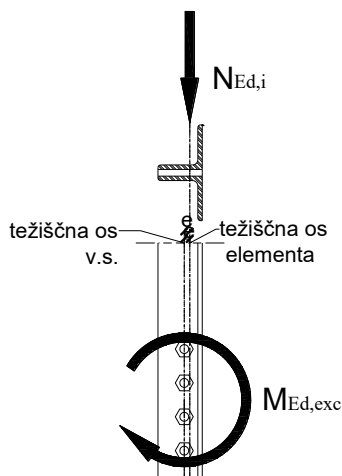
VOZLIŠČE 24



VOZLIŠČE 28



Slika 19 Smeri delovanja momenta zaradi ekscentričnosti za nosilec z odprtimi profili



Slika 20 Prikaz ekscentričnosti za nosilec z odprtimi profili

V preglednici 16 prikazujem rezultate momentov, ki se pojavijo zaradi ekscentričnosti osne sile glede na položaj veznih sredstev po spodnji enačbi.

$$M_{Ed,exc} = e \cdot N_{Ed,i}$$

$M_{Ed,exc}$ = moment zaradi ekscentričnosti med težiščem vijakov in težiščem osi elmenta

e = razdalja med težiščema veznih sredstev in elementa.

Preglednica 16 Moment zaradi ekscentričnosti za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili			
RMT			
El.	$N_{Ed,i}$ [kN]	e [cm]	$M_{Ed,exc}$ [kNcm]
D1	963,22	1,64	1579,68
D2	499,67	1,36	679,55
D3	63,83	0,88	56,17
V1	-658,23	1,28	842,53
V2	-457,06	1,36	621,60
V3	-156,94	0,97	152,23

4.4 Geometrija stikov

Geometrijo lukenj za vijake sem določil v skladu s SIST EN 1993-1-8 preglednica 3.3. Glej tudi slike 15 do 17.

Preglednica 17 Izbira lukenj vijakov za nosilec z odprtimi profili

Vozlišče	Element	e_1 [mm]	e_2 [mm]	p_1 [mm]
V1	D1	40	53	80
	V1	60	59	76
V24	D2	56	43	80
	V2	50	43	66
V28	D3	48	20	60
	V3	50	41	66

4.5 Kontrole nosilnosti

4.5.1 Sila, ki deluje na vijak

Pri izračunu za model RMT upoštevam vpliv momenta zaradi ekscentričnosti osne sile glede na vezna sredstva, vpliv momenta, osne in prečne sile. Pri modelu RMČ in RMK pa samo vpliv osne sile. Obremenitev vijaka zaradi vpliva sekundarnih momentov in momenta zaradi ekscentričnosti izračunam po spodnjih enačbah. Rezultate prikazujem v preglednicah 18 in 19.

$$F^{\bar{M}_{Ed}} = \frac{r_{max} \cdot \bar{M}_{Ed}}{\sum r_i^2} \quad \bar{M}_{Ed} = M_{Ed} + M_{Ed,exc}$$

$F^{\bar{M}_{Ed}}$ = sila na vijak

$\bar{M}_{Ed}$ = moment, ki deluje na vezna sredstva

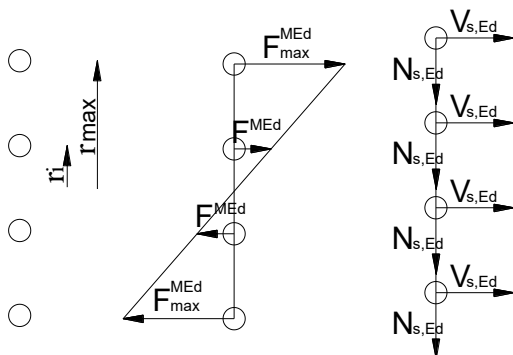
r_{max} = razdalja med najbolj oddaljenim vijakom in težiščem vseh vijakov.

r_i = razdalja med posameznim vijakom in težiščem vseh vijakov.

Preglednica 18 Obremenitev na najbolj obremenjen vijak za nosilec z odprtimi profili

RMT								
Voz.	El.	m	$\sum r_i^2$	r_{max} [cm]	M_{Ed} [kN · cm]	$M_{Ed,exc}$ [kN · cm]	$\bar{M}_{Ed}$	$F^{\bar{M}_{Ed}}$ [kN]
V1	D1	4	320,00	12,00	202,00	1579,68	1781,68	66,81
	V1	3	115,52	7,60	400,00	679,55	1079,55	71,02
V24	D2	3	128,00	8,00	67,00	56,17	123,17	7,70
	V2	3	87,12	6,60	167,00	842,53	1009,53	76,48
V28	D3	2	18,00	3,00	2,00	621,60	623,60	103,93
	V3	2	21,78	3,30	58,00	152,23	210,23	31,85

Izračune za celotno obremenitev na najbolj obremenjeni posamezni vijak prikazujem spodaj.



Slika 21 Razpored vpliva ekscentričnosti za nosilec z odprtimi profili

$$F_{v,Ed} = \sqrt{(V_{s,Ed} + F_{max}^{\bar{M}_{Ed}})^2 + (N_{s,Ed})^2} \quad N_{s,Ed} = \frac{N_{Ed,i}}{m} \quad V_{s,Ed} = \frac{V_{Ed,i}}{m}$$

m = število veznih sredstev

Kontrolo strižne nosilnosti vijaka prikazujem v preglednici 19 po spodnji enačbi.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$$

$F_{v,Rd}$ = projektna strižna nosilnost vijaka na eno strižno ravnino.

Preglednica 19 Kontrola strižne nosilnosti vijaka za nosilec z odprtimi profili

RMT								
Vozlišče	El.	m	$N_{s,Ed}$ [kN]	$F_{M,Ed}$ [kN]	$V_{s,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]	n
V1	D1	4	240,81	66,81	0,38	244,28	232,80	1,05
	V1	3	219,41	71,02	1,33	234,51	232,80	1,01
V24	D2	3	166,56	7,70	0,20	166,59	188,20	0,89
	V2	3	152,35	76,48	0,57	162,94	188,20	0,87
V28	D3	2	31,92	103,93	0,00	31,92	64,80	0,49
	V3	2	78,47	31,85	0,30	80,40	120,60	0,67
RMK								
V1	D1	4	241,47	0,00	0,00	241,47	232,80	1,04
	V1	3	221,94	0,00	0,00	221,94	232,80	0,95
V24	D2	3	167,54	0,00	0,00	167,54	188,20	0,89
	V2	3	153,50	0,00	0,00	153,50	188,20	0,82
V28	D3	2	32,11	0,00	0,00	32,11	64,80	0,50
	V3	2	78,92	0,00	0,00	78,92	120,60	0,65
RMČ								
V1	D1	4	246,87	0,00	0,00	246,87	232,80	1,06
	V1	3	232,75	0,00	0,00	232,75	232,80	1,00
V24	D2	3	190,57	0,00	0,00	190,57	188,20	1,01
	V2	3	159,25	0,00	0,00	159,25	188,20	0,85
V28	D3	2	77,96	0,00	0,00	77,96	64,80	1,20
	V3	2	91,88	0,00	0,00	91,88	120,60	0,76

4.5.2 Nosilnost na bočni pritisk

SIST EN 1993-1-8 v preglednici 3.6 navaja postopek za izračun nosilnosti vijaka na bočni pritisk. Vpliv sekundarnih momentov in prečnih ter momenta zaradi ekscentričnosti sem upošteval pri kontroli bočnega pritiska pravokotno na rob elementa. Rezultate kontrole za bočni pritisk z nekaterimi podatki navajam v preglednicah 20 do 23, izračunane po spodnji enačbi.

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{td} t}{\gamma_{M2}}$$

Preglednica 20 Podatki pri nosilnosti na bočni pritisk vzporedno robu za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili								
Vzporedno robu								
Voz.	El.	α_b	α_d (rob. v.)	α_d (notr. v.)	k_1	d[cm]	t[cm]	$F_{b,Rd}$ [kN]
V1	D1	0,55	0,55	0,86	2,50	2,20	1,60	190,26
	V1	0,81	/	0,81	2,50	2,20	1,00	181,76
V24	D2	0,85	0,85	0,96	2,50	2,00	1,00	173,40
	V2	0,75	/	0,75	2,50	2,00	1,00	153,00

se nadaljuje...

...nadaljevanje preglednice 20

V28	D3	1,00	1,14	1,18	2,50	1,20	0,40	48,96
	V3	0,97	/	0,97	2,50	1,60	0,60	94,98

Preglednica 21 Podatki pri nosilnosti na bočni pritisk pravokotno na rob za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili							
Pravokotno na rob							
Voz.	El.	α_b	$\alpha_d(\text{rob. v.})$	k_1	$d[\text{cm}]$	$t[\text{cm}]$	$F_{b,Rd}[\text{kN}]$
V1	D1	0,78	0,78	2,50	2,20	1,60	279,84
	V1	0,87	0,87	2,50	2,20	1,00	194,70
V24	D2	0,69	0,69	2,50	2,00	1,00	141,48
	V2	0,69	0,69	2,50	2,00	1,00	141,48
V28	D3	0,53	0,53	2,50	1,20	0,40	25,77
	V3	0,82	0,82	2,50	1,60	0,60	80,29

Preglednica 22 Nosilnost na bočni pritisk vzporedno robu za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili								
Vzporedno robu								
Kontrola nosilnosti na bočni pritisk			RMT	RMK	RMČ	RMT	RMK	RMČ
Voz.	El.	$F_{b,Rd}[\text{kN}]$	$F_{b,Ed}[\text{kN}]$	$F_{b,Ed}[\text{kN}]$	$F_{b,Ed}[\text{kN}]$	n	n	n
V1	D1	190,26	122,14	120,74	123,43	0,64	0,63	0,65
	V1	181,76	117,25	110,97	116,38	0,65	0,61	0,64
V24	D2	173,40	83,30	83,77	95,28	0,48	0,48	0,55
	V2	153,00	81,47	76,75	79,63	0,53	0,50	0,52
V28	D3	48,96	15,96	16,06	38,98	0,33	0,33	0,80
	V3	94,98	40,20	39,46	45,94	0,42	0,42	0,48

Preglednica 23 Nosilnost na bočni pritisk pravokotno na rob za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili				
Pravokotno na rob				
Kontrola nosilnosti na bočni pritisk			RMT	RMT
Voz.	El.	$F_{b,Rd}[\text{kN}]$	$F_{b,Ed}[\text{kN}]$	n
V1	D1	279,84	66,81	0,24
	V1	194,70	71,02	0,36
V24	D2	141,48	7,70	0,05
	V2	141,48	76,48	0,54
V28	D3	25,77	103,93	4,03
	V3	80,29	31,85	0,40

Pogoj in kontrolo duktilnosti prikazujem v preglednici 24.

$$F_{v,Rd} > F_{b,Rd}$$

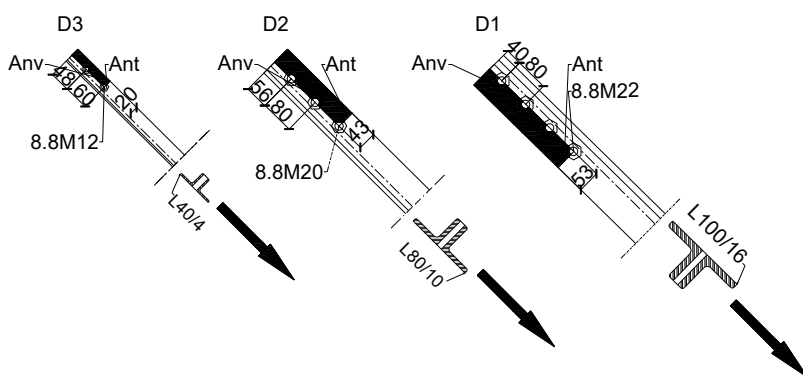
Preglednica 24 Kontrola duktilnosti spojev za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili		
Vzporedno robu		
Voz.	El.	$F_{b,Rd}/F_{v,Rd}$
V1	D1	0,86
	V1	0,78
V24	D2	0,92
	V2	0,81
V28	D3	0,76
	V3	0,79

4.5.3 Strižni iztrg

SIST EN 1993-1-8 (Poglavje 3.10.2) podaja navodila za projektno nosilnost na strižni iztrg za skupino vijakov obremenjenih z ekscentrično obtežbo. Vpliv momenta je treba upoštevati, podrobnih napotkov pa ne podaja. Na račun duktilnosti se ekscentričnost v vozliščih lahko zanemari. Moment upoštevam v velikosti rezultante osne sile in maksimalne sile zaradi momenta, ki odpade na najbolj obremenjen vijak (glej 4.5.1). Momenta zaradi ekscentričnosti v vozlišču ne upoštevam, saj dokažem da izpolnjujem zahtevo 3.10.3(2) v točki 4.3.4. Splošna enačba za nosilnost na strižni iztrg je prikazana spodaj. V preglednicah 25 in 26 prikazujem rezultate z nekaterimi podatki za kontrolo na strižni iztrg po spodnji enačbi.

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + A_{nv} \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad n = [N_{Ed}/2]/V_{eff,2,Rd}$$



Slika 22 Prikaz površin za strižni iztrg za nosilec z odprtimi profili

Preglednica 25 Kontrola nosilnosti na strižni iztrg za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili								
RMT								
Voz.	El.	γ_{M2}	f_u [kN/cm ²]	A_{nt} [cm ²]	A_{nv} [cm ²]	$V_{eff,2,Rd}$ [kN]	$N_{Ed}/2$ [kN]	n
V1	D1	1,25	51	6,56	31,36	910,40	481,61	0,53
V24	D2	1,25	51	3,20	16,1	460,55	249,84	0,54
V28	D3	1,25	51	0,52	2,61	74,71	31,92	0,43
RMK								
V1	D1	1,25	51	6,56	31,36	910,40	482,94	0,53
V24	D2	1,25	51	3,20	16,1	460,55	251,31	0,55
V28	D3	1,25	51	0,52	2,61	74,71	32,11	0,43
RMČ								
V1	D1	1,25	51	6,56	31,36	910,40	493,73	0,54
V24	D2	1,25	51	3,20	16,1	460,55	285,85	0,62
V28	D3	1,25	51	0,52	2,61	74,71	77,96	1,04

Preglednica 26 Strižni iztrg enačbe za izračun površin za nosilec z odprtimi profili

Voz.	element		
V1	D1	$A_{nt} = t \cdot \left(e_2 - \frac{d_0}{2} \right)$	$A_{nv} = t \cdot \left(3 p_1 + e_1 - 3 d_0 - \frac{d_0}{2} \right)$
V24	D2	$A_{nt} = t \cdot \left(e_2 - \frac{d_0}{2} \right)$	$A_{nv} = t \cdot \left(2 p_1 + e_1 - 2 d_0 - \frac{d_0}{2} \right)$
V28	D3	$A_{nt} = t \cdot \left(e_2 - \frac{d_0}{2} \right)$	$A_{nv} = t \cdot \left(p_1 + e_1 - d_0 - \frac{d_0}{2} \right)$

4.5.4 Kontrola neto prereza

Neto prereze sem preveril v skladu s SIST EN 1993-1-8 poglavje 3.10.3. V pasu sem upošteval, da je U-prerez sestavljen iz dveh L-prerezov. V preglednicah 27 in 28 prikazujem rezultate kontrol neto prerezov z nekaterimi podatki po spodnji enačbi.

$$N_{Ed} \leq N_{u,Rd} = \frac{\beta_t A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad n = N_{Ed} / N_{u,Rd}$$

Preglednica 27 Kontrola neto prereza za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili							
RMT							
Voz.	Element	f_u [kN/cm ²]	β_3	A_{net} [cm ²]	N_{Ed} [kN]	$N_{u,Rd}$ [kN]	n
V1	D1	51,00	0,57	55,36	963,22	1287,45	0,75
V24	D2	51,00	0,59	27,80	499,67	670,34	0,75
V28	D3	51,00	0,61	5,74	63,83	143,79	0,44
	Sp. Pas.	51,00	0,70	147,84	3522,48	4222,31	0,83
RMK							

se e nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 27

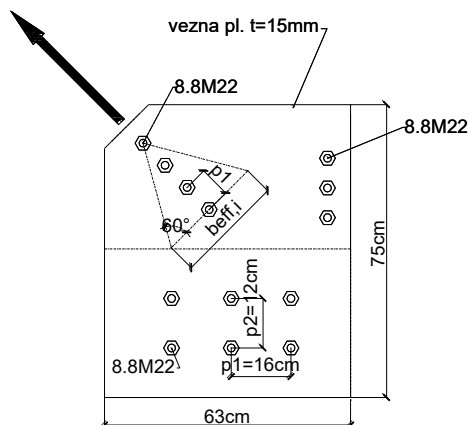
V1	D1	51,00	0,57	55,36	965,88	1287,45	0,75
V24	D2	51,00	0,59	27,80	502,62	670,34	0,75
V28	D3	51,00	0,61	5,74	71,77	143,79	0,50
	Sp. Pas.	51,00	0,70	147,84	3522,06	4222,31	0,83
RMČ							
V1	D1	51,00	0,57	55,36	987,46	1287,45	0,77
V24	D2	51,00	0,59	27,80	571,70	670,34	0,85
V28	D3	51,00	0,61	5,74	155,92	143,79	1,08
	Sp. Pas.	51,00	0,70	147,84	3638,25	4222,31	0,86

Preglednica 28 Enačbe za izračun neto površine za nosilec z odprtimi profili

Element	
D1	$A_{net} = (A - d_0 \cdot t)$
D2	$A_{net} = (A - d_0 \cdot t)$
D3	$A_{net} = (A - d_0 \cdot t)$
Sp. pas	$A_{net} = (A - 2 \cdot d_0 \cdot t)$

4.6 Vozliščna pločevina

Dimenzije vozliščne pločevine so: Širina/višina/debelina = 63cm/75cm/1,5cm.



Slika 23 Geometrija vozliščne pločevine s prikazanim efektivnim prerezom za izračun neto prereza za nosilec z odprtimi profili

4.6.1 Nosilnost na bočni pritisk

SIST EN 1993-1-8 v preglednici 3.6 navaja postopek za izračun nosilnosti vijaka na bočni pritisk. Kontrole z nekaterimi podatki prikazujem v preglednicah 29 do 32, po spodaj navedeni enačbi.

$$F'_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{td} d}{\gamma_{M2}} \quad n = F_{v,Ed} / F'_{b,Rd}$$

Preglednica 29 Vozliščna pločevina. Podatki za izračun nosilnost na bočni pritisk vzporedno k robu za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili							
Vzporedno robu							
Voz.	El.	α_b	α_d (notr. v.)	k_1	d [cm]	t [cm]	$F'_{b,Rd}$ [kN]
V1	D1	0,86	0,86	2,50	2,20	1,50	289,48
	V1	0,81	0,81	2,50	2,20	1,50	272,65
	pas	1,00	1,97	2,50	2,20	1,50	336,60
V24	D2	0,96	0,96	2,50	2,00	1,50	293,76
	V2	0,75	0,75	2,50	2,00	1,50	229,50
V28	D3	1,00	1,18	2,50	1,20	1,50	183,60
	V3	0,97	0,97	2,50	1,60	1,50	237,46

Preglednica 30 Vozliščna pločevina. Podatki za izračun nosilnost na bočni pritisk pravokotno na rob za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili						
Pravokotno na rob						
Voz.	El.	α_b	k_1	d [cm]	t [cm]	$F'_{b,Rd}$ [kN]
V1	D1	1,00	2,50	2,20	1,50	336,60
	V1	1,00	2,50	2,20	1,50	336,60
	pas	1,00	2,50	2,20	1,50	336,60
V24	D2	1,00	2,50	2,00	1,50	306,00
	V2	1,00	2,50	2,00	1,50	306,00
V28	D3	1,00	2,50	1,20	1,50	183,60
	V3	1,00	2,50	1,60	1,50	244,80

Preglednica 31 Vozliščna pločevina. Kontrola nosilnost na bočni pritisk vzporedno robu za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili								
Vzporedno robu								
Kontrola nosilnosti na bočni pritisk			RMT	RMK	RMČ	RMT	RMK	RMČ
Voz.	El.	$F'_{b,Rd}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	n	n	n
V1	D1	289,48	123,85	120,74	123,43	0,43	0,42	0,43
	V1	272,65	120,85	110,97	116,38	0,44	0,41	0,43
	pas	336,60	83,31	83,77	95,28	0,25	0,25	0,28
V24	D2	293,76	83,99	76,75	79,63	0,29	0,26	0,27
	V2	229,50	15,96	16,06	38,98	0,07	0,07	0,17
V28	D3	183,60	40,20	39,46	45,94	0,22	0,21	0,25
	V3	237,46	123,85	120,74	123,43	0,52	0,51	0,52

Preglednica 32 Vozliščna pločevina. Kontrola nosilnost na bočni pritisk pravokotno na rob za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili				
Pravokotno na rob				
Kontrola nosilnosti na bočni pritisk			RMT	RMT
Voz.	El.	$F'_{b,Rd}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	n
V1	D1	336,60	66,81	0,20
	V1	336,60	71,02	0,21
V24	D2	306,00	7,70	0,03
	V2	306,00	76,48	0,25
V28	D3	183,60	103,93	0,57
	V3	244,80	31,85	0,13

4.6.2 Kontrola neto prereza

Kontrolo neto prereza prikazujem v preglednici 33 po spodaj navedenih enačbah. Upošteval sem porušni mehanizem prikazan na sliki 23.

$$b_{eff,i} = 2 \cdot \sum_i p_1 \cdot \tan 30 - d_0 \quad A_{net} = t \cdot b_{eff} \quad N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$b_{eff} = 2 \cdot \sum_i p_1 \cdot \tan 30 + p_2 - 2 \cdot d_0$$

Preglednica 33 Vozliščna pločevina. Kontrola neto prereza za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili							
					RMT	RMK	RMČ
Vozlišče	Element	b_{eff} [cm]	A_{net} [cm ²]	$N_{u,Rd}$ [kN]	$N_{f,Ed}$ [kN]	$N_{f,Ed}$ [kN]	$N_{f,Ed}$ [kN]
V1	D1	25,30	37,94	1393,30	963,22	965,88	987,46
V24	D2	16,26	24,40	895,82	499,67	502,62	571,70
V28	D3	2,92	4,39	161,05	63,83	64,22	155,92

Preglednica 34 Vozliščna pločevina. Izkoriščenost neto prereza za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili				
		RMT	RMK	RMČ
Vozlišče	Element	n	n	n
V1	D1	0,69	0,69	0,71
V24	D2	0,56	0,56	0,64
V28	D3	0,40	0,40	0,97

4.6.3 Sestavljeni prečni elementi s pasovi, na majhni razdalji

Sestavljene prečne elemente s pasovi na majhni razdalji, se lahko obravnava kot homogen prerez, če je razdalja L med povezovalnimi pločevinami manjša kot petnajstkratnik vztrajnostnega polmera $i_{\min}$

posameznega kotnika oziroma U-profila. Glej 6.4.4 SIST EN 1993-1-1. Izbrane dolžine prikazujem v preglednici 35.

Preglednica 35 Dolžine med povezavami elementov za nosilec z odprtimi profili

Nosilec z odprtimi profili		
Element	$15 \cdot i_{min}[\text{cm}]$	$L[\text{cm}]$
Zg. pas	45,60	40
V1	45,60	40
V2	36,15	30
V3	31,95	30

5 KONTROLA SPOJEV NOSILCA S CEVMI

Kontrole sem naredil v celoti skladno s 7. poglavjem v SIST EN1993-1-8. Osredotočil sem se na tri najbolj obremenjena vozlišča. To so vozlišča 1, 24 in 28 (glej slike 24 do 26). S tem sem zajel vse različne tipe polnilnih elementov z njihovo maksimalno obremenjenostjo tako v elementih, kot v spojih. Vsi spoji so varjeni s čelnimi zvari s polno penetracijo. Vsa vozlišča so tipa N. Upošteval sem naslednje zahteve:

- debelina pasov in polnilnih elementov je večja ali enaka 2,5mm,
- kot med pasom in polnilnim elementom je večji ali enak 30°,
- reža med polnilnimi elementi ni manjša od seštevka debelin sten priključnih elementov,
- širina preklopa je večja od 25%,
- pri preklopu tanjša palica prekriva debelejši in ali ožja širšo.

Preveril sem naslednje kontrole:

- območje veljavnosti,
- kontrola napetosti,
- porušitev stene pasu v stiku s polnilnimi palicami,
- prebojna strižna porušitev.

Rezultati analiz:

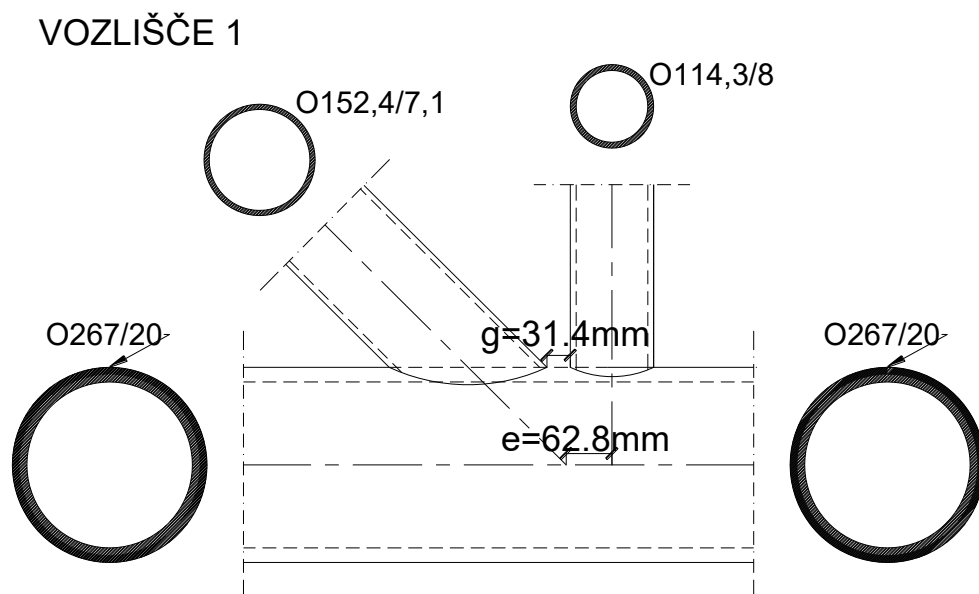
- RMT osne sile in sekundarni momenti,
- RMK in RMČ v diagonalah in vertikalah so samo osne sile.

Postopki izračuna so dokaj enostavni. Še posebej če spoji ustrezajo območju veljavnosti v SIST EN 1993-1-8 (preglednica 7.1). Tedaj je potrebno kontrolirati le dve od šestih kontrol. Drugače je potrebno preveriti vseh šest kontrol. SIST EN 1993-1-8 tudi dopušča razmike polnilnih palic v dovoljeni ekscentričnosti. Polnilne palice ob ustrezanju območja veljavnosti na račun duktilnosti tik ob spoju omogočijo razvoj rotacij. V SIST EN1993-1-8 so tudi slikovno predstavljeni načini porušitve za lažjo predstavo.

5.1 Detajli vozlišč

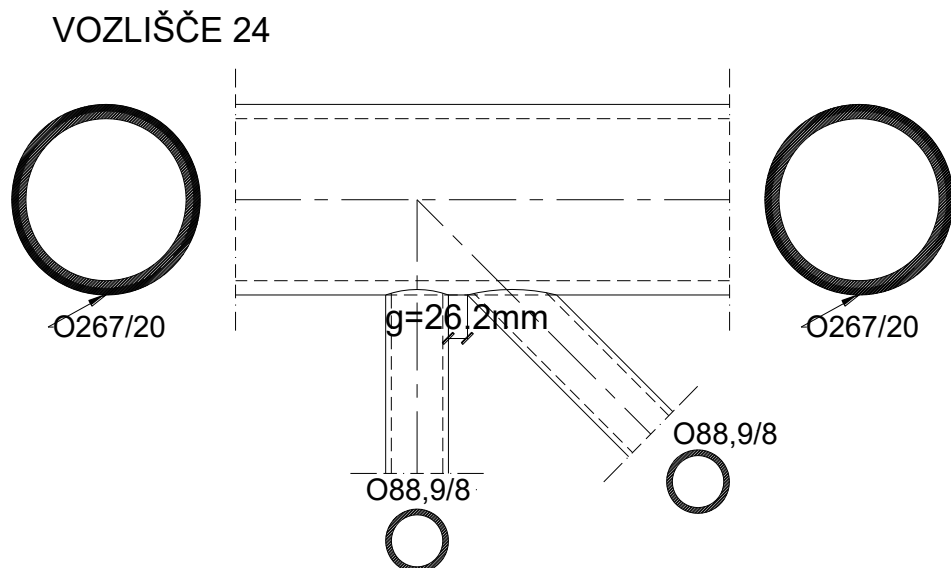
Detajle vozlišč prikazujem na slikah 24 do 26.

Vozlišče 1



Slika 24 Detajl vozlišča 1 za nosilec s cevmi

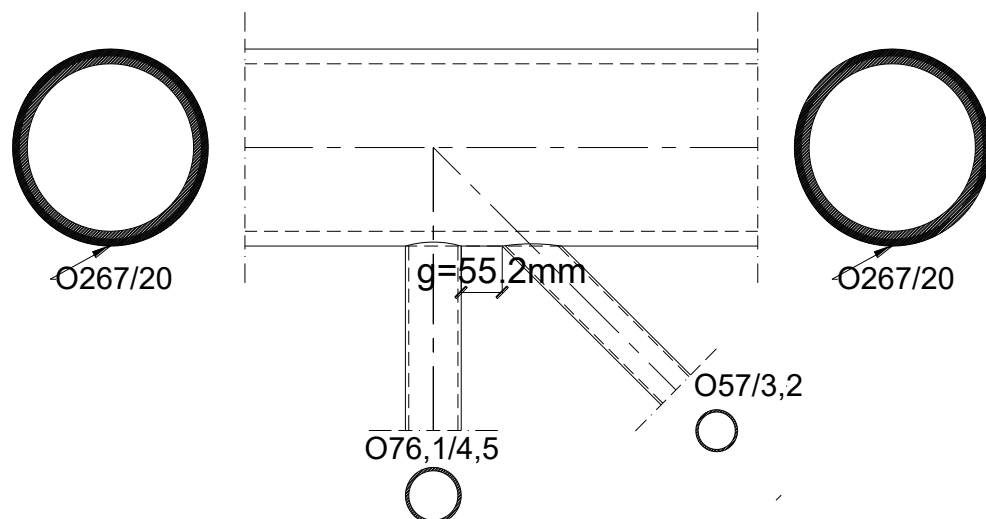
Vozlišče 24



Slika 25 Detajl vozlišča 24 za nosilec s cevmi

Vozlišče 28

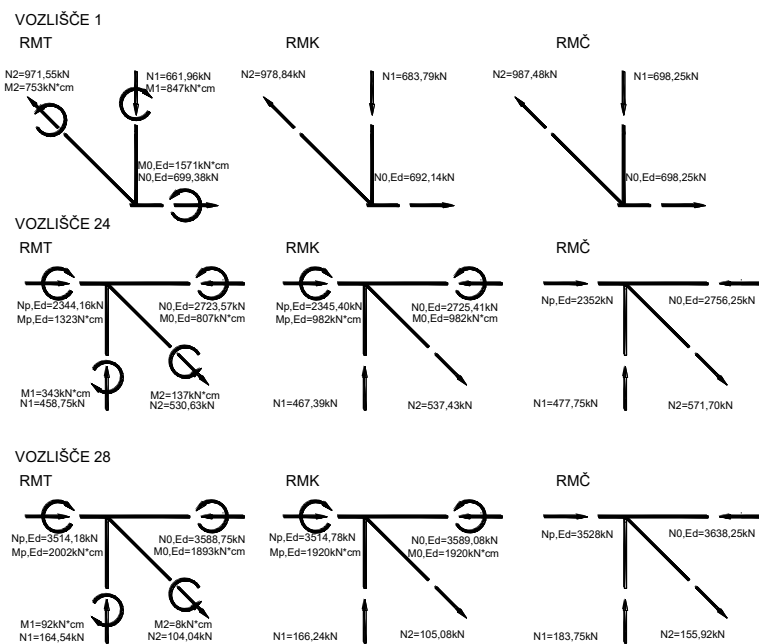
VOZLIŠČE 28



Slika 26 Detajl vozlišče 28 za nosilec s cevmi

5.2 Obremenitev

V preglednici 36 in na sliki 27 prikazujem vplive na vozlišča 1, 24 in 28.



Slika 27 Vplivi na vozlišča za nosilec s cevmi

Preglednica 36 Obremenitev vozlišč za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi						
		RMT			RMK	RMČ
Voz.	El.	$N_{Ed}[\text{kN}]$	$M_{y,Ed}[\text{kNcm}]$	$V_{Ed}[\text{kN}]$	$N_{Ed}[\text{kN}]$	$N_{Ed}[\text{kN}]$
1	D1	972	753	6	979	987
	V1	662	847	8	684	698
24	D2	531	137	1	537	572
	V2	459	343	3	467	478
28	D3	104	8	0	105	156
	V3	165	92	1	166	184

5.3 Območje veljavnosti

Pravila iz SIST EN1993-1-8 (preglednica 7.1) povzemam in prikazujem v preglednici 37. Rezultate kontrol prikazujem v preglednici 38.

Preglednica 37 Območje veljavnosti SIST EN 1993-1-8 Preglednica 7.1

Območje veljavnosti za varjena vozlišča, v katerih se stikujejo okrogle votle polnilne palice in okrogli votli pasovi
$0,2 \leq d_i/d_0 \leq 1,0$
2. razred kompaktnosti in vendar $10 \leq d_0/t_0 \leq 50$
2. razred kompaktnosti in $10 \leq d_i/t_i \leq 50$
$\lambda_{ov} \geq 25\%$
$g \geq t_1 + t_2$

Preglednica 38 Območje veljavnosti za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi										
Voz.	Element	$d_i[\text{cm}]$	$t_i[\text{cm}]$	$g[\text{cm}]$	$q[\text{cm}]$	$p[\text{cm}]$	d_i/d_0	d_i/t_i	$t_1 + t_2$	λ_{ov}
V1	D1	15,24	7,10	-3,14	3,14	11,43	0,57	21,46	1,51	0,27
	V1	11,43	8,00	-3,14	3,14	11,43	0,43	14,29	1,51	0,27
	Sp. pas	26,70	20,00	-3,14	3,14	11,43	1,00	13,35	1,51	0,27
V24	D2	8,89	8,00	2,62	-2,62	8,89	0,33	11,11	1,60	/
	V2	8,89	8,00	2,62	-2,62	8,89	0,33	11,11	1,60	/
	Zg. pas	26,70	20,00	2,62	-2,62	8,89	1,00	13,35	1,60	/
V28	D3	5,70	3,20	5,52	/	/	0,21	17,81	0,77	/
	V3	7,61	4,50	5,52	/	/	0,29	16,91	0,77	/
	Zg. pas	26,70	20,00	5,52	/	/	1,00	13,35	0,77	/

θ = kot med polnilnim elementom in pasom.

d_0 = premer pasu

d_1 = premer vertikale

d_2 = premer diagonale

$$g = \frac{d_0}{2} - \frac{d_1}{2} - \frac{d_2}{2 \cos \theta} \quad q = -g \quad p = d_1$$

Vsa vozlišča padejo v območje veljavnosti iz preglednice 7.1 v SIST EN 1993-1-8.

5.4 Ekscentričnost

Polnilno palico D1 (diagonalo) v vozlišču 1 smo razmaknili v okvirju dovoljene ekscentričnosti po navedbah v SIST EN 1993-1-8 poglavje 5.1.5 (5). Razmik je namenoma enak dvakratni razdalji q , tako da se vrednost faktorja k_p ne spremeni.

$$e = -2 \cdot q = 2 \cdot g = 6,28 \text{ cm}$$

Ustreza spodnjima pogojema.

$$-0,55d_0 \leq e \leq 0,25d_0$$

$$-14,7 \text{ cm} \leq e \leq 6,67 \text{ cm}$$

5.5 Kontrole nosilnosti

5.5.1 Porušitev stene pasu v stiku s polnilnimi palicami

Spodnje enačbe smo privzeli iz SIST EN 1993-1-8 (preglednici 7.2 in 7.5).

Projektno osna nosilnost stika vertikale in pasu prikazujem v preglednici 39, izračunano po spodnji enačbi.

$$N_{1,Rd} = \frac{k_g k_p f_y t_0^2}{\sin \theta_1} \left(1,8 + 10,2 \frac{d_1}{d_0} \right) / \gamma_{M5}$$

Projektno osna nosilnost stika diagonale in pasu prikazujem v preglednici 39 izračunano po spodnjih enačbah.

$$N_{2,Rd} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} N_{1,Rd} \quad k_g = \gamma^{0,2} \left(1 + \frac{0,024 \gamma^{1,2}}{1 + \exp\left(\frac{0,5g}{t_0} - 1,33\right)} \right)$$

$$\text{za } n_p > 0 \text{ (tlak)} \quad k_p = 1 + 0,3n_p(1 + n_p) \quad \text{vendar } k_p \leq 1,0$$

$$\text{za } n_p \leq 0 \text{ (nateg)} \quad k_p = 1$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} \quad n_p = (\sigma_{p,Ed} / f_{y0}) / \gamma_{M5} \quad \gamma_{M5} = 1,0$$

Preglednica 39 Kontrola osne nosilnost stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi							
RMT							
	Element	γ	k_p	k_g	$N_{i,Ed}[\text{kN}]$	$N_{i,Rd}[\text{kN}]$	n
V1	D1	6,68	1,00	1,68	971,55	2070,92	0,47
	V1	6,68	1,00	1,68	661,91	1471,08	0,45
V24	D2	6,68	0,77	1,69	530,63	1394,41	0,38
	V2	6,68	0,77	1,69	458,75	990,53	0,46
V28	D3	6,68	0,57	1,63	104,04	985,09	0,11
	V3	6,68	0,57	1,63	164,54	699,76	0,24
RMK							
V1	D1	6,68	1,00	1,68	978,84	2070,92	0,47
	V1	6,68	1,00	1,68	683,79	1471,08	0,46
V24	D2	6,68	0,77	1,69	537,43	1405,09	0,38
	V2	6,68	0,77	1,69	467,39	998,11	0,47
V28	D3	6,68	0,59	1,63	105,08	987,83	0,11
	V3	6,68	0,59	1,63	166,24	701,71	0,24
RMČ							
V1	D1	6,68	1,00	1,68	987,48	2070,92	0,48
	V1	6,68	1,00	1,68	698,25	1471,08	0,47
V24	D2	6,68	0,79	1,69	571,70	1434,65	0,40
	V2	6,68	0,79	1,69	477,75	1019,11	0,47
V28	D3	6,68	0,64	1,63	155,92	1050,47	0,15
	V3	6,68	0,64	1,63	183,75	746,21	0,25

Projektno upogibna nosilnost stika polnilnega elementa in pasu in nekatere podatke prikazujem v preglednicah 40 in 41 izračunano po spodnjih enačbah.

$$M_{ip,1,Rd} = 4,85 \frac{f_{y0} t_0^2 d_1}{\sin \theta_1} \sqrt{\gamma} \beta k_p / \gamma_{M5} \quad \beta = \frac{d_1 + d_2}{2 \cdot d_0}$$

Preglednica 40 Podatki za kontrola upogibne nosilnost stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi										
RMT										
Voz.	Element	γ	β	$\sin \theta_i$	k_p	$f_{y0}[\text{kN/cm}^2]$	$t_0[\text{cm}]$	$d_0[\text{cm}]$	$d_i[\text{cm}]$	γ_{M5}
V1	D1	6,68	0,38	0,71	1,00	35,50	2,00	26,70	15,24	1,00
	V1	6,68	0,38	1,00	1,00	35,50	2,00	26,70	11,43	1,00
V24	D2	6,68	0,40	0,71	0,77	35,50	2,00	26,70	8,89	1,00
	V2	6,68	0,40	1,00	0,77	35,50	2,00	26,70	8,89	1,00
V28	D3	6,68	0,19	0,71	0,57	35,50	2,00	26,70	5,70	1,00
	V3	6,68	0,19	1,00	0,57	35,50	2,00	26,70	7,61	1,00

Preglednica 41 Kontrola upogibne nosilnosti stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi				
RMT				
Voz.	Element	$M_{ip,i,ed}$	$M_{ip,1,Rd}$	n
V1	D1	753,00	14484,41	0,05
	V1	847,00	7680,36	0,11
V24	D2	137,00	7111,60	0,02
	V2	343,00	5027,90	0,07
V28	D3	8,00	1774,26	0,00
	V3	92,00	1674,74	0,05

5.5.2 Nosilnost proti strižnem preboju

Projektno osno nosilnost proti strižnemu preboju (SIST EN 1993-1-8, preglednica 7.2) in nekatere podatke prikazujem v preglednicah 42 in 43 izračunano po spodnji enačbi.

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 + \sin^2 \theta_i} / \gamma_{M5} \text{ pri } d_i \leq d_0 - 2t_0$$

Preglednica 42 Podatki za kontrolo osne nosilnosti proti preboju stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi								
Voz.	Element	γ_{M5}	$f_{y0} [\text{kN/cm}^2]$	$d_0 [\text{cm}]$	$t_0 [\text{cm}]$	$d_i [\text{cm}]$	$\sin \theta_i$	$d_0 - 2t_0 [\text{cm}]$
V1	D1	1,00	35,50	26,70	2,00	15,24	0,71	22,70
	V1	1,00	35,50	26,70	2,00	11,43	1,00	22,70
V24	D2	1,00	35,50	26,70	2,00	8,89	0,71	22,70
	V2	1,00	35,50	26,70	2,00	8,89	1,00	22,70
V28	D3	1,00	35,50	26,70	2,00	5,70	0,71	22,70
	V3	1,00	35,50	26,70	2,00	7,61	1,00	22,70

Preglednica 43 Kontrola osne nosilnosti proti preboju stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi								
		RMT	RMK	RMČ		RMT	RMK	RMČ
Voz.	Element	$N_{i,Ed} [\text{kN}]$	$N_{i,Ed} [\text{kN}]$	$N_{i,Ed} [\text{kN}]$	$N_{i,Rd} [\text{kN}]$	n	n	n
V1	D1	971,55	978,84	987,48	3327,17	0,29	0,29	0,30
	V1	661,91	683,79	698,25	1471,25	0,45	0,46	0,47
V24	D2	530,63	537,43	571,70	1940,85	0,27	0,28	0,29
	V2	458,75	467,39	477,75	1144,31	0,40	0,41	0,42
V28	D3	104,04	105,08	155,92	1244,41	0,08	0,08	0,13
	V3	164,54	166,24	183,75	979,55	0,17	0,17	0,19

Projektno upogibno nosilnost proti preboju polnilnega elementa in pasu (Preglednica 7.5 SIST EN 1993-1-8) in nekatere podatke prikazujem v preglednicah 44 in 45 izračunane po spodnji enačbi.

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{f_{y0} t_0^2 d_1}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \frac{3 + \sin \theta_1}{4 \sin^2 \theta_1} / \gamma_{M5}$$

Preglednica 44 Podatki za kontrolo upogibne nosilnosti proti preboju stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi							
Voz.	Element	γ_{M5}	$f_{y0}[\text{kN/cm}^2]$	$t_0[\text{cm}]$	$d_i[\text{cm}]$	$\sin \theta_i$	$d_0 - 2t_0[\text{cm}]$
V1	D1	1,00	35,50	2,00	15,24	0,71	22,70
	V1	1,00	35,50	2,00	11,43	1,00	22,70
V24	D2	1,00	35,50	2,00	8,89	0,71	22,70
	V2	1,00	35,50	2,00	8,89	1,00	22,70
V28	D3	1,00	35,50	2,00	5,70	0,71	22,70
	V3	1,00	35,50	2,00	7,61	1,00	22,70

Preglednica 45 Kontrola upogibne nosilnosti proti preboju stika polnilnega elementa in pasu za nosilec s cevmi

Nosilec s cevmi				
RMT				
Voz.	Element	$M_{ip,i,ed}$	$M_{ip,1,Rd}$	n
V1	D1	753,00	14779,10	0,05
	V1	847,00	5355,54	0,16
V24	D2	137,00	5029,00	0,03
	V2	343,00	3239,77	0,11
V28	D3	8,00	2067,42	0,00
	V3	92,00	2373,99	0,04

5.5.3 Kontrola napetosti

Pri $M_{ip,1,Rd}$ in $N_{ip,1,Rd}$ je merodajna manjša vrednost med porušitvijo stene v stiku s polnilnimi palicami in prebojno strižno porušitvijo. Priključki polnilnih palic, izpostavljeni kombiniranemu delovanju upogibnih momentov in osnih sil, morajo zadostiti naslednjemu pogoju. Rezultate kontrol prikazujem v preglednicah 46 do 48, izračunane po spodnjih enačbah.

$$n = \frac{N_{ip,1,Ed}}{N_{ip,1,Rd}} + \left[\frac{M_{ip,1,Ed}}{M_{ip,1,Rd}} \right]^2 \leq 1$$

$$\text{za } n_p > 0 \text{ (tlak)} \quad k_p = 1 + 0,3n_p(1 + n_p) \quad \text{vendar } k_p \leq 1,0$$

$$\text{za } n_p \leq 0 \text{ (nateg)} \quad k_p = 1$$

Preglednica 46 Kontrola kombiniranega delovanja napetosti pri modelu RMT za nosilec s cevmi.

Nosilec s cevmi								
RMT		Obremenitev		Prebojna strižna porušitev		Porušitev stene pasu		
	Element	$N_{i,Ed}[\text{kN}]$	$M_{ip,i,ed}$	$N_{i,Rd}[\text{kN}]$	$M_{ip,1,Rd}$	$N_{i,Rd}[\text{kN}]$	$M_{ip,1,Rd}$	n

se nadaljuje...

...nadaljevanje preglednice 46

V1	D1	971,55	753,00	3327,17	14779,10	2070,92	14484,41	0,47
	V1	661,91	847,00	1471,25	5355,54	1471,08	7680,36	0,47
V24	D2	530,63	137,00	1940,85	5029,00	1394,41	7111,60	0,38
	V2	458,75	343,00	1144,31	3239,77	990,53	5027,90	0,47
V28	D3	104,04	8,00	1244,41	2067,42	985,09	1774,26	0,11
	V3	164,54	92,00	979,55	2373,99	699,76	1674,74	0,24

Preglednica 47 Kontrola kombiniranega delovanja napetosti pri modelu RMK za nosilec s cevmi.

Nosilec s cevmi					
RMK		Obremenitev	Prebojna strižna porušitev	Porušitev stene pasu	
	Element	$N_{i,Ed}$ [kN]	$N_{i,Rd}$ [kN]	$N_{i,Rd}$ [kN]	n
V1	D1	978,84	3327,17	2070,92	0,47
	V1	683,79	1471,25	1471,08	0,46
V24	D2	537,43	1940,85	1405,09	0,38
	V2	467,39	1144,31	998,11	0,47
V28	D3	105,08	1244,41	987,83	0,11
	V3	166,24	979,55	701,71	0,24

Preglednica 48 Kontrola kombiniranega delovanja napetosti pri modelu RMČ za nosilec s cevmi.

Nosilec s cevmi					
RMČ		Obremenitev	Prebojna strižna porušitev	Porušitev stene pasu	
	Element	$N_{i,Ed}$ [kN]	$N_{i,Rd}$ [kN]	$N_{i,Rd}$ [kN]	n
V1	D1	987,48	3327,17	2070,92	0,48
	V1	698,25	1471,25	1471,08	0,47
V24	D2	571,70	1940,85	1434,65	0,40
	V2	477,75	1144,31	1019,11	0,47
V28	D3	155,92	1244,41	1050,47	0,15
	V3	183,75	979,55	746,21	0,25

5.6 Zvari

Za vse varjene spoje sem uporabil čelne zware s polno penetracijo po SIST EN 1993-1-8.

6 KONTROLA POMIKOV

V nacionalnem dodatku k SIST EN 1990 so podani priporočeni kriteriji za upogibke.

Upogibke izračunam pri pogosti kombinaciji v MSU. Rezultate prikazujem v preglednici 49 po spodnji enačbi.

$$w_{max} = \frac{L}{200} = \frac{4000\text{cm}}{200} = 20\text{cm} \quad w_{dej} \leq w_{max}$$

Preglednica 49 Kontrola upogibkov

Nosilec z odprtimi profili		
	$w[\text{cm}]$	$w_{max}[\text{cm}]$
RMT	8,76	20
RMK	8,78	20
RMČ	9,21	20
Nosilec s cevmi		
RMT	9,86	20
RMK	9,90	20
RMČ	10,10	20

DISKUSIJA

Pri izbiri prerezov za nosilec bi se ponovno odločil za prereze iz cevastih profilov z varjenimi spoji. Izkazalo se je, da so postopki za računanje spojev dosti manj komplicirani in bolj transparentni. Pri tradicionalni zasnovi se je treba dodatno ukvarjati z dimenzioniranjem vijakov in vozliščne pločevine. Tu sem moral večkrat interaktivno ponoviti kontrole. Pri ceveh sem se predvsem ukvarjal samo z območjem veljavnosti. Postopki pri tradicionalni zasnovi so dostikrat pomanjkljivi in prepuščeni projektantu. Pri tradicionalni zasnovi se zaradi nesimetričnosti elementov pojavljajo ekscentričnosti, ki dodatno komplicirajo izračune. Že sami vijaki in geometrija zahtevata kar nekaj kontrol. Spoji z vijaki se razlikujejo po številu vijakov in geometriji, zato so potrebni izračuni za vsak spoj posebej, pri cevastih prerezih pa so bile enačbe enake za vsa vozlišča, samo vhodni podatki so bili drugačni. Kar se tiče modeliranja vozlišč bi se ponovno odločil za model RMK, kjer sta pasova kontinuirna nosilca, polnilni elementi pa so členkasto priključeni nanj. Tako pasova prevzameta del obtežbe tudi z upogibnimi momenti medtem, ko se sekundarni momenti ne prenesejo na polnilne elemente. S tem pa se olajša delo.

VIRI

Beg D. 2010. Projektiranje jeklenih konstrukcij v skladu z Evrokodom-3 kratek povzetek. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Beg D., Pogačnik A. 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije.

Kilar V. 2004. Izbira dimenzij osnovnih elementov konstrukcij. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo.

Standardi

SIST EN 1990:2004. Evrokod 0: Osnove projektiranja

SIST EN 1990:2004/A101:2005. Evrokod 0: Osnove projektiranja-Nacionalni dodatek

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

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

SIST EN 1993-1-8:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-8 del: Projektiranje spojev.

SIST EN 1993-1-1:2005/A101:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1 del: Splošna pravila in pravila za stavbe – Nacionalni dodatek.