

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:

Jovanovski, M., 2014. Zagotavljanje horizontalne togosti s pomočjo trapezne pločevine pri enoetažnih jeklenih objektih. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Korelc, J., somentor Može, P.): 108 str.

Datum arhiviranja: 23-01-2015

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:

Jovanovski, M., 2014. Zagotavljanje horizontalne togosti s pomočjo trapezne pločevine pri enoetažnih jeklenih objektih. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Korelc, J., co-supervisor Može, P.): 108 pp.

Archiving Date: 23-01-2015

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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM DRUGE STOPNJE  
GRADBENIŠTVO  
GRADBENE KONSTRUKCIJE**

Kandidat:

**MARKO JOVANOVSKI**

**ZAGOTAVLJANJE HORIZONTALNE TOGOSTI S  
POMOČJO TRAPEZNE PLOČEVINE PRI  
ENOETAŽNIH JEKLENIH OBJEKTIH**

Magistrsko delo št.: 4/II.GR

**STRESSED SKIN DESIGN OF SINGLE STOREY STEEL  
BUILDINGS**

Graduation – Master Thesis No.: 4/II.GR

**Mentor:**

prof. dr. Jože Korelc

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

doc. dr. Primož Može

Ljubljana, 18. 12. 2014

## **IZJAVE**

Podpisani Marko Jovanovski izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom:  
Zagotavljanje horizontalne togosti s pomočjo trapezne pločevine pri enoetažnih jeklenih  
objektih.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 16. 11. 2014

Marko Jovanovski

## BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

**UDK:** 624.014.2(043.2)  
**Avtor:** Marko Jovanovski  
**Mentor:** prof. dr. Jože Korelc  
**Somentor:** doc.dr. Primož Može  
**Naslov:** Zagotavljanje horizontalne togosti s pomočjo trapezne pločevine pri enoetažnih jeklenih objektih  
**Tip dokumenta:** Magistrsko delo  
**Obseg in oprema:** 108 str., 19 pregl., 69 sl., 118 en.  
**Ključne besede:** trapezna pločevina, diafragma, stabilnost okvirjev, enoetažna jeklena konstrukcija

### Izvleček

Magistrsko delo obravnava problem zagotavljanja horizontalne togosti pri enoetažnih jeklenih objektih. V prvem delu je nanizanih nekaj statičnih sistemov, ki zajemajo omenjeno problematiko. Nato se podrobneje usmerimo na zagotavljanje horizontalne togosti z uporabo jeklene trapezne pločevine. Le-ta prevzema horizontalne in vertikalne obremenitve, poleg tega pa je konstrukcija pri takem sistemu hkrati tudi pokrita. Opisana sta dva tipična primera. Prvi opisuje trapezno pločevino pritrjeno na primarne nosilce, drugi pa na sekundarne nosilce. Nato prikažemo glavne detajle, saj so ti merodajni pri kriteriju določanja nosilnosti diafragme. V drugem delu je obravnavana enoetažna jeklena konstrukcija, ki je prekrita z jekleno trapezno pločevino. Konstrukcija je sestavljena iz 10 jeklenih okvirjev, tlorisnih dimenzij 20 x 45 m. Prikazani so postopki dimenzioniranja, ki jih podaja publikacija *ECCS* (*ECCS*, 1995) in avtor *T. Höglund* (*Höglund*, 2002). Obravnavali smo tudi dodatne obtežbe zaradi možnosti bočne zvrnitve primarnih nosilcev, izračunali pa smo jih s pomočjo publikacije *ECCS* in avtorja *L. Sokol-a*. Dimenzionirali smo tudi pritrtilna sredstva in obravnavali interakcijo med okvirji in trapezno pločevino. Pri dimenzioniranju smo želeli doseči majhno maso konstrukcije.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 624.014.2(043.2)  
**Author:** Marko Jovanovski  
**Supervisor:** Prof. Jože Korelc, Ph. D.  
**Co-supervisor:** Assist. Prof. Primož Može, Ph. D.  
**Title:** Stressed Skin Design of single storey steel buildings  
**Document type:** Master`s Thesis  
**Scope and tools:** 108 p., 19 tab., 69 fig., 118 eq.  
**Keywords:** corrugated steel sheet, diaphragm action, frame stability, one-story steel building

### **Abstract**

Master`s thesis addresses problem of stressed skin design of one storey steel buildings. The first part deals with different structural systems, where stressed skin design is used to provide the horizontal stiffness. The stiffness is provided by the profiled sheeting that is the main structural element in the roof structure. There are two cases described. The first one, where the profile sheeting is fastened to the rafter and second one, where the sheeting is fastened to the purlins. Further on, the details are described that are relevant for diaphragm bearing capacity. The second part deals with an example of single storey steel building, where the stressed skin design is performed. The plan of the building is 20 by 45 meters. Ten frames are placed in the short direction. The stressed skin design is described according to publication *ECCS* (ECCS, 1995) and according to *Höglund* (Höglund, 2002). The profiled sheeting was also used as the support to prevent lateral buckling of the rafters. The design of fasteners and the interaction between main frames and profiled sheeting is presented. The objective was to achieve low weight of the structure.

## ZAHVALA

Rad bi se zahvalil mentorju prof. dr. Jožetu Korelcu za pomoč pri magistrskem delu. Posebno se zahvaljujem somentorju doc. dr. Primožu Možetu za nasvete, pomoč in usmerjanje ob pisanju magistrskega dela. Zahvalil bi se tudi ostalim sodelavcem na katedri za metalne konstrukcije, predvsem pokojnemu prof. dr. Darku Begu, ki mi je dal drugačen pogled na jeklene konstrukcije.

Zahvaljujem se tudi dr. Leonu Hladniku in Thomasu Andersenu M.Sc. za strokovno podporo in pomoč pri pridobivanju tehničnih podatkov.

Zahvalil bi se tudi družini, prijateljem, sošolcem in vsem bližnjim, ki ste mi ob študiju stali ob strani. Posebna zahvala pa gre tebi Eva, ki si mi tudi v težjih trenutkih dajala potreben navdih.

## KAZALO VSEBINE

Izjave	I
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	II
Bibliographic-documentalistic information and abstract	III
Zahvala	IV
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 Zagotavljanje stabilnosti v okvirjih, zasnove diafragme in prenosi obtežb</b>	<b>2</b>
2.1 Zagotavljanje stabilnosti v jeklenih okvirjih	2
2.2 Tipi diafragm s trapezno pločevino	5
2.2.1 Diafragma pritrjena na primarne nosilce – obremenitev vzdolž konstrukcije – tip diafragme D1	7
2.2.2 Diafragma pritrjena na sekundarne nosilce – obremenitev vzdolž konstrukcije – tip diafragm D2	11
2.3 Prenos obtežb v prečni smeri	13
2.3.1 Pločevina pritrjena na primarne nosilce	13
2.3.2 Pločevina pritrjena na sekundarne nosilce	15
2.3.3 Prenos obtežb v vertikalna zavetrovanja	16
2.4 Prenos osne sile v diafragmo	19
2.5 Načrtovanje nosilnosti	21
2.6 Interakcija med diafragmo in okvirji	23
2.7 Načini pritrjevanja	26
2.7.1 Pritrdilna sredstva	26
2.7.2 Trapezna pločevina pritrjena neposredno na primarne ali na čelne nosilce	27
2.7.3 Trapezna pločevina pritrjena na sekundarne nosilce	29
2.8 Trapezna pločevina kot bočna podpora nosilcev	30
2.9 Odprtine v diafragmi	31
2.10 Obremenitve	35
2.11 Podajnost diafragme	37
2.11.1 Na sekundarne nosilce	37
2.11.2 Na primarne nosilce	38
<b>3 Dimenzioniranje profilirane pločevina in vseh pritrditev</b>	<b>39</b>
3.1 Splošno	39
3.2 Dimenzioniranje trapezne pločevine po publikaciji ECCS	39
3.2.1 Dimenzioniranje trapezne pločevine pritrjene neposredno na primarne nosilce	39

3.2.2	Dimenzioniranje trapezne pločevine pritrjene na sekundarne nosilce	44
3.3	Dimenzioniranje trapezne pločevine po Höglundu	48
3.3.1	Profilirana pločevina	49
3.3.1.1	Individualni element	49
3.3.1.2	Deformacije na robu profilirane pločevine	50
3.3.1.3	Potrebne kontrole pri vmesni podpori	52
3.3.1.4	Osne sile v profilirani pločevini	52
3.3.2	Robni nosilci	53
3.3.3	Povezave med pločevinami in pritrditve	53
3.4	Podajnost diafragme	59
3.4.1	Pločevina pritrjena na primarne nosilce	59
3.4.2	Diafragma pritrjena na sekundarne nosilce	64
3.5	Prenos izbočnih sil zaradi bočne zvrnitve profilov na diafragmo	66
3.5.1	Diafragma pritrjena na primarne nosilce	66
3.5.2	Iteracijski postopek	67
3.5.3	Analiza po teoriji minimalne potencialne energije	70
3.5.4	Diafragma pritrjena na sekundarne nosilce	74
<b>4</b>	<b>Primer</b>	<b>77</b>
4.1	Splošno	77
4.2	Zasnova	77
4.3	Obtežbe	79
4.4	Dimenzioniranje primarnih nosilcev	82
4.5	Profilirana pločevina in vijaki	87
4.6	Dimenzioniranje profilirane pločevine	88
4.6.1	Določitev notranjih statičnih količin za trapezno pločevino:	89
4.6.2	Dodatna obtežba zaradi bočne zvrnitve primarnih nosilcev	91
4.6.3	Preverjanje pogojev	92
4.6.4	Osna sila v trapezni pločevini	94
4.7	Dimenzioniranje pritrditev	96
4.7.1	Stranski šivi	96
4.7.2	Priključitev na robni nosilec	97
4.7.3	Priključitev robne ojačitve in trapezne pločevine na robu objekta	97
4.7.4	Priključitev trapezne pločevine na čelni nosilec	98
4.7.4.1	Veter vzdolžno na objekt	99
4.7.4.2	Veter prečno na objekt	100
4.7.5	Povezava med trapezno pločevino in primarnim nosilcem	100



4.7.6	Deformacije v diafragmi	101
4.8	Dimenzioniranje diafragme po ECCS-u	103
4.9	Potresna obremenitev	105
<b>5</b>	<b>Zaključek</b>	<b>106</b>
	<b>PRILOGA</b>	<b>111</b>
<b>VIRI</b>	<b>108</b>	

**KAZALO PREGLEDNIC**

<b>Preglednica 1:</b>	<b>Odprtine v diafragmi</b>	<b>33</b>
<b>Preglednica 2:</b>	<b>Merodajne obtežne kombinacije</b>	<b>35</b>
<b>Preglednica 3:</b>	<b>Faktorji odvisni od števila nosilcev</b>	<b>46</b>
<b>Preglednica 4:</b>	<b>Faktorji odvisni od števila vijakov, ki povezujejo pločevino in nosilec</b>	<b>46</b>
<b>Preglednica 5:</b>	<b>Označba nosilnosti profilirane pločevine</b>	<b>48</b>
<b>Preglednica 6:</b>	<b>Označba za obremenitve</b>	<b>48</b>
<b>Preglednica 7:</b>	<b>Priporočeno minimalno število vijakov</b>	<b>54</b>
<b>Preglednica 8:</b>	<b>Izračun bočnih pritiskov pri vijakih</b>	<b>55</b>
<b>Preglednica 9:</b>	<b>Izračun bočnih pritiskov pri žičnikih</b>	<b>56</b>
<b>Preglednica 10:</b>	<b>Nosilnost pločevine na bočni pritisk za vijak premera 6,3 mm</b>	<b>57</b>
<b>Preglednica 11:</b>	<b>Vrednosti za faktor K v primeru pritrditve v vsakem koritu</b>	<b>62</b>
<b>Preglednica 12:</b>	<b>Vrednosti za faktor K v primeru pritrditve v vsakem drugem koritu</b>	<b>63</b>
<b>Preglednica 13:</b>	<b>Strižne nosilnosti in podajnosti določenih primerov spojev med primarnimi in sekundarnimi nosilci</b>	<b>64</b>
<b>Preglednica 14:</b>	<b>Stalna obtežba strehe</b>	<b>79</b>
<b>Preglednica 15:</b>	<b>Notranje statične količine v primarnem nosilcu</b>	<b>81</b>
<b>Preglednica 16:</b>	<b>Vrednosti faktorjev <math>\psi</math></b>	<b>82</b>
<b>Preglednica 17:</b>	<b>Izračun primarnega profila na bočno zvrnitev</b>	<b>84</b>
<b>Preglednica 18:</b>	<b>Preglednica karakteristik in izkoriščenosti</b>	<b>86</b>
<b>Preglednica 19:</b>	<b>Obtežbe in pomiki pri MSU za primarni nosilec</b>	<b>87</b>

## KAZALO SLIK

<b>Slika 1: Tipi zagotavljanja stabilnosti v jeklenih okvirjih v prečni smeri</b>	<b>3</b>
<b>Slika 2: Primer klasičnega zavetrovanja v enoetažnih jeklenih halah</b>	<b>3</b>
<b>Slika 3: Zasnova konstrukcije v primeru členkastih povezav</b>	<b>4</b>
<b>Slika 4: Zasnova konstrukcije v primeru ko so stebri vpeti v temelje</b>	<b>4</b>
<b>Slika 5: Tip diafragme, kjer je pločevina pritrjena neposredno na primarne nosilce</b>	<b>6</b>
<b>Slika 6: Tip diafragme, kjer je pločevina pritrjena na sekundarne nosilce</b>	<b>6</b>
<b>Slika 7: Momenti in prečne sile v linijskem nosilcu</b>	<b>7</b>
<b>Slika 8: Analogija med I ali H profilom in prerezom v konstrukciji</b>	<b>8</b>
<b>Slika 9: Prikaz strižnega tok v trapezni pločevini</b>	<b>9</b>
<b>Slika 10: Analogija med kvadratnim prerezom in prerezom v konstrukciji</b>	<b>10</b>
<b>Slika 11: Strižni tok v diafragmi pritrjeni na sekundarne nosilce</b>	<b>11</b>
<b>Slika 12: Obremenitve v diafragmi brez ojačitve na robu</b>	<b>12</b>
<b>Slika 13: Prenos obtežb v diafragmi zaradi prečne obtežbe</b>	<b>14</b>
<b>Slika 14: Prenos obtežb v diafragmi zaradi prečne obtežbe</b>	<b>16</b>
<b>Slika 15: Prenos obtežb primeru dveh prečnih in enega vzdolžnega zavetrovanja – primer a</b>	<b>17</b>
<b>Slika 16: Prenos obtežb primeru dveh vzdolžnih in enega prečnega zavetrovanja – primer b</b>	<b>19</b>
<b>Slika 17: Prenos horizontalne sile v diafragmo</b>	<b>20</b>
<b>Slika 18: Tipični strižni panel</b>	<b>22</b>
<b>Slika 19: Podajnost okvirja in trapezne pločevine</b>	<b>24</b>
<b>Slika 20: Horizontalna obtežba vetra na diafragmo</b>	<b>25</b>
<b>Slika 21: Horizontalna obtežba zaradi žerjava</b>	<b>25</b>
<b>Slika 22: Vrste vijakov za pritrjevanje trapezne pločevine</b>	<b>26</b>
<b>Slika 23: Pritrditev trapezne pločevine na primarni nosilec</b>	<b>27</b>
<b>Slika 24: Pritrditev trapezne pločevine na primarni nosilec ob prekrivanju</b>	<b>28</b>
<b>Slika 25: Robna pritrditev trapezne pločevine</b>	<b>28</b>

<b>Slika 26: Primer pritrjevanje trapezne pločevine z ojačitvijo iz brez na robu konstrukcije</b>	<b>28</b>
<b>Slika 27: Stranski šivi</b>	<b>29</b>
<b>Slika 28: Strižna ojačitev pri trapezni pločevini pritrjeni na sekundarne nosilce</b>	<b>29</b>
<b>Slika 29: Ojačitev slemena</b>	<b>30</b>
<b>Slika 30: Glavne napetosti v pločevini kjer odprtine nimajo ojačitev</b>	<b>31</b>
<b>Slika 31: Glavne napetosti v pločevini z odprtinami (z in brez ojačitev)</b>	<b>31</b>
<b>Slika 32: Sile v robnih nosilcih</b>	<b>32</b>
<b>Slika 33: Obremenitve na nosilce pri odprtini</b>	<b>34</b>
<b>Slika 34: Ojačitev v odprtini</b>	<b>35</b>
<b>Slika 35: Parcialni koeficienti za kombinacijo obtežb pri mejnem stanju</b>	<b>36</b>
<b>Slika 36: Deformacije v diafragmi – zaporedni sistem</b>	<b>38</b>
<b>Slika 37: Potek dimenzioniranja diafragme po ECCS za trapezno pločevino pritrjeno neposredno na primarne nosilce</b>	<b>43</b>
<b>Slika 38: Potek dimenzioniranja diafragme po ECCS za trapezno pločevino pritrjeno na sekundarne nosilce</b>	<b>47</b>
<b>Slika 39: Prikaz obremenitev v trapezni pločevini</b>	<b>49</b>
<b>Slika 40: Lokalno izbočenje pasnic (zgoraj in spodaj) in stojin zaradi strižne sile</b>	<b>49</b>
<b>Slika 41: Deformacije na robu profilirane pločevine v primeru pritrditve v vsakem koritu</b>	<b>50</b>
<b>Slika 42: Strižne deformacije na robu panela v primeru pritrditve pasnic (zgornje in spodnje)</b>	<b>51</b>
<b>Slika 43: Deformacije na robu panela v primeru fiksiranja v vsaki drugi spodnji pasnici</b>	<b>51</b>
<b>Slika 44: Lokalni vnos prečne sile</b>	<b>52</b>
<b>Slika 45: Ojačitve na robu konstrukcije</b>	<b>53</b>
<b>Slika 46: Možne strižne porušitve vijakov</b>	<b>55</b>
<b>Slika 47: Obremenitve na vijake nad primarnim nosilcem</b>	<b>57</b>
<b>Slika 48: Razlika strižnih sil med polji</b>	<b>58</b>

<b>Slika 49: Redukcija izvlečne sile zaradi pozicije vijakov in zakovic</b>	<b>59</b>
<b>Slika 50: Primer primarnega bočno podprtega paličnega nosilca</b>	<b>66</b>
<b>Slika 51: Sistem, ki vključuje primarni nosilec in diafragma</b>	<b>68</b>
<b>Slika 52: Nosilec v tlaku, ki je stabiliziran preko prečne obtežbe</b>	<b>68</b>
<b>Slika 53: Dodatne deformacije nosilca pod tlačno obremenitvijo</b>	<b>69</b>
<b>Slika 54: Nosilec na elastični podlagi</b>	<b>71</b>
<b>Slika 55: Model deformacij končnih elementov v diafragmi</b>	<b>71</b>
<b>Slika 56: Pomik na koncu nosilca zaradi povečanih deformacij</b>	<b>73</b>
<b>Slika 57: Hladno oblikovani profili</b>	<b>74</b>
<b>Slika 58: Deformacije sekundarnega nosilca v upogibu in torziji</b>	<b>76</b>
<b>Slika 59: 3D pogled objekt</b>	<b>77</b>
<b>Slika 60: Tloris objekta</b>	<b>78</b>
<b>Slika 61: Prerez objekta</b>	<b>78</b>
<b>Slika 62: Konstrukcijski sklop strehe</b>	<b>79</b>
<b>Slika 63: Prečni in vzdolžni prerez polovice primarnega nosilca</b>	<b>82</b>
<b>Slika 64: Graf momenta v primarnem nosilcu</b>	<b>85</b>
<b>Slika 65: Graf prečne sile v primarnem nosilcu</b>	<b>85</b>
<b>Slika 66: Graf izkoriščenosti primarnega nosilca</b>	<b>85</b>
<b>Slika 67: Podatki o profilirani pločevini</b>	<b>87</b>
<b>Slika 68: Obtežba vzdolž konstrukcije</b>	<b>90</b>
<b>Slika 69: Obremenitev prečno na konstrukcijo</b>	<b>91</b>



## 1 UVOD

Jeklo poleg betona predstavlja enega izmed najpogosteje uporabljenih materialov nosilnih konstrukcij. Pri najrazličnejših enoetažnih objektih, kot so športne ali industrijske hale, se investitorji pogosto odločajo za jekleno izvedbo. Vlagatelji pričakujejo in zahtevajo ekonomično ter hitro gradnjo, vendar ne na račun kakovostne izvedbe. Ekonomičnost lahko dosežemo s kar nekaj dejavniki, kot sta manjša teža vgrajenega materiala in hitra gradnja.

Najpogosteje klasična gradnja potek v naslednjih korakih. Po pripravi temeljev in vgradnji jeklenih okvirjev se vgradi tako horizontalna kot vertikalna zavetrovanja in nato pokrije streho z različnimi kritinami, kot so profilirana pločevina ali sendvič paneli.

Obstaja pa tudi možnost, da se horizontalna ali vertikalna zavetrovanja ne vgrajujejo ampak namesto le-teh vgradimo profilirano pločevino s katerimi zagotovimo bočno podpiranje nosilcev, prenos vertikalnih in horizontalnih obtežb in hkrati z njimi prekrijemo konstrukcijo. S tem, ko ne vgradimo strešnega zavetrovanja, privarčujemo na teži jeklene konstrukcije in pri času dimenzioniranja ter izdelavi detajlov, kar posledično pomeni, bolj ekonomično gradnjo. Druga prednost takega sistema je tudi hitrost izvedbe. V primeru, ko bi morali v konstrukcijo vgrajevati zavetrovanja, bi tako časovno podaljšali gradnjo in s tem povečali same stroške. V drugem primeru, ko pa vgradimo trapezno pločevino direktno na primarne ali sekundarne nosilce pa imamo v enem koraku zagotovljeno zavetrovanje in pokrito konstrukcijo. Nekateri avtorji ocenjujejo, da s takim sistemom gradnje lahko privarčujemo tudi do 18 % na teži konstrukcije (G. De Matteis, R. Landolfo, F. M. Mazzolani, 1998) in pridobimo na času. Sistem, v katerem trapezno pločevino ali sendvič panele uporabljamo namesto vertikalnega zavetrovanja, se v praksi ni uveljavil oziroma se uporablja precej redko. Avtorji opozarjajo, da kadar trapezno pločevino zajamemo v statično analizo, se le-ta obravnava kot del nosilne konstrukcije in se jih brez vednosti odgovornega projektanta ne sme odstranjevati.

Tak sistem se lahko uporablja tudi v večnadstropnih stavbah, vendar so se v praksi bolj uveljavile enoetažne konstrukcije.

Sendvič paneli so sestavljeni iz dveh slojev pločevine, med katerima je običajno toplotna izolacija. Panel lahko obravnavamo kot kompozit (interakcija med pločevinama, toplotno izolacijo in veznim sredstvom med njima), zaradi česar dosežemo velike razpone z majhno težo panelov, obenem pa dobro toplotno izolacijo konstrukcije. Problem sendvič panelov je stikovanje med njimi in stiki s primarno konstrukcijo. Ker je težko zagotavljati dovolj veliko

togost detajlov, se tak sistem redkeje uporablja. V praksi se je bolj uveljavila trapezna pločevina, kateri se bomo podrobneje posvetili v nadaljevanju.

Glavni problem takega sistema se nanaša na samo statično analizo. V nadaljevanju bomo raziskali na kakšen način se dimenzionira pločevino, saj mora le-ta prevzeti ne samo vertikalno obtežbo snega, ampak tudi sile, ki nastanejo zaradi vetra, vztrajnostnih sil (potresna obtežba), izbočnih ter zavornih sil pri lahkih žerjavnih progah (pri klasični gradnji le-te prevzemajo horizontalna zavetrovanja).

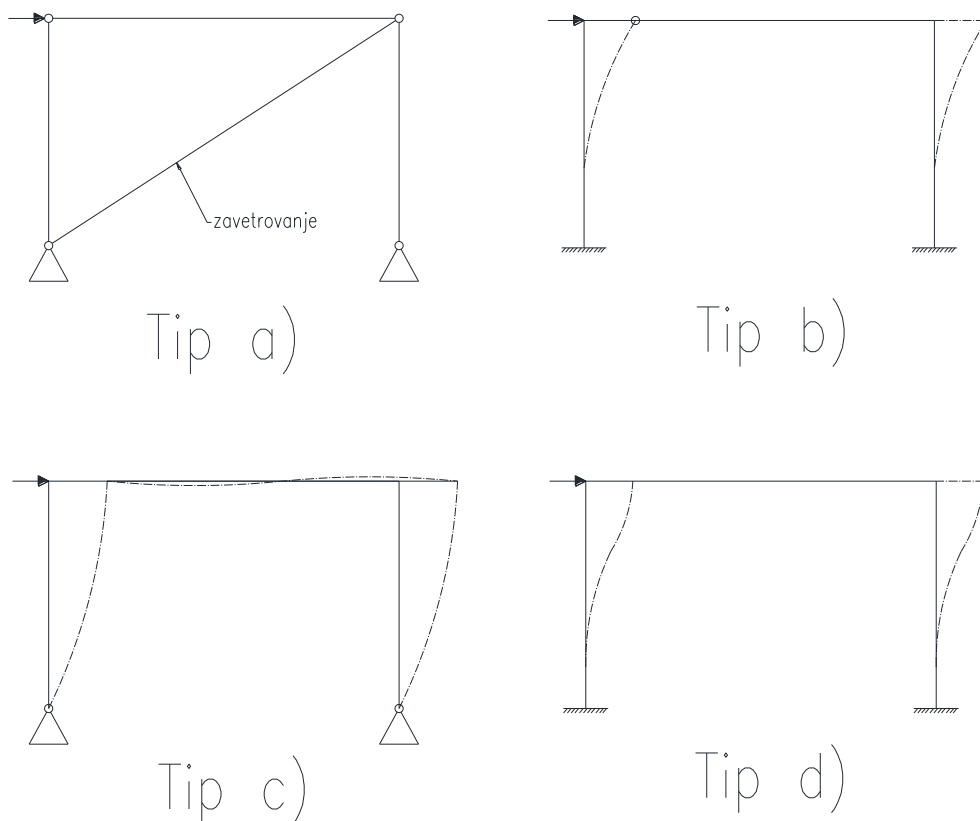
V magistrskem delu smo se usmerili predvsem na področje obnašanja jeklenih profiliranih pločevin pri horizontalni obtežbi. V evropski literaturi se omenjen pojav označuje z angleškim terminom »Stressed Skin Design«, v severni Ameriki pa se uporablja termin »Diaphragm Design«. V drugem delu magistrskega dela smo izračunali praktičen primer enoetažne hale, ki vsebuje trapezno pločevino, ta pa predstavlja diafragmo konstrukcije.

## **2 Zagotavljanje stabilnosti v okvirjih, zasnove diafragme in prenosi obtežb**

### **2.1 Zagotavljanje stabilnosti v jeklenih okvirjih**

V splošnem poznamo štiri načine, ki jih uporabljamo pri zagotavljanju stabilnosti v jeklenih okvirjih, le-ti pa so prikazani na sliki 1. V vseh nanizanih primerih na sliki 1 moramo zagotoviti tudi vertikalno in horizontalno zavetrovanje vzdolž objekta kot je prikazano na sliki 2. Le-ti nam pomagajo pri prenosu horizontalne obtežbe v temelje. Druga naloga zavetrovanj je tudi bočno podpiranje primarnih nosilcev, kjer zavetrovanje preprečuje izbočitev zgornje tlačene pasnice.

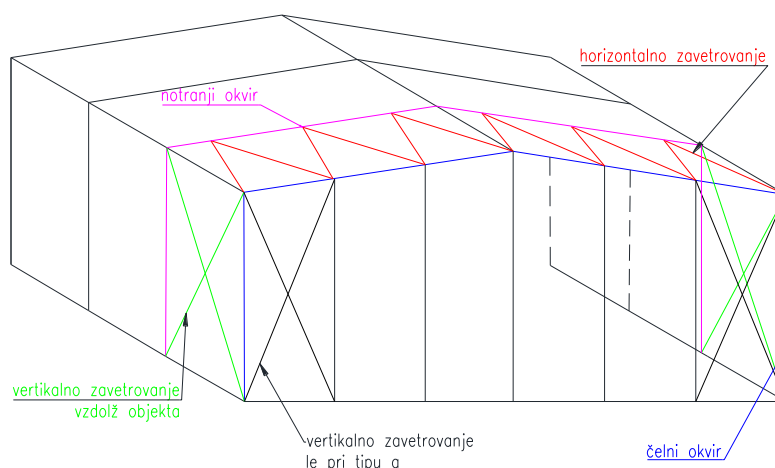




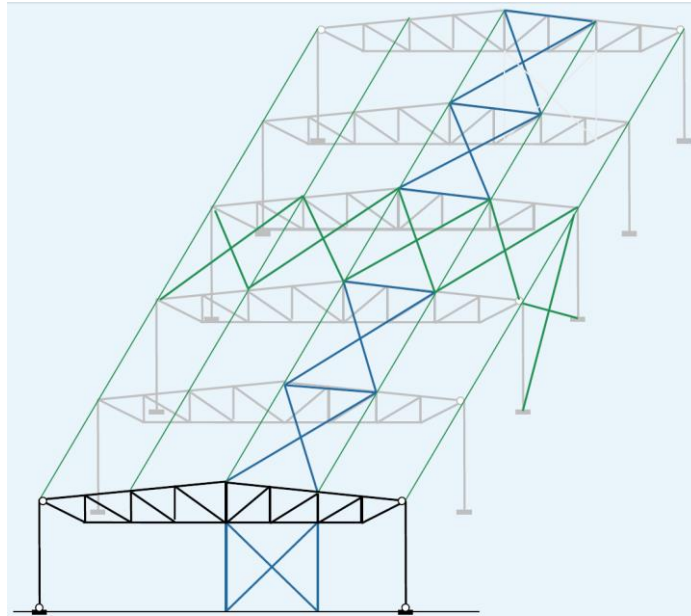
### Načini stabilizacije v okvirjih

Slika 1: Tipi zagotavljanja stabilnosti v jeklenih okvirjih v prečni smeri

Na sliki 1 pri tipu a) je prikazan okvir, ki je členkasto priključen v podporah in tudi povezava med stebrom in prečko je členkasta. Take vrste okvirja nima nobene horizontalne togosti in je nestabilen. Zato vgradimo zavetrovanje, ki nam omogoča prevzem horizontalne obtežbe in s tem sistem postane statično določen. Okvir s povezji se namesti v čelni okvir, notranji okvirji pa ostanejo brez diagonale, torej so sami po sebi nestabilni. Zato je potrebno horizontalne obremenitve prenesti na čelna okvirja in z njima zagotoviti stabilnost konstrukcije (slika 2 in 3).

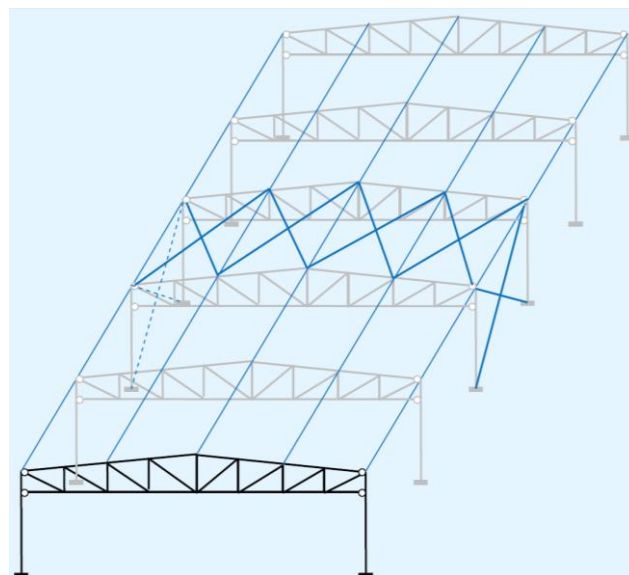


Slika 2: Primer klasičnega zavetrovanja v enoetažnih jeklenih halah



Slika 3: Zasnova konstrukcije v primeru členkastih povezav

Drugi način zagotavljanja stabilnosti v okvirjih je tak, da je okvir spodaj nepomično vpet zgoraj pa je členkasto priključen na prečko (slika 1-tip b). V takem primeru horizontalne sile prevzamejo konzolni stebri. Ta sistem se redko uporablja, saj so stroški, ki nastanejo zaradi potrebe po velikih temeljih večji, kot če togost zagotavljamo z momentnim spojem med prečko in stebrom kot prikazuje tip c na sliki 1. Vendar je teža jeklene konstrukcije v primerjavi s tipom b večja. Prednost v primerjavi s tipom a je v tem, da ni potrebno vgrajevati dodatnih zavetrovanj v ravnini okvirjev, vendar morajo biti še zmeraj vgrajena horizontalna zavetrovanja, ki zagotavljajo prenos obtežb s strehe preko povezij ali stebrov naprej v temelje (če je obtežba prečno na konstrukcijo se prenese v povezje, sicer v stebre).



Slika 4: Zasnova konstrukcije v primeru ko so stebri vpeti v temelje

Tretji način (tip c) je najbolj pogost način zagotavljanje stabilnosti okvirjev v praksi. Taka konstrukcija je v svoji ravnini stabilna in ni potrebe po vgrajevanju dodatnih zavetrovanj v ravnini okvirjev. Prednost pred tipoma a in b na sliki 1 je, da v prečki nastanejo tako pozitivni kot negativni momenti, kar pomeni veliko manjše obremenitve prečke v sredini razpona in zaradi tega manjše profile pri enakem razponu. Konstrukcija, ki je grajena z okvirji tipa c, potrebujejo za stabilizacijo konstrukcije strešna zavetrovanja in vertikalna zavetrovanja v vzdolžni smeri konstrukcije (podobno kot je prikazano na sliki 4).

Zadnji tip zasnove pa je tak, da so povezave med prečkami, stebri in temelji povsod toge. To sicer pomeni večjo statično nedoločenost, kar je v osnovi boljše in tudi profili so manjši zaradi tega, vendar je enako kot pri tipu b, kjer moramo zagotavljati velike temelje zaradi momenta, ki nastane v njih in tudi spoji morajo biti polno-nosilni tako, da prevzamejo obremenitve, ki nastanejo zaradi momenta. Od vseh štirih primerov ima primer d največjo togost, vendar tudi tak sistem potrebuje strešno zavetrovanje in vertikalno zavetrovanje vzdolž objekta. Tip d ima najmanjšo težo izmed vseh nanizanih na sliki 1, vendar ima najzahtevnejše stike.

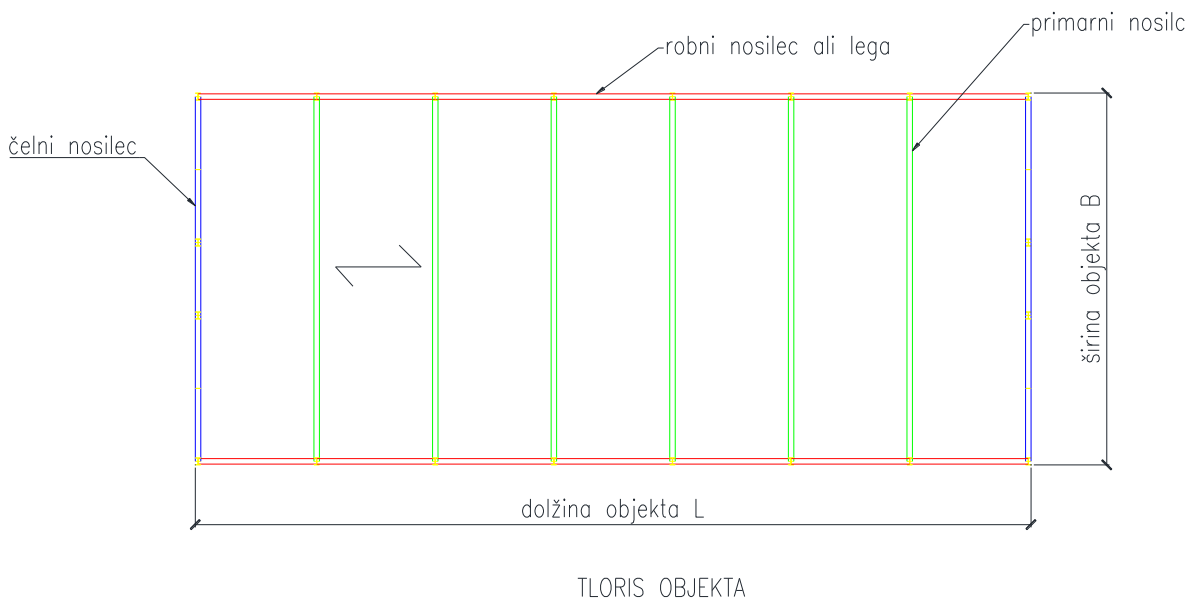
Diafragmo v strehi lahko zagotovimo s povezji. Ti bi morali biti pozicionirani v vseh poljih, kar pa ni ekonomično. Zato običajno strešna konstrukcije sama po sebi ne zagotavlja toge diafragme, kar načeloma pomeni, da pri potresni obtežbi vsak okvir niha zase. Slabost konstrukcije, ki nima toge diafragme je tudi pri prerazporejanju obtežb, saj se le-te kadar je v konstrukcijo vgrajena diafragma boljše prerazporedijo. Prav zaradi tega je smiselno uporabiti trapezno profilirano jekleno pločevino, ki je bolj toga kot povezja ter je razporejena preko celotne strehe in prav zaradi tega lahko tvori diafragmo. Prednost takšne zasnove lahko pripišemo k prispevku pločevin, ki pripomorejo k večji togosti in nosilnosti okvirjev, predvsem togost in nosilnost v strigu.

V naslednjem poglavju bomo predstavili kako se zgoraj omenjeni tip a obnaša in kakšne tipe zasnove diafragme s trapeznimi pločevinami še poznamo. V tip a pa smo se usmerili, ker nam ta omogoča najmanjšo težo izmed naštetih.

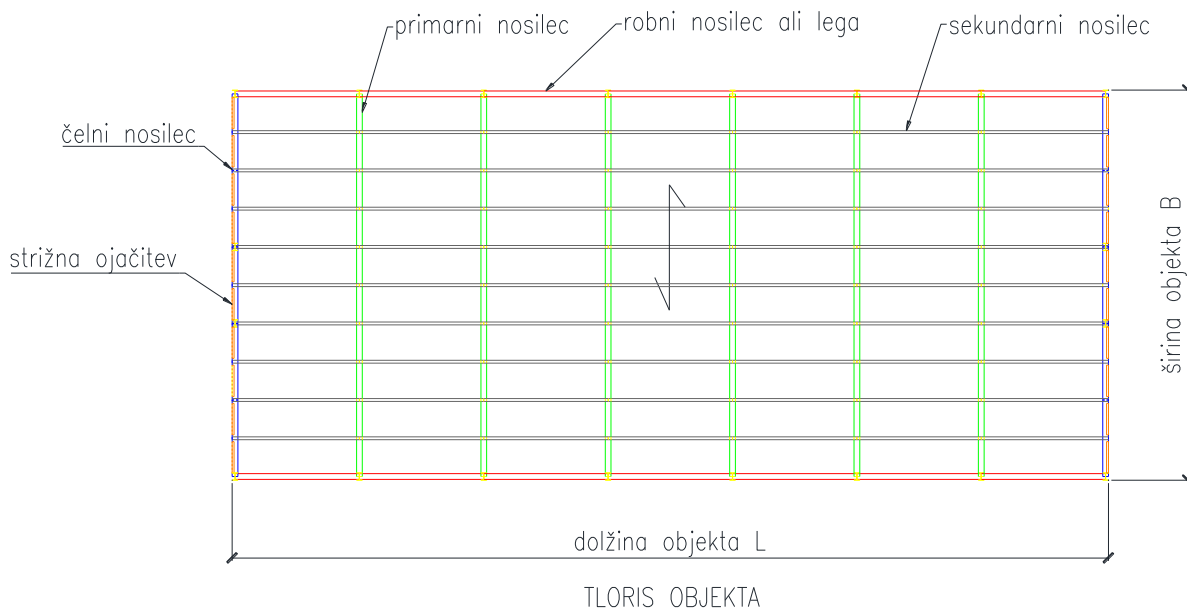
## **2.2 Tipi diafragm s trapezno pločevino**

Diafragmo sestavljajo trapezna profilirana pločevina, robni nosilci, čelni nosilci in seveda povezave med njimi. Na sliki 5 so robni nosilci označeni z rdečo barvo, čelni nosilci z modro barvo, primarni nosilci z zeleno barvo in smer trapezne pločevine s puščico. To je primer, v katerem je trapezna pločevina postavljena neposredno na primarne nosilce. Drugi primer zasnove diafragme pa je tak, da je profilirana pločevina postavljena na sekundarne nosilce (slika 6). Barve za določene elemente so enake tudi v tem primeru vendar so dodatno s sivo barvo označeni sekundarni nosilci in z oranžno strižne ojačitve, ki so v takem primeru skoraj nujne, več o tem pa bomo razložili v kasnejših poglavjih. Za primarne nosilce se v obeh

primerih običajno uporablja vroče valjane ali varjene I ali H profile, lahko pa se uporabi tudi škatlasti prerez ali palični nosilec. Za sekundarne nosilce pa se uporablja manjše škatlaste prereze ali pa hladno oblikovani C, Z,  $\Sigma$ , U ali podobni prerezi. Lahko uporabimo tudi vroče valjane profile vendar so običajno obremenitve na sekundarne nosilce majhne, zato bi bila uporaba omenjenih profilov neekonomična. Pri ojačitvah se velikokrat uporabljajo različni hladno oblikovani profili ali pa se uporabi pločevino, ki jo oblikujejo po meri (predvsem za ojačitve na robu. Standard SIST EN 1993-1-3 pravi, da za nosilni sistem trapeznih pločevin lahko uporabljamo le jeklene pločevine.



Slika 5: Tip diafragme, kjer je pločevina pritrjena neposredno na primarne nosilce

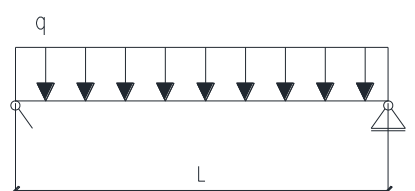


Slika 6: Tip diafragme, kjer je pločevina pritrjena na sekundarne nosilce

## 2.2.1 Diafragma pritrjena na primarne nosilce – obremenitev vzdolž konstrukcije – tip diafragme D1

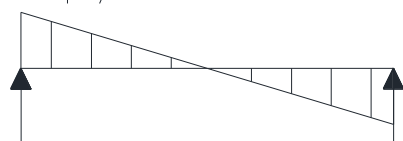
Osnovni sistem nosilne konstrukcije pri diafragmah, ki so pritrjene neposredno na primarne nosilce, je podoben kot pri linijskem prosto-ležečem nosilcu, ki ima obliko prereza I ali H in nanj deluje linijska konstantna obtežba. Zato lahko notranje statične količine določimo na enak način (slika 7). Momenta linija je v linijskem nosilcu v obliki kvadratne parabole, pri konstrukciji pa je odsekoma linearen. Ker vemo, da je prečna sila odvod momenta, morajo biti prečne sile odsekoma konstantne. Obremenitve v prečnem prerezu konstrukcije so enake kot pri linijskem nosilcu. Pasnici v objektu predstavljata robna nosilca (na sliki 7 so označene z rdečo barvo), trapezna pločevina pa se obnaša podobno kot stojina pri nosilcu. Tak sistem deluje kot visok I ali H profil, torej se osne sile preko momenta preneseta na robna nosilca in tako ena prevzame natezne obremenitve druga pa tlačne, strig pa prevzame profilirana pločevina (slika 8) . Reakcije prevzameta čelna nosilca, ki sta na sliki 7 obarvana z modro barvo.

Linijski nosilec



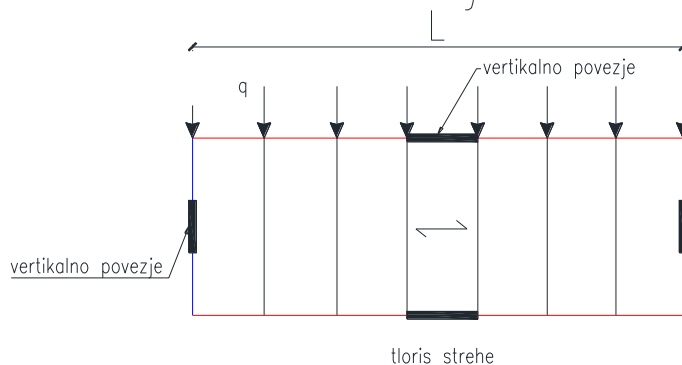
$$M = q \cdot L^2 / 8$$

$$V = q \cdot L / 2$$

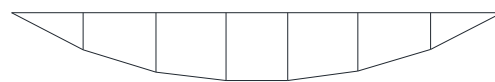


$$R = q \cdot L / 2$$

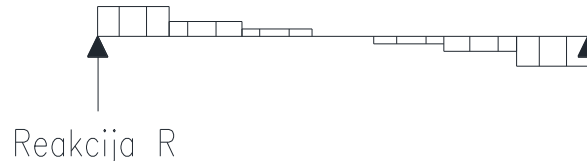
Konstrukcija



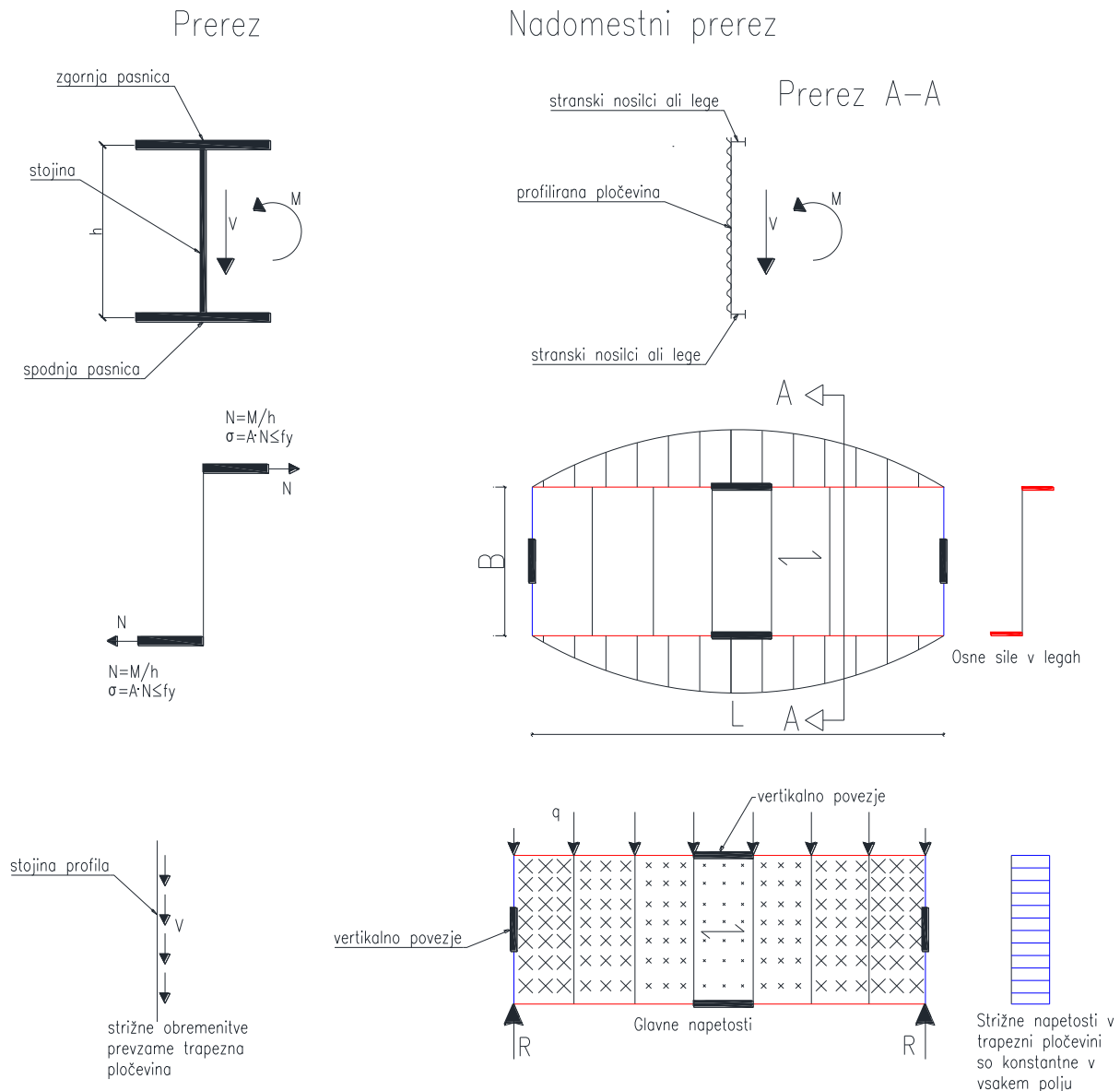
Moment M



Strižna sila V



Slika 7: Momenti in prečne sile v linijskem nosilcu



Slika 8: Analogija med I ali H profilom in prerezom v konstrukciji

Strižne sile, ki se prenesejo v trapezno pločevino so prikazane kot glavne napetosti v pločevini, kar ponazarjajo križci na sliki 8 spodaj. Strižne napetosti po višini so po poljih približno enakomerne. Tako kot v linijskem nosilcu tudi tukaj strižna sila proti središču konstrukcije pada. Osne sile, ki se prenesejo v robni nosilec in so označene na sliki v sredini, potekajo v obliki kvadratne parabole ter so na sredini objekta največje. Ker ima linijski nosilec, ki je linijsko obremenjen kvadratno obliko momentne linije, tudi osne sile v legah tvorijo enako obliko vzdolž konstrukcije.

Kot omenjeno se tak tip diafragme obnaša kot prosto-ležeč nosilec, zato lahko napišemo naslednje enačbe, ki povedo, kako iz linijske obtežbe izračunamo osne sile v legah, strižni tok in reakcije (ki jih predstavljajo osne sile v čelnih nosilcih). Na sliki 9 je shematsko prikazan strižni tok v trapezni pločevini.

$$S = \frac{V_{Ed} \cdot S_c}{I_s} = \frac{V_{Ed} \cdot A_f \cdot \frac{b}{2}}{2 \cdot A_f \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2} = \frac{V_{Ed}}{b} = \frac{q \cdot L}{2 \cdot b} [N/m] \quad (2.1)$$

$$N = \frac{M}{b} [kN] \quad (2.2)$$

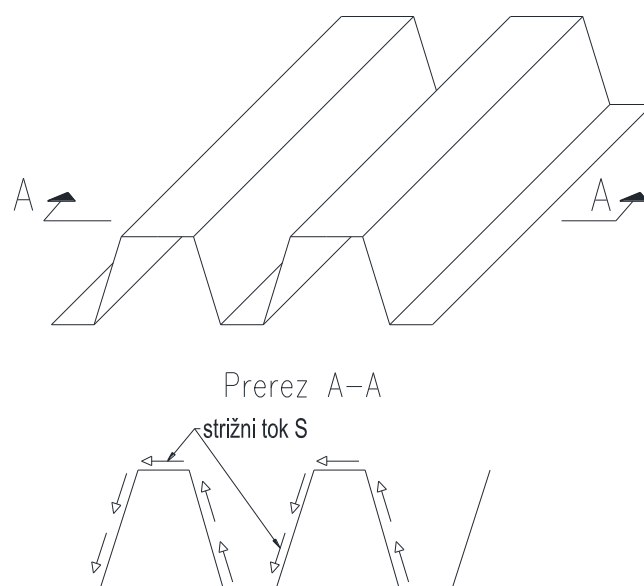
$$M = \frac{q \cdot L^2}{8} [kNm] \quad (2.3)$$

$$R = \frac{q \cdot L}{2} [kN] \quad (2.4)$$

Oznake predstavljajo sledeče:

- $q$  horizontalna obtežba na enoto dolžine
- $L$  dolžina objekta
- $b$  širina objekta
- $M$  moment zaradi linijske obtežbe  $q$
- $N$  osna sile v robnih nosilcih zaradi momenta
- $V_{Ed}$  strižna sila
- $R$  reakcije v čelnih nosilcih
- $S$  največji strižni tok v trapezni pločevini (v prvem polju)
- $A_f$  ploščina pasnice
- $S_c$  statični moment v pasnice glede na težišče prereza
- $I_s^*$  vztrajnostni moment prereza

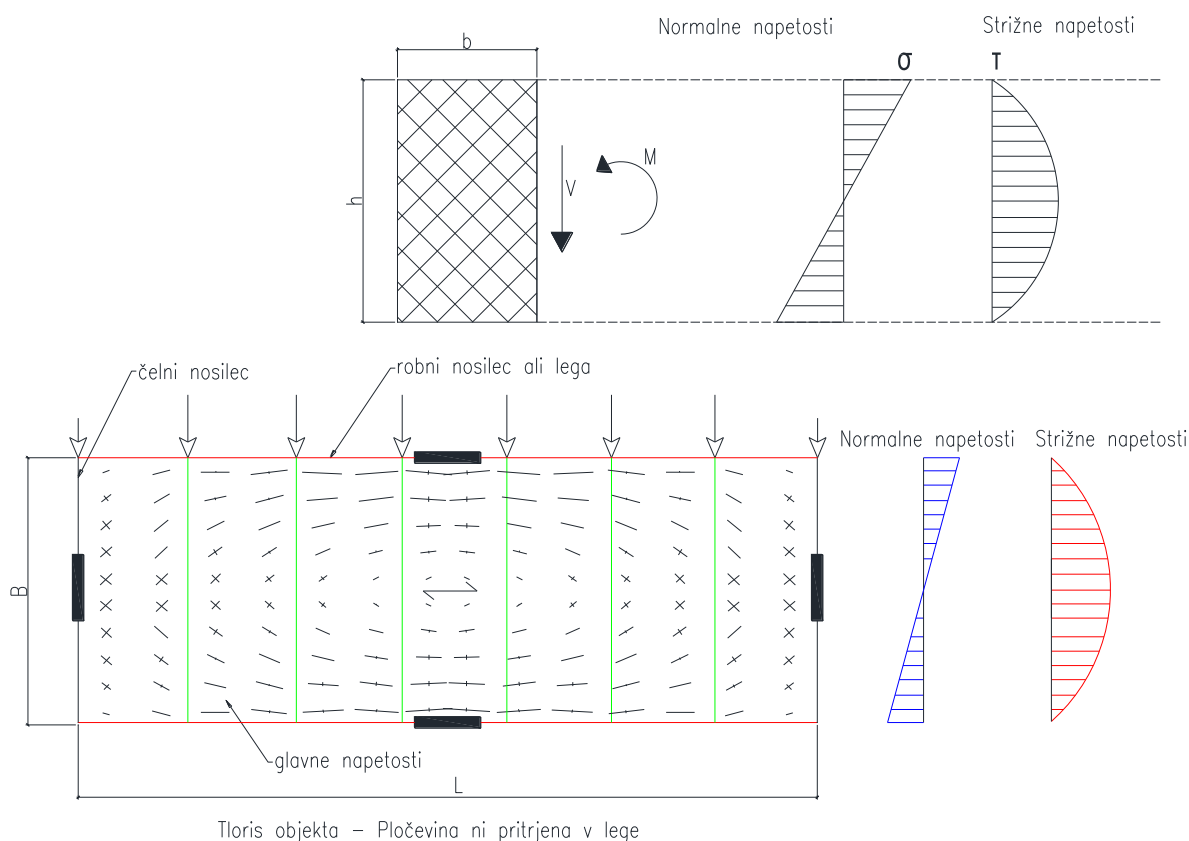
(\*zanemarili smo del vztrajnostnega momenta okoli pasnice same, ker je zanemraljivo majhen)



Slika 9: Prikaz strižnega tok v trapezni pločevini

Zasnova konstrukcije na sliki 8 je taka, da so povezave med nosilci, temelji, stebri in povezji členkasti, torej enaki kot primer na sliki 3, glavni okvir pa so enaki kot tip a na sliki 1, le da v tem primeru namesto zavetrovanj uporabimo trapezno pločevino, ki zagotavlja stabilnost konstrukcije v strehi tako v vzdolžni kot tudi v prečni smeri.

Možen je tudi primer v katerem robni nosilci niso vgrajeni ali pa profilirana pločevina nanje ni pritrjena. To pomeni, da se moment v robne nosilce ne more prenesti (preko tlakov in nategov), ampak se prenese preko pločevine. V takem primeru pa sistem deluje kot visok zelo tanek nosilec pravokotnega prereza. Pri dimenzioniranju, kjer pločevina ni pritrjena v lege moramo upoštevati tudi tlačne napetosti v ravnini pločevine in napetosti zaradi obtežb normalno na ravnino pločevine. Normalne napetosti so enake kot v primeru, ko imamo I ali H nosilec, strižne napetosti pa imajo obliko kvadratne parabole, enako kot pravokotnem prerezu. Na sliki 10 je prikazana analogija med napetostmi v prerezu v primeru pravokotnega prereza in prereza v konstrukciji.



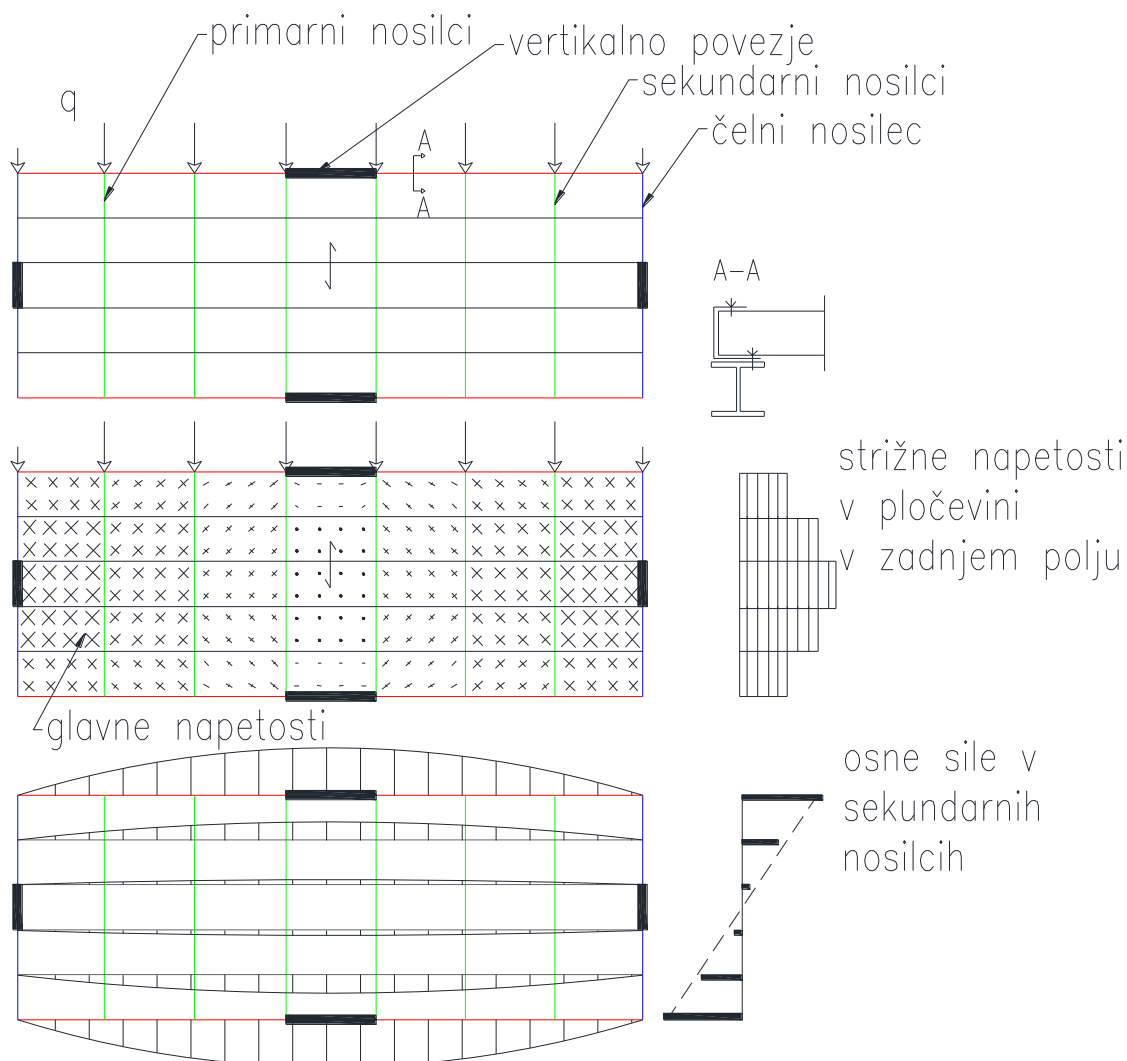
Slika 10: Analogija med kvadratnim prerezom in prerezom v konstrukciji

Takšna diafragma je primarna za prenos majhnih obremenitev, saj so deformacije na robu pločevine in deformacije celotne diafragme velike. Tak sistem ima majhno togost, obremenjen pa je normalno in v lastni ravnini.



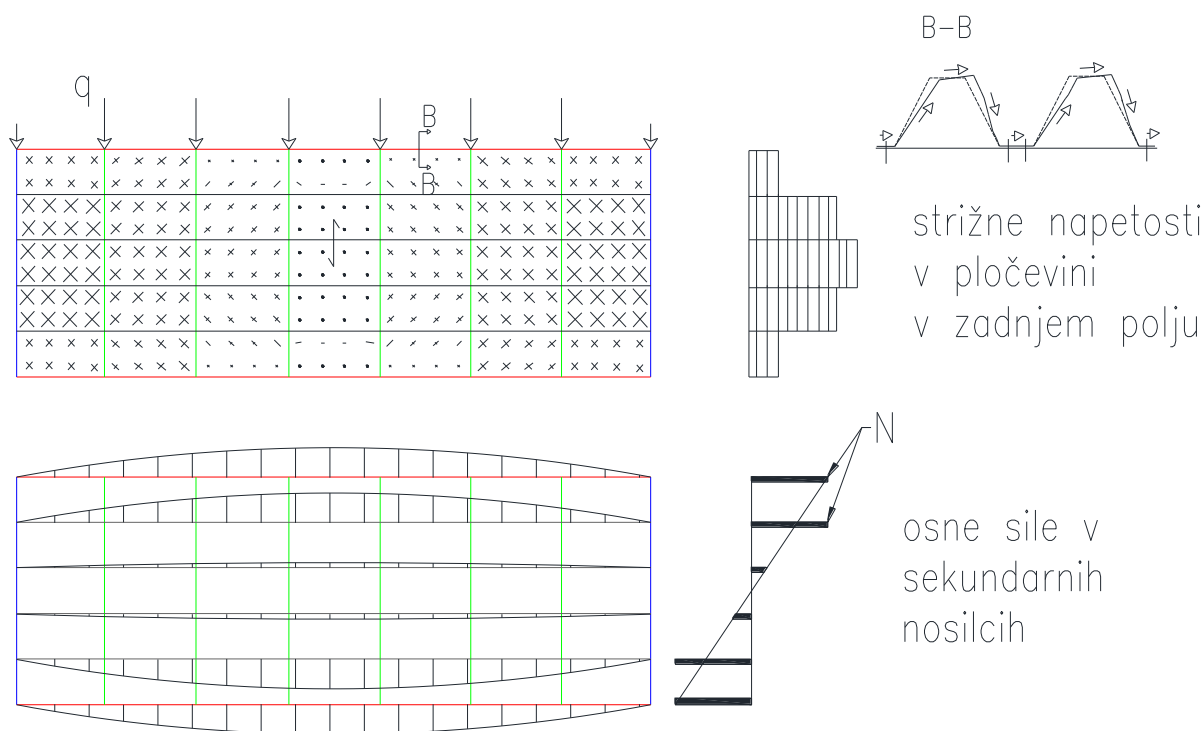
## 2.2.2 Diafragma pritrjena na sekundarne nosilce – obremenitev vzdolž konstrukcije – tip diafragm D2

Kadar je pločevina pritrjena na sekundarne nosilce deluje enako kot v prejšnjem poglavju (podobno kot I ali H profil) le da se v tem primeru moment prenese na sekundarne nosilce (strešne lege). Na porazdelitev sil med sekundarnimi nosilci najbolj vplivajo strižne deformacije diafragme, le-te pa so odvisne od kar nekaj faktorjev na primer od izvedb detajla na stranskih pritrditvah med paneli.



Slika 11: Strižni tok v diafragmi pritrjeni na sekundarne nosilce

Na sliki 11 lahko vidimo, da se enako kot pri prejšnjem primeru moment porazdeli na nosilce vendar tokrat na sekundarne nosilce. V prejšnjem primeru so bile normalne napetosti linearne, v danem primeru pa se temu približajo vendar niso eksaktne. V Bernoullijevem nosilcu so napetosti po prerezu linearne, v tem primeru pa se na zadnjo vrsto sekundarnih nosilcev prenese večja obremenitev kot na ostale. Na porazdelitev normalnih napetosti po prerezu, oziroma osnih sil v sekundarnih nosilcih vpliva strižna podajnost diafragme. Strižne napetosti se odsekoma konstantno spreminjajo preko vsakega polja. Največja strižna napetost nastopi na koncu konstrukcije in sicer v srednjem polju (slika 11 - v sredini). Kot posledica strižne podajnosti diafragme so sile na sekundarne nosilce ob robu konstrukcije večje kot pri Bernoullijevem nosilcu proti notranjosti pa manjše. Naštete ugotovitve veljajo le takrat, kadar je trapezna pločevina na robu konstrukcije ojačana kot kaže prerez A-A na sliki 11. Predpostavka, ki smo jo upoštevali je, da ima diafragma po celotni površini enako togost. Prenos obremenitev poteka drugače, če ob robovih ni ojačitev pač pa je pločevina pritrjena le v koritih (slika 12). Togost diafragme v takem primeru ni enaka po celotnem tlorisu kot v prejšnjem primeru. Ker diafragma nima robnih ojačitev je bolj podajna ob robovih, prav zaradi tega se pojavijo deformacije, prikazane na sliki 12 - prerez B-B. Temu se izognemo tako, da trapezno pločevino na robu pritrdimo tako v koritu kot v grebenu, to pa lahko zagotovimo le z ojačitvijo. Na sliki 12 je prikazano, da se večino momenta prenese na zadnji dve vrsti sekundarnih nosilcev, kjer sta sili v legah skoraj enako veliki. Strižna sila pa ima večji skok med robnimi in notranjimi polji kar pa lahko pripišemo togosti diafragme in dejstvu, da se obremenitev prenese v razmerju togosti pločevin.



Slika 12: Obremenitve v diafragmi brez ojačitve na robu

V primeru, ko robnih ojačitev ni in se moment prenese na zunanje dva sekundarna nosilca, se lahko osna sila v zunanjih sekundarnih nosilcih izračuna na naslednji način (Höglund, 2002):

$$N = \frac{M}{2 \cdot b_1} \approx 0,58 \cdot \frac{M}{b} \quad (2.5)$$

$$b_1 = b - \frac{b}{(n-1)} \quad (2.6)$$

$$S = \frac{V}{b} \cdot \frac{n-1}{n-2} \quad (2.7)$$

kjer so:

$b_1$  razdalja med skrajnima dvema sekundarnima nosilcema na vsaki strani konstrukcije (kot ročica med osnima silama)

$n$  število sekundarnih nosilcev

$b$  širina objekta

$V$  prečna sila (ostale definicije so podane pri enačbi 2.1)

## 2.3 Prenos obtežb v prečni smeri

Pri horizontalni obtežbi, ki deluje vzdolž objekta (slika 13), se obremenitev prenese preko fasadnih panelov na fasadne stebre in nato preko vrhov stebrov preko diafragme v vertikalna povezja. Ponovno ločimo dva sistema diafragme. Pri prvem je pločevina pritrjena direktno na primarne nosilce, pri drugem pa je pločevina pritrjena na sekundarne nosilce.

### 2.3.1 Pločevina pritrjena na primarne nosilce

Pri obtežbi na koncu objekta so prenosi obtežbe v diafragmo drugačne kot pri obtežbi vzdolž objekta. Aktivira se le del celotne diafragme in ne celotna tako kot v poglavju 2.2.1 in 2.2.2. Glavne napetosti se proti notranjosti objekta počasi zmanjšujejo in so proti koncu stavbe zanemarljivo majhne.

Pri projektiranju se običajno predpostavi (Höglund, 2002), da je dolžina ki se aktivira pri prečni obtežbi na stavbo enaka 2/3 dolžine stavbe (slika 13 - spodaj). Torej lahko maksimalno strižno obremenitev ali strižni tok zapišemo v obliki naslednje enačbe:

$$S = \frac{Q \cdot h}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{3}{2 \cdot b} = Q \cdot h \cdot \frac{3}{8} \quad (2.8)$$

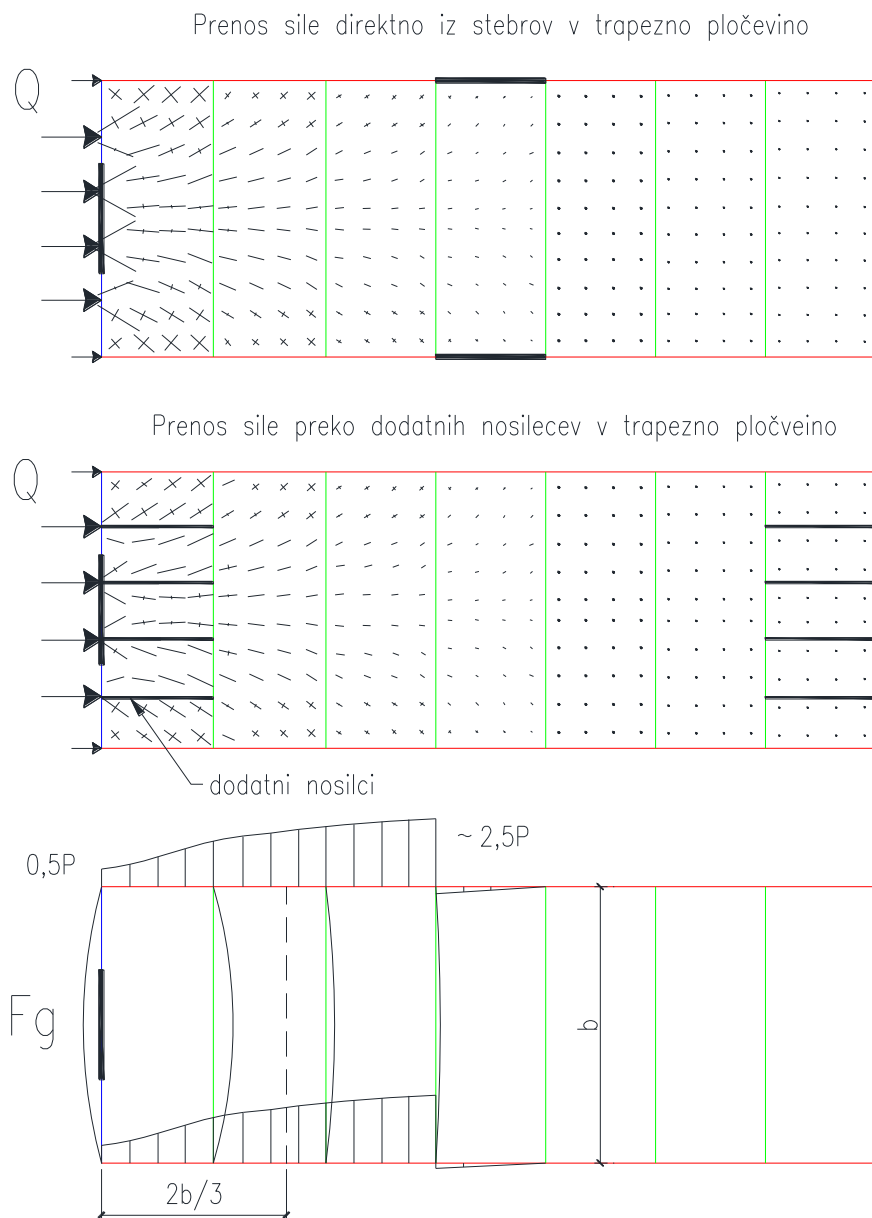
kjer so:

$S$  največji strižni tok v diafragmi

$Q$  obremenitev na enoto površine

$b$  širina objekta

$h$  višina stavbe



Slika 13: Prenos obtežb v diafragmi zaradi prečne obtežbe

Največjo silo, ki zaradi horizontalne obtežbe v prečni smeri nastane v čelnih nosilcih lahko zapišemo z naslednjo enačbo (oznake so našteje zgoraj pri enačbi 2.1):

$$F_g = \frac{Q \cdot h}{2} \cdot \frac{b^2}{8} \cdot \frac{3}{2 \cdot b} = \frac{3}{16} \cdot Q \cdot h \cdot b \quad (2.9)$$

V robnih nosilcih pa se sile prerazporedijo kot je prikazano na sliki 13 spodaj. Silo P izračunamo po naslednji enačbi:

$$P = \frac{Q \cdot b \cdot h}{N - 1} \quad (2.10)$$

kjer je:

$N$       število čelnih stebrov

Koncentracije napetosti na mestu, kjer obremenitev začne prevzemati trapezna pločevina, so lahko zelo velike. Običajna rešitev za omenjen problem je ta, da vgradimo dodatne nosilce, ki so locirani v krajnih poljih in zagotovijo, da se obremenitev bolj enakomerno prenese v diafragmo (slika 13 v sredini). Omenjena slika prikazuje tudi, kako se obremenitve prerazporedijo po diafragmi. Skoraj celotna prečna obtežba se preko robnih nosilcev prenese v vertikalna zavetrovanja. Sistem je zasnovan enako kot v poglavju 2.1 tip a.

### 2.3.2 Pločevina pritrjena na sekundarne nosilce

V primeru, ko je pločevina pritrjena na sekundarne nosilce in obtežbe deluje prečno na stavbo pa se obtežba prenese globoko v diafragmo (slika 14). Strižni tok se porazdeli preko večine diafragme, vendar se na mestu vnosa obtežbe pojavijo koncentracije. Sila v sekundarnih nosilcih pada v obliki linearne funkcije. Obremenitve na primarne nosilce so majhne, največ obtežbe zaradi horizontalne sile pade na čelni nosilec. Predpostavimo, da se aktivira dolžina 1,5 x širina stavbe, kar je znatno več kot v primeru 2.3.1. Zato lahko napišemo naslednje enačbe za strižni tok in silo v legah:

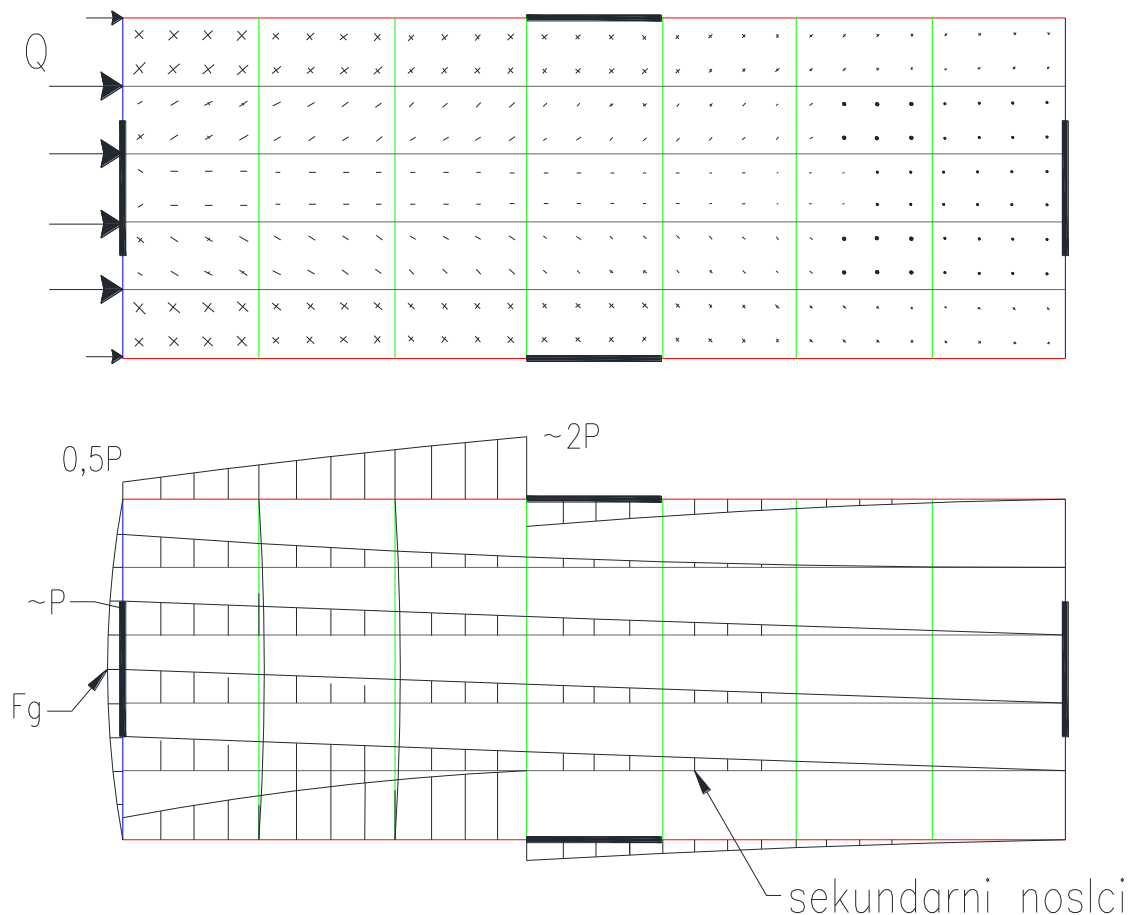
$$S = \frac{q \cdot h}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{1}{1,5 \cdot b} = \frac{1}{6} \cdot Q \cdot h \quad (2.11)$$

$$F_g = \frac{q \cdot h}{2} \cdot \frac{b^2}{8} \cdot \frac{1}{1,5 \cdot b} = \frac{1}{24} \cdot Q \cdot h \cdot b \quad (2.12)$$

kjer je:

- S* največji strižni tok v diafragmi
- Q* obremenitev na enoto površine
- b* širina objekta
- h* višina stavbe

Silo *P* pa izračunamo enko kot v enačbi 2.10.



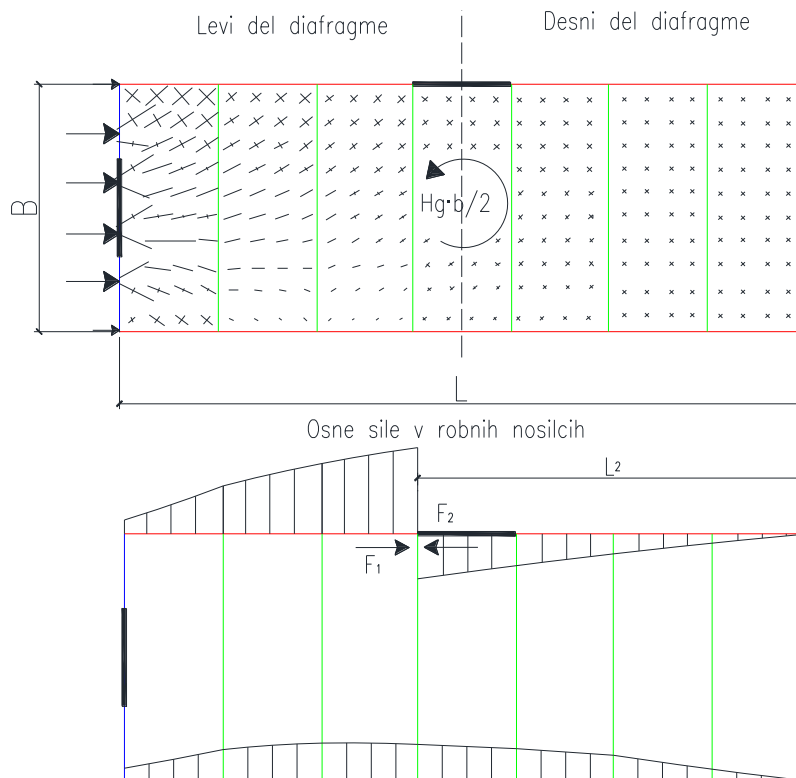
Slika 14: Prenos obtežb v diafragmi zaradi prečne obtežbe

Če primerjamo enačbi 2.9 in 2.12 lahko vidimo, da so v slednjem primeru sile v robnih nosilcih manjše, prav tako so manjše tudi glavne napetosti in s tem strižni tok v diafragmi. Glavnih okvirji so v tem primeru zasnovani tako, da so vsi spoji med prečkami, stebri in zavetrovanji povezani členkasto.

### 2.3.3 Prenos obtežb v vertikalna zavetrovanja

V magistrskem delu smo se posvetili statičnemu sistemu, s katerim togost v obeh pravokotnih smereh zagotovimo z vertikalnim povezjem (brez uporabe momentnega okvirja), diafragme pa uporabimo za prenos obtežb do povezij. Za zagotovitev stabilnosti morajo biti v konstrukcijo vgrajena vsaj tri vertikalna povezja (slika 15 in 16). Praksa običajno poseže po štirih, vendar vedno to ni mogoče. To pa nas prisili, da vgradimo minimalno zahtevano število zavetrovanj. V literaturi se za opisan tip konstrukcije s tremi povezji pojavlja ime konzolna diafragma (slika 15 in 16). V tem poglavju se bomo posvetili ravno takšnim zasnovam in obravnavali primer, kjer je trapezna pločevina pritrjena neposredno na primarne nosilce. Na izbiro imamo torej le dve zasnovi in sicer:

- a. Tip K1: dve povezji sta vgrajeni v krajši smeri (prečno) in eno pa v daljši smeri konstrukcije (vzdolž) (slika 15)
- b. Tip K2: dve povezji sta vgrajeni v daljši smeri (vzdolž) in eno v krajši smeri konstrukcije (prečno) (slika 16)



Slika 15: Prenos obtežb primeru dveh prečnih in enega vzdolžnega zavetrovanja – primer a

Zaradi nesimetričnosti v obeh primerih nastane torzijski moment. Pri tipu konstrukcije *K1* se torzijskemu momentu upirata povezji na koncu stavbe. V konstrukciji delujeta dve povsem drugačni magnitudi strižnih sil v diafragmi, zato konstrukcijo razdelimo na dva dela, levega in desnega, kot kaže slika 15. Na desnem delu konstrukcije (na nasprotni strani delovanja obtežbe) so glavne napetosti v vsakem polju posebej skoraj konstante. Strižni tok v desni strani diafragme lahko zapišemo po naslednji enačbi (Höglund, 2002):

$$S_r = \frac{H_g \cdot b}{2} \cdot \frac{1}{L \cdot b} = \frac{H_g}{2 \cdot L} \text{ [kN/m]} \quad (2.13)$$

kjer so:

$H_g$  vsota zunanje obtežbe

$L$  dolžina stavbe

$b$  širina stavbe

$\frac{H_g \cdot b}{2}$  torzijski moment

Na levi strani konstrukcije so glavne napetosti največje v zgornjem levem kotu kot kaže slika 15. Če tvori leva polovica slike približno kvadrat (kar je v običajnih konstrukcijah zaradi razmerja med dolžino in širino zagotovljeno), potem lahko zapišemo, da je strižni tok ( $S_l$ ) enak (Höglund, 2002):

$$S_l = \frac{H_g}{b} \quad (2.14)$$

Oznake so enake kot v prejšnji enačbi. Del obremenitve se prenese tudi na robni nosilec (na strani vertikalnega povezja, slika 15) in sicer preko diafragme nazaj v zavetrovanje kot natezna sila ( $F_2$ ). To silo lahko izračunamo na naslednji način (Höglund, 2002):

$$F_2 = \frac{S_h}{L_2} \quad (2.15)$$

Preostali del obremenitve se prenese na zavetrovanje z nasprotne strani diafragme kot tlačna sila ( $F_1$ ) (Höglund, 2002), glej sliko 15.

$$F_1 = H_g - F_2 \quad (2.16)$$

Tlačna sila, ki pa se pojavi v robnem nosilcu na strani, kjer vertikalnega povezja ni, ima približno enako velikost kot sila  $F_2$ .

Pri tipu objekta K2, ki ga vidimo na sliki 16, mora povezje v krajši smeri (levo povezje na sliki 16) prevzeti vso horizontalno obtežbo. V takem primeru je strižni tok dvakrat večji kot v primeru, ko ima konstrukcija v vsakem zunanjem robu vgrajena zavetrovanja. Torzijskemu momentu v konstrukciji se upira zavetrovanje v daljši smeri objekta (slika 16 - zavetrovanje zgoraj in spodaj). Obremenitev na povezje na daljši stranici, ki nastane zaradi torzije je enaka (Höglund, 2002):

$$R_l = \frac{H_l \cdot L}{2 \cdot b} \quad (2.17)$$

kjer je

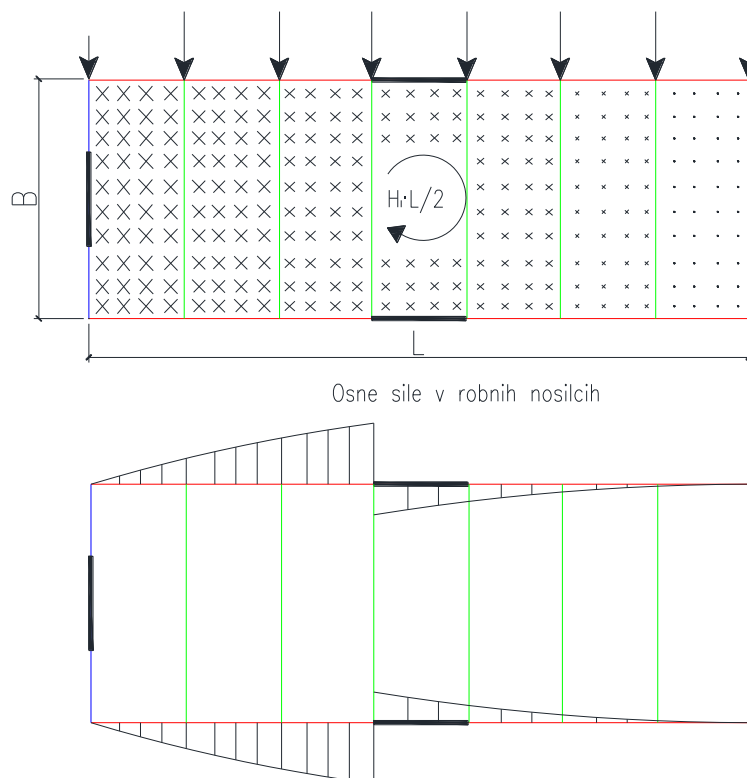
$R_l$  sila v (zgornjem in spodnjem) zavetrovanju

$H_l$  seštevek vseh obremenitev

$L$  dolžina stavbe

$b$  širina stavbe





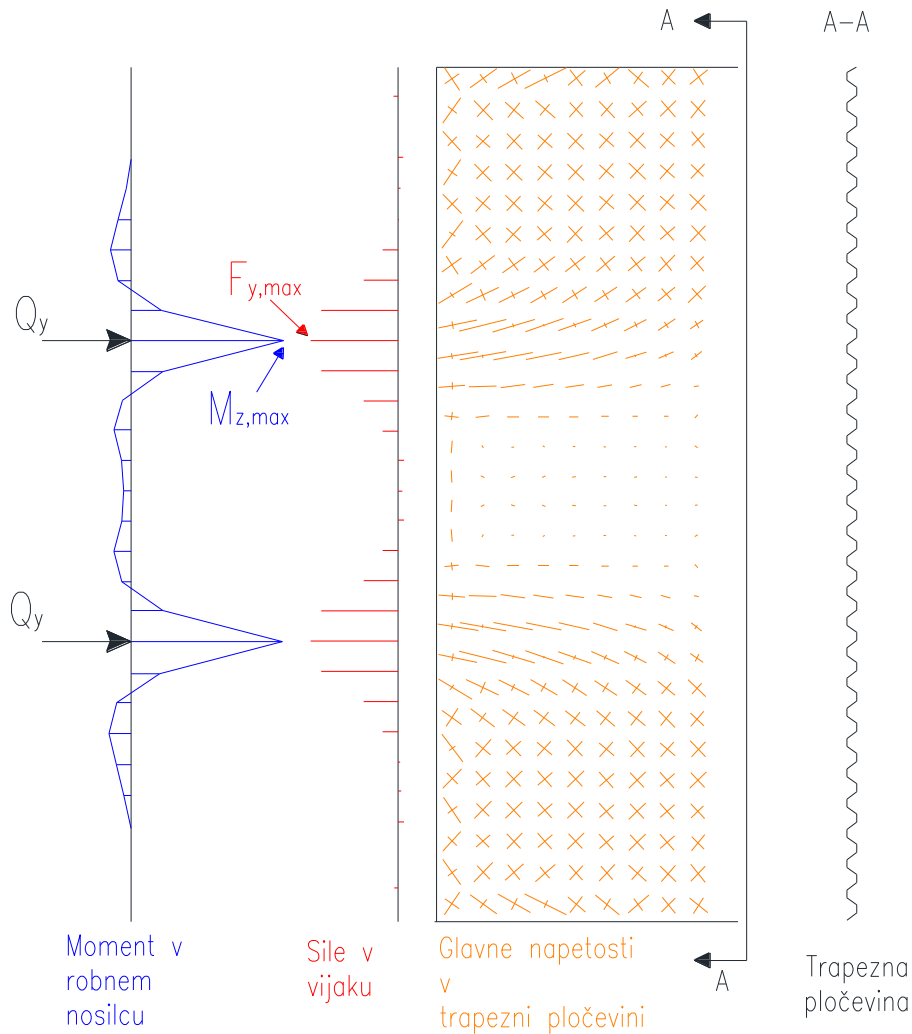
Slika 16: Prenos obtežb primeru dveh vzdolžnih in enega prečnega zavetrovanja – primer b

Takrat, ko je zavetrovanje po daljši strani objekta na sredini, dosežemo maksimalno silo v legi, ki znaša  $3R_l/4$ . Če pa je zavetrovanje na katerem drugem mestu v konstrukciji, potem pa se sila v legah določi s splošno metodo in sicer z integriranjem strižnega toka vzdolž robnega nosilca.

Lahko se tudi zgodi, da so deformacije pri tipu K2 prevelike. Deformacije v diafragmi lahko zmanjšamo z vgradnjo robnih ojačitev, ki so bolj podrobno opisane v poglavju 2.7.2.

## 2.4 Prenos osne sile v diafragmo

V zgornjih dveh poglavjih smo opisali prenos obtežbe v diafragmo kadar obtežba deluje vzdolž (po dolgi strani) objekta. Kadar pa deluje obtežba prečno (v krajši smeri) na objekt pa se v diafragmi pojavijo osne sile. Le-te se prenesejo na robna nosilca. Zato je esencialnega pomena, da so vrhovi kotnih stebrov povezani z robnimi nosilci. S tem se sile prenesejo na več vijakov na robu trapezne pločevine. Sila se nato prenese dlje v diafragmo v smeri profiliranosti trapezne pločevine, kar pomeni, da je strižni tok v prvem polju relativno enakomerno razporejen vzdolž konstrukcije proti legi, kot kaže slika 17. Strižni tok nato hitro upade v naslednjih poljih.



Slika 17: Prenos horizontalne sile v diafragmo

Način izračuna osne sile v diafragmi Evrokod ne podaja. Zato si bomo pomagali s švedskim standardom StBk (Swedish Code for Light Gauge Metal structures 79, Stockholm 1980), ki pravi, da moramo čelni nosilec obravnavati kot nosilec na elastični podlagi, kjer podpore predstavljajo povezave med vijaki in pločevino. Le-te so mnogo bolj podajne kot trapezna pločevina.

Z empirično enačbo določimo strižno deformacijo med vijaki in trapezno pločevino:

$$v = \frac{F_{II}}{k_2 \cdot d \cdot \sqrt{t} \cdot 10^3} [\text{mm}], \quad (2.18)$$

kjer so:

$F_{II}$  ... strižna sila na vijak [N]

$k_2$  ... koeficient za vijake. Če je debelina pasnice čelnega nosilca večja od 2,5mm potem je  $k_2 = 1,5$

$d$  ... premer vijaka [mm]

$t$  ... debelina trapezne pločevine [mm]

Modul elastične podlage  $k$  se izračuna po naslednji enačbi:

$$k = \frac{F_{II}}{v \cdot c_s}, \quad (2.19)$$

kjer je:

$c_s$  ... razdalja med vijaki

Maksimalni prečni pomik določa naslednja enačba:

$$w_{max} = \frac{1}{m} \frac{Q_y \cdot \beta}{2 \cdot k}, \quad (2.20)$$

kjer so :

$\beta$  ... koeficient ki zajame modul elastičnosti povezave in upogibno togost čelnega nosilca

$Q_y$  ... sila na vrhu stebra

$m$  ... število nosilcev preko katerih se lahko sila prerazporedi

Nato določimo koeficient  $\beta$ :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4 E I_z}}, \quad (2.21)$$

kjer sta:

$E$  ... elastični modul jekla

$I_z$  ... vztrajnostni moment lege v šibki smeri

Maksimalna osna sila v trapezni pločevini znaša:

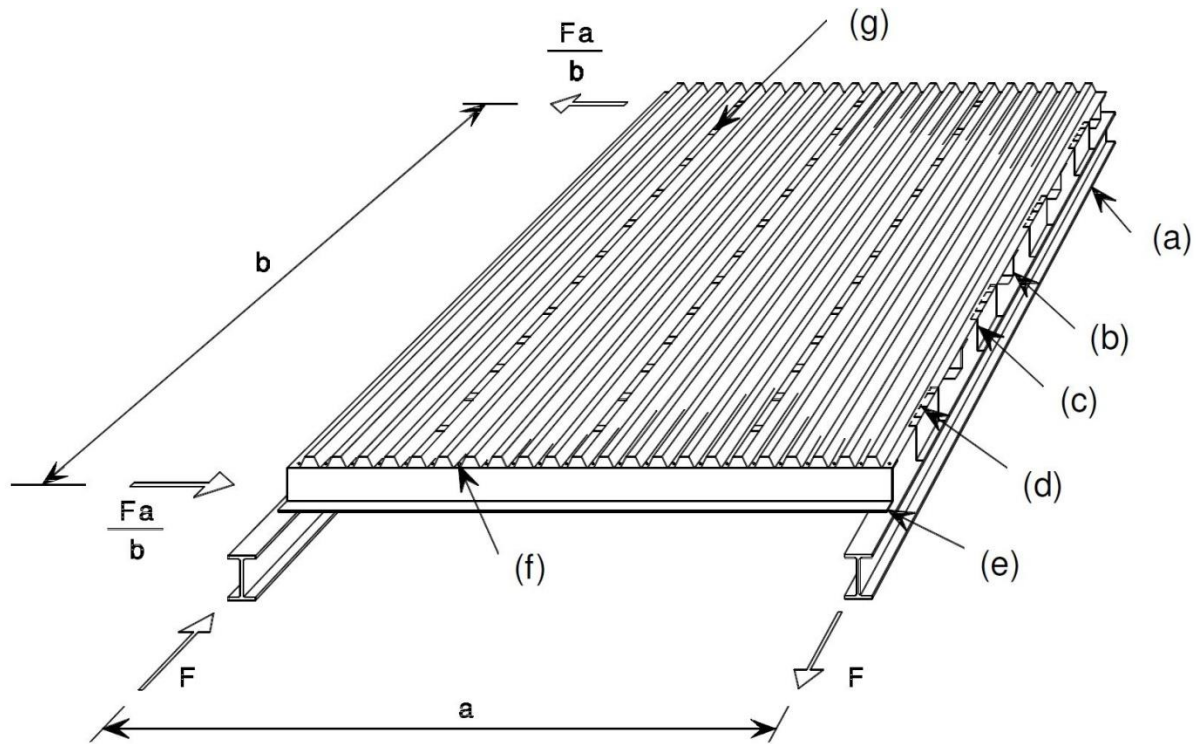
$$N_{max} = k \cdot w_{max} \quad (2.22)$$

Vijake, ki so locirani tam, kjer je sila aplicirana v trapezno pločevino, je potrebno preveriti na dve sili in sicer silo zaradi strižnega toka v diafragmi in osno silo, ki nastane kot posledica pritiska vetra na čelni okvir in je pravokotna na strižni tok.

## 2.5 Načrtovanje nosilnosti

Po priporočilih ECCS-a moramo za zagotavljanje zadostne varnosti konstrukcije diafragmo projektirati tako, da v mejnem stanju nastane duktilna porušitev. Trapezna pločevina mora biti najprej dimenzionirana na osnovno funkcijo, ki je upogib. ECCS pravi, da moramo zagotoviti, da strižna napetost ne preseže  $0,25 f_{yb}/\gamma_{MO}$ , kjer je  $f_{yb}$  nominalna napetost tečenja pločevine. Pri načrtovanju nosilnosti moramo pozornost nameniti izvedbenim detajlom, saj je njihova nosilnost pri mejnem stanju kritična. Nosilnost diafragme je odvisna od števila pritrjenih robov.

Pločevino lahko pritrdimo na dveh ali pa na vseh štirih straneh. Slednjo izvedbo priporoča ECCS, saj ima diafragma tako večjo togost in manjše probleme pri robnih deformacijah pločevine. Na sliki 18 je prikazan tipičen trapezni panel s sestavnimi deli.



Slika 18: Tipični strižni panel

Označbe na sliki 18 so naslednje:

- a) lega/ primarni nosilec
- b) sekundarni nosilec
- c) strižna povezava
- d) vijak, ki priključuje pločevino na strižno povezavo
- f) vijak, ki povezuje pločevino in lego
- g) vijaki ki priključujejo dve pločevini oziroma šivni vijaki

Najmanjša vrednost izmed spodaj naštetih določa nosilnost diafragme:

- nosilnosti »stranskih šivov« med paneli,
- linijo vijakov, ki so pritrjeni v ojačitev na robnem nosilcu (običajno strižna ojačitev).

Pri obeh gre za trganje pločevine, ki spada med duktilne porušitve. Preostali načini porušitev, ki ne spadajo med duktilne porušitve so naslednji:

1. porušitev vijaka, ki povezuje pločevino in primarni/sekundarni nosilec,
2. strižna izbočitev panela,
3. porušitev robnih leg/sekundarnih nosilcev zaradi tlačnih/nateznih obremenitev,
4. mečkanje ali porušitev v prerezu panela na robu konstrukcije.

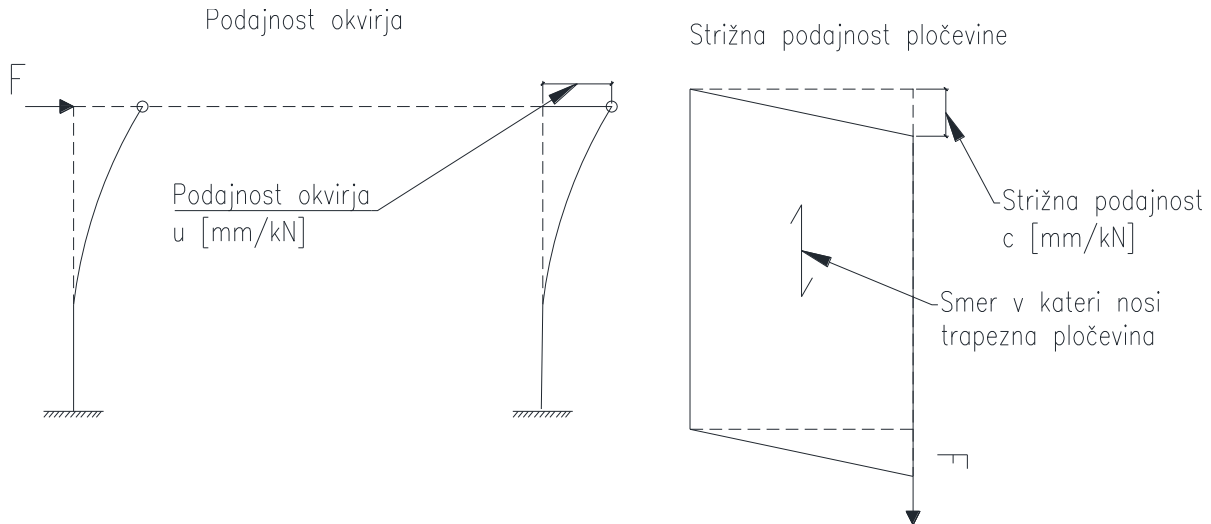
Pri teh načinih porušitev *ECCS* podaja faktor dodatne nosilnosti. *ECCS* pravi, da morajo biti zgoraj naštetih nosilnost vedno večje kot sta duktilni porušitvi. Omenjeno lahko zagotovimo s predimenzioniranimi detajli in tako omogočimo, da se bo diafragma obnašala duktilno. Po priporočilih *ECCS*-a za zgoraj naštetih primera 2 in 3 podaja 25 % dodatno nosilnost. Za primer 1 pa kar 40 % dodatne nosilnosti, saj je v tem primeru vijak natežno in strižno obremenjen, nanj pa delujejo še dodatne sile zaradi ekscentričnosti reakcijske sile, ki se pojavijo zaradi distorzije trapezne pločevine na robu. Četrty porušni mehanizem bazira na plastični porušitvi na skrajnem koncu profila, vendar do porušitve ne more priti, dokler ni dovolj velikih pomikov konstrukcije in se mehanizem ne more razširiti. Enačbe, v katerih so zapisane projektne vrednosti zagotavljajo dovolj veliko varnost, da porušitve profila na robu ne nastane. Omenjeno potrjujejo tudi številni kontrolni testi (Davies, J.M. & Fisher, J., 1987).

## 2.6 Interakcija med diafragmo in okvirji

Trapezna pločevina predstavlja nezanemarljivo togost v lastnih ravninah in lahko bistveno prispeva k večji nosilnosti okvirjev. Togost pločevine je običajno večja kot je togost zavetrovanj. Prav zaradi tega so v praksi v tujini - predvsem v skandinavskih državah, ZDA in Kanadi – začeli pogosto izkoriščati ta fenomen. Večina enoetažnih jeklenih objektov je stabiliziranih s pločevino in ne s horizontalnimi zavetrovanji. Nekateri objekti imajo tudi namesto vertikalnega zavetrovanja vgrajeno pločevino, vendar se tak sistem redkeje uporablja. Ne glede na to, ali trapezno pločevino predpostavimo kot diafragmo ali ne, bodo sile nanjo delovale. Prav zaradi tega mora biti diafragma in njene priključitve dimenzionirane na način da:

- ne izgubi tesnosti na stikih in
- se zoperstavi silam, katerim je lahko izpostavljena.

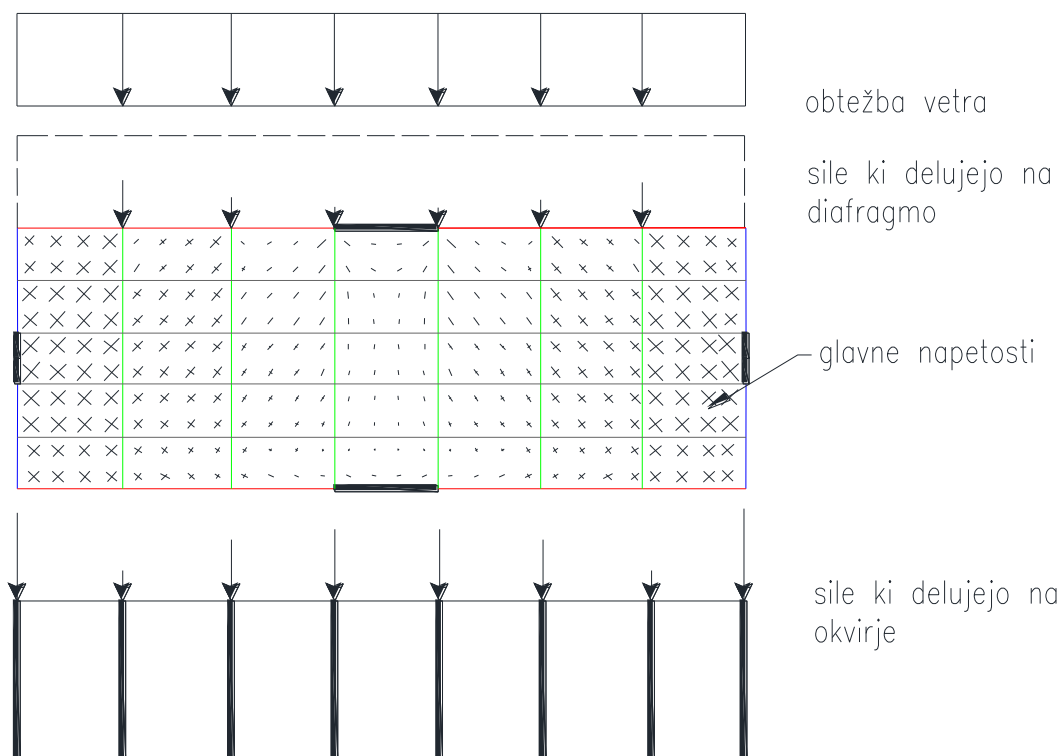
Da bi lahko izračunali razdelitev sil med diafragmo in okvirji moramo poznati podajnost le-teh. Zanima nas predvsem strižna podajnost trapezne pločevine in podajnost okvirja kot to lahko vidimo na sliki 19. Strižno podajnost v diafragmi dobimo tako, da seštejemo vse možne strižne deformacije v priključkih, povezavah in pločevini sami. Vsi priključki in povezave ter izračun deformacij v so bolj podrobno opisane v poglavju 2.11.



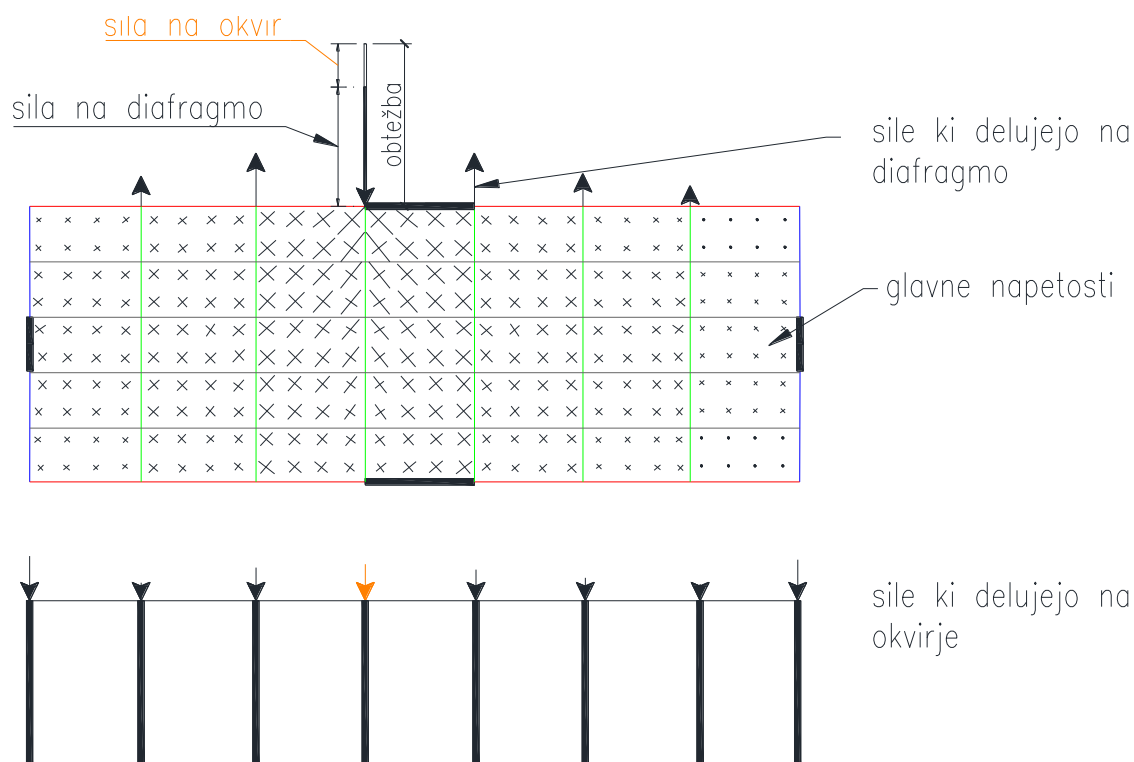
Slika 19: Podajnost okvirja in trapezne pločevine

Relativno podajnost med paneli in okvirji dobimo s faktorjem  $\psi = c/u$ , ki pove kakšno je razmerje med pomiki diafragme in okvirjev. Če je  $\psi$  velik (togi okvirji), pločevina ne prevzame veliko togosti, če je  $\psi$  majhen (podajni okvirji) bo diafragma prevzela veliko obtežbo, če pa je  $\psi = 0$  pa pomeni, da diafragma prevzame vso obtežbo.

Na slikah 20 in 21 sta podana primera, ko na diafragma delujejo horizontalne sile. V primeru na sliki 20 je obtežba na stavbo zaradi vetra, na sliki 21 pa je točkovna obremenitev zaradi sil, ki jih povzroči žerjav. V obeh primerih je podajnost okvirjev in diafragme približno enaka, to torej pomeni, da se polovica obremenitve porazdeli na okvirje ter druga polovica v diafragma. Prerazporeditev sil pa je precej drugačna. V diafragmi imamo največje obremenitve na koncu objekta (v bližini čelnih okvirjev), ki tudi predstavljajo podporo diafragmi. Obremenitve na okvirje predstavljajo zunanje sile, pri katerih moramo odšteti sile v diafragmi. Rezultat tega je, da so obremenitve na okvir največje na sredini objekta, kjer prevzamejo kar 75% celotne sile na okvirje. Kadar je razmerje med dolžino in širino stavbe večje od 4, okvirji prevzamejo večji del obtežbe (Höglund, 2002).



Slika 20: Horizontalna obtežba vetra na diafragmo



Slika 21: Horizontalna obtežba zaradi žerjava

Na sliki 21, kjer vidimo obremenitev na diafragmo in okvirje zaradi obtežbe žerjava, so glavne napetosti največje v bližini obtežbe in le manjši del se prenese na konec konstrukcije. Približno 70% celotne obremenitve prevzame diafragma, ki jih nato prenese na sosednje okvirje.

Razmerje 70/30 pri prenosu obtežbe med diafragmo in okvirji je presenetljivo konstantno in ni odvisno od razmerja togosti  $\psi$  (Höglund, 2002). V primeru klasičnega zavetrovanja, kot je prikazan na sliki 1, bi se konstrukcija zaradi obtežbe žerjava obnašala znatno drugače. Vsa obtežba bi se prenesla v en okvir, kar bi pomenilo, da se obtežba ne prerazporedi preko celotnega tlorisa. Zato je tam konstrukcija veliko bolj obremenjena kot pa v primeru, ki je prikazan na sliki 21.

## 2.7 Načini pritrjevanja

### 2.7.1 Pritrdilna sredstva

Za pritrjevanje trapezne pločevine na primarne, sekundarne nosilce ali pa za ojačitve se uporabljajo vijaki, žičniki in točkovni zvari. Poznamo različne vrste vijakov in žičnikov, ki jih uporabljamo pri montaži diafragme s trapeznimi pločevinami. Tako vijake delimo na samo-rezne in samo-izvrtljive vijake. Samo-izvrtljive vijake lahko pritrdimo v pločevine, katerih debeline znašajo med 1 in 12 mm, to pa jim omogoča konica, ki sama reže skozi pločevino. Uporablja se jih za pritrjevanje in spajanje trapeznih pločevin med seboj. Samo-rezni vijaki takih debelin ne zmorejo prebiti, saj se lahko uniči navoj in konica vijaka, lahko pa se uporablja tam, kjer je debelina pločevine manjša od 3 mm. Samo-rezni vijaki so najstarejši tip vijakov, ki se jih uporablja in potrebujejo že v naprej narejeno luknjo, ki se jo naredi z vrtanjem ali pa s prebojem skozi material. Premer luknje mora ustrezati izbranemu premeru vijaka, saj mora navoj dobro nalegati na luknjo, da med luknjo in navojem ne nastane praznina. Taki vijaki imajo prednost tam, kjer je debelina pločevine tako velika, da samo-izvrtljivi vijaki ne morejo narediti preboja skozi pločevino. Uporablja se vijake premera 4,8, 5,5 in 6,3 mm. Pomembno je, da so vijaki iz nerjavečega jekla, saj so lahko izpostavljeni vremenskim vplivom. Zaradi tankih pločevin se hitro zgodi, da vijake preveč privijemo, zato je dobro, če pri vijačenju uporabljamo nastavke, ki to preprečuje. V nasprotnem primeru lahko pločevino prebijemo ali pa jo lokalno plastificiramo.



Slika 22: Vrste vijakov za pritrjevanje trapezne pločevine

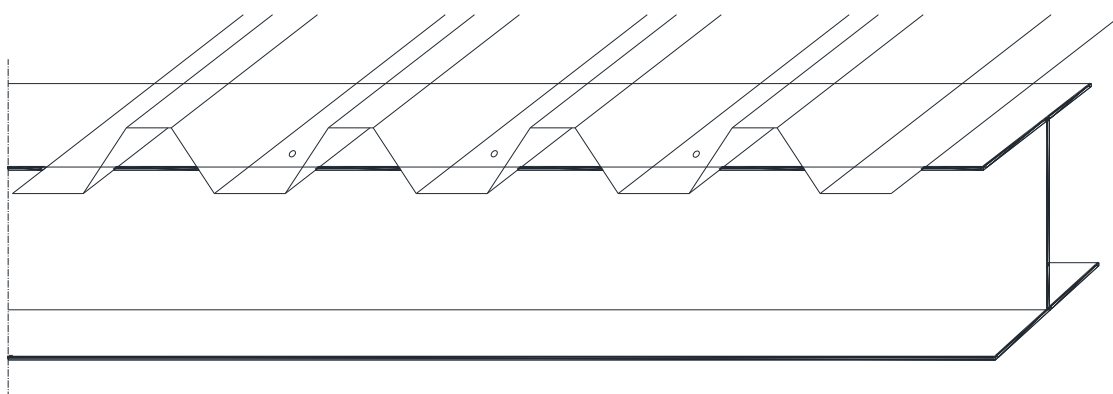


Za pritrjevanje lahko uporabljamo tudi aluminijaste žičnike, ki imajo podobne premere kot vijaki (od 4 mm pa do 6,4 mm). Žičnike postavimo v pištolo, ki pod velikim pritiskom izstreli in zabije žičnik. Take žičniki uporabljamo pri stranskih pritrjevanjih med trapeznimi pločevinami in za povezavo pločevine in ojačitev.

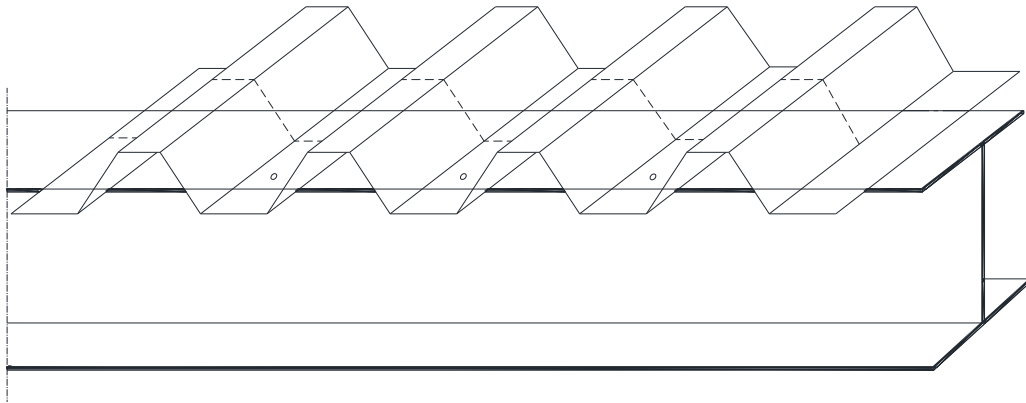
Za pritrjevanje v pločevino debelejšo od 6 mm se uporabi drugačen tip žičnikov (aluminijasti ali monel, ki je zlitina iz niklja, bakra in železa), ki se jih prav tako pribije s pištolo. Uporaba teh žičnikov je primerna za pritrjevanje pločevine na primarne ali pogojno na sekundarne nosilce. Standard *SIST EN 1993-1-3* podaja različne nosilnosti vijakov in žičnikov, le te pa so podrobneje razložene v poglavju 3.3.3.

## 2.7.2 Trapezna pločevina pritrjena neposredno na primarne ali na čelne nosilce

Pritrdilna sredstva igrajo najpomembnejšo vlogo, saj so pri projektiranju diafragme običajno merodajna. Če je trapezna pločevina položena neposredno na primarne nosilce, mora biti pritrjena preko korit v zgornjo pasnico primarnih nosilcev kot kaže slika 23. Pločevine običajno prekrivamo nad podporo (slika 24), saj z dvojnimi prerezi lažje prevzamemo negativni moment in se s tem izognemo pločevinam z višjim profilom. Seveda mora biti dolžina prekrivanja ustrezno velika, poveča pa se tudi obremenitev na vijake. Poleg tega se poveča tudi debelina pločevin za pritrjevanje, kar pomeni izbor večjega premera vijaka. Poskrbeti pa moramo tudi, da je na voljo dovolj pritrdilnih sredstev.

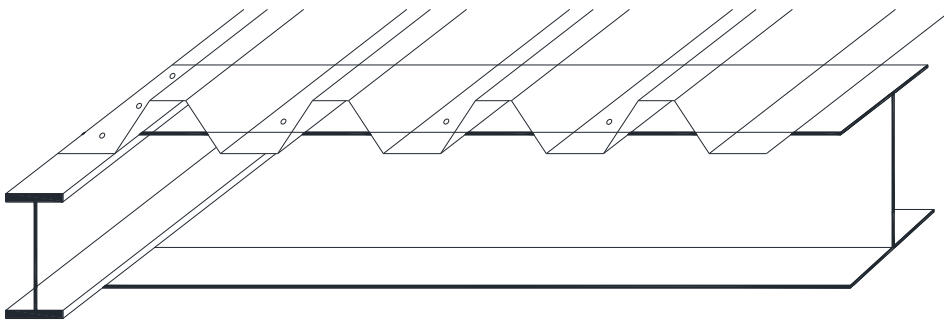


Slika 23: Pritrditev trapezne pločevine na primarni nosilec

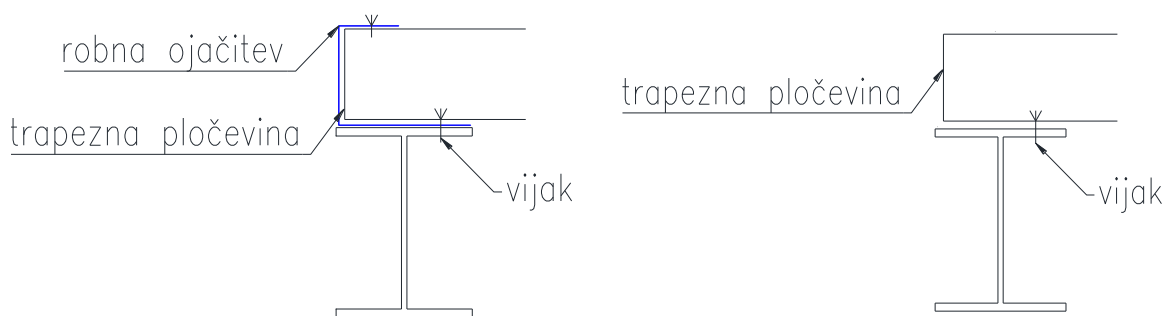


Slika 24: Pritrditev trapezne pločevine na primarni nosilec ob prekrivanju

Pločevino pa je obvezno potrebno priključiti tudi na robovih (slika 25), saj se sicer obremenitve ne morejo prenesti iz pločevine na robne ali čelne nosilce. Sama pločevina pa takih obremenitev ni sposobna prenesti. Zato se na robove ojači (slika 26). Ojačitve v pločevini zmanjšajo deformacije (slika 43) in posledično tudi napetosti.

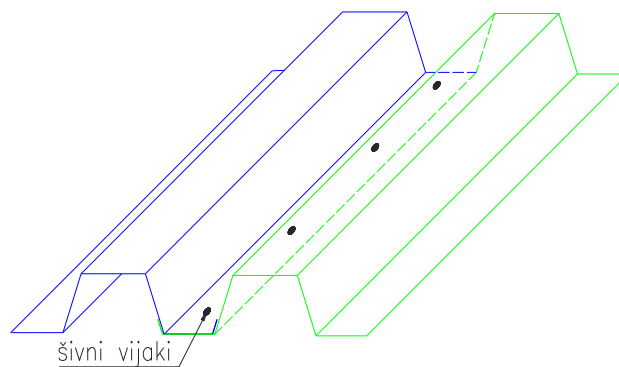


Slika 25: Robna pritrditev trapezne pločevine



Slika 26: Primer pritrdjevanje trapezne pločevine z ojačitvijo iz brez na robu konstrukcije

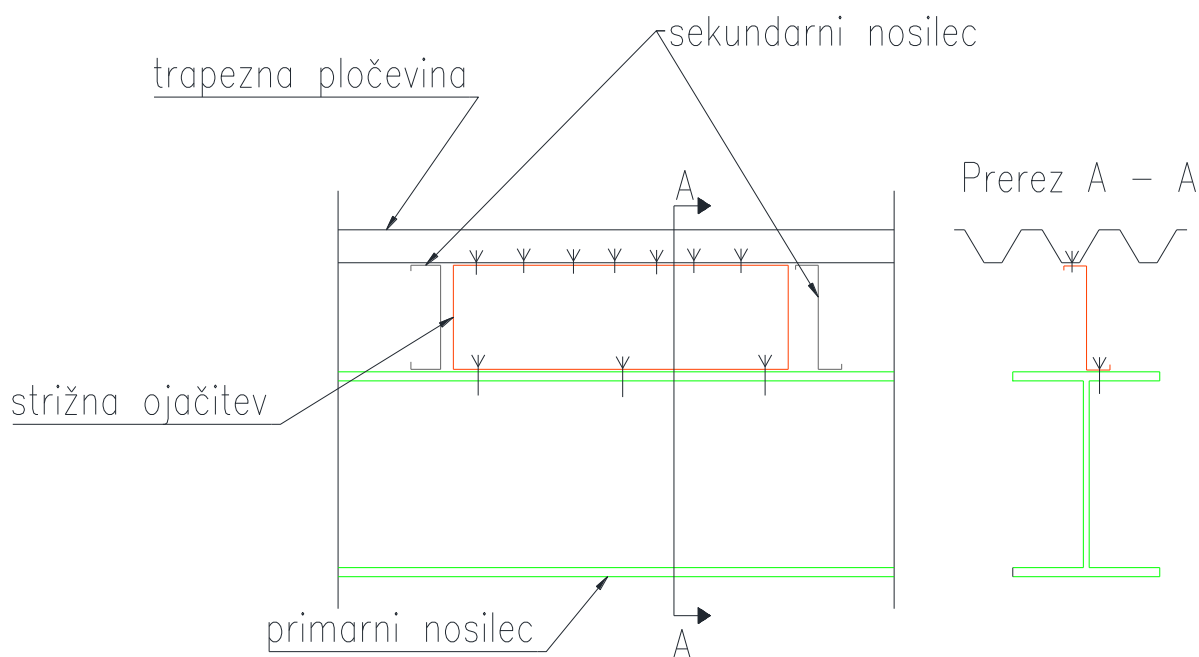
Širina pločevin se giblje okoli enega metra. Zato je potrebno pločevine med seboj povezati s stranskim šivom (slika 27). Stranski šiv se izvede z vijaki ali žičniki.



Slika 27: Stranski šivi

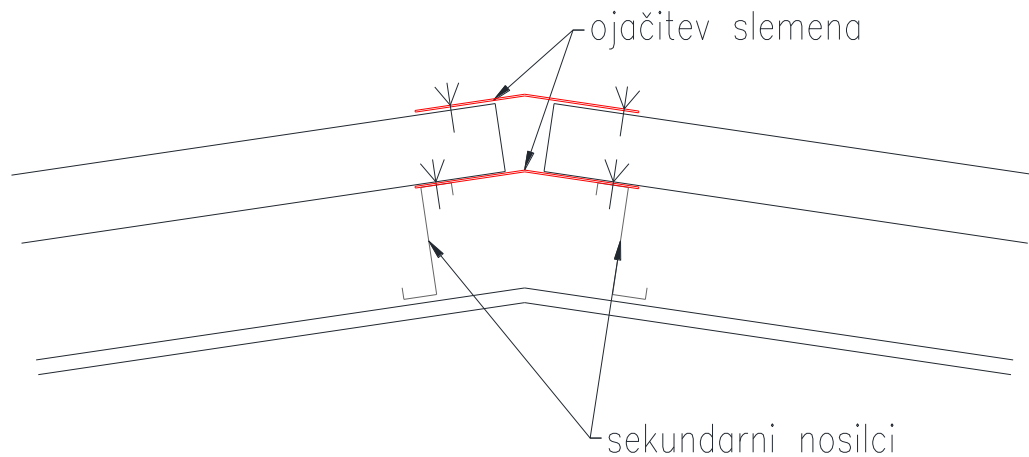
### 2.7.3 Trapezna pločevina pritrjena na sekundarne nosilce

Sekundarni nosilci so lahko pri majhnih obremenitvah hladno valjani profili (npr. Z ali C) pri večjih obremenitvah pa tudi I in škatlasti profili. Če so obremenitve večje je potrebno dodati strižno ojačitev kot je prikazano na sliki 28, ki pa so po dolžini omejene, saj lahko segajo le od enega do drugega sekundarnega nosilca. Če je stavba večjih tlorskih dimenzij je primerna rešitev, da strižne ojačitve postavimo bolj na sredino objekta, saj tako zmanjšamo notranje sile zaradi razlike v temperaturi med nosilci in pločevino. Prekrivanje pločevine po dolžini se ponavadi naredi nad sekundarnimi nosilci saj jih lahko pritrdimo neposredno na nosilec. Prav tako moramo tudi zagotoviti stranske šive in povezavo na robu stavbe (sliki 26 in 27). Vijaki morajo biti dimenzionirani na razlike v strižnem toku med sekundarnimi nosilci, vendar so te tako majhne, da priporočena razdalja med vijaki podana v poglavju 3.3.3 zadošča.



Slika 28: Strižna ojačitev pri trapezni pločevini pritrjeni na sekundarne nosilce

Povezave v slemenu ne moramo narediti s stranskim šivom, zato to naredimo tako, da privijačimo pločevino neposredno v nosilec. Napetosti so lahko na robu trapezne pločevine večje, zato se lahko zgodi, da moramo tako kot na robu (pri legi) uporabiti stranko ojačitev kot je prikazana na sliki 26. Če je naklon strehe majhen in v slemenu naredimo ojačitev, lahko tako diafragmo obravnavamo kot eno čez celotno konstrukcijo (slika 29).



Slika 29: Ojačitev slemena

## 2.8 Trapezna pločevina kot bočna podpora nosilcev

Upogibni nosilci imajo probleme s stabilnostjo. Bočno zvrnitev lahko preprečimo z različnimi rešitvami, eden izmed njih je, da s trapezno pločevino nudimo linijsko bočno podpiranje nosilcev. Fenomen opišemo z nosilcem na elastični podlagi. Pločevina služi kot linijska bočna podpora, če je njena upogibna in osna togost v primerjavi z nosilcem primerno velika.

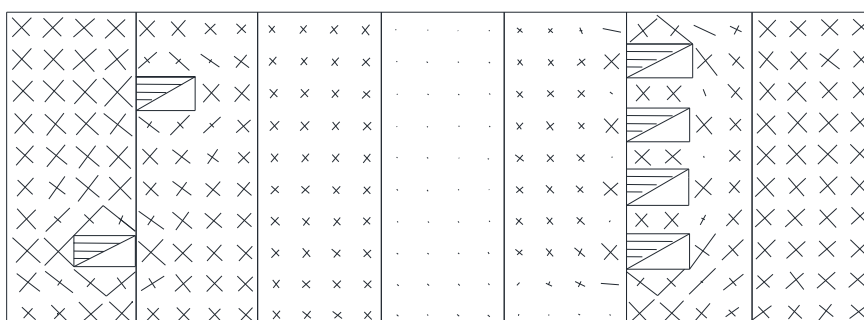
Eden redkih virov, ki govori, kdaj lahko trapezno pločevino uporabljamo kot linijsko bočno podporo primarnim nosilcem, je publikacija *ECCS* v aneksu *B*. Tam podaja konkretne enačbe in postopke s katerimi lahko zagotovimo dovolj veliko togost trapezne pločevine.

Enako govori tudi enačba napisana v standardu *SIST EN 1993-1-3*, vendar le-ta podaja rešitev za trapezne pločevine položene na sekundarne nosilce. V tem primeru so izbočne sile precej manjše kot v primeru, ko je trapezna pločevina pritrjena na primarne nosilce, kjer lahko pri velikih primarnih nosilcih pride do relativno velike sile v pločevini. Več o tej temi je napisano spodaj v poglavju 3.5.

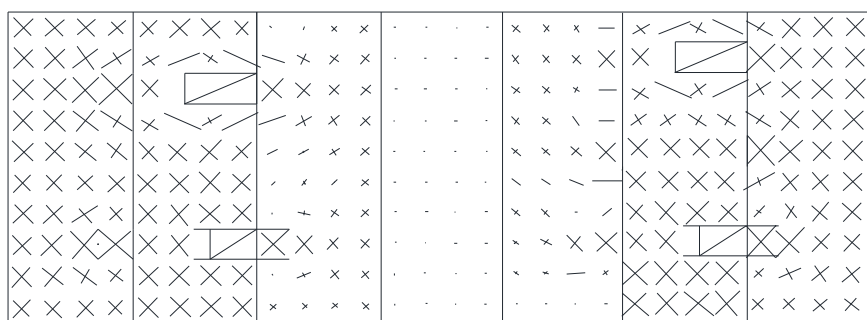
## 2.9 Odprtine v diafragmi

Večino stavb ima vgrajene različne inštalacije če želimo, da upravlja svojo funkcijo. Prav zaradi tega hitro preidemo na strojne inštalacije in te so povezane z različnimi preboji in odprtinami v stavbah. Če je odstotek odprtin v diafragmi manjši od 3% in so naključno locirane, dodatni izračuni niso potrebni. Upoštevati je potrebno le, da se število vijakov ne sme zmanjšati glede na diafragmo v kateri ni nobenih odprtin, razlika v vijakih pa se porabi v ojačitvah okoli odprtin, kjer so razdalje med vijaki manjše kot sicer v diafragmi. V primeru, ko je v diafragmi 15% odprtin glede na celoten tloris diafragme, so potrebni dodatni detajlni izračuni. Če pa presežemo 15% odprtin, pa moramo površino razdeliti na več manjših površin in vsak del le-te upoštevati kot diafragmo.

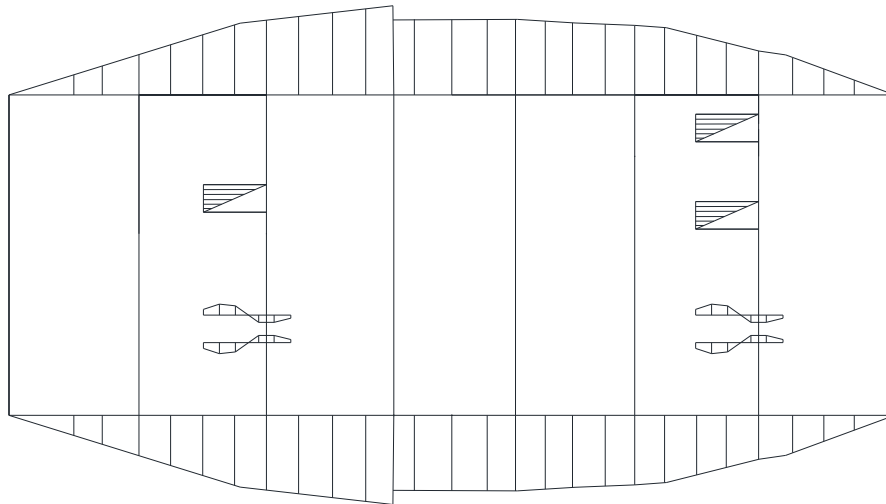
Preboj skozi trapezno pločevino, ki je del nosilnega sistema konstrukcije, povzroči spremembo glavnih napetosti v diafragmi. Lokacija odprtine je zelo pomembna, saj so napetosti ob robovih odprtine večje kot v sredini objekta. Vendar je motnja napetosti okoli odprtine majhna. Napetosti na robovih neojačanih odprtin se povečajo, vendar se zgoraj in spodaj zmanjšajo (slika 30). Na slikah 30 in 31 križci predstavljajo velikost in smer glavnih napetosti. Na sliki 31 zgornje odprtine niso ojačane, kjer se lepo vidi razliko med spodnjimi, ki so. Tam kjer je ojačitev se glavne napetosti skoraj ne spremenijo, saj se obremenitve v trapezni pločevini prenesejo v ojačitve nosilce, ki so pritrjeni v trapezno pločevino in sicer v obliki nateznih in tlačnih obremenitev.



Slika 30: Glavne napetosti v pločevini kjer odprtine nimajo ojačitev

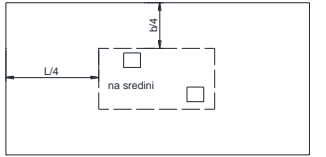
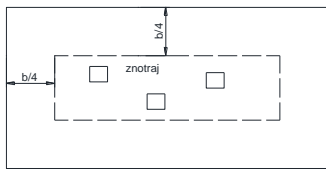
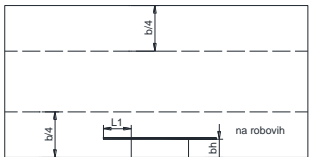
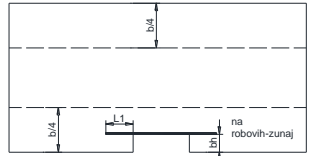
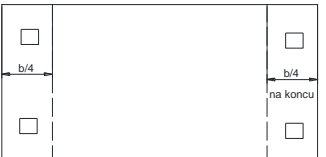
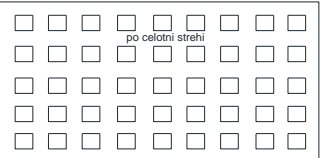


Slika 31: Glavne napetosti v pločevini z odprtinami (z in brez ojačitev)



Slika 32: Sile v robnih nosilcih

Evrokodi ne podajajo postopka za izračun spremembe strižnega toka v odvisnosti od lokacije odprtin, zato v naslednji preglednici prikazujemo švedski standard StBK-N5 (Swedish Code for Light Gauge Metal structures 70, 1980).

Pozicija odprtine	Strižni tok skozi odprtino	Strižni tok ob straneh odprtine	Sile v robnih nosilcih
a) na sredini 	Odprtine na sredini objekta lahko zanemarimo če izpolnimo naslednje pogoje: - dolžina odprtine $l_h < b/10$ - širina odprtine $b_h < b/10$ - razdalja med odprtinami $c_h > 2 b_h$		
b) znotraj 	$S_0 = \frac{V}{b - b_h}$	$S_1 = \frac{F_{e,beam}}{2 \cdot L_1}$	
c) na robovih 	$S_0 = \frac{V}{b - b_h}$	$S_1 = \frac{F_{e,beam}}{L_1}$	$F_{e,beam} = \frac{M}{b - \frac{b_h}{2}}$ za pločevino na primarnih nosilci
d) na robovih - zunaj 	$S_0 = \frac{V}{b - b_h}$	$S_1 = \frac{F_{e,beam}}{L_1}$	$F_{e,beam} = \frac{M}{b - \frac{b_h}{2}}$ za pločevino na primarnih nosilcih
e) na koncu 	$S_0 = \frac{V}{b - b_h}$		
f) po celotni strehi 	$S_0 = \frac{V}{b - \Sigma b_h}$		

Preglednica 1: Odprtine v diafragmi

Na koncu konstrukcije (v bližini čelnih nosilcev) je strižni tok večji, zato se je dobro izogibati odprtina v tem (primer *e* v preglednici 1). Projektiranje trapezne pločevine v tem delu se izvede na podlagi lokalnega strižnega ( $S_l$ ) toka. Če pa so odprtine približno enakomerno porazdeljene po strehi, se strižni tok izračuna kot neto širine odprtin (glej primer *f* v preglednici 1). Tukaj je seveda nujno potrebno zagotoviti ojačitve, s katerimi zagotovimo boljše kontinuiteto strižnega toka. Ojačitve v odprtinah so zasnovane tako, da so nosilci postavljeni okrog odprtin in so daljši od same luknje (slika 34). Sile v takih ojačitvah se izračunajo po enačbah 2.23 in 2.24, oznake pa so prikazane na sliki 33 (Höglund, 2002).

$$F_l = \frac{S_0 \cdot l_h}{1 + \frac{g_h}{l_h}} \geq \frac{S_0 \cdot l_h}{2} \quad (2.23)$$

$$F_b = \frac{S_0 \cdot a_h}{2} \quad (2.24)$$

kjer je,

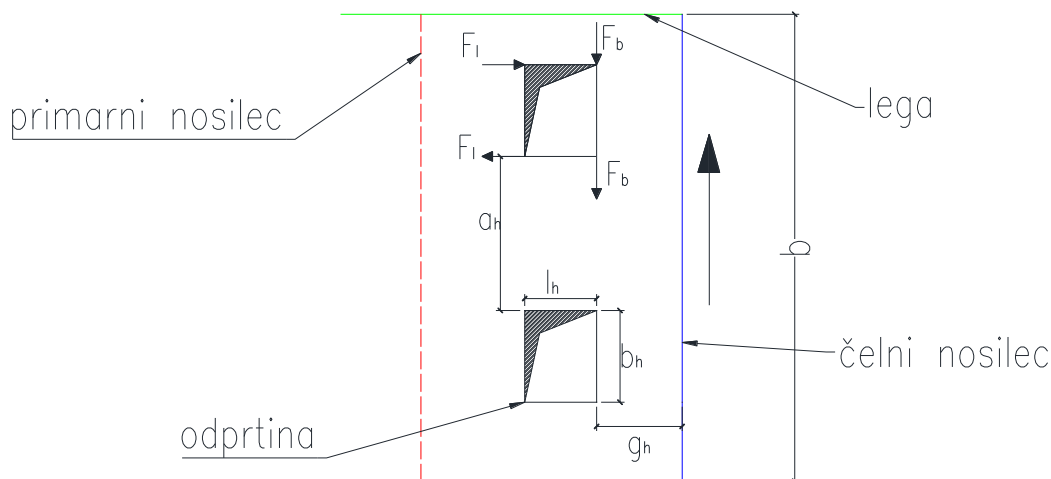
$F_l$  sila pravokotno na primarne nosilce

$F_b$  sila vzporedno na primarne nosilce

$l_h$  dolžina odprtine

$a_h$  razdalja med odprtinami

$g_h$  razdalja od roba



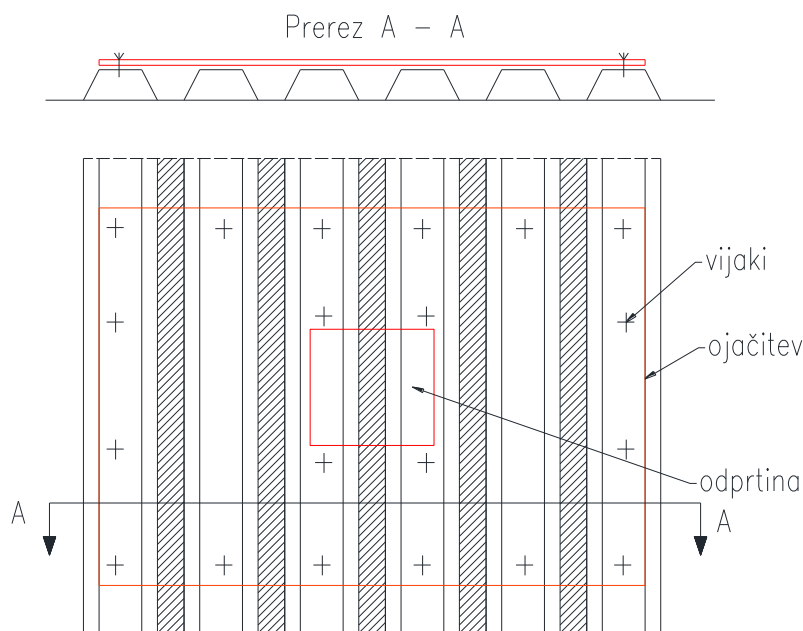
Slika 33: Obremenitve na nosilce pri odprtini

Dodatni izračuni niso potrebni če zagotovimo naslednje pogoje:

- maksimalna velikost odprtine ni večja kot  $300 \times 300 \text{ mm}$ ,
- odprtina je prekrita s pločevino, ki je za faktor 1,5 krat debelejša kot je osnovna debelina in ne sme biti tanjša od  $1,2 \text{ mm}$ ,
- razdalje med odprtinami morajo biti večje kot  $1 \text{ m}$ ,



- širina profilirane pločevine, ki prekriva odprtino pravokotno na glavno smer, mora osnovno pločevino na obeh straneh prekriti za vsaj dve stojini trapezne pločevine (oziroma le eno če je odprtina manjša od  $125 \times 125 \text{ mm}$ ),
- profilirana pločevina ki prekriva osnovno mora biti pritrjena kot kaže slika 34



Slika 34: Ojačitev v odprtini

## 2.10 Obremenitve

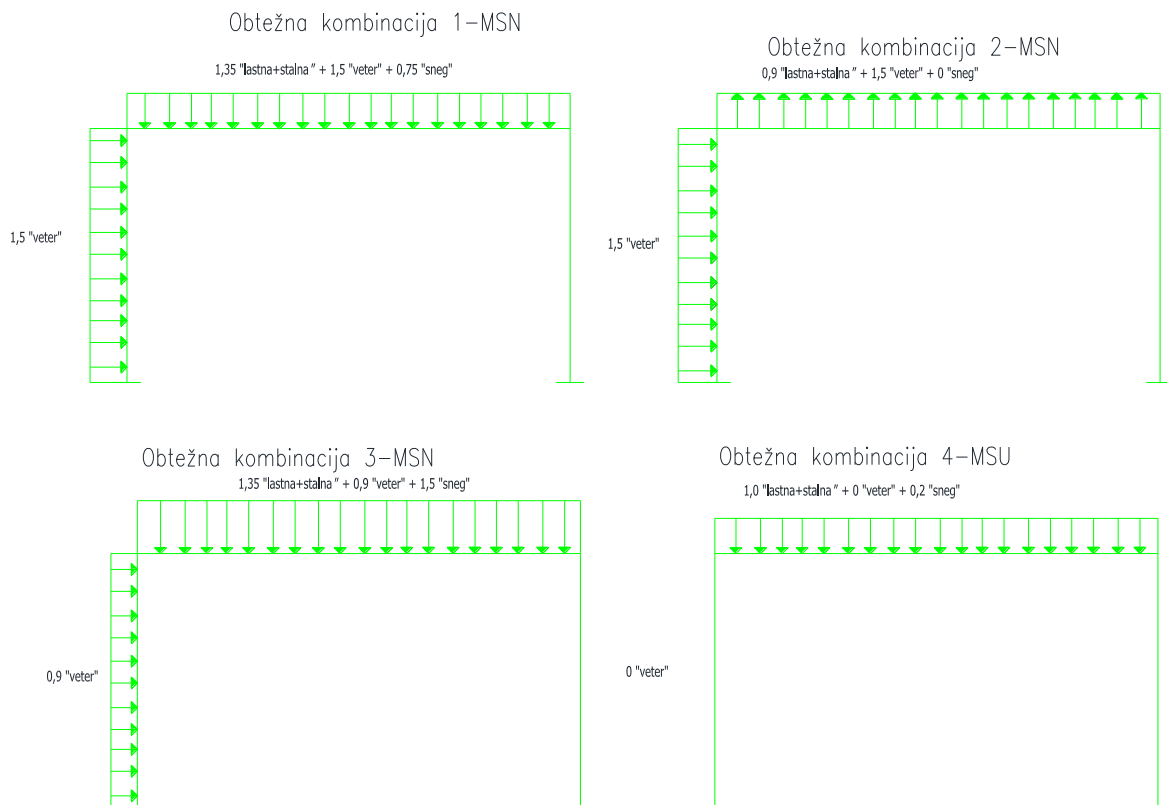
V življenjski dobi je konstrukcija izpostavljena različnim vplivom, velikost in pogostost vpliva pa je povezana z verjetnostjo. S kombinacijami, podanimi v *SIST EN 1991* zajamemo sočasni pojav različnih vplivov, verjetnosti in kombinacije vplivov pa so definirani v *SIST EN 1990*. Kombinacij je lahko zelo veliko, zato bomo izvzeli le merodajne torej najbolj neugodne kombinacije. Pri projektiranju diafragme so običajno merodajne štiri kombinacije, ki so nanašane v preglednici 2, poleg tega pa to podani tudi parcialni faktorji.

Obtežna kombinacija		Stalni vpliv		Veter		Sneg	
MSN	1	$\gamma_G$	1.35	$\gamma_Q$	1.5	$\gamma_Q \cdot \psi_0$	$1.5 \times 0.5 = 0,75$
	2	$\gamma_{G,inf}$	0.9	$\gamma_Q$	1.5	$\gamma_G$	0
	3	$\gamma_G$	1.35	$\gamma_Q \cdot \psi_0$	$1.5 \times 0.6 = 0,9$	$\gamma_G$	1.5
MSU (pogosta)	4	$\gamma_G$	1.0	$\gamma_Q \cdot \psi_2$	$1.0 \times 0 = 0$	$\gamma_Q \cdot \psi_1$	$1.0 \times 0.2 = 0.2$

Preglednica 2: Merodajne obtežne kombinacije

Prva obtežna kombinacija zajame največje horizontalne obremenitve, le-te pa tvorijo največje obremenitve v diafragmi. Druga kombinacija pa je merodajna takrat, kadar iščemo največje obremenitve v vijakih. Obremenitev na vijake je največja takrat, kadar deluje tako horizontalna kot vertikalna obtežba, vendar mora slednja delovati v nasprotni smeri gravitacije (srk vetra). Tretja kombinacija nam pove, kakšne so največje upogibne obremenitve v trapezni pločevini, te pa dobimo z največjimi vertikalnimi obremenitvami. Vse našteje kombinacije delujejo v okviru mejnega stanja nosilnosti (MSN). V četrti kombinaciji, pa preverjamo pomike trapezne pločevine. Le-te zajamemo pri mejnem stanju uporabnosti (MSU).

Seizmična obremenitve ni zajeta, čeprav nekateri avtorji ugotavljajo, da sistem, kjer trapezna pločevina tvori diafragma lahko uporabljamo v conah nizke seizmičnosti, saj je diafragma dovolj toga v svoji ravnini. Potresno obremenitev lahko upoštevamo pri enoetažnih halah, kjer ni veliko mase koncentrirane v strehi (G. De Matteis, R. Landolfo, F. M. Mazzolani, 1998). Slika Slika : prikazuje obtežne kombinacije našteje v preglednici 2.



Slika 35: Parcialni koeficienti za kombinacijo obtežb pri mejnem stanju

## 2.11 Podajnost diafragme

### 2.11.1 Na sekundarne nosilce

Strižno podajnost celotne diafragme se izračuna tako, da seštejemo vse naslednje komponente (glej tudi poglavje 3.4) :

- a) podajnost zaradi distrozije profilov ( $c_{1,1}$ ),
- b) podajnost zaradi strižni deformacij v panelih ( $c_{1,2}$ ),
- c) podajnost zaradi zdrsa vijaka med trapezno pločevino in sekundarnimi nosilci ( $c_{2,1}$ ),
- d) podajnost stranskega šiva ( $c_{2,2}$ ),
- e) podajnost zaradi zveze med spojem in primarnim nosilcem ( $c_{2,3}$ ),
- f) podajnost zaradi povezave med primarnimi in sekundarnimi nosilci (le v primeru, ko imamo sistem, kjer je pločevina pritrjena na sekundarne nosilce) ( $c_{2,4}$ ),
- g) podajnost zaradi osnih deformacij v robnih nosilcih ( $c_3$ ).

Na podajnost pri distroziji profilov ( $c_{1,1}$ ) najbolj vpliva geometrija trapezne pločevine, njena debelina in način pritrditve. Pritrjevanje le v grebenih je veliko bolj podajno. Podajnost je tudi odvisna od število sekundarnih nosilcev (če gre za tak sistem) in kolikokrat se paneli prekrivajo med seboj. Večje kot je število sekundarnih nosilcev in večja kot je dolžina prekrivanja med paneli manjša je podajnost.

Vsak panel, ki je v osnovi pravokotne oblike, se zaradi strižne obtežbe skuša preoblikovati v paralelogram (slika 19 - desno). V primeru, ko so paneli pritrjeni na sekundarne nosilce, strižni tok ni enakomerno porazdeljen in zato moramo upoštevati tudi faktor, ki je upošteva število sekundarnih nosilcev ( $c_{1,2}$ ).

Zdrs vijaka med paneli in nosilci ( $c_{2,1}$ ), ki nastane zaradi zračnosti, se lahko določi le s testi. Za samo-rezne in samo-izvrtljive vijake so taki testi že narejeni. Pri pritrjevanju z žičniki ali točkovni zvari zdrsa ni. Pomembno je, da so razdalje med vijaki dovolj majhne, saj tako zagotavljamo dovolj veliko togost in nosilnost diafragme.

Pri stranskem šivu se zaradi strižnih obremenitev paneli med seboj premaknejo ( $c_{2,2}$ ). V mejnem stanju se zaradi bočnih pritiskov pločevina prične trgati (duktilna porušitev). V stranskih šivih vezna sredstva predstavljajo samo-rezni vijaki ali žičniki, ki pa ne smejo biti aluminijasti, saj je njihova nosilnosti običajno prenizka.

Strižne ojačitve navadno predstavljajo različni hladno oblikovani profili, ki so privijačeni na zgornjo pasnico primarnega nosilca. Vezna sredstva so enaka kot pri stranskih šivih. Zdrs nastane zaradi enakih razlogov kot zgoraj, le da gre za zdrs med ojačitvijo in trapezno pločevino ( $c_{2,3}$ ).

Podajnosti  $c_{1,i}$  in  $c_{2,i}$  nastanejo zaradi aktivacije diafragme. Podajnost  $c_3$  pa nastane zaradi upogiba sekundarnega nosilca. Podajnost diafragme je manjša, če trapezna pločevina poteka neprekinjeno čez več sekundarnih nosilcev.

Zgoraj smo omenili, da seštevek vseh podajnosti tvori celotno podajnost diafragme, kar pa shematično prikazuje slika 36.



Slika 36: Deformacije v diafragmi – zaporedni sistem

### 2.11.2 Na primarne nosilce

V primeru, ko pa je trapezna pločevina pritrjena na primarne nosilce, se podajnost izračuna na podoben način kot v zgornjem poglavju, razlika pa je v podajnosti  $c_{2,1}$  in  $c_{2,3}$ . Podajnost  $c_{2,1}$  predstavlja zdrs vijaka ali žičnika med primarnim nosilcem in trapezno pločevino. Le-ta je odvisna od števila vijakov ali žičnikov ter relativne razdalje med njimi. Bolj kot so na gosto vijakačeni manjša je podajnost. Druga podajnost ( $c_{2,3}$ ) pa predstavlja zdrs vijaka med robno ojačitvijo in robnim nosilcem. Tudi ta je odvisna od števila pritrdilnih sredstev in od velikosti letih. Enačbe in faktorji so za oba sistema (na primarne in sekundarne nosilce) podrobneje podani in opisani v poglavju 3.4.

### 3 Dimenzioniranje profilirane pločevina in vseh pritrditev

#### 3.1 Splošno

Standard *SIST 1993-1-3* podaja principe projektiranja diafragme, ki jih tvori trapezna pločevina. Za postopek izračuna pa se sklicuje na publikacijo *ECCS* (ECCS, 1995). Ta publikacija podaja izračune, vendar so postopki izračunov, ki jih podaja avtor T. Höglund dosti bolj obsežni in natančni. V nadaljevanju bomo pokazali, kako se diafragmo, ki jo tvorijo trapezne pločevine izračuna na oba načina.

#### 3.2 Dimenzioniranje trapezne pločevine po publikaciji ECCS

Publikacija loči diafragmo na dva dela, prav tako kot smo jih ločili v poglavju 2.2. Torej gre za diafragmo, kjer je trapezna pločevina pritrjena bodisi na primarne ali bodisi na sekundarne nosilce. V naslednjih poglavjih bomo prikazali oba načina, kako se določi strižna nosilnost diafragme.

##### 3.2.1 Dimenzioniranje trapezne pločevine pritrjene neposredno na primarne nosilce

Pri taki zasnovi diafragme, sta le prva dva porušna mehanizma, ki sta spodaj nanizana, duktilna. Pri ostalih gre za neduktilne porušitve, tem pa se želimo v konstrukcijah izogibati. Priporočeno je tudi, da imajo neduktilne porušitve 25% dodatne nosilnosti v primerjavi z merodajno porušitvijo (ECCS, 1995). Gre za neke vrste načrtovanja nosilnosti za diafragme, ki jih tvorijo trapezne pločevine. Spodaj so nanizani porušni mehanizmi ter enačbe, ki povedo, kako določiti nosilnost določenega mehanizma:

- DUKTILNE PORUŠITVE:
  - a) nosilnost stranskega šiva

$$V_{ult,1} = \frac{a}{b} \left( n_s \cdot F_s + \frac{\beta_1 \cdot F_p}{\beta_3} \right), \quad (3.1)$$

- b) nosilnost stikovanja robnih pritrditev (štirje robovi trapezne pločevine so pritrjeni na primarne nosilce)

$$V_{ult,2} = \frac{a}{b} (n_{sc} \cdot F_s), \quad (3.2)$$

- c) nosilnost stikovanja robnih pritrditev (dva robova trapezne pločevine sta pritrjena na primarne nosilce)

$$V_{ult,3} = \frac{a}{b} (1,5 \cdot \beta_1 \cdot F_p), \quad (3.3)$$

$$V_{Rd} = \min V_{ult,i}$$

- NEDKUTILNE PORUŠITVE:

- d) nosilnost stika pločevine in nosilca ob upoštevanju »prying sile«

$$V_{Rd} \leq \frac{0,6 \cdot a \cdot F_p}{p}, \quad (3.4)$$

- e) porušitev trapezne pločevine na robu diafragme

$$V_{Rd} \leq 0,9 \cdot f_y \cdot a \sqrt{\frac{t^3}{d}}, \quad (3.5)$$

- f) strižni uklon trapezne pločevine

1. globalni uklon

$$V_{cr,g} = 28,8 \cdot \frac{a}{b^2} \cdot \sqrt[4]{D_x \cdot D_y^3}, \quad (3.6)$$

$$D_x = \frac{E \cdot t^3 \cdot d}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot u'} \quad (3.7)$$

$$D_y = \frac{E \cdot I}{d}, \quad (3.8)$$

2. lokalni uklon

- i. neojačana pasnica (grebena) trapezne pločevine,

$$V_{cr,l} = 4,83 \cdot t \cdot b \cdot E \cdot \left(\frac{t}{l}\right)^2, \quad (3.9)$$

- ii. ojačana pasnica (grebena) trapezne pločevine,

$$V_{cr,l} = 36 \cdot \frac{b}{b_k^2} \cdot \sqrt[4]{D_{x,i} \cdot D_{y,i}}, \quad (3.10)$$

$$D_{x,i} = \frac{E \cdot I_f}{b_k}, \quad (3.11)$$

$$D_{y,i} = \frac{E \cdot t^3}{10,92}, \quad (3.12)$$

3. interakcija med lokalnim in globalnim uklonom trapezne pločevine,

$$\frac{l}{t} \leq 2,9 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \rightarrow \text{interakcija se lahko zanemari}$$

$$\frac{l}{t} > 2,9 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

→ interakcija se upošteva in sicer tako, da se zmanjša nosilnost  
globalnega uklona trapezne pločevine:

$$V_{red} = \frac{V_{cr,g} \cdot V_{cr,l}}{V_{cr,g} + V_{cr,l}} \quad (3.13)$$

Projektni pogoj je torej:

$$V_{Rd} \leq V_{red}, \quad (3.14)$$

g) nosilnost robnih nosilcev (leg)

$$N_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot l^2}{8 \cdot a}. \quad (3.15)$$

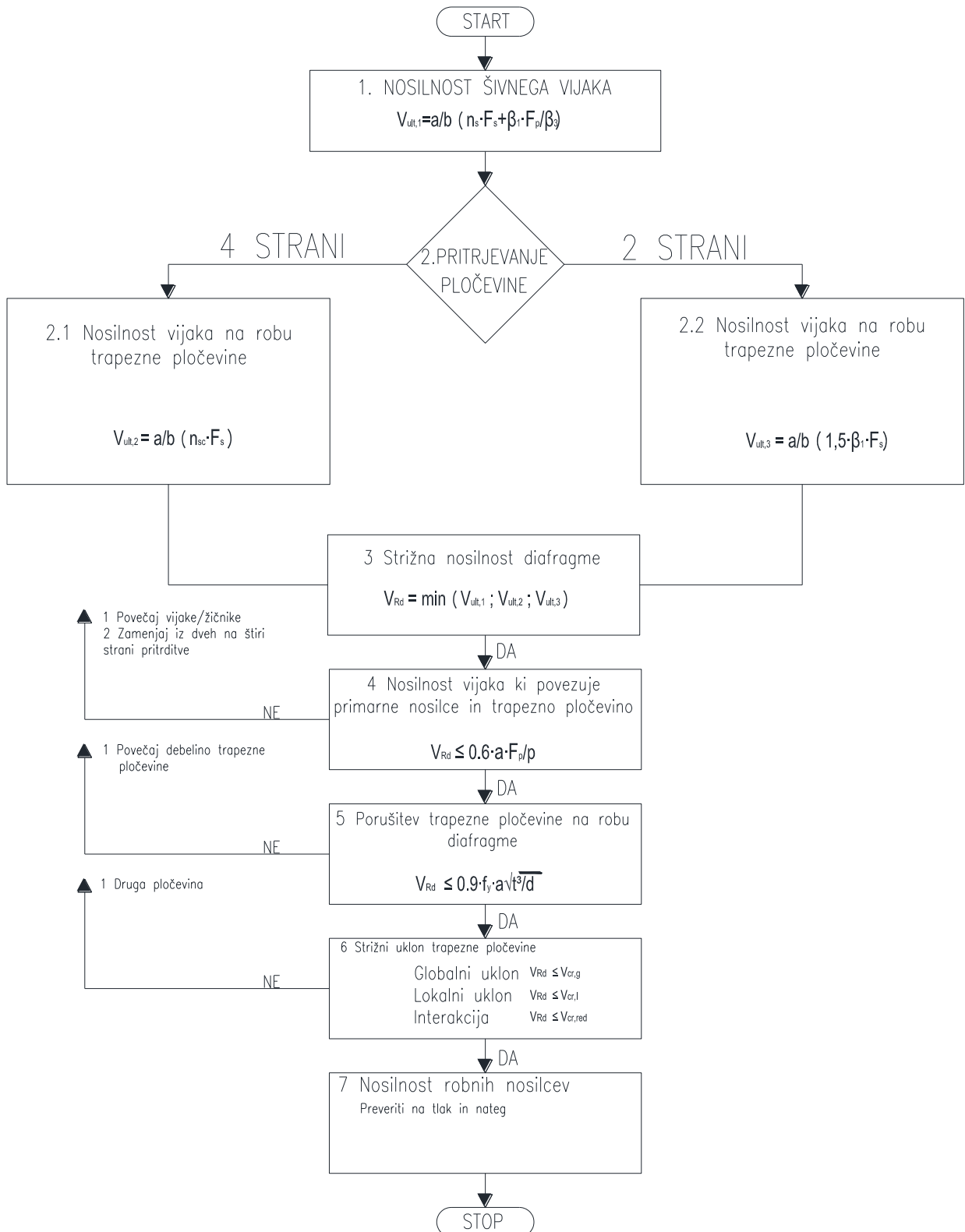
Oznake zgornjih enačb:

- a* razdalja med primarnima nosilcema
- b* širina diafragme
- n<sub>s</sub>* število šivnih vijakov – izključujoče tiste ki gredo skozi pločevino in nosilec
- F<sub>s</sub>* nosilnost pritrditve pločevine na strižno povezavo v bočnem pritisku
- β<sub>1</sub>* faktor ki je odvisen od števila vijakov
- F<sub>p</sub>* nosilnost pritrditve pločevine med pločevino in nosilec v bočnem pritisku
- β<sub>3</sub>* faktor, ki zajema koliko je število trapeznih panelov
- n<sub>sc</sub>* število vijakov, ki povezujejo ojačitev in trapezno pločevino
- p* razdalja med vijaki
- f<sub>y</sub>* meja tečenja trapezne pločevine
- t* debelina pločevine
- d* razdalja med vijakoma – kot kaže preglednica 11
- D<sub>x</sub>* upogibna togost
- D<sub>y</sub>* upogibna togost
- E* elastični modul jekla
- I* vztrajnostni moment samo enega vala profilirane pločevine
- u* obseg trapezna pločevine od enega do drugega vijaka – preglednica 11
- v* Poissonov količnik jekla
- l* dolžina zgornje ali spodnje pasnice
- b<sub>k</sub>* strižna nosilnost šivnega vijaka
- D<sub>x,i</sub>* upogibna togost
- D<sub>y,i</sub>* upogibna togost

- $q_{Ed}$     *projektna obtežba na diafragmo*  
 $\alpha_3$     *faktor odvisen od števila sekundarnih panelov*  
 $p$       *središčna razdalja med koriti*

Na sliki 37 je prikazano, da moramo najprej izračuna prva dva porušna mehanizma, lahko tudi tretjega, vendar sistem kjer je trapezna pločevina pritrjena le na dva robova. Kadar je trapezna pločevina pritrjena le na dveh robovih ima diafragme manjšo nosilnost in težave pri pomikih konstrukcije, zato tak sistem pritrjevanja ni priporočljiv. Nato preverimo kateri ima manjšo vrednost in tisti je merodajen ( $V_{Rd} = \min(V_{ult,1}, V_{ult,2}, V_{ult,3})$ ). Sledi preverjanje neduktilnih porušitev, kjer moramo zagotoviti, da bo imela merodajna porušitev vedno manjšo vrednost kot ostale. Kadar preverjamo vijak, ki povezuje primarne nosilce in trapezno pločevino, nosilnost zmanjšamo kar za 40% - *glej enačbo 3.4* (ECCS, 1995). Razlog tiči v obremenitvi vijaka, saj je vijak poleg strižnih obremenitev obremenjen še z dodatno silo zaradi ekscentričnosti reakcijske sile t.i. »*prying*« (ang.) sile. Te se pojavijo zaradi deformiranja trapezne pločevine in vijak natezno obremenijo, torej nastane interakcija med strigom in nategom.





Slika 37: Potek dimenzioniranja diafragme po ECCS (D. Dubina, V. Ungureanu, R. Landolfo, 2012) za trapezno pločevino pritrjeno neposredno na primarne nosilce

### 3.2.2 Dimenzioniranje trapezne pločevine pritrjene na sekundarne nosilce

Podobno kot pri poglavju 3.2.1 se tudi tukaj določi strižna nosilnost diafragme po določenih porušnih mehanizmih. V primeru, kjer je pločevina pritrjena na sekundarno nosilce, lahko nastanejo duktilne porušitve in sicer porušitev stranskega šiva, nosilnost stikovanja pritrditev pločevine in čelnega nosilca ter nosilnost stikovanja strižne ojačitve in trapezne pločevine pri notranjem sekundarnem nosilcu. Strižno nosilnost diafragme nam določa minimalna vrednost izmed prvih treh nosilnosti ( $V_{Rd} = \min(V_{ult,1}, V_{ult,2}, V_{ult,3})$ ). Ostale so neduktilne porušitve. Vsi pogoji, ki določajo nosilnost diafragme so naštetih spodaj:

- DUKTILNE PORUŠITVE:

- a) nosilnost stranskega šiva

$$V_{ult,1} = n_s \cdot F_s + \frac{\beta_1 \cdot F_p \cdot n_p}{\beta_3}, \quad (3.16)$$

- b) nosilnost stikovanja pritrditev pločevine in čelnega nosilca

$$V_{ult,2} = n_{sc} \cdot F_{sc}, \quad (3.17)$$

- c) nosilnost stikovanja strižne ojačitve in trapezne pločevine pri notranjem sekundarnem nosilcu

$$V_{ult,3} = \frac{1}{2} \cdot n'_{sc} \cdot F_{sc} \cdot (n - 1), \quad (3.18)$$

$$V_{Rd} = \min V_{ult,i}$$

- NEDUKTILNE PORUŠITVE

- d) nosilnost stika pločevine in sekundarnega nosilca

$$V_{Rd} \leq \frac{0,6 \cdot b \cdot F_p}{p \cdot \alpha_3}, \quad (3.19)$$

- e) porušitev trapezne pločevine na robu diafragme

*se izračuna enako kot v enačbi 3.5,*

- f) strižni uklon trapezne pločevine
  1. globalni uklon

*se izračuna enako kot v enačbi 3.6, 3.7 in 3.8,*

## 2. lokalni uklon

i. neojačana pasnica (grebena) trapezne pločevine  
*se izračuna enako kot v enačbi 3.9,*

ii. ojačana pasnica (grebena) trapezne pločevine  
*se izračuna enako kot v enačbi 3.10, 3.11 in 3.12,*

## 3. interakcija med lokalnim in globalnim uklonom trapezne pločevine

*se izračuna enako kot v enačbi 3.13 in 3.14,*

### g) nosilnost robnih nosilcev (leg)

*se izračuna enako kot v enačbi 3.15.*

Kadar preverjamo nosilnost stika med sekundarnimi nosilci in trapezno pločevino veljajo enaka pravilo kot v prejšnjem poglavju za primer, ko preverjamo nosilnost stika med primarnimi nosilci in pločevino. Vse oznake so razložene v prejšnjem poglavju, le da sta oznaki  $a$  in  $b$  v primeru, kjer je pločevina pritrjena na sekundarne nosilce ravno zamenjani. Torej je  $a$  razdalja med polji in  $b$  širina diafragme. V tabeli 3 in 4 pa so podane vrednosti za parametre  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  in  $\alpha_3$ , te veljajo tudi za primer v poglavju 3.2.1.

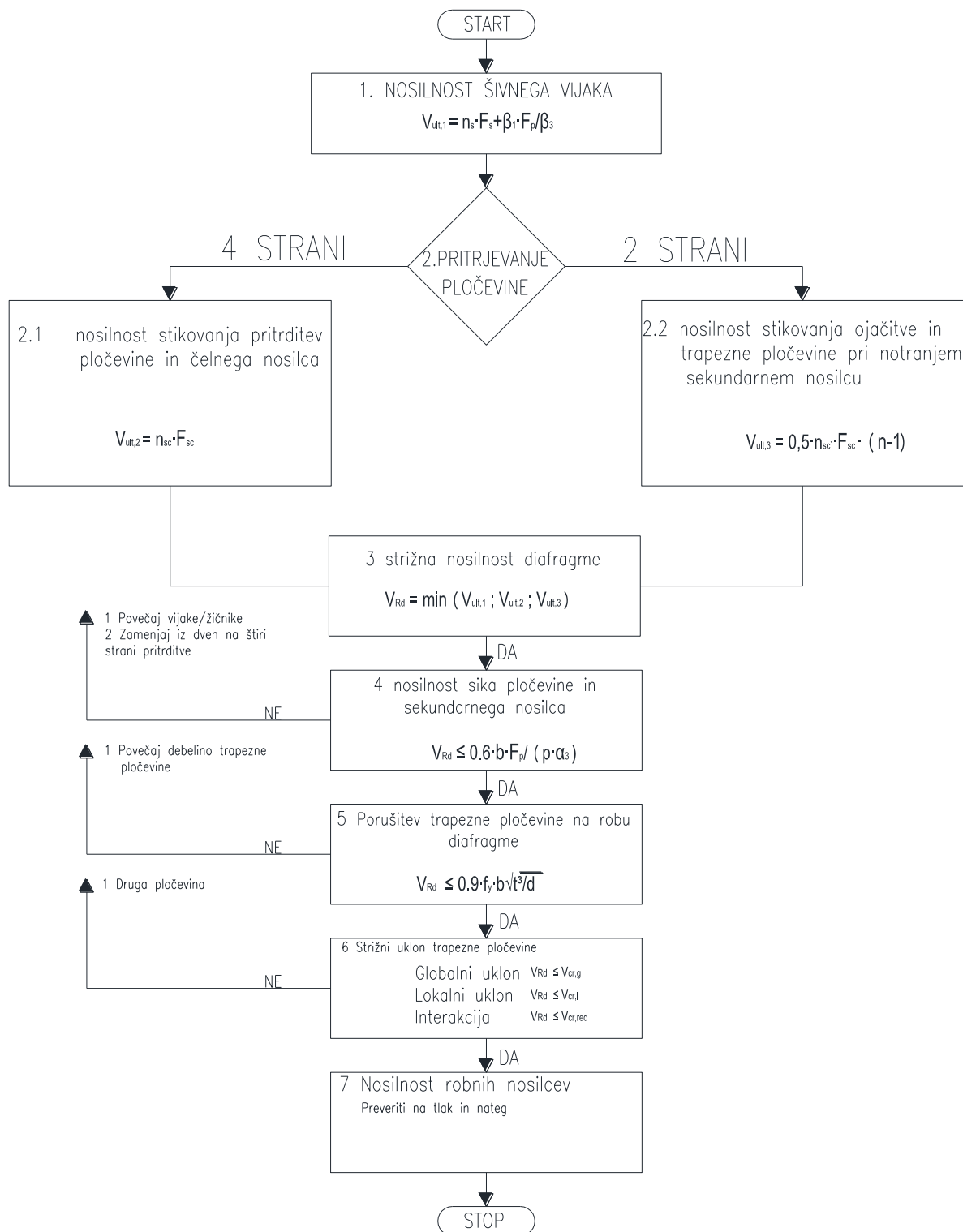
Preglednica 3: Faktorji odvisni od števila nosilcev

skupno število sekundarnih nosilcev na širino trapeznega panlea - $n_p$	faktor		
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
2	1	1	1
3	1	1	1
4	0,85	0,75	0,9
5	0,7	0,67	0,8
6	0,6	0,55	0,71
7	0,6	0,5	0,64
8	0,6	0,44	0,58
9	0,6	0,4	0,53
10	0,6	0,36	0,49
11	0,6	0,33	0,45
12	0,6	0,3	0,42
13	0,6	0,29	0,39
14	0,6	0,27	0,37
15	0,6	0,25	0,35
16	0,6	0,23	0,33
17	0,6	0,22	0,31
18	0,6	0,21	0,3
19	0,6	0,2	0,28
20	0,6	0,19	0,27

Preglednica 4: Faktorji odvisni od števila vijakov, ki povezujejo pločevino in nosilec

skupno število vijakov na širino trapeznega panela - $n_f$	faktor $\beta_1$		faktor $\beta_2$
	ploč. pritrjena na sek. nosilce	ploč. pritrjena na prim. nosilce	
2	0,13	1	1
3	0,3	1	1
4	0,44	1,04	1,11
5	0,58	1,13	1,25
6	0,71	1,22	1,4
7	0,84	1,33	1,56
8	0,97	1,45	1,71
9	1,1	1,56	1,88
10	1,23	1,68	2,04

Na sliki 38 je prikazan diagram poteka dimenzioniranja strižne diafragme.



Slika 38: Potek dimenzioniranja diafragme po ECCS (Vir: D. Dubina, V. Ungureanu, R. Landolfo, 2012) za trapezno pločevino pritrjeno na sekundarne nosilce

### 3.3 Dimenzioniranje trapezne pločevine po Höglundu (T. Höglundu, 2002)

Proizvajalci profiliranih pločevin morajo zagotoviti določene karakteristike o nosilnosti pločevin, da bi lahko preverili ali določeno obtežbo le-te prenesejo. Podatki, ki jih potrebujemo so naslednji:

Preglednica 5: Označba nosilnosti profilirane pločevine

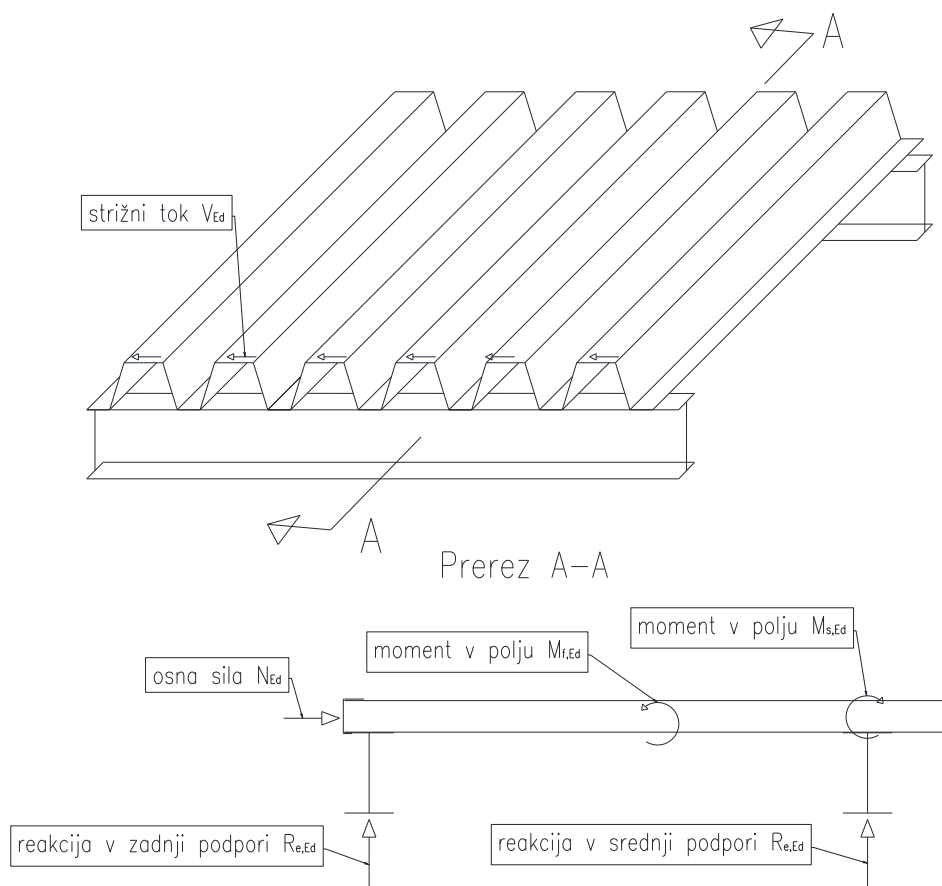
Simbol	Opis
$V_{w,Rd}$	strižna nosilnost pločevine proti strižnemu izbočenju stojine
$V_{f,Rd}$	strižna nosilnost pločevine proti uklonu pasnice
$V_{g,Rd}$	strižna nosilnost pločevine proti globalnemu uklonu panela
$R_{s,Rd}$	strižna nosilnost pločevine proti upogibu na robu profila
$V_{r,Rd}$	odpornost profila proti reakciji v srednji podpori
$R_{e,Rd}$	odpornost profila proti reakciji na koncu profila
$R_v/V$	faktor, ki pove kolikšna je sila v podpori (v ravnini diafragme), če pomnožimo s prečno silo
$F_{c2}$	nosilnost proti iztrgu v vijaku
$M_{f,Rd}$	upogibna nosilnost pločevine za pozitivno orientacijo (v polju)
$M_{s,Rd}$	upogibna nosilnost pločevine za negativno orientacijo (nad podporo)
$N_{c,Rd}$	uklonska nosilnost pločevine (globalni uklon panela)

Za izračun pa potrebujemo tudi obtežbe, ki so podane v naslednji preglednici.

Preglednica 6: Označba za obremenitve

Simbol	Opis
$V_{Ed}$	strižna sila v ravnini diafragme, strižni tok
$R_{s,Ed}$	reakcija v srednji podpori
$R_{e,Ed}$	reakcija v zadnji podpori
$M_{f,Ed}$	moment v polju zaradi vertikalnih obremenitev
$M_{s,Ed}$	moment nad podporo zaradi vertikalnih obremenitev
$N_{Ed}$	osne sile

Zgoraj našteje obtežbe so prikazane na sliki Slika 39:

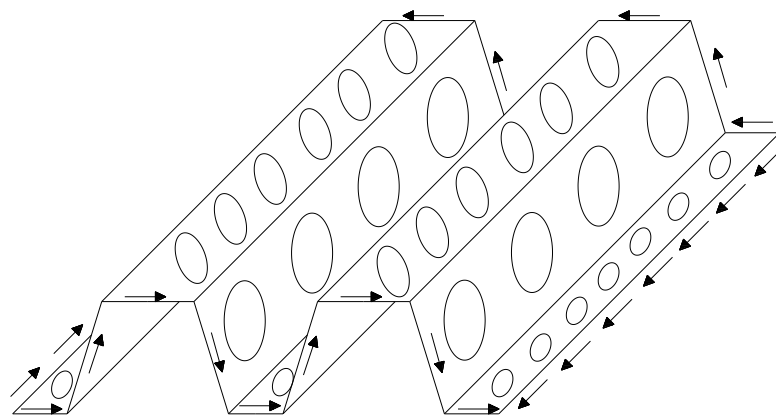


Slika 39: Prikaz obremenitev v trapezni pločevini

### 3.3.1 Profilirana pločevina

#### 3.3.1.1 Individualni element

Pri samostojnem elementu moramo preveriti kombinacije, v katerih so zajete obtežbe zaradi vetra na stene (horizontalna obtežba) in vertikalne obtežbe, ki nastopi zaradi lastne in stalne teže ter teže snega. Preveriti pa je potrebno tudi, da ne nastane lokalno izbočenje v stojini ali pasnici ali pa globalnega izbočenja celotnega profila zaradi strižne sile.



Slika 40: Lokalno izbočenje pasnic (zgoraj in spodaj) in stojin zaradi strižne sile

Da ne bi prišlo do lokalnega uklona stojine, moramo izpolniti naslednja dva kriterija, kjer preverjamo strig in interakcijo z momentom:

$$V_{Ed} \leq V_{w,Rd} \quad (3.20)$$

$$\frac{M_{f,Ed}}{M_{f,Rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} \leq 1,3 \quad (3.21)$$

Preveriti moramo tudi, da ne bi nastalo lokalno izbočenje pasnice. Le-to zagotovimo z naslednji enačbo:

$$V_{Ed} \leq V_{f,Rd} \quad (3.22)$$

$$0,8 \cdot \frac{M_{f,Ed}}{M_{f,Rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{f,Rd}} \leq 1,1 \quad (3.23)$$

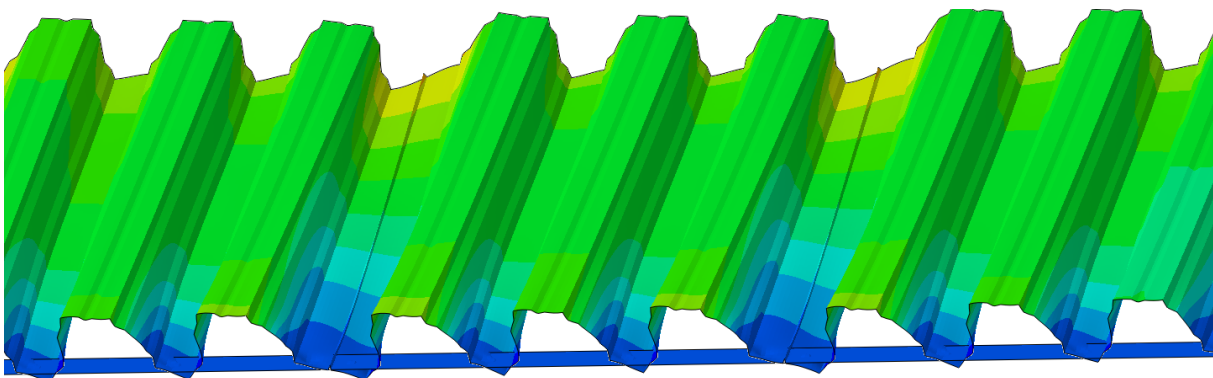
Nato pa preverimo še globalno izbočenje panela, kjer moramo izpolniti naslednji pogoj.

$$V_{Ed} \leq V_{g,Rd} \quad (3.24)$$

Oznake navedenih količin so nanizane v preglednici 5 in 6.

### 3.3.1.2 Deformacije na robu profilirane pločevine

Na koncu stavbe oz. na robu profilirane pločevine se strižni tok prenese iz panela na podporo, ki pa jo predstavlja zgornja pasnica primarnih ali sekundarnih profilov. Pri pritrjevanju obstaja več načinov, kako se le-to izvede. Pločevino lahko vijačimo v vsakem koritu ali pa v vsakem drugem. V takem primeru pride do ekscentričnosti, ki povzročijo deformacijo na robu profila kot kaže slika 41. Na sliki 41 so pomiki zaradi lažjega prikaza povečani za faktor 10, barve pa prikazujejo magnitudo pomikov.

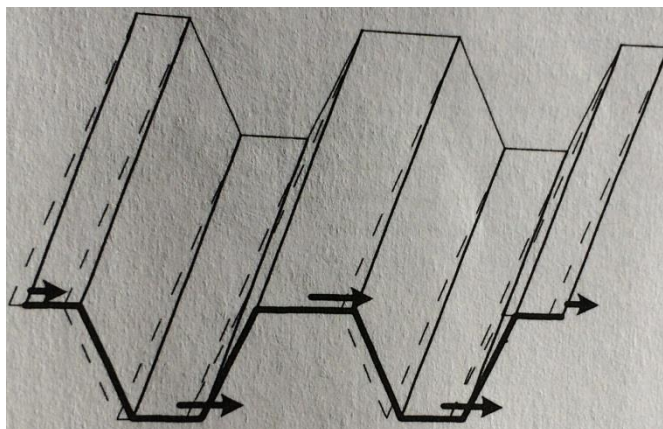


Slika 41: Deformacije na robu profilirane pločevine v primeru pritrditve v vsakem koritu

Najboljši primer pritrditve panelov na robu pa je tak, da se pritrdi tako greben kot korito profila (slika 26). V takem primeru pride do boljšega ravnotežja med strižnim tokom v panelu in reakcij

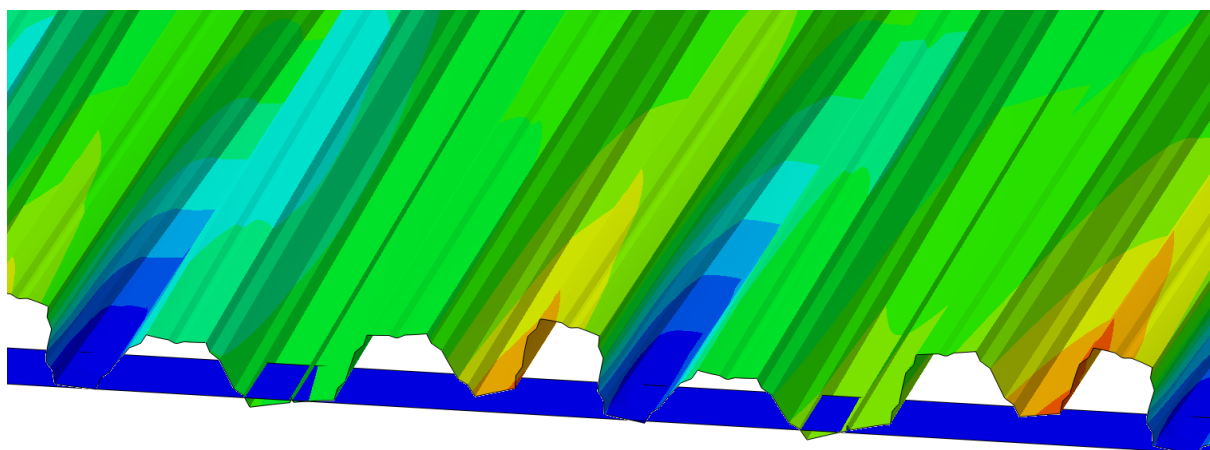


v nosilcih (čelni in robni nosilci). V takem primeru pride le do strižnih deformacij v pločevini, do nekaj deformacij pa pride tudi v pritrdilnih sredstvih. Slika 42 prikazuje strižne deformacije v primeru pritrditev na obeh straneh (vrhu in dnu pasnice).



Slika 42: Strižne deformacije na robu panela v primeru pritrditve pasnic (zgornje in spodnje)

Najslabši primer pritrdjevanja roba profilirane pločevine pa je tak, da se panel pritrdi le v spodnjih pasnicah in v vsakem drugem koritu. Tukaj pride do veliko večjih deformacij in posledično pomikov (slika 43). Na omenjeni sliki so pomiki zaradi lažjega prikaza povečani za faktor 5, barve pa prikazujejo magnitudo pomikov. Takemu pritrdjevanju se raje izognemo ali pa ga uporabimo tam, kjer je strižni tok in ostale obremenitve izjemno majhne.



Slika 43: Deformacije na robu panela v primeru fiksiranja v vsaki drugi spodnji pasnici

Ker pa vseeno lahko v kateremkoli od naštetih primerov pritrditve pride do mečkanja stojine v panelu, moramo izpolniti naslednjo enačbo.

$$V_{r,Rd} \geq V_{Ed} \quad (3.25)$$

$$\frac{R_{e,Ed}}{R_{e,Rd}} + \frac{R_{v,Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1,05 \quad (3.26)$$

### 3.3.1.3 Potrebne kontrole pri vmesni podpori

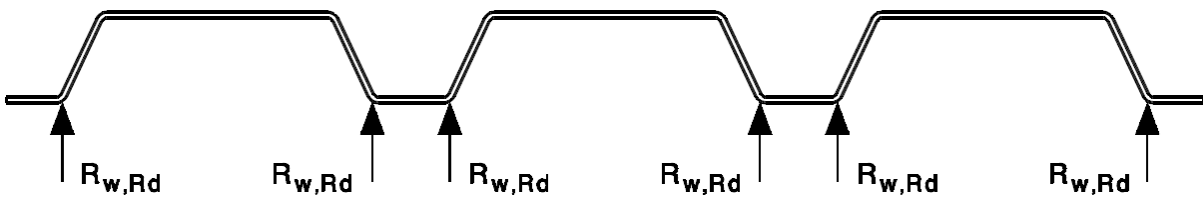
Pri vmesni podpori moramo preveriti lokalni uklon in mečkanje stojine v panelu. To preverimo z naslednjimi enačbami, kjer moramo upoštevati:

$$0,8 \cdot \frac{R_{s,Ed}}{R_{s,Rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} \leq 1,1 \quad (3.27)$$

in

$$\frac{M_{s,Ed}}{M_{s,Rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} \leq 1,3 \quad (3.28)$$

Vrednost  $R_{s,Rd}$  lahko izračunamo po *SIST 1993-1-3*, kjer se pojavi drugačna oznaka in sicer  $R_{w,Rd}$ , kot kaže slika Slika 44:.



Slika 44: Lokalni vnos prečne sile (SIST EN 1993-1-3)

### 3.3.1.4 Osne sile v profilirani pločevini

Na čelnem okvirju (priveterna stran) se preko vrhov stebrov sile zaradi vetra prenesejo v pločevino. Velikost le-te pa je odvisna od togosti čelnih stebrov. Zagotoviti moramo, da osna sila v pločevini ni prevelika, da ne pride do izbočitve le-te. Zato upoštevamo naslednjo enačbo.

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \quad (3.29)$$

Osna sila ima tekom dolžine stavbe vedno manjši vpliv in hitro vpade (slika 17), zato lahko vzamemo da je efektivna dolžina na približni razdalji 80 odstotkov razdalje med primarnimi nosilci.

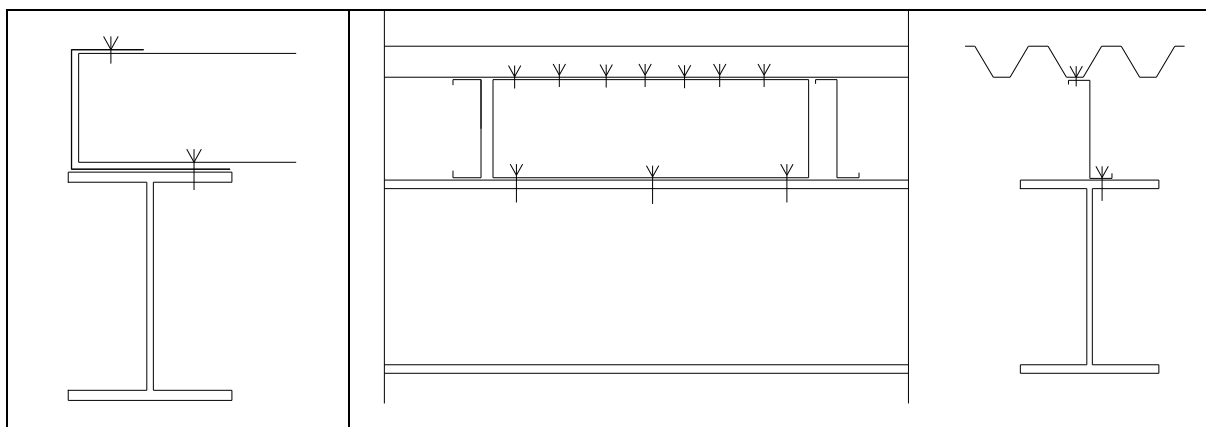
Preveriti moramo tudi interakcijo med osno silo in momentom, kjer mora veljati naslednja enačba.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{f,Ed}}{M_{f,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.30)$$

### 3.3.2 Robni nosilci

Robni nosilci prenašajo osne sile, ki nastanejo zaradi dvojice sil (momenta) v pločevini ali pa zaradi reakcij podpor v čelnih legah. To velja, kadar so paneli priključeni direktno na primarne nosilce. V primeru, ko je trapezna pločevina fiksirana na sekundarne nosilce pa upoštevamo, da se osna sila prenese na krajna dva. Dimenzioniranje krajnih elementov se izvede tako, da se upošteva večjo izmed tlačnih sil v profilu.

Strižne obremenitve v pločevini so velike, zato je lahko potrebno dodati ojačitve na robovih objekta. Kadar gre za primer, kjer je pločevina pritrjena neposredno na primarne nosilce, ojačitve postavimo prečno na smer valov, v drugem primeru, kjer pa je pločevina pritrjena na sekundarne nosilce, pa ojačitve postavimo vzdolž konstrukcije.



Slika 45: Ojačitve na robu konstrukcije

Polovica strižnega toka se prenese preko zgornje pasnice in nato naprej na ojačitev preko vijaka, ki jih povezuje. Ojačitev bi morala biti vsaj  $0,5 \text{ mm}$  debelejša od debeline profilirane pločevine, ali pa je potrebno preveriti da ne bi nastalo lokalno izbočenje ojačitve.

### 3.3.3 Povezave med pločevinami in pritrditve

Širina panelov je veliko manjša kot je širina ali dolžina stavbe. Zato moramo le-te nekako združiti med seboj, da delujejo kot eno. Najbolj pogosta pritrjevalna sredstva so vijaki in točkovni zvari. Seveda so vse povezave odločilno pomembne pri prenosu strižnega toka med paneli in med nosilci. Ko preverjamo pritrditve to običajno naredimo tako, da povemo kolikšno je minimalno število vijakov ali zvarov. Količine le teh so našteje v tabeli 7.

Preglednica 7: Priporočeno minimalno število vijakov

Lokacija	Število vijakov
<i>stransko prekrivanje panelov</i>	<i>največ na 500mm</i>
<i>panel ki se priključuje na lege</i>	<i>največ na 500mm</i>
<i>robna ojačitev (če je potrebna)</i>	<i>največ na 300mm</i>
<i>visoki profili – <math>h_w &gt; 50</math> mm in <math>b_d &gt; 200</math> mm prosti rob pločevine</i>	<i>v primeru dveh ali nobene ojačitve v spodnji pasnici se pritrdi en vijak v vsako korito, sicer dva</i>
<i>nizki profili – <math>h_w \leq 50</math> mm in <math>b_d \leq 200</math> mm prosti rob pločevine</i>	<i>vijak v vsako korito</i>
<i>visoki profili – <math>h_w &gt; 50</math> mm in <math>b_d &gt; 200</math> mm vmesna podpora</i>	<i>vijak v vsako korito</i>
<i>nizki profili – <math>h_w \leq 50</math> mm in <math>b_d \leq 200</math> mm vmesna podpora</i>	<i>vijak v vsako korito</i>

Prav tako moramo zagotoviti, da so stranski šivi projektirani tako, da se v panelih lahko razvije strižna obremenitev, ne da bi prišlo do zdrsa med paneli. Preprečiti moramo, da bi bil merodajni kriterij za porušitev po vijaku, torej morajo biti vijaki dovolj veliki, da se začne zaradi bočnih pritiskov trgati profilirana pločevina. Ta način pa dosežemo tako, da upoštevamo naslednjo enačbo.

$$c_n = \frac{F_{s,Rd}}{V_{Ed}} \quad (3.31)$$

V enačbi je upoštevano razmerje med strižno silo ( $V_{Ed}$ ) in strižno projektno nosilnost vijaka ali z odpornostjo pločevine na trganje zaradi bočnih pritiskov ( $F_{s,Rd}$ ). Upoštevamo seveda nižjo izmed slednjih dveh vrednosti. Na enak način izračunamo tudi pritrditve panelov na lego.

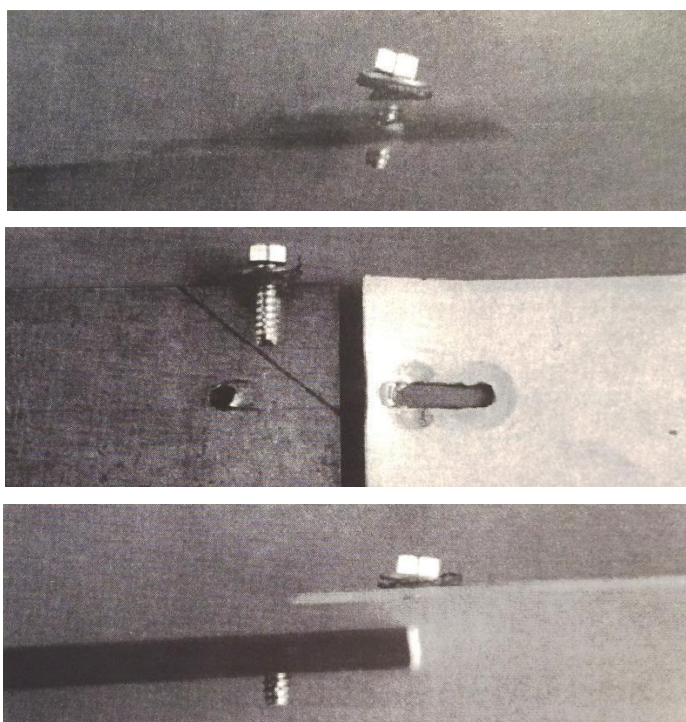
Podobno izračun pa je tudi za pritrditev robne ojačitve (takšne kot so na sliki 45), vendar moramo upoštevati, da je pločevina v istem prerezu privijačena dvakrat. Prav zaradi tega pa se enačba malo prilagodi.

$$c_e = \frac{2 \cdot F_{s,Rd}}{V_{Ed}} \quad (3.32)$$

Predpostavka v slednji enačbi je taka, da se polovico strižne obremenitve prenese preko spodnje pasnice in druga polovica preko zgornje, druga predpostavka pa je, da so uporabljeni enaki vijaki. Spodnji vijak mora biti pritrjen preko profilirane pločevine in ojačitve na zgornjo pasnico lege. Spoji med robno ojačitvijo in konstrukcijo stavbe prenesejo celotno strižno silo v robni nosilec, ker pa mora biti robna ojačitev debelejša od profilirane pločevine morajo biti tudi vijaki večjih premerov, saj moramo zagotoviti, da se vijak ne pretrga. Standard *SIST EN 1993-1-3* podaja, da morajo imeti vijaki vsaj 25% večjo nosilnost od projektne obremenitve.

Slika 46 prikazuje možne porušitve vijakov pri strižni obremenitvi. Zgoraj na sliki 46 je prikazana porušitev zaradi iztrga vijaka iz pločevine, pri tem pa se vijak nagne. Druga porušitev (na sredini na sliki 46) pa prikazuje trganje pločevine zaradi bočnih pritiskov. Tretja porušitev na sliki 46 prikazuje pretrg vijaka zaradi strižne sile.

Za medsebojne pritrditve trapeznih pločevin se največkrat uporabljajo nerjaveči jekleni ali karbonski šivni vijaki, lahko pa tudi aluminijasti žičniki. Po standardu *SIST 1993-1-3* lahko po naslednjih formulah izračunamo bočne pritiske na pločevino (preglednica 8 in 9).



Slika 46: Možne strižne porušitve vijakov (vir: D. Dubina, V. Ungureanu, R. Landolfo, 2012)

Preglednica 8: Izračun bočnih pritiskov pri vijakih

Vijaki obremenjeni v strigu:	
<i>Bočni pritiski:</i> $F_{b,Rd} = \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$	
<i>Pri tem je <math>\alpha</math> enak:</i>	
-če je $t=t_1$ :	$\alpha = 3,2 \cdot \sqrt{t/d}$ ampak $\alpha \leq 2,1$
-če je $t_1 \geq 2,5t$ in $t < 1,0$ mm:	$\alpha = 3,2 \cdot \sqrt{t/d}$ ampak $\alpha \leq 2,1$
-če je $t_1 \geq 2,5t$ in $t \geq 1,0$ mm:	$\alpha = 2,1$
-če je $t < t_1 < 2,5t$ :	$\alpha$ ....se dobi z linearno interpolacijo,
<i>kjer je:</i>	
<i>t...debelina tanjše pločevine</i>	

<i>t<sub>1</sub>...debelina debelejšje pločevine</i>		
<i>Strižna nosilnost vijaka:</i>		
$F_{v,Rd} = F_{v,Rk}^* / \gamma_{M2}$		
<i>*strižna nosilnost vijaka (<math>F_{v,Rk}</math>) se določi s preizkusi</i>		
Pogoji in omejitve:		
${}^1F_{v,Rd} \geq 1,2 \cdot F_{b,Rd}$	$e_1 \geq 3d$	$p_1 \geq 3d$
$3,0 \text{ mm} \leq d \leq 8,0 \text{ mm}$	$e_2 \geq 1,5d$	$p_2 \geq 3d$
1)Potrebni pogoj mora biti izpolnjen, kadar potrebujemo deformacijsko kapaciteto spoja. Če le-ta ni izpolnjen, moramo deformacijsko kapaciteto izpolniti v drugih delih konstrukcije.		

Preglednica 9: Izračun bočnih pritiskov pri žičnikih

Žičniki obremenjeni v strigu:		
<i>Bočni pritiski:</i> $F_{b,Rd} = \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$ , ampak $F_{b,Rd} \leq f_u \cdot e_1 \cdot t / (1,2 \cdot \gamma_{M2})$		
<i>Pri tem je <math>\alpha</math> enak:</i>		
<i>-če je <math>t=t_1</math>:</i>	$\alpha = 3,6 \cdot \sqrt{t/d}$ ampak $\alpha \leq 2,1$	
<i>-če je <math>t_1 \geq 2,5t</math>:</i>	$\alpha = 2,1$	
<i>-če je <math>t &lt; t_1 &lt; 2,5t</math>:</i>	$\alpha$ ....se dobi z linearno interpolacijo,	
<i>kjer je:</i>		
<i>t...debelina tanjše pločevine</i>		
<i>t<sub>1</sub>...debelina debelejšje pločevine</i>		
<i>d...premer vijaka</i>		
<i>f<sub>u</sub>...maksimalna nosilnost pločevine</i>		
<i>Strižna nosilnost vijaka:</i>		
$F_{v,Rd} = F_{v,Rk}^* / \gamma_{M2}$		
<i>*strižna nosilnost vijaka (<math>F_{v,Rk}</math>) se določi s preizkusi</i>		
Pogoji in omejitve:		
$2,6 \text{ mm} \leq d \leq 6,4 \text{ mm}$	$e_1 \geq 1,5 d$	$p_1 \geq 3d$
$f_u \leq 550 \text{ MPa}$	$e_2 \geq 1,5d$	$p_2 \geq 3d,$

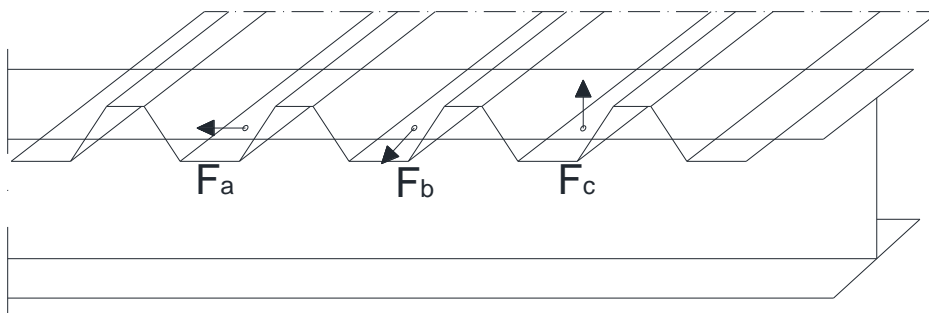
Upoštevajoč enačbe v preglednicah 8 in 9 (op. vrednosti veljajo le za pločevine debeline  $0,5 \text{ mm} \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$ ) lahko izračunamo pri kakšni sili pride do trganja pločevine zaradi strižnih obremenitev. Vrednosti so nanizane v preglednici 10.

Preglednica 10: Nosilnost pločevine na bočni pritisk za vijak premera 6,3 mm

debelina pločevine	debelina jedra pločevine	$f_u$ [Mpa]	debelina podložne pločevine	
			če je $t=t_1$ [kN]	če je $t_1 \geq 2,5 t$ [kN]
0,5	0,441	330	0,62	1,54
0,6	0,538	330	0,84	1,88
0,65	0,587	420	1,21	2,61
0,7	0,636	420	1,37	2,83
0,75	0,685	420	1,53	3,05
0,8	0,734	420	1,7	3,25
0,85	0,783	420	1,87	3,48
1	0,93	420	2,42	4,13
1,2	1,126	420	3,22	5,01
1,5	1,519	420	4,56	6,75
2	1,909	420	7,12	8,49
2,5	2,398	420	10	10,7
Za vijake $\phi=4,8$ pomnožiti z			0,87	0,76
Za vijake $\phi=5,5$ pomnožiti z			0,93	0,87
Za vijake $\phi=8$ pomnožiti z			1,13	1,27

Naslednja kontrola zajema pritrditve profiliranih panelov na primarne nosilce. Pri tej kontroli moramo preveriti predvsem vijake, kajti le-ti so obremenjeni z naslednjimi silami (slika 47):

- $F_a$  – strižna sila v smeri primarnega nosilca
- $F_b$  – strižna sila pravokotno na smer primarnega nosilca
- $F_c$  – izvlečna sila normalno na profilirano pločevino



Slika 47: Obremenitve na vijake nad primarnim nosilcem

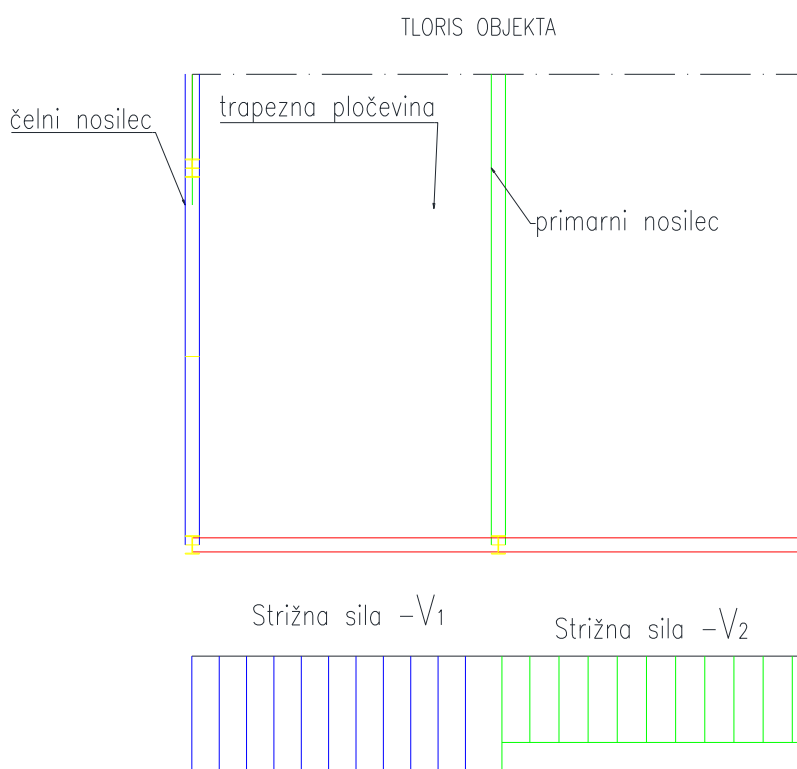
Vzdolž primarnega nosilca se pojavita dve strižni sili. Prva se pojavi med pločevinama na mestu kjer se prekrivata. Silo na vijak lahko tako izračunamo po naslednji enačbi:

$$F_{a1} = c_s \cdot V_1 \quad (3.33)$$

Druga strižna sila pa se pojavi tam, kjer se profilirana pločevina priključuje na primarni nosilec. Drugo silo na vijak dobimo sledeče:

$$F_{a2} = c_s \cdot (V_1 + V_2) \quad (3.34)$$

V enačbi  $c_s$  predstavlja razdaljo med vijaki, kot kaže slika 23.  $V_1$  predstavlja strižno silo na eni strani podpore,  $V_2$  pa na drugi strani podpore, kot kaže slika 48.



Slika 48: Razlika strižnih sil med polji

Silo, ki se pojavi pravokotno na smer primarnih nosilcev, povzroči točkovna obtežba (po navadi na vrhu robnih stebrov). Druga sila na vijak pa se pojavi pri stranskih šivih. Le-ta ( $F_{a3}$ ) se izračuna enako kot pri  $F_{a1}$  vendar moramo upoštevati strižno silo, ki izhaja iz strižnega toka v trapezni pločevini, ki ga povzroči obtežba vzdolž objekta in bolj gosto vijačene povezave.

Zaradi srka vetra na streho se pojavijo tudi izvlečne sile v vijakih ( $F_{c1}$ ), ki pa se jih izračuna enako kot pri  $F_{a1}$  in  $F_{a3}$ , kjer moramo seveda upoštevati primerne razdalje med vijaki in sile na primernih mestih. Izvlečne sile na vijaku ( $F_{c2}$ ) se pojavijo tudi zaradi torzijske obremenitve na koncu profilirane pločevine (pojavijo se zaradi deformacij na robu profilirane pločevine (glej poglavje 3.3.1.2).

Sile, ki delujejo v isti ravnini je potrebno s pomočjo rezultante sil sešteti. Torej združiti moramo obremenitve, ki delujejo v ravnini profiliranih panelov ter obremenitve, ki delujejo normalno na ravnino panelov.

$$F_{v,sd} = \sqrt{(\Sigma F_a)^2 + (\Sigma F_b)^2} \quad (3.35)$$

$$F_{t,sd} = \Sigma F_c \quad (3.36)$$



Nato je potrebno preveriti profilirano pločevino in vijake, tako da uporabimo naslednje enačbe.

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{F_{p,Rd}} \leq 1.0 \quad (3.37)$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 F_{t,Rd}} \leq 1.0 \quad (3.38)$$

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} \quad (3.39)$$

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} \quad (3.40)$$

$$F_{t,Ed} \leq F_{o,Rd}, \quad (3.41)$$

kjer je:

$F_{b,Rd}$       *nosilnost pločevine na bočne pritiske*

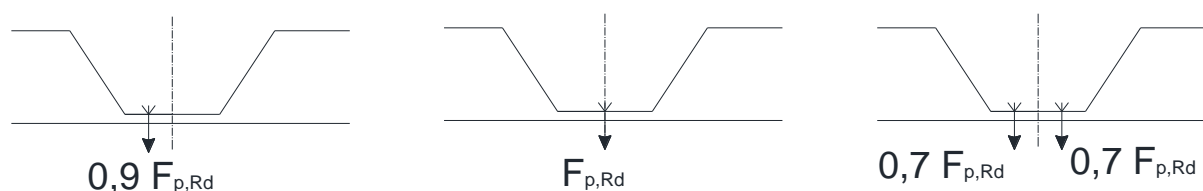
$F_{p,Rd}$       *nosilnost pločevine proti preboju*

$F_{v,Rd}$       *strižna nosilnost vijaka*

$F_{t,Rd}$       *natezna nosilnost vijaka*

$F_{o,Rd}$       *nosilnost proti iztrgu vijaka iz podložnega materiala*

Nosilnost proti preboju za samo-izvrtljive vijake in zakovice je potrebno zmanjšati v primeru, če niso pritrjene ali privijačene centrično v koritu profilirane pločevine. V primeru, ko je pritrdilno sredstvo premaknjeno na četrtno širine korita, je potrebno projektno odpornost vijaka ali zakovice zmanjšati na  $0,9 F_{p,Rd}$ . V primeru, ko pa sta dva vijaka na četrtni razdalje nosilnost zmanjšamo na  $0,7 F_{p,Rd}$ .



Slika 49: Redukcija izvlečne sile zaradi pozicije vijakov in zakovic

### 3.4 Podajnost diafragme

#### 3.4.1 Pločevina pritrjena na primarne nosilce

Podajnost diafragme se po obeh virih (Höglund, 2002; ECCS, 1995) izračuna enako, saj avtor (Höglund, 2002) povzema izračun deformacij po priporočilih ECCS-a. Zagotoviti moramo, da je pomik diafragme manjši od predpisanega. Ločimo med dvema tipoma diafragm, na tisto, kjer je trapezna pločevina pritrjena na primarne nosilce ter diafragmo, pri kateri je trapezna pločevina pritrjena na sekundarne nosilce (poglavje 2.2.1 in 2.2.2).

V nadaljevanju so našete vse možne podajnosti v elementih, ki tvorijo diafragmo in enačbe, za primer, ko je pločevina pritrjena na primarno nosilce:

a) podajnost zaradi distrozije profilov ( $c_{1,2}$ )

$$c_{1,1} = \frac{a \cdot d^{2,5} \cdot \alpha_5 \cdot K}{E \cdot t^{2,5} \cdot b^2}, \quad (3.42)$$

b) podajnost zaradi strižni deformacij v panelih ( $c_{1,2}$ )

$$c_{1,2} = \frac{2 \cdot a \cdot (1 + \nu) \cdot (1 + 2 \cdot \frac{h_w}{b_d})}{E \cdot t \cdot b}, \quad (3.43)$$

c) podajnost zaradi zdrsa vijaka med trapezno pločevino in primarnimi nosilci ( $c_{2,1}$ )

$$c_{2,1} = \frac{2 \cdot a \cdot s_p \cdot p}{b^2}, \quad (3.44)$$

d) podajnost zaradi zdrsa vijaka med paneli (zdrs stranskega šiva) ( $c_{2,2}$ )

$$c_{2,2} = \frac{s_s \cdot s_p \cdot (n_{sh} - 1)}{n_s \cdot s_p + \beta_1 \cdot s_s}, \quad (3.45)$$

$$n_{sh} = \frac{a}{3 \cdot b_d}, \quad (3.46)$$

e) podajnost zaradi zdrsa v vijaku na robu konstrukcije ( $c_{2,3}$ )

$$c_{2,3} = \frac{2 \cdot s_{sc}}{n_{sc}}, \quad (3.47)$$

f) podajnost zaradi osnih deformacij v legah ( $c_3$ )

$$c_3 = \frac{n^2 \cdot b^3}{4,8 \cdot E \cdot A \cdot a^2}. \quad (3.48)$$

Celotno strižno podajnost diafragme izračunamo po naslednji enačbi:

$$c = \frac{b^2}{a^2} \cdot (c_{1,1} \cdot c_{1,2} \cdot c_{2,1} \cdot c_{2,2} \cdot c_{2,3}) + c_3 \quad (3.49)$$

Pomik na sredini konstrukcije pa izračunamo po naslednji enačbi:

$$\Delta = \left(\frac{n^2}{8}\right) \cdot c \cdot (q \cdot b) \quad (3.50)$$

Vse oznake so razložene spodaj:

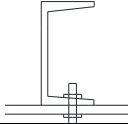
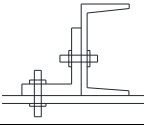
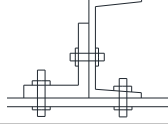
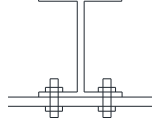
$a$  širina diafragme (slika 8 - tam označena z B)

$d$	<i>razdalja med dvema grebenoma</i>
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	<i>korekcijski faktor, ki upošteva koliko nosilcev prekrije trapezna pločevina</i>
$\alpha_4$	<i>faktor, ki upošteva število panelov po širini konstrukcije</i>
$\alpha_5$	faktor odvisen od števila trapeznih panelov v konstrukciji
$K$	faktor, ki je odvisen od geometrije trapezne pločevine
$E$	elastični modul jekla
$t$	debelina pločevine
$\nu$	Poissonov količnik
$s_p$	podajnost pritrditve v vijaku med pločevino in nosilcem
$b$	dolžina enega polja
$s_s$	zdrs v šivnem vijaku
$n_{sh}$	število korit na širino panela
$h_w$	višina trapezne pločevine
$n_s$	število šivnih vijakov na en preklap med pločevinama
$\beta_1$	faktor, ki upošteva število vijakov na širino panela
$n_p$	število sekundarnih nosilcev (tudi robnih)
$n$	število panelov vzdolž diafragme
$n_{sc}$	število vijakov, ki priključujejo panel na nosilec
$q$	obremenitev diafragme na enoto dolžine





Preglednica 13: Strižne nosilnosti in podajnosti določenih primerov spojev med primarnimi in sekundarnimi nosilci

Tipi sekundarnih nosilcev in njihovih ojačitev	Strižna nosilnost $F_{pr}$ [kN]	Podajnost $s_{pr}$ [mm/kN]
	14,4	0,6
	7,2	1,2
	19,6	0,35
	10	2,6

Od preglednice 11 do 13 veljajo za tipa diafragme D1 (poglavje 2.2.1) in D2 (poglavje 2.2.2).

### 3.4.2 Diafragma pritrjena na sekundarne nosilce

Podajnost diafragme D2 izračunano podobno kot v prejšnjem poglavju, vendar moramo upoštevati druge elemente, ki tvorijo strižno diafragma. Preveriti moramo naslednje podajnosti:

- a) podajnost zaradi distrozije profilov ( $c_{1,1}$ ).

Prvi pogoj, ki nam pove, kolikšna je podajnost zaradi distrozije profilov:

$$c_{1,1} = \frac{a \cdot d \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_4 \cdot K}{E \cdot t^{2.5} \cdot b^2}, \quad (3.51)$$

- b) podajnost zaradi strižni deformacij v panelih ( $c_{1,2}$ ).

Drugi pogoj pravi, da moramo preveriti strižne deformacije v panelu, torej moramo zagotoviti naslednji enačbi (obrazložitev oznak je spodaj, če pa so se že pojavile pa so našteje zgoraj):

$$c_{1,2} = \frac{2 \cdot a \cdot \alpha_2 \cdot (1 + \nu) \cdot (1 + 2 \cdot \frac{h_w}{b_d})}{E \cdot t \cdot b} \quad (3.52)$$

kjer sta:

$h_w$  višina trapezne pločevine

$\nu$  Poissonov količnik jekla

c) podajnost zaradi zdrsa vijaka med trapezno pločevino in sekundarnimi nosilci ( $c_{2,1}$ ).

Tretji pogoj, ki tudi vpliva na podajnost diafragme, pa je podajnost med trapezno pločevino in nosilci. Izpolniti moramo naslednjo enačbo:

$$c_{2,1} = \frac{2 \cdot a \cdot s_p \cdot p \cdot \alpha_3}{b^2}, \quad (3.53)$$

kjer sta:

$s_p$  zdrs v vijaku med pločevino in nosilcem

$p = b_d$

d) podajnost zaradi zdrsa vijaka med paneli (t.i. zdrs stranskega šiva) ( $c_{2,2}$ ).

Pogoj d nam prav tako poveča podajnost diafragme. Le-to izračunamo na naslednji način:

$$c_{2,2} = \frac{2 \cdot s_s \cdot s_p \cdot (n_{sh} - 1)}{2 \cdot n_s \cdot s_p + \beta_1 \cdot n_p \cdot s_s} \quad (3.54)$$

$$n_{sh} = \frac{a}{3 \cdot b_d} \quad (3.55)$$

kjer so:

$s_s$  zdrs v šivnem vijaku

$n_s$  število sivnih vijakov na en preklap med pločevinama

$\beta_1$  faktor, ki upošteva število vijakov na širino panela

$n_p$  število sekundarnih nosilcev (tudi robnih)

e) podajnost zaradi zdrsa med panelom in strižno ojačitvijo ( $c_{2,3}$ ).

Podajnost zaradi zdrsa med panelom in strižno ojačitvijo izračunamo po naslednji enačbi:

$$c_{2,3} = \frac{4 \cdot (n + 1) \cdot s_s}{n^2 \cdot n_{sc}} \quad (3.56)$$

kjer sta:

$n$  število panelov vzdolž diafragme

$n_{sc}$  število vijakov, ki priključujejo panel na nosilec

f) podajnost zaradi osnih deformacij v sekundarnih nosilcih ( $c_3$ ).

Zadnja podajnost pa izhaja iz upogiba v nosilcih in se izračuna sledeče:

$$c_3 = \frac{n^2 \cdot a^2 \cdot \alpha_3}{4.8 \cdot E \cdot A \cdot b^2} \quad (3.57)$$

Skupna podajnost celotne diafragme se izračuna tako, da se primere od  $a$ -e sešteje in pomnoži s količnikom med kvadratom razdalje med paneli in širine diafragme, na koncu pa se prišteje še primer  $f$ , ki je neodvisen od drugih.

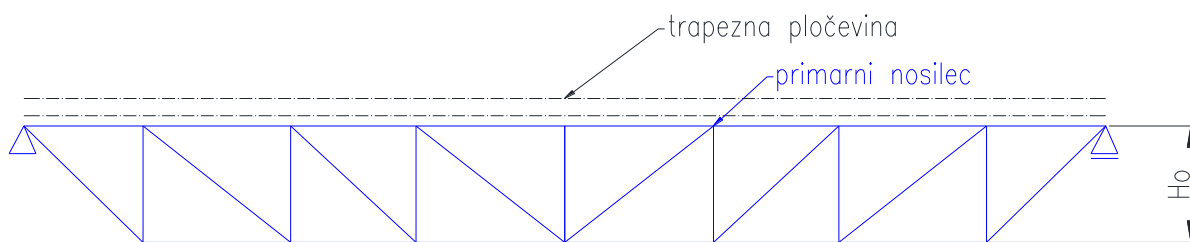
$$c = \frac{b^2}{a^2} \cdot (c_{1,1} \cdot c_{1,2} \cdot c_{2,1} \cdot c_{2,2} \cdot c_{2,3}) + c_3 \quad (3.58)$$

Dolžini  $a$  in  $b$  sta v primeru, ko je trapezna pločevina pritrjena na sekundarne nosilce ravno obratni, kot v primeru pritrditve trapezne pločevine na primarne nosilce.

### 3.5 Prenos izbočnih sil zaradi bočne zvrnitve profilov na diafragmo

#### 3.5.1 Diafragma pritrjena na primarne nosilce

V poglavju 2.8 smo omenili, da je v ECCS-u podana rešitev, kako se obtežbo, ki nastane pri bočni zvrnitvi primarnih profilov prenese na diafragmo, ki jo tvori trapezna pločevina. Kako je problem rešen bomo opisali v nadaljevanju.



Slika 50: Primer primarnega bočno podprtega paličnega nosilca

ECCS pravi, da je procedura določanja naslednja:

Obremenitev v ravnini strižnih panelov (v našem primeru v ravnini trapezne pločevine), ki jo povzroči nosilec, ki je bočno podprt se določi po naslednji enačbi:

$$q_{Ed} = \frac{k_r}{62.5 \cdot \left(\frac{a}{N} - c\right)}, \quad (3.59)$$

kjer so:

$N$  ... tlačna osna sila v zgornji pasnici

$c$  ... strižna podajnost diafragme

$k_r$  ... koeficient, ki je odvisen od števila podprtih nosilcev

$n_r$  ... število podprtih nosilcev

$$k_r = \sqrt{0,2 + \frac{1}{n_r}} \quad (3.60)$$



Maksimalna strižna sila, ki se pojavi v trapezni pločevini je:

$$V_{Ed,max} = \frac{q_{Ed} a}{2} \quad (3.61)$$

Naslednji pogoj moramo upoštevati, da preprečimo porušitev vijakov med trapezno pločevino in primarnimi nosilci:

$$q_{Ed} \leq \frac{F_{p,Rd}}{p} \quad (3.62)$$

Če zgornji dve enačbi združimo dobimo sledeče:

$$V_{Ed,max} \leq 0,5 \cdot F_{p,Rd} \cdot \frac{a}{p}, \quad (3.63)$$

kjer je:

*a ... dolžina primarnega nosilca*

*F<sub>p,Rd</sub> ... projektna strižna nosilnost posameznega vijaka, ki povezuje pločevino in nosilec*

*p ... razdalja med koriti v trapezni pločevini*

*q<sub>Ed</sub> ... linijska obtežba zaradi bočne zvrnitve profilov*

Upoštevati moramo tudi pogoj, ki zagotavlja, da se prepreči porušitev šivnih vijakov:

$$V_{Ed,max} \leq P_{max} \quad (3.64)$$

$$P_{max} \leq \begin{cases} \text{strižni uklon trapezne pločevine} \\ \text{porušitev trapezne pločevine na robu} \end{cases}$$

Zgornje dva pogoja sta opisana v poglavju 3.2.1.

Avtor (*Leopold Sokol, 1995*) navaja dva načina kako rešiti problem in sicer:

- Iteracijski postopek in
- analiza po teoriji minimalne potencialne energije.

### 3.5.2 Iteracijski postopek

Če želimo primer rešiti moramo vpeljati teorijo drugega reda, v kateri upoštevamo začetne imperfektnosti. Model, ki ga obravnavamo na sliki 51 predstavlja nosilec, ki je bočno podprt s trapezno pločevino, ki deluje kot diafragma. Diafragma služi kot elastična linijska bočna podpora, ki zmanjša prečne deformacije primarnim nosilcem. Interakcijske sile med nosilcem in diafragmo lahko predstavimo kot obtežbo, ki stabilizira nosilec (slika 52). Na sliki 52 so oznake naslednje:

*N ... tlačna sila [kN]*

*f<sub>0</sub> ... začetne imperfektnosti [mm]*

$q_0$  ... linijska obtežba, ki zagotavlja stabilizacijo nosilca [kN/mm]

$R$  ... reakcijska sila, zaradi obtežbe  $q_0$  [kN]  $\rightarrow R = \frac{q_0 \cdot L}{2}$

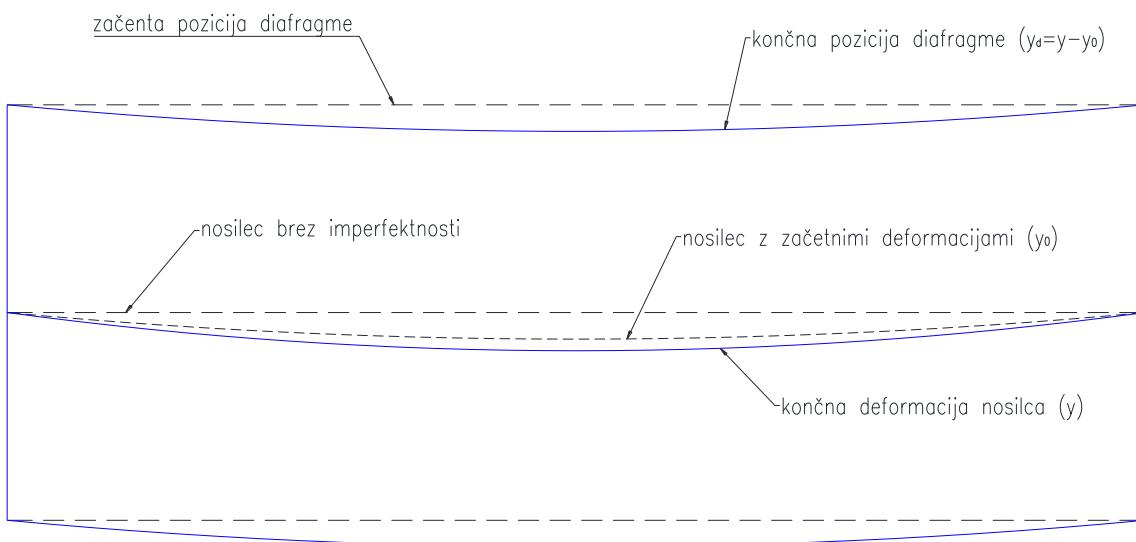
Horizontalno reakcijo  $R$ , ki nastane zaradi obtežbe  $q_0$ , moramo po principu superpozicije sešteti še z obtežbami, ki delujejo v isti smeri, npr. obtežba vetra na čelni okvir. Prav tako moramo obtežbo  $q_0$  upoštevati pri deformaciji diafragme, saj nam jih le-ta povečuje.

Začetne imperfekcije nosilcev bomo poenostavili in rekli, da prevzamemo parabolično obliko in sicer po enačbi:

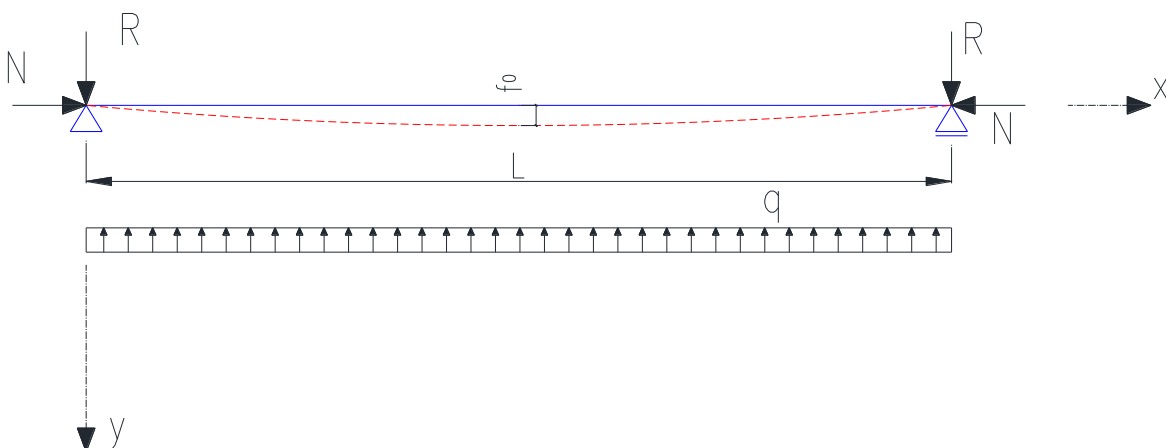
$$y_0 = \frac{4 \cdot f_0}{L} x \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (3.65)$$

pri kateri dobimo enakomerno porazdeljeno obtežbo

$$q_0 = N \frac{8 \cdot f_0}{L^2} \quad (3.66)$$



Slika 51: Sistem, ki vključuje primarni nosilec in diafragmo



Slika 52: Nosilec v tlaku, ki je stabiliziran preko prečne obtežbe

Postopek bomo začeli z iteracijskim postopkom (korak za korakom), ki bazira na ravnotežju vseh sil. Vpeljali bomo konzervativno predpostavko, ki pravi, da je bočna togost nosilca v primerjavi s strižno togostjo diafragme dovolj majhna, da jo lahko zanemarimo. Če nosilec z začetnimi imperfektnostmi ( $f_0$ ) obremenimo s tlačno silo, mu povečamo deformacije in ustvarimo deformacijo na sredini elementa z vrednostjo  $\Delta f_0$ , kot kaže slika 53. Modificiran pomik na sredini elementa se izračuna po naslednji enačbi:

$$f_1 = f_0 + \Delta f_0 = f_0 + \int_0^{L/2} c' V_x dx \quad (3.67)$$

kjer je

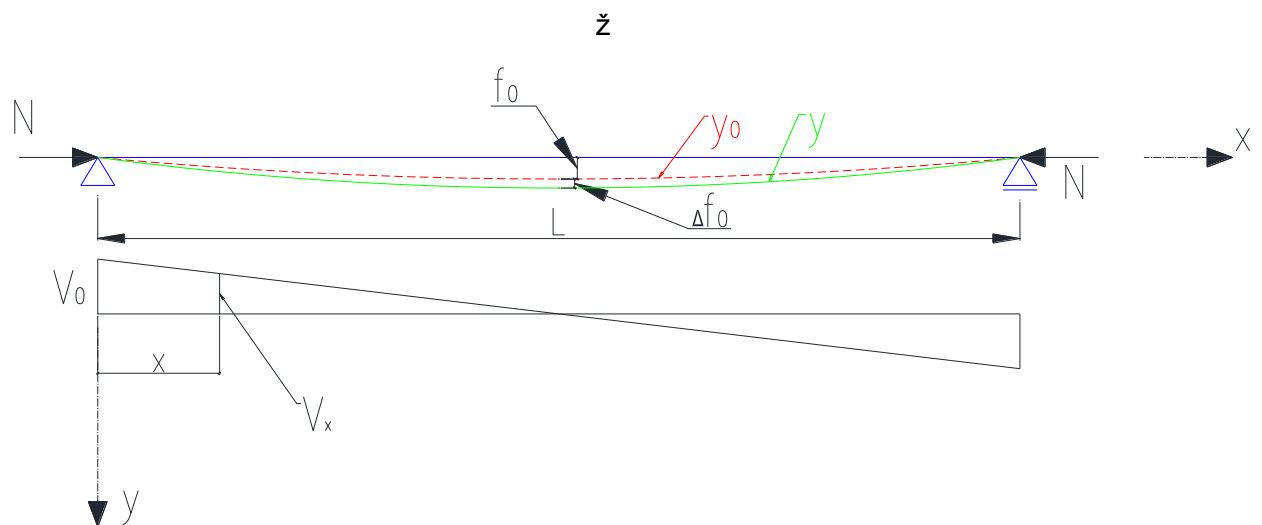
$c'$  ... enota strižna podajnosti diafragme

$$c' = \frac{c}{L} \quad (3.68)$$

$c$  ... skupna strižna podajnosti diafragme

$V_x$  ... strižna sila v trapezni pločevini, ki nastane zaradi obtežbe  $q_0$

$$V_x = \frac{V_0(L - 2x)}{L} = \frac{q_0(L - 2x)}{2} \quad (3.69)$$



Slika 53: Dodatne deformacije nosilca pod tlačno obremenitvijo

Ko združimo enačbe 3.66, 3.67, 3.68 in 3.69 dobimo:

$$f_1 = f_0 + \frac{c \cdot q_0 \cdot L}{8} \quad (3.70)$$

Nadomestna linijska obtežba, ki ji povzroči pomik  $f_1$  se glasi:

$$q_1 = N \frac{8 \cdot f_1}{L^2} \quad (3.71)$$

Vedeti moramo, da  $f_1$  in  $q_1$  nista končni vrednosti. V naslednjem koraku bomo izračunali pomik  $f_2$  zaradi obtežbe  $q_1$ .

$$f_2 = f_0 + \frac{c \cdot q_1 \cdot L}{8} \quad (3.72)$$

Nadomestna linijska obtežba, ki ji povzroči pomik  $f_2$  se glasi:

$$q_2 = N \frac{8 \cdot f_2}{L^2} \quad (3.73)$$

Tako korak za korakom proceduro nadaljujemo, dokler ne dosežemo dovolj velike natančnosti.

### 3.5.3 Analiza po teoriji minimalne potencialne energije

Druga teorija pa problem reši po teoremu o minimalni potencialni energiji. Tudi v tej teoriji se konzervativno predpostavi, da je energija, ki se pojavi pri prečnih deformaciji v nosilcu zanemarljivo majhna v primerjavi z deformacijsko energijo v diafragmi. Skupna energija celotnega sistema je torej enaka:

$$U = U_i + U_e, \quad (3.74)$$

kjer je:

$U_i$  ... deformacijska energija celotne diafragme

$U_e$  ... potencialna energija zaradi obtežbe  $N$

Diafragma se v danem sistemu obnaša kot nosilec na elastični podlagi. Klasični statični model je prikazan na sliki 54. Prikazuje, da gre za neskončno število neodvisno med seboj nepovezanih elastičnih vzmeti. V vsaki poziciji vzdolž nosilca je reakcija proporcionalna pomiku nosilca v tisti točki. Deformacijska energija je v takem primeru direktno odvisna od pomika nosilca. V primeru diafragme, pa deformacijska energija ni direktno proporcionalna pomikom v dani točki, ampak je odvisna od gradienta pomika kot kaže slika 55. Deformacijska oblika končnega elementa  $\Delta x$  v diafragmi opiše naslednja enačba, ki pravi:

$$\Delta U_i = \beta_t \frac{(\Delta y_d)^2}{2} \quad (3.75)$$

kjer je:

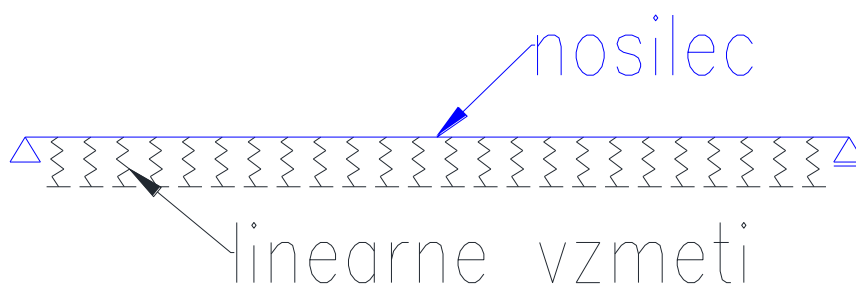
$\beta_t$  ... togost vzmeti, ki pripada končnemu elementu  $\Delta x$

$\Delta y_d$  ... gradient pomika elementa

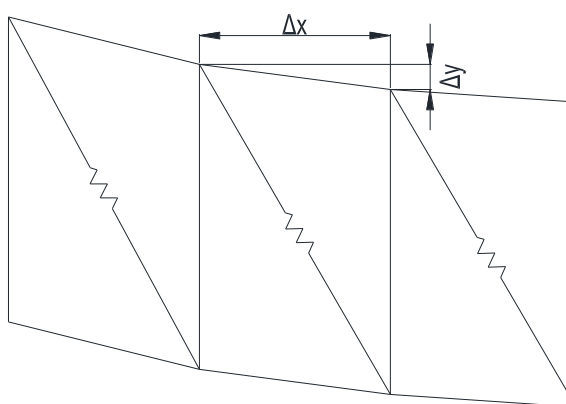
$\Delta y_d = \Delta(y - y_0)$

$y_0$  ... začetna pomik nosilca

$y$  ... končni pomik nosilca



Slika 54: Nosilec na elastični podlagi



Slika 55: Model deformacij končnih elementov v diafragmi

Kot splošno pravilo, da bi obdržali dobro konvergenco, ki stremi proti numerično natančni rešitvi, moramo funkcijo  $y$  definirati kot celotno neskončno vrsto, ki je lahko polinomska ali trigonometrična. Le-ta nam predstavlja interpolacijsko funkcijo. Že po nekaj korakih lahko dosežemo dovolj veliko natančnost.

Funkcijo  $y$  bomo definirali tako, da bo imela enako obliko kot jo ima diafragma, ki je enakomerno zvezno obremenjena.

$$y = \int_0^x c \cdot V_x dx \quad (3.76)$$

Pri zgornji enačbi so spremenljivke že opisane. Ko združimo enačbe 3.68, 3.69 in 3.76 dobimo:

$$y = \frac{cq}{2} x \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (3.77)$$

Tako vidimo, da ima diafragma, ki je zvezno enakomerno obremenjena parabolično deformacijsko obliko. Naslednja enačba pa daje dovolj dobro aproksimacijo, da dobimo zelo dobro natančnost z le enim paraboličnim členom. Enačba se glasi:

$$y = \frac{4f}{L} x \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (3.78)$$

Ko združimo enačbe dobimo naslednjo formulo:

$$y_d = y - y_d = \frac{4x(L-x)}{L^2} (f - f_0) \quad (3.79)$$

Podajnost končnega elementa dobimo po naslednji enačbi (slika 55):

$$c_t = \frac{c \Delta x}{L}, \quad (3.80)$$

ter z inverzom togost končnega elementa

$$\beta_t = \frac{L}{c \Delta x}. \quad (3.81)$$

Ko zopet združimo enačbe 3.84 in 3.90, dobimo

$$\Delta U_i = \frac{L}{2c \Delta x} (\Delta y_d)^2. \quad (3.82)$$

Nato enačbo po dolžini integriramo in limitiramo, da je :

$$\Delta x = dx$$

$$\Delta y_d = dy_d$$

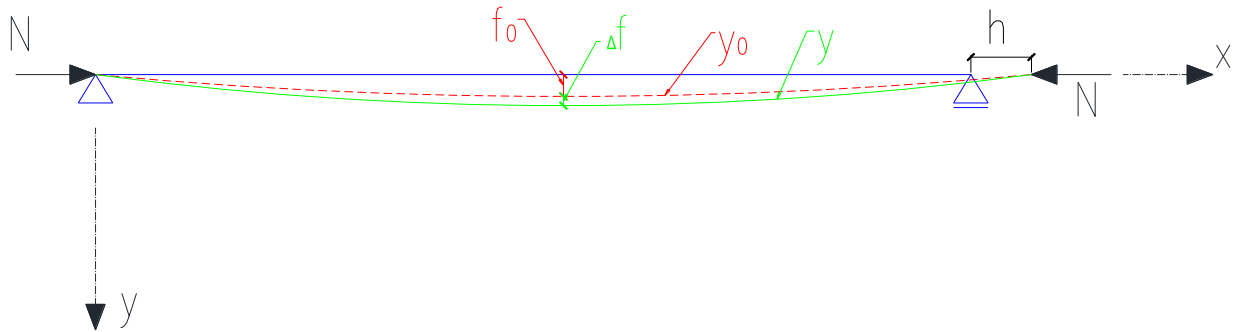
$$U_i = \frac{L}{2c} \int_0^L \left(\frac{dy_d}{dx}\right)^2 dx, \quad (3.83)$$

kjer smo  $y_d$  definirali zgoraj. Dobimo deformacijsko energijo diafragme, ki znaša

$$U_i = \frac{8}{3c} (f - f_0)^2. \quad (3.84)$$

Potencialna energija osne sile  $N$  povzroči, da se zaradi povečane deformacije na sredini elementa pojavi pomik  $h$  na robu elementa kot kaže slika 56. Le-ta znaša:

$$U_e = N h \quad (3.85)$$



Slika 56: Pomik na koncu nosilca zaradi povečanih deformacij

Ko vzamemo v račun še začetne deformacije  $y_0$  in zanemarimo osne deformacije elementa (saj so te majhne v primerjavi z upogibnimi), lahko razliko dolžino infinitivno majhnega delca pred in po deformaciji zapišemo z naslednjo formulo:

$$(d_s - d_x) - (ds_0 - dx) = \left( dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} - dx \right) - \left( dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy_0}{dx_0}\right)^2} - dx \right) \cong \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 - \left(\frac{dy_0}{dx_0}\right)^2 \right] dx \quad (3.86)$$

kjer je

$$h = -\frac{1}{2} \int_0^L \left[ \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 - \left(\frac{dy_0}{dx_0}\right)^2 \right] dx = \frac{8}{3L} (f_0^2 - f^2). \quad (3.87)$$

Ko zamenjamo enačbi 3.87 in 3.85, dobimo naslednji izraz:

$$U_e = \frac{8N}{3L} (f_0^2 - f^2) \quad (3.88)$$

Skupna energija celotnega sistema je torej enaka:

$$U = \frac{8}{3c} (f - f_0) + \frac{8N}{3L} (f_0^2 - f^2). \quad (3.89)$$

V skladu s principom o stacionarni vrednosti deformacijske energije, se bo sistem po obtežbi deformiral tako, da bo njegova potencialna energija ostala stacionarna (minimalna) in po naslednji variaciji energije enaka nič:

$$\frac{\delta U}{\delta f} = \frac{16}{3c} (f - f_0) - \frac{16Nf}{3L} = 0 \quad (3.90)$$

Kot obrnemo zgornjo enačbo dobimo kakšen je pomik na sredini elementa in ta znaša:

$$f = \frac{f_0}{1 - \frac{N c}{L}} \quad (3.91)$$

Obtežba ki ustreza zgornjemu pomiku pa znaša:

$$q = N \frac{8 f}{L^2} \quad (3.92)$$

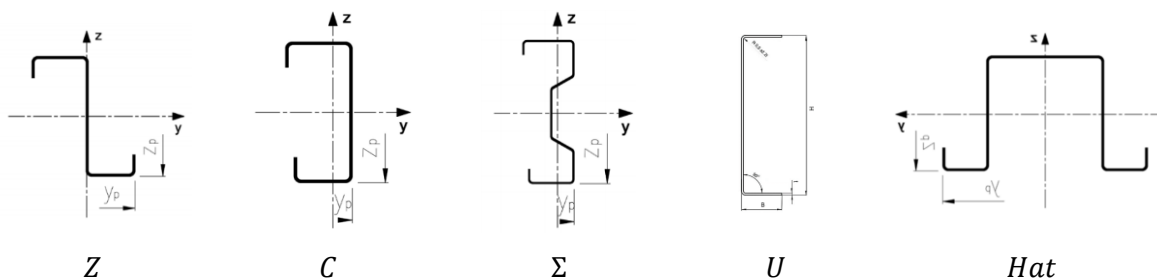
Zgornji dve enačbi definirata pomik  $f$  in zvezno konstantno obtežbo  $q$ , ki ustrezata končni deformaciji celotnega sistema. To sta dva načina kako določiti interakcijske sile nosilcem in trapezno pločevino zaradi upogiba nosilca. Drugi način je bolj primeren za vsakdanjo uporabo, medtem ko lahko drugega uporabimo za preverjanje prvega. V poglavju 4.6.2 je prikazan tudi rešen primer.

### 3.5.4 Diafragma pritrjena na sekundarne nosilce

V prejšnjem poglavju smo pokazali, na kakšen način se obtežbe zaradi bočne zvrnitve primarnih profilov prenese na trapezno pločevino. Kot rečeno, za zgornji primer v standardih ni podane rešitve za prenos obtežbe, zato smo si pomagali z drugo literaturo. Vendar za primer, ko je trapezna pločevina pritrjena na sekundarne nosilce in s tem povezane probleme ter prenose obtežb dokaj podrobno opisuje standard *SIST EN 1993-1-3*. Zato bomo v tem poglavju opisali, kdaj in v kakšnih primerih je potrebno ta standard upoštevati.

Določbe v omenjenem standardu veljajo le za sekundarne hladno oblikovane nosilce naslednjih oblik (slika 57):

- $Z$
- $C$
- $U$
- $\Sigma$
- *Hat*



Slika 57: Hladno oblikovani profili



Omejeni pa so na razmerje med višini in debelino ter na dolžino pasnice in debelino. Razmerja so naslednja:

$$\frac{h}{t} < 233 \dots \text{kjer je } h \text{ višina stojine in } t \text{ debelina stojine}$$

$$\frac{c}{t} < 20 \dots \text{kjer je } c \text{ dolžina pasnice in } t \text{ debelina pasnice}$$

Polno bočno podporo lahko zagotavljamo s trapezno ali katero drugo profilirano pločevino, katera ima dovolj veliko togost. Mora biti kontinuirno pritrjena preko trapezne pločevine na pasnice sekundarnega nosilca preko vsakega korita. Sekundarni nosilec je bočno podprt, če velja naslednja enačba:

$$S \geq \left( EI_{\omega} + GI_t + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25 h^2 \right) \frac{70}{h^2}, \quad (3.93)$$

kjer je:

*S ... del strižne togosti, ki jo zagotavlja pločevina, za obravnavan element, ki je povezan s pločevino v vsakem valu (če je povezan v vsakem drugem valu, potem S zamenjamo z 0,2 S)*

*E ... elastični modul jekla*

*I<sub>ω</sub> ... vztrajnosti moment z ovirano torzijo*

*G ... strižni modul*

*I<sub>t</sub> ... vztrajnostni moment za neovirano torzijo*

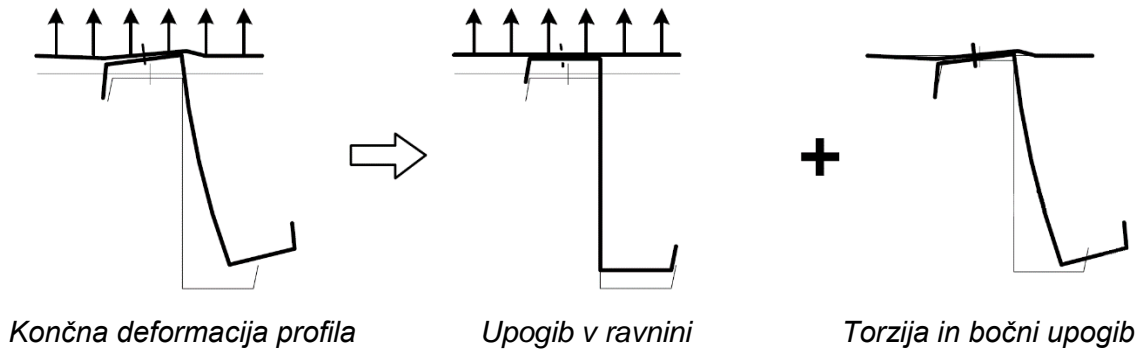
*I<sub>z</sub> ... vztrajnostni moment okoli šibke osi*

*h ... višina sekundarnega nosilca*

*L ... dolžina sekundarnega nosilca*

Enačbo 3.93 lahko uporabimo tudi za določanje prečne stabilnosti pasnic v kombinaciji z drugimi tipi sistemov za prekrivanje konstrukcij, vendar morajo biti spoji primerni za dimenzioniranje.

Obnašanje bočno podprtih sekundarnih nosilcev moramo modelirati tako, da povezava med nosilcem in pločevino delno onemogoča zvijanje sekundarnih nosilcev. To lahko nadomestimo z rotacijsko vzmetjo. Napetosti, ki se pojavijo v nepodprti pasnici moramo izračunati tako, da efekte upogiba v ravnini in efekte torzije seštejemo po principu superpozicije. Pri upogibu moramo upoštevati še upogib izven lastne ravnine, saj profili, ki smo jih zgoraj našteali niso dvojno simetrični (slika 58). To najlažje naredimo tako, da modeliramo nosilec na elastični podlagi.



Slika 58: Deformacije sekundarnega nosilca v upogibu in torziji

Standard tudi podaja enačbo, s katero lahko izračunamo strižno togost trapezne pločevine, s katero podpira sekundarni nosilec. Enačba velja le v primerih, ko je trapezna pločevina pritrjena v vsakem koritu in povezana s sosednjimi paneli po vseh štirih straneh.

$$S = 1000 \sqrt{t^3} \left( 50 + 10^3 \sqrt{b_{roof}} \right) \frac{S}{h_w}, \quad (3.94)$$

kjer je:

$t$  ... debelina trapezne pločevine, ki se jih odšteje vse zaščitne sloje

$b_{roof}$  ... širina strehe

$s$  ... razdalja med sekundarnimi nosilci

$h_w$  ... višina trapezne pločevine

\* vse spremenljivke so v mm

Podrobnejše dimenzioniranje in kriteiji za določanje mejnega stanja nosilnosti in uporabnosti so podrobno naštet v zgoraj omenjenem standardu (SIST EN 1993-1-3).

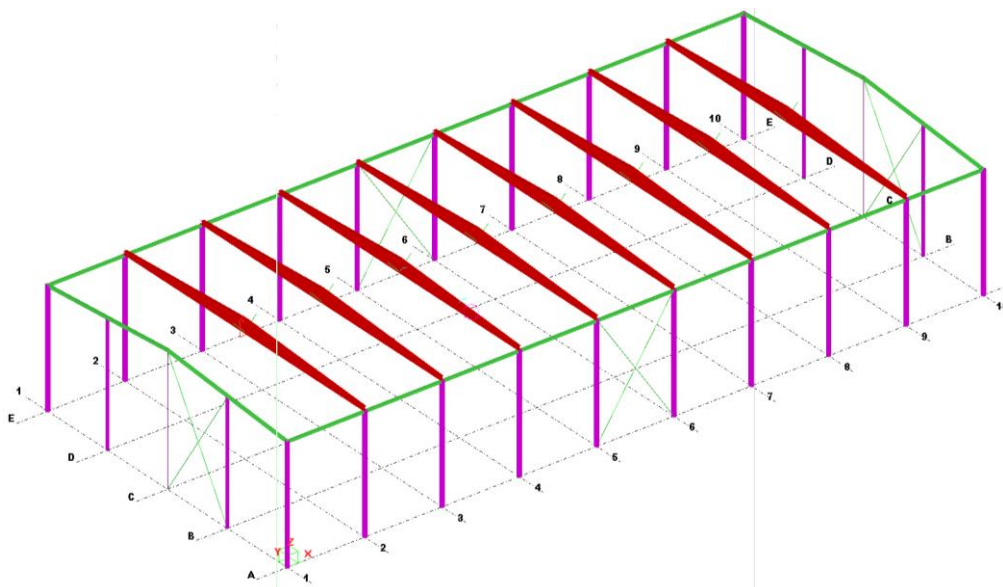
## 4 Primer

### 4.1 Splošno

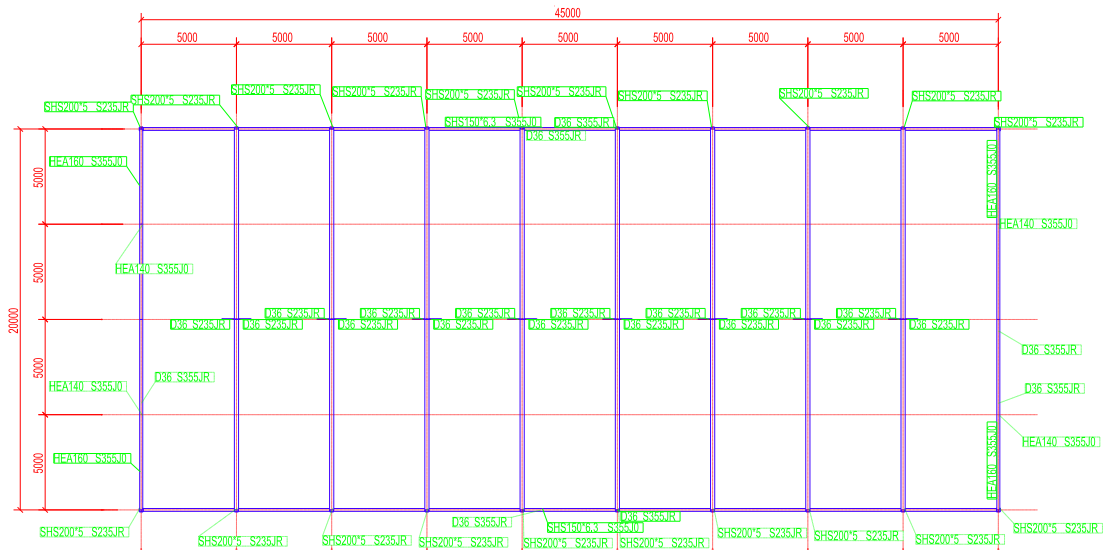
V prejšnjih poglavjih je bilo kar nekaj govora o teoriji, kako se sistemi obnašajo in dimenzionirajo. V naslednjih poglavjih pa bomo halo, ki je prekrita s trapeznimi pločevinami tudi statično analizirali in dimenzionirali ter zgoraj omenjeno teorijo prenesli v praktični primer.

### 4.2 Zasnova

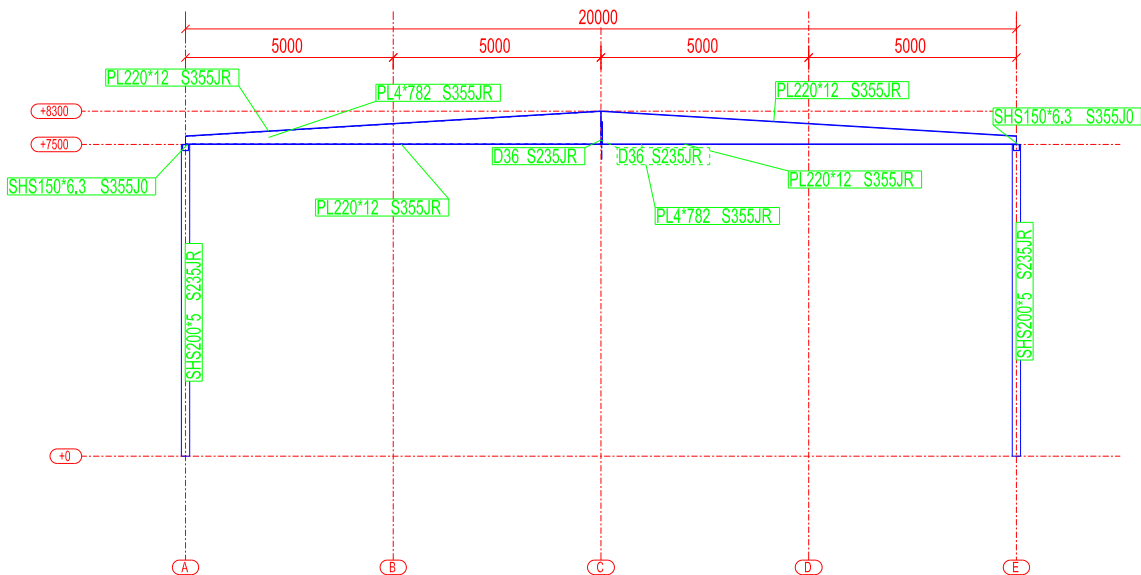
Objekt je lociran v Ljubljani. Sestavljen je iz 10 jeklenih okvirjev (slika 59), ki so členkasto povezani med seboj. Primarni nosilci so varjeni, katerih višina stojine se linearno spreminja, kot kaže slika 61 in členkasto pripeti na stebre. Ves moment prevzemamo s pasnicama, saj smo izbrali tak nosilec, ki ima stojino v 4. razredu kompaktnosti in le-ta malo doprinese k prevzemanju upogibnega momenta. Spodnji pasnica primarnega nosilca je na sredini razpona bočno podprta. Vertikalna zavetrovanje predstavljajo jeklene zatege, robne nosilce in stebre pa votli pravokotni profili. Čelne okvirje s povezji sestavljajo HEA profili. Celoten material je kvalitete S355. Trapezna profilirana pločevina, ki bo prenašala strižne sile in sile zaradi snega je *T130M-75L-930* proizvajalca *RUUKKI*. Meja tečenja za trapezno pločevino znaša  $350\text{ MPa}$ . Trapezna pločevina deluje kot diafragma, prevzema pa tudi horizontalne in vertikalne obtežbe. Poleg tega pa pločevina zagotavlja linijsko bočno podpro primarnim upogibnim nosilcem. Vsa horizontalna obtežba se preko trapezne pločevine prenese v vertikalno povezje. Robni nosilci prevzemajo osne sile, ki jih povzroči akcija diafragme pri horizontalni obtežbi, čelni nosilci pa prevzema reakcije. Povezja v sredini razpona primarnih nosilcev zagotavljajo stabilnost v primeru bočne zvrnitve primarnih nosilcev pri srku vetra v strehi.



Slika 59: 3D pogled objekt



Slika 60: Tloris objekta



Slika 61: Prerez objekta

## Material:

- Nosilci in stebri → S355
- $f_y = 355\text{MPa}$   $f_u = 490\text{MPa}$   $E = 210\text{GPa}$
- Profilirana pločevina → S350
- $f_y = 350\text{MPa}$

## Geometrijski podatki:

$$b_{\text{roof}} = 20\text{ m}$$

Širina strehe

$$L_{\text{roof}} = 45\text{ m}$$

Dolžina strehe

$$h_p = 7,5\text{ m}$$

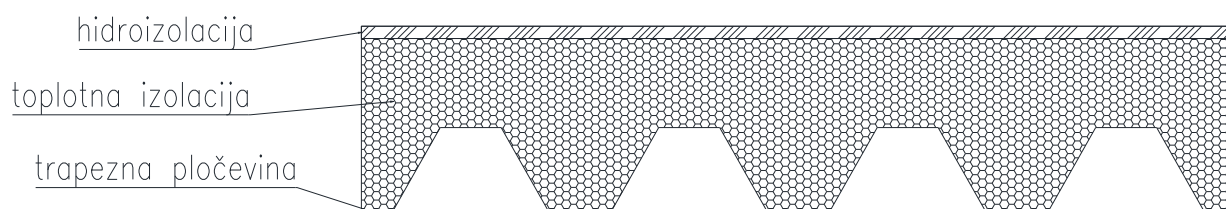
Višina stebrov

$h_b = 0,8 \text{ m}$	<i>Višina nosilca</i>
$n_s = 3,4^\circ$	<i>Naklon strehe</i>
$h_t = 8,3 \text{ m}$	<i>Višina slemena</i>
$c_{rafter} = 5 \text{ m}$	<i>Razdalje med stebri - vzdolžno</i>
$c_{gp} = 5 \text{ m}$	<i>Razdalje med čelnimi stebri</i>

### 4.3 Obtežbe

#### **Lastna in stalna:**

Lastna teža nosilca znaša 0,55 kN/m. Stalna teža zaradi strehe pa je prikazana na sliki 62 ter izračunana v preglednici 14.



Slika 62: Konstrukcijski sklop strehe

Preglednica 14: Stalna obtežba strehe

	debelina [cm]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Obtežba [kN/m <sup>2</sup> ]	
hidroizolacija	0,08	78	0,0624	
toplotna izolacija	20	0,012	0,0024	
trapezna pločevina	/	/	0,1 *	
		Skupaj		
		$G_{stalna}$	0,165	kN/m <sup>2</sup>

\*podatki proizvajalca

#### **Obtežba snega:**

$$s_k = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_{k,1}$$

$s_{k,1}$  *Karakteristična obtežba snega na tleh*

$s_k$  *Karakteristična obtežba snega na strehi*

$C_e$  *Faktor izpostavljenosti*

$C_t$  *Toplotni koeficient*

$\mu_i$  *Oblikovni koeficient obtežbe snega*

$$s_{k,1} = 1,293 \cdot \left( 1 + \left( \frac{A [m]}{728} \right)^2 \right) = 1,293 \cdot \left( 1 + \left( \frac{300 \text{ m}}{728} \right)^2 \right) = 1,51 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$C_e = C_t = 1$$

$$\mu_i = 0,8$$

$$S_k = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,51 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,208 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### Obtežba vetra:

$$q_p = 0,54 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Največji pritisk vetra}$$

Koeficient notranjega in zunanjega tlaka:

$$q_{c,e+i,1} = 1,5 \quad \text{Največji neto koeficient (notranjega in zunanjega) pritiska na steno}$$

$$q_{c,e+i,2} = 0,9 \quad \text{Največji neto koeficient (notranjega in zunanjega) skra na streho}$$

$$q_{c,e+i,3} = 0,5 \quad \text{Največji neto koeficient (notranjega in zunanjega) pritiska na streho}$$

Največja obtežba vetra na strehi in stenah:

- stena

$$\bullet \quad W_{roof,w} = q_{c,e+i,1} \cdot q_p = 1,5 \cdot 0,54 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (\text{pritisk})$$

- streha

$$\bullet \quad W_{roof,s} = q_{c,e+i,2} \cdot q_p = 0,54 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,9 = 0,486 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (\text{srk})$$

$$\bullet \quad W_{roof,p} = q_{c,e+i,3} \cdot q_p = 0,54 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,5 = 0,27 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (\text{pritisk})$$

### Kombinacije vplivov:

Pri kombinaciji vplivov smo upoštevali najbolj neugodne, torej smo pri iskanju največjega pozitivnega momenta upoštevali kombinacijo  $Q_1$ :

$$Q_1 = 1,35 \cdot G + 1,35 \cdot G_{stalna} \cdot c_{rafter} + 1,5 \cdot S_k \cdot c_{rafter} + 0,6 \cdot 1,5 \cdot W_{roof,p} \cdot c_{rafter}$$

$$Q_1 = 1,35 \cdot 0,55 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 1,35 \cdot 0,165 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 5\text{m} + 1,5 \cdot 1,208 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 5\text{m} + 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,27 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 5\text{m}$$

$$Q_1 = 12,13 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Za največji negativni moment v primarnem nosilcu smo uporabili naslednjo kombinacijo, kjer veter deluje kot srk:

$$Q_2 = 0,9 \cdot (G + G_{stalna} \cdot c_{rafter}) - 1,5 \cdot W_{roof,s} \cdot c_{rafter}$$

$$Q_2 = 0,9 \cdot \left( 0,55 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 0,165 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 5\text{m} \right) - 1,5 \cdot 0,486 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 5\text{m}$$

$$Q_2 = -2,41 \text{kN/m}$$

Minus predznak pri kombinaciji  $Q_2$  pomeni, da obtežba deluje v obratni smeri kot gravitacija.

Preglednica 15: Notranje statične količine v primarnem nosilcu

Mejno stanje nosilnosti (MSN)				
kombinacije Max [kN/m]			kombinacije min [kN/m]	
g		1,86	g 1,24	
sneg in veter		10,28	veter -3,65	
Obtežba skupaj		12,13	Obtežba skupaj -2,41	
Max M			Min M	
L [m]	Med [kNm]	Ved [kN]	Med [kNm]	Ved [kN]
0	0,0	121,3	0,0	24,1
0,5	-59,1	115,2	11,7	22,9
1	-115,2	109,2	22,9	21,7
1,5	-168,3	103,1	33,4	20,5
2	-218,4	97,1	43,3	19,3
2,5	-265,4	91,0	52,7	18,1
3	-309,3	84,9	61,4	16,9
3,5	-350,3	78,9	69,5	15,6
4	-388,2	72,8	77,0	14,4
4,5	-423,1	66,7	84,0	13,2
5	-454,9	60,7	90,3	12,0
5,5	-483,7	54,6	96,0	10,8
6	-509,5	48,5	101,1	9,6
6,5	-532,3	42,5	105,6	8,4
7	-552,0	36,4	109,5	7,2
7,5	-568,7	30,3	112,9	6,0
8	-582,3	24,3	115,6	4,8
8,5	-592,9	18,2	117,7	3,6
9	-600,5	12,1	119,2	2,4
9,5	-605,0	6,1	120,1	1,2
10	-606,6	0,0	120,4	0,0
12	-582,3	-24,3	115,6	4,8
14	-509,5	-48,5	101,1	9,6
16	-388,2	-72,8	77,0	14,4
18	-218,4	-97,1	43,3	19,3
20	0,0	-121,3	0,0	24,1

Za mejno stanje uporabnosti smo upoštevali naslednje kombinacije:

$$Q_{1,MSU} = 1,0 \cdot G_{stalna} + 1,0 \cdot S + 1,5 \cdot \psi_0 \cdot W_{roof,p} \dots \textit{karakteristična}$$

$$Q_{2,MSU} = 1,0 \cdot G_{stalna} + 1,0 \cdot \psi_1 \cdot S + 1,5 \cdot \psi_2 \cdot W_{roof,p} \dots \textit{pogosta}$$

$$Q_{3,MSU} = 1,0 \cdot G_{stalna} + 1,0 \cdot \psi_2 \cdot S + 1,5 \cdot \psi_2 \cdot W_{roof,p} \dots \textit{navidezno stalna}$$

Za vrednosti  $\psi$  standard SIST EN 1990 podaja naslednje vrednosti

Obtežba	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
sneg	0,5	0,2	0
veter	0,6	0,2	0

Preglednica 16: Vrednosti faktorjev  $\psi$

Torej smo na mejno stanje uporabnosti uporabili naslednje kombinacije.

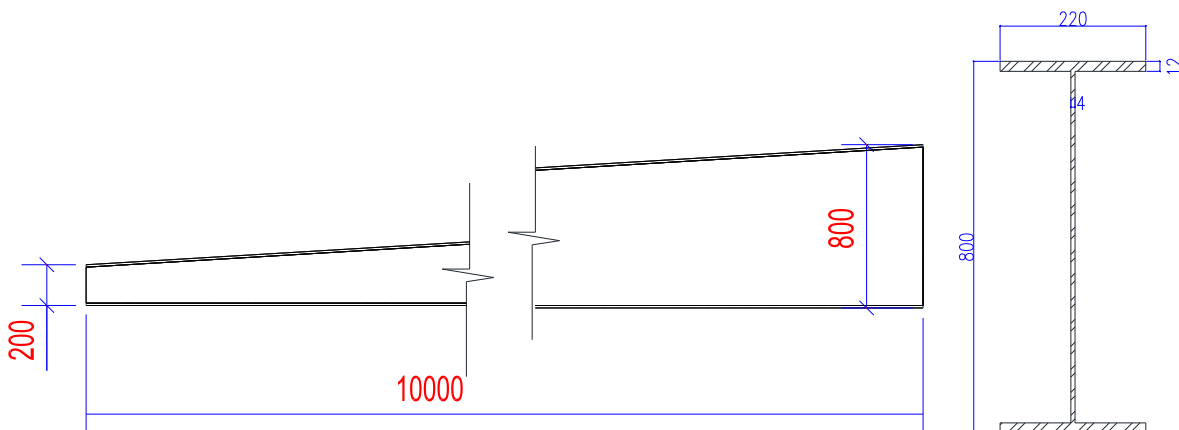
$$Q_{1,MSU} = 1,0 \cdot G_{stalna} + 1,0 \cdot S + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_{roof,p} = 1,61 \frac{kN}{m^2} \dots \textit{karakteristična}$$

$$Q_{2,MSU} = 1,0 \cdot G_{stalna} + 1,0 \cdot 0,2 \cdot S + 1,5 \cdot 0 \cdot W_{roof,p} = 0,407 \frac{kN}{m^2} \dots \textit{pogosta}$$

$$Q_{3,MSU} = 1,0 \cdot G_{stalna} + 1,0 \cdot 0 \cdot S + 1,5 \cdot 0 \cdot W_{roof,p} = 0,165 \frac{kN}{m^2} \dots \textit{navidezno stalna}$$

#### 4.4 Dimenzioniranje primarnih nosilcev

Primarni nosilec (slika 63) smo dimenzionirali tako, da smo dobili največjo izkoriščenost in posledično majhno težo. Nosilec smo zasnovali tako, da se njegova višina linearno povečuje. Višina nosilca je na sredini največja (800 mm). Proti koncu nosilca pa se višina zmanjša na 200 mm. Na tem mestu je največja prečna sila, ki jo prevzame stojina.



Slika 63: Prečni in vzdolžni prerez polovice primarnega nosilca

Primarne nosilce smo dimenzionirali na dve merodajni kombinaciji in to sta kombinaciji  $Q_1$  in  $Q_2$ . Pri kombinaciji  $Q_1$  se nam v zgornji pasnici primarnega nosilca pojavijo tlačne sile, s tem pa tudi povezan problem bočne zvrnitve profila. Na primarne nosilce je pritrjena trapezna pločevina, ki nosilcu nudi bočno podporo. Sile, ki nastanejo pri tem, pa bomo kasneje upoštevali pri dimenzioniranju trapezne pločevine in robnih nosilcev.



Pri kombinaciji  $Q_2$  pa se nam v nosilcu pojavijo negativni momenti. V tem primeru je spodnja pasnica v tlaku in zato smo jo na sredini razpona bočno podprli. Z metodo tlačene pasnice smo preverili, ali je bočna zvrnitev prisotna.

Če je izpolnjena naslednja enačba, potem nevarnosti bočne zvrnitve ni:

$$\lambda_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \leq \lambda_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}}$$

kjer je :

$k_c$  ... faktor, ki je odvisen od oblike momenta

$L_c$  ... razdalje med bočnimi podporami

$i_{f,z}$  ... vztrajnosti polmer nadomestnega tlačnega pasu

(glede na šibko os – sestavlja ga pasnica in  $\frac{1}{6}$  tlačnega dela stojine

$\lambda_1$  ... relativna vitkost

$M_{c,Rd}$  ... nosilnost prečnega prereza

$M_{y,Ed}$  ... največja projektna vrednost upogibnega momenta

V preglednici 17 so nanizani vsi podatki z izračuni in pogoji, na sliki 64 in 65 pa notranje statične količine.

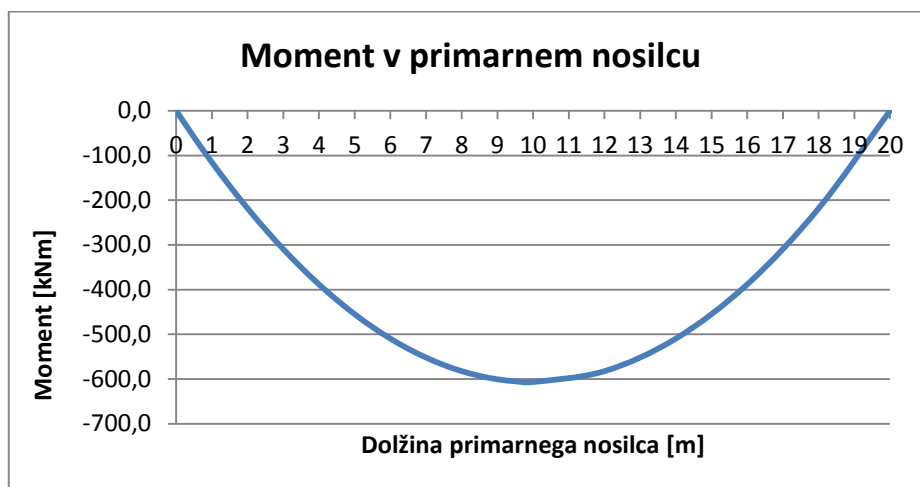
Preglednica 17: Izračun primarnega profila na bočno zvrnitev

$k_c$	0,75
$L_c$	1000 cm
$\lambda_{c,0}$	0,5
$\lambda_1$	76,1

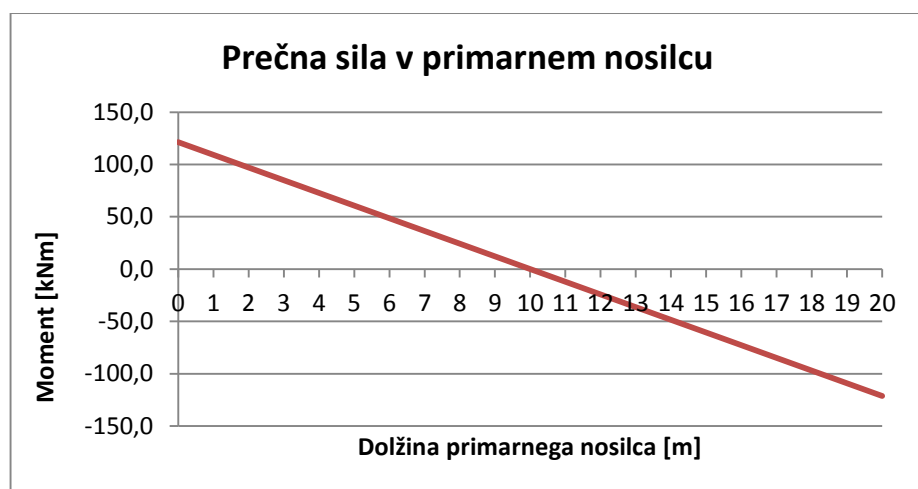
  

L [m]	$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	A [cm <sup>2</sup> ]	$i_{r,z}$ [cm]	$M_{c,Rd}$ [kNcm]	$M_{y,Ed}$ [kNcm]	$\lambda_f$	$\lambda_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}}$	$\lambda_f < \lambda_{c,0}$	$\chi_r$	$M_{b,Rd}$ [kNcm]	$M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd} \leq M_{c,Rd}$
0	1064,8	27,57	6,21	17230	0	1,59	1000,00	OK	0,21	3980,1	OK
0,5	1064,8	27,77	6,19	20284	1174	1,59	8,64	OK	0,21	4685,6	OK
1	1064,8	27,97	6,17	23384	2287	1,60	5,11	OK	0,2	5144,4	OK
1,5	1064,8	28,17	6,15	26528	3340	1,60	3,97	OK	0,2	5836,1	OK
2	1064,8	28,37	6,13	29715	4334	1,61	3,43	OK	0,19	6210,5	OK
2,5	1064,8	28,57	6,10	32947	5266	1,62	3,13	OK	0,19	6885,9	OK
3	1064,8	28,77	6,08	36222	6139	1,62	2,95	OK	0,19	7570,3	OK
3,5	1064,8	28,97	6,06	39540	6952	1,63	2,84	OK	0,19	8263,8	OK
4	1064,8	29,17	6,04	42901	7704	1,63	2,78	OK	0,19	8966,2	OK
4,5	1064,8	29,37	6,02	46305	8396	1,64	2,76	OK	0,19	9677,7	OK
5	1064,8	29,57	6,00	49752	9028	1,64	2,76	OK	0,19	10398,1	OK
5,5	1064,8	29,77	5,98	53241	9600	1,65	2,77	OK	0,19	11127,5	OK
6	1064,8	29,97	5,96	56774	10112	1,65	2,81	OK	0,19	11865,8	OK
6,5	1064,9	30,17	5,94	60349	10563	1,66	2,86	OK	0,19	12613,0	OK
7	1064,9	30,37	5,92	63967	10954	1,67	2,92	OK	0,19	13369,2	OK
7,5	1064,9	30,57	5,90	67628	11285	1,67	3,00	OK	0,18	13990,4	OK
8	1064,9	30,77	5,88	71332	11556	1,68	3,09	OK	0,18	14123,7	OK
8,5	1064,9	30,97	5,86	75078	11767	1,68	3,19	OK	0,18	14865,5	OK
9	1064,9	31,17	5,84	78867	11917	1,69	3,31	OK	0,18	15615,7	OK
9,5	1064,9	31,37	5,83	82699	12007	1,69	3,44	OK	0,18	16374,4	OK
10	1064,9	31,57	5,81	86573	12038	1,70	3,60	OK	0,18	17141,5	OK
12	1064,9	30,77	5,88	71332	11556	1,68	3,09	OK	0,18	14123,7	OK
14	1064,8	29,97	5,96	56774	10112	1,65	2,81	OK	0,19	11865,8	OK
16	1064,8	29,17	6,04	42901	7704	1,63	2,78	OK	0,19	8966,2	OK
18	1064,8	28,37	6,13	29715	4333	1,61	3,43	OK	0,19	6210,5	OK
20	1064,8	27,57	6,21	17230	0	1,59	1000,00	OK	0,21	3980,1	OK

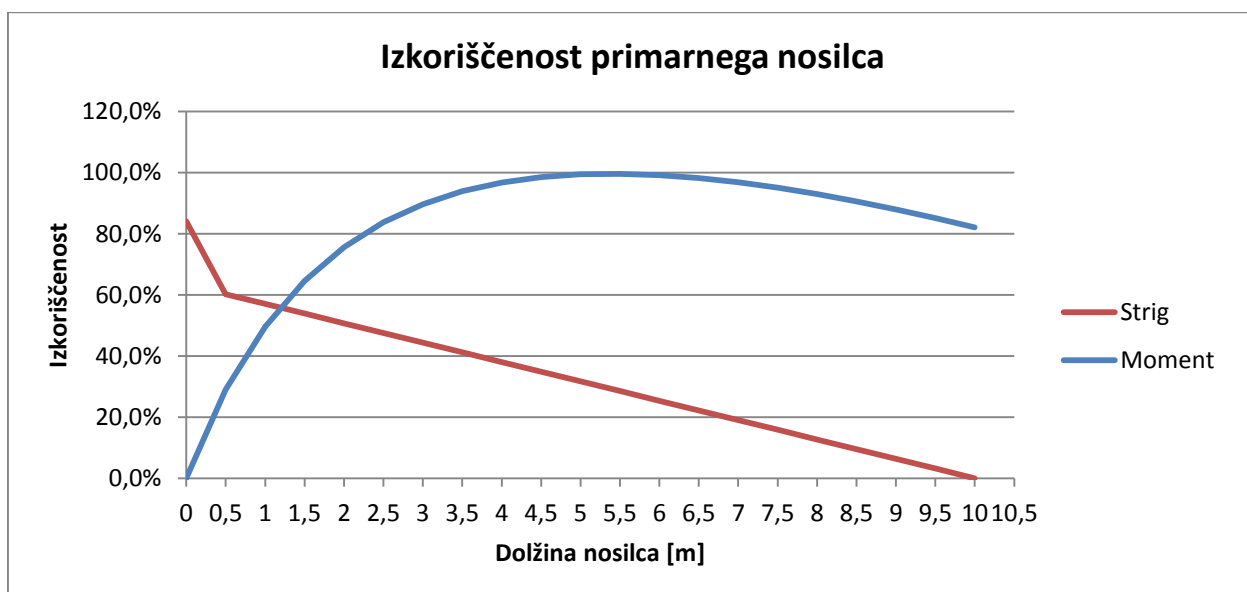
Nato smo dimenzionirali še napetosti v prerezu:



Slika 64: Graf momenta v primarnem nosilcu



Slika 65: Graf prečne sile v primarnem nosilcu



Slika 66: Graf izkoriščenosti primarnega nosilca

Preglednica 18: Preglednica karakteristik in izkoriščenosti

Razred kompaktnosti												Izkoriščenost zaradi momenta
L [m]	hw/tw	Razred kompaktnosti	72 ε/η	kt	λw	χw	V <sub>ed</sub> ≤ V <sub>abd</sub>	Izkoriščenost na strig	Izkoriščenost zaradi momenta			
		1 RK 2 RK 3 RK 4 RK	/	/	/	/	/		moment	prevzamejo	le pasnice	
0	44	Kompaktna	/	/	/	/	/	84,1%	0,0%			
0,5	51,5	Vitka	48,8	5,34	0,732	1,13	OK	60,2%	28,9%			
1	59	Vitka	48,8	5,34	0,839	0,99	OK	57,0%	49,6%			
1,5	66,5	Vitka	48,8	5,34	0,946	0,88	OK	53,9%	64,6%			
2	74	Vitka	48,8	5,34	1,052	0,79	OK	50,7%	75,6%			
2,5	81,5	Vitka	48,8	5,34	1,159	0,72	OK	47,5%	83,8%			
3	89	Vitka	48,8	5,34	1,266	0,66	OK	44,4%	89,7%			
3,5	96,5	Vitka	48,8	5,34	1,372	0,60	OK	41,2%	93,9%			
4	104	Vitka	48,8	5,34	1,479	0,56	OK	38,0%	96,8%			
4,5	111,5	Vitka	48,8	5,34	1,585	0,52	OK	34,9%	98,6%			
5	119	Vitka	48,8	5,34	1,692	0,49	OK	31,7%	99,5%			
5,5	126,5	Vitka	48,8	5,34	1,799	0,46	OK	28,5%	99,6%			
6	134	Vitka	48,8	5,34	1,905	0,44	OK	25,3%	99,2%			
6,5	141,5	Vitka	48,8	5,34	2,012	0,41	OK	22,2%	98,3%			
7	149	Vitka	48,8	5,34	2,118	0,39	OK	19,0%	96,9%			
7,5	156,5	Vitka	48,8	5,34	2,225	0,37	OK	15,8%	95,1%			
8	164	Vitka	48,8	5,34	2,331	0,36	OK	12,7%	93,0%			
8,5	171,5	Vitka	48,8	5,34	2,438	0,34	OK	9,5%	90,6%			
9	179	Vitka	48,8	5,35	2,544	0,33	OK	6,3%	88,0%			
9,5	186,5	Vitka	48,8	5,35	2,651	0,31	OK	3,2%	85,2%			
10	194	Vitka	48,8	5,35	2,757	0,30	OK	0,0%	82,1%			

stojina

Slika 66 prikazuje izkoriščenost prečnega prereza. Skok pri izkoriščenosti strižne sile nastopi zaradi drugih enačb lokalne stabilnosti stojine v strigu. Slika 66 pa prikazuje tudi izkoriščenost pasnic zaradi upogibnega momenta. Ker ima momenta linija obliko kvadratne parabole, razdalja med pasnicama pa se povečuje linearno, je največja izkoriščenost pasnic pri 5,5 metrih.

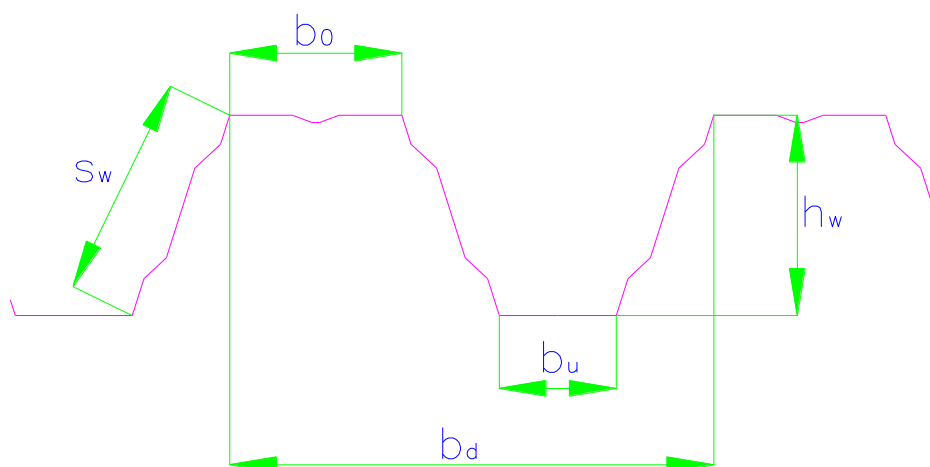
Preverili smo vse tri kombinacije pri mejnem stanju uporabnosti. Rezultati so podani v naslednji preglednici:

Preglednica 19: Obtežbe in pomiki pri MSU za primarni nosilec

Obtežba	q [kN/cm]	w [cm]	L/w
karakteristična	0,076	15	133
pogost	0,0198	4,1	487
navidezno stalna	0,077	1,2	1660

V preglednici vidimo, da so pomiki dovolj majhni, tako da ni potrebe po večjih prerezih.

#### 4.5 Profilirana pločevina in vijaki



Slika 67: Podatki o profilirani pločevini

$$h_w = 128 \text{ mm}$$

$$b_d = 311 \text{ mm}$$

$$b_o = 110 \text{ mm}$$

$$b_u = 75 \text{ mm}$$

$$f_{yb} = 350 \text{ MPa}$$

$$t_{cor} = 0,76 \text{ mm}$$

$$t = 0,8 \text{ mm}$$

$$b_w = 0,5 \cdot (b_d - b_o - b_u) = 0,5 \cdot (311 \text{ mm} - 110 \text{ mm} - 75 \text{ mm}) = 63 \text{ mm}$$

$$s_w = 143 \text{ mm}$$

Nosilnost pločevine (poda proizvajalec pločevine - RUUKKI):

$M_{f,Rd} = 10,95 \text{ kNm/m}$	<i>upogibna nosilnost pločevine na sredini razpona (pozitivna orient.)</i>
$M_{s,Rd} = 13,76 \text{ kNm/m}$	<i>upogibna nosilnost pločevine ob podpori (negativna orient.)</i>
$R_{w,Rd} = 25,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	<i>strižna nosilnost pločevine nad podporo</i>
$V_{w,Rd} = 50,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	<i>uklon stojine v strigu</i>
$V_{f,Rd} = 65,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	<i>uklon pasnice v strigu</i>
$V_{g,R} = 464,8 \text{ kNm}$	<i>globalni uklon</i>
$V_{r,Rd} = 10,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	<i>sila pri kateri pride do mečkanja profila na robu</i>

Žičniki iz jekla (nosilnosti poda proizvajalec žičnikov):

$d_{rivet} = 6,3 \text{ mm}$	<i>Premer žičnika</i>
$t_{nom} = 0,734 \text{ mm}$	<i>Nominalna debelina trapezne pločevine</i>
$F_{v,Rd,riv} = 3,52 \text{ kN}$	<i>Strižna nosilnost žičnika</i>
$F_{b,Rd,riv,1} = 2,17 \text{ kN}$	<i>Nosilnost žičnika na bočni pritisk <math>t_1 = t</math></i>
$F_{b,Rd,riv,2} = 3,52 \text{ kN}$	<i>Nosilnost žičnika na bočni pritisk <math>t_1 \geq 2,5t</math></i>
$F_{p,Rd,riv} = 1,29^* \text{ kN}$	<i>Nosilnost žičnika proti preboju (* pri podložki 14 mm)</i>
$F_{t,Rd,riv} = 4,22 \text{ kN}$	<i>Natezna nosilnost žičnika</i>

Vijaki (nosilnosti poda proizvajalec vijakov):

$d_{screw} = 6,3 \text{ mm}$	<i>Premer vijaka</i>
$F_{v,Rd,screw} = 7,84 \text{ kN}$	<i>Strižna nosilnost vijaka</i>
$F_{b,Rd,screw,1} = 1,7 \text{ kN}$	<i>Nosilnost vijaka na bočni pritisk <math>t_1 = t</math></i>
$F_{b,Rd,screw,2} = 3,26 \text{ kN}$	<i>Nosilnost vijaka na bočni pritisk <math>t_1 \geq 2,5t</math></i>
$F_{p,Rd,screw} = 3,29^* \text{ kN}$	<i>Nosilnost vijaka proti preboju (* pri podložki 19 mm)</i>
$F_{t,Rd,screw} = 8,16 \text{ kN}$	<i>Natezna nosilnost vijaka</i>

#### 4.6 Dimenzioniranje profilirane pločevine

Najprej moramo določiti projektne obtežbe pri mejnem stanju nosilnosti (MSN) in mejnem stanju uporabnosti (MSU) in sicer za kombinacijo med lastno in stalno težo, obtežbo snega in vetra, kot smo to naredili za primarne nosilce v poglavju 4.4.

$$Q_1 = 1,35 \cdot 0,165 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1,5 \cdot 1,208 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,27 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 2,28 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$Q_{1,MSU} = 1,0 \cdot G_{\text{stalna}} + 1,0 \cdot S + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_{\text{roof,p}} = 1,62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

#### 4.6.1 Določitev notranjih statičnih količin za trapezno pločevino:

$M_{s,Ed}$  ... minimalni moment nad podporo

$M_{f,Ed}$  ... maksimalni moment na sredini razpona

$R_A, R_B, R_C$  ... reakcije

$I_{fic}$  ... efektivni vztrajnostni moment trapezne pločevine

$y$  ... vertikalni pomik

Mejno stanje nosilnosti – MSN:

$$M_{s,Ed} = \frac{Q_1 \cdot L_1^3 + Q_1 \cdot L_2^3}{8 \cdot (L_1 + L_2)} = \frac{2,28 \frac{kN}{m^2} \cdot (5m)^3 + 2,28 \frac{kN}{m^2} \cdot (5m)^3}{8 \cdot (5m + 5m)} = 7,125 \text{ kNm/m}$$

$$M_{s,Ed} \leq M_{s,Rd} \rightarrow 7,125 \text{ kNm/m} \leq 13,76 \text{ kNm/m}$$

$$R_A = R_C = \frac{Q_1 \cdot L_1}{2} - \frac{M_{s,Ed}}{L_1} = \frac{2,28 \frac{kN}{m^2} \cdot 5m}{2} - \frac{7,125 \frac{kNm}{m}}{5m} = 4,275 \text{ kN/m}$$

$$\frac{R_A}{0,5 R_{w,Rd}} \leq 1 \rightarrow \frac{4,275 \frac{kN}{m}}{0,5 \cdot 25,3 \frac{kN}{m}} = 0,33 \leq 1$$

$$R_B = Q_1 \cdot (L_1 + L_2) - R_A - R_C = 2,28 \frac{kN}{m^2} \cdot (5m + 5m) - 2 \cdot 4,275 \frac{kN}{m} = 14,25 \text{ kN/m}$$

$$\frac{R_B}{R_{w,Rd}} \leq 1 \rightarrow \frac{14,25 \frac{kN}{m}}{25,3 \frac{kN}{m}} = 0,56 \leq 1$$

$$M_{f,Ed} = \frac{R_A^2}{2 \cdot Q_1} = \frac{\left(4,275 \frac{kN}{m}\right)^2}{2 \cdot 2,28 \frac{kN}{m^2}} = 4 \text{ kNm/m}$$

$$M_{f,Ed} \leq M_{f,Rd} \rightarrow 4 \frac{kNm}{m} \leq 10,95 \text{ kNm/m}$$

Zgornje vrednosti nam povedo, da je za mejno stanje nosilnost profilirana pločevina malo izkoriščena, vendar naslednji pogoj (MSU) določa debelino trapezne pločevine.

Mejno stanje uporabnosti – karakteristična kombinacija ( $I_{eff}$  poda proizvajalec):

$$I_{eff} = 2668007 \text{ mm}^4/m$$

$$y = \frac{5 \cdot Q_{1,MSU} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{eff}} = \frac{5 \cdot 1,62 \frac{kN}{m^2} \cdot (5m)^4}{384 \cdot 210 \cdot 10^6 \frac{kN}{m^2} \cdot 2668007 \cdot 10^{-12} \frac{m^4}{m}} = 0,0223m = 2,23 \text{ cm}$$

$$\frac{L}{y} = \frac{5m}{0,023m} = 212$$

Pri preverjanju kriterija pomikov, bi lahko uporabili tudi pogosto kombinacijo, kjer je kriterij strožji ( $\frac{l}{y} \geq 500$ ), vendar smo uporabili karakteristično kombinacijo, kjer pa je kriterij zaradi večje obtežbe blažji.

Akcija na diafragmo zaradi vetra – vzdolž konstrukcije (slika 68):

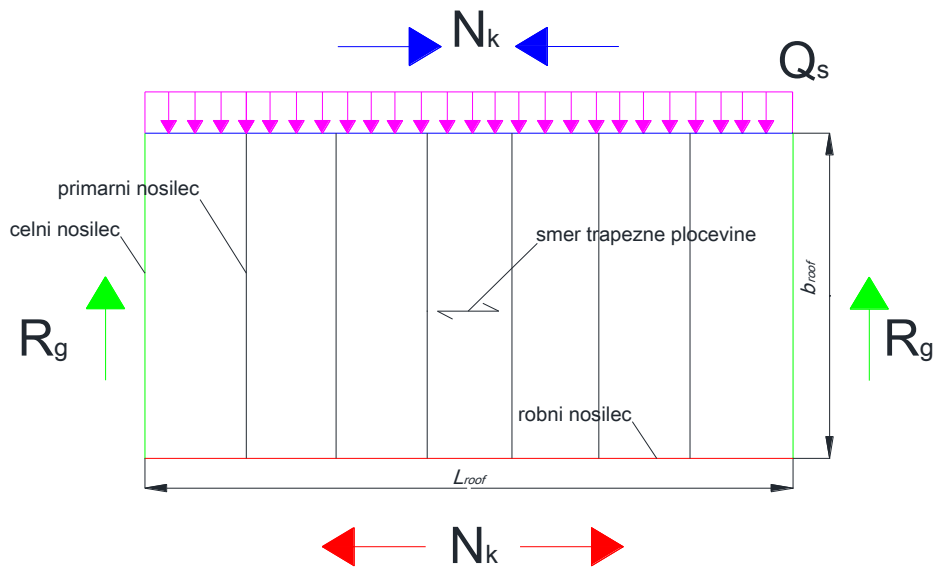
$$b_{diaph} = b_{roof}$$

$$Q_s = \frac{h}{2} \cdot 1,5 \cdot W_{roof,p} = \frac{7,5 \text{ m}}{2} \cdot 1,5 \cdot 0,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 4,56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$R_g = Q_s \cdot \frac{L_{roof}}{2} = 4,56 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{45 \text{ m}}{2} = 102,5 \text{ kN}$$

$$N_k = \frac{Q_s \cdot L_{roof}^2}{8 \cdot b_{diaph}} = \frac{4,56 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (45 \text{ m})^2}{8 \cdot 20 \text{ m}} = 57,7 \text{ kN}$$

$$V_{max} = \frac{Q_s \cdot (L_{roof} - c_{rafter})}{2 \cdot b_{diaph}} = \frac{4,56 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (45 \text{ m} - 5 \text{ m})}{2 \cdot 20 \text{ m}} = 4,56 \text{ kN/m}$$



Slika 68: Obtežba vzdolž konstrukcije

Obtežba prečno na konstrukcijo (slika 69):

$$Q_{sg} = 1,5 \cdot W_{roof,p} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{h_p}{2} + h_b + \frac{h_t}{2} \right) + n_{podp.nosilcev} \cdot q \text{ (iz naslednjega poglavja)}$$

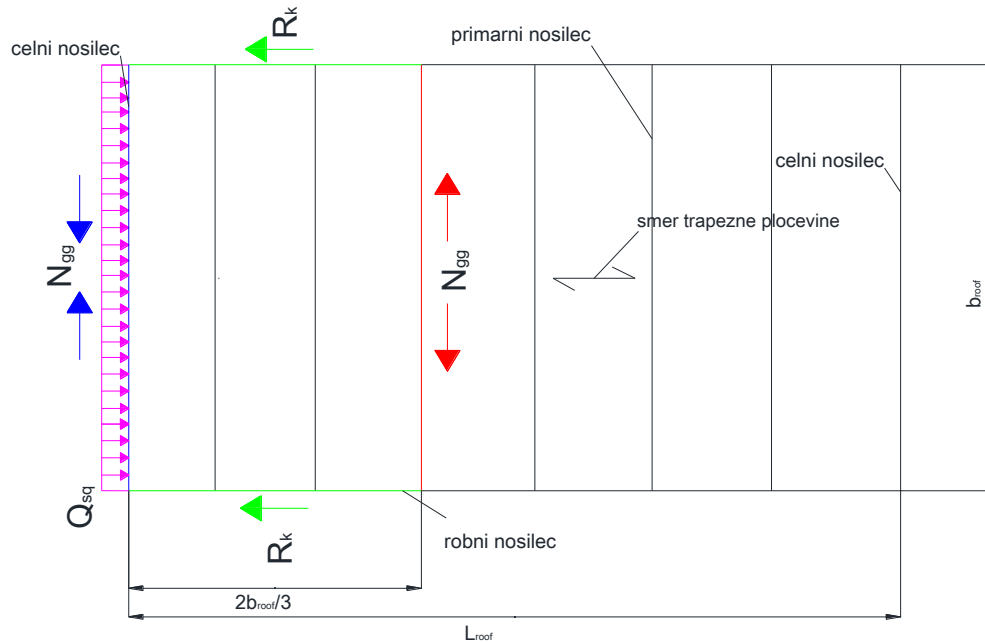
$$Q_{sg} = 1,50 \cdot 0,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{7,5 \text{ m}}{2} + 0,8 \text{ m} + \frac{8,3 \text{ m}}{2} \right) + 4 \cdot 0,422 \text{ kN/m} = 6,97 \text{ kN/m}$$

$$R_k = Q_{sg} \cdot \frac{b_{roof}}{2} = 6,97 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{20 \text{ m}}{2} = 69,7 \text{ kN}$$

$$N_{gg} = 0,19 \cdot Q_{sg} \cdot b_{roof} = 0,19 \cdot \frac{6,97 \text{ kN}}{\text{m}} \cdot 20 \text{ m} = 26,5 \text{ kN}$$



$$V_g = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot Q_{sg} = \frac{3}{4} \cdot \frac{6,97 \text{ kN}}{m} = 5,23 \text{ kN/m}$$



Slika 69: Obremenitev prečno na konstrukcijo

#### 4.6.2 Dodatna obtežba zaradi bočne zvrnitve primarnih nosilcev

Obremenitve na trapezno pločevino zaradi možnosti bočne zvrnitve primarnih nosilcev

Le-to bomo naredili na dva načina kot sta opisana v poglavju 3.5.1, torej po teoriji minimalne potencialne energije in po iteracijskem postopku. Diafragma vsebuje naslednje karakteristike:

$$w = 5000 \text{ mm}$$

$$L = 20000 \text{ mm}$$

$$N = \frac{M_{Ed}}{h} = \frac{484 \text{ kNm}}{0,506\text{m}} = 956,5 \text{ kN}$$

$$c = 0,0146 \frac{\text{cm}}{\text{kN}} \dots \text{izračunano iz poglavja 4.7.6}$$

Predpostavimo, da je začetna imperfektnost primarnih nosilcev:

$$f_0 = k_r \cdot \frac{L}{500} = 0,5477 \cdot \frac{20000 \text{ mm}}{500} = 21,91 \text{ mm}$$

$$k_r = \sqrt{0,2 + \frac{1}{n_r}} = \sqrt{0,2 + \frac{1}{10}} = 0,5477$$

$$n_r = 10$$

Nato v skladu s poglavjem 3.5.1 začnemo z iteracijami:

Prvi korak:

$$q_0 = N \cdot \frac{8 \cdot f_0}{L^2} = 956,5 \text{ kN} \cdot \frac{8 \cdot 21,91 \text{ mm}}{(20000 \text{ mm})^2} = 4,191 \cdot 10^{-4} \text{ kN/mm}$$

Drugi korak:

$$f_1 = f_0 + \frac{c \cdot q_0 \cdot L}{8} = 21,91 \text{ mm} + \frac{0,146 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} \cdot 4,191 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot 20000 \text{ mm}}{8} = 22,063 \text{ mm}$$

$$q_1 = N \cdot \frac{8 \cdot f_1}{L^2} = 956,5 \text{ kN} \cdot \frac{8 \cdot 22,063 \text{ mm}}{(20000 \text{ mm})^2} = 4,221 \cdot 10^{-4} \text{ kN/mm}$$

Tretji korak:

$$f_2 = f_0 + \frac{c \cdot q_1 \cdot L}{8} = 21,91 \text{ mm} + \frac{0,146 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} \cdot 4,221 \cdot 10^{-4} \text{ kN/mm} \cdot 20000 \text{ mm}}{8} = 22,064 \text{ mm}$$

$$q_2 = N \cdot \frac{8 \cdot f_2}{L^2} = 956,5 \text{ kN} \cdot \frac{8 \cdot 22,064 \text{ mm}}{(20000 \text{ mm})^2} = 4,221 \cdot 10^{-4} \text{ kN/mm}$$

Lahko vidimo da se med drugim in tretjim korakom obtežba ni spremenila, zato bomo obtežbo  $q_2$  vzeli za merodajno. Vseeno pa bomo dobljeni rezultat preverili z izrazom, ki smo ga izpeljali v poglavju 3.5.1.

Pomik po deformaciji je enak (enačbi 3.91 in 3.92):

$$f = \frac{f_0}{1 - \frac{N \cdot c}{L}} = \frac{21,91 \text{ mm}}{1 - \frac{956,5 \text{ kN} \cdot 0,146 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}}{20000 \text{ mm}}} = 22,06 \text{ mm}$$

$$q = N \cdot \frac{8 \cdot f}{L^2} = 956,5 \text{ kN} \cdot \frac{8 \cdot 22,06 \text{ mm}}{(20000 \text{ mm})^2} = 4,22 \cdot 10^{-4} \text{ kN/mm}$$

Ko primerjamo  $q$  in  $q_2$  lahko opazimo da sta skoraj enaka. V danem primeru bi bilo dovolj, če bi naredili le dve iteracije.

Torej dodatna obtežba na profilirano pločevino znaša:

$$q = 4,289 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kN}}{\text{mm}} = 0,4289 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### 4.6.3 Preverjanje pogojev

Lokalni uklon stojine v profiliranem panelu (enačbi 3.20 in 3.21):

$$V_{w,Rd} \geq V_{max}$$

$$50,3 \text{ kN/m} \geq 4,56 \text{ kN/m}$$

$$\frac{M_f}{M_{f,Rd}} + \frac{V_{max}}{V_{w,Rd}} < 1,3$$

$$\frac{4 \text{ kNm/m}}{10,95 \text{ kNm/m}} + \frac{4,56 \text{ kN/m}}{50,3 \text{ kN/m}} = 0,46 < 1,3$$

Lokalni uklon pasnice v profiliranem panelu (enačbi 3.22 in 3.23):

$$V_{f,Rd} \geq V_{max}$$

$$65,1 \text{ kN/m} \geq 4,56 \text{ kN/m}$$

$$0,8 \cdot \frac{M_f}{M_{f,Rd}} + \frac{V_{max}}{V_{f,Rd}} < 1,3$$

$$0,8 \cdot \frac{\frac{4 \text{ kNm}}{m}}{10,95 \frac{\text{kNm}}{m}} + \frac{4,56 \frac{\text{kN}}{m}}{65,1 \frac{\text{kN}}{m}} = 0,36 < 1,3$$

Globalni uklon trapezne pločevine enačba 3.24):

$$V_{g,Rd} = \frac{V_{gR}}{c_{rafter}^2}$$

$$V_{g,Rd} = \frac{464,8 \text{ kNm}}{(5\text{m})^2} = 18,6 \text{ kN/m}$$

$$V_{g,Rd} \geq V_{max}$$

$$18,6 \text{ kNm} \geq 4,56 \text{ kN/m}$$

Strižne napetosti v panelu (SIST EN 1993-1-3, poglavje 10.3.4):

$$\tau = \frac{V_{max}}{t} \leq 0,25 \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M1}}$$

$$\tau = \frac{4,56 \text{ kN/m}}{0,0008\text{m}} = 5,7 \text{ MPa} \leq 0,25 \cdot \frac{350 \text{ MPa}}{1} = 87,5 \text{ MPa}$$

Distorzija profilov na robu (enačba 3.25):

$$V_{r,Rd} \geq V_{max}$$

$$10,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \geq 4,56 \text{ kN/m}$$

Vmesna podpora (enačbi 3.27 in 3.28):

- lokalni uklon stojine in mečkanje le-te

$$0,8 \cdot \frac{R_B}{R_{w,Rd}} + \frac{V_{max}}{V_{w,Rd}} \leq 1,1$$

$$0,8 \cdot \frac{14,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{25,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} + \frac{4,56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{50,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} = 0,54 \leq 1,1$$

- lokalni uklon stojine zaradi strižne sile in momenta

$$\frac{M_{s,Ed}}{M_{s,Rd}} + \frac{V_{max}}{V_{w,Rd}} \leq 1.3$$

$$\frac{7,125 \text{ kNm/m}}{13,76 \text{ kNm/m}} + \frac{4,56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{50,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} = 0,61 \leq 1.3$$

#### 4.6.4 Osna sila v trapezni pločevini

Kot omenjeno v zgornjih poglavjih se sila, ki nastane zaradi vetra na koncu objekta prenese preko vrhov stebrov v trapezno pločevino pri čemer nastanejo osne sile v trapezni pločevini. Magnituda osne sile je odvisna od prečne togosti čelnega nosilca (enačbe so povzete iz poglavja 2.4). Vztrajnostni moment v šibki smeri čelnega nosilca (HEA 160) znaša:

$$I_z = 616 \text{ cm}^4$$

Trapezna pločevina je pritrjena s štirimi vijaki v vsakem koritu na čelni nosilec.

$$n_{sk} = 4$$

$$c_s = \frac{b_d}{n_{sk}} = \frac{311 \text{ mm}}{4} = 77,75 \text{ mm}$$

Strižna deformacija med vijakom in pločevino (enačba 2.18):

$$v = \frac{F_{II}}{k_2 \cdot d \cdot \sqrt{t} \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]} = \frac{1 \text{ kN}}{1,5 \cdot 6,3 \text{ mm} \cdot \sqrt{0,8 \text{ mm}} \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2} = 0,118 \text{ mm}$$

Modul elastične podlage se izračuna po naslednji enačbi (enačba 2.19):

$$k = \frac{F_{II}}{v \cdot c_s} = \frac{1 \text{ kN}}{0,118 \text{ mm} \cdot 77,75 \text{ mm}} = 109 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0,0109 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

Nato določimo koeficient  $\beta$  (enačba 2.21):

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4 E I_z}} = \sqrt[4]{\frac{0,0109 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}{4 \cdot 210 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \cdot 616 \cdot 10^4 \text{ mm}^4}} = 0,001205 \text{ mm}^{-1} = 1,205 \text{ m}^{-1}$$

Maksimalni prečni pomik pa določa naslednja enačba (enačba 2.20):

$$w_{max} = \frac{1}{m} \frac{Q_y \cdot \beta}{2 \cdot k} = \frac{1}{1} \frac{34,85 \text{ kN} \cdot 1,205 \text{ m}^{-1}}{\text{mm}^2 \cdot 0,0109 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}} = 1,93 \text{ mm}$$

$$Q_y = Q_y \cdot c_{gp} = 6,97 \text{ kN/m} \cdot 5 \text{ m} = 34,85 \text{ kN}$$

Maksimalna osna sila v trapezni pločevini znaša (enačba 2.22)::

$$N_{max} = k \cdot w_{max} = 0,0109 \frac{kN}{mm^2} \cdot 1,93 \text{ mm} = 0,021 \text{ kN/mm} = 21,0 \text{ kN/m}$$

Maksimalna sila v vijaku znaša

$$N_{max,b} = k \cdot w_{max} \cdot c_s = 0,0109 \frac{kN}{mm^2} \cdot 1,93 \text{ mm} \cdot 77,75 \text{ mm} = 1,64 \text{ kN}$$

Površina trapezne pločevine, ki sodeluje pri prevzemanju osnih sil (v podatkih proizvajalca):

$$A_{eff} = 1 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

Sedaj določimo vztrajnostni radij  $i_{eff}$ , vitkost  $\bar{\lambda}_c$  in redukcijski faktor  $\chi$  (vztrajnosti moment trapezne pločevine poda proizvajalec), ki ji podaja *SIST EN 1993-1-3*, poglavje 6.3.1.3:

$$i_{eff} = \sqrt{\frac{I_y}{A_{eff}}} = \sqrt{\frac{2417 \text{ mm}^4}{1 \text{ mm}^2/\text{mm}}} = 49,16 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_c = \frac{l_u}{i_{eff} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{5000 \text{ mm}}{49,16 \text{ mm} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{350 \text{ MPa}}{210\,000 \text{ MPa}}} = 1,32$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT}(\lambda_c - \lambda_{LT}) + \lambda_c^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34(1,02 - 0,2) + 1,02^2] = 1,16$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_c^2}} = \frac{1}{1,16 + \sqrt{1,16^2 - 1,32^2}} = 0,61$$

Nosilnost prečnega prereza trapezne pločevine na tlačno silo:

$$N_{c,Rd} = \chi \cdot f_{yb} \cdot \frac{A_{eff}}{\gamma_{M1}} = 0,61 \cdot 0,350 \frac{kN}{mm^2} \cdot \frac{1 \frac{mm^2}{mm}}{1} = 213,5 \text{ kN/m}$$

Kontrola nosilnost na tlačno silo:

$$N_{max} \leq N_{c,Rd}$$

$$21,0 \frac{kN}{m} \leq 213,5 \text{ kN/m}$$

Interakcija med osno silo in momentom (odpornostni moment poda proizvajalec):

$$k_\delta = \frac{1}{1 - \frac{N_{max}}{N_{crit}}} = \frac{1}{1 - \frac{21 \text{ kN/m}}{230,7 \text{ kN/m}}} = 1,1$$

$$N_{crit} = \frac{\pi^2 E I_{trap.ploč}}{L_u} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \frac{kN}{mm^2} \cdot 2783844 \text{ mm}^4/\text{m}}{(5000 \text{ mm})^2} = 230,7 \text{ kN/m}$$

$$M^{II} = k_\delta \cdot (M_{s,Ed} + w_0 \cdot N_{max}) = 1,1 \left( 7,125 \frac{kNm}{m} + \frac{1}{200} \cdot 5 \text{ m} \cdot 21,0 \frac{kN}{m} \right) = 8,415 \text{ kNm/m}$$

$$\bar{\lambda}_{ploc.} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{crit}}} = \sqrt{\frac{1 \frac{mm^2}{mm} \cdot 0,350 \text{ kN/mm}^2}{0,230 \text{ kN/mm}}} = 1,23$$

$$\chi = 0,45$$

$$\frac{N_{max}}{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M^{II}}{W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{0,021 \text{ kN/mm}}{0,45 \cdot 1 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} \cdot 0,350 \text{ kN/mm}^2 / 1} + \frac{8,415 \text{ kNm/m}}{39,324 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}} \cdot 0,350 \text{ kN/mm}^2 / 1} = 0,75 \leq 1$$

## 4.7 Dimenzioniranje pritrditev

### 4.7.1 Stranski šivi (glej poglavje 3.3.3)

Pločevina je na robovih in koncih pritrjena z vijaki premera 6,3 mm, pločevine pa so med seboj pritrjene z žičniki premera 6,3 mm (slika 27). Odpornost pločevine na trganje zaradi strižne sile v žičniku (SIST EN 1993-1-3, poglavje 8.3):

$$F_{b,Rd,riv} = \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot \frac{t}{\gamma_{M2}} = 1,28 \cdot 420 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 6,3 \text{ mm} \cdot \frac{0,8 \text{ mm}}{1,25} = 2172 \text{ N} = 2,17 \text{ kN}$$

$$\alpha = 3,6 \cdot \sqrt{\frac{t}{d}} = 3,6 \cdot \sqrt{\frac{0,8 \text{ mm}}{6,3 \text{ mm}}} = 1,28$$

$$F_{v,Rd,riv} = 3,52 \text{ kN}$$

Po standardu SIST EN 1993-1-3 moramo nosilnost žičnikov na strig zmanjšati za 25%. Torej sledi:

$$F_{Rd,riv} = \min \left( F_{b,Rd,riv}, \frac{F_{v,Rd,riv}}{1,25} \right) = \min \left( 2,17 \text{ kN}, \frac{3,52 \text{ kN}}{1,25} = 2,81 \text{ kN} \right) = 2,17 \text{ kN}$$

V poglavjih zgoraj smo omenili, da je lahko maksimalna razdalja med žičniki 500 mm.

Polovica število polj v konstrukciji  $n_f$

$$n_f = 4$$

$$i = 1 \dots n_f \rightarrow 1 \dots 4$$

$$V_1 = V_{max} \cdot \left( \frac{n_f + 1 - i}{n_f} \right) = 4,56 \text{ kN/m} \cdot \left( \frac{4 + 1 - i}{4} \right)$$

$$V_2 = V_g \cdot \left( \frac{n_f + 1 - i}{n_f} \right) = 5,23 \text{ kN/m} \cdot \left( \frac{4 + 1 - i}{4} \right)$$

$$c_i = \frac{F_{Rd,riv}}{V_1} = \frac{2,17 \text{ kN}}{V_1}$$

Preveriti je potrebno še obremenitve, kadar veter deluje na koncu (poglavje 2.3).

$$k = 1 \dots 3$$

$$c_k = \text{če je } V_g > V_i, \text{ potem } \frac{F_{Rd,riv}}{V_2}, \text{ sicer } \frac{F_{Rd,riv}}{V_1}$$

Polja številka	$V_1 \left[ \frac{kN}{m} \right]$	$V_2 \left[ \frac{kN}{m} \right]$	$c_i [cm]$	$c_k [cm]$	$c_{n,i} [cm]$
1	4,56	5,23	47	41	41
2	3,42	3,92	63	55	50
3	2,28	2,62	95	82	50
4	1,14	samo do dolžine $\frac{2}{3}b$	190	/	50

Za merodajno razdaljo med šivnimi vijaki  $c_n$  upoštevamo manjšo izmed vrednosti  $c_i$  in  $c_k$  vendar ne sme biti večja ob 50 cm.

#### 4.7.2 Priključitev na robni nosilec (glej poglavje 2.7.2 in 3.3.2)

Debelina pločevine, ki jo uporabimo za robno ojačitev znaša 2,5 mm. Meja tečenja le-te znaša 350 MPa, za vezno sredstvo pa bomo uporabili vijake premera 6,3 mm. Razdalja med vijaki ne sme biti večja od 300 mm (glej preglednico 7 in 10 ter sliko 45 - levo).

$$t_1 = 2,5 \text{ mm}$$

$$t = 0,8 \text{ mm}$$

$$\frac{t_1}{t} = \frac{2,5 \text{ mm}}{0,8 \text{ mm}} = 3,125 > 2,5$$

$$F_{b,Rd,screw,2} = \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot \frac{t_{nom}}{\gamma_{M2}} = 2,1 \cdot 0,42 \frac{kN}{mm^2} \cdot 6,3 \text{ mm} \cdot \frac{0,734 \text{ mm}}{1,25} = 3,26 \text{ kN}$$

$$\alpha = 2,1$$

$$c_r = \frac{F_{b,Rd,screw,2}}{V_{max}} = \frac{3,26 \text{ kN}}{4,56 \text{ kN} \cdot m^{-1}} = 714 \text{ mm} > 300 \text{ mm}$$

$$c_r = 300 \text{ mm}$$

#### 4.7.3 Priključitev robne ojačitve in trapezne pločevine na robu objekta (glej poglavje 2.7.2)

Trapezno pločevino moramo na robovih ojačati (glej poglavje 2.7.2 in sliko 26):

$$t_1 = 2,5 \text{ mm}$$

$$t = 0,8 \text{ mm}$$

$$\frac{t_1}{t} = \frac{2,5 \text{ mm}}{0,8 \text{ mm}} = 3,125 \leq 2,5 \rightarrow \alpha = 2,1$$

$$F_{b,Rd,riv,2} = 3,26 \text{ kN}$$

$$c_e = \frac{F_{b,Rd,riv,2}}{0,5 \cdot V_{max}} = \frac{3,26 \text{ kN}}{0,5 \cdot 4,56 \text{ kN} \cdot m^{-1}} = 1430 \text{ mm} > 500 \text{ mm}$$

$$c_e = 500 \text{ mm}$$

Število vijakov na robu, kjer se priključuje ojačitev na zgornjo pasnico:

Osna sila v robnem nosilcu znaša  $N_k = 57,7 \text{ kN}$

Nosilnost 2,5 mm pločevine na bočni pritisk znaša  $F_{b,Rd,riv,2} = 3,26 \text{ kN}$

Potrebno število vijakov:  $n_k = 1,25 \cdot \frac{N_k}{F_{b,Rd,riv,2}} = 1,25 \cdot \frac{57,7 \text{ kN}}{3,26 \text{ kN}} = 22,1 \dots 23 \text{ vijakov}$

Za 25% smo povečali število vijakov zaradi tega, ker je trapezna pločevina pritrjena na zgornjo pasnico lege in zato pride do ekscentričnosti.

Preveriti je potrebno še veter na koncu objekta. Tam pride do osne sile v legi zaradi reakcije ( $R_k$ ).

$R_k = 69,7 \text{ kN}$

$F_{b,Rd,riv,2} = 3,26 \text{ kN}$

$n_v = 1,25 \cdot \frac{R_k}{F_{b,Rd,riv,2}} = 1,25 \cdot \frac{69,7 \text{ kN}}{3,26 \text{ kN}} = 26,7 \rightarrow 27 \text{ vijakov}$

#### 4.7.4 Priključitev trapezne pločevine na čelni nosilec (glej poglavje 2.7.2)

Za dimenzioniranje števila vijakov, ki povezuje trapezno pločevino in čelni nosilec moramo preveriti za dve kombinaciji. Prva je kadar veter deluje vzdolž objekta ter druga kadar deluje veter prečno na objekt. V slednji kombinaciji veter povzroča velike koncentracije strižnih sil na vrhu stebrov. Najbolj obremenjen vijak je torej tisti, ki je v bližini vrha stebra in s t.i. šivi povezuje trapezno pločevino med seboj.

Debelina pasnice lege (*HEA 160*):

$t_f = 9 \text{ mm}$

Meja tečenja za čelni nosilec:

$f_y = 355 \text{ MPa}$

Pločevina debeline 0,8 mm in vijaki 6,3 mm imata naslednje karakteristike (glej preglednico 10):

Največji bočni pritisk, ki ga pločevina prenese preden se začne trgati:

$F_{b,Rd} = F_{b,Rd,screw,2} = 3,26 \text{ kN}$

Nosilnost proti preboju skozi 0,8 mm pločevino (poda proizvajalec vijakov):

$F_{p,Rd} = F_{p,Rd,screw} = 3,29 \text{ kN}$

Strižna nosilnost vijaka:  $F_{v,Rd} = F_{v,Rd,screw} = 7,84 \text{ kN}$

Natezna trdnost vijaka:  $F_{t,Rd} = F_{t,Rd,screw} = 8,16 \text{ kN}$

Število vijakov v koritu:  $n_{sk} = 2$



#### 4.7.4.1 Veter vzdolžno na objekt (glej poglavje 2.2.1)

Strižna sila, ki se prenese na primarni nosilec:

$$F_a = c_s \cdot V_{max} = \frac{0,311m}{2} \cdot 4,56 \frac{kN}{m} = 0,71kN$$

$$c_s = \frac{b_d}{n_{sk}}$$

Maksimalna sila v vijaku (glej poglavje 4.6.4):

$$F_{b1} = N_{max,b} = 1,64 kN$$

Strižna sila v šivnem vijaku (enačba 3.31):

$$F_{b2} = c_{n1} \cdot \frac{V_{max}}{n_{sk}} = 410 mm \cdot \frac{4,56 kN}{1000 mm \cdot 2} = 0,935 kN$$

Izvlačna sila zaradi srka vetra (glej poglavje 3.3.3):

$$\begin{aligned} F_{c1} &= c_s \cdot 0,5 \cdot c_{rafter} \cdot (komb Q_2) = \\ &= \frac{0,311m}{2} \cdot 0,5 \cdot 5m \cdot \left( \frac{2,41kN}{m} \right) = 0,937 kN \end{aligned}$$

Izvlačna sila zaradi distorzije profila ( $P_{c2V}$  poda proizvajalev pločevine, glej poglavje 3.3.1.2 in 3.3.3):

$$F_{c2} = P_{c2V} \cdot V_{max} \cdot \frac{2}{n_{sk}} = 0,1m \cdot \frac{4,56 kN}{m} \cdot \frac{2}{2} = 0,456 kN$$

Rezultanta sil (glej poglavje 3.3.3):

- Strižna sila  $F_{v,1} = \sqrt{F_a^2 + F_b^2} = \sqrt{(0,71kN)^2 + (1,64kN + 0,935 kN)^2} = 2,67 kN$
- Izvlačna sila  $F_{t,1} = \sqrt{F_{c1} + F_{c2}} = \sqrt{(0,937 kN)^2 + (0,456 kN)^2} = 1,04 kN$

Nosilnost pločevine (glej poglavje 3.3.3):

$$\begin{aligned} \frac{F_{v,1}}{1,4 \cdot F_{b,Rd}} + \frac{F_{t,1}}{F_{p,Rd}} &\leq 1 \\ \frac{2,67 kN}{1,4 \cdot 3,26 kN} + \frac{1,04kN}{3,29 kN} &= 0,90 \leq 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{F_{v,1}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,1}}{F_{t,Rd}} &\leq 1 \\ \frac{2,67}{4,13 kN} + \frac{1,04 kN}{8,16 kN} &= 0,77 \leq 1 \end{aligned}$$

#### 4.7.4.2 Veter prečno na objekt (glej poglavje 2.3.1)

Strižna sila, ki se prenese na robno pritrditev na koncu stavbe:

$$F_a = b_d \cdot \frac{V_g}{2} = 0,311m \cdot \frac{5,23 \frac{kN}{m}}{2} = 0,813 kN$$

Strižna sila, ki se pojavi na vrhu čelnih stebrov (glej poglavje 4.6.4):

$$F_{b1} = N_{max,b} = 1,64 kN$$

Strižna sila v šivnem vijaku (enačba 3.31):

$$F_{b2} = c_{n1} \cdot V_g \cdot \frac{1}{n_{sk}} = 0,410 m \cdot 5,23 \frac{kN}{m} \cdot \frac{1}{2} = 1,07 kN$$

Izvlačna sila zaradi srka vetra (glej poglavje 3.3.3):

$$F_{c1} = c_s \cdot 0,5 \cdot c_{rafter} \cdot (komb Q_2) = \\ = \frac{0,311m}{2} \cdot 0,5 \cdot 5m \cdot \left( \frac{2,41kN}{m} \right) = 0,937 kN$$

Izvlačna sila zaradi distorzije profila ( $P_{c2V}$  poda proizvajalev pločevine, glej poglavje 3.3.1.2 in 3.3.3):

$$F_{c2} = P_{c2V} \cdot V_g \cdot \frac{2}{n_{sk}} = 0 \dots v \text{ tej smeri ne pride do distorzije profilov}$$

Rezultanta sil (glej poglavje 3.3.3):

- Strižna sila  $F_{v,2} = \sqrt{F_a^2 + F_{b1}^2} = \sqrt{(0,813 kN)^2 + (1,64 + 1,07 kN)^2} = 2,83 kN$
- Izvlačna sila  $F_{t,2} = \sqrt{F_{c1}^2 + F_{c2}^2} = \sqrt{(0,937 kN)^2 + (0 kN)^2} = 0,937 kN$

Nosilnost pločevine (glej poglavje 3.3.3):

$$\frac{F_{v,2}}{1,4 \cdot F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,2}}{F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{2,83 kN}{1,4 \cdot 7,84 kN} + \frac{0,937 kN}{8,16 kN} = 0,37 \leq 1$$

$$\frac{F_{v,2}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,2}}{F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{2,83 kN}{7,84 kN} + \frac{0,937 kN}{8,16 kN} = 0,48 \leq 1$$

#### 4.7.5 Povezava med trapezno pločevino in primarnim nosilcem (glej poglavje 2.7.2 in 3.3.3)

Le-ta je projektirana na sile, ki nastanejo po vzdolžni strani objekta, kjer so glavne napetosti v pločevini največje.

$$t_f = 12 mm$$

$$t = 1 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 355 \text{ MPa}$$

Dva vijaka v vsakem koritu s premerom:  $d = 6,3 \text{ mm}$

Največji bočni pritisk, ki ga pločevina prenese preden se začne trgati:  $F_{b,Rd} = 1,7 \text{ kN}$

Nosilnost proti preboju skozi 1 mm pločevino:  $F_{p,Rd} = 3,29 \text{ kN}$

Strižna nosilnost vijaka:  $F_{v,Rd} = 7,84 \text{ kN}$

Natezna trdnost vijaka:  $F_{t,Rd} = 8,16 \text{ kN}$

Razdalja med vijaki:  $c_s = b_d = 311 \text{ mm}$

Strižna sila, ki se prenese preko pločevine v primarni nosilec (glej poglavje 4.7.1):

$$F_a = c_{s2} \cdot (V_1 - V_2) = 0,311 \text{ m} \cdot \left( 4,56 \frac{\text{kN}}{\text{m}} - 3,42 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right) = 0,355 \text{ kN}$$

Število vijakov v koritu:  $n_{sk} = 2$

Strižna sila v stranskem šivu (enačba 3.31):

$$F_b = \frac{c_{n2}}{n_{sk}} \cdot V_{max} = \frac{0,5 \text{ m}}{2} \cdot 4,56 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 1,14 \text{ kN}$$

Izvlačna sila zaradi obtežbe vetra (glej poglavje 3.3.3):

$$F_c = \frac{b_d}{n_{sk}} \cdot k_{omb} Q_2 = \frac{0,311 \text{ m}}{2} \cdot \left( \frac{2,41 \text{ kN}}{\text{m}} \right) = 0,375 \text{ kN}$$

Rezultanta sil (glej poglavje 3.3.3):

- Strižna sila  $F_{v,3} = \sqrt{F_a^2 + F_b^2} = \sqrt{(0,355 \text{ kN})^2 + (1,14 \text{ kN})^2} = 1,19 \text{ kN}$
- Izvlačna sila  $F_{t,3} = F_c = 0,375 \text{ kN}$

Nosilnost pločevine (glej poglavje 3.3.3):

$$\frac{F_{v,3}}{1,4 \cdot F_{b,Rd}} + \frac{F_{t,3}}{F_{p,Rd}} \leq 1$$
$$\frac{1,19 \text{ kN}}{1,4 \cdot 1,7 \text{ kN}} + \frac{0,375 \text{ kN}}{3,29 \text{ kN}} = 0,61 \leq 1$$

#### 4.7.6 Deformacije v diafragmi

$$a = b_{roof} = 20 \text{ m}$$

$$b = c_{rafter} = 5 \text{ m}$$

$$d = p = b_d = 0,311 \text{ m}$$

$$t = 0,8 \text{ mm}$$

a) podajnost zaradi distrozije profilov ( $c_{1,1}$ , glej enačbo 3.42)

$$c_{1,1} = \frac{a \cdot d^{2,5} \cdot \alpha_5 \cdot K}{E \cdot t^{2,5} \cdot b^2}$$

$$c_{1,1} = \frac{2000 \text{ cm} \cdot (31,1 \text{ cm})^{2,5} \cdot 0,7 \cdot 0,189}{21000 \text{ kN/cm}^2 \cdot (0,08 \text{ cm})^{2,5} \cdot (500 \text{ cm})^2} = 0,15 \text{ cm/kN}$$

- b) podajnost zaradi strižni deformacij v panelih ( $c_{1,2}$ , glej enačbo 3.43)

$$c_{1,2} = \frac{2 \cdot a \cdot (1 + \nu) \cdot (1 + 2 \cdot \frac{h_w}{d})}{E \cdot t \cdot b}$$

$$c_{1,2} = \frac{2 \cdot 2000 \text{ cm} \cdot (1 + 0,3) \cdot (1 + 2 \cdot \frac{12,8 \text{ cm}}{31,1 \text{ cm}})}{21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 0,08 \text{ cm} \cdot 500 \text{ cm}} = 0,0062 \text{ cm/kN}$$

- c) podajnost zaradi zdrsa vijaka med trapezno pločevino in primarnimi nosilci ( $c_{2,1}$ , glej enačbo 3.44)

$$c_{2,1} = \frac{2 \cdot a \cdot s_p \cdot b_d}{b^2}$$

$$c_{2,1} = \frac{2 \cdot 2000 \text{ cm} \cdot 0,015 \frac{\text{cm}}{\text{kN}} \cdot 31,1 \text{ cm}}{500^2 \text{ cm}^2} = 0,0075 \text{ cm/kN}$$

- d) podajnost zaradi zdrsa vijaka med paneli (t.i. zdrs stranskega šiva) ( $c_{2,2}$ , glej enačbo 3.45 in 3.46)

$$c_{2,2} = \frac{s_s \cdot s_p \cdot (n_{sh} - 1)}{n_s \cdot s_p + \beta_1 \cdot s_s} = \frac{0,25 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} \cdot 0,15 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} \cdot (21 - 1)}{15 \cdot 0,15 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} + 1 \cdot 0,25 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}} = 0,3 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} = 0,03 \frac{\text{cm}}{\text{kN}}$$

$$n_{sh} = \frac{a}{3 \cdot b_d} = \frac{2000 \text{ cm}}{3 \cdot 31,1 \text{ cm}} = 21,43 \cong 21$$

$$n_s = \frac{b}{\text{razadalja med šivnimi vijaki}} - 1 = \frac{500 \text{ cm}}{40 \text{ cm}} - 1 = 15$$

- e) podajnost zaradi zdrsa v vijaku na robu konstrukcije ( $c_{2,3}$ , glej enačbo 3.47)

$$c_{2,3} = \frac{2 \cdot s_{sc}}{n_{sc}} = \frac{2 \cdot 0,15 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}}{16} = 0,02 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} = 0,002 \text{ cm/kN}$$

$$n_{sc} = \frac{b}{\text{razadalja med šivnimi vijaki}} = \frac{500 \text{ cm}}{30 \text{ cm}} = 16$$

- f) Podajnost zaradi osnih deformacij v legah ( $c_3$ , glej enačbo 3.48)

$$c_3 = \frac{n^2 \cdot b^3}{4,8 \cdot E \cdot A \cdot a^2} = \frac{9^2 \cdot (500 \text{ cm})^3}{4,8 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 33,63 \text{ cm}^2 \cdot (2000 \text{ cm})^2} = 0,00074702 \text{ cm/kN}$$

Vsota vseh podajnosti je celotna strižna podajnost diafragme in jo izračunamo po enačbi 3.49:

$$c = \frac{b^2}{a^2} \cdot (c_{1,1} + c_{1,2} + c_{2,1} + c_{2,2} + c_{2,3}) + c_3 =$$

$$c = \frac{(500 \text{ cm})^2}{(2000 \text{ cm})^2} \cdot \left( 0,15 \frac{\text{cm}}{\text{kN}} + 0,0062 \frac{\text{cm}}{\text{kN}} + 0,0075 \frac{\text{cm}}{\text{kN}} + 0,03 \frac{\text{cm}}{\text{kN}} + 0,003 \text{ cm/kN} \right) + 0,000747 \text{ cm/kN} =$$

$$c = 0,0165 \frac{\text{cm}}{\text{kN}}$$

Pomik na sredini konstrukcije pa izračunamo po enačbi 3.50:

$$\Delta = \left(\frac{n^2}{8}\right) \cdot c \cdot (V_{max} \cdot c_{rafter}) = \left(\frac{9^2}{8}\right) \cdot 0,0123 \frac{cm}{kN} \cdot \left(\frac{4,56 kN}{m} \cdot 5m\right) = 3,81 cm$$

#### 4.8 Dimenzioniranje diafragme po ECCS-u

Dimenzioniranje po priporočili ECCS-a je bolj preprosto in priporočeno za vsakdanjo rabo. Kot smo opisali v poglavju 3.2.1 moramo zagotoviti naslednje pogoje (oznake so prav tako opisane v poglavju 3.2.1, in 4.7.6):

a) nosilnost stranskega šiva (enačba 3.1)

$$V_{ult,1} = \frac{a}{b} \left( n_s \cdot F_s + \frac{\beta_1 \cdot F_p}{\beta_3} \right)$$

$$V_{ult,1} = \frac{20000 mm}{5000 mm} \left( 11 \cdot 1,7 kN + \frac{1 \cdot 3,26 kN}{1} \right) = 155,04 kN$$

$$n_s = \frac{\text{razadalja med šivnimi vijaki}}{300 cm} - 1 = \frac{500 cm}{300 cm} - 1 = 15$$

b) nosilnost stikovanja robnih pritrditev (štirje robovi trapezne pločevine so pritrjeni na nosilce, enačba 3.2)

$$V_{ult,2} = \frac{a}{b} (n_{sc} \cdot F_s)$$

$$V_{ult,2} = \frac{20000 mm}{5000 mm} (16 \cdot 1,7 kN) = 108,8 kN$$

Merodajna strižna nosilnost:

$$V_{Rd} = \min(V_{ult,1}, V_{ult,2}) = 108,8 kN$$

c) nosilnost stika pločevine in nosilca (enačba 3.4)

$$V_{Rd} = 108,8 \leq \frac{0,6 \cdot a \cdot F_p}{p} = \frac{0,6 \cdot 20000 mm \cdot 3,26 kN}{311 mm} = 125,8 kN$$

d) porušitev trapezne pločevine na robu diafragme (enačba 3.5)

$$V_{Rd} = 108,8 \leq 0,9 \cdot f_y \cdot a \sqrt{\frac{t^3}{d}} = 0,9 \cdot 0,35 \frac{kN}{mm^2} \cdot 20000 mm \cdot \sqrt{\frac{(0,8 mm)^3}{311 mm}} = 224,6 kN$$

e) strižni uklon trapezne pločevine

1. globalni uklon (enačbe 3.6 do 3.8)

$$V_{Rd} = 108,8 \leq V_{cr,g} = 28,8 \cdot \frac{a}{b^2} \cdot \sqrt[4]{D_x \cdot D_y^3}$$

$$V_{cr,g} = 28,8 \cdot \frac{20000 mm}{(5000 mm)^2} \cdot \sqrt[4]{5,03 kNmm \cdot (578130 kNmm)^3} =$$

$$V_{Rd} = 108,8 \leq V_{cr,g} = 723,5 kN$$

$$D_x = \frac{E \cdot t^3 \cdot d}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot u} = \frac{210 \frac{kN}{mm^2} \cdot (0,8 mm)^3 \cdot 311 mm}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 470 mm} = 5,03 kNmm$$

$$D_y = \frac{E \cdot I}{d} = \frac{210 \frac{kN}{mm^2} \cdot 856183 \text{ mm}^4}{311 \text{ mm}} = 578130 \text{ kNmm}$$

## 2. lokalni uklon (enačba 3.9)

i. neojačana pasnica (grebena) trapezne pločevine

$$V_{cr,l} = 4,83 \cdot t \cdot b \cdot E \cdot \left(\frac{t}{l}\right)^2 = 4,83 \cdot 0,8 \text{ mm} \cdot 5000 \text{ mm} \cdot 210 \frac{kN}{mm^2} \cdot \left(\frac{0,8 \text{ mm}}{110 \text{ mm}}\right)^2$$

$$V_{Rd} = 108,8 \leq V_{cr,l} = 165,7 \text{ kN}$$

## 1. interakcija med lokalnim in globalnim uklonom trapezne pločevine (enačba 3.13)

$$\frac{l}{t} > 2,9 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \rightarrow \text{interakcija se upošteva in sicer tako, da se zmanjša nosilnost}$$

globalnega uklona trapezne pločevine:

$$\frac{110 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 110 > 2,9 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 2,9 \cdot \sqrt{\frac{210000 \text{ MPa}}{350 \text{ MPa}}} = 71$$

$$V_{red} = \frac{V_{cr,g} \cdot V_{cr,l}}{V_{cr,g} + V_{cr,l}} = \frac{723,5 \text{ kN} \cdot 165,7 \text{ kN}}{723,5 \text{ kN} + 165,7 \text{ kN}} = 134 \text{ kN}$$

Projektni pogoj je torej:

$$V_{Rd} = 108,8 \leq V_{red} = 302 \text{ kN}$$

## f) nosilnost robnih nosilcev (za obtežbo $q$ glej poglavje 4.6.2, glej tudi enačbo 3.15):

$$N_{k,2} = \frac{V_{max} \cdot L_{roof}^2}{8 \cdot b_{diaph}} + n_{podp.nosilcev} \cdot q \cdot a = \frac{4,56 \frac{kN}{m} \cdot (45 \text{ m})^2}{8 \cdot 20 \text{ m}} + 10 \cdot 0,429 \frac{kN}{m} \cdot 20 \text{ m}$$

$$N_{k,2} = 143,5 \text{ kN}$$

Izberemo cev dimezij  $150 \times 6,3 \text{ mm}$  in material S 235, saj pri takih profilih ni nevarnosti bočne zvrnitve in zato lahko nosilnost izračunam z enačbo, ki jo podaja SIST EN 1993-1-1.

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{c_{rafter}}{i \cdot \lambda_1} = \frac{500 \text{ cm}}{5,84 \text{ cm} \cdot 93,9} = 0,91$$

$\chi(\lambda) \rightarrow 0,78$  (uklonska krivulja a)

$$N_{Ed} = 143,5 \text{ kN} \leq N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,78 \cdot 33,63 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1} = 616,4 \text{ kN}$$

Torej nosilnost diafragme znaša  $108,8 \text{ kN}$ . Obremenitev nanjo pa:

$$q_{Ed} = V_{max} \cdot c_{rafter} \leq V_{Rd}$$

$$q_{Ed} = L_{roof} \cdot \frac{V_{max}}{2} - V_{max} \cdot \frac{c_{rafter}}{2} = 45 \text{ m} \cdot \frac{4,56 \text{ kN}}{m} - \frac{4,56 \text{ kN}}{m} \cdot \frac{5 \text{ m}}{2} = 91,2 \text{ kN} \leq V_{Rd} = 108,8$$

#### 4.9 Potresna obremenitev

Določili bomo potresno obremenitev s pomočjo horizontalnih sil. Predpostavili bomo, da se nihajni čas konstrukcije nahaja na platoju spektra pospeškov. Za obtežbo potrebujemo maso konstrukcije.

$$m_1 = L_{roof} \cdot a \cdot G_{stalna} + G_{primarni \ nosilci} + G_{stebri} + G_{\check{c}etni \ okvir} + G_{robni \ nosilce}$$

$$m_1 = 45 \text{ m} \cdot 20 \text{ m} \cdot 16,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 10570 \text{ kg} + 4590 \text{ kg} + 2200 \text{ kg} + 2500 \text{ kg} = 34980 \text{ kg}$$

Upoštevamo še maso spojev, ki znašajo približno 2,5 odstotka celotne mase.

$$m = m_1 + m_1 \cdot 0,025 = 34980 \text{ kg} + 34980 \text{ kg} \cdot 0,025 = 35855 \text{ kg} = 35,9 \text{ t}$$

Nato določimo pospešek temeljnih tal. Predpostavimo, da konstrukcija stoji na produ, zato lahko vzamemo tip tal B. Objekt se nahaja v Ljubljani, kjer znaša projektni pospešek temeljnih tal  $a_g = 0,25 \text{ g}$ . Za faktor obnašanja  $q$  bomo predpostavili vrednost 1,5.

$$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} = 0,25 \cdot \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} \cdot 1,2 \cdot \frac{2,5}{1,5} = 4,91 \text{ m/s}^2$$

Potresna obtežba torej znaša:

$$F_b = S_d(T) \cdot m = 4,91 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 35,9 \text{ t} = 176 \text{ kN} < Q_s \cdot L_{roof} = 4,56 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 45 \text{ m} = 205 \text{ kN}$$

Obremenitev porazdelimo na dolžino objekta.

$$Q_{seis.} = \frac{F_b}{L_{roof}} = \frac{176 \text{ kN}}{45 \text{ m}} = 3,92 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ugotovimo, da je potresna obremenitev, manjša ob obremenitve vetra, kar pomeni, da potresna obtežba ni merodajna. To pa je posledica majhne mase same konstrukcije.

## 5 Zaključek

V magistrskem delu obravnavamo problematiko zagotavljanja stabilnosti v enoetažnih jeklenih okvirjih s pomočjo trapezne pločevine, saj ta omogoča, da je gradnja veliko bolj učinkovita. Z omenjenim sistemom se izognemo vsem horizontalnim zavetrovanjem, poleg tega pa trapezna pločevina predstavlja tudi kritino, zaradi česar privarčujemo pri količini vgrajenega materiala. Problem omenjenega sistema je, da ga standard *SIST EN 1993-1-3* le bežno omenja oziroma se predvsem sklicuje na publikacijo *ECCS*, v kateri je problematika bolj podrobno obravnavana.

V prvem delu smo naredili povzetek, na kakšne načine lahko tvorimo stabilnost v enoetažnih jeklenih okvirjih. Nato smo pokazali, kako lahko tvorimo stabilnost okvirjev s pomočjo trapezne pločevine. Obravnavali smo dva primera, in sicer prvi primer, kadar je trapezna pločevina pritrjena neposredno na primarne nosilce (primer D1) in kadar je pritrjena na sekundarne nosilce (primer D2). Ugotovili smo, da se diafragma s trapeznimi pločevinami obnaša podobno kot visoki upogibno obremenjeni prosto-ležeči nosilec. Moment v obliki tlačnih oziroma natezних osnih obremenitev prevzemata robna nosilca. Strig pa prevzame trapezna pločevina. Podobno kot pri visokem I ali H profilu, kjer večino momenta prevzemata pasnici, strig pa prevzame stojina. Pri tipu D2 je enako, le da se moment v obliki tlačnih in natezних sil prerazporedi preko sekundarnih nosilcev. Kadar je diafragma obremenjena prečno na konstrukcijo, se v trapezni pločevini pojavijo tlačne obremenitve, le-te pa vzdolž konstrukcije hitro upadejo.

Največjo pozornost pri diafragmi, ki jo tvori trapezna pločevina, moramo posvetiti detajlom. Leti so merodajni pri računu nosilnosti diafragme. Predvsem je pomembno ali je trapezna pločevina pritrjena v vsakem koritu ali v vsakem drugem. Slednja je namreč problematična pri kriteriju pomikov, saj so lahko preveliki. Drugi pomembni detajl je spoj med trapeznimi pločevinami. Stranski šiv je spoj med dvema trapeznima pločevinama in izkaže se, da je običajno ravno ta spoj merodajen pri nosilnosti diafragme. Tretji pomembni spoj pa je na robu diafragme, kjer je priporočeno, da trapezno pločevino ojačamo z dodatno pločevino, katere debelina mora biti večja, kot je debelina trapezne pločevine. Tako preprečimo distorzijo profila na robu diafragme in zagotovimo večjo togost same diafragme.

V nadaljevanju smo podali postopke za dimenzioniranje trapezne pločevine, ki se obnaša kot diafragma, kot vir pa smo uporabili publikacijo *ECCS* (D. Dubina, V. Ungureanu, R. Landolfo, 2012) in avtorja *T. Höglund*-a (Höglund, 2002). Slednji podaja veliko bolj detajlne in natančne izračune diafragme, medtem ko *ECCS* podaja bolj splošne in praksi bolj primerne izračune.



Srečali smo se z vprašanjem ali lahko trapezna pločevina predstavlja linijsko bočno podporo primarnim ali sekundarnim nosilcem. Pomagali smo si z znanstvenimi članki, publikacijo *ECCS* in standardom *SIST EN 1993-1-3*. Le-ta podaja, na kakšen način rešimo omenjeni problem, kadar imamo na sekundarnih nosilcih pritrjeno trapezno pločevino, vendar pa ne podaja primera, kadar želimo trapezno pločevino uporabiti kot linijsko bočno podporo primarnim nosilcem. S pomočjo avtorja *L. Sokol-a* (Sokol, 1995) smo pokazali rešitev omenjene problematike.

V zadnjem delu obravnavamo primer enoetažne jeklene hale, pri kateri diafragmo tvorijo trapezne pločevine. Halo smo dimenzionirali s pomočjo standarda *SIST EN 1993*, publikacije *ECCS* (D. Dubina, V. Ungureanu, R. Landolfo, 2012) in po priporočilih avtorja *T. Höglund* (Höglund, 2002). Ugotovili smo, da pri sistemih, pri katerih s trapezno pločevino zagotavljamo horizontalno togost konstrukcij, lahko veliko privarčujemo pri sami masi konstrukcije, kar je posebej pomembno pri seizmični analizi konstrukcije. Pri potresni obtežbi lahko obravnavano konstrukcijo kot sistem z eno prostostno stopnjo. Ker je pravilna tako po tlorisu kot po višini, jo lahko izračunamo s horizontalnimi silami. Pri podajanju potresne obtežbe lahko upoštevamo, da je nihajni čas konstrukcije na platoju spektra pospeškov. Za elastično obnašanje konstrukcije, pa lahko vzamemo faktor obnašanja 1,5 in ugotovimo, da je zaradi majhne mase konstrukcije potresna obtežba manjša kot je obtežba vetra. Ker smo uporabili faktor obnašanja 1,5, lahko dimenzioniramo na enak način kot pri obtežbi z vetrom. *ECCS* (*ECCS*, 1995) navaja, da se lahko pri dinamične obtežbi pojavilo večje deformacije v diafragmi, kar lahko pripišemo detajlom, saj se lahko pojavijo lokalne porušitve, na primer elongacijo lukenj in podobno.

Prišli smo do zaključka, v katerem ugotavljamo, da trapezno pločevino v enoetažnih objektih lahko uporabljamo kot diafragmo. Z omenjenim sistem smo dosegli razmeroma lahko konstrukcijo, saj je masa slednje znašala približno 35,9 ton, glede na tlorisne dimenzije to pomeni, da ima konstrukcija približno  $40 \text{ kg/m}^2$ . Ob upoštevanju, da je konstrukcija zaradi samega sistema že pokrita, je masa konstrukcije relativno majhna. V več-etažnih objektih trapezna pločevina težje tvori togo diafragmo. Sicer ima diafragma enako togost, vendar je obremenitev na konstrukcijo večja, čeprav publikacija *ECCS* (*ECCS*, 1995), na katero se sklicuje Evrokod, govori tudi o primeru večetažnih stavb. Sistem kjer trapezne pločevine uporabljajo kot horizontalno togost objektov je že vrsto let uveljavljen v Skandinaviji, ZDA in Kanadi v Sloveniji pa je takšen konstrukcijski sistem redek.

## VIRI

Beg, D., Pogačnik A. 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: str. 1-1 – 3-152

Davies, J.M., 2006. Developments in stressed skin design. Thin-Walled Structures 44. The University of Manchester, Science Direct: str. 1250-1260

De Matteis, G., Landolfo, R., Mazzolani, F.M. 1998. Diaphragm effect for industrial steel buildings under earthquake loading. Journal of Constructional Steel Research 46, No. 1-3. University of Naples, Journal of Constructional Steel Research: str. 1-11

Dowling, P.J., Harding, J.E., Bjorhovde, R. 1992. Constructional Steel Design. UK, Essex, The Steel Construction Institute: str. 247-275

Dubina, D., Ungureanu, V., Landolfo, R. 2012. Design of Cold-formed Steel Structures: Portugal, European Convention for Constructional Steelwork: str. 299-435

ECCS – European Recommendation for the Application of Metal Sheeting acting as a Diaphragm – Stressed Skin Design.1995. European convention for Constructional Steelwork: str. 1-263

Höglund, T. 2002. Stabilisation by stressed skin diaphragm action. Sweden, The Swedish Institute of Steel Construction: str. 1-115

Sokol, L. 1995. Lateral Stabilization by Steel Sheeting of Structural Members, Thin-Walled Structures 25, No. 3 .France, Elsevier Science: str. 207-217

### **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 1991-1-1: 2004/A101:2005 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije -1-1. del: Splošni vplivi – Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb – Nacionalni dodatek.

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

SIST EN 1991-1-3: 2004/oA101:2007 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije -1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega – Nacionalni dodatek.

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

SIST EN 1991-1-4: 2004/oA101: 2007 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije -1-4. del: Splošni vplivi – Vplivi vetra – Nacionalni dodatek.

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

SIST EN 1993-1-1:2005/A101:2006 – Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe – Nacionalni dodatek.

SIST EN 1993-1-3:2007 – Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-3. Del: Splošna pravila – Dodatna pravila za hladno oblikovane profile in pločevino.

SIST EN 1998-1:2005 – Evrokod 8 – Projektiranja potresnoodpornih konstrukcij – 1.del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe.

### **Spletni viri:**

Rogers, C. A., Tremblay, R., Impact of Diaphragm behavior on the Seismic Design of Low-Rise Steel Buildings.

[http://msc.aisc.org/globalassets/modernsteel/archives/2008/03/2008v03\\_roof\\_diaphragms\\_fuII.pdf](http://msc.aisc.org/globalassets/modernsteel/archives/2008/03/2008v03_roof_diaphragms_fuII.pdf) (Pridobljeno, 20.5.2014)

Slika pritrdilna sredstva.

<http://guoze196.company.frbiz.com/i92189468-self-tapping-screws-hex-head-tapping-screw-self-drilling-screw-flat-counter-sunk-philips-tapping-screw.html> (Pridobljeno, 8.7.2014)

Slika pritrdilna sredstva.

<http://i01.i.aliimg.com/img/pb/380/117/204/1206791725025jpg.jpg> (Pridobljeno, 8.7.2014)

Slika pritrdilna sredstva.

<http://images.gasgoo.com/MiMwMDRfMDA0Izg3ODM1MzEwMA--/auto-part-round-head-cruciform-slot-self-tapping-screw.jpg> (Pridobljeno, 8.7.2014)

## **PRILOGA: POZICIJSKI NAČRT TRAPEZNE PLOČEVINE**