

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:

Povše, M., 2016. Dimenzioniranje lesenega ostrešja gospodarskega poslopja. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D.): 73 str.

Datum arhiviranja: 20-09-2016

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:

Povše, M., 2016. Dimenzioniranje lesenega ostrešja gospodarskega poslopja. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 73 pp.

Archiving Date: 20-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

MATJAŽ POVŠE

**DIMENZIONIRANJE LESENEGA OSTREŠJA
GOSPODARSKEGA POSLOPJA**

Diplomska naloga št.: 584/SOG

DESIGN OF WOODEN ROOF OF FARM BUILDING

Graduation thesis No.: 584/SOG

Mentor:

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, 14. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani študent Matjaž Povše, vpisna številka 26106866, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Dimenzioniranje lesenega ostrešja gospodarskega poslopja

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta/-ke:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.011.1:6924(043.2)
Avtor: Matjaž Povše
Mentor: doc. dr. Drago Saje
Naslov: Dimenzioniranje lesenega ostrešja gospodarskega poslopja
Tip dokumenta: Diplomaska naloga
Obseg in oprema: 73 str., 14 preg., 51 sl., 6 pril.
Ključne besede: leseno ostrešje, jeklene palice, trdnost pravokotno na vlakna

Izvleček

V okviru diplomske naloge smo preverjali, ali obstoječe leseno ostrešje v kombinaciji z jeklenimi palicami ustreza vsem ustreznim kontrolam standarda Evrokod. Na začetku diplomske naloge so predstavljene lastnosti uporabljenih materialov in vplivi na obravnavano konstrukcijo, to so lastna teža, koristna obtežba, obtežba snega in vetra. Vsi statični izračuni so narejeni z računalniškim programom Sap2000. Izkazalo se je, da je potrebno obstoječe ostrešje ustrezno sanirati z namenom, da bo zagotovljena ustrezna varnost, ki jo pogojuje Evrokod standard.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.011.1:6924(043.2)
Author: Matjaž Povše
Supervisor: doc. dr. Drago Saje
Title: Design of wooden roof of farm building
Document type: Graduation Thesis
Scope and tools: 73 p., 14 tab., 51 fig., 6 ann.
Key words: wooden roofing, steel rods, strenght perpendicular to the grain

Abstract

This thesis covers the verification, whether the existing wooden roof in combination with steel rods complies with all relevant controls in standard Eurocode. It presents the characteristics of the materials used in the structure and determination of external loads on the roof structure such as dead, live, snow and wind load. All static calculations are made by a computer program Sap2000. It has been shown that it is necessary to repair the existing roof structure in order to ensure adequate safety, which is demanded by Eurocodes standards.

ZAHVALA

Za pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Dragu Sajetu.

Posebna zahvala pa gre na tem mestu mojemu bratu Mihi, za vse bolj ali manj potrpežljive ure, ki sva jih preživela skupaj v zaključku moje študijske poti.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	OPIS OBSTOJEČE KONSTRUKCIJE	2
2.1	ZASNOVA KONSTRUKCIJE	2
2.2	UPORABLJENI MATERIALI	3
2.3	POŠKODBE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTOV	6
3	VPLIVI NA KONSTRUKCIJO	9
3.1	LASTNA TEŽA	9
3.2	KORISTNA OBTEŽBA STREHE	10
3.3	OBTEŽBA SNEGA	10
3.4	OBTEŽBA VETRA	11
3.4.1	<i>Zunanje sile</i>	<i>11</i>
3.4.2	<i>Notranje sile</i>	<i>13</i>
3.4.3	<i>Sile trenja</i>	<i>13</i>
3.4.4	<i>Veter v smeri slemena</i>	<i>13</i>
3.4.5	<i>Veter pravokotno na smer slemena</i>	<i>16</i>
3.5	OBTEŽNE KOMBINACIJE	19
3.5.1	<i>Mejno stanje nosilnosti MSN</i>	<i>19</i>
3.5.2	<i>Mejno stanje uporabnosti MSU</i>	<i>20</i>
4	STATIČNI IZRAČUN KONSTRUKCIJE PO EVROKOD STANDARDIH	20
4.1	ŠPIROVEC	20
4.2	ROČICA	30
4.3	VZDOLŽNE LEGE	32
4.3.1	<i>Kapna lega</i>	<i>32</i>
4.3.2	<i>Vmesna lega</i>	<i>38</i>
4.3.3	<i>Slemenska lega</i>	<i>43</i>
4.4	PALIČJE	48
4.4.1	<i>Steber pod vmesno lego</i>	<i>50</i>
4.4.2	<i>Steber pod slemenom</i>	<i>53</i>
4.4.3	<i>Poveznik</i>	<i>55</i>
4.4.4	<i>Natezna palica</i>	<i>60</i>
4.4.5	<i>Škarnik</i>	<i>62</i>
4.5	ZAVAROVALNA KONSTRUKCIJA	64
5	MOŽNE REŠITVE OBSTOJEČE KONSTRUKCIJE	71
6	ZAKLJUČEK	72
	VIRI	73

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Modifikacijski faktor k_{mod} (SIST EN 1995-1-1:2005, Preglednica 3.1).....	4
Preglednica 2: Projektne nosilnosti lesa C24	5
Preglednica 3: Koeficient lezenja k_{def}	5
Preglednica 4: Nosilnost jeklenih elementov	6
Preglednica 5: Koeficienti zunanjega tlaka za navpične stene stavb (SIST EN 1991-1-4:2005).....	16
Preglednica 6: Koeficienti neto tlakov za dvokapno nadstrešnico (SIST EN 1991-1-4:2005, Preglednica 7.7).....	18
Preglednica 7: Koeficienti izpostavljenosti dvokapne nadstrešnice.....	18
Preglednica 8: Kombinacijski faktorji za spremenljive vplive.....	19
Preglednica 9: Razčlenjene kombinacije za MSN	20
Preglednica 10: Obtežba kapne lege	33
Preglednica 11: Obtežba vmesne lege.....	39
Preglednica 12: Obtežba slemenske lege	44
Preglednica 13: Izbočitvene sile stebrov pod vmesno lego.....	65
Preglednica 14: Izbočitvene sile stebrov pod slemensko lego	66

KAZALO SLIK

Slika 1: Južna fasada gospodarskega poslopja	2
Slika 2: Spoj stebra in vmesne lege	7
Slika 3: Prekoračitev kontaktnih napetosti 1	7
Slika 4: Prekoračitev kontaktnih napetosti 2	8
Slika 5: Deformiranje jeklenega kotnika	8
Slika 6: Zvrnitev jeklenega I profila.....	9
Slika 7: Obtežba snega na tleh (SIST EN 1991-1-3:2004/A101, Slika 1).....	10
Slika 8: Razpored obtežbe snega za dvokapnico	11
Slika 9: Tlaki na ploskve (SIST EN 1991-1-4:2005, Slika 5.1)	14
Slika 10: Referenčna višina in razpored tlakov (SIST EN 1991-1-4:2005, Slika 7.4)	16
Slika 11: Obtežni primeri dvokapne strehe (SIST EN 1991-1-4:2005, Slika 7.17)	17
Slika 12: Zračni tok ob nadstrešnici (SIST EN 1991-1-4:2005, Slika 7.15)	17
Slika 13: Ovojnica osnih sil N_{Ed} [kN].....	21
Slika 14: Ovojnica prečnih sil V_{Ed} [kN].....	22
Slika 15: Ovojnica upogibnih momentov M_{Ed} [kNm].....	22
Slika 16: Redukcija nosilnosti zarezanega nosilca ob podpori (SIST EN 1995-1-1:2005, Slika 6.11). 24	
Slika 17: Kontrola povesa	25
Slika 18: Deformacijska oblika špirovca.....	26
Slika 19: Reakcije pri kombinaciji 3.2 [kN].....	26
Slika 20: Porušni mehanizmi porušitve enostrižne zveze.....	29
Slika 21: Geometrija ročice	30
Slika 22: Ovojnica prečnih sil $V_{z,Ed}$ [kN].....	33
Slika 23: Ovojnica upogibnih momentov $M_{y,Ed}$ [kNm]	33
Slika 24: Ovojnica prečnih sil $V_{y,Ed}$ [kN].....	34
Slika 25: Ovojnica upogibnih momentov $M_{z,Ed}$ [kNm].....	34
Slika 26: Primerjava togosti veznih sredstev (Beg, 2009).....	37
Slika 27: Reakcije pri obtežni kombinaciji 3.2.....	37
Slika 28: Deformacijska oblika kapne lege	38
Slika 29: Rega med stebrom in vzdolžno lego	39
Slika 30: Osne sile N_{Ed} [kN], obtežna kombinacija 2.2.....	40
Slika 31: Prečne sile V_{Ed} [kN], obtežna kombinacija 2.2	40
Slika 32: Upogibni momenti M_{Ed} [kN], obtežna kombinacija 2.2.....	40
Slika 33: Deformacijska linija vmesne lege	43
Slika 34: Osne sile N_{Ed} [kN], obtežna kombinacija 1.1	44
Slika 35: Prečne sile V_{Ed} [kN], obtežna kombinacija 1.1	45
Slika 36: Upogibni momenti M_{Ed} [kNm], obtežna kombinacija 2.2	45
Slika 37: Deformacijska linija slemenske lege.....	48
Slika 38: Reakcije enotske enakomerne zvezne obtežbe kapne, vmesne in slemenske lege [kN]	49
Slika 39: Ovojnica osnih sil N_{Ed} [kN]	49
Slika 40: Ovojnica prečnih sil V_{Ed} [kN]	50
Slika 41: Ovojnica upogibnih momentov M_{Ed} [kNm].....	50
Slika 42: Določitev faktorja $k_{c,90}$ za ločeno podporo (SIST EN 1995-1-1:2005, Slika 6.3).....	52
Slika 43: Določitev faktorja $k_{c,90}$ za kontinuirno podporo (SIST EN 1995-1-1:2005, Slika 6.3)	55
Slika 44: Porušni model za dvostrizne zveze lesa (SIST EN 1995-1-1:2005, Slika 8.2)	63
Slika 45: Vplivne površine za vetrno obtežbo zavarovalne konstrukcije.....	64
Slika 46: Osne sile N_{Ed} [kN], veter iz vzhodne strani.....	66

Slika 47: Prečne sile V_{Ed} [kN], veter iz vzhodne strani.....	66
Slika 48: Upogibni momenti M_{Ed} [kNm], veter iz vzhodne strani	67
Slika 49: Osne sile N_{Ed} [kN], veter iz vzhodne strani	67
Slika 50: Prečne sile V_{Ed} [kN], veter iz vzhodne strani.....	67
Slika 51: Upogibni momenti M_{Ed} [kNm], veter iz vzhodne strani	68

1 UVOD

V diplomski nalogi je izdelan statični izračun obstoječega ostrešja gospodarskega poslopja na Dolenjskem. Glavni razlog, zakaj je bila izbrana obravnavana konstrukcija, je v tem, da je bila konstrukcija dimenzionirana s strani gradbenega tehnika, ki nikoli v življenju ni uporabljal standardov Evrokod. Obravnavano ostrešje pa je kljub temu »preživelo« obilno sneženje februarja leta 2013. V času tega sneženja se je ne daleč stran od tega poslopja podrla nadstrešnica družbe Adria Mobil, ki je že bila dimenzionirana po standardu Evrokod. Po tem dogodku so zaradi večjih deformacij strešnih konstrukcij očistili sneg s streh nekaterih nakupovalnih centrov in industrijskih hal na območju občine Novo Mesto ter tako preprečili njihove porušitve. Pri obravnavanem ostrešju je v tem času prišlo le do velikega povesa jeklenega I profila, ki se je po taljenju snega zopet vrnil v prvotno stanje, kar kaže na to, da obremenitev ni presegla meje elastičnosti.

Diplomska naloga vsebuje šest poglavij. V prvem poglavju je opisana geometrija obravnavane konstrukcije, izbrani so materialni parametri uporabljenih materialov in opisane so vse velike poškodbe na konstrukciji, ki so nastale do sedanjega časa. V naslednjem poglavju so definirani vsi vplivi, ki delujejo na konstrukcijo. Večji poudarek je na strani vetrne obtežbe zaradi velikih odprtih po obodu stavbe. Po določitvi jakosti in prostorske porazdelitve posameznih obtežb so bile iz velikega nabora obtežnih kombinacij izbrane le najbolj neugodne, to so tiste kombinacije obtežb, ki nam pogojujejo dimenzije posameznih konstrukcijskih elementov. Sledi četrto poglavje, ki je jedro te diplomske naloge. V tem poglavju so izvedene vse kritične kontrole nosilnosti elementov ostrešja, brez podporne konstrukcije (jeklen I profil in armirano betonski stebri). Ker so bile dimenzije konstrukcije že vnaprej znane, smo posamezne elemente modelirali na način, da bo sanacija konstrukcije kar se da enostavna in poceni. Ta način je najbolj izrazit pri podpiranju vmesne in slemenske lege z ročicami. Zaradi dejstva, da bo ostrešje sanirano le v primeru spremembe namembnosti stavbe, smo v predzadnjem poglavju podali le opisne rešitve nezadostnih elementov in neustreznih detajlov. V zaključku diplomske naloge so opisane težave pri projektiranju lesenih konstrukcij po Evrokod standardu.

2 OPIS OBSTOJEČE KONSTRUKCIJE

2.1 Zasnova konstrukcije

V diplomski nalogi je obravnavano gospodarsko poslopje, ki je locirano v Gorenjem Globodolu, občina Mirna Peč. Zgrajeno je bilo v letu 2005. Poslopje je arhitekturno zasnovano, kot dvokapna streha na armirano betonskih stebrih. Usmerjenost slemena je v smeri vzhod - zahod, zato je v času zime severna strešina vedno bolj obremenjena kot južna. Objekt je razdeljen na tri prostore. Prvi prostor, ki je v celoti zaprt z lesenimi stenami, je namenjen hlevu. Sledi srednji prostor, v katerem se shranjujejo kmetijski pridelki. Na vzhodni strani poslopja je lociran največji prostor objekta, ki je namenjen skladiščenju kmetijske mehanizacije in je v celoti odprt iz južne in severne strani. Podrobne arhitekturne podloge in detajli spojev so podani v prilogi.



Slika 1: Južna fasada gospodarskega poslopja

Streha

Streha je oblikovana kot dvokapnica z naklonoma strešin $\alpha = 37^\circ$, tlorisnih dimenzij 22,3 x 17,4 m. Strešine so pokrite z betonsko kritino Bramac. Ostrešje je sestavljeno iz petih prečnih paličji, ki podpirajo pet vzdolžnih gred. Posamezni špirovci, dimenzij 12 x 14 cm, nalegajo na kapno, vmesno in slemensko lego, z globino zaseka $t = 3$ cm. Vezno sredstvo špirovcev predstavljajo žebli debeline $d =$

7,6 mm in dolžine $l = 260$ mm. Vse vzdolžne lege ostrešja so dimenzij 18 x 22 cm. Spoj kapne lege in poveznika je zasnovan z globino zaseka kapne lege $t = 2$ cm in globino zaseka poveznika $t = 5$ cm. Zaradi ekscentrične obremenitve kapne lege je v opisanem spoju uporabljen vijak M14. Vmesne in slemenska lega so podprte s stebri, dimenzij 18 x 22 cm, in ročicami, dimenzij 12 x 14 cm. Prečno paličje sestavljajo poveznik, stebra pod vmesno lego, steber slemenske lege, jeklene natezne palice in dva škarnika. Zaradi velike širine objekta (širina je 17,4 m) je poveznik sestavljen iz dveh delov, ki sta na mestu stebra slemenske lege spojena s povezovalno gredjo in s šestimi vijaki M20. Spoj nateznic in poveznika omogoča jeklen kotnik z dolžino posameznega kraka $l = 5$ cm. Na mestu, kjer natezna palica nalega na vmesno lego, je uporabljena jeklena plošča dimenzij 18 x 10 x 0,5 cm. Natezne palice so narejene iz gladke armaturne M20 in imajo na vsakem koncu vrezan navoj. Škarnik je dimenzij 5 x 30 cm in je na vsakem koncu z vijakom M14 pritrjen na špirovec.

Stebri in stene

Leseno ostrešje je podprto z armirano betonskimi stebri, jeklenima profiloma I 400 in lesenimi hrastovimi stebri. Armirano betonski stebri so kvadratne oblike, dimenzije 45 x 45 cm in višine 3,25 m. Jeklena profila I 400 sta uporabljena za premostitev lesenega ostrešja na mestu prostora, ki je namenjen skladiščenju kmetijske mehanizacije. Hrastovi stebri imajo v konstrukciji funkcijo podpore lesenimi stenami, ki so narejene iz smrekovih plohov, debeline 4,5 cm, po principu utora in peresa.

Podložna plošča

Armirano betonska podložna plošča, debeline 12 cm, je izvedena po celotnem tlorisu objekta. Pod nadstreškom na severni strani je izveden višinski zamik plošče, velikosti 42 cm. Celotna plošča je enojno armirana z armaturnimi mrežami Q189. Zaradi velikega tlorisa plošče, so bile na mejah posameznih prostorov izvedene dilatacije.

Temelji

Vsak izmed osmih armirano betonskih stebrov je temeljen s kvadratnim točkovnim temeljem, širine 2 m in višine 0,6 m. Globina temeljenja znaša 1,15 m.

2.2 Uporabljeni materiali

Les

Ves uporabljen les v konstrukciji ostrešja je smrekov les, ki je bil pred izdelavo izžagan iz hlodovine in zračno posušen. Pred montažo je bil v celoti štiristransko skoblan. Ocenjen tlačni razred lesa je C24, kar pomeni, da gre za les iglavcev in topolovine s karakteristično upogibno trdnostjo $f_{m,k} = 2,4$ kN/cm². Specifična gostota lesa znaša $\rho_k = 350$ kg/m³. Deformabilnost je upoštevana z modulom elastičnosti $E_{0,mean} = 1100$ kN/cm² in strižnim modulom $G_{mean} = 69$ kN/cm².

V lesenih konstrukcijah je nosilnost odvisna od razreda uporabnosti in od trajanja obtežbe. Ta odvisnost je zajeta z modifikacijskim faktorjem k_{mod} (Preglednica 1). V izračunih je privzet razred uporabe 2, za katerega velja, da povprečna vsebovanost vlage v lesu ne preseže 20 %. Merodajne obtežne kombinacije so v razredu srednje dolge in kratkotrajne obtežbe.

Preglednica 1: Modifikacijski faktor k_{mod} (SIST EN 1995-1-1:2005, Preglednica 3.1)

Razred trajanja obtežbe	Razred uporabe		
	1	2	3
Trajna	0,60	0,60	0,50
Dolgotrajna	0,70	0,70	0,55
Srednja dolga	0,80	0,80	0,65
Kratkotrajna	0,90	0,90	0,70
Trenutna	1,10	1,10	0,90

Projektne vrednosti nosilnosti lesenih elementov se izračunajo iz karakterističnih po naslednji enačbi:

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M}$$

kjer so:

f_d projektna vrednost nosilnosti

f_k karakteristična vrednost nosilnosti

k_{mod} modifikacijski faktor

γ_M varnostni faktor, ki ima vrednost 1,3

Preglednica 2: Projektne nosilnosti lesa C24

Trdnost [kN/cm ²]			C24
Upogib	$f_{m,k}$		2,400
	$f_{m,d}$	M	1,477
		S	1,662
Nateg (vzporedno z vlakni)	$f_{t,0,k}$		1,400
	$f_{t,0,d}$	M	0,862
		S	0,969
Nateg (pravokotno na vlakna)	$f_{t,90,k}$		0,050
	$f_{t,90,d}$	M	0,031
		S	0,035
Tlak (vzporedno z vlakni)	$f_{c,0,k}$		2,100
	$f_{c,0,d}$	M	1,292
		S	1,454
Tlak (pravokotno na vlakna)	$f_{c,90,k}$		0,250
	$f_{c,90,d}$	M	0,154
		S	0,173
Strig	$f_{v,k}$		0,250
	$f_{v,d}$	M	0,154
		S	0,173

Vpliv reologije na končne pomike je zajet s končnim koeficientom lezenja k_{def} . Vrednost uporabljenega koeficienta lezenja je prikazana v preglednici 3.

Preglednica 3: Koeficient lezenja k_{def}

Material	Razred uporabe		
	1	2	3
Masivni les	0,6	0,8	2,0
Lepljen lameliran les	0,6	0,8	2,0

Jeklo

Karakteristične vrednosti natezne nosilnosti jekla so podane v preglednici 4. Elastični modul jekla znaša $E_{cm} = 21000 \text{ kN/cm}^2$, specifična teža pa znaša $\gamma_s = 78 \text{ kN/m}^3$.

Preglednica 4: Nosilnost jeklenih elementov

	Karakteristična meja elastičnosti	Karakteristična natezna trdnost
	f_y [kN/cm ²]	f_u [kN/cm ²]
Konstruktivno jeklo	23,5	36
S235		
Gladka armatura	24	36
GA 240/360		
Rebrasta armatura	50	/
S500		

Beton

Pri izdelavi vseh betonskih elementov je bil uporabljen beton C25/30, kar pomeni, da je njegova karakteristična tlačna trdnost $2,4 \text{ kN/cm}^2$. V linearni elastični analizi je deformabilnost podana z elastičnim modulom $E_{cm} = 3100 \text{ kN/cm}^2$ in Poissonovim količnikom $\nu = 0,2$. Lastno težo izračunamo s pomočjo specifične teže armiranega betona, ki znaša $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$.

2.3 Poškodbe konstrukcijskih elementov

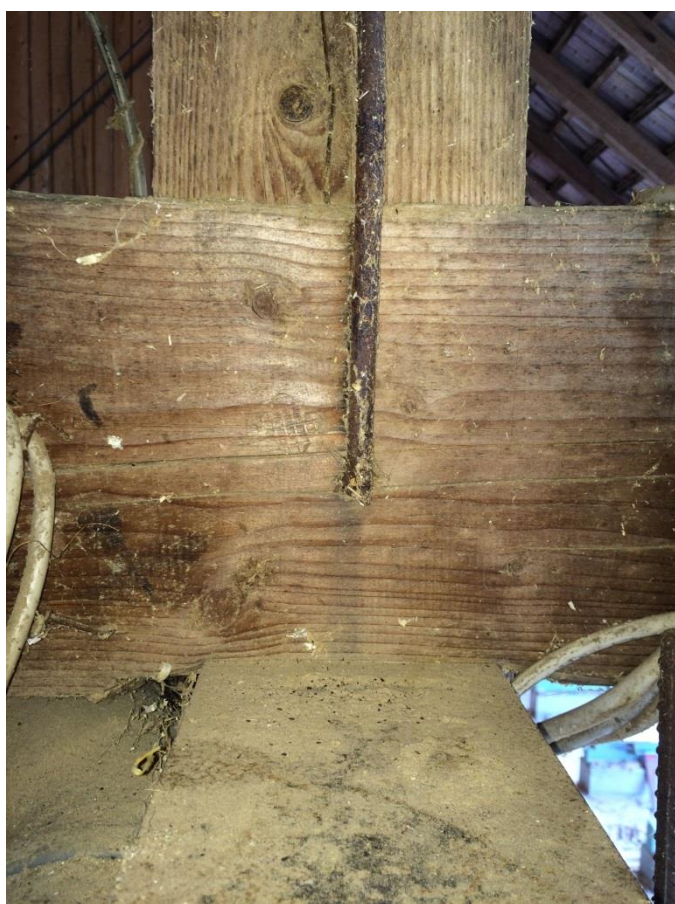
Zaradi neustreznega dimenzioniranja, so se na konstrukciji pojavile poškodbe, ki jih bo potrebno v prihodnje ustrezno sanirati.

Prekoračitev kontaktnih napetosti

Zaradi prekoračitve kontaktnih napetosti pravokotno na vlakna je prišlo do večjih tlačnih deformacij poveznika na mestih, kjer nanj nalega steber vmesne lege. Deformacije so še posebej velike na mestih, kjer je poveznik podprt z jeklenim profilom I 400 (Slika 3 in Slika 4). Poleg velikih tlačnih deformacij pa opazimo tudi razširitev prereza v prečni smeri, kar že kaže na začetek cepitve lesenih vlaken. Iz slike 2 je razvidno, da je deformiranje vmesne lege manjše od deformiranja poveznika, kar kaže na ugoden vpliv ročic.



Slika 2: Spoj stebra in vmesne lege



Slika 3: Prekoračitev kontaktnih napetosti 1



Slika 4: Prekoračitev kontaktnih napetosti 2

Nezadostna togost jeklenega kotnika

Zaradi nezadostne togosti jeklenega kotnika je prišlo do dveh težav, in sicer (Slika 5):

- koncentracija kontaktnih napetosti v lesu ob vsaki strani poveznika
- zasuk kotnika



Slika 5: Deformiranje jeklenega kotnika

Zvrnitev jeklenega profila I 400

V notranjosti objekta je jeklen profil I 400 le postavljen na armirano betonski steber, zaradi česar se je nagnil proti severni strani. To je razumljivo, saj je obtežba snega na severni strešini skozi celotno zimo večja ali enaka obtežbi južne strešine (Slika 6).



Slika 6: Zvrnitev jeklenega I profila

3 VPLIVI NA KONSTRUKCIJO

3.1 Lastna teža

Lastna teža predstavlja stalni vpliv, ki izhaja iz teže uporabljenih materialov. V nadaljevanju bo izračunana lastna teža obstoječe konstrukcije, ki se bo po potrebi izboljšave konstrukcijskih elementov ustrezno povečala.

Stalna obtežba na m² strešine:

betonski strešniki Bramac s porabo 10,4 strešnika na m ²	$4,3 \cdot 10,4 =$	0,439 kN/m ²
prečne letve 4/5 cm, e = 0,32 m	$0,04 \cdot 0,05 \cdot (1/0,32) \cdot 4,2 =$	0,026 kN/m ²
špirovec 12/14 cm, e = 1,0 m	$0,12 \cdot 0,14 \cdot (1/1) \cdot 4,2 =$	0,071 kN/m ²
	Σ	0,536 kN/m ²

Obtežba vzdolžnih leg in prečnega paličja:

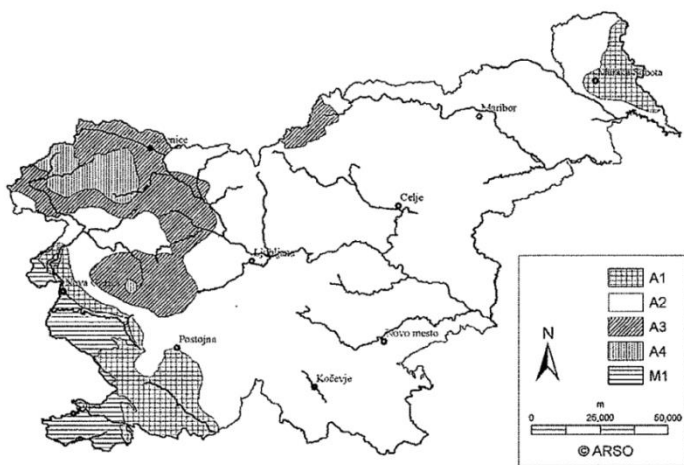
kapna lega 18/22 cm	$0,18 \cdot 0,22 \cdot 4,2 =$	0,166 kN/m
vmesna lega 18/22 cm	$0,18 \cdot 0,22 \cdot 4,2 =$	0,166 kN/m
slemenska lega 18/22 cm	$0,18 \cdot 0,22 \cdot 4,2 =$	0,166 kN/m
škarje	$0,05 \cdot 0,3 \cdot 4,2 =$	0,063 kN/m
ročica	$0,12 \cdot 0,14 \cdot 4,2 =$	0,071 kN/m

3.2 Koristna obtežba strehe

V nacionalnem dodatku SIST EN 1991-1-1:204/A101 je določeno, da za koristno obtežbo strehe, dostopne le za vzdrževanje (kategorija H), izberemo obtežbo $q_k = 0,4 \text{ kN/m}^2$.

3.3 Obtežba snega

Obtežba snega je definirana v standardu SIST EN 1991-1-3:2004/A101. Obravnavano gospodarsko poslopje se nahaja na Dolenjskem v coni A2 (Slika 7) na nadmorski višini $A = 220 \text{ m}$.



Slika 7: Obtežba snega na tleh (SIST EN 1991-1-3:2004/A101, Slika 1)

Karakteristična obtežba snega na tleh se tako izračuna po enačbi:

$$s_k = 1,293 \left[1 + \left(\frac{A}{728} \right)^2 \right] = 1,411 \text{ kN/m}^2 \quad (3.1)$$

Iz te obtežbe lahko izračunamo obtežbo snega na strehi kot:

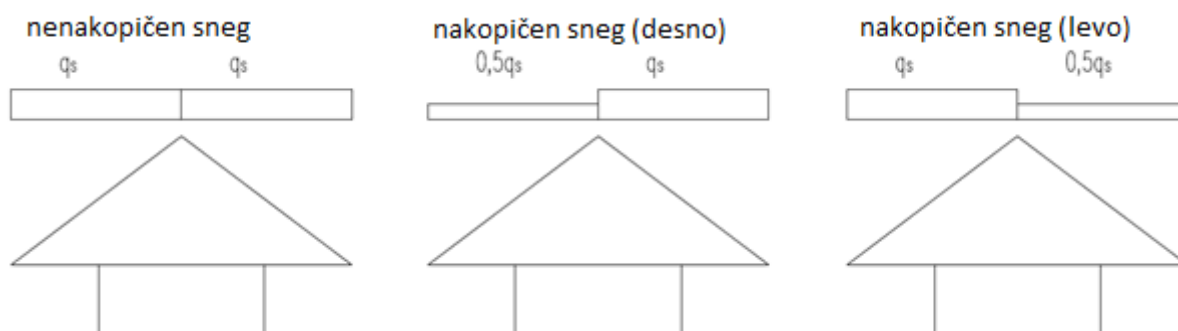
$$q_s = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,411 = 1,129 \text{ kN/m}^2 \quad (3.2)$$

kjer so:

- μ_1 oblikovni koeficient (v našem primeru je vrednost 0,8, saj sneg ne zdrsne s strehe)
- C_e koeficient izpostavljenosti vetru (v našem primeru je vrednost koeficienta 1,0)
- C_t toplotni koeficient (v našem primeru je vrednost koeficienta 1,0)

Sama razporeditev obtežbe je odvisna od oblike strehe. V našem primeru obravnavamo dvokapnico z enakima naklonoma, zato razpored obtežbe snega razdelimo na (Slika 8):

- nenakopičen sneg
- nakopičen sneg



Slika 8: Razpored obtežbe snega za dvokapnico

3.4 Obtežba vetra

Obtežbo vetra določimo s pomočjo standarda SIST EN 1991-1-4:2005 in njenega nacionalnega dodatka. V splošnem jo lahko razdelimo na zunanje, notranje in sile trenja.

3.4.1 Zunanje sile

Zunanje sile izhajajo iz tlakov na zunanje ploskve ovoja stavbe in jih izračunamo kot:

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot \sum w_e \cdot A_{ref} \quad (3.3)$$

kjer so:

$c_s c_d$ konstrukcijski faktor (v našem primeru 1,0 saj je stavba nižja od 15 m)

w_e tlak vetra na zunanje površine

A_{ref} referenčna površina posamezne ploskve

Določitev tlaka vetra na zunanje površine:

$$w_e = c_{pe} \cdot q_p \quad (3.4)$$

kjer je:

c_{pe} koeficient zunanje tlaka

q_p največji tlak pri sunkih vetra odvisen od referenčne višine z_e

Tlak pri največji hitrosti ob sunkih se določi z:

$$q_p = c_e \cdot q_b = 1,709 \cdot 0,25 = 0,427 \text{ kN/m}^2 \quad (3.5)$$

kjer je:

c_e faktor izpostavljenosti
 q_b osnovni tlak vetra

Osnovni tlak vetra izračunamo iz enačbe:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 20^2 = 0,25 \text{ kN/m}^2 \quad (3.6)$$

kjer sta:

ρ gostota zraka $1,25 \text{ kg/m}^3$
 v_b osnovna hitrost vetra

Osnovna hitrost vetra se določi iz lokacije objekta:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 20 = 20 \text{ m/s} \quad (3.7)$$

kjer so:

c_{dir} smerni faktor (privzamemo vrednost 1,0)
 c_{season} faktor letnega časa (privzamemo vrednost 1,0)
 $v_{b,0}$ temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra (*Cona 1*, $A < 800 \text{ m}$, $v_{b,0} = 20 \text{ m/s}$)

Faktor izpostavljenosti se lahko zapiše tudi kot:

$$c_e = \left[1 + 7 \frac{k_I \cdot k_r}{c_0 \cdot c_r} \right] c_0^2 \cdot c_r^2 = \left[1 + 7 \frac{1 \cdot 0,215}{1 \cdot 0,755} \right] 1^2 \cdot 0,755^2 = 1,709 \quad (3.8)$$

kjer so:

k_I faktor turbulence (privzamemo vrednost 1,0)
 k_r faktor terena
 c_0 faktor oblike terena (privzamemo vrednost 1,0)
 c_r faktor hrapavosti

Faktor terena določimo iz kategorije terena III, ki predstavlja vasi, podeželsko okolje in stalni gozd.

$$k_r = 0,19 \left[\frac{z_0}{z_{0,II}} \right]^{0,07} = 0,19 \left[\frac{0,3}{0,05} \right]^{0,07} = 0,215 \quad (3.9)$$

Faktor hrapavosti določimo z:

$$c_r = k_r \cdot \ln \left[\frac{z}{z_0} \right] = 0,215 \cdot \ln \left[\frac{10}{0,3} \right] = 0,755 \quad (3.10)$$

kjer je:

z višina objekta

3.4.2 Notranje sile

Notranje sile izhajajo iz tlakov na notranje ploskve ovoja stavbe in jih izračunamo kot:

$$F_{w,e} = \sum w_i \cdot A_{ref} \quad (3.11)$$

kjer sta:

w_i tlak vetra na notranje površine

A_{ref} referenčna površina posamezne ploskve

Določitev tlaka vetra na notranje površine:

$$w_i = c_{pi} \cdot q_p \quad (3.12)$$

kjer je:

c_{pi} koeficient notranjega tlaka

q_p največji tlak pri sunkih vetra odvisen od referenčne višine z_i

3.4.3 Sile trenja

Sile trenja nastanejo na površinah, ki ležijo vzporedno s smerjo vetra. Določimo jih z:

$$F_{tr} = c_{tr} \cdot q_p \cdot A_{tr} \quad (3.11)$$

kjer sta:

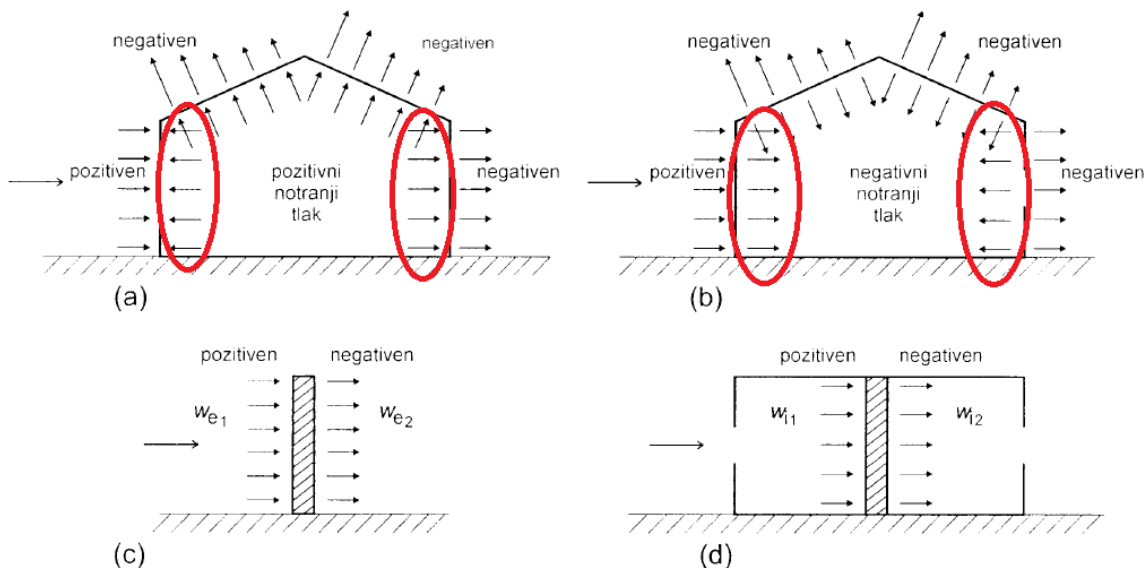
c_{tr} koeficient trenja

A_{tr} površina zunanje ploskve, vzporedne vetru

3.4.4 Veter v smeri slemena

Veter v smeri slemena dvokapnice povzroča obremenitve, ki jih mora prenesti zavarovalna konstrukcija. V našem primeru bomo obravnavali privetno in zavetno stran kot navpično steno višine 10 m. Upoštevali bomo le zunanje pritiske vetra.

Razlog, zakaj bomo izločili notranje pritiske, je v tem, da naša zavarovalna konstrukcija zagotavlja ravnotežje tako privetni kot zavetrni strani in je tako vektorski seštevek notranjih pritiskov enak nič, saj se notranji pritiski po celotni notranjosti stavbe upoštevajo z enakim predznakom (Slika 9).



Slika 9: Tlaci na ploskve (SIST EN 1991-1-4:2005, Slika 5.1)

V standardu SIST EN 1991-1-4:2005 je zapisano, da lahko učinek trenja vetra na ploskev zanemarimo, če je celotna površina vzporednih ploskev s smerjo vetra enaka ali manjša od štirikratne površine vsote privetnih in zavetrnih ploskev.

Velikost ploskev vzporedno s smerjo vetra:

$$S_{vzporedno} = 2 (10,9 \cdot 23,2) + 3,3 \cdot 5 + 3,3 \cdot 10 = 555,3 \text{ m}^2$$

Velikost ploskev pravokotno na smer vetra:

$$S_{pravokotno} = 2 \left(\frac{6,6 \cdot 17,4}{2} + 3,3 \cdot 8,5 \right) = 170,9 \text{ m}^2$$

$$S_{vzporedno} \leq 4 \cdot S_{pravokotno} \tag{3.12}$$

$$555,3 \text{ m}^2 \leq 4 \cdot 170,9 = 683,6 \text{ m}^2 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen, zato sile trenja zanemarimo}$$

Določitev največjega tlaka pri sunkih vetra q_p

Z enačbe 3.7 izračunamo osnovno hitrost vetra:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 20 = 20 \text{ m/s}$$

Z enačbe 3.6 izračunamo osnovni tlak vetra:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 20^2 = 0,25 \text{ kN/m}^2$$

Z enačbe 3.9 izračunamo faktor terena:

$$k_r = 0,19 \left[\frac{z_0}{z_{0,II}} \right]^{0,07} = 0,19 \left[\frac{0,3}{0,05} \right]^{0,07} = 0,215$$

Z enačbo 3.10 izračunamo faktor hrapavosti:

$$c_r = k_r \cdot \ln \left[\frac{z}{z_0} \right] = 0,215 \cdot \ln \left[\frac{10}{0,3} \right] = 0,755$$

Z enačbo 3.8 izračunamo faktor izpostavljenosti:

$$c_e = \left[1 + 7 \frac{k_I \cdot k_r}{c_0 \cdot c_r} \right] c_0^2 \cdot c_r^2 = \left[1 + 7 \frac{1 \cdot 0,215}{1 \cdot 0,755} \right] 1^2 \cdot 0,755^2 = 1,709$$

Na koncu izračunamo q_p z enačbo 3.5:

$$q_p = c_e \cdot q_b = 1,709 \cdot 0,25 = 0,427 \text{ kN/m}^2$$

Določitev faktorja izpostavljenosti zunanjega pritiska c_e

Faktor izpostavljenosti določimo glede na razmerje med višino in globino stavbe, ki je definirana kot dolžina stavbe v smeri vetra (v tem primeru v smeri slemena).

$$\frac{h}{d} = \frac{10}{21,5} = 0,465$$

Nato interpoliramo vrednosti iz *Preglednice 5* in dobimo koeficient izpostavljenosti na privetni strani, označeni z D, in na zavetni strani, označeni z E. Ker so površine D in E večje kot 10 m^2 , moramo upoštevati vrednosti $c_{pe,10}$.

Preglednica 5: Koefficienti zunanje tlaka za navpične stene stavb (SIST EN 1991-1-4:2005)

Področje h/d	D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	+0,8	+1,0	-0,7	
1	+0,8	+1,0	-0,5	
<0,25	+0,7	+1,0	-0,3	

Končni vrednosti faktorjev izpostavljenosti sta tako:

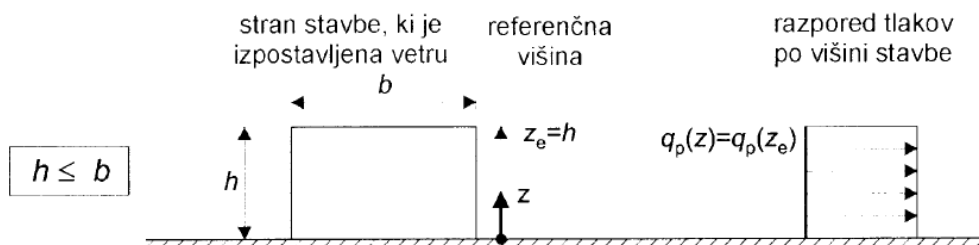
$$c_{pe,D} = 0,729$$

$$c_{pe,E} = -0,375$$

Pozitivna vrednost faktorja izpostavljenosti pomeni, da veter pritiska na ploskev, negativna vrednost pa pomeni srk.

Razpored zunanjih tlakov

Razpored zunanjih tlakov je po višini privetrne in zavetrne strani enakomeren (Slika 10), saj je višina objekta (10 m) manjša od širine (pri tej smeri vetra 17,4 m).

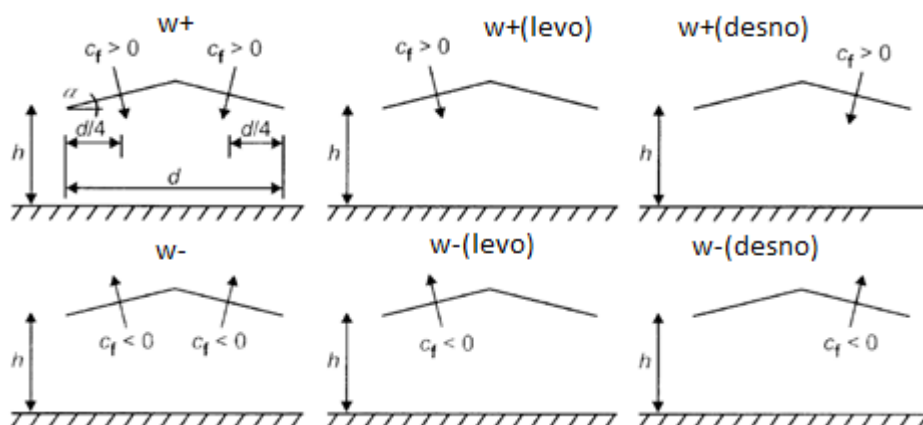


Slika 10: Referenčna višina in razpored tlakov (SIST EN 1991-1-4:2005, Slika 7.4)

3.4.5 Veter pravokotno na smer slemena

Pri vetru pravokotno na smer slemena upoštevamo pravila za nadstrešnice, ki se uporabijo, če je na najmanj dveh straneh stavbe vsota odprtin na posamezni strani večja od 30 % površine te strani (SIST EN 1991-1-4:2005, člen 7.2.9(2)). V našem primeru je ta pogoj izpolnjen, saj je delež odprtin na južni strani poslopja 75 %, na severnem delu pa 50 %.

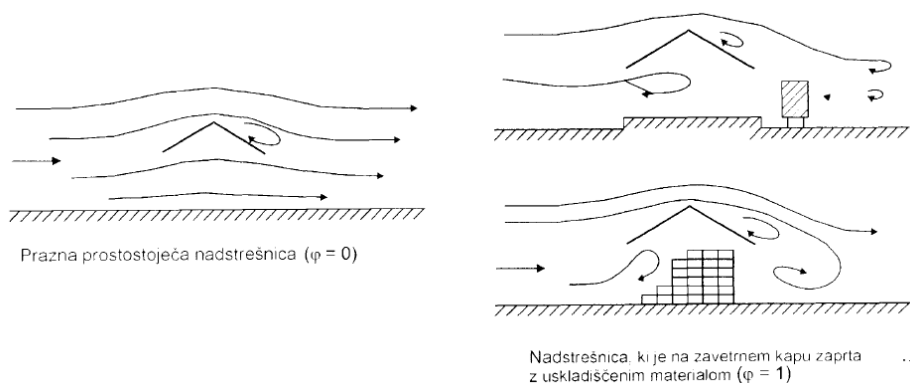
Vetrna obtežba pri nadstrešnicah je definirana z neto pritiskom na strešino, ki je vektorski seštevek med zunanjim in notranjim pritiskom, opisanim v poglavju 3.4.1 in poglavju 3.4.2. Pri projektiranju moramo upoštevati šest obtežnih primerov, in sicer tako da obtežimo z maksimalnim in minimalnim neto pritiskom celotno streho in pa posamezni strešini, pri čemer je druga neobremenjena (Slika 11).



Slika 11: Obtežni primeri dvokapne strehe (SIST EN 1991-1-4:2005, Slika 7.17)

Dodaten faktor, ki vpliva na velikost neto pritiskov, je pri nadstrešnicah stopnja zapolnjenosti ϕ . Njena vrednost je med 0 in 1, pri čemer vrednost 0 pomeni, da je nadstrešnica prazna, vrednost 1 pa je uporabljena pri polni zapolnitvi ali oviri na zavetrni strani stavbe (Slika 12). V našem primeru bomo izbrali stopnjo značilnosti $\phi = 0,5$ iz dveh razlogov:

- ob neposredni bližini na južnem delu poslopja je stalna ovira, ki jo predstavlja gospodarski objekt (vrednost $\phi = 1$),
- polovica poslopja je skoraj vedno popolnoma prazna (vrednost $\phi = 0$).



Slika 12: Zračni tok ob nadstrešnici (SIST EN 1991-1-4:2005, Slika 7.15)

Določitev največjega tlaka pri sunkih vetra q_p

Pri računu največjega tlaka pri sunkih vetra moramo za referenčno višino vzeti višino h , kotirano na Sliki 11. Ker pa je ta višina manjša od minimalne višine $z_{\min} = 5$ m (kategorija terena III), moramo privzeti to vrednost.

Z enačbo 3.10 izračunamo faktor hrapavosti:

$$c_r = k_r \cdot \ln \left[\frac{z}{z_0} \right] = 0,215 \cdot \ln \left[\frac{5}{0,3} \right] = 0,606$$

Z enačbo 3.8 izračunamo faktor izpostavljenosti:

$$c_e = \left[1 + 7 \frac{k_I \cdot k_r}{c_0 \cdot c_r} \right] c_0^2 \cdot c_r^2 = \left[1 + 7 \frac{1 \cdot 0,215}{1 \cdot 0,606} \right] 1^2 \cdot 0,606^2 = 1,281$$

Na koncu izračunamo q_p z enačbo 3.5:

$$q_p = c_e \cdot q_b = 1,281 \cdot 0,25 = \mathbf{0,320 \text{ kN/m}^2}$$

Določitev faktorja izpostavljenosti neto pritiska $c_{p,net}$

Vrednosti za posamezna področja A, B, C in D interpoliramo za stopnjo zaplnjenosti $\varphi = 0,5$ in nagib strešine $\alpha = 37^\circ$ (Preglednica 7).

Preglednica 6: Koeficienti neto tlakov za dvokapno nadstrešnico (SIST EN 1991-1-4:2005, Preglednica 7.7)

			Koeficienti neto tlakov $c_{p,net}$			
			Razdelitev na področja			
Nagib α [°]	Zapolnitev φ	Celotni koeficient sile c_i	Področje A	Področje B	Področje C	Področje D
+30	Maksimum all φ	+0,9	+1,3	+1,9	+1,6	+0,7
	Minimum $\varphi = 0$	-1,0	-1,4	-1,9	-1,4	-2,0
	Minimum $\varphi = 1$	-1,3	-1,4	-1,8	-1,4	-2,0
OPOMBA: + vrednosti pomenijo neto navzdol delujoč vpliv vetra - vrednosti pomenijo neto navzgor delujoč vpliv vetra						

Preglednica 7: Koeficienti izpostavljenosti dvokapne nadstrešnice

Nagib α [°]	Zapolnitev $\varphi = 0,5$	Področje A	Področje B	Področje C	Področje D
+37	Max	+1,3	+1,9	+1,6	+0,7
	Min	-1,4	-1,85	-1,4	-2,0

3.5 Obtežne kombinacije

3.5.1 Mejno stanje nosilnosti MSN

V mejnem stanju nosilnosti bomo uporabili osnovno kombinacijo vplivov za trajne in prehodne situacije, pri kateri upoštevamo, da je eden izmed spremenljivih vplivov prevladujoč (SIST EN 1991-1-1:2004).

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.13)$$

kjer so:

- γ_G parcialni varnostni faktor za stalni vpliv, ki ima vrednost 1 pri ugodnem vplivu in 1,35 pri neugodnem vplivu
- G_k karakteristična vrednost stalnega vpliva
- γ_Q parcialni varnostni faktor za spremenljiv vpliv, ki ima vrednost 0 pri ugodnem vplivu in 1,5 pri neugodnem vplivu
- Q_k karakteristična vrednost spremenljivega vpliva
- ψ_0 faktor za kombinacijsko vrednost spremenljivega vpliva

Kombinacije sestavimo s pomočjo kombinacijskih faktorjev, ki so podani v preglednici 8. Za izračun obremenitev v MSN upoštevamo štiri možnosti in sicer:

- KOMB 1: $1,35 G + 1,5Q_s \rightarrow k_{mod} = 0,8$
- KOMB 2: $1,35 G + 1,5Q_s + 0,9Q_{w+} \rightarrow k_{mod} = 0,9$
- KOMB 3: $1,0 G + 1,5Q_{w-} \rightarrow k_{mod} = 0,9$
- KOMB 4: $1,35 G + 1,5Q_{w+} + 0,75Q_s \rightarrow k_{mod} = 0,9$

Prvi dve kombinaciji predstavljata maksimalno obtežbo v smeri gravitacije. Na prvi pogled bi lahko ugotovili, da je potrebno upoštevati le kombinacijo 2, saj je v tem primeru dodana še kombinacijska vrednost obtežbe vetra, vendar pa je v kombinaciji 1 modifikacijski faktor k_{mod} manjši za 10 % od tistega iz kombinacije 2. Z drugimi besedami to pomeni, da je v kombinaciji 1 nosilnost lesnih elementov manjša za 10 % od nosilnosti elementov v kombinaciji 2. Tretja kombinacija je bila določena za maksimalno obtežbo v nasprotni smeri gravitacije, kar nam pomaga pri izračunu sidrnih sil na konstrukciji. Zadnja kombinacija povzroča največje obremenitve zavarovalne konstrukcije.

Ker je obtežba vetra in snega modelirana na več različnih načinov, je potrebno kombinacije v tem poglavju še nadalje razčleniti. Vseh 10 kombinacij je predstavljenih v preglednici 9. Grafično si jih lahko predstavljamo s pomočjo slike 8 in slike 11.

Preglednica 8: Kombinacijski faktorji za spremenljive vplive

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
sneg (s)	0,5	0,2	0
veter (w)	0,6	0,2	0
kategorija H	0	0	0

Preglednica 9: Razčlenjene kombinacije za MSN

	Lastna teža	Obtežba snega	Obtežba vetra
KOMB 1.1	1,35 G	1,5 nenakopičen sneg	/
KOMB 1.2	1,35 G	1,5 nakopičen sneg (levo)	/
KOMB 1.3	1,35 G	1,5 nakopičen sneg (desno)	/
KOMB 2.1	1,35 G	1,5 nenakopičen sneg	0,9 w+
KOMB 2.2	1,35 G	1,5 nakopičen sneg (levo)	0,9 w+(levo)
KOMB 2.3	1,35 G	1,5 nakopičen sneg (desno)	0,9 w+(desno)
KOMB 3.1	1,0 G	/	1,5 w-
KOMB 3.2	1,0 G	/	1,5 w-(levo)
KOMB 3.3	1,0 G	/	1,5 w-(desno)
KOMB 4	1,35 G	0,75 nenakopičen sneg	1,5 w+

3.5.2 Mejno stanje uporabnosti MSU

V mejnem stanju uporabnosti se kontrolirajo upogibi lesenih nosilcev v dveh korakih:

- preverjanje začetnih upogibov (posledica elastičnega deformiranja nosilcev) pri karakteristični kombinaciji vplivov:

$$w_{inst} (\sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" Q_{k,1} "+" \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}) \quad (3.14)$$

- preverjanje končnih upogibov (posledica lezenja):

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} \quad (3.15)$$

$$w_{creep} = w_{inst,G} \cdot (k_{def}) + w_{inst,Q_1} \cdot (\psi_{2,1} \cdot k_{def}) + w_{inst,Q_i} \cdot (\psi_{2,i} \cdot k_{def}) \quad (3.16)$$

Iz enačbe 3.16 je razvidno, da lezenje upoštevamo nad navidezno stalno kombinacijo vplivov. V našem primeru izberemo razred uporabnosti 2, v katerem ima koeficient lezenja k_{def} vrednost 0,8.

4 STATIČNI IZRAČUN KONSTRUKCIJE PO EVROKOD STANDARDIH

Vse izvedene kontrole v tem poglavju so povzete po standardu SIST EN 1995-1-1:2005 in njegovim nacionalnim dodatkom.

4.1 Špirovec

Računski model

V računskem modelu obravnavamo špirovec, ki je na največji medsebojni razdalji $e = 1$ m. Špirovec je na mestu kapne lege podprt z nepomično podporo, saj sta kapni legi postavljeni direktno na poveznik, ki ju medsebojno povezuje. Vmesni legi in sleme so postavljeni na stebre, zato tu modeliramo premično členkasto podporo z možnostjo pomika v horizontalni smeri.

V celotnem ostrešju je 25 parov špirovcev in 26 škarnikov, ki so enakomerno razporejeni po dolžini vzdolžnih leg, zato v modelu povežemo premični podpori na mestu vmesnih leg z enim škarnikom. Ta škarnik modeliramo kot natezno palico z omejeno tlačno obremenitvijo.

Maksimalno tlačno obremenitev izračunamo z naslednjim postopkom:

$$I_z = \frac{30 \cdot 5^3}{12} = 312,5 \text{ cm}^4$$

$$\lambda_z = \frac{l_u}{\sqrt{\frac{I_z}{A}}} = \frac{800}{\sqrt{\frac{312,5}{150}}} = 554,3$$

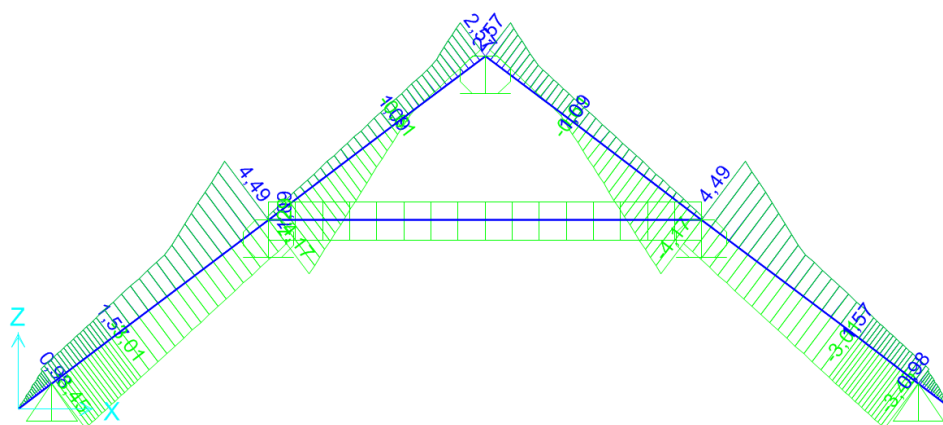
$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{554,3}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,1}{740}} = 9,4$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3)) + \lambda_{rel,z}^2 = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (9,4 - 0,3) + 9,4^2) = 45,6$$

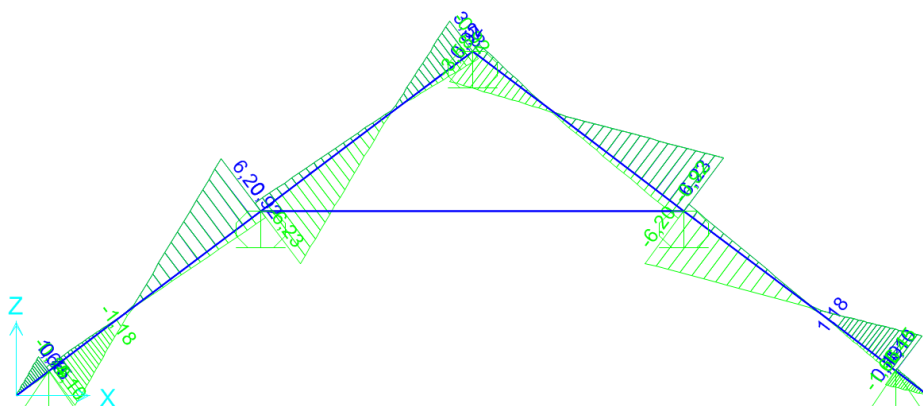
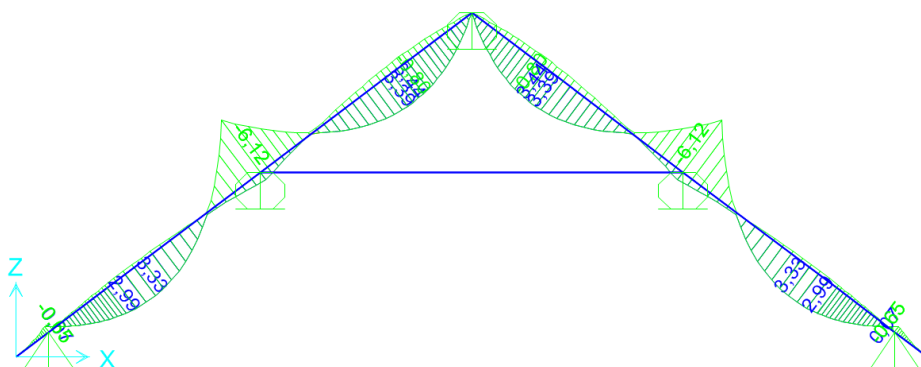
$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{45,6 + \sqrt{45,6^2 - 9,4^2}} = 0,011$$

$$N_{Ed} \leq k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}^M \cdot A = 0,011 \cdot 1,292 \cdot 150 = 2,1 \text{ kN}$$

Obremenitve



Slika 13: Ovojnica osnih sil N_{Ed} [kN]

Slika 14: Ovojnica prečnih sil V_{Ed} [kN]Slika 15: Ovojnica upogibnih momentov M_{Ed} [kNm]

Upogib z natezno osno silo

Pri upogibu z osno silo kontroliramo le natezno osno silo, saj je natezna trdnost lesa vzporedno z vlakni manjša od tlačne trdnosti. Iz ovojnic (Slika 15) je razvidno, da je kritičen prerez špirovca nad vmesno podporo. Ker gre za interakcijo med upogibom in natezno osno silo ne moremo vnaprej določiti, ali je merodajna kombinacija 1 ali 2, zato preverimo oba primera:

- kombinacija 1.2 in 1.3

$$N_{d,pr1p} = 3,31 \text{ kN}, M_{d,min} = -5,05 \text{ kNm}$$

$$A_{net} = b \cdot h_{net} = 12 \cdot 11 = 132 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{ed}}{A_{net}} = \frac{3,31}{132} = 0,025 \text{ kN/cm}^2$$

$$W_{y,net} = \frac{b \cdot h_{net}^2}{6} = \frac{12 \cdot 11^2}{6} = 242 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{d,min}}{W_{y,net}} = \frac{5,05}{242} = 2,087 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{0,025}{0,862} + \frac{2,087}{1,477} = 1,44 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

- kombinacija 2.1 in 2.2

$$N_{d,prisp} = 4,49 \text{ kN}, M_{d,min} = -6,12 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{d,prisp}}{A_{net}} = \frac{4,49}{132} = 0,034 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{d,min}}{W_{y,net}} = \frac{6,12}{242} = -2,529 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{0,034}{0,969} + \frac{2,529}{1,662} = 1,56 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

Strig

Za strižne napetosti je zopet merodajen prerez nad vmesno podporo. Vprašanje, katera kombinacija je merodajna, lahko rešimo z:

$$\frac{V_{Ed}^M}{V_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S},$$

če je pogoj izpolnjen je merodajna kombinacija 2 (S), drugače je merodajna kombinacija 1 (M).

$$\frac{5,16}{6,23} = 0,828 < \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen, merodajna je kombinacija 2 (S).}$$

Zareza špirovca na mestu podpore povzroči koncentracijo napetosti, zaradi katere moramo reducirati strižno trdnost. Geometrijski podatki so razvidni iz slike 16.

$$h = 14 \text{ cm}, h_{ef} = 11 \text{ cm}, x = 0 \text{ cm}$$

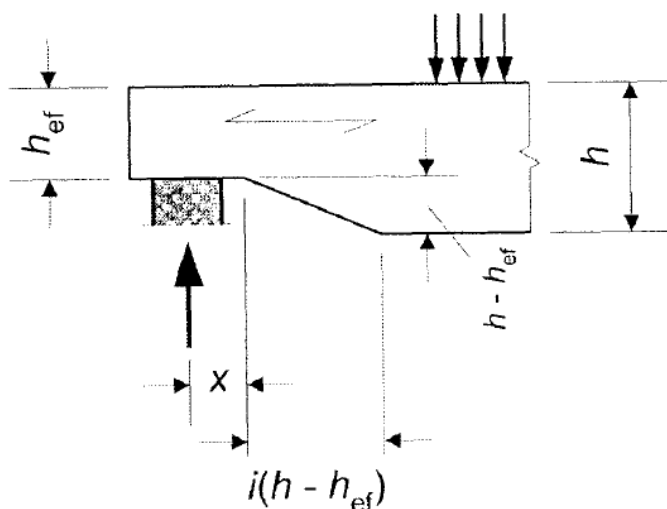
$$i = \frac{4}{3} = 1,33$$

$$\alpha = \frac{h_{ef}}{h} = \frac{11}{14} = 0,79$$

$$k_n = 5 \rightarrow \text{za masivni les}$$

$$k_v = \min \left\{ \frac{1}{k_n \cdot \left(1 + \frac{1,1 \cdot i^{1,5}}{\sqrt{h}}\right)}, \frac{1}{\sqrt{h} \cdot \left(\sqrt{\alpha \cdot (1 - \alpha)} + 0,8 \cdot \frac{x}{h} \cdot \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2}\right)} \right\}$$

$$k_v = \min \left\{ \frac{1}{5 \cdot \left(1 + \frac{1,1 \cdot 1,33^{1,5}}{\sqrt{140}}\right)}, \frac{1}{\sqrt{140} \cdot \left(\sqrt{0,79 \cdot (1 - 0,79)} + 0,8 \cdot \frac{0}{140} \cdot \sqrt{\frac{1}{0,79} - 0,79^2}\right)} \right\} = 1,18$$



Slika 16: Redukcija nosilnosti zarezanega nosilca ob podpori (SIST EN 1995-1-1:2005, Slika 6.11)

Kontrola strižnih napetosti:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_{Ed}^S}{\frac{2}{3} b \cdot h_{ef}} = \frac{6,23}{\frac{2}{3} 12 \cdot 11} = 0,071 \text{ kN/cm}^2 \leq k_v \cdot f_{v,d}^S = 1 \cdot 0,173 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Zasek špirovca

Kontaktne ploskve, na kateri je podprt špirovcec, je velikosti 12 x 5 cm. Merodajne so kontaktne napetosti pravokotno na vlakna (na strani vmesne lege). Obtežbo dobimo iz vertikalne reakcije na mestu vmesne lege pri obtežni kombinaciji 2.2 ali 2.3.

$$\frac{F_{c,90,d}^M}{F_{c,90,d}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S}$$

$$\frac{12,39}{14,91} = 0,831 < 0,889 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen, merodajna je kombinacija 2 (S).}$$

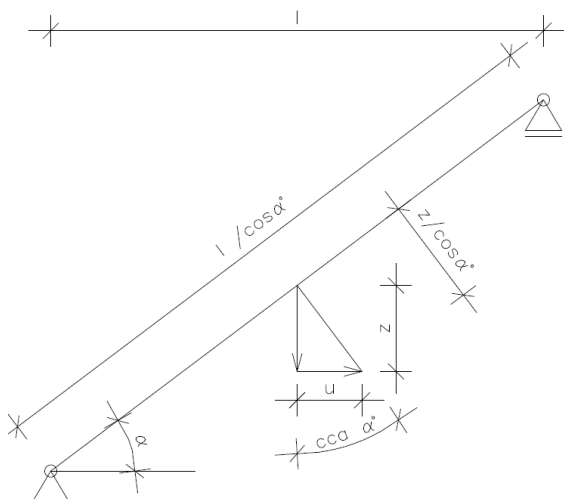
$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}^S}{A} = \frac{14,91}{12 \cdot 5} = 0,249 \text{ kN/cm}^2 \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^S = 1 \cdot 0,173 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow$$

pogoj ni izpolnjen

Pri izbiri faktorja $k_{c,90} = 1$ pogoj nosilnosti ni izpolnjen, vendar pa bo v poglavju 4.4 prikazano, da je lahko vrednost tega faktorja nekajkrat višja od vrednosti 1.

Kontrola povesa

Poves je definiran kot pravokoten premik konstrukcije od veznice med podporami. Pri nagnjenem nosilcu bi morali tako kontrolirati pomike izražene v lokalnem koordinatnem sistemu, vendar pa program Sap2000 poda pomike le v globalnih koordinatah, zato bomo povese kontrolirali s tlorisnim razponom med podporami (l) in vertikalnim pomikom (z) (Slika 17).



Slika 17: Kontrola povesa

Kontrola povесov med vmesno lego in slemenom v začetnem času (Slika 18):

$$z_{inst} = z_{g,k} + z_{s,k} + \psi_0 \cdot z_{w,k} = 0,41 + 0,69 + 0,6 \cdot 0,27 = 1,26 \text{ cm} \leq \frac{l}{300} = \frac{400}{300} = 1,33 \text{ cm} \rightarrow$$

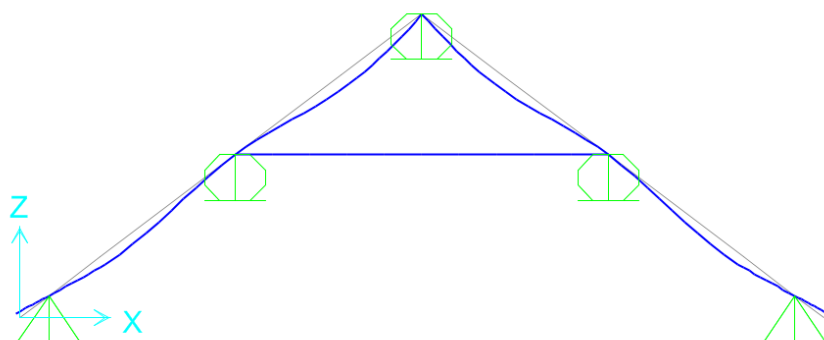
pogoj je izpolnjen

Potrebno je opraviti še kontrolo povесov po končanem lezenju:

$$z_{fin} = z_{g,k} \cdot (1 + k_{def}) + z_{s,k} \cdot (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) + z_{w,k} \cdot (\psi_0 + \psi_{2,i} \cdot k_{def})$$

$$z_{fin} = 0,41 \cdot (1 + 0,8) + 0,69 \cdot (1 + 0 \cdot 0,8) + 0,27 \cdot (0,6 + 0 \cdot 0,8) = 1,59 \text{ cm}$$

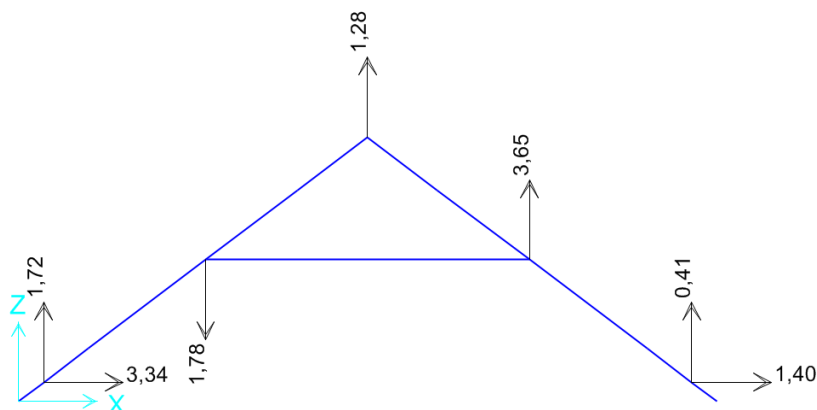
$$z_{fin} = 1,59 \text{ cm} \leq \frac{l}{250} = \frac{400}{250} = 1,60 \text{ cm} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$



Slika 18: Deformacijska oblika špirovca

Sidranje zaradi vetrne obtežbe

Vetrna obtežba brez varnostnega faktorja (1,5), ki deluje kot pritisk iz notranje strani, je po celotni konstrukciji večja od teže kritine, zato bi morali biti strešniki ustrezno sidrani na ostrešje. Poleg tega je potrebno zagotoviti ustrezno sidranje špirovcev na vzdolžne lege.



Slika 19: Reakcije pri kombinaciji 3.2 [kN]

Špirovec je na mestu vseh treh vzdolžnih leg pritrjen z žebljem dolžine 260 mm in debeline $d = 7,6$ mm. Iz slike 19, lahko določimo osno in bočno obremenitev žebljanega spoja na mestu kapne lege.

$$F_{ax,Ed} = 3,34 \cdot \sin 37^\circ = 2,01 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} = 3,34 \cdot \cos 37^\circ = 2,67 \text{ kN}$$

Določitev karakteristične osne izvlečne nosilnosti žeblja:

$$f_{ax,k} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 350^2 = 2,45 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{head,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 = 70 \cdot 10^{-6} \cdot 350^2 = 8,58 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{ax,Rk} = \min \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} = 2,45 \cdot 7,6 \cdot 150 = 2,79 \text{ kN} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 = 8,58 \cdot 15^2 = 1,93 \text{ kN} \end{cases}$$

kjer so:

$f_{ax,k}$ karakteristična izvlečna trdnost [N/mm²]

$f_{head,k}$ karakteristična izvlečna trdnost glave žebnja [N/mm²]

ρ_k karakteristična gostota lesa [kg/m³]

d premer žebnja

t_{pen} globina zabijanja

d_h premer glave žebnja

$F_{ax,Rk}$ karakteristična izvlečna nosilnost

Projektna izvlečna nosilnost žebnja se določi po enakem postopku, kot pri lesenih elementih:

$$F_{ax,Rd} = k_{mod} \frac{F_{ax,Rk}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{1,93}{1,3} = 1,34 \text{ kN}$$

Priprava vrednosti za izračun karakteristične bočne nosilnosti žebnja:

$$t_1 = 110 \text{ mm}$$

$$t_2 = 150 \text{ mm}$$

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} = 0,082 \cdot 350 \cdot 7,6^{-0,3} = 15,62 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{h,k} = f_{h,1,k} = f_{h,2,k}$$

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = 1$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 600 \cdot 7,6^{2,6} = 35107 \text{ Nmm}$$

kjer so:

t_1 debelina lesa prvega kosa lesa, gledano iz strani nabijanja žebnja

t_2 debelina zabijanja v drug kos lesa, gledano iz strani nabijanja žebnja

$f_{h,k}$ karakteristična bočna trdnost žebnja v lesu

$M_{y,Rk}$ karakteristični upogibni moment popolne plastifikacije

Bočna nosilnost zveze z enostrižno ravnino je omejena z naslednjimi porušnimi mehanizmi (Slika 20):

- a. Bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v prvem sestavnem elementu

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d = 15,62 \cdot 110 \cdot 7,6 = 13,06 \text{ kN}$$

- b. Bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v drugem sestavnem elementu

$$F_{v,Rk} = f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 15,62 \cdot 150 \cdot 7,6 = 17,81 \text{ kN}$$

c. Zasuk veznega sredstva

$$F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right)} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = \frac{15,62 \cdot 110 \cdot 7,6}{1 + 1} \cdot \left[\sqrt{1 + 2 \cdot 1^2 \cdot \left[1 + \frac{150}{110} + \left(\frac{150}{110} \right)^2 \right] + 1^3 \cdot \left(\frac{150}{110} \right)^2 - 1 \cdot \left(1 + \frac{150}{110} \right)} \right] + \frac{1,93}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 7,00 \text{ kN}$$

d. Upogib veznega sredstva zaradi kontaktnih napetosti v drugem elementu

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{15,62 \cdot 110 \cdot 7,6}{2 + 1} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 1 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 35107}{15,62 \cdot 7,6 \cdot 110^2}} - 1 \right] + \frac{1,93}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 5,38 \text{ kN}$$

e. Upogib veznega sredstva zaradi kontaktnih napetosti v prvem elementu

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{15,62 \cdot 150 \cdot 7,6}{1 + 2 \cdot 1} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 1^2 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (1 + 2 \cdot 1) \cdot 35107}{15,62 \cdot 7,6 \cdot 150^2}} - 1 \right] + \frac{1,93}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 6,96 \text{ kN}$$

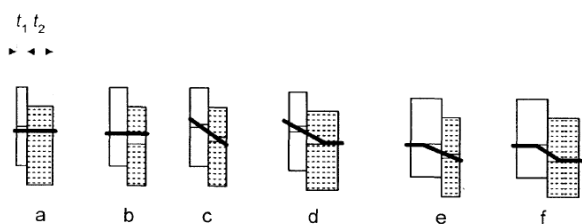
f. Upogib veznega sredstva v obeh sestavnih delih

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \cdot \sqrt{2 \cdot 35107 \cdot 15,62 \cdot 7,6} + \frac{1,93}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 3,80 \text{ kN}$$

Člen ($F_{ax,Rk} / 4$), ki je prispevek izvlečne nosilnosti je omejen na 15 % vrednosti člena, ki je v enačbi zapisan pred njim.



Slika 20: Porušni mehanizmi porušitve enostrižne zveze

Projektna bočna nosilnost žeblija se določi kot minimalna vrednost nosilnosti pri posameznem porušnem mehanizmu.

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{3,80}{1,3} = 2,63 \text{ kN}$$

Končna kontrola veznega sredstva na mestu kapne lege:

$$\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} + \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{2,01}{1,34} + \frac{2,67}{2,63} = 2,52 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

Kontrola veznega sredstva na mestu vmesne lege:

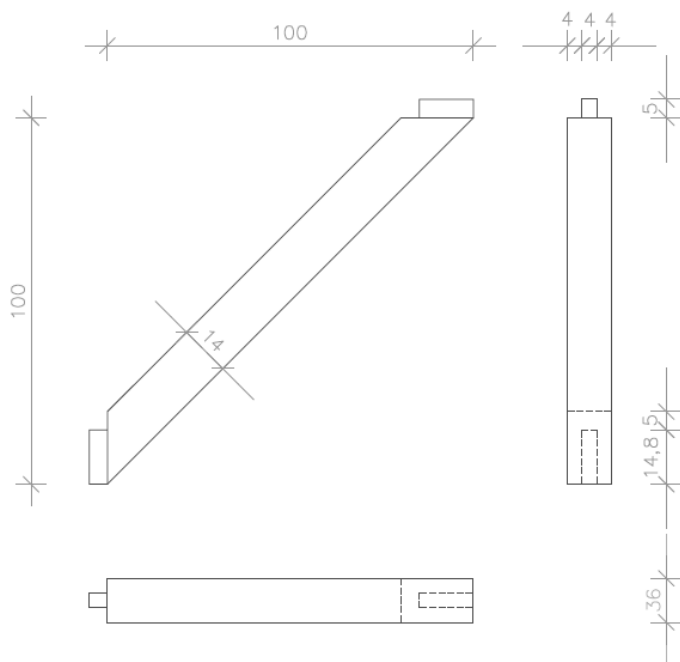
$$F_{ax,Ed} = 1,78 \cdot \cos 37^\circ = 1,42 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} = 1,78 \cdot \sin 37^\circ = 1,07 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} + \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{1,42}{1,34} + \frac{1,07}{2,63} = 1,47 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

4.2 Ročica

V obravnavanem ostrešju ima ročica funkcijo zmanjševanja razpetine vzdolžnih leg in zagotavljanje horizontalne stabilnosti ostrešja v smeri slemena. Njena nosilnost je omejena z nosilnostjo samega konstrukcijskega elementa in nosilnostjo spoja. Na sliki 21 je podan tloris, naris in stranski ris obravnavane ročice.



Slika 21: Geometrija ročice

Tlačna nosilnost ročice

$$A = b \cdot h = 12 \cdot 14 = 168 \text{ cm}^2$$

$$I_z = \frac{14 \cdot 12^3}{12} = 2016 \text{ cm}^4$$

$$\lambda_z = \frac{l_u}{\sqrt{\frac{I_z}{A}}} = \frac{127,4}{\sqrt{\frac{2016}{168}}} = 36,8$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{36,8}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,1}{740}} = 0,62$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3)) + \lambda_{rel,z}^2 = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (0,62 - 0,3)) + 0,62^2 = 0,73$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,73 + \sqrt{0,73^2 - 0,62^2}} = 0,91$$

Tlačna nosilnost ročice za srednje dolge obtežbe:

$$N_{Ed}^M \leq k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}^M \cdot A = 0,91 \cdot 1,292 \cdot 168 = 197,3 \text{ kN}$$

Tlačna nosilnost ročice za kratkotrajne obtežbe:

$$N_{Ed}^S \leq k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}^S \cdot A = 0,91 \cdot 1,454 \cdot 168 = 222 \text{ kN}$$

Nosilnost spoja vzporedno s stično površino ročice

Nosilnost spoja, vzporedno s stično površino ročice, predstavlja minimum med strižno nosilnostjo čepa in nosilnostjo kontaktnih napetosti na strani čepa.

Strižna nosilnost čepa (čisti strig):

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d}{b \cdot l_v} \leq f_{v,d} \rightarrow V_d \leq f_{v,d} \cdot b \cdot l_v$$

$$V_{Ed}^M \leq f_{v,d}^M \cdot b \cdot l_v = 0,154 \cdot 4 \cdot 14,8 = 9,1 \text{ kN}$$

$$V_{Ed}^S \leq f_{v,d}^S \cdot b \cdot l_v = 0,173 \cdot 4 \cdot 14,8 = 10,2 \text{ kN}$$

Nosilnost kontaktnih napetosti čepa:

$$\alpha = 45^\circ$$

$$A_{c,\alpha} = 4 \cdot 5 = 20 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F_{Ed}}{A_{c,\alpha}} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}}{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}} \rightarrow F_d \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}}{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}} \cdot A_{c,\alpha}$$

$$F_{Ed}^M \leq \frac{f_{c,0,d}^M}{\frac{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^M}{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}} \cdot A_{c,\alpha} = \frac{1,292}{1 \cdot 0,154} \cdot \sin^2 45 + \cos^2 45} \cdot 20 = 5,5 \text{ kN}$$

$$F_{Ed}^S \leq \frac{f_{c,0,d}^S}{\frac{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^S}{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}} \cdot A_{c,\alpha} = \frac{1,454}{1 \cdot 0,173} \cdot \sin^2 45 + \cos^2 45} \cdot 20 = 6,2 \text{ kN}$$

Končna nosilnost vzporedno s stično površino ročice:

$$N_{Ed}^M \leq \min\{V_{Ed}^M, F_{Ed}^M\} \cdot \sqrt{2} = 5,5 \cdot \sqrt{2} = 7,8 \text{ kN}$$

$$N_{Ed}^S \leq \min\{V_{Ed}^S, F_{Ed}^S\} \cdot \sqrt{2} = 6,2 \cdot \sqrt{2} = 8,8 \text{ kN}$$

Nosilnost spoja pravokotno na stično površino ročice

V pravokotni smeri stične površine so merodajne kontaktne napetosti na strani vzdolžne lege ali stebra, saj so v tem primeru omejene s tlačno trdnostjo pravokotno na vlakna.

$$A_{c,90} = 2 \cdot 4 \cdot 14,8 + 12 \cdot 5 = 178,4 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{Ed}/\sqrt{2}}{A_{c,90}} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} \rightarrow N_{Ed} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} \cdot A_{c,90} \cdot \sqrt{2}$$

$$N_{Ed}^M \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^M \cdot A_{c,90} \cdot \sqrt{2} = 1 \cdot 0,154 \cdot 178,4 \cdot \sqrt{2} = 38,9 \text{ kN}$$

$$N_{Ed}^S \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^S \cdot A_{c,90} \cdot \sqrt{2} = 1 \cdot 0,173 \cdot 178,4 \cdot \sqrt{2} = 43,6 \text{ kN}$$

Komentar

V naslednjih poglavjih je privzeto, da ima ročica neomejeno nosilnost, saj drugače ne bi bile izpolnjene upogibne kontrole vmesne in slemenske lege. Za tak način smo se odločili, ker bi bilo v primeru sanacije ostrejšja lažje in cenejše popraviti ali zamenjati ročice, kakor pa zagotoviti ustrezno nosilnost vzdolžnih leg.

4.3 Vzdolžne lege

4.3.1 Kapna lega

Računski model

Kapno lego enostavno modeliramo kot kontinuirni nosilec preko več polj. Podpore namestimo na mestu, kjer kapna lega nalega na poveznik. Na mestu vzdolžnega stika namestimo momentni členek.

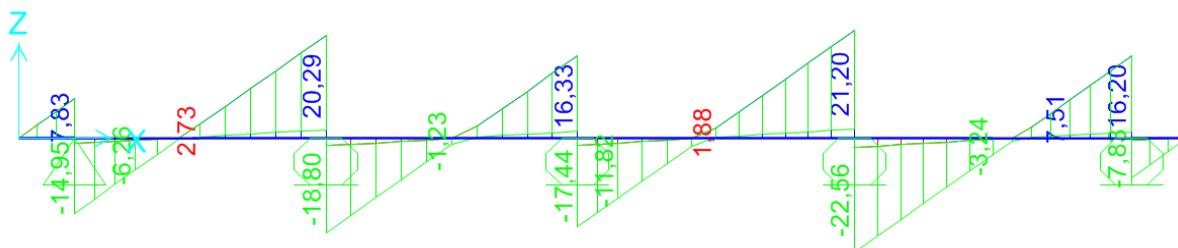
Obtežba kapne lege izhaja iz lastne teže same lege in obtežbe, ki se prenaša preko kontaktnih ploskev špirovcev. Slednjo modeliramo z enakomerno linijsko obtežbo, ki jo izračunamo iz reakcij, dobljenih v računskem modelu iz poglavja 4.1. Ker so špirovci na medsebojni oddaljenosti $e = 1 \text{ m}$, vrednosti ni potrebno korigirati. Velikost obtežbe je prikazana v preglednici 10. Pozitivne vrednosti pri horizontalni obtežbi q_y pomenijo smer proti zunanosti stavbe, negativne vrednosti pa smer proti notranosti. Pozitivna vertikalna obtežba q_z je usmerjena v smeri težnostnega pospeška. Razpored obtežbe preko polj je enakomeren, saj modela obtežbe snega in vetra ne predvidevata drugačne razporeditve.

Preglednica 10: Obtežba kapne lege

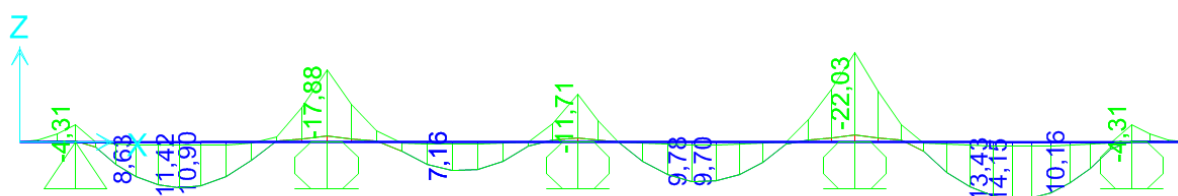
Obtežba	Področje C, A, D		Področje B	
	q_y [kN/m]	q_z [kN/m]	q_y [kN/m]	q_z [kN/m]
G	0,13	1,73	0,13	0,17
S nenakopicen	0,21	2,63	0,21	2,63
S nakopicen (levo)	0,16	2,59	0,16	2,59
S nakopicen (desno)	0,16	1,36	0,16	1,36
W+	-1,14	0,83	-1,51	0,94
W-	1,13	-0,66	1,47	-0,92
W(levo)+	-1,86	0,29	-2,73	0,03
W(levo)-	2,15	0,11	2,66	-0,03
W(desno)+	0,72	0,54	1,22	0,92
W(desno)-	-1,02	-0,77	-1,19	-0,90

Obremenitve

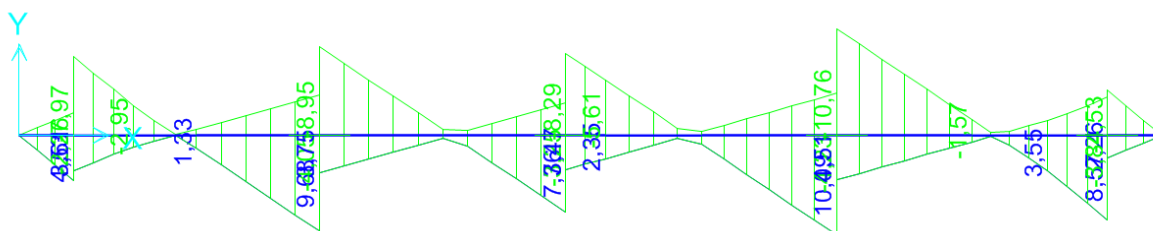
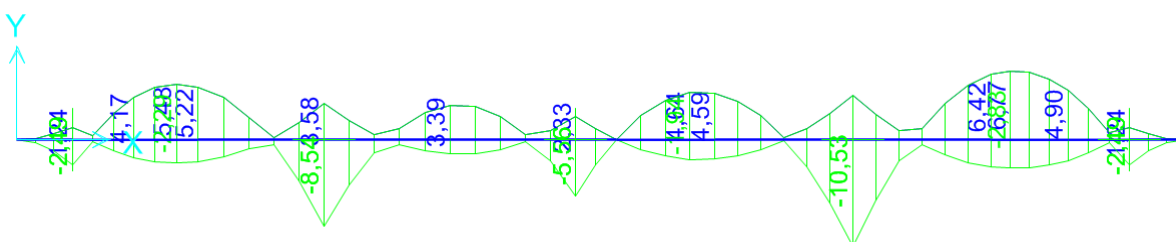
Obremenitve kapne lege so prikazane z ovojniciami notranjih sil za prve tri kombinacije obtežb. Linijska obtežba q_z povzroča prečne sile v smeri z (Slika 22) in upogibne momente okoli osi y (Slika 23), pri obtežbi q_y pa so smeri ravno obratne (Slika 24 in Slika 25).



Slika 22: Ovojnica prečnih sil $V_{z,Ed}$ [kN]



Slika 23: Ovojnica upogibnih momentov $M_{y,Ed}$ [kNm]

Slika 24: Ovojnica prečnih sil $V_{y,Ed}$ [kN]Slika 25: Ovojnica upogibnih momentov $M_{z,Ed}$ [kNm]

Dvoosni upogib

Kritičen prerez za kontrolo dvoosnega upogiba je na mestu drugega poveznika, gledano iz vzhodne strani poslopja. Ker je velikost obtežbe v z smeri večja od tiste v y, bomo izbrali maksimalne obremenitve momenta okoli osi y in pripadajoče momente okoli osi z. Zopet imamo opravka z interakcijo, zato moramo opraviti dve kontroli, in sicer:

- za kombinacijo 1:

$$M_{y,d,min} = -19,67 \text{ kNm}, M_{z,d,prip} = -1,52 \text{ kNm}$$

$$W_{y,net} = \frac{b \cdot h_{net}^2}{6} = \frac{18 \cdot 20^2}{6} = 1200 \text{ cm}^3$$

$$W_{z,net} = \frac{b^2 \cdot h_{net}}{6} = \frac{18^2 \cdot 20}{6} = 1080 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d,min}}{W_{y,net}} = \frac{19,67}{1200} = 1,639 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d,prip}}{W_{y,net}} = \frac{1,52}{1080} = 0,141 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \frac{1,639}{1,477} + 0,7 \cdot \frac{0,141}{1,477} = 1,18 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

$$k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,7 \cdot \frac{1,639}{1,477} + \frac{0,141}{1,477} = 0,87 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

- za kombinacijo 2:

$$M_{y,d,min} = -22,03 \text{ kNm}, M_{z,d,prip} = 1,72 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d,min}}{W_{y,net}} = \frac{22,03}{1200} = 1,836 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d,prip}}{W_{y,net}} = \frac{1,72}{1080} = 0,159 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \frac{1,836}{1,662} + 0,7 \cdot \frac{0,159}{1,662} = 1,17 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

$$k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,7 \cdot \frac{1,836}{1,662} + \frac{0,159}{1,662} = 0,87 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Strižne napetosti

Strižne napetosti preverimo v istem prerezu, kot pri kontroli upogibnih momentov. Zopet imamo opravka z interakcijo, zato ne moremo vnaprej določiti kritične kombinacije.

- za kombinacijo 1:

$$V_{z,d,min} = -20,14 \text{ kN}, V_{y,d,prip} = -1,55 \text{ kN}$$

$$\tau_{z,d} = \frac{V_{z,d,min}}{\frac{2}{3} b \cdot h_{ef}} = \frac{20,14}{\frac{2}{3} 18 \cdot 20} = 0,084 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{y,d} = \frac{V_{y,d,prip}}{\frac{2}{3} b \cdot h_{ef}} = \frac{1,55}{\frac{2}{3} 20 \cdot 18} = 0,006 \text{ kN/cm}^2$$

Zareza kapne lege na mestu podpore povzroči koncentracijo napetosti, zaradi katere moramo reducirati strižno trdnost. Geometrijski podatki so razvidni iz slike 16.

$$h = 22 \text{ cm}, h_{ef} = 20 \text{ cm}, x = 11 \text{ cm}$$

$$i = 0$$

$$\alpha = \frac{h_{ef}}{h} = \frac{20}{22} = 0,91$$

$$k_n = 5 \rightarrow \text{za masivni les}$$

$$k_v = \min \left\{ \frac{1}{k_n \cdot \left(1 + \frac{1,1 \cdot i^{1,5}}{\sqrt{h}}\right)}, \frac{1}{\sqrt{h} \cdot \left(\sqrt{\alpha \cdot (1-\alpha)} + 0,8 \cdot \frac{x}{h} \cdot \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2}\right)} \right\}$$

$$k_v = \min \left\{ \frac{1}{5 \cdot \left(1 + \frac{1,1 \cdot 0^{1,5}}{\sqrt{220}}\right)}, \frac{1}{\sqrt{220} \cdot \left(\sqrt{0,91 \cdot (1-0,91)} + 0,8 \cdot \frac{110}{220} \cdot \sqrt{\frac{1}{0,91} - 0,91^2}\right)} \right\} = 0,68$$

Kontrola strižnih napetosti:

$$\sqrt{\tau_{z,d}^2 + \tau_{y,d}^2} = \sqrt{0,084^2 + 0,006^2} = 0,084 \frac{kN}{cm^2} \leq k_v \cdot f_{v,d} = 0,68 \cdot 0,154 = 0,105 \rightarrow$$

pogoj je izpolnjen

- za kombinacijo 2:

$$V_{z,d,min} = -22,56 \text{ kN}, V_{y,d,prip} = -1,64 \text{ kN}$$

$$\tau_{z,d} = \frac{V_{z,d,min}}{\frac{2}{3} b \cdot h_{ef}} = \frac{22,56}{\frac{2}{3} 18 \cdot 20} = 0,094 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{y,d} = \frac{V_{y,d,prip}}{\frac{2}{3} b \cdot h_{ef}} = \frac{1,64}{\frac{2}{3} 20 \cdot 18} = 0,007 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sqrt{\tau_{z,d}^2 + \tau_{y,d}^2} = \sqrt{0,094^2 + 0,007^2} = 0,094 \frac{kN}{cm^2} \leq f_{v,d} = 0,68 \cdot 0,173 = 0,118 \rightarrow$$

pogoj je izpolnjen

Kontaktne napetosti v podpori

Kontaktna ploskev, na kateri je podprta kapna lega, je velikosti 18 x 22 cm. Merodajna je kontaktna ploskev na strani poveznika, zato ker je razdalja od roba podpore in konca nosilca manjša od 1/3 višine poveznika. Obtežbo dobimo iz vertikalne reakcije na mestu podpore, pri obtežni kombinaciji 2.2 ali 2.3. Pri kontroli je zanemarjena ekscentrična obremenitev kapne lege.

$$\frac{F_{c,90,d}^M}{F_{c,90,d}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S}$$

$$\frac{39,07}{43,75} = 0,893 < 0,889 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen, merodajna je kombinacija 1 (M).}$$

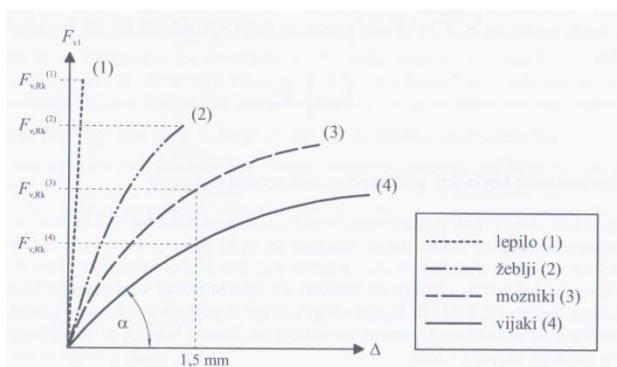
$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{l}{250}\right) \cdot \left(1 + \frac{h}{12 \cdot l}\right) = \left(2,38 - \frac{180}{250}\right) \cdot \left(1 + \frac{240}{12 \cdot 180}\right) = 1,84$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}^M}{A} = \frac{39,07}{18 \cdot 22} = 0,099 \frac{kN}{cm^2} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^M = 1,84 \cdot 0,154 = 0,284 \frac{kN}{cm^2} \rightarrow$$

pogoj je izpolnjen

Sidranje v horizontalni smeri

Horizontalno reakcijo kapne lege omogočajo kontaktne napetosti poveznika, ki je na mestu kapne lege poglobljen za 5 cm. Poleg kontaktnih napetosti imamo na tem mestu tudi vijak M14, vendar pa njegove nosilnosti v horizontalni smeri ne moremo upoštevati, saj je njegova togost premajhna (Slika 26). Glavni razlog vijaka, ki povezuje kapno lego in poveznik, je prevzem torzijskega momenta zaradi ekscentrične obremenitve kapne lege s špirovci.



Slika 26: Primerjava togosti veznih sredstev (Beg, 2009)

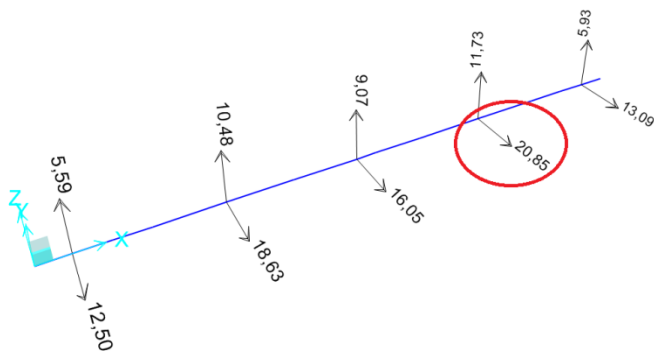
Horizontalna nosilnost spoja poveznika in kapne lege je minimalna vrednost med tlačno nosilnostjo pravokotno na vlakna (na strani kapne lege) in strižno nosilnostjo klina na zunanji strani kapne lege:

- tlačna nosilnost pravokotno na vlakna

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}^S}{A} = \frac{20,85}{22 \cdot 5} = 0,189 \frac{kN}{cm^2} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^S = 1 \cdot 0,173 \frac{kN}{cm^2} \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

- strižna nosilnost klina (čisti strig)

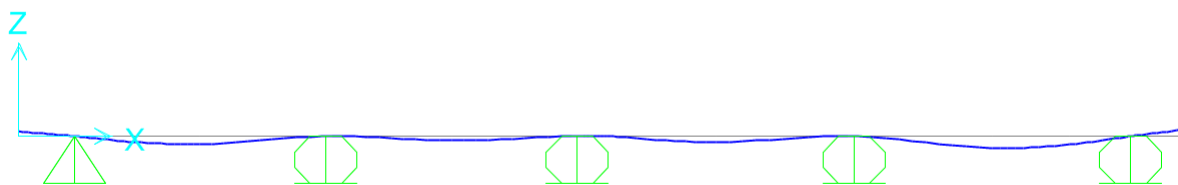
$$\tau_{v,d} = \frac{V_d^S}{b \cdot l_v} = \frac{20,85}{22 \cdot 15} = 0,063 \frac{kN}{cm^2} \leq f_{v,d}^S = 0,173 \frac{kN}{cm^2} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$



Slika 27: Reakcije pri obtežni kombinaciji 3.2

Kontrola povesa

Kontrolo povesev naredimo za krajno polje velikosti $l = 5,5$ m (Slika 28). Posebej očitamo pomike v vertikalni in horizontalni smeri in jih nato kontroliramo z interakcijo.



Slika 28: Deformacijska oblika kapne lege

Kontrola povesov v začetnem času:

$$z_{inst} = z_{g,k} + z_{s,k} + \psi_0 \cdot z_{w,k} = 0,50 + 0,77 + 0,6 \cdot 0,25 = 1,42 \text{ cm}$$

$$y_{inst} = y_{g,k} + y_{s,k} + \psi_0 \cdot y_{w,k} = +0,05 + 0,09 - 0,6 \cdot 0,50 = -0,16 \text{ cm}$$

$$\sqrt{z_{inst}^2 + y_{inst}^2} = \sqrt{1,42^2 + (-0,16)^2} = 1,43 \text{ cm} \leq \frac{l}{300} = \frac{550}{300} = 1,83 \text{ cm} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontrola povesov v končnem času:

$$z_{fin} = z_{g,k} \cdot (1 + k_{def}) + z_{s,k} \cdot (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) + z_{w,k} \cdot (\psi_0 + \psi_{2,i} \cdot k_{def})$$

$$z_{fin} = 0,50 \cdot (1 + 0,8) + 0,77 \cdot (1 + 0) + 0,25 \cdot (0,6 + 0) = 1,82 \text{ cm}$$

$$y_{fin} = y_{g,k} \cdot (1 + k_{def}) + y_{s,k} \cdot (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) + y_{w,k} \cdot (\psi_0 + \psi_{2,i} \cdot k_{def})$$

$$y_{fin} = 0,05 \cdot (1 + 0,8) + 0,09 \cdot (1 + 0) - 0,50 \cdot (0,6 + 0) = -0,12 \text{ cm}$$

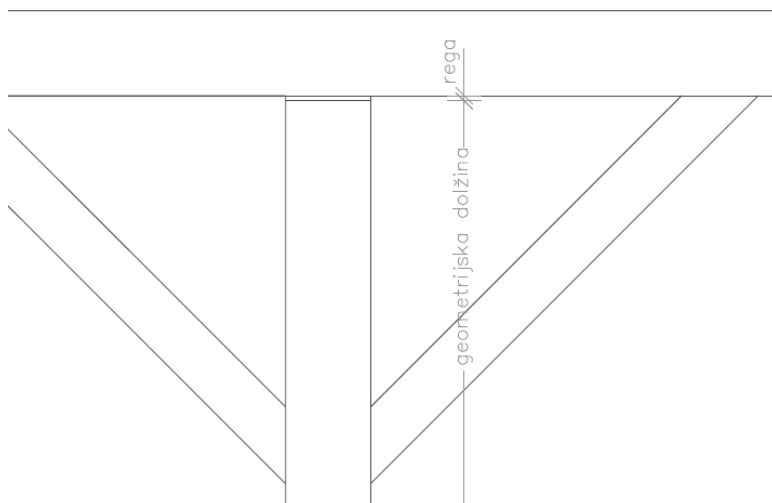
$$\sqrt{z_{fin}^2 + y_{fin}^2} = \sqrt{1,82^2 + (-0,12)^2} = 1,82 \text{ cm} \leq \frac{l}{250} = \frac{550}{250} = 2,20 \text{ cm} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

4.3.2 Vmesna lega

Računski model

Zaradi uporabljenih ročic smo vzdolžno lego podprli s palično konstrukcijo, sestavljeno iz stebrov in ročic. Uporabljene ročice lahko prenašajo le tlačno obremenitev, zato je potrebno v programu Sap2000 uporabiti nelinearno analizo. Na mestih vzdolžnega podaljševanja vmesne lege namestimo momentne členke.

V uporabljenem modelu ni upoštevano deformiranje spoja ročice na mestu vmesne lege in stebra, saj je bila pri izdelavi dodana rega med vmesno lego in stebrom (Slika 29).



Slika 29: Rega med stebrom in vzdolžno lego

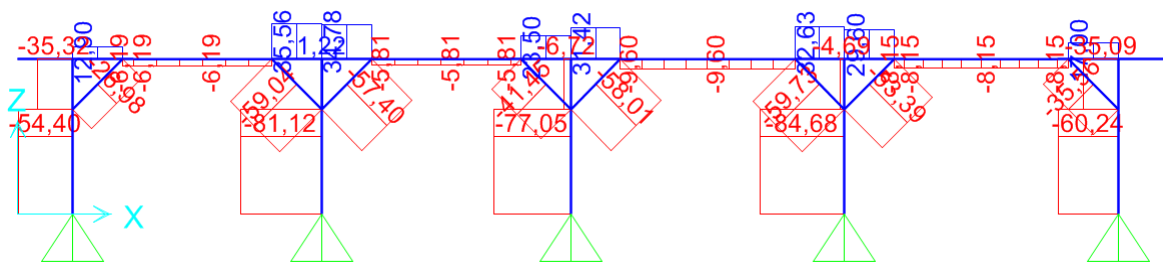
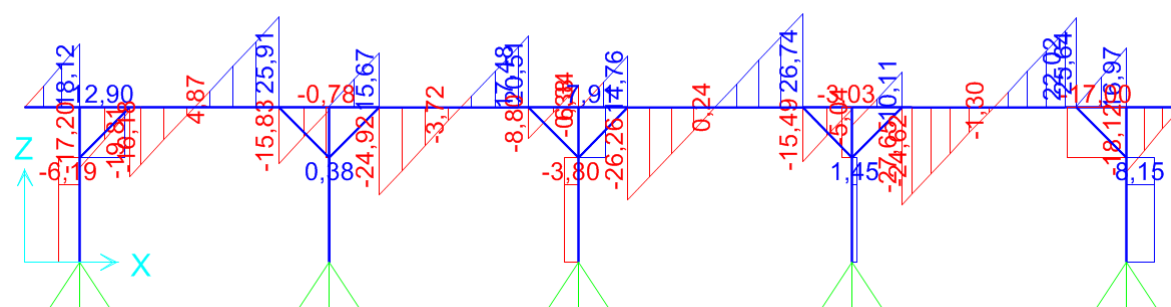
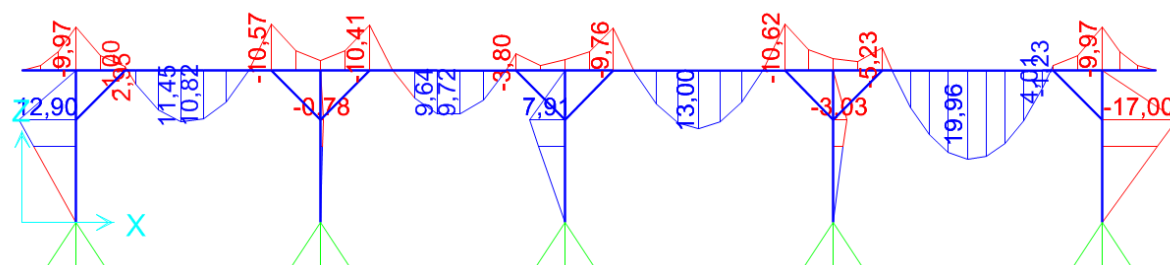
Vmesno lego obremenimo z linijsko obtežbo, ki jo dobimo iz vertikalne reakcije modela, uporabljenega za statični izračun špirovca.

Preglednica 11: Obtežba vmesne lege

Obtežba	Področje C, A, D	Področje B
	q_z [kN/m]	q_z [kN/m]
G	3,35	3,35
S nenakopicen	5,35	5,35
S nakopicen (levo)	5,40	5,40
S nakopicen (desno)	2,62	2,62
W+	2,53	3,87
W-	-2,99	-3,77
W(levo)+	2,80	4,28
W(levo)-	-3,31	-4,17
W(desno)+	-0,27	-0,41
W(desno)-	0,31	0,40

Obremenitve

Zaradi uporabljenih ročic se poleg upogibnega momenta (Slika 32) in prečnih sil (Slika 31) pojavijo tudi precejšnje osne sile (Slika 30).

Slika 30: Osne sile N_{Ed} [kN], obtežna kombinacija 2.2Slika 31: Prečne sile V_{Ed} [kN], obtežna kombinacija 2.2Slika 32: Upogibni momenti M_{Ed} [kN], obtežna kombinacija 2.2

Upogib s tlačno osno silo

Merodajno mesto obremenitve je prvo polje iz vzhodne strani poslopja. Primerjava obremenitev med kombinacijo 1 in 2 je pokazala, da so upogibni momenti prevladujoča obremenitev v primerjavi s tlačnimi obremenitvami, zato smo kriterij obremenitve izvedli le za upogibne momente.

$$\frac{M_{Ed}^M}{M_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S}$$

$$\frac{16,61}{19,96} = 0,832 < 0,889 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen, merodajna je kombinacija 2.2 (S).}$$

Projektne obremenitve:

$$N_{d,prip} = -8,51 \text{ kN}, M_{d,max} = 19,96 \text{ kNm}$$

Določitev napetosti:

$$A = b \cdot h = 18 \cdot 22 = 396 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{d,prip}}{A} = \frac{-8,51}{396} = -0,021 \text{ kN/cm}^2$$

$$W_y = \frac{18 \cdot 22^2}{6} = 1452 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{d,max}}{W_y} = \frac{19,96}{1452} = 1,375 \text{ kN/cm}^2$$

Določitev redukcijskega faktorja nosilnosti za uklon okoli šibke osi:

$$A = b \cdot h = 18 \cdot 22 = 396 \text{ cm}^2$$

$$I_z = \frac{22 \cdot 18^3}{12} = 10692 \text{ cm}^4$$

$$\lambda_z = \frac{l_u}{\sqrt{\frac{I_z}{A}}} = \frac{550}{\sqrt{\frac{10692}{396}}} = 105,8$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{105,8}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,1}{740}} = 1,79$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3)) + \lambda_{rel,z}^2 = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (1,79 - 0,3)) + 1,79^2 = 2,26$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2,26 + \sqrt{2,26^2 - 1,79^2}} = 0,28$$

Določitev redukcijskega faktorja nosilnosti za bočno zvrnitev:

Ker je vmesna lega bočno podprta s špirovci in torzijsko podprta s nateznimi palicami, smo za redukcijski faktor nosilnosti, za bočno zvrnitev, izbrali vrednost 0,1.

$$k_{crit} = 1,0$$

Kontrola nosilnosti prereza:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \left(\frac{0,021}{1,454}\right)^2 + \frac{1,375}{1,662} = 0,83 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontrola stabilnosti:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} = \left(\frac{1,375}{1 \cdot 1,662}\right)^2 + \frac{0,021}{0,28 \cdot 1,454} = 0,74 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Upogib z natezno osno silo

Največje obremenitve se pojavijo na mestu drugega stebra iz zahodne strani objekta, natančneje na mestu spoja ročice in vmesne lege. Kriterij obremenitve določimo iz prevladujoče upogibne obremenitve.

$$\frac{M_{Ed}^M}{M_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S}$$

$$\frac{8,80}{10,75} = 0,819 < \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna je kombinacija 2 (S).}$$

$$M_{d,prip} = -10,75 \text{ kNm}, N_{d,max} = 35,56 \text{ kN}$$

$$A = b \cdot h = 18 \cdot 22 = 396 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{d,prip}}{A} = \frac{35,56}{396} = 0,090 \text{ kN/cm}^2$$

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{18 \cdot 22^2}{6} = 1452 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{d,min}}{W_y} = \frac{10,75}{1452} = 0,740 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,090}{0,969} + \frac{0,740}{1,662} = 0,54 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Strižne napetosti

Maksimalne strižne napetosti se pojavijo pri drugem stebri, gledano iz vzhodne strani. Merodajno obtežno kombinacijo določimo iz kriterija obremenitve:

$$\frac{V_{Ed}^M}{V_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S},$$

če je pogoj izpolnjen je merodajna kombinacija 2 (S), drugače je merodajna kombinacija 1 (M).

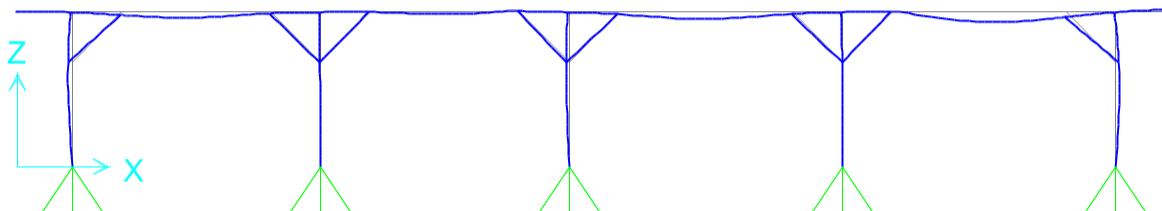
$$\frac{23,03}{27,65} = 0,833 < \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna je kombinacija 2 (S).}$$

Kontrola strižne nosilnosti:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_{Ed}^S}{\frac{2}{3} b \cdot h} = \frac{27,65}{\frac{2}{3} 18 \cdot 22} = 0,105 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{v,d}^S = 0,173 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontrola povesa

Maksimalen povese se zgodi v prvem polju iz vzhodne strani. Razlog lahko poiščemo v vzdolžnem spoju vmesne lege in manjšem vpetju lege nad končnim stebrom. Merodajna je kombinacija, pri kateri je konstrukcija bolj obremenjena nad obravnavano vmesno lego in manj na nasprotni strani.



Slika 33: Deformacijska linija vmesne lege

Kontrola povosov v začetnem času:

$$z_{inst} = z_{g,k} + z_{s,k} + \psi_0 \cdot z_{w,k} = 0,38 + 0,62 + 0,6 \cdot 0,32 = 1,19 \text{ cm}$$

$$z_{inst} = 1,19 \text{ cm} \leq \frac{l}{300} = \frac{550}{300} = 1,83 \text{ cm} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontrola povosov v končnem času:

$$z_{fin} = z_{g,k} \cdot (1 + k_{def}) + z_{s,k} \cdot (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) + z_{w,k} \cdot (\psi_0 + \psi_{2,i} \cdot k_{def})$$

$$z_{fin} = 0,38 \cdot (1 + 0,8) + 0,62 \cdot (1 + 0) + 0,32 \cdot (0,6 + 0) = 1,50 \text{ cm}$$

$$z_{fin} = 1,50 \text{ cm} \leq \frac{l}{250} = \frac{550}{250} = 2,20 \text{ cm} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

4.3.3 Slemenska lega

Računski model

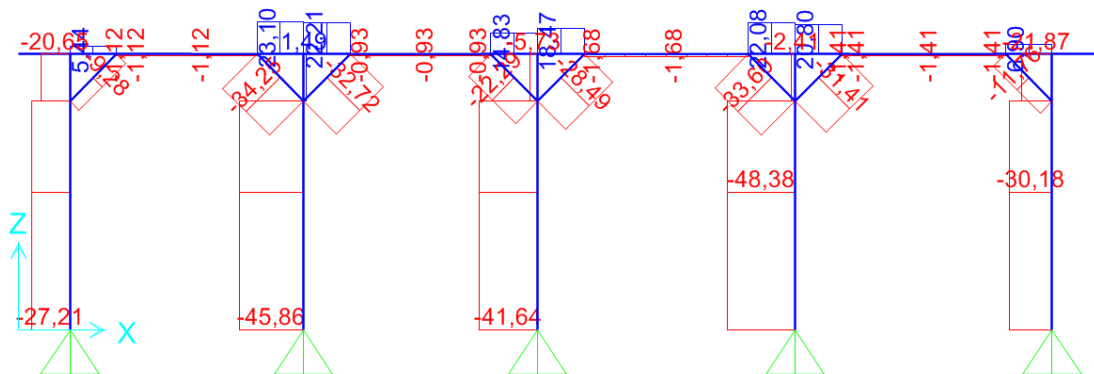
Računski model slemenske lege je zasnovan na enak način, kot tisti uporabljen za opis delovanja vmesne lege. Obremenitev (Preglednica 12) je tudi v tem primeru dobljena iz reakcij modela uporabljenega pri modeliranju špirovca.

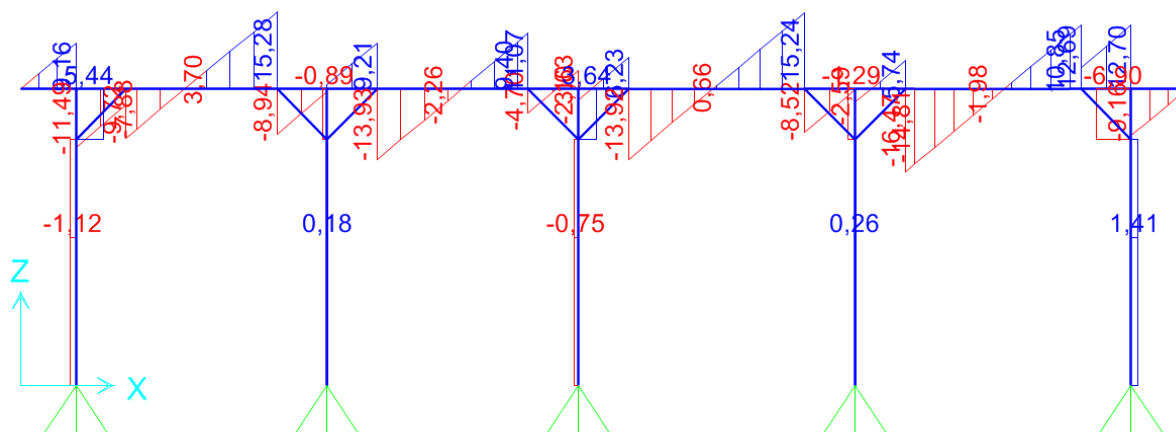
Preglednica 12: Obtežba slemenske lege

Obtežba	Področje C, A, D q_z [kN/m]	Področje B q_z [kN/m]
G	2,26	2,26
S nenakopicen	3,52	3,52
S nakopicen (levo)	2,64	2,64
S nakopicen (desno)	2,64	2,64
W+	0,12	0,86
W-	-1,08	-0,83
W(levo)+	0,06	0,43
W(levo)-	-0,54	-0,42
W(desno)+	0,06	0,43
W(desno)-	-0,54	-0,42

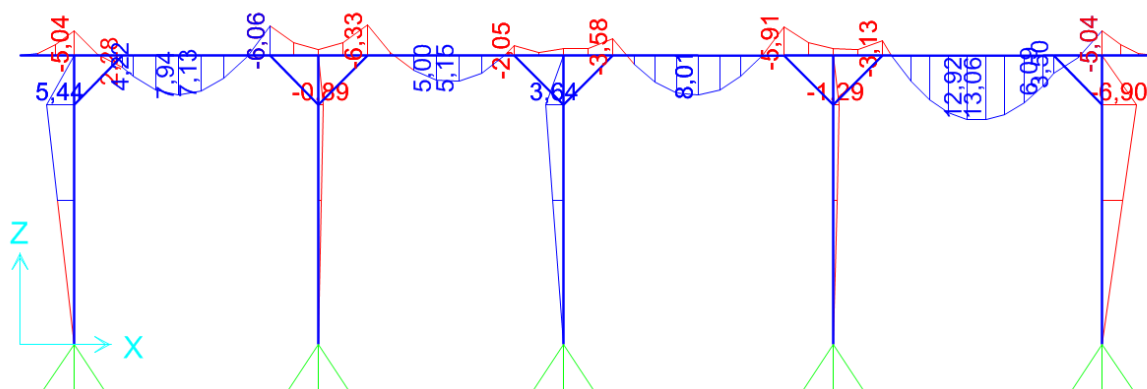
Obremenitve

Podana obtežba povzroča poleg upogibnega momenta (Slika 36) in prečnih sil (Slika 35) tudi osne sile (Slika 34), ki so posledica podpiranja slemenske lege z ročicami.

Slika 34: Osne sile N_{Ed} [kN], obtežna kombinacija 1.1



Slika 35: Prečne sile V_{Ed} [kN], obtežna kombinacija 1.1



Slika 36: Upogibni momenti M_{Ed} [kNm], obtežna kombinacija 2.2

Upogib s tlačno osno silo

Iz slike 36 je razvidno, da je zopet merodajno mesto obremenitve prvo polje dolžine 5,5 m. Zaradi majhne tlačne obremenitve smo kriterij obremenitve izračunali na osnovi upogibnih momentov.

$$\frac{M_{Ed}^M}{M_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S}$$

$$\frac{13,06}{13,26} = 0,985 < 0,889 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen, merodajna je kombinacija 1.1 (M).}$$

Projektne obremenitve:

$$N_{d,prisp} = -1,41 \text{ kN}, M_{d,max} = 13,26 \text{ kNm}$$

Določitev napetosti:

$$A = b \cdot h = 18 \cdot 22 = 396 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{d,prisp}}{A} = \frac{-1,41}{396} = -0,004 \text{ kN/cm}^2$$

$$W_y = \frac{18 \cdot 22^2}{6} = 1452 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{d,max}}{W_y} = \frac{13,26}{1452} = 0,913 \text{ kN/cm}^2$$

Določitev redukcijskega faktorja nosilnosti za uklon okoli šibke osi:

$$A = b \cdot h = 18 \cdot 22 = 396 \text{ cm}^2$$

$$I_z = \frac{22 \cdot 18^3}{12} = 10692 \text{ cm}^4$$

$$\lambda_z = \frac{l_u}{\sqrt{\frac{I_z}{A}}} = \frac{550}{\sqrt{\frac{10692}{396}}} = 105,8$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{105,8}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,1}{740}} = 1,79$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3)) + \lambda_{rel,z}^2 = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (1,79 - 0,3)) + 1,79^2 = 2,26$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2,26 + \sqrt{2,26^2 - 1,79^2}} = 0,28$$

Določitev redukcijskega faktorja nosilnosti za bočno zvrnitev:

Ker je slemenska lega bočno in torzijsko podprta s špirovci, smo za redukcijski faktor nosilnosti, za bočno zvrnitev, izbrali vrednost 1,0.

$$k_{crit} = 1,0$$

Kontrola nosilnosti prereza:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \left(\frac{0,004}{1,292}\right)^2 + \frac{0,913}{1,477} = 0,62 \leq 1 \rightarrow \text{pogoje je izpolnjen}$$

Kontrola stabilnosti:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} = \left(\frac{0,913}{1 \cdot 1,477}\right)^2 + \frac{0,004}{0,28 \cdot 1,292} = 0,39 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Upogib z natezno osno silo

Največje obremenitve se pojavijo na mestu drugega stebra iz zahodne strani objekta, natančneje na mestu spoja ročice in vmesne lege. Kriterij obremenitve določimo iz prevladujoče upogibne obremenitve.

$$\frac{M_{Ed}^M}{M_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S}$$

$$\frac{6,06}{6,15} = 0,985 < \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna je kombinacija 1 (M).}$$

$$M_{d,min} = -6,06 \text{ kNm}, N_{d,prip} = 23,10 \text{ kN}$$

$$A = b \cdot h = 18 \cdot 22 = 396 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{d,prip}}{A} = \frac{23,10}{396} = 0,058 \text{ kN/cm}^2$$

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{18 \cdot 22^2}{6} = 1452 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{d,min}}{W_y} = \frac{6,06}{1452} = 0,417 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,058}{0,862} + \frac{0,417}{1,477} = 0,35 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Strižne napetosti

Maksimalne strižne napetosti se pojavijo pri drugem stebru, gledano iz vzhodne strani. Merodajno obtežno kombinacijo določimo iz kriterija obremenitve:

$$\frac{V_{Ed}^M}{V_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S},$$

če je pogoj izpolnjen je merodajna kombinacija 2 (S), drugače je merodajna kombinacija 1 (M).

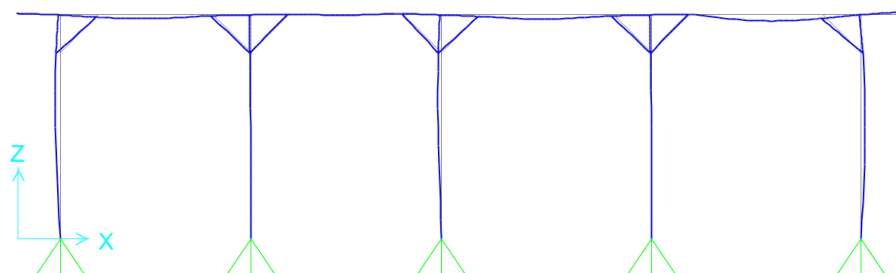
$$\frac{16,47}{16,70} = 0,986 < \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna je kombinacija 1 (M).}$$

Kontrola strižne nosilnosti:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_{Ed}^S}{\frac{2}{3} b \cdot h} = \frac{16,47}{\frac{2}{3} 18 \cdot 22} = 0,062 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{v,d}^M = 0,154 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontrola povesa

Maksimalen poves slemenske lege se zgodi v prvem polju iz vzhodne strani. Merodajna je kombinacija, pri kateri je konstrukcija simetrično obremenjena na linijo slemena.



Slika 37: Deformacijska linija slemenske lege

Kontrola povosov v začetnem času:

$$z_{inst} = z_{g,k} + z_{s,k} + \psi_0 \cdot z_{w,k} = 0,33 + 0,52 + 0,6 \cdot 0,02 = 0,86 \text{ cm}$$

$$z_{inst} = 0,86 \text{ cm} \leq \frac{l}{300} = \frac{550}{300} = 1,83 \text{ cm} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontrola povosov v končnem času:

$$z_{fin} = z_{g,k} \cdot (1 + k_{def}) + z_{s,k} \cdot (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) + z_{w,k} \cdot (\psi_0 + \psi_{2,i} \cdot k_{def})$$

$$z_{fin} = 0,33 \cdot (1 + 0,8) + 0,52 \cdot (1 + 0) + 0,02 \cdot (0,6 + 0) = 1,13 \text{ cm}$$

$$z_{fin} = 1,13 \text{ cm} \leq \frac{l}{250} = \frac{550}{250} = 2,20 \text{ cm} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

4.4 Paličje

Računski model

Zaradi podaljševanja poveznika na mestu stebra slemenske lege smo za izračun notranjih sil paličja uporabili dva modela, in sicer: model, pri katerem smo upoštevali, da je prvi poveznik togo vpet v drugega, in model, pri katerem je na mestu stika uporabljen momentni členek. Tako smo dobili celoten razpon obnašanja spoja in lahko trdimo, da je dejansko obnašanje nekje med tema dvema modeloma.

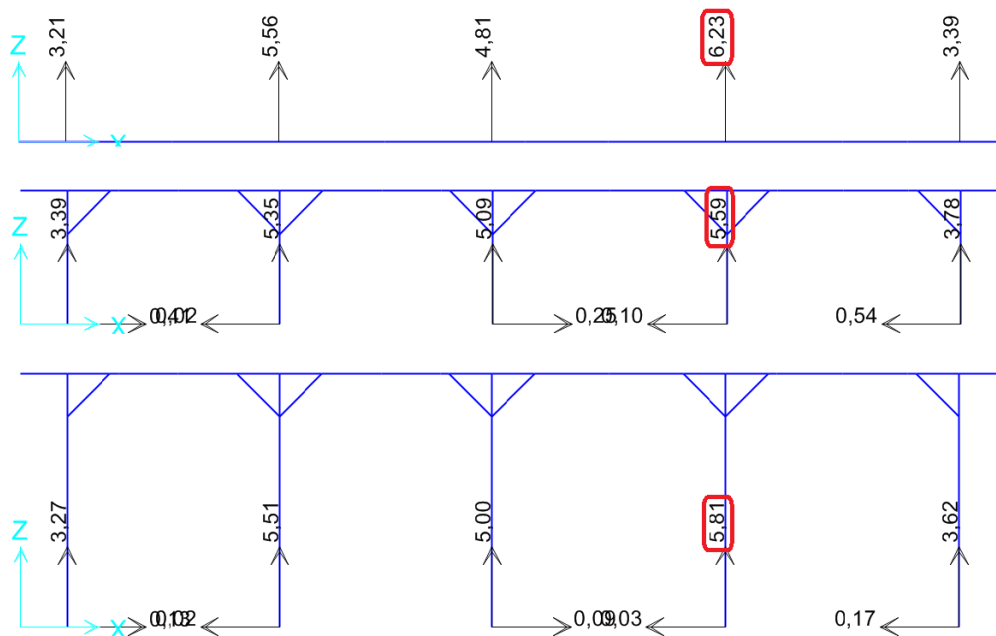
Pri modeliranju stika med natezno palico in vmesno lego smo upoštevali, da stik lahko prevzame razliko nateznih sil palice na zunanji in notranji strani.

Na mestu spoja stebra pod vmesno lego so bile opažene večje deformacije, ki bi jih morali po standardu Evrokod ustrezno upoštevati v računskem modelu. Za to se nismo odločili, saj je konstrukcija zasnovana tako, da se lahko večje deformacije poveznika zmanjšajo s pomočjo jeklenih palic.

Ker pri nobeni kombinaciji obtežbe ni prišlo do tlačnih napetosti v jeklenih palicah, smo vse rezultate dobili z linearno elastično analizo.

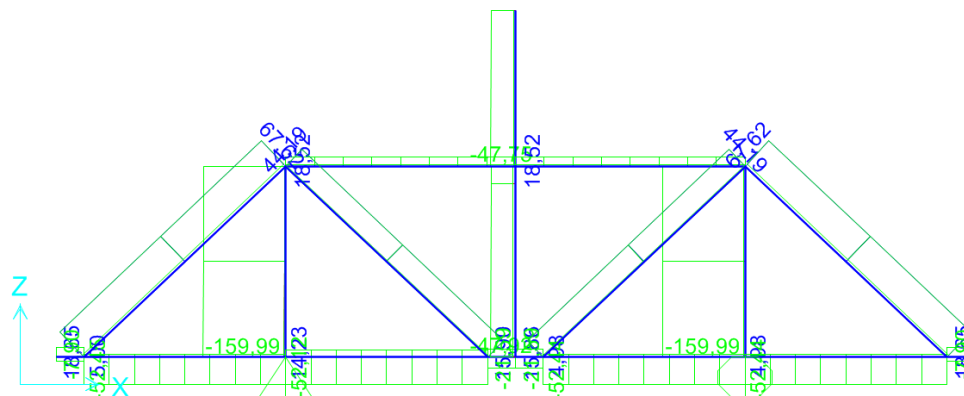
Obremenitve

V računskem modelu smo upoštevali vplivno širino $l = 5,6$ m, dobljeno z enakomerno enotsko obtežbo vmesne lege (Slika 38). Razlog, zakaj nismo vzeli največje vrednosti na sliki 38, je v tem, da so vzdolžne lege v resnici obremenjene s koncentriranim silami in vertikalna obtežba špirovcev je največja na vmesni legi.

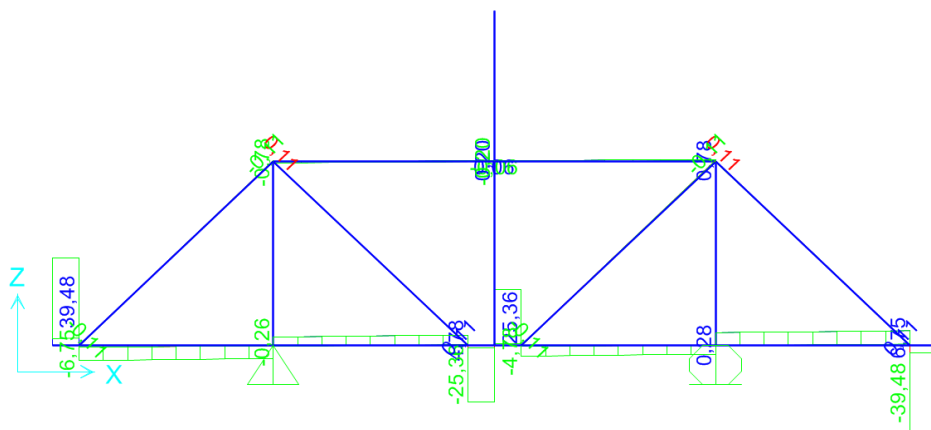
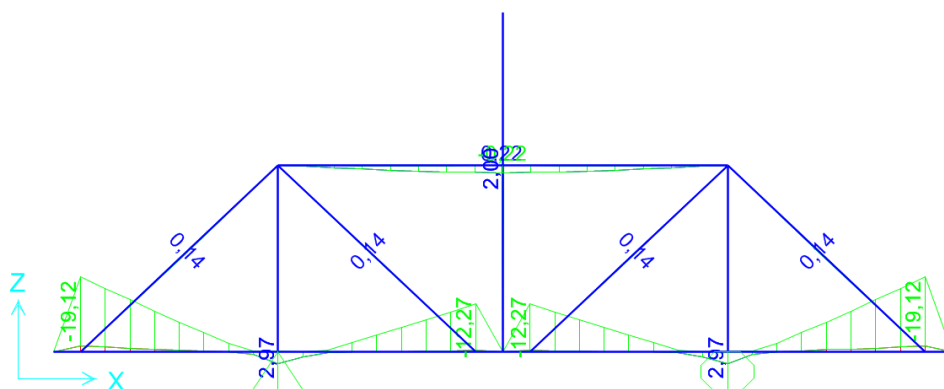


Slika 38: Reakcije enotske enakomerne zvezne obtežbe kapne, vmesne in slemenske lege [kN]

Vrednosti posameznih obtežb, smo dobili z množenjem reakcij, dobljenih iz modela špirovca (Poglavje 4.1) in vplivne širine l . Modifikacija je bila potrebna le pri lastni teži, kjer je bilo potrebno reakciji prišteti lastno težo vzdolžnih leg. Na slikah 39, 40 in 41 so prikazane notranje statične količine na modelu z zanemarljivo upogibno togostjo spoja prvega in drugega poveznika.



Slika 39: Ovojnica osnih sil N_{Ed} [kN]

Slika 40: Ovojnica prečnih sil V_{Ed} [kN]Slika 41: Ovojnica upogibnih momentov M_{Ed} [kNm]

4.4.1 Steber pod vmesno lego

Upogibne napetosti stebra pod vmesno lego se bojo kontrolirale šele v poglavju 4.5, kjer bodo na konstrukcijo dodane še vetrna obtežba vzdolž slemena in izbočitvene sile stebrov.

Kontrola osne stabilnosti:

$$A = b \cdot h = 18 \cdot 22 = 396 \text{ cm}^2$$

$$I_z = \frac{22 \cdot 18^3}{12} = 10692 \text{ cm}^4$$

$$\lambda_z = \frac{l_u}{\sqrt{\frac{I_z}{A}}} = \frac{297,5}{\sqrt{\frac{10692}{396}}} = 57,3$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{57,3}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,1}{740}} = 0,97$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3)) + \lambda_{rel,z}^2 = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (0,97 - 0,3)) + 0,97^2 = 1,04$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1,04 + \sqrt{1,04^2 - 0,97^2}} = 0,71$$

Kriterij obremenitve med kombinacijo 1 in 2:

$$\frac{N_{Ed}^M}{N_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S},$$

če je pogoj izpolnjen je merodajna kombinacija 2 (S), drugače je merodajna kombinacija 1 (M).

$$\frac{144}{160} = 0,900 < \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna je kombinacija 1 (M).}$$

Kontrola stabilnosti:

$$N_{Ed}^M = 144 \leq k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}^M \cdot A = 0,71 \cdot 1,292 \cdot 396 = 363 \text{ kN} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontrola kontaktnih napetosti na mestu poveznika

Če v kontroli normalnih napetosti pravokotno na vlakna privzamemo vrednost faktorja $k_{c,90} = 1$, potem smo nosilnost omejili s približno 1 % tlačnih deformacij. Tako je nosilnost v mejnem stanju nosilnosti omejena z vizualnim vidikom (mejno stanje uporabnosti), kar je zelo konservativno, zato bomo faktor $k_{c,90}$ izračunali po členu 6.1.5(4) standarda SIST EN 1995-1-1:2005. Standard Evrokod nas pri tem opomni, da pri izbiri višjih vrednosti faktorja $k_{c,90}$ tlačna deformacija naraste na okoli 10 % višine elementa.

Efektivna dolžina pri vmesni podpori (Slika 42):

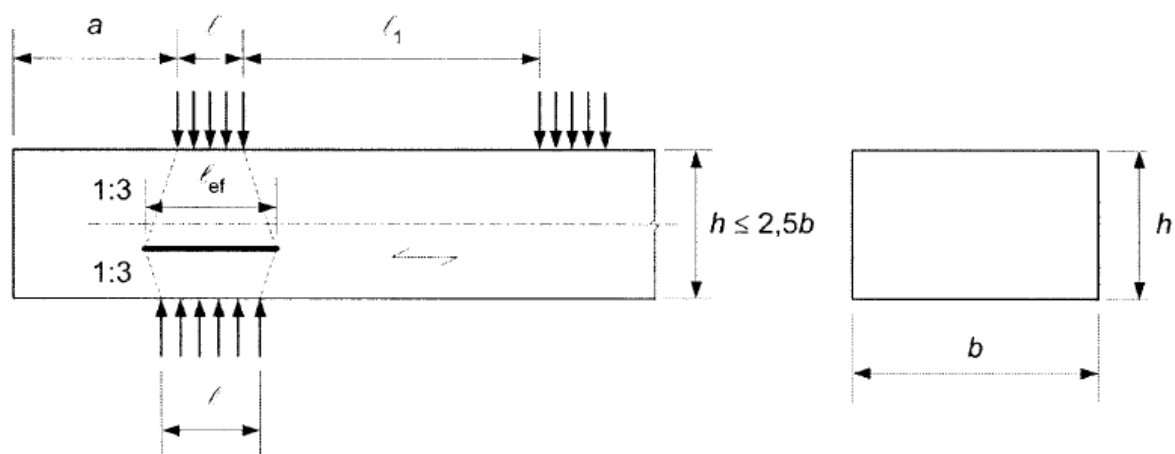
$$l = 18 \text{ cm}, \quad l_s = 15,5 \text{ cm}, \quad h = 26 \text{ cm}$$

$$l_{ef} = 0,5 \cdot \left(l + l_s + \frac{2 \cdot h}{3} \right) = 0,5 \cdot \left(18 + 15,5 + \frac{2 \cdot 26}{3} \right) = 25,4 \text{ cm}$$

Faktor $k_{c,90}$ posebej določimo za spodnjo in zgornjo stran poveznika:

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{l}{250} \right) \cdot \left(\frac{l_{ef}}{l} \right)^{0,5} = \left(2,38 - \frac{180}{250} \right) \cdot \left(\frac{254}{180} \right)^{0,5} = 2,0 \rightarrow \text{za zgornjo stran poveznika}$$

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{l_s}{250} \right) \cdot \left(\frac{l_{ef}}{l_s} \right)^{0,5} = \left(2,38 - \frac{115}{250} \right) \cdot \left(\frac{254}{115} \right)^{0,5} = 2,3 \rightarrow \text{za spodnjo stran poveznika}$$

Slika 42: Določitev faktorja $k_{c,90}$ za ločeno podporo (SIST EN 1995-1-1:2005, Slika 6.3)

Kontrola nosilnosti za kontaktno napetost med stebrom in poveznikom:

$$A_{net} = 18 \cdot 22 - 4 \cdot 18 = 324 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{c,90,d}^M = \frac{N_{ed}^M}{A_{net}} = \frac{144}{324} = 0,444 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^M = 2,0 \cdot 0,154 = 0,308 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow$$

pogoj ni izpolnjen

Kontrola nosilnosti za kontaktno napetost med jeklenim nosilcem in poveznikom:

$$A = 15,5 \cdot 22 = 341 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{c,90,d}^M = \frac{N_{ed}^M}{A} = \frac{144}{341} = 0,422 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^M = 2,3 \cdot 0,154 = 0,354 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow$$

pogoj ni izpolnjen

Kontrola kontaktnih napetosti na mestu vmesne lege

Zaradi prekinjene obtežbe jeklenih palic je enostavna določitev efektivne dolžine onemogočena, zato smo za izračun faktorja $k_{c,90}$ uporabili izraz za vmesno podporo kontinuirnega nosilca:

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{l}{250}\right) \cdot \left(1 + \frac{h}{6 \cdot l}\right) = \left(2,38 - \frac{220}{250}\right) \cdot \left(1 + \frac{220}{6 \cdot 220}\right) = 1,8 \leq 4$$

Obtežbo na kontaktno ploskev izračunamo iz razlike osne obremenitve stebra (Slika 39) in obtežbe, ki se prenaša preko ročic (Slika 30).

$$N_{Ed}^M = 144 \text{ kN} - \frac{(49,8 + 44,5)}{\sqrt{2}} = 77,3 \text{ kN}$$

$$N_{Ed}^S = 160 \text{ kN} - \frac{(58,5 + 52,3)}{\sqrt{2}} = 81,7 \text{ kN}$$

Kriterij obremenitve med kombinacijo 1 in 2:

$$\frac{N_{Ed}^M}{N_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S},$$

če je pogoj izpolnjen je merodajna kombinacija 2 (S), drugače je merodajna kombinacija 1 (M).

$$\frac{77,3}{81,7} = 0,946 < \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna je kombinacija 1 (M).}$$

Kontrola nosilnosti:

$$A_{net} = 18 \cdot 22 - 4 \cdot 22 = 308 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{c,90,d}^M = \frac{N_{Ed}^M}{A} = \frac{77,3}{308} = 0,251 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^M = 1,8 \cdot 0,154 = 0,277 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow$$

pogoj je izpolnjen

4.4.2 Steber pod slemenom

Upogibne napetosti stebra pod vmesno lego se bojo kontrolirale šele v poglavju 4.5, kjer bodo na konstrukcijo dodane še vetrna obtežba vzdolž slemena in izbočitvene sile stebrov.

Kontrola osne stabilnosti:

$$A = b \cdot h = 18 \cdot 22 = 396 \text{ cm}^2$$

$$I_z = \frac{22 \cdot 18^3}{12} = 10692 \text{ cm}^4$$

$$\lambda_z = \frac{l_u}{\sqrt{\frac{I_z}{A}}} = \frac{577}{\sqrt{\frac{10692}{396}}} = 111$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{111}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,1}{740}} = 1,88$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3)) + \lambda_{rel,z}^2 = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (1,88 - 0,3)) + 1,88^2 = 2,43$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2,43 + \sqrt{2,43^2 - 1,88^2}} = 0,25$$

Kriterij obremenitve med kombinacijo 1 in 2:

$$\frac{N_{Ed}^M}{N_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S},$$

če je pogoj izpolnjen je merodajna kombinacija 2 (S), drugače je merodajna kombinacija 1 (M).

$$\frac{47,2}{47,8} = 0,987 < \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna je kombinacija 1 (M).}$$

Kontrola stabilnosti:

$$N_{Ed}^M = 47,2 \leq k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}^M \cdot A = 0,25 \cdot 1,292 \cdot 396 = 128 \text{ kN} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontrola kontaktnih napetosti na mestu slemenske lege

Slemenska lega predstavlja kontinuirni nosilec preko več polj, zato faktor $k_{c,90}$ izračunamo z enačbo:

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{l}{250}\right) \cdot \left(1 + \frac{h}{6 \cdot l}\right) = \left(2,38 - \frac{220}{250}\right) \cdot \left(1 + \frac{220}{6 \cdot 220}\right) = 1,8 \leq 4$$

Obremenitev lahko določimo iz modela za slemensko lego (Slika 34), saj paličje dodatno ne obtežuje tega dela konstrukcije.

$$N_{Ed}^M = 2,41 \text{ kN}$$

Kontrola nosilnosti:

$$A_{net} = 18 \cdot 22 - 4 \cdot 22 = 308 \text{ cm}^2$$

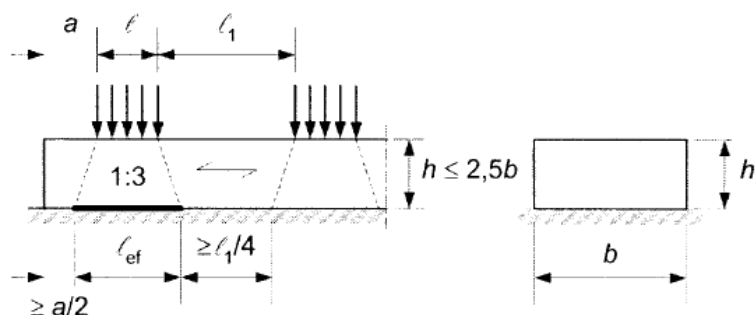
$$\sigma_{c,90,d}^M = \frac{N_{Ed}^M}{A} = \frac{2,41}{308} = 0,008 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^M = 1,8 \cdot 0,154 = 0,277 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow$$

pogoj je izpolnjen

Kontrola kontaktnih napetosti na mestu poveznika

Obravnavani steber je postavljen na element, ki povezuje oba kosa poveznika. Ta element je po celotni dolžini podprt s poveznikom, zato efektivno dolžino določimo iz slike 43.

$$l_{ef} = l + \frac{2 \cdot h}{3} = 18 + \frac{2 \cdot 22}{3} = 32,7 \text{ cm}$$



Slika 43: Določitev faktorja $k_{c,90}$ za kontinuirno podporo (SIST EN 1995-1-1:2005, Slika 6.3)

Izračun faktorja $k_{c,90}$:

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{l}{250}\right) \cdot \left(\frac{l_{ef}}{l}\right)^{0,5} = \left(2,38 - \frac{180}{250}\right) \cdot \left(\frac{327}{180}\right)^{0,5} = 2,2$$

Kontrola nosilnosti:

$$A_{net} = 18 \cdot 22 - 4 \cdot 18 = 324 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{c,90,d}^M = \frac{N_{ed}^M}{A} = \frac{47,2}{324} = 0,146 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^M = 2,2 \cdot 0,154 = 0,339 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow$$

pogoj je izpolnjen

4.4.3 Poveznik

Upogib s tlačno osno silo:

Pri upogibu z osno silo bomo kontrolirali del poveznika, ki je pod nadstreškom.

1. Kontrola nosilnosti prereza na mestu spoja poveznika in natezne palice:

$$N_{Ed,priv} = -41,3 \text{ kN}, M_{Ed,min} = -17,1 \text{ kNm}$$

$$A = b \cdot h = 22 \cdot 26 = 572 \text{ cm}^2$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{22 \cdot 26^2}{6} = 2479 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{c,0,d}^M = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{-41,3}{572} = 0,072 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d}^M = \frac{M_{ed}}{W} = \frac{-17,1}{2479} = 0,690 \text{ kN/cm}^2$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}^M}{f_{c,0,d}^M}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}^M}{f_{m,d}^M} = \left(\frac{0,072}{1,292}\right)^2 + \frac{0,690}{1,477} = 0,47 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Obtežna kombinacija 2.1:

$$N_{Ed,prisp} = -52,2 \text{ kN}, M_{Ed,min} = -19,1 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{c,0,d}^S = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{-52,2}{572} = 0,091 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d}^S = \frac{M_{Ed}}{W} = \frac{-19,1}{2479} = 0,770 \text{ kN/cm}^2$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}^S}{f_{c,0,d}^S}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}^S}{f_{m,d}^S} = \left(\frac{0,091}{1,454}\right)^2 + \frac{0,770}{1,662} = 0,47 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

2. Kontrola nosilnosti poveznika kot elementa na delu nadstreška:

Uklon okoli šibke osi

$$l = 400 \text{ cm}$$

$$A = b \cdot h = 22 \cdot 26 = 572 \text{ cm}^2$$

$$I_z = \frac{26 \cdot 22^3}{12} = 23071 \text{ cm}^4$$

$$\lambda_z = \frac{l u}{\sqrt{\frac{I_z}{A}}} = \frac{2 \cdot l}{\sqrt{\frac{I_z}{A}}} = \frac{2 \cdot 400}{\sqrt{\frac{23071}{572}}} = 126$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{126}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,1}{740}} = 2,14$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3)) + \lambda_{rel,z}^2 = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (2,14 - 0,3)) + 2,14^2 = 2,96$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2,96 + \sqrt{2,96^2 - 2,14^2}} = 0,20$$

Bočna zvrnitev

$$l_{ef} = l = 400 \text{ cm}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,05} = \frac{0,78 \cdot 22^2}{26 \cdot 400} \cdot 740 = 26,9 \text{ kN/cm}^2$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{2,4}{26,9}} = 0,30$$

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{za } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{za } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{za } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \rightarrow k_{crit} = 1$$

Obtežna kombinacija 1.1

$$\left(\frac{\sigma_{c,m,d}^M}{k_{crit} \cdot f_{c,m,d}^M} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}^M}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}^M} = \left(\frac{0,690}{1 \cdot 1,477} \right)^2 + \frac{0,072}{0,2 \cdot 1,292} = 0,50 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Obtežna kombinacija 2.1

$$\left(\frac{\sigma_{c,m,d}^S}{k_{crit} \cdot f_{c,m,d}^S} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}^S}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}^S} = \left(\frac{0,770}{1 \cdot 1,662} \right)^2 + \frac{0,091}{0,2 \cdot 1,454} = 0,53 \leq 1 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Dolžinski spoj poveznika

V dolžinskem spoju se pojavijo tlačne, natezne in upogibne napetosti. Tlačne napetosti se prenašajo preko kontaktnih napetosti na koncu vsakega kosa poveznika. Prenos nateznih napetosti je omogočen s tremi vijaki M20, ki povezujejo vsak del poveznika s povezovalnim elementom. V samem spoju pride samo do pozitivnih upogibnih momentov (natezne napetosti na spodnji strani), zato mora celoten upogibni moment prenesti povezovalni element.

1. Kontrola tlačnih napetosti

$$\frac{N_{Ed}^M}{N_{Ed}^S} = \frac{11,2}{21,6} = 0,52 < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S} = \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna kombinacija 2 (S)}$$

$$\sigma_{c,0,d}^S = \frac{N_{Ed}^S}{A} = \frac{21,6}{22 \cdot 26} = 0,038 \frac{kN}{cm^2} \leq f_{c,0,d}^S = 1,454 \frac{kN}{cm^2}$$

2. Kontrola nateznih napetosti

$$N_{Ed}^S = 15,9 \text{ kN}$$

$$A_{net} = (22 - 2) \cdot 22 = 440 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{t,0,d}^S = \frac{N_{Ed}^S}{A} = \frac{15,9}{440} = 0,036 \frac{kN}{cm^2} \leq f_{t,0,d}^S = 0,969 \frac{kN}{cm^2}$$

3. Kontrola strižnih napetosti vijakov

Priprava vrednosti za izračun karakteristične bočne nosilnosti vijaka:

$$t_1 = 260 \text{ mm}$$

$$t_2 = 220 \text{ mm}$$

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 20) \cdot 350 = 22,96 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{h,k} = f_{h,1,k} = f_{h,2,k}$$

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = 1$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 360 \cdot 20^{2,6} = 260676 \text{ Nmm}$$

$$F_{ax,Rk} = A_{podloška} \cdot 3 \cdot f_{c,90,k} = 9,43 \cdot 3 \cdot 0,25 = 7,07 \text{ kN}$$

kjer so:

- t_1 debelina lesa prvega kosa lesa, gledano iz strani nabijanja žebnja
- t_2 debelina zabijanja v drug kos lesa, gledano iz strani nabijanja žebnja
- $f_{h,k}$ karakteristična bočna trdnost žebnja v lesu
- $M_{y,Rk}$ karakteristični upogibni moment popolne plastifikacije
- $F_{ax,Rk}$ karakteristična izvlečna nosilnost

Bočna nosilnost zveze z enostrizno ravnino je omejena z naslednjimi porušnimi mehanizmi (Slika 19):

- a. Bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v prvem sestavnem elementu

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d = 22,96 \cdot 260 \cdot 20 = 120,3 \text{ kN}$$

- b. Bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v drugem sestavnem elementu

$$F_{v,Rk} = f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 22,96 \cdot 220 \cdot 20 = 101,0 \text{ kN}$$

- c. Zasuk veznega sredstva

$$F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = \frac{22,96 \cdot 260 \cdot 20}{1 + 1} \cdot \left[\sqrt{1 + 2 \cdot 1^2 \cdot \left[1 + \frac{220}{260} + \left(\frac{220}{260} \right)^2 \right] + 1^3 \cdot \left(\frac{220}{260} \right)^2} - 1 \cdot \left(1 + \frac{220}{260} \right) \right] + \frac{7,07}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 47,9 \text{ kN}$$

- d. Upogib veznega sredstva zaradi kontaktnih napetosti v drugem elementu

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{22,96 \cdot 260 \cdot 20}{2 + 1} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 1 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 260676}{22,96 \cdot 20 \cdot 260^2}} - 1 \right] + \frac{7,07}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 44,9 \text{ kN}$$

- e. Upogib veznega sredstva zaradi kontaktnih napetosti v prvem elementu

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{22,96 \cdot 220 \cdot 20}{1 + 2 \cdot 1} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 1^2 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (1 + 2 \cdot 1) \cdot 260676}{22,96 \cdot 20 \cdot 220^2}} - 1 \right] + \frac{7,07}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 38,4 \text{ kN}$$

- f. Upogib veznega sredstva v obeh sestavnih delih

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \cdot \sqrt{2 \cdot 260676 \cdot 22,96 \cdot 20} + \frac{7,07}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 19,6 \text{ kN}$$

Člen ($F_{ax,Rk}/4$), ki je prispevek izvlečne nosilnosti, je omejen na 25 % vrednosti člena, ki je v enačbi zapisan pred njim.

Projektna bočna nosilnost vijaka se določi kot minimalna vrednost nosilnosti pri posameznem porušnem mehanizmu.

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{19,6}{1,3} = 13,6 \text{ kN}$$

Celotna bočna nosilnost skupine vijakov se določi s pomočjo efektivnega števila vijakov.

$$n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} n = 3 \\ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}} = 3^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{780}{13 \cdot 20}} = 3,5 \end{array} \right.$$

$$F_{v,Rd,spoja} = n_{ef} \cdot F_{v,Rd} = 3 \cdot 13,6 = 40,8 \text{ kN}$$

Kontrola strižne nosilnosti:

$$N_{Ed}^S = 15,9 \text{ kN} \leq F_{v,Rd,spoja} = 40,8 \text{ kN} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

4. Kontrola upogiba

$$\frac{M_{Ed}^M}{M_{Ed}^S} = \frac{11,2 \text{ kN}}{11,3 \text{ kN}} = 0,991 < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S} = \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna kombinacija 1 (M)}$$

Za prerez upoštevamo kar celoten prerez povezovalnega elementa, saj je utor za čep stebra na tlačni strani prereza.

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{22 \cdot 22^2}{6} = 1775 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{m,d}^M = \frac{M_{ed}^M}{W} = \frac{11,2}{1775} = 0,631 \frac{kN}{cm^2} \leq f_{m,d}^M = 1,477 \frac{kN}{cm^2} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

4.4.4 Natezna palica

Natezno palico bomo za kontrolo striga obravnavali kot vijak in ne kot element.

Natezna obremenitev

Nosilnost v primeru natezne palice ni odvisna od trajanja obtežbe, zato moramo poiskati maksimalno natezno obremenitev. Največja osna obremenitev se pojavi v obtežni kombinaciji 2.1 in znaša 67,6 kN. Pri kontroli se je potrebno zavedati, da morajo to obtežbo prenesti dve palice M20.

Kontrola bruto prereza:

$$A = 3,14 \text{ cm}^2$$

$$F_{t,Ed,palice} = \frac{F_{t,Ed}}{2} = \frac{67,6}{2} = 33,8 \text{ kN}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3,14 \cdot 24}{1,0} = 75,4 \text{ kN}$$

$$F_{t,Ed,palice} = 33,8 \text{ kN} \leq F_{t,Rd} = 75,4 \text{ kN} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontrola neto prereza:

$$A_s = 2,45 \text{ cm}^2$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 36 \cdot 2,45}{1,25} = 63,5 \text{ kN}$$

$$F_{t,Ed,palice} = 33,8 \text{ kN} \leq F_{t,Rd} = 63,5 \text{ kN} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Strižne obremenitve

Strižne napetosti se v palici pojavijo na mestu krivljenja preko vmesne lege. Velikost strižne obremenitve dobimo iz vertikalne komponente natezne sile palice:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Ed,palice} = F_{t,Ed,palice} \cdot \sin 43,4^\circ = 33,8 \cdot \sin 43,4^\circ = 23,2 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 36 \cdot 3,14}{1,25} = 54,3 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed,palice} = 23,2 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 54,3 \text{ kN} \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontaktne napetosti na mestu poveznika

Spoj natezne palice in poveznika je konstruiran tako, da se obremenitev natezne palice prenese preko matice in jeklenega kotnika na stično površino med kotnikom in poveznikom. Na tej površini moramo kontrolirati kontaktne napetosti.

$$A_{c,\alpha} = b \cdot \check{s} = 22 \cdot 5 = 110 \text{ cm}^2$$

$$\frac{F_{Ed}^M}{F_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S}$$

$$\frac{60,5}{67,6} = 0,895 < 0,889 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen, merodajna je kombinacija 1.1 (M).}$$

$$\alpha = 43,4^\circ$$

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{1,292}{\frac{1,292}{1 \cdot 0,154} \cdot \sin^2 43,4^\circ + \cos^2 43,4^\circ} = 0,288 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F_{Ed}^M}{A_{c,\alpha}} = \frac{60,5}{110} = 0,550 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq f_{c,\alpha,d} = 0,288 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

Kontaktne napetosti na mestu vmesne lege

Na mestu vmesne lege je posamezna palica podložena z jekleno ploščo dimenzij 18 cm x 5 cm x 0,5 cm. Obremenitev stične ploskve dobimo iz seštevek vertikalnih komponent natezne palice na zunanji in notranji strani vmesne lege (Slika 39) in tlačne napetosti v stebru, iz modela za izračun vmesne lege (Slika 30).

$$F_{Ed}^M = (60,5 + 41,5) \cdot \sin 43,4^\circ + 3,9 = 74 \text{ kN}$$

$$F_{Ed}^S = (67,6 + 42,0) \cdot \sin 43,4^\circ + 4,6 = 80 \text{ kN}$$

Kriterij obremenitve:

$$\frac{F_{Ed}^M}{F_{Ed}^S} < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S}$$

$$\frac{74}{80} = 0,925 < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna je kombinacija 1 (M).}$$

Kontrola nosilnosti:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_{Ed}^M/2}{A} = \frac{74/2}{18 \cdot 5} = 0,411 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}^M = 1 \cdot 0,154 = 0,154 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

4.4.5 Škarnik

Natezne napetosti

Kriterij obremenitve:

$$\frac{N_{Ed}^M}{N_{Ed}^S} = \frac{16,9}{21,6} = 0,782 < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S} = \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna kombinacija 2 (S)}$$

Kontrola nosilnosti:

$$A_{net} = 2 \cdot (b \cdot h - b \cdot d) = 2 \cdot (5 \cdot 30 - 5 \cdot 1,4) = 286 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{t,0,d}^S = \frac{21,6}{286} = 0,076 \frac{kN}{cm^2} \leq f_{t,0,d}^S = 0,969 kN/cm^2 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Kontrola strižnih napetosti vijakov

Priprava vrednosti za izračun karakteristične bočne nosilnosti vijaka:

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

$$t_1 = 50 \text{ mm}$$

$$t_2 = 120 \text{ mm}$$

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 14) \cdot 350 = 24,68 \frac{N}{mm^2} = f_{h,1,k}$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 14 = 1,56$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{24,68}{1,56 \cdot \sin^2 43,4^\circ + \cos^2 43,4^\circ} = 19,52 \frac{N}{mm^2} = f_{h,2,k}$$

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = \frac{19,52}{24,68} = 0,79$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 360 \cdot 14^{2,6} = 103123 \text{ Nmm}$$

$$F_{ax,Rk} = A_{podloška} \cdot 3 \cdot f_{c,90,k} = 9,43 \cdot 3 \cdot 0,25 = 7,07 \text{ kN}$$

kjer so:

d premer vijaka v mm

t_1 debelina lesa prvega kosa lesa, gledano iz strani nabijanja žebnja

t_2 debelina zabijanja v drug kos lesa, gledano iz strani nabijanja žebnja

α kot med silo in smerjo vlaken

$f_{h,k}$ karakteristična bočna trdnost žebnja v lesu

$M_{y,Rk}$ karakteristični upogibni moment popolne plastifikacije

$F_{ax,Rk}$ karakteristična izvlečna nosilnost

Bočna nosilnost zveze z dvostržno ravnino je omejena z naslednjimi porušnimi mehanizmi (Slika 44):

- a. Bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v zunanjem sestavnem elementu

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d = 24,68 \cdot 50 \cdot 14 = 17,3 \text{ kN}$$

- b. Bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v srednjem sestavnem elementu

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 0,5 \cdot 19,52 \cdot 120 \cdot 14 = 16,4 \text{ kN}$$

- c. Upogib veznega sredstva v srednjem sestavnem elementu

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4\beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{24,68 \cdot 50 \cdot 14}{2 + 0,79} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 0,79 \cdot (1 + 0,79) + \frac{4 \cdot 0,79 \cdot (2 + 0,79) \cdot 103123}{24,68 \cdot 14 \cdot 50^2}} - 0,79 \right] + \frac{7,07}{4}$$

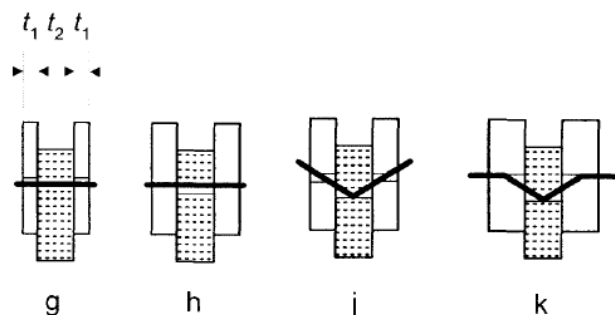
$$= 10,3 \text{ kN}$$

- d. Upogib veznega sredstva v vseh treh sestavnih elementih

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,79}{1 + 0,79}} \cdot \sqrt{2 \cdot 103123 \cdot 24,68 \cdot 14} + \frac{7,07}{4} = 10,9 \text{ kN}$$

Člen ($F_{ax,Rk} / 4$), ki je prispevek izvlečne nosilnosti, je omejen na 25 % vrednosti člena, ki je v enačbi zapisan pred njim.



Slika 44: Porušni model za dvostržne zveze lesa (SIST EN 1995-1-1:2005, Slika 8.2)

Projektna bočna nosilnost vijaka se določi kot minimalna vrednost nosilnosti pri posameznem porušnem mehanizmu.

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{10,3}{1,3} = 7,13 \text{ kN}$$

Kontrola strižne nosilnosti:

$$N_{Ed}^S = 21,6 \text{ kN} \leq F_{v,Rd,spoja} = 7,13 \text{ kN} \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

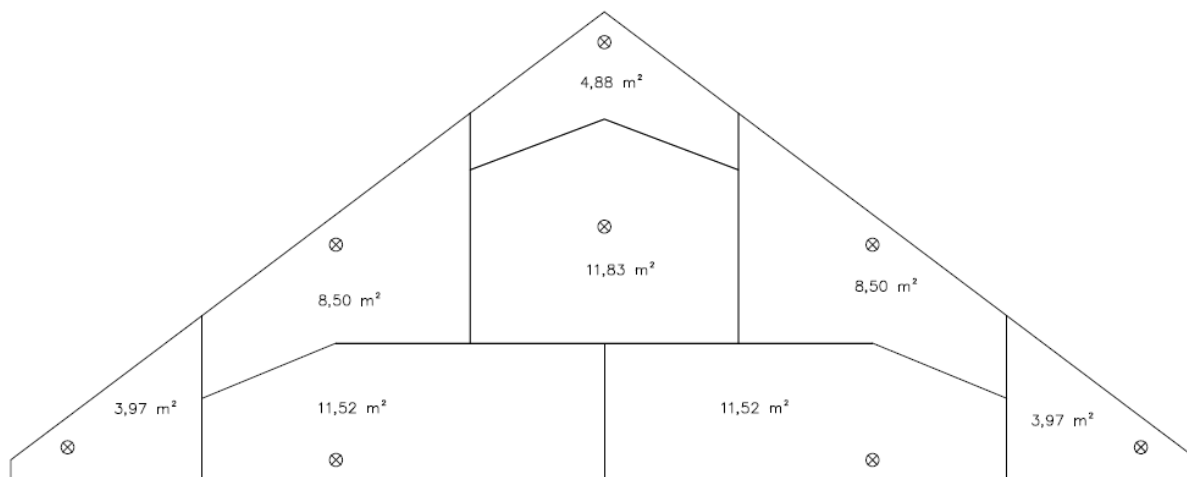
4.5 Zavarovalna konstrukcija

Elemente zavarovalne konstrukcije v našem primeru predstavljajo stebri, ročice in vzdolžne lege. Ti elementi so obremenjeni z vertikalno obtežbo (lastna teža, sneg, veter) in hkrati tudi s horizontalno obtežbo (izbočitvene sile stebrov in vetrna obtežba, ki deluje vzdolž slemena). Ker je določitev horizontalne obtežbe zamudno opravilo, smo jo določili le za najbolj neugodno kombinacijo vplivov (kombinacija 4) in jo uporabili na vseh ostalih obtežnih kombinacijah. S tem postopkom določevanja notranjih sil zavarovalne konstrukcije smo zagotovo na varni strani.

Računski model

Za izračun zavarovalne konstrukcije lahko uporabimo modela za izračun vmesne in slemenske lege, saj v teh dveh modelih nastopajo tudi ročice in stebri. Ker ročice v nategu nimajo nosilnosti, lahko opravimo linearno elastično nosilnost, pri kateri izločimo ročice z nateznimi obremenitvami, ali pa v programu Sap2000 izvedemo nelinearno analizo, pri kateri program samodejno določi zanemarljivo togost ročice v nategu.

Obtežbo vetra in izbočitvene sile določimo iz obtežne kombinacije 4, ki je prevladujoča kombinacija za dimenzioniranje zavarovalne konstrukcije. Velikost in pozicijo vetrne obtežbe določimo s pomočjo slike 45, pri kateri je upoštevano, da se obtežba prenaša s polovičnimi razponi med različnimi podporami. Izbočitvene sile posameznega stebra izračunamo kot 1/50 tlačne osne obremenitve dobljene iz obtežne kombinacije 4. Za določitev osnih sil posameznih stebrov si pomagamo s vplivnimi širinami iz slike 38 in obremenitvami najbolj obremenjenega stebra (Slika 39). Pri tem naredimo majhno napako, saj ne upoštevamo področja vetra B. Z izračunanimi silami obremenimo konstrukcijo enkrat v smeri vzhod – zahod in obratno.



Slika 45: Vplivne površine za vetrno obtežbo zavarovalne konstrukcije

Obtežba za vmesno lego:

$$A = 8,50 \text{ m}^2$$

$$F_{w,privetrna,d} = (A \cdot q_p \cdot c_{pe,D}) \cdot 1,5 = (8,50 \cdot 0,427 \cdot 0,729) \cdot 1,5 = 3,97 \text{ kN}$$

$$F_{w,zavetrna,d} = (A \cdot q_p \cdot c_{pe,E}) \cdot 1,5 = (8,50 \cdot 0,427 \cdot -0,375) \cdot 1,5 = -2,04 \text{ kN}$$

Vrednosti izbočitvenih sil posameznih stebrov so podane v preglednici 13, v kateri indeks stebra i pomeni zaporedno pozicijo stebra, gledano iz zahodne strani objekta. Osnovno silo posameznega stebra izračunamo z naslednjo enačbo:

$$N_{Ed,steber\ i} = \frac{l_i}{l_4} \cdot N_{Ed,steber\ 4}$$

Preglednica 13: Izbočitvene sile stebrov pod vmesno lego

	l_i/l_4	N_{Ed} [kN]			$F_{izbočitev,Ed}$ [kN] kombinacija 4/50
		G	S (nenakopičen)	W +	
Steber 1	0,61	24,3	35,6	12,1	1,55
Steber 2	0,96	38,3	56,2	19,1	2,45
Steber 3	0,91	36,4	53,4	18,2	2,33
Steber 4	1,00	40,0	58,7	19,9	2,56
Steber 5	0,68	27,1	39,7	13,5	1,73

Obtežba za slemensko lego:

$$A_1 = 11,83 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 4,88 \text{ m}^2$$

$$F_{w,privetrna,1,d} = (A \cdot q_p \cdot c_{pe,D}) \cdot 1,5 = (11,83 \cdot 0,427 \cdot 0,729) \cdot 1,5 = 5,5 \text{ kN}$$

$$F_{w,zavetrna,1,d} = (A \cdot q_p \cdot c_{pe,E}) \cdot 1,5 = (11,83 \cdot 0,427 \cdot -0,375) \cdot 1,5 = -2,8 \text{ kN}$$

$$F_{w,privetrna,2,d} = (A \cdot q_p \cdot c_{pe,D}) \cdot 1,5 = (4,88 \cdot 0,427 \cdot 0,729) \cdot 1,5 = 2,3 \text{ kN}$$

$$F_{w,zavetrna,2,d} = (A \cdot q_p \cdot c_{pe,E}) \cdot 1,5 = (4,88 \cdot 0,427 \cdot -0,375) \cdot 1,5 = -1,2 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,steber\ i} = \frac{l_i}{l_4} \cdot N_{Ed,steber\ 4}$$

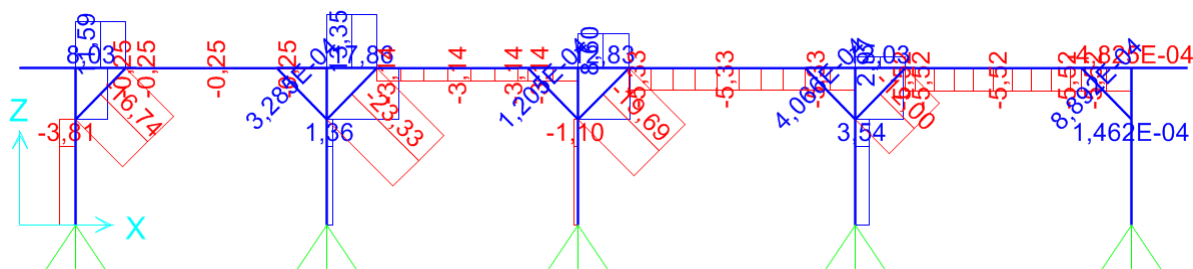
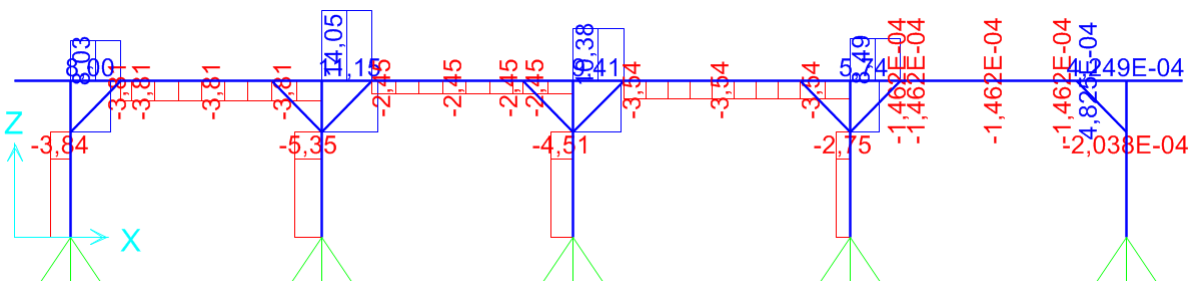
Preglednica 14: Izbočitvene sile stebrov pod slemensko lego

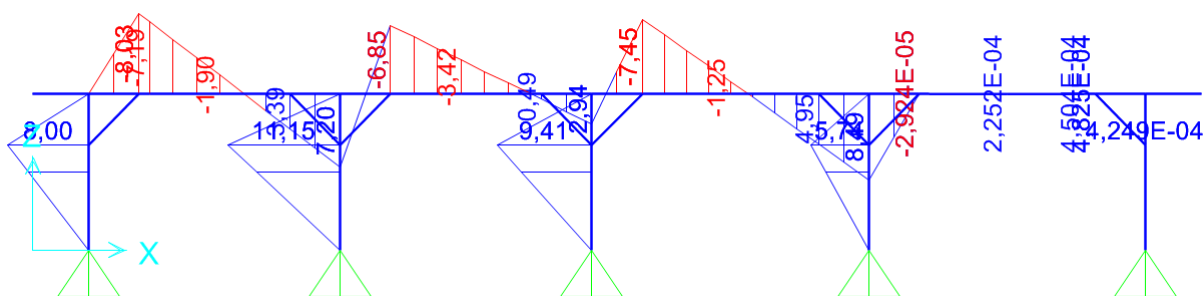
	l_i/l_4	N_{Ed} [kN]			$F_{izbočitev,d}$ [kN]
		G	S (nenakopičen)	W +	kombinacija 4/50
Steber 1	0,57	7,5	11,3	0,4	0,38
Steber 2	0,99	13,0	19,6	0,7	0,66
Steber 3	0,92	11,9	18,1	0,6	0,61
Steber 4	1,00	13,02	19,7	0,7	0,67
Steber 5	0,66	8,6	13,1	0,4	0,44

Obremenitve

Obremenitve podane na slikah 46, 47 in 48 predstavljajo obremenitev na mestu vmesne lege pri vetru iz vzhodne strani. Razlog, zakaj pride do nateznih obremenitev v stebrih, je v tem, da smo morali zaradi globalne stabilnosti spoj stebra in vmesne lege modelirati kot členek, ki onemogoča različne premike stebra in vmesne lege v vertikalni smeri. Vrednosti osnih sil so tako nerealne in jih je potrebno upoštevati na naslednji način:

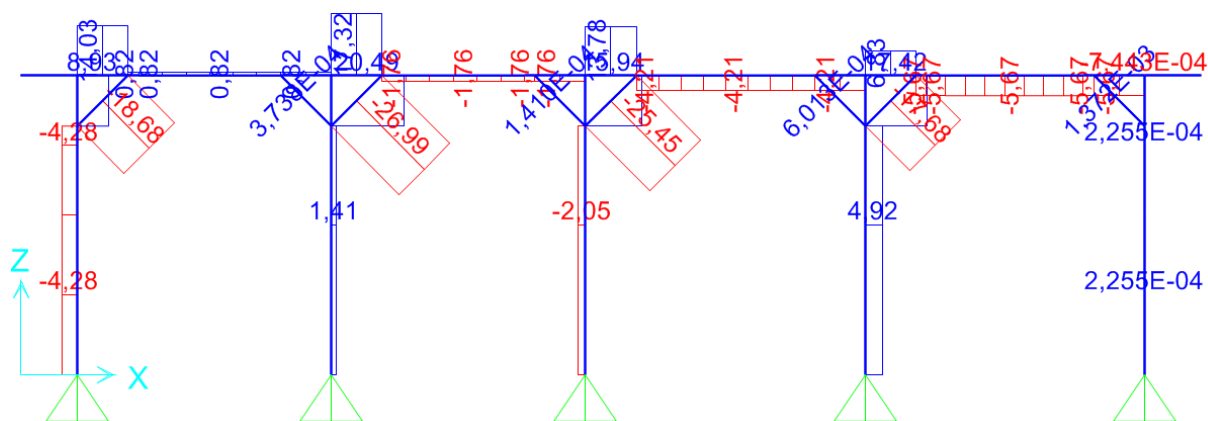
- na delu stebra med ročico in vmesno lego je potrebno za osno obremenitev privzeti vrednost 0,
- na delu stebra med poveznikom in ročico pa je potrebno za osno obremenitev privzeti tlačno obremenitev, katere vrednost dobimo iz vertikalne projekcije osne sile v ročici. Ta vrednost je enaka razliki osnih sil v stebru, nad in pod spojem ročice (Slike 46, Slike 49).

Slika 46: Osne sile N_{Ed} [kN], veter iz vzhodne straniSlika 47: Prečne sile V_{Ed} [kN], veter iz vzhodne strani

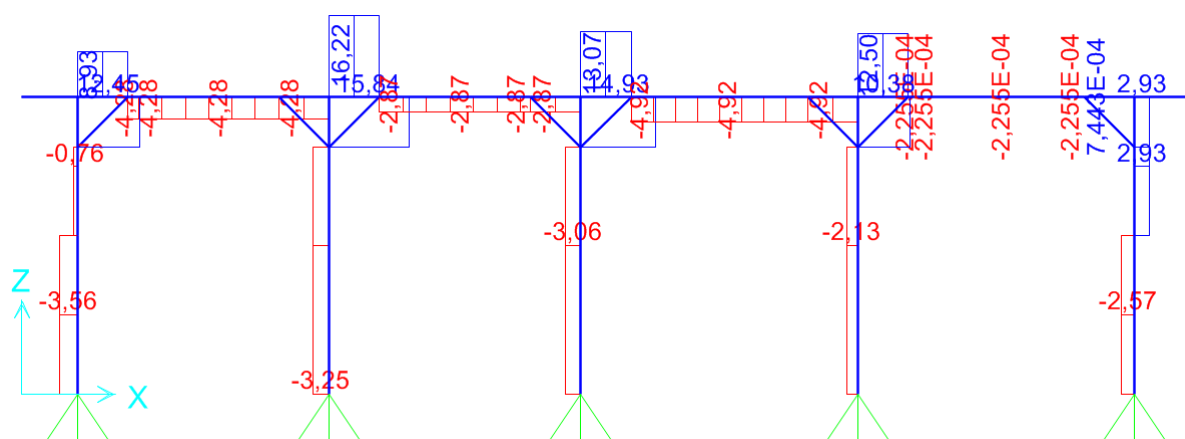


Slika 48: Upogibni momenti M_{Ed} [kNm], veter iz vzhodne strani

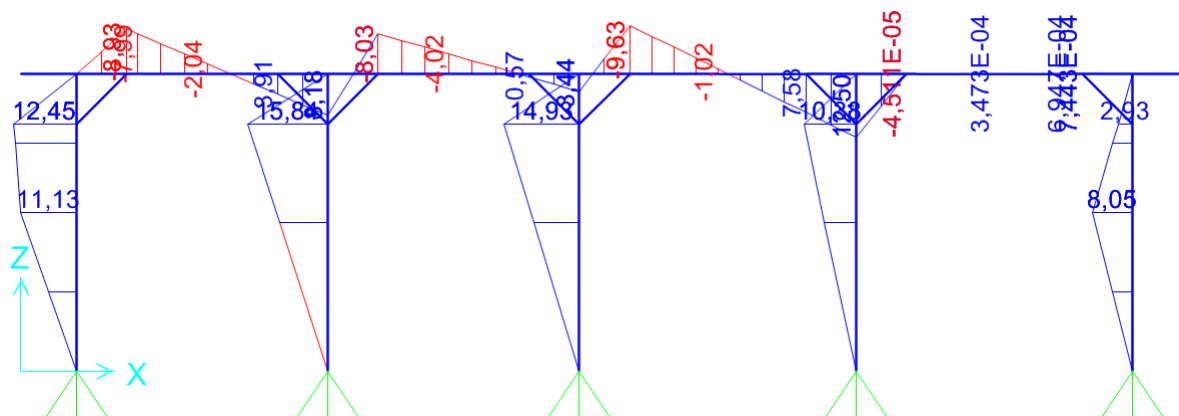
Obremenitve podane na slikah 49, 50 in 51 predstavljajo obremenitev na mestu slemenske lege, pri vetru iz vzhodne strani. Osne sile stebrov na mestu slemenske lege se interpretirajo na enak način kot je opisano v prejšnjem odstavku.



Slika 49: Osne sile N_{Ed} [kN], veter iz vzhodne strani



Slika 50: Prečne sile V_{Ed} [kN], veter iz vzhodne strani

Slika 51: Upogibni momenti M_{Ed} [kNm], veter iz vzhodne strani

Maksimalna obremenitev ročice vmesne lege

Ker ročice služijo kot elementi zavarovalne konstrukcije in kot elementi, ki zmanjšujejo razpon vzdolžnih leg, bomo maksimalno obremenitev ročic določili z seštevkom:

- največje osne sile v ročici zaradi vertikalne obtežbe vzdolžnih leg (obtežna kombinacija 1 in 2),
- največje osne sile v ročici zaradi horizontalne obtežbe vzdolžnih leg (obtežna kombinacija 4).

$$N_{Ed}^M = -47,8 - 23,3 = -71,1 \text{ kN}$$

$$N_{Ed}^S = -57,4 - 23,3 = -80,7 \text{ kN}$$

Kriterij obremenitve:

$$\frac{N_{Ed}^M}{N_{Ed}^S} = \frac{71,1}{80,7} = 0,881 < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S} = \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna kombinacija 2 (S)}$$

Kontrola nosilnosti:

$$N_{Ed}^S = 80,7 \text{ kN} \leq 8,8 \text{ kN} \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

Maksimalna obremenitev ročice slemenske lege

$$N_{Ed}^M = -32,7 - 27 = -59,7 \text{ kN}$$

$$N_{Ed}^S = -33,2 - 27 = -60,2 \text{ kN}$$

Kriterij obremenitve:

$$\frac{N_{Ed}^M}{N_{Ed}^S} = \frac{59,7}{60,2} = 0,992 < \frac{k_{mod}^M}{k_{mod}^S} = \frac{0,8}{0,9} = 0,889 \rightarrow \text{merodajna kombinacija 1 (M)}$$

Kontrola nosilnosti:

$$N_{Ed}^M = 59,7 \text{ kN} \leq 7,8 \text{ kN} \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

Maksimalna upogibna obremenitev stebra vmesne lege

Maksimalne upogibne obremenitve so v sredinskem stebru. Merodajna je obtežna kombinacija 1 (glej poglavje 4.4.1).

$$N_{Ed,prip}^M = -129,3 - 13,9 = 143,2 \text{ kN}, M_{Ed,max}^M = 6,6 + 9,4 = 16 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{c,0,d}^M = \frac{N_{Ed,prip}^M}{A} = \frac{-143,2}{18 \cdot 22} = -0,362 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{m,y,d}^M = \frac{M_{Ed,max}^M}{W_y} = \frac{6 \cdot 16}{18 \cdot 22^2} = 1,102 \text{ kN/cm}^2$$

$$I_y = \frac{18 \cdot 22^3}{12} = 15972 \text{ cm}^4$$

$$\lambda_y = \frac{lu}{\sqrt{\frac{I_y}{A}}} = \frac{197,5}{\sqrt{\frac{15972}{18 \cdot 22}}} = 31,1$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{31,1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,1}{740}} = 0,53$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3)) + \lambda_{rel,y}^2 = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (0,53 - 0,3)) + 0,53^2 = 0,66$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,66 + \sqrt{0,66^2 - 0,53^2}} = 0,94$$

$$k_{c,z} = 0,71$$

Kontrola stabilnosti:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}^M}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}^M} + \frac{\sigma_{m,y,d}^M}{f_{m,y,d}^M} = \frac{0,362}{0,94 \cdot 1,292} + \frac{1,102}{1,477} = 1,04 \leq 1,0 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}^M}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}^M} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}^M}{f_{m,y,d}^M} = \frac{0,362}{0,71 \cdot 1,292} + 0,7 \cdot \frac{1,102}{1,477} = 0,92 \leq 1,0 \rightarrow \text{pogoj je izpolnjen}$$

Maksimalna upogibna obremenitev stebra slemenske lege

Maksimalne upogibne obremenitve so v sredinskem stebru. Merodajna je obtežna kombinacija 1 (glej poglavje 4.4.2).

$$N_{Ed,prip}^M = -43,2 - 18 = 61,2 \text{ kN}, M_{Ed,max}^M = 3,6 + 14,9 = 18,5 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{c,0,d}^M = \frac{N_{ed,prip}^M}{A} = \frac{-61,2}{18 \cdot 22} = -0,155 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{m,y,d}^M = \frac{M_{ed,max}^M}{W_y} = \frac{6 \cdot 18,5}{18 \cdot 22^2} = 1,274 \text{ kN/cm}^2$$

$$I_y = \frac{18 \cdot 22^3}{12} = 15972 \text{ cm}^4$$

$$\lambda_y = \frac{l_u}{\sqrt{\frac{I_y}{A}}} = \frac{477}{\sqrt{\frac{15972}{18 \cdot 22}}} = 75,1$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{75,1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,1}{740}} = 1,27$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3)) + \lambda_{rel,y}^2 = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (1,27 - 0,3)) + 1,27^2 = 1,41$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,41 + \sqrt{1,41^2 - 1,27^2}} = 0,50$$

$$k_{c,z} = 0,25$$

Kontrola stabilnosti:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}^M}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}^M} + \frac{\sigma_{m,y,d}^M}{f_{m,y,d}^M} = \frac{0,155}{0,5 \cdot 1,292} + \frac{1,274}{1,477} = 1,10 \leq 1,0 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}^M}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}^M} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}^M}{f_{m,y,d}^M} = \frac{0,155}{0,25 \cdot 1,292} + 0,7 \cdot \frac{1,274}{1,477} = 1,08 \leq 1,0 \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen}$$

Komentar

Iz preglednic 13 in 14 ter slik 46 in 49 lahko ugotovimo, da so izbočitvene sile odvisne od osnih sil v stebrih pri posamezni obtežni kombinaciji, na te osne sile stebrov pa zopet vplivajo izbočitvene sile. To pomeni, da bi morali v splošnem notranje sile elementov zavarovalne konstrukcije določiti iterativno. V prvem koraku bi bilo potrebno za vsako obtežno kombinacijo izračunati osne sile v stebrih. Iz teh osnih sil bi izračunali izbočitvene sile in iz njimi obremenili zavarovalno konstrukcijo. Dobljene osne sile stebrov bi prišteli osnim silami dobljenim v prvem koraku in znova določili izbočitvene sile, iz katerih bi znova dobili nove vrednosti osnih sil stebrov. Iteracijo bi končali, ko bi bila razlika izbočitvenih sil v zaporednem koraku ustrezno majhna.

5 MOŽNE REŠITVE OBSTOJEČE KONSTRUKCIJE

Zaradi dotrajanosti strešne kritine in varnostni pri izvajanju del predlagamo, da se vsi ukrepi za izboljšanje varnosti konstrukcije izvedejo ob prekrivanju ostrešja. V okviru sanacije ostrešja bi bilo potrebno narediti naslednje ukrepe:

- izravnava jeklenega I profila na mestu notranjega stebra,
- dobetoniranje dveh armirano betonskih stebrov do zgornje višine jeklenega I profila,
- zagotoviti ustrezno nosilnost spojev ročic z dodatnimi jeklenimi profili ali z zamenjavo celotnih ročic z novimi, ki bi imele spoj oblikovan z zasekom po celotni širini stebra in vzdolžne lege,
- povečanje zaseka na mestu spoja poveznika in natezne palice ter zamenjava jeklenega kotnika z močnejšim,
- zagotoviti ustrezno dodatno nosilnost spoja škarnika in špirovca,
- namestitev jeklenega U profila na mestu naleganja nateznih palic na vzdolžne lege in zavaritev nateznih palic na ta profil,
- namestitev togih jeklenih plošč pod poveznik, na mestih kjer le-ta nalega na jeklen I profil,
- zagotoviti ustrezno sidranje špirovcev v vzdolžne lege,
- zagotoviti ustrezno sidranje poveznikov v armirano betonske stebre oziroma v jeklen I profil,
- zamenjava betonske strešne kritine z jekleno profilirano pločevino, ki bi predstavljala le 16 % teže obstoječe kritine.

6 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi je bilo analizirano leseno ostrešje gospodarskega poslopja po standardu Evrokod. Ugotovljeno je bilo, da so ustrezno dimenzionirane le natezne palice. Če bi pri kapni legi in špirovcu upoštevali ugoden vpliv kontaktnih napetosti na mestu zaseka in možnost prerazporeditve upogibnih momentov iz mesta podpore v polje, bi lahko bila ustrezno dimenzionirana tudi ta dva elementa. Pri vmesni in slemenski legi so sicer izpolnjene vse merodajne kontrole nosilnosti, vendar so pri tem upoštewane ročice z neomejeno nosilnostjo in zanemarljivo podajnostjo spojev. Razlogi za uporabo teh dveh predpostavk so navedene v poglavju 4.2 in poglavju 4.3.2. Pri povezniku so bile na mestu naleganja stebrov pričakovano presežene kontaktne napetosti pravokotno na smer vlaken.

Smotrno sanacijo objekta z namenom, da bo ustrezal standardu Evrokod, je možno zagotoviti z rešitvami opisanimi v poglavju 5.

Pri dimenzioniranju obravnavane konstrukcije smo naleteli tudi na nekaj pomanjkljivosti dela standarda Evrokod, ki se nanaša na projektiranje lesenih konstrukcij. V standardu ni bilo mogoče najti nekaterih splošnih navodil, kako modelirati kontinuirni nosilec, ki je podprt s stebri in ročicami. Težave so nastopile tudi pri določitvi nosilnosti za tlačno obremenitev pravokotno na vlakna. Standard sicer podaja faktor povečanja tlačne nosilnosti pravokotno na vlakna ($k_{c,90}$) za nosilce, ki so centrično obremenjeni po celotni širini prereza, ne poda pa nekaterih smernih vrednosti faktorja povečanja nosilnosti za spoje, ki se pogosto uporabljajo pri konstruiranju lesenih ostrešji. Tako smo pri kontroliranju spoja ročice, spoja poveznika in natezne palice, spoja špirovca in vzdolžne lege ter spoja kapne lege in poveznika privzeli vrednost faktorja $k_{c,90} = 1$, čeprav jo standard navzgor omejuje s vrednostjo 4. Ne toliko pomanjkljivost kot kompliciranost smo opazili pri določitvi izbočitvenih sil zavarovalne konstrukcije, ki jih moramo v splošnem določiti s pomočjo iteracije. V obravnavani diplomski nalogi se iteracije nismo poslužili, saj je bilo povečanje osnih obremenitev stebrov zaradi obtežbe na zavarovalno konstrukcijo zanemarljivo v primerjavi z osno obremenitev stebrov, ki je posledica preostale obtežbe.

VIRI

Beg, D., Pogačnik, A. 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: str. 3 -31, 3-69-3-72,5-53.

Standardi:

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

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

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

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

SIST EN 1991-1-4:2004/A101. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije. Del 1-4: Splošni vplivi – Obtežba vetra – Nacionalni dodatek

SIST EN 1995-1-1:2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij. Del 1-1: Splošni pravila in pravila za stavbe

SIST EN 1995-1-1:2005/A101. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij. Del 1-1: Splošni pravila in pravila za stavbe – Nacionalni dodatek

PRILOGE

Prologa A: ARHITEKTURNI NAČRTI

A1: Tloris pritličja

A2: Tloris ostrešja

A3: Prerez B – B

A4: Prerez A – A

A5: Fasade

A6: Detajl A in B