

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Šimun Kodžoman

**Primerjava izračuna lesenih lepljenih nosilcev s
poenostavljenimi izrazi iz standarda Evrokod 5
s podrobnejšo analizo z računalniškim
programom**

Diplomska naloga št.: 428

Mentor:
doc. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 24. 6. 2011

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **ŠIMUN KODŽOMAN** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom **»PRIMERJAVA IZRAČUNA LESENIH LEPLJENIH NOSILCEV S POENOSTAVLJENIMI IZRAZI IZ STANDARDA EVROKOD 5 S PODROBNEJŠO ANALIZO Z RAČUNALNIŠKIM PROGRAMOM«.**

Izjavljam, da prenašam vse avtorske pravice diplomske naloge na Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani.

Ljubljana, 15.07.2011

Šimun Kodžoman

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 624.072.2:691.11(043.2)
- Avtor:** Šimun Kodžoman
- Mentor:** doc. dr. Jože Lopatič, univ. dipl. inž.grad.
- Naslov:** Primerjava izračuna lesenih lepljenih nosilcev s poenostavljenimi izrazi iz standarda Evrokod 5 s podrobnejšo analizo z računalniškim programom
- Obseg in oprema:** 54 str., 39 pregl., 36 slik.
- Ključne besede:** leseni lepljeni nosilci, nosilci, lesene konstrukcije, Evrokod 5, standardi, računalniški program

Izvleček

V diplomski nalogi sem analiziral različne oblike lesenih lepljenih nosilcev ki sem jih za potrebe naloge uporabil na namišljeni konjušnici v območju Ljubljane. Obravnaval sem enokapni nosilec, dvokapni nosilec in ukrivljena nosilca s spremenljivo ter konstantno višino. Obtežba in obtežni primer sta določena po SIST EN 1991. Nosilce sem računal na dva različna načina, s poenostavljenimi izrazi iz Evrokoda 5 in s podrobnejšo analizo z računalniškim programom Tower. Primerjal sem odstopanja napetosti od linearne porazdelitve v kritičnih območjih za dva načina izračuna, ter spreminjanje teh odstopanj glede na geometrijske lastnosti posameznega nosilca. Pri vseh primerih so bila odstopanja med izračunom po Evrokodu 5 in metodi končnih elementov minimalna in v inženirsko sprejemljivih mejah.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.072.2:691.11(043.2)

Author: Šimun Kodžoman

Supervisor: Assist.Prof. Ph.D. Jože Lopatič, b. s. c. a.

Title: The design comparison of the glued laminated members by standard Eurocode 5 and more detailed analysis by a computer program

Notes: 54 p., 39 tab., 36 fig.

Key words: glued laminated members, members, glulam, Eurocode 5, standards, computer program

Abstract

The thesis contains an analysis of different types of glued laminated members that have been used for the tasks used on imaginary stables in Ljubljana area. This analysis focuses on tapered beam, double-tapered beam, pitched cambered beam and curved beam. Loading and load case are determined by SIST EN 1991. Two methods of calculation have been used; simplified equations from Eurocode 5 and a more detailed analysis enabled by a computer program Tower. In addition, the thesis offers a comparison of deviations of the linear stress distribution in critical areas for the two methods of calculation and changes in these deviations caused by a change to the geometric characteristics of members. In all cases, the deviations between the calculation from Eurocode 5 and the finite element method was minimal and within acceptable limits.

ZAHVALA

Mojim staršem za razumevanje in potrpežljivost.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	OSNOVNI PODATKI O NOSILCIH	2
2.1	Arhitektura objekta	2
2.2	Tehnični podatki o nosilcih	4
2.2.1	Enokapni nosilec	7
2.2.2	Dvokapni nosilec	7
2.2.3	Ukrivljen nosilec s spremenljivo višino	8
2.2.4	Ukrivljen nosilec s konstantno višino	9
3	VPLIVI NA KONSTRUKCIJO.....	11
3.1	Stalna obtežba	11
3.2	Koristna obtežba	12
3.3	Določitev vrednosti vpliva snega	13
3.4	Določitev vrednosti vpliva vetra	16
3.4.1	Izračun osnovne hitrosti vetra.....	17
3.4.2	Tlak vetra w_e na zunanje ploskve.....	18
3.4.3	Koeficient zunanjega tlaka c_{pe} za enokapnico.....	20
3.4.4	Koeficient zunanjega tlaka c_{pe} za dvokapnico	24
3.4.5	Koeficient zunanjega tlaka c_{pe} za ukrivljeno streho.....	28
3.4.6	Koeficient notranjega tlaka c_{pi} na navpične stene in obtežba vetra	29
3.4.7	Maksimalna vrednost vpliva vetra	34
3.5	Kombinacije vplivov za stalna in začasna projektna stanja	34
3.5.1	Kombinacije vplivov.....	35
4	NAPETOSTI.....	36
4.1	Vzdolžna napetost ($\sigma_{m,d}$).....	36

4.1.1	Enokapni nosilec	39
4.1.2	Dvokapni nosilec	40
4.1.3	Ukrivljen nosilec s spremenljivo višino	43
4.1.4	Ukrivljen nosilec s konstantno višino	45
4.2	Prečne napetosti ($\sigma_{t,90,d}$)	46
4.2.1	Dvokapni nosilec	47
4.2.2	Ukrivljen nosilec s spremenljivo višino	49
4.2.3	Ukrivljen nosilec s konstantno višino	50
5	PRIMERJAVA REZULTATOV	51
5.1	Koeficient napetosti v kritičnem prerezu (k_{α}, k_0)	51
5.2	Koeficient vzdolžne napetosti v slemenu (k_l)	52
5.3	Koeficient prečne napetosti v slemenu (k_p)	53
6	ZAKLJUČEK	55
7	VIRI	56

KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Maksimalne dovoljene debeline (t) in maksimalne površine prečnega prereza (A) vgrajenih lamel.....</i>	<i>5</i>
<i>Preglednica 2: Homogen lepljen les – karakteristične trdnosti in deformacijske lastnosti (N/mm²) ter gostote (kg/m³)</i>	<i>6</i>
<i>Preglednica 3: Oblikovna koeficienta obtežbe snega</i>	<i>14</i>
<i>Preglednica 4: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za enokapnice pri vetru v smeri $\Theta=0^\circ$.....</i>	<i>22</i>
<i>Preglednica 5: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za enokapnice pri vetru v smeri $\Theta=0^\circ$.....</i>	<i>22</i>
<i>Preglednica 6: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za enokapnice pri vetru v smeri $\Theta=180^\circ$.....</i>	<i>22</i>
<i>Preglednica 7: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri vetru vzporedno z slemenom.....</i>	<i>23</i>
<i>Preglednica 8: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri delovanju vetra pravokotno na sleme.....</i>	<i>25</i>
<i>Preglednica 9: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri delovanju vetra pod kotom $\Theta=0^\circ$.....</i>	<i>25</i>
<i>Preglednica 10: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri delovanju vetra pod kotom $\Theta=0^\circ$.....</i>	<i>26</i>
<i>Preglednica 11: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri delovanju vetra pod kotom $\Theta=0^\circ$.....</i>	<i>26</i>
<i>Preglednica 12: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri delovanju vetra vzporedno na sleme</i>	<i>27</i>
<i>Preglednica 13: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za ukrivljeno streho.....</i>	<i>29</i>
<i>Preglednica 14: Koeficienti notranjskega srka in tlaka za vse oblike strehe</i>	<i>30</i>
<i>Preglednica 15: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$</i>	<i>31</i>
<i>Preglednica 16: Skupni vpliv vetra (zunanji tlak + notranji srk) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$</i>	<i>31</i>
<i>Preglednica 17: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=180^\circ$</i>	<i>31</i>
<i>Preglednica 18: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$</i>	<i>32</i>
<i>Preglednica 19: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$</i>	<i>32</i>
<i>Preglednica 20: Skupni vpliv vetra (zunanji tlak + notranji srk) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$</i>	<i>33</i>

<i>Preglednica 21: Skupni vpliv vetra (zunanj srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$</i>	<i>33</i>
<i>Preglednica 22: Skupni vpliv vetra (zunanj tlak + notranji srk) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$</i>	<i>33</i>
<i>Preglednica 23: Skupni vpliv vetra (zunanj srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=90^\circ$</i>	<i>34</i>
<i>Preglednica 24: Skupni vpliv vetra (zunanj srk + notranji tlak) za ukrivljeno streho</i>	<i>34</i>
<i>Preglednica 25: Vrednosti za kombinacije vplivov pri stalnem, začasnem in potresnem stanju</i>	<i>35</i>
<i>Preglednica 26: Primerjava vrednosti koeficientov k_α in k_0 glede na način izračuna.....</i>	<i>40</i>
<i>Preglednica 27: Koeficient k_1 v odvisnosti od višine dvokapnega nosilca.....</i>	<i>42</i>
<i>Preglednica 28: Koeficienta k_α in k_0 v odvisnosti od višine dvokapnega nosilca pri obeh načinih izračuna vzdolžnih napetosti.....</i>	<i>43</i>
<i>Preglednica 30: Koeficient k_1 v odvisnosti od višine ukrivljenega nosilca s spremenljivo višino</i>	<i>44</i>
<i>Preglednica 29: Koeficienta k_α in k_0 v odvisnosti od višine ukrivljenega nosilca s spremenljivo višino pri obeh načinih izračuna vzdolžnih napetosti</i>	<i>44</i>
<i>Preglednica 31: Koeficient k_1 v odvisnosti od višine ukrivljenega nosilca s konstantno višino</i>	<i>45</i>
<i>Preglednica 32: Koeficient k_1 v odvisnosti od radija ukrivljenosti ukrivljenega nosilca s konstantno višino</i>	<i>45</i>
<i>Preglednica 33: Koeficient k_p v odvisnosti od višine prereza pri dvokapnem nosilcu</i>	<i>49</i>
<i>Preglednica 34: Koeficient k_p v odvisnosti od višine prereza pri ukrivljenem nosilcu s spremenljivo višino</i>	<i>49</i>
<i>Preglednica 35: Koeficient k_p v odvisnosti od višine prereza pri ukrivljenem nosilcu s konstantno višino</i>	<i>50</i>
<i>Preglednica 36: Koeficient k_p v odvisnosti od radija ukrivljenosti pri ukrivljenem nosilcu s konstantno višino</i>	<i>50</i>
<i>Preglednica 37: Odstopanja koeficientov k_α in k_0</i>	<i>51</i>
<i>Preglednica 38: Odstopanja koeficientov k_α in k_0 glede višino h</i>	<i>51</i>
<i>Preglednica 39: Odstopanja koeficientov k_1 glede na višino h</i>	<i>52</i>
<i>Preglednica 40: Odstopanja koeficientov k_p glede na višino h</i>	<i>53</i>
<i>Preglednica 41: Prečne napetosti v slemenu.....</i>	<i>53</i>
<i>Preglednica 42: Odstopanja koeficientov k_p glede na radij ukrivljenosti r.....</i>	<i>54</i>

KAZALO SLIK

<i>Slika 1: Tloris obravnavanega objekta.....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2: Tloris ostrešja obravnavanega -objekta.....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 3: Severna in južna fasada obravnavanega objekta.....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 4: Vzhodna in zahodna fasada obravnavanega objekta.....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 5: Enokapni nosilec.....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 6: Prerez A-A in B-B enokapnega nosilca.....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 7: Dvokapni nosilec.....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 8: Prerez A-A in B-B dvokapnega nosilca.....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 9: Ukrivljeni nosilec s spremenljivo višino.....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 10: Prerez A-A in B-B ukrivljenega nosilca s spremenljivo višino.....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 11: Ukrivljeni nosilec s konstantno višino.....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 12: Prerez A-A in B-B ukrivljenega s spremenljivo višino.....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 13: Prikaz oznak uporabljenih pri izračunu vplivov.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 14: Detajl vzdolžnega prereza strešne konstrukcije.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 15: Oblikovni koeficienti obtežbe snega pri enokapnici [SIST EN 1991-1-3, 2004].....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 16: Oblikovna koeficienta obtežbe snega pri dvokapnici [SIST EN 1991-1-3, 2004].....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 17: Obtežna karta snega v Sloveniji po conah [SIST EN 1991-1-3, 2008].....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 18: Temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra $V_{b,o}$ [SIST EN 1991-1-4, 2007].....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 19: Izbrana zasičenost pri III. kategoriji terena [SIST EN 1991-1-4, 2007].....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 20: Razdelitev enokapnice na področja pri delovanju vetra pravokotno na sleme.....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 21: Razdelitev enokapnice na področja [SIST EN 1991-1-4, 2005].....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 22: Razdelitev dvokapnice na področja pri delovanju vetra pravokotno na sleme $\Theta=0^\circ$.</i>	<i>24</i>
<i>Slika 23: Razdelitev dvokapnice na področja pri delovanju vetra vzporedno na sleme [SIST EN 1991-1-4, 2005].....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 24: Priporočene vrednosti koeficientov za ukrivljene strehe nad pravokotnim tlorisom</i>	<i>28</i>
<i>Slika 25: Površina odprtin na posameznem ovoju stavbe.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 26: Določitev temenskega območja (SIST EN 1995-1-1 2005, str. 53).....</i>	<i>38</i>

<i>Slika 27: Razporeditev membranske sile N_x[kN/m] po enokapnem nosilcu in po kritičnem prerezu</i>	<i>39</i>
<i>Slika 28: Koeficient napetosti glede na naklon.....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 29: Vpliv naklona α° na koeficient k_1 pri dvokapnem nosilcu.....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 30: Prikaz linearne in dejanske razporeditve napetosti v dvokapnem nosilcu.....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 31: Prikaz poteka vzdolžnih napetosti in lokacije kritičnega prereza za dvokapni nosilec zaradi konstantne zvezne obtežbe q (Premrov Miroslav in Dobrila Peter, Lesene konstrukcije, 2008, Fakultete za gradbeništvo Maribor, str. 328)</i>	<i>42</i>
<i>Slika 32: Membranska sila N_x v slemenu in kritičnemu prerezu dvokapnega nosilca.....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 33: Membranska sila N_x v slemenu in kritičnemu prerezu ukrivljenega nosilca s spremenljivo višino</i>	<i>44</i>
<i>Slika 34: Plastični model ukrivljenega nosilca. Zgoraj: neobremenjen. Spodaj: obremenjen na zgornjem robu (Judith J. Stalnaker in Ernest C. Harris, Structural Design in Wood, 1997, Chapman & Hall, str. 177)</i>	<i>47</i>
<i>Slika 35: Odvisnost koeficienta k_p od naklona α° pri dvokapnem nosilcu.....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 36: Koeficient k_p v odvisnosti od višine prereza pri dvokapnem nosilcu.....</i>	<i>48</i>

1 UVOD

Lamelirani lepljeni les (ang. *glued laminated timber* ali *glulam*) označuje les, ki ga pridobimo z lepljenjem lesenih lamel v celoto. Čeprav je patent zanj znan že preko sto let, je intenzivni razvoj doživel šele v zadnjih tridesetih letih. Z razvojem lepljenega lameliranega lesa se je odprla možnost izdelave lesenih linijskih elementov poljubne višine in oblike. Pod tako imenovane linijske elemente štejemo tiste, pri katerih je ena dimenzija veliko večja od drugih dveh. Pri lepljenih lameliranih nosilcih je pri vseh lamelah orientacija vlaken enaka, vlakna pa potekajo v smeri dolžine elementa.

Če primerjamo masiven in lepljen les, je njegova najbolj očitna prednost poljubna oblika linijskih elementov. Poznamo več klasičnih oblik lepljenih lameliranih nosilcev: ravni, enokapni, dvokapni, ukrivljeni s spremenljivo višino, ukrivljeni z konstantno višino.. Druge prednosti lepljenega lesa so: boljše lastnosti glede trdnosti in togosti, večja natančnost izdelave in zmanjšanje sprememb geometrije pri izpostavljenosti zunanjim vplivom.

Evrokod 5 za računanje elementov iz lameliranih lepljenih nosilcev s pravokotnim prečnim prereзом določa poenostavljene izraze za kontrolo napetosti. Glede na to, da so izrazi prilagojeni za tri klasične vrste lepljenih lameliranih nosilcev, sem v diplomski nalogi poskusil določiti kakšna so odstopanja med napetostmi, izračunanimi z poenostavljenimi enačbami za napetosti v Evrokodu 5 in napetostmi, izračunani s podrobnejšo analizo po metodi končnih elementov v računalniškem programu. Pri analizi rezultatov sem primerjal, ne le tovrstna odstopanja, ampak tudi spreminjanje napetosti, glede na geometrijo posameznega nosilca. Obtežba za analizo je določena po standardu SIST EN 1991-1-1, vsi nosilci, ki sem ih primerjal, pa zadostujejo trdnostnim pogojem iz SIST EN 1995-1-1.

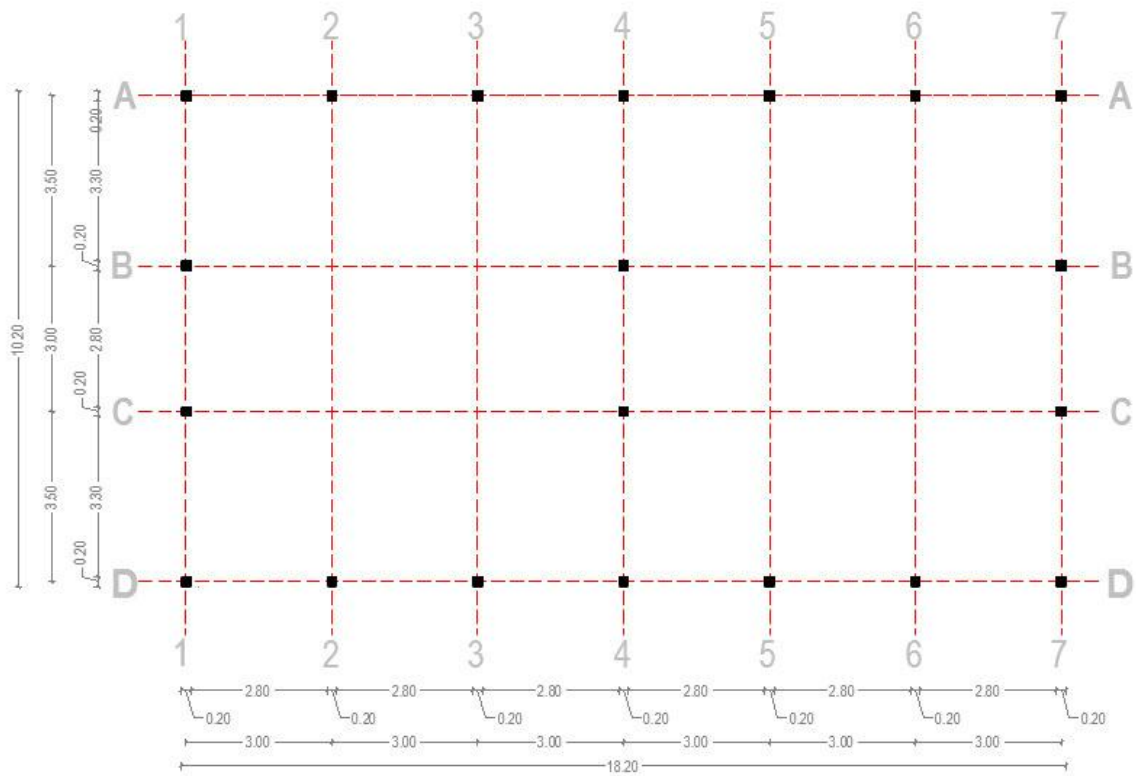
2 OSNOVNI PODATKI O NOSILCIH

Obravnaval sem naslednje lepljene lamelirane nosilce:

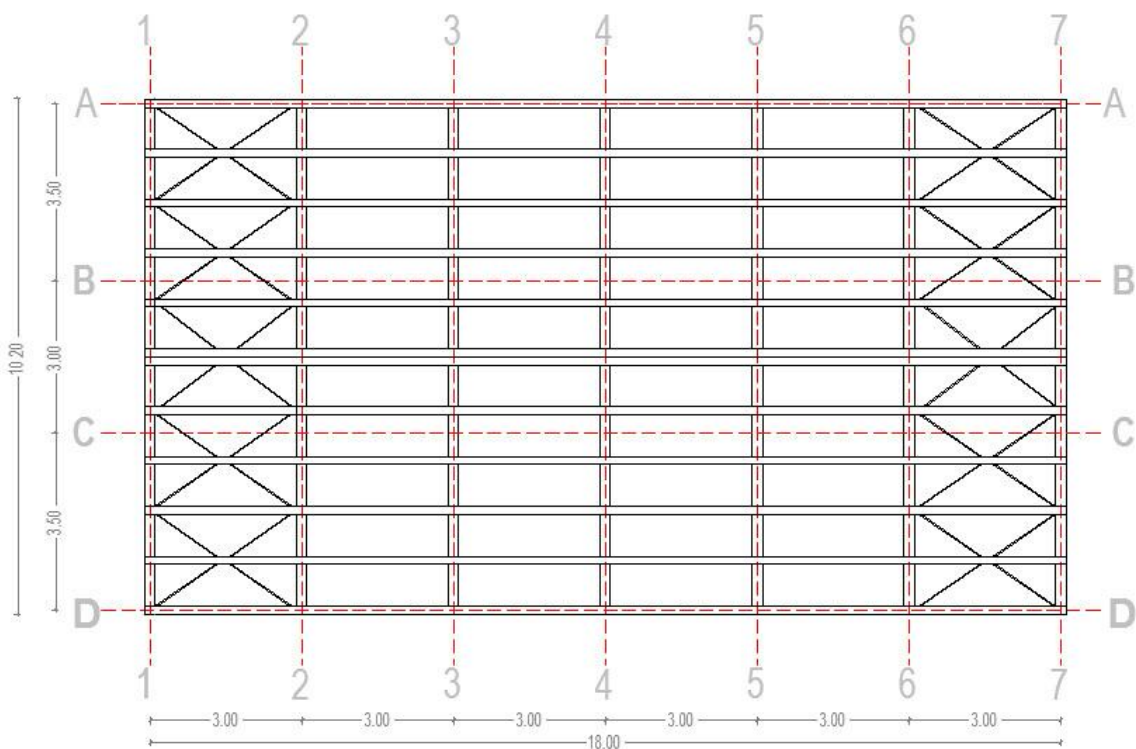
- enokapni nosilec
- dvokapni nosilec
- ukrivljeni nosilec z spremenljivo višino
- ukrivljeni nosilec s konstantno višino

2.1 Arhitektura objekta

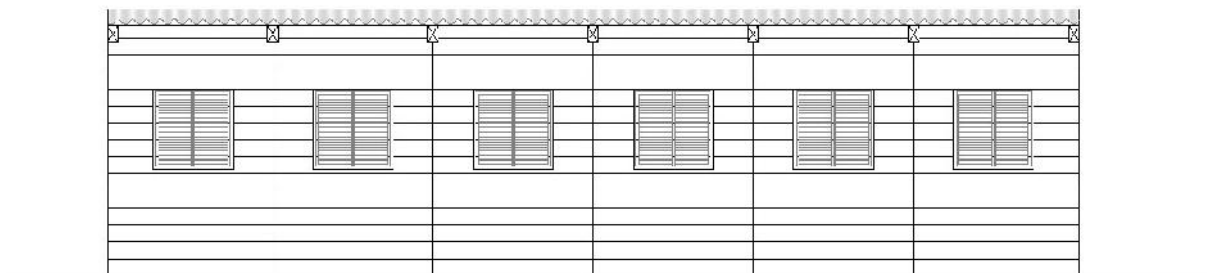
Objekt, na katerem se nahajajo obravnavani nosilci je konjušnica, ki sem jo za potrebe analize umestil v okolico Ljubljane. Dimenzije objekta so 10,20 m na 18,20 m. Osne razdalje med nosilci so 3 m. Predvidena sekundarna nosilna konstrukcija so nosilci od masivnega lesa dimenzij 10/12 cm, položeni prečno na obravnavane nosilce. Analiziral sem najbolj izpostavljen oziroma vmesni nosilec. Nosilec je prosto ležeče položen na AB nosilce, ki se členkasto priključujejo na AB stebre, ti pa se zaključijo v točkovnih temeljih povezanih z AB gredo. V spodnji slikah nisem upošteval vseh posameznih oblik nosilcev, ampak je prikazana arhitektura objekta le z dvokapnim nosilcem.



Slika 1: Tloris obravnavanega objekta



Slika 2: Tloris ostrešja obravnavanega objekta



Slika 3: Severna in južna fasada obravnavanega objekta



Slika 4: Vzhodna in zahodna fasada obravnavanega objekta

2.2 Tehnični podatki o nosilcih

Debelina lamel

Različni avtorji priporočajo različne debeline lamel za ravne in malo ukrivljene ter ukrivljene nosilce. Aghayere in Virgil priporočata $1\frac{1}{2}$ " (38,1 mm) oziroma $1\frac{3}{8}$ " (34,35 mm) za ravne in rahlo ukrivljene nosilce ter $\frac{3}{4}$ " (19,05 mm) za ukrivljene nosilce. Kermani v svoji knjigi *Structural timber design* priporočeno debelino določa v milimetrih in sicer od 33 mm do maksimalno 50 mm za ravne in rahlo ukrivljene ter od 12 mm oziroma 19 mm do maksimalno 33mm. SIST EN 386:2002 za iglavce uporabnostnega razreda SI ($v \leq 12\%$) določa maksimalno predpisano debelino 45 mm kot je razvidno iz *Preglednice 1*.

Preglednica 1: Maksimalne dovoljene debeline (t) in maksimalne površine prečnega prereza (A) vgrajenih lamel

	Razred uporabe I ($v_l \leq 12\%$)		Razred uporabe II ($12\% \leq v_l \leq 20\%$)		Razred uporabe III ($v_l > 20\%$)	
	$t(\text{mm})$	$A(\text{mm}^2)$	$t(\text{mm})$	$A(\text{mm}^2)$	$t(\text{mm})$	$A(\text{mm}^2)$
Iglavci	45	12000	45	12000	35	10000
Listavci	40	7500	40	7500	30	6000

Za ukrivljene lamele SIST EN 386:2002 dodatno podaja maksimalno predpisano debelino lamele (t) glede na polmer njene ukrivljenosti (r) z naslednjo enačbo:

$$t \leq \frac{r}{250} \cdot \left[1 + \left(\frac{f_{mdck}}{80} \right)^2 \right] = \frac{32730}{250} \cdot \left[1 + \left(\frac{24}{80} \right)^2 \right] = 142,70 \text{ mm} \quad (2.1)$$

kjer predstavlja f_{mdck} deklarirano upogibno trdnost spoja za katero velja $f_{mdck} \geq f_{mk}$. Upogibno trdnost spoja deklarira proizvajalec. Za svoj nosilec sem izbral da je $f_{mdck} = f_{mk}$ pri čem je $f_{m,k}$ upogibna trdnost lamele. Ko sem v enačbo ustavil vrednosti, ki jih upoštevam pri vseh nosilcih - to so radij ukrivljenosti $r=32,73 \text{ m} = 32730 \text{ mm}$ in upogibna trdnost za les trdnostnega razreda C24 $f_{mk} = 24 \text{ N/mm}^2$, sem dobil vrednost

$$t \leq 142,70 \text{ mm}$$

Ker maksimalne vrednosti debeline lamel, izračunane po tej enačbi, ne smejo presegati vrednosti podane v *Preglednici 1* in ker nosilce z relativno velikim radijem ukrivljenost lahko štejemo za rahlo ukrivljene, sem za tovrstne nosilce določil isto debelino lamele kot za ravne nosilce. Glede na priporočila in standarde za debelino lamel vseh obravnavanih nosilcev, sem izbral vrednost $t = 40 \text{ mm}$.

Širina lamel

Pri izbiri neto širine lamel sem upošteval priporočila SIST EN 386:2002, ki običajne širine lamel umešča med 80 in 200 mm. Če je širina večja od 200 mm, moramo z vzdolžnimi žlebovi preprečiti deformacije zaradi sušenja. Zaradi zgoraj omenjenih zahtev sem izbral širno lamele $b=200 \text{ mm}$.

Bočne podpore

Nosilci so, kot je razvidno iz arhitekture objekta, bočno podprti na dolžini dveh metrov. Ker sam izračun uklonske varnosti ni pomemben za nalogo sem predpostavil da je nosilec polno nosilen na upogib.

Dimenzije nosilcev

Dimenzije nosilcev so približno določene po priporočilih Premrova in Dobrile (2008) in niso optimizirane glede na vplive, saj sem se pri analizi rezultatov, bolj kot na samo dimenzioniranje nosilcev, osredotočil na odstopanja pri dveh načinih izračuna notranjih napetosti. Dimenzije posameznih nosilcev sem podal v nadaljevanju tega poglavja.

Trdnostni razred nosilcev

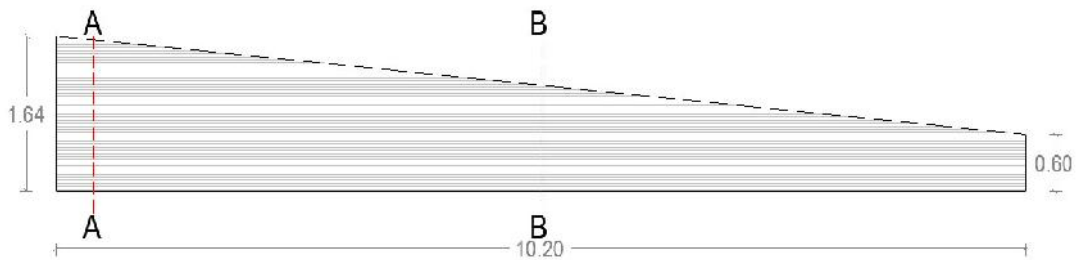
Pri izračunu sem upošteval to, da vsi nosilci sodijo v trdnostni razred GL24h. Upoštrevane vrednosti so razvidne iz *Preglednice 2*. in so prevzete iz SIST EN 1194:1999.

Preglednica 2: Homogen lepljen les – karakteristične trdnosti in deformacijske lastnosti (N/mm²) ter gostote (kg/m³)

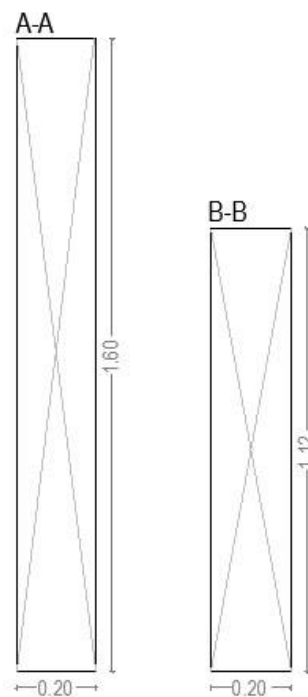
		Homogen lepljen les			
Trdnostni razred		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
Upogibna trdnost	$f_{m,g,k}$	24,0	28,0	32,0	36,0
Natezna trdnost	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,40	0,45	0,50	0,60
Tlačna trdnost	$f_{c,0,g,k}$	24,0	26,5	29,0	31,0
	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
Strižna trdnost	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Modul elastičnosti	$E_{0,g,mean}$	11 600	12 600	13 700	14 700
	$E_{0,g,05}$	9 400	10 200	11 100	11 900
	$E_{90,g,mean}$	390	420	460	490
Strižni modul	$G_{g,mean}$	720	780	850	910
Gostota	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

2.2.1 Enokapni nosilec

- uporabljen les: GL24h
- naklon zgornjega roba nosilca: 10,2% oz. 5,8°



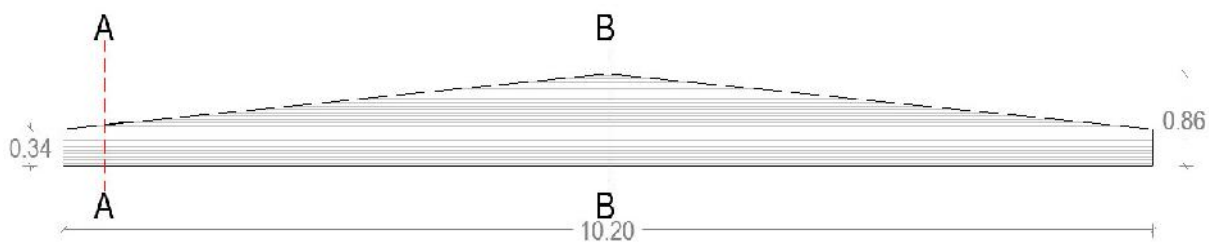
Slika 5: Enokapni nosilec



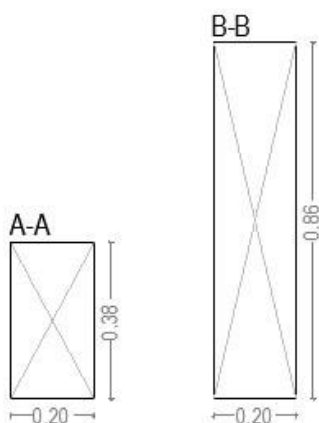
Slika 6: Prerez A-A in B-B enokapnega nosilca

2.2.2 Dvokapni nosilec

- uporabljen les: GL24h
- naklon zgornjega roba nosilca: 10,2% oz. 5,8°



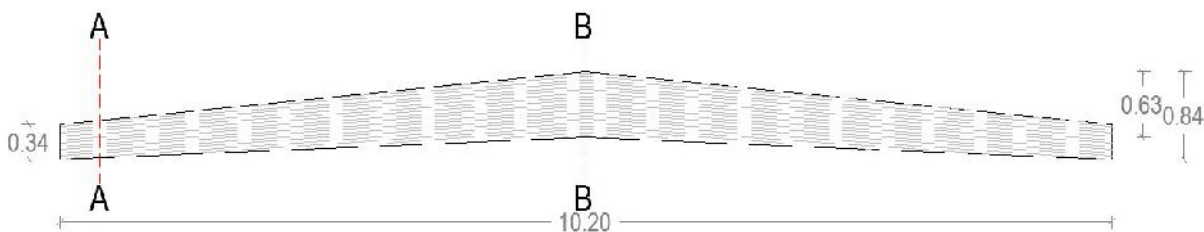
Slika 7: Dvokapni nosilec



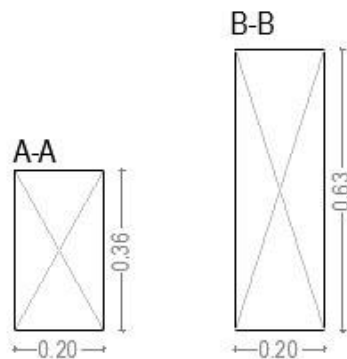
Slika 8: Prerez A-A in B-B dvokapnega nosilca

2.2.3 Ukrivljen nosilec s spremenljivo višino

- uporabljen les: GL24h
- naklon zgornjega roba nosilca: 10,2% oz. 5,8°
- radij ukrivljenosti: 32,73 m



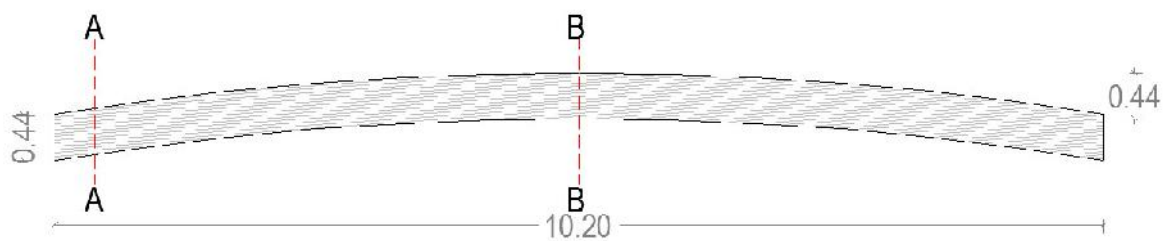
Slika 9: Ukrivljeni nosilec s spremenljivo višino



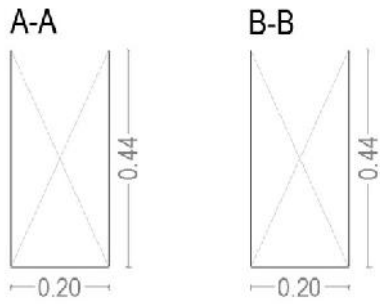
Slika 10: Prerez A-A in B-B ukrivljenega nosilca s spremenljivo višino

2.2.4 Ukrivljen nosilec s konstantno višino

- uporabljen les: GL24h
- radij ukrivljenosti: 32,73 m



Slika 11: Ukrivljeni nosilec s konstantno višino



Slika 12: Prerez A-A in B-B ukrivljenega s spremenljivo višino

3 VPLIVI NA KONSTRUKCIJO

Med vplive na konstrukcijo sodijo vsi zunanji dejavniki, ki vplivajo na obnašanje konstrukcije. V tem poglavju sem določil vrednosti posameznih obtežb. Obravnaval sem stalno in koristno obtežbo, ki so enakomerno porazdeljene po konstrukciji, ter obtežbi snega in vetra, ki sem jih nadomestil z enakomerno porazdeljene silami, ki upoštevajo maksimalne vrednosti snega in vetra na obravnavanem območju.

3.1 Stalna obtežba

Stalna obtežba predvidoma deluje na konstrukcijo ves čas njene življenjske dobe in jo obravnavamo kot stalni nepomični vpliv. Vrednosti stalne obtežbe sem določil po naslednji enačbah.

$$\text{Lega} \quad g_1 = \frac{A l_1 \gamma_1}{\epsilon_1} = \frac{0,1 \text{ m} \cdot 0,12 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} \cdot 35 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}{1 \text{ m}} = 0,126 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (3.1)$$

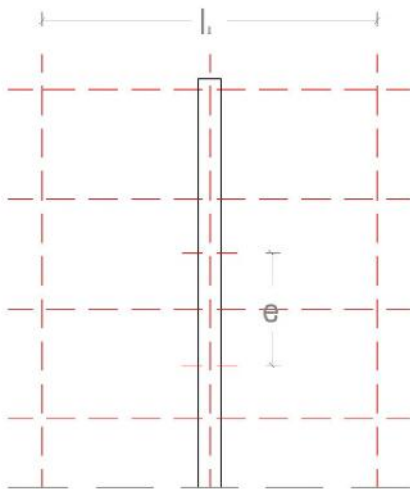
$$\text{Strešna kritina} \quad g_2 = l_1 \cdot g_{kr} \left| \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right| = 3 \text{ m} \cdot 0,1204 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,361 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (3.2)$$

$$\text{Stalna obtežba na nosilec} \quad \mathbf{g = 0,487 \frac{kN}{m}}$$

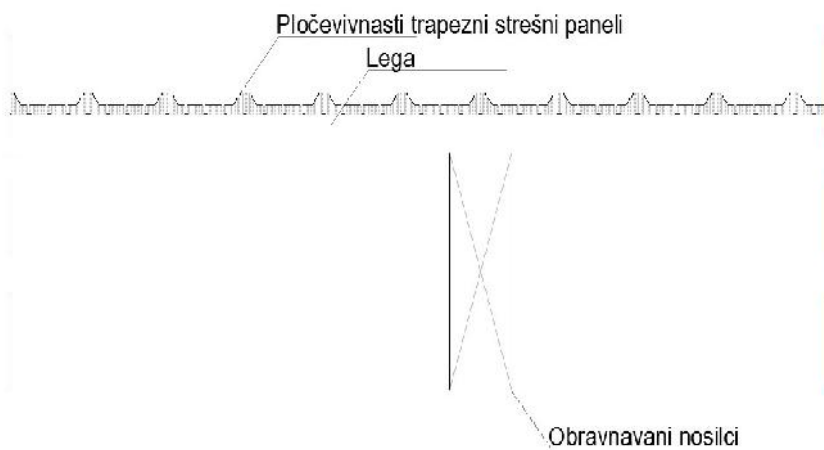
Pomen oznak v enačbah:

- A – površina prereza lege
- l_1 – vplivna dolžina lege (*Slika 13*)
- γ_1 – prostorninska teža lege
- ϵ_1 – dolžina vpliva lege (*Slika 13*)
- g_{kr} – teža strešne kritine

Lastno težo lepljenega lameliranega nosilca upošteva program.



Slika 13: Prikaz oznak uporabljenih pri izračunu vplivov



Slika 14: Detajl vzdolžnega prereza strešne konstrukcije

3.2 Koristna obtežba

Koristno obtežbo v splošnem obravnavamo kot spremenljiv pomični vpliv, ki sem ga upošteval kot navidezno statičnega. V obravnavanem primeru je streha dostopna le za normalno vzdrževanje in popravila, zaradi česar jo uvrščamo v kategorijo »H« (normalna, ne pohodna streha).

Koristna obtežba (ne pohodna streha kategorije »H«)

$$g_3 = Q \cdot l_1 = 0,4 \frac{kN}{m^2} \cdot 3m = 1,2 \frac{kN}{m} \quad (3.3)$$

Pomen oznak:

- Q – vrednost obtežbe za normalno ne pohodno streho (kategorija »H«)
- l_1 – vplivna širina strešne kritine

3.3 Določitev vrednosti vpliva snega

Na strehi je mogočih več različnih porazdelitev snega, na katere vplivajo lastnosti strehe ter drugi dejavniki kot so:

- oblika strehe,
- hrapavost površine strehe,
- toplotne lastnosti strehe,
- količina toplote generirane pod streho,
- sosednje stavbe,
- teren v okolici stavbe in
- krajevne podnebne razmere, zlasti prevetrenost, temperaturne spremembe in verjetnost padavin (tako dežja kot snega).

Določil sem le maksimalno vrednost obtežbe snega in jo razporedil enakomerno po strehi zaradi lažje primerjave rezultatov.

Za trajna/začasna projektna stanja določimo obtežbo snega na strehi na naslednji način

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (3.4)$$

kjer so:

- μ_ioblikovni koeficient obtežbe snega
 s_kkarakteristična obtežba snega na tleh
 C_ekoeficient izpostavljenosti
 C_ttoplotni koeficient
 sobtežba snega na strehi

Koeficient izpostavljenosti C_e se uporablja za določitev obtežbe snega na strehi. Pri zbirni vrednosti C_e se upošteva prihodnje stanje okoli objekta. Za C_e sem vzel vrednost 1,0, ker sem predpostavil običajen teren, ki predstavlja površine, kjer veter ne prenaša snega na objektih, saj so zaščiteni s konfiguracijo terena, drugimi objekti ali drevesi.

Toplotni koeficient C_t se upošteva za zmanjšanje obtežbe snega pri strehah z veliko toplotno prevodnostjo ($> 1 \text{ W/m}^2\text{K}$), zlasti pri steklenih strehah, kjer se sneg topi zaradi toplotnih izgub. Za vse druge primere velja:

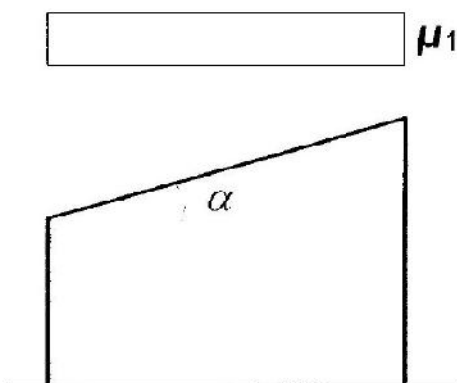
$$- C_t = 1,0.$$

Oblikovni koeficient strehe μ ima pomembno vlogo pri porazdelitvi obtežbe snega. Potrebno je določiti oblikovni koeficient obtežbe snega pri strehah s takšno zunanjo geometrijo, kjer bi se lahko pomembno povečala obtežba snega glede na streho z ravno površino. Vrednosti, podane v preglednici, veljajo, če sneg lahko zdrсне s strehe. Če so na strehi snegobrani ali druge ovire, ali pa se nagib strehe zmanjša zaradi parapetov, oblikovni koeficient ne sme biti manjši od 0,8. Način določitve oblikovnega koeficienta se razlikuje za dvokapnice in enokapnice.

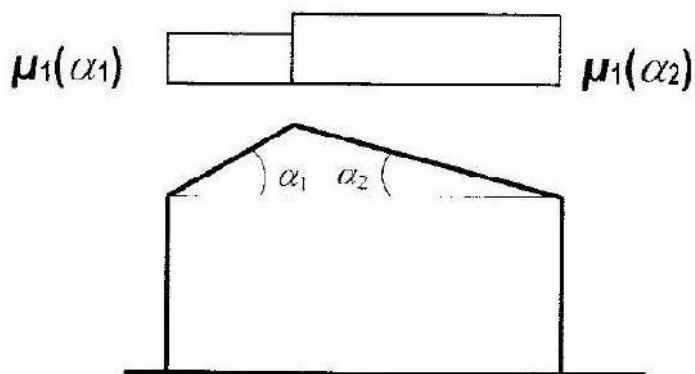
Preglednica 3: Oblikovna koeficienta obtežbe snega

Nagib strehe α	$0^\circ < \alpha < 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha > 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8 (60 - \alpha) / 30$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8 \alpha / 30$	1,6	-

Na spodnjih slikah je prikazan oblikovni koeficient v povezavi z naklonom enokapnice in dvokapnice. Izbran oblikovni koeficient obtežbe snega je tako za enokapnico kot za dvokapnico $\mu_1 = 0,8$. V obravnavanih primerih bo zaradi simetričnosti strehe sneg po strehi enakomerno razporejen.



Slika 15: Oblikovni koeficient obtežbe snega pri enokapnici [SIST EN 1991-1-3, 2004]

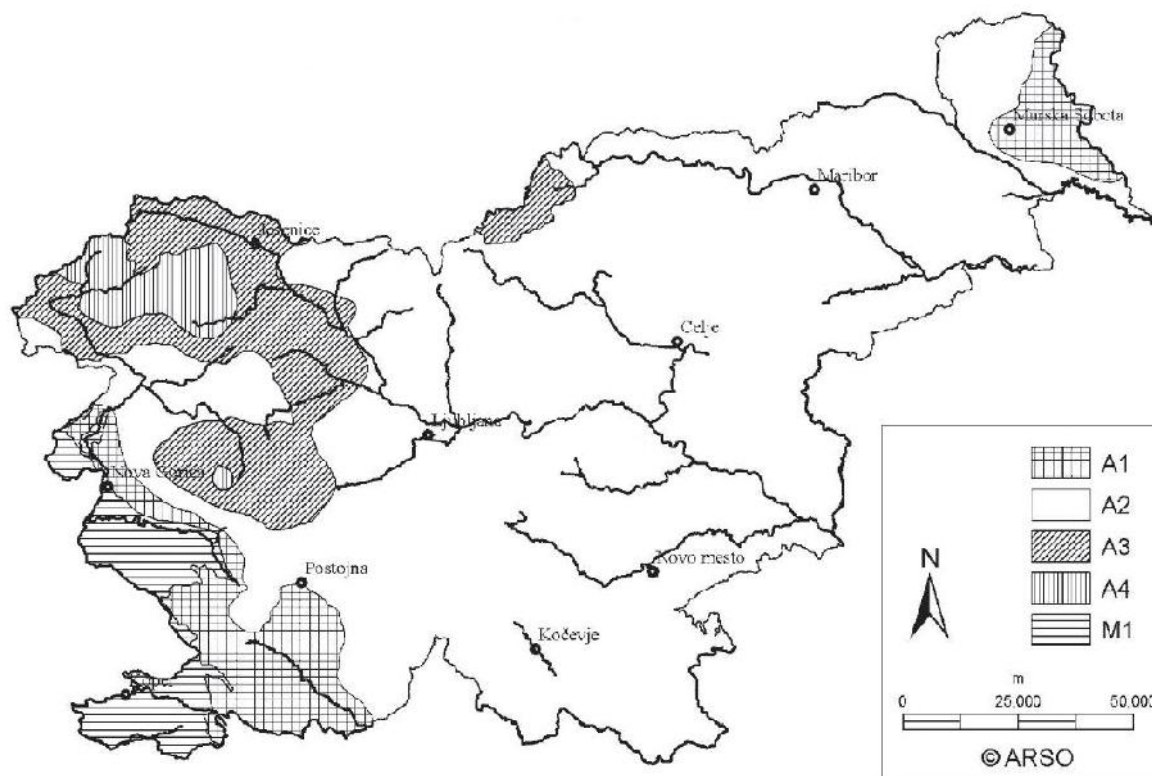


Slika 16: Oblikovna koeficienta obtežbe snega pri dvokapnici [SIST EN 1991-1-3, 2004]

Karakteristično vrednost obtežbe snega sem določil po spodnji enačbi, ki je prilagojena za posamezno cono v Sloveniji. Ker je obravnavan objekt lociran v Ljubljani, izberemo naslednjo enačbo:

$$s_k = 1,293 \cdot \left| 1 + \left(\frac{A}{728} \right)^2 \right| \quad (3.5)$$

Osnova za zgoraj navedeno enačbo izhaja iz karte obtežbe snega, ki je razdeljena na štiri alpske in eno mediteransko cono. Na podlagi spodaj prikazane slike in lokacije objekta sem izbral cono [A2], ki zavzema večji del Slovenije in je na karti označena brez šrafure.



Slika 17: Obtežna karta snega v Sloveniji po conah [SIST EN 1991-1-3, 2008]

$$s_k = 1,293 \cdot \left| 1 + \left(\frac{18564}{728} \right)^2 \right| = 1,38 \text{ kN/m}^2 \quad (3.6)$$

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,38 = 1,11 \text{ kN/m}^2 \quad (3.7)$$

Maksimalna vrednost vpliva snega ($e=3\text{m}$)

$$e \cdot s = 3 \text{ kN/m}$$

3.4 Določitev vrednosti vpliva vetra

Veter na konstrukcijo lahko deluje neugodno ali ugodno. Vpliv vetra se spreminja s časom in lahko deluje neposredno na zunanje in notranje ploskve ter posredno na notranje ploskve zaradi propustnosti ovoja. Dejanski vpliv vetra na konstrukcijo je navadno turbulentnega značaja, ki ga predstavimo s silami oziroma tlaki, ki imajo enakovreden vpliv. Tlaki delujejo na površine kot rezultirajoča sila pravokotno na površino stavbe. V nadaljevanju bom obravnaval vpliv vetra na enokapnico in dvokapnico. Izračunane vplive bom potem uporabil v modelih. Narava naloge zahteva enakomerno razporejeno obtežbo, zaradi tega sem pri modelih upošteval maksimalen vpliv vetra, enakomerno razporejen pravokotno na ploskev.

3.4.1 Izračun osnovne hitrosti vetra

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{bo} \quad (3.8)$$

kjer so:

C_{dir}smerni vektor

C_{season}faktor letnega časa

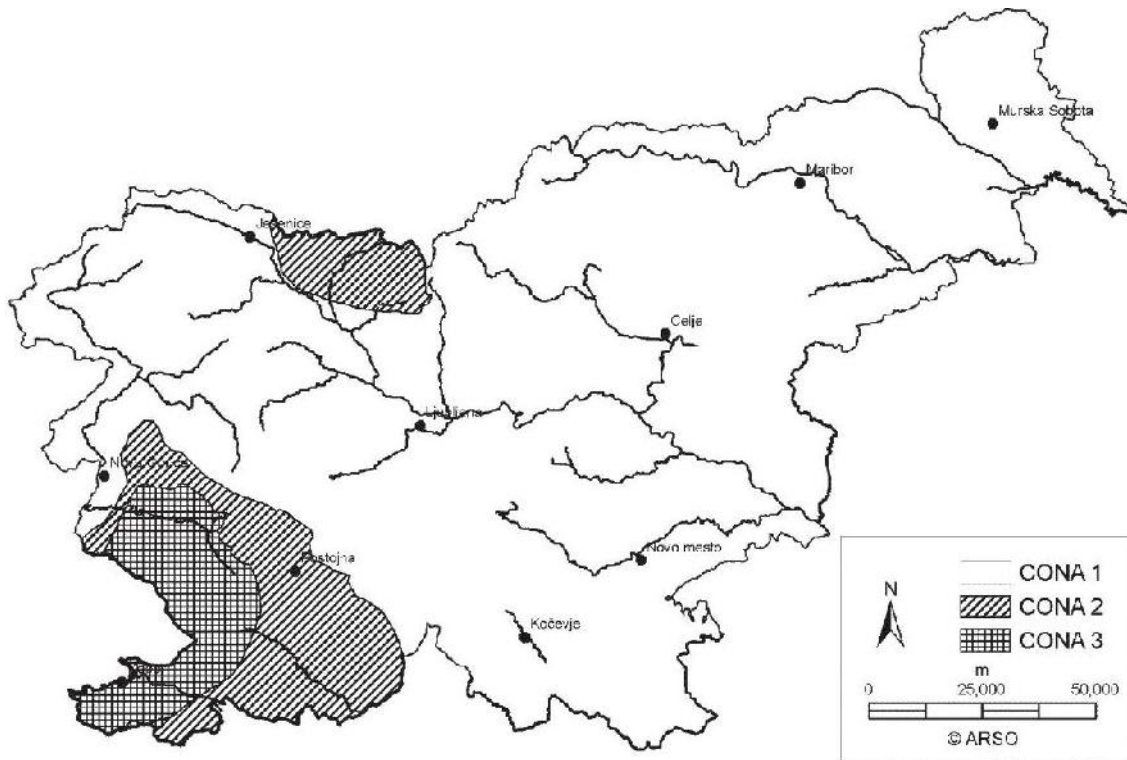
$V_{b,o}$temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra

V_bosnovna hitrost vetra

Za vrednost **smernega vektorja** C_{dir} sem izbral priporočeno vrednost, ki znaša 1,0.

Za vrednost **faktorja letnega časa** C_{season} sem izbral priporočeno vrednost, ki znaša 1,0.

Na podlagi spodaj prikazane slike in izbrane lokacije objekta sem izbral cono 1, ki sicer zavzema večji del Slovenije, in izbral temeljno vrednost osnovne hitrosti vetra $V_{b,o}$, ki znaša 20m/s v krajih z nadmorsko višino pod 800m.



Slika 18: Temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra $V_{b,o}$ [SIST EN 1991-1-4, 2007]

$$V_b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 20 \text{ m/s} = 20 \text{ m/s}$$

3.4.2 Tlak vetra w_e na zunanje ploskve

Tlak vetra na zunanje ploskve sem izračunal po naslednji enačbi:

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

kjer so:

$q_p(z_e)$največji tlak pri sunkih vetra

z_ereferenčna višina za zunanji tlak

C_{pe}koeficient zunanjega tlaka

Največji tlak pri sunkih vetra q_p sem izračunal po naslednji enačbi:

$$q_p(z_e) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m(z) = c_e(z) \cdot q_b = 1,3576 \cdot 250 \quad (3.9)$$

$$q_p(z_e) = 349,3 \text{ N/m}^2 = 0,3493 \text{ kN/m}^2$$

Osnovni tlak vetra q_b sem izračunal po naslednji enačbi:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \frac{kg}{m^3} \cdot (20 \frac{m}{s})^2 = 250 \frac{kg \cdot m^2}{m^3 \cdot s^2} \quad (3.10)$$

kjer so:

ρgostota zraka, ki je odvisna od nadmorske višine, temperature in zračnega tlaka, pričakovanega med neurjem na obravnavanem območju.

Za **gostoto ρ** privzamemo vrednost $1,25 \text{ kg/m}^3$.

Faktor hrapavosti $C_r(z)$ terena sem izračunal po naslednji enačbi:

$$C_r(z) = C_r(z_{min}) \quad \text{za} \quad z \leq z_{min} \quad (3.11)$$

$$C_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{za} \quad z_{min} < z < z_{max}; \quad | \quad 5m \quad 6,0m \quad 200m \quad (3.12)$$

$$C_r(z) = 0,2154 \cdot \ln\left(\frac{60}{0,3}\right) = 0,6452$$

kjer so:

zvišina

objekta, za višino objekta pa sem zaradi lažjega izračuna izbral konstantno višino $z=6m$

z_0hrapavostna dolžina

$z_{0,II}$hrapavostna dolžina za drugo kategorijo

z_{min}najmanjša višina, določena na podlagi kategorije terena

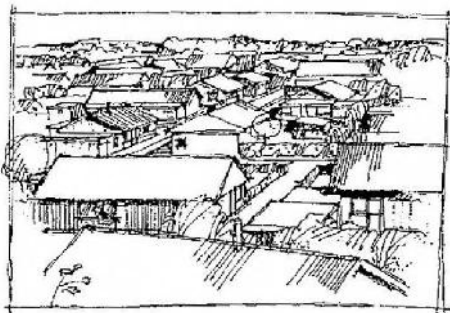
z_{max}maksimalna višina, omejena z veljavnostjo tega standarda

k_rfaktor terena, ki je odvisen od hrapavostne dolžine z_0

Za **faktor hribovitosti $C_o(z)$** oziroma oblike terena privzamemo vrednost 1,0.

Faktor terena k_r se izračuna po spodnji enačbi. Za kategorijo terena predpostavimo, da imamo področje z običajnim rastlinjem, stavbami ali posameznimi ovirami na razdalji največ 20 višin ovir (vasi, podeželsko okolje, stalni gozd), zato za z_0 izberemo 0,3m, medtem ko za $z_{0,II}$ izberemo 0,05m.

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_o}{z_{o1}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{03}{005} \right)^{0,07} = \mathbf{0.2154} \quad (3.13)$$



Slika 19: Izbrana zasičenost pri III. kategoriji terena [SIST EN 1991-1-4, 2007]

Faktor izpostavljenosti $c_e(z)$ sem izračunal po naslednji enačbi:

$$c_e(z) = \left| 1 + 7 \cdot \frac{k_t k_r}{c_o c_r} \right| \cdot c_o^2 \cdot c_r^2 = \left| 1 + 7 \cdot \frac{1002154}{1006452} \right| \cdot 1,0^2 \cdot 0,6452^2 \quad (3.14)$$

$$c_e(z) = \mathbf{1.389}$$

ali če ga določimo po grafu iz SIST EN 1994-1-4:

$$c_e(z) = \mathbf{1.4}$$

kjer je:

k_ifaktor turbulence

Za **faktor turbulence k_i** privzamemo vrednost 1,0.

3.4.3 Koeficient zunanje tlaka c_{pe} za enokapnico

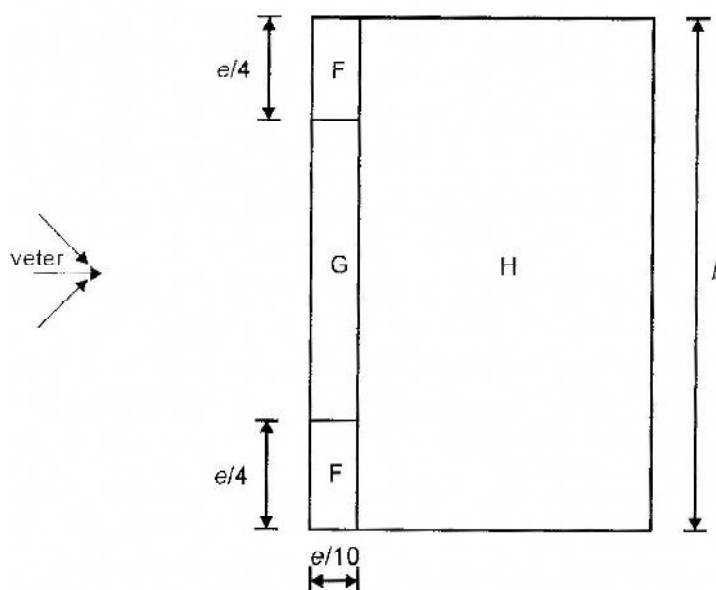
Za enokapnice so koeficienti zunanje tlaka različni glede na področja, ki so označena z F, G, H. Obravnavana enokapnica ima naklon 10%, kar predstavlja 6°. Po spodnjem postopku sem določil koeficiente zunanje tlaka za dvokapnice.

Koeficient zunanje tlaka pri delovanju vetra pravokotno na sleme $\theta=0^\circ$ in $\theta=180^\circ$

$$e = \min\{b, l \cdot 2 \cdot h\} = \min\{18,20; 2 \cdot 6,0\} = \min\{18,20; 12,0\} = 12,0m$$

$$\frac{e}{4} = \frac{12,0m}{4} = 3m$$

$$\frac{e}{10} = \frac{12,0m}{10} = 1,2m$$



Slika 20: Razdelitev enokapnice na področja pri delovanju vetra pravokotno na sleme

[SIST EN 1991-1-4, 2005]

Na podlagi linearne interpolacije za enokapnico, glede na naklon, sem za posamezno področje uporabil vrednosti koeficientov zunanje tlaka, ki so prikazane v spodnjih preglednicah. Ker so za enokapnice podane pozitivne in negativne vrednosti zunanje vpliva, je v primeru tovrstnih strešin treba obravnavati tri primere, ki so mogoči med delovanjem obtežbe vetra:

PRIMER I

V primeru I sem obravnaval samo srk na celotnem področju strehe pri smeri vetra $\theta=0^\circ$.

Preglednica 4: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za enokapnice pri vetru v smeri $\Theta=0^\circ$

Področja	q_p	c_{pe}	w_e (kN/m ²)
F	0,3493	-1,62	-0,566
G	0,3493	-1,16	-0,405
H	0,3493	-0,57	-0,199

PRIMER II

V primeru II sem obravnaval pritisk na celotnem področju strehe pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$.

Preglednica 5: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za enokapnice pri vetru v smeri $\Theta=0^\circ$.

Področja	q_p	c_{pe}	w_e (kN/m ²)
F	0,3493	0,18	0,063
G	0,3493	0,18	0,063
H	0,3493	0,27	0,094

PRIMER III

V primeru III je obravnavan samo srk na celotnem področju strehe pri smeri vetra $\Theta=180^\circ$.

Preglednica 6: Koeficienti zunanjskega tlaka in obtežba vetra za enokapnice pri vetru v smeri $\Theta=180^\circ$.

Področja	q_p	c_{pe}	w_e (kN/m ²)
F	0,3493	-2,32	-0,810
G	0,3493	-1,3	-0,454
H	0,3493	-0,81	-0,283

Koeficient zunanjskega tlaka pri delovanju vetra vzporedno s slemenom $\Theta=90^\circ$

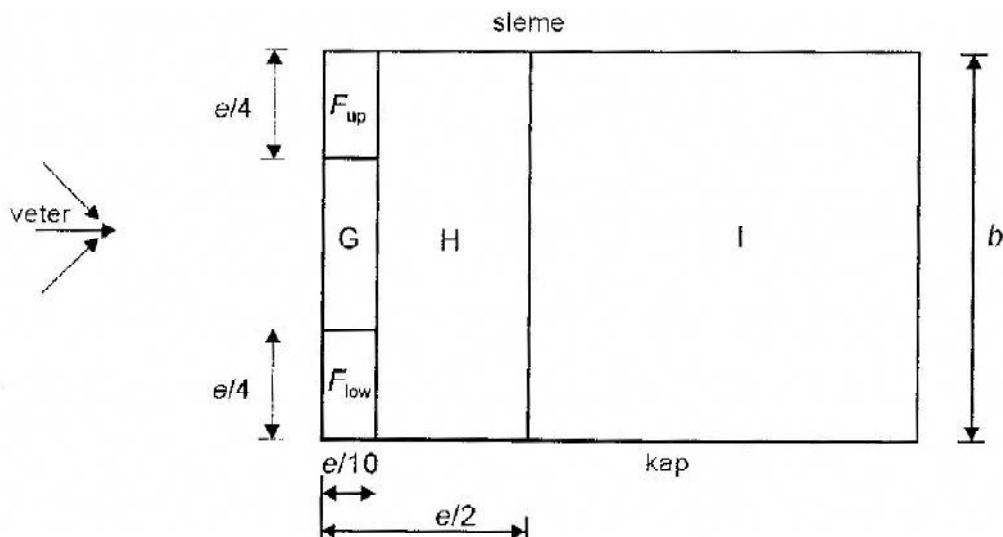
Po spodnjem postopku sem določil koeficiente zunanjskega tlaka za dvokapnice:

$$e = \min\{b \text{ ali } 2 \cdot h\} = \min\{10,2; 2 \cdot 6\} = \min\{10,2; 12\} = 10,2m$$

$$\frac{e}{4} = \frac{10,2m}{4} = 2,55m$$

$$\frac{e}{10} = \frac{10,2m}{10} = 1,02m$$

$$\frac{e}{2} = \frac{10,2m}{2} = 5,01m$$



Slika 21: Razdelitev enokapnice na področja [SIST EN 1991-1-4, 2005]

Na podlagi linearne interpolacije za enokapnico, glede na naklon, sem za posamezno področje uporabil vrednosti koeficientov zunanega tlaka, ki so prikazani v spodnji preglednici.

Preglednica 7: Koeficienti zunanega tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri vetru vzporedno z slemenom

Področja	q_p	c_{pe}	w_e (kN/m ²)
F _{up}	0,3493	-2,13	-0,744
F _{low}	0,3493	-2,05	-0,716
G	0,3493	-1,81	-0,632
H	0,3493	-0,62	-0,217
I	0,3493	-0,52	-0,182

3.4.4 Koeficient zunanjskega tlaka c_{pe} za dvokapnico

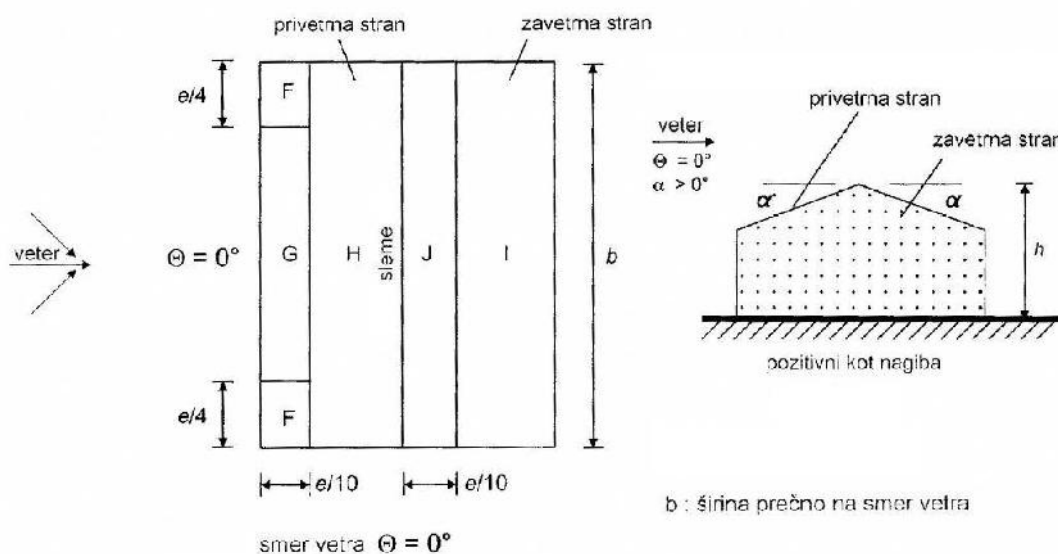
V primeru dvokapnic so koeficienti zunanjskega tlaka različni glede na področja, ki so označena od F do J. Ta področja delimo podobno kot pri računu koeficientov za enokapnice, ob upoštevanju določenih zahtev za dvokapnice. Obravnavana dvokapnica ima naklon 10%, kar predstavlja 6° . Koeficiente zunanjskega tlaka za dvokapnice sem določil po naslednjem postopku.

Koeficient zunanjskega tlaka pri delovanju vetra pravokotno na slame $\Theta=0^\circ$

$$e = \min\{b; 2 \cdot h\} = \min\{10,2; 2 \cdot 6,0\} = \min\{10,2; 12,0\} = 10,2$$

$$\frac{e}{4} = \frac{10,2m}{4} = 2,55m$$

$$\frac{e}{10} = \frac{10,2m}{10} = 1,02m$$



Slika 22: Razdelitev dvokapnice na področja pri delovanju vetra pravokotno na slame $\Theta=0^\circ$.

[SIST EN 1991-1-4, 2005]

Na podlagi linearne interpolacije za dvokapnico, glede na naklon strešine, sem za posamezno področje uporabil vrednosti koeficientov zunanjskega tlaka, ki so prikazane v spodnjih preglednicah. Ker so za dvokapnice podane pozitivne in negativne vrednosti zunanjskega

vpliva, je v primeru tovrstnih strešin treba obravnavati štiri primere, ki so mogoči med delovanjem obtežbe vetra:

PRIMER I

V primeru I sem obravnaval samo srk na celotnem področju strehe.

Preglednica 8: Koeficienti zunanje tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri delovanju vetra pravokotno na sleme

Področja	q_p	c_{pe}	w_e (kN/m ²)
F	0,3493	-1,62	-0,566
G	0,3493	-1,16	-0,405
H	0,3493	-0,57	-0,199
J	0,3493	-0,58	-0,203
I	0,3493	-0,64	-0,224

PRIMER II

V primeru II sem na področjih F,G in H obravnaval pritisk, na področjih J in I pa srk.

Preglednica 9: Koeficienti zunanje tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri delovanju vetra pod kotom $\Theta=0^\circ$.

Področja	q_p	c_{pe}	w_e (kN/m ²)
F	0,3493	0,02	0,007
G	0,3493	0,02	0,007
H	0,3493	0,02	0,007
J	0,3493	-0,58	-0,203
I	0,3493	-0,64	-0,224

PRIMER III

V primeru III sem na področjih F,G in H obravnaval srk, na področjih J in I pa pritisk.

Preglednica 10: Koeficienti zunanega tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri delovanju vetra pod kotom $\Theta=0^\circ$.

Področja	q_p	c_{pe}	w_e (kN/m ²)
F	0,3493	-1,62	-0,566
G	0,3493	-1,16	-0,405
H	0,3493	-0,57	-0,199
I	0,3493	-0,58	-0,203
J	0,3493	0,02	0,007

PRIMER IV

V primeru IV sem obravnaval samo pritisk na celotnem področju strehe.

Preglednica 11: Koeficienti zunanega tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri delovanju vetra pod kotom $\Theta=0^\circ$.

Področja	q_p	c_{pe}	w_e (kN/m ²)
F	0,3394	0,0142	0,00
G	0,3394	0,0142	0,00
H	0,3394	0,0142	0,00
J	0,3394	0,1148	0,04
I	0,3394	-0,5574	-0,19

Koeficient zunanega tlaka pri delovanju vetra vzporedno na sleme $\Theta=90^\circ$.

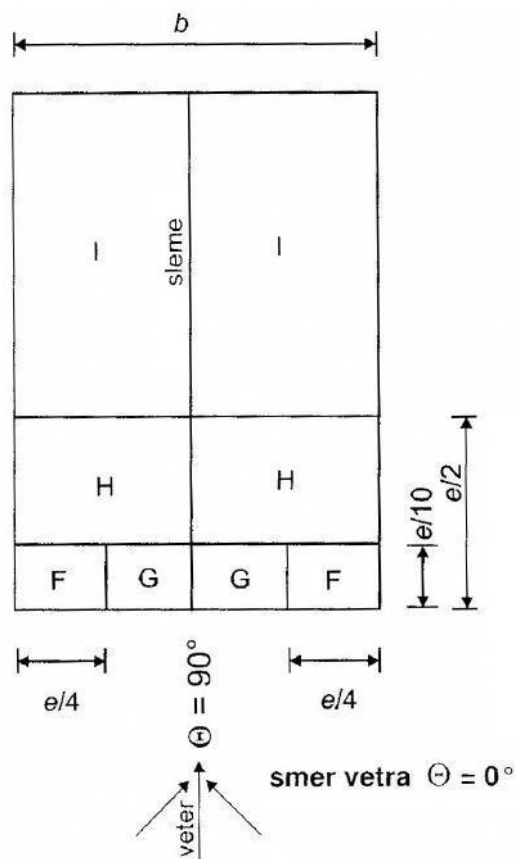
Po spodnjem postopku sem določil koeficiente zunanega tlaka za dvokapnice:

$$e = \min\{b; l; 2 \cdot h\} = \min\{18; 2 \cdot 6\} = \min\{18; 12\} = 12$$

$$\frac{e}{4} = \frac{12m}{4} = 3m$$

$$\frac{e}{10} = \frac{12m}{10} = 1,2m$$

$$\frac{e}{2} = \frac{12m}{2} = 6m$$



Slika 23: Razdelitev dvokapnice na področja pri delovanju vetra vzporedno na sleme [SIST EN 1991-1-4, 2005]

Na podlagi linearne interpolacije za dvokapnico, ki je odvisna od naklona strešine, sem za posamezno področje uporabil vrednosti koeficientov zunanje tlaka, ki so prikazani v spodnji preglednici.

Preglednica 12: Koeficienti zunanje tlaka in obtežba vetra za dvokapnice pri delovanju vetra vzporedno na sleme

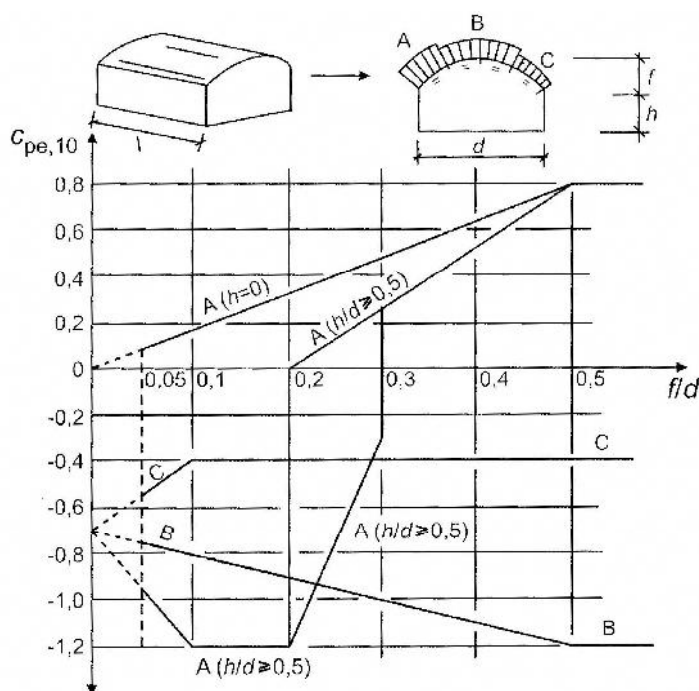
Področja	q_p	c_{pe}	w_e (kN/m ²)
F	0,3493	-1,78	-0,622
G	0,3493	-2,47	-0,863
H	0,3493	-0,69	-0,241
I	0,3493	-0,59	-0,206

3.4.5 Koeficient zunanega tlaka c_{pe} za ukrivljeno streho

Za ukrivljene strehe nad pravokotnim prerezom so koeficienti zunanega tlaka različni glede na področja, ki so označena od A do C. Referenčna višina je $z_e = h+f$.

$$\frac{h}{d} = \frac{6,0}{10,2} = 0,58$$

$$\frac{f}{d} = \frac{0,7}{10,2} = 0,068$$



za $0 < h/d < 0,5$ do $c_{pe,10}$ dobi z linearno interpolacijo
 za $0,2 < f/d < 0,3$ in $h/d \geq 0,5$ so obravnavata dve vrednosti $c_{pe,10}$
 Diagram ne velja za ravne strehe.

Slika 24: Priporočene vrednosti koeficientov za ukrivljene strehe nad pravokotnim tlorisom

[SIST EN 1991-1-4, 2005]

Na podlagi linearne interpolacije koeficientov za ukrivljene strehe nad pravokotnim tlorisom, določenih iz grafa Slika 21, sem za posamezno področje uporabil vrednosti koeficientov zunanega tlaka, ki so prikazane v spodnjih preglednicah.

Po določitvi $c_{pe,10}$ iz tabele sem izračunal še vrednosti w_e (kN/m^2) za ukrivljene strehe.

Preglednica 13: Koeficienti zunanega tlaka in obtežba vetra za ukrivljeno streho

Področja	q_p	c_{pe}	$w_e (kN/m^2)$
A	0,3493	-0,4	-0,140
B	0,3493	-0,86	-0,300
C	0,3493	-1,2	-0,419

Tlak vetra w_i na notranje ploskve

Tlak vetra na notranje ploskve sem izračunal po naslednji enačbi:

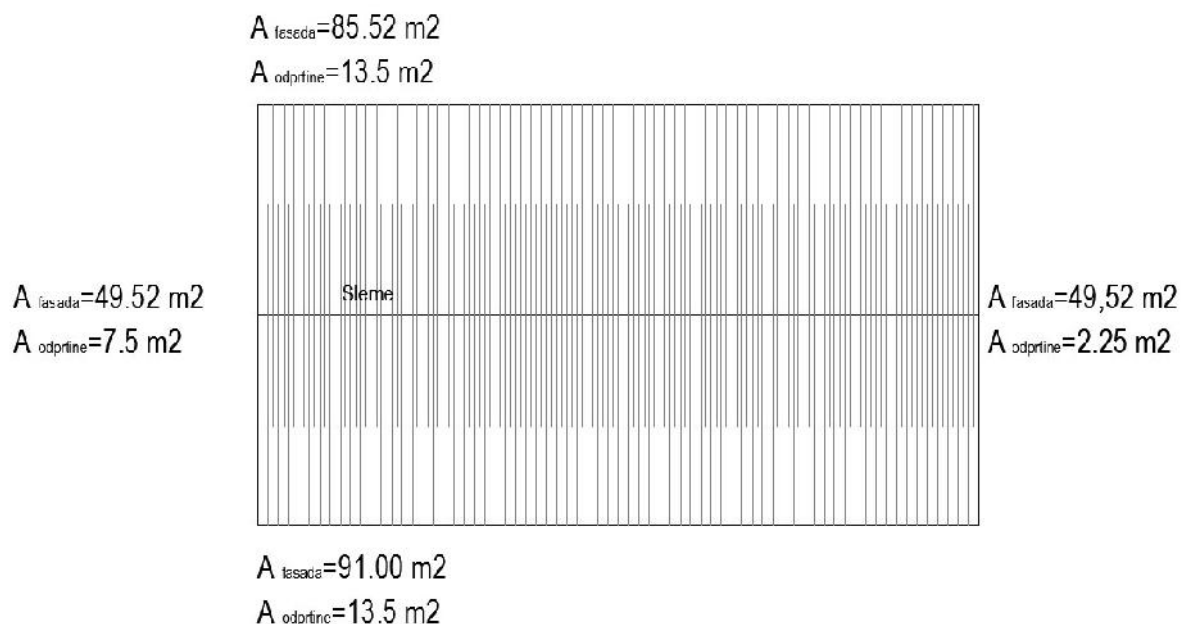
$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (3.15)$$

kjer so:

$q_p(z_i)$največji tlak pri sunkih vetra
 c_{pi}koeficient notranjega tlaka

3.4.6 Koeficient notranjega tlaka c_{pi} na navpične stene in obtežba vetra

Pri delovanju vetra je treba upoštevati sočasen vpliv notranjih in zunanjih tlakov. Ta vpliv upoštevamo takrat, ko predpostavimo, da nam lahko odprtine v ovoju stavbe prispevajo k prepustnosti in s tem k notranjim pritiskom oziroma srkom. Na podlagi tega je treba upoštevati najneugodnejšo kombinacijo zunanjih in notranjih tlakov. Notranji tlaki so odvisni predvsem od razporeditve odprtin na ovoju stavbe. Za prevladujočo stran ovoja stavbe glede na odprtine velja tista stran, ki ima dvakrat večjo površino odprtin v primerjavi z vsemi ostalimi površinami odprtin v ovoju stavbe. Slika 23 prikazuje površino posameznega dela fasade in pripadajočo površino odprtin.



Slika 25: Površina odprtin na posameznem ovoju stavbe

Za stavbe brez prevladujoče strani ovoja stavbe glede na odprtine, pri katerih ni smiselno določati koeficient notranjih tlakov, SIST EN 1991 priporoča naj za C_{pi} privzamemo neugodnejšo vrednost med +0,2 in -0,3.

Preglednica 14: Koeficienti notranjega srka in tlaka za vse oblike strehe

Področje celotne strehe	q_p	c_{pi}	$w_i \text{ (kN/m}^2\text{)}$
SRK	0,3493	-0,3	-0,105
TLAK	0,3493	0,2	0,070

Tlak vetra po enokapnici

Ker sem za enokapnice podal pozitivne in negativne vrednosti zunanjega vpliva, je v primeru tovrstnih strešine treba obravnavati tri primere, ki so mogoči med delovanjem obtežbe vetra:

PRIMER I

V primeru I sem zunanjem vplivu vetra pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$ prištel tlak notranjega vpliva vetra.

Preglednica 15: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$

Področja	w_e (kN/m²)+w_i(kN/m²)
F	-0,636
G	-0,475
H	-0,269

PRIMER II

V primeru II sem zunanjem vplivu vetra pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$ prištel srk notranjega vpliva vetra.

Preglednica 16: Skupni vpliv vetra (zunanji tlak + notranji srk) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$

Področja	w_e (kN/m²)+w_i(kN/m²)
F	0,168
G	0,168
H	0,168

PRIMER III

V primeru III sem zunanjem vplivu vetra pri smeri vetra $\Theta=180^\circ$ prištel tlak notranjega vpliva vetra.

Preglednica 17: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=180^\circ$

Področja	w_e (Kn/m²)+w_i(kN/m²)
F	-0,880
G	-0,524
H	-0,353

PRIMER IV

V primeru IV sem zunanjem vplivu vetra pri smeri vetra $\Theta=90^\circ$ prištel tlak notranjega vpliva vetra.

Preglednica 18: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$

Področja	w_e (kN/m ²)+ w_i (kN/m ²)
Fup	-0,814
Flow	-0,786
G	-0,702
H	-0,287
I	-0,252

Tlak vetra na dvokapnici

Ker sem za dvokapnice podal pozitivne in negativne vrednosti zunanjega vpliva, je v primeru tovrstnih strešine treba obravnavati štiri primere, ki so mogoči med delovanjem obtežbe vetra:

PRIMER I

V primeru I sem zunanjem vplivu vetra pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$ prištel tlak notranjega vpliva vetra.

Preglednica 19: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$

Področja	w (kN/m ²) = $w_e + w_i$
F	-0,636
G	-0,475
H	-0,269
I	-0,273
J	-0,294

PRIMER II

V primeru II sem zunanjem vplivu vetra pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$ prištel srk notranjega vpliva vetra na področjih F, G in H ter srk notranjega vpliva vetra na področjih J in I.

Preglednica 20: Skupni vpliv vetra (zunanji tlak + notranji srk) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$

Področja	$w \text{ (kN/m}^2\text{)} = w_e + w_i$
F	0,112
G	0,112
H	0,112
I	-0,273
J	-0,294

PRIMER III

V primeru III sem zunanjem vplivu vetra pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$ prištel tlak notranjega vpliva vetra na področjih F, G in H ter tlak notranjega vpliva vetra na področjih J in I.

Preglednica 21: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$

Področja	$w \text{ (kN/m}^2\text{)} = w_e + w_i$
F	-0,636
G	-0,475
H	-0,269
I	-0,273
J	-0,063

PRIMER IV

V primeru IV sem zunanjem vplivu vetra pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$ prištel srk notranjega vpliva vetra.

Preglednica 22: Skupni vpliv vetra (zunanji tlak + notranji srk) pri smeri vetra $\Theta=0^\circ$

Področja	$w \text{ (kN/m}^2\text{)} = w_e + w_i$
F	0,112
G	0,112
H	0,112
I	-0,273
J	0,112

PRIMER V

V primeru V sem obravnaval notranji in zunanji tlak vetra pri delovanju vetra vzporedno na sleme.

Preglednica 23: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) pri smeri vetra $\Theta=90^\circ$

Področja	w_e (kN/m ²)+ w_i (kN/m ²)
F	-0,210
G	-0,370
H	-0,489
I	-0,210

Tlak vetra po ukrivljeni strehi

Preglednica 24: Skupni vpliv vetra (zunanji srk + notranji tlak) za ukrivljeno streho

Področja	w_e (kN/m ²)+ w_i (kN/m ²)
A	-0,440
B	-0,600
C	-0,719

3.4.7 Maksimalna vrednost vpliva vetra

Na podlagi izračuna različnih oblik vpliva vetra na vse obravnavane oblike sem določil maksimalno obtežbo vetra. Kot sem že omenil, sem zaradi narave naloge, ki določa enakomerno razporejeno obtežbo, pri izračunih upošteval le največjo obtežbo vetra.

Maksimalna vrednost vpliva vetra $w = 0,880 \frac{kN}{m^2} \cdot l_1 = 0,880 \frac{kN}{m^2} \cdot 3 m = 2,64 \frac{kN}{m}$

3.5 Kombinacije vplivov za stalna in začasna projektna stanja

Pri projektiranju po mejnih stanjih nosilnosti je treba preveriti kombinacije vplivov za stalna in začasna projektna stanja ter kombinacije vplivov za potresna projektna stanja. Kot sem že omenil, narava naloge ne zahteva, da v analizi upoštevam horizontalne vplive, ker sem se

usmeril na primerjavo. V nadaljevanju sem torej obravnaval samo kombinacije vertikalni vplivov in sicer za stalna in začasna projektna stanja.

Kombinacije vplivov za stalna in začasna projektna stanja sem določil po naslednji enačbi:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} \cdot G_{kj} + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} \cdot \Psi_{0i} \cdot Q_{ki} \quad (3.16)$$

kjer so:

"+".....znak za kombinacijo
 Σkombiniran učinek
 $\gamma_{G,j}$delni faktor varnosti za stalni vpliv
 $G_{k,j}$karakteristična vrednost stalnega vpliva j
 $\gamma_{Q,i}$delni faktor varnosti za prevladajoči spremenljiv vpliv
 $Q_{k,i}$karakteristična vrednost prevladujočega spremenljivega vpliva
 $\gamma_{Q,i}$delni faktor varnosti za spremenljiv vpliv i
 $Q_{k,i}$karakteristična vrednost spremljajočega spremenljivega vpliva i
 $\Psi_{0,i}$kombinacijski faktor spremenljivega vpliva i

3.5.1 Kombinacije vplivov

Kombinacije vplivov za stalna in začasna projektna stanja ter za potresna projektna stanja sem določil s programom TOWER.

Preglednica 25: Vrednosti za kombinacije vplivov pri stalnem, začasnem in potresnem stanju

N_0 –	Vpliv	γ	Ψ_0	Ψ_2
I	lastna "+"stalna	1,35 ali 1,0	-	-
II	koristna "H"	1,5 ali 0,0	0,0	0,0
III	sneg	1,5 ali 0,0	0,5	0,0
IV	veter	1,5 ali 0,0	0,6	0,0

4 NAPETOSTI

Obravnaval sem vzdolžne in radialne napetosti oziroma napetosti prečno na smer vlaken.

Napetosti sem določil na dva načina in sicer:

- po poenostavljeni izrazih iz standarda Evrokod 5 in
- s podrobnejšo analizo po metodi končnih elementov.

4.1 Vzdolžna napetost ($\sigma_{m,d}$)

Evrokod 5 zahteva kontrolo vzdolžnih napetosti v kritičnem prerezu nosilca za vse nosilce s spremenljivo višino. Lokacijo kritičnega prereza na vzdolžni osi (x) določimo s pomočjo zahteve, da so odvodi normalnih napetosti po vzdolžni osi (x) enaki nič:

$$\sigma_x = \max. \frac{d\sigma_{xx}}{dx} = 0 \quad (4.1)$$

V literaturi lahko najdemo izraze za različne nosilce za določitev lokacije kritičnega prereza, kljub temu pa sem, zaradi tehnične možnosti, kritični prerez v tem primeru določil iz izračuna po metodi končnih elementov.

Program Tower podaja rezultate po MKE v obliki grafa poteka membranskih sil N_x (kN/m) po nosilcu. Napetosti $\sigma_{m,0,d}$ ob robu vzporednem z vlakni oziroma $\sigma_{m,\alpha,d}$ ob robu, nagnjenem za kot α izračunamo tako, da membransko silo N_x množimo s konstantno dimenzijo v v smeri.

Iste napetosti lahko določimo tudi po enačbah podanih v Evrokodu 5, ki za kontrolo napetosti v kritičnem prerezu privzema linearno porazdelitev in uvaja koeficient $k_{m,\alpha}$, s katerim reducira tlačno trdnost ob robu nagnjenem za α glede na smer vlaken. Zaradi možnosti primerjave in upoštevanja odstopanja tudi pri ravnem robu sem te napetosti izračunal po predlogu Riberholta:

$$\sigma_{m\alpha d} = (1 - 4,4 \times \tan^2 \alpha) \frac{6 \times M_d}{b \times h^2} \quad (\text{napetost pod kotom } \alpha \text{ na smer vlaken}) \quad (4.2)$$

$$\sigma_{m0d} = (1 + 3,7 \times \tan^2 \alpha) \frac{6 \times M_d}{b \times h^2} \quad (\text{napetost v smeri vlaken}) \quad (4.3)$$

Za koeficienta, ki določata razmerje med napetostjo korigirano zaradi naklona in linearno porazdeljeno napetostjo, sem v nadaljevanju uporabljal naslednje oznake:

k_{α} – koeficient spremembe napetosti ob nagnjenem robu

k_0 – koeficient spremembe napetosti ob ravnem robu

Pri dvokapnem in ukrivljenih nosilcih je treba kontrolirati vzdolžne napetosti v temenskem območju, kjer prihaja do maksimalnega momenta. Temensko območje določimo kot je prikazano na sliki (*Slika 26*). Evrokod 5 za vzdolžne napetosti v slemenu definira koeficient k_l , ki ga določimo po naslednji enačbi:

$$k_l = k_1 + k_2 \times \left(\frac{r_{ax}}{r}\right) + k_3 \times \left(\frac{r_{ax}}{r}\right)^2 + k_4 \times \left(\frac{r_{ax}}{r}\right)^3 \quad (4.4)$$

$$k_1 = 1 + 1,4 \tan \alpha_{ap} + 5,4 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (4.5)$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \tan \alpha_{ap} \quad (4.6)$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \tan \alpha_{ap} - 7,8 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (4.7)$$

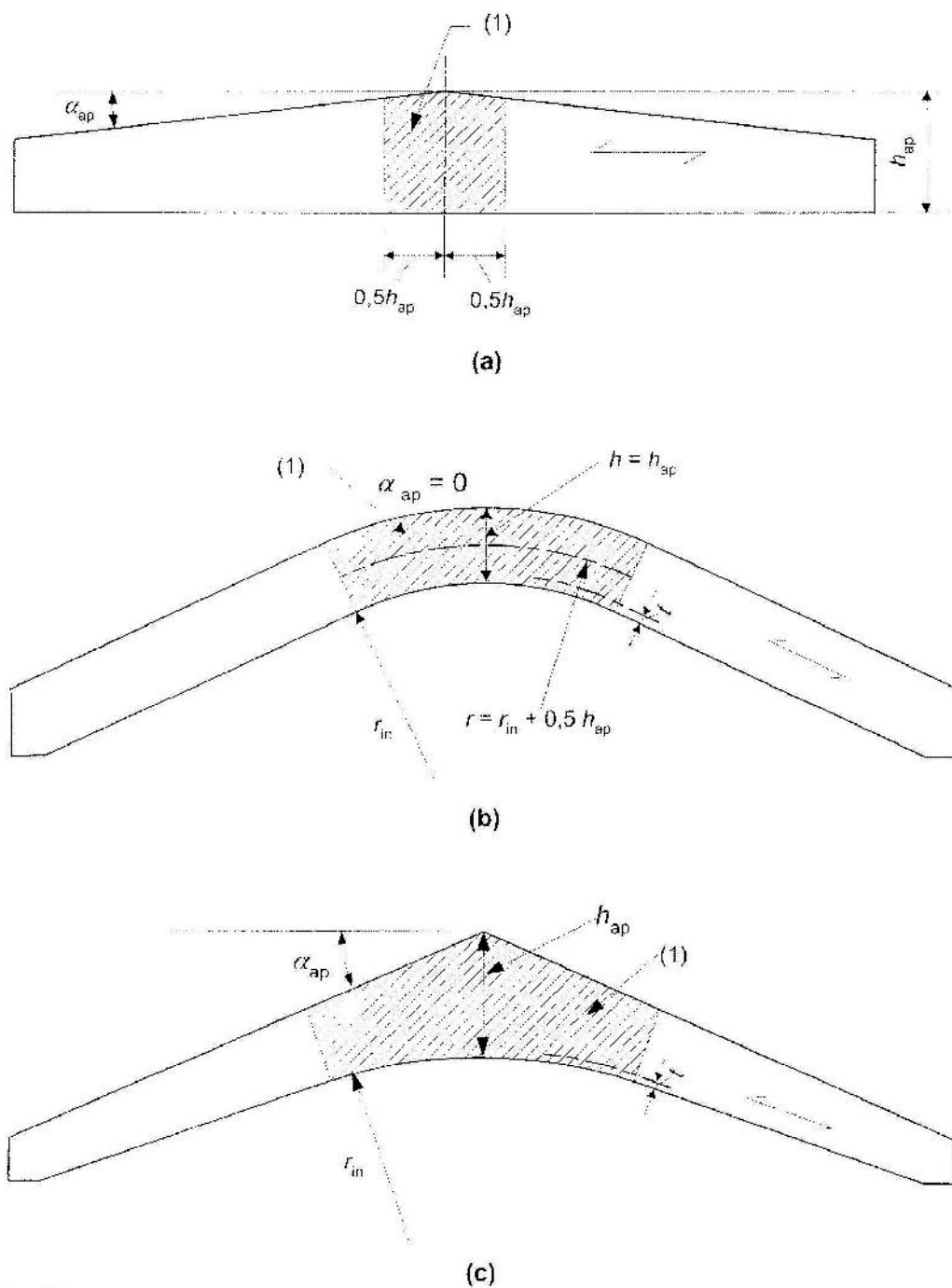
$$k_4 = 6 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (4.8)$$

$$r = r_{in} + 0,5h_{ap}$$

h_{ap} – višina nosilca v temenu (*Slika 26*)

b – širina nosilca

r_{in} – notranji radij ukrivljenega področja (*Slika 26*)



Legenda:

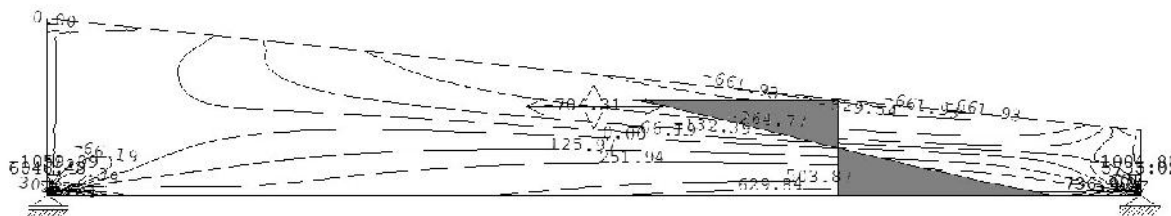
(1) temensko območje

OPOMBA: V ukrivljenih nosilcih in dvokapnih nosilcih z ukrivljenim spodnjim robom (sedlastih nosilcih) se temensko območje razteza preko ukrivljenega dela nosilca.

Slika 26: Določitev temenskega območja (SIST EN 1995-1-1 2005, str. 53)

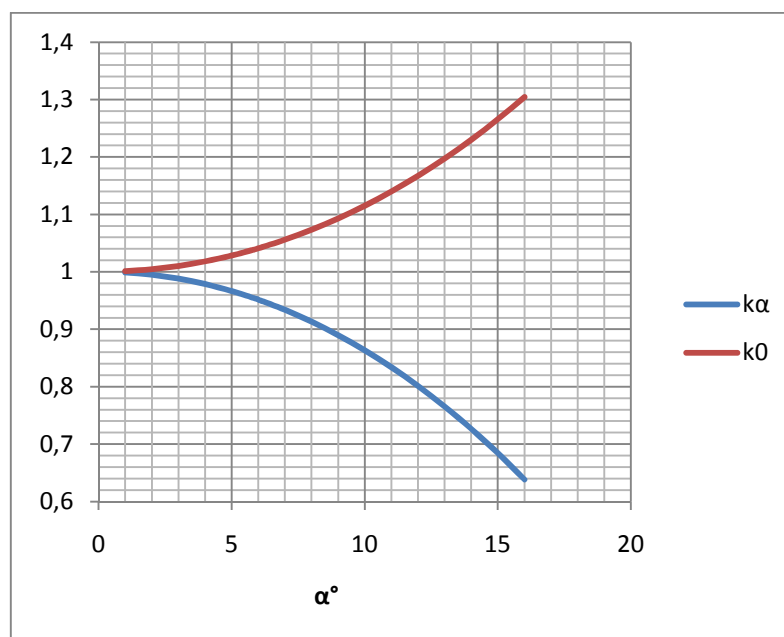
4.1.1 Enokapni nosilec

Slika 27 prikazuje potek membranske sile N_x po nosilcu in razporeditev te sile po kritičnem prerezu.



Slika 27: Razporeditev membranske sile N_x [kN/m] po enokapnem nosilcu in po kritičnem prerezu

Kot je iz enačb (4.2 ,4.3) razvidno, je razlika med linearno določeno vzdolžno napetostjo in tisto, določeno po Ribenholtu, pogojena z naklonom. Velikosti koeficientov napetosti glede na naklon je prikazana na spodnjem grafu (Slika 28).



Slika 28: Koeficient napetosti glede na naklon

Preglednica 26: Primerjava vrednosti koeficientov k_α in k_0 glede na način izračuna

	Riberholt	MKE
k_α	0,955	1,023
k_0	1,038	1,070

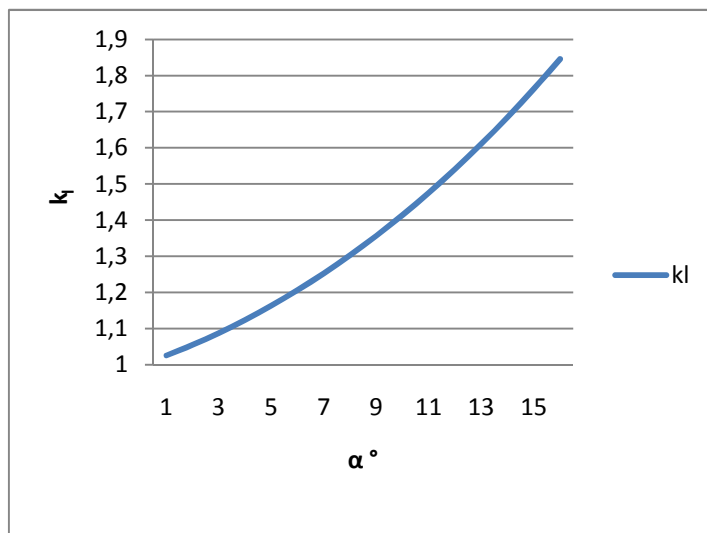
Koeficient napetosti pri spodnjem robu je večji od ena kar lahko pripišemo premalo zgoščeni mreži končnih elementov ampak kot je razvidno iz preglednice (Preglednica 26), odstopanja med koeficienti ne presegajo $\pm 7\%$ ne glede na to ali enokapni nosilec računamo z metodo končnih elementov ali upoštevamo Riberholtove korekcije odstopanja od linearno porazdeljene napetosti, kar pa je zanemarljivo.

4.1.2 Dvokapni nosilec

Ker je radij ukrivljenosti $r=\infty$, je razmerje med višino in radijem ukrivljenosti, ki se pojavlja v enačbah za določitev koeficienta k_l (4.4 - 4.8), pri dvokapnem nosilcu enako nič ($\frac{t_{ap}}{r} = 0$). Iz tega izhaja, da je enačba za določitev koeficienta k_l pri dvokapnem nosilcu:

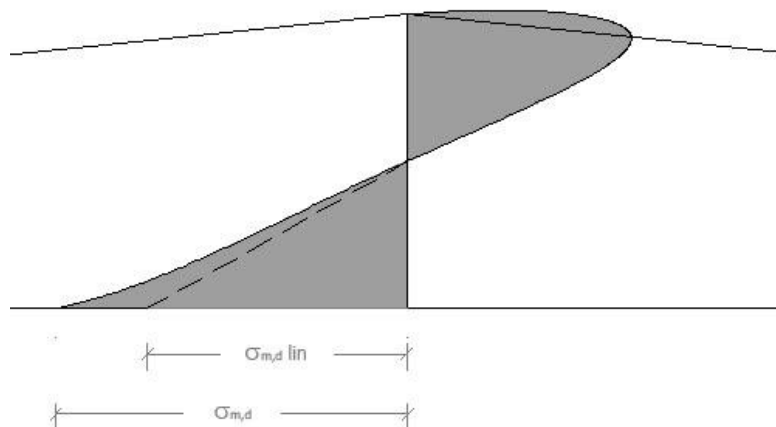
$$k_l = k_1 = 1 + 1,4 \tan \alpha_{ap} + 5,4 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (4.9)$$

Iz enačbe je razvidno, da na vrednost koeficienta k_l vpliva le naklon, tako kot prikazuje graf (Slika 29).



Slika 29: Vpliv naklona α° na koeficient k_1 pri dvokapnem nosilcu

S pomočjo koeficienta k_1 določimo napetosti v natezni coni slemena, ki niso več linearne (Slika 30). Takšno razmerje sem tudi določil po metodi končnih elementov in ugotavljal razliko med koeficientoma k_1 za različna načina izračuna.



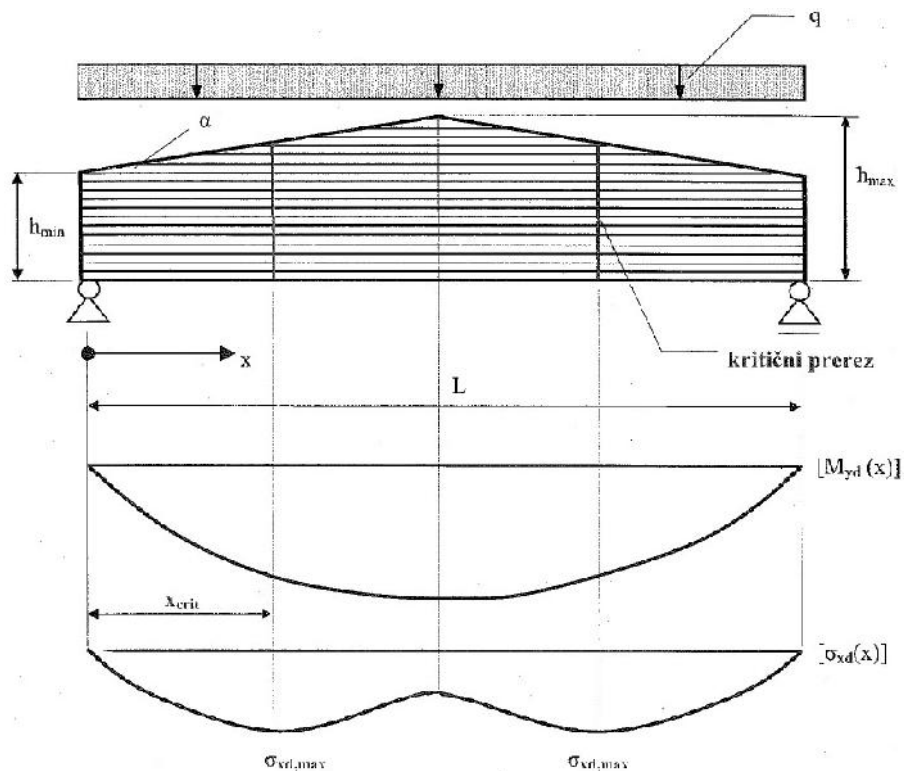
Slika 30: Prikaz linearne in dejanske razporeditve napetosti v dvokapnem nosilcu

Preglednica 27: Koeficient k_1 v odvisnosti od višine dvokapnega nosilca

h (m)	k_1 EC 5	k_1 MKE
0,86	1,198	1,184
1,02	1,198	1,186
1,40	1,198	1,212

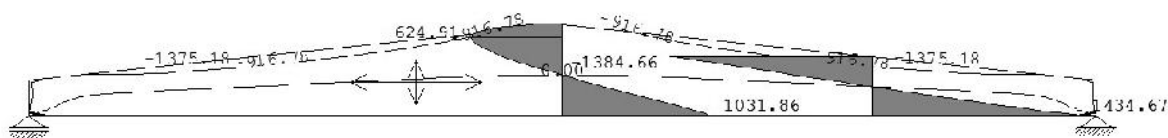
Čprav Evrokod 5 pri dvokapnih nosilcih ne upošteva vpliva višine nosilca na povečanje grafa vzdolžne napetosti v tlačni coni, je iz rezultatov (

Preglednica 27) razvidno, da pri računu po MKE do tovrstnih odstopanj prihaja.



Slika 31: Prikaz poteka vzdolžnih napetosti in lokacije kritičnega prereza za dvokapni nosilec zaradi konstantne zvezne obtežbe q (Premrov Miroslav in Dobrila Peter, Lesene konstrukcije, 2008, Fakultete za gradbeništvo Maribor, str. 328)

Ker so napetosti znotraj nosilca zaradi spremenljive višine porazdeljene kot na sliki (Slika 31), moramo pri dvokapnem nosilcu kontrolirati tudi kritični prerez, ki sem ga določil iz izračuna po metodi končnih elementov (Slika 32).



Slika 32: Membranska sila N_x [kN/m] v slemenu in kritičnem prerezu dvokapnega nosilca

Če napetosti v kritičnem prerezu dvokapnega nosilca določamo s pomočjo koeficientov po Riberholtu (enačbi 4.2 in 4.3), so vrednosti koeficientov zaradi identičnega naklona iste kot pri enokapnem nosilcu ampak odstopanja od koeficientov določenih po MKE so nekoliko manjša (Preglednica 28).

Preglednica 28: Koeficienta k_α in k_0 v odvisnosti od višine dvokapnega nosilca pri obeh načinih izračuna vzdolžnih napetosti

h (m)	k_α Riberholt	k_α MKE	k_0 Riberholt	k_0 MKE
0,86	0,955	0,986	1,038	1,002
1,02	0,955	1,014	1,038	1,038
1,40	0,955	0,994	1,038	1,089

4.1.3 Ukrivljen nosilec s spremenljivo višino

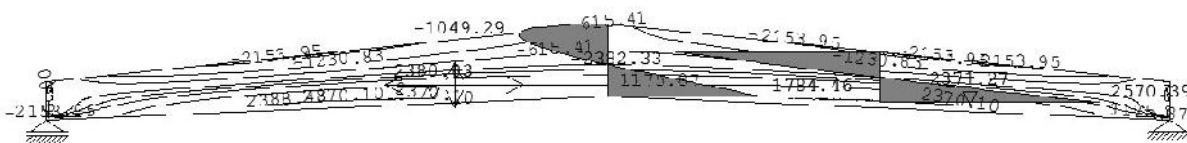
Tako pri ukrivljenem kot pri dvokapnem nosilcu s spremenljivo višino moramo kontrolirati potrebno vzdolžno napetost v slemenu. Pri izračunu koeficienta k_l je $\frac{f_{ap}}{r}$ 0 in, za razliko od dvokapnega nosilca, moramo obravnavati tudi ti dve spremenljivki. Po Evrokodu 5 na odstopanje pri ukrivljenem nosilcu s spremenljivo višino torej ne vpliva le naklon, ampak tudi razmerje višine nosilca v slemenu in radija ukrivljenosti nosilca. Edino v tovrstnem primeru sem uporabil celotne enačbe 4.4 – 4.8. Čeprav Evrokod 5 upošteva več možnih koeficientov, ki vplivajo na že omenjeno nelinearnost poteka napetosti, ta še vedno odstopa od izračuna po MKE.

Preglednica 29: Koeficient k_l v odvisnosti od višine ukrivljenega nosilca s spremenljivo višino

h_{ap} (m)	h_{ap}/r	k_l EC 5	k_l MKE
0,63	0,0101	1,193	1,127
0,80	0,0128	1,192	1,193
1,3	0,0207	1,189	1,246

Kljub očitnemu ne sorazmerju med spremembo koeficienta k_l glede na višino, lahko opazimo, da razlika med izračuni k_l ni bistvena.

Tako pri dvokapnem pri ukrivljenem nosilcu se pokaže, da se maksimalne napetosti dostikrat ne nahajajo v temenskem območju, ampak v kritičnem prerezu, ter jih je treba kontrolirati. Kritični prerez sem kot v prejšnjih primerih določil v modelu izračunanem po metodi končnih elementov (Slika 33).



Slika 33: Membranska sila N_x [kN/m] v slemenu in kritičnem prerezu ukrivljenega nosilca s spremenljivo višino

Preglednica 30: Koeficienta k_α in k_0 v odvisnosti od višine ukrivljenega nosilca s spremenljivo višino pri obeh načinih izračuna vzdolžnih napetosti

h (m)	k_α Riberholt	k_α MKE	k_0 Riberholt	k_0 MKE
0,63	0,955	0,950	1,038	1,025
0,80	0,955	1,014	1,038	1,038
1,3	0,955	0,994	1,038	1,033

Tudi v tem primeru ne prihaja do bistvenega odstopanja med koeficientoma, določenima po različnih metodah, čeprav se k_α in k_0 , določena po MKE, spreminjata z višino nosilca.

4.1.4 Ukrivljen nosilec s konstantno višino

Vzdolžne napetosti pri ukrivljenem nosilcu s konstantno višino moramo kontrolirati samo v slemenu. Ker je pri tovrstnem nosilcu $\alpha=0$, se koeficient k_l določi po enačbi:

$$k_l = 1 + 0,35 \times \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + 0,6 \times \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 \quad (4.10)$$

iz česar je razvidno, da v tem primeru samo faktor h_{ap}/r vpliva na razmerje med linearno porazdeljeno in dejansko napetostjo. Ko sem pri obeh metodah računanja določil koeficient k_l , sem dobil rezultate prikazane v spodnji preglednici (*Preglednica 31*).

Preglednica 31: Koeficient k_l v odvisnosti od višine ukrivljenega nosilca s konstantno višino

h_{ap} (m)	h_{ap}/r	k_l EC 5	k_l MKE
0,44	0,0134	1,005	1,048
0,50	0,0153	1,005	1,061
0,68	0,0206	1,007	1,076

Iz rezultatov je razvidno, da je vpliv višine nosilca na razmerje med dejanskimi in linearnimi poteki napetosti v nosilcu zanemarljiv pri tako majhni ukrivljenosti.

Vpliv radija ukrivljenosti na porazdelitev sile v vzdolžni smeri in zmanjšanje napetosti je toliko bolj opazen. Pri konstantni višini $h=0,68$ m sem dobil naslednje rezultate (*Preglednica 32*).

Preglednica 32: Koeficient k_l v odvisnosti od radija ukrivljenosti ukrivljenega nosilca s konstantno višino

r (m)	h_{ap}/r	k_l EC 5	k_l MKE
22,24	0,030	1,011	1,107
15,25	0,045	1,017	1,148
11,78	0,058	1,022	1,100

Iz *Preglednica 32* je razvidno, da je koeficient k_l večji, če je radij ukrivljenosti manjši pri izračunu po enačbah iz Evrokoda 5, ampak če računamo po MKE se zgodi ravno nasprotno.

4.2 Prečne napetosti ($\sigma_{t,90,d}$)

V slemenu se dodatno pojavijo tudi prečne napetosti, ki potekajo nelinearno po prečnem prerezu nosilca. Odvisne so od naklona in ukrivljenosti lamel. Običajno preverjamo samo natezne napetosti, ker je natezna trdnost lesa bistveno manjša od tlačne. Prečno napetost določimo po enačbi:

$$\sigma_{t90d} = k_p \frac{6 \times M_{apd}}{b \times h_{ap}^2} - 0,6 \frac{E_d}{b} \quad (4.11)$$

v kateri koeficient k_p zajame delež prečne napetosti glede na linearno razporejeni upogibni napetosti. Upoštevamo tudi redukcijo, v kateri je p_b projektna zvezna obtežba, ki deluje po zgornjem robu nosilca v območju slemena. Evrokod 5 redukcijo podaja za koeficient k_p :

$$k_p = k_5 + k_6 \times \left(\frac{r_{ax}}{r} \right) + k_7 \times \left(\frac{r_{ax}}{r} \right)^2 \quad (4.12)$$

$$k_5 = 0,2 \tan \alpha_{ap} \quad (4.13)$$

$$k_2 = 0,25 - 1,5 \tan \alpha_{ap} + 2,6 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (4.14)$$

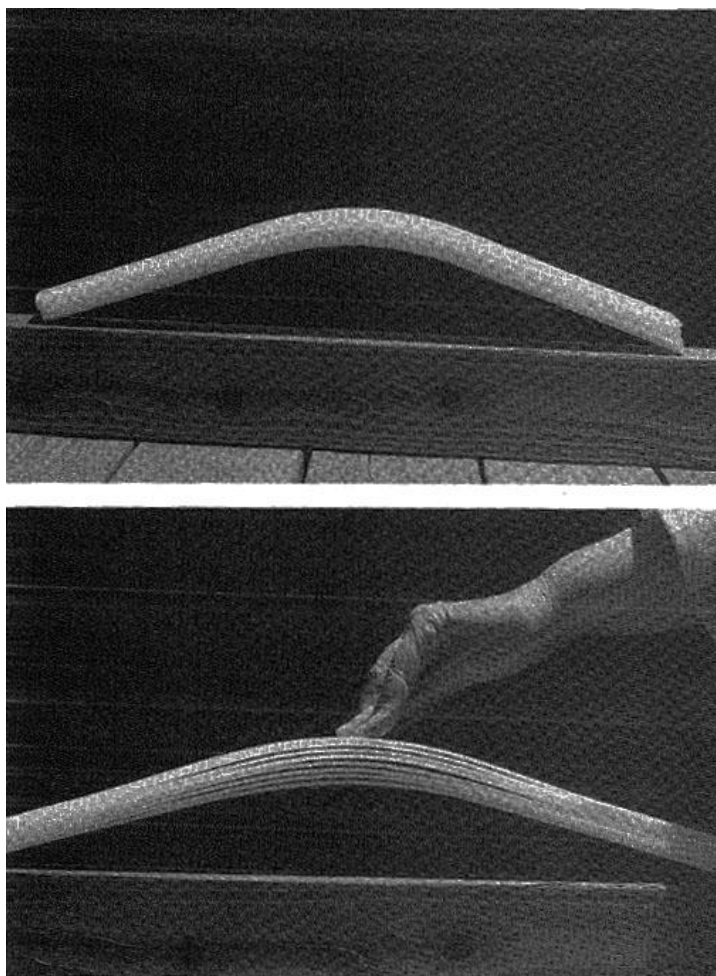
$$k_3 = 2,1 \tan \alpha_{ap} - 4 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (4.15)$$

$$r = r_{in} + 0,5h_{ap}$$

h_{ap} – višina nosilca v temenu (*Slika 26*)

b – širina nosilca

r_{in} – notranji radij ukrivljenega področja (**Error! Reference source not found.**)



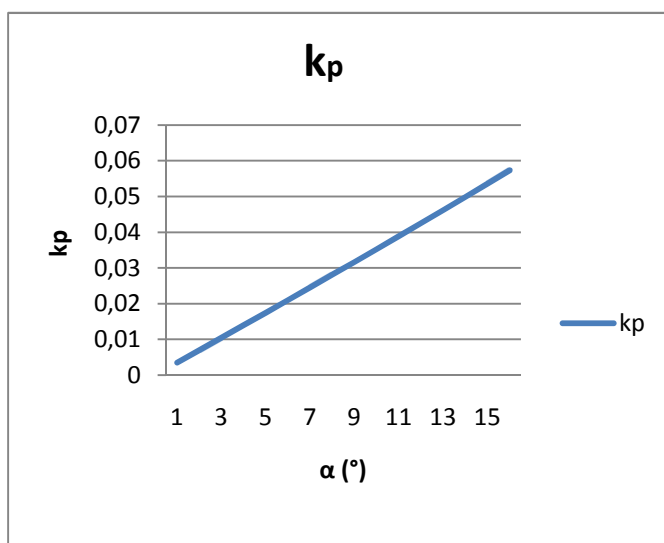
Slika 34: Plastični model ukrivljenega nosilca. Zgoraj: neobremenjen. Spodaj: obremenjen na zgornjem robu (Judith J. Stalnakar in Ernest C. Harris, Structural Design in Wood, 1997, Chapman & Hall, str. 177)

4.2.1 Dvokapni nosilec

Pri dvokapnem nosilcu je radij ukrivljenosti, kot sam že omenil, neskončen ($r=\infty$). Iz tega sledi, da je razmerje $h_{ap}/r=0$. Koeficient k_p je torej:

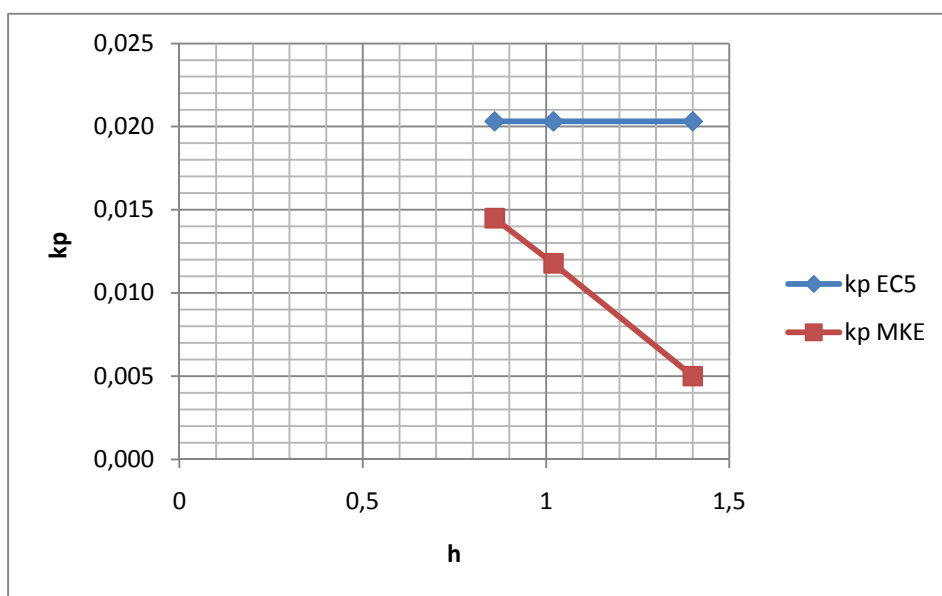
$$k_p = 0,2 \tan \alpha_{ap} \quad (4.16)$$

in je odvisen le od naklona (Slika 35).



Slika 35: Odvistnost koeficienta k_p od naklona α° pri dvokapnem nosilcu

Če pri izračunu po Evrokodu 5 spreminjamo višino nosilca, k_p pri dvokapnem nosilcu ostane isti, če pa pogledamo rezultate po metodi končnih elementov, se vrednost koeficienta k_p zmanjšuje z večanjem višine nosilca. In kot vidimo iz grafa (Slika 36) vrednost koeficienta narašča linearno.



Slika 36: Koeficient k_p v odvisnosti od višine prereza pri dvokapnem nosilcu

Preglednica 33: Koeficient k_p v odvisnosti od višine prereza pri dvokapnem nosilcu

h_{ap} (m)	h_{ap}/r	k_p EC 5	k_p MKE
0,86	∞	0,020	0,014
1,02	∞	0,020	0,012
1,4	∞	0,020	0,005

Če upoštevamo, da so vsi nosilci enako obremenjeni, ter da tudi nosilec z najmanjšim h zadostuje pogoju nosilnosti, ugotovimo, da največja odstopanja dobimo pri močno predimenzioniranem nosilcu. Iz *Preglednica 33* je ravno tako razvidno, da je koeficient k_p , določen po enačbah iz Evrokoda 5, vedno večji od tistega, določenega po MKE, in zato vedno na varni strani.

4.2.2 Ukrivljen nosilec s spremenljivo višino

Iz enačb 4.12-4.15 je razvidno, da je koeficient k_p pri ukrivljenem prerezu odvisen tako od naklona kot tudi od razmerja med višino in radijem ukrivljenosti (h_{ap}/r). Vendar je iz rezultatov (*Preglednica 35*) razvidno, da koeficient k_p , izračunan po enačbah iz Evrokoda 5 z večjim h_{ap}/r , rahlo narašča, tisti, ki sem ga določil po metodi končnih elementov pa vidno upada. Tako kot v primeru dvokapnega nosilca so odstopanja največja pri vidno predimenzioniranem nosilcu, faktor k_p , določen po Evrokodu 5, pa je vedno večji in zaradi tega na varni strani.

Preglednica 34: Koeficient k_p v odvisnosti od višine prereza pri ukrivljenem nosilcu s spremenljivo višino

h_{ap} (m)	h_{ap}/r	k_p EC 5	k_p MKE
0,63	0,010	0,022	0,017
0,80	0,013	0,022	0,015
1,30	0,021	0,023	0,007

4.2.3 Ukrivljen nosilec s konstantno višino

Po enačbah iz Evrokoda 5 pri ukrivljenem nosilcu s konstantnim prerezom za naklon privzamemo vrednost $\alpha=0^\circ$ in takrat enačba za koeficient k_p glasi:

$$k_p = 0,25 \times \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) \quad (4.16)$$

Preglednica 35: Koeficient k_p v odvisnosti od višine prereza pri ukrivljenem nosilcu s konstantno višino

h_{ap} (m)	h_{ap}/r	k_p EC 5	k_p MKE
0,44	0,013	0,003	0,002
0,50	0,015	0,004	0,003
0,68	0,021	0,005	0,003

Preglednica 35 kaže, da sprememba višine minimalno vpliva na prečno napetost v ukrivljenem nosilcu s konstantnim prerezom. Ker so odstopanja glede na način izračuna ravno tako bila minimalna, sem se odločil preveriti kako povečanje radija vpliva na koeficient k_p (*Preglednica 36*).

Preglednica 36: Koeficient k_p v odvisnosti od radija ukrivljenosti pri ukrivljenem nosilcu s konstantno višino

r (m)	h_{ap}/r	k_p EC 5	k_p MKE
22,24	0,030	0,008	0,005
15,25	0,045	0,011	0,009
11,78	0,058	0,014	0,012

Koeficient k_p je v izračunu po Evrokodu 5 upadal z radijem ukrivljenosti, kar sem pričakoval glede na enačbo, zanimivo pa je, da je koeficient, določen po MKE, tudi naraščal in ni prišlo do bistvenih odstopanj.

5 PRIMERJAVA REZULTATOV

Rezultate sem za primerjavo prikazal kot odstopanja med koeficienti določeni po Evrokodu 5 in metodi končnih elementov:

$$\text{odstopanje} = \frac{(kE(-kMKE) \cdot 100}{kMKE} \quad (5.1)$$

Negativne vrednosti v preglednicah pomenijo višjo vrednost napetosti določenih po MKE ker je k določen po Evrokodu 5 zmanjševanec. Torej pozitivne vrednosti pomenijo da smo na varni strani ob upoštevanju enačb EC5.

5.1 Koeficient napetosti v kritičnem prerezu (k_α , k_0)

Preglednica 37: Odstopanja koeficientov k_α in k_0

	Odstopanje (%)
k_α	-6,65
k_0	-2,96

Preglednica 38: Odstopanja koeficientov k_α in k_0 glede višino h

	h_{ap} (m)	Odstopanje k_α (%)	Odstopanje k_0 (%)
Dvokapni nosilec	0,86	-3,2	1,6
	1,02	-5,9	0,0
	1,40	-3,9	-4,9
Ukrivljeni nosilec s spremenljivo višino	0,63	0,5	1,3
	0,80	-3,0	0,0
	1,30	-2,0	-9,1

Vsa odstopanja pri določanju koeficienta napetosti v kritičnem prerezu so v inženirsko sprejemljivih mejah $\pm 10\%$. Relativno velika in negativna odstopanja dobimo le pri napetosti

ob zgornjem robu in pri nosilci ki nimajo optimalne višine. Odstopanja se manjšajo z približanjem realni višini nosilca. Napetosti so v tem primeru bile določene po Riberholtu ampak če upoštevamo priporočilo Evrokoda 5 da se upogibna trdnost ob zgornjem robu zmanjša za koeficient $k_{m,\alpha}$ in da se za kontrolo uporabi linearno porazdelitev menim da bi bili na varni strani.

5.2 Koeficient vzdolžne napetosti v slemenu (k_l)

Preglednica 39: Odstopanja koeficientov k_l glede na višino h

	h_{ap} (m)	Odstopanje k_l (%)
Dvokapni nosilec	0,86	1,1
	1,02	1,0
	1,40	-1,2
Ukrivljeni nosilec s spremenljivo višino	0,63	5,9
	0,80	0,0
	1,30	-4,6
Ukrivljeni nosilec s konstantno višino	0,44	-4,2
	0,50	-5,2
	0,68	-6,4

Odstopanja pri določanju koeficienta vzdolžne napetosti v slemenu so v inženirsko sprejemljivih mejah $\pm 10\%$. Relativno velika in negativna odstopanja dobimo le pri močno predimenzioniranimi nosilci in pri ukrivljenem nosilcu s konstantno višino. Vrednost odstopanja se zmanjšuje z približevanjem višine realni vrednosti.

5.3 Koeficient prečne napetosti v slemenu (k_p)

Preglednica 40: Odstopanja koeficientov k_p glede na višino h

	h_{ap} (m)	Odstopanje k_p (%)
Dvokapni nosilec	0,86	40,1
	1,02	42,0
	1,40	75,3
Ukrivljeni nosilec s spremenljivo višino	0,63	29,0
	0,80	31,5
	1,30	67,9
Ukrivljeni nosilec s konstantno višino	0,44	39,6
	0,50	67,9
	0,68	38,6

Preglednica 41: Prečne napetosti v slemenu

	h_{ap} (m)	$\sigma_{t,90,d}$ (kN/m ²) EC	$\sigma_{t,90,d}$ (kN/m ²) MKE	$k_{dis} * f_{t,90,d} * k_{vol}$ (kN/m ²)
Dvokapni nosilec	0,86	66,99	63,15	156,24
	1,02	43,05	37,45	145,93
	1,40	14,79	8,95	128,57
Ukrivljeni nosilec s spremenljivo višino	0,63	149,46	132,5	415,05
	0,80	89,23	75,85	377,22
	1,30	25,98	15,25	310,64
Ukrivljeni nosilec s konstantno višino	0,44	31,81	38,4	197,32
	0,50	25,85	32,4	192,34
	0,68	14,24	21,95	180,87

Odstopanja pri izračunu napetosti prečno na vlakna so, kot je razvidno iz preglednice (Preglednica 39), zelo velika in znašajo tudi do 75 %. Ker gre za zelo majhne absolutne

vrednosti (*Preglednica 41*) so razlike med vrednostmi zanemarljive v primerjavi z zahtevano trdnostjo (*Preglednica 41*) in znašajo maksimalno 4,5 % trdnosti.

Z povečanjem ukrivljenosti nosilca se poveča tudi možnost da pečna napetost postane merodajna. Zaradi tega sem preveril tudi vpliv ukrivljenosti na odstopanja med vrednostmi koeficientov pri ukrivljenem nosilcu z konstantno višino in ugotovil da se močno zmanjšujejo (*Preglednica 42*).

Preglednica 42: Odstopanja koeficientov k_p glede na radij ukrivljenosti r

r	h/r	Odstopanje k_p (%)
22,32	0,045	40,8%
15,25	0,030	26,0%
11,78	0,058	17,4%

6 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem določal napetosti v lepljenih lesenih nosilcih na dva načina in sicer po poenostavljenih izrazih iz Evrokoda 5 ter po metodi končnih elementov. Zanimala so me možna odstopanja med vrednostmi pridobljenimi na ta dva načina.

Po analizi pridobljenih rezultatov pri izračunu vzdolžnih napetosti v kritičnem prerezu in slemenu po metodi končnih elementov ter po poenostavljenih izrazih iz Evrokoda 5 sem ugotovil, da določena odstopanja med vrednostmi koeficientov določenimi po dveh metodah obstajajo, ampak ne presegajo 10 % vrednosti koeficientov določenih po metodi končnih elementov, kar je inženirsko sprejemljivo.

Pri izračunu prečnih napetosti v slemenu dobimo na prvi pogled zelo velika odstopanja med koeficienti določeni po Evrokodu 5 in koeficienti določeni po metodi končnih elementov. Pri vseh primerih so koeficienti določeni po Evrokodu 5 večji od koeficientov določenih po MKE. Iz primerjave absolutnih vrednosti napetosti z zahtevano trdnostjo sem ugotovil, da v teh primerih napetost ni izkoriščena, ker s povečanjem ukrivljenosti nosilca povečamo tudi možnost, da prečna napetost postane merodajna, sem preveril kako ukrivljenost vpliva na odstopanja koeficienta k_p določenega po Evrokodu 5 od koeficienta k_p določenega po metodi končnih elementov. Ugotovil sem, da se pri manjših radijih ukrivljenosti odstopanja močno zmanjšujejo in lahko predvidevam, da v primeru, ko je prečna napetost merodajna, odstopanja pridejo v inženirsko sprejemljive meje.

Čeprav je pri izračunih prišlo do zgoraj omenjenih odstopanj lahko zaključimo da so poenostavljeni izrazi iz Evrokoda 5 dovolj natančni za vsakdanjo uporabo.

7 VIRI

Aghayere, A., Vigil, J. 2007. Structural Wood Design a practice-Orianted Approach Using the ASD Method. John Wiley & Sons: 369 str.

Kermani, A. 1999. Structural Timber Design. Oxford, Blackwell Science: 268 str.

Lopatič, J. 2010. Študijsko gradivo pri predmetu LK II, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 12 str.

Premrov, M., Dobrila, P. 2008. Lesene konstrukcije. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo: 347 str.

Stalnaker, J., Harris, E., 1997. Structural Design in Wood. Massachusetts, Chapman & Hall: 448 str.

SLOVENSKI STANDARD SIST EN 1990, september 2004, EVROKOD – Osnove projektiranja konstrukcij

SLOVENSKI STANDARD SIST EN 1991-1-1, september 2004, EVROKOD 1 – Vplivi na konstrukcije - 1.1.del: Splošni vplivi – Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb

SLOVENSKI STANDARD SIST EN 1991-1-3, september 2004, EVROKOD 1 – Vplivi na konstrukcije - 1.3.del: Splošni vplivi – Obtežba snega

SLOVENSKI STANDARD SIST EN 1991-1-4, oktober 2005, EVROKOD 1 – Vplivi na konstrukcije - 1.4.del: Splošni vplivi – Vplivi vetra

SLOVENSKI STANDARD SIST EN 1995-1, maj 2005, EVROKOD 5 – Projektiranje lesenih konstrukcij - 1.del: Splošna pravila in pravila za stavbe