

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:

Domadenik, Ž., 2015. Dimenzioniranje značilnih lameliranih lepljenih lesenih nosilcev. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Lopatič, J.): 39 str.

Datum arhiviranja: 05-10-2015

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Domadenik, Ž., 2015. Dimenzioniranje značilnih lameliranih lepljenih lesenih nosilcev. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Lopatič, J.): 39 pp.

Archiving Date: 05-10-2015

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*

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



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM PRVE STOPNJE  
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

**ŽIGA DOMADENIK**

**DIMENZIONIRANJE ZNAČILNIH LAMELIRANIH  
LEPLJENIH LESENIH NOSILCEV**

Diplomska naloga št.: 232/B-GR

**DESIGN OF TYPICAL GLUED LAMINATED TIMBER  
BEAMS**

Graduation thesis No.: 232/B-GR

**Mentor:**

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 24. 09. 2015

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **ŽIGA DOMADENIK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom  
»**DIMENZIONIRANJE ZNAČILNIH LAMELIRANIH LEPLJENIH LESENIH NOSILCEV**«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 18.09.2015

Žiga Domadenik

---



## **BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>624.011.1(497.4)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Žiga Domadenik</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Jože Lopatič</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Dimenzioniranje značilnih lameliranih lepljenih lesenih nosilcev</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>39 str., 6 pregl., 17 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>lesene konstrukcije, nosilci, lepljeni nosilci, lamelirani nosilci, glulam, računalniški program, dimenzioniranje, Evrokod 5</b>

### **Izvleček**

V diplomski nalogi sem izdelal računalniški program s pomočjo razvijalca, vgrajenega v program Excel; uporabil sem programski jezik Visual Basic (VBA). Program omogoča dimenzioniranje značilnih lameliranih lesenih nosilcev, ki jih obravnava Evrokod 5: Enokapni nosilec spremenljive višine, dvokapni nosilec spremenljive višine, ukrivljeni nosilec s konstantno višino in dvokapni ukrivljen nosilec s spremenljivo višino. V programu sem uporabil poenostavljene izrazi iz Evrokoda 5. Prvi del diplomske naloge opisuje izraze s katerimi kontroliramo ustreznost posameznega elementa – tako proti porušitvi kot tudi v menih stanjih uporabnosti. Drugi del diplomske naloge opisuje delovanje programa, tretji del pa prikaže računski primer po posameznih korakih izračunan s pomočjo programa.

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

**UDK:** 624.011.1(497.4)(043.2)

**Author:** Žiga Domadenik

**Supervisor:** Assoc. Prof. Jože Lopatič, Ph.D

**Title:** Design of typical glued laminated timber beams

**Notes:** 39 p., 6 tab., 17 fig.

**Key words:** structural timber design, glued laminated members, glulam, dimensioning, computer program, Eurocode 5

### **Abstract**

In this graduation thesis, I developed a computer program with the help of Excel's built-in developer. I used the programming language Visual Basics (VBA). The program allows dimensioning of typical laminated timber beams covered by Eurocode 5: Single tapered beam, double tapered beam, curved beam and pitched cambered beam. The program uses simplified expressions of Eurocode 5. The first part of the thesis describes expressions used for dimensioning, the second part describes the operation of the program and the third part shows the example of step by step calculation through the program.

## KAZALO VSEBINE

<b>IZJAVA O AVTORSTVU</b>	<b>I</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT</b>	<b>IV</b>
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 ZNAČILNI TIPI NOSILCEV</b>	<b>2</b>
2.1 Enokapni nosilci spremenljive višine	2
2.1.1 Kontrola strižnih napetosti	2
2.1.2 Kontrola normalnih napetosti v kritičnem prerezu	3
2.1.3 Kontrola radialnih napetosti v kritičnem prerezu	5
2.1.4 Kontrola strižnih (tangencialnih) napetosti v kritičnem prerezu	6
2.1.5 Kontrola kontaktnih napetosti	6
2.1.6 Kontrola povesov	7
2.2 Dvokapni in ukrivljeni nosilci	8
2.2.1 Kontrola normalnih napetosti v temenu	9
2.2.2 Kontrola radialnih napetosti v temenu	9
2.2.3 Kontrola povesov	10
<b>3 OPIS PROGRAMA</b>	<b>12</b>
3.1 Vhodni podatki	12
3.1.1 Razpetina, ki jo želimo premostiti ( $L$ )	13
3.1.2 Razdalja med posameznimi bočnimi podporami vzdolž nosilca ( $l_{ef}$ )	13
3.1.3 Naklon zgornjega roba nosilca ( $\alpha$ oziroma $\beta$ )	13
3.1.4 Notranji radij zaokrožitve nosilca ( $r$ )	13
3.1.5 Širina prečnega prereza nosilca ( $b$ )	14
3.1.6 Debelina posamezne deske oziroma lamele ( $t$ )	14
3.1.7 Naklon spodnjega roba nosilca ( $\delta$ )	15
3.1.8 Stalni vplivi ( $g$ )	15
3.1.9 Lastna teža nosilca	16
3.1.10 Koristni spremenljiv vpliv ( $q$ ), trajanje in kombinacijski faktorji ( $\psi_0, \psi_1, \psi_2$ )	16
3.1.11 Spremenljiva obtežba s snegom ( $q_s$ )	16
3.1.12 Spremenljiva obtežba z vetrom ( $q_w$ )	16
3.1.13 Trdnostni razred	17
3.1.14 Razred uporabe	17
3.1.15 Največji dovoljeni trenutni poves ( $w_{inst}$ )	17
3.1.16 Največji dovoljeni končni poves ( $w_{fin}$ )	17
3.2 Opis delovanja programa	18
3.2.1 Kontrola strižnih napetosti	21

3.2.2	Kontrola normalnih napetosti v temenu	22
3.2.3	Kontrola radialnih napetosti v temenu	23
3.2.4	Kontrola normalnih napetosti v kritičnem prerezu	24
3.2.5	Kontrola radialnih napetosti v kritičnem prerezu	25
3.2.6	Kontrola strižnih napetosti v kritičnem prerezu	26
3.2.7	Kontrola kontaktnih napetosti	26
3.2.8	Kontrola povesa	27
4	RAČUNSKI PRIMER UPORABE PROGRAMA	30
4.1	Izbira merodajne kombinacije vplivov in izračun projektnih materialnih karakteristik	31
4.2	Kontrola strižnih napetosti pri $x=0$	32
4.3	Kontrola normalnih napetosti v temenu ( $x=L/2$ )	32
4.4	Kontrola nateznih radialnih napetosti v temenu ( $x=L/2$ )	33
4.5	Kontrola normalnih napetosti v kritičnem prerezu ( $x = x_{crit}$ )	34
4.6	Kontrola tlačnih radialnih napetosti v kritičnem prerezu ( $x = x_{crit}$ )	35
4.7	Kontrola strižnih napetosti v kritičnem prerezu ( $x = x_{crit}$ )	35
4.8	Kontrola trenutnih pomikov v MSU	35
4.9	Kontrola končnih pomikov v MSU	36
4.10	Izpis vseh kontrol s pomočjo programa	37
5	ZAKLJUČEK	38
	VIRI	39



## KAZALO SLIK

Slika 1: Enokapni nosilec s spremenljivo višino	2
Slika 2: Koeficient $k_{m,\alpha}$ glede na naklon $\alpha$	4
Slika 3: Tlačne (zgoraj) in natezne (spodaj) radialne napetosti glede na orientacijo nagnjenega roba	5
Slika 4: Potek strižnih (tangencialnih) napetosti po višini kritičnega prereza	6
Slika 5: Dvokapni nosilec s spremenljivo višin	8
Slika 6: Ukrivljen nosilec konstantne višine	8
Slika 7: Dvokapni ukrivljen nosilec s spremenljivo višin	8
Slika 8: Dvokapni nosilec – radialne napetosti v slemenu	9
Slika 9: Grafični prikaz vhodnih podatkov in glavnega rezultata, ki nam ga ponudi program	12
Slika 10: Hitrost naraščanja prve, druge in četrte potence razpetine v logaritmičnem merilu	13
Slika 11: Geometrijske karakteristike dvokapnega nosilca z ukrivljeno osj	14
Slika 12: Grob prikaz normalnih napetosti v lamelah zaradi upogiba med izdelavo elementa	14
Slika 13: Redukcijski faktor $k_r$ v odvisnosti od radija zaokrožitve in debeline posamezne lamele	15
Slika 14: Prikaz spreminjanja oblike dvokapnega nosilca pri različnih naklonih spodnjega roba	15
Slika 15: Primer vnosa podatkov o obtežbi nosilca	18
Slika 16: Potek prečnih sil vzdolž dolžine nosilca	21
Slika 17: Vhodni podatki	30

## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Kombinacijski varnostni faktorji	16
Preglednica 2: Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti lepljenega lesa	17
Preglednica 3: Potrebne kontrole glede na tip nosilca	20
Preglednica 4: Povečevanje višine nosilca do zadostitve kontroli normalnih napetosti	34
Preglednica 5: Povečevanje višine $h_1$ do zadostitve zahtevi o takojšnjem pomiku	36
Preglednica 6: Povečevanje višine $h_1$ do zadostitve zahtevi o končnem pomiku	36

## 1 UVOD

Lameliran lepljen les oziroma angleško *glued laminated timber* ali še krajše *glulam*, nastane z lepljenjem lesenih lamel v celoto. Na tak način pridemo do najrazličnejših oblik in prerezov elementa.

Ideja lepljenega lesa (Lopatič 2012) se je razvila zaradi potrebe po večjih oziroma ustrežnejših elementih. Na eni strani lahko izdelamo elemente z višino tudi do dva metra, ki lahko premostijo izjemne razpetine, po drugi strani pa lahko izdelamo manjše elemente (npr. 30/30cm) z boljšimi lastnostmi kot bi nam jih ponudili masivni elementi, ki bi se pri sušenju nekoliko deformirali, popokali in ukrivili. Poleg večje geometrijske stabilnosti nam lepljeni nosilci prinašajo tudi pogled v notranjost elementa med samo izdelavo; na ta način lahko izločimo oziroma razpršimo šibka mesta kot so grče in smolnati kanali. S tem dobi glulam tudi nižji delni varnostni faktor za lastnosti in odpornosti materiala, ki znaša 1.25 (pri masivnem lesu znaša 1.30).

Otto Hetzer (Otto Hetzer 2015), oče lepljenega lameliranega lesa, po poklicu mojster tesar in uspešen podjetnik je že med leti 1891 in 1910 postal lastnik petih mednarodnih patentov na temo lameliranih lepljenih konstrukcij. Njegov cilj je bil jasen: izboljšati trdnostne lastnosti lesa; tako mu je leta 1910 uspelo premostiti razpetino 43m na svetovni razstavi v Bruslju. Lepljene konstrukcije so postale konkurenčnejše šele v 60-ih in 70-ih letih prejšnjega stoletja, ko je kemijska industrija razvila boljše, obstojnejše lepila.

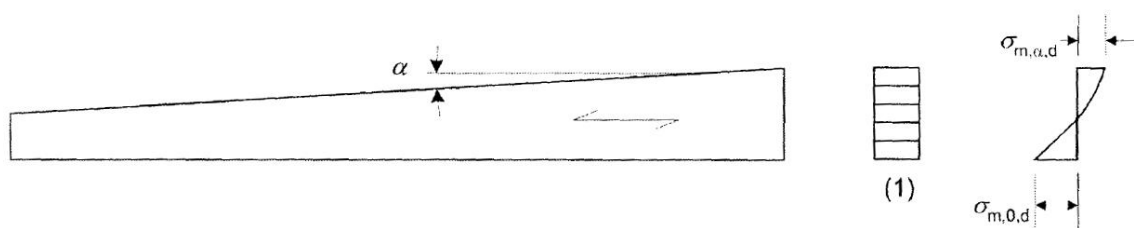
Pri lepljenih nosilcih (Lopatič 2012) velja, da so lamele obrnjene tako, da potekajo vlakna vzporedno z dolžino nosilca. Tipična širina lamele je 20 centimetrov, debelina pa je odvisna od ukrivljenosti elementa. Želja je, da bi bile lamele čim debelejše; s tem je element cenejši, ker ga je potrebno manj obdelati, porabiti manj lepila in pridelati manj odpadka v obliki žagovine. Za ravne nosilce se debeline lamel lahko gibljejo okoli 40 milimetrov, za velike ukrivljenosti pa so lamele lahko debele tudi samo 10 milimetrov.

V diplomski nalogi sem izdelal program za dimenzioniranje tipičnih oblik nosilcev, ki jih obravnava Evrokod 5. Vsi elementi imajo pravokotni prečni prerez, po obliki pa se spreminjajo od najbolj enostavnega ravnega nosilca pa do dvokapnega nosilca s spremenljivo višino in ukrivljeno osjo.

## 2 ZNAČILNI TIPI NOSILCEV

Obravnaval sem štiri osnovne oblike nosilcev, ki jih obravnava Evrokod 5, dve od teh sem obravnaval še v dveh različnih orientacijah. Ne glede na obliko elementa, je prerez vedno pravokotne oblike ( $b/h$ ). Predvidevam tudi, da je arhitekturna oblika elementa določena; torej že v naprej poznamo razpetino ter naklon in/ali radij elementa, ki ga dimenzioniramo; v naprej poznamo tudi vplive, ki delujejo na element. Odprta vedno ostaja le višina prereza ( $h(x)$ ), ki mora zadostiti vsem kontrolam.

### 2.1 Enokapni nosilci spremenljive višine



Slika 1: Enokapni nosilec s spremenljivo višino (SIST EN 1995-1-1:2005 - 6.4.2 Ravni enokapni nosilci)

Gre za elemente, katerih višina se linearno spreminja, prerez pa ostaja pravokoten  $b/h(x)$ . Okvirne razpetine, ki so jih enokapni nosilci zmožni premostiti so do 30m, pri čemer je orientacijska vrednost  $h_{min} \approx L/30$  (Lopatič 2012), kot  $\alpha$  pa 0-10° (Porteous in Keramani 1999). Tak tip nosilca se največkrat uporablja kot primarna strešna nosilna konstrukcija, s katero že zagotovimo zadosten naklon strehe. Program omogoča tudi izračun nosilca, ki ima nagnjen rob na spodnji strani, tako je lahko na zgornji strani še neka uporabna horizontalna površina.

#### 2.1.1 Kontrola strižnih napetosti

Prva kontrola v mejnem stanju nosilnosti, kontrolira strižne napetosti, ki se spreminjajo tako vzdolž nosilca kot tudi po njegovi višini. Največja strižna napetost se pojavi na mestu, kjer je prečna sila ( $V_d$ ) največja in višina ( $h(x)$ ) najmanjša – to se zgodi na začetku nosilca (glede na sliko 1). To kontrolo zato najlažje izvedemo takoj na začetku, ker v njej nastopa zgolj ena neznana količina –  $h_{min}$ .

$$\tau_{v,d} = \frac{1.5 V_d}{k_{cr} b h_{min}} \leq f_{v,g,d} = \frac{k_{mod} f_{v,g,k}}{\gamma_M} \quad (1)$$

Pri tem so:  $\tau_{v,d}$  projektna strižna napetost,  $V_d$  največja projektna prečna sila,  $k_{cr}$  koeficient, ki upošteva vpliv razpok (priporočena vrednost za lepljen les je 0,67),  $f_{v,g,d}$  projektna strižna trdnost lepljenega lesa,  $f_{v,g,k}$  karakteristična strižna trdnost lepljenega lesa,  $k_{mod}$  modifikacijski faktor, ki zajame trajanje obtežbe in vlažnostne pogoje lesa,  $\gamma_M$  pa je materialni varnostni faktor, ki za lepljen les znaša 1,25.

### 2.1.2 Kontrola normalnih napetosti v kritičnem prerezu

Z drugo kontrolo v mejnem stanju nosilnosti preverjamo normalne napetosti, ki so posledica projektnega momenta  $M_d(x)$  v kritičnem prerezu  $M_{crit}$  (pri  $x = x_{crit}$ ). Evrokod 5 nam daje možnost, da izračunamo napetosti po spodnjem in po zgornjem robu brez upoštevanja spremenljive višine, nato pa trdnosti korigiramo s faktorjem  $k_{m,\alpha}$ .

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = \frac{6 M_{crit}}{b h_{crit}^2} \quad (2)$$

$$x_{crit} = \frac{L}{1 + \frac{h_2}{h_1}} \quad (3)$$

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} k_h k_{crit} f_{m,g,d} \quad (4)$$

$$\sigma_{m,0,d} \leq k_h k_{crit} f_{m,g,d} \quad (5)$$

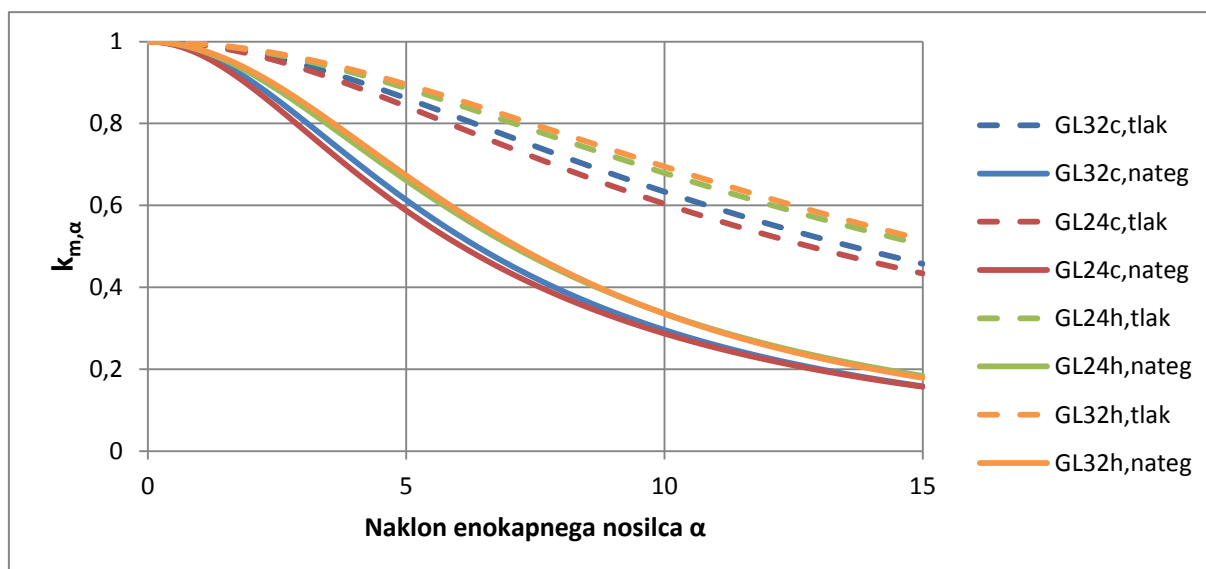
$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,g,d}}{1.5 f_{v,g,d}} \tan \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,g,d}}{f_{c,90,g,d}} \tan^2 \alpha\right)^2}} \quad (\text{če so tlaki ob nagnjenem robu}) \quad (6)$$

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,g,d}}{0.75 f_{v,g,d}} \tan \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,g,d}}{f_{t,90,g,d}} \tan^2 \alpha\right)^2}} \quad (\text{če so nategi ob nagnjenem robu}) \quad (7)$$

$$k_h = \min \left\{ \left( \frac{600}{h [mm]} \right)^{0.1}, 1.1 \right\} \quad (8)$$

Pri tem so:  $\sigma_{m,\alpha,d}$  projektna normalna napetost zaradi upogiba pod kotom  $\alpha$  glede na vlakna,  $\sigma_{m,0,d}$  projektna normalna napetost zaradi upogiba vzporedno z vlakni,  $M_{crit}$  projektni moment v kritičnem prerezu,  $h_1$  višina prereza pri  $x = 0$  (velja  $h_1 < h_2$ ),  $h_2$  višina prereza pri  $x = L$ ,  $k_h$  faktor, ki v primeru prerezov manjših od 600 milimetrov poveča projektno upogibno trdnost,  $k_{crit}$  redukcijski faktor bočne zvrnitve (v primeru nateznih napetosti velja  $k_{crit} = 1$ ),  $f_{m,g,d}$  projektna upogibna trdnost lepljenega lesa,  $f_{c,90,g,d}$  projektna tlačna trdnost pravokotno na vlakna lepljenega lesa in  $f_{t,90,g,d}$  projektna natezna trdnost pravokotno na vlakna lepljenega lesa.

Če iz vrednotimo faktorja  $k_{m,\alpha}$  za različne kote  $\alpha$ , lahko vidimo, da je v glavnem odvisen od naklona in manj od trdnosti samega materiala. Z grafa vidimo, da ob uporabi nosilca z nagibom  $\alpha=5^\circ$ , na strani kjer so natezne napetosti, izkoriščamo samo 60-70% upogibne trdnosti materiala. Če pa nosilec zasnujemo tako, da je poševni rob na strani kjer so tlačne napetosti, pa izkoriščamo 85-90% njegove upogibne trdnosti. S povečevanjem naklona nosilca, se izkoristek upogibne trdnosti samo še zmanjšuje.



Slika 2: Koeficient  $k_{m,\alpha}$  glede na naklon  $\alpha$

Posebno pozornost moramo posvetiti nevarnosti bočne zvrnitve elementa, saj razmerja med širino in višino nosilca zlahka dosežejo vrednost 1:10.

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi b^2 \sqrt{E_{0,05} G_{0,05} \left(1 - 0,63 \frac{b}{h_2}\right)}}{h_2 l_{ef}} \quad (9)$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (10)$$

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ 1/\lambda_{rel,m}^2 & 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (11)$$

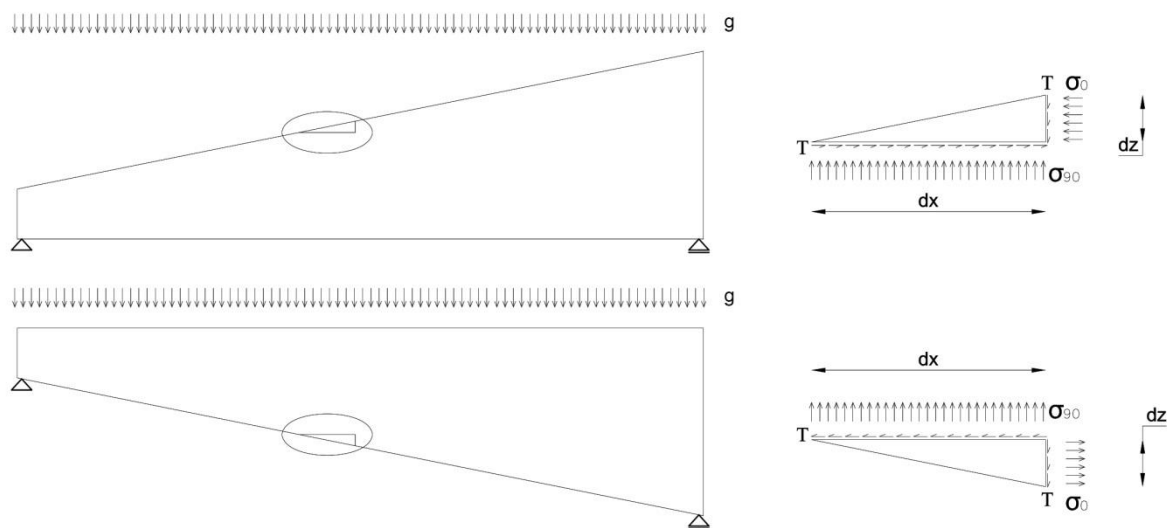
Pri tem sta:  $E_{0,05}$  karakteristična vrednost modula elastičnosti pri 5% fraktili v smeri vlaken lesa in  $l_{ef}$  učinkovita dolžina nosilca, ki je odvisna od podpiranja in obtežbe.

### 2.1.3 Kontrola radialnih napetosti v kritičnem prerezu

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{6 M_{crit}}{b h_{crit}^2} \tan^2(\alpha) \leq f_{c,90,g,d} \quad (12)$$

$$\sigma_{t,90,d} = \frac{6 M_{crit}}{b h_{crit}^2} \tan^2(\alpha) \leq f_{t,90,g,d} \quad (13)$$

Glede na orientacijo nosilca (obtežba deluje navpično navzdol) je potreben razmislek o kontroli, ki jo je potrebno opraviti. Če se na nagnjenem robu pojavljajo tlačne napetosti bo potrebno izvesti prvo kontrolo (12), vendar ta praviloma ne bo merodajna. Če pa se na nagnjenem robu pojavljajo natezne napetosti je potrebno izvesti drugo kontrolo (13), ki je zaradi nizkih nateznih trdnosti materiala v pravokotni smeri na vlakna praviloma lahko merodajna.



Slika 3: Tlačne (zgoraj) in natezne (spodaj) radialne napetosti glede na orientacijo nagnjenega roba

Če za prvi primer zapišemo ravnotežni pogoj na desno spodnje oglišče trikotnika dobimo:

$$\sigma_0 d_z \frac{d_z}{2} b = \sigma_{90} d_x \frac{d_x}{2} b; \quad (14)$$

Pri tem upoštevamo  $\frac{d_z}{d_x} = \tan(\alpha)$  in dobimo:

$$\sigma_{90} = \sigma_0 \left( \frac{d_z}{d_x} \right)^2 = \sigma_0 \tan^2(\alpha) \quad (15)$$

#### 2.1.4 Kontrola strižnih (tangencialnih) napetosti v kritičnem prerezu

$$\tau_{v,d} = \frac{6 M_{crit}}{b h_{crit}^2} \tan(\alpha) \leq f_{v,g,d} \quad (16)$$

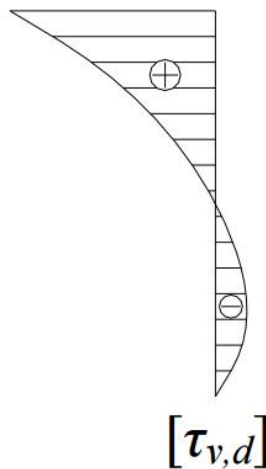
Če za prvi primer s slike 3 (na strani 5) zapišemo ravnotežje v smeri x dobimo:

$$\sigma_0 d_z b = \tau d_x b \quad (17)$$

$$\tau = \sigma_0 \left( \frac{d_z}{d_x} \right) \quad (18)$$

Pri tem upoštevamo  $\frac{d_z}{d_x} = \tan(\alpha)$  in dobimo:

$$\tau = \sigma_0 \tan(\alpha) \quad (19)$$



Slika 4: Potek strižnih (tangencialnih) napetosti po višini kritičnega prereza

#### 2.1.5 Kontrola kontaktnih napetosti

Kontrola se nanaša na kontakte napetosti v območju podpor. S pomočjo te enačbe lahko na koncu dimenzioniramo dolžino naleganja ali pa se odločimo za kakšno drugo metodo podpiranja, ker je pri velikih razponih in visokih nosilcih (do 2m), zaradi velikih reakcij v podporah, nesmiselno zagotavljati odpornost kontaktnih napetosti samo preko naleganja spodnje površine nosilca.

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{b a_{ležiščče}} \leq f_{c,90,g,d} k_{c,90} \quad (20)$$

Pri tem so:  $a_{ležiščče}$  dolžina naleganja na podporo,  $k_{c,90}$  faktor s katerim zajamemo vpliv razporeditve obtežbe in stopnjo tlačne deformacije ( $k_{c,90} \geq 1$ ).



## 2.1.6 Kontrola povesov

Kontrola se nanaša na mejno stanje uporabnosti in preverja ustreznost takojšnjega in končnega povesa. Osnovni formuli (21 in 22) veljata za klasičen raven nosilec s konstantno višino in ravno osjo.

$$w_{inst} = \frac{5 l^4}{384 E_{0,mean} I_z} (g + q_s + \psi_0 q_v) \leq \frac{l [cm]}{300} \quad (21)$$

$$w_{fin} = \frac{5 l^4}{384 E_{0,mean} I_z} (g(1 + k_{def}) + q_s(1 + \psi_2 k_{def}) + q_v(\psi_0 + \psi_2 k_{def})) \leq \frac{l [cm]}{250} \quad (22)$$

V nadaljevanju sem uporabil izraze, ki nam jih podaja Keramani, A. 1999. *Structural Timber Design*. Oxford, Blackwell Science: 223 str.

$$M_{max,lastna} = \frac{(g+g_{lastna})L^2}{8} \quad (23)$$

$$a = \frac{h_2}{h_1} \quad (24)$$

$$k2_{\delta b} = 19.2 \left( \frac{1}{a-1} \right)^4 \left( 3(a+1) \ln \left( \frac{a+1}{2} \right) - (2a+1) \ln(a) - \frac{(a-1)^2}{2(a+1)} \right) \quad (25)$$

$$k2_{\delta s} = \frac{2(a+1)}{(a-1)^2} \ln \left( \frac{(a+1)^2}{4a} \right) \quad (26)$$

$$w_{inst,g,b} = \frac{60 M_{max,lastna} L^2 k2_{\delta b}}{48 E_{0,mean} b h_1^3} \quad (27)$$

$$w_{inst,g,s} = \frac{1.2 M_{max,lastna} k2_{\delta s}}{G_{0,mean} b h_1} \quad (28)$$

$$w_{inst} = w_{inst,g,b} + w_{inst,g,s} + \frac{q_s}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,b} + \frac{q_s}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,s} \quad (29)$$

$$+ \frac{q_v \psi_0}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,b} + \frac{q_v \psi_0}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,s}$$

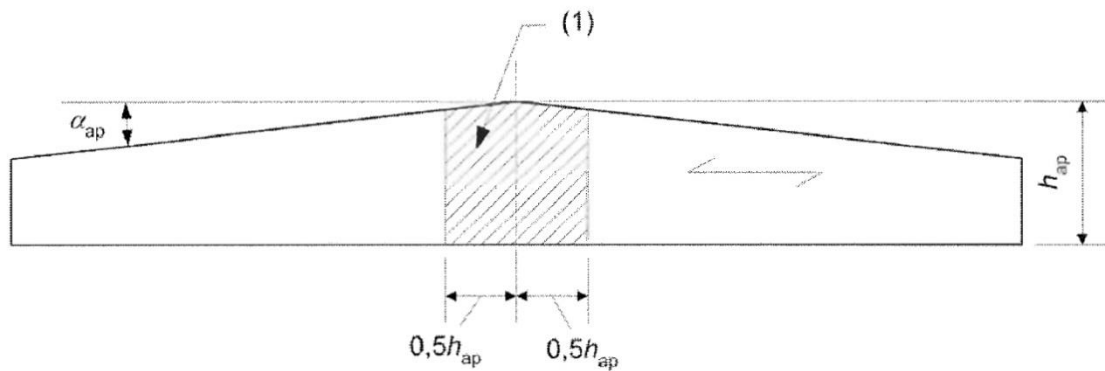
$$w_{fin} = (1 + k_{def})(w_{inst,g,b} + w_{inst,g,s}) \quad (30)$$

$$+ (1 + \psi_2 k_{def}) \left( \frac{q_s}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,b} + \frac{q_s}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,s} \right)$$

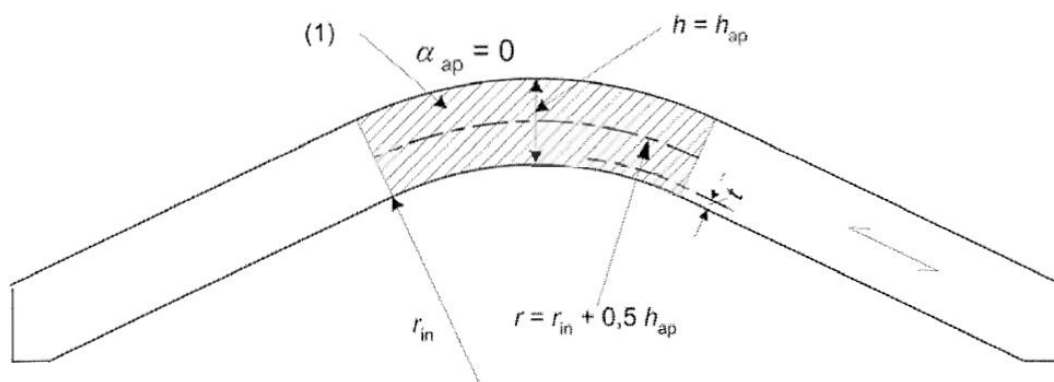
$$+ (\psi_0 + \psi_2 k_{def}) \left( \frac{q_v \psi_0}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,b} + \frac{q_v \psi_0}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,s} \right)$$

Pri tem so:  $M_{max,lastna}$  največji moment na sredini nosilca obremenjenega s stalnimi vplivi,  $k2_{\delta b}$  redukcijski faktor povesa enokapnega nosilca zaradi upogiba,  $k2_{\delta s}$  redukcijski faktor povesa enokapnega nosilca zaradi striga,  $w_{inst,g,b}$  trenutni poves pod stalnimi vplivi zaradi upogiba,  $w_{inst,g,s}$  trenutni poves pod stalnimi vplivi zaradi striga,  $w_{inst}$  skupni trenutni poves in  $w_{fin}$  skupni končni poves.

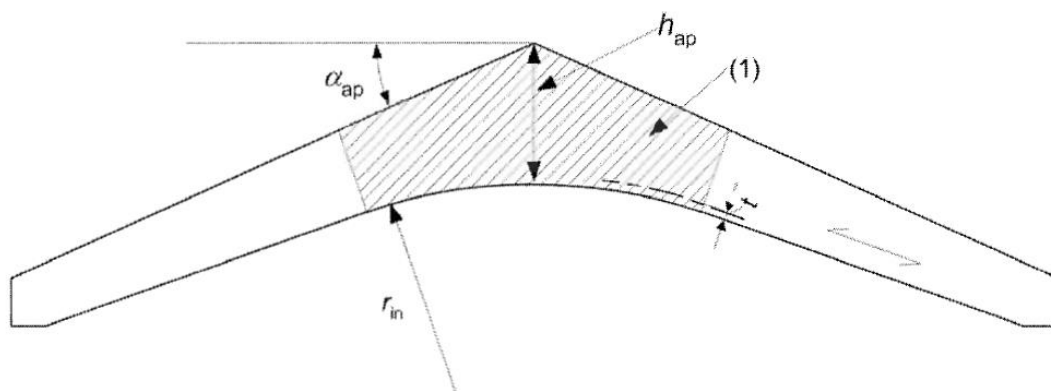
## 2.2 Dvokapni in ukrivljeni nosilci



Slika 5: Dvokapni nosilec s spremenljivo višino (SIST EN 1995-1-1:2005 – 6.4.3 Ravni dvokapni nosilci)



Slika 6: Ukrivljen nosilec konstantne višine (SIST EN 1995-1-1:2005 – 6.4.3 Ukrivljeni nosilci)



Slika 7: Dvokapni ukrivljen nosilec s spremenljivo višino (SIST EN 1995-1-1:2005 – 6.4.3 Sedlasti nosilci)

V tej kategoriji nosilcev gre za enotne izraze, ki veljajo za vse tri tipe elementov, ter se pri določenih poenostavijo. Nosilci so še vedno pravokotne oblike v prečnem prerezu  $b/h(x)$ . Preverjanje zajema vse tiste kontrole, ki so se nanašale na enokapne nosilce s spremenljivo višino, poleg teh pa so še dodatne zahteve, ki jih je potrebno kontrolirati v temenskem območju.

### 2.2.1 Kontrola normalnih napetosti v temenu

$$\sigma_{m,d} = k_l \frac{6 M_{d,temena}}{b h_2^2} \leq k_r k_h f_{m,g,d} \quad (31)$$

$$k_l = k_1 + k_2 \left(\frac{h_2}{r}\right) + k_3 \left(\frac{h_2}{r}\right)^2 + k_4 \left(\frac{h_2}{r}\right)^3 \quad (32)$$

$$k_1 = 1 + 1.4 \tan \alpha + 5.4 \tan^2 \alpha \quad (33)$$

$$k_2 = 0.35 - 8 \tan \alpha \quad (34)$$

$$k_3 = 0.6 + 8.3 \tan \alpha - 7.8 \tan^2 \alpha \quad (35)$$

$$k_4 = 6 \tan^2 \alpha \quad (36)$$

$$r = r_{in} + 0.5 h_2 \quad (37)$$

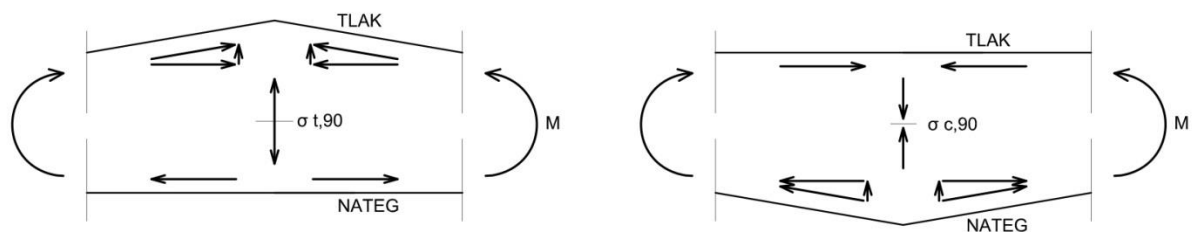
$$k_r = \min \begin{cases} 1 & ; \quad \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0.76 + 0.001 \frac{r_{in}}{t} & ; \quad \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases} \quad (38)$$

$$k_h = \min \begin{cases} \left(\frac{600}{h [mm]}\right)^{0.1} \\ 1.1 \end{cases} \quad (39)$$

Pri tem so:  $M_{d,temena}$  projektni upogibni moment v temenu (pri  $x = L/2$ ),  $h_2$  višina nosilca v temenu ( $h_2 = h_{ap}$ ),  $r_{in}$  notranji radij ukrivljenosti in  $k_r$  koeficient, ki zajame vpliv predhodnih napetosti zaradi krivljenja lamel.

### 2.2.2 Kontrola radialnih napetosti v temenu

Zaradi nagnjenosti oziroma ukrivljenosti elementa se v temenskem območju pojavijo radialne napetosti, ki so lahko natezne ali tlačne. V enem primeru nam želijo prerez delaminirati, v drugem primeru pa prerez stiskajo skupaj. Izkaže se, da so problematične tiste napetosti, ki so natezne pravokotno na vlakna materiala. Privzamemo lahko, da so največje radialne napetosti v višini nevtralne osi.



Slika 8: Dvokapni nosilec – radialne napetosti v slemenu

S slike vidimo, da je problematičen primer, ko je nagnjen rob elementa v tlaku, takrat je potrebno preveriti naslednji pogoj:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6 M_{d,temena}}{b h_2^2} - 0.6 \frac{p_d}{b} \leq k_{dis} k_{vol} f_{t,90,g,d} \quad (40)$$

$$k_p = k_5 + k_6 \left(\frac{h_2}{r}\right) + k_7 \left(\frac{h_2}{r}\right)^2 \quad (41)$$

$$k_5 = 0.2 \tan \alpha \quad (42)$$

$$k_6 = 0.25 - 1.5 \tan \alpha + 2.5 \tan^2 \alpha \quad (43)$$

$$k_7 = 2.1 \tan \alpha - 4 \tan^2 \alpha \quad (44)$$

$$p_d = \gamma_G \frac{g}{\cos \alpha} + \gamma_s q_s \quad (45)$$

$$k_{dis} = \begin{cases} 1.4 & ; \text{ dvokapni nosilec in ukrivljen nosilec s konstantno višino} \\ 1.7 & ; \text{ ukrivljen nosilec s spremenljivo višino} \end{cases} \quad (46)$$

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V_{temena}}\right)^{0.2} \quad (47)$$

$$V_{temena} = \begin{cases} b h_2^2 (1 - 0.25 \tan \alpha) & ; \text{ dvokapni nosilci} \\ \frac{\beta \pi}{180} b (h_2^2 + 2 h_2 r_{in}) & ; \text{ ukrivljen nosilec konst. višine } \leq \frac{2}{3} V_b \\ b (\sin \alpha \cos \alpha (r_{in} + h_2)^2 - r_{in}^2 \frac{\alpha \pi}{180}) & ; \text{ ukrivljen nosilec sprem. višine} \end{cases} \quad (48)$$

Pri tem so:  $k_{dis}$  koeficient, ki zajame vpliv razporeditve napetosti v temenskem območju,  $k_{vol}$  volumski koeficient,  $V_0$  referenčni volumen  $0.01m^3$ ,  $V_{temena}$  volumen temenskega območja in  $V_b$  volumen celotnega nosilca.

### 2.2.3 Kontrola povsov

Račun povesa dvokapnega nosilca se izvede enako kot račun povesa enokapnega nosilca, razlika je le v redukcijskem faktorju.

$$w_{inst} = w_{inst,g,b} + w_{inst,g,s} + \frac{q_s}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,b} + \frac{q_s}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,s} \quad (49)$$

$$+ \frac{q_v \psi_0}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,b} + \frac{q_v \psi_0}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,s}$$

$$w_{fin} = (1 + k_{def})(w_{inst,g,b} + w_{inst,g,s}) \quad (50)$$

$$+ (1 + \psi_2 k_{def}) \left( \frac{q_s}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,b} + \frac{q_s}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,s} \right)$$

$$+ (\psi_0 + \psi_2 k_{def}) \left( \frac{q_v \psi_0}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,b} + \frac{q_v \psi_0}{(g+g_{lastna})} w_{inst,g,s} \right)$$

$$w_{inst,g,b} = \frac{60 M_{max,lastna} L^2 k4_{\delta b}}{48 E_{0,mean} b h_1^3} \quad (51)$$

$$w_{inst,g,s} = \frac{1.2 M_{max,lastna} k4_{\delta s}}{G_{0,mean} b h_1} \quad (52)$$

$$k4_{\delta b} = 19.2 \left( \frac{1}{a-1} \right)^3 \left( 2 \frac{(a+2)}{(a-1)} \ln \left( \frac{a+1}{2} \right) + \frac{3}{(a+1)} - \frac{2}{(a+1)^2} - 4 \right) \quad (53)$$

$$k4_{\delta s} = \frac{4}{(a-1)} \left( \left( \frac{a+1}{a-1} \right) \ln \left( \frac{a+1}{2} \right) - 1 \right) \quad (54)$$

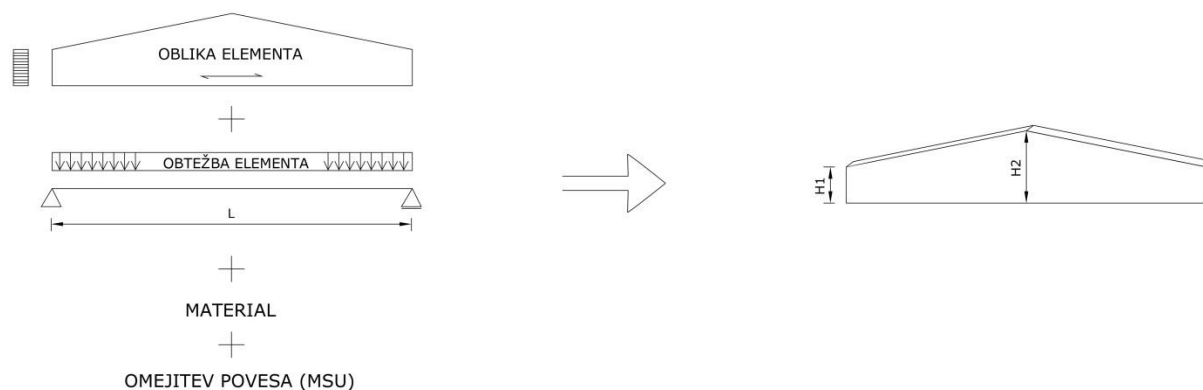
Pri tem so:  $k4_{\delta b}$  redukcijski faktor povesa dvokapnega nosilca zaradi upogiba,  $k4_{\delta s}$  redukcijski faktor povesa dvokapnega nosilca zaradi striga,  $w_{inst,g,b}$  trenutni poves pod stalnimi vplivi zaradi upogiba,  $w_{inst,g,s}$  trenutni poves pod stalnimi vplivi zaradi striga,  $w_{inst}$  skupni trenutni poves in  $w_{fin}$  skupni končni poves.

### 3 OPIS PROGRAMA

#### 3.1 Vhodni podatki

Program za dimenzioniranje je ustvarjen v Excelovem dokumentu s pomočjo razvijalca v delovnem okolju Visual Basic (VBA). Zasnovan je tako, da iz vhodnih podatkov, ki so podrobneje opisani v nadaljevanju, izračuna najmanjše zadostne višine posameznega nosilca.

Vhodni podatki so razdeljeni v štiri osnovne skupine. Vse zahtevane podatke mora uporabnik poznati, da lahko zažene program. Tukaj program ne omogoča računanja v različnih smereh – npr. računanje največje možne obtežbe, ki jo nek nosilec znanih dimenzij prenese ali pa računanje največje razpetine, ki jo z nekim nosilcem znanih razpetin še lahko premostimo. Seveda bi bilo možno program razširiti na ta način, da bi v prvi fazi preveril podatke in ugotovil kateri podatki manjkajo, nato bi preveril ali je podano zadostno število podatkov za izračun manjkajočih in navsezadnje bi sprožil ustrezno proceduro za dimenzioniranje manjkajočih podatkov.



Slika 9: Grafični prikaz vhodnih podatkov in glavnega rezultata, ki nam ga ponudi program

Prvo skupino vhodnih podatkov predstavljajo geometrijske karakteristike nosilca. Najprej si izberemo eno od v naprej pripravljenih tipičnih oblik nosilcev in nato vnesemo, odvisno od tipa nosilca, še šest ali sedem geometrijskih parametrov.

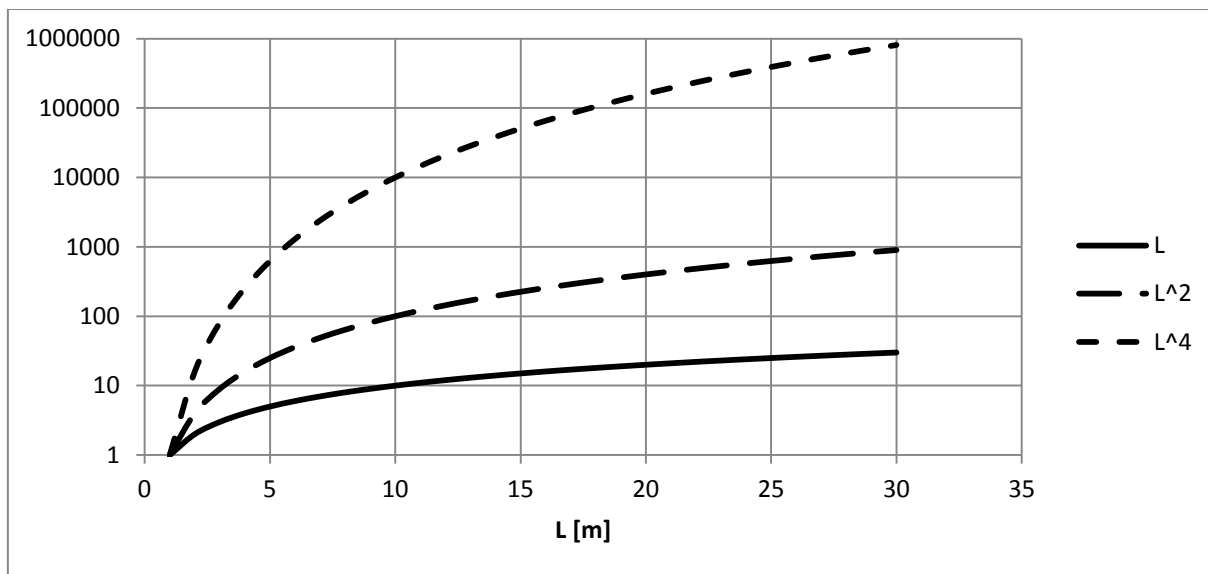
Druga skupina vhodnih podatkov zajema podatke o vplivih na nosilec. Tip in smer posameznega vpliva sta fiksno določena – program obravnava navpično tlorsno porazdeljeno obtežbo vzdolž celotne dolžine elementa.

Tretja skupina vhodnih podatkov so materialne karakteristike elementa, ki jih podamo programu zgolj z izbiro trdnostnega razreda lesa.

Četrta skupina vhodnih podatkov pa se nanaša na mejno stanje uporabnosti in omogoča uporabniku določiti mejno vrednost sredinskega povesa nosilca.

### 3.1.1 Razpetina, ki jo želimo premostiti (L)

Razpetina vpliva na prečno silo  $V_{(x)}$ , na moment  $M_{(x)}$  in na največji poves nosilca  $w_{(x=L/2)}$ ; vendar v različnih velikostnih redih. Prečno silo povečuje linearno, moment povečuje s kvadratom, poves pa kar s četrto potenco. Če primerjamo dva nosilca, konstantnih prerezov in enakih karakteristik, dolžin 15 in 25 metrov vidimo, da se prečna sila poveča za faktor 1.7, moment se poveča za faktor 2.8 in poves se poveča za faktor 7.7.



Slika 10: Hitrost naraščanja prve, druge in četrte potence razpetine v logaritmичnem merilu

### 3.1.2 Razdalja med posameznimi bočnimi podporami vzdolž nosilca ( $l_{ef}$ )

Razdalja med bočnimi podporami vpliva na redukcijski faktor zaradi nevarnosti bočne zvrnitve  $k_{crit}$ , ki zmanjšuje projektno upogibno trdnost nosilca. Ker je faktor redukcijski, je vedno manjši ali enak 1. Da bo material kar se da dobro izkoriščen, si želimo čim večji  $k_{crit}$  – to zagotovimo z dovolj pogostim bočnim podpiranjem tlačnega dela nosilca.

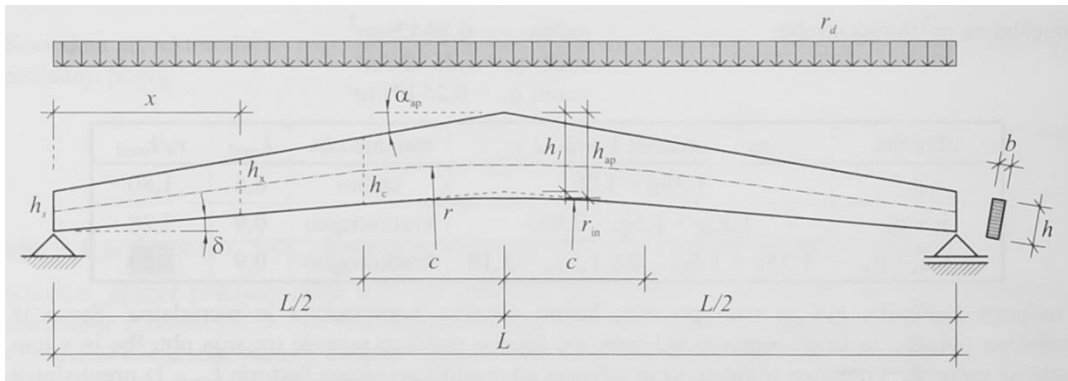
### 3.1.3 Naklon zgornjega roba nosilca ( $\alpha$ oziroma $\beta$ )

Naklon je podatek, ki nam skupaj z razpetino povezuje višine nosilca v odvisnosti od osi x, ki teče vzdolž nosilca. Kadar gre za streho je naklon običajno arhitekturno podan in ga ni mogoče optimizirati s statičnega vidika.

### 3.1.4 Notranji radij zaokrožitve nosilca (r)

Formule za izračun geometrije dvokapnega ukrivljenega nosilca (Beg in Pogačnik 2009) so smiselne, dokler je radij tako majhen, da velja:

$$c = r * \sin(\delta) < L/2 \quad (55)$$



Slika 11: Geometrijske karakteristike dvokapnega nosilca z ukrivljeno osjo (Beg D., Pogačnik A., 2009)

Če začnemo popolnoma spreminjati geometrijo nosilca z vnašanjem izjemno velikih radijev z namenom, da bi poravnali spodnji rob, formule spodletijo pri računanju volumna nosilca.

### 3.1.5 Širina prečnega prereza nosilca (b)

Glede na uporabljene materialne karakteristike lepljenega lesa lahko uporabljamo širine večje od 150 milimetrov – pri manjših širinah je potrebno korigirati materialne karakteristike. Običajna širina lepljenega nosilca je 20 centimetrov.

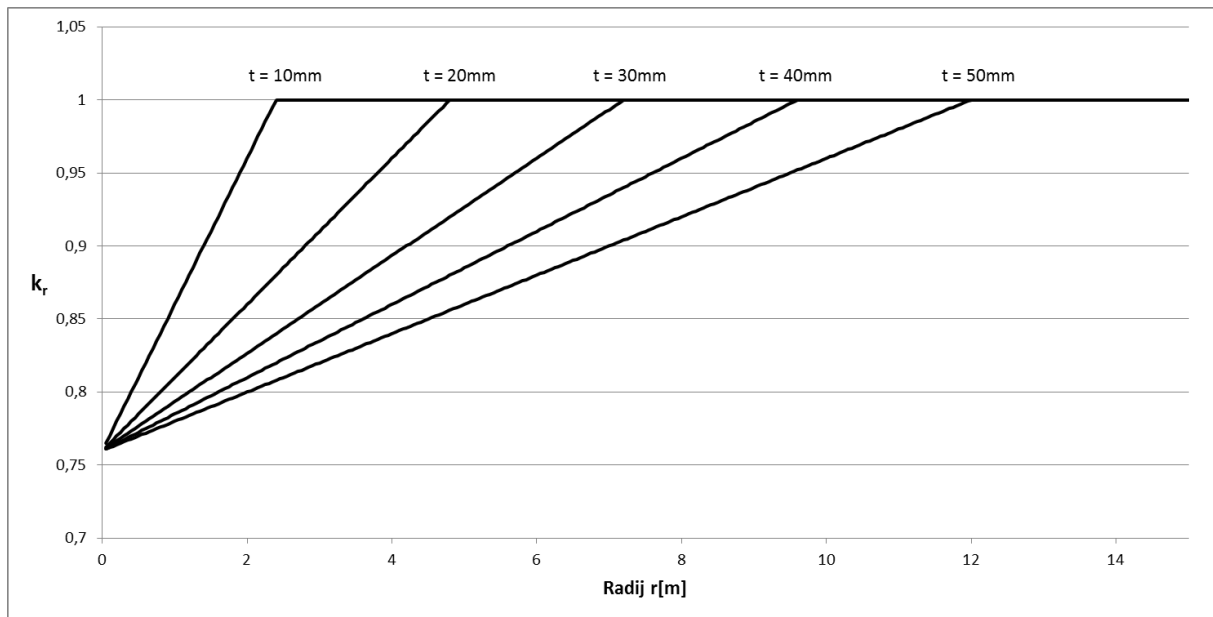
### 3.1.6 Debelina posamezne deske oziroma lamele (t)

Debelina lamele vpliva na upogibno trdnost ( $f_{m,g,d}$ ) ukrivljenega elementa. Med samim procesom oblikovanja elementa vnašamo v lamele upogibne napetosti. Tanjše kot so lamele manjše so te napetosti, vendar se cena elementa povečuje, ker se povečujejo obdelovalne površine elementa, odpadki zaradi rezanja in poraba lepila. Vpliv teh zaostalih napetosti zajamemo z redukcijskim faktorjem  $k_r$ , s katerim nato pomnožimo upogibno trdnost elementa.



Slika 12: Grob prikaz normalnih napetosti v lamelah zaradi upogiba med izdelavo elementa

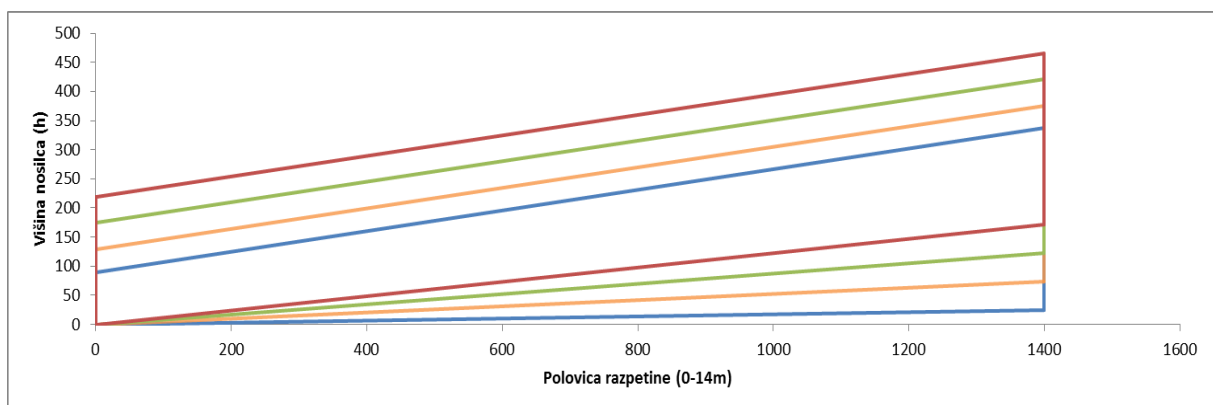




Slika 13: Redukcijski faktor  $k_r$  v odvisnosti od radija zaokrožitve in debeline posamezne lamele

### 3.1.7 Naklon spodnjega roba nosilca ( $\delta$ )

Naklon na spodnji strani ukrivljenega dvokapnega nosilca vpliva v največji meri na višino nosilca na začetku oz. koncu ( $x = 0$  oz.  $x=L$ ). Če opazujemo spodnjo sliko (14), ki prikazuje obnašanje polovice nosilca pri spreminjanju zgolj ene spremenljivke – naklona spodnjega roba nosilca ( $\delta$ ), opazimo, da višina v temenu  $h_2$  ostaja skoraj konstantna. Zaradi določenega spodnjega in zgornjega naklona ter izračunane potrebne višine  $h_2$ , je določena celotna geometrija nosilca; zato se pri povečevanju naklona spodnjega roba nosilca povečuje tudi začetna višina  $h_1$ .



Slika 14: Prikaz spreminjanja oblike dvokapnega nosilca pri različnih naklonih spodnjega roba

### 3.1.8 Stalni vplivi (g)

Stalni vplivi, so tisti vplivi, za katere predvidevamo, da bodo prisotni skozi celotno življenjsko obdobje nosilca. V mejnih stanjih nosilnosti stalne vplive povečamo z delnim varnostnim faktorjem

1.35 v skladu s standardi Evrokod. Pri statičnem sistemu prostoležečega nosilca so vplivi, s katerimi obremenimo element vedno neugodni, zato delni varnostni faktor 1.0 ne pride v upoštevanje.

### 3.1.9 Lastna teža nosilca

Na začetku dimenzioniranja lastna teža ni znana, ker ne poznamo vseh dimenzij nosilca (v našem primeru ne poznamo višine  $h_{(x)}$ ), zato program lahko upošteva tudi točno lastno težo nosilca.

### 3.1.10 Koristni spremenljiv vpliv (q), trajanje in kombinacijski faktorji ( $\psi_0, \psi_1, \psi_2$ )

Trajanje in kombinacijske faktorje lahko pri spremenljivem vplivu določi uporabnik sam. Bodisi gre za streho kjer koristni vplivi predstavljajo nadomestno obtežbo za vzdrževalna dela ali pa gre za ravno teraso, na kateri koristni vplivi predstavljajo nadomestno obtežbo uporabnikov terase.

Preglednica 1: Kombinacijski varnostni faktorji (SIST EN 1990:2004)

Vpliv	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Koristna obtežba v stavbah (glej EN 1991-1-1)			
Kategorija A: bivalni prostori	0,7	0,5	0,3
Kategorija B: pisarne	0,7	0,5	0,3
Kategorija C: stavbe, kjer se zbirajo ljudje	0,7	0,7	0,6
Kategorija D: trgovine	0,7	0,7	0,6
Kategorija E: skladišča	1,0	0,9	0,8
Kategorija F: prometne površine vozilo s težo $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Kategorija G: prometne površine 30 kN < teža vozila $\leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Kategorija H: strehe	0	0	0
Obtežba snega na stavbah (glej EN 1991-1-3)*			
Finska, Islandija, Norveška, Švedska	0,7	0,5	0,2
Druge članice CEN, za kraje z nadmorsko višino nad 1.000 m	0,7	0,5	0,2
Druge članice CEN, za kraje z nadmorsko višino pod 1.000 m	0,5	0,2	0
Obtežba vetra na stavbah (glej EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Spremembe temperature (ne pri požaru) v stavbah (glej EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
OPOMBA: Vrednosti faktorjev $\psi$ so lahko določene v nacionalnem dodatku. *) Za države, ki niso omenjene v nadaljevanju, glej ustrezne krajevne pogoje.			

### 3.1.11 Spremenljiva obtežba s snegom ( $q_s$ )

$\psi_0=0,6, \psi_1=0,2, \psi_2=0$ , trajanje obtežbe je srednje dolgo –  $k_{mod}=0,8$  (SIST EN 1990:2004).

### 3.1.12 Spremenljiva obtežba z vetrom ( $q_w$ )

$\psi_0=0,6, \psi_1=0,2, \psi_2=0$ , trajanje obtežbe je kratko –  $k_{mod}=0,9$  (SIST EN 1990:2004).

### 3.1.13 Trdnostni razred

Preglednica 2: Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti lepljenega lesa (SIST EN 1194:1999)

Trdnostni razredi [kN/cm <sup>2</sup> ]		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Upogib	$f_{m,g,k}$	2,4	2,8	3,2	3,6	2,4	2,8	3,2	3,6
Nateg	$f_{t,0,g,k}$	1,65	1,95	2,25	2,6	1,4	1,65	1,95	2,25
	$f_{t,90,g,k}$	0,04	0,045	0,05	0,06	0,035	0,04	0,045	0,05
Tlak	$f_{c,0,g,k}$	2,4	2,65	2,9	3,1	2,1	2,4	2,65	2,9
	$f_{c,90,g,k}$	0,27	0,3	0,33	0,36	0,24	0,27	0,3	0,33
Strig	$f_{v,g,k}$	0,27	0,32	0,38	0,43	0,22	0,27	0,32	0,38
Modul elast.	$E_{0,g,mean}$	1160	1260	1370	1470	1160	1260	1370	1470
	$E_{0,g,0,05}$	940	1020	1110	1190	940	1020	1110	1190
	$E_{90,g,mean}$	39	42	46	490	32	39	42	46
Strižni modul	$G_{g,mean}$	72	78	85	91	59	72	78	85
	$G_{g,0,05}$	58,2	63,2	68,7	73,3	58,2	63,2	68,7	73,7
Gostota [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450	350	380	410	430
	$\rho_{g,mean}$	456	492	516	540	420	456	492	516

### 3.1.14 Razred uporabe

1.razred: zelo suh, tehnično sušen les (povprečna vrednost vlage ne presega 12%), značilna vsebnost vlage, ki ustreza temperaturi 20°C in relativni vlažnosti zraka, ki preseže 65% le nekaj tednov v letu.

2.razred: normalno vlažen les (povprečna vrednost vlage ne presega 20%), značilna vsebnost vlage, ki ustreza temperaturi 20°C in relativni vlažnosti zraka, ki preseže 85% le nekaj tednov v letu.

OPOMBA: Tretjega razreda uporabnosti ( $k_{def}=2.0$ ) ni mogoče izbrati, ker so vsi modifikacijski faktorji določeni za prvi ali drugi razred uporabe.

### 3.1.15 Največji dovoljeni trenutni povos ( $w_{inst}$ )

Največji dovoljeni trenutni povos poda uporabnik v obliki odvisnosti od dolžine nosilca (L), prednastavljena vrednost je  $L/300$ . Osnovne vrednosti mejnih pomikov po SIST EN 1995-1-1 so od  $L/500$  do  $L/300$ .

### 3.1.16 Največji dovoljeni končni povos ( $w_{fin}$ )

Največji dovoljeni končni povos poda uporabnik v obliki odvisnosti od dolžine nosilca (L), prednastavljena vrednost je  $L/250$ . Osnovne vrednosti mejnih pomikov po SIST EN 1995-1-1 so od  $L/350$  do  $L/250$ .

### 3.2 Opis delovanja programa

Prvi korak se nanaša na izračun projektne obtežbe  $q_{Ed}$ . Program upošteva stalno obtežbo, poljubno koristno obtežbo, obtežbo snega, obtežbo vetra ter po želji še lastno težo samega nosilca v dimenzijah, ki jih izračuna, lahko pa lastno težo podamo v naprej v sklopu ostale stalne obtežbe.

OBTEŽBA			
Stalna	$g$	4	kN/m
Lastna teža nosilca je že upoštevana			<input checked="" type="checkbox"/>
Koristna	$q$	4,8	kN/m
Do 1 tedna	0,6	0.2	0
Sneg	$q_s$	3	kN/m
Veter	$q_w$	0	kN/m

Slika 15: Primer vnosa podatkov o obtežbi nosilca

Program preveri sedem možnih kombinacij vplivov v mejnem stanju nosilnosti ter upošteva modifikacijski faktor najkrajše trajajočega vpliva. Nato projektno obtežbo vsake od kombinacij ( $q_{Ed,i}$ ) primerja s pripadajočim modifikacijskim faktorjem ( $k_{mod,i}$ ) ter na ta način določi kritično obtežno kombinacijo. Kritična je tista kombinacija, pri kateri je kvocient  $q_{Ed,i} / k_{mod,i}$  največji.

$$q_{Ed,1} = 1.35 (g + g_{lastna}) \quad (56)$$

$$q_{Ed,2} = 1.35 (g + g_{lastna}) + 1.5 q_s \quad (57)$$

$$q_{Ed,3} = 1.35 (g + g_{lastna}) + 1.5 q_w \quad (58)$$

$$q_{Ed,4} = 1.35 (g + g_{lastna}) + 1.5 q \quad (59)$$

$$q_{Ed,5} = 1.35 (g + g_{lastna}) + 1.5 q_s + 1.5 * 0.6 * q_w + 1.5 * \psi_0 * q \quad (60)$$

$$q_{Ed,6} = 1.35 (g + g_{lastna}) + 1.5 q_w + 1.5 * 0.6 * q_s + 1.5 * \psi_0 * q \quad (61)$$

$$q_{Ed,7} = 1.35 (g + g_{lastna}) + 1.5 q + 1.5 * 0.6 * q_s + 1.5 * 0.6 * q_w \quad (62)$$

Prva kombinacija vplivov zajema samo stalne vplive; naslednje tri kombinacije zajemajo stalne vplive in prevladujoč spremenljiv vpliv; zadnje tri kombinacije pa upoštevajo stalne vplive, prevladujoče spremenljive vplive in spremljajoče spremenljive vplive.

Ko je znana merodajna kombinacija vplivov, je znan tudi modifikacijski faktor ( $k_{mod}$ ) in tako lahko program izračuna projektne materialne karakteristike lepljenega lesa. Karakteristične trdnosti posameznega trdnostnega razreda ima že tabelirane v spominu.

$$f_{m,g,d} = f_{m,g,k} \frac{k_{mod}}{1.25} \quad (63)$$

$$f_{v,g,d} = f_{v,g,k} \frac{k_{mod}}{1.25} \quad (64)$$

$$f_{c,0,g,d} = f_{c,0,g,k} \frac{k_{mod}}{1.25} \quad (65)$$

$$f_{c,90,g,d} = f_{c,90,g,k} \frac{k_{mod}}{1.25} \quad (66)$$

$$f_{t,90,g,d} = f_{t,90,g,k} \frac{k_{mod}}{1.25} \quad (67)$$

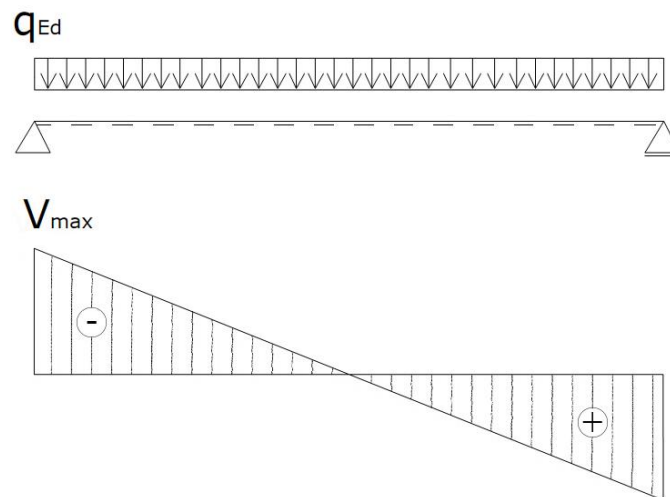
V drugem koraku program, glede na tip nosilca, prične s postopkom dimenzioniranja. V spodnji tabeli so prikazane kontrole, ki jim mora zadostiti posamezen tip nosilca.

Preglednica 3: Potrebne kontrole glede na tip nosilca

Tip nosilca Vrsta kontrole	Enokapni nosilec s poševnim robom zgoraj	Enokapni nosilec s poševnim robom spodaj	Dvokapni nosilec s poševnim robom zgoraj	Dvokapni nosilec s poševnim robom spodaj	Nosilec z ukrivljeno osjo in konstantno višino	Nosilec z ukrivljeno osjo in spremenljivo višino
Kontrola strižnih napetosti ( $x=0$ )	X	X	X	X	X	X
Kontrola normalnih napetosti v temenu			X	X	X	X
Kontrola radialnih napetosti v temenu			X		X	X
Kontrola normalnih napetosti v kritičnem prerezu	X	X	X	X		X
Kontrola nateznih radialnih napetosti v kritičnem prerezu		X		X		
Kontrola strižnih napetosti v kritičnem prerezu	X	X	X	X		X
Kontrola kontaktnih napetosti	X	X	X	X	X	X
Kontrola pomikov	X	X	X	X		

### 3.2.1 Kontrola strižnih napetosti

Prva kontrola je kontrola strižnih napetosti in je enaka pri vseh nosilcih. Prav tako se vedno izvede na istem mestu; ker so vsi nosilci obteženi s porazdeljeno obtežbo so največje prečne sile ravno na koncih nosilca.



Slika 16: Potek prečnih sil vzdolž dolžine nosilca

```
'KONTROLA STRIŽNIH NAPETOSTI PRI h1  
Vmax = qed * L / 2      '[kN]  
h1 = 1.5 * Vmax / (0.67 * b * fvd)  
'Višina h1 na podlagi kontrole strižnih napetosti na robu  
st_desk = Round(h1 / t + 0.5)  
h1 = st_desk * t  
h2 = h1 + (L / 2) * 100 * Tan(alfa / 57.2958)
```

V prvi vrstici se izračun največja prečna sila, ki je enaka reakciji podpore, nato se iz enačbe (x.y) izrazi minimalna potrebna višina za zadostitev kontroli. V četrti vrstici se dobljena višina nosilca deli z debelino posamezne deske – tako dobimo število desk, ki ga je potrebno zaokrožiti navzgor. V šesti vrstici pa se izračuna natančna višina h2. S slike je razvidno, da se v tem primeru h2 nanaša na višino  $h(x=L)$  – torej gre za enokapni nosilec s spremenljivo višino. Pri dvokapnih nosilcih računamo h2 na sredini razpetine, zato se L spremeni v  $L/2$ . Kot alfa je v peti vrstici pod tangensom kota deljen s številom, ki stopinje pretvori v radiane.

$$X^{\circ} \frac{\pi}{180} = X^{\circ} / \frac{180}{\pi} = X^{\circ} / 57.2958 = Y \text{ rad} \quad (68)$$

### 3.2.2 Kontrola normalnih napetosti v temenu

Druga kontrola je kontrola normalnih napetosti v temenu. Kontrola je enaka za vse tri tipe nosilcev, ki imajo sredinsko teme. V primeru dvokapnega nosilca, ki ima raven spodnji rob, je za radij vnesena zelo velika številka, ki nadomešča neskončen radij.

```
'KONTROLA NORMALNIH NAPETOSTI V TEMENU
Dim k1, k2, k3, k4, kl As Double
'kl
k1 = 1 + 1.4 * Tan(alfa / 57.2958) + 5.4 * (Tan(alfa / 57.2958)) ^ 2
k2 = 0.35 - 8 * Tan(alfa / 57.2958)
k3 = 0.6 + 8.3 * Tan(alfa / 57.2958) - 7.8 * (Tan(alfa / 57.2958)) ^ 2
k4 = 6 * (Tan(alfa / 57.2957795130823)) ^ 2
r = r_in + 0.5 * h2 / 100 '[m]
kl = k1 + k2 * (h2/(r * 100)) + k3 * (h2 / (r*100))^2 + k4 * (h2/(r * 100)) ^ 3
'kh
If h2 < 60 Then
    kh = WorksheetFunction.Min(1.1, (600 / (h2 * 10)) ^ 0.1)
Else
    kh = 1
End If
'k_crit
Dim sig_m_crit, lamda_rel_m As Double 'Preverjanje bočne zvrnitve
sig_m_crit = (3.14159265* b^2*((e005 * g005* (1-0.63* b/h2))^ 0.5))/(h2*lef* 100)
lamda_rel_m = (fmk / sig_m_crit) ^ 0.5
If lamda_rel_m <= 0.75 Then 'k_crit
    kcrit = 1
Else
    If lamda_rel_m > 1.4 Then
        kcrit = 1 / (lamda_rel_m) ^ 2
    Else
        kcrit = 1.56 - 0.75 * lamda_rel_m
    End If
End If
'kr
If r_in * 100 / t >= 240 Then
    kr = 1
Else
    kr = 0.76 + 0.001 * r_in * 100 / t
End If
'Kontrola ustreznosti višin pridobljenih iz kontrole strižnih napetosti
If kl * 6 * Mmax * 100 / (b * h2 ^ 2) <= kr * kh * kcrit * fmd Then
    'Kontrola uspešna
Else
    While kl * 6 * Mmax * 100 / (b * h2 ^ 2) > kr * kh * kcrit * fmd
        h2 = h2 + 0.1
        'kl
        r = r_in + 0.5 * h2 / 100 '[m]
        kl = k1 + k2* (h2/(r*100))+ k3*(h2/ (r* 100))^2 + k4*(h2/(r* 100))^3
        'kh
        If h2 < 60 Then
            kh = WorksheetFunction.Min(1.1, (600 / (h2 * 10)) ^ 0.1)
        Else
            kh = 1
        End If
        'k_crit
        sig_m_crit = (3.14159265* b^2* ((e005* g005* (1- 0.63* b/h2))^ 0.5))
        / (h2 * lef * 100)
        lamda_rel_m = (fmk / sig_m_crit) ^ 0.5
        If lamda_rel_m <= 0.75 Then 'k_crit
            kcrit = 1
        Else
            If lamda_rel_m > 1.4 Then
                kcrit = 1 / (lamda_rel_m) ^ 2
            Else
                kcrit = 1.56 - 0.75 * lamda_rel_m
            End If
        End If
    End While
End If
```



```
'kr
If r_in * 100 / t >= 240 Then
    kr = 1
Else
    kr = 0.76 + 0.001 * r_in * 100 / t
End If
Wend
h1 = h2 - Tan(alfa / 57.2957795130823) * 100 * L / 2
st_desk = Round(h1 / t + 0.5)
h1 = st_desk * t
h2 = h1 + Tan(alfa / 57.2957795130823) * 100 * L / 2
End If
```

V prvem koraku program izračuna vse potrebne koeficiente  $k_1$ ,  $k_h$ ,  $k_{crit}$  in  $k_r$ , ki jih potrebujemo za kontrolo (31). Drugi korak je preverjanje ali je višina  $h_2$  ustrezna. Če je pogoj zadoščen in velja  $k_1 * 6 * M_{max} * 100 / (b * h_2^2) \leq k_r * k_h * k_{crit} * f_{m,g,d}$ , potem program nadaljuje izračun z naslednjo kontrolo; če pa pogoj ni izpolnjen potem program pade v zanko »Do While«, ki koračno povečuje višino  $h_2$  po en milimeter, nato ponovno izračuna tiste koeficiente, ki so odvisni od višine  $h_2$ , dokler zgoraj napisani pogoj ni izpolnjen.

Zadnje štiri vrstice pred zaključkom zunanega »If« stavka, so identične kot pri kontroli strižnih napetosti (vidimo, da gre v tem primeru za dvokapni nosilec, ker se  $h_2$  izračuna na polovici razpetine L), njihova naloga je zaokrožitev začetne višine na celo število desk in izračun nove, točne višine  $h_2$ .

### 3.2.3 Kontrola radialnih napetosti v temenu

Tretja kontrola je kontrola radialnih napetosti v temenu. Tudi ta kontrola je enaka za vse tipe nosilcev, ki imajo temensko območje. Do razlik med posameznimi tipi nosilcev prihaja le pri računu koeficienta  $k_{vol}$ ;  $V_b$  in  $V_{temena}$  se izračunata različno glede na geometrijske karakteristike prereza.

```
'KONTROLA RADIALNIH NAPETOSTI V TEMENU
Dim k5, k6, k7, kp, pd, kdis, kvol, Vb, Vtemena As Double
'kp
k5 = 0.2 * Tan(alfa / 57.2958)
k6 = 0.25 - 1.5 * Tan(alfa / 57.2958) + 2.5 * (Tan(alfa / 57.2958)) ^ 2
k7 = 2.1 * Tan(alfa / 57.2958) - 4 * (Tan(alfa / 57.2958)) ^ 2
kp = k5 + k6 * (h2 / (r * 100)) + k7 * (h2 / (r * 100)) ^ 2
'pd
pd = qed + 1.35 * (g + g_lastna) * ((1 / Cos(alfa / 57.2958)) - 1)
'kdis
kdis = 1.4
'kvol
Vb = b / 100 * (L * h1 / 100 + L * h2 / 200) '[m^3]
If b / 100 * (h2 / 100)^2 * (1 - 0.25 * Tan(alfa / 57.2958)) <= (2 / 3) * Vb Then
    temena = b / 100 * (h2 / 100) ^ 2 * (1 - 0.25 * Tan(alfa / 57.2958))
Else
    Vtemena = (2 / 3) * Vb
End If
kvol = (0.01 / Vtemena) ^ (0.2)

'Kontrola ustreznosti veljavnih višin
If kp * 6 * Mmax * 100 / (b * h2^2) - 0.6 * pd / (b * 100) <= kdis * kvol * ft90d Then
    'Kontrola uspešna
Else
    While kp * 6 * Mmax * 100 / (b * h2^2) - 0.6 * pd / (b * 100) > kdis * kvol * ft90d
        'Povečevanje h2 do ustreznosti kontrole
        h2 = h2 + 0.1
        k5 = 0.2 * Tan(alfa / 57.2958)
        k6 = 0.25 - 1.5 * Tan(alfa / 57.2958) + 2.5 * (Tan(alfa / 57.2958)) ^ 2
```

```
k7 = 2.1 * Tan(alfa / 57.2958) - 4 * (Tan(alfa / 57.2958)) ^ 2
kp = k5 + k6 * (h2 / (r * 100)) + k7 * (h2 / (r * 100)) ^ 2
'pd
pd = qed + 1.35 * (g + g_lastna) * ((1 / Cos(alfa / 57.2958)) - 1)
'kdis
kdis = 1.4
'kvol
Vb = b / 100 * (L * h1 / 100 + L * h2 / 200) '[m^3]
If b/100 * (h2/100)^2 * (1-0.25 * Tan(alfa/57.2958)) <= (2/3)* Vb Then
    Vtemena = b/100 * (h2/100)^2 * (1- 0.25* Tan(alfa / 57.2958))
Else
    Vtemena = (2 / 3) * Vb
End If
kvol = (0.01 / Vtemena) ^ (0.2)
Wend
h1 = h2 - Tan(alfa / 57.2958) * L * 100 / 2
st_desk = Round(h1 / t + 0.5)
h1 = st_desk * t
h2 = h1 + Tan(alfa / 57.2958) * 100 * L / 2
End If
```

Oblika kontrole je zasnovana na enak način kot kontrola normalnih napetosti v temenu. Tudi v tem primeru nastopajo v enačbi koeficienti, ki so odvisni od višine  $h_2$  in jih je zato potrebno ponovno izračunati ob vsakem povečanju višine do zadostitve kontroli.

### 3.2.4 Kontrola normalnih napetosti v kritičnem prerezu

Četrta kontrola je kontrola normalnih napetosti v kritičnem prerezu. Kritično mesto je definirano kot  $x_{crit}$ , ki predstavlja razdaljo od začetka elementa do kritičnega mesta – to je mesto, kjer pričakujemo ekstremno vrednost normalnih napetosti. Pri enokapnem nosilcu velja ta razdalja od strani z manjšo višino ( $h_1$ ) proti strani z večjo višino ( $h_2$ ), pri ostalih nosilcih pa razdalja do kritičnega mesta velja z obeh koncev nosilca. S pomočjo naklona nagnjenega roba se potem lahko določi višina nosilca na kritičnem mestu  $h_{crit}$  in pa tudi moment na kritičnem mestu  $M_{crit}$ .

Program nato določi potrebne koeficiente ( $k_{m,\alpha}$ ,  $k_h$  in  $k_{crit}$ ) in izračuna potrebno višino kritičnega prereza  $h_{crit\_potr}$ . Če velja, da je potrebna višina manjša od dejanske višine, potem je kontrola izpolnjena in program nadaljuje z naslednjo kontrolo; če pa je potrebna višina večja od dejanske, potem pa program zažene »Do-While« proceduro, ki koračno povečuje kritično višino po en milimeter in sproti vsakič izračuna vse koeficiente, ki so odvisni od višine.

```
'KONTROLA NORMALNIH NAPETOSTI V KRITIČNEM PREREZU
xcrit = L * 100 * 0.5 * h1 / h2 '[cm]
hcrit = h1 + Tan(alfa / 57.2957795130823) * xcrit '[cm]
Mcrit = Vmax * (xcrit / 100) - qed * 0.5 * (xcrit / 100) * (xcrit / 100) '[kNm]
kmalfatl = 1 / (1 + (fmd * Tan(alfa / 57.2958) / (1.5 * fvd)) ^ 2 + (fmd *
(Tan(alfa / 57.2958)) ^ 2 / fc90d) ^ 2) ^ 0.5
If hcrit < 60 Then
    kh = WorksheetFunction.Min(1.1, (600 / (hcrit * 10)) ^ 0.1)
Else
    kh = 1
End If
'Preverjanje bočne zvrnitve
sig_m_crit = (3.14159265 * b * b * ((e005 * g005 * (1 - 0.63 * b / h2)) ^ 0.5)) /
(h2 * lef * 100)
lamda_rel_m = (fmk / sig_m_crit) ^ 0.5
If lamda_rel_m <= 0.75 Then
    kcrit = 1
    'k_crit
```

```
Else
    If lamda_rel_m > 1.4 Then
        kcrit = 1 / (lamda_rel_m) ^ 2
    Else
        kcrit = 1.56 - 0.75 * lamda_rel_m
    End If
End If
hcrit_potr = (6 * Mcrit * 100 / (b * kmalfatl * kh * kcrit * fmd)) ^ 0.5
'Dobimo potrebno višino na kritičnem mestu

While hcrit_potr > hcrit
    hcrit = hcrit + 0.1
    h1 = hcrit_potr - Tan(alfa / 57.2958) * xcrit
    st_desk = Round(h1 / t + 0.5)
    h1 = st_desk * t
    h2 = h1 + Tan(alfa / 57.2958) * L * 100 * 0.5
    xcrit = L * 100 * 0.5 * h1 / h2 '[cm]
    hcrit = h1 + Tan(alfa / 57.2957795130823) * xcrit '[cm]
    Mcrit = Vmax * (xcrit / 100) - qed * 0.5 * (xcrit / 100) * (xcrit / 100)
    kmalfatl = 1 / (1 + (fmd * Tan(alfa / 57.2958) / (1.5 * fvd)) ^ 2 + (fmd *
    (Tan(alfa / 57.2958)) ^ 2 / fc90d) ^ 2) ^ 0.5
    If hcrit < 60 Then
        kh = WorksheetFunction.Min(1.1, (600 / (hcrit * 10)) ^ 0.1)
    Else
        kh = 1
    End If
    'Preverjanje bočne zvrnitve
    sig_m_crit = (3.14159265*b^2*((e005*g005*(1-0.63*b/h2))^0.5))/(h2*lef *100)
    lamda_rel_m = (fmk / sig_m_crit) ^ 0.5
    If lamda_rel_m <= 0.75 Then
        kcrit = 1
    Else
        If lamda_rel_m > 1.4 Then
            kcrit = 1 / (lamda_rel_m) ^ 2
        Else
            kcrit = 1.56 - 0.75 * lamda_rel_m
        End If
    End If
    hcrit_potr = (6 * Mcrit * 100 / (b * kmalfatl * kh * kcrit * fmd)) ^ 0.5
    'Dobimo potrebno višino na kritičnem mestu
Wend
```

### 3.2.5 Kontrola radialnih napetosti v kritičnem prerezu

Peta kontrola je kontrola radialnih napetosti v kritičnem prerezu. Ker imamo iz prejšnjih kontrol že poračunane vrednosti o višini in momentu na kritičnem mestu, tukaj samo še primerjamo vrednosti. Glede na orientacijo poševnega roba (nateg ali tlak) je potrebno kontrolirati natezne napetosti v smeri pravokotno na vlakna, tlačne napetosti pravokotno na vlakna niso nikoli merodajne. Koda je prikazana za primer, ko je nagnjen rob obremenjen s tlačnimi napetostmi, to je kadar se nahaja na zgornji strani nosilca.

```
'KONTROLA TLAČNIH RADIALNIH NAPETOSTI V KRITIČNEM PREREZU
If 6 * Mcrit * 100 / (b * hcrit ^ 2) * (Tan(alfa / 57.2958)) ^ 2 <= fc90d Then
    'Kontrola uspešna
Else
    While 6 * Mcrit * 100 / (b * hcrit ^ 2) * (Tan(alfa / 57.2958)) ^ 2 > fc90d
        hcrit = hcrit + 0.01
    Wend
    h1 = hcrit - Tan(alfa / 57.2958) * xcrit
    st_desk = Round(h1 / t + 0.5)
    h1 = st_desk * t
    h2 = h1 + Tan(alfa / 57.2958) * L * 100 / 2
End If
```

### 3.2.6 Kontrola strižnih napetosti v kritičnem prerezu

Šesta kontrola je kontrola strižnih napetosti v kritičnem prerezu in je zelo podobna peti kontroli, primerjalna vrednost je sedaj strižna trdnost materiala.

```
'KONTROLA STRIŽNIH NAPETOSTI V KRITIČNEM PREREZU
If 6 * Mcrit * 100 / (b * hcrit ^ 2) * Tan(alfa / 57.2958) <= fvd Then
    'Kontrola uspešna
Else
    While 6 * Mcrit * 100 / (b * hcrit ^ 2) * Tan(alfa / 57.2958) > fvd
        hcrit = hcrit + 0.01
    Wend
    h1 = hcrit - Tan(alfa / 57.2958) * xcrit
    st_desk = Round(h1 / t + 0.5)
    h1 = st_desk * t
    h2 = h1 + Tan(alfa / 57.2958) * L * 100 / 2
End If
```

### 3.2.7 Kontrola kontaktnih napetosti

Sedma kontrola v resnici ni kontrola ampak zgolj podatek. Kontrolirati je potrebno kontaktne napetosti na mestu naleganja med ležiščem in elementom. Ker pa imamo opravka z velikimi razpentinami, bomo običajno podpirali nosilec na drug način kot samo z naleganjem, pri katerem bi včasih potrebovali zelo veliko površino oziroma zelo dolg steber v smeri nosilca (ker imamo širino b že izbrano). Pod to točko se izračuna potrebna naležna površina oziroma potrebna naležna dolžina (recimo stebra), ki jo mora nato inženir zagotoviti.

```
'KONTROLA KONTAKTNIH NAPETOSTI
Dim nalezna_pov, nalezna_dol As Double
nalezna_pov = Vmax / fc90d '[cm^2]
nalezna_dol = nalezna_pov / b

'KONTROLA KONTAKTNIH NAPETOSTI
Dim fc_beta, nalezna_pov, nalezna_dol As Double
fc_beta = fc0d / ((fc0d / (1 * fc90d)) * (Sin(90 / 57.2958 - beta / 57.2958)) ^ 2
+ (Cos(90 / 57.2958 - beta / 57.2958)) ^ 2)
nalezna_pov = Vmax / fc_beta '[cm^2]
nalezna_dol = nalezna_pov / b
```

Prva kontrola velja za nosilce z ravno osjo ter spremenljivo višino, druga pa velja za nosilce z ukrivljeno osjo, kjer je potrebno upoštevati nagib vlaken – tlačne napetosti niso več pravokotno na vlakna.

$$f_{c,\beta,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} \sin^2(\beta) + \cos^2(\beta)} \quad (69)$$

### 3.2.8 Kontrola povesa

Osmo kontrola je kontrola povesa na sredini razpona nosilca. Sestavljena je iz dveh posamičnih kontrol glede na čas opazovanja. Najprej kontroliramo trenutni poves ( $w_{inst}$ ), ki se razvije takoj po nanosu obtežbe. Prikazan bo postopek izračuna za dvokapni nosilec spremenljive višine.

```
'Trenutni pomik w_inst
Mmax_g_glastna = (g + g_lastna) * L * L / 8 '[kNm]
a = h2 / h1
k4_gb = 19.2 * (1 / (a - 1))^3 * (2 * (a + 2) / (a - 1) * Log((a + 1) / 2) + 3 / (a + 1) - 2 / (a + 1)^2 - 4)
k4_gs = 4 / (a - 1) * ((a + 1) / (a - 1) * Log((a + 1) / 2) - 1)
w_inst_gb = 5 * Mmax_g_glastna * L^2 * 10^6 * k4_gb * 12 / (48 * e0mean * b * h1 ^ 3)
w_inst_gs = 1.2 * Mmax_g_glastna * 100 * k4_gs / (g0mean * b * h1)
```

Najprej obravnavamo samo stalno obtežbo. Poves nosilca se bo izračunal kot vsota povesa zaradi upogiba in povesa zaradi prečnih sil. V prvi vrstici se izračuna največji moment zaradi stalne obtežbe. V drugi vrstici se izračuna koeficient razmerja večje višine proti manjši višini, ki ga potrebujemo za izračun koeficientov  $k_{4b}$  in  $k_{4s}$ . V peti in šesti vrstici se izračuna takojšnji poves zaradi stalne teže nosilca;  $w_{inst\_gb}$  predstavlja poves zaradi upogiba (b kot ang. bending) in  $w_{inst\_gs}$  predstavlja poves zaradi prečnih sil (s kot ang. shear).

V prvi vrstici vsakega »If« stavka program ugotovi katera kombinacija je aktualna, potem pa glede na kombinacijo izračuna trenutni pomik. Ker se mejno stanje uporabnosti nahaja v elastičnem področju materiala, lahko pomik zaradi stalne obtežbe preprosto delimo s stalno obtežbo in ga nato pomnožimo z neko spremenljivo obtežbo in s tem dobimo pomik zaradi te spremenljive obtežbe.

```
If qed = qed7 Then
  w_inst = w_inst_gb + w_inst_gs + q * w_inst_gb / (g + g_lastna) + q * w_inst_gs /
  (g + g_lastna) + qs * 0.6 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qs * 0.6 * w_inst_gs /
  (g + g_lastna) + qw * 0.6 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qw * 0.6 * w_inst_gs /
  (g + g_lastna)
End If
If qed = qed6 Then
  w_inst = w_inst_gb + w_inst_gs + qw * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qw * w_inst_gs /
  (g + g_lastna) + qs * 0.6 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qs * 0.6 * w_inst_gs /
  (g + g_lastna) + q * psi0 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + q * psi0 * w_inst_gs /
  (g + g_lastna)
End If
If qed = qed5 Then
  w_inst = w_inst_gb + w_inst_gs + qs * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qs * w_inst_gs /
  (g + g_lastna) + qw * 0.6 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qw * 0.6 * w_inst_gs /
  (g + g_lastna) + q * psi0 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + q * psi0 * w_inst_gs /
  (g + g_lastna)
End If
If qed = qed4 Then
  w_inst = w_inst_gb + w_inst_gs + q * w_inst_gb / (g + g_lastna) + q * w_inst_gs /
  (g + g_lastna)
End If
If qed = qed3 Then
  w_inst = w_inst_gb + w_inst_gs + qw * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qw * w_inst_gs /
  (g + g_lastna)
End If
If qed = qed2 Then
  w_inst = w_inst_gb + w_inst_gs + qs * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qs * w_inst_gs /
  (g + g_lastna)
End If
If qed = qed1 Then
  w_inst = w_inst_gb + w_inst_gs
End If
```

V tem trenutku program pozna trenutni pomik v mejnem stanju uporabnosti. Sedaj ga lahko primerja z mejnim pomikom, ki smo ga v vhodne podatke podali kot delež celotne razpetine (npr.  $L/300$ ). Če je pomik prevelik, se začne koračno povečevanje višine nosilca ter ponovno računanje trenutnega pomika do zadostitve kontroli.

```
'Povečanje h1 in h2 v korakih po 0.1cm, do zadostitve pogoja L/Linst
While w_inst > L * 100 / Linst
  h1 = h1 + 0.1
  st_desk = Round(h1 / t + 0.5)
  h1 = st_desk * t
  h2 = h1 + Tan(alfa / 57.2957795130823) * L * 100 / 2
  Mmax_g_glastna = (g + g_lastna) * L * L / 8 '[kNm]
  a = h2 / h1
  k4_gb = 19.2 * (1/(a-1))^3 * (2*(a+2)/(a-1) * Log((a+1)/2) + 3/(a+1) - 2/(a+1)^2 - 4)
  k4_gs = 4 / (a - 1) * ((a + 1) / (a - 1) * Log((a + 1) / 2) - 1)
  w_inst_gb = 5 * Mmax_g_glastna * L^2 * 10^6 * k4_gb * 12 / (48 * e0mean * b * h1 ^ 3)
  w_inst_gs = 1.2 * Mmax_g_glastna * 100 * k4_gs / (g0mean * b * h1)
.
.
'Na tem mestu program ponovno preveri aktualno obtežno kombinacijo in izračuna trenutni pomik
.
.
Wend
```

Drugi del kontrole preverja končni pomik, ki nastane po izvršenem lezenju materiala. Tako kot pri začetnem pomiku, mora program najprej ugotoviti katera kombinacija vplivov je aktualna, da lahko izračuna končni pomik.

```
If qed = qed7 Then
  w_fin = (1 + kdef) * (w_inst_gb + w_inst_gs) + (1 + psi2 * kdef) * (q * w_inst_gb / (g + g_lastna) + q * w_inst_gs / (g + g_lastna)) + (0.6) * (qs * 0.6 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qs * 0.6 * w_inst_gs / (g + g_lastna)) + (0.6) * (qw * 0.6 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qw * 0.6 * w_inst_gs / (g + g_lastna))
End If
If qed = qed6 Then
  w_fin = (1 + kdef) * (w_inst_gb + w_inst_gs) + (1) * (qw * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qw * w_inst_gs / (g + g_lastna)) + (0.6) * (qs * 0.6 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qs * 0.6 * w_inst_gs / (g + g_lastna)) + (psi0 + psi2 * kdef) * (q * psi0 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + q * psi0 * w_inst_gs / (g + g_lastna))
End If
If qed = qed5 Then
  w_fin = (1 + kdef) * (w_inst_gb + w_inst_gs) + (1) * (qs * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qs * w_inst_gs / (g + g_lastna)) + (0.6) * (qw * 0.6 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qw * 0.6 * w_inst_gs / (g + g_lastna)) + (psi0 + psi2 * kdef) * (q * psi0 * w_inst_gb / (g + g_lastna) + q * psi0 * w_inst_gs / (g + g_lastna))
End If
If qed = qed4 Then
  w_fin = (1 + kdef) * (w_inst_gb + w_inst_gs) + (1 + psi2 * kdef) * (q * w_inst_gb / (g + g_lastna) + q * w_inst_gs / (g + g_lastna))
End If
If qed = qed3 Then
  w_fin = (1 + kdef) * (w_inst_gb + w_inst_gs) + (1) * (qw * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qw * w_inst_gs / (g + g_lastna))
End If
If qed = qed2 Then
  w_fin = (1 + kdef) * (w_inst_gb + w_inst_gs) + (1) * (qs * w_inst_gb / (g + g_lastna) + qs * w_inst_gs / (g + g_lastna))
End If
If qed = qed1 Then
  w_fin = (1 + kdef) * (w_inst_gb + w_inst_gs)
End If
```

Program nato preveri ustreznost končnega pomika in ga po potrebi zmanjša s spreminjanjem parametrov. Če je pomik potrebno zmanjšati, začne koračno povečevati začetno višino nosilca  $h_1$  po en milimeter ter jo nato že pred izračunom pomika zaokroži na celo število desk.

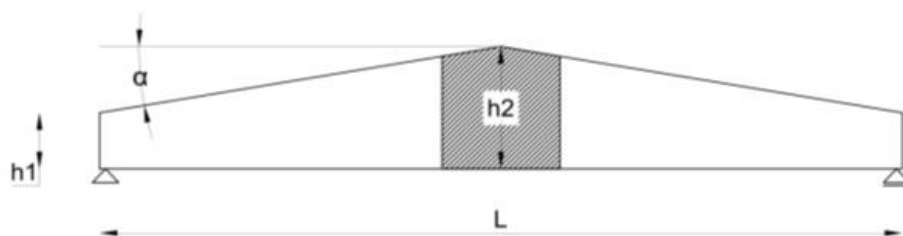
```
'Povečanje h1 in h2 v korakih po 0.1cm, do zadostitve pogoja L/Lfin
While w_fin > L * 100 / Lfin
  h1 = h1 + 0.1
  st_desk = Round(h1 / t + 0.5)
  h1 = st_desk * t
  h2 = h1 + Tan(alfa / 57.2957795130823) * L * 100 / 2
  a = h2 / h1
  k4_gb = 19.2 * (1/(a-1))^3 * (2*(a+2)/(a-1) * Log((a+1)/2) + 3/(a+1) - 2/(a+1)^2 - 4)
  k4_gs = 4 / (a - 1) * ((a + 1) / (a - 1) * Log((a + 1) / 2) - 1)
  w_inst_gb = 5 * Mmax_g_glastna * L^2 * 10^6 * k4_gb * 12 / (48 * e0mean * b * h1 ^ 3)
  w_inst_gs = 1.2 * Mmax_g_glastna * 100 * k4_gs / (g0mean * b * h1)
.
.
'Na tem mestu program ponovno preveri aktualno obtežno kombinacijo in izračuna končni pomik
.
.
Wend
```

Preden uporabnik pritisne gumb za izračun potrebne višine nosilca, lahko izbere tudi možnost, da program prikaže postopek dimenzioniranja. Tako postane potek računa kar se da transparenten uporabniku.

Poleg minimalnih potrebnih višin elementa nam program prikaže tudi uporabljeno merodajno kombinacijo vplivov, računске materialne karakteristike ter vse izvedene kontrole, ki jih zahteva Evrokod 5. S tem se lahko uporabnik sam prepriča ali program deluje pravilno.

#### 4 RAČUNSKI PRIMER UPORABE PROGRAMA

Z računskim primerom bo pokazan celoten postopek dimenzioniranja, kot ga izvede program. Za primer je uporabljen dvokapni nosilec z razpetino 28 metrov. V tem računskem primeru so prikazani vsi tipi kontrol, ki jih program zna iz vrednotiti. Vhodni podatki so razvidni s spodnje slike.



Dvokapni nosilec spremenljive višine

GEOMETRIJA			
Razpetina	L	28	m
Bočno podpirajne	$l_{ef}$	5	m
Naklon	$\alpha$	3	°
Notranji radij	r	$\infty$	m
Širina	b	20	cm
Debelina deske	t	3	cm

OBTEŽBA			
Stalna	g	4	kN/m
Lastna teža nosilca je že upoštevana			<input checked="" type="checkbox"/>
Koristna	q	0	kN/m
Do 1 tedna	0,6	0,2	0
Sneg	$q_s$	4	kN/m
Veter	$q_w$	1	kN/m

MATERIALNE KARAKTERISTIKE			
Trdnostni razred	GL 28h		
Razred uporabnosti	$k_{def} =$	0,8	2

OMEJITEV POVESA - MSU		
$w_{inst}$	L /	300
$w_{fin}$	L /	250

Slika 17: Vhodni podatki



#### 4.1 Izbira merodajne kombinacije vplivov in izračun projektnih materialnih karakteristik

Program izračuna vseh sedem možnih kombinacij vplivov in jim določi pripadajoči modifikacijski faktor, glede na najkrajše trajajoči vpliv. Nato se iz razmerja  $q_{Ed,i} / k_{mod,i}$  odloči za merodajno kombinacijo vplivov  $q_{Ed}$ . (Uporabljene enačbe 56, 57, 58, 59, 60, 61 in 62.)

$$\begin{aligned} q_{ed\_1} &= 1.35 (g + g_{lastna}) = 5,4 \text{ kN/m} \\ k_{mod\_1} &= 0,6 \\ q_{ed\_1} / k_{mod\_1} &= 9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{ed2} &= 1.35 * (g + g_{lastna}) + 1.5 * q_s = 11,4 \text{ kN/m} \\ k_{mod\_2} &= 0,8 \end{aligned}$$

$$q_{ed\_2} / k_{mod\_2} = \mathbf{14,25}$$

$$\mathbf{\max (q_{Ed,i} / k_{mod,i})}$$

$$\begin{aligned} q_{ed3} &= 1.35 * (g + g_{lastna}) + 1.5 * q_w = 6,9 \text{ kN/m} \\ k_{mod\_3} &= 0,9 \\ q_{ed\_3} / k_{mod\_3} &= \mathbf{7,666666666666667} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{ed4} &= 1.35 * (g + g_{lastna}) + 1.5 * q = 5,4 \text{ kN/m} \\ k_{mod\_4} &= 0,9 \\ q_{ed\_4} / k_{mod\_4} &= \mathbf{6} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{ed5} &= 1.35 * (g + g_{lastna}) + 1.5 * q_s + 1.5 * 0.6 * q_w + 1.5 * \psi_{i0} * q = 12,3 \text{ kN/m} \\ k_{mod\_5} &= 0,9 \\ q_{ed\_5} / k_{mod\_5} &= \mathbf{13,666666666666667} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{ed6} &= 1.35 * (g + g_{lastna}) + 1.5 * q_w + 1.5 * 0.6 * q_s + 1.5 * \psi_{i0} * q = 10,5 \text{ kN/m} \\ k_{mod\_6} &= 0,9 \\ q_{ed\_6} / k_{mod\_6} &= \mathbf{11,666666666666667} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{ed7} &= 1.35 * (g + g_{lastna}) + 1.5 * q + 1.5 * 0.6 * q_s + 1.5 * 0.6 * q_w = 9,9 \text{ kN/m} \\ k_{mod\_7} &= 0,9 \\ q_{ed\_7} / k_{mod\_7} &= \mathbf{11} \end{aligned}$$

Vidimo, da je merodajna druga kombinacija vplivov,  $q_{Ed}=11.4 \text{ kN/m}$ . V naslednjem koraku je mogoče izračunati projektne materialne karakteristike na podlagi sedaj znanega modifikacijskega faktorja  $k_{mod}$ .

$$f_{m,g,d} = f_{m,g,k} \frac{k_{mod}}{1.25} = 2.8 \text{ kN/cm}^2 \frac{0.8}{1.25} = 1.792 \text{ kN/cm}^2 \quad (70)$$

$$f_{v,g,d} = f_{v,g,k} \frac{k_{mod}}{1.25} = 0.32 \text{ kN/cm}^2 \frac{0.8}{1.25} = 0.205 \text{ kN/cm}^2 \quad (71)$$

$$f_{c,0,g,d} = f_{c,0,g,k} \frac{k_{mod}}{1.25} = 2.65 \text{ kN/cm}^2 \frac{0.8}{1.25} = 1.696 \text{ kN/cm}^2 \quad (72)$$

$$f_{c,90,g,d} = f_{c,90,g,k} \frac{k_{mod}}{1.25} = 0.3 \text{ kN/cm}^2 \frac{0.8}{1.25} = 0.192 \text{ kN/cm}^2 \quad (73)$$

$$f_{t,90,g,d} = f_{t,90,g,k} \frac{k_{mod}}{1.25} = 0.045 \text{ kN/cm}^2 \frac{0.8}{1.25} = 0.029 \text{ kN/cm}^2 \quad (74)$$

## 4.2 Kontrola strižnih napetosti pri $x=0$

Ker poznamo mesto največjih strižnih napetosti ter vso obtežbo in karakteristike materiala, lahko iz izraza (1) izrazimo edino še ne znano količino – začetno višino nosilca ( $h_{min}$ ).

$$\tau_{v,d} = \frac{1.5 V_d}{k_{cr} b h_{min}} \leq f_{v,g,d} = \frac{k_{mod} f_{v,g,k}}{\gamma_M} \quad (1)$$

$$h_{min} \geq \frac{1.5 V_d}{k_{cr} b f_{v,g,d}} = \frac{1.5 * 28m * 11.4 \frac{kN}{m} * 0.5}{0.67 * 20cm * 0.205 \frac{kN}{cm^2}} = 87.15 \text{ cm} \quad (75)$$

$$\text{število lamel} = \frac{87.15 \text{ cm}}{3 \text{ cm}} = 29.05 \quad \rightarrow \quad 30 \text{ lamel debeline } 30mm \quad (76)$$

$$h_1 = 30 * 3cm = 90cm \quad (77)$$

$$h_2 = h_1 + \frac{L}{2} * \tan(\alpha) = 90cm + \frac{2800cm}{2} * \tan(3^\circ) = 163.37cm \quad (78)$$

## 4.3 Kontrola normalnih napetosti v temenu ( $x=L/2$ )

Program najprej preizkusi kontrolo s podatki, ki jih je izračunal pod točko (4.2), če kontroli ne bo zadoščeno bo višini korigiral.

$$k_1 = 1 + 1.4 \tan(3^\circ) + 5.4 \tan^2(3^\circ) = 1.088 \quad (33)$$

$$k_2 = 0.35 - 8 \tan(3^\circ) = -0.069 \quad (34)$$

$$k_3 = 0.6 + 8.3 \tan(3^\circ) - 7.8 \tan^2(3^\circ) = 1.014 \quad (35)$$

$$k_4 = 6 \tan^2(3^\circ) = 0.0165 \quad (36)$$

$$r = r_{in} + 0.5 h_2 = \infty + 0.5 * 163.37cm = \infty \quad (37)$$

$$k_l = k_1 + k_2 \left(\frac{h_2}{r}\right) + k_3 \left(\frac{h_2}{r}\right)^2 + k_4 \left(\frac{h_2}{r}\right)^3 = 1.088 - 0 + 0 + 0 = 1.088 \quad (32)$$

$$k_r = \min \begin{cases} 1 & ; \quad \frac{r_{in}}{t} = \infty \geq 240 \\ 0.76 + 0.001 \frac{r_{in}}{t} & ; \quad \frac{r_{in}}{t} = \infty < 240 \end{cases} \quad (38)$$

$$M_{d,temena} = \frac{11.4 \text{ kN/m} * (28m)^2}{8} = 1117.2 \text{ kNm} \quad (79)$$

$$\sigma_{m,d} = 1.088 \frac{6 * 1117.2 \text{ kNm} * 100}{20cm * 163.37^2 cm^2} = 1.367 \text{ kN/cm}^2 \leq 1.792 \text{ kN/cm}^2 \quad (31)$$

Kontroli je zadoščeno, zato višini ostajata nespremenjeni ( $h_1=90cm$  in  $h_2=163.37cm$ ).

#### 4.4 Kontrola nateznih radialnih napetosti v temenu ( $x=L/2$ )

Enako kot pri kontroli normalnih napetosti v temenu (4.3), program naprej poračuna vse parametre in preizkusi kontrolo z do sedaj izračunanima višinama ( $h_1$  in  $h_2$ ). Če kontroli ne bo zadoščeno, bo program v korakih po en centimeter povečeval višino nosilca v temenu in preverjal kontrolo do zadostitve.

$$k_5 = 0.2 \tan(3^\circ) = 0.01048 \quad (42)$$

$$k_6 = 0.25 - 1.5 \tan(3^\circ) + 2.5 \tan^2(3^\circ) = 0.178 \quad (43)$$

$$k_7 = 2.1 \tan(3^\circ) - 4 \tan^2(3^\circ) = 0.099 \quad (44)$$

$$k_p = 0.01 + 0 + 0 = 0.01 \quad (41)$$

$$p_d = 1.35 \frac{4 \text{ kN/m}}{\cos(3^\circ)} + 1.5 * 4 \text{ kN/m} = 11.41 \text{ kN/m} \quad (45)$$

$$k_{dis} = 1.4 \quad (46)$$

$$V_b = 0.2 \text{ m} * (28 \text{ m} * 0.9 \text{ m} + 28 \text{ m} * (1.634 \text{ m} - 0.9 \text{ m}) * 0.5) = 7.1 \text{ m}^3 \quad (80)$$

$$V_{temena} = 0.2 \text{ m} * 1.634^2 \text{ m}^2 * (1 - 0.25 \tan(3^\circ)) = 0.527 \text{ m}^3 \leq \frac{2}{3} 7.1 \text{ m}^3 = 4.73 \text{ m}^3 \quad (48)$$

$$k_{vol} = \left( \frac{0.01 \text{ m}^3}{0.527 \text{ m}^3} \right)^{0.2} = 0.453 \quad (47)$$

$$\sigma_{t,90,d} = 0.01 \frac{6 * 1117.2 \text{ kNm} * 100}{20 \text{ cm} * 163.37^2 \text{ cm}^2} - 0.6 \frac{11.41 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{20 \text{ cm} * 100} = 0.0132 - 0.0034 = \quad (40)$$

$$= \mathbf{0.00974 \text{ kN/cm}^2} \leq 1.4 * 0.453 * 0.029 \text{ kN/cm}^2 = \mathbf{0.018 \text{ kN/cm}^2}$$

Vidimo, da je kontroli nateznih radialnih napetosti v temenu zadoščeno ( $h_1=90\text{cm}$  in  $h_2=163.37\text{cm}$ ).

#### 4.5 Kontrola normalnih napetosti v kritičnem prerezu ( $x = x_{crit}$ )

$$x_{crit} = \frac{L \cdot h_1}{2 \cdot h_2} = \frac{2800 \text{ cm} \cdot 90 \text{ cm}}{2 \cdot 163.37 \text{ cm}} = 771.26 \text{ cm} \quad (81)$$

$$h_{crit} = h_1 + \tan(3^\circ) \cdot x_{crit} = 130.42 \text{ cm} \quad (82)$$

$$\begin{aligned} M_{crit} &= 28 \text{ m} \cdot 11.4 \text{ kN/m} \cdot 0.5 \cdot 7.713 \text{ m} - 11.4 \text{ kN/m} \cdot 0.5 \cdot 7.713^2 \text{ m}^2 \\ &= 891.9 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (83)$$

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{1.792 \text{ kN/cm}^2}{1.5 \cdot 0.205 \text{ kN/cm}^2} \tan(3) \right)^2 + \left( \frac{1.792 \text{ kN/cm}^2}{0.192 \text{ kN/cm}^2} \tan^2(3) \right)^2}} = 0.956 \quad (6)$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \cdot 20^2 \sqrt{1020 \cdot 63.2 \left( 1 - 0.63 \frac{20}{163.37} \right)}}{163.37 \cdot 500} = 3.75 \text{ kN/cm}^2 \quad (9)$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{2.8 \text{ kN/cm}^2}{3.75 \text{ kN/cm}^2}} = 0.864 \quad (10)$$

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \lambda_{rel,m} \leq 0.75 \\ 1.56 - 0.75 \lambda_{rel,m} & 0.75 < \lambda_{rel,m} \leq 1.4 = 0.912 \\ 1/\lambda_{rel,m}^2 & 1.4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (11)$$

Iz drugega (2) in četrtega (4) izraza lahko tako izračunamo potrebno višino kritičnega prereza:

$$h_{potr} \geq \sqrt{\frac{6 M_{crit}}{b k_{m,\alpha} k_h k_{crit} f_{m,g,d}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 891.9 \cdot 100 \text{ kNm}}{20 \cdot 0.956 \cdot 1 \cdot 0.912 \cdot 1.792}} = 130.87 \text{ cm} < h_{crit} \quad (84)$$

Ker je potrebna višina kritičnega prereza manjša od dejanske višine kritičnega prereza je potrebno korigirati višini  $h_1$  in  $h_2$ . Program izvede povečanje tako, da povečuje  $h_{crit}$  v korakih po 0.1 centimetra ter poračuna  $h_1$  in  $h_2$ , nato pa ponovno izračuna koeficiente v izrazih 81, 82, 83, 9, 10 ter 11. Nato pa preveri kontrolo pod številko 84.

Preglednica 4: Povečevanje višine nosilca do zadostitve kontroli normalnih napetosti

	$h_{crit,dej}$	$h_1$	$h_2$	$x_{crit}$	$M_{crit}$	$\sigma_{m,crit}$	$\lambda_{rel,m}$	$k_{crit}$	$h_{potr}$	
	130,42	90	163,3709	771,2514	891,8648	3,75228	0,863836	0,912123	130,8536	$< h_{crit,dej}$
+ 1 cm	131,42	90,7903								
		93	166,3709	782,5889	899,918	3,687394	0,871403	0,906448	131,8539	$> h_{crit,dej}$

Zaradi ustreznega zaokroževanja na celo število lamel smo že v prvem koraku zadosti povečali dimenzijo prereza in ustregli kontroli. ( $h_1$  je sedaj 93cm,  $h_2$  pa 166.37cm)

#### 4.6 Kontrola tlačnih radialnih napetosti v kritičnem prerezu ( $x = x_{crit}$ )

Program po izrazu (12) preveri ustreznost višine kritičnega prereza. Če višina ne ustreza, ponovno začne v korakih povečevati  $h_{crit}$ . V naprej lahko predvidevamo, da ta kontrola ne bo nikdar merodajna, tlačne radialne napetosti bodo manjše za cel velikostni razred ali celo dva.

$$\begin{aligned}\sigma_{c,90,d} &= \frac{6 \cdot 899,918 \cdot 100 \text{ kNm}}{20 \text{ cm} \cdot 134,014^2 \text{ cm}^2} \tan^2(3) = \\ &= \mathbf{0.0041 \text{ kN/cm}^2} \leq f_{c,90,g,d} = \mathbf{0.192 \text{ kN/cm}^2}\end{aligned}\quad (12)$$

Kontroli je zadoščeno, zato višini ostajata nespremenjeni.

$$(h_1 = 93 \text{ cm}, h_2 = 166.37 \text{ cm})$$

#### 4.7 Kontrola strižnih napetosti v kritičnem prerezu ( $x = x_{crit}$ )

$$\tau_{v,d} = \frac{6 \cdot 899,918 \cdot 100 \text{ kNm}}{20 \text{ cm} \cdot 134,014^2 \text{ cm}^2} \tan(3) = \mathbf{0.079 \text{ kN/cm}^2} \leq f_{v,g,d} = \mathbf{0.205 \text{ kN/cm}^2} \quad (16)$$

Tudi kontroli strižnih napetosti v kritičnem prerezu je zadoščeno, zato višini ostajata nespremenjeni.

$$(h_1 = 93 \text{ cm}, h_2 = 166.37 \text{ cm})$$

#### 4.8 Kontrola trenutnih pomikov v MSU

$$M_{max,g} = (4 \text{ kN/m} + 0) \cdot 28^2 \text{ m}^2 / 8 = 392 \text{ kNm} \quad (85)$$

$$a = \frac{166.37 \text{ cm}}{93 \text{ cm}} = 1.789 \quad (86)$$

$$\begin{aligned}k4_{g,b} &= 19.2 \cdot \left(\frac{1}{1.789-1}\right)^3 \cdot \left(\frac{2(1.789+2)}{1.789-1}\right) \cdot \ln\left(\frac{1.789+1}{2}\right) + \frac{3}{1.789+1} \\ &\quad - \frac{2}{(1.789+1)^2} - 4 = 0.485\end{aligned}\quad (87)$$

$$k4_{g,s} = \frac{4}{1.789-1} \cdot \left(\frac{1.789+1}{1.789-1}\right) \cdot \ln\left(\frac{1.789+1}{2}\right) - 1 = 0.890 \quad (88)$$

$$w_{inst,g,b} = \frac{5 \cdot 392 \text{ kNm} \cdot 28^2 \text{ m}^2 \cdot 0.485 \cdot 12 \cdot 10^6}{48 \cdot 1260 \text{ kN/cm}^2 \cdot 20 \text{ cm} \cdot 93^3 \text{ cm}^3} = 9.192 \text{ cm} \quad (89)$$

$$w_{inst,g,s} = \frac{1.2 \cdot 392 \text{ kNm} \cdot 0.890 \cdot 100}{78 \text{ kN/cm}^2 \cdot 20 \text{ cm} \cdot 93 \text{ cm}} = 0.289 \text{ cm} \quad (90)$$

$$w_{inst} = 9.192 \text{ cm} + 0.289 \text{ cm} + \frac{4 \text{ kN/m} \cdot 9.192 \text{ cm}}{4 \text{ kN/m}} + \frac{4 \text{ kN/m} \cdot 0.289 \text{ cm}}{4 \text{ kN/m}} = 18.95 \text{ cm} \quad (91)$$

$$\frac{L}{300} = \frac{2800 \text{ cm}}{300} = \mathbf{9.333 \text{ cm}} < \mathbf{18.95 \text{ cm}} = w_{inst} \quad (92)$$

Kontrola ni izpolnjena, zato začne program povečevati začetno višino nosilca ( $h_1$ ). Nato s pomočjo naklona zgornjega roba izračuna višino  $h_2$ , ponovno izračuna maksimalni moment, ki ostaja enak, ker smo v vhodnih podatkih navedli, da je teža nosilca že zajeta v stalni obtežbi (g). Nato se izračunajo faktorji povesa ter na koncu še trenutni skupni povese, ki ga je potrebno primerjati z zahtevo  $L/300$ .

Preglednica 5: Povečevanje višine  $h_1$  do zadostitve zahtevi o takojšnjem pomiku

	$h_1$	$h_{1,zaokr^*}$	$h_2$	$M_{max,g}$	$a$	$k_{4,gb}$	$k_{4,gs}$	$w_{inst,gb}$	$w_{inst,gs}$	$w_{inst}$		$L/300$
		93	166,37	392	1,789	0,4847	0,8896	9,19	0,29	18,95	>	9,333
+0,1	93,1	96	169,37	392	1,764	0,4942	0,8925	8,52	0,28	17,59	>	9,333
+0,1	96,1	99	172,37	392	1,741	0,5034	0,8953	7,91	0,27	16,36	>	9,333
+0,1	99,1	102	175,37	392	1,719	0,5123	0,8979	7,36	0,27	15,25	>	9,333
+0,1	102,1	105	178,37	392	1,699	0,5209	0,9004	6,86	0,26	14,24	>	9,333
+0,1	105,1	108	181,37	392	1,679	0,5292	0,9028	6,40	0,25	13,31	>	9,333
+0,1	108,1	111	184,37	392	1,661	0,5373	0,9051	5,99	0,25	12,47	>	9,333
+0,1	111,1	114	187,37	392	1,644	0,5451	0,9072	5,61	0,24	11,70	>	9,333
+0,1	114,1	117	190,37	392	1,627	0,5526	0,9093	5,26	0,23	10,99	>	9,333
+0,1	117,1	120	193,37	392	1,611	0,5599	0,9113	4,94	0,23	10,34	>	9,333
+0,1	120,1	123	196,37	392	1,597	0,5669	0,9132	4,64	0,22	9,74	>	9,333
	123,1	126	199,37	392	1,582	0,5738	0,9150	4,37	0,22	<b>9,18</b>	<	<b>9,333</b>

#### 4.9 Kontrola končnih pomikov v MSU

$$w_{fin} = (1 + 0.8) * (4.37\text{ cm} + 0.22\text{ cm}) + 1.0 * 4\text{ kN/m} * \frac{4.37\text{ cm}}{4\text{ kN/m}} + \quad (93)$$

$$+ 1.0 * 4\text{ kN/m} * \frac{0.22\text{ cm}}{4\text{ kN/m}} = \mathbf{12.86\text{ cm}} > \frac{L}{250} = \frac{2800\text{ cm}}{250} = \mathbf{11.2\text{ cm}}$$

Preglednica 6: Povečevanje višine  $h_1$  do zadostitve zahtevi o končnem pomiku

	$h_1$	$h_{1,zaokr^*}$	$h_2$	$M_{max,g}$	$a$	$k_{4,gb}$	$k_{4,gs}$	$w_{inst,gb}$	$w_{inst,gs}$	$w_{fin}$		$L/250$
		126	199,37	392	1,582	0,5738	0,9150	4,37	0,22	12,86	>	11,2
+0,1	126,1	129	202,37	392	1,569	0,5804	0,9167	4,12	0,21	12,14	>	11,2
+0,1	129,1	132	205,37	392	1,556	0,5869	0,9184	3,89	0,21	11,48	>	11,2
+0,1	132,1	135	208,37	392	1,543	0,5931	0,9200	3,67	0,21	<b>10,87</b>	<	<b>11,2</b>

S tem smo prišli do zadnje in tudi očitno najstrožje kontrole, ki določa višino prostoležečega nosilca.

( $h_1 = 135\text{ cm}$ ,  $h_2 = 208.37\text{ cm}$ )

#### 4.10 Izpis vseh kontrol s pomočjo programa

V zadnjem koraku program ponovi vse kontrole s končnima višinama  $h_1$  in  $h_2$ . Tako omogoča, da se uporabnik sam prepriča o korektnosti delovanja programa.

KONTROLA STRIŽNIH NAPETOSTI ( $x=0$ )

$$\tau_{v,d} = \frac{1.5 V_{d,max}}{k_{cr} b h_1} = 0.132 \quad \frac{kN}{cm^2} \leq f_{v,g,d} = 0.205 \quad \frac{kN}{cm^2}$$

KONTROLA NORMALNIH NAPETOSTI V KRITIČNEM PREREZU ( $x_{crit}$ )

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6 M_{crit}}{b h_{crit}^2} = 0.881 \quad \frac{kN}{cm^2} \leq k_{m,\alpha} k_h k_{crit} f_{m,g,d} = 1.389 \quad \frac{kN}{cm^2}$$

KONTROLA RADIALNIH TLAČNIH NAPETOSTI V KRITIČNEM PREREZU ( $x_{crit}$ )

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{6 M_{crit}}{b h_{crit}^2} \tan^2(\alpha) = 0.002 \quad \frac{kN}{cm^2} \leq f_{c,90,g,d} = 0.192 \quad \frac{kN}{cm^2}$$

KONTROLA STRIŽNIH NAPETOSTI V KRITIČNEM PREREZU ( $x_{crit}$ )

$$\tau_{v,d} = \frac{6 M_{crit}}{b h_{crit}^2} \tan(\alpha) = 0.046 \quad \frac{kN}{cm^2} \leq f_{v,g,d} = 0.205 \quad \frac{kN}{cm^2}$$

KONTROLA NORMALNIH NAPETOSTI V TEMENU ( $x=L/2$ )

$$\sigma_{m,d} = k_l \frac{6 M_{temena}}{b h_2^2} = 0.84 \quad \frac{kN}{cm^2} \leq k_r k_h k_{crit} f_{m,g,d} = 1.624 \quad \frac{kN}{cm^2}$$

KONTROLA RADIALNIH NAPETOSTI V TEMENU ( $x=L/2$ )

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6 M_{temena}}{b h_2^2} - 0.6 \frac{p_d}{b} = 0.005 \quad \frac{kN}{cm^2} \leq k_{dis} k_{vol} f_{t,90,g,d} = 0.017 \quad \frac{kN}{cm^2}$$

KONTAKTNE NAPETOSTI ( $X=0$ )

$$nalezna\ površina \geq \frac{V_{max}}{f_{c,90,g,d}} = 831.25 \quad cm^2, \quad nalezna\ dolžina \geq \frac{V_{max}}{f_{c,90,g,d} b} = 41.562 \quad cm$$

MSU – KONTROLA TRENUTNIH POMIKOV ( $X=L/2$ )

$$w_{inst} = 7.761 \quad cm \leq \frac{L}{L_{inst,omejitev}} = 9.333 \quad cm$$

MSU – KONTROLA KONČNIH POMIKOV ( $X=L/2$ )

$$w_{fin} = 10.865 \quad cm \leq \frac{L}{L_{fin,omejitev}} = 11.2 \quad cm$$

Slika 17: Končne kontrole

Iz samih kontrol lahko tudi vidimo, katera je bila merodajna; tista, ki je relativno najbližje mejni vrednosti, ki jo omejuje kontrola. V zgornjem primeru se jasno vidi, da je bila kritična prav zadnja kontrola, ker dejanski pomik v končnem času znaša 10.9 centimetra, omejitev pomika pa znaša 11.2 centimetra.

## **5 ZAKLJUČEK**

Glavni cilj diplomske naloge je bil izdelati preprost program, ki po nekem algoritmu preverja kontrole v mejnih stanjih nosilnosti in uporabnosti, ter na koncu izračuna najmanjši možni višini prostoležečega nosilca, ki ravno še zadostita vsem kontrolam, ki jih predpisuje Evrokod 5. Na koncu se je izkazalo, da program obsega 3858 vrstic in vsebuje kar 165 052 znakov. Uporabnik, ki bi se prvič srečal s tem programom, bi še vedno potreboval mojo diplomsko nalogo, kot navodilo za pravilno uporabo programa, vendar podobno velja za katerikoli drug program, s katerim se srečamo prvič.

Med izdelovanjem programa so se mi porodile tudi nove ideje o raznih nadgradnjah programa, ki bi ga naredile bolj prijaznega za uporabo ter bolj vsestranskega. Prva ideja, ki bi spremenila celoten koncept izdelave in s tem tudi programsko okolje bi bil nek grafični vmesnik, ki bi programu dodal neko stopnjo profesionalnosti in svobode glede izgleda, vendar bi program še vedno deloval na enaki kodni osnovi. Druga ideja, ki je pogojena s prvo pa je prilagoditev programa za uporabo na pametnih telefonih. Tak projekt bi po mojih ocenah terjal veliko več programerskih ur in se mi je zdel za samostojno diplomsko nalogo preobsežen. Projekt bi bil zanimiv tudi zato, ker trenutno ni takšnega programa, ki bi se ga dalo uporabljati na pametnih telefonih in bi lahko kot zaključek projekta program dejansko spravil v prodajo po neki simbolični ceni v spletni trgovini.



## VIRI

Beg D., Pogačnik A. 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: str. 1-51.

Lopatič J. 2012. Lesene konstrukcije. Študijsko gradivo (B-UNI). Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 41-42, 52-58, 114-123.

Otto Hetzer. 2015.

<http://www.otto-hetzer.ch/> (Pridobljeno 16. 8. 2015.)

Porteous, J., Keramani, A. 1999. Structural Timber Design. Oxford, Blackwell Science: str. 205-226.

Saje D. 2015. 9. Vaja: Lepljeni nosilci (UNI-B-GR). Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 11-23.

[http://www.fgg.uni-lj.si/kmlk/Drago/LK/2014\\_2015/Lesene\\_konstrukcije\\_09\\_vaja\\_2015.pdf](http://www.fgg.uni-lj.si/kmlk/Drago/LK/2014_2015/Lesene_konstrukcije_09_vaja_2015.pdf)

(Pridobljeno 17. 8. 2015.)

SIST EN 1990: 2004. EVROKOD – Osnove projektiranja konstrukcij.

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

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