

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:

Krištof, I. 2012. Zobati spoji lameliranih lepljenih nosilnih elementov lesenih konstrukcij. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Lopatič, J.): 76 str.

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:

Krištof, I. 2012. Zobati spoji lameliranih lepljenih nosilnih elementov lesenih konstrukcij. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Lopatič, J.): 76 pp.

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 ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

IGOR KRIŠTOF

**ZOBATI SPOJI LAMELIRANIH LEPLJENIH NOSILNIH
ELEMENTOV LESENIH KONSTRUKCIJ**

Diplomska naloga št.: 3263/KS

**LARGE FINGER JOINTS OF GLULAM LOAD-
BEARING ELEMENTS IN TIMBER STRUCTURES**

Graduation thesis No.: 3263/KS

Mentor:

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:

prof. dr. Boštjan Brank

Ljubljana, 29. 11. 2012

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Igor Krištof izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Zobati spoji lameliranih lepljenih nosilnih elementov lesenih konstrukcij«.

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

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

Ljubljana, 7. 11. 2012

Igor Krištof

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.011.1:624.04/.07(043.2)
Avtor:	Igor Krištof
Mentor:	izr. prof. dr. Jože Lopatič
Naslov:	Zobati spoji lameliranih lepljenih nosilnih elementov lesenih konstrukcij
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	76 str., 20 pregl., 69 sl., 57 en.
Ključne besede:	lepljeni leseni spoji, polni zobati spoji, zobati spoji velikega formata, zobčasti spoji, lepljeni lamelirani les, vozlišča okvirnih konstrukcij, VBA Excel, računski primer

Izvleček

V diplomski nalogi so predstavljeni polni zobati spoji. To so lepljeni leseni spoji, ki povezujejo lesene elemente, običajno iz lepljenega lameliranega lesa. Pogosto tovrstni spoji spajajo vozlišča tročlenskih okvirnih konstrukcij, ki se uporabljajo pri leseni montažni gradnji in imajo razpone do 40 m. V primerjavi z mehanskimi spoji so lepljeni spoji cenejši, imajo odlično nosilnost, a slabšo duktilnost. Zobate spoje v diplomski nalogi sem obravnaval na okvirni konstrukciji, ki je plod moje domišljije, uporabljala pa naj bi se za športne namene. V diplomski nalogi je predstavljeno tudi dimenzioniranje polnih zobatih spojev po trenutno veljavnih standardih Evrokod in starih DIN standardih, z namenom primerjave postopkov. Za primere enojnega in dvojnega polnega zobatega spoja v vozliščih okvirnih konstrukcij in polnega zobatega spoja na ravnih nosilcih konstantne višine je narejen pripomoček za račun nosilnosti spojev v programu Excel. Za izdelavo pripomočka sem uporabljal program Microsoft Visual Basic for Applications, ki je programski jezik vgrajen v Microsoft Excel. Na koncu diplomske naloge so za vse primere spojev dodani računski primeri in študije vplivov na nosilnost spojev.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	624.011.1:624.04/.07(043.2)
Author:	Igor Krištof
Supervisor:	Assoc. Prof. Jože Lopatič, Ph.D.
Title:	Large finger joints of glulam load – bearing elements in timber structures
Document type:	Graduation Thesis – University studies
Scope and tools:	76 p., 20 tab., 69 fig., 57 eq.
Keywords:	Glued timber joints, large finger joints, finger joints, glued laminated timber, glulam, frame corners, VBA Excel, examples

Abstract

In the graduation thesis are presented large finger joints. Large finger joints are glued timber joints, used for connecting wooden elements, usually glulam beams. Frequently this kind of joints connect corners of three – hinged frames, used for building prefabricated timber structures with spans up to 40 m. In comparison with mechanical joints, glued joints are cheaper and they have excellent load – carrying capacity, but poor ductility. I have installed large finger joints in the glulam frame structure, that is figment of my imagination, used for sports activities. In the graduation thesis is also presented design of large finger joints according to current standards Eurocode and according to old DIN standards, with the purpose of comparing the design procedures. I have made a tool in Microsoft Excel for calculating load – carrying capacity of direct and insert type of large finger joints in frame corners and large finger joints at straight beams of constant height. The tool was made with Microsoft Visual Basic for Applications program, which is a development tool build in Microsoft Excel. At the end of the graduation thesis there are examples and a research about which parameters affect load – carrying capacity of large finger joints.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Jožetu Lopatiču za vso strokovno pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge.

Hvala mami Slavki, očetu Edvardu in sestri Ksenji za podporo, razumevanje in spodbudne besede na moji poti do znanja. Hvala tudi Janezu in Bredi za vso pomoč.

Posebej pa bi se rad zahvalil moji puncu Piki, ki me je tekom študija neutrudno bodrila, vame zaupala in mi vedno stala ob strani.

KAZALO VSEBINE

Izjave	III
Izjave o pregledu naloge	IV
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček	V
Bibliographic – documentalistic information and abstract	VI
Zahvala	VII
1 UVOD	1
2 LEPLJENI LAMELIRANI LES	4
2.1 Proizvodnja in dostava lepjenega lameliranega lesa	4
2.2 Lastnosti lepjenega lameliranega lesa	7
2.2.1 Vlažnost	7
2.2.2 Gostota	8
2.2.3 Trdnost in togost	8
2.3 Konstrukcije iz lepjenega lameliranega lesa	9
3 POLNI ZOBATI SPOJI	11
3.1 Opis in značilnosti	11
3.2 Izdelava	12
3.2.1 Potrebna oprema	12
3.2.2 Postopek izdelave	12
3.2.3 Kontrola kvalitete	13
3.3 Geometrija	14
3.3.1 Zobati klini	14
3.3.2 Polni zobati spoj	15
3.4 Preiskave in eksperimentalno ugotovljeno obnašanje	16
3.4.1 Geometrija zobatih klinov in izdelava preizkušancev	17
3.4.2 Preizkušanci in shema obremenitve	18
3.4.3 Rezultati	19
3.4.4 Učinkovitost ojačitev	21
3.4.5 Tipični načini porušitve	22
3.4.6 Enačbe za določitev nosilnosti	24
3.4.7 Povzetek	25
4 DIMENZIONIRANJE ZOBATIH SPOJEV	26
4.1 Standard Evrokod	26
4.1.1 Enojni ali dvojni polni zobati spoj v vozlišču okvira	26
4.1.2 Zobati spoj pri ravnem nosilcu konstantne višine	30
4.2 Standard DIN 1052	32
4.2.1 Enojni ali dvojni polni zobati spoj v vozlišču okvira	32
4.2.2 Zobati spoj pri ravnem nosilcu konstantne višine	35

5 PRIPOMOČEK ZA DIMENZIONIRANJE VELIKIH ZOBATIH SPOJEV	37
5.1 Enojni ali dvojni polni zobati spoj v vozlišču okvira	37
5.1.1 Material	38
5.1.2 Geometrija zobatih klinov spoja	38
5.1.3 Notranje sile v okviru	38
5.1.4 Geometrija okvira	39
5.1.5 Uklonske količine, geometrijske karakteristike, koti.....	43
5.1.6 Kontrola zobatega spoja	43
5.2 Polni zobati spoj na ravnem nosilcu	44
5.2.1 Material	44
5.2.2 Geometrija zobatih klinov spoja	44
5.2.3 Geometrija in tip nosilca	45
5.2.4 Notranje sile v nosilcu.....	45
5.2.5 Geometrijske karakteristike	45
5.2.6 Kontrola zobatega spoja	46
6 RAČUNSKI PRIMERI	47
6.1 Tročlenski okvir z enojnimi polnimi zobatimi spoji (Evrokod)	47
6.1.1 Zasnova	47
6.1.2 Podatki	48
6.1.3 Obtežba.....	48
6.1.4 Materialne karakteristike.....	48
6.1.5 Kontrola napetosti.....	49
6.2 Tročlenski okvir z dvojnimi polnimi zobatimi spoji (Evrokod)	52
6.2.1 Zasnova	52
6.2.2 Podatki	53
6.2.3 Obtežba.....	53
6.2.4 Materialne karakteristike.....	53
6.2.5 Kontrola napetosti.....	53
6.3 Prostoležeči nosilec spojen s polnim zobatim spojem (Evrokod).....	57
6.3.1 Zasnova	57
6.3.2 Podatki	57
6.3.3 Obtežba.....	57
6.3.4 Materialne karakteristike.....	57
6.3.5 Določitev geometrije nosilca	58
6.3.6 Obremenitev na mestu spoja.....	58
6.3.7 Kontrola napetosti.....	58
6.4 Tročlenski okvir z enojnimi polnimi zobatimi spoji (DIN)	59
6.4.1 Zasnova	59
6.4.2 Podatki	59

6.4.3 Obtežba.....	60
6.4.4 Materialne karakteristike.....	60
6.4.5 Kontrola napetosti.....	60
6.5 Tročlenski okvir z dvojnimi polnimi zobatimi spoji (DIN)	62
6.5.1 Zasnova	62
6.5.2 Podatki	62
6.5.3 Obtežba.....	63
6.5.4 Materialne karakteristike.....	63
6.5.5 Kontrola napetosti.....	63
6.6 Prostoležeči nosilec spojen s polnim zobatim spojem (DIN).....	65
6.6.1 Zasnova	65
6.6.2 Podatki	65
6.6.3 Obtežba.....	65
6.6.4 Materialne karakteristike.....	66
6.6.5 Določitev geometrije nosilca	66
6.6.6 Obremenitev na mestu spoja.....	66
6.6.7 Kontrola napetosti.....	67
7 ŠTUDIJA VPLIVOV RAZLIČNIH PARAMETROV NA NOSILNOST	69
7.1 Zobati spoji v vozliščih okvirnih konstrukcij.....	69
7.1.1 Eojni polni zobati spoji	69
7.1.2 Dvojni polni zobati spoji	70
7.1.3 Primerjava med enojnimi in dvojnimi polnimi zobatimi spoji	71
7.2 Zobati spoji pri ravnih nosilcih konstantne višine	72
8 ZAKLJUČKI	73
VIRI	75

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Vrste konstrukcijskih lepljenih spojev (Thelandersson in Larsen, 2003, str. 335).....	2
Preglednica 2:	Maksimalne debeline lamel t_{max} v odvisnosti od radija ukrivljenosti r	6
Preglednica 3:	Tolerance lepljenega lameliranega lesa v skladu s standardom SIST EN 390 pri vlažnosti 12 %.....	6
Preglednica 4:	Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti lepljenega lameliranega lesa (SIST EN 1194:2000)	8
Preglednica 5:	k_{mod} v odvisnosti od razreda uporabe in trajanja obtežbe (SIST EN 14080)	8
Preglednica 6:	Vrste konstrukcij iz lepljenega lameliranega lesa (Rug in Mönck, 2008, str. 460).....	9
Preglednica 7:	Zahteve za zobate spoje po DIN 68140-1:1998-02	14
Preglednica 8:	Značilni profili zobatih spojev po DIN 68140-1:1998-02.....	15
Preglednica 9:	Lastnosti uporabljenega lepljenega lameliranega lesa	17
Preglednica 10:	Način obremenjevanja in značilnosti preizkušancev.....	18
Preglednica 11:	Učinkovitost ojačevanja z jeklenimi palicami pri maksimalnem odpiralnem upogibnem momentu.....	22
Preglednica 12:	Primerjava med eksperimentalno dobljenimi in izračunanimi momenti .	24
Preglednica 13:	Primerjave trdnosti lepljenega lameliranega lesa po Evrokod standardih z dopustnimi napetostmi lepljenega lameliranega lesa po starih DIN standardih.....	35
Preglednica 14:	Modeli konstrukcij pri računskih primerih.....	47
Preglednica 15:	Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom	51
Preglednica 16:	Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom	56
Preglednica 17:	Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom	59
Preglednica 18:	Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom	62
Preglednica 19:	Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom	65
Preglednica 20:	Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom	67

KAZALO SLIK

Slika 1:	Različne vrste konstrukcijskih lepljenih spojev (Thelandersson in Larsen, 2003; Wiegand, 2003).....	1
Slika 2:	Shematični prikaz proizvodnje lepljenega lameliranega lesa (Larsen in Enjily, 2009, str. 60).....	4
Slika 3:	Obrezovanje lamel nosilca do čiste oblike	5
Slika 4:	Zobčasti spoj; p = razmak zoba, l = dolžina zoba, b_t = širina konice zoba, l_t = konična reža.....	5
Slika 5:	a) Spajanje ravnega nosilca ter b) spajanje vozlišča okvirja z enojnim in c) dvojn timer polnim zobatim spojem (Wiegand, 2003, str. 1).....	11
Slika 6:	a) Enojni in b) dvojni zobati spoj velikega formata (Thelandersson in Larsen, 2003, str 350).....	12
Slika 7:	Dolžina klina l , razmak med klini p , širina konice klina b_t , konična reža l_t in kot nagiba klina α . Prikazana je tudi primerjava med dejansko in poenostavljeno konico zobatega klina.....	14
Slika 8:	Geometrija enojnega velikega zobatega spoja v vozlišču okvirne konstrukcije	15
Slika 9:	Geometrija dvojnega velikega zobatega spoja v vozlišču okvirne konstrukcije	16
Slika 10:	Uporabljeni profil zobatih klinov v skladu s standardom DIN 68140-1:1998-02	17
Slika 11:	Enojni zobati spoj, neojačano	18
Slika 12:	Dvojni zobati spoj, neojačano	18
Slika 13:	Enojni zobati spoj, ojačano	18
Slika 14:	Dvojni zobati spoj, ojačano	18
Slika 15:	Diagrami moment (M) – rotacija (ϕ) pri preizkušancih z enojnim polnim zobatim spojem (Komatsu et al., 2001, str. 524)	19
Slika 16:	Diagrami moment (M) – rotacija (ϕ) pri preizkušancih z enojnim polnim zobatim spojem (Komatsu et al., 2001, str. 524)	20
Slika 17:	Diagrami moment (M) – rotacija (ϕ) pri preizkušancih z dvojn timer polnim zobatim spojem (Komatsu et al., 2001, str. 525)	20
Slika 18:	Diagrami moment (M) – rotacija (ϕ) pri preizkušancih z dvojn timer polnim zobatim spojem (Komatsu et al., 2001, str. 525)	21
Slika 19:	Primerjave med preizkušanci z a) enojnimi in b) dvojn timer zobatimi spoji, podvrženimi pozitivnim momentom do porušitve (Komatsu et al., 2001, str. 526)	21
Slika 20:	Porušitev preizkušanca z a) enojnim in b) dvojn timer zobatim spojem zaradi zapiralnega momenta (Komatsu et al., 2001, str. 527).....	23
Slika 21:	Porušitev preizkušanca z a) enojnim in b) dvojn timer zobatim spojem zaradi odpiralnega momenta (Komatsu et al., 2001, str. 527, 528)	23
Slika 22:	Predpostavljene razporeditve napetosti v a) enojnih in b) dvojn timer polnih zobatih spojih.....	24
Slika 23:	Kot okvirja z a) dvojn timer in b) enojnim univerzalnim polnim zobatim spojem	26

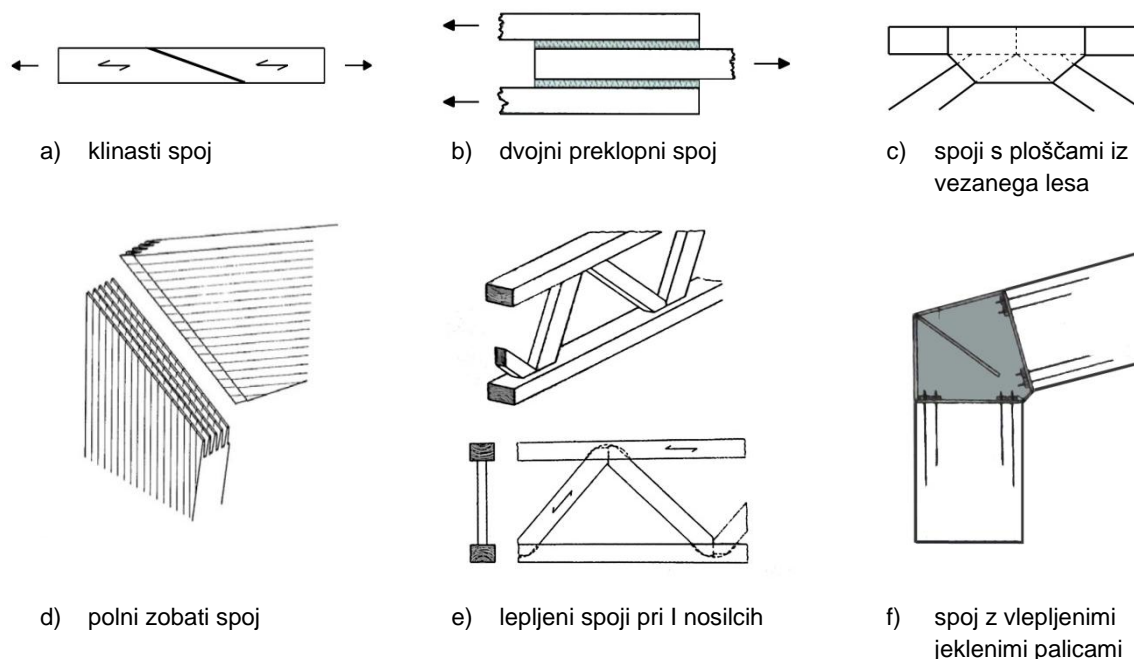
Slika 24:	Potek in predznak a) upogibnega momenta, b) osne sile in c) prečne sile pri okvirjih s polnimi zobatimi spoji.....	27
Slika 25:	Oznake količin pri računu uklonske dolžine (Gojkovič, 1989, str .432).....	29
Slika 26:	Polni zobati spoj pri ravnem nosilcu (Neuhaus, 1994, str. 310).....	30
Slika 27:	Del nosilca s polnim zobatim spojem.....	32
Slika 28:	Vozlišče okvira z a) enojnim in b) dvojn timer univerzalnim polnim zobatim spojem (Neuhaus, 1994, str. 310).....	32
Slika 29:	Graf $\omega = \omega(\lambda)$ pri različnih kvaliteta h lepljenega lameliranega lesa.....	34
Slika 30:	Izbira vrste spoja v programu	37
Slika 31:	Prvi segment, Material.....	37
Slika 32:	Gradnik Combo Box	38
Slika 33:	Segment Geometrija zobatih klinov spoja.....	38
Slika 34:	Segment Notranje sile v okviru	38
Slika 35:	Segment Geometrija okvira	39
Slika 36:	Izbira poteka elementov a) in vnos višine stebra b)	39
Slika 37:	Določanje navpičnosti stebra a) in opozorilo b)	40
Slika 38:	Primer prikaza v zavihku Računski model	40
Slika 39:	Primer prikaza v zavihku Nosilni elementi	41
Slika 40:	Primer prikaza v zavihku Območje spoja pri dvojn timer zobatem spoju.....	41
Slika 41:	Primer prikaza v zavihku Območje spoja pri enojn timer zobatem spoju.....	42
Slika 42:	Primer prikaza skice a) polovice okvira in b) detajla spoja pri dvojn timer poln timer zobatem spoju.....	42
Slika 43:	Primer prikaza skice a) polovice okvira in b) detajla spoja pri enojn timer poln timer zobatem spoju.....	43
Slika 44:	Segment Uklonske količine, geometrijske karakteristike, koti	43
Slika 45:	Segment Kontrola zobatega spoja.....	44
Slika 46:	Segment Material	44
Slika 47:	Segment Geometrija in tip nosilca	44
Slika 48:	Tipični računski modeli konstrukcij	45
Slika 49:	Segment Notranje sile v nosilcu	45
Slika 50:	Segment Geometrijske karakteristike	46
Slika 51:	Segment Kontrola zobatega spoja.....	46
Slika 52:	Polovica okvira z enojn timer poln timer zobatim spojem; enote v cm.....	47
Slika 53:	Detajl enojnega polnega zobatega spoja v vozlišču; enote v cm	48
Slika 54:	Rezultati kontrole nosilnosti enojnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje	52
Slika 55:	Polovica okvira z dvojn timer poln timer zobatim spojem; enote v cm.....	52
Slika 56:	Detajl dvojn timer polnega zobatega spoja v vozlišču; enote v cm.....	52

Slika 57:	Rezultati kontrole nosilnosti dvojnega polnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje	56
Slika 58:	Raven nosilec spojen s polnim zobatim spojem	57
Slika 59:	Rezultati kontrole nosilnosti polnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje	59
Slika 60:	Rezultati kontrole nosilnosti enojnega polnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje	62
Slika 61:	Rezultati kontrole nosilnosti dvojnega polnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje	65
Slika 62:	Rezultati kontrole nosilnosti polnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje	68
Slika 63:	Geometrija uporabljenih elementov	69
Slika 64:	Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od višine pri enojnih polnih zobatih spojih.....	69
Slika 65:	Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od višine nosilca pri dvojnih polnih zobatih spojih	70
Slika 66:	Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od širine vstavka pri dvojnih polnih zobatih spojih	70
Slika 67:	Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od višine nosilca in širine vstavka pri dvojnih polnih zobatih spojih.....	71
Slika 68:	Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od višine pri enojnih in dvojnih polnih zobatih spojih	71
Slika 69:	Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od višine prereza pri polnih zobatih spojih na ravnih nosilcih	72

1 UVOD

Lepljeni leseni spoji so v uporabi že tisočletja. V starem Egiptu so z želatinastim lepilom, ki so ga dobili tako, da so v vodi vreli živalske kosti in kožo, spajali lesene sarkofage, v katerih so ležali faraoni. Dandanes je uporaba lepljenih spojev zelo razširjena. Les se spaja z lepilom na različne načine in za različne namene. Če se osredotočimo na gradbeništvo, izraz konstrukcijski lepljeni spoj predstavlja mesto prenosa obremenitve na zaprti površini med spojenimi elementi. Spajamo lahko od dva do štiri (redkeje več) elemente. Med konstrukcijske lepljene spoje štejemo tudi spoje elementov, ki niso le iz lesa in lepila, ampak imajo z namenom izboljšanja nosilnosti dodane tudi jeklene vstavke, z vlakni ojačano plastiko, itd. Pomembno je, da spoj poteka po celi stikovani površini, saj se tako ustvari monoliten efekt (Thelandersson in Larsen, 2003).

Prednosti lepljenih spojev v primerjavi z mehanskimi spoji (žblji, sponke, vijaki...) so odlična togost – večja nosilnost pri enakih površinah spajanja; možnost avtomatizacije proizvodnje (za več vrst spojev edina ekonomsko sprejemljiva alternativa, npr. zobčasti spoji pri lamelah lepljenega lameliranega lesa). Slabosti pa potreba po natančni izdelavi in izkušenih delavcih; manj očitne stvari, ki jih je potrebno kontrolirati pri proizvodnji; zelo omejena proizvodnja na terenu; kompleksno mehansko in pogosto krhko obnašanje ter slabša duktilnost.



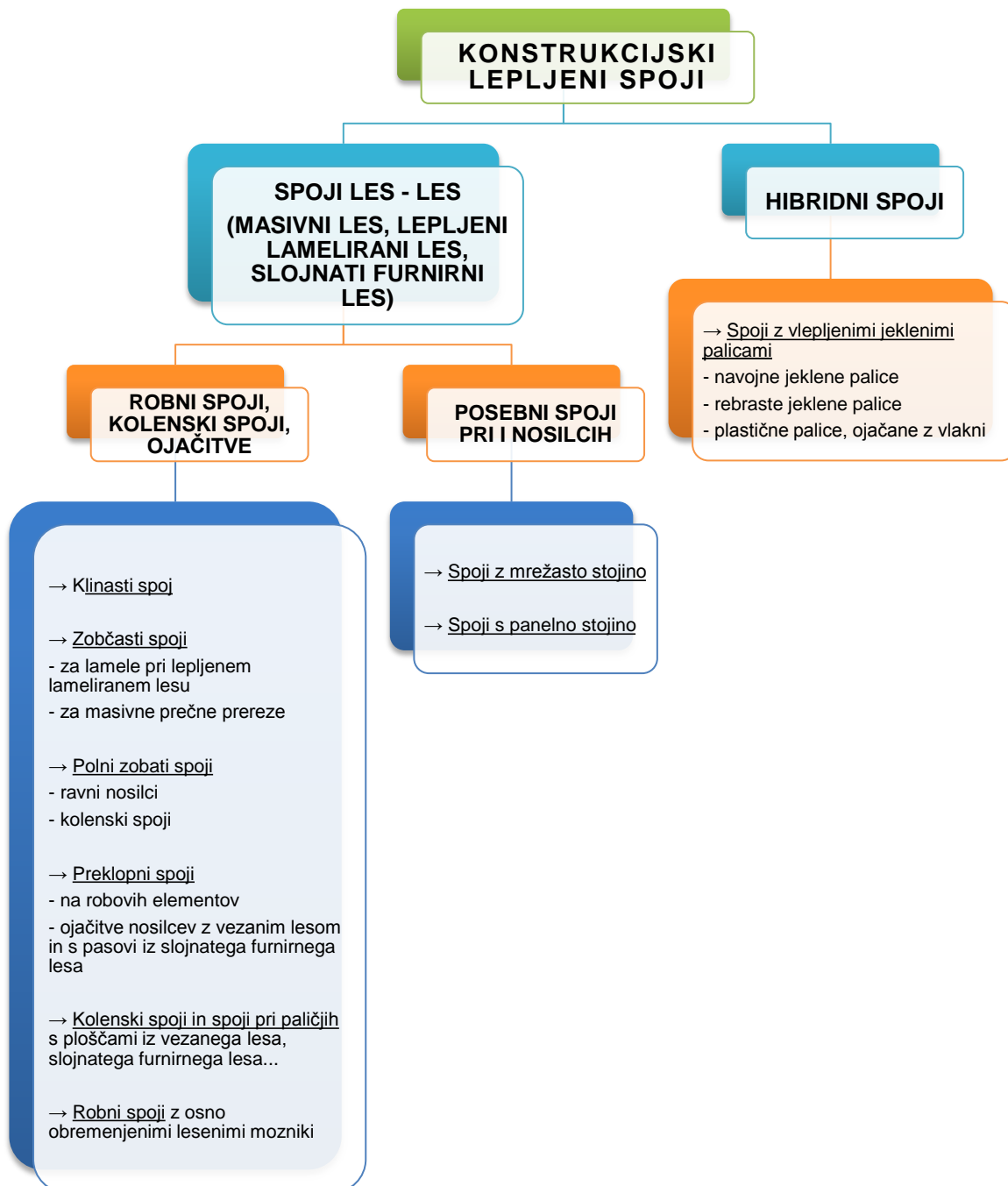
Slika 1: Različne vrste konstrukcijskih lepljenih spojev (Thelandersson in Larsen, 2003; Wiegand, 2003)

Da lahko v celoti uporabimo odlične lastnosti konstrukcijskih lepljenih spojev v lesenih konstrukcijah v povezavi s probabilističnim pristopom projektiranja konstrukcij, moramo znati predvideti nosilnost teh spojev. Nosilnosti se določi s testiranjem preizkušancev ali z analizo, ki upošteva različne materiale, geometrijo in obtežne pogoje. Da predvidimo nosilnost spoja, je potrebno razumeti napetosti, deformacije in predvsem porušne mehanizme, ki nastopijo na mestu stikovanja elementov. Vendar pa raziskovanje teh parametrov otežujejo nekatere lastnosti lepljenih spojev. Kot primer lahko navedemo majhno debelino lepilne ploskve,

običajno v mejah od 0,1 do 0,5 mm, ki še posebej pri spajanju lesenih elementov kaže kompleksno obnašanje pri prehajanju obremenitve prek vmesne ploskve iz lepila na lepljene elemente.

Dandanes je ocena nosilnosti lepljenih spojev največkrat izvedena na osnovi opravljenih eksperimentalnih preiskav. V večini primerov je nosilnost spoja, ki je neločljivo povezana s trdnostjo vmesne plasti lepila, določena s pomočjo izkustvenih enačb, dobljenih iz rezultatov preiskav. Te enačbe so poenostavljene in končno nosilnost ponavadi predstavlja produkt med lepljeno površino in od debeline neodvisno trdnostjo vmesne ploskve iz lepila.

Preglednica 1: Vrste konstrukcijskih lepljenih spojev (Thelandersson in Larsen, 2003, str. 335)



Poznamo več vrst lepljenih spojev v lesenih konstrukcijah, ki se razlikujejo glede izdelave, velikosti, materialov in načina porušitve. Razlikovati moramo predvsem med lesenimi lepljenimi spoji, kjer kot vezno sredstvo nastopa le lepilo (Slika 1a, 1b, 1d, 1e) in lesenimi lepljenimi spoji, kjer vezno sredstvo predstavljata lepilo in jeklo (Slika 1f). Tu jeklo nastopa v obliki kotnih vstavkov ter vlepljenih jeklenih plošč in palic. Leseni lepljeni spoji, kjer kot vezno sredstvo nastopa le lepilo, imajo to prednost, da lahko elemente med seboj spojimo brez kakršnekoli dodatne povezave. Obdelamo le konca elementov in ju z lepilom spojimo.

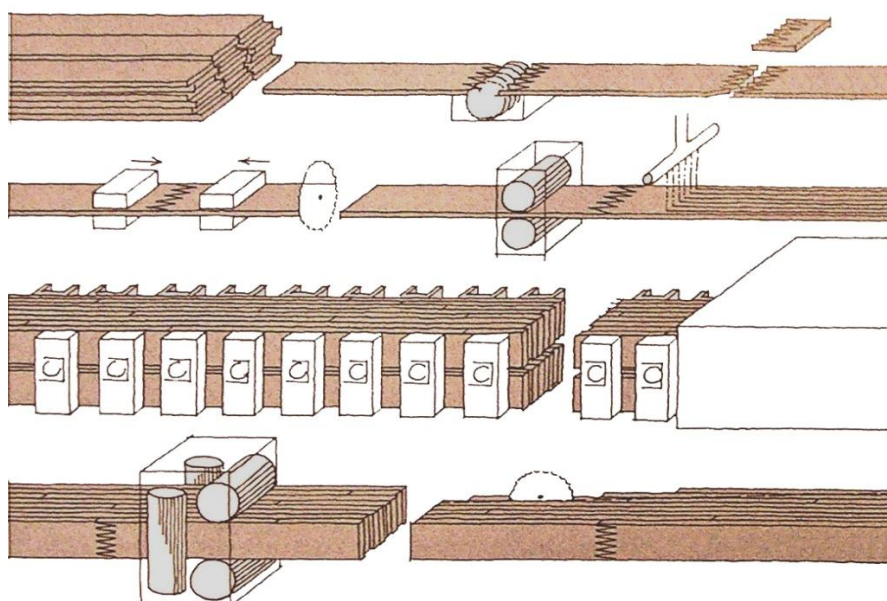
Velikosti površin konstrukcijskih lepljenih spojev segajo od približno 20 cm² (prečni prerezi z malimi zobčastimi spoji) do 3000 cm² (prečni prerezi s polnimi zobatimi spoji v vozliščih okvirnih konstrukcij iz lepljenega lameliranega lesa). Poglavje zase so preklopne lesene plošče iz vezanega lesa (Slika 1c), ki v vozliščih spajajo lesena paličja, saj dosegajo površine od 10 cm² do 10000 cm².

Proizvodnja lepljenih spojev se razteza od popolnoma industrijske pri zobčastih spojih do celovitega dela več različnih strokovnjakov in mojstrov pri polnih zobatih spojih. Kontrola kvalitete obsega od preizkusov kontinuiranega obremenjevanja (Eby, 1981) do vizualne inšpekcije (Thelandersson in Larsen, 2003).

2 LEPLJENI LAMELIRANI LES

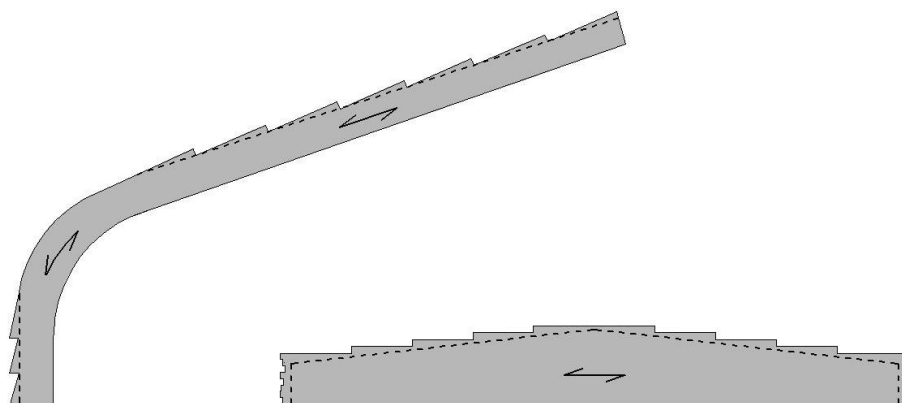
2.1 Proizvodnja in dostava lepljenega lameliranega lesa

Lepljeni lamelirani les je sodobno kompozitno gradivo z boljšimi in bolj enakomernimi mehanskimi lastnostmi kot masiven les. Sestavljajo ga tanke lamele, pri katerih je potek vlaken večinoma vzporeden. Lamele so ploskovno zlepljene z lepili za konstrukcijsko uporabo. Lepila imajo visoko trdnost in trajnost, odporna so proti vodi, povišani vlažnosti in temperaturi ter biološkim dejavnikom. Ker je osnovni gradnik tanka lamela, je v primerjavi z drugimi gradivi mogoče enostavno in poceni izdelovati ukrivljene elemente (Larsen in Enjily, 2009).



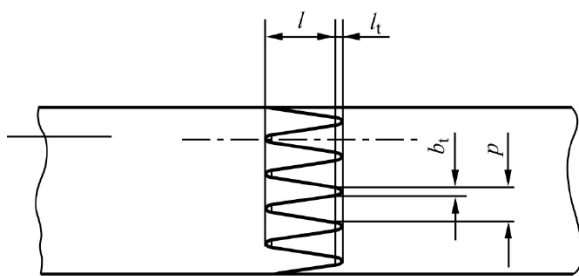
Slika 2: Shematični prikaz proizvodnje lepljenega lameliranega lesa (Larsen in Enjily, 2009, str. 60)

Proizvodnja lepljenega lameliranega lesa je shematično prikazana na sliki 2. Osnovni material je deska določene trdnosti, posušena na enakomerno vsebnost vlage 12 %. Deske so ravne in na obeh koncih z zobčastimi spoji zlepljene na sosednje deske. Na ta način se iz večih desk naredi eno dolgo, ki jo imenujemo lamela. Lamele se režejo na dolžine, ki so daljše od dolžine končnega lepljenega elementa, zaradi kasnejšega »krojenja«. Na ploskve lamel se nanese lepilo, lamele se za tem vstavijo v kalup, kjer se zaradi nanešenega pritiska sprimejo med seboj. Pri proizvodnji ukrivljenih elementov je kalup sestavljen iz vertikalnih oblikovnikov, ki sovpadajo s končno obliko lepljenega elementa in je preko njih tudi nanešen vpenjalni pritisk. Ravni nosilci so običajno pritisnjeni s hidravlično opremo v statičnih kalupih. Lepljeni lamelirani les se mora stiskati, dokler lepilo ni posušeno. Sušenje lepila je krajše in bolj zanesljivo, če se temperatura v prostoru sušenja zviša na približno 40 °C. Po sušenju sledi nadaljna obdelava komponent: rezanje po dolžini, čisto obrezovanje glede na obliko, obdelava površin... Za lamelirane lepljene lesene konstrukcije lahko uporabljamo vse vrste lesa, najpogosteje pa so v uporabi smreka, jelka, macesen in topol.

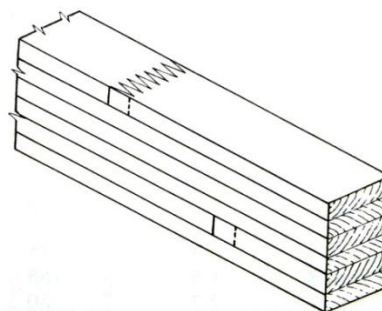


Slika 3: Obrezovanje lamel nosilca do čiste oblike

Horizontalno spajanje desk pri lepjenem lameliranem lesu omogočajo zobčasti spoji. To so samonastavljivi spoji, sestavljeni iz več enakih simetričnih zob, s katerimi zlepimo skupaj dva elementa. Geometrija zobčastega spoja je definirana s tremi nominalno neodvisnimi parametri: dolžino zoba l , razmakom zoba p in širino konice zoba b_t . Dolžina zoba poteka od začetnega, najširšega dela do konice. Meri se vzdolž srednjice zoba. Razmak zoba je pravokotna razdalja med srednjicama sosednjih zob. Širina konice predstavlja širino porezane konice zoba. Zobčast spoj vsebuje še en parameter, konično režo l_t , ki pa je odvisen od proizvodnih pogojev. Grobo pravilo je, da je razmerje $l_t/l \approx 0,03$, kar se izkaže za primerno vrednost. Strogo vzeto sta le razmak p in nagib zoba α dovolj za določitev rezalnika zobčastega spoja, dolžina l in potemtakem tudi b_t in l_t so določeni tekom proizvodnega procesa, z natančnostjo rezanja in končno obdelavo.



(Vir: BS EN 385:2001, str. 5)



(Vir: Ozelton in Baird, 1976, str. 147)

Slika 4: Zobčasti spoj; p = razmak zoba, l = dolžina zoba, b_t = širina konice zoba, l_t = konična reža

Lepilo, ki se uporablja pri lepjenem lameliranem lesu, mora biti vsaj tako odporno proti vetru, vlagi in ognju kot uporabljen les. Poleg tega naj ne bi v zrak sproščal nevarnih plinov, tudi pri gorenju. Resorcinol lepila, ki so prepoznavna po temni lepilni ploskvi, se ocenjujejo za najboljše in najbolj vzdržljiva. Zaradi estetskih zahtev arhitektov se povečuje uporaba brezbarvnih poliuretanskih lepil. V razredih uporabe 1 in 2 je dovoljena tudi uporaba poceni melaminskih – urea lepil, če je zagotovljeno, da temperatura v konstrukciji ne bo presegla 50 °C. Tudi ta lepila puščajo skoraj brezbarvne lepilne ploskve.

V splošnem imajo lahko nosilci iz lepljenega lameliranega lesa prečne prereze poljubnih pravokotnih oblik ter celo »I« oblik. V največ primerih je najbolj ekonomična rešitev pravokoten prečni prerez s širino 65, 90, 115, 140, 160 ali 185 mm (skandinavske standardne mere) ali 60, 80, ... 200 mm (celinske evropske standardne mere). Nosilci širši kot 185 mm oz. 200 mm se izdelajo z lepljenjem dveh ali več desk eno zraven druge. Širše nosilce je težje izdelati, zato so tudi dražji.

Pri nosilcih je ekonomično izbrati veliko razmerje med višino h in širino b prečnega prereza. Vendar pa se z večanjem razmerja povečuje tudi nevarnost bočne zvrnitve, zato moramo zagotoviti ustrezno bočno podpiranje. Pri normalnem bočnem podpiranju se uporablja razmerje $h/b = 6-7$.

Z namenom zmanjšanja predhodnih napetosti v ukrivljenih nosilcih, ko so lamele že vpete na mesta, naj debelina lamele t ne bi presegla t_{max} :

$$t_{max} = \frac{r}{250} \left(1 + \frac{f_{m,k}}{80} \right), \quad (2.1)$$

kjer je r radij ukrivljenosti in $f_{m,k}$ karakteristična upogibna trdnost lesa lamele. Maksimalne debeline lamel v odvisnosti od radija ukrivljenosti so podane v preglednici 2.

Preglednica 2: Maksimalne debeline lamel t_{max} v odvisnosti od radija ukrivljenosti r

Lepljeni lamelirani les	t_{max}
GL36	0,006 r
GL28	0,0055 r
GL24	0,0052 r

Preglednica 3: Tolerance lepljenega lameliranega lesa v skladu s standardom SIST EN 390 pri vlažnosti 12 %

Širina	+ 2 mm	Vse širine
	- 2 mm	
Višina	+ 4 mm	$h \leq 400$ mm
	- 2 mm	
	+ 1 %	$h > 400$ mm
	- 0,5 %	
Dolžina	+ 2 mm	$l \leq 2$ m
	- 2 mm	
	+ 0,1 %	$2 \text{ m} < l \leq 20$ m
	- 0,1 %	
	+ 20 mm	$l > 20$ m
	- 20 mm	
Kot prečnega prereza	Odklon od pravega kota	$\leq 1 : 50$

Če ni drugače dogovorjeno, se nosilce iz lepljenega lameliranega lesa izdelava z upoštevanjem toleranc iz preglednice 3.

Velikosti tovrstnih nosilcev so omejene s proizvodno opremo in z dovoljenim časom od nanosa lepila na prvo lamelo do zaključka stiskanja. Običajno so za elemente z volumnom večjim od 10 m³ in dolžino večjo od 25 m potrebni dodatni ukrepi. Dodatna omejitev za velikost so tudi prometni predpisi pri transportu.

Podjetja, ki proizvajajo lepjeni lamelirani les, so podvržena kontroli zunanjih organov, ki zajema:

- kontrolo razvrstitve in vsebnosti vlage lamel,
- kontrolo trdnosti zobčastih spojev,
- kontrolo kvalitete ravnanja lamel,
- kontrolo mešanja in nanosa lepila,
- kontrolo časa sušenja lepila in stiskanja,
- kontrolo pogojev sušenja, temperature in vsebnosti vlage v zraku ter
- kontrolo kvalitete lepilne ploskve.

Kvaliteta zobčastih spojev, s pomočjo katerih so narejene posamezne lamele, mora biti nadzorovana redno z upogibnimi preizkusi do porušitve. Kvaliteta lepilne ploskve se preizkuša s t.i. delaminacijskim testom, kjer 100 mm dolge odrezke lamel impregnirajo z vodo pod visokim pritiskom in jih potem hitro posušijo. Dolžina delaminiranih lepilnih ploskev služi kot indikacija kvalitete lepljenega lameliranega lesa.

Nosilce iz lepljenega lameliranega lesa se na teren dostavlja s kamioni s hidravličnimi dvigali, ki tovor ne le odložijo, ampak ga lahko tudi vertikalno dvignejo. Z lepljenim lameliranim lesom je na terenu treba ravnati previdno in tudi preveriti, da med transportom ni prišlo do kakšnih poškodb. Pogosto elemente pripeljejo zavite v plastično folijo, ki jih ščiti pred vodo in prstjo. Če pride do kondenzacije pod folijo, lahko na tistem mestu zaradi vlage pride do razbarvanja. V takih primerih moramo folijo hitro odstraniti, da se les lahko posuši. Pri zunanjem skladiščenju morajo elementi stati na suhi ravni podlagi in biti zaščiteni pred dežjem. Da zagotovimo ustrezno ventilacijo, med elemente in pod pregrinjalo položimo letve. Letve morajo biti postavljene v vertikalni smeri druga nad drugo, da preprečimo deformacije elementov zaradi daljšega skladiščenja.

2.2 Lastnosti lepljenega lameliranega lesa

2.2.1 Vlažnost

Lepljeni lamelirani les je bolj odporen na vplive vlage kot masiven les, ker je dostavljen posušen. Vlažnostne spremembe so počasnejše zaradi večjih dimenzij elementov, vendar zaradi večjih dimenzij pride tudi do večjih gradientov vlažnosti.

Izpostavljenost soncu lahko povzroči pospešeno izsuševanje površine, kar lahko vodi do razpok na površini ali celo do uničenja površine. Posebno je potrebno paziti na konce poševnih nosilcev usmerjene proti jugu in jih ustrezno zaščititi.

Vsebnost vlage ob dostavi je približno 12 %. Pri izpostavljanju vlagi (npr. zunanje skladiščenje pozimi) se vlažnost lahko poveča na 18 – 20 %. Če take elemente potem vgradimo, je pomembno, da take konstrukcije ne segrejemo nenadoma na visoko temperaturo. To lahko namreč povzroči velike razpoke, ker bolj vlažna sredica preprečuje krčenje zunanjih delov elementa.

2.2.2 Gostota

Ko računamo lastno težo konstrukcij iz lepljenega lameliranega lesa, moramo upoštevati gostoto 500 kg/m^3 ali več.

2.2.3 Trdnost in togost

Lepljeni lamelirani les ima večjo povprečno trdnost in manjša odstopanja le – te kot običajen gradbeni les. Standard SIST EN 1194, lesene konstrukcije – lepljeni lamelirani les – trdnostni razredi in določitev karakterističnih vrednosti podaja trdnostne razrede za lepljeni lamelirani les. Obstajajo štiri razredi za t.i. homogeni lepljeni lamelirani les in štiri razredi za sestavljeni lepljeni lamelirani les. Pri homogenem so vse lamele v prečnem prerezu iz lesa istega trdnostnega razreda, pri kompozitnem pa je 2/3 lamel v sredini iz lesa slabše kakovosti od lesa lamel na zunanjih straneh. Razredi so označeni s črkama GL (glulam), ki jima sledi karakteristična trdnost v N/mm^2 , na zadnjem mestu pa je črka h (homogen) ali c (sestavljen). Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti so podane v preglednici 4.

Preglednica 4: Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti lepljenega lameliranega lesa (SIST EN 1194:2000)

Trdnostni razredi		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c	Enote
Upogib	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36	24	28	32	36	MPa = N/mm ²
Nateg	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5	
	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6	0,35	0,4	0,45	0,5	
Tlak	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29	
	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3	3,3	3,6	2,4	2,7	3	3,3	
Strig	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8	
Modul elastičnosti	$E_{0,g,mean}$	11600	12600	13700	14700	11600	12600	13700	14700	
	$E_{0,g,0.05}$	9400	10200	11100	11900	9400	10200	11100	11900	
	$E_{90,g,mean}$	390	420	460	490	320	390	420	460	
Strižni modul	$G_{g,mean}$	720	780	850	910	590	720	780	850	
	$G_{g,0.05}$	582	632	687	737	582	632	687	737	

Preglednica 5: k_{mod} v odvisnosti od razreda uporabe in trajanja obtežbe (SIST EN 14080)

Razred uporabe	Razred trajanja obtežbe				
	P (stalna)	L (dolgotrajna)	M (srednje dolga)	S (kratkotrajna)	I (trenutna)
1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9

Projektne trdnosti f_d se izračuna z izrazom:

$$f_d = \frac{k_{mod} f_k}{\gamma_M} \quad (2.2)$$

Pri tem so k_{mod} modifikacijski faktor v odvisnosti od trajanja obtežbe in vlažnosti (Preglednica 5), γ_M delni varnostni faktor za lastnosti materiala; pri lepjenem lameliranem lesu velja $\gamma_M = 1,25$ (SIST EN 1995-1-1:2005) in f_k karakteristična trdnost lepjenega lameliranega lesa.

Za pravokotne prečne prereze je referenčna višina pri upogibu in širina v nategu 600 mm. Za prečne prereze manjših dimenzij se upogibna in natezna trdnost lahko pomnoži s faktorjem k_h :


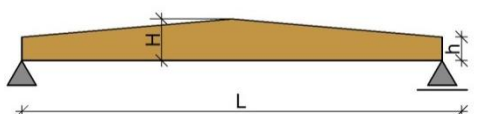
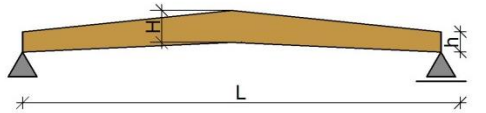
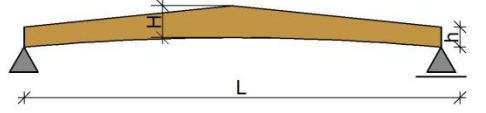
$$k_h = \min \left\{ 1,1, \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \right\}. \quad (2.3)$$

Poleg tega, da je lepjeni lamelirani les izdelan po navodilih standarda SIST EN 14080, je potrebno upoštevati še:

- posebne zahteve glede botaničnih vrst lesa,
- posebne zahteve glede lepil (npr. brezbarvna lepila pri zobčastih spojih),
- posebne zahteve glede vsebnosti vlage,
- posebne zahteve glede debelin lamel in
- posebne zahteve glede zaščite pred biološkimi nevarnostmi.

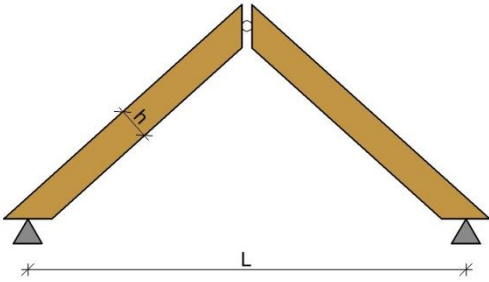
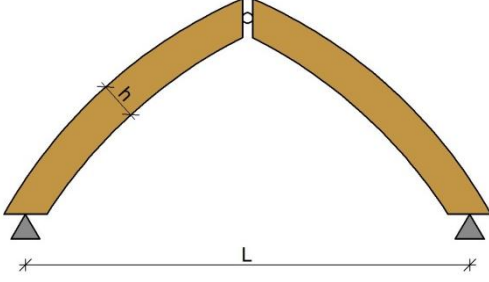
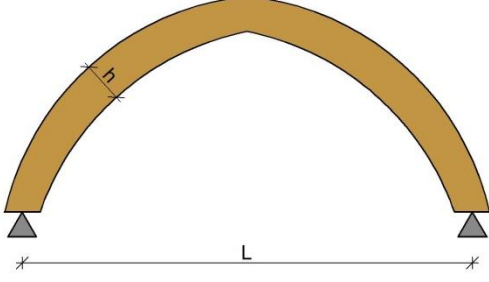
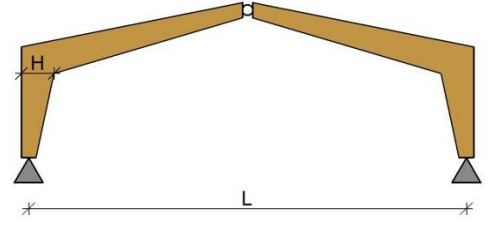
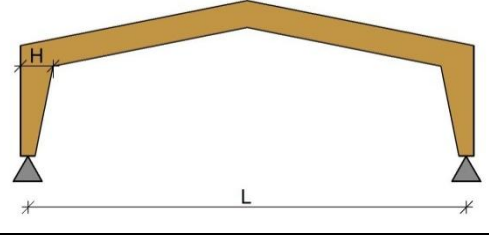
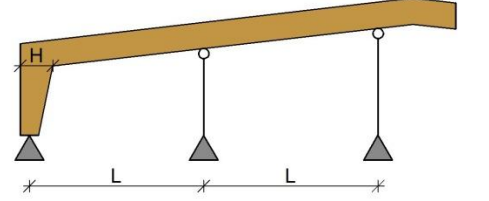
2.3 Konstrukcije iz lepjenega lameliranega lesa

Preglednica 6: Vrste konstrukcij iz lepjenega lameliranega lesa (Rug in Mönck, 2008, str. 460)

Skica	Ime/opis	Razpon L	Višina H oz h
	Ravni nosilec konstantne višine	12 do 25 m	$H \approx \frac{L}{17}$
	Ravni dvokapni nosilec spremenljive višine	12 do 35 m	$H \approx \frac{L}{16}$ $h \approx \frac{L}{30}$
	Nagnjeni dvokapni nosilec spremenljive višine	12 do 35 m	$H \approx \frac{L}{16}$ $h \approx \frac{L}{30}$
	Dvokapni nosilec z ukrivljenim spodnjim robom	12 do 30 m	$H \approx \frac{L}{16}$ $h \approx \frac{L}{30}$

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 6

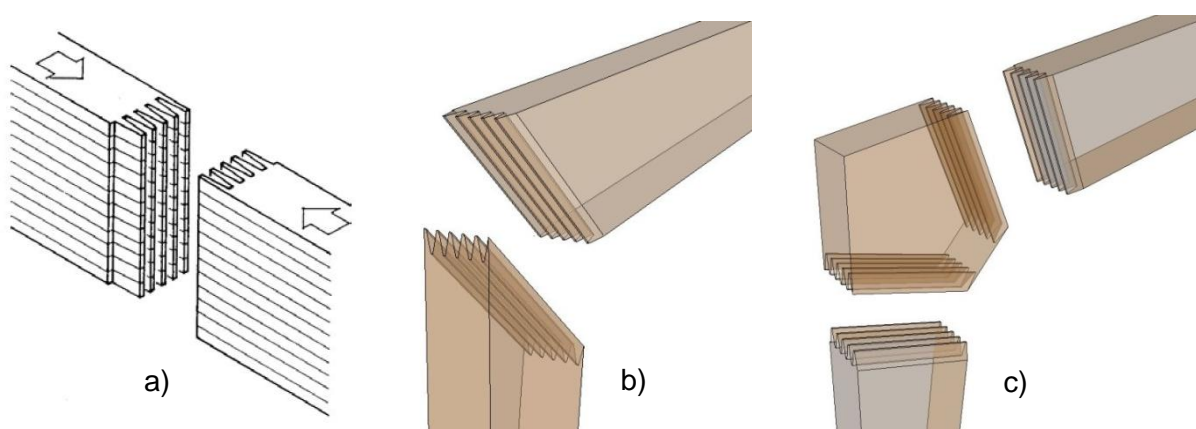
	Tročlensko povezje poljubnega naklona	15 do 35 m	$h \approx \frac{L}{18}$
	Tročlenski lok z nosilcema konstantne višine	20 do 60 m	$h \approx \frac{L}{25}$
	Dvočlenski lok z nosilcem konstantne višine	20 do 100 m	$h \approx \frac{L}{25}$
	Tročlenski okvir ¹ z nosilci spremenljive višine	15 do 40 m	$H \approx \frac{L}{20}$
	Dvočlenski okvir s prečkami konstantne višine	15 do 30 m	$H \approx \frac{L}{23}$
	Večpoljni okvir s prečkami konstantne višine	10 do 25 m (na polje)	$H \approx \frac{L}{20}$

¹ Tročlenski okvir je konstrukcija na kateri smo konstruirali polne zobate spoje.

3 POLNI ZOBATI SPOJI

3.1 Opis in značilnosti

Zobati spoji velikega formata ali polni zobati spoji so lepljeni spoji, ki potekajo skozi celotno področje prečnega prereza. Izvedemo jih na koncih nosilcev narejenih iz lepljenega lameliranega lesa. Za horizontalno lameliran lepljen les se uporabljajo pretežno v vozliščih tročlenskih okvirnih konstrukcij. Poznamo tudi primere uporabe, kjer se stikujejo ravni ali rahlo ukrivljeni elementi, ki so obremenjeni pretežno z upogibom ali čistim nategom. Elementa, spojena na ta način, se lahko stikata pod poljubnim kotom ter z enojnim ali dvojnimi spojem (Slika 5). Pri dvojnem spoju med stikovana elementa položimo vstavek, ki je narejen iz lepljenega lameliranega lesa ali slojnatega furnirnega lesa.



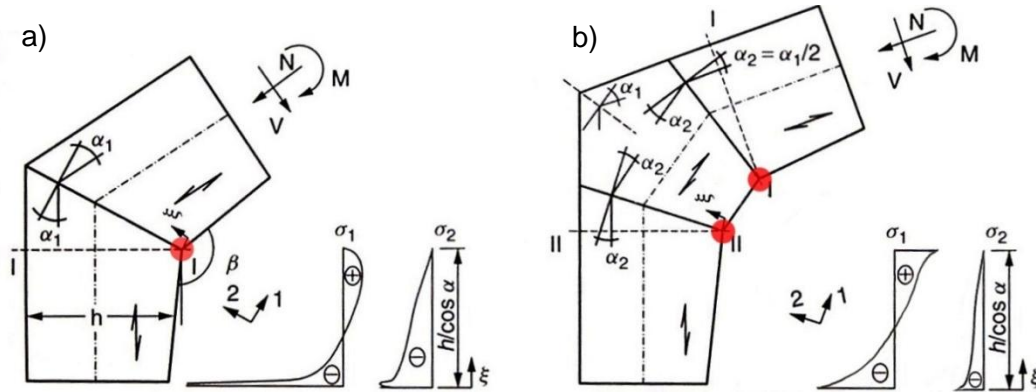
Slika 5: a) Spajanje ravnega nosilca ter b) spajanje vozlišča okvirja z enojnim in c) dvojnimi polnimi zobatimi spojem (Wiegand, 2003, str. 1)

Za podajanje geometrije zobatih spojev velikega formata na lokalni ravni se uporabljajo iste oznake kot za zobčaste spoje za izdelavo lamel pri lepljenem lameliranem lesu: dolžina zoba l , razmak zoba p , širina konice zoba b_t in konična reža l_t . Simetrijska smer zob mora biti vzporedna smeri vlaken, dolžina posameznega zoba v spoju mora biti vsaj 45 mm. Konične reže služijo temu, da se površine zob ob priključitvi med seboj zagotovo zlepijo. Velike naj bi bile od 1 mm do 6 mm po celotni globini spoja. Najpogosteje je uporabljan profil z dimenzijami $l = 50$ mm, $p = 12$ mm in $b_t = 2$ mm. Celotna površina poškodovanih zob mora biti manj kot 5 % prečnega prereza.

Nosilnost zobatih spojev velikega formata se preverja po poenostavljenem pristopu, ki velja, če v vozliščih nastopajo negativni (zapiralni) upogibni momenti. Taka obremenitev povzroči velike tlačne napetosti pravokotno na linijo spoja ob notranjem robu² in tlačne napetosti paralelno na linijo spoja, ki se povečujejo proti notranjemu robu. Vse to je razvidno iz grafov na sliki 6. Razporeditve napetosti σ_1 in σ_2 iz slike 6 pripadajo vozlišču pri okviru z enojnim oziroma dvojnimi polnimi zobatimi spojem pri približno 50 % končne nosilnosti, kjer σ_1 predstavlja napetosti pravokotno na linijo spoja, σ_2 pa napetosti paralelno na linijo spoja. Nosilnost vozlišč z enojnim polnimi zobatimi spojem pri okvirih se občutno poveča, če med elementa, ki ju stikujemo, zlepimo kotni vstavek iz lepljenega lameliranega lesa ali slojnatega furnirnega lesa. Da dosežemo čim večje povečanje nosilnosti, moramo vstavek oblikovati

² Notranji robovi so na sliki 6 označeni z rdečo piko.

tako, da je kot med lamelami spojenih elementov in pravokotnico na linijo spoja (α_2 na sliki 6) enak na obeh straneh in čim manjši. Veljati mora izraz $\alpha_2 = \alpha_1/2$ (Slika 6). S tem zmanjšamo visoke normalne tlačne napetosti ob notranjem robu, ki so glavni razlog za porušitev spoja.



Slika 6: a) Enojni in b) dvojni zobati spoj velikega formata (Thelandersson in Larsen, 2003, str 350)

Lepila, ki spajajo elemente pri tovrstnih spojih, morajo omogočati izdelavo stikov s takšno trdnostjo in trajnostjo, da bo učinkovitost povezave zagotovljena v izbranem razredu uporabnosti ves čas pričakovane življenjske dobe konstrukcije. Vrsto lepila izberemo glede na klimatske pogoje, vrsto uporabljenega lesa in glede na uporabo zaščitnih sredstev skozi proizvodni proces. Napotke za izbiro vrste lepila nam podaja standard SIST EN 301. Priporočena je uporaba polikondenzacijskih lepil, fenolnega ali aminoplastičnega tipa oziroma fenolnih smol.

3.2 Izdelava

3.2.1 Potrebna oprema

Oprema, potrebna za izdelavo zobatega spoja velikega formata (SIST EN 387:2002):

- rezalna naprava za izrez zobatih klinov po celotni višini elementov,
- termohigrograf za spremljanje temperature in relativne vlažnosti zraka v prostorih za skladiščenje, izdelavo in sušenje,
- merilci vlažnosti lesa in oprema za kalibriranje merilcev vlažnosti,
- oprema za tehtanje in mešanje smole in utrjevalcev,
- oprema za enakomerno nanašanje potrebne količine lepila in potrebnega pritiska na lepilne ploskve,
- ventilacijske in klimatske naprave za doseganje prave temperature in relativne vlažnosti zraka med sušenjem lepila in
- vrtalnik za izrez cilindričnega preizkušanca.

3.2.2 Postopek izdelave

a) Rezanje zobatih klinov

Najprej se na obeh stikovanih elementih z rezalnikom po celotni višini prereza izreže zobate kline. Simetrijska linija klinov mora biti vzporedna s smerjo vlaken elementa. Izrezani zobati klini morajo biti dovolj robustni, da se ne poškodujejo pri premikanju elementov med

produkcijo. Širina prečnega prereza mora biti vsaj petkrat večja od razmaka zoba (p). Oba stikovana elementa morata biti obdelana z istim rezalnikom, da se zagotovi največje možno ujemanje. Rezanje zobatih klinov se naj ne bi izvajalo prej kot 24 ur pred vezanjem. Pri vrstah lesa, ki se težje vežejo, t.j. imajo večjo vsebnost smole ali če imamo lamele, na katere so bila nanešena zaščitna sredstva, se rezanje naj ne bi izvajalo prej kot 8 ur pred vezanjem.

b) Spajanje elementov

Lepilo se na površine zobatih klinov nanaša v skladu z navodili proizvajalca lepila in vedno na očiščene površine. Spojeni elementi morajo imeti temperaturo višjo od najnižje predpisane s strani proizvajalca lepila, ki ne sme biti manjša od 15 °C. Vsebnost vlage spojenih elementov ne sme presegati 15 % (1., 2. razred uporabe) oz. 18 % (3. razred uporabe). Smolo in utrjevalec je potrebno zmešati vedno pred nanosom, ločeni nanos je prepovedan. Lepilo nanesemo po celotni dolžini zobatih klinov na vseh elementih, ki jih bomo spojili. Količina nanešenega lepila mora biti tolikšna, da pri stiskanju iz vseh lepilnih ploskev pride do kontinuiranega iztiskanja lepila.

c) Stiskanje

Pri stiskanju s sponami vpneemo skupaj lesene elemente, ki so zlepljeni. Oprema za stiskanje mora zagotoviti enakomeren pritisk vzdolž vseh lepilnih ploskev in fiksno stabilnost vpetih elementov, da ne pride do zdrsa med elementoma. Vpenjalni pritisk predpišejo proizvajalci lepila, vendar v vsakem primeru ta ne sme biti manjši od 0,3 MPa za prečni prerez površine večje od 0,35 m² in 0,5 MPa za prečni prerez površine manjše od 0,0125 m². Med stiskanjem moramo vpenjalni pritisk prilagajati, da ne pride do razcepitve vlaken. Razcepitev lahko preprečimo tudi z vnosom pritiska pravokotno na ravnino zobatih klinov.

d) Sušenje in klimatizacija

Minimalna temperatura med sušenjem je 18 °C ali priporočena temperatura s strani proizvajalca (vzamemo večjo vrednost). Temperatura med sušenjem se lahko dvigne za največ 10 °C nad minimalno temperaturo. Zagotoviti moramo, da se vsebnost vlage pri spojenih elementih bistveno ne spremeni. Polni zobati spoj v prvih 72 urah ne sme biti podvržen obremenitvam. Elementov, ki vsebujejo polni zobati spoj, ne smemo uporabiti, dokler lepilo ni posušeno v skladu z navodili proizvajalca.

3.2.3 Kontrola kvalitete

Proizvajalci polnih zobatih spojev morajo z namenom izpolnitve zahtev standarda ustanoviti notranjo kontrolo proizvodnje in jo ustrezno dokumentirati. Izbrana mora biti oseba, ki ima avtoriteto, znanje in izkušnje s proizvodnjo polnih zobatih spojev in nosi odgovornost za nadzor ter vodenje proizvodnje. Pri proizvodnji tovrstnih spojev je potrebno kontrolirati več stvari, in sicer geometrijo zobatih klinov (ob vsaki spremembi v proizvodnji), debelino lepilne ploskve in velikost konične reže na površini vsakega spoja. Notranjost izdelanega spoja preverimo s cilindričnim vzorcem premera 25 mm, ki ga izvrtamo z vrtalnikom. Vzorec mora biti izvrtan vzdolž zobatih klinov in mora vsebovati konice klinov. Pri proizvodnji enakih spojev moramo vzeti vzorec vsaj na vsak deseti spoj. Pri vsaki novi proizvodnji polnih zobatih spojev ali pri večjih spremembah v obstoječi proizvodnji je potrebno določiti začetno trdnost

spoja. To se izvede z upogibnim preizkusom, ki mora biti izveden v skladu s standardom SIST EN 408. Upogibno trdnost spoja se v splošnem izračuna po spodnji enačbi:

$$f_m = \frac{6M}{bh^2} \quad (3.1)$$

Dokumentacija preverjanja kvalitete proizvajalca in postopki ter navodila morajo ustrezati dejanski proizvodnji polnih zobatih spojev in morajo biti opisani v priložniku kvalitete dela, ki zajema:

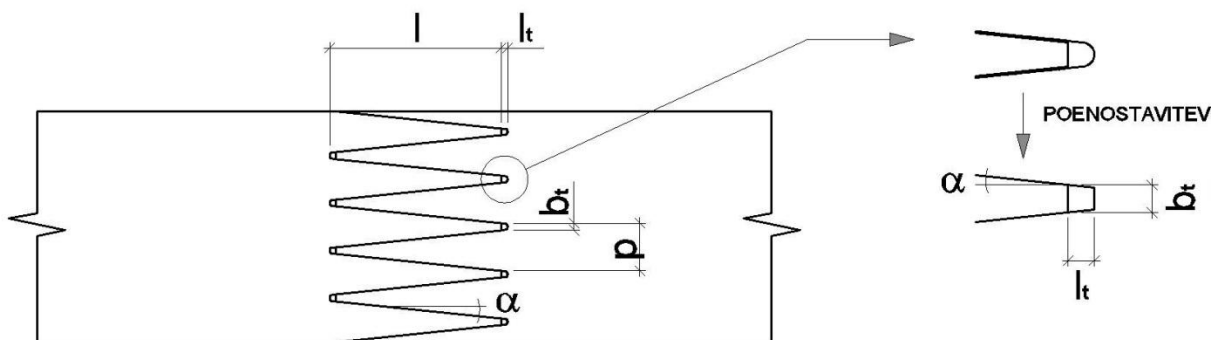
- cilje glede kvalitete in organizacijsko strukturo, odgovornosti in pooblastila za tiste, ki so odgovorni za ustreznost polnih zobatih spojev,
- postopke za preverjanje ustrezne kvalitete lepljenega lameliranega lesa in lepil,
- kontrolo proizvodnje in ostale uporabljene tehnike, procese in sistematične ukrepe ter
- preverjanja in preizkuse, ki so izvedeni pred, med in po proizvodnji in njihovo pogostost.

3.3 Geometrija

Geometrijo polnih zobatih spojev, ki se nahajajo v vozliščih stikovanih elementov, podajamo na dveh nivojih: na nivoju zobatih klinov in na globalnem nivoju spoja.

3.3.1 Zobati klini

Opis geometrije zobatih klinov za nosilne gradbene elemente, ki predstavlja osnovo še danes, je bil podan v standardu DIN 68140-1:1998-02. Spodnje zahteve veljajo, če je gradbeni material masiven les iglavcev ali lepljeni lamelirani les.



Slika 7: Dolžina klina l , razmak med klini p , širina konice klina b_t , konična reža l_t in kot nagiba klina α . Prikazana je tudi primerjava med dejansko in poenostavljeno konico zobatega klina

Preglednica 7: Zahteve³ za zobate spoje po DIN 68140-1:1998-02

ν	l	α
$\leq 0,18$	$\leq 10 \text{ mm}$	$\leq 7,5^\circ (1 : 7,6)$
	$> 10 \text{ mm}$	$\leq 7,1^\circ (1 : 8)$

Simbol ν v preglednici 7 predstavlja razmerje med širino konice klina b_t in razmakom med klini p , s pomočjo katerega se izračuna oslabitev prečnega prereza (*red A*) zaradi zobatega

³ Zahteve veljajo za skupino uporabe I – gradnja visoke nosilnosti (nosilne konstrukcije iz lepljenega lameliranega lesa)

spoja. Tako upoštevanje oslabitve prereza uporabljajo tudi novejši, trenutno veljavni standardi.

$$\nu = \frac{b_t}{p} \quad (3.2)$$

$$red A = (1 - \nu) A \quad (3.3)$$

Preglednica 8: Značilni profili zobatih spojev po DIN 68140-1:1998-02

l [mm]	p [mm]	b_t [mm]	ν [m/m]
7,5	2,5	0,2	0,08
10	3,7	0,6	0,16
20	6,5	1	0,16
50 ⁴	12	2	0,17
60	15	2,7	0,18

3.3.2 Polni zobati spoj

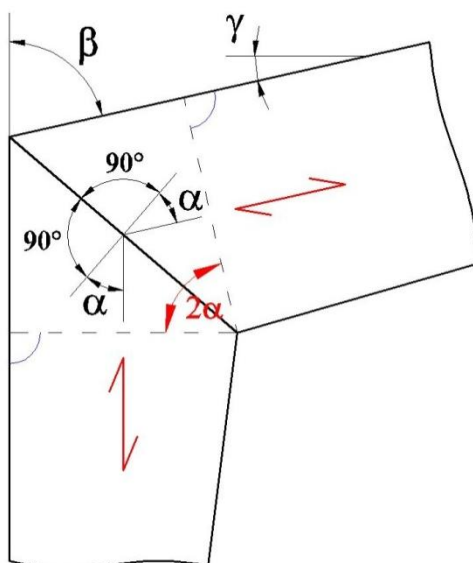
Geometrija zobatega spoja se konstruira s pomočjo kota α , ki se ga izračuna s pomočjo kota β (Slika 8). Ta se razlikuje glede na to ali imamo enojni ali dvojni zobati spoj. Smernice za tako geometrijo je podal nemški inženir Bodo Heimeshoff v članku *Berechnung von Rahmenecken mit Keilzinkenverbindungen*, ki ga je objavila revija *Holzbau-Statik-Aktuell* leta 1976.

a) Enojni polni zobati spoj

Za izračun geometrije najprej potrebujemo kot γ (nagib prečke okvirja), s pomočjo katerega se nato izračuna kot β (kot med vertikalo in prečko okvirja) in α (konstrukcijski kot). Vse te količine so prikazane na sliki 8.

$$\beta = 90^\circ - \gamma \quad (3.4)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{2} \quad (3.5)$$



Slika 8: Geometrija enojnega velikega zobatega spoja v vozlišču okvirne konstrukcije

⁴ Univerzalni profil, ki se uporablja pri polnih zobatih spojih

Da se zagotovi čim večja nosilnost, moramo elementa, ki ju spajamo (steber – prečka), na koncih, kjer ju bomo spojili, porezati tako, da je kot med smermi vlaken spojenih elementov čim manjši. Ta kot mora biti 2α .

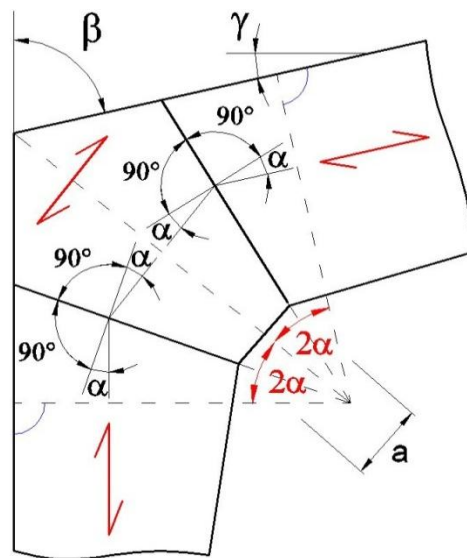
b) Dvojni polni zobati spoj

Dvojni zobati spoj se od enojnega razlikuje v tem, da med spojena elementa vstavimo vmesni kos, ki poskrbi, da na mestih spajanja pride do manjših napetosti. Enako kot pri enojnem spoju za izračun geometrije potrebujemo kot γ (nagib prečke okvirja), s pomočjo katerega se nato izračuna kot β (kot med vertikalo in prečko okvirja) in α (konstrukcijski kot), le razmerja med količinami so drugačna. Dolžina vstavljenega kosa na notranji strani vozlišča z oznako a , mora biti večja od 20 cm, saj šele takrat pride do pravega zmanjšanja napetosti na mestih spajanja. Vse te količine so prikazane na sliki 9.

$$\beta = 90^\circ - \gamma \quad (3.6)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{4} \quad (3.7)$$

Da se zagotovi čim večja nosilnost, moramo elemente, ki jih spajamo (steber – kotni vstavek – prečka), na koncih, kjer jih bomo spojili, porezati tako, da je kot med smermi vlaken spojenih elementov čim manjši. Ta kot mora biti 2α .



Slika 9: Geometrija dvojnega velikega zobatega spoja v vozlišču okvirne konstrukcije

3.4 Preiskave in eksperimentalno ugotovljeno obnašanje

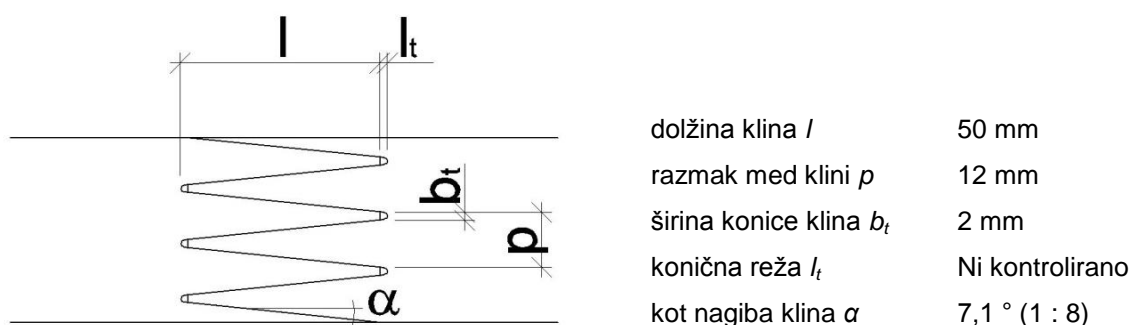
V knjigi z naslovom *Joints in Timber Structures* (Aicher in Reinhardt, 2001) so zbrana znanstvena poročila iz simpozija RILEM. Poročilo *Moment-resisting Performance of Glulam Beam-to-column Joints Composed of Various Types of Large Finger Joints* (Komatsu et al., 2001), opisuje eksperimentalne preiskave in rezultate teh preiskav na zobatih spojih velikega formata v vozliščih okvirnih konstrukcij. Glavni nosilec teh preiskav je bil inštitut za raziskave lesa univerze v Kyotu z Japonske. V tem razdelku so opisane preiskave in povzeti rezultati iz tega poročila.

Na Japonskem je veliko okvirnih konstrukcij iz lepjenega lameliranega lesa. Uporabljajo se za skladiščne in industrijske hale, trgovske zgradbe, šolske učilnice itd. Za povezovanje glavnih nosilnih elementov pri tovrstnih konstrukcijah se večinoma uporabljajo mehanski spoji z vstavljenimi jeklenimi ploščami, pritrjeno s sorniki. Prednost takšnih spojev sta duktilnost in enostavna montaža na terenu, slabost pa visoka cena. Projektiranje in izdelovanje posameznih jeklenih spojev pri okvirjih iz lepjenega lameliranega lesa je drago, zato je redukcija stroškov spajanja cilj japonske industrije tovrstnih konstrukcij. V Evropi so polni zobati spoji alternativna metoda spajanja za vrsto različnih konstrukcij iz lepjenega lameliranega lesa, a območje ni tako potresno ogroženo kot je Japonska. Ker metoda spajanja s polnimi zobatimi spoji ne zahteva jeklenih vstavkov, so stroški izdelave manjši kot pri konvencionalnih mehanskih spojih. Preiskani spoji so bili izdelani v skladu z nemškim standardom DIN 68140-1:1998-02.

V tej preiskavi je bila torej narejena študija nosilnosti polnih zobatih spojev (enojnih in dvojnih) v vozliščih okvirnih konstrukcij pri različnih tipih obremenitve. Preučevali so tudi duktilnost spojev in jo skušali izboljšati z vstavljanjem jeklenih palic v spoj. Rezultate preiskav o izboljšanju nosilnosti bi lahko s pridom izkoristili tudi pri nas, saj je večina območja Slovenije potresno ogrožena.

3.4.1 Geometrija zobatih klinov in izdelava preizkušancev

Slika 10 prikazuje geometrijo polnih zobatih spojev, uporabljenih v tej študiji. Profil zobatih klinov je bil izveden v skladu z nemškim standardom DIN 68140-1:1998-02. Preglednica 9 prikazuje materialne lastnosti lepjenega lameliranega lesa, iz katerega so bili izdelani preizkušanci. Vsi testni preizkušanci so bili narejeni iz lokalnega lesa macesna v tovarni lepjenega lameliranega lesa, ki se nahaja v prefekturi Iwate na severnem delu japonskih glavnih otokov. Za lepilo so uporabili fenol – resocinolno smolo (Phenolite 6000).



Slika 10: Uporabljeni profil zobatih klinov v skladu s standardom DIN 68140-1:1998-02

Preglednica 9: Lastnosti uporabljenega lepjenega lameliranega lesa

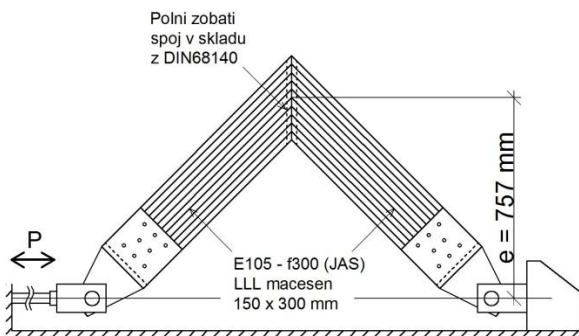
Količine	Enote	Srednja vrednost
Gostota	kg/m ³	544
Vsebnost vlage	%	9,72
Upogibna trdnost	N/mm ²	24,72
JAS ⁵ razred	E105 – f300 (macesen)	
Prečni prerez	150 mm × 300 mm (debelina lamele 30 mm)	

⁵ Japanese Agricultural Standard

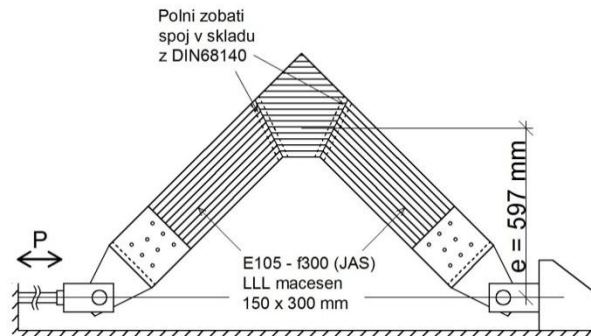
3.4.2 Preizkušanci in shema obremenitve

Slike 11, 12, 13 in 14 prikazujejo različne preizkušance »L« oblike, ki so bili uporabljeni v tej študiji. Imamo torej štiri vrste preizkušancev: neojačane z enojnim zobatim spojem, ojačane z enojnim zobatim spojem, neojačane z dvojnimi zobatimi spoji in ojačane z dvojnimi zobatimi spoji. Pri preizkušancih z dvojnimi zobatimi spoji med spojena elementa postavimo vmesni kos. Ojačitve so bile skonstruirane na podlagi predhodnih eksperimentov in nemških raziskav. Izvedene so bile tako, da so skozi spoj prečno vstavili jeklene palice. Preglednica 10 podaja način obremenitve in značilnosti preizkušancev. Ciklična obremenitev je bila prirejena maksimalni obtežbi P_{max} , ki so jo dobili s pomočjo monotonega obremenjevanja. Potek cikličnega obremenjevanja:

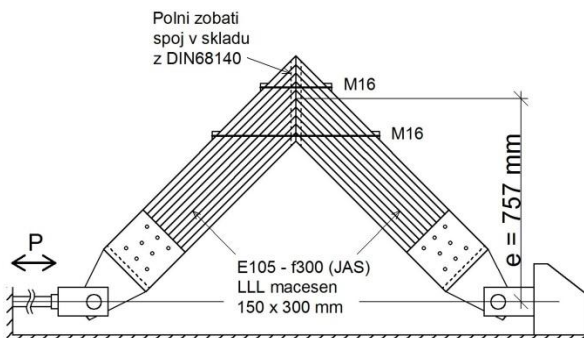
- 1. cikel: $0 \rightarrow \frac{1}{4} P_{max} \rightarrow 0 \rightarrow -\frac{1}{4} P_{max} \rightarrow 0$,
- 2. cikel: $0 \rightarrow \frac{1}{2} P_{max} \rightarrow 0 \rightarrow -\frac{1}{2} P_{max} \rightarrow 0$,
- 3. cikel: $0 \rightarrow \frac{3}{4} P_{max} \rightarrow 0 \rightarrow -\frac{3}{4} P_{max} \rightarrow 0$ in
- 4. cikel: $0 \rightarrow P_{max}$.



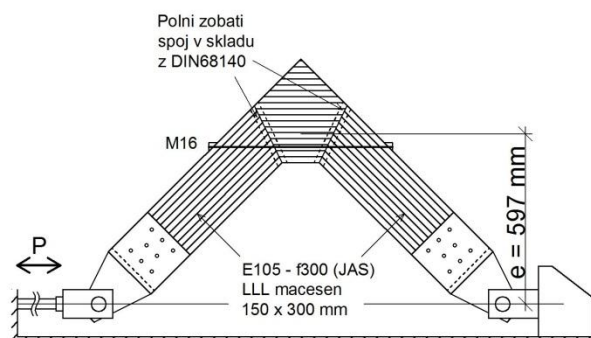
Slika 11: Enojni zobati spoj, neojačano



Slika 12: Dvojni zobati spoj, neojačano



Slika 13: Enojni zobati spoj, ojačano



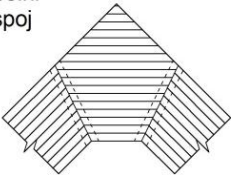
Slika 14: Dvojni zobati spoj, ojačano

Preglednica 10: Način obremenjevanja in značilnosti preizkušancev

Preizkušavec	Tip Polnega zobatega spoja	Ojačitev	Način obremenjevanja	Vrsta momenta ob poružitvi
T-01	Enojni polni zobati spoj 	Ne	Monotono	Odpiralni
C-01		Ne	Monotono	Zapiralni
T-02		Ne	Ciklično	Odpiralni
C-02		Ne	Ciklično	Zapiralni
BT-01		Da	Ciklično	Odpiralni
BT-02		Da	Ciklično	Odpiralni

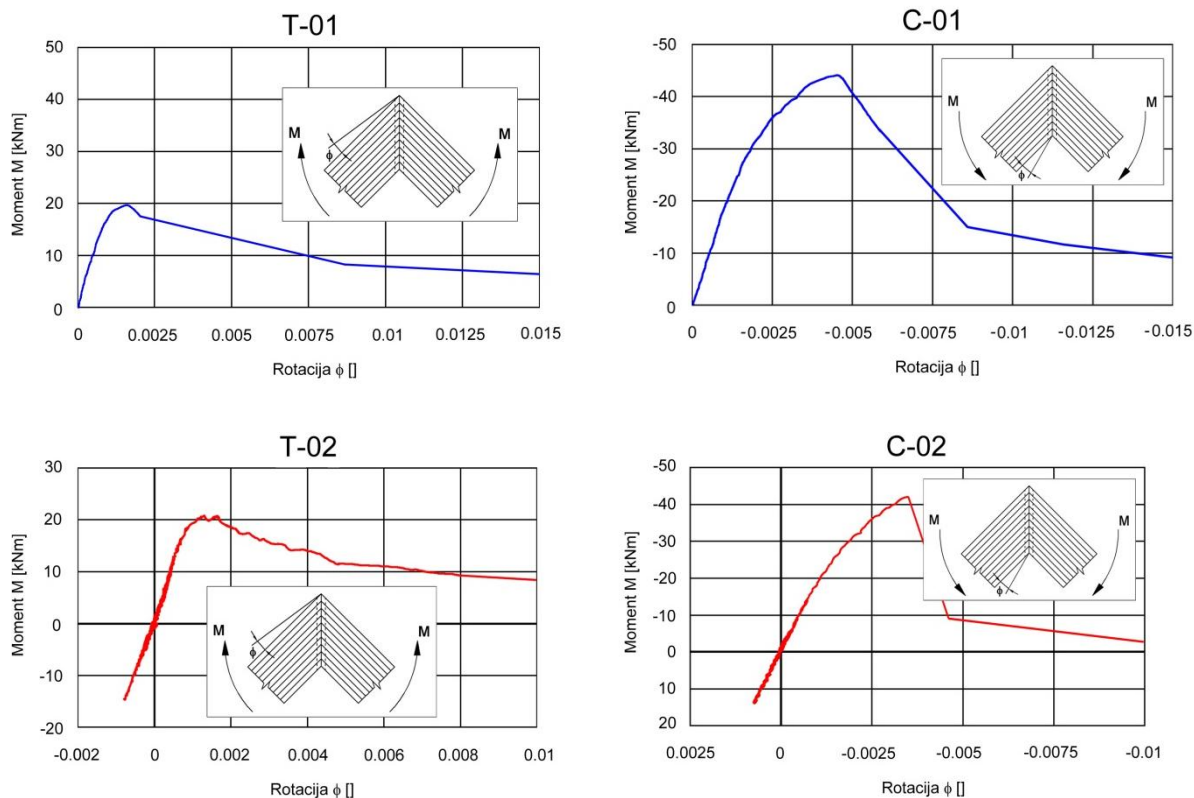
se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 10

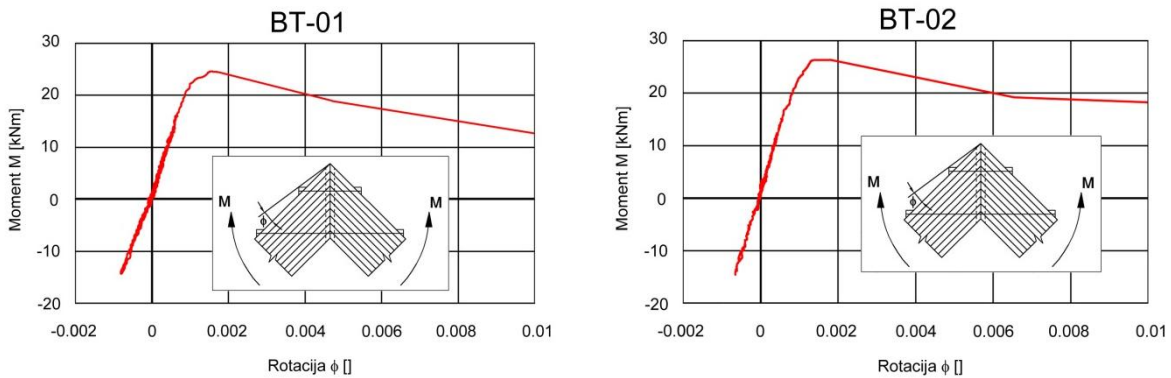
TB-01	Dvojni polni zobati spoj 	Ne	Monotono	Odpiralni
CB-01		Ne	Monotono	Zapiralni
TB-02		Ne	Ciklično	Odpiralni
CB-02		Ne	Ciklično	Zapiralni
TB-03		Ne	Ciklično	Odpiralni
BTB-01		Da	Ciklično	Odpiralni
BCB-01		Da	Ciklično	Zapiralni

3.4.3 Rezultati

Sliki 15 in 16 prikazujeta diagrame moment (M) – rotacija (ϕ) za preizkušance z enojnim polnim zobatim spojem. Pri monotoni obremenitvi lahko opazimo, da je zveza med momentom in rotacijo najprej linearna, nato pa se začne obnašati nelinearno zaradi tečenja materiala v notranjem območju vozlišča (v primeru, ko imamo negativen, zapiralni moment). Tudi pri ciklični obremenitvi je v prvih korakih, ko sila obremenjevanja še ni tako velika, zveza med momentom in rotacijo linearna, kasneje pa pride do nelinearnosti in odpovedi materiala. Opazimo lahko še, da pri ciklični obremenitvi polni zobati spoj ne nudi histereznega obnašanja, kot je to v navadi pri mehanskih lesenih spojih. Pri preizkušancih C-01 in C-02 na sliki 15, kjer porušitev nastopi zaradi negativnih momentov, lahko opazimo očitno nelinearno območje, preden spoj odpove. To nam pove, da imajo enojni polni zobati spoji pri tej obtežbi sposobnost deformiranja v nelinearno območje. Če je črta krivulje modra, je obremenjevanje monotono, če je rdeča pa ciklično.

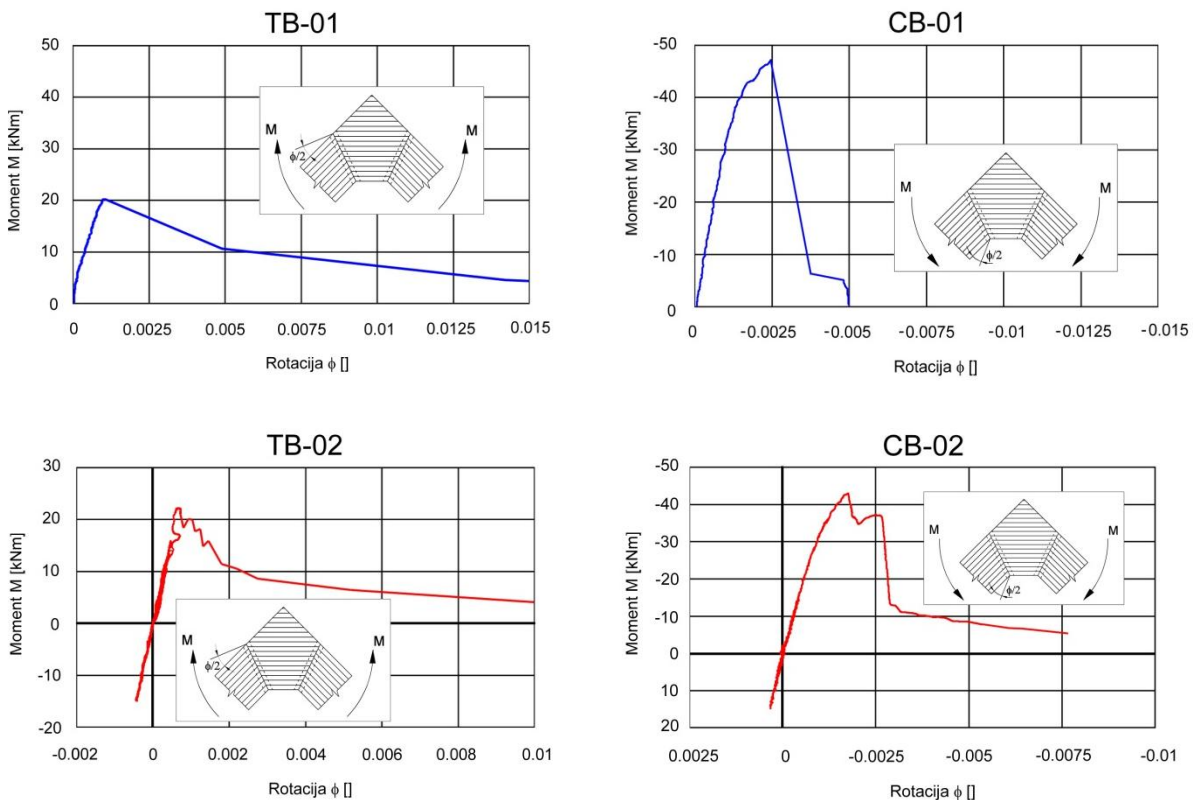


Slika 15: Diagrami moment (M) – rotacija (ϕ) pri preizkušancih z enojnim polnim zobatim spojem (Komatsu et al., 2001, str. 524)

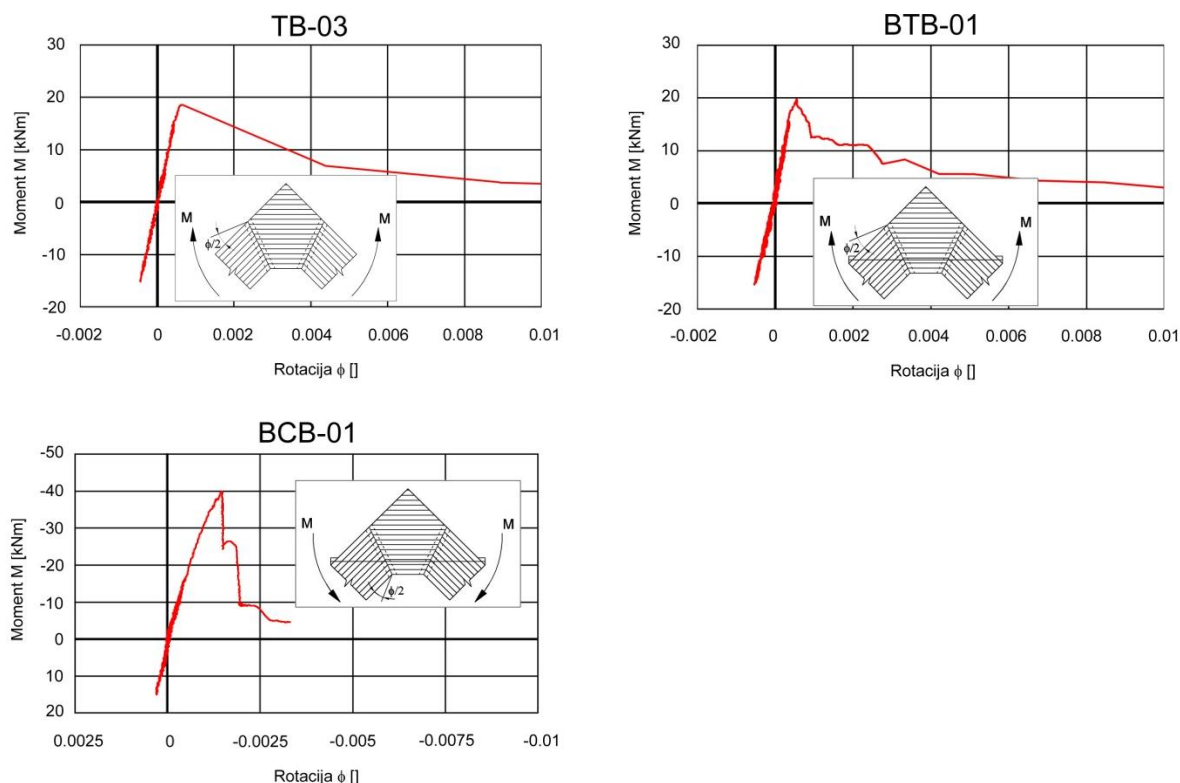


Slika 16: Diagrami moment (M) – rotacija (ϕ) pri preizkušancih z enojnim polnim zobatim spojem (Komatsu et al., 2001, str. 524)

Sliki 17 in 18 prikazujeta diagrame moment (M) – rotacija (ϕ) za preizkušance z dvojnimi polnimi zobatimi spoji. Če jih primerjamo z diagrami s slik 15 in 16, vidimo, da so ti bolj togi in manj duktilni. Prevzamejo lahko večjo obremenitev in se pri tem manj deformirajo. Porušitev nastopi pri manjših deformacijah kot pri preizkušancih z enojnimi zobatimi spoji. Če je črta krivulje modra, je obremenjevanje monotono, če je rdeča pa ciklično.



Slika 17: Diagrami moment (M) – rotacija (ϕ) pri preizkušancih z dvojnimi polnimi zobatimi spojem (Komatsu et al., 2001, str. 525)

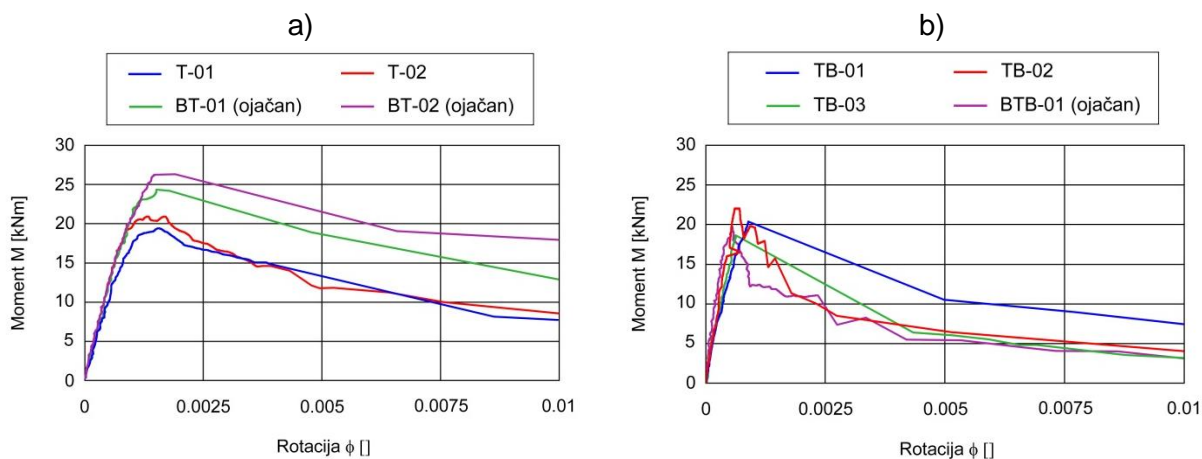


Slika 18: Diagrami moment (M) – rotacija (ϕ) pri preizkušanjih z dvojnimi polnimi zobatimi spoji (Komatsu et al., 2001, str. 525)

Preiskave so pokazale, da imajo polni zobati spoji v vozliščih okvirnih konstrukcij neduktilen porušni mehanizem, predvsem če so podvrženi pozitivnim (odpiralnim) upogibnim momentom. Ko nanje deluje negativni (zapiralni) upogibni moment, pokažejo malo nelinearnih deformacij pred poružitvijo. To sposobnost dobijo zaradi tečenja materiala, obremenjenega s tlačnimi napetostmi ob notranjem robu spoja (Aicher, 1997).

3.4.4 Učinkovitost ojačitev

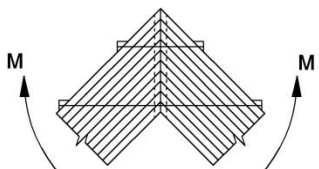
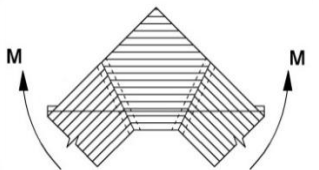
Slika 19 prikazuje diagrama $M - \phi$ za preizkušance z enojnimi oziroma dvojnimi polnimi zobatimi spoji, ki so podvrženi pozitivnim upogibnim momentom vse do poružitve.



Slika 19: Primerjave med preizkušanci z a) enojnimi in b) dvojnimi zobatimi spoji, podvrženimi pozitivnim momentom do poružitve (Komatsu et al., 2001, str. 526)

Preglednica 11 povzema ugotovitve glede učinkovitosti ojačevanja spojev z jeklenimi palicami pri obremenjevanju z odpiralnimi momenti. Primerjave temeljijo na srednjih vrednostih momentov, ki so jih dobili tako, da so izračunali povprečje momentov pri posamezni vrsti preizkušanca. Razvidno je, da je bilo ojačevanje učinkovito pri preizkušancih z enojnimi polnimi zobatimi spoji, saj se je nosilnost povečala za kar 25 %. Pri preizkušancih z dvojnimi polnimi zobatimi spoji se nosilnost ni povečala, celo poslabšala se je za 2,5 %. Vzrok temu je neučinkovitost tovrstnih ojačitev in vpliv oslabitev, ki smo jih povzročili z vrtanjem.

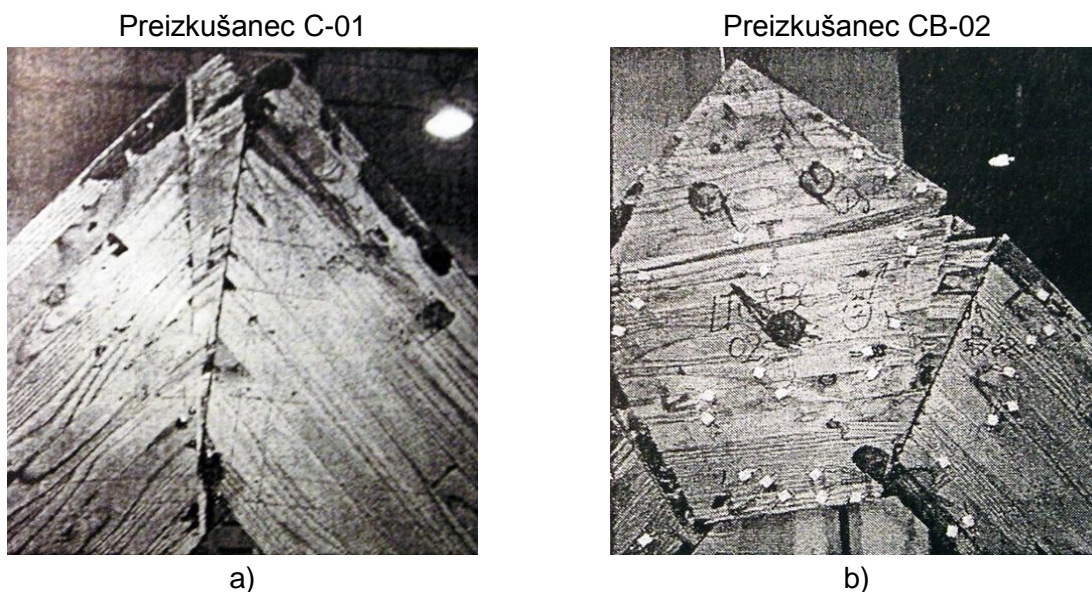
Preglednica 11: Učinkovitost ojačevanja z jeklenimi palicami pri maksimalnem odpiralnem upogibnem momentu

Vrsta preizkušanca		Oznaka	M_{max} [kN m]	Povp. vrednost M_{max} [kN m]	Učinkovitost (b/a)		
Z enojnim zobatim spojem		Neojačan	a	T-01	19,61	1,254	
			T-02	21,09			
		Ojačan	b	BT-01	24,51		25,51
			BT-02	26,51			
Z dvojnimi zobatimi spojem		Neojačan	a	TB-01	20,38	0,975	
			TB-02	22,02			
			TB-03	18,68			
		Ojačan	b	BTB-01	19,85	19,85	

Pridobljene ugotovitve je potrebno jemati z rezervo, saj so bili vzorci statistično gledano premajhni, da bi lahko podali natančno oceno. Tu bi izpostavil račun učinkovitosti ojačevanja pri preizkušancih z dvojnimi polnimi zobatimi spoji na preglednici 11 desno spodaj. Za račun povprečnega maksimalnega momenta pri ojačanih preizkušancih so imeli le en primerek, kar je absolutno premalo. Dobljena upogibna nosilnost zato najverjetneje ni zelo natančna, a nam vseeno poda neko okvirno sliko. Število preizkušancev je majhno, ker so preiskave na polnih zobatih spojih v vozliščih okvirnih konstrukcij drage.

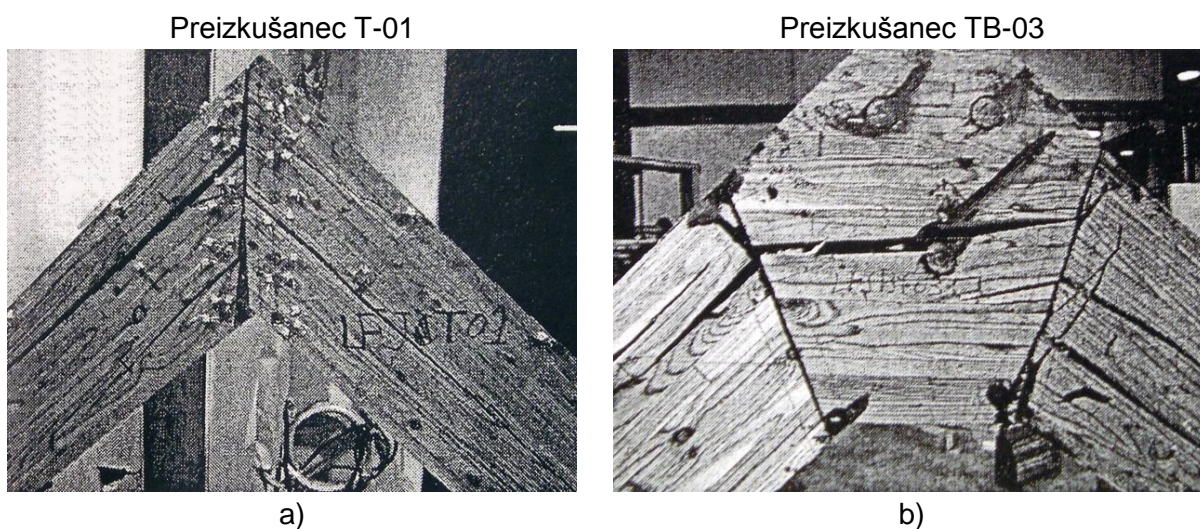
3.4.5 Tipični načini porušitve

Tipična načina porušitve pri neojačanih preizkušancih, na katere je deloval negativni (zapiralni) upogibni moment, sta prikazana na sliki 20. V nateznih conah spoja je nastopila strižna porušitev, v tlačnih conah spoja pa je prišlo do tečenja materiala (predvsem na notranji strani). Učinka uklona v tlačnih conah spoja ni bilo zaznati. Pri preizkušancih z dvojnimi polnimi zobatimi spoji je prišlo tudi do cepljenja vstavljenega kosa iz lepljenega lameliranega lesa.



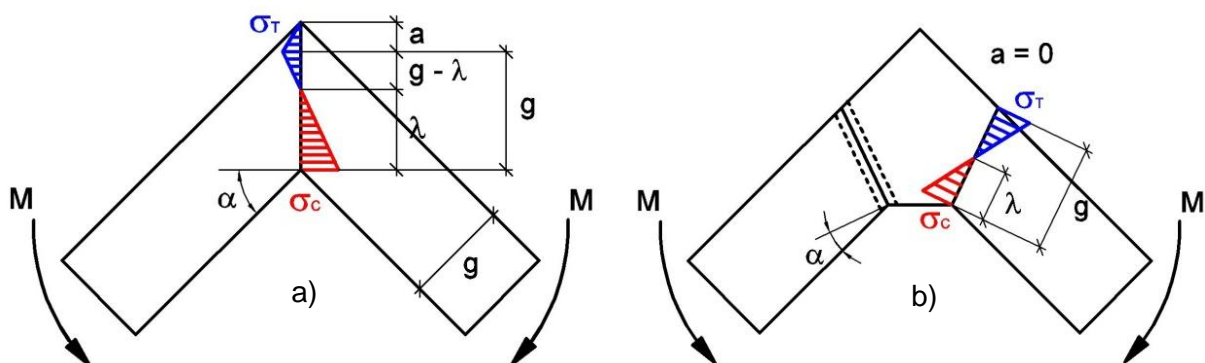
Slika 20: Porušitev preizkušanca z a) enojnim in b) dvojnim zobatim spojem zaradi zapiralnega momenta (Komatsu et al., 2001, str. 527)

Slika 21 prikazuje cepljenje lesa pri neojačanih preizkušancih zaradi radialnih napetosti, ki so nastale kot posledica pozitivnih (odpiralnih) upogibnih momentov. Porušni mehanizem je bila strižna porušitev vzdolž lepilne ploskve na mestih nateznih napetosti. Pri ojačanih preizkušancih je bilo zaznati manjši nivo cepljenja. Jeklena palica je namreč potekala diagonalno čez nosilca in jima nudila oporo v radialni smeri. Ker pa je bilo manj cepljenja lesa v nosilcih, je bilo posledično manj cepljenja lesa tudi v vmesnem kosu (vstavku) iz lepjenega lameliranega lesa.



Slika 21: Porušitev preizkušanca z a) enojnim in b) dvojnim zobatim spojem zaradi odpiralnega momenta (Komatsu et al., 2001, str. 527, 528)

3.4.6 Enačbe za določitev nosilnosti



Slika 22: Predpostavljene razporeditve napetosti v a) enojnih in b) dvojnih polnih zobatih spojih

Iz raziskave in na osnovi teorije nosilcev in ugotovitev drugih avtorjev (Aicher, 1997), so bile izpeljane enačbe nosilnosti, ki predvidijo upogibno nosilnost polnega zobatega spoja v vozlišču okvirne konstrukcije iz lepljenega lameliranega lesa (Komatsu et al., 2001, str. 528, 529).

a) Enačba za primer zapiralnega momenta (Komatsu et al., 2001):

$$M_1 = -\frac{b \sigma_{c,eff}}{6 \lambda} \{2 \lambda^3 + 2 (g - \lambda)^3 + (g - \lambda)(3g - 3\lambda + a)a\}, \quad (3.8)$$

kjer so b širina nosilca, $\sigma_{c,eff}$ efektivna tlačna trdnost polnega zobatega spoja, λ lokacija nevtralne osi, količini g in a pa sta razvidni s slike 22.

b) Enačba za primer odpiralnega momenta (Komatsu et al., 2001):

$$M_2 = -\frac{1,5 b f_{g,t}}{6 \lambda} \{2 \lambda^3 + 2 (g - \lambda)^3 + (g - \lambda)(3g - 3\lambda + a)a\}, \quad (3.9)$$

kjer je $f_{g,t}$ natezna trdnost polnega zobatega spoja z zobatimi klini dolžine 50 mm.

Lokacija nevtralne osi (Komatsu et al., 2001):

$$\lambda = \frac{g^2 + g a}{2g + a}. \quad (3.10)$$

Efektivna tlačna trdnost polnega zobatega spoja (Aicher, 1997):

$$\sigma_{c,eff} = f_{c,0} \left\{ 1 + \left(\frac{f_{c,90}}{f_{c,0}} - 1 \right) \sin \alpha \right\}, \quad (3.11)$$

kjer so $f_{c,0}$ tlačna trdnost lepljenega lameliranega lesa vzporedno z vlakni, $f_{c,90}$ tlačna trdnost lepljenega lameliranega lesa pravokotno na vlakna, α pa kot prikazan na sliki 22.

Preglednica 12: Primerjava med eksperimentalno dobljenimi in izračunanimi momenti

Preizkušanelec	Moment ob poružitvi	Tip spoja	$M_{c,eksp}$	$M_{c,izrač}$	①/②	a	g	λ
			[kN m]	[kN m]				
			①	②		[mm]	[mm]	[mm]
T-01	Odpiralni	Enojni	19,61	23,40	0,84	124	300	175,7
T-02			21,09	23,40	0,90	124	300	175,7
C-01	Zapiralni		44,63	41,78	1,07	124	300	175,7
C-02			42,55	41,78	1,02	124	300	175,7

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 12

TB-01	Odpiralni	Dvojni	20,38	19,43	1,05	0	325	162,5
TB-02			22,02	19,43	1,13	0	325	162,5
TB-03			18,67	19,43	0,96	0	325	162,5
CB-01	Zapiralni		47,56	47,30	1,01	0	325	162,5
CB-02			43,40	47,30	0,92	0	325	162,5
Opomba	Tlak	$\sigma_{c,90}$	8,83 MPa	Lepljeni lamelirani les: macesen				
		$\sigma_{c,0}$	23,5 MPa					
	Nateg	$\sigma_{g,t}$	7,36 MPa	Širina nosilcev: 150 mm				

Preglednica 12 prikazuje primerjavo med izračunanim momentom in dejanskim momentom, ki je bil izmerjen med preizkusom pri preizkušancih brez ojačitev.

3.4.7 Povzetek

Pri preiskavi so bili testirani štiri različni spoji v vozliščih okvirnih konstrukcij iz lepljenega lameliranega lesa, ki so bili spojeni s pomočjo lepila in zobatih klinov, z namenom proučevanja njihove upogibne nosilnosti. Spodaj so navedene glavne ugotovitve:

- Polni zobati spoji v vozliščih okvirnih konstrukcij iz lepljenega lameliranega lesa imajo slabo duktilnost, še posebej, če so podvrženi pozitivnim (odpiralnim) upogibnim momentom.
- Pri preizkušancih, ki so bili podvrženi negativnim (zapiralnim) upogibnim momentom, je bilo zaznati nelinearne deformacije.
- Ojačevanje z jeklenimi palicami se je izkazalo za učinkovito pri preizkušancih z enojnimi polnimi zobatimi spoji (25 % izboljšanje nosilnosti), medtem ko smo pri preizkušancih z dvojnimi polnimi zobatimi spoji rahlo poslabšali nosilnost.
- Enačbe za izračun upogibne nosilnosti spoja podajo dober približek dejanski nosilnosti tako pri odpiralnem, kot pri zapiralnem momentu.

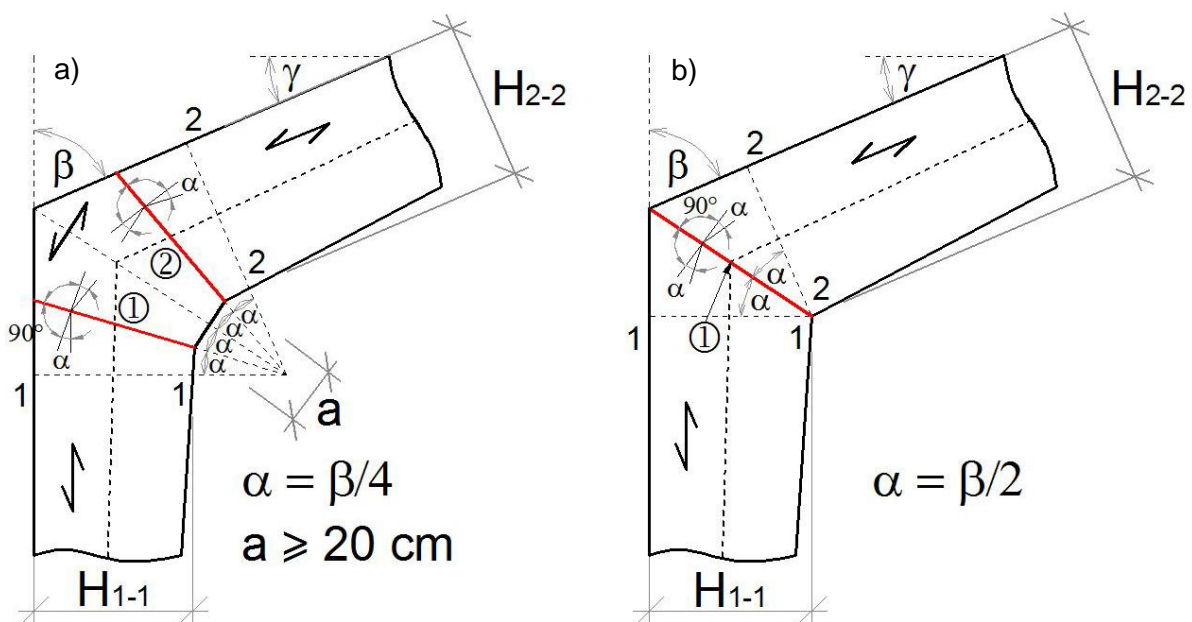
4 DIMENZIONIRANJE ZOBATIH SPOJEV

Dimenzioniranje zobatih spojev velikega formata temelji na poenostavljenem pristopu, ki ga je uvedel nemški inženir Bodo Heimeshoff (1976). Ustreznost tega pristopa so potrdile tudi eksperimentalne preiskave. Osnovo izračuna predstavlja linearna interakcija med osno silo in upogibnim momentom v prerezu, ki z eno stranico sovpada z notranjim robom (Slika 6). Izračun velja le, če v vozlišču spoja nastopa negativni (zapiralni) upogibni moment. Predpostavimo, da porušitev nastopi takrat, ko je tlačna trdnost (dopustna napetost) ob notranjem robu prekoračena.

V tem poglavju sta opisana dva različna načina dimenzioniranja polnih zobatih spojev, in sicer glede na trenutno veljavne standarde Evrokod in glede na stare DIN standarde, ki niso več v veljavi.

4.1 Standard Evrokod

4.1.1 Enojni ali dvojni polni zobati spoj v vozlišču okvira



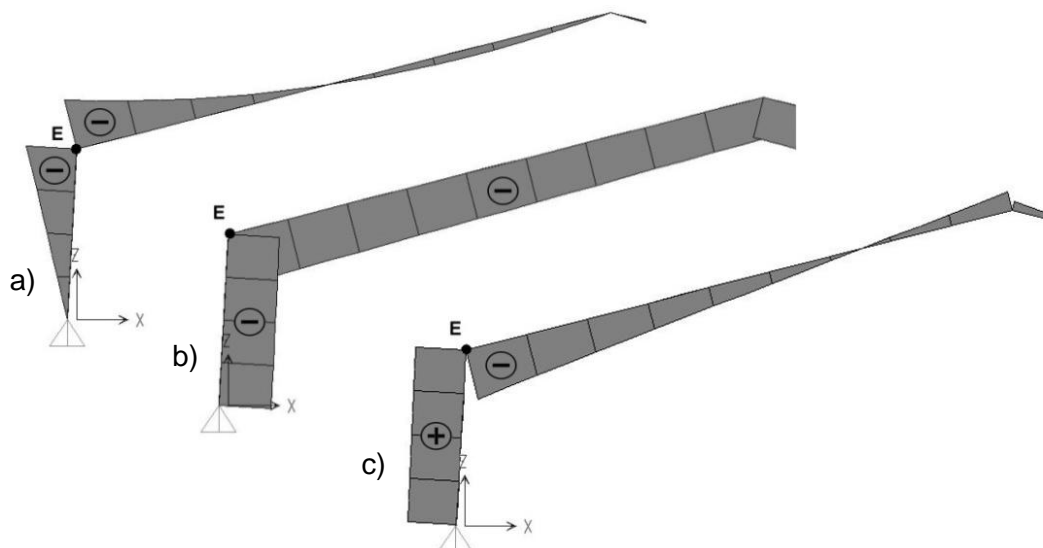
Slika 23: Kot okvira z a) dvojnimi in b) enojnim univerzalnim⁶ polnimi zobatimi spojem

Slika 23 prikazuje stikovanje v vozlišču okvira z zobatimi spoji. Rdeče črte ponazarjajo potek spoja. Točka 1 oz. 2 se nahaja tam, kjer srednjici elementov sekata zobati spoj. Velikosti notranjih sil iz teh točk uporabimo pri kontroli nosilnosti. V izračunu uporabimo velikosti prečnega prereza 1 – 1 oz. 2 – 2. V praksi ustvarimo enak računski model okvira (Slika 24) tako za enojni, kot za dvojni polni zobati spoj. To pomeni, da pri računskem modelu okvira z dvojnimi zobatimi spojem med steber in prečko ne damo vmesnega elementa, ampak jih samo spojimo, kot da vmesnega dela sploh ne bi bilo. Notranje statične količine pri obeh vrstah zobatih spojev odčitamo v točki E (Slika 24). Moment pri dvojnem zobatem spoju preračunamo na mesto 1 oz. 2:

$$|M|_{i,d} = |M|_{E,d} - a * |V|_{E,d}, \quad (4.1)$$

⁶ Univerzalni polni zobati spoj: $l = 5 \text{ cm}$; $p = 1,2 \text{ cm}$; $b_t = 0,2 \text{ cm}$

kjer je a dolžina spodnjega dela vstavka pri dvojnih polnih zobatih spojih (Slika 23) in i indeks vrednosti 1 oz. 2. Enačba velja, ko imamo v vozlišču, kjer se nahaja spoj, negativne upogibne momente.



Slika 24: Potek in predznak a) upogibnega momenta, b) osne sile in c) prečne sile pri okvirjih s polnimi zobatimi spoji

Porušitev se zgodi, ko je na mestu notranjega dela vozlišča (notranji rob) dosežena tlačna trdnost pod kotom α glede na smer vlaken. Pri enojnem spoju se notranji rob nahaja na stičišču spodnjega dela stebra in prečke, pri dvojnemu spoju pa na mestu, kjer se spodnji del prečke oz. stebra stikuje z vstavkom. Analiza poteka v ravnini okvira, zato bi morale imeti uklonske količine in momenti indekse y , vendar smo jih zaradi preglednosti izpustili. Rug in Mönck (2008) sta podala naslednjo enačbo mejnega stanja:

$$\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,\alpha,d}} \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \right) \leq 1,0. \quad (4.2)$$

Pri čemer so:

$f_{c,0,d}$... projektna tlačna trdnost lepjenega lameliranega lesa vzporedno z vlakni [kN/cm^2],

$f_{m,d}$... projektna upogibna trdnost lepjenega lameliranega lesa [kN/cm^2],

$f_{c,\alpha,d}$... projektna tlačna trdnost lepjenega lameliranega lesa pod kotom α glede na vlakna [kN/cm^2],

$\sigma_{c,0,d}$... tlačna napetost vzporedno z vlakni [kN/cm^2],

$\sigma_{m,d}$... upogibna napetost [kN/cm^2] in

k_c ... uklonski koeficient [-].

Da zajamemo možne poškodbe v polnem zobatem spoju, ki so nastale pri procesu strojnega rezanja zobatih klinov, uporabimo v izračunu trdnosti $f_{m,k}$, $f_{c,0,k}$ in $f_{t,0,k}$, ki pripadajo lepjenemu lameliranemu lesu nižje kvalitete. Naprimer, če uporabljamo lepjeni lamelirani les kvalitete GL32h, pri računu kontrole (4.2) uporabimo trdnosti $f_{m,k}$, $f_{c,0,k}$ in $f_{t,0,k}$, ki pripadajo lepjenemu lameliranemu lesu kvalitete GL28h. Oslabitev prečnega prereza pri kontroli polnih zobatih spojev upoštevamo tako, da za 20 % zmanjšamo prečni prerez (A_{neto}) in odpornostni moment (W_{neto}).

a) Tlačna napetost vzporedno z vlakni $\sigma_{c,0,d}$ [kN/cm²] se izračuna z izrazom:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{i,d}}{A_{neto}}. \quad (4.3)$$

Pri tem sta:

$N_{i,d}$... projektna osna sila na mestu i [kN] ($i = 1$ oz. 2) in

A_{neto} ... reducirani prečni prerez [cm²].

Reducirani prečni prerez [cm²] je definiran z izrazom:

$$A_{neto} = 0,8 b h_{i-i}, \quad (4.4)$$

kjer sta:

b ... širina nosilca [cm] in

h_{i-i} ... višina nosilca v prerezu $i-i$ [cm] ($i = 1$ oz. 2).

b) Upogibna napetost $\sigma_{m,d}$ [kN/cm²] se izračuna z izrazom:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{i,d}}{W_{neto}}, \quad (4.5)$$

kjer sta:

$M_{i,d}$... projektni upogibni moment na mestu i [kN cm] ($i = 1$ oz. 2) in

W_{neto} ... reducirani odpornostni moment [cm³].

Reducirani odpornostni moment W_{neto} [cm³] je definiran z izrazom:

$$W_{neto} = \frac{0,8 b h_{i-i}^2}{6}. \quad (4.6)$$

c) Tlačna trdnost lepljenega lameliranega lesa pod kotom α glede na vlakna $f_{c,\alpha,d}$ [kN/cm²] je definirana z izrazom:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,d}}{2 f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,d}}{1,5 f_{v,d}} \sin \alpha \cos \alpha\right)^2 + \cos^4 \alpha}}. \quad (4.7)$$

Pri čemer so:

α ... kot med smerjo vlaken elementa in pravokotnico na črto spoja⁷ [°],

β ... kot med zgornjo stranico prečke in vertikalo [°],

γ ... naklon strehe okvira [°],

$f_{v,d}$... projektna strižna trdnost lepljenega lameliranega lesa [kN/cm²] in

$f_{c,90,d}$... projektna tlačna trdnost lepljenega lameliranega lesa pravokotno na vlakna [kN/cm²].

Kot med smerjo vlaken elementa in pravokotnico na črto spoja α [°] je definiran z izrazom:

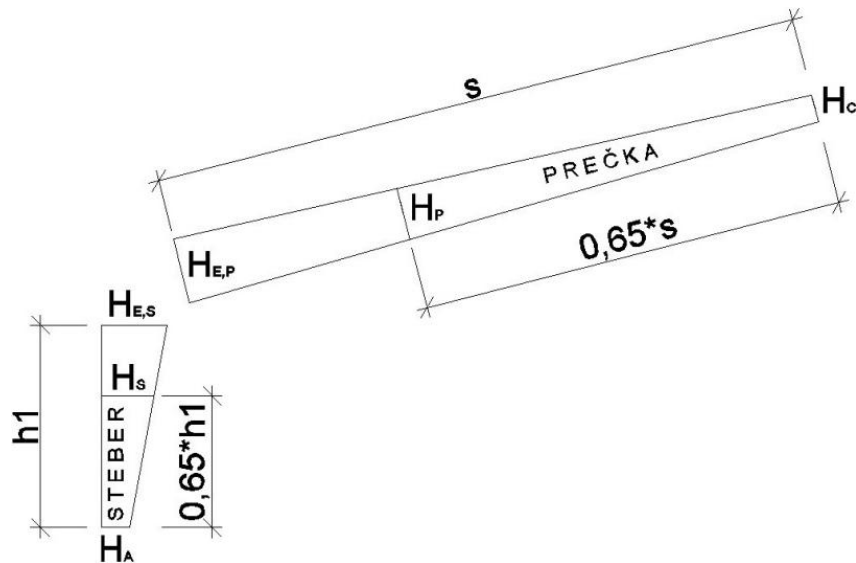
$$\alpha = \frac{\beta}{2} = \frac{90^\circ - \gamma}{2} \text{ oz. } \alpha = \frac{\beta}{4} = \frac{90^\circ - \gamma}{4}. \quad (4.8)$$

d) Izračun uklonskega koeficienta k_c [-]

Vitkost elementa λ [-] je definirana z izrazom:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i}. \quad (4.9)$$

⁷ Definicija kota α se razlikuje glede na vrsto spoja (Slika 23)



Slika 25: Oznake količin pri računu uklonske dolžine (Gojković, 1989, str .432)

Pri tem so:

i ... vztrajnostni polmer stebra oz. prečke [cm]:

$$i = 0,289 H_S \text{ oz. } i = 0,289 H_P, \quad (4.10)$$

H_S ... višina prereza stebra pri 65 % višine stebra [cm] (Slika 25):

$$H_S = H_A + 0,65(H_E^S - H_A) \text{ in} \quad (4.11)$$

H_P ... višina prereza prečke pri 65 % dolžine prečke [cm] (Slika 25):

$$H_P = H_C + 0,65(H_E^P - H_C). \quad (4.12)$$

- Uklonska dolžina stebra $l_{ef,S}$ [cm] je definirana kot:

$$l_{ef,S} = \beta_S h_1, \quad (4.13)$$

kjer sta:

h_1 ... višina stebra [cm] (Slika 25) in

β_S ... faktor za določitev uklonske dolžine stebra [-].

Faktor za določitev uklonske dolžine stebra β_S [-] je definiran z izrazom:

$$\beta_S = \sqrt{4 + \frac{\pi^2 E I_S}{h_1} \left(\frac{1}{K_\varphi} + \frac{s}{3 E I_P} \right) + \frac{E I_S N_{P,P} s^2}{E I_P N_{P,S} s^2}}. \quad (4.14)$$

Pri čemer so:

E ... elastični modul lepjenega lameliranega lesa vzporedno z vlakni $E_{0,mean}$, deljen z varnostnim faktorjem za material γ_M [kN/cm²],

$I_{S,P}$... vztrajnostni moment stebra oz. prečke v prerezu 1 – 1 oz. 2 – 2 [cm⁴] (Slika 23),

$K_\varphi = \infty$,

s ... dolžina prečke [cm] (Slika 25) in

$N_{P,S}; N_{P,P}$... povprečni vrednosti osne sile v stebri oz. prečki [kN].

Vztrajnostni moment stebra oz. prečke v prerezu 1 – 1 oz. 2 – 2 $I_{S,P}$ [cm⁴] (Slika 23) je definiran z izrazom:

$$I_{S,P} = \frac{b H_i - i^3}{12}, \quad (i = 1 \text{ oz. } 2). \quad (4.15)$$

- Uklonska dolžina prečke $l_{ef,P}$ [cm] je definirana z izrazom:

$$l_{ef,P} = \beta_P s, \quad (4.16)$$

kjer je:

β_P ... faktor za določitev uklonske dolžine prečke, ki se izračuna z izrazom:

$$\beta_P = \beta_S \sqrt{\frac{E I_P N_{P,S}}{E I_S N_{P,P}}} \frac{h_1}{s}. \quad (4.17)$$

Relativna vitkost elementa λ_{rel} [-] se izračuna z izrazom:

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \quad (4.18)$$

kjer sta:

$f_{c,0,k}$... karakteristična tlačna trdnost lepljenega lameliranega lesa vzporedno z vlakni [kN/cm²] in

$E_{0,05}$... elastični modul lepljenega lameliranega lesa vzporedno z vlakni [kN/cm²] (5% fraktila).

Faktor za določitev uklonskega koeficienta k [-], kjer je za lepljeni lamelirani les $\beta_c = 0,1$; je definiran kot:

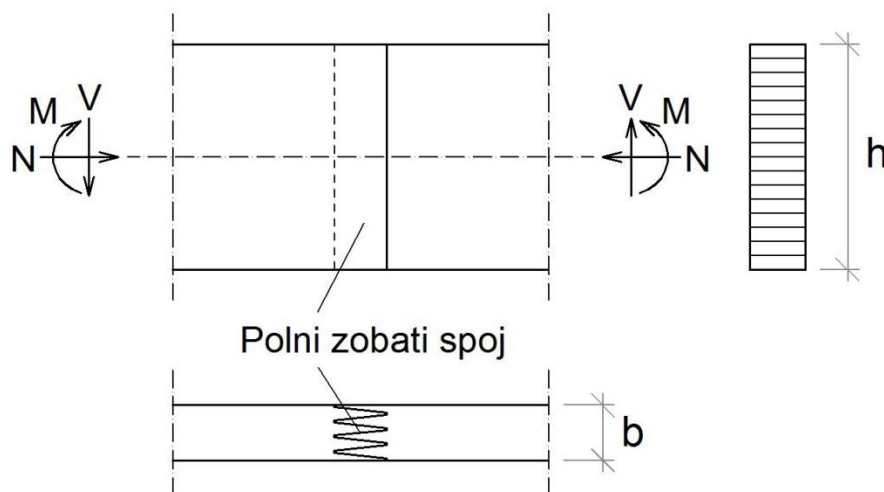
$$k = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2). \quad (4.19)$$

Uklonski koeficient k_c se izračuna z izrazom:

$$k_c = \min \left\{ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}, 1,0 \right\}. \quad (4.20)$$

Enačba (4.1) velja, ko imamo negativne (zapiralne) momente v spoju. Večjim pozitivnim momentom se je v polnih zobatih spojih pri okvirjih potrebno izogibati, zato ker tvorijo natezne napetosti pravokotno na smer vlaken in povzročajo cepljenje spojenih elementov.

4.1.2 Zobati spoj pri ravnem nosilcu konstantne višine



Slika 26: Polni zobati spoj pri ravnem nosilcu (Neuhaus, 1994, str. 310)

Zobate spoje pri ravnih nosilcih konstantne višine dimenzioniramo tako, da preverimo kombinacijo upogibnih in osnih napetosti ter strižne napetosti. Če so zobati spoji izvedeni v skladu s standardom SIST EN 387:2002, je območje spoja boljše kvalitete od osnovnega materiala, zato lahko na mestu spoja uporabimo kar enačbe mejnega stanja nosilnosti za navadne lesene elemente.

- a) Kontrola osno – upogibnih napetosti za primer, ko ni nevarnosti bočne zvrnitve, se izračuna kot:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0 \quad \text{ali} \quad \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0. \quad (4.21)$$

- Tlačna oz. natezna napetost vzporedno z vlakni [kN/cm²] se izračuna z izrazom:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{neto}} \quad \text{oz.} \quad \sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_{neto}}. \quad (4.22)$$

Pri tem sta:

N_d ... projektna osna sila na mestu spoja [kN] in

A_{neto} ... reducirani prečni prerez [cm²].

Reducirani prečni prerez A_{neto} [cm²] je definiran z izrazom:

$$A_{neto} = 0,8 b h, \quad (4.23)$$

kjer sta:

b ... širina nosilca [cm] in

h ... višina nosilca na mestu spoja [cm].

- Upogibna napetost $\sigma_{m,d}$ [kN/cm²] se izračuna z izrazom:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_{neto}}, \quad (4.24)$$

kjer sta:

M_d ... projektni upogibni moment na mestu spoja [kN cm] in

W_{neto} ... reducirani odpornostni moment [cm³], ki je definiran z izrazom:

$$W_{neto} = \frac{0,8 b h^2}{6}. \quad (4.25)$$

- b) Kontrola strižnih napetosti se preveri z izrazom:

$$\frac{1,5 V_d}{A_{s,neto} f_{v,d}} \leq 1,0; \quad (4.26)$$

kjer so:

V_d ... projektna prečna sila na mestu spoja [kN],

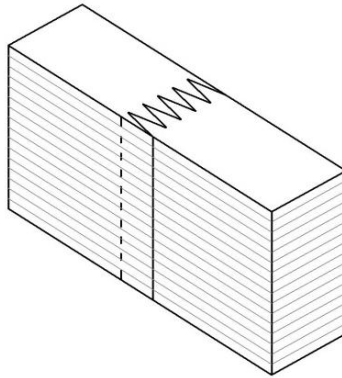
$f_{v,d}$... projektna strižna trdnost lepjenega lameliranega lesa [kN/cm²] in

$A_{s,neto}$... reducirani pomožni prerez [cm²].

Reducirani pomožni prerez [cm²] je definiran z izrazom:

$$A_{s,neto} = 0,67 \times 0,8 b h = 0,53 b h. \quad (4.27)$$

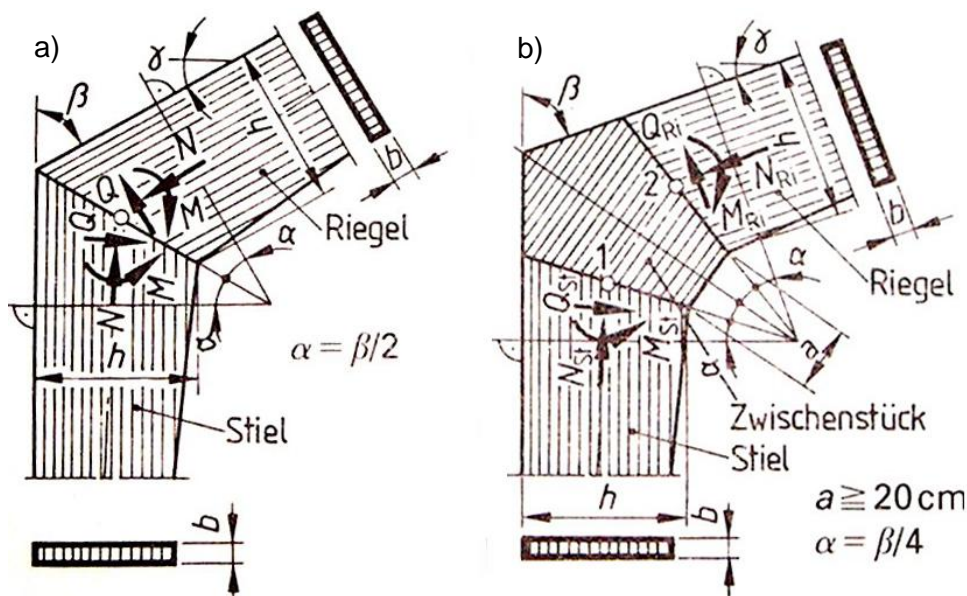
Pri dimenzioniranju preverimo tako osno – upogibno kot strižno kontrolo, upoštevamo pa tisto, ki nam da večje dimenzije prečnega prereza.



Slika 27: Del nosilca s polnim zobatim spojem

4.2 Standard DIN 1052

4.2.1 Enojni ali dvojni polni zobati spoj v vozlišču okvira



Slika 28: Vozlišče okvira z a) enojnim in b) dvojn timerzalnim polnim zobatim spojem (Neuhaus, 1994, str. 310)

Slika 28 prikazuje spajanje v vozlišču okvira z zobatimi spoji. Točka 1 oz 2 se nahaja tam, kjer srednjici elementov sekata zobati spoj. Dimenzije prečnih prereзов za kontrolo nosilnosti vzamemo iz prereзов, ki so definirani s kotom α , in so na sliki 28 kotirani z oznako h . Notranje statične količine za kontrolo odčitamo v točkah 1 in 2.

Porušitev se zgodi, ko je na mestu notranjega roba (Slika 6) dosežena dopustna napetost pod kotom α glede na smer vlaken. Analiza poteka v ravnini okvira, zato bi morale imeti uklonske količine in momenti indekse y , vendar smo jih zaradi preglednosti izpustili. Enačba mejnega stanja (Werner in Zimmer, 2010) se glasi:

$$\omega \frac{N_i}{A_n} + \frac{zul\sigma_{D,II} M_i}{zul\sigma_B W_n} \leq zul\sigma_{D,II} - (zul\sigma_{D,II} - zul\sigma_{D,\perp}) \sin\alpha. \quad (4.28)$$

Pri čemer so:

$zul\sigma_B$... dopustna upogibna napetost lepjenega lameliranega lesa [kN/cm^2],

$zul\sigma_{D,II}$... dopustna napetost lepjenega lameliranega lesa vzporedno z vlakni [kN/cm^2],

$zul\sigma_{D,\perp}$... dopustna napetost lepjenega lameliranega lesa pravokotno na vlakna [kN/cm^2],

α ... kot med smerjo vlaken elementa in pravokotnico na črto spoja [$^\circ$], glej enačbo (4.8),

N_i ... osna sila na mestu i [kN] ($i = 1$ oz. 2),

M_i ... upogibni moment na mestu i [kN cm] ($i = 1$ oz. 2),

A_n ... reducirani prečni prerez [cm^2] in

W_n ... reducirani odpornostni moment [cm^3].

Reducirani prečni prerez A_n [cm^2] je definiran z izrazom:

$$A_n = 0,8 b h, \quad (4.29)$$

kjer sta:

b ... širina nosilca [cm] s slike 28 in

h ... višina nosilca [cm] s slike 28.

Reducirani odpornostni moment W_n [cm^3] je definiran z izrazom:

$$W_n = \frac{0,8 b h^2}{6}. \quad (4.30)$$

a) Izračun uklonskega koeficienta ω

Vitkost elementa λ [-] je definirana z izrazom:

$$\lambda = \frac{l_i}{i}, \quad (4.31)$$

kjer so:

i ... vztrajnostni polmer stebra oz. prečke [cm]:

$$i = 0,289 H_S \text{ oz. } i = 0,289 H_P, \quad (4.32)$$

H_S ... višina prereza stebra pri 65 % višine stebra [cm] (Slika 25):

$$H_S = H_A + 0,65(H_E^S - H_A) \text{ in} \quad (4.33)$$

H_P ... višina prereza prečke pri 65 % dolžine prečke [cm] (Slika 25):

$$H_P = H_C + 0,65(H_E^P - H_C). \quad (4.34)$$

- Uklonska dolžina stebra $l_{i,S}$ [cm] je definirana kot:

$$l_{i,S} = 2 h_1 \sqrt{1 + 0,4 C}; \quad (4.35)$$

kjer sta:

h_1 ... višina stebra [cm] (Slika 25) in

C ... koeficient redukcije zaradi spremenljive višine elementov [-].

Koeficient redukcije zaradi spremenljive višine elementov C [-] je definiran z izrazom:

$$C = \frac{I_S 2 s}{I_P h_1} = \frac{\frac{b H_S^3}{12} 2 s}{\frac{b H_P^3}{12} h_1} = \left(\frac{H_S}{H_P}\right)^3 \frac{2 s}{h_1}, \quad (4.36)$$

pri čemer sta:

$I_{S,P}$... vztrajnostni moment stebra oz. prečke [cm^4] in

s ... dolžina prečke [cm] (Slika 25).

Vztrajnostni moment stebra oz. prečke [cm^4] se izračuna z izrazom:

$$I_{S,P} = \frac{b H_{S,P}^3}{12}. \quad (4.37)$$

- Uklonska dolžina prečke $l_{i,P}$ [cm] je definirana z izrazom:

$$l_{i,P} = l_{i,S} \cdot \sqrt{k_P}, \quad (4.38)$$

kjer sta:

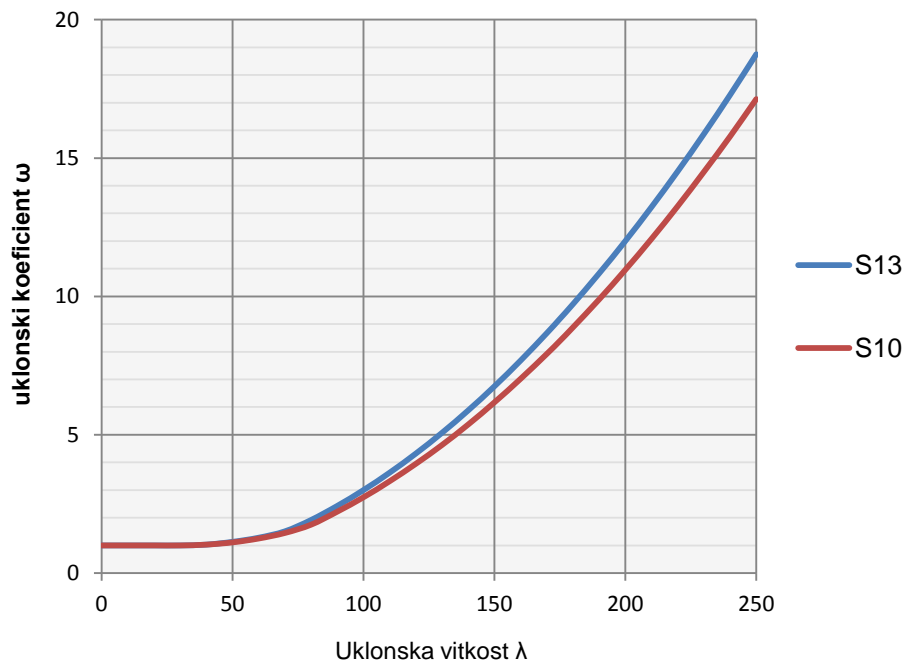
k_P ... koeficient za izračun uklonske dolžine prečke [-] in

$N_{S,P}$... povprečna vrednost osne sile v stebru oz. prečki [kN].

Koeficient za izračun uklonske dolžine prečke k_P [-] se izračuna kot:

$$k_P = \frac{I_P N_S}{I_S N_P}. \quad (4.39)$$

Uklonski koeficient ω [-] odčitamo v odvisnosti od vitkosti λ [-] v naslednjem grafu:



Slika 29: Graf $\omega = \omega(\lambda)$ pri različnih kvalitetah lepljenega lameliranega lesa

Preglednica 13 prikazuje primerjavo med karakterističnimi trdnostmi (f_k) lepljenega lameliranega lesa po standardih Evrokod (SIST EN 1194:2000) in med dopustnimi napetostmi ($zul \sigma$) po starih DIN standardih (DIN 1052 T1). Okvirne vrednosti dopustnih napetosti dobimo, če karakteristične vrednosti trdnosti delimo s skupno varnostjo proti poružitvi. Skupna varnost proti poružitvi je zmnožek varnosti na obremenitev, varnosti na material in »varnosti« zaradi trajanja obtežbe (Beg in Pogačnik, 2009).

Preglednica 13: Primerjave trdnosti lepljenega lameliranega lesa po Evrokod standardih z dopustnimi napetostmi lepljenega lameliranega lesa po starih DIN standardih

Standard		SIST EN 1194:2000				DIN 1052 T1 (stari)			Enote
Kvaliteta lesa		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h		S10	S13	
Upogib	$f_{m,g,k}$	2,4	2,8	3,2	3,6	$zul \sigma_B$	1,1	1,4	[kN/cm ²]
Nateg	$f_{t,0,g,k}$	1,65	1,95	2,25	2,6	$zul \sigma_{Z, }$	0,85	1,05	
	$f_{t,90,g,k}$	0,04	0,045	0,05	0,06	$zul \sigma_{Z,\perp}$	0,02	0,02	
Tlak	$f_{c,0,g,k}$	2,4	2,65	2,9	3,1	$zul \sigma_{D, }$	0,85	1,1	
	$f_{c,90,g,k}$	0,27	0,3	0,33	0,36	$zul \sigma_{D,\perp}$	0,25	0,25	
Strig	$f_{v,g,k}$	0,27	0,32	0,38	0,43	$zul \tau_Q$	0,12	0,12	

4.2.2 Zobati spoj pri ravnem nosilcu konstantne višine

Podobno kot pri standardih Evrokod tudi tu preverimo kombinacijo upogibnih in osnih napetosti ter strižne napetosti.

a) Kontrola osno – upogibnih napetosti v primeru, ko ni nevarnosti bočne zvrnitve:

$$\frac{N/A_n}{zul\sigma_{D,||}} + \frac{M/W_n}{zul\sigma_B} \leq 1,0 \quad \text{ali} \quad \frac{N/A_n}{zul\sigma_{Z,||}} + \frac{M/W_n}{zul\sigma_B} \leq 1,0. \quad (4.40)$$

Pri čemer so:

$zul\sigma_{D,||}$... dopustna tlačna napetost lepljenega lameliranega lesa vzporedno z vlakni [kN/cm²],

$zul\sigma_{Z,||}$... dopustna natezna napetost lepljenega lameliranega lesa vzporedno z vlakni [kN/cm²],

$zul\sigma_B$... dopustna upogibna napetost lepljenega lameliranega lesa [kN/cm²],

N ... osna sila na mestu spoja [kN],

M ... upogibni moment na mestu spoja [kN cm],

A_n ... reducirani prečni prerez [cm²] in

W_n ... reducirani odpornostni moment [cm³].

Reducirani prečni prerez A_n [cm²] je definiran z izrazom:

$$A_n = 0,8 b h, \quad (4.41)$$

kjer sta:

b ... širina nosilca [cm] in

h ... višina nosilca na mestu spoja [cm].

Reducirani odpornostni moment W_n [cm³] se izračuna z izrazom:

$$W_n = \frac{0,8 b h^2}{6}. \quad (4.42)$$

b) Kontrola strižnih napetosti se preveri z izrazom:

$$\frac{1,5 V/A_n}{zul\tau_Q} \leq 1,0; \quad (4.43)$$

kjer so:

$zul\tau_Q$... dopustna strižna napetost lepljenega lameliranega lesa [kN/cm²],

V ... prečna sila na mestu spoja [kN] in

A_n ... reducirani prerez [cm^2], glej enačbo (4.41).

Merodajen je tisti pogoj, ki nam da večje dimenzije prečnega prereza.

5 PRIPOMOČEK ZA DIMENZIONIRANJE VELIKIH ZOBATIH SPOJEV

Ena izmed nalog pri izdelavi diplomske naloge je bila tudi izdelava računskega pripomočka za dimenzioniranje polnih zobatih spojev. Pripomoček je bil izdelan s pomočjo programa MS Excel in programskega jezika Visual Basic for Excel. Na naslednjih straneh so predstavljeni izgled, zasnova in delovanje programa.

Ob zagonu programa se odpre uvodni delovni list (Slika 30), ki od nas zahteva izbiro vrste spoja, ki bi ga radi obravnavali. Na izbiro imamo enojni in dvojni polni zobati spoj v vozlišču okvira ter zobati spoj na ravnem nosilcu. Izbiro potrdimo s klikom na sliko zelenega spoja.



Slika 30: Izbiro vrste spoja v programu

5.1 Enojni ali dvojni polni zobati spoj v vozlišču okvira

Če izberemo enojni ali dvojni zobati spoj pri okviru, nas program prestavi na delovni list, ki je sestavljen iz šestih vsebinsko različnih delov (segmentov). Uporabniški vmesnik je pri obeh primerih identičen, razlikuje se le v malenkostih, ki bodo predstavljene sproti. Program je sestavljen preprosto in intuitivno. Začnemo v zgornjem levem kotu pri prvem segmentu in nadaljujemo proti desni, če je več segmentov v vrsti. Ko segmentov zmanjka, se pomaknemo navzdol in skrajno levo. V segmentih velja pravilo, da začnemo tam, kjer to označuje oranžna puščica, ki nas vodi po oranžnih okencih čez cel segment. V vsako okence, ki je pobarvano oranžno, sami vnašamo/spreminjamo podatke. Okenca, ki so bela, se preračunajo/spremenijo sama od sebe oziroma ostanejo nespremenjena.

MATERIAL	Vrsta Lepljenega lameliranega lesa		Razred trajanja obtežbe			
	GL32h		S (kratkotrajna)			
$f_{m,k}$	2,80 [kN/cm ²]		k_{MOD}	0,9	$f_{m,d}$	2,02 [kN/cm ²]
$f_{c,0,k}$	2,65 [kN/cm ²]		Varnostni faktor za LLL		$f_{c,0,d}$	1,91 [kN/cm ²]
$f_{c,90,k}$	0,33 [kN/cm ²]				$f_{c,90,d}$	0,24 [kN/cm ²]
$f_{v,k}$	0,38 [kN/cm ²]		γ_M	1,25	$f_{v,d}$	0,27 [kN/cm ²]
$E_{0,mean}$	1370,00 [kN/cm ²]		$E_{0,mean}$	1096,00 [kN/cm ²]		
$E_{0,05}$	1110,00 [kN/cm ²]		$E_{0,05}$	888,00 [kN/cm ²]		
$G_{0,05}$	68,70 [kN/cm ²]		$G_{0,05}$	54,96 [kN/cm ²]		

Slika 31: Prvi segment, Material

5.1.1 Material

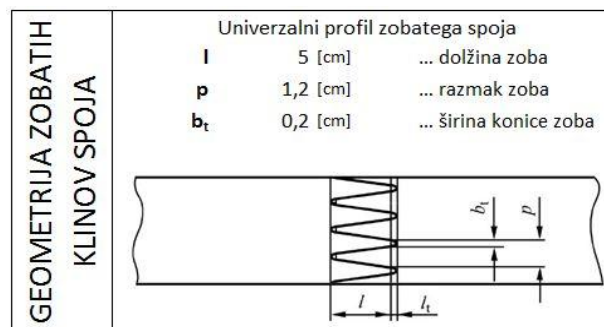
Prvi segment se imenuje *Material* (Slika 31). Tu izberemo vrsto lepljenega lameliranega lesa in trajanje obtežbe. Glede na izbiro program preračuna karakteristične in projektne vrednosti trdnosti, elastičnega modula in strižnega modula lepljenega lameliranega lesa. Za izbiro vrste lesa in razreda trajanja obtežbe se je uporabil gradnik Combo Box (Slika 32).

Vrsta Lepljenega lameliranega lesa	Razred trajanja obtežbe
GL32h	S (kratkotrajna)
GL28h	P (stalna)
GL32h	L (dolgotrajna)
GL36h	M (srednje dolga)
GL28c	S (kratkotrajna)
GL32c	I (trenutna)
GL36c	

Slika 32: Gradnik Combo Box

5.1.2 Geometrija zobatih klinov spoja

V tem segmentu ni nobeno okence pobarvano oranžno, zato tu ničesar ne spreminjamo. Slika 33 prikazuje, da so tu izbrane dimenzije zobatih klinov univerzalnega polnega zobatega spoja v skladu s standardom SIST EN 387:2002.



Slika 33: Segment Geometrija zobatih klinov spoja

5.1.3 Notranje sile v okviru

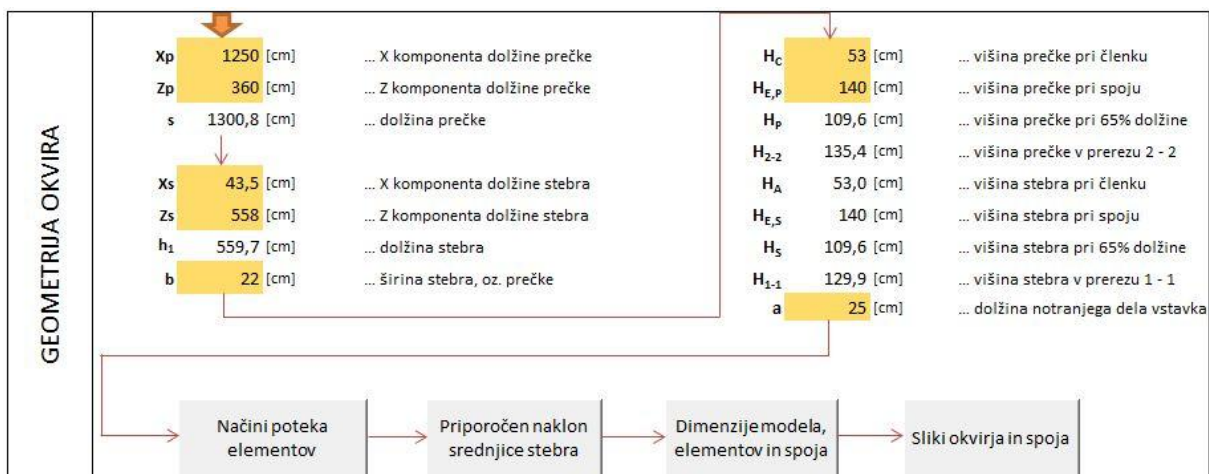
V oranžna okenca vnesemo absolutne vrednosti notranjih sil v okviru, ki smo jih izračunali s programom za izračun notranjih statičnih količin, ki deluje po metodi končnih elementov. Slika 34 prikazuje izgled segmenta.

NOTRANJE SILE V OKVIRU	OP.: Notranje sile iz točke E		
	N_{E,d}	146,4 [kN]	... osna sila v prečki
	V_{E,d}	89,0 [kN]	... prečna sila v prečki
	M_{E,d}	436,2 [kNm]	... upogibni moment v prečki
	N_{p,p}	127,8 [kN]	... povprečna osna sila v prečki
	N_{E,d}	147,0 [kN]	... osna sila v stebru
	V_{E,d}	108,5 [kN]	... prečna sila v stebru
	M_{E,d}	436,2 [kNm]	... upogibni moment v stebru
	N_{p,s}	150,6 [kN]	... povprečna osna sila v stebru

Slika 34: Segment Notranje sile v okviru

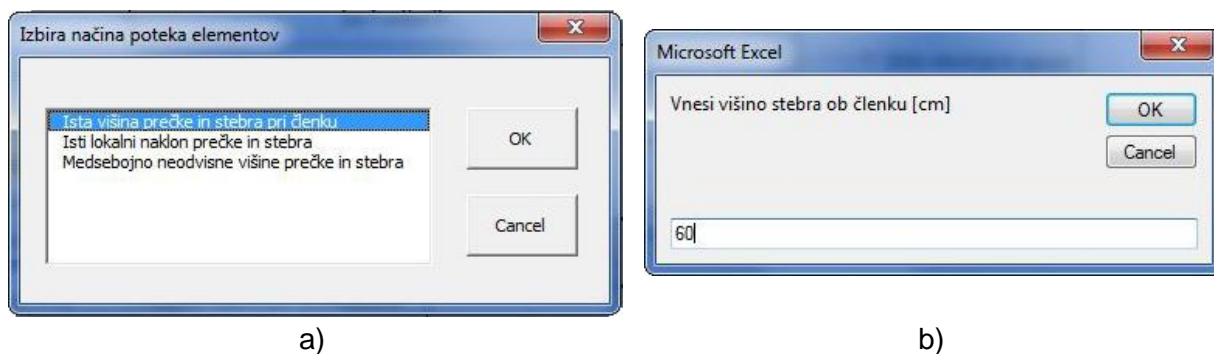
5.1.4 Geometrija okvira

S tem segmentom se določi geometrijo okvira, katerega elementi so spojeni s polnimi zobatimi spoji. Tu je potrebne največ interakcije z uporabnikom, saj so poleg oranžnih okenc, kamor vnašamo dimenzije okvira, prisotni tudi gumbi, s katerimi natančneje podamo geometrijo oz. pogledamo grafično upodobitev podanega okvira. Količine v oranžnih okencih so grafično prikazane, pogledamo jih s pritiskom na gumb *Dimenzije modela, elementov in spoja* (Slika 35).



Slika 35: Segment Geometrija okvira

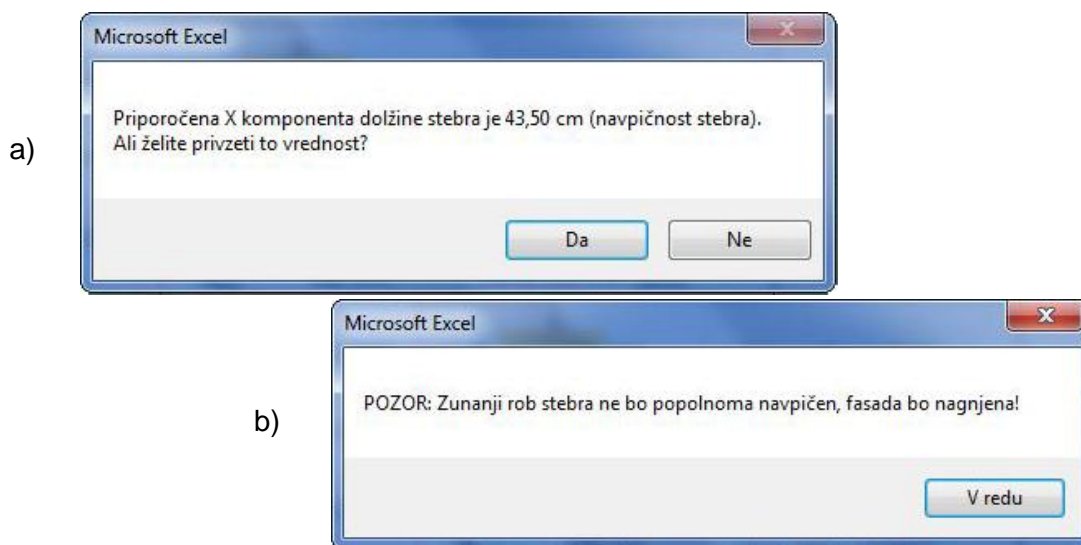
Gumb *Načini poteka elementov* odpre pogovorno okno z gradnikom List Box (Slika 36a), ki nam ponuja tri možnosti, od katerih so odvisne višine prečke oz. stebra pri členku. To posredno vpliva na lokalni naklon prečke oz. stebra. Prva izbira nam izenači višino stebra pri členku z višino prečke pri členku. Druga izbira nam izenači lokalni naklon stebra z lokalnim naklonom prečke. Pri tretji izbiri lastoročno vpišemo višino stebra ob členku preko pogovornega okna z gradnikom Input Box, kot je razvidno s slike 36b.



Slika 36: Izbira poteka elementov a) in vnos višine stebra b)

Dimenzije geometrije okvira podajamo glede na sredinske črte elementov, zato je težko brez izračuna določiti take vrednosti, da bo zunanji del stebra popolnoma navpičen. To je pomembno, saj običajno želimo imeti navpično fasado. Gumb *Priporočen naklon srednjice stebra* nam odpre pogovorno okno (Slika 37a) z gradnikom Msg Box, ki nam predlaga tak naklon stebra, da bo fasada navpična. Če potrdimo pogovorno okno, bo program samodejno

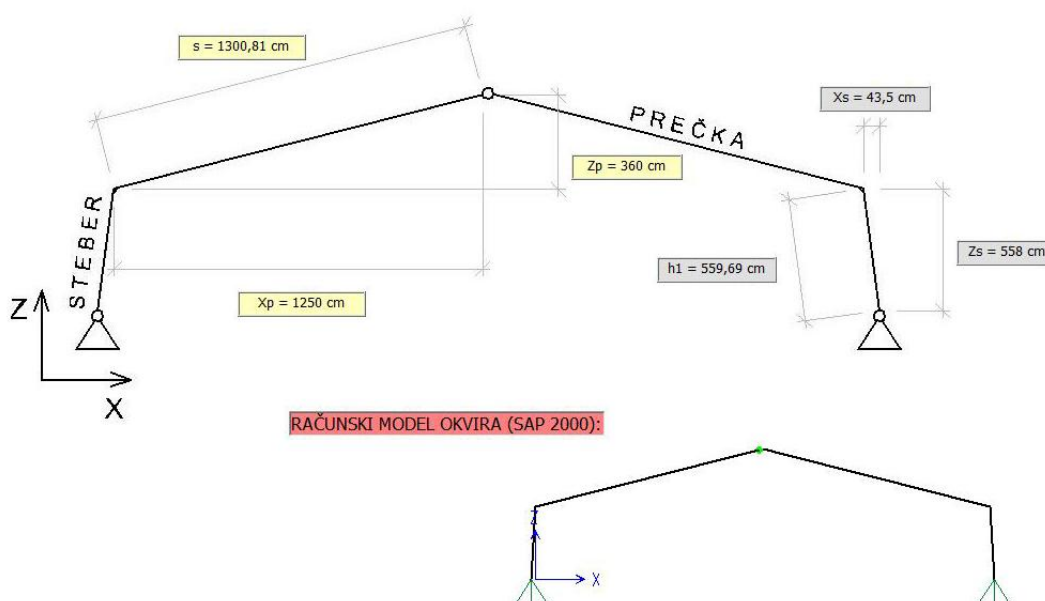
vnesel predlagano vrednost v oranžno okence; če pa kliknemo odgovor *Cancel*, pa se odpre dodatno pogovorno okno (Slika 37b). To nas opozori, da bo fasada okvira nagnjena.



Slika 37: Določanje navpičnosti stebra a) in opozorilo b)

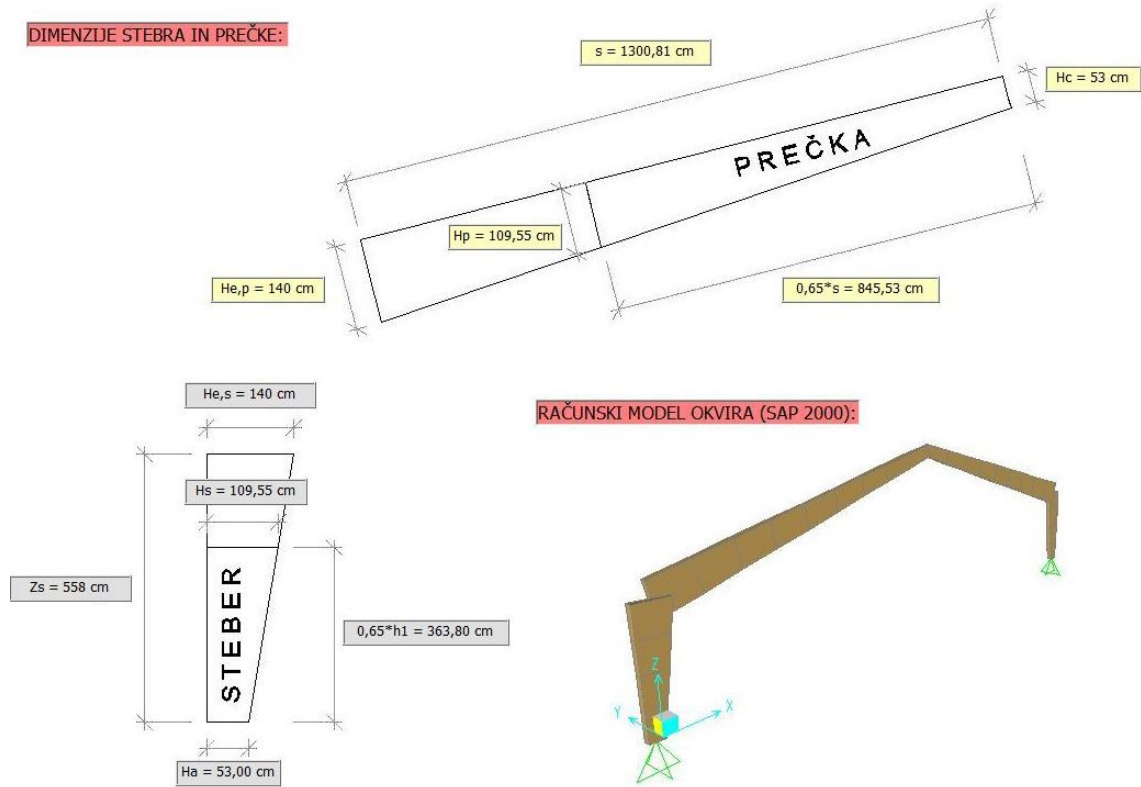
Segment nam ponuja tudi grafično predstavitev količin, ki smo jih vnesli. Gumb *Dimenzije modela, elementov in spoja* odpre okno s tremi zavihki. Prvi zavihek (Slika 38) se imenuje *Računski model* in prikazuje sliko računskega modela okvira, kotirano z vnešenimi količinami. Razviden je tudi $X - Z$ koordinatni sistem programa. Drugi zavihek (Slika 39) se imenuje *Nosilni elementi* in prikazuje kotirane dimenzije računskih modelov stebra in prečke. Tretji zavihek (Slika 40 in Slika 41) se pri enojnem in dvojnem polnem zobatem spoju razlikuje, prikazuje pa detajl spoja, kotiran z vnesenimi in posredno izračunanimi količinami.

DIMENZIJE KOMPONENT STEBRA IN PREČKE:

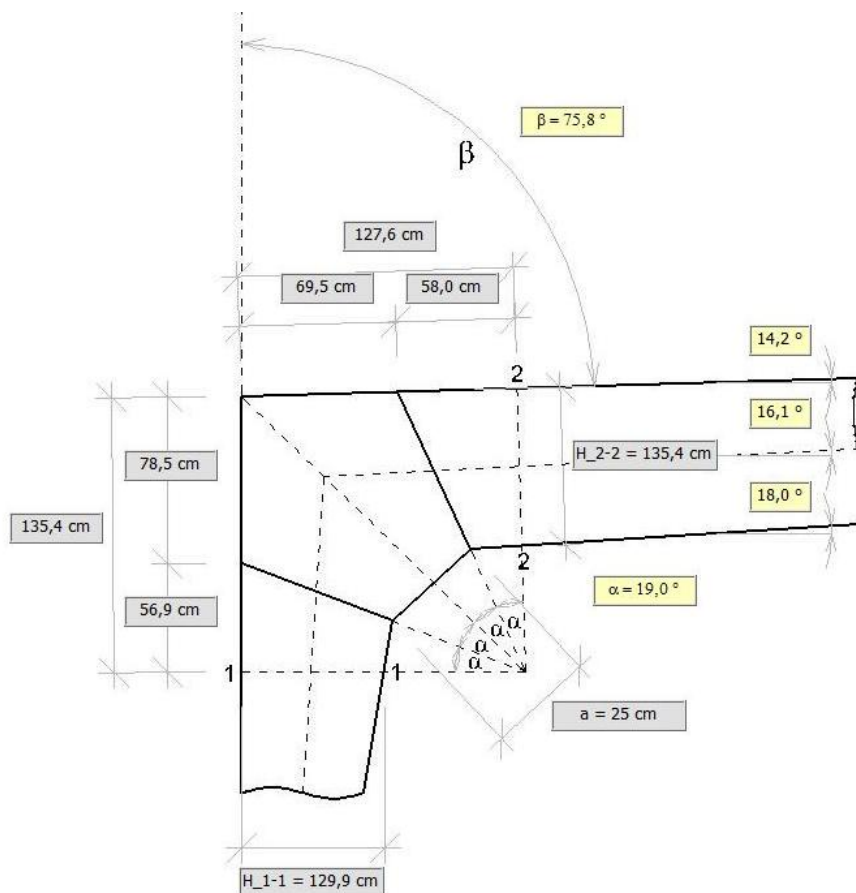


RAČUNSKI MODEL OKVIRA (SAP 2000):

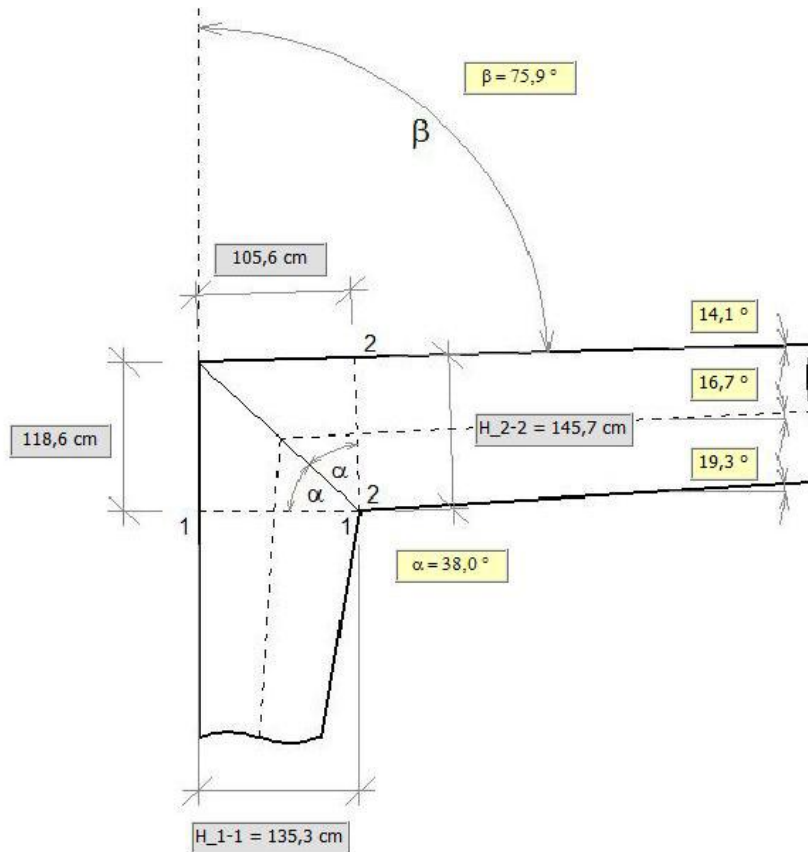
Slika 38: Primer prikaza v zavihku Računski model



Slika 39: Primer prikaza v zavihku Nosilni elementi

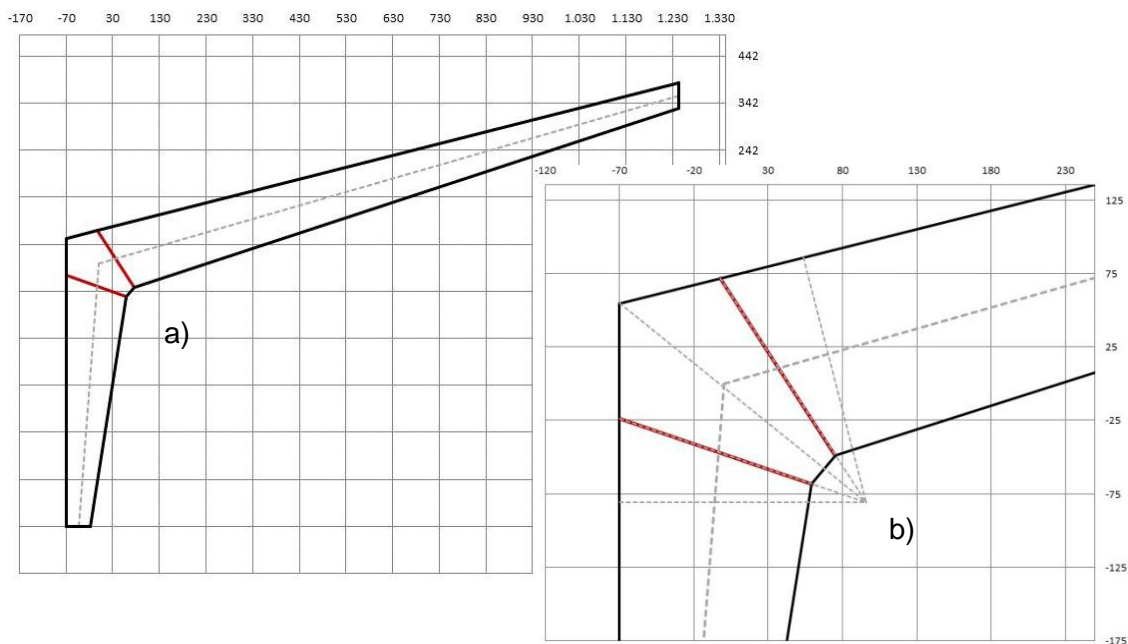


Slika 40: Primer prikaza v zavihku Območje spoja pri dvojnem zobatem spoju

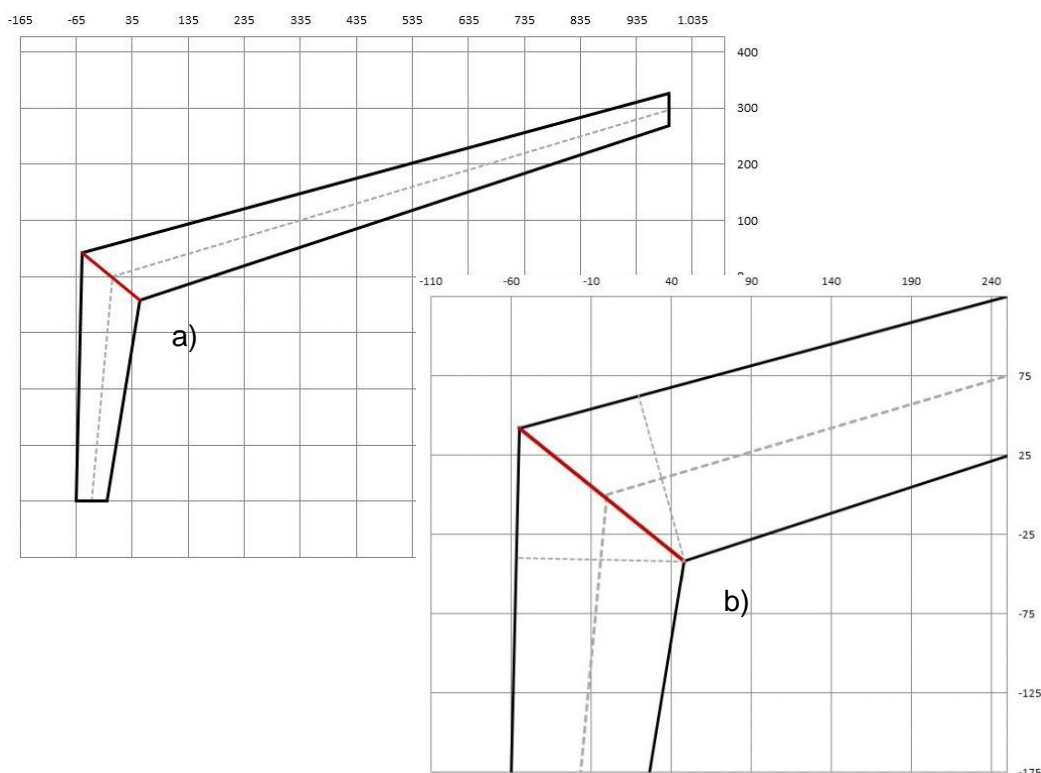


Slika 41: Primer prikaza v zavihku Območje spoja pri enojnem zobatem spoju

Četrty gumb *Sliki okvirja in spoja* nam odpre okno s skicama polovice okvirja in detajla spoja narisanimi v merilu. Na pogovornem oknu sta gumba *Prejšnji* in *Naslednji*, s katerima listamo med skicama. Seveda se skice pri enojnem in dvojnem polnem zobatem spoju med seboj razlikujejo.



Slika 42: Primer prikaza skice a) polovice okvirja in b) detajla spoja pri dvojnem polnem zobatem spoju



Slika 43: Primer prikaza skice a) polovice okvira in b) detajla spoja pri enojnem polnem zobatem spoju

5.1.5 Uklonske količine, geometrijske karakteristike, koti

Segment (Slika 44) prikazuje samodejno izračunane količine kot so: količine, ki jih potrebujemo pri računu uklona, posredne geometrijske karakteristike in konstrukcijski koti.

UKLONSKE KOLIČINE, GEO. KARAKTERISTIKE, KOTI	I_p	1647949,2 [cm ⁴]	... vztrajnostni moment prečke	$k_{y,p}$	1,054 []	
	I_s	1940598 [cm ⁴]	... vztrajnostni moment stebra	$k_{y,s}$	0,998 []	
	β_p	1,193 []	... koef. uklonske dolžine prečke	$k_{c,y,p}$	0,753 []	... uklonski koeficient prečke
	β_s	4,388 []	... koef. uklonske dolžine stebra	$k_{c,y,s}$	0,796 []	... uklonski koeficient stebra
	$I_{eff,p}$	1755,959 []	... uklonska dolžina prečke	$A_{NETO,p}$	2254,08 [cm ²]	... reducirani prečni prerez prečke
	$I_{eff,s}$	1755,173 []	... uklonska dolžina stebra	$W_{y,NETO,p}$	44104,83 [cm ³]	... reducirani odp. moment prečke
	$\lambda_{y,p}$	64,810 []	... uklonska vitkost prečke	$A_{NETO,s}$	2169,60 [cm ²]	... reducirani prečni prerez stebra
	$\lambda_{y,s}$	61,346 []	... uklonska vitkost stebra	$W_{y,NETO,s}$	40860,80 [cm ³]	... reducirani odp. moment stebra
	λ_z	28,835 []	... ukl. vitkost okrog Z osi ($l_{ef} \approx 2m$)	β	59,6 [°]	... kot med vertikalo in zgornjo linijo prečke
	$\lambda_{rel,c,y,p}$	1,018 []	... uklonska relativna vitkost prečke	α	14,9 [°]	... $\alpha = \beta/4$
	$\lambda_{rel,c,y,s}$	0,964 []	... uklonska relativna vitkost stebra			

Slika 44: Segment Uklonske količine, geometrijske karakteristike, koti

5.1.6 Kontrola zobatega spoja

Zadnji segment prikazuje kontrolo nosilnosti polnega zobatega spoja, ki je izračunana za steber in prečko. Kot je razvidno s slike 45, so dodani tudi barvni indikatorji, ki se obarvajo rdeče, če je nosilnost prekoračena oziroma zeleno, če nosilnost ni prekoračena.

KONTROLA ZOBATEGA SPOJA	$f_{c,a,d}$	1,001 [kN/cm ²]	$\frac{f_{c,o,d}}{f_{c,a,d}} \left(\frac{\sigma_{c,o,d}}{k_c f_{c,o,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \right) \leq 1$
	$\sigma_{c,o,d}^P$	0,065 [kN/cm ²]	0,881 ≤ 1
	$\sigma_{m,d}^P$	0,858 [kN/cm ²]	V REDU
		Zadosten H_2-2	118,9 [cm]
	$\sigma_{c,o,d}^S$	0,063 [kN/cm ²]	0,932 ≤ 1
	$\sigma_{m,d}^S$	0,914 [kN/cm ²]	V REDU
		Zadosten H_1-1	116,4 [cm]

Slika 45: Segment Kontrola zobatega spoja

5.2 Polni zobati spoj na ravnem nosilcu

Če na uvodni strani izberemo zobati spoj na ravnem nosilcu, nas program prestavi na delovni list, ki je kot v prejšnjem primeru sestavljen iz šestih vsebinsko različnih delov. Spet začnemo zgoraj levo in tudi druga pravila glede okenc, barv in puščic so enaka kot prej.

5.2.1 Material

Prvi segment je tudi tukaj *Material* (Slika 46). Tu izbereš vrsto lepljenega lameliranega lesa in trajanje obtežbe. Glede na izbiro ti program poračuna karakteristične in projektne vrednosti trdnosti. Za izbiro vrste lesa in trajanja obtežbe smo uporabili gradnik Combo Box.

MATERIAL	Vrsta lepljenega lameliranega lesa	GL36h	Razred trajanja obtežbe	S (kratkotrajna)
	$f_{m,k}$	3,20 [kN/cm ²]	k_{MOD}	0,9
	$f_{c,o,k}$	2,90 [kN/cm ²]	Varnostni faktor za LLL	
	$f_{t,o,k}$	2,25 [kN/cm ²]	γ_M	1,25
	$f_{v,k}$	0,38 [kN/cm ²]	$f_{m,d}$	2,30 [kN/cm ²]
			$f_{c,o,d}$	2,09 [kN/cm ²]
		$f_{t,o,d}$	1,62 [kN/cm ²]	
		$f_{v,d}$	0,27 [kN/cm ²]	

Slika 46: Segment Material

5.2.2 Geometrija zobatih klinov spoja

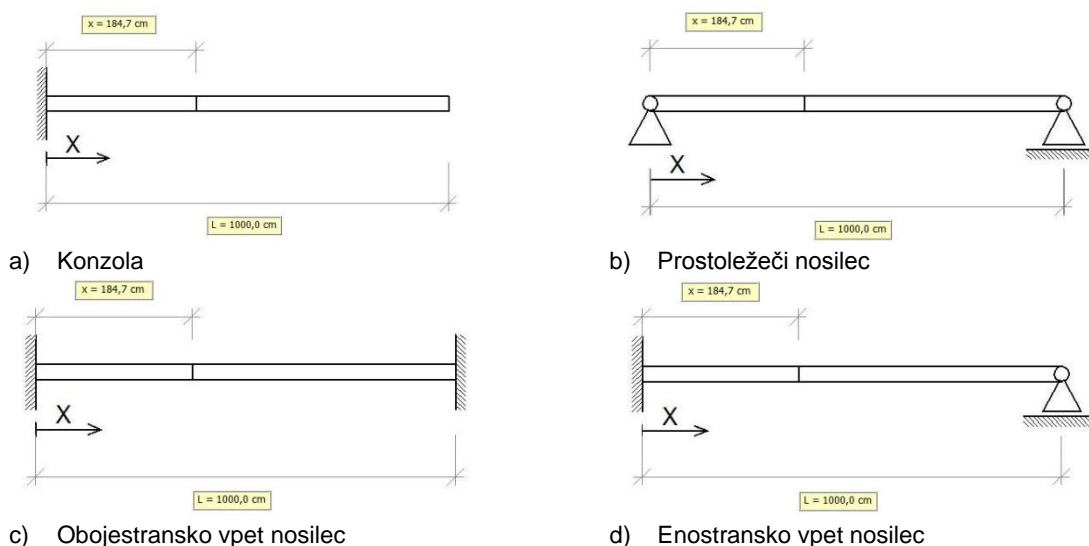
Drugi segment je *Geometrija zobatih klinov spoja* in je tako po izgledu, kot po vsebini identičen drugemu segmentu iz prejšnjega razdelka na sliki 33.

GEOMETRIJA IN TIP NOSILCA	L	1000 [cm]	... dolžina nosilca
	h	100 [cm]	... višina nosilca
	b	22 [cm]	... širina nosilca
	x	184,65 [cm]	... mesto spoja od roba nosilca
		Robni pogoji	Dimenzije modela in spoja
		Konzola	
		Prostoležeči nosilec	
		Obojestransko vpet nosilec	
		Enostransko vpet nosilec	

Slika 47: Segment Geometrija in tip nosilca

5.2.3 Geometrija in tip nosilca

V tem segmentu v oranžna okenca vnesemo količine, ki opišejo geometrijo konstrukcije, s klikom na gradnik Combo Box pa izberemo robne pogoje konstrukcije (Slika 47). S klikom na gumb *Dimenzije modela in spoja* se nam odpre okno, ki prikazuje skico računskega modela in detajla spoja. Skici sta tudi kotirani z vnesenimi oziroma izračunanimi količinami. Slika 48 prikazuje računske modele vseh štirih ponujenih konstrukcij.



Slika 48: Tipični računski modeli konstrukcij

5.2.4 Notranje sile v nosilcu

V oranžna okenca vnesemo vrednosti notranjih sil na mestu spoja. Predznak je tu pomemben, saj glede na predznak program določi, katero enačbo mejnega stanja bo uporabil pri kontroli nosilnosti. Segment je prikazan na sliki 49.

NOTRANJE SILE V NOSILCU	OP.: Notranje sile odčitamo na mestu spoja (predznak!)	
	N	123 [kN] ... osna sila na mestu spoja
	V	-64,49 [kN] ... prečna sila na mestu spoja
	M	435,27 [kNm] ... upog. moment na mestu spoja

Slika 49: Segment Notranje sile v nosilcu

5.2.5 Geometrijske karakteristike

Segment vsebuje samodejno izračunane geometrijske karakteristike, ki so potrebne za izračun napetosti ali za kontrolo mejnega stanja nosilnosti. Ker nobeno okence ni obarvano oranžno, ni potrebno ničesar spreminjati. Količine so prikazane na sliki 50.

GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE	I_y	1833333 [cm ⁴]	... vztrajnostni moment nosilca
	A	2200 [cm ²]	... površina prečnega prereza nosilca
	A_{NETO}	1760,00 [cm ²]	... reducirani prečni prerez nosilca
	$W_{y,NETO}$	29333,33 [cm ³]	... reducirani odp. moment nosilca
	$A_{s,NETO}$	1179,20 [cm ²]	... reducirani pomožni prerez nosilca

Slika 50: Segment Geometrijske karakteristike

5.2.6 Kontrola zobatega spoja

Zadnji segment vsebuje strižno in osno – upogibno kontrolo nosilnosti spoja. Upoštevamo tisti pogoj, ki nam da večje prečne prereze nosilca. Kot je razvidno s slike 51, so dodani tudi barvni indikatorji, ki se obarvajo rdeče, če je nosilnost prekoračena oziroma zeleno, če nosilnosti nismo prekoračili.

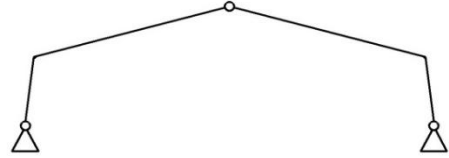
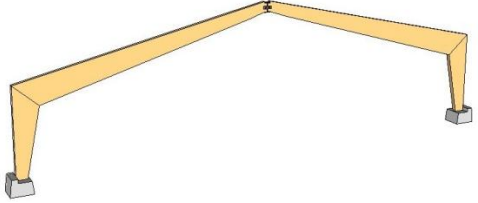
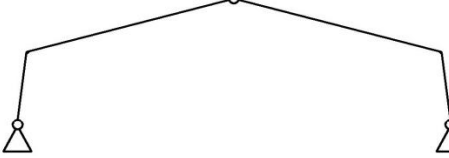
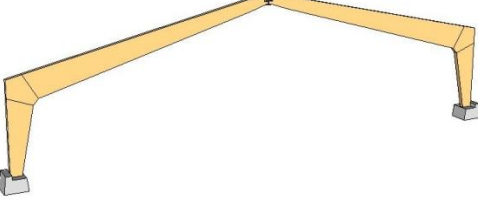
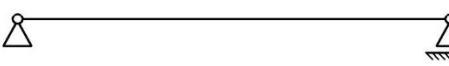
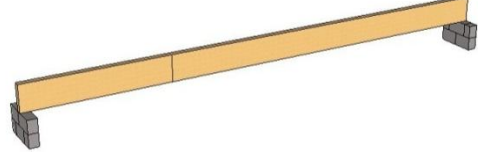
KONTROLA ZOBATEGA SPOJA	Strižna kontrola:	V REDU	
		0,428 ≤ 1	
	Zadosten H	33,0 [cm]	
	Osno - upogibna kontrola:	PREKORAČENO!	
	$\sigma_{c,0,d}, \sigma_{t,0,d}$	0,100 [kN/cm ²]	1,257 > 1
	$\sigma_{m,d}$	2,753 [kN/cm ²]	Potreben H 86,0 [cm]
		PREKORAČENO!	Potreben H 86,0 [cm]

Slika 51: Segment Kontrola zobatega spoja

6 RAČUNSKI PRIMERI

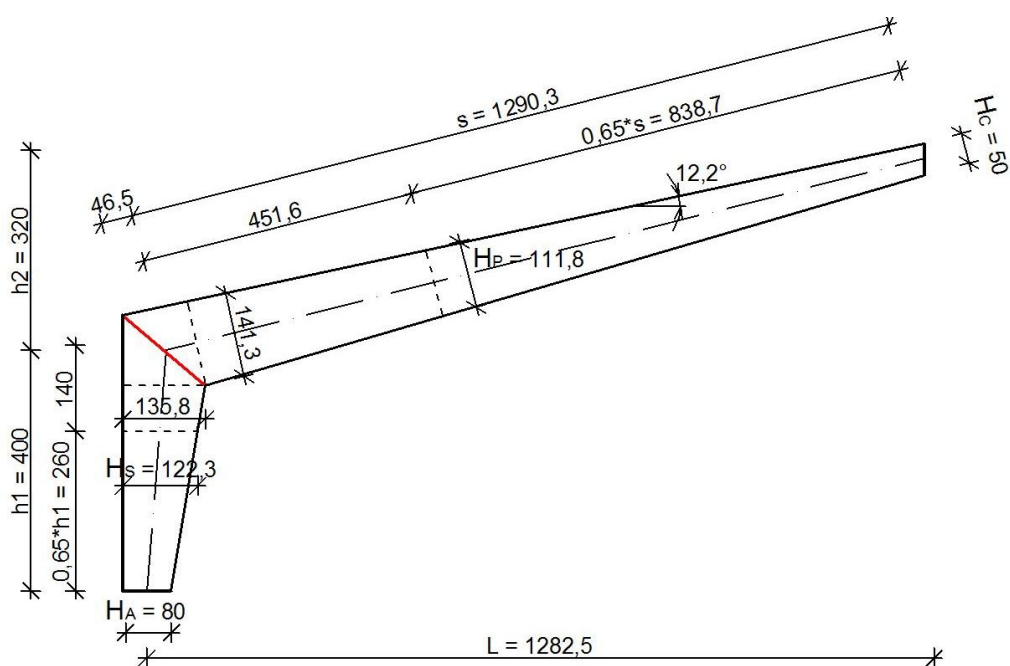
V tem poglavju so podani trije računski primeri s konstrukcijami, ki vsebujejo zobate spoje velikega formata, izračunane po standardih Evrokod in DIN. Najprej je obravnavan tročlenski okvir, ki je v vozliščih spojen z enojnimi oz. dvojnimi polnimi zobatimi spoji, nato pa še prostoležeči nosilec, ki je sestavljen iz dveh delov in spojen s polnim zobatim spojem.

Preglednica 14: Modeli konstrukcij pri računskih primerih

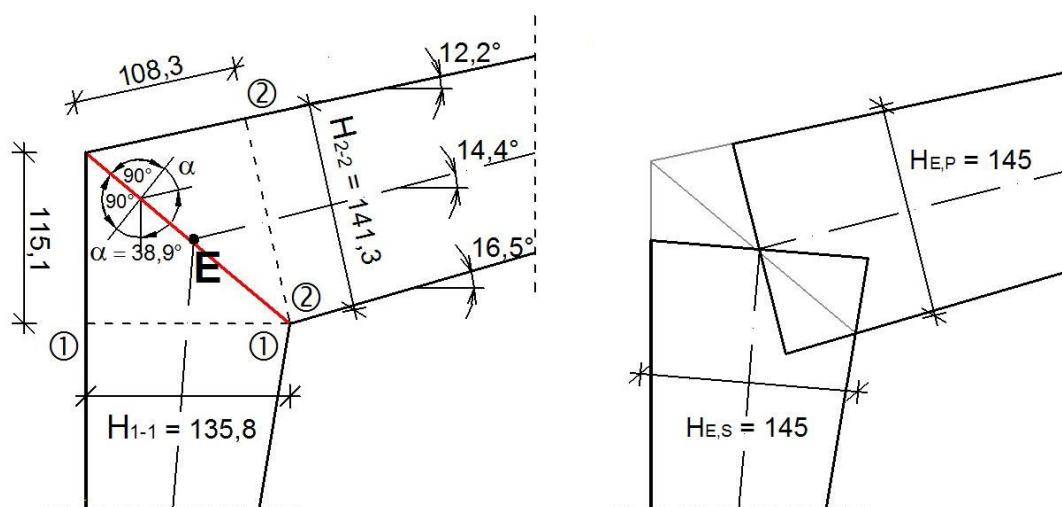
Ime	Računski model	3D model
Tročlenski okvir z enojnimi polnimi zobatimi spoji		
Tročlenski okvir z dvojnimi polnimi zobatimi spoji		
Prostoležeči nosilec spojen s polnim zobatim spojem		

6.1 Tročlenski okvir z enojnimi polnimi zobatimi spoji (Evrokod)

6.1.1 Zasnova



Slika 52: Polovica okvira z enojnim polnim zobatim spojem; enote v cm



Slika 53: Detajl enojnega polnega zobatega spoja v vozlišču; enote v cm

6.1.2 Podatki

Okvir je v vozliščih spojen z enojnimi univerzalnimi polnimi zobatimi spoji, tam kjer so rdeče črte na slikah 52 in 53. Razpon L je dolžine 25,65 m, osna razdalja med nosilci je 3,5 m. Sledeče količine so razvidne s slik 52 in 53:

$$h_1 = 400 \text{ cm}$$

$$h_2 = 320 \text{ cm}$$

$$H_A = 80 \text{ cm}$$

$$H_{E,S} = 145 \text{ cm}$$

$$H_{1-1} = 135,8 \text{ cm}$$

$$H_C = 50 \text{ cm}$$

$$H_{E,P} = 145 \text{ cm}$$

$$H_{2-2} = 141,3 \text{ cm}$$

$$b = 28 \text{ cm}$$

6.1.3 Obtežba

Obtežbo okvirne konstrukcije predstavljajo: stalna obtežba, koristna obtežba snega in koristna obtežba vetra. Obtežba je podrobno opisana in izračunana v prilogi A z naslovom *Obtežba okvirne konstrukcije*.

6.1.4 Materialne karakteristike

Material, iz katerega je izdelana okvirna konstrukcija, je lepljeni lamelirani les kvalitete GL36h. V izračunih uporabljamo vrednosti trdnosti $f_{m,k}$, $f_{c,0,k}$ in $f_{t,0,k}$, ki pripadajo lepljenemu lameliranemu lesu enega razreda nižje kvalitete (GL32h), da zajamemo poškodbe zaradi strojnega rezanja zobatih klinov. Ker imamo 2. razred uporabnosti in kratkotrajno obtežbo, velja $k_{mod} = 0,9$ (Preglednica 5).

Projektne trdnosti se izračunajo po enačbi (2.2), karakteristične vrednosti trdnosti lepljenega lameliranega lesa f_k pa so podane v preglednici 4.

$$f_{m,k} = 3,2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{m,d} = 0,9 \times \frac{3,2}{1,25} = 2,30 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{c,0,k} = 2,9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{c,0,d} = 0,9 \times \frac{2,9}{1,25} = 2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{t,0,k} = 2,25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{t,0,d} = 0,9 \times \frac{2,25}{1,25} = 1,62 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{c,90,k} = 0,36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{c,90,d} = 0,9 \times \frac{0,36}{1,25} = 0,26 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{v,d} = 0,38 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{v,d} = 0,9 \times \frac{0,38}{1,25} = 0,27 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$E_{0,mean} = 1470 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow E = \frac{E_{0,mean}}{\gamma_M} = \frac{1470}{1,25} = 1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$E_{0,05} = 1190 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

6.1.5 Kontrola napetosti

Vrednosti osnih sil (Preglednica A4) za izračun tlačnih napetosti vzamemo iz obtežne kombinacije za N_{MIN} , vrednosti upogibnih momentov (Preglednica A5) za izračun upogibnih napetosti vzamemo pa iz obtežne kombinacije za M_{MIN} (Rug in Mönck, 2008)

a) Tlačno napetost vzporedno z vlakni $\sigma_{c,0,d}$ [kN/cm²] se izračuna po izrazu (4.3):

$$\sigma_{c,0,d}^P = \frac{N_{E,d}^P}{A_{neto}^P} = \frac{146,4 \text{ kN}}{3165,1 \text{ cm}^2} = 0,046 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

$$\sigma_{c,0,d}^S = \frac{N_{E,d}^S}{A_{neto}^S} = \frac{147,0 \text{ kN}}{3041,9 \text{ cm}^2} = 0,048 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

kjer je $N_{E,d}$ absolutna vrednost projektne osne sile na mestu E [kN] (Priloga A, Preglednica A4).

A_{neto} je reducirani prečni prerez [cm²], definiran z izrazom (4.4):

$$A_{neto}^P = 0,8 b H_{2-2} = 0,8 \times 28 \text{ cm} \times 141,3 \text{ cm} = 2743,5 \text{ cm}^2,$$

$$A_{neto}^S = 0,8 b H_{1-1} = 0,8 \times 28 \text{ cm} \times 135,8 \text{ cm} = 3041,9 \text{ cm}^2.$$

b) Upogibno napetost $\sigma_{m,d}$ [kN/cm²] se izračuna po izrazu (4.5):

$$\sigma_{m,d}^P = \frac{M_{E,d}}{W_{neto}^P} = \frac{43620 \text{ kN cm}}{74538,6 \text{ cm}^3} = 0,585 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

$$\sigma_{m,d}^S = \frac{M_{E,d}}{W_{neto}^S} = \frac{43620 \text{ kN cm}}{68848,8 \text{ cm}^3} = 0,634 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

kjer je $M_{E,d}$ absolutna vrednost projektnega upogibnega momenta na mestu E [kN cm] (Priloga A, Preglednica A5).

W_{neto} je reducirani odpornostni moment [cm³], definiran z izrazom (4.6):

$$W_{neto}^P = \frac{0,8 b H_{2-2}^2}{6} = \frac{0,8 \times 28 \text{ cm} \times 141,3^2 \text{ cm}^2}{6} = 74538,6 \text{ cm}^3;$$

$$W_{neto}^S = \frac{0,8 b H_{1-1}^2}{6} = \frac{0,8 \times 28 \text{ cm} \times 135,8^2 \text{ cm}^2}{6} = 68848,8 \text{ cm}^3.$$

c) Tlačno trdnost lepjenega lameliranega lesa pod kotom α glede na vlakna $f_{c,\alpha,d}$ [kN/cm²] se izračuna po enačbi (4.7):

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,d}}{2 f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,d}}{1,5 f_{v,d}} \sin \alpha \cos \alpha\right)^2 + \cos^4 \alpha}}$$

$$= \frac{2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{\left(\frac{2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{2 \times 0,26 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \sin^2 38,9^\circ\right)^2 + \left(\frac{2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,5 \times 0,27 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \sin 38,9^\circ \cos 38,9^\circ\right)^2 + \cos^4 38,9^\circ}} = 0,688 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.$$

Pri čemer je α [°] kot med smerjo vlaken elementa in pravokotnico na linijo spoja, glej enačbo (4.8):

$$\alpha = \frac{\beta}{2} = \frac{90^\circ - \gamma}{2} = \frac{90^\circ - 12,2^\circ}{2} = 38,9^\circ;$$

kjer sta β kot med zgornjo stranico prečke in vertikalo [°], γ pa naklon strehe okvira [°].

d) Izračun uklonskega koeficienta k_c :

Vitkost elementa λ [-] je definirana z izrazom (4.9); z izrazoma (4.10) in (4.15) pa se izračuna potrebne geometrijske karakteristike:

$$\lambda_P = \frac{l_{ef,P}}{i_P} = \frac{1654,3 \text{ cm}}{32,31 \text{ cm}} = 51,20;$$

$$\lambda_S = \frac{l_{ef,S}}{i_S} = \frac{1743,7 \text{ cm}}{35,34 \text{ cm}} = 49,34;$$

$$i_P = 0,289 H_P = 0,289 \times 111,8 \text{ cm} = 32,31 \text{ cm};$$

$$i_S = 0,289 H_S = 0,289 \times 122,3 \text{ cm} = 35,34 \text{ cm};$$

$$I_P = \frac{b H_P^3}{12} = \frac{28 \text{ cm} \times 111,8^3 \text{ cm}^3}{12} = 3260635,1 \text{ cm}^4;$$

$$I_S = \frac{b H_S^3}{12} = \frac{28 \text{ cm} \times 122,3^3 \text{ cm}^3}{12} = 4268312,0 \text{ cm}^4.$$

→ Uklonska dolžina stebra $l_{ef,S}$ [cm] je definirana z izrazom (4.13):

$$l_{ef,S} = \beta_S h_1 = 4,359 \times 400 \text{ cm} = 1743,7 \text{ cm}.$$

Faktor za določitev uklonske dolžine stebra β_S se izračuna po enačbi (4.14):

$$\beta_S = \sqrt{4 + \frac{\pi^2 E I_S}{h_1} \left(\frac{1}{K_\phi} + \frac{s}{3 E I_P} \right) + \frac{E I_S N_{P,P} s^2}{E I_P N_{P,S} s^2}}$$

$$= \sqrt{4 + \frac{\pi^2 \times 1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 4,3 \times 10^6 \text{ cm}^4}{400 \text{ cm}} \left(\frac{1}{\infty} + \frac{1290,3 \text{ cm}}{3 \times 1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 3,3 \times 10^6 \text{ cm}^4} \right) + \frac{1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 4,3 \times 10^6 \text{ cm}^4 \times 127,8 \text{ kN} \times 1290,3^2 \text{ cm}^2}{1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 3,3 \times 10^6 \text{ cm}^4 \times 150,6 \text{ kN} \times 1290,3^2 \text{ cm}^2}}$$

$$= 4,359;$$

kjer sta $N_{P,S}$ oz. $N_{P,P}$ povprečni vrednosti osne sile v stebri oz. prečki [kN].

→ Uklonsko dolžino prečke $l_{ef,P}$ [cm] se izračuna po izrazu (4.16):

$$l_{ef,P} = \beta_P s = 1,282 \times 1290,3 \text{ cm} = 1654,3 \text{ cm}.$$

Faktor za določitev uklonske dolžine prečke β_P , glej enačbo (4.17):

$$\beta_P = \beta_S \sqrt{\frac{E I_P N_{P,S}}{E I_S N_{P,P}}} \frac{h_1}{s} = 4,359 \times \sqrt{\frac{1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 3,3 \times 10^6 \text{ cm}^4 \times 150,6 \text{ kN}}{1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 4,3 \times 10^6 \text{ cm}^4 \times 127,8 \text{ kN}}} \frac{400 \text{ cm}}{1290,3 \text{ cm}} = 1,282.$$

Relativno vitkost λ_{rel} [-] se izračuna po enačbi (4.18):

$$\lambda_{rel,P} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{51,20}{\pi} \sqrt{\frac{2,9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1190 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}} = 0,805;$$

$$\lambda_{rel,S} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{49,34}{\pi} \sqrt{\frac{2,9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1190 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}} = 0,775.$$

Faktor za določitev uklonskega koeficienta k , kjer je za lepjeni lamelirani les $\beta_c = 0,1$; se izračuna z izrazom (4.19):

$$k_P = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,P} - 0,3) + \lambda_{rel,P}^2) = 0,5(1 + 0,1(0,805 - 0,3) + 0,805^2) = 0,849;$$

$$k_S = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,S} - 0,3) + \lambda_{rel,S}^2) = 0,5(1 + 0,1(0,775 - 0,3) + 0,775^2) = 0,824.$$

Uklonski koeficient k_c se izračuna po izrazu (4.20):

$$k_{c,P} = \min \left\{ \frac{1}{k_P + \sqrt{k_P^2 - \lambda_{rel,P}^2}} = \frac{1}{0,849 + \sqrt{0,849^2 - 0,805^2}} = 0,893; \right.$$

$$\left. \frac{1}{1,0} \right.$$

$$k_{c,S} = \min \left\{ \frac{1}{k_S + \sqrt{k_S^2 - \lambda_{rel,S}^2}} = \frac{1}{0,824 + \sqrt{0,824^2 - 0,775^2}} = 0,906. \right.$$

$$\left. \frac{1}{1,0} \right.$$

Za kontrolo napetosti uporabimo enačbo (4.2):

$$\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,\alpha,d}} \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \right) \leq 1,0.$$

Prečka:
$$\frac{2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{0,694 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \left(\frac{0,046 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{0,893 \times 2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} + \frac{0,585 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{2,30 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \right) = 0,840 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

Steber:
$$\frac{2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{0,694 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \left(\frac{0,048 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{0,906 \times 2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} + \frac{0,634 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{2,30 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \right) = 0,906 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

Preglednica 15 prikazuje primerjavo med rezultati končne kontrole nosilnosti, ki so bili izračunani po »peš« postopku in rezultati, ki so bili izračunani z izdelanim pripomočkom v programu Microsoft Excel (Slika 54). Do minimalnih razlik pri rezultatih med načini izračuna je prišlo zaradi zaokroževanja.

Preglednica 15: Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom

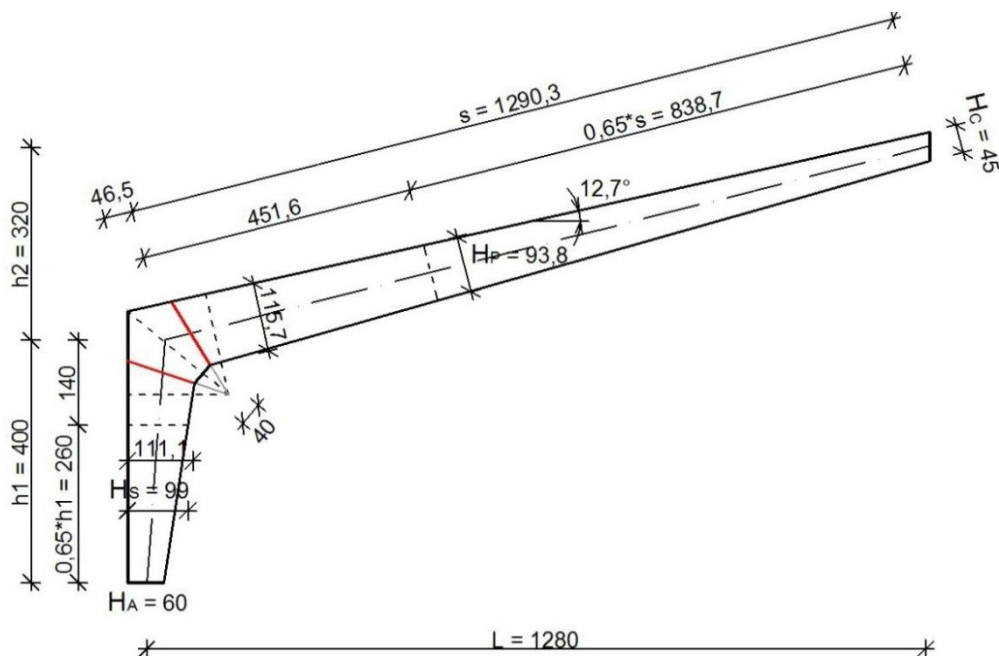
	»peš« izračun	Pripomoček za dimenzioniranje
Prečka	0,840	0,839
Steber	0,906	0,905

KONTROLA ZOBATEGA SPOJA	$f_{c,\alpha,d}$	0,694 [kN/cm ²]	$\frac{f_{c,o,d}}{f_{c,\alpha,d}} \left(\frac{\sigma_{c,o,d}}{k_c f_{c,o,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \right) \leq 1$
	$\sigma_{c,o,d}^P$	0,046 [kN/cm ²]	$0,839 \leq 1$
$\sigma_{m,d}^P$	0,585 [kN/cm ²]		Zadosten H_2-2 129,0 [cm]
$\sigma_{c,o,d}^S$	0,048 [kN/cm ²]	$0,905 \leq 1$	V REDU
$\sigma_{m,d}^S$	0,634 [kN/cm ²]		Zadosten H_1-1 128,9 [cm]

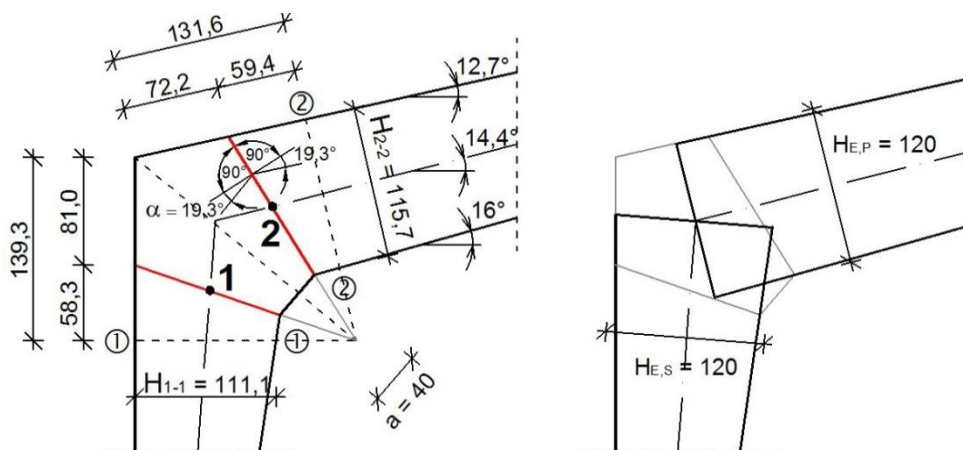
Slika 54: Rezultati kontrole nosilnosti enojnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje

6.2 Tročlenski okvir z dvojnimi polnimi zobatimi spoji (Evrokod)

6.2.1 Zasnova



Slika 55: Polovica okvira z dvojnimi polnimi zobatimi spojem; enote v cm



Slika 56: Detajl dvojnega polnega zobatega spoja v vozlišču; enote v cm

6.2.2 Podatki

Okvir je v vozliščih spojen z dvojnimi univerzalnimi polnimi zobatimi spoji, tam kjer so rdeče črte na slikah 55 in 56. Razpon L je dolžine 25,6 m, osna razdalja med nosilci je 3,5 m. Sledeče količine so razvidne iz slik 55 in 56:

$$h_1 = 400 \text{ cm}$$

$$h_2 = 320 \text{ cm}$$

$$H_A = 60 \text{ cm}$$

$$H_{E,S} = 120 \text{ cm}$$

$$H_{1-1} = 111,1 \text{ cm}$$

$$H_C = 45 \text{ cm}$$

$$H_{E,P} = 120 \text{ cm}$$

$$H_{2-2} = 115,7 \text{ cm}$$

$$a = 40 \text{ cm}$$

$$b = 24 \text{ cm}$$

6.2.3 Obtežba

Obtežbo okvirne konstrukcije predstavljajo: stalna obtežba, koristna obtežba snega in koristna obtežba vetra. Obtežba je podrobno opisana in izračunana v prilogi A z naslovom *Obtežba okvirne konstrukcije*.

6.2.4 Materialne karakteristike

Material, iz katerega je izdelana okvirna konstrukcija, je lepjeni lamelirani les kvalitete GL36h. V izračunih uporabljamo vrednosti trdnosti $f_{m,k}$, $f_{c,0,k}$ in $f_{t,0,k}$, ki pripadajo lepjenemu lameliranemu lesu enega razreda nižje kvalitete (GL32h), da zajamemo poškodbe zaradi strojnega rezanja zobatih klinov. Ker imamo 2. razred uporabnosti in kratkotrajno obtežbo, velja $k_{mod} = 0,9$ (Preglednica 5).

Projektne trdnosti se izračuna po enačbi (2.2), karakteristične vrednosti trdnosti lepjenega lameliranega lesa f_k so podane v preglednici 4:

$$f_{m,k} = 3,2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{m,d} = 0,9 \times \frac{3,2}{1,25} = 2,30 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{c,0,k} = 2,9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{c,0,d} = 0,9 \times \frac{2,9}{1,25} = 2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{t,0,k} = 2,25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{t,0,d} = 0,9 \times \frac{2,25}{1,25} = 1,62 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{c,90,k} = 0,36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{c,90,d} = 0,9 \times \frac{0,36}{1,25} = 0,26 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{v,d} = 0,38 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow f_{v,d} = 0,9 \times \frac{0,38}{1,25} = 0,27 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$E_{0,mean} = 1470 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \rightarrow E = \frac{E_{0,mean}}{\gamma_M} = \frac{1470}{1,25} = 1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$E_{0,05} = 1190 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

6.2.5 Kontrola napetosti

Vrednosti osnih sil (Preglednica A4) za izračun tlačnih napetosti vzamemo iz obtežne kombinacije za N_{MIN} , vrednosti upogibnih momentov (Preglednica A5) za izračun upogibnih napetosti vzamemo pa iz obtežne kombinacije za M_{MIN} (Rug in Mönck, 2008).

a) Tlačno napetost vzporedno z vlakni $\sigma_{c,0,d}$ [kN/cm²] se izračuna po izrazu (4.3):

$$\sigma_{c,0,d}^P = \frac{N_{E,d}^P}{A_{neto}^P} = \frac{146,4 \text{ kN}}{2221,4 \text{ cm}^2} = 0,066 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

$$\sigma_{c,0,d}^S = \frac{N_{E,d}^S}{A_{neto}^S} = \frac{147,0 \text{ kN}}{2133,1 \text{ cm}^2} = 0,069 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

kjer je $N_{E,d}$ abs. vrednost projektne osne sile na mestu E [kN] (Priloga A, Preglednica A4).

A_{neto} je reducirani prečni prerez [cm²], definiran z izrazom (4.4):

$$A_{neto}^P = 0,8 b H_{2-2} = 0,8 \times 24 \text{ cm} \times 115,7 \text{ cm} = 2221,4 \text{ cm}^2;$$

$$A_{neto}^S = 0,8 b H_{1-1} = 0,8 \times 24 \text{ cm} \times 111,1 \text{ cm} = 2133,1 \text{ cm}^2.$$

b) Upogibno napetost $\sigma_{m,d}$ [kN/cm²] se izračuna po izrazu (4.5):

$$\sigma_{m,d}^P = \frac{M_{2,d}}{W_{neto}^P} = \frac{40060 \text{ kN cm}}{42836,8 \text{ cm}^3} = 0,935 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

$$\sigma_{m,d}^S = \frac{M_{1,d}}{W_{neto}^S} = \frac{39280 \text{ kN cm}}{39498,3 \text{ cm}^3} = 0,994 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

kjer je $M_{i,d}$ absolutna vrednost projektne upogibnega momenta na mestu i [kN cm], $i = 1$ oz. 2; (Priloga A, Preglednica A5).

$M_{i,d}$ se izračuna po izrazu (4.1):

$$|M|_{2,d} = 43620 \text{ kN cm} - 40 \text{ cm} \times 89,0 \text{ kN} = 40060 \text{ kN cm},$$

$$|M|_{1,d} = 43620 \text{ kN cm} - 40 \text{ cm} \times 108,5 \text{ kN} = 39280 \text{ kN cm}.$$

W_{neto} je reducirani odpornostni moment [cm³], definiran z izrazom (4.6):

$$W_{neto}^P = \frac{0,8 b H_{2-2}^2}{6} = \frac{0,8 \times 24 \text{ cm} \times 115,7^2 \text{ cm}^2}{6} = 42836,8 \text{ cm}^3;$$

$$W_{neto}^S = \frac{0,8 b H_{1-1}^2}{6} = \frac{0,8 \times 24 \text{ cm} \times 111,1^2 \text{ cm}^2}{6} = 39498,3 \text{ cm}^3.$$

c) Tlačno trdnost lepljenega lameliranega lesa pod kotom α glede na vlakna $f_{c,\alpha,d}$ [kN/cm²] se izračuna po enačbi (4.7):

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,d}}{2 f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,d}}{1,5 f_{v,d}} \sin \alpha \cos \alpha\right)^2 + \cos^4 \alpha}} =$$

$$= \frac{2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{\left(\frac{2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{2 \times 0,26 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \sin^2 19,3^\circ\right)^2 + \left(\frac{2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,5 \times 0,27 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \sin 19,3^\circ \cos 19,3^\circ\right)^2 + \cos^4 19,3^\circ}} = 1,114 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.$$

Pri čemer je α [°] kot med smerjo vlaken elementa in pravokotnico na linijo spoja, glej enačbo (4.8):

$$\alpha = \frac{\beta}{4} = \frac{90^\circ - \gamma}{4} = \frac{90^\circ - 12,7^\circ}{4} = 19,3^\circ;$$

kjer sta β kot med zgornjo stranico prečke in vertikalo [°], γ pa naklon strehe okvira [°].

d) Izračun uklonskega koeficienta k_c :

Vitkost elementa λ [-] je definirana z izrazom (4.9); z izrazoma (4.10) in (4.15) pa se izračuna potrebne geometrijske karakteristike:

$$\lambda_P = \frac{l_{ef,P}}{i_P} = \frac{1673,5 \text{ cm}}{27,09 \text{ cm}} = 61,78;$$

$$\lambda_S = \frac{l_{ef,S}}{i_S} = \frac{1673,2 \text{ cm}}{28,61 \text{ cm}} = 58,48;$$

$$i_P = 0,289 H_P = 0,289 \times 93,75 \text{ cm} = 27,09 \text{ cm};$$

$$i_S = 0,289 H_S = 0,289 \times 99,00 \text{ cm} = 28,61 \text{ cm};$$

$$I_P = \frac{b H_P^3}{12} = \frac{24 \text{ cm} \times 93,75^3 \text{ cm}^3}{12} = 1647949,2 \text{ cm}^4;$$

$$I_S = \frac{b H_S^3}{12} = \frac{24 \text{ cm} \times 99,00^3 \text{ cm}^3}{12} = 1940598,0 \text{ cm}^4.$$

→ Uklonska dolžina stebra $l_{ef,S}$ [cm] je definirana z izrazom (4.13):

$$l_{ef,S} = \beta_S h_1 = 4,183 \times 400 \text{ cm} = 1673,2 \text{ cm}.$$

Faktor za določitev uklonske dolžine stebra β_S se izračuna po enačbi (4.14):

$$\beta_S = \sqrt{4 + \frac{\pi^2 E I_S}{h_1} \left(\frac{1}{K_\phi} + \frac{s}{3 E I_P} \right) + \frac{E I_S N_{P,P} s^2}{E I_P N_{P,S} s^2}}$$

$$= \sqrt{4 + \frac{\pi^2 \times 1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,9 \times 10^6 \text{ cm}^4}{400 \text{ cm}} \left(\frac{1}{\infty} + \frac{1290,3 \text{ cm}}{3 \times 1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,6 \times 10^6 \text{ cm}^4} \right) + \frac{1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,9 \times 10^6 \text{ cm}^4 \times 127,8 \text{ kN} \times 1290,3^2 \text{ cm}^2}{1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,6 \times 10^6 \text{ cm}^4 \times 150,6 \text{ kN} \times 1290,3^2 \text{ cm}^2}}$$

$$= 4,183;$$

kjer sta $N_{P,S}$ oz. $N_{P,P}$ povprečni vrednosti osne sile v stebru oz. prečki [kN].

→ Uklonsko dolžino prečke $l_{ef,P}$ [cm] se izračuna po izrazu (4.16):

$$l_{ef,P} = \beta_P s = 1,297 \times 1290,3 \text{ cm} = 1673,52 \text{ cm}.$$

Faktor za določitev uklonske dolžine prečke β_P , glej enačbo (4.17):

$$\beta_P = \beta_S \sqrt{\frac{E I_P N_{P,S}}{E I_S N_{P,P}}} \frac{h_1}{s} = 4,183 \times \sqrt{\frac{1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,6 \times 10^6 \text{ cm}^4 \times 150,6 \text{ kN}}{1176 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,9 \times 10^6 \text{ cm}^4 \times 127,8 \text{ kN}}} \frac{400 \text{ cm}}{1290,3 \text{ cm}} = 1,297.$$

Relativno vitkost λ_{rel} [-] se izračuna po enačbi (4.18):

$$\lambda_{rel,P} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{61,78}{\pi} \sqrt{\frac{2,9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1190 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}} = 0,971;$$

$$\lambda_{rel,S} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{58,48}{\pi} \sqrt{\frac{2,9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1190 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}} = 0,919.$$

Faktor za določitev uklonskega koeficienta k , kjer je za lepjeni lamelirani les $\beta_c = 0,1$; se izračuna z izrazom (4.19):

$$k_P = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,P} - 0,3) + \lambda_{rel,P}^2) = 0,5(1 + 0,1(0,971 - 0,3) + 0,971^2) = 1,005;$$

$$k_S = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,S} - 0,3) + \lambda_{rel,S}^2) = 0,5(1 + 0,1(0,919 - 0,3) + 0,919^2) = 0,953.$$

Uklonski koeficient k_c se izračuna po izrazu (4.20):

$$k_{c,P} = \min \left\{ \frac{1}{k_P + \sqrt{k_P^2 - \lambda_{rel,P}^2}} = \frac{1}{1,005 + \sqrt{1,005^2 - 0,971^2}} = 0,791; \right.$$

$$k_{c,S} = \min \left\{ \frac{1}{k_S + \sqrt{k_S^2 - \lambda_{rel,S}^2}} = \frac{1}{0,953 + \sqrt{0,953^2 - 0,919^2}} = 0,830. \right.$$

Za kontrolo napetosti uporabimo enačbo (4.2):

$$\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,\alpha,d}} \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \right) \leq 1,0.$$

Prečka: $\frac{2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,114 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \left(\frac{0,066 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{0,791 \times 2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} + \frac{0,935 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{2,30 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \right) = 0,838 \leq 1,0$ ✓

Steber: $\frac{2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,114 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \left(\frac{0,069 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{0,830 \times 2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} + \frac{0,994 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{2,30 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \right) = 0,885 \leq 1,0$ ✓

Preglednica 16 prikazuje primerjavo med rezultati končne kontrole nosilnosti, ki so bili izračunani po »peš« postopku in rezultati, ki so bili izračunani z izdelanim pripomočkom v programu Microsoft Excel (Slika 57). Do minimalnih razlik pri rezultatih med načini izračuna je prišlo zaradi zaokroževanja.

Preglednica 16: Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom

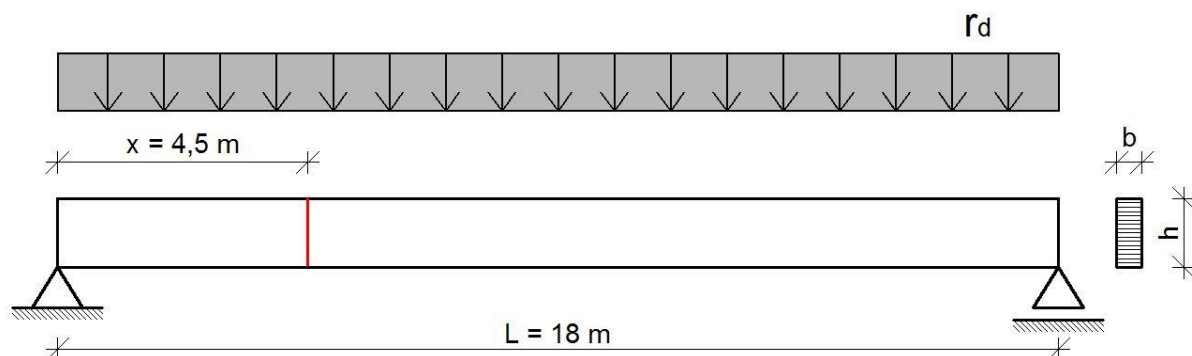
	»peš« izračun	Pripomoček za dimenzioniranje
Prečka	0,838	0,835
Steber	0,885	0,884

KONTROLA ZOBATEGA SPOJA	$f_{c,\alpha,d}$	1,114 [kN/cm ²]	$\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,\alpha,d}} \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \right) \leq 1$
	$\sigma_{c,0,d}^P$	0,066 [kN/cm ²]	
	$\sigma_{m,d}^P$	0,935 [kN/cm ²]	0,835 ≤ 1
			V REDU
			Zadosten H_2-2 105,3 [cm]
	$\sigma_{c,0,d}^S$	0,069 [kN/cm ²]	$\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,\alpha,d}} \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \right) \leq 1$
	$\sigma_{m,d}^S$	0,994 [kN/cm ²]	
			0,884 ≤ 1
			V REDU
			Zadosten H_1-1 104,2 [cm]

Slika 57: Rezultati kontrole nosilnosti dvojnega polnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje

6.3 Prostoležeči nosilec spojen s polnim zobatim spojem (Evrokod)

6.3.1 Zasnova



Slika 58: Raven nosilec spojen s polnim zobatim spojem

6.3.2 Podatki

Raven prostoležeči nosilec konstantne višine je na razdalji 4,5 m od leve podpore spojen z univerzalnim polnim zobatim spojem. Rdeča črta na sliki 58 ponazarja potek spoja. Razpon nosilca je 18 m.

6.3.3 Obtežba

Obtežbo konstrukcije predstavljata: stalna obtežba in koristna obtežba snega. Vrednost stalne obtežbe vsebuje tudi predpostavljeno lastno težo nosilca. Upoštevamo jo kot enakomerno porazdeljeno obtežbo, ki deluje na tekoči meter nosilca: $g = 4,5 \text{ kN/m}$ (stalna obtežba) in $q = 5,5 \text{ kN/m}$ (koristna obtežba snega).

Trajanje obtežbe pri merodajni obtežni kombinaciji je kratkotrajno ($k_{mod} = 0,9$). Projektna vrednost obtežbe je:

$$r_d = 1,35 g + 1,5 q = 1,35 \times 4,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 1,5 \times 5,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 14,33 \frac{\text{kN}}{\text{m}}.$$

6.3.4 Materialne karakteristike

Material, iz katerega je izdelana konstrukcija, je lepjeni lamelirani les kvalitete GL36h. V izračunih uporabljamo vrednosti trdnosti $f_{m,k}$, $f_{c,0,k}$ in $f_{t,0,k}$, ki pripadajo lesu enega razreda nižje kvalitete (GL32h), da zajamemo poškodbe zaradi strojnega rezanja zobatih klinov. Ker imamo 2. razred uporabnosti in kratkotrajno obtežbo, velja $k_{mod} = 0,9$ (Preglednica 5).

Projektne trdnosti se izračunajo po enačbi (2.2), karakteristične vrednosti trdnosti lepjenega lameliranega lesa f_k pa so podane v preglednici 4:

$$\begin{aligned} f_{m,k} = 3,2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} &\rightarrow f_{m,d} = 0,9 \times \frac{3,2}{1,25} = 2,30 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\ f_{c,0,k} = 2,9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} &\rightarrow f_{c,0,d} = 0,9 \times \frac{2,9}{1,25} = 2,09 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\ f_{t,0,k} = 2,25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} &\rightarrow f_{t,0,d} = 0,9 \times \frac{2,25}{1,25} = 1,62 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\ f_{v,d} = 0,38 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} &\rightarrow f_{v,d} = 0,9 \times \frac{0,38}{1,25} = 0,27 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \end{aligned}$$

6.3.5 Določitev geometrije nosilca

Iz pogoja, da niso prekoračene strižne napetosti ob podpori, se določi minimalna višina nosilca:

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 V_d}{A_S} \leq f_{v,d} \quad \rightarrow \quad h_{min} = \frac{1,5 \times 129,0 \text{ kN}}{0,67 \times 20 \text{ cm} \times 0,18 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 80,22 \text{ cm.}$$

Kjer so:

$$A_S \dots \text{ pomožni prerez nosilca,} \quad A_S = \frac{2}{3} b h,$$

$b = 20 \text{ cm}$ (izbrana širina nosilca) in

$$V_d = r_d \frac{L}{2} = 14,33 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 9 \text{ m} = 129,0 \text{ kN.}$$

Izberem $h = 100 \text{ cm}$.

6.3.6 Obremenitev na mestu spoja

$$M_{S,d} = \frac{r_d \cdot L \cdot x}{2} - \frac{r_d \cdot x^2}{2} = \frac{14,33 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 18 \text{ m} \cdot 4,5 \text{ m}}{2} - \frac{14,33 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 4,5^2 \text{ m}^2}{2} = 435,27 \text{ kN m}$$

$$V_{S,d} = r_d \cdot x - \frac{r_d \cdot L}{2} = 14,33 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 4,5 \text{ m} - \frac{14,33 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 18 \text{ m}}{2} = -64,49 \text{ kN}$$

$$N_{S,d} = 0 \text{ kN}$$

6.3.7 Kontrola napetosti

a) Kontrola osno – upogibnih napetosti, glej enačbo (4.21):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0 \quad \text{ali} \quad \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0;$$

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{1,632 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{2,30 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 0,710 \leq 1,0. \quad \checkmark$$

Tlačne oziroma natezne napetosti ne računamo, ker nimamo osne obremenitve, zato je enaka nič.

Upogibno napetost $\sigma_{m,d}$ [kN/cm²] se izračuna po izrazu (4.24):

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{S,d}}{W_{neto}} = \frac{43527 \text{ kN cm}}{26666,7 \text{ cm}^3} = 1,632 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

kjer je W_{neto} reducirani odpornostni moment [cm³], definiran z izrazom (4.25):

$$W_{neto} = \frac{0,8 b h^2}{6} = \frac{0,8 \times 20 \text{ cm} \times 100^2 \text{ cm}^2}{6} = 26666,7 \text{ cm}^3.$$

b) Kontrola strižnih napetosti, glej enačbo (4.26):

$$\frac{1,5 V_d}{A_{S,neto} f_{v,d}} \leq 1,0;$$

$$\frac{1,5 \times 64,49 \text{ kN}}{1072 \text{ cm}^2 \times 0,27 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 0,334 \leq 1,0. \quad \checkmark$$

Reducirani pomožni prerez $A_{s,neto}$ [cm²] je definiran z izrazom (4.27):

$$A_{s,neto} = 0,67 \times 0,8 b h = 0,536 b h = 0,53 \times 20 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} = 1072 \text{ cm}^2.$$

Preglednica 17 prikazuje primerjavo med rezultati končne kontrole nosilnosti, ki so bili izračunani po »peš« postopku in rezultati, ki so bili izračunani z izdelanim pripomočkom v programu Microsoft Excel (Slika 59). Do minimalnih razlik pri rezultatih med načini izračuna je prišlo zaradi zaokroževanja.

Preglednica 17: Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom

	»peš« izračun	Pripomoček za dimenzioniranje
Kontrola osno – upogibnih napetosti	0,710	0,708
Kontrola strižnih napetosti	0,334	0,330

KONTROLA ZOBATEGA SPOJA	Strižna kontrola:	V REDU	} V REDU
		0,330 ≤ 1	
	Zadosten H	33,0 [cm]	
	Osno - upogibna kontrola:	V REDU	
	$\sigma_{c,0,d}, \sigma_{t,0,d}$ 0,000 [kN/cm ²]	0,708 ≤ 1	
	$\sigma_{m,d}$ 1,632 [kN/cm ²]	Zadosten H 84,2 [cm]	
			Zadosten H 84,2 [cm]

Slika 59: Rezultati kontrole nosilnosti polnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje

6.4 Tročlenski okvir z enojnimi polnimi zobatimi spoji (DIN)

6.4.1 Zasnova

Geometrija okvira je enaka kot pri računskem primeru z uporabo standardov Evrokod v razdelku 6.1 *Tročlenski okvir z enojnimi polnimi zobatimi spoji (Evrokod)*. Okvir je prikazan na slikah 52 in 53.

6.4.2 Podatki

Okvir je v vozliščih spojen z enojnimi univerzalnimi polnimi zobatimi spoji, tam kjer so rdeče črte na slikah 52 in 53. Razpon L je dolžine 25,65 m, osna razdalja med nosilci je 3,5 m. Sledeče količine so razvidne s slik 52 in 53:

$$h_1 = 400 \text{ cm}$$

$$h_2 = 320 \text{ cm}$$

$$H_A = 80 \text{ cm}$$

$$H_{E,S} = 145 \text{ cm}$$

$$H_{1-1} = 135,8 \text{ cm}$$

$$H_C = 50 \text{ cm}$$

$$H_{E,P} = 145 \text{ cm}$$

$$H_{2-2} = 141,3 \text{ cm}$$

$$b = 28 \text{ cm}$$

6.4.3 Obtežba

Obtežbo okvirne konstrukcije predstavljajo: stalna obtežba, koristna obtežba snega in koristna obtežba vetra. Obtežba glede na standard DIN se ni posebej računala, ampak smo uporabili obtežbo iz Priloge A (A.2 *Obtežba okvirne konstrukcije*) brez varnostnih faktorjev $\gamma_G = 1,35$ in $\gamma_Q = 1,50$. Tako so se vrednosti obtežb z reducirale za cca. 25 do 30 %.

6.4.4 Materialne karakteristike

Material, iz katerega je izdelana okvirna konstrukcija, je lepljeni lamelirani les kvalitete S13. Za boljšo predstavbo, kako kvaliteten je ta lepljeni lamelirani les, glej preglednico 13, ki prikazuje primerjavo med trdnostnimi razredi lepljenega lameliranega lesa po standardih Evrokod in med razredi dopustnih napetosti lepljenega lameliranega lesa po starih DIN standardih.

Dopustne napetosti, uporabljene v izračunih:

$$zul\sigma_B = 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$zul\sigma_{D||} = 1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$zul\sigma_{D\perp} = 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$zul\tau_Q = 0,12 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

6.4.5 Kontrola napetosti

Vrednosti osnih sil (Preglednica A6), ki nastopajo v kontroli napetosti, vzamemo iz obtežne kombinacije za N_{MIN} , vrednosti upogibnih momentov (Preglednica A6), ki nastopajo v kontroli napetosti, pa iz obtežne kombinacije za M_{MIN} .

Reducirani prečni prerez A_n [cm²] je definiran z izrazom (4.29):

$$A_n^P = 0,8 b H_{2-2} = 0,8 \times 28 \text{ cm} \times 141,3 \text{ cm} = 3165,1 \text{ cm}^2;$$

$$A_n^S = 0,8 b H_{1-1} = 0,8 \times 28 \text{ cm} \times 135,8 \text{ cm} = 3041,9 \text{ cm}^2.$$

Reducirani odpornostni moment W_{neto} [cm³] je definiran z izrazom (4.30):

$$W_n^P = \frac{0,8 b H_{2-2}^2}{6} = \frac{0,8 \times 28 \text{ cm} \times 141,3^2 \text{ cm}^2}{6} = 74538,6 \text{ cm}^3;$$

$$W_n^S = \frac{0,8 b H_{1-1}^2}{6} = \frac{0,8 \times 28 \text{ cm} \times 135,8^2 \text{ cm}^2}{6} = 68848,8 \text{ cm}^3.$$

→ Izračun dopustne tlačne napetosti pod kotom α glede na vlakna $zul\sigma_{D,\angle}$ [kN/cm²], glej enačbo (4.28):

$$zul\sigma_{D,\angle} = zul\sigma_{D,||} - (zul\sigma_{D,||} - zul\sigma_{D,\perp}) \sin\alpha = 1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} - \left(1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} - 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}\right) \times \sin 38,9^\circ = 0,566 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.$$

α [°] je kot med smerjo vlaken elementa in pravokotnico na črto spoja glej enačbo (4.8):

$$\alpha = \frac{\beta}{2} = \frac{90^\circ - \gamma}{2} = \frac{90^\circ - 12,2^\circ}{2} = 38,9^\circ;$$

kjer sta β kot med zgornjo stranico prečke in vertikalo, γ pa naklon strehe okvira [°].

→ Izračun uklonskega koeficienta ω :

Vitkost elementa λ [-] je definirana z izrazom (4.31):

$$\lambda_P = \frac{l_{i,P}}{i_P} = \frac{1587,1 \text{ cm}}{32,31 \text{ cm}} = 49,12;$$
$$\lambda_S = \frac{l_{i,S}}{i_S} = \frac{1673,9 \text{ cm}}{35,34 \text{ cm}} = 47,37.$$

Vztrajnostni polmer prečke oz. stebra [cm] se izračuna z izrazom (4.32):

$$i_P = 0,289 H_P = 0,289 \times 111,8 \text{ cm} = 32,31 \text{ cm},$$
$$i_S = 0,289 H_S = 0,289 \times 122,3 \text{ cm} = 35,34 \text{ cm}.$$

Vztrajnostni moment prečke oz. stebra [cm], glej enačbo (4.37):

$$I_P = \frac{b H_P^3}{12} = \frac{28 \text{ cm} \times 111,8^3 \text{ cm}^3}{12} = 3260635,1 \text{ cm}^4;$$
$$I_S = \frac{b H_S^3}{12} = \frac{28 \text{ cm} \times 122,3^3 \text{ cm}^3}{12} = 4268312,0 \text{ cm}^4.$$

Uklonska dolžina stebra $l_{i,S}$ [cm] se izračuna po izrazu (4.35):

$$l_{i,S} = 2 h_1 \sqrt{1 + 0,4 C} = 2 \times 400 \text{ cm} \times \sqrt{1 + 0,4 \times 8,445} = 1673,9 \text{ cm}.$$

Koeficient redukcije zaradi spremenljive višine elementov C je definiran z izrazom (4.36):

$$C = \left(\frac{H_S}{H_P}\right)^3 \frac{2 s}{h_1} = \left(\frac{122,3 \text{ cm}}{111,8 \text{ cm}}\right)^3 \frac{2 \times 1290,3 \text{ cm}}{400 \text{ cm}} = 8,445.$$

Uklonska dolžina prečke $l_{i,P}$ [cm] je definirana z izrazom (4.38):

$$l_{i,P} = l_{i,S} \cdot \sqrt{k_P} = 1673,9 \text{ cm} \times \sqrt{0,899} = 1587,1 \text{ cm}.$$

Koeficient za izračun uklonske dolžine prečke k_P , glej enačbo (4.39):

$$k_P = \frac{I_P N_{P,S}}{I_S N_{P,P}} = \frac{3260635,1 \text{ cm}^4 \times 106,5 \text{ kN}}{4268312,0 \text{ cm}^4 \times 90,5 \text{ kN}} = 0,899;$$

kjer sta $N_{P,S}$ oz. $N_{P,P}$ povprečni vrednosti osne sile v stebru oz. prečki [kN].

Uklonski koeficient odčitamo z grafa $\omega = \omega(\lambda)$ (Slika 29):

$$\omega_P = 1,122;$$
$$\omega_S = 1,105.$$

→ Kontrolo napetosti preverimo po enačbi (4.28):

$$\omega \frac{N_i}{A_n} + \frac{zul\sigma_{D,II} M_i}{zul\sigma_B W_n} \leq zul\sigma_{D,\angle} = zul\sigma_{D,II} - (zul\sigma_{D,II} - zul\sigma_{D,\perp}) \sin\alpha;$$
$$\frac{\omega N_i}{zul\sigma_{D,\angle} A_n} + \frac{zul\sigma_{D,II} M_i}{zul\sigma_{D,\angle} zul\sigma_B W_n} \leq 1,0.$$

Prečka:
$$\frac{1,122 \times 103,5 \text{ kN}}{0,566 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 3165,1 \text{ cm}^2} + \frac{1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 31000 \text{ kN cm}}{0,566 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 74538,6 \text{ cm}^3} = 0,641 \leq 1,0$$
 ✓

$$\text{Steber: } \frac{1,105 \times 103,8 \text{ kN}}{0,566 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 3041,9 \text{ cm}^2} + \frac{1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 31000 \text{ kN cm}}{0,566 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 68848,8 \text{ cm}^3} = 0,692 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

Preglednica 18 prikazuje primerjavo med rezultati končne kontrole nosilnosti, ki so bili izračunani po »peš« postopku in rezultati, ki so bili izračunani z izdelanim pripomočkom v programu Microsoft Excel (Slika 60). Do minimalnih razlik pri rezultatih med načini izračuna je prišlo zaradi zaokroževanja.

Preglednica 18: Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom

	»peš« izračun	Pripomoček za dimenzioniranje
Prečka	0,641	0,642
Steber	0,692	0,691

KONTROLA ZOBATEGA SPOJA	zul $\sigma_{D,L}$ 0,567 [kN/cm ²]		$\omega \frac{N_i}{A_n} + \frac{zul\sigma_{D,II} M_i}{zul\sigma_B W_n} \leq zul\sigma_{D,II} - (zul\sigma_{D,II} - zul\sigma_{D,L}) \sin\alpha$
	σ_c^P 0,033 [kN/cm ²]	σ_m^P 0,416 [kN/cm ²]	
		V REDU	
σ_c^S 0,034 [kN/cm ²]	σ_m^S 0,450 [kN/cm ²]	0,691 ≤ 1	
		V REDU	

Slika 60: Rezultati kontrole nosilnosti enojnega polnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje

6.5 Tročlenski okvir z dvojnimi polnimi zobatimi spoji (DIN)

6.5.1 Zasnova

Geometrija okvira je enaka kot pri računskem primeru z uporabo standardov Evrokod v razdelku 6.2 *Tročlenski okvir z dvojnimi polnimi zobatimi spoji (Evrokod)*. Okvir je prikazan na slikah 55 in 56.

6.5.2 Podatki

Okvir je v vozliščih spojen z dvojnimi univerzalnimi polnimi zobatimi spoji, tam kjer so rdeče črte na slikah 55 in 56. Razpon L je dolžine 25,60 m, osna razdalja med nosilci je 3,5 m. Sledeče količine so razvidne s slik 55 in 56:

$$h_1 = 400 \text{ cm}$$

$$h_2 = 320 \text{ cm}$$

$$H_A = 60 \text{ cm}$$

$$H_{E,S} = 120 \text{ cm}$$

$$H_{1-1} = 111,1 \text{ cm}$$

$$H_C = 45 \text{ cm}$$

$$H_{E,P} = 120 \text{ cm}$$

$$H_{2-2} = 115,7 \text{ cm}$$

$$b = 24 \text{ cm}$$

$$a = 40 \text{ cm}$$

6.5.3 Obtežba

Obtežbo okvirne konstrukcije predstavljajo: stalna obtežba, koristna obtežba snega in koristna obtežba vetra. Obtežba glede na standard DIN se ni posebej računala, ampak smo uporabili obtežbo iz Priloge A (A.2 Obtežba okvirne konstrukcije) brez varnostnih faktorjev $\gamma_G = 1,35$ in $\gamma_Q = 1,50$. Tako so se vrednosti obtežb zreducirale za cca. 25 do 30 %.

6.5.4 Materialne karakteristike

Material, iz katerega je izdelana okvirna konstrukcija, je lepjeni lamelirani les kvalitete S13. Za boljšo predstavo, kako kvaliteten je ta lepjeni lamelirani les, glej preglednico 13, ki prikazuje primerjavo med trdnostnimi razredi lepjenega lameliranega lesa po standardih Evrokod in med razredi dopustnih napetosti lepjenega lameliranega lesa po starih DIN standardih.

Dopustne napetosti, uporabljene v izračunih:

$$\begin{aligned}zul\sigma_B &= 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\zul\sigma_{D||} &= 1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\zul\sigma_{D\perp} &= 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\zul\tau_Q &= 0,12 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}\end{aligned}$$

6.5.5 Kontrola napetosti

Vrednosti osnih sil (Preglednica A6), ki nastopajo v kontroli napetosti, vzamemo iz obtežne kombinacije za N_{MIN} , vrednosti upogibnih momentov (Preglednica A6), ki nastopajo v kontroli napetosti, pa iz obtežne kombinacije za M_{MIN} .

Reducirani prečni prerez A_n [cm²] je definiran z izrazom (4.29):

$$\begin{aligned}A_n^P &= 0,8 b H_{2-2} = 0,8 \times 24 \text{ cm} \times 115,7 \text{ cm} = 2221,4 \text{ cm}^2; \\A_n^S &= 0,8 b H_{1-1} = 0,8 \times 24 \text{ cm} \times 111,1 \text{ cm} = 2133,1 \text{ cm}^2.\end{aligned}$$

Reducirani odpornostni moment W_{neto} [cm³] je definiran z izrazom (4.30):

$$\begin{aligned}W_n^P &= \frac{0,8 b H_{2-2}^2}{6} = \frac{0,8 \times 24 \text{ cm} \times 115,7^2 \text{ cm}^2}{6} = 42836,8 \text{ cm}^3; \\W_n^S &= \frac{0,8 b H_{1-1}^2}{6} = \frac{0,8 \times 28 \text{ cm} \times 111,1^2 \text{ cm}^2}{6} = 39498,3 \text{ cm}^3.\end{aligned}$$

→ Izračun dopustne tlačne napetosti pod kotom α glede na vlakna $zul\sigma_{D,\angle}$ [kN/cm²], glej enačbo (4.28):

$$\begin{aligned}zul\sigma_{D,\angle} &= zul\sigma_{D,II} - (zul\sigma_{D,II} - zul\sigma_{D,L}) \sin\alpha = 1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} - \left(1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} - 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}\right) \times \sin 19,3^\circ = \\&0,819 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.\end{aligned}$$

α [°] je kot med smerjo vlaken elementa in pravokotnico na črto spoja, glej enačbo (4.8):

$$\alpha = \frac{\beta}{4} = \frac{90^\circ - \gamma}{4} = \frac{90^\circ - 12,7^\circ}{4} = 19,3^\circ;$$

kjer sta β kot med zgornjo stranico prečke in vertikalo, γ pa naklon strehe okvira [°].

→ Izračun uklonskega koeficienta ω :

Vitkost elementa λ [-] je definirana z izrazom (4.31):

$$\lambda_P = \frac{l_{i,P}}{i_P} = \frac{1607,6 \text{ cm}}{27,11 \text{ cm}} = 59,30;$$

$$\lambda_S = \frac{l_{i,S}}{i_S} = \frac{1606,8 \text{ cm}}{28,61 \text{ cm}} = 56,16.$$

Vztrajnostni polmer prečke oz. stebra [cm] se izračuna z izrazom (4.32):

$$i_P = 0,289 H_P = 0,289 \times 93,8 \text{ cm} = 27,11 \text{ cm};$$

$$i_S = 0,289 H_S = 0,289 \times 99,0 \text{ cm} = 28,61 \text{ cm}.$$

Vztrajnostni moment prečke oz. stebra [cm], glej enačbo (4.37):

$$I_P = \frac{b H_P^3}{12} = \frac{24 \text{ cm} \times 93,8^3 \text{ cm}^3}{12} = 1650587,3 \text{ cm}^4;$$

$$I_S = \frac{b H_S^3}{12} = \frac{24 \text{ cm} \times 99,0^3 \text{ cm}^3}{12} = 1940598,0 \text{ cm}^4.$$

Uklonska dolžina stebra $l_{i,S}$ [cm] se izračuna po izrazu (4.35):

$$l_{i,S} = 2 h_1 \sqrt{1 + 0,4 C} = 2 \times 400 \text{ cm} \times \sqrt{1 + 0,4 \times 7,585} = 1606,8 \text{ cm}.$$

Koeficient redukcije zaradi spremenljive višine elementov C je definiran z izrazom (4.36):

$$C = \left(\frac{H_S}{H_P}\right)^3 \frac{2 s}{h_1} = \left(\frac{99,0 \text{ cm}}{93,8 \text{ cm}}\right)^3 \frac{2 \times 1290,3 \text{ cm}}{400 \text{ cm}} = 7,585.$$

Uklonska dolžina prečke $l_{i,P}$ [cm] je definirana z izrazom (4.38):

$$l_{i,P} = l_{i,S} \cdot \sqrt{k_P} = 1606,8 \text{ cm} \times \sqrt{1,001} = 1607,6 \text{ cm}.$$

Koeficient za izračun uklonske dolžine prečke k_P , glej enačbo (4.39):

$$k_P = \frac{I_P N_{P,S}}{I_S N_{P,P}} = \frac{1650587,3 \text{ cm}^4 \times 106,5 \text{ kN}}{1940598,0 \text{ cm}^4 \times 90,5 \text{ kN}} = 1,001;$$

kjer sta $N_{P,S}$ oz. $N_{P,P}$ povprečni vrednosti osne sile v stebru oz. prečki [kN].

Uklonski koeficient odčitamo z grafa $\omega = \omega(\lambda)$ (Slika 29):

$$\omega_P = 1,271;$$

$$\omega_S = 1,224.$$

→ Kontrolo napetosti preverimo po enačbi (4.28):

$$\omega \frac{N_i}{A_n} + \frac{zul\sigma_{D,II} M_i}{zul\sigma_B W_n} \leq zul\sigma_{D,\angle} = zul\sigma_{D,II} - (zul\sigma_{D,II} - zul\sigma_{D,\perp}) \sin\alpha,$$

$$\frac{\omega N_i}{zul\sigma_{D,\angle} A_n} + \frac{zul\sigma_{D,II} M_i}{zul\sigma_{D,\angle} zul\sigma_B W_n} \leq 1,0.$$

Momente v točkah 1 in 2 se izračuna po izrazu (4.1)

$$|M|_2 = 31000 \text{ kN cm} - 40 \text{ cm} \times 63,4 \text{ kN} = 28464 \text{ kN cm},$$

$$|M|_1 = 31000 \text{ kN cm} - 40 \text{ cm} \times 76,9 \text{ kN} = 27924 \text{ kN cm}.$$

Prečka:
$$\frac{1,271 \times 103,5 \text{ kN}}{0,819 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 2221,4 \text{ cm}^2} + \frac{1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 28464 \text{ kN cm}}{0,819 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 42836,8 \text{ cm}^3} = 0,710 \leq 1,0$$
 ✓

Steber:
$$\frac{1,224 \times 103,8 \text{ kN}}{0,819 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 2133,1 \text{ cm}^2} + \frac{1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 27924 \text{ kN cm}}{0,819 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 39498,3 \text{ cm}^3} = 0,751 \leq 1,0$$
 ✓

Preglednica 19 prikazuje primerjavo med rezultati končne kontrole nosilnosti, ki so bili izračunani po »peš« postopku in rezultati, ki so bili izračunani z izdelanim pripomočkom v programu Microsoft Excel (Slika 61).

Preglednica 19: Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom

	»peš« izračun	Pripomoček za dimenzioniranje
Prečka	0,710	0,710
Steber	0,751	0,751

KONTROLA ZOBATEGA SPOJA	zul $\sigma_{D,\angle}$	0,819 [kN/cm ²]	$\frac{\omega \cdot N_i}{zul\sigma_{D,\angle} \cdot A_N} + \frac{zul\sigma_{D,II} \cdot M_i}{zul\sigma_{D,\angle} \cdot zul\sigma_B \cdot W_N} \leq 1,0$	
	σ_c^P	0,047 [kN/cm ²]	0,710	≤
σ_m^P	0,664 [kN/cm ²]	V REDU		
σ_c^S	0,049 [kN/cm ²]	0,751	≤	1
σ_m^S	0,707 [kN/cm ²]	V REDU		

Slika 61: Rezultati kontrole nosilnosti dvojnega polnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje

6.6 Prostoležeči nosilec spojen s polnim zobatim spojem (DIN)

6.6.1 Zasnova

Geometrija prostoležečega nosilca konstantne višine je enaka kot pri računskem primeru z uporabo standardov Evrokod v razdelku 6.3. Nosilec je prikazan na sliki 58.

6.6.2 Podatki

Raven prostoležeči nosilec konstantne višine je na razdalji 4,5 m od leve podpore spojen z univerzalnim polnim zobatim spojem. Rdeča črta na sliki 58 ponazarja potek spoja. Razpon nosilca je 18 m.

6.6.3 Obtežba

Obtežbo konstrukcije predstavljata: stalna obtežba in koristna obtežba snega. Vrednost stalne obtežbe vsebuje tudi predpostavljeno lastno težo nosilca. Upoštevamo jo kot enakomerno porazdeljeno obtežbo, ki deluje na tekoči meter nosilca: $g = 4,5 \text{ kN/m}$ (stalna obtežba) in $q = 5,5 \text{ kN/m}$ (koristna obtežba snega).

Obtežbo se izračuna na enak način kot pri računskem primeru z uporabo standardov Evrokod, le da imajo tu vsi delni faktorji vrednost 1.

$$r = g + q = 4,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 5,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

6.6.4 Materialne karakteristike

Material, iz katerega je izdelana okvirna konstrukcija, je lepljeni lamelirani les kvalitete S13. Za boljšo predstavbo, kako kvaliteten je ta lepljeni lamelirani les, glej preglednico 13, ki prikazuje primerjavo med trdnostnimi razredi lepljenega lameliranega lesa po standardih Evrokod in med razredi dopustnih napetosti lepljenega lameliranega lesa po starih DIN standardih.

Dopustne napetosti, uporabljene v izračunih:

$$zul\sigma_B = 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$zul\sigma_{D||} = 1,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$zul\sigma_{Z||} = 1,05 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$zul\tau_Q = 0,12 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

6.6.5 Določitev geometrije nosilca

Iz pogoja, da niso prekoračene strižne napetosti ob podpori, se določi minimalna višina nosilca:

$$\tau_{v,d} = \frac{1,5 V}{b h zul\tau_Q} \leq 1,0 \quad \rightarrow \quad h_{min} = \frac{1,5 \times 90 \text{ kN}}{20 \text{ cm} \times 0,12 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 56,25 \text{ cm};$$

kjer sta:

$b = 20 \text{ cm}$ (izbrana širina nosilca) in

$$V_P = r \frac{L}{2} = 10,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 9 \text{ m} = 90,0 \text{ kN}.$$

Izberem $h = 80 \text{ cm}$.

6.6.6 Obremenitev na mestu spoja

$$M_S = \frac{r \cdot L \cdot x}{2} - \frac{r \cdot x^2}{2} = \frac{10,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 18 \text{ m} \cdot 4,5 \text{ m}}{2} - \frac{10,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 4,5^2 \text{ m}^2}{2} = 303,75 \text{ kN m}$$

$$V_S = r \cdot x - \frac{r_d \cdot L}{2} = 10,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 4,5 \text{ m} - \frac{10,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 18 \text{ m}}{2} = -45,0 \text{ kN}$$

$$N_S = 0 \text{ kN}$$

6.6.7 Kontrola napetosti

a) Kontrola osno – upogibnih napetosti, glej enačbo (4.40):

$$\frac{N_S/A_n}{zul\sigma_{D,||}} + \frac{M_S/W_n}{zul\sigma_B} \leq 1,0 \quad \text{ali} \quad \frac{N_S/A_n}{zul\sigma_{Z,||}} + \frac{M_S/W_n}{zul\sigma_B} \leq 1,0.$$

Račun se poenostavi, ker nimamo osnih obremenitev. Za kontrolo uporabimo notranje statične količine z mesta spoja, ki smo jih predhodno izračunali.

$$\frac{M/W_n}{zul\sigma_B} = \frac{30375 \text{ kN cm}}{17066,7 \text{ cm}^3 \cdot 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 1,271 \geq 1,0 \quad \times$$

Povečam višino nosilca na 100 cm.

$$\frac{M/W_n}{zul\sigma_B} = \frac{30375 \text{ kN cm}}{26666,7 \text{ cm}^3 \cdot 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 0,813 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

Reducirani odpornostni moment W_{neto} [cm^3] je definiran z izrazom (4.42):

$$W_{neto} = \frac{0,8 b h^2}{6} = \frac{0,8 \times 20 \text{ cm} \times 80^2 \text{ cm}^2}{6} = 17066,7 \text{ cm}^3;$$

$$W_{neto} = \frac{0,8 b h^2}{6} = \frac{0,8 \times 20 \text{ cm} \times 100^2 \text{ cm}^2}{6} = 26666,7 \text{ cm}^3.$$

b) Kontrola strižnih napetosti, glej izraz (4.43):

$$\frac{1,5 V}{A_n zul\tau_Q} \leq 1,0;$$

$$\frac{1,5 \times 45 \text{ kN}}{1600 \text{ cm}^2 \times 0,12 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 0,351 \leq 1,0. \quad \checkmark$$

Reducirani prečni prerez A_n [cm^2] je definiran z izrazom (4.41):

$$A_n = 0,8 b h = 0,8 \times 20 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} = 1600 \text{ cm}^2.$$

Preglednica 20 prikazuje primerjavo med rezultati končne kontrole nosilnosti, ki so bili izračunani po »peš« postopku in rezultati, ki so bili izračunani z izdelanim pripomočkom v programu Microsoft Excel (Slika 62). Do minimalnih razlik pri rezultatih med načini izračuna je prišlo zaradi zaokroževanja.

Preglednica 20: Primerjava rezultatov "peš" izračuna in rezultatov dobljenih s pripomočkom

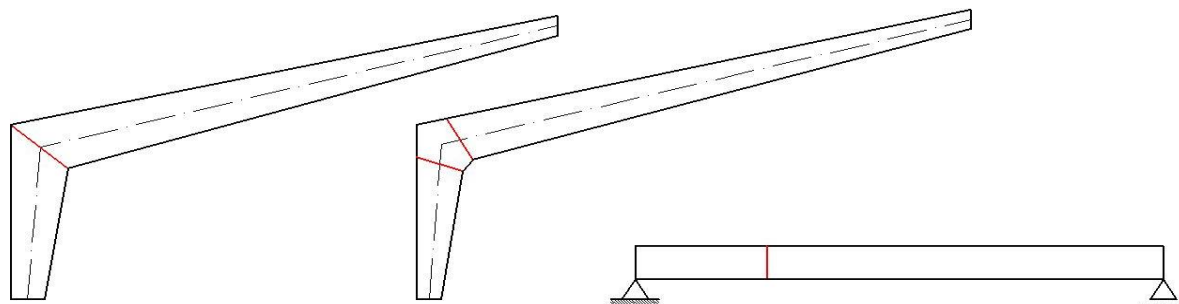
	»peš« izračun	Pripomoček za dimenzioniranje
Kontrola osno – upogibnih napetosti	0,813	0,814
Kontrola strižnih napetosti	0,351	0,352

KONTROLA ZOBATEGA SPOJA	Strižna kontrola:			
	$\frac{1,5 Q/A_n}{zul\tau_Q} \leq 1,0$		V REDU	
		0,352	≤	1
	Osno - upogibna kontrola:			
$\frac{N/A_n}{zul\sigma_{z, }} + \frac{M/W_n}{zul\sigma_B} \leq 1,0$		V REDU		
	0,814	≤	1	
$\frac{N/A_n}{zul\sigma_{D, }} + \frac{M/W_n}{zul\sigma_B} \leq 1,0$				
			V REDU	
		0,814	≤	1

Slika 62: Rezultati kontrole nosilnosti polnega zobatega spoja pri pripomočku za dimenzioniranje

7 ŠTUDIJA VPLIVOV RAZLIČNIH PARAMETROV NA NOSILNOST

Pripomoček za dimenzioniranje polnih zobatih spojev je omogočil, da so se izvedle različne primerjave in študije nosilnosti pri polnih zobatih spojih v vozliščih okvirnih konstrukcij ter na ravnih nosilcih konstantne višine. Spreminjali smo višine nosilcev, širine vstavkov in kvaliteto uporabljenega lepjenega lameliranega lesa ter opazovali posledično spreminjanje in obnašanje nosilnosti. Slika 63 prikazuje geometrijo uporabljenih modelov, ki je enaka kot pri Evrokod računskih primerih.

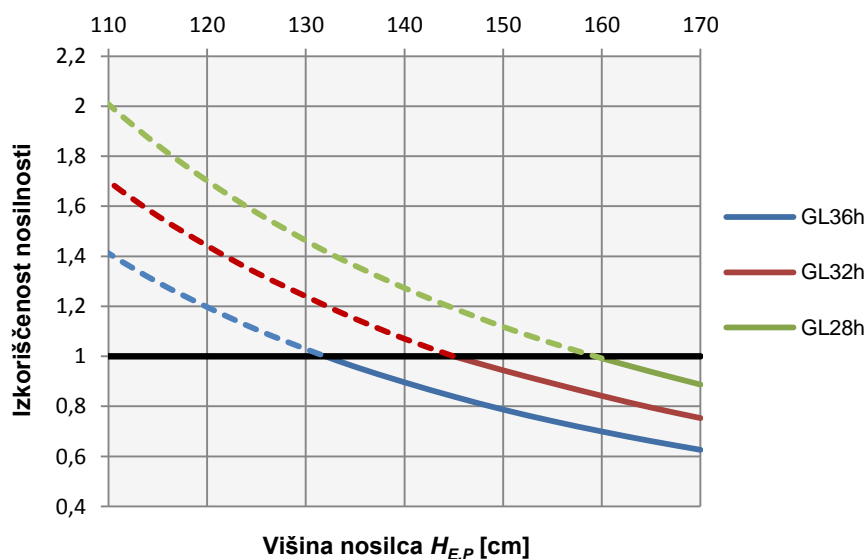


Slika 63: Geometrija uporabljenih elementov

7.1 Zobati spoji v vozliščih okvirnih konstrukcij

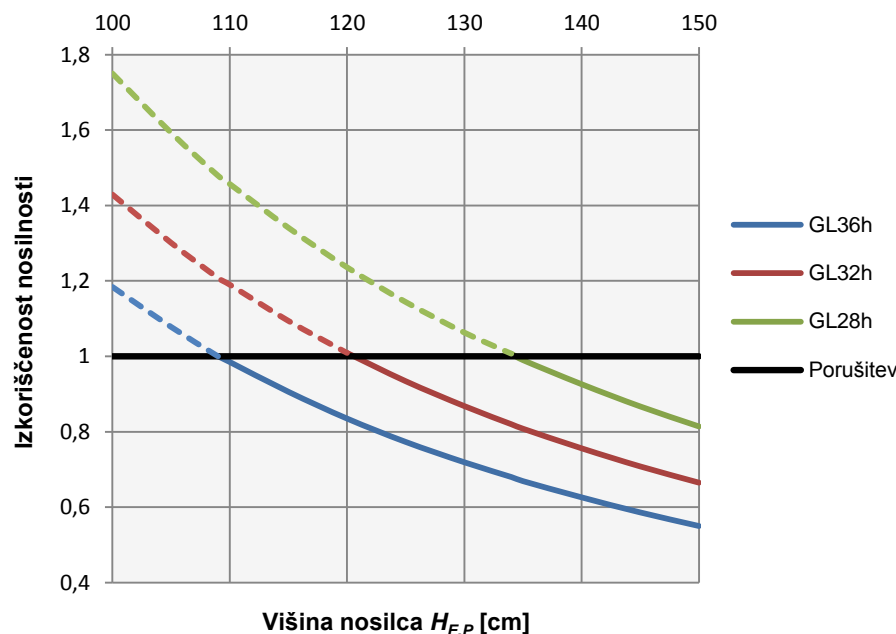
7.1.1 Eojni polni zobati spoji

Slika 64 prikazuje, kako se pri enojnih polnih zobatih spojih spreminja izkoriščenost nosilnosti pri različnih vrednostih višine nosilca. Primerjava se je izvedla na okvirni konstrukciji z geometrijo, enako kot v razdelku 6.1 (Slika 52). Spreminjala se je višina $H_{E,P}$ na mestu spoja, izkoriščenost nosilnosti pa je odčitana na strani prečke. Na grafu so tri barvne krivulje za tri različne kvalitete lepjenega lameliranega lesa. Če je krivulja nad vodoravno črto, je črtkana, to pomeni porušitev spoja. Če je krivulja pod vodoravno črto pa nosilnost spoja ni prekoračena. Pri lepjenem lam. lesu kvalitete GL28h, vidimo, da smo na meji porušitve pri 160 cm višine nosilca, medtem ko je meja porušitve pri kvaliteti GL36h pri 133 cm.



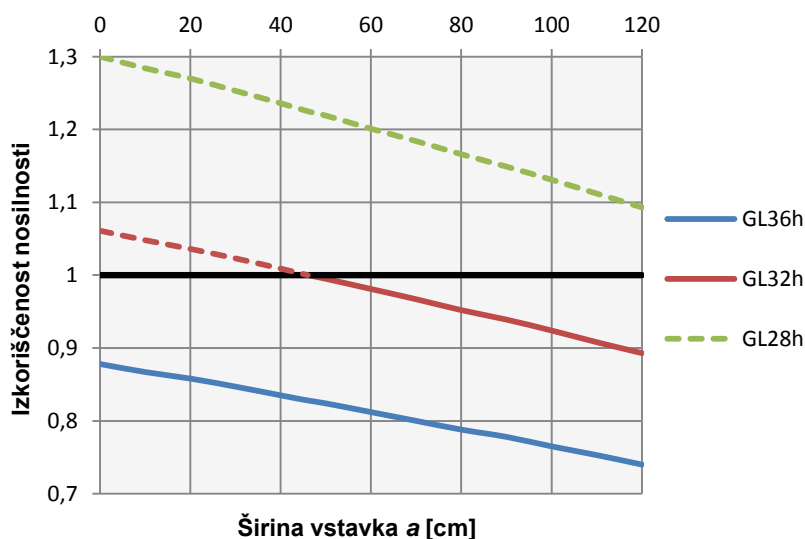
Slika 64: Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od višine pri enojnih polnih zobatih spojih

7.1.2 Dvojni polni zobati spoji



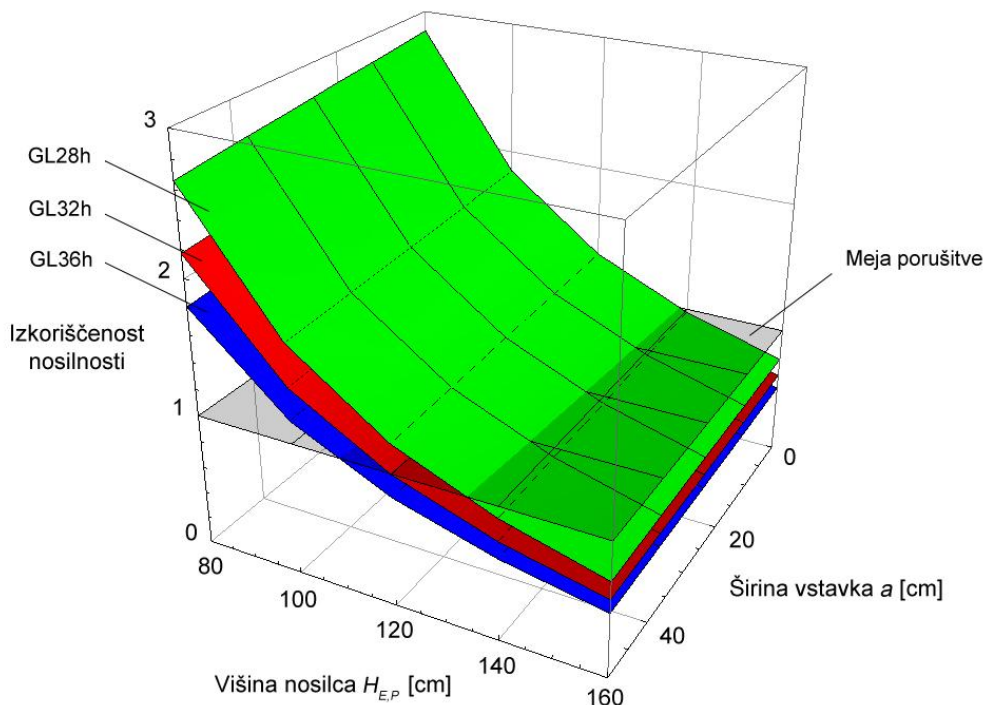
Slika 65: Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od višine nosilca pri dvojnih polnih zobatih spojih

Tu so se izvajale primerjave na okvirni konstrukciji z geometrijo, enako kot v razdelku 6.2 (Slika 55). Spreminjala se je višina $H_{E,P}$ na mestu spoja in širina vstavka a , izkoriščenost nosilnosti pa je odčitana na strani prečke. Slika 65 prikazuje, kako se pri dvojnih polnih zobatih spojih spreminja izkoriščenost nosilnosti pri različnih vrednostih višine nosilca (a je bil 40 cm). Pri lepljenem lameliranem lesu kvalitete GL28h porušitev nastopi pri višini 135 cm, medtem ko je meja porušitve pri kvaliteti GL36h šele pri 109 cm. Slika 66 prikazuje izkoriščenost nosilnosti v odvisnosti od širine vstavka. Literatura priporoča dimenzije širine vstavka od 30 do 50 cm (Werner in Zimmer, 2010), a smo vseeno uporabili širino v mejah od 0 do 120 cm, saj nas je zanimalo tudi obnašanje pri manjših in večjih vrednostih. Nosilnost narašča z večanjem vstavka skoraj linearno. Veliko bolj kot spreminjanje širine vstavka vpliva na nosilnost spoja kvaliteta uporabljenega lesa.



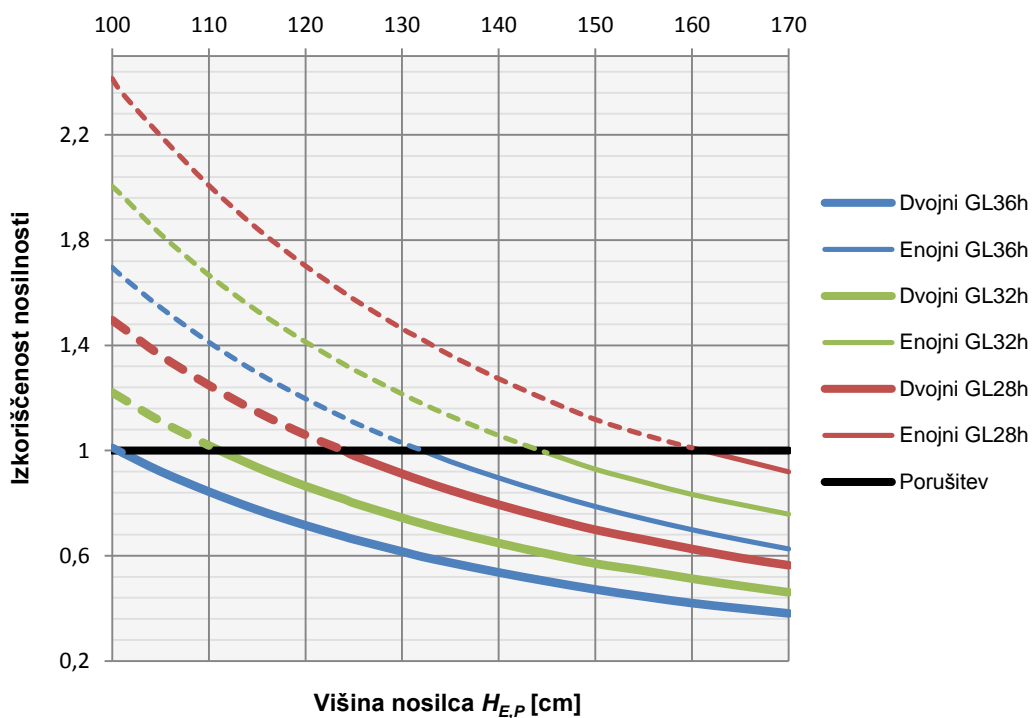
Slika 66: Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od širine vstavka pri dvojnih polnih zobatih spojih

Slika 67 prikazuje odvisnost izkoriščenosti nosilnosti spoja od višine nosilca in širine vstavka. Iz grafa je razvidno, da na nosilnost zelo vplivata kvaliteta lepjenega lameliranega lesa in višina nosilca, medtem ko spreminjanje širine vstavka na izkoriščenost nosilnosti nima velikega vpliva.



Slika 67: Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od višine nosilca in širine vstavka pri dvojnih polnih zobatih spojih

7.1.3 Primerjava med enojnimi in dvojnimi polnimi zobatimi spoji

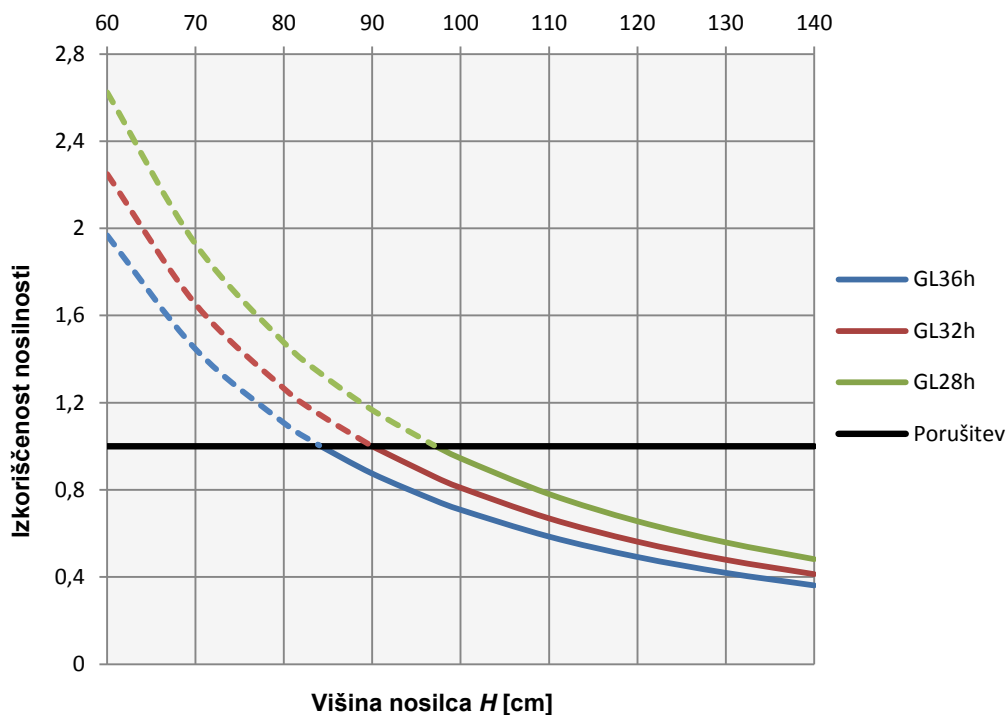


Slika 68: Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od višine pri enojnih in dvojnih polnih zobatih spojih

Primerjava med izkoriščenostjo nosilnosti enojnih in dvojnih polnih zobatih spojev je potekala na okviru z dimenzijami enakimi kot v razdelku 6.1 (Slika 52) Širina vstavka pri dvojnem polnem zobatem spoju je bila 40 cm. Slika 68 prikazuje primerjavo izkoriščenosti nosilnosti, iz katere je razvidno, da so dvojni polni zobati spoji bolj primerni od enojnih, saj zagotavljajo večjo nosilnost. Razlog za večjo nosilnost je manjši kot med vlakni elementa in pravokotnico na linijo spoja α , ki nam zagotovi večjo tlačno trdnost pod kotom α glede na vlakna. Če uporabimo dvojne polne zobate spoje, imamo lahko za več kot 20 % manjše višine nosilcev kot pri enojnih polnih zobatih spojih.

7.2 Zobati spoji pri ravnih nosilcih konstantne višine

Slika 69 prikazuje odvisnost nosilnosti spoja od višine ravnega nosilca, ki se je obravnaval v razdelku 6.3 (Slika 58). Pri lepljenem lameliranem lesu kvalitete GL36h porušitev nastopi pri višini 85 cm, pri kvaliteti GL32h pri 91 cm in pri kvaliteti GL28h pri 97 cm. Pri vseh kvalitetah lepljenega lameliranega lesa in pri vseh višinah nosilca je bila merodajna kontrola osno – upogibnih napetosti.



Slika 69: Graf izkoriščenosti nosilnosti v odvisnosti od višine prereza pri polnih zobatih spojih na ravnih nosilcih

8 ZAKLJUČKI

V diplomski nalogi sem obravnaval zobate spoje velikega formata pri konstrukcijah iz lepljenega lameliranega lesa. Tovrstne spoje najpogosteje uporabljamo v vozliščih okvirnih konstrukcij, lahko pa se jih uporabi tudi za spajanje ravnih nosilcev konstantne višine. Nosilce spojene s polnimi zobatimi spoji se izdelava v proizvodnji s postopki rezanja zobatih klinov, spajanja elementov, stiskanja ter sušenja in klimatizacije. Z namenom izpolnitve standarda SIST EN 387:2002, ki podaja zahteve za uporabo in minimalne zahteve za proizvodnjo polnih zobatih spojev, morajo proizvajalci izvajati tudi kontrolo kvalitete. Spojene elemente se nato pripelje na gradbišče, kjer jih vgradijo v konstrukcijski sistem objekta. Izdelava spojev na gradbišču je prepovedana. Prednosti lepljenih spojev so odlična togost in posledično tudi nosilnost ter hitra gradnja objektov, ki vsebujejo lepljene spoje. Lepljeni spoji, ki jih uporabimo pri spajanju elementov iz lepljenega lameliranega lesa so tudi cenejši od mehanskih izvedb. Med pomankljivosti sodita manjša duktilnost in zahteva po veliki natančnosti pri izdelavi.

Na nosilnost polnih zobatih spojev vpliva več parametrov. Najprej bi izpostavil geometrijo stikovanih elementov. Sem štejemo dimenzije prerezov in kot, pod katerim se elementa stikata. Kot spajanja pri polnih zobatih spojih v vozliščih okvirnih konstrukcij vpliva na konstrukcijski kot α , ki služi za izračun pripadajoče trdnosti $f_{c,\alpha,d}$, ki ima velik vpliv na nosilnost. V drugo skupino parametrov uvrstimo kvaliteto lepljenega lameliranega lesa uporabljenih elementov. Na nosilnost ima velik vpliv, saj se pri najboljši kakovosti lesa v primerjavi z najslabšo kakovostjo nosilnost lahko razlikuje tudi do 20 %. Zadnji pomemben parameter je izbira vrste polnega zobatega spoja. Pri vozliščih okvirnih konstrukcij lahko uporabimo enojni polni zobati spoj ali dvojni polni zobati spoj; tu imamo med stikovanimi elementoma vstavek, ki zmanjša kot med vlakni elementa in spojem ter tako poveča nosilnost.

Postopke dimenzioniranja polnih zobatih spojev sem opisal v skladu s standardom Evrokod 5. Literature s tega področja ni veliko, zato so mi vir predstavljale predvsem različne knjige o projektiranju lesenih konstrukcij. Kot zanimivost sem poleg dodal še postopke dimenzioniranja v skladu s starim standardom DIN 1052, ki ni več v veljavi. Med postopkoma je zaznati veliko podobnosti, saj oba temeljita na ugotovitvah nemškega inženirja Boda Heimeshoffa, ki je uvedel poenostavljeno kontrolo nosilnosti, temelječo na linearni interakciji med osno silo in upogibnim momentom na mestu notranjega roba (Slika 6). Za oba postopka dimenzioniranja sem izdelal po tri računske primere, kjer je s podrobnim postopkom izračuna prikazana kontrola nosilnosti polnih zobatih spojev.

V okviru diplomske naloge sem izdelal tudi pripomoček za dimenzioniranje polnih zobatih spojev v programu Microsoft Excel, s pomočjo aplikacije Microsoft Visual Basic for Applications. Pripomoček računa tri različne vrste polnih zobatih spojev, in sicer enojne in dvojne polne zobate spoje v vozliščih okvirnih konstrukcij iz lepljenega lameliranega lesa ter polne zobate spoje, ki spajajo ravne lepljene lamelirane nosilce konstantne višine. Izračun je zasnovan tako, da najprej izberemo kvaliteto lepljenega lameliranega lesa, kar sproži samodejni izračun vseh materialnih karakteristik potrebnih za kontrolo. Nato vpišemo notranje sile na mestu spoja ter podamo geometrijo elementov. Program omogoča tudi grafični prikaz dimenzij računskega modela, spojenih elementov in detajla spoja ter skico

uporabljene konstrukcije, izrisane v merilu. Sledi izračun geometrijskih in uklonskih karakteristik potrebnih za kontrolo, na koncu pa še preverjanje nosilnosti spoja obeh spojenih elementov. Pravilnost izračunov v programu sem preveril z računskimi primeri, ki sem jih izračunal »peš«. Izdelano orodje za dimenzioniranje spojev se je izkazalo za zelo uporabno, saj nam poleg prihranjenega časa zagotovi tudi boljšo predstavo o izgledu spoja in uporabljene konstrukcije. Odlično služi tudi, ko hočemo ugotoviti, kako spreminjanje geometrije, kakovosti materiala in vrste spoja vpliva na nosilnost spoja.

Naj zaključim, da izdelano diplomsko delo služi kot širok vpogled v zobate spoje velikega formata. Predstavil sem material za izdelavo, dosegljivo eksperimentalno ugotovljeno obnašanje, dimenzioniranje, računske primere in še druge stvari, ki opišejo spoje. Izdelan računski pripomoček pa prikaže praktično plat problema in pripomore k boljši predstavi.

VIRI

Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po standardih Evrokod, Ljubljana, Inženirska Zbornica Slovenije: 1077 str.

BS EN 385:2001. Finger jointed structural timber – Performance requirements and minimum production requirements.

Eby, R. E., 1981. Proofloading of finger-joints for glulam timber. Forest Products Journal 31, 1: 37 – 41.

Gojković, M. 1989. Drvene konstrukcije. Beograd, Građevinski fakultet Univerziteta v Beogradu: 524 str.

Komatsu, K., Nitta, A., Kawahara, S. et al. 2001. Moment-resisting performance of glulam beam-to-column joints composed of various types of large finger joints. V: Aicher, S. (ur.), Reinhardt, H.-W. (ur.). Joints in Timber Structures : proceedings of the International RILEM Symposium in Stuttgart, Germany, September 12–14, 2001. Cachan Cedex, Rilem Publications s.a.r.l.: p. 521–530

Kitek Kuzman, M., Hrovatin, J., Kušar, J. 2006. Lesene lepljene konstrukcije v arhitekturi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 6 str.

Larsen, H., Enjily, V. 2009. Practical design of timber structures to Eurocode 5. London, Thomas Telford Limited: 268 str.

Neuhaus, H. 1994. Lehrbuch des Ingenieurholzbaus. Stuttgart, B. G. Teubner Stuttgart: 488 str.

Ozelton, E. C., Baird J. A. 1976. Timber designers' manual. London, Granada Publishing Limited: 518 str.

Rug, W., Mönck, W. 2008. Holzbau, Bemessung und Konstruktion. Berlin, HUSS-MEDIEN GmbH: 543 str.

SIST EN 1991-1-1:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-1. del: Splošni vplivi – Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb (istoveten z EN 1991-1-1:2000).

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

SIST EN 1991-1-3:2004/A101:2008. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega – Nacionalni dodatek.

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

SIST EN 1991-1-4:2005/oA101:2007. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Obtežbe vetra – Nacionalni dodatek.

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

SIST EN 387:2002. Lepljeni lamelirani les – Polni zobati spoji – Zahteve za uporabo in minimalne zahteve za proizvodnjo.

Steinbrecher, D. 2012. Rahmenecken, Cottbus, Brandenburgische Technische Universität https://www.docs.tu-cottbus.de/stahlbau/public/Fachgebiet_Holzbau/Master/Rahmenecken.pdf (Pridobljeno 9. 6. 2012.)

Thelandersson, S. (ur.), Larsen, H. (ur.) 2003. Timber Engineering. West Sussex, John Wiley & Sons Ltd: 446 str.

Werner, G., Zimmer, K. 2010. Holzbau 2. Dach- und Hallentragwerke nach DIN 1052 (neu 2008) und Eurocode 5. Heidelberg, Springer: 417 str.

Wiegand, T. 2002. Entwicklung eines Rechenverfahrens für keilgezinkte Rahmenecken und Biegeträger ohne oder mit Zwischenstück aus Brettschichtholz oder Holzwerkstoffplatten. Doktorska disertacija. Wuppertal, Bergischen Universität Wuppertal: 168 str.
<http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-683/d110302.pdf>
(Pridobljeno 9. 6. 2012.)

KAZALO PRILOG

Priloga A: OKVIRNA KONSTRUKCIJA

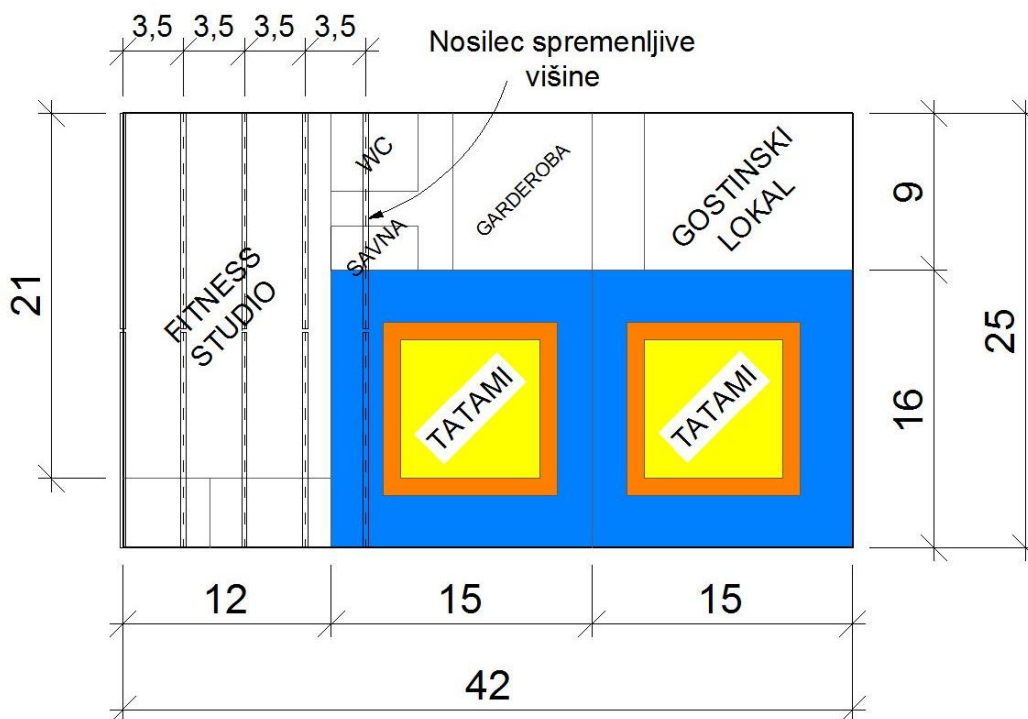
A1

PRILOGA A: OKVIRNA KONSTRUKCIJA

Da se je lahko izvedla kontrola polnih zobatih spojev v vozlišču okvirne konstrukcije, smo si konstrukcijo izmislili in jo umestili v predmestje Ljubljane. Material, iz katerega je izdelana nosilna konstrukcija, je lepljen lameliran les. Vrsta konstrukcije je tročlenski okvir, vozlišča pa so spojena z enojnimi oz. dvojnimi polnimi zobatimi spoji. Objekt stoji na nadmorski višini 300 m.

A.1 Opis objekta

Zgradba je večnamenska športna dvorana z dvema judo tatamijema (borilnima površinama) dimenzij 16×15 metrov, fitness studijem dimenzij 21×12 metrov in gostinskim lokalom dimenzij 9×12 metrov. V stavbi so še drugi manjši prostori, kot so kabineti, garderobe, toalete in savna. Predvidene dimenzije športne dvorane so: $42 \times 25 \times 7$ m. Tloris objekta z dimenzijami je prikazan na sliki A1.



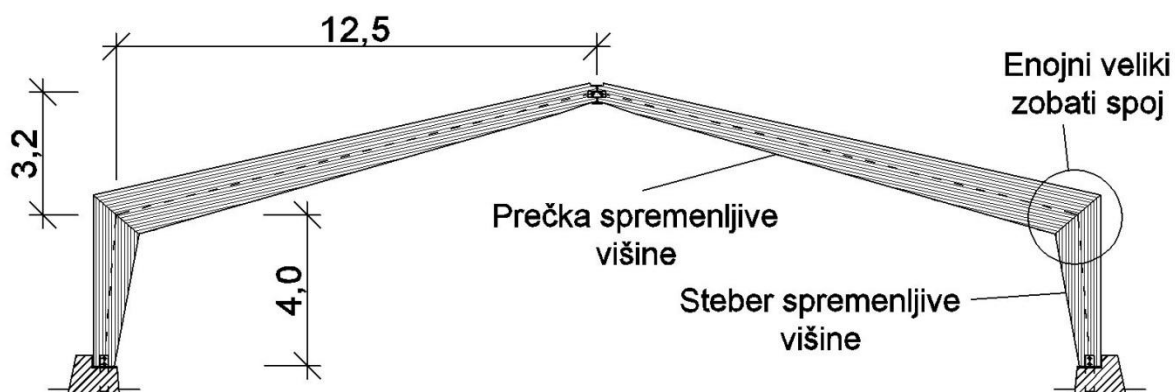
Slika A1: Tloris objekta in nosilci

Nosilno konstrukcijo strehe sestavljajo prečke tročlenskega okvira (Slika A2), ki so lamelirani lepljeni nosilci prečnega prereza s spremenljivo višino. Dolžina^{A1} vsake prečke je 12,9 m ($x_p = 12,5$ m; $z_p = 3,2$ m). Oblika nosilca je pravokotnik. Teoretična osna razdalja med nosilci je 3,5 m. Nosilno konstrukcijo strehe v eni osi sestavimo iz dveh enakih nosilcev, ki sta med seboj členkasto povezana. Krovno konstrukcijo sestavljajo profilirana pločevina, termoizolacija, letve, opaž, plohi in lege. Razdalja med legami je cca. 1 m. Lege so pritrjene na prečke okvira z BMF^{A2} priključnimi elementi. Stebri tročlenskega okvira, ki so s prečkami

^{A1} Meril sem dolžine osi elementov.

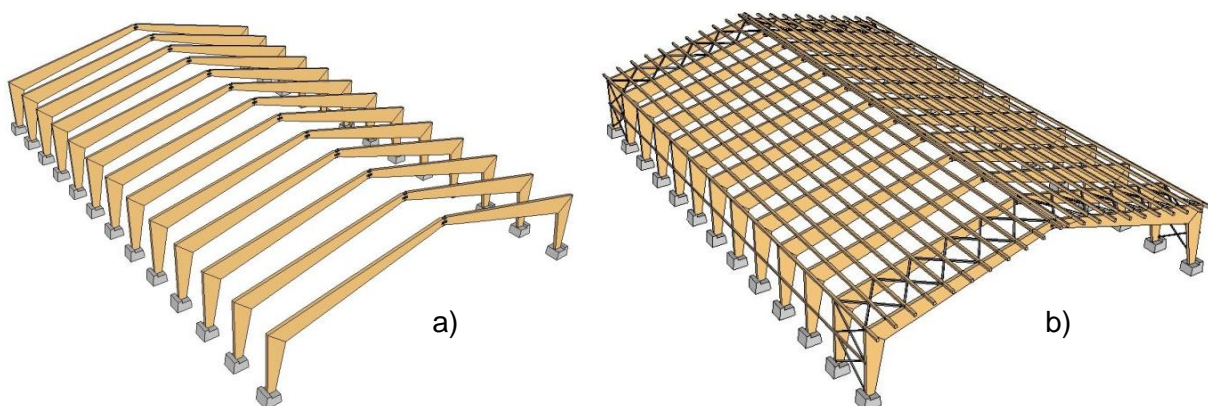
^{A2} Jekleni kotniki, ploščice za priključevanje lesenih elementov z vijaki.

povezani z velikimi zobatimi spoji, prenašajo obtežbo na temeljna tla. Višina stebrov, ki so členkasto priključeni na betonski temelj je 4 m.

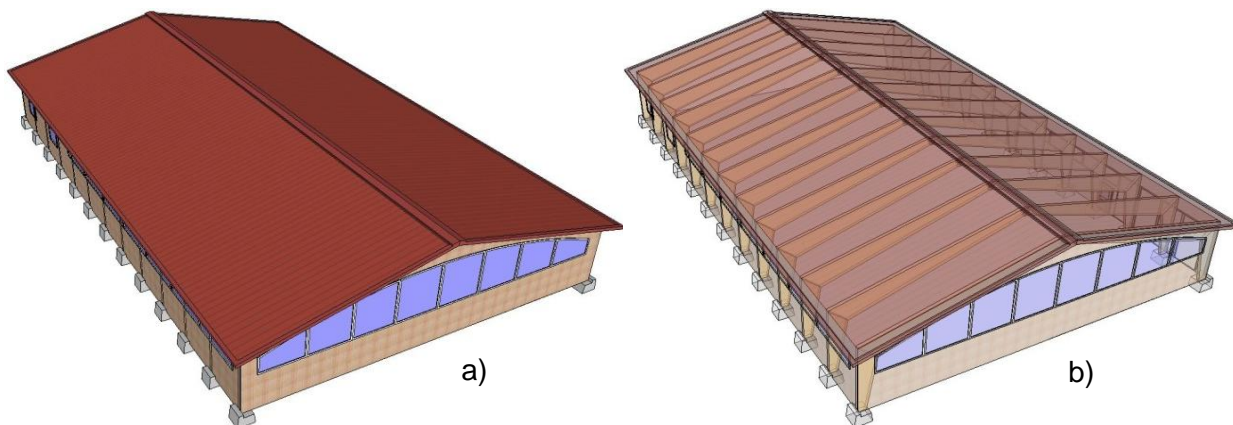


Slika A2: Tročlenski okvir z enojnimi velikimi zobatimi spoji

Fasada (čelna in vzdolžna) je sestavljena iz opaža, vodoravnih tramičev in stebričev. Vodoravni tramiči so na stebre priključeni z BMF priključnimi elementi. Tudi stebri so na prečke okvira oz. lege priključeni z BMF priključnimi elementi. Zavarovalno konstrukcijo strehe, stebrov in fasade izvedemo z jeklenimi diagonalami.



Slika A3: 3D model a) postavitve primarnih nosilcev ter b) primarnih nosilcev, zavarovalne konstrukcije in leg



Slika A4: 3D model a) celotnega objekta in b) objekta z vidno primarno nosilno konstrukcijo

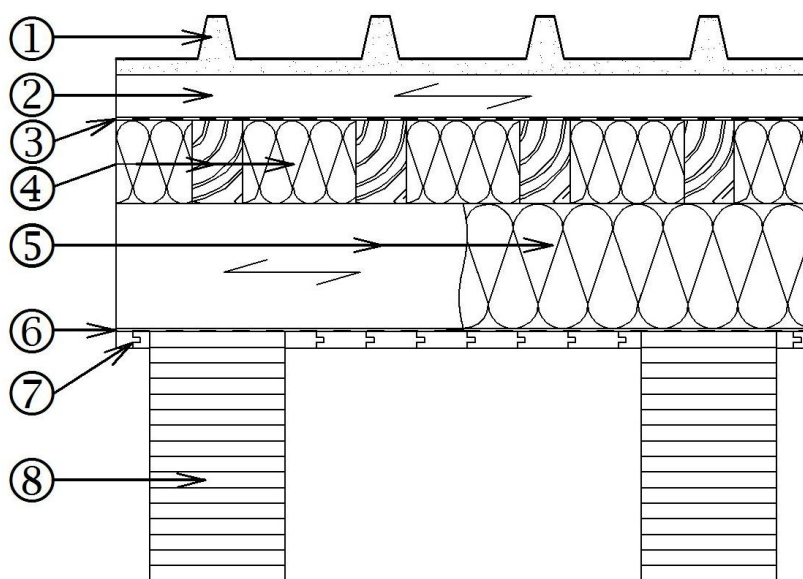
A.2 Obtežba okvirne konstrukcije

Cilj te diplomske naloge je dimenzioniranje velikih zobatih spojev v vozliščih okvirnih konstrukcij. Da se lotimo dimenzioniranja, potrebujemo oceno vrednosti notranjih sil v obravnavanih elementih, ki nastanejo zaradi obtežb, delujočih na konstrukcijo. Na tročlenski okvir, ki sem ga uporabil v svoji nalogi, delujejo tri vrste obtežb: stalna obtežba, obtežba vetra in obtežba snega. Vplivna širina – razpon elementov v vzdolžni smeri, ki odpadejo na en okvir – je 3,5 m (oznaka e_n). Ta vrednost je enaka medsebojnim razmakom okvirjev. V nadaljevanju sledijo postopki pridobivanja obtežb in njihov izračun v skladu s standardi Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije.

A.2.1 Stalna obtežba

Strešna konstrukcija je dostopna le za vzdrževanje (kategorija H). V standardu SIST EN 1991-1-1: 2004/A101: 2005 je priporočena vrednost za koristno obtežbo $q = 0,4 \text{ kN/m}^2$. Leseni elementi ostrešja (opaž, plohi, tramiči, stebri) so iz mehkega lesa C24, za katerega se je uporabila gostota $\rho_k = 420 \text{ kg/m}^3$. Primarni nosilci so iz lepjenega lameliranega lesa GL36h z gostoto $\rho_k = 450 \text{ kg/m}^3$. Priključki so izvedeni z BMF priključnimi elementi, ki so iz jekla S235. Slika A5 prikazuje prerez ostrešja, kjer se lepo vidi njegova sestava, v preglednici A1 pa je podan izračun obtežbe ostrešja.

a) Ostrešje



Slika A5: Konstrukcijski sklop ostrešja

Preglednica A1: Obtežba ostrešja

Št.	Element sklopa	Izračun obtežbe	Rezultat
1	Jeklena pocinkana profilirana pločevina s poliuretansko izolacijo: 0,6 mm + 20 mm	Priporočena vrednost iz EC 1	0,4 kN/m
2	Prečne letve: 4/5 cm ($e = 0,6 \text{ m}$)	$4,2 \text{ kN/m}^3 \times 0,04 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} \times (3,5 \text{ m}/0,6 \text{ m})$	0,05 kN/m
3	Sekundarna kritina Tyvek		

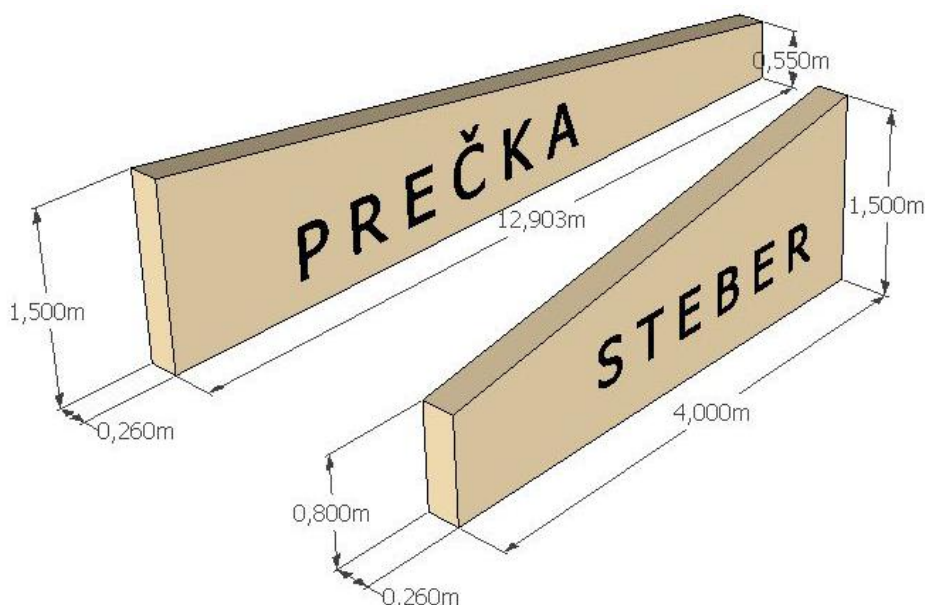
se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice A1

4	Morali: 6/10 cm ($e = 1$ m)	$4,2 \text{ kN/m}^3 \times 0,06 \text{ m} \times 0,10 \text{ m} \times (3,5 \text{ m/1 m})$	0,09 kN/m	
	Toplotna izolacija: 10 cm	$0,6 \text{ kN/m}^3 \times 0,10 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$	0,21 kN/m	
5	Lege: 16/20 cm ($e = 1$ m)	$4,2 \text{ kN/m}^3 \times 0,16 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} \times (3,5 \text{ m/1 m})$	0,47 kN/m	
	Toplotna izolacija: 20 cm	$0,6 \text{ kN/m}^3 \times 0,20 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$	0,42 kN/m	
6	PE folija			
7	Opaž: deske 2,2 cm	$4,2 \text{ kN/m}^3 \times 0,022 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$	0,32 kN/m	
	Inštalacije in drugo		0,94 kN/m	
8	Primarni nosilec	Račun kasneje		
			Σg_1	2,90 kN/m

b) Primarna nosilca

Obtežba primarnih nosilcev je v bistvu lastna teža primarne nosilne konstrukcije. Zaradi lažjega spreminjanja parametrov v programu, kjer so se računale notranje sile okvirne konstrukcije, smo ocenili dimenzije dveh kritičnih nosilcev, ki sta predstavljalata lastno težo nosilnega sistema. Nosilcema, ki sta prikazana na sliki A6, smo dali razmeroma velike dimenzije prečnih prerezov, da je bil izračun na varni strani. V izračunu smo uporabili tudi najtežji možni lepljeni lamelirani les GL36h z gostoto $\rho_k = 450 \text{ kg/m}^3$.



Slika A6: Dimenzije primarnih nosilcev

Obtežba primarnih nosilcev g_2 [kN/m] se izračuna z izrazom:

$$g_2 = m' g, \quad (\text{A.1})$$

kjer sta:

g ... gravitacijski pospešek [m/s^2] in

m' ... masa na enoto dolžine [kg/m].

Masa na enoto dolžine m' [kg/m] je definirana z izrazom:

$$m' = \rho S, \quad (\text{A.2})$$

pri čemer sta:

ρ ... gostota lesa [kg/m^3] in

S ... površina prereza [m^2].

→ Prečka

$$g_{2,L} = m'_L g = 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,26 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1721,7 \frac{\text{N}}{\text{m}} = \mathbf{1,722 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

$$g_{2,D} = m'_D g = 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,26 \text{ m} \times 0,55 \text{ m} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 631,3 \frac{\text{N}}{\text{m}} = \mathbf{0,631 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

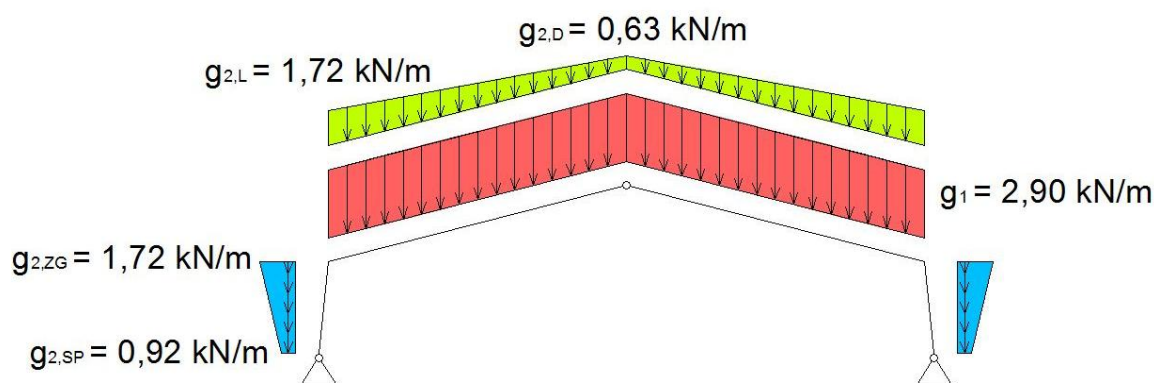
→ Steber

$$g_{2,ZG} = m'_{ZG} g = 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,26 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1721,7 \frac{\text{N}}{\text{m}} = \mathbf{1,722 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

$$g_{2,SP} = m'_{SP} g = 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,26 \text{ m} \times 0,80 \text{ m} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 918,2 \frac{\text{N}}{\text{m}} = \mathbf{0,918 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

c) Skupna stalna obtežba

Slika A7 prikazuje stalno obtežbo na modelu okvira, ki smo jo podali v program za izračun notranjih sil po metodi končnih elementov.



Slika A7: Celotna stalna obtežba na modelu okvira

A.2.2 Obtežba snega

Obtežbo snega s_i [kN/m^2] na strehi se za trajna in začasna projektna stanja določi po naslednji enačbi (količine v enačbi razložene v nadaljevanju):

$$s_i = \mu_i C_e C_t s_k. \quad (\text{A.3})$$

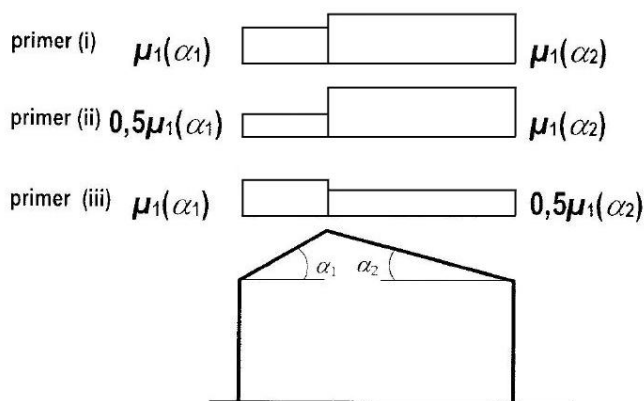
Ker potrebujemo obtežbo v enoti [kN/m], moram obtežbo snega pomnožiti še z vplivno širino e_n , tako dobim obtežbo snega $q_{s,i}$ na enoto dolžine:

$$q_{s,i} = s_i e_n. \quad (\text{A.4})$$

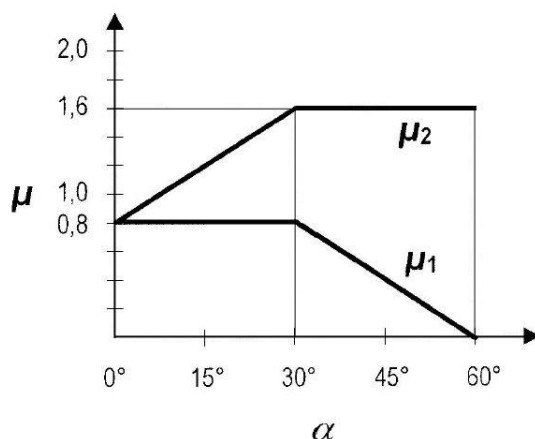
Objekt se nahaja v predmestju Ljubljane, zato po standardu SIST EN 1991-1-3:2004/A101:2008 spada v cono A2. Nadmorska višina lokacije objekta je 300 m. Iz tega dobimo enačbo za karakteristično vrednost obtežbe snega na tleh s_k [kN/m^2], kjer oznaka A pomeni nadmorsko višino:

$$s_k = 1,293 \left[1 + \left(\frac{A}{728} \right)^2 \right]. \quad (\text{A.5})$$

Upoštevati moramo obtežbo nenakopičenega snega, saj se sneg na dvokapni strehi ne more kopičiti. Možni razporedi obtežbe snega so prikazani na sliki A8. Primer (i) prikazuje simetričen razpored obtežbe nenakopičenega snega, primera (ii) in (iii) pa nesimetričen razpored obtežbe nenakopičenega snega (neenakomerno taljenje, zdrs). Da bi bil izračun na varni strani, izberemo kritični^{A3} nagib strehe $\alpha = 12^\circ$. Slika A9 prikazuje graf oblikovnih koeficientov μ_1 in μ_2 v odvisnosti od nagiba strehe α . Ker je streha na objektu dvokapna in nagib majhen, v kasnejših izračunih uporabimo koeficient μ_1 vrednosti 0,8.



Slika A8: Oblikovni koeficient obtežbe snega pri dvokapnici (SIST EN 1991-1-3:2004, str. 16)



Slika A9: Oblikovna koeficienta obtežbe snega (SIST EN 1991-1-3:2004, str. 15)

V enačbi obtežbe snega nastopata še koeficient izpostavljenosti C_e in toplotni koeficient C_t . Za obravnavani objekt (izolirana streha) in njegovo lokacijo imata glede na standard oba koeficienta vrednost 1,0.

a) Račun nenakopičenega snega simetrično – primer (i)

$$s_k = 1,293 \left[1 + \left(\frac{A}{728} \right)^2 \right] = 1,293 \left[1 + \left(\frac{300}{728} \right)^2 \right] = 1,513 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$s_1 = q_{s,1,L} = q_{s,1,D} = \mu_1 C_e C_t s_k = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,513 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,210 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_{s,1} = s_1 e_n = 1,210 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = 4,235 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

^{A3} Kritičen, ker predpostavim, da v računu ne bo nastopil manjši kot

b) Račun nenakopičenega snega nesimetrično – primer (ii)

$$s_k = 1,523 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$s_{2,L} = 0,5 \mu_1 C_e C_t s_k = 0,5 \times 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,523 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,605 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$s_{2,D} = \mu_1 C_e C_t s_k = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,523 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,210 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_{s,2,L} = s_{2,L} e_n = 0,605 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = 2,118 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{s,2,D} = s_{2,D} e_n = 1,210 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = 4,235 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

c) Račun nenakopičenega snega nesimetrično – primer (iii)

$$s_k = 1,523 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$s_{3,L} = \mu_1 C_e C_t s_k = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,523 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,210 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

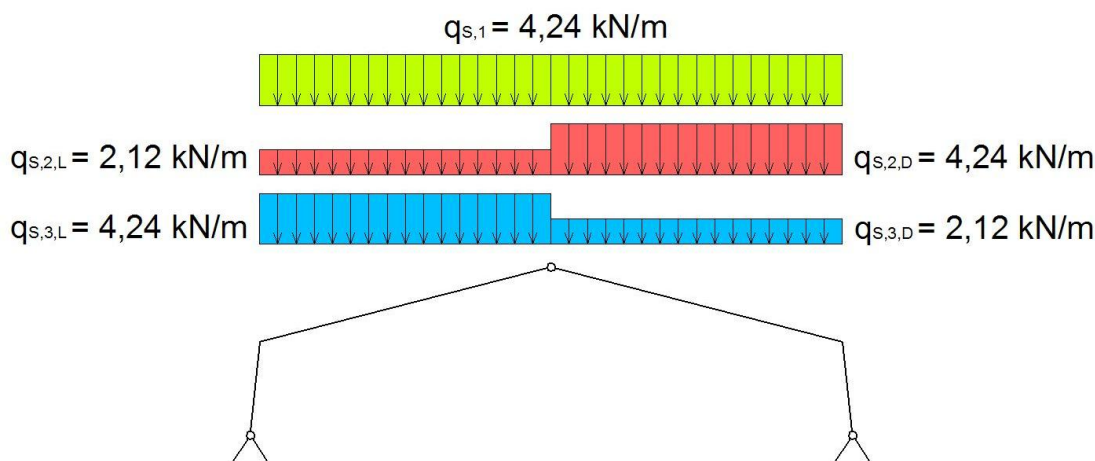
$$s_{3,D} = 0,5 \mu_1 C_e C_t s_k = 0,5 \times 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,523 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,605 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_{s,3,L} = s_{3,L} e_n = 1,210 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = 4,235 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{s,3,D} = s_{3,D} e_n = 0,605 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = 2,118 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

d) Celotna obtežba snega

Slika A10 prikazuje tri različne obtežbe snega, s katerimi smo v programu za izračun notranjih sil po metodi končnih elementov obremenili model okvira z nosilci iz lepjenega lameliranega lesa.



Slika A10: Obtežba snega na modelu okvira

A.2.3 Obtežba vetra

Lokacija objekta je podatek, s pomočjo katerega iz nacionalnega dodatka standardu odčitamo naslednje podatke: cona A, ocena za referenčno hitrost vetra je $v_{b,0} = 25$ m/s, kategorija terena: III (predmestje industrijske cone), višina hrapavosti oz. neravnine: $z_0 = 0,3$ m, minimalna višina nad tlemi, kjer je hitrost vetra konstantna: $z_{min} = 5$ m, gostota zraka: $\rho = 1,25$ kg/m³.

Obtežbo vetra na enoto ploskve [kN/m²] dobimo preko tlaka na zunanje površine in koeficienta za zunanji tlak, definirana pa je z izrazom:

$$w_e = c_{pe} q_p, \quad (\text{A.6})$$

pri čemer so:

c_{pe} ... koeficient zunanjega tlaka,

$q_p(z_e)$... največji tlak pri sunkih vetra na referenčni višini z_e [kN/m²] in

z_e ... referenčna višina na zunanji tlak [m].

Ker hočem obtežbo v enoti [kN/m], moram obtežbo vetra pomnožiti še z vplivno širino e_n , tako dobim obtežbo vetra $q_{w,i}$ na enoto dolžine:

$$q_w = w_e e_n. \quad (\text{A.7})$$

Največji tlak pri sunkih vetra q_p [kN/m²] se izračuna z izrazom:

$$q_p = c_e q_b, \quad (\text{A.8})$$

kjer sta:

c_e ... faktor izpostavljenosti [-] in

q_b ... osnovni tlak [kN/m²].

- i) Faktor izpostavljenosti c_e [-] je definiran z izrazom:

$$c_e = \left[1 + 7 \frac{k_I k_r}{c_0 c_r} \right] c_0^2 c_r^2, \quad (\text{A.9})$$

kjer so:

k_I ... faktor turbolence (= 1,0),

k_r ... faktor terena, ki je odvisen od hrapavostne dolžine z_0 in se izračuna:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}, \quad (\text{A.10})$$

c_0 ... faktor oblike terena, ki upošteva spremembo lokalne topografije (= 1,0) ter

c_r ... faktor hrapavosti, ki se izračuna po izrazu:

$$c_r = \begin{cases} k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), & z_{min} \leq z \leq 200 \text{ m} \\ k_r \ln \left(\frac{z_{min}}{z_0} \right), & z \leq z_{min} = 5 \text{ m} \end{cases}. \quad (\text{A.11})$$

- ii) Osnovni tlak q_b [kN/m²] je določen kot:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2, \quad (\text{A.12})$$

kjer je v_b osnovna hitrost vetra [m/s], definirana z izrazom:

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0}. \quad (\text{A.13})$$

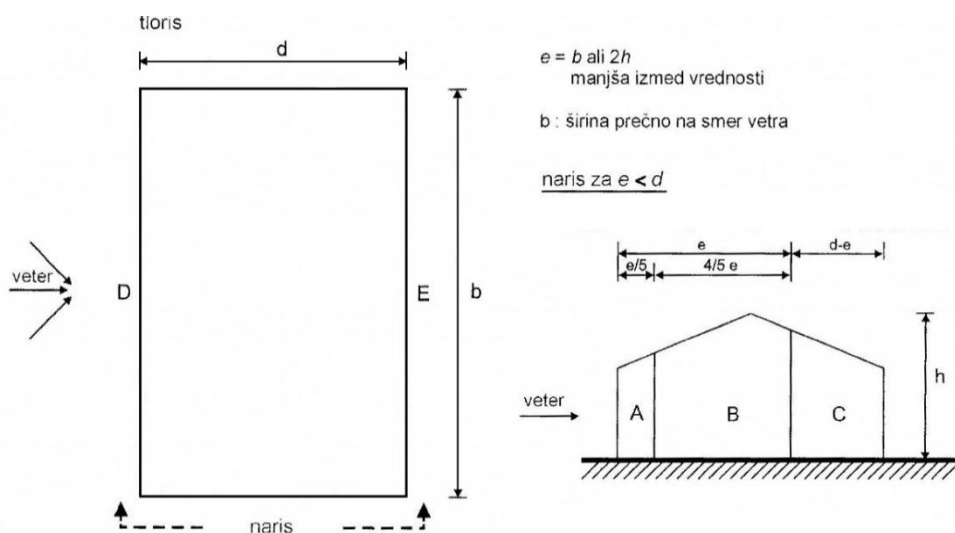
Pri čemer sta:

c_{dir} smerni faktor [-] (= 1,0) in c_{season} faktor letnega časa [-] (= 1,0).

Koeficienti zunanje tlaka c_{pe} :

a) Pri navpični steni

Slika A11 prikazuje, kako se razdeli stena na področja pri določanju obtežbe vetra. Obravnaval se je le veter v smeri vzporedno na ravnino okvira, saj smo predpostavili, da vso obtežbo prečno na ravnino okvira prenese zavarovalna konstrukcija. Iz preglednice A2 lahko odčitamo oz. interpoliramo vrednosti koeficientov tlaka c_{pe} . Če se obtežba vetra na konstrukcijo objekta določi na podlagi koeficientov tlaka c_{pe} na privetni in zavetrni strani (področji D in E na sliki A11), se lahko upošteva nepopolnost zvez za sočasne tlake vetra na privetni in zavetrni strani. Za stavbe z razmerjem višine in širine $h/d \geq 5$ se rezultirajoča sila pomnoži z 1, za stavbe z razmerjem $h/d \leq 1$ pa z 0,85. Za vmesne vrednosti h/d faktor interpoliramo. Vrednosti $c_{pe,1}$ se uporabljajo pri projektiranju majhnih elementov in pritrditev, velikih 1 m^2 ali manj; vrednosti $c_{pe,10}$ uporabljamo za projektiranje celotne konstrukcije stavb.



Slika A11: Razdelitev sten na področja (SIST EN 1991-1-4:2005, str. 30)

Preglednica A2: Vrednosti c_{pe} za navpične stene stavb s pravokotnim tlorisom (SIST EN 1991-1-4:2005, str. 31)

Področje h/d	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

b) Pri dvokapni strehi

Slika A12 prikazuje, kako se razdeli dvokapno streho na področja pri določanju obtežbe vetra. Iz preglednice A3 lahko odčitamo vrednosti koeficientov tlaka c_{pe} za različna področja dvokapnice. Za vmesne naklone strešine se lahko uporabi linearna interpolacija med vrednostmi enakega predznaka. Uporaba pozitivnih in negativnih vrednosti na isti strani strehe ni dovoljena. Vrednosti $c_{pe,1}$ se uporabljajo pri projektiranju majhnih elementov in pritrditev, velikih 1 m^2 ali manj; vrednosti $c_{pe,10}$ uporabljamo za projektiranje celotne konstrukcije stavb.

$$\frac{h}{d} = \frac{7,2 \text{ m}}{25 \text{ m}} = 0,288$$

$$c_{pe,PRIVETRNO} = c_{pe,D} = 0,705$$

$$c_{pe,ZAVETRNO} = c_{pe,E} = -0,310$$

Pri računu obtežbe vetra moramo rezultirajočo silo w_e pomnožiti s faktorjem 0,85; ker za sočasne tlake vetra na privetrni in zavetrni strani tako navaja standard (pod pogojem, če velja $h/d \leq 1$).

$$w_{e,PRIVETRNO} = w_{e,D} = 0,85 c_{pe,D} q_p = 0,85 \times 0,705 \times 0,587 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,352 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,ZAVETRNO} = w_{e,E} = 0,85 c_{pe,E} q_p = 0,85 \times -0,310 \times 0,587 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = -0,155 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_{w,PRIVETRNO} = w_{e,D} e_n = 0,352 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = \mathbf{1,232 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

$$q_{w,ZAVETRNO} = w_{e,E} e_n = -0,155 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = \mathbf{-0,541 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

b) Pri dvokapni strehi

$$q_p = 0,586 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Vrednosti koeficientov $c_{pe,10}$ iz preglednice A3 smo morali interpolirati, saj niso neposredno podane za kot nagiba strehe 12° .

$$c_{pe,G} = 0,14$$

$$c_{pe,H} = 0,14$$

$$c_{pe,I} = -0,46$$

$$c_{pe,J} = -0,88$$

$$w_{e,G} = c_{pe,G} q_p = 0,14 \times 0,587 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,082 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,H} = c_{pe,H} q_p = 0,14 \times 0,587 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,082 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,I} = c_{pe,I} q_p = -0,46 \times 0,587 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = -0,270 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,J} = c_{pe,J} q_p = -0,88 \times 0,587 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = -0,517 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_{w,G} = w_{e,G} e_n = 0,082 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = \mathbf{0,287 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

$$q_{w,H} = w_{e,H} e_n = 0,082 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = \mathbf{0,287 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

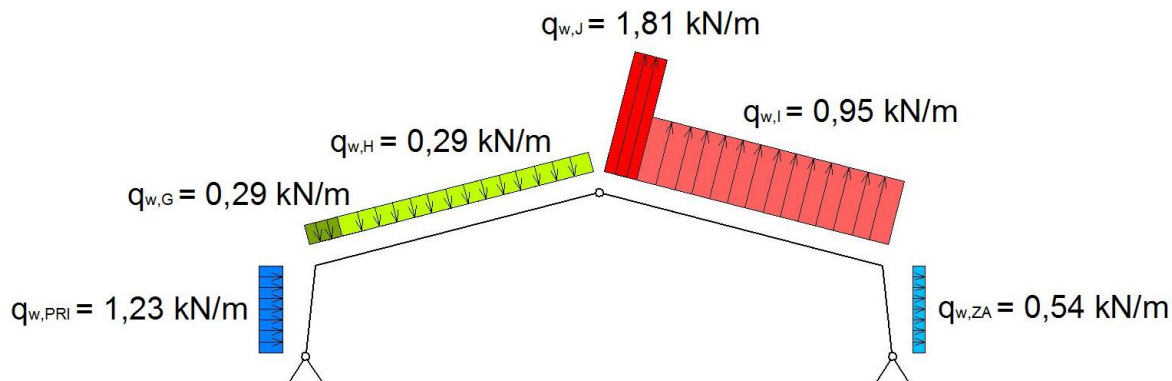
$$q_{w,I} = w_{e,I} e_n = -0,270 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = \mathbf{-0,945 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

$$q_{w,J} = w_{e,J} e_n = -0,517 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,5 \text{ m} = \mathbf{-1,810 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

c) Celotna obtežba vetra

Slika A13 prikazuje približno obtežbo vetra na stene in obtežbo vetra na streho pri modelu, narejenem v programu za računanje notranjih sil konstrukcij po metodi končnih elementov. Tlaka vetra na notranje površine oboda stavbe se ni upoštevalo, ker izračunana obtežba

vetra predstavlja dovolj dober približek obtežbe, s katero smo dobili okvirne notranje sile za račun polnih zobatih spojev v vozliščih okvira.

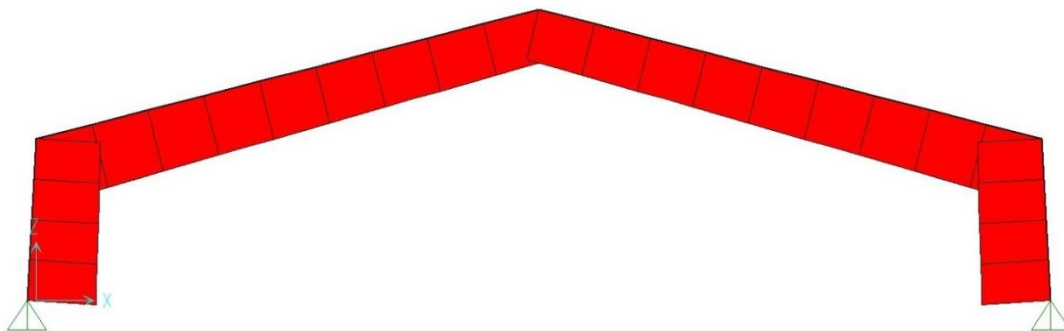


Slika A13: Obtežba vetra na modelu okvira

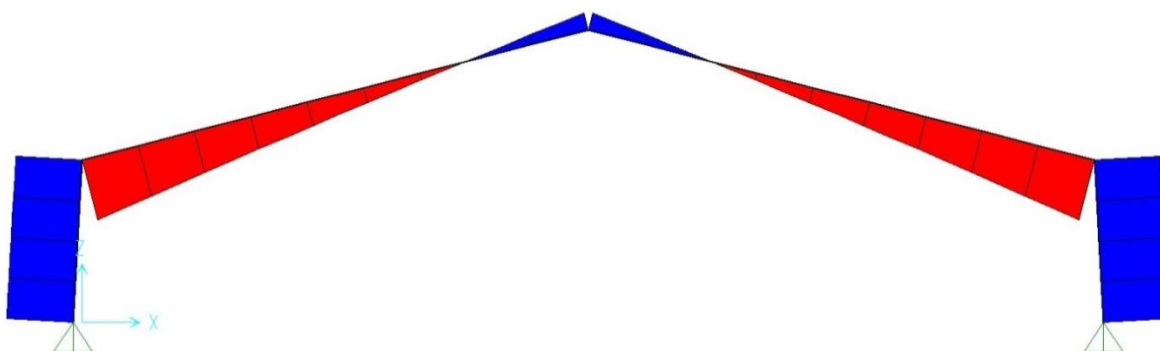
A.3 Notranje sile v okvirni konstrukciji

Notranje sile smo izračunali s pomočjo programa SAP 2000, ki deluje po metodi končnih elementov. Najprej smo ustvarili računski model konstrukcije, ki smo ga obtežili s stalno obtežbo, obtežbo vetra ter obtežbo snega. Nato smo pogledali kakšne notranje sile povzročijo v konstrukciji posamezne obtežbe, in ustvarili obtežne kombinacije, s katerimi smo dobili maksimalne notranje statične količine. Analiza je bila narejena le v ravnini okvirov. Za vplive prečno na ravnino okvirov predpostavimo, da jih prenese zavarovalna konstrukcija. Rdeča barva na diagramih notranjih sil pomeni negativno, modra pa pozitivno vrednost.

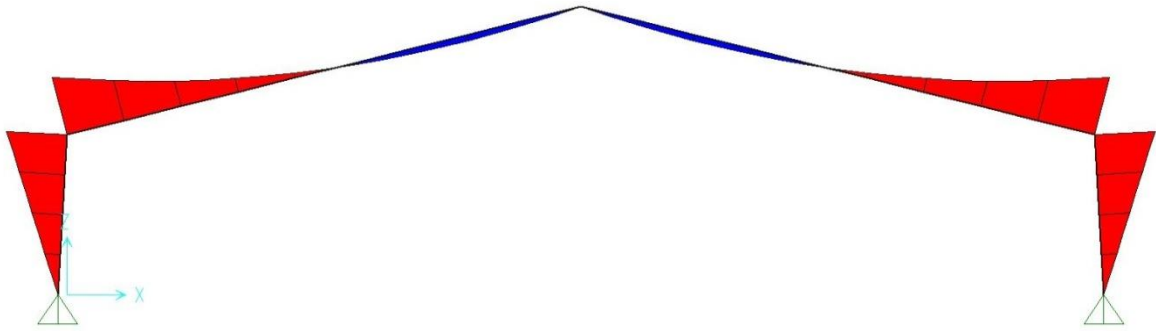
A.3.1 Notranje sile zaradi stalne obtežbe



Slika A14: Diagram osnih sil pri stalni obtežbi, $|N|_{max} = 60,31$ kN



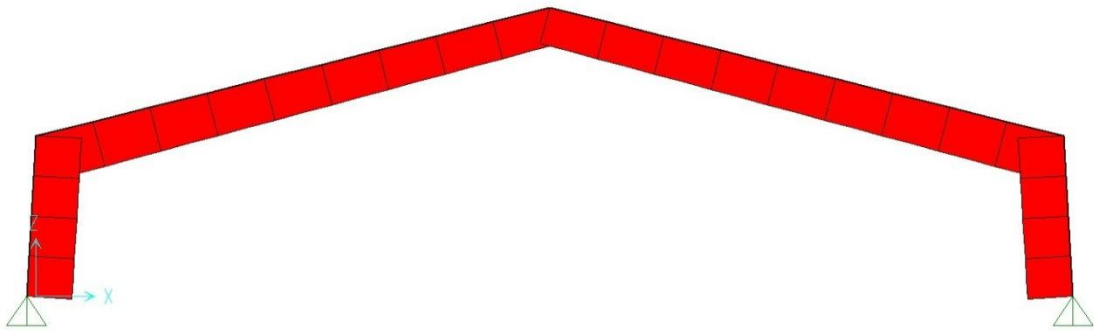
Slika A15: Diagram prečnih sil pri stalni obtežbi, $|V|_{max} = 42,33$ kN



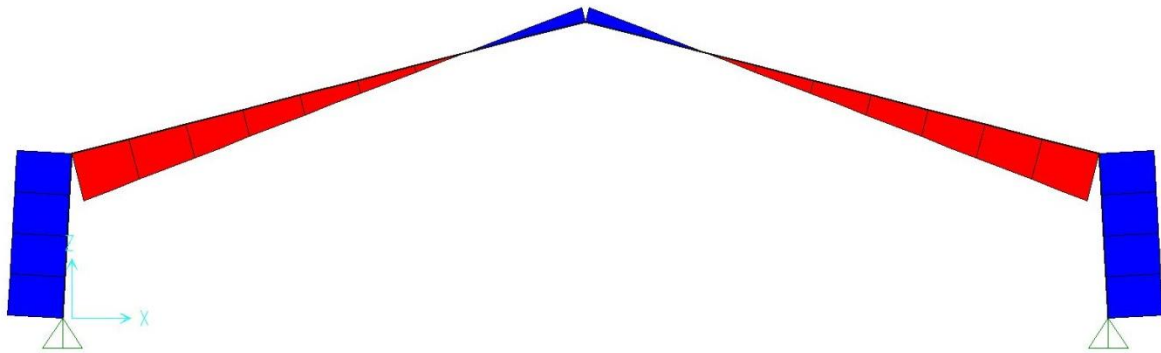
Slika A16: Diagram momentov pri stalni obteži, $|M|_{max} = 168,92$ kNm

A.3.2 Notranje sile zaradi obtežbe snega

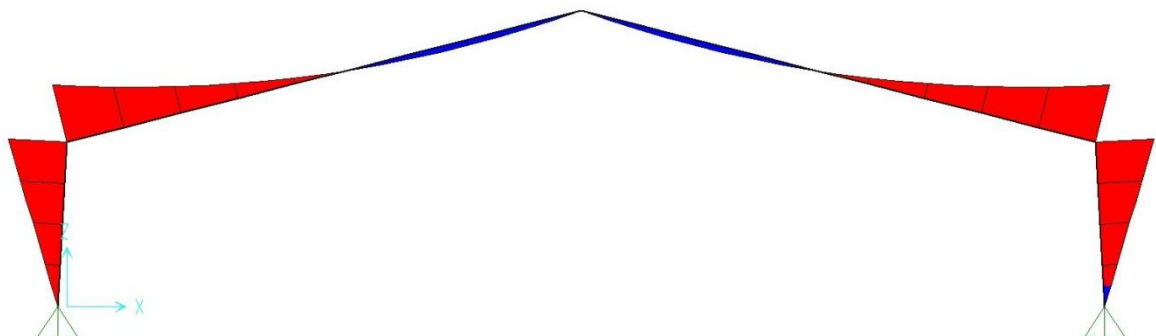
a) Simetričen sneg



Slika A17: Diagram osnih sil pri obtežbi simetričnega snega, $|N|_{max} = 59,25$ kN



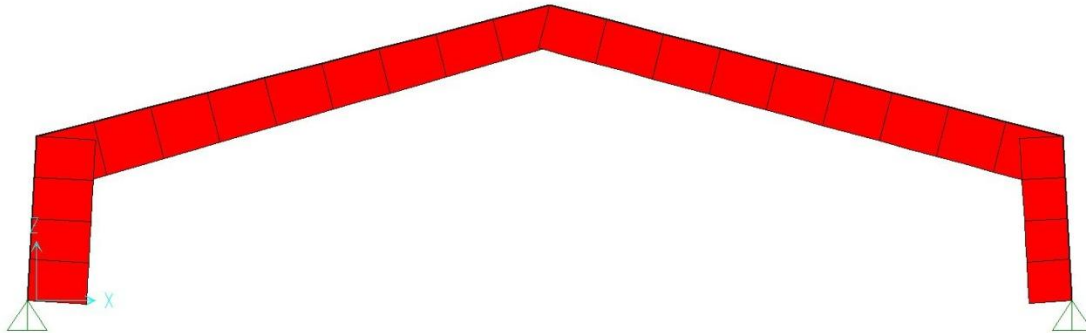
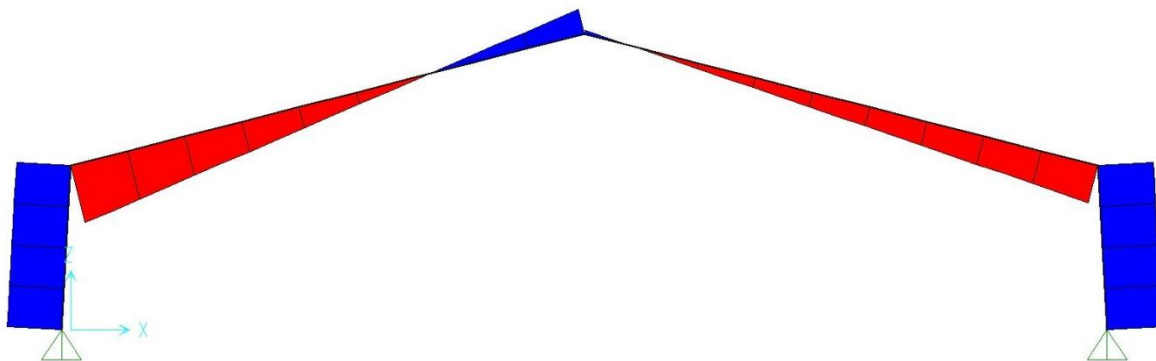
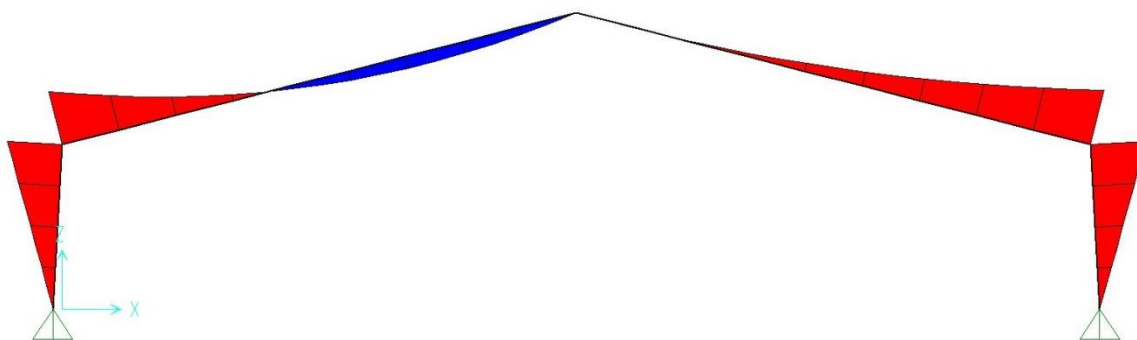
Slika A18: Diagram prečnih sil pri obtežbi simetričnega snega, $|V|_{max} = 44,56$ kN



Slika A19: Diagram momentov pri obtežbi simetričnega snega, $|M|_{max} = 178,52$ kNm

b) Nesimetričen sneg

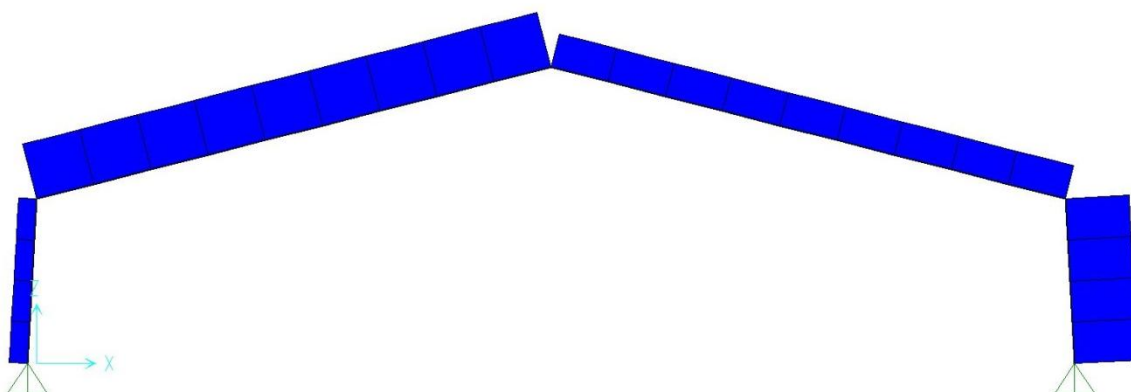
Prikazani so diagrami notranjih sil ene variante postavitve obtežbe nesimetričnega snega. V programu smo uporabili še varianto, ki je identična tej, le da ima prezrcaljeno obtežbo preko navpičnice, ki poteka skozi sredino okvira. Enako so potem prezrcaljeni tudi diagrami notranjih sil.

Slika A20: Diagram osnih sil pri obtežbi nesimetričnega snega, $|N|_{max} = 48,14$ kNSlika A21: Diagram prečnih sil pri obtežbi nesimetričnega snega, $|V|_{max} = 35,91$ kNSlika A22: Diagram momentov pri obtežbi nesimetričnega snega, $|M|_{max} = 135,36$ kNm**A.3.3 Notranje sile zaradi obtežbe vetra**

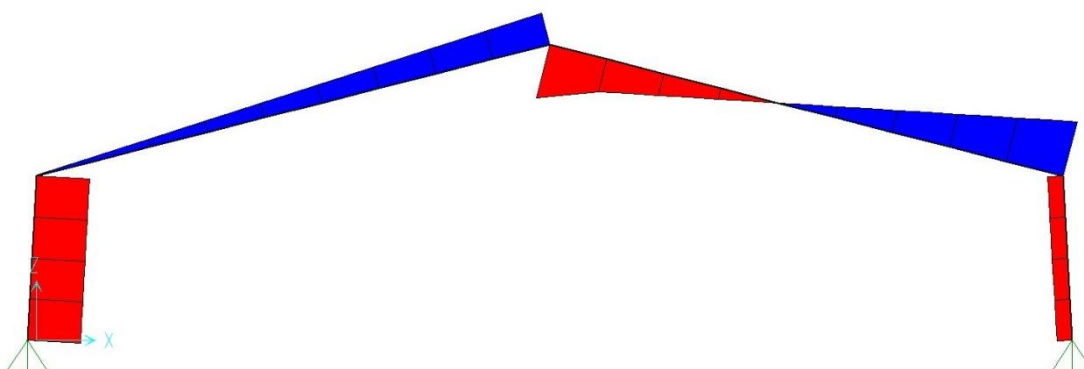
a) Obtežba vetra na streho

Prikazani so diagrami notranjih sil ene variante postavitve obtežbe vetra na strehi. V programu smo uporabili še varianto, ki je identična tej, le da ima prezrcaljeno obtežbo preko

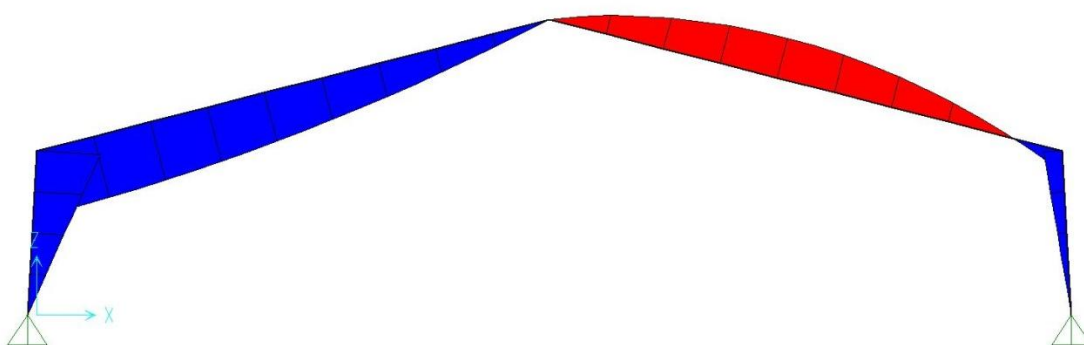
navpičnice, ki poteka skozi sredino okvira. Enako so potem prezrcaljeni tudi diagrami notranjih sil.



Slika A23: Diagram osnih sil pri obtežbi vetra na streho, $|N|_{max} = 7,72$ kN



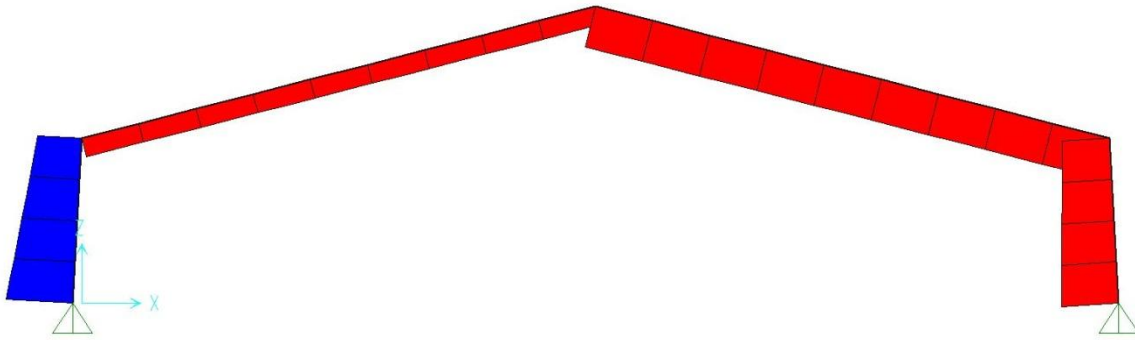
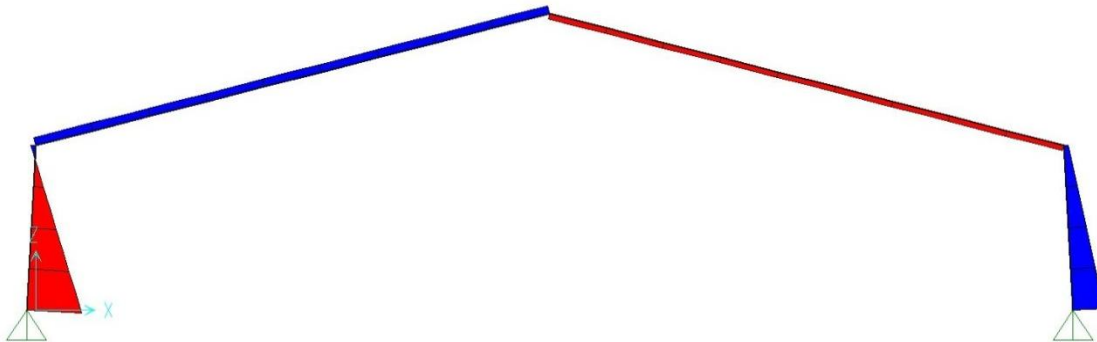
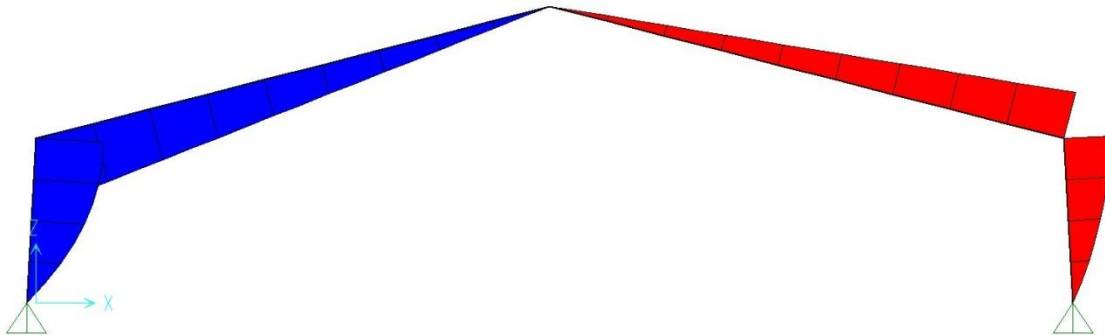
Slika A24: Diagram prečnih sil pri obtežbi vetra na streho, $|V|_{max} = 6,79$ kN



Slika A25: Diagram momentov pri obtežbi vetra na streho, $|M|_{max} = 26,01$ kNm

b) Obtežba vetra na stenah

Prikazani so diagrami notranjih sil ene variante postavitve obtežbe vetra na stenah. V programu smo uporabili še varianto, ki je identična tej, le da ima prezrcaljeno obtežbo preko navpičnice, ki poteka skozi sredino okvira. Enako so potem prezrcaljeni tudi diagrami notranjih sil.

Slika A26: Diagram osnih sil pri obtežbi vetra na stenah, $|N|_{max} = 0,81$ kNSlika A27: Diagram prečnih sil pri obtežbi vetra na stenah, $|N|_{max} = 4,50$ kNSlika A28: Diagram momentov pri obtežbi vetra na stenah, $|M|_{max} = 8,24$ kNm

A.3.4 Obtežne kombinacije maksimalnih notranjih statičnih količin

Za določanje maksimalnih notranjih statičnih količin smo uporabili različne obtežne kombinacije, ki smo jih izračunali po spodnji enačbi:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} g_{k,j} \text{ " + " } \gamma_{Q,1} q_{k,1} \text{ " + " } \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} q_{k,i} , \quad (5.14)$$

kjer so:

$\gamma_{G,j}$... delni varnostni faktor za stalni vpliv,

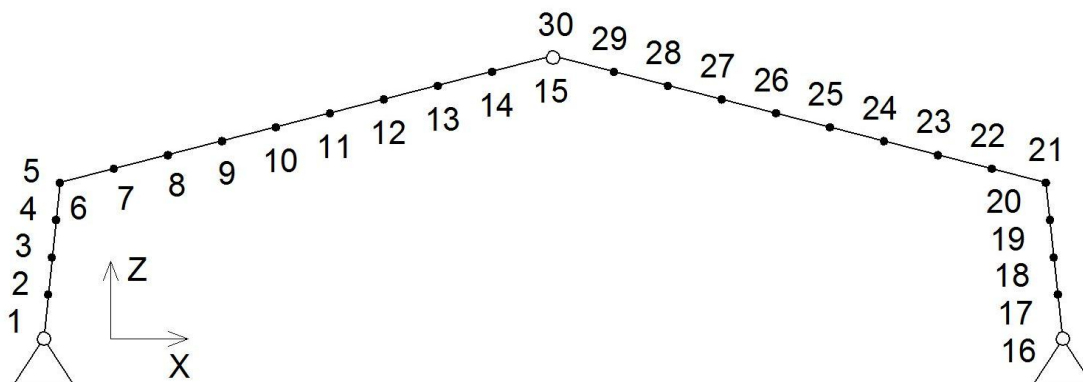
$g_{k,j}$... karakteristična vrednost stalnega vpliva,

$\gamma_{Q,i}$... delni varnostni faktor za spremenljiv vpliv,

$\gamma_{Q,1}$... delni varnostni faktor za prevladujoč spremenljiv vpliv

ψ_0 ... faktor za kombinacijsko vrednost spremenljivega vpliva in

$q_{k,i}$... karakteristična vrednost spremenljivega vpliva.



Slika A29: Točke okvira

→ Obtežna kombinacija za določitev minimalne osne sile:

$$1,35 g_{celotna} + 1,5 q_{S,simetričen} + 1,5 \times 0,6 q_{W,stena,neg}$$

→ Obtežna kombinacija^{A4} za določitev minimalnega upogibnega momenta:

$$1,35 g_{celotna} + 1,5 q_{S,simetričen} + 1,5 \times 0,6 q_{W,stena}$$

Preglednici A4 in A5 prikazujeta minimalne in pripadajoče notranje statične količine v različnih točkah okvirne konstrukcije, ki so bile dobljene z dvema različnima obtežnima kombinacijama. Pri določanju obtežnih kombinacij smo iz računa izločili obtežbo vetra na streho, saj je ugodno vplivala na velikost notranjih sil. Lokacije točk v okviru so prikazane na sliki A29. Točke 1, 15, 30 in 16 se nahajajo na mestih členkov.

Preglednica A4: Notranje sile pri obtežni kombinaciji za N_{MIN}

Preglednica A5: Notranje sile pri obtežni kombinaciji za M_{MIN}

	Točka	N_{MIN} [kN]	V_{PRIP} [kN]	M_{PRIP} [kN m]	Točka	N_{PRIP} [kN]	V_{PRIP} [kN]	M_{MIN} [kN m]
Steber	1	-154,3	108,6	0,0	1	-152,9	102,3	0,0
	2	-152,8	108,2	-108,5	2	-151,6	103,5	-103,0
	3	-151,2	107,8	-216,7	3	-150,0	104,7	-207,3
	4	-149,2	107,4	-324,5	4	-148,1	105,9	-312,7
	5	-147,0	107,0	-431,9	5	-146,0	107,1	-419,3
Prečka	6	-146,4	-107,8	-431,9	6	-146,2	-106,9	-419,3
	7	-142,1	-90,7	-289,5	7	-141,8	-89,8	-278,4
	8	-137,7	-73,9	-171,6	8	-137,5	-72,9	-161,8
	9	-133,5	-57,2	-77,6	9	-133,2	-56,3	-69,2
	10	-129,3	-40,8	-7,3	10	-129,0	-39,8	-0,4
	11	-125,1	-24,6	39,6	11	-124,9	-23,6	45,1
	12	-121,1	-8,7	63,4	12	-120,8	-7,7	67,6
	13	-117,0	7,1	64,6	13	-116,8	8,0	67,3
	14	-113,1	22,6	43,3	14	-112,8	23,5	44,7
	15	-109,2	37,9	0,0	15	-108,9	38,8	0,0
Steber	16	-113,9	19,3	0,0	16	-114,2	18,3	0,0
	17	-116,7	8,2	19,7	17	-117,0	7,3	18,3
	18	-119,6	-3,0	23,5	18	-119,9	-4,0	20,7
	19	-122,5	-14,4	11,0	19	-122,8	-15,4	6,8
	20	-125,5	-26,1	-18,1	20	-125,8	-27,1	-23,6

se nadaljuje ...

^{A4} Obtežni kombinaciji za določitev N_{MIN} ter določitev in M_{MIN} se med seboj razlikujeta po predznaku obtežbe $q_{W,stena}$

... nadaljevanje Preglednice A4 in Preglednice A5

Prečka	21	-128,6	-38,0	-64,1	21	-128,8	-39,0	-71,0
	22	-131,7	-50,2	-127,3	22	-131,9	-51,2	-135,6
	23	-134,9	-62,5	-208,1	23	-135,1	-63,5	-217,8
	24	-138,1	-75,1	-306,8	24	-138,3	-76,1	-317,9
	25	-141,4	-88,0	-423,7	25	-141,6	-88,9	-436,2
	26	-126,6	108,2	-423,7	26	-127,6	108,1	-436,2
	27	-128,7	107,0	-316,0	27	-129,8	108,5	-327,8
	28	-130,5	105,8	-209,4	28	-131,7	108,9	-218,9
	29	-132,1	104,6	-104,1	29	-133,4	109,3	-109,6
	30	-133,4	103,4	0,0	30	-134,8	109,7	0,0

Ker so se računali spoji tudi glede na stare DIN standarde, smo v vozlišču okvira izračunali maksimalne notranje statične količine (N_{MIN} , M_{MIN}) še v skladu s temi standardi. Uporabili smo enako obtežbo in obtežne kombinacije kot pri računu glede na standarde Evrokod, razlika je bila le v tem, da so imeli varnostni in kombinacijski faktorji pri DIN obtežnih kombinacijah vrednost 1,0.

Preglednica A6: Notranje sile pri obtežnih kombinacijah za N_{MIN} in M_{MIN} v vozlišču spoja

Element	Obtežna kombinacija	N_{MIN} oz. V_{PRIP} [kN]	V_{PRIP} [kN]	M_{PRIP} oz. M_{MIN} [kN m]
Prečka	N_{MIN}	-103,50	-76,01	-307,08
Steber		-103,79	75,74	
Prečka	M_{MIN}	-103,25	-63,44	-310,00
Steber		-102,63	76,91	