

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:

Gabršček, D., 2016. Pripomočki za račun odpornosti priključkov lesenih konstrukcij pri uporabi kovinskih paličnih veznih sredstev. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Lopatič, J., somentor Saje, D.): 33 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5926/>

Datum arhiviranja: 13-10-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Gabršček, D., 2016. Pripomočki za račun odpornosti priključkov lesenih konstrukcij pri uporabi kovinskih paličnih veznih sredstev. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Lopatič, J., co-supervisor Saje, D.): 33 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5926/>

Archiving Date: 13-10-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

DANI GABRŠČEK

**PRIPOMOČKI ZA RAČUN ODPORNOSTI
PRIKLJUČKOV LESENIH KONSTRUKCIJ PRI
UPORABI KOVINSKIH PALIČNIH VEZNIH SREDSTEV**

Diplomska naloga št.: 267/B-GR

**TOOLS FOR CALCULATING THE RESISTANCE OF
METAL DOWEL-TYPE CONNECTIONS OF TIMBER
STRUCTURES**

Graduation thesis No.: 267/B-GR

Mentor:

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Somentor:

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, 22. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE (ERRATA)

Stran	z	napako	Vrstica z	napako	Namesto	Naj bo
-------	---	--------	-----------	--------	---------	--------

»Ta stran je namenoma prazna«

IZJAVA

Spodaj podpisani študent DANI GABRŠČEK, vpisna številka 26110414, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: PRIPOMOČKI ZA RAČUN ODPORNOSTI PRIKLJUČKOV LESENIH KONSTRUKCIJ PRI UPORABI KOVINSKIH PALIČNIH VEZNIH SREDSTEV

IZJAVLJAM

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: Ljubljana

Datum: 16.9.2016

Podpis študenta:

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKA – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 624.04:624.07(497.4)(043.2)
- Avtor:** Dani Gabršček
- Mentor:** izr. prof. dr. Jože Lopatič
- Somentor:** doc. dr. Drago Saje
- Naslov:** Pripomočki za račun odpornosti priključkov lesenih konstrukcij pri uporabi kovinskih paličnih veznih sredstev
- Tip dokumenta:** diplomska naloga – univerzitetni študij
- Obseg in oprema:** 33 str., 42 sl., 5 pregl.
- Ključne besede:** leseni priključki, račun odpornosti veznega sredstva, Johansenove enačbe, Excel program, mehanska vezna sredstva paličnega tipa

Izvleček:

V okviru diplomske naloge sem izdelal program za račun odpornosti priključkov lesenih konstrukcij pri uporabi kovinskih paličnih veznih sredstev. Program je izdelan s pomočjo razvijalca v Microsoftovem programu Excel. Uporabljen je programski jezik Visual Basic (VBA). Program računa odpornosti različnih mehaničnih veznih sredstev paličnega tipa, kot so žebli, lesni vijaki, sponke, vijaki in trni v različnih enostrižnih in dvostržnih ter nekaterih večstrižnih lesenih priključkih. Račun temelji na izrazih Johansenove teorije, ki je nekoliko spremenjena v Evrokodu 5. Prvi del diplomske naloge opisuje Johansenove enačbe in njihovo aplikacijo v Evrokodu 5, v drugem delu pa so opisani delovanje programa in uporabljene enačbe pri vsaki vrsti veznega sredstva.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

- UDC:** 624.04:624.07(497.4)(043.2)
- Author:** Dani Gabršček
- Supervisor:** assoc. prof. Jože Lopatič Ph.D.
- Co-advisor:** assist. prof. Drago Saje Ph.D.
- Title:** Tools for calculating the resistance of metal dowel-type connections of timber structures
- Document type:** Graduation Thesis – University studies
- Notes:** 33 p., 42 fig., 5 tab.
- Keywords:** timber connections, calculation of load-carrying capacity of fastener, Johansen's yield theory, Excel program, mechanical dowel-type fasteners

Abstract:

Within the thesis I made a computer program created in the developer mode of Microsoft Excel program. The programming language used is called Visual Basic (VBA). Program can calculate load-carrying capacity of metal dowel-type fasteners such as nails, screws, bolts and dowels in a different type of single shear, double shear and some multiple shear timber connections. Calculations are based on Johansen's yield theory which is slightly modified by Eurocode 5. First part of thesis describes Johansen's equations and their application in Eurocode 5, the second part describes program operation and the equations used for each type of fastener.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, izr. prof. Jožetu Lopatiču in somentorju doc. dr. Dragu Sajetu za pomoč in usmerjanje pri pisanju diplomske naloge.

Hvala tudi vam, starša Marko in Nataša, brat Tevž, sestri Teja in Tjaša za vso podporo izkazano v času študija in pisanja diplomske naloge.

Hvaležen sem tudi tebi Darja, ker si me vseskozi spodbujala in mi vedno stala ob strani.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

IZJAVA	III
BIBLIOGRAFSKA – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VII
ZAHVALA	IX
1. UVOD	1
2. KOVINSKA PALIČNA VEZNA SREDSTVA	2
3. JOHANSENOVA TEORIJA	3
3.1 MATERIALNE KARAKTERISTIKE	3
3.2 JOHANSENOVE ENAČBE	5
3.2.1 <i>Priključki les-les</i>	6
3.2.2 <i>Priključki les-pločevina</i>	11
3.3 JOHANSENOVE ENAČBE V IZRAZIH ZA DOLOČITEV ODPORNOSTI VEZNI SREDSTEV V EVROKODU 5	15
4. OPIS IZDELANEGA PROGRAMA	16
4.1 RAZLIČNA VEZNA SREDSTVA	16
4.1.1 <i>Žebliji</i>	16
4.1.2 <i>Sponke</i>	17
4.1.3 <i>Palični mozniki (Trni) in vijaki</i>	17
4.1.4 <i>Lesni vijaki</i>	17
4.2 VHODNI PODATKI	18
4.3 PARAMETRI POTREBNI ZA IZRAČUN ODPORNOSTI VEZNEGA SREDSTVA	19
4.3.1 <i>Premer veznega sredstva</i>	19
4.3.2 <i>Karakteristični polnoplastični upogibni moment</i>	19
4.3.3 <i>Karakteristična vtisna trdnost</i>	20
4.3.4 <i>Dimenziji t_1 in t_2</i>	21
4.3.4 <i>Trenje in izvlečna odpornost veznega sredstva</i>	21
4.4 OPIS KODE PROGRAMA	24
4.5 RAČUN ODPORNOSTI ENOSTRIŽNEGA PRIKLJUČKA	28
4.6 RAČUN ODPORNOSTI VEČSTRIŽNEGA PRIKLJUČKA	29
5. ZAKLJUČEK	32
VIRI	33

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO SLIK

Slika 1: Odprt žebeljan priključek po testu, s katerim je bila določena odpornost [1]	2
Slika 2: Idealni togo plastičen material [1]	3
Slika 3: Vrste priključkov [3]	5
Slika 4: Shematski prikaz porušnih mehanizmov za priključke les-les [5]	6
Slika 5: Način porušitve za enostrižni priključek les-les z dvema mestoma plastifikacije [1]	6
Slika 6: Način porušitve (a) in pripadajoč izraz (L-L) [1]	8
Slika 7: Način porušitve (b) in pripadajoč izraz (L-L) [1]	8
Slika 8: Način porušitve (c) in pripadajoč izraz (L-L) [1]	8
Slika 9: Način porušitve (d) in pripadajoč izraz (L-L) [1]	9
Slika 10: Način porušitve (e) in pripadajoč izraz (L-L) [1]	9
Slika 11: način porušitve (f) in pripadajoč izraz (L-L) [1]	9
Slika 12: Način porušitve (g) in pripadajoč izraz (L-L-L) [1]	10
Slika 13: Način porušitve (h) in pripadajoč izraz (L-L-L) [1]	10
Slika 14: Način porušitve (j) in pripadajoč izraz (L-L-L) [1]	10
Slika 15: Način porušitve (k) in pripadajoč izraz (L-L-L) [1]	10
Slika 16: Shematski prikaz porušnih mehanizmov za priključke les-pločevina [5]	11
Slika 17: Način porušitve (a) in pripadajoč izraz (L-P) [1]	11
Slika 18: Način porušitve (b) in pripadajoč izraz (L-P) [1]	12
Slika 19: Način porušitve (c) in pripadajoč izraz (L-P) [1]	12
Slika 20: Način porušitve (d) in pripadajoč izraz (L-P) [1]	12
Slika 21: Način porušitve (e) in pripadajoč izraz (L-P) [1]	12
Slika 22: Način porušitve (f) in pripadajoč izraz (L-P-L) [1]	13
Slika 23: Način porušitve (g) in pripadajoč izraz (L-P-L) [1]	13
Slika 24: Način porušitve (h) in pripadajoč izraz (L-P-L) [1]	13
Slika 25: Način porušitve (j) in pripadajoč izraz (P-L-P) [1]	14
Slika 26: Način porušitve (k) in pripadajoč izraz (P-L-P) [1]	14
Slika 27: Način porušitve (m) in pripadajoč izraz (P-L-P) [1]	14
Slika 28: Po vrsti: gladki žebli, obročasti žebelj in žebelj s spiralnim navojem [2]	16
Slika 29: Trni in vijaki [1]	17
Slika 29: Uporabniško okno	18
Slika 30: Prikaz dimenzij t_1 in t_2 [6]	21
Slika 31: Deformiranje veznega sredstva v primeru plastifikacije [2]	22
Slika 32: Dva prikaza rezultatov	27
Slika 33: Primeri opozoril	27
Slika 34: Primer enostrižnega priključka [2]	28
Slika 35: Vnos vhodnih podatkov za račun enostrižnega priključka	28
Slika 36: Načini porušitve [5]	28
Slika 37: Rezultati računa enostrižnega priključka	29

Slika 38: Primer večstrižnega priključka [2]	29
Slika 39: Vnos vhodnih podatkov za račun večstrižnega priključka	30
Slika 40: Prikaz vnosa kota	30
Slika 41: Združljivi načini porušitev za večstrižni priključek s petimi elementi [3]	31
Slika 42: Rezultati računa večstrižnega priključka	31

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Johansenove enačbe v izrazih za določitev odpornosti veznih sredstev v Evrokodu 5.....	15
Preglednica 2: Karakteristični upogibni moment različnih veznih sredstev [2].	19
Preglednica 3: Vtisna trdnost za žeblje [2]	20
Preglednica 4: Vtisna trdnost za vijake in žeblje premera večjega od 8 mm [2].....	20
Preglednica 5: Karakteristična trdnost za tlak pravokotno na vlakna	26

»Ta stran je namenoma prazna«

1. UVOD

Les poleg kamna spada med tradicionalen gradbeni material in gradbeno stroko spremlja vse od njenih začetkov. Z industrijsko revolucijo je v ospredje prišla uporaba betona in jekla ter les neupravičeno potisnila v ozadje. V današnjem času pa se je uporaba lesa ponovno obudila, saj je les glede na svojo majhno težo odličen gradbeni material. Vse več je različnih študij, ki ugotavljajo, da les dobro vpliva na počutje ljudi in je zato nadvse primeren za konstrukcije, ki so vidne [3].

Les je naraven material in zato močno dimenzijsko omejen. Najlepše se to vidi pri masivnem lesu, kjer so dimenzije omejene v smislu največjih možnih dolžin in največjih možnih prečnih prereзов. Lesene konstrukcije so zato običajno sestavljene iz večjega števila sestavnih elementov, ki jih povezujejo vezna sredstva. Njihova naloga je, da prevzamejo rezultante navideznih napetosti na stičnih ploskvah ter s tem prenašajo sile med elementi [3].

Sile med elementi se najpogosteje prenašajo preko adhezije (lepila) ali preko striga pri uporabi veznih sredstev paličnega tipa (žebliji, vijaki, trni, itd.). Slednji pritegujejo vse večje zanimanje [1]. Zavedati se moramo, da so priključki izvedeni z mehanskimi veznimi sredstvi v lesenih konstrukcijah, v nasprotju z njihovimi ekvivalenti v jeklenih in betonskih konstrukcijah, bistveno bolj podajni in ne morejo zagotavljati povsem toge povezave med sestavnimi elementi [5].

Najobičajnejši tip veznega sredstva v priključku lesenih konstrukcij je mehanski tip, katerega sestavljata dve glavni skupini. V prvi izmed teh so vezna sredstva kovinskega paličnega tipa, pri katerem se napetosti prenašajo preko striga po principu paličnega moznika. V to skupino spadajo žebliji, vijaki, lesni vijaki, sponke, itd. V drugo skupino spadajo vezna sredstva, ki napetosti prenašajo preko nosilnosti lesa v bližini površine, kot so krempljaste plošče, mozniki posebnih patentiranih oblik, itd. [2].

2. KOVINSKA PALIČNA VEZNA SREDSTVA

Pojem "palično vezno sredstvo" je izraz za skupino veznih sredstev, za katere je značilno prenašanje obremenitve med povezanimi elementi v priključku preko kombinacije upogiba in striga v veznem sredstvu ter striga in bočne nosilnosti v lesenem elementu [2].

Če pogledamo Sliko 1, ki prikazuje odprt žebelj priključek po izvedenem testu, katerega namen je ugotoviti nosilnost priključka, vidimo, da je za porušitev značilnih več različnih pojavov.

Opazimo lahko:

- da sta elementa zdrsnila drug ob drugem,
- žebelja sta se plastično deformirala zaradi upogiba,
- les med obema elementoma v bližini žebelja je porušen zaradi njegovega vpliva,
- žebelj na levi strani je deloma izvlečen.

Ta opažanja kažejo tri nosilna obnašanja v priključku. Ta so:

- upogibna odpornost veznega sredstva, katera je odvisna od njegovega premera in njegove upogibne trdnosti,
- odpornost lesa na vtiskanje veznega sredstva, na katero vplivata predvsem gostota lesenega elementa ter površina kontakta, torej premer veznega sredstva in njegova dolžina in
- izvlečna odpornost veznega sredstva. Veznemu sredstvu navoj ali hrapavost poveča izvlečno trdnost.



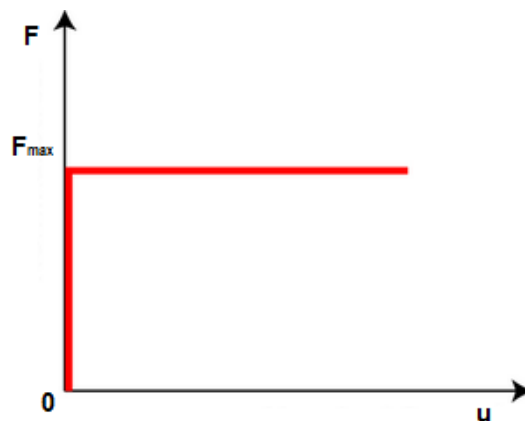
Slika 1: Odprt žebelj priključek po testu, s katerim je bila določena odpornost [1]

3. JOHANSENOVA TEORIJA

Splošna teorija za izračun odpornosti priključkov lesenih elementov s kovinskimi paličnimi veznimi sredstvi obremenjenimi pravokotno na njihovo os, je bila najprej razvita s strani Johansena v letu 1949. Johansen je modeliral palično vezno sredstvo kot nosilec vdelan v lesu. Porušni mehanizem skupno določajo: geometrija priključka, vtisna trdnost sestavnih elementov in upogibna trdnost veznega sredstva [1].

3.1 Materialne karakteristike

Johansenova teorija temelji na predpostavki, da se material na osnovi lesa pri vtisni obremenitvi in vezno sredstvo pri upogibni obremenitvi, obnašata togo-plastično. Ta predpostavka bistveno olajša analizo, pri tem pa skorajda ne pride do bistvene napake pri končnem rezultatu [1].



Slika 2: Idealni togo plastičen material [1]

Vtisna trdnost f_h je definirana kot količnik največje obremenitve in ploskve projekcije veznega sredstva na lesen element,

$$f_h = \frac{F_{max}}{d \cdot t}$$

kjer sta d premer veznega sredstva in t debelina lesenega elementa.

Vtisna trdnost ni materialna ampak sistemska karakteristika. Odvisna je od materialnih lastnosti uporabljenega veznega sredstva in lesenega elementa. Opravljenih je bilo veliko testov vtisne trdnosti, katere je Werner v letu 1993 povzel in identificiral najpomembnejše parametre [1].

- Gostota: ugotovil je, da vtisna trdnost linearno raste s povečevanjem gostote lesa listavcev, iglavcev in topolovine ter vezane plošče.
- Premer veznega sredstva in premer luknje: s povečevanjem premera veznega sredstva se zmanjšuje vtisna trdnost, vendar je njegov vpliv manjši od vpliva gostote. Premer predhodno izvrtane luknje do dveh milimetrov večje od premera veznega sredstva ima zanemarljiv vpliv.

- Kot med smerjo sile in smerjo vlaken: vpliv kota je večji pri večjih premerih veznega sredstva in se razlikuje glede na vrsto uporabljenega lesa, saj je vpliv ortotropnosti izrazitejši pri iglavcih (mehki les) kot pri listavcih (trdi les). Vpliv dobro opiše Hankinsonova enačba:

$$f_{h,\alpha} = \frac{f_{h,0} \cdot f_{h,90}}{f_{h,0} \sin^2 \alpha + f_{h,90} \cos^2 \alpha}$$

- Trenje med veznim sredstvom in okoliškim lesom: povečana hrapavost površine veznega sredstva ali kako drugače povečana sprijemljivost med veznim sredstvom in lesom, povečuje vtisno trdnost in zmanjšuje težnjo po cepitvi lesa v smeri vlaken.
- Vlažnost lesa: kot na večino togostnih in trdnostnih karakteristik lesa, tudi na vtisno trdnost vpliva vsebnost vlage, ko je ta pod mejo nasičenosti.
- Ojačitev lesa pravokotno na smer vlaken: prilepljen kos plošče na lesni osnovi ali lesni vijak orientiran pravokotno na smer vlaken, prepreči cepljenje lesa in zato poveča vtisno trdnost in duktilnost.

Izraze za vtisno trdnost lesa, dobljene iz številnih preiskav [1], lahko zapišemo v odvisnosti od premera veznega sredstva in gostote lesa za sile v smeri vlaken:

$$f_h = 0,082\rho d^{-3} \quad \text{brez predhodnega vrtanja lukenj in} \quad (3.1)$$

$$f_h = 0,082(1 - 0,01d)\rho \quad \text{s predhodnim vrtanjem lukenj.} \quad (3.2)$$

V izrazih (3.1) in (3.2) ρ predstavlja gostoto v kg/m^3 in d pa premer veznega sredstva v mm.

Za plošče na osnovi so bili pridobljeni podobni izrazi na podlagi preizkušanj. Za vezane plošče je vtisna trdnost za približno tretjino večja od vtisne trdnosti masivnega lesa enake gostote.

Upogibno trdnost kovinskega paličnega veznega sredstva izračunamo s pomočjo njegovega momenta plastifikacije M_y . Johansen je upošteval za spodnjo mejo elastično upogibno nosilnost veznega sredstva krožnega prereza.

$$M_{y,el} = \frac{\pi}{32} \cdot f_y \cdot d^3, \quad (3.3)$$

kjer je f_y meja elastičnosti uporabljenega veznega sredstva.

Zgornja meja pa je plastična upogibna zmogljivost veznega sredstva okroglega prereza;

$$M_{y,pl} = \frac{1}{6} \cdot f_y \cdot d^3, \quad (3.4)$$

kar zahteva velike deformacije in posledično kot upogiba v veznem sredstvu velikosti do 45° . Ker se material po plastifikaciji pri večjih deformacijah ponovno utrdi, dobimo večje vrednosti in lahko v izrazu (3.4) zamenjamo mejo plastičnosti z

$$f_y = 0,8 \cdot f_u. \quad (3.5)$$

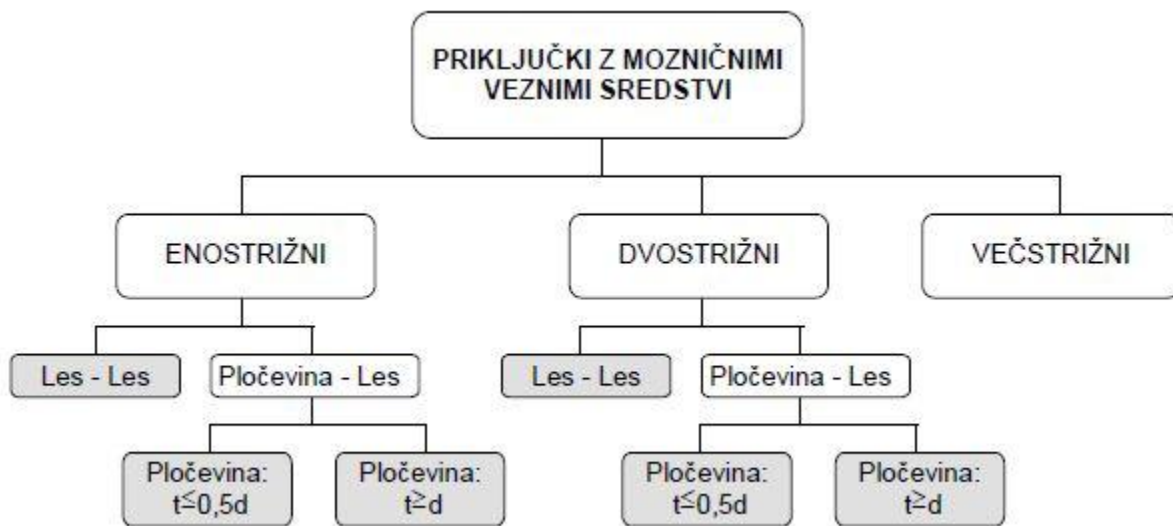
Mnoge raziskave, na področju vtisne trdnosti lesa pri priključkih s kovinskimi veznimi sredstvi, so pokazale, da je kot krivljenja veznih sredstev manjši od 45° . V splošnem velja, da kot krivljenja narašča z zmanjševanjem premera veznega sredstva. Teoretična izpeljava kota ob zdrsu priključka 15 mm, nam da naslednjo enačbo za moment plastifikacije kovinskih paličnih tipih veznih sredstev z krožnim prerezom [1]:

$$M_y = 0,30 \cdot f_u \cdot d^{2,6}. \quad (3.6)$$

3.2 Johansenove enačbe

Izsledki raziskav različnih priključkov pokažejo omejeno število možnih načinov porušitev v odvisnosti od geometrije priključka, vtisne trdnosti sestavnih elementov in momenta plastifikacije veznega sredstva.

Ker je nosilnost veznega sredstva odvisna tudi od tega, ali je priključek iz samih lesenih elementov ali pa je v priključku prisotna tudi pločevina, so glede na omenjeno, podani različni izrazi. Razlikujemo torej priključke, ki so sestavljeni iz lesa in pločevine ter priključke sestavljene le iz lesa, pri tem pa še vsakega od teh priključkov razdelimo na tiste z eno strižno ravnino in tiste z dvema strižnima ravninama. Za vsakega izmed priključkov so določene enačbe in načini porušitev (glej Sliko 3).

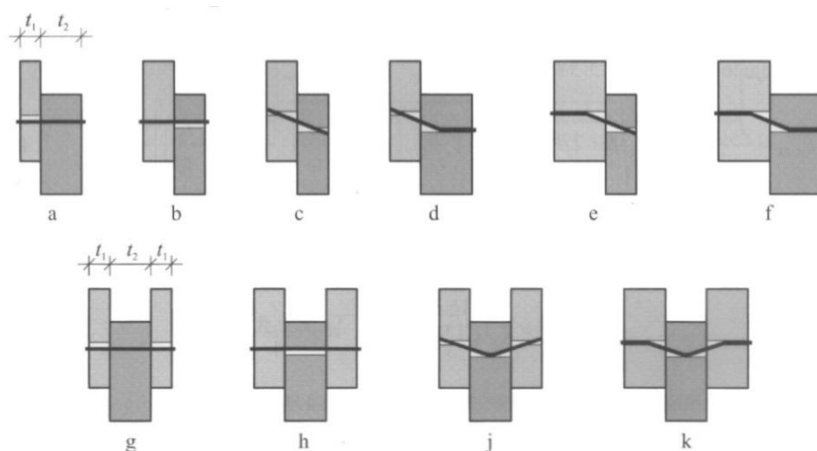


Slika 3: Vrste priključkov [3]

3.2.1 Priključki les-les

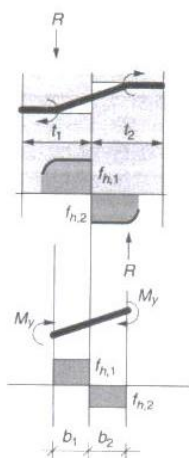
Obravnavamo priključke dveh ali več elementov, ki so izdelani na osnovi lesa. To pomeni, da ne gre le za zveze elementov izdelanih iz masivnega in lepljenega lesa, temveč so lahko vključeni tudi elementi izdelani iz predelanega lesa (OSB plošče, iverne plošče, vezane plošče,...). Bistveno je, da je vezno sredstvo deformabilno v vseh sestavnih elementih.

Slika 4 prikazuje mogoče načine porušitve za enostrižne in dvostrizne priključke les-les. Porušitev se lahko zgodi zaradi prekoračitve vtisne trdnosti enega ali dveh sestavnih elementov (načini porušitev (a), (b), (c), (g) in (h)) in hkrati prekoračitve upogibne odpornosti veznega sredstva (načini porušitve (d),(e),(f),(j) in (k)). Če je vezno sredstvo upogibno plastificirano, se lahko pojavita ena (načini porušitev (d),(e) in (j)) ali dve (načini porušitve (f) in (k)) točki zasuka veznega sredstva glede na strižno ravnino [1].



Slika 4: Shematski prikaz porušnih mehanizmov za priključke les-les [5]

Za prikaz je v nadaljevanju izpeljava nosilnosti za eno vezno sredstvo za eno strižno ravnino pri načinih porušitve (f) in (k).



Slika 5: Način porušitve za enostrižni priključek les-les z dvema mestoma plastifikacije [1]

Nosilnost R je pridobljena na osnovi ravnotežnih pogojev (glej Sliko 5). Obravnavan je del med dvema točkama zasuka veznega sredstva, kjer je prišlo do upogibne plastifikacije. Normalne napetosti v veznem sredstvu so zanemarljive in strižne napetosti v točkah zasuka znašajo 0, ker moment v teh točkah doseže maksimum. Uporabljene so naslednje oznake:

- t_1 in t_2 sta debelini lesenega elementa ali globina prodiranja veznega sredstva v elementu,
- $f_{h,1}$ je vtisna trdnost ki ustreza lesu z debelino t_1 ,
- $f_{h,2}$ je vtisna trdnost, ki ustreza lesu z debelino t_2 ,
- b_1 in b_2 sta oddaljenosti mesta plastifikacije v posameznem elementu od strižne ravnine,
- β je razmerje vtisnih trdnosti,
- d je premer veznega sredstva,
- M_y je moment plastifikacije veznega sredstva,
- R je nosilnost priključka na eno strižno ravnino.

Vsota sil pravokotno na os veznega sredstva znaša:

$$f_{h,1} \cdot d \cdot b_1 = f_{h,2} \cdot d \cdot b_2$$

$$b_2 = \frac{b_1}{\beta}$$

Ravnotežje momentov poda:

$$\begin{aligned} 2 \cdot M_y &= f_{h,1} \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{\beta} + f_{h,2} \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{\beta} \\ &= f_{h,1} \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{\beta} + \beta \cdot f_{h,1} \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{\beta^2 \cdot 2} \\ &= f_{h,1} \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{\beta} \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \end{aligned}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot M_y}{f_{h,1} \cdot d}} \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}}$$

$$R = f_{h,1} \cdot d \cdot b_1 = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_y \cdot f_{h,1} \cdot d}$$

Za ostale načine porušitve se nosilnost izračuna po enakem principu [1].

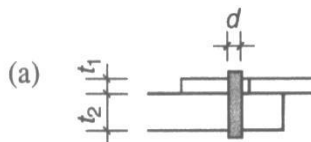
3.2.1.1 Priključki z enostrizno ravnino (enostrizni priključki)

Za enostrizne priključke les-les je mogočih 6 različnih načinov porušitve in za vsak način je izpeljana enačba, ki poda strižno nosilnost veznega sredstva. Od vseh šestih je merodajna najmanjša.

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

V tem primeru je strižna nosilnost veznega sredstva določena s pogojem trdnosti lesa. Povprečna kontaktna tlačna napetost med veznim sredstvom in lesom ne sme preseči bočne trdnosti lesa v prvem sestavnem elementu. Odpornost veznega sredstva je določena kot produkt vtisne trdnosti lesa prvega sestavnega elementa ter dolžine in premera veznega sredstva.

$$R = f_{h,1} t_1 d$$

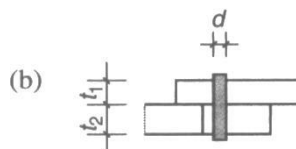


Slika 6: Način porušitve (a) in pripadajoč izraz (L-L) [1]

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

Gre za enak princip kot v prvem primeru, le da opazujemo drugi sestavni element priključka.

$$R = f_{h,1} t_2 d \beta$$

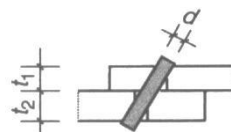


Slika 7: Način porušitve (b) in pripadajoč izraz (L-L) [1]

c) Zasuk veznega sredstva kot togega telesa.

V tem primeru so presežene vtisne trdnosti v obeh sestavnih elementih, zato se vezno sredstvo togo zasučje okoli točke vrtišča v strižni ravnini.

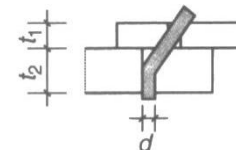
$$R = \frac{f_{h,1} t_1 d}{1 + \beta} \left\{ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right\} \quad (c)$$



Slika 8: Način porušitve (c) in pripadajoč izraz (L-L) [1]

d) Plastifikacija veznega sredstva zaradi kontaktnih napetosti v drugem elementu.

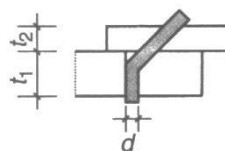
Upogibni moment, ki zaradi kontaktnih napetosti obremenjuje vezno sredstvo v drugem elementu priključka, doseže vrednost momenta plastifikacije veznega sredstva in povzroči večji zasuk.

$$R = \frac{f_{h,1}t_1d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_y}{f_{h,1}dt_1^2}} - \beta \right] \quad (d)$$


Slika 9: Način porušitve (d) in pripadajoč izraz (L-L) [1]

e) Plastifikacija veznega sredstva zaradi kontaktnih napetosti v prvem elementu.

Pogoji so enaki kot pri primeru d), le da tukaj doseže upogibni moment vrednost momenta plastifikacije v prvem elementu in povzroči večji zasuk.

$$R = \frac{f_{h,1}t_2d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_y}{f_{h,1}dt_2^2}} - \beta \right] \quad (e)$$


Slika 10: Način porušitve (e) in pripadajoč izraz (L-L) [1]

f) Plastifikacija veznega sredstva v obeh sestavnih elementih.

Vezno sredstvo se v obeh elementih priključka plastično deformira. Hkrati velja, da sta oba elementa približno enake debeline in da je vezno sredstvo tanko.

$$R = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_y f_{h,1}d}$$


Slika 11: način porušitve (f) in pripadajoč izraz (L-L) [1]

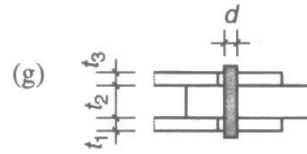
3.2.1.2 Priključki z dvema strižnima ravninama (dvostrizni priključek)

Spajamo po tri lesene sestavne elemente in predpostavimo simetrijo priključka. Izrazi so skoraj enaki kot pri enostrižni zvezi, le da zaradi predpostavke o simetriji odpadeta načina porušitve (c) in (e). Tako ostanejo še štirje načini porušitve. Pozorni moramo biti na dejstvo, da čeprav gre za dvostriznen stik, dobljene nosilnosti priključka pomenijo nosilnost veznega sredstva v eni strižni ravnini.

g) Bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v zunanjih sestavnih elementih.

Nosilnost veznega sredstva je določena s produktom vtisne trdnosti zunanjega elementa ter debeline in dolžine kontakta veznega sredstva z elementom.

$$R = f_{h,1} t_1 d$$

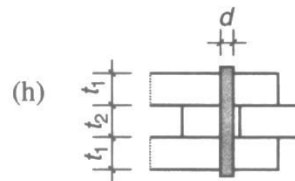


Slika 12: Način porušitve (g) in pripadajoč izraz (L-L-L) [1]

h) Bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v srednjem elementu.

Ker produkt vtisne trdnosti in površine pod plaščem veznega sredstva predstavlja nosilnost za obe strižni ravnini skupaj, moramo že znan izraz dodatno pomnožiti z 0.5, da dobimo nosilnost na eno strižno ravnino.

$$R = 0,5 f_{h,1} t_2 d \beta$$

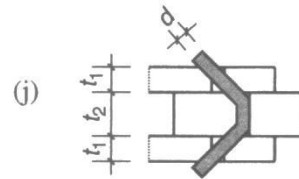


Slika 13: Način porušitve (h) in pripadajoč izraz (L-L-L) [1]

j) Plastifikacija veznega sredstva v srednjem sestavnem elementu priključka.

Izraz je enak kot v primeru enostrižne zveze primer (d).

$$R = \frac{f_{h,1} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_y}{f_{h,1} d t_1^2}} - \beta \right]$$

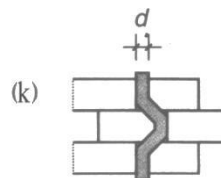


Slika 14: Način porušitve (j) in pripadajoč izraz (L-L-L) [1]

k) Plastifikacija veznega sredstva v vseh treh elementih.

Izraz je enak kot v primeru enostrižne zveze primer (f).

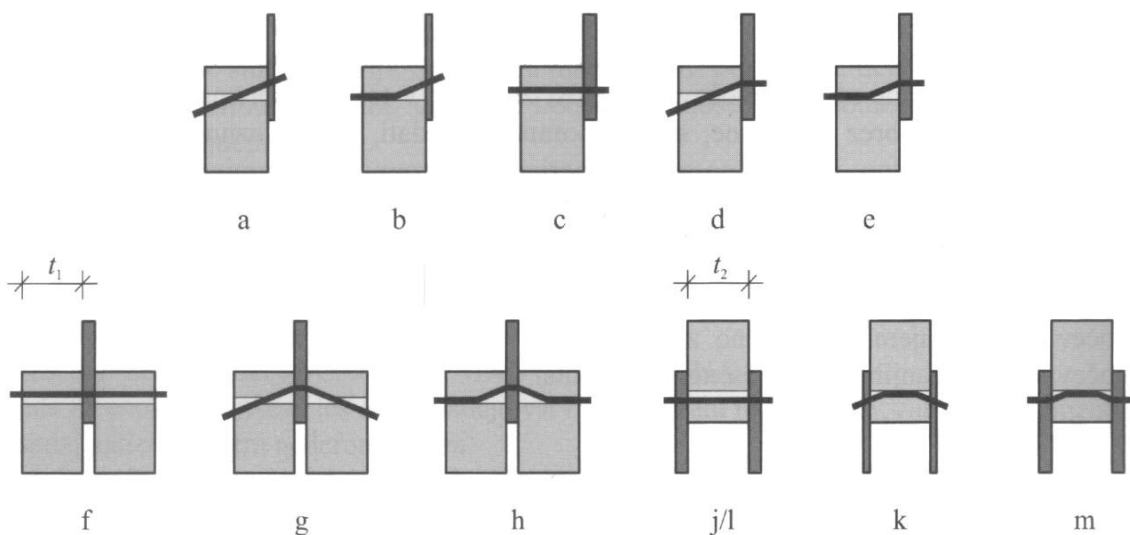
$$R = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_y f_{h,1} d}$$



Slika 15: Način porušitve (k) in pripadajoč izraz (L-L-L) [1]

3.2.2 Priključki les-pločevina

V tej različici obravnavamo spoje dveh ali več lesenih elementov, ki so medsebojno povezani še s pomočjo ene ali več pločevin. Togost priključka je v tem primeru večja kot v zvezah les-les, saj pločevina nudi veznemu sredstvu dodatno oporo. Upoštevamo dve različici opore, ki sta predvsem odvisni od debeline pločevine. Če je pločevina tanka, kar pomeni, da je njena debelina manjša od polovičnega premera veznega sredstva ($t \leq 0,5d$), predpostavljamo, da ne more prevzeti momenta, zato se vezno sredstvo v njej zasuka. Če pa je pločevina debela, kar pomeni, da je njena debelina večja od premera veznega sredstva ($t \geq d$), predpostavljamo vpetost veznega sredstva v pločevini. Za vmesne vrednosti debelin pločevine, se izračunajo izrazi za debelo in tanko pločevino. Strižna nosilnost je vrednost, ki jo dobimo z interpolacijo glede na debelino pločevine.



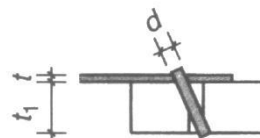
Slika 16: Shematski prikaz porušnih mehanizmov za priključke les-pločevina [5]

3.2.2.1 Priključki z eno strižno ravnino (enostrizni priključki)

a) Zasuk veznega sredstva kot togega telesa (tanka pločevina ne prevzema momenta).

Kontaktne napetosti na robu lesenega elementa dosežejo vtisno trdnost, zato se vezno sredstvo zavrti kot togo telo.

$$R = (\sqrt{2} - 1) f_{h,1} t_1 d$$

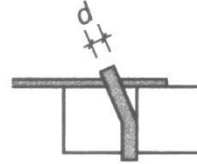


Slika 17: Način porušitve (a) in pripadajoč izraz (L-P) [1]

b) Plastifikacija veznega sredstva v lesenem elementu (tanka pločevina ne prevzema momenta).

Manj pogost pojav, ki se zgodi predvsem pri vitkih, manj togih veznih sredstvih, ki spajajo trd les.

$$R = \sqrt{2M_y f_{h,1} d}$$

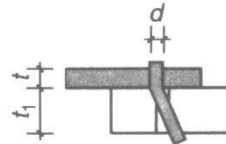


Slika 18: Način porušitve (b) in pripadajoč izraz (L-P) [1]

c) Plastifikacija veznega sredstva ob površju pločevine (vezno sredstvo vpeto v debelo pločevino).

Zaradi velike razlike v togosti med lesom in pločevino se na spoju nakopiči deformacijska energija, ki plastificira vezno sredstvo.

$$R = f_{h,1} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_y}{f_{h,1} d t_1^2}} - 1 \right]$$

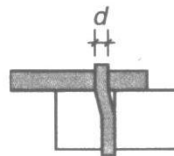


Slika 19: Način porušitve (c) in pripadajoč izraz (L-P) [1]

d) Plastifikacija veznega sredstva v lesenem elementu in ob površju pločevine (vezno sredstvo vpeto v debeli pločevini).

Predvsem značilno za vitkejša vezna sredstva pri togem priključku.

$$R = \sqrt{2} \sqrt{2M_y f_{h,1} d}$$

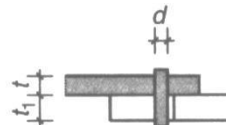


Slika 20: Način porušitve (d) in pripadajoč izraz (L-P) [1]

e) Porušitev lesa okoli veznega sredstva (vezno sredstvo vpeto v debeli pločevini).

Že znan primer, ko kontaktna napetost v lesu doseže vtisno trdnost lesa in pride do paralelnega vtiskanja veznega sredstva v les.

$$R = f_{h,1} t_1 d$$



Slika 21: Način porušitve (e) in pripadajoč izraz (L-P) [1]

3.2.2.2 Priključek z dvema strižnima ravninama (dvostrizni priključek)

Glede na lego pločevine razlikujemo dvostrizne priključke s pločevino kot srednjim elementom in priključek s pločevino kot zunanjima elementoma.

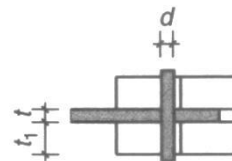
PLOČEVINA JE SREDNJI ELEMENT

Bočna nosilnost veznega sredstva je neodvisna od debeline pločevine, saj ta zaradi simetrije deluje kot toga vmesna podpora. Vezno sredstvo lahko modeliramo kot kontinuirani nosilec čez dve polji, pri čemer zunanji podpori nista togi pač pa zaradi deformabilnosti lesa linearno elastični. Ob predpostavki o simetričnosti priključka dobimo tri mogoče načine porušitve.

f) Porušitev lesa okoli veznega sredstva.

Porušitev se zgodi v obeh zunanjih lesenih elementih (simetrija). Nosilnost veznega sredstva je izračunana po že znanem produktu vtisne trdnosti lesa ter projekcije površine veznega sredstva v obeh lesenih elementih.

$$R = f_{h,1} t_1 d$$

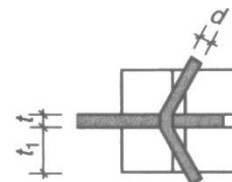


Slika 22: Način porušitve (f) in pripadajoč izraz (L-P-L) [1]

g) Plastifikacija veznega sredstva ob površini pločevine.

Upogibni moment doseže vrednost momenta plastifikacije na stiku lesa in pločevine.

$$R = f_{h,1} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_y}{f_{h,1} d t_1^2}} - 1 \right]$$

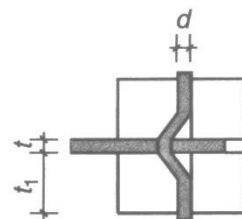


Slika 23: Način porušitve (g) in pripadajoč izraz (L-P-L) [1]

h) Plastifikacija veznega sredstva ob površini pločevine in v obeh zunanjih elementih.

Togost lesa in vitkost veznega sredstva povzročita, da moment doseže moment plastifikacije tudi v zunanjih lesenih elementih.

$$R = \sqrt{2} \sqrt{2M_y f_{h,1} d}$$



Slika 24: Način porušitve (h) in pripadajoč izraz (L-P-L) [1]

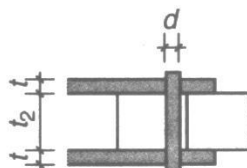
PLOČEVINA JE NA ZUNANJI STRANI

Porušni mehanizmi so podobni kot pri zvezi les-les, le da se pločevina kot zunanji element ne poruši v okolici veznega sredstva.

j/l) Porušitev lesa okoli veznega sredstva v lesenem elementu.

Ne glede na debelino pločevine je kriterij enak kot pri lesenem priključku.

$$R = 0.5 f_{h,2} t_2 d$$

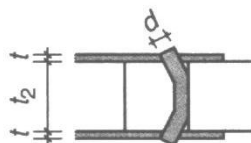


Slika 25: Način porušitve (j) in pripadajoč izraz (P-L-P) [1]

k) Plastifikacija veznega sredstva v lesenem elementu (tanka pločevina ne prevzame momenta).

Tanka pločevina ne prevzame momenta, zato se vezno sredstvo v njej zavrti. Kontaktna napetost lesa povzročijo, da moment v veznem sredstvu doseže moment plastifikacije.

$$R = \sqrt{2M_y f_{h,2} d}$$

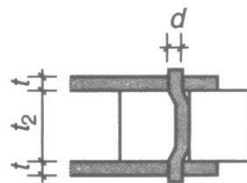


Slika 26: Način porušitve (k) in pripadajoč izraz (P-L-P) [1]

m) Plastifikacija veznega sredstva na površini pločevine in v lesenem elementu (vezno sredstvo vpeto v debeli pločevini).

Debela pločevina deluje kot vpetje. Taka porušitev je značilna za tanjša vezna sredstva.

$$R = \sqrt{2} \sqrt{2M_y f_{h,2} d}$$



Slika 27: Način porušitve (m) in pripadajoč izraz (P-L-P) [1]

3.3 Johansenove enačbe v izrazih za določitev odpornosti vezni sredstev v Evrokodu 5

Johansenove enačbe so izpeljane upoštevajoč geometrijo priključka, vtisno trdnost lesa in upogibno odpornost veznega sredstva. Vendar pri računu odpornosti veznega sredstva niso upoštevane niti sile trenja med sestavnimi elementi, niti izvlečna odpornost veznega sredstva. Pridobljene vrednosti so sicer na varni strani, a v poskusu, da bi se bolj približali realnemu stanju, Evrokod 5 Johansenovim enačbam doda prispevek teh dveh mehanizmov. Zaradi tega so izrazi nekoliko drugačni. Ti izrazi so uporabljeni tudi v mojem programu. V standardu SIST EN 1995-1-1 so odpornosti veznega sredstva zapisane v sledečem splošnem formatu:

$$F_{v,Rk} = k_{fr} \cdot F_{v,Rk,Johansen} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

- Kjer so:
- $F_{v,Rk}$ karakteristična odpornost enega veznega sredstva v eni strižni ravnini,
 - k_{fr} faktor, ki upošteva sile trenja med sestavnimi elementi,
 - $F_{v,Rk,Johansen}$ karakteristična odpornost veznega sredstva po Johansenu,
 - $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ pa prispevek izvlečnega mehanizma veznega sredstva.

Preglednica 1: Johansenove enačbe v izrazih za določitev odpornosti veznih sredstev v Evrokodu 5

enostrizni priključek les-les		dvostrizni priključek les-les	
$f_{h,1,k} t_1 d$	(a)	$f_{h,1,k} t_1 d$	(g)
$f_{h,2,k} t_2 d$	(b)	$0,5 f_{h,2,k} t_2 d$	(h)
$\frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(c)	$1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(i)
$1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(d)	$1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(k)
$1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(e)	dvostrizni priključek, pločevina je srednji element	
$1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(f)	$f_{h,1,k} t_1 d$	(f)
enostrizni priključek les-tanka pločevina		$f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(g)
$0,4 f_{h,k} t_1 d$	(a)	$2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(h)
$1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(b)	dvostrizni priključek, tanka pločevina je zunanji element	
enostrizni priključek les-debela pločevina		$0,5 f_{h,2,k} t_2 d$	(j)
$f_{h,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(c)	$1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(k)
$2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(d)	dvostrizni priključek, debela pločevina je zunanji element	
$f_{h,k} t_1 d$	(e)	$0,5 f_{h,2,k} t_2 d$	(l)
		$2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(m)

4. OPIS IZDELANEGA PROGRAMA

Program za računanje odpornosti veznih sredstev je izdelan kot del Excelovega dokumenta. Excel je Microsoftov program za analizo podatkov. Program za računanje odpornosti priključkov lesenih konstrukcij pri uporabi kovinskih paličnih veznih sredstev je spisan s pomočjo orodja imenovanega razvijalec v okolju Visual Basic (VBA).

Program s pomočjo vhodnih podatkov, ki jih uporabnik zapiše v za to namenjene celice v tabelah Excela, izbere ustrezne Johansenove enačbe iz Evrokoda 5, izračuna in izbere vse potrebne spremenljivke ter poda odpornosti za različne porušitve. Vrednost, ki je najmanjša narekuje način porušitve priključka.

4.1 Različna vezna sredstva

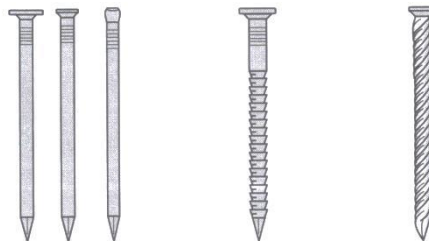
Čeprav so vsa vezna sredstva kovinska ter palične oblike, ima vsako izmed njih svoje značilno obnašanje v priključku. Te razlike pomenijo, da nam vsako vezno sredstvo poda svojo odpornost. Pomeni pa tudi, da se v nekaterih vrstah priključkov določena vezna sredstva pojavljajo pogosteje kot druga.

4.1.1 Žebliji

Uporaba žbljev je najpogosteje uporabljena metoda spajanja elementov v lesenih konstrukcijah, zato dobimo žblje različnih oblik in velikosti. Najpogostejši so žblji z gladkim stebлом, narejeni iz jeklene žice, imenovani žičniki. Imajo okrogel prečni prerez z minimalno natezno trdnostjo 600 N/mm^2 .

Žbljane priključke je lahko sestaviti in so primerni za manj obtežene konstrukcije s tankimi elementi. Običajno so uporabljeni za paličje, stene, stropove in strehe, torej skoraj pri vseh konstrukcijah, ki vključujejo manjše obtežbe in enostavne elemente.

Odpornost žblja za strižno in izvlečno obremenitev lahko povečamo z mehanskimi deformacijami stebela ter tako ustvarimo žblje s spiralnim in obročastim navojem. Druge oblike izboljševanja žbljev so dobljene z brazdanjem in zvijanjem stebela žbljev kvadratnega prereza. Proces zvijanja ne spremeni le površine, ampak utrdi tudi material [2].



Slika 28: Po vrsti: gladki žblji, obročasti žebelj in žebelj s spiralnim navojem [2]

Program razlikuje med žebliji okroglega in kvadratnega prečnega prereza, saj različna oblika pomeni različno vrednost karakterističnega polnoplastičnega upogibnega momenta $M_{y,Rk}$. V programu ni žeblijev z modificiranimi stebli, a ker ti nudijo večje odpornosti, smo na varni strani, četudi računamo z navadnimi žebliji z gladkim stebлом.

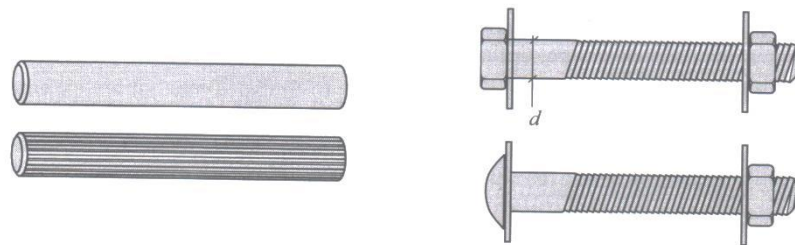
4.1.2 Sponke

Sponke se obnašajo podobno kot žebliji, le da so pogosto manjših premerov. Poznamo sponke z krožnim prerezom stebel in pravokotnim. Uporabljamo jih predvsem pri tanjših sestavnih elementih v enostrižnih zvezah les-les in les-lesna plošča.

4.1.3 Palični mozniki (Trni) in vijaki

Trni so cilindrične palice običajno iz jekla. Imajo gladko ali progasto površino in so na voljo v premerih od 6 mm do 30 mm. Vijaki so mozniki z navojem in maticami ali polkrožnimi glavami na straneh, prav tako v premerih do 30 mm. Mozniki in vijaki so običajno uporabljeni v priključkih, ki zahtevajo večjo bočno nosilnost, kot je lahko omogočena s strani žeblijev ali lesenih vijakov. Za razliko od trnjev, vijaki nudijo odpornost tudi odpornost v nategu.

Uporabljeni so lahko tudi v priključkih z dvema elementoma, vendar jih pogosteje najdemo tam, kjer povezujejo tri ali več elementov v večstrižnem priključku. Stranski elementi v priključku so lahko leseni ali kovinski. Pri uporabi vijakov je obvezna uporaba podložk pod glavo vijaka in matico, da se obremenitev razporedi [2].



Slika 29: Trni in vijaki [1]

4.1.4 Lesni vijaki

Lesni vijaki so uporabljeni namesto žeblijev v priključkih, kjer so potrebne večje odpornosti, predvsem glede izvleka. Lahko so uporabljeni v priključkih les-les, še posebej pa so primerni za priključke pločevina-les in lesna plošča-les. Podobno kot žebliji so tudi lesni vijaki pogosteje uporabljeni tako, da je en lesni vijak obremenjen v eni strižni ravnini.

Lesni vijaki morajo biti vedno priviti v les in ne zabiti, saj na tej predpostavki temeljijo računi. V priključkih v katerih je uporabljen les iglavcev (mehki les) in so uporabljeni lesni vijaki premera večjega od 6 mm je potrebno na mestih, kjer so vijaki priviti, predhodno izdelati izvrtino. Enako velja za priključke z lesom listavcem (trdi les) in lesne vijake vseh premerov.

Predhodno izvrtana luknja na mestu, kjer je steblo lesnega vijaka brez navoja, mora biti enakega premera kot premer vijaka na tem mestu. Predhodno izvrtana luknja na mestu navoja, mora imeti premer v vrednosti 70% premera vijaka. Dolžina luknje mora biti enaka dolžini stebila [2].

4.2 Vhodni podatki

Program sem poskušal sestaviti s čim manjšim številom vhodnih podatkov, saj se z njihovim naraščanjem večata nepreglednost in konfuznost. Uporabnik mora poznati osnovno geometrijo priključka in karakteristike uporabljenih materialov iz katerih je priključek sestavljen.

Uporabnik lahko poljubno dodaja ali odvzema število elementov v priključku s klikanjem na gumba dodaj element in izbriši element. Program računa enostrižne priključke, dvostržne priključke in večstržne priključke z do petimi sestavnimi elementi. Uporabnik v prvem polju izbira iz spustnega seznama med različnimi materiali. V pripravljena polja mora vpisati gostoto uporabljenega lesa, njegovo debelino ter kot med delovanjem sile ter smerjo vlaken. Pločevinastim elementom ni potrebno vnašati gostote. V drugi tabeli iz spustnega seznama izbere ustrezno vezno sredstvo, vpiše njegov premer in dolžino ter mejo natezno trdnost ali karakteristično natezno trdnost v odvisnosti od vrste veznega sredstva. Določiti mora še ali so luknje za vezna sredstva predhodno izvrtane ali ne, ko to ni že v osnovi zahtevano oziroma predpisano.

ODPORNOST VEZNEGA SREDSTVA		Dodaj element	Izbriši element	Izračunaj odpornost veznega sredstva		
KARAKTERISTIKE ELEMENTOV						
št. Elementa	Material	gostota [kg/m ³]	debelina - t _i [mm]	kot - α [°]	k ₉₀	f _{h,ki} / (f _{h,0,ki} /f _{h,α,ki})
2	Les iglavcev	320	50	0	1	25,4528
1	Les iglavcev	320	50	0	1	25,4528

KARAKTERISTIKE VEZNEGA SREDSTVA	
Vezno sredstvo	Žebliji krožnega prereza
f _u [N/mm ²]	650
premer - d [mm]	3
Dolžina vez. sr - L _{v,s} [mm]	90
če: ρ _k > 500 kg/m ³	S predhodnim vrтанjem lukenj

Slika 29: Uporabniško okno

Najpomembnejši parametri v računu odpornosti, so premer veznega sredstva d , karakteristični moment plastifikacije veznega sredstva $M_{y,Rk}$ in karakteristična vtisna trdnost $f_{h,i,k}$ i-tega lesenega elementa v priključku.

Evrokod 5 podaja izraze za račun posameznih vrednosti v odvisnosti od vrste veznih sredstev in uporabljenih materialov v priključku.

4.3 Parametri potrebni za izračun odpornosti veznega sredstva

4.3.1 Premer veznega sredstva

Večina veznih sredstev ima okrogel prerez, zato premera ni težko določiti, vendar obstaja tudi nekaj izjem.

Žebljem kvadratnega prečnega prereza se za premer upošteva njegovo stransko dimenzijo.

Ker se v vseh izrazih računa s parametrom d , je ta pri sponkah s pravokotnim prerezom stebel definiran kot kvadratni koren produkta obeh stranic prereza in je to vrednost, ki jo vpišemo v program. Program tako ne razlikuje med uporabljeno obliko sponke.

Evrokod 5 dovoli, da pri računu momenta plastifikacije lesnega vijaka, če je dolžina neoslabljenega dela vijaka v lesu, kjer se nahaja konica daljši od $4d$, upoštevamo kot učinkoviti premer vijaka nazivni premer $d_{ef} = d$. V vseh ostalih primerih je potrebno upoštevati učinkoviti premer vijaka, ki znaša 1.1 kratnik premera jedra navoja: $d_{ef} = 1.1 \cdot d_{min}$.

V programu je pri računu karakterističnega momenta plastifikacije v vseh primerih uporabljen oslabljeni del lesnega vijaka, ki je predpostavljen, da znaša $0.7d$, kar je minimalna vrednost. Računi so tako vedno na varni strani.

4.3.2 Karakteristični polnoplastični upogibni moment

Natančnejša izpeljava karakterističnega polnoplastičnega momenta je predstavljena v poglavju 3.1. Različna vezna sredstva imajo različno odpornost na upogib. Program izbere ustrezno enačbo.

Preglednica 2: Karakteristični upogibni moment različnih veznih sredstev [2].

Vezno sredstvo	$M_{y,Rk}$ (N mm)
Žebliji	
Okrogli gladki žebliji	$0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6}$ (4.1)
Žebliji kvadratnega prereza	$0,45 \cdot f_u \cdot d^{2,6}$ (4.2)
Sponke	$240 \cdot d^{2,6}$ (4.3)
Vijaki	$0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$ (4.4)
Trni	Kot za vijake
Lesni vijaki	
Lesni vijaki premera $d \leq 6$ mm	Kot za žeblije
Lesni vijaki premera $d > 6$ mm	Kot za vijake

Kjer je d premer kot definiran v prejšnjem poglavju, f_u natezna trdnost materiala veznega sredstva v N/mm^2 in $f_{u,k}$ karakteristična natezna trdnost veznega sredstva v N/mm^2 .

4.3.3 Karakteristična vtisna trdnost

Karakteristična vtisna trdnost $f_{h,k}$ je odvisna od premera uporabljenih veznih sredstev, gostote lesa sestavnih elementov v priključku in od tega ali so v sestavnem elementu morda predhodno izvrtane luknje. Evrokod 5 podaja naslednje enačbe, ki so vključene v program:

Preglednica 3: Vtisna trdnost za žblje [2]

Pogoj	$f_{h,k}$ (N/mm ²)
Leseni in LVL priključki z uporabo žbljev premera do 8 mm:	
Brez predhodno izvrtanih lukenj	$f_{h,k} = 0,082\rho_k d^{-0,3}$ (4.5)
Z predhodno izvrtanimi luknjami	$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k$ (4.6)
Leseni in LVL priključki z uporabo žbljev premera večjega od 8 mm.	Uporabimo izraze za vijake
Za zveze les-lesna plošča z žblji, ki imajo premer glave večji od 2d in kjer je material lesne plošče:	
Vezana plošča	$f_{h,k} = 0,11\rho_k d^{-0,3}$ (4.7)
Iverna ali OSB plošča	$f_{h,k} = 65d^{-0,7}t^{0,1}$ (4.8)

Kjer je d je premer žblja, t je debelina sestavnega elementa, ρ_k je karakteristična gostota lesa, LVL (laminated veneer lumber - slojnatega furnirnega lesa) ali lesne plošče (v kg/m³). V programu je predpostavljen premer glave večji od 2d in ga ni potrebno vnašati.

Preglednica 4: Vtisna trdnost za vijake in žblje premera večjega od 8 mm [2]

Pogoji:	$f_{h,k}$ (N/mm ²)
Uporabljeni so vijaki ali žblji z premerom $d > 8$:	
Leseni in LVL priključki:	
Obremenjeni v smeri vlaken	$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k$ (4.9)
Obremenjeni pod kotom α glede na vlakna	$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$ (4.10)
Za zveze les-lesna plošča ne glede na smer obremenitve kjer je material plošče vezana plošča:	$f_{h,\alpha,k} = 0,11(1 - 0,01d)\rho_k$ (4.11)
Za zveze les-lesna plošča ne glede na smer obremenitve kjer je material plošče iverna ali OSB plošča	$f_{h,\alpha,k} = f_{h,k} = 50d^{-0,6}t^{0,2}$ (4.12)

V preglednici so zbrani izrazi za karakteristično vtisno trdnost pri uporabi vijakov, moznikov in žbljev katerih premer je večji od 8 mm.

Faktor k_{90} je odvisen od vrste lesa sestavnega elementa, in poenostavlja Hankinsonovo enačbo.

Za iglavce znaša: $k_{90} = (1,35 + 0,015d)$ (4.13)

Za LVL znaša: $k_{90} = (1,3 + 0,015d)$ (4.14)

Za listavce znaša: $k_{90} = (0,9 + 0,015d)$ (4.15)

KARAKTERISTIČNA VTISNA TRDNOST LESA PRI UPORABI SPONK IN LESNIH VIJAKOV

Izrazi za karakteristično vtisno trdnost sponk so enaki izrazom pri žeblih, ki jih najdemo v Preglednici 3. Izraze za vtisno trdnost lesa v primerih uporabe lesnih vijakov se razdeli v 2 skupini v odvisnosti od njihovega premera:

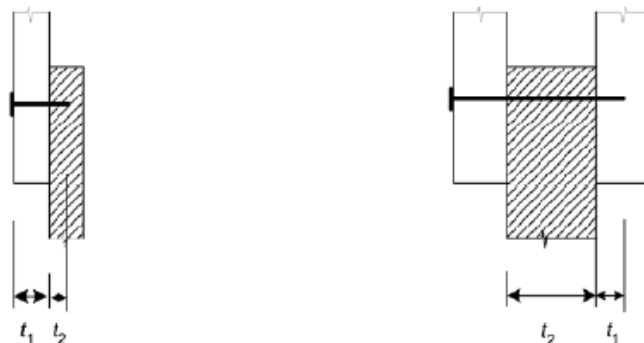
- izrazi so enaki izrazom za žeblje, ko je premer lesnega vijaka $d \leq 6$ mm,
- izrazi so enaki izrazom za vijake, ko je premer lesnega vijaka $d > 6$ mm.

4.3.4 Dimenziji t_1 in t_2

V priključkih razlikujemo med elementoma 1 in 2, kot je razvidno IZ Johansenovih enačb. Dimenziji t_1 in t_2 se nanašata na dolžine veznih sredstev v posameznem sestavnem elementu. V primeru enostrižne zveze je t_1 debelina tistega elementa, kjer se nahaja glava veznega sredstva, t_2 pa dolžina prodiranja konice v drugi element.

V primeru dvostržne zveze je t_2 debelina srednjega elementa, t_1 pa dolžina prodiranja konice v zunanji (zadnji) element.

V primeru trnov in vijakov pa so to vedno debeline posameznih sestavnih elementov, saj vezna sredstva potekajo po celotni širini priključka.



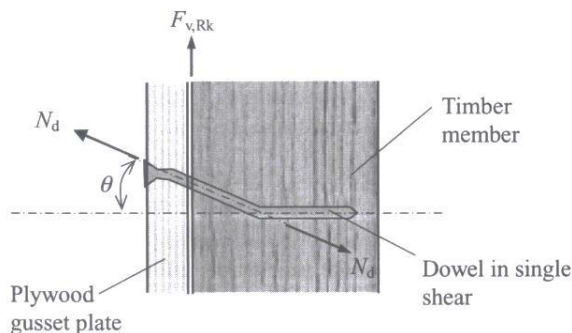
Slika 30: Prikaz dimenzij t_1 in t_2 [6]

4.3.4 Trenje in izvlečna odpornost veznega sredstva

V priključku imamo dve vrsti trenja. Eno se pojavi, če so elementi pri sestavi v stiku in drugo če se vezno sredstvo upogne in povleče elemente skupaj. Prvo se zanemari, saj se leseni elementi zaradi delovanja lahko skrčijo, medtem ko se drugo vedno pojavi v porušnih mehanizmih, ki vključujejo upogib veznega sredstva.

Pri plastifikaciji veznega sredstva se ta upogne in zavrti za kot θ (Slika 31). Koeficient trenja med elementoma pa znaša μ . Ob upogibni obremenitvi se pojavi v veznem sredstvu tudi natezna obremenitev, ki jo lahko razdelimo na dve komponenti in vse skupaj opišemo z enačbo:

$$F_{v,Rk} = N_d(\sin \theta + \mu \cos \theta) + \text{Johansenov izraz } (F_{y,Rk}) \quad (4.16)$$



Slika 31: Deformiranje veznega sredstva v primeru plastifikacije [2]

Komponento $N_d \sin \theta$ lahko v Evrokodu 5 štejejo kot $F_{ax,Rk}/4$, kjer je $F_{ax,Rk}$ karakteristična izvlečna odpornost veznega sredstva. $N_d \mu \cos \theta$ pa postane delež Johansenove odpornosti.

V Evrokodu 5 je določena je tudi zgornja meja prispevka $F_{ax,Rk}/4$ in znaša vnaprej določen procent odpornosti po Johansenovih enačbah v odvisnosti od uporabljenega veznega sredstva.

$$\text{procent} \leq \begin{cases} 15\% & \text{Žeblje okroglega prereza} \\ 25\% & \text{Žeblje kvadratnega prereza} \\ 50\% & \text{Ostali žeblji} \\ 100\% & \text{Lesni vijaki} \\ 25\% & \text{Vijaki} \\ 0\% & \text{Trni} \end{cases}$$

KARAKTERISTIČNA IZVLEČNA ODPORNOST PRI UPORABI ŽEBLJEV

Evrokod 5 nam podaja naslednje enačbe za izračun karakteristične izvlečne odpornosti žebljev.

Za žeblje z gladko površino:

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} dt_{pen} \\ f_{ax,k} dt_{pen} + f_{head,k} d_h^2 \end{array} \right.$$

Za žeblje, ki niso gladki:

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} dt_{pen} \\ f_{head,k} d_h^2 \end{array} \right.$$

Pri tem so:

- $f_{ax,k}$ karakteristična izvlečna trdnost žeblja,
- $f_{head,k}$ karakteristična izvlečna trdnost dela žeblja z glavo (uvlek glave v les),
- t_{pen} globina zabitja dela žeblja pri konici v les,
- t debelina lesa pri glavi žeblja in
- d_h premer glave žeblja, za katerega program predpostavlja vrednost $2,25d$ za debeline žeblja do $3,75\text{mm}$ in $2d$ za vse ostale premere.

Vrednosti za izvlečni trdnosti $f_{ax,k}$ in $f_{head,k}$ pa sta sledeči:

$$f_{ax,k} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \quad (4.17)$$

$$f_{head,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \quad (4.18)$$

Evrokod 5 določa tudi minimalno globino zabijanja, ki znaša pri žeblih 8d. Program nas opozori, če temu pogoju pri vnesenih podatkih ni zadoščeno. Pri globini 12d se lahko upošteva polna vrednost izvlečne odpornosti. Pri dolžinah od 12d do 8d pa jo je potrebno linearno zmanjševati do vrednosti 0 z izrazom $((t_{per}/4d) - 2)$.

Te enačbe se upoštevajo tudi za izvlečno odpornost sponk.

KARAKTERISTIČNA IZVLEČNA ODPORNOST PRI UPORABI VIJAKOV

Izvlečno oziroma natezno odpornost vijakov določajo natezna trdnost vijaka in nosilnost lesenega elementa pod podložko. Ko leži podložka na lesu ali elementu iz lesa, upoštevamo 300% porast karakteristične nosilnosti na tlak pravokotno na vlakna $f_{c,k} = 3,0 \times f_{c,90,k}$.

Natezne nosilnosti trnom ne pripisujemo, zato je vrednost izvlečne karakteristične odpornosti v tem primeru 0.

KARAKTERISTIČNA IZVLEČNA ODPORNOST PRI UPORABI LESNIH VIJAKOV

Izvlečno odpornost lesnih vijakov določajo natezna nosilnost lesnega vijaka, odpornost glede na uvlek glave v les, ki se jo izračuna enako kot pri žeblih in izvlečna odpornost iz dela lesa, kjer se nahaja konica z navojem. Slednjo izračunamo z izrazom:

$$F_{ax,\alpha,k} = (\pi \cdot d \cdot l_{ef})^{0,8} \cdot f_{ax,\alpha,k} \quad (4.19)$$

Pri tem je l_{ef} dolžina navoja v delu lesa s konico, zmanjšana za en premer lesnega vijaka, d zunanji premer vijaka na delu z navojem in $f_{ax,\alpha,k}$ karakteristična izvlečna trdnost veznega sredstva v smeri kota α glede na smer vlaken:

$$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,k}}{\sin^2 \alpha + 1,5 \cos^2 \alpha} \quad (4.20)$$

Tukaj pa je $f_{ax,k}$ karakteristična izvlečna trdnost v smeri pravokotno na vlakna izračunana kot:

$$f_{ax,k} = 3,6 \cdot 10^{-3} \rho_k^{1,5} \quad (4.21)$$

Najmanjša dolžina navoja lesnega vijaka v elementu, kjer se nahaja konica, mora biti 6d, da je zagotovljena minimalna izvlečna odpornost.

4.4 Opis kode programa

Najprej se vse količine, ki jih je uporabnik vpisal v okenca preberejo in shranijo.

```
'debelina elementov
Dim T()
ReDim T(st_el)
For i = 1 To st_el
    T(i) = Worksheets("program").Cells(7 + st_el - i, 7)
Next i

'kot
Dim alfa()
ReDim alfa(st_el)
For i = 1 To st_el
    alfa(i) = Worksheets("program").Cells(7 + st_el - i, 9)
Next i

'gostota
Dim Ro()
ReDim Ro(st_el)
For i = 1 To st_el
    Ro(i) = Worksheets("program").Cells(7 + st_el - i, 5)
Next i

'vtisna trdnost posameznega sredstva
Dim Fh()
ReDim Fh(st_el)
For i = 1 To st_el
    Fh(i) = Worksheets("program").Cells(7 + st_el - i, 11)
Next i

'ostale kolicine
vez_sr = Worksheets("program").Cells(6, 15)
fu = Worksheets("program").Cells(7, 15)
d = Worksheets("program").Cells(8, 15)
Lvs = Worksheets("program").Cells(9, 15)
```

Nato program izračuna količine, ki so neodvisne od vrste priključka. To sta karakteristični moment plastifikacije $M_{y,Rk}$ in premer glave standardnih žebeljev in vijakov, ki znaša $2.25d$ za premere do 3.75 mm in $2d$ za vse ostale.

```
'Myrk
If vez_sr = "Žebelji kvadratnega prereza" Then
    Myrk = 0.45 * fu * d ^ (2.6)
ElseIf vez_sr = "Sponke" Then
    Myrk = 240 * d ^ (2.6)
ElseIf vez_sr = "Lesni vijaki" Then
    Myrk = 0.3 * fu * (d * 0.7 * 1.1) ^ 2.6
Else
    Myrk = 0.3 * fu * d ^ (2.6)
End If

'dh
If d < 3.75 Then
    dh = 2.25 * d
Else
    dh = 2 * d
End If
```

Program nato nadaljuje z identifikacijo vrste zveze priključka. Pravilna identifikacija programu omogoča računanje s pravilnimi izrazi. To pomeni, da določi ali gre za priključek z dvema, tremi ali petimi sestavnimi elementi. Program dovoljuje, da vpišemo element 1 in element 2 poljubno in ni potrebno, da je element 2 tisti v katerem je konica veznega sredstva. Za enostrižne zveze program predpostavlja, da zabijamo žebelje in sponke ter privijamo lesne vijake skozi tanjši element v debelejšega. S pomočjo te predpostavke sam določi elementa 1 in 2, ter s tem pravilno orientira element. Za tem se določi dolžina prodiranja konice veznega sredstva v element 2. Program javi napako v obliki sporočilnega okna, če ta dolžina ne ustreza dolžini za doseganje minimalne izvlečne odpornosti veznega sredstva, kot je opisano v poglavju 4.3.4. Pri dvostriznih zvezah je zahtevana simetrija, zato smer vgradnje ni pomembna. Programska koda se delno razlikuje za posamezne vrste priključkov, vendar ne bom prikazoval vseh razlik. Program onemogoča uporabo žebeljev, lesenih vijakov in sponk v dvostrizni zvezi les-pločevina, kjer je pločevina zunanji element. Prav tako onemogoča uporabo sponk v dvostriznih priključkih. Večstrizni priključki dovoljujejo le uporabo trnov ali vijakov.

```
'določitev Tpoint dvostrizna zveza les in les je srednji element
If vez_sr = "Žebelji okroglega prereza" Or vez_sr = "Žebelji kvadratnega prereza" Then
    Tpoint = Lvs - T(1) - T(2)
    If Tpoint < 8 * d Then
        MsgBox "Žebelj je prekratek!", vbExclamation, "Napaka pri vnosu!"
        Exit Sub
    End If
ElseIf vez_sr = "Lesni vijaki" Then
    Tpoint = Lvs - T(1) - T(2) - d
    If Tpoint < 6 * d Then
        MsgBox "Lesni vijak je prekratek!", vbExclamation, "Napaka pri vnosu!"
        Exit Sub
    End If
ElseIf vez_sr = "Sponke" Then
    MsgBox "Vezno sredstvo ni primerno!", vbExclamation, "Napaka pri vnosu!"
    Exit Sub
ElseIf vez_sr = "Mozniki" Or "Vijaki" Then
    Tpoint = T(2)
End If

'določitev Tpoint enostrižna zveza les-les in les-pločevina
If vez_sr = "Žebelji okroglega prereza" Or vez_sr = "Žebelji kvadratnega prereza" Then
    Tpoint = Lvs - WorksheetFunction.Min(T())
    If Tpoint < 8 * d Then
        MsgBox "Žebelj je prekratek!", vbExclamation, "Napaka pri vnosu!"
        Exit Sub
    End If
ElseIf vez_sr = "Lesni vijaki" Then
    Tpoint = Lvs - WorksheetFunction.Min(T()) - d
    If Tpoint < 6 * d Then
        MsgBox "Lesni vijak je prekratek!", vbExclamation, "Napaka pri vnosu!"
        Exit Sub
    End If
ElseIf vez_sr = "Sponke" Then
    Tpoint = Lvs - WorksheetFunction.Min(T())
    If Tpoint < 14 * d Then
        MsgBox "Sponka je prekratka!", vbExclamation, "Napaka pri vnosu!"
    End If
ElseIf vez_sr = "Mozniki" Or "Vijaki" Then
    Tpoint = WorksheetFunction.Max(T())
End If
```

Sledi izračun izvlečne odpornosti veznega sredstva. Uporabimo formule iz poglavja 4.3.4. Karakteristično nosilnost na tlak pravokotno na vlakna, ki je potrebna za račun osne odpornosti vijakov, dobimo iz tabele razreda trdnosti lesa glede na karakteristično gostoto lesenega elementa.

Preglednica 5: Karakteristična trdnost za tlak pravokotno na vlakna

	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40	D30	D35	D40	D50	D60	D70
ρ_k [kg/m ³]	290	310	320	340	350	370	380	400	420	530	560	590	650	700	900
$f_{c,90,k}$ [N/cm ²]	430	460	480	510	530	560	570	600	630	800	840	880	970	1050	1350

```
'Fax,Rk
If vez_sr = "Žebli kvadratnega prereza" Then
    faxk = 20 * 10 ^ (-6) * Rop ^ (2) * WorksheetFunction.min(1, Tpoint / (4 * d) - 2)
    fhead = 70 * 10 ^ (-6) * Roh ^ (2)
    Fax_rk = WorksheetFunction.min(faxk * d * Tpoint, fhead * dh ^ (2))

ElseIf vez_sr = "Žebli okroglega prereza" Then
    faxk = 20 * 10 ^ (-6) * Rop ^ (2) * WorksheetFunction.min(1, Tpoint / (4 * d) - 2)
    fhaxk = 20 * 10 ^ (-6) * Roh ^ (2) * (WorksheetFunction.min(1, T()) / (4 * d) - 2)
    If fhaxk < 0 Then fhaxk = 0
    fhead = 70 * 10 ^ (-6) * Roh ^ (2)
    Fax_rk = WorksheetFunction.min(faxk * d * Tpoint, fhaxk * d * WorksheetFunction.min(T()) + fhead * dh ^ (2))

ElseIf vez_sr = "Lesni vijaki" Then
    faxk = 3.6 * 10 ^ (-3) * Rop ^ (1.5)
    fhead = 70 * 10 ^ (-6) * Roh ^ (2)
    If alfap <> 0 And alfap = "" Then
        faxk = faxk / (Sin(alfap * Pi / 180) ^ 2 + 1.5 * Cos(alfap * Pi / 180) ^ 2)
    End If
    Fax_rk = WorksheetFunction.min(faxk * (Pi * d * Tpoint) ^ (0.8), fhead * dh ^ (2))

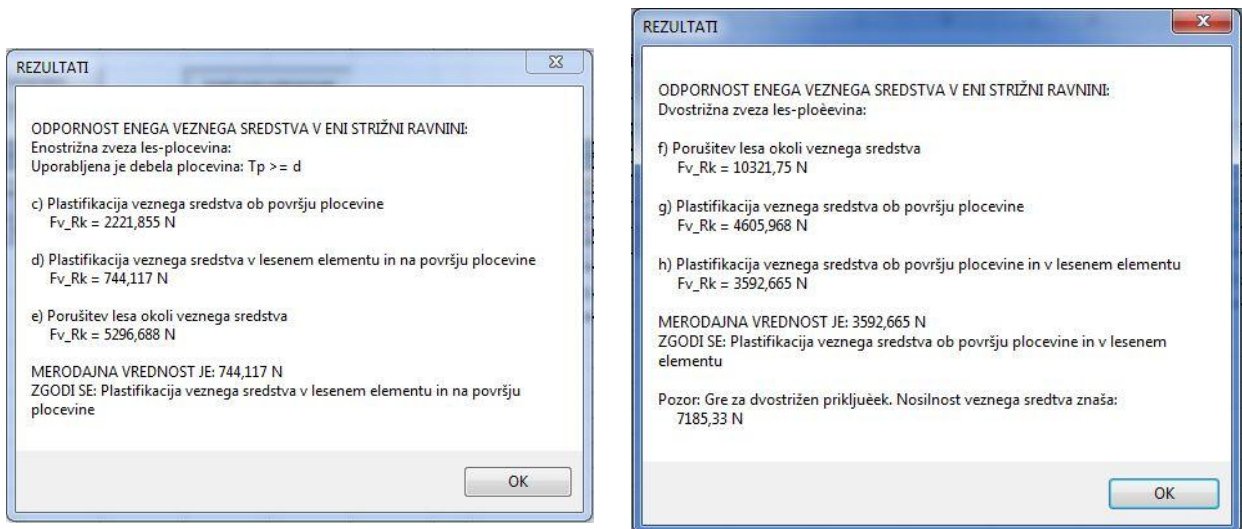
ElseIf vez_sr = "Vijaki" Then
    'fdc90
    Select Case WorksheetFunction.min(Ro())
        Case Is <= 300
            fc90 = 4.3
        Case Is <= 315
            fc90 = 4.6
        Case Is <= 330
            fc90 = 4.8
        Case Is <= 345
            fc90 = 5.1
        Case Is <= 360
            fc90 = 5.3
        Case Is <= 375
            fc90 = 5.6
        Case Is <= 390
            fc90 = 5.7
        Case Is <= 410
            fc90 = 6
        Case Is <= 475
            fc90 = 6.3
        Case Is <= 545
            fc90 = 8
        Case Is <= 575
            fc90 = 8.4
```

Ko so določeni vsi parametri, ki so potrebni za račun odpornosti priključkov lesenih konstrukcij, program izvede še modificirane Johansenove enačbe. Za tem program generira sporočilno okno, ki ga prikaže uporabniku. Na njem so zapisani rezultati posameznih porušnih mehanizmov in njihov opis ter najmanjša vrednost, ki je tudi merodajna.

```
'porušni mehanizmi
Ap = 0.4 * Fw * Tw * d
Bp = 1.15 * Sqr(2 * Myrk * Fw * d)
Cp = Fw * Tw * d * (Sqr(2 + (4 * Myrk) / (Fw * Tw ^ (2) * d)) - 1)
Dp = 2.3 * Sqr(Myrk * Fw * d)
Ep = Fw * Tw * d

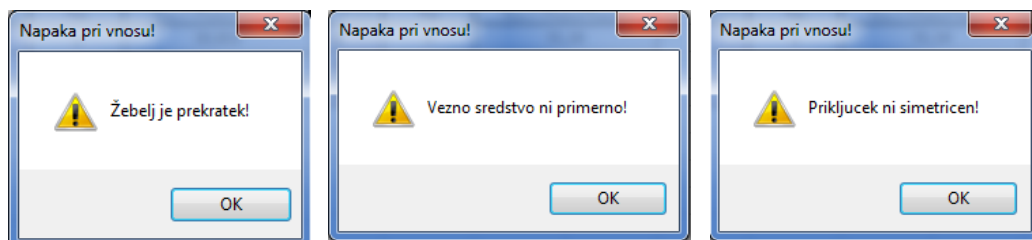
'dodatek izvlečenega mehanizma
Select Case vez_sr
  Case Is = "Žebelji okroglega prereza"
    Bp = Bp + WorksheetFunction.min(0.15 * Bp, Faxrk / 4)
    Cp = Cp + WorksheetFunction.min(0.15 * Cp, Faxrk / 4)
    Dp = Dp + WorksheetFunction.min(0.15 * Dp, Faxrk / 4)

  Case Is = "Žebelji kvadratnega prereza"
    Bp = Bp + WorksheetFunction.min(0.25 * Bp, Faxrk / 4)
    Cp = Cp + WorksheetFunction.min(0.25 * Cp, Faxrk / 4)
    Dp = Dp + WorksheetFunction.min(0.25 * Dp, Faxrk / 4)
```



Slika 32: Dva prikaza rezultatov

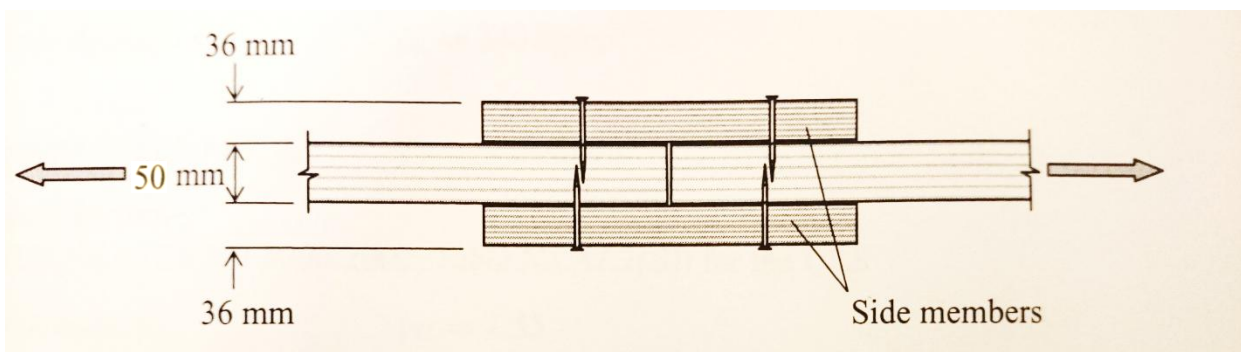
Program v obliki sporočil opozarja na nekatere napake.



Slika 33: Primeri opozoril

4.5 Račun odpornosti enostržnega priključka

Izračunali bomo odpornost priključka sestavljenega iz dveh 50 mm debelih lesenih elementov, katera povezujeta dva 36 mm debela lesena elementa, kot kaže Slika 34. Leseni elementi so povezani skupaj z žebliji gladkega krožnega prereza s premerom 3.35 mm in dolžine 65 mm. Zabiti so brez predhodnega vrtanja izvrtin. Žebliji imajo natezno trdnost 600 N/mm². Uporabljen je les trdnostnega razreda C22 s karakteristično gostoto 340 kg/m³.



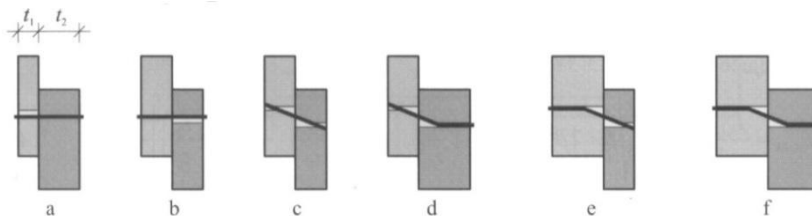
Slika 34: Primer enostržnega priključka [2]

Ker so žebliji obremenjeni le v eni strižni ravnini, lahko priključek razdelimo na štiri dele in modeliramo le enega. V program vnesemo podatke obeh elementov, v poljubnem vrstnem redu, saj program sam določi element 1, ki je debeline 36 mm in skozenj zabijamo žeblije, in element 2, ki je debeline 50 mm se vanj pogreza konica žeblija. V tabelo karakteristik veznega sredstva vnesemo še podatke o žeblijih in program izračuna odpornost priključka, ki ga nudi en žebelj.

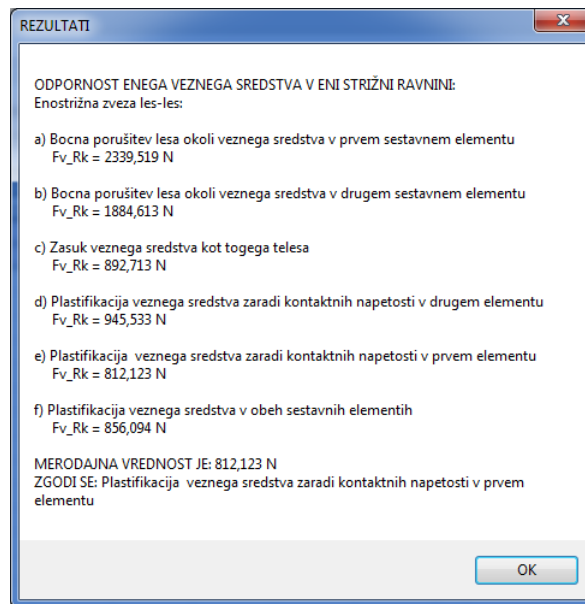
ODPORNOST VEZNEGA SREDSTVA							Dodaj element		Izračunaj odpornost		
							Izbrisi element		veznega sredstva		
KARAKTERISTIKE ELEMENTOV							KARAKTERISTIKE VEZNEGA SREDTVA				
Št. Elementa	Material	gostota [kg/m ³]	debelina - t [mm]	kot - α [°]	k ₉₀	f _{0,k1} / (f _{0,k1} /f _{0,k2})	Vežno sredstvo	Žebliji krožnega prereza			
2	Les iglavcev	340	36	0	1	19,40	f _u [N/mm ²]	600			
1	Les iglavcev	340	50	0	1	19,40	premer - d [mm]	3,35			
							Dolžina vez. sr - L _v [mm]	65			
							če: ρ _k > 500 kg/m ³	Brez predhodnega vrtanja lukenj			

Slika 35: Vnos vhodnih podatkov za račun enostržnega priključka

Na Sliki 37 so prikazani rezultati, ki jih izračuna program. Merodajen način porušitve je način e) in sicer plastifikacija žeblija v prvem sestavnem elementu. Na sliki 36 so prikazani načini porušitev za priključek les-les za boljšo predstavbo. Priključek z enim žeblijem zdrži 812.12 N. S tem podatkom se lahko hitro določi potrebno število žeblijev glede na obremenitev priključka.



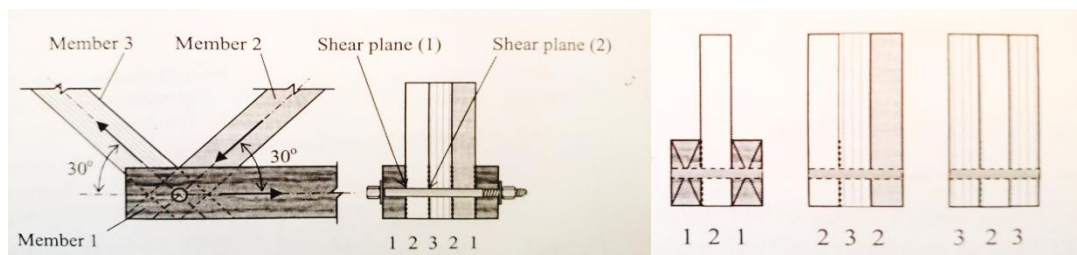
Slika 36: Načini porušitve [5]



Slika 37: Rezultati računa enostriznega priključka

4.6 Račun odpornosti večstrižnega priključka

Priključek je simetričen in sestavljen iz petih lesenih elementov trdnostnega razreda C18 s karakteristično gostoto 320 kg/m^3 . Debelini elementov 1 in 2 znašata 50 mm, debelina srednjega elementa pa 70 mm. Elemente povezuje vijak premera 12 mm kot kaže slika 38.



Slika 38: Primer večstrižnega priključka [2]

Program omogoča tudi račun priključka s petimi lesenimi sestavnimi elementi. Postopek računa za večstrižni priključek je nekoliko drugačen, saj zanje ni enačb. Zato je za večstrižne priključke celotna karakteristična odpornost določena kot:

vsota minimalnih karakterističnih odpornosti za vsako izmed strižnih ravnin določenih za primere vseh možnih sestavov po treh sosednjih elementov.

Vsaka strižna ravnina je torej obravnavana v enem ali več možnih načinov porušitve za dvostrizni spoj [3]. To pomeni da računamo serije dvostriznih priključkov kot kaže Slika 38:

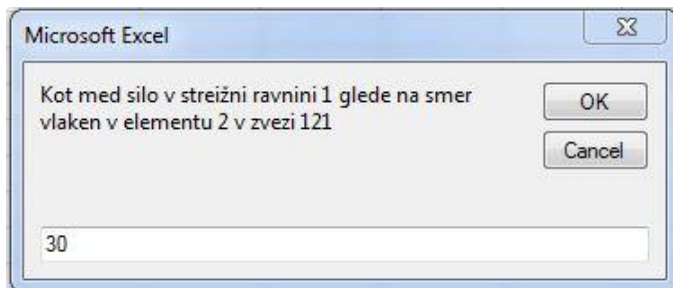
ODPORNOST VEZNEGA SREDSTVA		Dodaj element Izbriši element		Izračunaj odpornost veznega sredstva				
KARAKTERISTIKE ELEMENTOV						KARAKTERISTIKE VEZNEGA SREDTVA		
št. Elementa	Material	gostota [kg/m ³]	debelina - t [mm]	kot - α [°]	k ₉₀	f _{vk1} / (f _{v,0,k1} / f _{v,0,k2})	Vezno sredstvo	Vijaki
5	Les iglavca	320	50				f _{v,k} [N/mm ²]	400
4	Les iglavca	320	50				premer - d [mm]	12
3	Les iglavca	320	70				Dolžina vez. sr - L _v [mm]	270
2	Les iglavca	320	50				če: ρ _k > 500 kg/m ³	S predhodnim vrtnjem lukenj
1	Les iglavca	320	50					

Slika 39: Vnos vhodnih podatkov za račun večstrižnega priključka

Ker so za račun vtisnih trdnosti lesa pomembni koti obremenitve v posamezni strižni ravnini glede na smer vlaken v posameznem sestavnem elementu, nas program o njih povpraša v času reševanja. V podano okence vpišemo po navodilih kot v stopinjah, kot je prikazano na Sliki 36.

Ti koti v tem primeru znašajo:

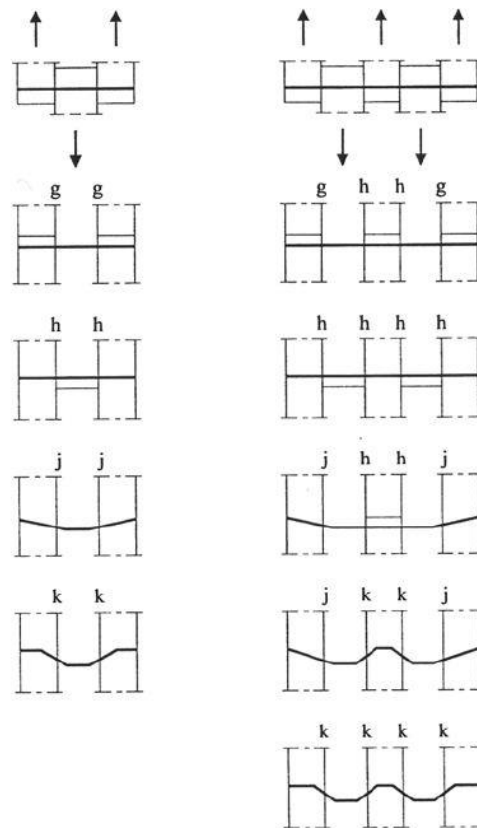
- kot med silo v strižni ravnini 1 glede na smer vlaken v elementu 1 v zvezi 1,2,1: $\theta_{1,2} = 0^\circ$,
- kot med silo v strižni ravnini 1 glede na smer vlaken v elementu 2 v zvezi 1,2,1: $\theta_{2,1} = 30^\circ$,
- kot med silo v strižni ravnini 2 glede na smer vlaken v elementu 2 v zvezi 2,3,2: $\theta_{2,3} = 60^\circ$,
- kot med silo v strižni ravnini 2 glede na smer vlaken v elementu 3 v zvezi 2,3,2: $\theta_{3,2} = 0^\circ$,
- kot med silo v strižni ravnini 2 glede na smer vlaken v elementu 2 v zvezi 3,2,3: $\theta_{3,2} = 0^\circ$,
- kot med silo v strižni ravnini 2 glede na smer vlaken v elementu 3 v zvezi 3,2,3: $\theta_{2,3} = 60^\circ$.



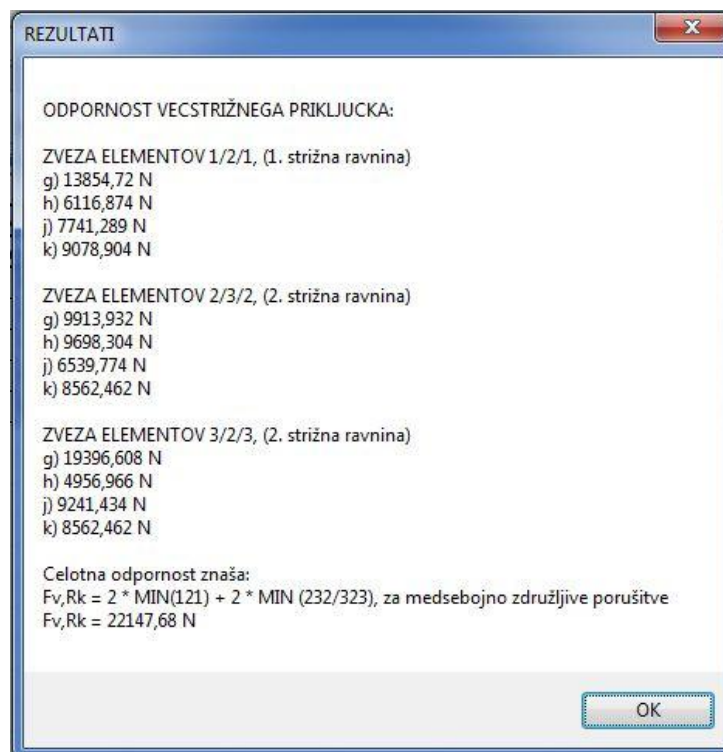
Slika 40: Prikaz vnosa kota

Program nato po enakem načinu kot za dvostrizni stik izračuna odpornosti za vse načine porušitve za vse dvostrizne zveze in te poda v sporočilnem oknu. Za določitev celotne odpornosti priključka, je potrebno sešteti minimalni vrednosti izmed porušitev obeh strižnih ravnin. Izbrani vrednosti morata pripadati združljivima načinoma porušitve. Združljivi načini porušitve so prikazani na Sliki 41. Program izpelje proceduro določanja združljivih načinov porušitev ter tako določi celotno odpornost priključka in veznega elementa. Program generira sporočilno okno, ki prikaže te rezultate. Rezultati so podani na Sliki 42.

V prvi strižni ravnini najmanjša vrednost pripada porušitvi h) in znaša 6.12 kN. Ker je z načinom porušitve h) v prvi strižni ravnini združljiv le način porušitve h) v drugo strižno ravnin, dobimo najmanjšo vrednost v zvezi elementov 3,2,3. Ta znaša 4,96 kN. Celotna vrednost odpornosti tako znaša: $F_{v,Rk} = 2 \cdot 6.12 + 2 \cdot 4.96 = 22.15 \text{ kN}$



Slika 41: Združljivi načini porušitev za večstrižni priključek s petimi elementi [3]



Slika 42: Rezultati računa večstrižnega priključka

5. ZAKLJUČEK

V okviru diplomske naloge sem se ukvarjal z različnimi vrstami priključkov v lesenih konstrukcijah. Proučil sem postopke določanja odpornosti veznih sredstev paličnega tipa in v programu Excel izdelal program, ki to izračuna. Nastal je odličen pripomoček, ki izračuna odpornost enega veznega sredstva paličnega tipa v priključkih lesenih konstrukcij. Pri poznani obremenitvi tako hitro določimo število veznih sredstev v primeru uporabe žebeljev, lesnih vijakov in sponk in velikost veznega sredstva v primeru uporabe trnov in vijakov. Nastali program zahteva malo vhodnih podatkov, da bi bil uporabniku prijazen in enostaven za uporabo.

V diplomski nalogi sem spoznal, da je določanje odpornosti veznih sredstev paličnega tipa dolgotrajen in mučen proces, saj je polno pravil in različnih enačb. Prav to pa večja nevarnost napak, ki so ob avtomatizaciji, torej računu s pripomočkom odpravljene.

VIRI

- [1] Thelandersson S. (ur.), J. Larsen H. (ur.). 2003. Timber Engineering. Chichester [etc.]. Wiley, cop. str. 303-331.
- [2] Porteous J., Kermani A. 2007. Structural Timber Design to eurocode 5. Oxford, Malden. Blackwell. str. 372-451
- [3] Lopatič J. 2012. Lesene konstrukcije. Študijsko gradivo (B-UNI). Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. str. 61-92
- [4]. Saje D. 2015. Vaje pri predmetu Lesene konstrukcije, 3.letnik GR UNI-B, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
- [5] Beg D. (ur), Pogačnik A. (ur). 2011. Piročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije. 5. poglavje
- [6] SIST EN 1995-1-1:2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1. Del: Splošna pravila in pravila za stavbe