

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:

**MARKO HOZJAN**

**SPAJANJE LESENIH ELEMENTOV S POMOČJO  
KREMLJASTIH PLOŠČ**

Diplomska naloga št.: 3205

**CONNECTIONS OF TIMBER ELEMENTS MADE WITH  
PUNCHED METAL PLATES**

Graduation thesis No.: 3205

**Mentor:**  
doc. dr. Jože Lopatič

**Predsednik komisije:**  
izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 2012

**STRAN ZA POPRAVKE:**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## **IZJAVE**

Podpisani Marko Hozjan izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Spajanje lesenih elementov s pomočjo krempljastih plošč«.

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

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

Ljubljana, 10. 2. 2012

Marko Hozjan

## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK: 624.011.1 (043.2)**

**Avtor: Marko Hozjan, univ.dipl. inž. gradb.**

**Mentor: izr. prof. dr. Jože Lopatič**

**Somentor: doc. dr. Sebastjan Bratina**

**Naslov: Spajanje lesenih elementov s pomočjo krempljastih plošč**

**Tip dokumenta: diplomska naloga – univerzitetni študij**

**Obseg in oprema: 63 str., 19 pregl., 49 sl., 91 en., 2.pril.**

**Ključne besede: Spoji, ježevke, krempljaste plošče, kolenski spoj, VBA Excel, računski primer, leseni prefabricirani elementi**

### **Izvleček**

V diplomski nalogi so predstavljeni leseni prefabricirani elementi, ki so med seboj spojeni s krempljastimi ploščami. Najpogostejše so palične strešne konstrukcije, ki se ponavadi uporabljajo pri leseni montažni gradnji in imajo lahko razpone do 35 m. Prefabricirani elementi sestavljajo sisteme, kot so na primer ostrešja, ki se prodajajo kot končni proizvod s strani specializiranih podjetij. V svetu že dlje časa poznajo prednosti takih sistemov, ki poenostavijo, pocenijo in pospešijo gradnjo lesenih konstrukcij. Posebno pozornost je potrebno posvetiti tudi pogojem montaže, saj so elementi občutljivi na obremenitve, ki delujejo izven njihove ravnine. V nadaljevanju diplomske naloge so predstavljeni spoji v prefabriciranem strešnem elementu in njihovo dimenzioniranje po standardu SIST EN 1995-1-1:2005. Za primer kolenskega spoja je narejen pripomoček za izračun nosilnosti spojev v programu Excel. Pri izdelavi pripomočka je bil uporabljen program Microsoft Visual Basic for Applications, ki je razvojno okolje, vgrajeno v Microsoft Office. V računskem primeru, na koncu diplomske naloge, so med seboj primerjani rezultati analitičnega računa, z rezultati, ki jih dobimo s pripomočkom za izračun spojev.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC: 624.011.1 (043.2)**

**Author: Marko Hozjan**

**Supervisor: izr. prof. dr. Jože Lopatič.**

**Cosupervisor: doc. dr. Sebastjan Bratina.**

**Title: Connections of wood elements made with punched metal plates**

**Document type: Graduation Thesis – University studies**

**Notes: 63 p., 19 tab., 49 fig., 91 eq., 2 ann.**

**Key words: Joints, punched metal plates, knee joints, VBA Excel, example, prefabricated elements made of wood**

### **Abstract**

In the graduation thesis trusses with punched metal plates are presented. These kind of constructions are mostly used for dwelling houses, with spans up to 35 m. Trusses are prefabricated elements, they are composed in such structures like roof and are products of specialised companies. Such systems are well known in the world and it is considered that they can simplify, speed up and reduce the building costs of wooden structures. Special concern must be taken to the installation of trusses, because they don't have resistance to the out of plane loads. Hereafter are presented joints of prefabricated trusses, according to SIST EN 1995-1-1:2005. The tool was made in Excel, for calculating the load capacity of joints made with punched metal plates, based on an example of a knee joint. The tool was made with Microsoft Visual Basic for Applications program, which is a development tool build in Microsoft Office. At the end of the graduation thesis, the results of an analytical example were compared with the results obtained by the tool.

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. J. Lopatiču in somentorju doc. dr. S. Bratini. Zahvalil bi se tudi svojim staršema, ki sta mi skozi vsa leta študija nudila pomoč in podporo ter bratu Mihi, sestri Kristini in puncu Barbari, za vso vzpodbudo med študijem.

## **KAZALO VSEBINE:**

Izjave	III
Izjave o pregledu naloge	IV
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček	V
Bibliographic – documentalistic information and abstract	VI
Zahvala	VII
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 LESENE KONSTRUKCIJE SPOJENE S KREMPLJASTIMI PLOŠČAMI</b>	<b>4</b>
2.1 Palične strešne konstrukcije	6
2.1.1 Leseni elementi	8
2.1.2 Krempljaste plošče	10
2.2 Spoji s krempljastimi ploščami	12
2.3 Trdnostne karakteristike krempljastih plošč	14
2.4 Duktilnost krempljev	19
2.5 Trajnost	20
2.6 Nizkociklično utrujanje spoja	21
<b>3 SPAJANJE LESENIH ELEMENTOV S POMOČJO KREMPLJASTIH PLOŠČ</b>	<b>23</b>
3.1 Računski modeli paličja za izračun obremenitev v spoju	23
3.2 Dimenzioniranje spojev	25
3.2.1 Sidrna nosilnost krempljastih plošč	26
3.2.2 Nosilnost krempljaste plošče na stiku med lesenima elementoma	30
3.2.3 Kontrola cepilnih sil	32
<b>4 POGOJI ZA SKLADIŠČENJE IN MONTAŽO ELEMENTOV</b>	<b>34</b>
<b>5 PRIPOMOČEK ZA KONTROLO NOSILNOSTI KOLENSKEGA SPOJA</b>	<b>35</b>
5.1 Osnovni geometrijski podatki kolenskega spoja	35
5.2 Določitev efektivnih stičnih površin	38
5.2.1 Vozlišča efektivne stične površine za element 2	38
5.2.2 Vozlišča efektivne stične površine za element 1	40
5.2.3 Geometrijske karakteristike stičnih površin	41
5.2.4 Določitev dimenzije plošče, merjene vzdolž stične črte	43
5.3 Obremenitev v težišču efektivnih stičnih površin	43
5.4 Predstavitev pripomočka za kontrolo nosilnosti kolenskega spoja	45



<b>6 RAČUNSKI PRIMER</b>	<b>51</b>
6.1 Kontrola nosilnosti s »peš« postopkom	52
6.1.1 Sidrna nosilnost krempljaste plošče	52
6.1.2 Nosilnost krempljaste plošče na stiku med lesenima elementoma	56
6.1.3 Kontrola cepilnih sil	58
6.2 Kontrola nosilnosti s pomočjo izdelanega programskega orodja v programskem okolju Microsoft Excel in primerjava rezultatov	59
6.3 Vpliv izbire vrste krempljaste plošče na nosilnost kolenskega spoja	60
<b>7 ZAKLJUČEK</b>	<b>62</b>
<b>VIRI</b>	<b>64</b>

## KAZALO PREGLEDNIC:

Preglednica 1: Minimalne dimenzije lesenih elementov [10].	9
Preglednica 2: Maksimalne geometrijske deformacije v lesenem elementu (v oklepajih so zapisani angleški izrazi za deformacije) [10].	9
Preglednica 3: Minimalne specifikacije za jeklo [10].	11
Preglednica 4: Dimenzije krempljastih plošč.	11
Preglednica 5: Trdnostne karakteristike krempljastih plošč, dobljene s standardnimi preizkusi.	15
Preglednica 6: Minimalno število testov, potrebnih za določitev karakterističnih trdnosti sidranja.	16
Preglednica 7: Minimalno število testov, potrebnih za določitev karakterističnih trdnosti jeklene ploščice.	17
Preglednica 8: Karakteristične vrednosti krempljastih plošč.	19
Preglednica 9: Minimalna protikorozijska zaščita za krempljaste plošče glede na ISO 2081 (povezani standard z SIST EN 1995-1-1:2005) [6].	20
Preglednica 10: Razredi uporabe za lesene konstrukcije [6].	21
Preglednica 11: Primeri razredov uporabnosti [19].	21
Preglednica 12: Poglavja v SIST EN 1995-1-1:2005, ki se neposredno nanašajo na krempljaste plošče.	23
Preglednica 13: Vrednost $k_{mod}$ glede na razred trajanja obtežbe in razred uporabe [6].	27
Preglednica 14: Trdnostne karakteristike krempljaste plošče Wolf Typ 101.	51
Preglednica 15: Geometrijske karakteristike efektivnih stičnih površin v kolenskem spoju	54
Preglednica 16: Geometrijske karakteristike efektivnih stičnih površin, izračunane s programom v Excelu (levo) in s pomočjo AutoCAD-a (desno).	59
Preglednica 17: Kontrole nosilnosti kolenskega spoja s pomočjo izdelanega programskega orodja v Excelu oziroma s »pešč« računom.	60
Preglednica 18: Karakteristične trdnosti različnih tipov krempljastih plošč.	60
Preglednica 19: Kontrola nosilnosti kolenskega spoja za različne tipe krempljastih plošč.	61

## KAZALO SLIK:

Slika 1: Prikaz prve krempljaste plošče, oziroma »Grip plate« plošče. Skica je iz dokumenta ameriškega urada za patente [2].	1
Slika 2: Število dokončanih lesenih stanovanjskih stavb v RS od leta 2004 do 2010.	2
Slika 3: Uporaba krempljastih plošč za stikovanje lesenih konstrukcij.	4
Slika 4: Različni tipi hidravličnih stiskalnice za vgradnjo krempljastih plošč.	5
Slika 5: Tipične vrste paličnih strešnih konstrukcij [4].	6
Slika 6: Elementi lesene palične strešne konstrukcije.	7
Slika 7: Primer krempljaste plošče.	10
Slika 8: Zveza med pomiki in silo za nekatere vrste spojev [11].	12
Slika 9: Diagrami sila/zdrs ( $F/u$ ) za lesene elemente obremenjene natezno osno silo, ki je vzporedna s smerjo lesnih vlaken, za različna mehanska vezna sredstva.	13
Slika 10: Porušitev kolenskega spoja z izvlekom krempljev, ki se upognejo za $45^\circ$ [12].	14
Slika 11: Preizkus vpetja kremplja [14].	20
Slika 12: Razvoj računskih modelov paličja [11].	24
Slika 13: Definiranje podpore pri poenostavljeni analizi po SIST EN 1995-1-1:2005.	25
Slika 14: Pomen kotov pri obravnavanju krempljaste plošče.	26
Slika 15: Karakteristične sidrna trdnost krempljaste plošče v smeri vlaken lesa pri poljubnem kotu $\alpha$ ( $f_{a,\alpha,0,k}$ ) v odvisnosti od vrste krempljaste plošče.	28
Slika 16: Obremenitve v krempljasti plošči v središču efektivne površine.	29
Slika 17: Obremenitve v krempljasti plošči pri kontroli nosilnosti jeklene ploščice.	31
Slika 18: Cepilne sile v nateznem spoju.	33
Slika 19: Geometrijski podatki krempljaste plošče.	35
Slika 20: Premik krempljaste plošče v koordinatnem sistemu ( $x,y$ ).	36
Slika 21: Premice, ki določajo robove lesenih elementov.	36
Slika 22: Premice, ki določajo robove lesenih elementov z upoštevanjem redukcije stičnih površin.	38
Slika 23: Vozlišča efektivne stične površine za element 2, $k_{elem} > k_{diag}$ .	39
Slika 24: Vozlišča efektivne stične površine za element 2, $k_{elem} < k_{diag}$ .	40
Slika 25: Vozlišča efektivne stične površine za element 1, $k_{elem} > k_{diag}$ .	41
Slika 26: Vozlišča efektivne stične površine za element 1, $k_{elem} < k_{diag}$ .	41
Slika 27: Vozlišča plošče na stični črti, $k_{elem} > k_{diag}$ .	43
Slika 28: Vozlišča plošče na stični črti, $k_{elem} < k_{diag}$ .	43
Slika 29: Projektna obremenitev zgornjega pasu in krempljaste plošče v kolenskem spoju.	44
Slika 30: Obremenitev v središču efektivnih stičnih površin.	45
Slika 31: Vnos dimenzij krempljaste plošče ter izbira njene lege.	46
Slika 32: Vnos podatkov o lesenih elementih.	46
Slika 33: Povzetek računskih kontrol nosilnosti kolenskega spoja.	46
Slika 34: Grafična predstavitev kolenskega spoja.	47
Slika 35: Vnos materiala lesenih elementov iz spustnega seznama.	47
Slika 36: Vnos projektne obremenitve.	47
Slika 37: Koti v kolenskem spoju.	48
Slika 38: Vnos trdnostnih karakteristik krempljaste plošče.	48
Slika 39: Izpis koordinat vozlišč efektivnih stičnih površin (levo) ter pripadajoče geometrijske karakteristike (desno).	49

Slika 40: Karakteristične sidrne trdnosti na enoto površine krempljaste plošče za stično površino med ploščo in elementom 1 oziroma 2.	49
Slika 41: Kontrola nosilnosti krempljaste plošče skladno s standardom SIST EN 1995-1-1:2005.	50
Slika 42: Kontrola sidrne nosilnosti kolenskega spoja skladno s standardom SIST EN 1995-1-1:2005.	50
Slika 43: Geometrijski podatki kolenskega spoja.	51
Slika 44: Potek upogibnih elementov v zgornjem pasu.	52
Slika 45: Določitev geometrijskih karakteristik v spoju s pomočjo programa AutoCad.	53
Slika 46: Geometrijske karakteristike efektivne stične površine za element 2, izračunane s pomočjo programa AutoCAD.	53
Slika 47: Geometrijske karakteristike efektivne stične površine za element 1, izračunane s pomočjo programa AutoCAD.	53
Slika 48: Komponente projektnih sil za vmesno površino stika v obeh glavnih smereh plošče.	56
Slika 49: Komponente projektnih sil v krempljasti plošči.	57

**KAZALO PRILOG:**

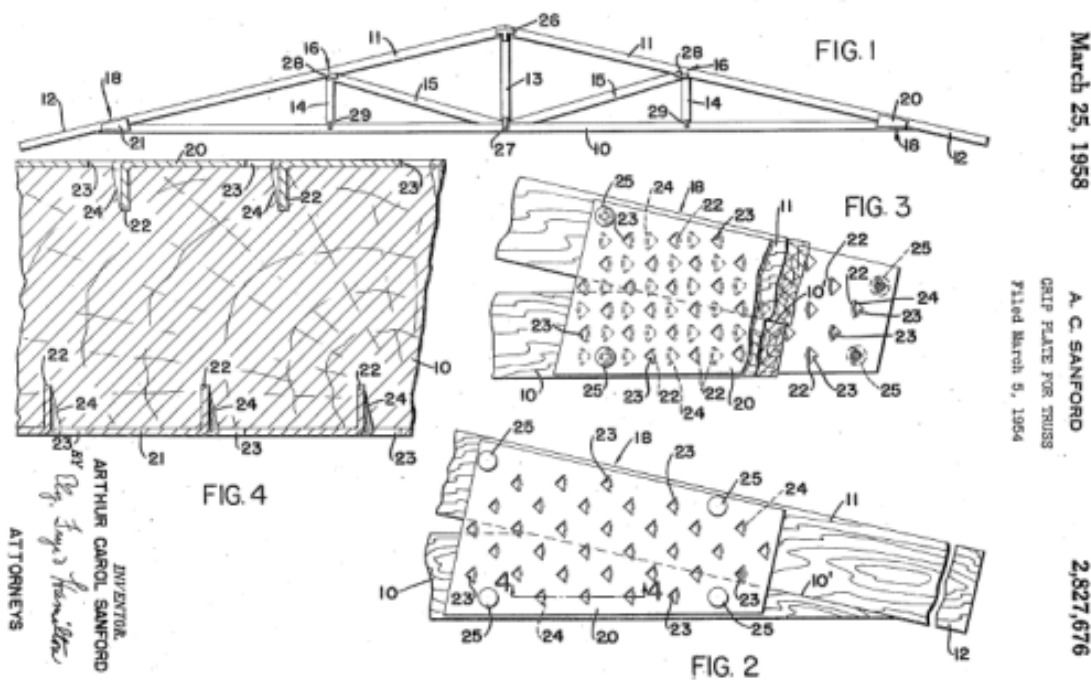
PRILOGA A: ODVISNOST KARAKTERISTIČNE SIDRNE TRDNOSTI KREMPLJASTE PLOŠČE V SMERI VLAKEN, V ODVISNOSTI OD KOTA $\alpha$	A1
PRILOGA B: IZPIS REZULTATOV IZ PROGRAMA ZA RAČUNSKI PRIMER	B1

## **OKRAJŠAVE IN SIMBOLI:**

DIN	Deutsches Institut für Normung
EC 0	Evrokod 0
EC 5	Evrokod 5
EU	Evropska Unija
RS	Republika Slovenija
VBA	Visual Basic for Applications
ZDA	Združene države Amerike

## 1 UVOD

V Združenih državah Amerike je v začetku petdesetih let, iznajdba jeklenih spojnikov za les, povzročila pravo malo revolucijo pri gradnji lesenih enodružinskih hiš. Začelo se je med drugo svetovno vojno, ko so v ZDA (Združene države Amerike) iskali način, kako bi skrajšali potreben čas za izgradnjo vojaških objektov. Najprej so elemente strešnih konstrukcij med seboj spajali kar z lesenimi vezanimi ploščami, ki so jih prilepili in pribili na nosilne lesene elemente. Podobna situacija se pojavi tudi po vojni, ko je bilo potrebno zadostiti naraščajočemu povpraševanju po enodružinskih hišah. Da bi zmanjšali potrebno količino dela na gradbišču, zaradi lepljenja in rezanja vezanih plošč, so inženirji iskali nove rešitve. V prvem koraku so lesene vezane plošče zamenjali z lahkimi kovinskimi ploščami, ki so že imele izvrtane luknje za žeblje. S tem pa so rešili samo del problema, še vedno je bilo potrebno veliko dela, da so plošče pritrdili na lesene elemente. V želji da bi še dodatno zmanjšal potrebno delo na gradbišču in pospešil proizvodnjo, je Arthur Carrol Sanford iznašel krempljaste plošče in jih poimenoval Gri-P-Late [1]. Na spodnji sliki je predstavljena skica iz dokumenta ameriškega patentnega urada, iz leta 1958, ki prikazuje Gri-P-Late plošče.



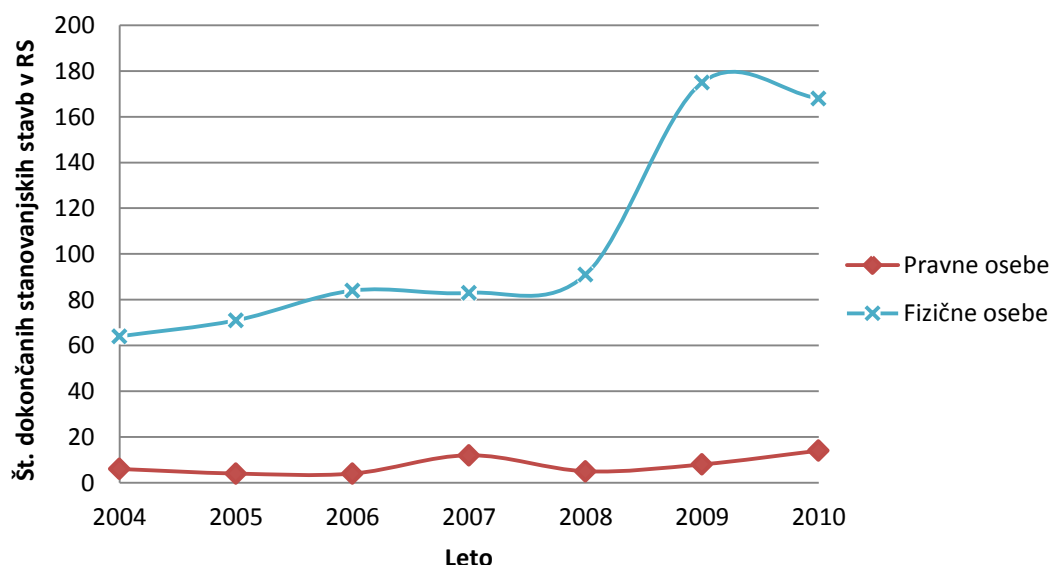
Slika 1: Prikaz prve krempljaste plošče, oziroma »Grip plate« plošče. Skica je iz dokumenta ameriškega urada za patente [2].

Gri-P-Late so bile prve jeklene plošče, iz katerih so izbili kremplje in s tem dobili sistem za pritrditev lesenih elementov. Na žalost pa so tudi te plošče potrebovale dodatno pritrditev z žebli (na sliki 1 so s številko 25 označena mesta, ki so bila puščena za dodatno pritrditev z žebli). Raziskovalno delo je nadaljeval J. Calvin Jureit, ki je izboljšal prvotne krempljaste plošče in jih poimenoval Gang-Nail plate. Te ploščice so vtiskali v lesene elemente s pomočjo hidravlične stiskalnice in niso več potrebovale dodatne pritrditve [1]. Kmalu so krempljaste plošče začeli uporabljati za izdelavo prefabriciranih lesenih elementov, njihova uporaba pa se je z leti naglo povečevala. V preteklih letih je prodaja jeklenih veznih sredstev v ZDA vsako leto narasla za 120 mio dolarjev [3].

Danes se krempljaste plošče, ki jih imenujemo tudi ježevke ali ježaste plošče, uporabljajo za stikovanje lesenih prefabriciranih elementov, ki se izdelujejo v tovarnah in se dostavijo na gradbišče kot končni izdelki. Tam se potem vgradijo na primerna mesta v konstrukciji. Krempljaste plošče se najpogosteje uporabljajo za stikovanje paličnih strešnih konstrukcij, uporabljajo pa se tudi za stikovanje sestavljenih upogibnih nosilcev, paličnih medetažnih konstrukcij (paličnih nosilcev) in paličnih stenskih elementov.

Leseni prefabricirani elementi se prodajajo tudi v sklopu sistemov, ki jih specializirana podjetja ponujajo na trgu. Med te sisteme lahko štejemo ostrešja, medetažne konstrukcije, stenski panele in podobno. Leseni elementi v teh sistemih so med seboj spojeni s krempljastimi ploščami. V sistemu so ponavadi zajete vse faze gradnje, od načrtovanja do izvedbe. S tem je proizvajalcu dana možnost optimizacije proizvodnje, kar lahko pomeni konkurenčno prednost na trgu. Proizvajalci sistemov ponujajo tudi programe za izračun konstrukcij in spojev, imajo pa tudi lastno inženirsko mrežo, mrežo proizvajalcev elementov in izvajalcev. Podjetje Alpine Engineered Products Inc. je eno od takih podjetij. V svoji brošuri, objavljeni leta 2003 [4] so zapisali, da so njihovi prefabricirani izdelki, ki jih izdelujejo od leta 1966, vgrajeni v vsaki peti stanovanjski hiši v ZDA in Kanadi in so bili proizvedeni v več kot 550 proizvodnih obratih. Ker je to le eno od treh velikih podjetij, ki ponujajo take sisteme v ZDA in Kanadi, dobimo s tem realno predstavo o razširjenosti prefabriciranih lesenih elementov v Severni Ameriki. Prefabricirani elementi pa so razširjeni tudi drugod po svetu, še posebej v anglosaških državah, kot so Avstralija, Velika Britanija in Nova Zelandija, pogosti pa so tudi v Evropi, še posebej v skandinavskih državah, Danski in Nemčiji. Poznamo jih tudi v Sloveniji.

Tudi v Sloveniji je mogoče opaziti porast gradnje lesenih objektov. Poleg vedno večjega števila lesenih enodružinskih hiš, je mogoče zaznati tudi vedno večjo število lesenih nosilnih konstrukcij v objektih, kot so vrtci, termalna zdravilišča, športni objekti in drugi. Z razvojem tehnologij, ki omogočajo izdelavo lepljenih nosilcev, lesenih panelnih sten, idr. ter že poznanih prednostih lesenih konstrukcij, se delež lesenih nosilnih konstrukcij v Sloveniji naglo povečuje. Rast števila dokončanih stanovanjskih stavb v Sloveniji, pri katerih kot gradbeni material prevladuje les, je predstavljena na sliki 2. Podatki so povzeti po Statističnih letopisih RS (Republika Slovenija) v letih od 2005 do 2011 [5].



Slika 2: Število dokončanih lesenih stanovanjskih stavb v RS od leta 2004 do 2010.



Iz slike 2 je razvidno, da je leta 2008 število dokončanih lesenih stanovanjskih stavb v Sloveniji, kjer so investitorji fizične osebe, občutno naraslo. Število je v lanskem letu sicer rahlo upadlo, kar pa glede na krizo v gradbeništvu ni presenetljivo. Število dokončanih lesenih stanovanjskih stavb, kjer so investitorji pravne osebe pa zaenkrat stagnira. Pričakujemo lahko, da bo z večanjem konkurence v Sloveniji, prišlo do optimizacije gradnje enodružinskih hiš, kar bo privedlo do pocenitve gradnje, to pa bo še dodatno povečalo konkurenčnost montažnih hiš na trgu, saj je cena njihova največja prednost. Glede na delež trga, ki ga krempljaste plošče kot vezno sredstvo dosegajo pri gradnji enodružinskih hiš v tujini, je relevantno pričakovati, da se bodo sčasoma, ti trendi nadaljevali tudi v Sloveniji.

V Sloveniji prefabricirani elementi, spojeni s krempljastimi ploščami, niso zelo pogosti. Prvo podružnico v Sloveniji je leta 2010 odprlo podjetje Wolf System iz Avstrije. Pred uveljavitvijo Evrokodov v Sloveniji nismo imeli lastnega standarda, spoji s krempljastimi ploščami pa so se večinoma projektirali po nemških DIN standardih (Deutsches Institut für Normung). Od 2005 v Sloveniji velja standard EC 5 (Evrokod 5), ki med drugim zajema tudi dimenzioniranje spojev s krempljastimi ploščami. V standardu SIST EN 1995-1-1 je podan postopek poenostavljene analize paličij, ki so spojeni s krempljastimi ploščami. V nadaljevanju Evrokoda so obdelani še sestavi in konstrukcijske zahteve za izvedbo [6].

Z namenom, da se predstavi spajanje lesenih elementov s pomočjo krempljastih plošč, je bila napisana tudi ta diplomska naloga. V njej je predstavljeno dimenzioniranje spojev po standardu SIST EN 1995-1-1:2005. Predstavljen je širši pogled na problematiko dimenzioniranja prefabriciranih lesenih konstrukcij, ki so spojene s krempljastimi ploščami. Pri dimenzioniranju spojev imamo opravka s trinajstimi trdnostnimi karakteristikami krempljastih plošč, ki se določijo na podlagi standardnih preizkusov. Ker so ti preizkusi zelo dragi, se zanje odločajo predvsem proizvajalci krempljastih plošč. Trdnostne karakteristike, pridobljene iz standardnega preizkusa, so podane v tehničnem soglasju za posamezna vezna sredstva.

V diplomski nalogi sem se omejil na palične strešne konstrukcije, pri katerih je uporaba krempljastih plošč najbolj razširjena. Palične konstrukcije so tudi edine, ki so zajete v SIST EN 1995-1-1:2005. Na začetku diplomske naloge so predstavljene omejitve na katere moramo biti pozorni, ko imamo opravka s prefabriciranimi strešnimi elementi. Tolerance, ki veljajo pri izdelavi prefabriciranih elementov so veliko strožje kot tiste, ki veljajo za običajne lesene konstrukcije.

Končni rezultat te diplomske naloge je preprosto računsko orodje za izračun nosilnosti kolenskega spoja, ki je spojen s krempljastima ploščama, po standardu SIST EN 1995-1-1:2005. Pripomoček je razvit v programu Excel, s pomočjo programa Microsoft Visual Basic for Applications, ki omogoča programiranje v programih paketa Microsoft Office. Na koncu diplomske naloge je podan računski primer. Primerjava med rezultati, ki smo jih dobili s »peš« izračunom in rezultati, ki smo jih dobili s pripomočkom nam pokaže, da so ti skoraj identični. S tem smo zaključili, da izdelan pripomoček uspešno nadomešča zamuden »peš« postopek računa.

## 2 LESENE KONSTRUKCIJE SPOJENE S KREMPLJASTIMI PLOŠČAMI

Krempljaste plošče se uporabljajo za spajanje lesenih elementov v prefabriciranih konstrukcijah. Najpogosteje se uporabljajo pri spajanju paličnih konstrukcij, kot so npr. strešne konstrukcije, ali palični nosilci v medetažah. Uporabljajo se še za spajanje sestavljenih upogibnih nosilcev in kot ojačitve lesenih elementov na mestih, kjer lahko pričakujemo cepljenje lesa, začele pa so se uporabljati tudi za spajanje stenskih panelnih elementov. Zadnjo novost pri spajanju prefabriciranih lesenih elementov predstavljajo palični nosilci, ki imajo jeklene diagonale z jekleni kremplji, ki se pritrdijo na lesene pasnice na enak način, kot navadne krempljaste plošče.



a) lesene palične strešne konstrukcije [4].



b) palični nosilci v medetažnih konstrukcijah, spojeni s krempljastimi ploščami [4].



c) palični nosilci z jeklenimi diagonalami in lesenimi pasnicami, ki se uporabljajo kot medetažne konstrukcije, strešni nosilci ali kot nosilni elementi stenskih sistemov [7].

Slika 3: Uporaba krempljastih plošč za stikovanje lesenih konstrukcij.

Uporaba krempljastih plošč je omejena na prefabricirane elemente, kar je posledica ene od redkih slabosti, ki jih imajo. To je ta, da je krempljaste plošče potrebno vgraditi s pomočjo hidravličnih stiskalnic. Nikakor ni dovoljeno zabijanje krempljaste plošče v lesene elemente, saj se s tem poruši stik med lesenim elementom in krempljem. Proizvodnja prefabriciranih elementov poteka na velikih montažnih mizah, na katere položijo in začasno pritrdijo lesene elemente v podani geometriji. V vnaprej določena in izrisana mesta na lesenih elementih, se potem vtisnejo krempljaste plošče.

Večina proizvajalcev krempljastih plošč, ponuja tudi različne vrste stiskalnic, mize, stojala za skladiščenje izdelanih elementov in razne pripomočke za vgradnjo. Med montažo ali prevozom prefabriciranih elementov, lahko pride tudi do manjših poškodb, v obliki izvleka krempljev. Če deformacije niso prevelike, se lahko krempljaste plošče vtisnejo nazaj v lesene elemente, s pomočjo manjših prenosnih stiskalnic.



a) stiskalnica velikega formata v proizvodnem obratu prefabriciranih lesenih elementov [8].



b) prenosna stiskalnica za manjše popravke na gradbišču [9].

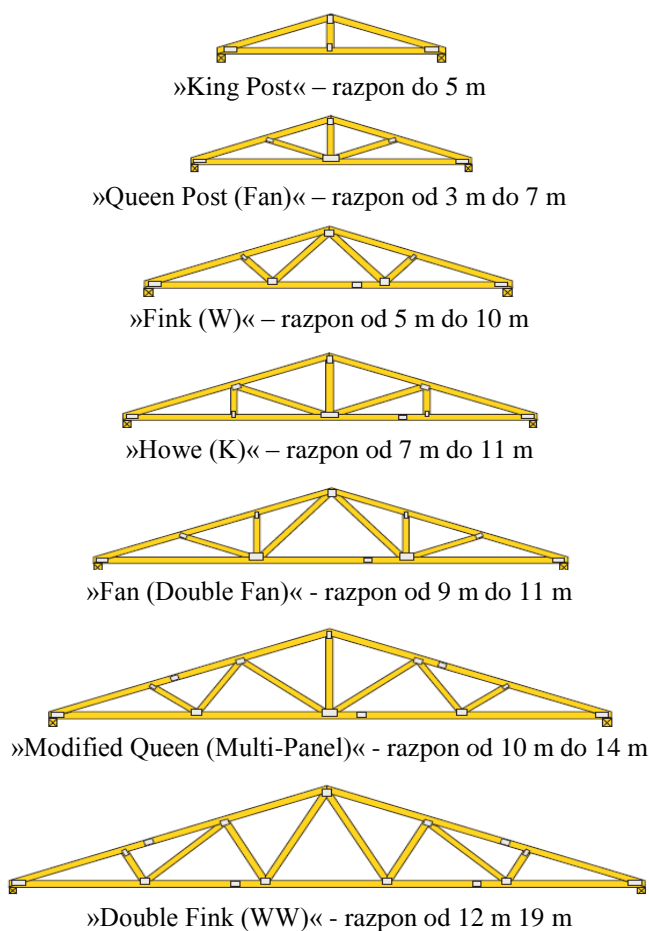
Slika 4: Različni tipi hidravličnih stiskalnic za vgradnjo krempljastih plošč.

Krempljaste plošče pa imajo tudi ogromno prednosti. Omogočajo hitro in enostavno izdelavo lesenih prefabriciranih elementov. Na gradbišču ne potrebujejo dodatnega prostora za rezanje in spajanje lesenih elementov, ne potrebujejo pa tudi dodatnega prostora za skladiščenje materiala, saj se prefabricirani elementi lahko vgradijo takoj po dostavi na gradbišče. Izdelava prefabriciranih elementov poteka pod kontroliranimi pogoji, zato je natančnost izdelave večja, odstopanja geometrije elementov pa so manjša. Nosilnost spojev ponavadi ni merodajna pri dimenzioniranju osnovnih lesenih elementov. Horizontalna razdalja med lesenimi elementi je majhna, zato za potrebe uklonskega zavarovanje konstrukcije potrebujemo strešne lege manjših dimenzij. Posledično so take konstrukcije lažje, ker imajo leseni elementi lahko manjše dimenzije. Končni rezultat je hitrejša in tudi cenejša izdelava konstrukcij.

## 2.1 Palične strešne konstrukcije

Palični strešni nosilci so prefabricirani konstrukcijski elementi, sestavljeni iz posameznih lesenih elementov, ki so med seboj spojeni s krempljastimi ploščami. Sestavljeni so v osnovni obliki trikotnikov in se posredno uporabljajo za podpiranje strešne kritine. V diplomski nalogi so opisani postopki za dimenzioniranje spojev paličnih strešnih nosilcev, ki pa se bistveno ne razlikujejo od spojev v ostalih konstrukcijah.

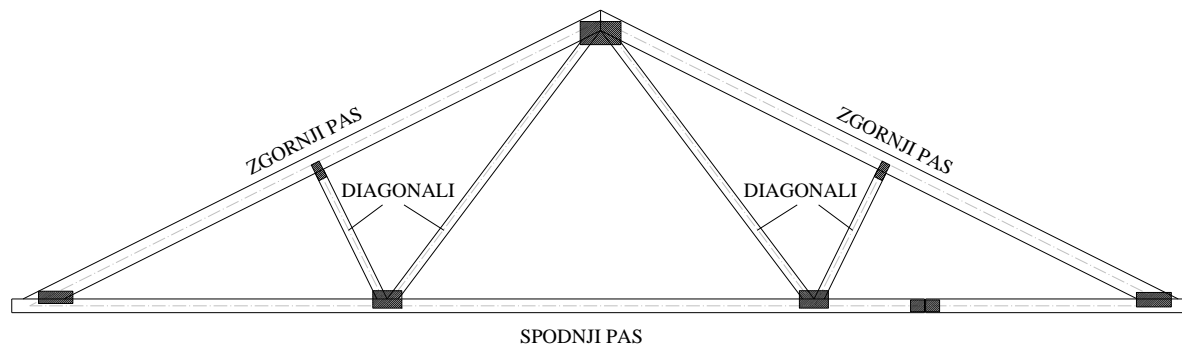
Proizvajalci poznajo več vrst paličnih strešnih nosilcev, katerih oblika je odvisna od razpona. Izkustveno in s pomočjo preiskav so določili okvirne razpone za posamezne vrste. Vrednosti so priporočene, nosilnost pa je potrebno potrditi z izračunom. Na izbiro vrste konstrukcije vplivajo tudi ekonomski vidiki, kot so zapletenost spojev, poraba materiala, vloženo delo in cena vhodnih surovin, ki lahko podražijo gradnjo. Merodajne so lahko tudi druge omejitve, kot so želje naročnika ali način transporta, ki je pri velikih razponih omejen, oziroma so potrebni dodatni stroški (izredni prevozi). Zato se včasih izplačajo tudi dodatna dela na gradbišču, ko npr. sestavijo konstrukcije iz več delov. Na spodnji sliki so predstavljene nekatere tipične vrste paličij, ki se od proizvajalca do proizvajalca ne razlikujejo veliko. Slika je vzeta iz kataloga podjetja Alpine engineered products Inc. [4].



Slika 5: Tipične vrste paličnih strešnih konstrukcij [4].

Postopek dimenzioniranja spojev s krempljastimi ploščami, opisan v tej diplomski nalogi, velja za razpone paličnih konstrukcij, ki so manjši od 35 m. Razponi med posameznimi sestavnimi elementi morajo biti manjši od 12 m, kot je to zapisano v standardu SIST EN 14250:2010 [10].

Vsi palični strešni nosilci so sestavljeni iz podobnih lesenih elementov. Elementi na zunanji strani paličja so sestavljajo zgornji in spodnji pas. Med notranje elemente štejemo diagonale in vertikale, ki povezujejo zgornji pas s spodnjim pasom. Ko realno paličje obremenimo, to deluje kot globalni upogibni element. Pri prevladujoči obtežbi v smeri gravitacije, je potem zgornji pas v tlaku, spodnji pas pa v nategu. Diagonale in vertikale so takrat v tlaku ali nategu. Primer palične strešne konstrukcije je predstavljeni na sliki 6.



Slika 6: Elementi lesene palične strešne konstrukcije.

Za računski model palične konstrukcije velja, da so elementi obremenjeni samo z osnimi silami, v realnih konstrukcijah pa nikoli ne moremo zagotoviti absolutne podajnosti na stikih. To pomeni, da so vezna sredstva obremenjena tudi z upogibnimi momenti in strižnimi silami, ki se potem prenašajo tudi na lesene elemente. Upoštevanje togosti v stikih spremeni obnašanje konstrukcije, saj pride do prerazporeditve notranjih sil v elementih.

Pri spajanju lesenih elementov paličnih strešnih konstrukcij dobimo različne vrste spojev:

- spoj med zgornjim pasom in spodnjim pasom (kolenski spoj)
- spoj med zgornjim pasom in diagonalo oz. vertikalo (T-spoj)
- spoj med spodnjim pasom in diagonalo oz. vertikalo (T-spoj)
- spoj v temenu med zgornjima pasovima in poljubnim številom diagonal oz. vertikal
- čisti natezni/tlačen spoj (čelni spoj)

Horizontalna razdalja med posameznimi lahкими paličnimi konstrukcijami znaša od 0.3 do 1.2 m [11]. Leseni elementi so relativno vitki, zato je potrebno zagotoviti uklonsko stabilnost okvirja, kot je to predpisano v standardu SIST EN 1995-1-1:2005 [6]. Obstaja nevarnost uklona, zato je potrebno uklonske dolžine tlačnih elementov zmanjšati z dovolj gostim podpiranjem. Zaradi majhnih razdalj med okvirji, imajo že tanke letve ali vezane plošče (odvisno od tega kaj imamo pod kritino) zadostno upogibno togost, da preprečijo uklon lesenih elementov. Zunanja obtežba se potem porazdeli na okvirje v razmerju togosti [11]. V ravnini strehe je potrebno vstaviti horizontalne zatege, ki pomagajo pri globalni stabilnosti konstrukcije, saj prenesejo osne sile v ravnini.

### Tolerance

Pri spajanju lesenih prefabriciranih elementov, prihaja do odstopanj, ki pa morajo biti znotraj še dopustnih toleranc. Kontrolirati moramo odstopanja pri pozicioniranju krempljastih plošč, dimenzijah prefabriciranih elementov in velikosti reže med stikovanima elementoma. V času izdelave, je potrebno zagotoviti ustrezno kontrolo kakovosti [10].

Toleranca za lego krempljaste plošče ne sme biti večja od projektirane, oz. večja od 10 mm. To velja za vse smeri. Da ne pride do sprostitve napetosti v spoju je potrebno omejiti izkrivljanje jeklene plošče med vtiskanjem. Odstopanje jeklene ploščice od podlage ne sme biti večja od 1 mm in ne na več kot 25 % sidrne površine, na katerem koli elementu, v katerem koli spoju.

Tolerance dimenzij prefabriciranih elementov v vertikalni in horizontalni smeri so za razpone manjše od 10 m enake  $\pm 10$  mm, za razpone večja od 10 m pa znašajo  $\pm 1$  mm/m.

Reža, med stikovanima lesenima elementoma na območju spoja, v času izdelave ne sme preseči 1,5 mm. Označimo jo z grško črko  $\Delta$ .

Pri dimenzioniranju prefabriciranih elementov moramo paziti, da krempljaste plošče ne izstopajo preko zunanjih robov lesenih elementov, saj moramo upoštevati, da na njih pritrujemo še podkonstrukcijo za kritino strehe. Dele krempljaste plošče, ki segajo čez zunanje robove lesenih elementov, zato pred vtiskanjem odstranimo. Spodnji rob jeklene ploščice v elementu nad podporo, mora biti 3 mm oddaljen od podprtega roba lesenega elementa.

V primeru, da se nam znotraj efektivne površine pojavljajo grče, moramo izvesti dodatne kontrole. Najprej moramo določiti, če gre za »žive« ali »mrtve« grče. »Žive« grče so dovoljene znotraj efektivne površine, če ne pride do izkrivljanja krempljev in ni lokalnih porušitev lesa okrog njih pri vtiskanju jeklene ploščice. Če imamo »mrtve grče«, luknje ali praske znotraj efektivne površine sidranja, se njihova površina ne upošteva in se odšteje od efektivne površine pri računu nosilnosti sidranja krempljastih plošč.

### **2.1.1 Leseni elementi**

Dimenzije lesenih elementov določimo z globalno analizo. Pri dimenzioniranju spojev je ugodno, da so elementi čim višji, saj imamo tako na voljo večjo površino za sidranje krempljaste plošče. Na nosilnost spoja vpliva tudi trdnostni razred lesa, saj je od njega odvisna gostota lesa.

#### **Material**

V diplomski nalogi s krempljastimi ploščami spajamo lesene elemente iz masivnega lesa, uporabljajo pa se lahko tudi za spajanje lepljenih nosilcev. Trdnostne razrede za mehki in trdi les določimo po standardu SIST EN 338. Glede na trdnostne razrede določimo karakteristične gostote, ki jih potem uporabimo v računu nosilnosti spoja. Lesene elemente razvrstimo po trdnosti z metodami po standardu SIST EN 14081-1 [10]. Nekateri proizvajalci krempljastih plošč imajo predpisane drevesne vrste, iz katerih so lahko narejeni leseni elementi.

Pri nabrekanju in krčenju lesenih elementov zaradi spreminjanja vlage, je potrebno zagotoviti dimenzijsko stabilnost prereзов. Za elemente, ki so razvrščeni v skladu z standardom SIST EN 14081-1, velja da izpolnjujejo zahteve o dimenzijski stabilnosti. V času izdelave prefabriciranih elementov, vlaga v lesenih elementih ne sme preseči 22 % [10].

## Dimenzije

Leseni elementi, ki se uporabijo za izdelavo prefabriciranih elementov, morajo zadostiti strožjim pogojem, kot konstrukcijski les, saj je natančnost izdelave prefabriciranih elementov večja zaradi kontroliranih pogojev izdelave. Za tolerance lesenih prefabriciranih elementov velja, da spadajo v 2. razred tolerance po standardu SIST EN 336 [10].

Minimalne dimenzije prereza lesenega elementa so zapisane v standardu SIST EN 14250:2010 in so podane v preglednici 1 [10]. Predvidevamo da je širina lesenih elementov omejena zaradi dolžine krempljev. Njihova dolžina je ponavadi okoli 1 mm.

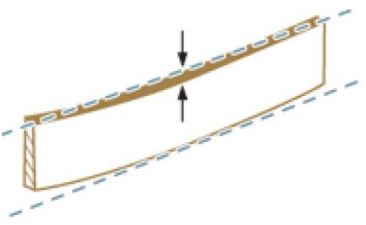
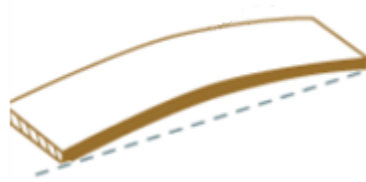
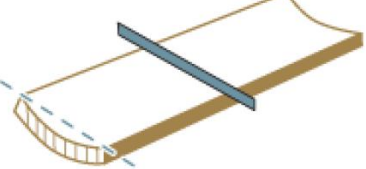
Preglednica 1: Minimalne dimenzije lesenih elementov [10].

Dimenzije	Elementi	Omejitev
Širina	Za vse elemente	35 mm
Višina	Zgornji in spodnji pas	68 mm
	Diagonale in vertikale	58 mm
Efektivna debelina	Zgornji in spodnji pas	35 mm

Efektivna debelina v preglednici 1, predstavlja debelino lesenega elementa, kot je ta definirana v SIST EN 336, torej z upoštevanjem morebitnih posnetih robov. Če imamo posnete robove, se efektivna debelina lesenega elementa zmanjša za debelino posnetega robu. Posneti robovi se ne smejo pojavljati v območju stikovanja in na območju podpiranja [10].


Geometrijske deformacije posameznih lesenih elementov pred vgradnjo, so definirane v EN 844-3 in morajo biti izmerjene po standardu SIST EN 1310. Paziti moramo, da so znotraj omejitev, ki so zapisane v preglednici 2 [10].

Preglednica 2: Maksimalne geometrijske deformacije v lesenem elementu (v oklepajih so zapisani angleški izrazi za deformacije) [10].

Skica	Vrsta deformacije	Omejitev
	Upogib elementa okoli močne osi (»spring«)	4 mm na 2 m dolžine elementa
	Upogib elementa okoli šibke osi (»bow«)	6 mm na 2 m dolžine elementa
	Upogib elementa glede na navpično os (v ravnini prereza) (»cup«)	2 mm na 100 mm dolžine prereza

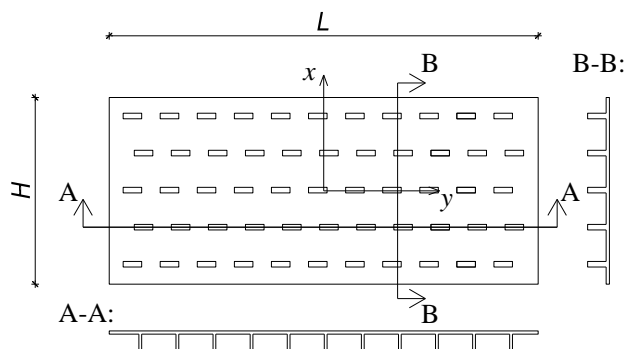
se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 2

Skica	Vrsta deformacije	Omejitev
	Torzijski zasuk elementa (»twist«)	2 mm na 25 mm širine prereza na 2 m dolžine elementa

### 2.1.2 Krempljaste plošče

Krempljaste plošče so industrijski izdelek in imajo kot take določene lastnosti. Razvoj krempljastih plošč poteka predvsem pri proizvajalcih. Vsak proizvajalec razvija svoje krempljaste plošče in jih tudi nenehno izpopolnjuje. Ker njihov razvoj poteka ločeno od ostalih proizvajalcev, med njimi prihaja do razlik v detajlih, v osnovi pa so si med seboj podobne. Vse so narejene iz tankih jeklenih pločevin, iz katerih se na določenem rastru izbijajo kremplji. Kremplji so vedno pravokotni glede na ravnino jeklene ploščice.



Slika 7: Primer krempljaste plošče.

Glavno smer krempljaste plošče predstavlja x os, y os je na njo pravokotna (glej sliko 7). Nosilnost krempljaste plošče v smeri osi x, je vedno večja od nosilnosti v y smeri. Smer izbitih krempljev je enaka glavni smeri krempljaste plošče. Posledično tudi luknje v krempljasti plošči potekajo v glavni smeri plošče.

### Vrste krempljastih plošč

Proizvajalci ponujajo različne vrste krempljastih plošč, ki se med seboj razlikujejo glede na modularno razporeditev krempljev ter glede na obliko in dolžino krempljev. Različne so tudi njihove debeline. Ker iztisnjeni kremplji potekajo v določeni smeri, je nemogoče narediti krempljasto ploščo, ki bi imela v vseh smereh enako nosilnost. Za različne vrste spojev se uporabljajo različne vrste krempljastih plošč. Nosilnost krempljaste plošče je odvisna od smeri obremenitev, ki na njo delujejo in od kota, ki ga glavna os krempljaste plošče oklepa s smerjo lesenih vlaken. Oblika in razporeditev krempljev, zato vpliva na nosilnost krempljaste plošče pri različnih kotih. Nekatere krempljaste plošče imajo največjo nosilnost, če so obremenjene v glavni smeri krempljaste plošče, druge spet dosežejo maksimalno nosilnost pri določenem kotu. Take krempljaste plošče so zato primerne za spoje, v katerih se spajajo leseni elementi pod določenimi koti. Predvidevamo, da je do tega prišlo v procesu optimizacije krempljastih plošč.



## Material

Glede na standard SIST EN 14250:2010, morajo biti krempljaste plošče narejene iz mehkega konstrukcijskega jekla, ali pa iz nerjavnega avstenitnega jekla. Zahteve, ki jim mora material ustrezati, so podane v preglednici 3 [10]. Kemijska sestava materiala, iz katerega so narejene krempljaste plošče, se razlikuje od proizvajalca do proizvajalca.

Preglednica 3: Minimalne specifikacije za jeklo [10].

Vrsta	Standard	Minimalna specifikacija
Mehko konstrukcijsko jeklo	SIST EN 10327:2004	DX51D
	EN 10326	S220GD
	EN 10292	HX220YD
Avstenitno nerjavno jeklo	SIST EN 10088-2:2005	X5CrNiTi 18-10

Na izbiro materiala lahko vpliva agresivnost okolja v katerem se nahaja konstrukcija Mehko konstrukcijsko jeklo ni korozijsko odporno, zato je potrebna dodatna protikorozijska zaščita.

## Dimenzije

Krempljaste plošče se izdelujejo iz jeklenih pločevin, iz katerih se po določenem vzorcu izbijejo kremplji. Med kremplji ostane prostor, kjer se pločevine lahko razrežejo na zelene dimenzije. Posamezne dimenzije krempljastih plošč, so torej odvisne od razmikov med kremplji.

Dolžino krempljastih plošč označimo s črko  $L$  (v smeri osi  $x$ ), višino pa s črko  $H$  (v smeri osi  $y$ ) kot to prikazuje slika 7. Omejitve za dimenziji  $L$  in  $H$  so za posamezne vrste krempljastih plošč predstavljene v preglednici 4 [24, 25].

Preglednica 4: Dimenzije krempljastih plošč.

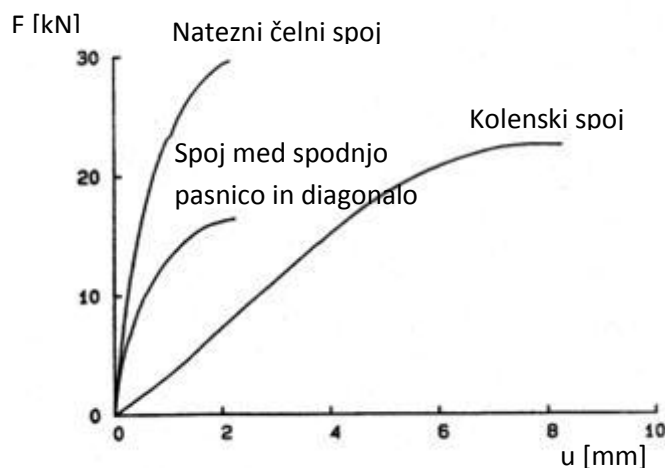
Tip krempljaste plošče	Višina plošče $H$ [mm]		Dolžina plošče $L$ [mm]	
	min	max	min	max
Proizvajalec Wolf System GmbH				
Vrsta 101	24	288	75	800
Vrsta 12N in 12NE	51	305	51	660
Vrsta 15N in 15NE	51	406	102	813
Vrsta 15Z in 15 ZE	51	406	102	813
Vrsta 20N in 20NE	51	305	102	762
Vrsta 20Z in 20 ZE	51	305	102	762
Proizvajalec MiTek Industries AB				
GNT-100S	28	206	40	396
M16S	37,8	227	133,3	1223,4
GNT-150S	37	290	82	800
MiTek Top W	36	288	100	600
GNT-150SK	56	196	221	330

Debeline krempljastih plošč označimo s črko  $d$ . Debeline so omejene na intervalu od 0.9 mm do 2.5 mm. Debelina mora biti v skladu s tolerancami iz standarda EN 10143 za mehka jekla, in standardom EN ISO 9445 za nerjavno jeklo [10].

## 2.2 Spoji s krempljastimi ploščami

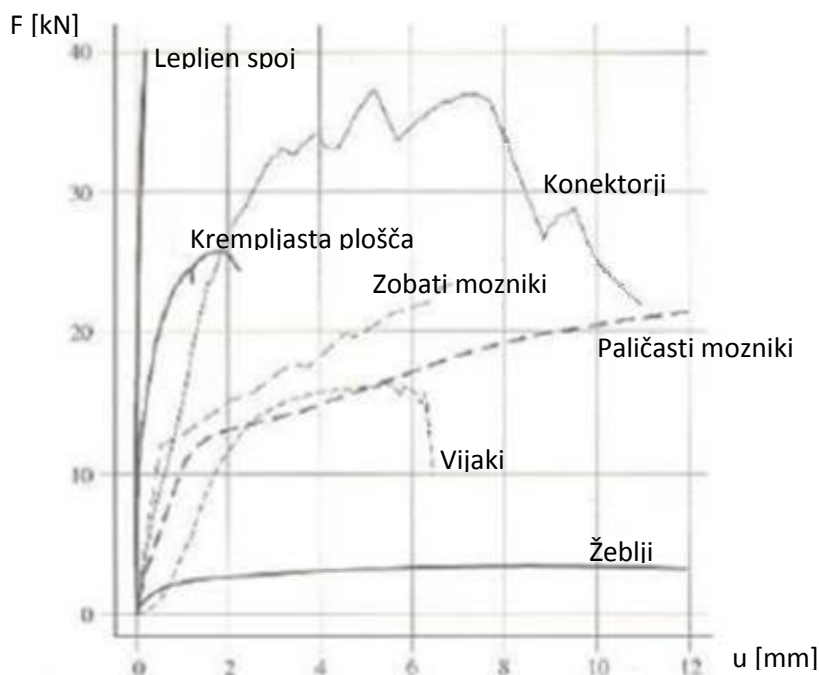
Obnašanje spojev s krempljastimi ploščami je odvisno od smeri obremenjevanja, zato je odvisno tudi od vrste spoja. Za krempljaste plošče velja, da se njihova nosilnost spreminja v odvisnosti od smeri obremenitve, ki delujejo na krempljasto ploščo in na leseni element. Na sliki 8 je predstavljena zveza med silo in pomikom (F-u diagram), za tri različne vrste spojev. Diagram je rezultat preizkusa, ki ga je R. Gupta dobil pri preizkušanju krempljastih plošč [12]. Na diagramu so predstavljeni rezultati preizkusa za natezni čelni spoj, spoj med spodnjo pasnico in diagonalo ter kolenski spoj.

Iz slike 8 je razvidno, da je togost spojev zelo različna. Natezni čelni spoj in spoj med spodnjo pasnico in diagonalo sta sorazmeroma toga, medtem ko je kolenski spoj bolj podajen.



Slika 8: Zveza med pomiki in silo za nekatere vrste spojev [11].

Slika 9 prikazuje togost različnih mehanskih veznih sredstev za les, pri katerih so spojeni leseni elementi obremenjeni z natezno osno silo, vzporedno s smerjo lesnih vlaken. Take vrste spojev smo poimenovali natezno obremenjeni čelni spoji. V primerjavi z ostalimi veznimi sredstvi imajo krempljaste plošče veliko nosilnost. Obnašajo se zelo toga, njihova začetna togost pa se lahko primerja z lepljenimi spoji [13]. Ravno zaradi svoje velike togosti, pa nimajo velike duktilnosti. Oblika krivulje na sliki 9, se lepo ujema z obliko krivulje za natezni čelni spoj na sliki 8.



Slika 9: Diagrami sila/zdrs ( $F/u$ ) za lesene elemente obremenjene natezno osno silo, ki je vzporedna s smerjo lesnih vlaken, za različna mehanska vezna sredstva.

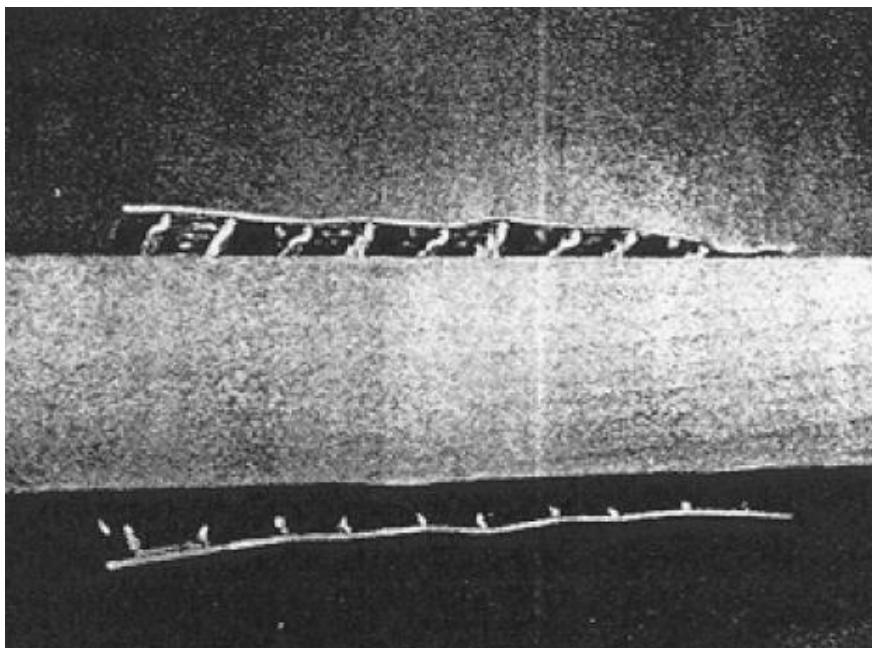
#### Tipične porušitve spoja pri standardnem preizkusu (modeli porušitve)

Pri obremenjevanju spojev prihaja do značilnih načinov porušitev, ki jih imenujemo modeli porušitev. Odvisni so od načina obremenjevanja spoja in do vrste spoja. Iz modela porušitve spoja lahko razberemo način prenosa obremenitev v spoju. Pomembno je tudi v katerem od elementov v spoju pride do porušitve spoja. S preizkusi je bilo dokazano, da je potrebno pri dimenzioniranju spojev upoštevati osne sile in upogibne momente v lesenih elementih na območju spoja. Vpliv strižne sile na nosilnost spoja je zanemarljiv [12].

S preizkusi je R. Gupta določil tipične modele porušitve spojev [12]:

- izvlek krempljev iz lesenega elementa zaradi porušitve strukture lesa v okolici, ponavadi je kritična prva vrsta krempljev, ob stiku lesenih elementov (značilno za čelni spoj, ki je obremenjen z natezno osno silo v smeri lesnih vlaken)
- izvlek krempljev brez porušitve lesa, kremplji se upognejo za  $45^\circ$  (značilno za kolenski spoj)
- porušitev krempljev na stiku z jekleno ploščico (premajhna duktilnost krempljev)
- porušitev jeklene ploščice (pretrganje jeklene ploščice v nategu ali izbočitev v tlaku)

V kolenskem spoju je merodajna tlačna sila v zgornji pasnici, saj se je v preizkusih izkazalo, da narekuje način porušitve. Model porušitve za kolenski spoj predstavlja izvlek krempljev v spodnji pasnici, brez porušitve lesa, kremplji se pri tem upognejo za  $45^\circ$ . Porušitev se začne na območju, kjer se lesena elementa stikata. Spoj se med obremenjevanjem obnaša duktilno. Slika 10 prikazuje porušitev kolenskega spoja pri preizkusu (pogled od zgoraj na element v zgornjem pasu) [12].



Slika 10: Porušitev kolenskega spoja z izvlekom krempljev, ki se upognejo za 45° [12].

Za prva dva tipična modela porušitve, se po SIST EN 1995-1-1:2005 izvede kontrola sidranja efektivne površine po vseh stikovanih lesenih elementih. Kontrola krempljev se izvede v skladu s standardom SIST EN 1075:2000. Kontrola porušitve krempljaste plošče kot jeklenega elementa pa se ravno tako izvede po standardu SIST EN 1995-1-1:2005. Kontrole so predstavljene v nadaljevanju.

V primeru da imamo zagotovljeno veliko sidrno površino, pride do porušitve spoja po jekleni ploščici, v primeru, da imamo majhne sidrne površine, pa pride do porušitve v sidranju krempljastih plošč. Na to moramo biti pozorni ko izvajamo standardne preizkuse krempljastih plošč, s katerimi določamo karakteristične trdnosti krempljastih plošč. Če na primer določamo natezno trdnost krempljaste plošče na dolžinsko enoto ( $f_{t,0}$ ), moramo zagotoviti zadostno sidrno površino, da pride do porušitve po jekleni ploščici.

### 2.3 Trdnostne karakteristike krempljastih plošč

Trdnostne karakteristike krempljastih plošč se določijo na podlagi standardnih preizkusov, ki se izvedejo po standardu SIST EN 1075:2000 [14]. Trdnostne karakteristike krempljastih plošč se navedejo v tehničnem soglasju. Na podlagi Direktive Evropske Unije, potrebujejo krempljaste plošče in prefabricirani leseni elementi pred prodajo potrditev skladnosti. Sistem potrjevanja skladnosti je predpisan s strani Komisije Evropske Unije. S potrjevanjem skladnosti proizvoda, se z določeno verjetnostjo zagotovi doseganje predpisanih lastnosti proizvoda, oziroma njegova skladnost z zahtevami tehnične specifikacije. Potrditev skladnosti opravljajo certifikacijski organi, pri nas je to Zavod za gradbeništvo (ZAG). Zakonska podlaga v Sloveniji je podana v Zakonu o gradbenih proizvodih (ZGPro). Proizvajalec lahko izda izjavo o skladnosti proizvoda in namesti CE znak na proizvod, potem ko mu certifikacijski organ izda certifikat o skladnosti proizvoda, ali certifikat notranje kontrole proizvodnje. [15]. Rezultate preizkusov mora proizvajalec hraniti vsaj še 10 let po zadnjem datumu proizvodnje izdelka [10].

### Preiskave za določitev nosilnosti krempljastih plošč

V preizkusu se krempljaste plošče obremenjujejo pod različnimi koti  $\alpha$  in  $\beta$ . Kot  $\alpha$  predstavlja kot med glavno smerjo krempljaste plošče in smerjo sile. Kot  $\beta$  predstavlja kot med smerjo vlaken lesa in smerjo sile. V preglednici 5 so našteve trdnostne karakteristike, ki jih potrebujemo za določitev karakterističnih trdnosti krempljastih plošč in jih dobimo pri standardnem preizkusu.

Preglednica 5: Trdnostne karakteristike krempljastih plošč, dobljene s standardnimi preizkusi.

Trdnostne karakteristike krempljaste plošče	Oznaka
Sidrna trdnost kontaktne površine med krempljasto ploščo in lesenim elementom	$f_{a,\alpha,\beta}$
Natezna trdnost krempljastih plošč	$f_{t,\alpha}$
Tlačna trdnost krempljastih plošč	$f_{c,\alpha}$
Strižna trdnost krempljastih plošč	$f_{v,\alpha}$

Kremplji so modularno razporejeni, zato je dovolj, da se testira ena sama dimenzija krempljastih plošč. Za preizkus mora biti izbrana taka dimenzija krempljaste plošče, da lahko rezultate, z ustrežno varnostjo, uporabimo tudi za preostale dimenzije. Po potrebi ustrežno velikost krempljaste plošče v preizkusih, določimo z predhodnim preizkusom [14].

Preiskave za določitev posameznih trdnostnih karakteristik krempljastih plošč so sestavljene iz večjega števila posameznih testov. Rezultati preiskav so maksimalne trdnosti spojev, ki so jih ti med obremenjevanjem prenesli. Maksimalne trdnosti spojev, po posameznih preiskavah se izračuna po enačbah, ki so podane v nadaljevanju.

Sidrna trdnost za poljubna kota  $\alpha$  in  $\beta$ , se iz rezultatov standardnega preizkusa določi po enačbi (1).

$$f_{a,\alpha,\beta} = \frac{F_{a,\alpha,\beta,\max}}{2 \cdot A_{ef}} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho}\right)^c \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (1)$$

Pri tem  $F_{a,\alpha,\beta,\max}$  pomeni maksimalno sidrno nosilnost spoja v preizkusu [N],  $c$  je brezdimenzionalen parameter in je odvisen od metode s katero smo določili gostoto lesa.  $A_{ef}$  predstavlja efektivno površino sidranja [cm<sup>2</sup>],  $\rho$  je gostota lesa v katerem je prišlo do porušitve [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_k$  pa predstavlja karakteristično gostoto lesa oziroma gostoto za razred lesa, ki je uporabljen v preizkusu [kg/m<sup>3</sup>].

Natezna trdnost krempljaste plošče za poljuben kot  $\alpha$ , se iz rezultatov standardnega preizkusa določi po enačbi (2).

$$f_{t,\alpha} = \frac{F_{t,\alpha,\max}}{2 \cdot l_j} \cdot \frac{t_{cor,d}}{t_{act}} \cdot \frac{f_{t,k}}{f_{t,act}} \text{ [N/mm]} \quad (2)$$

V enačbi (2) pomeni  $F_{t,\alpha,\max}$  maksimalno natezno nosilnost spoja v preizkusu [N],  $f_{t,k}$  predstavlja natezno trdnost  $R_m$  po standardu EN 10147,  $f_{t,act}$  pa je dejanska natezna trdnost materiala veznega sredstva. Vrednost  $l_j$  predstavlja dolžino stika na mestu stikovanja med lesenimi elementi [mm],  $t_{cor,d}$  predstavlja debelino jedra krempljaste plošče. Debelina jedra krempljaste plošče je enaka debelini krempljaste plošče zmanjšani za debelino zaščitnega sloja in toleranco za debelino. Dejanska debelina krempljaste plošče, brez zaščitnega sloja, je enaka  $t_{act}$ .

Z enačbo (3) se iz rezultatov standardnega preizkusa določi tlačna trdnost krempljaste plošče za poljuben kot  $\alpha$ .

$$f_{c,\alpha} = \frac{F_{c,\alpha,\max}}{2 \cdot l_j} \cdot \frac{t_{\text{cor,d}}}{t_{\text{act}}} \cdot \frac{f_{y,k}}{f_{y,\text{act}}} \text{ [N/mm]} \quad (3)$$

Pri tem  $F_{c,\alpha,\max}$  pomeni maksimalno tlačno nosilnost spoja v preizkusu [N],  $f_{y,k}$  predstavlja napetost na meji elastičnosti  $R_{eH}$  po standardu EN 10147,  $f_{y,\text{act}}$  pa je dejanska tlačna trdnost materiala veznega sredstva.

Strižna trdnost krempljaste plošče za poljuben kot  $\alpha$ , se iz rezultatov standardnega preizkusa določi po enačbi (4).

$$f_{v,\alpha} = \frac{F_{v,\alpha,\max}}{2 \cdot l_j} \cdot \frac{t_{\text{cor,d}}}{t_{\text{act}}} \cdot \frac{f_{y,k}}{f_{y,\text{act}}} \text{ [N/mm]} \quad (4)$$

V tej enačbi  $F_{v,\alpha,\max}$  pomeni maksimalno strižno nosilnost spoja v preizkusu [N]. Ostali parametri so že bili razloženi pri prejšnjih enačbah.

Vrednosti  $R_m$  in  $R_{eH}$  so karakteristične vrednosti jeklenih trakov in plošč po standardu EN 10147:2000, iz katerih se izdelujejo krempljaste plošče.

### Izvedenotenje karakterističnih trdnosti krempljastih plošč

Izpeljava enačb, za določitev karakterističnih trdnosti krempljastih plošč, ki jih potrebujemo za izračun nosilnosti spojev po standardu SIST EN 1995-1-1, so podane v Aneksu B standarda SIST EN 14545:2008. Karakteristične vrednosti se izvedenotijo iz rezultatov preiskav na podlagi 5 % fraktila po standardu SIST EN 1058 ali SIST EN 14358. Izračuna se jih z upoštevanjem globalnega koeficienta variacije  $COV_g$ , pri čemer upoštevamo rezultate vseh preiskav, pri katerih je bila porušitev enaka predvideni. Za izvedenotenje rezultatov moramo opraviti predpisano število testov. Njihovo minimalno število je podano v preglednicah 6 in 7 [10].

Preglednica 6: Minimalno število testov, potrebnih za določitev karakterističnih trdnosti sidranja.

$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	Minimalno število testov
0	0	5
30	0	5
60	0	5
90	0	5
0	90	5
90	90	5

Preglednica 7: Minimalno število testov, potrebnih za določitev karakterističnih trdnosti jeklene ploščice.

$\alpha$ [°]	Minimalno število testov
<b>Nateg</b>	
0	5
45*	5
90	5
<b>Tlak</b>	
0	5
45*	5
90	5
<b>Strig</b>	
0	3
15	3
30	3
45	3
60	3
75	3
90	3
105	3
120	3
135	3
150	3
165	3
*OPOMBA: V primerih, kjer lahko iz geometrije krempljaste plošče sklepamo, da karakteristične vrednosti za kote med 0° in 90° niso linearne.	

Kot lahko opazimo iz preglednic 6 in 7, je za določitev karakterističnih trdnosti potrebno opraviti veliko število testov. V najboljšem primeru je njihovo število enako 86 (oz. 96). To je število uspešnih testiranj, pri testiranjih pa imamo tudi določeno število neuspešnih testov, rezultate katerih je potrebno zavreči. Iz tega lahko sklepamo, da so testiranja zares draga.

Iz rezultatov preiskav lahko sedaj določimo karakteristično nosilnost sidranja na enoto površine krempljaste plošče za kota  $\alpha=0$  in  $\beta=0$  ( $f_{a,0,0,k}$ ), ki jo iz vrednotimo direktno iz rezultatov preiskave. Karakteristično nosilnost sidranja na enoto površine krempljaste plošče za kota  $\alpha=90$  in  $\beta=90$  ( $f_{a,90,90,k}$ ), se določi kot najmanjša izmed vrednosti za  $f_{a,90,90}$  in  $f_{a,90,90}$ , ki se iz vrednotita direktno iz rezultatov preiskav. Vrednosti za vmesne kote  $\alpha$  se upošteva s konstantami  $k_1$ ,  $k_2$  in  $\alpha_0$ , ki so odvisne od tipa krempljaste plošče. Vrednosti konstant se določijo po enačbah (5)-(7).

$$k_1 = \frac{f_{a,30,0} - f_{a,0,0}}{30^\circ} \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{f_{a,90,0} - f_{a,60,0}}{30^\circ} \quad (6)$$

$$\alpha_0 = \frac{f_{a,90,0} - f_{a,0,0} - ((90^\circ)k_2)}{k_1 - k_2} \quad (7)$$

Če imamo opravka z elementom, ki ima drugačno gostoto od elementa, ki je uporabljen v preizkusu, moramo v izračunu ustrezno modificirati karakteristično gostoto. To lahko storimo po enačbi (8), pri tem je  $\rho_k$  karakteristična gostota lesenega elementa, ki je bil uporabljen v preizkusu,  $\rho_{ref}$  pa predstavlja referenčno karakteristično gostoto, oziroma dejansko karakteristično gostoto uporabljenega lesenega elementa [16]. Karakteristična gostota lesenega elementa je navedena v tehničnem soglasju, največkrat pa je kar enaka  $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ , kar ustreza trdnostnemu razredu lesa C24.

$$k_\rho = \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_{ref}}} \quad (8)$$

Vrednosti za  $f_{c,0,k}$ ,  $f_{c,90,k}$ ,  $f_{t,0,k}$ ,  $f_{t,90,k}$ ,  $f_{v,0,k}$  in  $f_{v,90,k}$  se izvednotijo direktno iz rezultatov preiskav po SIST EN 1075. Strižni konstanti  $k_v$  in  $\gamma_0$  pa se izpeljeta po navodilih v standardu SIST EN 14545:2008 za uporabljeno vrsto krempljaste plošče [16]. Določimo ju iz rezultatov strižnega preizkusa. Najprej iz preiskav izvednotimo karakteristične strižne trdnosti jeklene ploščice  $f_{v,\alpha,k}$ , za različne kote  $\alpha$ , od  $15^\circ$  do  $165^\circ$ .

Koeficient  $\gamma_0$  predstavlja maksimalno vrednost kota  $\gamma$ , ki še zadosti pogoju (9), za vse kote  $\alpha$  od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ . Začnemo z vrednostjo  $\gamma = 0^\circ$ .

$$f_{v,\alpha} \geq \frac{R_{x,\alpha} \cdot R_{y,\alpha}}{\sqrt{\cos^2 \alpha \cdot R_{y,\alpha}^2 + \sin^2 \alpha \cdot R_{x,\alpha}^2}} \quad (9)$$

Kjer velja da je:

$$R_{x,a} = \max \left\{ \begin{array}{l} f_{n,0} \cdot |\sin[\alpha - \gamma \cdot \sin(2\alpha)]| \\ f_{v,0} \cdot |\cos \alpha| \end{array} \right. \quad (10)$$

$$f_{n,0} = \begin{cases} f_{t,0}; & 0^\circ < \alpha < 90^\circ \\ f_{c,0}; & 90^\circ < \alpha < 180^\circ \end{cases} \quad (11)$$

$$R_{y,a} = \max \left\{ \begin{array}{l} f_{n,90} \cdot |\cos \alpha| \\ f_{v,90} \cdot \sin \alpha \end{array} \right. \quad (12)$$

$$f_{n,90} = \begin{cases} f_{t,90}; & 90^\circ < \alpha < 180^\circ \\ f_{c,90}; & 0^\circ < \alpha < 90^\circ \end{cases} \quad (13)$$

Koeficient  $k_v$  predstavlja maksimalno vrednost za  $k$ , ki še zadosti pogoju (9). Začnemo z vrednostjo  $k = 0$ .

$$f_{v,\alpha} \geq \frac{R_{x,\alpha} \cdot R_{y,\alpha}}{\sqrt{\cos^2 \alpha \cdot R_{y,\alpha}^2 + \sin^2 \alpha \cdot R_{x,\alpha}^2}} \quad (14)$$



$$R_{x,\alpha} = \max \begin{cases} f_{t0} \cdot |\sin[\alpha - \gamma_0 \cdot \sin(2\alpha)]| \\ f_{v,0} \cdot |\cos\alpha| \end{cases} \quad (15)$$

$$R_{y,\alpha} = \begin{cases} f_{c,90} \cdot |\cos\alpha| \\ [1 + k \cdot \sin(2\alpha)] \cdot f_{v,90} \cdot \sin\alpha \end{cases} \quad (16)$$

V preglednici (8) so zbrane karakteristične vrednosti, ki smo jih izračunali po enačbah iz standarda SIST EN 14545:2009, iz rezultatov standardnega preizkusa po SIST EN 1075:2000. Potrebujemo jih za izračun nosilnosti spojev s krempljastimi ploščami po standardu SIST EN 1995-1-1:2005. Vsaka vrsta krempljaste plošče ima spodaj navedene karakteristike zapisane v tehničnem soglasju.

Preglednica 8: Karakteristične vrednosti krempljastih plošč.

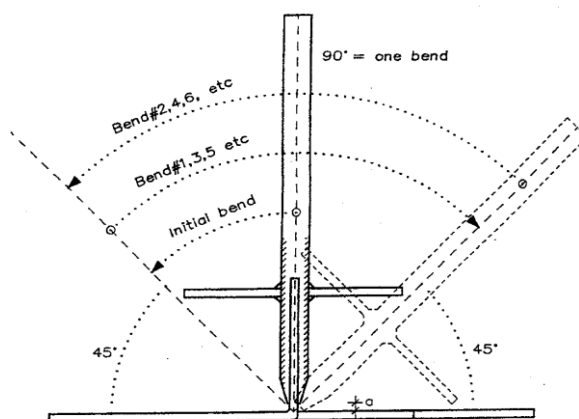
$f_{\alpha,0,0,k}$	Karakteristična nosilnost sidranja na enoto površine plošče za kota $\alpha=0^\circ$ in $\beta=0^\circ$
$f_{\alpha,90,90,k}$	Karakteristična nosilnost sidranja na enoto površine plošče za kota $\alpha=90^\circ$ in $\beta=90^\circ$
$k_1$	Konstanta
$k_2$	Konstanta
$\alpha_0$	Konstanta
$f_{t,0,k}$	Karakteristična natezna trdnost jeklene ploščice za $\alpha = 0^\circ$
$f_{t,90,k}$	Karakteristična natezna trdnost jeklene ploščice za $\alpha = 90^\circ$
$f_{c,0,k}$	Karakteristična tlačna trdnost jeklene ploščice za $\alpha = 0^\circ$
$f_{c,90,k}$	Karakteristična tlačna trdnost jeklene ploščice za $\alpha = 90^\circ$
$f_{v,0,k}$	Karakteristična strižna trdnost jeklene ploščice za $\alpha = 0^\circ$
$f_{v,90,k}$	Karakteristična strižna trdnost jeklene ploščice za $\alpha = 90^\circ$
$k_v$	Konstanta
$\gamma_0$	Konstanta

## 2.4 Duktilnost krempljev

Kontrola duktilnosti kremplja se opravi z standardnim preizkusom vpetja kremplja, opisanim v standardu SIST EN 1075:2000 [14]. Kremplj velja za duktilnega če zadosti pogojem preizkusa.

Preizkus je dokaj enostaven, kremplj oprimemo z orodjem, tako da konec orodja sega maksimalno 0,5 do 1,0 mm od ravnine plošče. Koren v roku ene sekunde upognemo do kota  $45^\circ$ , med krempljem in ploščo. Nato, spet v roku dveh sekund, kremplj upognemo v drugo smer za  $90^\circ$ , kot med krempljem in ploščo je spet  $45^\circ$ , vendar tokrat na drugi strani. To imenujemo en upogib. Nadaljujemo z upogibanjem kremplja (v roku dveh sekund) in štejemo, koliko upogibov prenese kremplj preden se poruši. Rezultat testa predstavlja število uspešno opravljenih upogibov za  $90^\circ$ .

Avtor članka [3] v svojem poročilu opiše, da so plošče, ki so se pri cikličnih obremenitvah obnašale duktilno, prenesle šest do sedem takih upogibov. Preizkus iz članka je bil narejen po standardu BS EN 10147.



Slika 11: Preizkus vpetja kremplja [14].

## 2.5 Trajnost

### Zaščita lesenih elementov

Za lesene elemente, ki nimajo dodatne zaščite, se trajnostni razred določi po standardu SIST EN 350-2 za izbran razred uporabe, ki je definiran v standardu SIST EN 335-1 in SIST EN 335-2. Trajnostni razred, za lesene elemente, ki so zaščiteni z zaščitnimi sredstvi, se določi po standardu EN 15228 [10].

### Protikorozijska zaščita jeklenih krempljastih plošč

Material, iz katerega so narejene krempljaste plošče, mora biti korozijsko odporen, oziroma ustrezno protikorozijsko zaščiten [16]. Primeri minimalne protikorozijske zaščite so podani v SIST EN 1995-1-1:2005. V preglednici (9) je predstavljen del, ki se nanaša na krempljaste plošče [6].

Preglednica 9: Minimalna protikorozijska zaščita za krempljaste plošče glede na ISO 2081 (povezani standard z SIST EN 1995-1-1:2005) [6].

Vezno sredstvo	Razred uporabe		
	1	2	3
Krempljaste plošče	Fe/Zn 12c	Fe/Zn 12c	Nerjaveče jeklo

(V primeru vročega cinkanja je potrebno v skladu z EN 10147 Fe/Zn 12c nadomestiti z Z275.)

Večinoma so krempljaste plošče narejene iz austenitnih jekel in konstrukcijskega jekla [10]. Nerjavna jekla so železove zlitine, ki z dodatkom kroma in niklja ter še nekaterih drugih legirnih elementov, kot so npr. molibden, titan in drugi. Glavne skupine nerjavnih jekel so austenitna, feritna in dupleks jekla. Austenitna nerjavna jekla so od vseh nerjavnih jekel najbolj razširjena. So nemagnetna in poleg kroma, ki ga je običajno približno 18 % (17-26), vsebujejo tudi minimalno 7 % (7-26) niklja, ki zvišuje njihovo korozijsko obstojnost in zelo majhen delež ogljika, ki mora biti pod 0,12 %. Za izboljšanje obdelovalnih lastnosti se dodaja žveplo. Z večanjem deleža niklja in kroma, odpornost proti koroziji narašča, obdelovalnost pa se zmanjšuje [17]. Korozijska odpornost se še posebej izboljša z legiranjem z molibdenom, saj se na ta način zaščitni pasivizacijski oksidni sloj na površini nerjavnega jekla dodatno stabilizira. Austenitna jekla odlikuje izredno dobra žilavost, celo pri zelo nizkih temperaturah imajo lep končni videz in niso zahtevna za vzdrževanje. Pogosto imajo dobre obdelovalne lastnosti (trdota je < 300 HB) in dobro natezno trdnost (< 850 N/mm<sup>2</sup>) [17,18].

Potrebna protikorozijska zaščita je odvisna od agresivnosti okolja v katerem se konstrukcija nahaja, zato je potrebno določiti razred uporabe. Po SIST EN 1995-1-1:2005, poznamo tri razrede uporabe za lesene konstrukcije. V prvem razredu uporabe relativna vlaga v ozračju (pri temperaturi 20°C) preseže 65% samo nekaj tednov v letu, pri tem povprečna vsebnost vlage pri večini mehkih vrst lesa ne preseže 12%. V drugem razredu uporabe relativna vlaga v ozračju (pri temperaturi 20°C) preseže 85% samo nekaj tednov v letu, povprečna vsebnost vlage pri večini mehkih vrst lesa pa ne preseže 20%. V tretjem razredu uporabnosti je vlažnost večja kot v drugem razredu uporabnosti. Vrednosti so zbrane v preglednici 10 [6].

Preglednica 10: Razredi uporabe za lesene konstrukcije [6].

Razred uporabe	Relativna vlaga v ozračju pri temperaturi 20°C	Povprečna vsebnost vlage v večini vrst mehkega lesa
1	samo nekaj tednov v letu preseže 65 % vlažnosti	12%
2	samo nekaj tednov v letu preseže 85 % vlažnosti	20%
3	vlažnost večja kot v 2. razredu uporabnosti	> 20%

Primeri razredov uporabe so naštetih v nacionalnem dodatku in so predstavljeni v preglednici 11.

Preglednica 11: Primeri razredov uporabnosti [19].

Razred uporabe	PRIMERI
1	Notranji bivalni prostori, pisarne in trgovski objekti
2	Kuhinje, kopalnice, pokrite konstrukcije na prostem, industrijski prostori s povišano vlažnostjo
3	Konstrukcije v stalnem stiku s terenom ali vodo, tudi konstrukcije nad vodo v stalni senci (npr. mostovi v soteskah)

Zaščitna sredstva za les ne smejo reagirati s protikorozijsko zaščito. Če se uporabljajo zaščitna sredstva, ki lahko povzročajo korozijo jekla, npr. zaščitna sredstva na podlagi bakrovih soli ali organske spojine, se za razred uporabe 1 in 2 uporabi avstenitna nerjaveča in galvanizirana jekla [16].

## 2.6 Nizkociklično utrujanje spoja

Do nizkocikličnega utrujanja v spoju s krempljastimi ploščami, prihaja zaradi menjavanja pritiskov in srkov zaradi vetra, ki mu je konstrukcija izpostavljena.

Pojav, ki najbolj vpliva na utrujanje materiala, so koncentracije napetosti. Pojavljajo se okoli odprtih, pri spremembi prereza ali zarezah. Naštete stvari pa so zelo pogoste v krempljastih ploščah. Za duktilne materiale, to še ne pomeni avtomatične zmanjšanje nosilnosti, saj se napetosti v takem materialu, pri prehodu v plastično območje, prerazporedijo.

Običajno nizkociklično utrujanje ni nevarno, pri krempljastih ploščah, pa lahko pride do posebnega efekta, ki so mu izpostavljene vse konstrukcije, ki so prevlečene s protikorozijsko zaščito. Med obremenjevanjem, film s katerim so prevlečene, razpoka. V razpokah filma nastajajo koncentracije

napetosti, ki skupaj z korozijo v razpokah povzročajo tok elektronov, ki dodatno pospešuje širjenje razpok pri nizkociklični obtežbi. Zaradi tega pojava lahko postane nevarno tudi nizkociklično obremenjevanje spoja. Trajna trdnost konstrukcije v korozivnem okolju se zato zmanjša [3].

Pri primerjavi rezultatov porušnih testov, ki so bili opravljeni za krempljaste plošče, med spoji, ki so bili predhodno izpostavljeni ciklični obtežbi in spoji, ki so bili obremenjeni le s statično obtežbo, opazimo da nosilnost spoja ostane enaka. Merodajen model porušitve, ki nastopi pri cikličnem obremenjevanju spoja, je izvlek krempljev. Začetni zdrs je neodvisen od tipa krempljaste plošče, njegovo nadaljnje povečevanje pa je odvisno od tipa krempljaste plošče. Pri vzorcu, ki je bil izpostavljen ciklični obtežbi je dodatno prišlo do porušitve približno 15 % krempljev na stiku med jekleno ploščico in krempljem. Vseeno je spoj pri dinamični obremenitvi ohranil svojo nosilnost, izgubil pa je le nekaj začetne togosti [3].

### 3 SPAJANJE LESENIH ELEMENTOV S POMOČJO KREMPLJASTIH PLOŠČ

Dimenzioniranje spojev s krempljastimi ploščami je predpisano v standardu SIST EN 1995-1-1:2005 [6], v katerem so podani postopki za projektiranje lesenih konstrukcij. Same krempljaste plošče so neposredno obdelane v poglavjih, ki so zapisana v preglednici 12.

Preglednica 12: Poglavja v SIST EN 1995-1-1:2005, ki se neposredno nanašajo na krempljaste plošče.

Št. poglavja	Naslov poglavja
4.2	Korozijska odpornost
5.4.3	Poenostavljena analiza paličij s kovinskimi ježastimi ploščami v stikih
8.1.4	Priključne sile pod kotom glede na vlakna
8.8	Zveze s kovinskimi ježastimi ploščami
9.2.2	Paličja s kovinskimi ježastimi ploščami
10.9	Posebna pravila za paličja s kovinskimi ježastimi ploščami

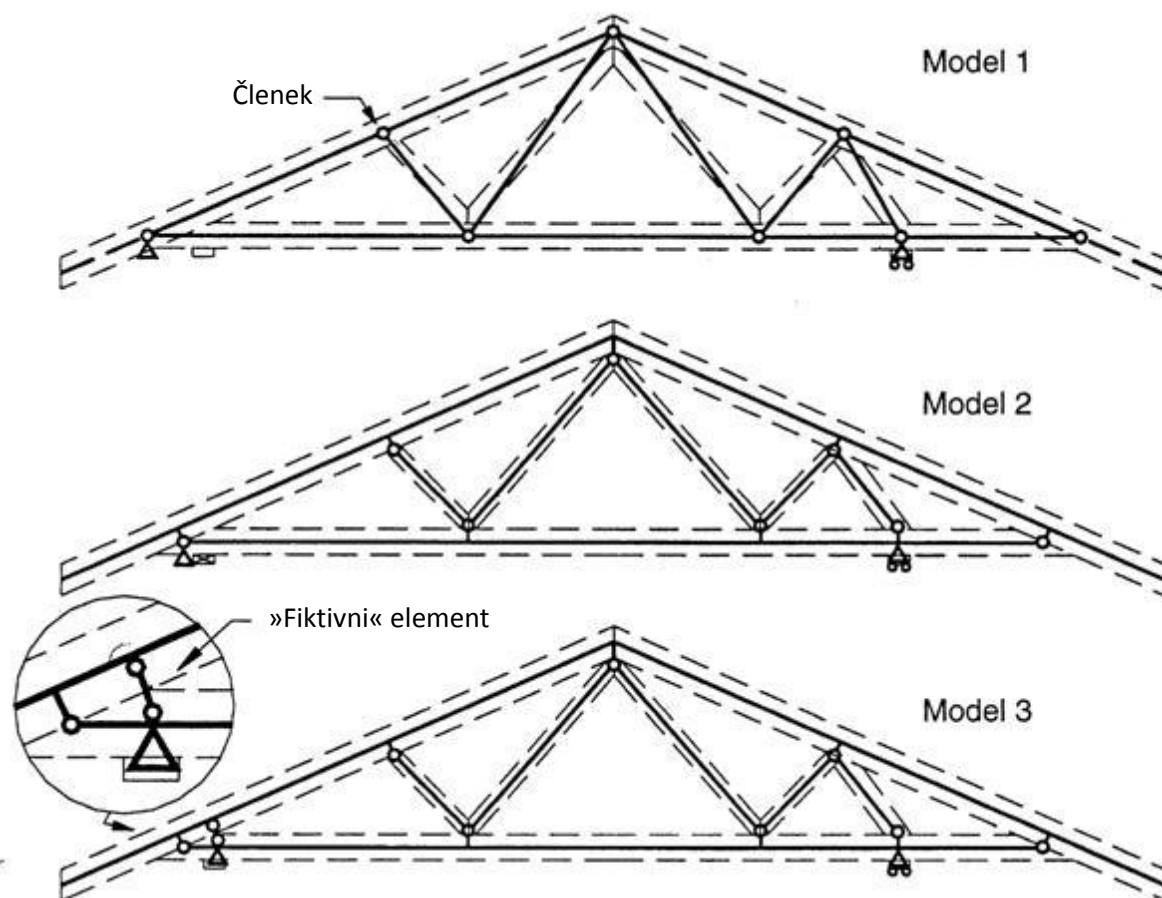
#### 3.1 Računski modeli paličja za izračun obremenitev v spoju

Za palične konstrukcije je značilno, da so elementi spojeni s členki. Ker so zasuki v členkih teoretično sproščeni, se preko njih lahko prenašajo samo osne sile. V vsakdanji praksi v spojih ni mogoče zagotoviti idealnih členkov, saj je nemogoče narediti spoje med lesenimi konstrukcijami, ki bi bili rotacijsko povsem podajni. Zaradi tega, se preko spojev prenašajo tudi momenti, ki jih je potrebno upoštevati pri dimenzioniranju spojev s krempljastimi ploščami po standardu SIST EN 1995-1-1.

Pred uveljavitvijo standarda SIST EN 1995-1-1:2005 so se pri dimenzioniranju spojev upoštevale samo osne sile. Na modelu paličja so se določile osne sile v lesenih elementih, ki jih je bilo potrebno v območjih spoja prenesti. Iz tabel proizvajalca krempljastih plošč se je odčitala sidrna nosilnost krempljaste plošče, s pomočjo katere se je potem izračunala potrebna efektivna površina sidranja krempljaste plošče. Izvedla se je tudi kontrola krempljaste plošče kot jeklenega elementa. Na območju stika, so se prekontrolirale linijske natezne oz. tlačne ter strižne nosilnost krempljaste plošče, ki so bile podane v tabelah proizvajalca. Iz teh dveh pogojev, se je določila potrebna dimenzija krempljaste plošče vzdolž stične črte. V kontrolah se je upoštevala nefaktorirana obtežba. Kontroli sta podobni kot v SIST EN 1995-1-1:2005, s tem da v spoju niso upoštevani upogibni momenti.

V praksi se pri statičnem izračunu konstrukcije uporabljajo 3D modeli, ki jih potem komercialni programi razdelijo na posamezne 2D modele, med katerimi so povezave upoštewane s silami. Najzahtevnejši del izračuna, pa predstavlja model za izračun spojev. Kot smo že omenili, so lahko elementi obremenjeni samo v ravnini paličja. Ker krempljaste plošče izven ravnine niso nosilne, obremenitve izven ravnine plošč niso dovoljene [11].

V zadnjih tridesetih letih so se računski modeli za izračun spojev s krempljastimi ploščami večkrat spremenili, tako da smo dobili vedno bolj natančne rezultate. Na sliki (12) so prikazani trije računski modeli za izračun spojev, od najstarejšega (Model 1), pa do najnovejšega (Model 3) [11].



Slika 12: Razvoj računskih modelov paličja [11].

Model 1 predstavlja enostaven model paličja, ki se je uporabljal do konca sedemdesetih let prejšnjega stoletja. Sestavljen je iz palic in členkov, preko katerih se prenašajo samo osne sile. Obtežba je podana s točkovnimi silami, ki delujejo v vozliščih. Elementi paličja niso skladni z osmi lesenih elementov. Prilagojen je pogojem v tistih časih, ko so bili računalniki še prava redkost in so se osne sile v paličju izračunavale s »peš« računom [11].

Model 2 je že bolj izpopolnjen. Zgornji in spodnji pas pa se modelira kot kontinuirni nosilec. Dodani so kratki pomožni elementi, ki povezujejo osi elementov z vozlišči in podporami. Elementi modela sedaj potekajo po oseh lesenih elementov. Razporeditve momentov v zgornjem in spodnjem pasu so podane direktno. Spoji med elementi se še vedno definirajo s členki, vendar je sedaj njihova lokacija točno na spoju med elementi [11].

V Modelu 3 je v kolenskem spoju dodan poseben »fiktivni« element. Z njim simuliramo dokaj veliko upogibno nosilnost v kolenskem spoju. Togost spoja in posledično razporeditev momentov na območju spoja, je odvisna od lokacije in togosti »fiktivnega« elementa. »Fiktivni« element poteka od členka ob zgornjem pasu, preko kontaktnega področja med lesenima elementoma, do členka ob spodnjem pasu, ki leži blizu podpore. V splošnem je togost »fiktivnega« elementa enaka togosti zgornjega in spodnjega pasu. S pomočjo teh elementov lažje simuliramo tudi pogoje blizu podpor. Podpora ne leži več na mestu stika, temveč je lahko od njega oddaljena. S tem lahko v računu zajamemo tudi previse elementov čez podporo [11].

Danes večina komercialnih programov pri izračunu uporablja »fiktivne« elemente. Večina programov je nastala v sodelovanju med ponudniki programov in uporabniki na podlagi izkušenj. Glavna problema, ki se pojavljata, sta [11]:

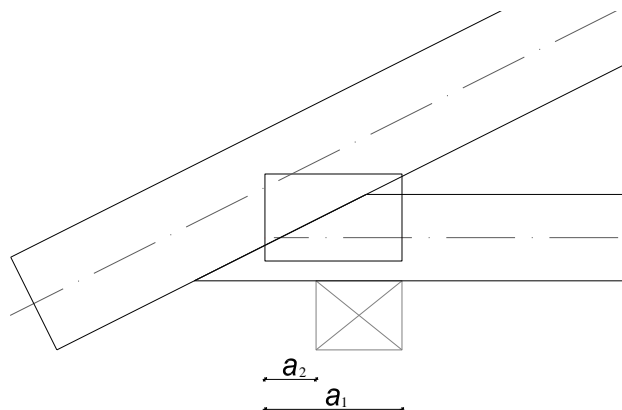
- določiti je potrebno sile v jekleni ploščici, sidrni površini in krempljih, ki jih ni mogoče razbrati iz modela, jih pa potrebujemo za izračun
- deformacija spoja ni upoštevana v deformaciji konstrukcije, saj so vsi spoji modelirani kot členki

Zadnji izmed problemov se rešuje z uvedbo treh medsebojno neodvisnih vzmeti, s katerimi modeliramo podajnost spoja. Imamo dve vzmeti v smeri pomikov in eno rotacijsko vzmet v vsakem spoju. Vzmeti so lahko linearne, ali nelinearne, njihova togost pa je odvisna od velikosti in lokacije krempljaste plošče. Vzmeti so v realnosti med seboj odvisne [11].

Leta 1977 je Foschi razvil model, s katerim lahko ocenimo togosti in sile v posameznih jeklenih ploščah in efektivnih površinah. Model je primeren za numerični izračun spojev s krempljastimi ploščami. Čeprav je ta model najbolj napreden od vseh modelov, dandanes še vedno ni vključen v komercialne računske programe [11].

Računski model po SIST EN 1995-1-1:2005 se izvede z analizo okvirja ali po poenostavljeni analizi za paličja spojena s krempljastimi ploščami. Za poenostavljeno analizo morajo veljati naslednji pogoji:

- zunanji koti med dvema poljema zgornjega in spodnjega pasu so najmanj  $180^\circ$ ,
- širina podpore je znotraj dolžine  $a_1$  in razdalja  $a_2$  ni večja kot  $a_1/3$  ali 100 mm,
- višina paličja je večja od 15% razpona in desetkratnika največje višine zunanjega elementa [6]



Slika 13: Definiranje podpore pri poenostavljeni analizi po SIST EN 1995-1-1:2005.

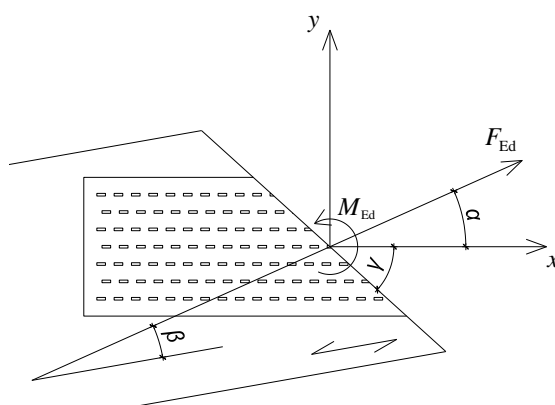
Osne sile v elementih se določijo s predpostavko, da so vsa vozlišča členkasta. Upogibni momenti v zunanjih elementih pa se določijo s predpostavko, da imamo opravka s kontinuirnim nosilcem. Vpliv zasuka vozlišč in delne vpetosti v spojih se upošteva z 10% zmanjšanjem momentov nad vmesno podporo. Tako določeni momenti se upoštevajo pri določitvi momentov v poljih [6].

### 3.2 Dimenzioniranje spojev

Na mestu spoja, lesene elemente vedno stikujemo vsaj z dvema enakima krempljastima ploščama, na obeh straneh. Krempljaste plošče morajo biti enakega tipa, dimenzij in smeri. Med seboj vedno spajamo samo lesene elemente enakih debelin, tako da imamo spoje samo v eni ravnini.

Po standardu SIST EN 1995-1-1 je potrebno izvesti dve kontroli nosilnosti. Prva kontrola je kontrola sidranja, ki nam pove kolikšno stično površino med lesenim elementom in jekleno ploščico potrebujemo, da lahko varno prenesemo obremenitve iz enega elementa na drugega. Druga kontrola je nosilnost krempljaste plošče kot nosilnega elementa na območju stika med lesenima elementoma. Za obe kontroli velja, da morajo biti projektne obremenitve v spoju, manjše od njegove projektne odpornosti.

Nosilnost spojev je odvisna od kotov  $\alpha$ ,  $\beta$  in  $\gamma$ . Kot  $\alpha$  predstavlja kot med glavno smerjo krempljaste plošče in smerjo sile. Kot  $\beta$  predstavlja kot med smerjo lesenih vlaken in smerjo sile. Kot  $\gamma$  predstavlja kot med glavno smerjo krempljaste plošče in stično črto spoja. Glavna smer krempljaste plošče sovпада z osjo  $x$ , os  $y$  pa je na njo pravokotna. Vse našteje karakteristike so prikazane na sliki 14.



Slika 14: Pomen kotov pri obravnavanju krempljaste plošče.

Po SIST EN 1995-1-1:2005 mora biti minimalno prekrivanje krempljaste plošče z lesenimi elementi v spoju, večje od 40 mm in od ene tretjine višine lesenega elementa. Pri stikovanju zgornjega in spodnjega pasu, mora biti dolžina krempljaste plošče večja od dveh tretjin višine najvišjega lesenega elementa v spoju.

### 3.2.1 Sidrna nosilnost krempljastih plošč

Sidrna nosilnost krempljaste zagotavljamo z zadostnimi efektivnimi površinami. Efektivna površina je enaka sidrni površini, reducirani za območja ob robovih lesenih elementov, kjer je sidranje krempljev zmanjšano. Sidrna površina se zmanjša za 5 mm ob robovih lesenega elementa in za  $6d$  v smeri lesenih vlaken na koncih lesenih elementov (glej sliko 22). Število efektivnih površin v spoju je enako številu stikovanih lesenih elementov v spoju. Veljati mora da odpornosti znotraj posameznih efektivnih območij niso presežene. Kontrola nosilnosti se izvede v središču efektivne površine, po enačbi (17).

$$\left( \frac{\tau_{F,d}}{f_{a,\alpha,\beta,d}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{M,d}}{f_{a,0,0,d}} \right)^2 \leq 1,0 \quad (17)$$

Če velja zgoraj zapisana neenakost, je nosilnost zveze zadostna in s tem tudi velikost in oblika posameznih efektivnih površin. Velikost in oblika efektivnih površin je odvisna od višin lesenih elementov, kota med njimi ter od velikosti in lege krempljaste plošče.



### Izračun projektne sidrne trdnosti kreppljaste plošče

Projektno sidrno trdnost kreppljaste plošče izračunamo iz pripadajoče karakteristične vrednosti z upoštevanjem varnosti, po enačbi (18) in (19).

$$f_{a,\alpha,\beta,d} = \frac{f_{a,\alpha,\beta,k}}{\gamma_m} k_{mod} \quad (18)$$

$$f_{a,0,0,d} = \frac{f_{a,0,0,k}}{\gamma_m} k_{mod} \quad (19)$$

Delni varnostni faktor za lastnosti materiala ( $\gamma_m$ ) je za kreppljaste plošče enak 1.25. Zaradi kontrolirane proizvodnje je lahko manjši od običajnega delnega varnostnega faktorja za spoje lesenih konstrukcij, ki je enak 1.30. Z modifikacijskim faktorjem zajamemo vpliv vlažnosti lesa in trajanje obtežbe (preglednica 13). Pri kombinacijah obtežbe, v katerih se nastopa več obtežb, velja pravilo, da se upošteva  $k_{mod}$  tiste obtežbe v kombinaciji, ki ima najkrajše trajanje. V splošnem so lahko spoji sestavljeni iz lesenih elementov, z različnim obnašanjem. Modifikacijski faktor za take spoje se izračuna po enačbi (20).

$$k_{mod} = \sqrt{k_{mod,1} \cdot k_{mod,2}} \quad (20)$$

V tem primeru je  $k_{mod,1}$  modifikacijski faktor prvega elementa,  $k_{mod,2}$  pa modifikacijski faktor drugega elementa. Vrednosti za modifikacijski faktor glede na vlažnosti lesa in trajanje obtežbe, po standardu SIST EN 1995-1-1:2005, so zapisane v preglednici 13.

Preglednica 13: Vrednost  $k_{mod}$  glede na razred trajanja obtežbe in razred uporabe [6].

Material	Standard	Razred uporabe	Razred trajanja obtežbe				
			Stalni vpliv	Dolgotrajni vpliv	Srednjetrjni vpliv	Kratkotrajni vpliv	Trenutni vpliv
Masivni les	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Karakteristična sidrna trdnost kreppljastih plošč na enoto površine pri podanem kotu  $\alpha$  in  $\beta$  ( $f_{a,\alpha,\beta,k}$ ), se izračuna po enačbi (21), oziroma (22), odvisno od kota  $\beta$ .

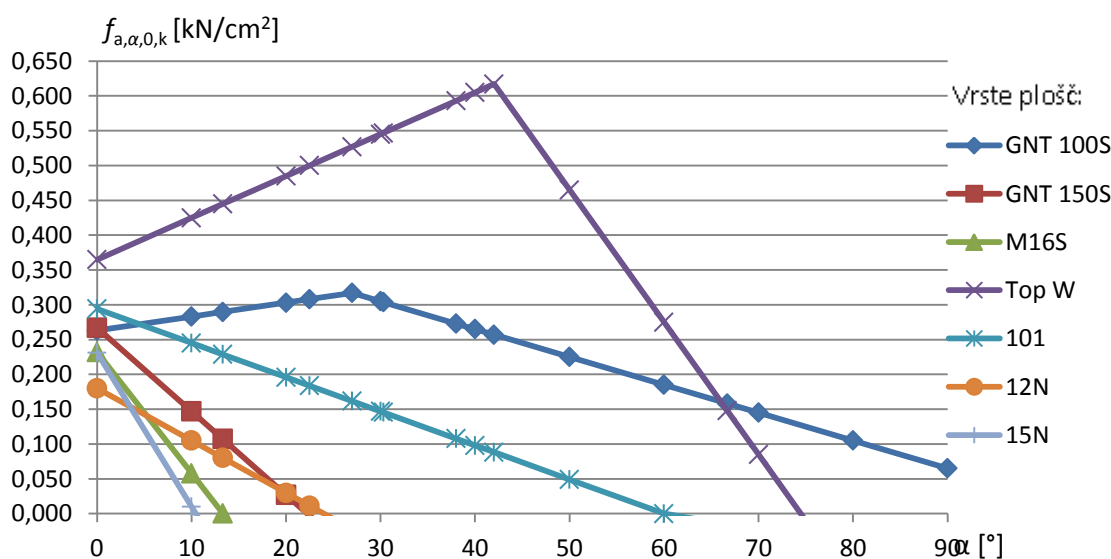
$$\text{Za } \beta \leq 45^\circ: f_{a,\alpha,\beta,k} = \max \left\{ \begin{array}{l} f_{a,\alpha,0,k} - (f_{a,\alpha,0,k} - f_{a,90,90,k}) \frac{\beta}{45^\circ} \\ f_{a,0,0,k} - (f_{a,0,0,k} - f_{a,90,90,k}) \sin(\max(\alpha, \beta)) \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\text{Za } 45^\circ < \beta \leq 90^\circ: f_{a,\alpha,\beta,k} = f_{a,0,0,k} - (f_{a,0,0,k} - f_{a,90,90,k}) \sin(\max(\alpha, \beta)) \quad (22)$$

Karakteristični sidrni trdnosti  $f_{a,0,0,k}$  in  $f_{a,90,90,k}$  sta določeni po postopku zapisanem v prejšnjem poglavju. Karakteristična sidrna trdnost  $f_{a,\alpha,0,k}$  pri poljubnem kotu  $\alpha$  v smeri lesnih vlaken ( $\beta=0$ ), se določi po enačbi (23).

$$f_{a,\alpha,0,k} = \begin{cases} f_{a,0,0,k} + k_1\alpha & , \text{ za } \alpha \leq \alpha_0 \\ f_{a,0,0,k} + k_1\alpha_0 + k_2(\alpha - \alpha_0) & , \text{ za } \alpha_0 < \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (23)$$

Karakteristična sidrna trdnost, pri poljubnem kotu  $\alpha$  v smeri lesnih vlaken ( $\beta=0$ ), je odvisna od vrste kreppljaste plošče. Pri dimenzioniranju spojev se to upošteva s koeficienti  $k_1$ ,  $k_2$  in  $\alpha_0$ . Določitev koeficientov je predstavljena v prejšnjem poglavju, njihov vpliv na trdnost pa je prikazan na sliki (15). Na njej je lepo vidna odvisnost karakteristične sidrne trdnosti v smeri lesnih vlaken od kota  $\alpha$  ( $\beta=0$ ), za posamezne vrste kreppljastih plošč. Predstavljene so tri kreppljaste plošče podjetja Wolf System in štiri vrste kreppljastih plošč podjetja MiTek Industries. Tehnična soglasja za te kreppljaste plošče so objavljena na internetu [20,21]. Izračuni s pomočjo preglednic so podani v Prilogi A.



Slika 15: Karakteristične sidrna trdnost kreppljaste plošče v smeri vlaken lesa pri poljubnem kotu  $\alpha$  ( $f_{a,\alpha,0,k}$ ) v odvisnosti od vrste kreppljaste plošče.

Kot lahko opazimo, imamo opravka z dvema različnima vrstama kreppljastih plošč. Pri prvem tipu se nosilnost do določenega kota  $\alpha$  povečuje, oziroma se nosilnost v zadostni meri ohranja. Take kreppljaste plošče so primerne za kolenske spoje, za katere so značilne obremenitve pri kotih okoli 30°. Drug tip so kreppljaste plošče, ki začnejo naglo izgubljati svojo nosilnost takoj potem, ko se začne povečevati kot  $\alpha$ . Iz tega lahko zaključimo, da so plošče prvega tipa primerne za spoje, v katerih se stikujejo leseni elementi pod kotom, kreppljaste plošče drugega tipa, pa so primerne za prenos obremenitev pretežno v smeri glavne osi kreppljaste plošče. Tak spoj je na primer čelni spoj. Iz preglednice v Dodatku A je razvidno, da je kot  $\alpha$  v prevojni točki enak koeficientu  $\alpha_0$ . Maksimalna trdnost kreppljaste plošče GNT 100S in Top W je torej dosežena v točki  $\alpha=\alpha_0$ . Koeficient  $k_1$  določa naklon premice do točke  $\alpha=\alpha_0$ , koeficient  $k_2$  pa od te točke naprej.

### Izračun projektnih sidrnih napetosti v kreppljasti plošči

Projektni sidrni napetosti  $\tau_{F,d}$  in  $\tau_{M,d}$ , ki ju povzročita projektna osna sila  $F_{A,Ed}$  in projektni upogibni momenta  $M_{A,Ed}$ , je potrebno izračunati za vsako efektivno površino sidranja v posameznem spoju. Projektna sila  $F_{A,Ed}$  in projektni moment  $M_{A,Ed}$  delujeta v središču efektivne površine sidranja. Napetosti  $\tau_{F,d}$  in  $\tau_{M,d}$  se izračunata po enačbi (24) in (25).

$$\tau_{F,d} = \frac{F_{A,Ed}}{A_{ef}} \quad (24)$$

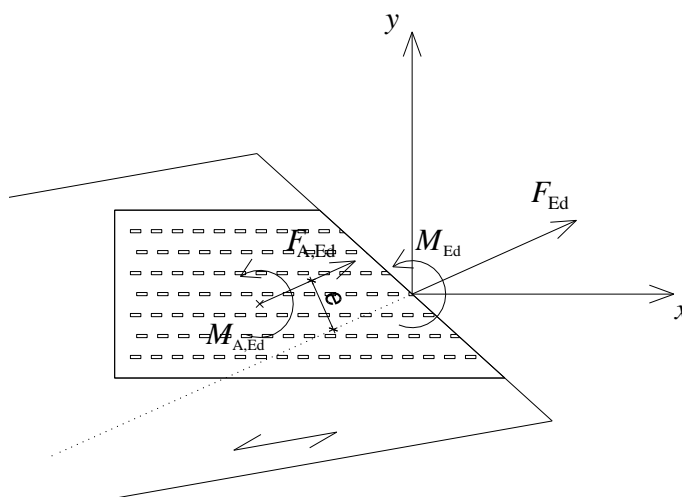
$$\tau_{M,d} = \frac{M_{A,Ed}}{W_p} \quad (25)$$

Enačbi za izračun projektne osne sile ( $F_{A,Ed}$ ) in projektnega upogibnega momenta ( $M_{A,Ed}$ ) v eni krempljasti plošči, sta zapisani spodaj. Obtežba deluje v središču efektivne površine.

$$F_{A,Ed} = F_{Ed} \quad (26)$$

$$M_{A,Ed} = M_{Ed} \pm e \cdot F_{Ed} \quad (27)$$

Pri računu momenta  $M_{A,Ed}$  upoštevamo dodatni moment v spoju, zaradi premaknitve projektne osne sile  $F_{A,Ed}$  v središče efektivne površine. Vrednost  $e$  predstavlja ročico od središča spoja, do središča efektivne površine v lesenem elementu. Sile in momenti v spoju so predstavljeni na spodnji sliki.



Slika 16: Obremenitve v krempljasti plošči v središču efektivne površine.

Za izračun nosilnosti spoja potrebujemo še ploščino in polarni odpornostni moment efektivne površine sidranja. Efektivno površino sidranja, predstavlja poligonalen lik, ki ga omejujejo stranice krempljaste plošče in lesenega elementa. V splošnem se izračunata po enačbi (28) in (29).

$$A_{ef} = \int_A dA \quad (28)$$

$$W_p = \int_A r dA \quad (29)$$

Vrednost  $r$  je razdalja od težišča plošče, do diferenciala površine  $dA$ . Polarni odpornostni moment izračunamo s pomočjo polarnega vztrajnostnega momenta  $I_p$ . Po definiciji polarni vztrajnostni moment, vrtili okoli osi  $z$  in je definiran z razdaljo diferencialne ploskve  $dA$  od »pola« (koordinatnega izhodišča) [22].

$$I_p = I_z = \int_A r^2 dA = \int_A x^2 + y^2 dA = \int_A x^2 dA + \int_A y^2 dA = I_y + I_x \quad (30)$$

Polarni vztrajnostni moment predstavlja vsoto upogibnega vztrajnostnega momenta okoli osi  $x$  in upogibnega vztrajnostnega momenta okoli  $y$  osi. V primeru ko računamo polarni odpornostni moment, je  $r_{max}$  maksimalna razdalja od središča efektivne površine do roba efektivne površine.

$$W_p = \frac{I_p}{r_{max}} \quad (31)$$

Polarni odpornostni moment se lahko izračuna tudi po poenostavljeni enačbi, ki je podana v SIST EN 1995-1-1:2005. V tej enačbi  $h_{ef}$  predstavlja maksimalno višino efektivne površine sidranja, pravokotno na daljšo stranico.

$$W_p = \frac{A_{ef} d}{4} \quad (32)$$

$$d = \sqrt{\left(\frac{A_{ef}}{h_{ef}}\right)^2 + h_{ef}^2} \quad (33)$$

### Upoštevanje tlačnih kontaktnih pritiskov med lesenimi elementi

V primeru, da so obremenitve v spoju tlačne, lahko v izračunu upoštevamo zmanjšano tlačno silo  $F_{A,Ed}$ . Izpolnjen mora biti pogoj, da je povprečna širina reže med lesenima elementoma manjša ali enaka 1.5 mm, največja širina reže pa ne presega 3 mm. V teh primerih lahko upoštevamo, da se 50 % tlačne sile prenese preko kontaktnih napetosti med lesenimi elementi. Projektna osna sila na eno krempljasto ploščo je takrat enaka  $F_{A,Ed}/2$ .

Za čelne spoje v tlaku lahko projektno silo  $F_{A,Ed}$  in projektni moment  $M_{A,Ed}$  v spoju, določimo po enačbi (34) in (35), če je  $h$  višina čelnega spoja.

$$F_{A,Ed} = \sqrt{\left(\frac{N_{Ed} \cos \beta}{2} - \frac{3|M_{Ed}|}{2h}\right)^2 + (F_{Ed} \sin \beta)^2} \quad (34)$$

$$M_{A,Ed} = \frac{M_{Ed}}{2} \quad (35)$$

### 3.2.2 Nosilnost krempljaste plošče na stiku med lesenima elementoma

Notranje sile v lesenem elementu se preko krempljev v efektivni površini sidranja prenesejo v krempljasto ploščo. Na območju stika, na dolžini  $l$ , pride do obremenitev v jeklenem elementu, ki jih mora prenesti krempljasta plošča. Kontrolo nosilnosti jeklenega elementa je potrebno izvesti za vsak stik med efektivnimi površinami. Nosilnost krempljastih plošč se kontrolira po enačbi (36).

$$\left(\frac{F_{x,Ed}}{F_{x,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{y,Ed}}{F_{y,Rd}}\right)^2 \leq 1,0 \quad (36)$$

Projektna obtežba, ki deluje na posamezno jekleno ploščico, se preračuna glede na glavni smeri jeklene ploščice.

$$F_{X,Ed} = F_{Ed} \cos\alpha \mp 2F_{M,Ed} \sin\gamma \quad (37)$$

$$F_{Y,Ed} = F_{Ed} \sin\alpha \mp 2F_{M,Ed} \cos\gamma \quad (38)$$

Pri tem je  $F_{Ed}$  projektna osna sila v posamezni krempljasti plošči in je enaka polovici sile v lesenem elementu,  $M_{Ed}$  pa je projektni upogibni moment v posamezni plošči (glej enačbi (39) in (40)). Ker imamo v spoju dve krempljasti plošči se obremenitev razdeli.

$$F_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} \quad (39)$$

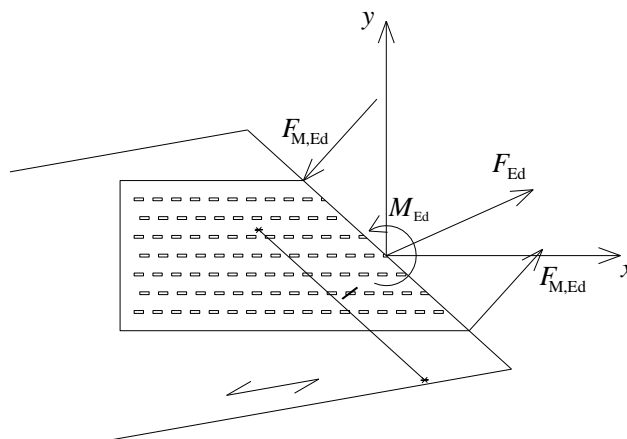
$$F_{M,Ed} = \frac{M_{Ed}}{l/2} \quad (40)$$

Projektni nosilnosti jeklene ploščice,  $F_{x,Rd}$  in  $F_{y,Rd}$ , v smeri x in y, se izračunata iz karakterističnih vrednosti, kjer je  $\gamma_s$  delni varnostni faktor lastnosti materiala za jeklo in je enak 1.15. Modifikacijski faktor  $k_{mod}$  je po SIST EN 1995-1-1:2005 enak 1,0.

$$F_{x,Rd} = \frac{F_{x,Rk}}{\gamma_s} \cdot k_{mod} \quad (41)$$

$$F_{y,Rd} = \frac{F_{y,Rk}}{\gamma_s} \cdot k_{mod} \quad (42)$$

Karakteristični nosilnosti krempljaste plošče  $F_{x,Rk}$  in  $F_{y,Rk}$  sta odvisni od kota  $\gamma$ , ki predstavlja kot med vzdolžno osjo krempljaste plošče in stično črto (glej sliko 14) in je odvisen je od naklonov lesenih elementov v spoju. Na karakteristične nosilnosti vplivajo še trdnosti jeklene ploščice, dolžina stika in vrsta krempljaste plošče. Vpliv debeline jeklene ploščice na nosilnost je zajet s trdnostnimi karakteristikami krempljaste plošče.



Slika 17: Obremenitve v krempljasti plošči pri kontroli nosilnosti jeklene ploščice.

Karakteristično nosilnost jeklene ploščice izračunamo po enačbah (43)-(47). Karakteristična trdnost v smeri glavne osi krempljaste plošče ( $f_{n,0,k}$ ), je enaka tlačni trdnosti, če je obtežba tlačna ( $F_{x,Ed} < 0$ ), če pa je obtežba natezna ( $F_{x,Ed} > 0$ ), je enaka natezni trdnosti plošče. Za izračun nosilnosti pa potrebujemo tudi karakteristično trdnost v smeri, ki je pravokotna na glavno smer krempljaste plošče ( $f_{n,90,k}$ ) in karakteristično strižno trdnost ( $f_{v,0,k}$ ). Konstanti  $k_v$  in  $\gamma_v$  sta odvisni od vrste krempljaste plošče. Konstanti in karakteristične trdnosti se določijo po standardnem preizkusu, kot je to opisano v prejšnjem poglavju.

$$F_{x,Rk} = \max \begin{cases} |f_{n,0,k} l \sin(\gamma - \gamma_0 \sin(2\gamma))| \\ |f_{v,0,k} l \cos \gamma| \end{cases} \quad (43)$$

$$F_{y,Rk} = \max \begin{cases} |f_{n,90,k} l \cos \gamma| \\ k f_{v,90,k} l \sin \gamma \end{cases} \quad (44)$$

$$f_{n,0,k} = \begin{cases} f_{t,0,k}; & \text{za } F_{x,Ed} > 0 \\ f_{c,0,k}; & \text{za } F_{x,Ed} \leq 0 \end{cases} \quad (45)$$

$$f_{n,90,k} = \begin{cases} f_{t,90,k}; & \text{za } F_{y,Ed} > 0 \\ f_{c,90,k}; & \text{za } F_{y,Ed} \leq 0 \end{cases} \quad (46)$$

$$k = \begin{cases} 1 + k_v \sin(2\gamma); & \text{za } F_{x,Ed} > 0 \\ 1; & \text{za } F_{x,Ed} \leq 0 \end{cases} \quad (47)$$

Kadar s krempljasto ploščo stikujemo več elementov, je potrebno sile na območjih stikovanja določiti tako, da je povsod izpolnjen ravnotežni pogoj. Izračunamo rezultanto sil, ki deluje v spoju in potem na njo dimenzioniramo spoj.

### 3.2.3 Kontrola cepilnih sil

Kadar deluje sila v zvezi pod kotom glede na lesna vlakna ( $F_{Ed}$ ), je potrebno upoštevati možnost razcepa v spoju zaradi natezne komponente sile pravokotno na lesna vlakna, ki se izračuna po enačbi (48) [6].

$$F_{v,Ed} = F_{Ed} \cdot \sin \alpha \quad (48)$$

Natezna komponenta sile pod kotom glede na lesna vlakna mora zadostiti pogoju (49). Na mestu spoja mora biti izpolnjen pogoj, da je projektna prečna sila ( $F_{v,Ed}$ ), ki je enaka natezni komponenti sile pod kotom glede na lesna vlakna, manjša od projektne razcepne nosilnosti lesenega elementa ( $F_{90,Rd}$ ). Karakteristična razcepna nosilnost za mehki les (iglavce) [N] se po standardu SIST EN 1995-1-1 izračuna po enačbi (52) [6].

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (49)$$

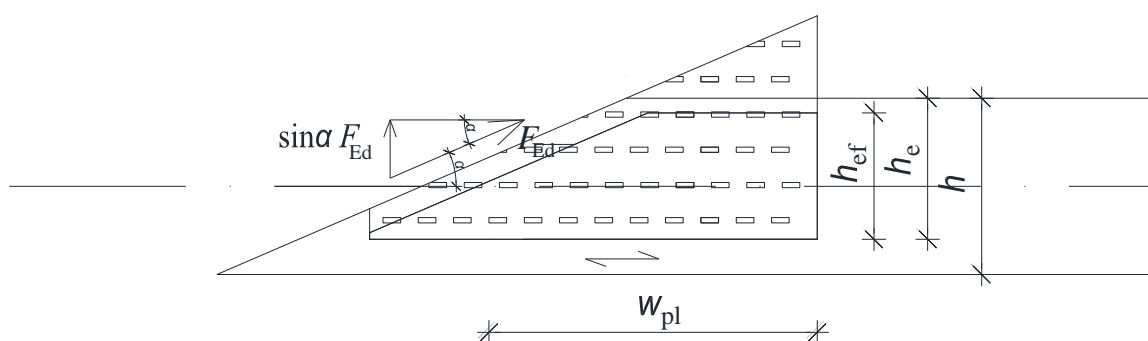
$$F_{90,Rd} = \frac{F_{90,Rk}}{\gamma_m} \cdot k_{mod} \quad (50)$$

$$\gamma_m = 1,25 \quad (51)$$

$$F_{90,Rk} = 14bw \cdot \sqrt{\frac{h_e}{(1 - \frac{h_e}{h})}} \quad (52)$$

$$w = \max \begin{cases} \frac{w_{pl}}{100} \\ 1 \end{cases} \quad (53)$$

V zgornjih enačbah  $w$  pomeni modifikacijski faktor,  $h_e$  predstavlja razdaljo od obremenjenega roba do roba ježaste plošče [mm],  $h$  je višina lesenega elementa [mm] in  $w_{pl}$  je širina krempljaste plošče v smeri lesnih vlaken [mm]. Karakteristike so predstavljene na sliki (18).



Slika 18: Cepilne sile v nateznem spoju.

V primeru ko višina  $h_e$  ni konstanta smo predpostavili, da se lahko širina ježaste plošče v smeri vlaken  $w_{pl}$  izračuna po enačbi (54).

$$w_{pl} = \frac{A_{ef}}{h_{ef}} \quad (54)$$

#### 4 POGOJI ZA SKLADIŠČENJE IN MONTAŽO ELEMENTOV

Krempljaste plošče so zelo občutljive na obremenitve izven ravnine stikovanja, zato je potrebno s prefabriciranimi lesenimi elementi spojenimi s krempljastimi ploščami ravnati še posebej previdno. Pri skladiščanju in montaži prefabriciranih elementov je potrebno upoštevati pravila določena v standardu SIST EN 1995-1-1:2005 in SIST EN 14250:2010 ter navodila proizvajalca.

Po standardu SIST EN 1995-1-1:2005 je potrebno pred pritrditvijo horizontalnih zateg preveriti ravnost in navpično poravnanoost paličij. Maksimalni upogib elementa (za vrste upogibov glej preglednico 2) v strešni konstrukciji po montaži, je omejen. Največji odmik elementa izven ravnine paličja se omeji z  $a_{\text{bow,perm}}$  po enačbi (55) [6]. Če dovoljena vrednost ni dogovorjena z naročnikom (v skladu z EC 0), se za  $a_{\text{bow,perm}}$  privzame 30 mm [19].

$$a_{\text{bow}} \leq a_{\text{bow,perm}} = 10 \div 50 \text{ mm} \quad (55)$$

Največje odstopanje paličja od navpične poravnanoosti ( $a_{\text{dev}}$ ) je omejeno z  $a_{\text{dev,perm}}$  po enačbi (56) [6]. Če dovoljena vrednost ni dogovorjena z naročnikom (v skladu z EC 0), se za  $a_{\text{dev,perm}}$  privzame 30 mm [19].

$$a_{\text{dev}} \leq a_{\text{dev,perm}} = 10 \div 50 \text{ mm} \quad (56)$$

Pri proizvodnji prefabriciranih elementov je potrebno upoštevati določila predpisana v standardu SIST EN 14250:2010, morebitna odstopanja pa morajo ostati znotraj predpisanih vrednosti (glej poglavje 2.1). V primeru da pride do deformacij v času od izdelave do vgradnje, se takšna paličja lahko še vedno uporabijo, če jih lahko izravnamo ne da bi prišlo do poškodb lesa ali spojev [6].

Po SIST EN 14250 [10] moramo pred vsako montažo preveriti še:

- tip, debelino in dimenzije krempljastih plošč,
- pozicijo, orientacijo in stik krempljastih plošč z lesenim elementom,
- razmak med stikovanimi elementoma,
- da nimamo posnetih robov na območju stika,
- ob prisotnosti grče, preverimo, če so kremplji pravilno vtisnjeni v leseni element in
- dimenzijsko pravilnost elementov.

V primeru, da ne moremo zagotoviti, da se bo z lesenimi elementi rokovalo v skladu s SIST EN 1995-1-1:2005, nam standard SIST EN 14250 ponuja naslednjo rešitev. Zagotoviti moramo minimalno širino lesenega elementa, po spodnji enačbi, kjer je  $l$  dolžina lesenega elementa v metrih,  $f_{\text{m,k}}$  pa karakteristična upogibna nosilnost lesenega elementa v  $\text{N/mm}^2$ . Izračunano širino dobimo v milimetrih [6,10]. S tem zagotovimo zadostno robustnost elementov.

$$b = \frac{1,8 \cdot l^2}{f_{\text{m,k}}} \quad (57)$$

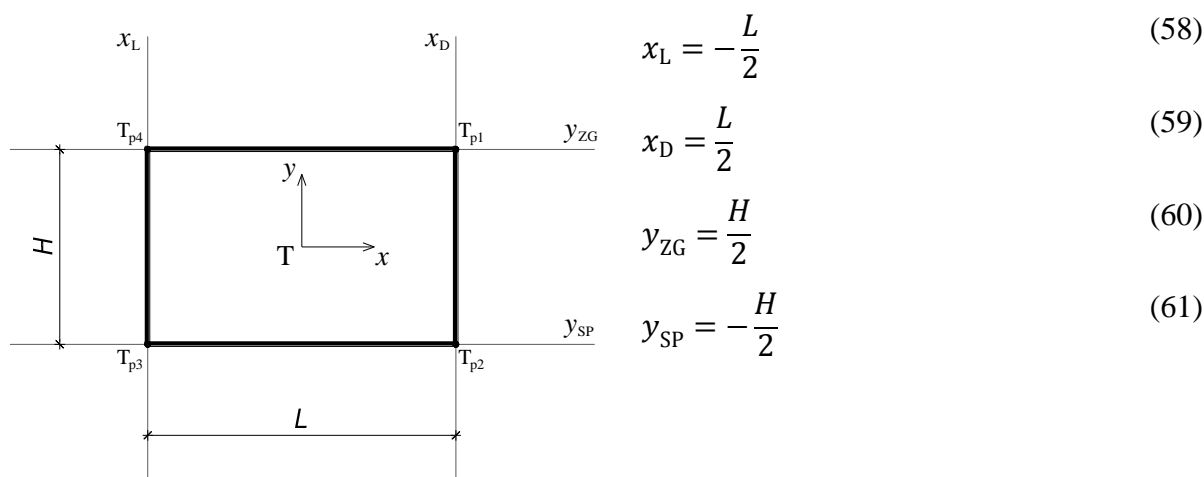


## 5 PRIPOMOČEK ZA KONTROLO NOSILNOSTI KOLENSKEGA SPOJA

Pripomoček za kontrolo nosilnosti kolenskega spoja smo izdelali s pomočjo uporabniške aplikacije Microsoft Excel, ki je najbolj razširjeno orodje za delo z elektronskimi preglednicami. Microsoft Excel je zelo primeren za avtomatizacijo izračuna podatkov, kjer ti izračuni temeljijo na vhodnih podatkih, ki jih vnašamo v tabelarični obliki, pri tem pa so enačbe za izračune že vnaprej določene. V Excelu nam je na voljo tudi razvojno okolje Microsoft Visual Basic for Applications (VBA). Tako smo lahko s pomočjo kode v programskem jeziku Visual Basic programsko orodje še dodatno razširili [23,24].

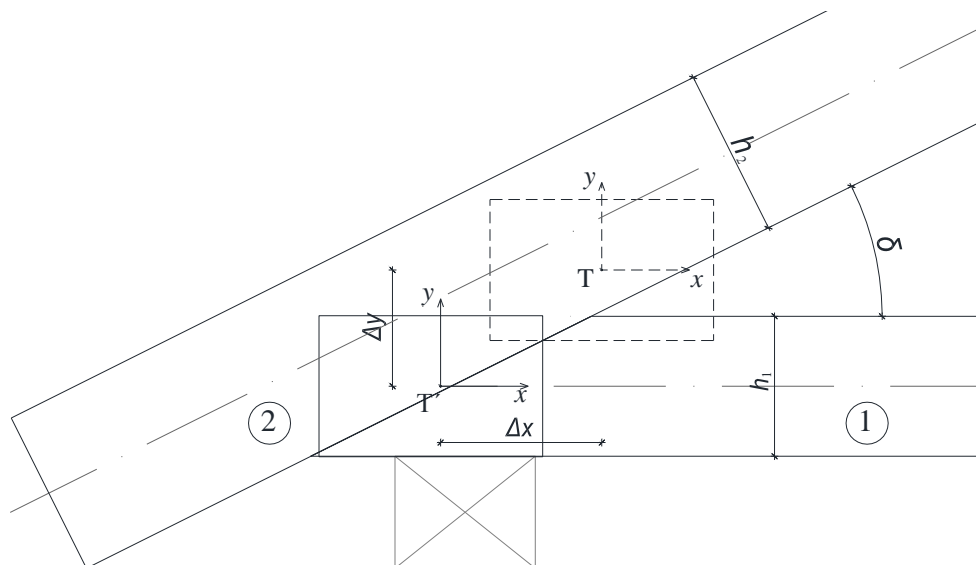
### 5.1 Osnovni geometrijski podatki kolenskega spoja

Kolenski spoj, kjer sta elementa med seboj povezana s pravokotno krempljasto ploščo dolžine  $L$  in višine  $H$ , obravnavamo v ravnini  $(x,y)$ . Izhodišče koordinatnega sistema postavimo v geometrijsko težišče krempljaste plošče. Označimo ga s točko  $T(0,0)$ , vozlišča plošče pa z  $T_{p1}(L/2,H/2)$ ,  $T_{p2}(L/2,-H/2)$ ,  $T_{p3}(-L/2,-H/2)$  in  $T_{p4}(-L/2,H/2)$ . Robove plošče določajo štiri premice kot prikazujemo na sliki 19.



Slika 19: Geometrijski podatki krempljaste plošče.

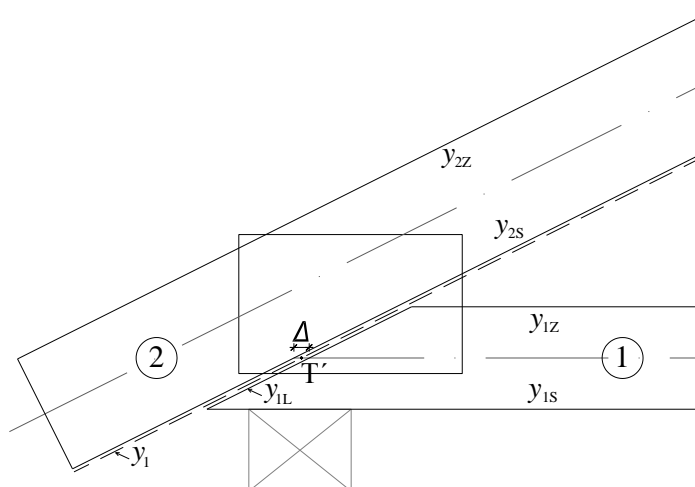
Vodoravni leseni element v kolenskem spoju (spodnji pas) v nadaljevanju imenujemo element 1, poševni element (zgornji pas) pa element 2. Kot med elementoma označimo z  $\delta$ . Višino elementa 1 označimo z  $h_1$ , elementa 2 pa z  $h_2$ . Na sliki 20 prikazujemo kolenski spoj ter izhodiščno in premaknjeno lego krempljaste plošče.



Slika 20: Premik krempljaste plošče v koordinatnem sistemu  $(x, y)$ .

V začetnem stanju, geometrijsko težišče krempljaste plošče (točka T) sovpada s točko T', ki označuje središče spoja med lesenima elementoma. Skozi to točko poteka premica  $y_1$ , ki oklepa z vodoravno osjo (os  $x$ ) naklon  $\delta$ . Izdelano programsko orodje omogoča, da krempljasto ploščo prosto premikamo v smeri osi  $x$  oziroma  $y$ . Pri tem pomik plošče (kakor tudi pomik izhodišča koordinatnega sistema) v smeri osi  $x$  označimo z  $\Delta x$ , v smeri osi  $y$  pa z  $\Delta y$ . V primeru premika plošče za  $\Delta x$  in  $\Delta y$  so koordinate središča spoja med elementoma, t.j. točke T',  $x = -\Delta x$  in  $y = -\Delta y$ .

Predpostavimo, da na stiku elementa nista tesno skupaj pač pa sta med seboj razmknjena. Z  $\Delta$  označimo velikost razmika, merjenega v smeri osi  $x$  (glej sliko 21). Točka T' leži na sredini razmika  $\Delta$ . Na sliki 21 prikazujemo premice, s katerimi določimo robove elementa 1 oziroma 2. Spodnji rob elementa 1 določa premica  $y_{1s}$ , zgornjega pa  $y_{1z}$ , na stiku pa je element 1 omejen s premico  $y_{1L}$ . Spodnji oziroma zgornji rob elementa 2 pa določata premici  $y_{2s}$  oziroma  $y_{2z}$ .



Slika 21: Premice, ki določajo robove lesenih elementov.

V nadaljevanju podajamo enačbe premic, ločeno za element 1 in 2.

#### ELEMENT 1

$$y_{1Z} = \frac{h_1}{2} - dy \quad (62)$$

$$y_{1S} = -\frac{h_1}{2} - dy \quad (63)$$

$$y_{1L} = \tan\delta \left( x + dx - \frac{\Delta}{2} \right) - dy \quad (64)$$

#### ELEMENT 2

$$y_{2Z} = \tan\delta \left( x + dx + \frac{\Delta}{2} \right) - dy + \frac{h_2}{\cos\delta} \quad (65)$$

$$y_{2S} = \tan\delta \left( x + dx + \frac{\Delta}{2} \right) - dy \quad (66)$$

Izrazi (62)-(66) nam bodo v pomoč pri določitvi stičnih površin med krempljasto ploščo in lesom. Standard SIST EN 1995-1-1:2005 določa, da moramo stične površine še dodatno reducirati in sicer za  $c = 5$  mm ob robovih lesa ter za razdaljo  $6d$  v smeri vlaken od konca lesa. Pri tem je  $d$  debelina krempljaste plošče.

Tako moramo izraze (62)-(66) še dodatno modificirati. Vpeljemo nove premice z naslednjimi znakami:  $y_{1,sp}$ ,  $y_{1,zg}$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  in  $y_4$ , oziroma z enačbami:

$$y_1 = \tan\delta(x + dx) - dy \quad (67)$$

$$y_{1,sp} = y_{2S} - \tan\delta(\Delta + 6d) = \tan\delta \left( x + dx - \frac{\Delta}{2} - 6d \right) - dy \quad (68)$$

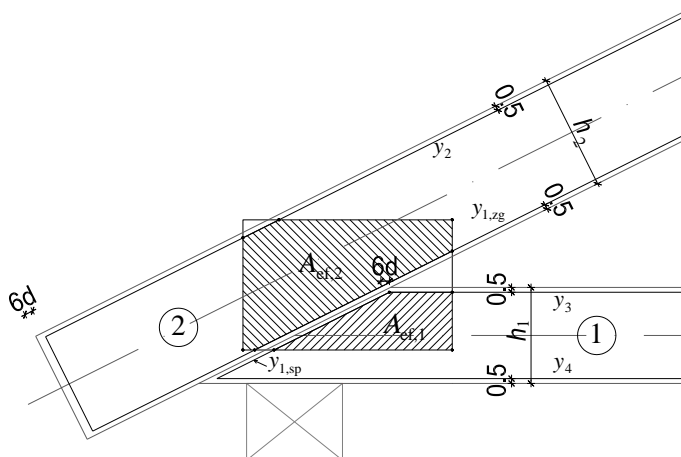
$$y_{1,zg} = y_{2S} + \frac{c}{\cos\delta} = \tan\delta \left( x + dx + \frac{\Delta}{2} \right) - dy + \frac{c}{\cos\delta} \quad (69)$$

$$y_2 = y_{2Z} - \frac{c}{\cos\delta} = \tan\delta \left( x + dx + \frac{\Delta}{2} \right) - dy + \frac{h_2 - c}{\cos\delta} \quad (70)$$

$$y_3 = y_{1Z} - c = -dy + \frac{h_1}{2} - c \quad (71)$$

$$y_4 = y_{1S} + c = -dy - \frac{h_1}{2} + c. \quad (72)$$

Na sliki 22 prikazujemo premice (68)-(72) ter šrafirani ploskvi  $A_{ef,1}$  in  $A_{ef,2}$ , ki predstavljata efektivno stično površino med krempljasto ploščo in elementom 1 oziroma 2.



Slika 22: Premice, ki določajo robove lesenih elementov z upoštevanjem redukcije stičnih površin.

## 5.2 Določitev efektivnih stičnih površin

Vozlišča efektivne stične površine med kreppljasto ploščo in lesnim elementom, določimo kot presečišča premic (58)-(61), ki opisujejo robove kreppljaste plošče ter premic (68)-(72), ki določajo robove lesenih elementov z upoštevanjem redukcije ob robovih, oziroma na koncu lesenega elementa. V nadaljevanju prikazujemo postopek določitve vozlišč ločeno za zgornji oziroma spodnji element.

### 5.2.1 Vozlišča efektivne stične površine za element 2

Efektivna stična površina za element 2 je omejena s premicama  $y_2$  in  $y_{1,zg}$  (enačbi (69) in (70)) ter premicami, ki določajo robove kreppljaste plošče (enačbe (58)-(61)). Postopek določitve koordinat vozlišč efektivne stične površine je odvisen od kota, ki ga oklepa element 2 z elementom 1 oziroma z osjo  $x$  (kot  $\delta$ ) ter kotom, ki ga oklepa notranja diagonala kreppljaste plošče z osjo  $x$  (kot  $\delta_p$ ). Z enačbama (73) in (74) definiramo naklon elementa 2 oziroma diagonale plošče glede na os  $x$ .

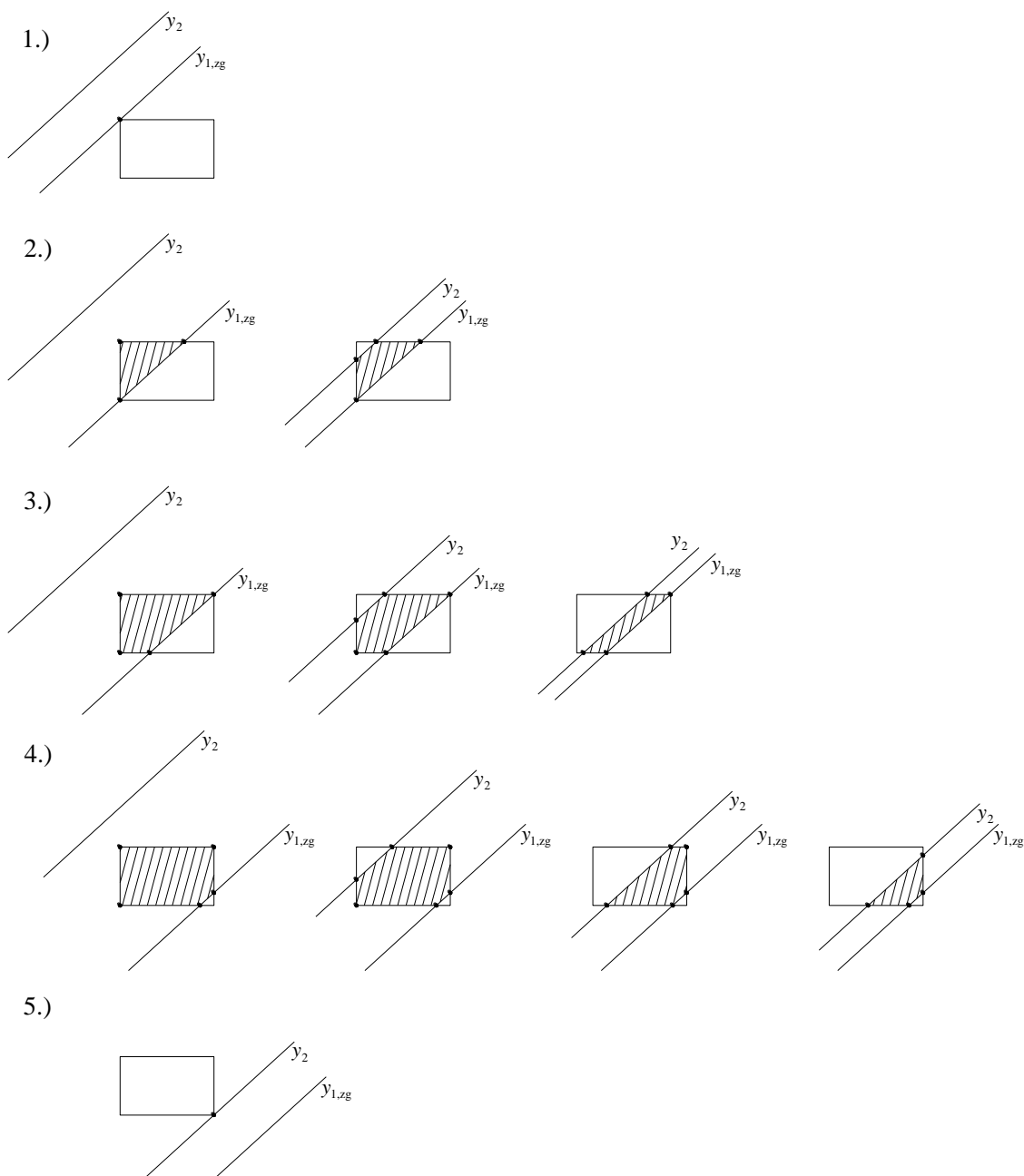
$$k_{\text{elem}} = \tan \delta \quad (73)$$

$$k_{\text{diag}} = \tan \delta_p = \frac{H}{L} \quad (74)$$

Analiziramo dva različna primera:

(i) primer ko  $k_{\text{elem}} > k_{\text{diag}}$ :

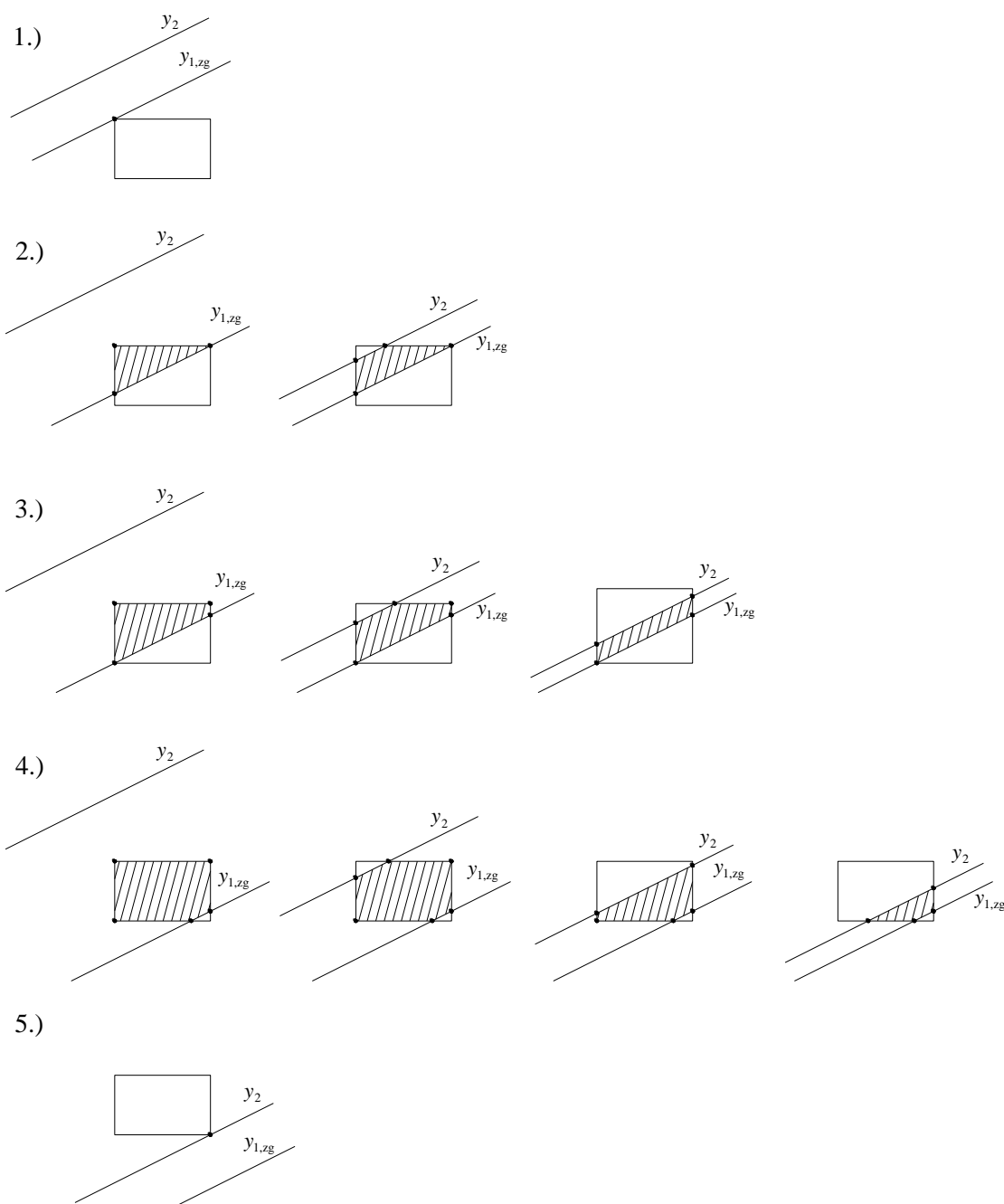
Obravnavamo enajst (11) različnih leg kreppljaste plošče glede na reducirani meji elementa 2. Razvrstimo jih v pet skupin kot prikazujemo na sliki 23.



Slika 23: Vozlišča efektivne stične površine za element 2,  $k_{elem} > k_{diag}$ .

(ii) primer ko  $k_{elem} < k_{diag}$ :

Tudi v tem primeru obravnavamo enajst (11) različnih leg krempljaste plošče. Prikazujemo jih na sliki 24.



Slika 24: Vozlišča efektivne stične površine za element 2,  $k_{elem} < k_{diag}$ .

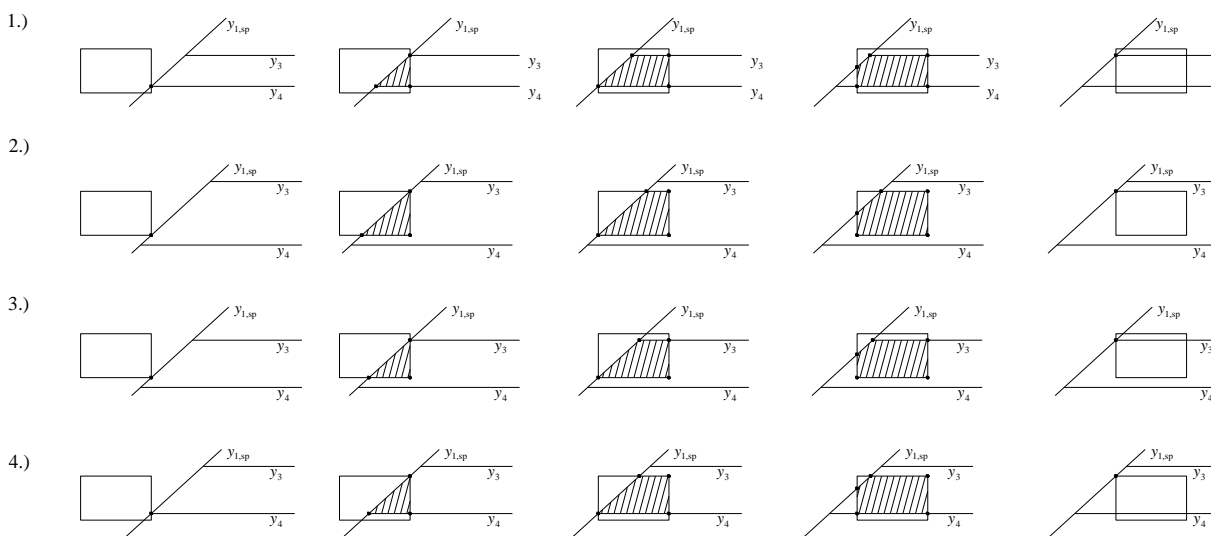
### 5.2.2 Vozlišča efektivne stične površine za element 1

Efektivna stična površina za element 1 je omejena s premicami  $y_{1,sp}$ ,  $y_3$  in  $y_4$  (enačbe (68), (71) in (72)) ter s premicami, ki določajo robove krempljaste plošče (enačbe (58)-(61)). Tudi v tem primeru je postopek določitve koordinat vozlišč efektivne stične površine odvisen od kota  $\delta$  oziroma kota  $\delta_p$ .

Analiziramo dva različna primera:

(i) primer ko  $k_{elem} > k_{diag}$ :

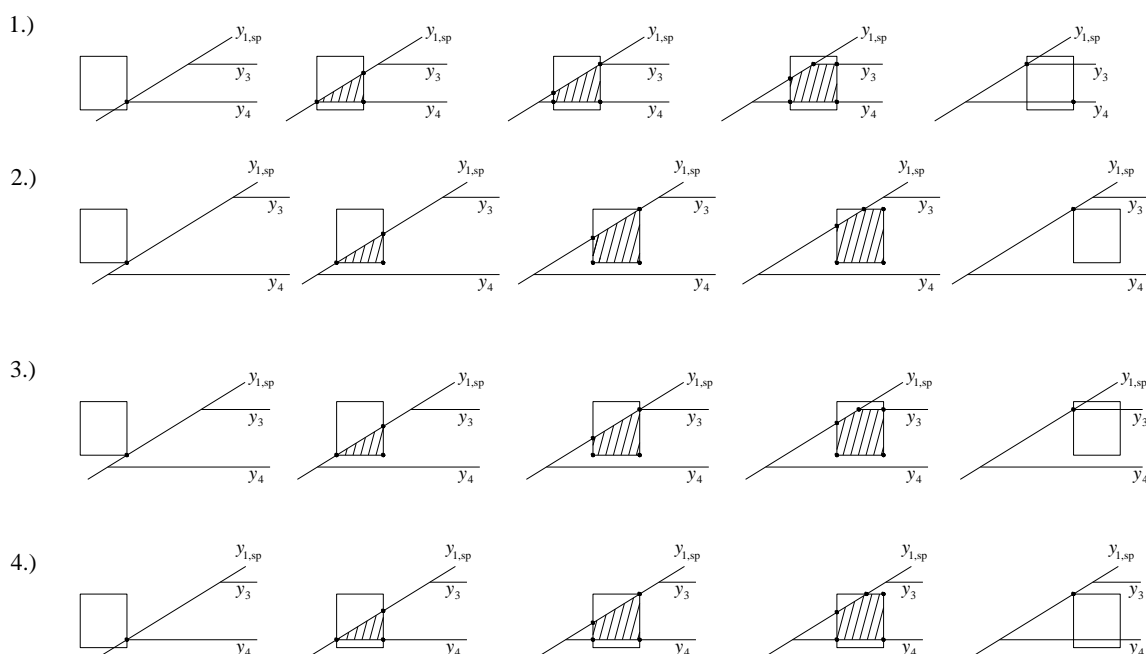
Obravnavamo dvajset (20) različnih leg krempljaste plošče glede na reducirane meje elementa 1. Razvrstimo jih v štiri skupine, kot prikazujemo na sliki 25.



Slika 25: Vozlišča efektivne stične površine za element 1,  $k_{elem} > k_{diag}$ .

(ii) primer ko  $k_{elem} < k_{diag}$ :

Tudi v tem primeru obravnavamo dvajset (20) različnih leg krempljaste plošče glede na reducirane meje elementa 1 in 2, kot prikazujemo na sliki 26.



Slika 26: Vozlišča efektivne stične površine za element 1,  $k_{elem} < k_{diag}$ .

### 5.2.3 Geometrijske karakteristike stičnih površin

V nadaljevanju moramo izračunati geometrijske karakteristike efektivne stične površine, ki jih bomo potrebovali pri določitvi nosilnosti zveze. Stična površina je v splošnem lik poligonalne oblike, ki ga

določa  $n$ -vozlišč s koordinatami  $x_i$  in  $y_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). V izrazih za račun geometrijskih karakteristik nastopajo ploskovni integrali. S pomočjo Greenove formule (glej enačbo (75)) ploskovne integrale prevedemo na krivuljne integrale po robu. Sama izpeljava izrazov je dokaj obsežna in je na voljo v literaturi (glej npr. [25]), zato je tukaj ne navajamo. Izpeljava je odvisna od izbire koordinatnega sistema in orientacije točk poligonalnega lika. Točke si morajo slediti ena za drugo in sicer v nasprotni smeri urinega kazalca.

$$\int_A \left( \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial z} \right) \partial y \partial z = \oint_C (Q dz - P dy) \quad (75)$$

Tako lahko ploščino efektivne stične površine med krempljasto ploščo in  $j$ -tim elementom lesa izračunamo z enačbo (76).

$$A_{ef,j} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_{i,j} \cdot y_{i+1,j} - x_{i+1,j} \cdot y_{i,j}) \quad (76)$$

Statična odpornostna momenta stične površine okrog osi  $x$  oziroma  $y$  določata izraza:

$$S_{x,j} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n [(x_{i,j} \cdot y_{i+1,j} - x_{i+1,j} \cdot y_{i,j}) \cdot (y_{i,j} + y_{i+1,j})] \quad (77)$$

$$S_{y,j} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n [(x_{i,j} \cdot y_{i+1,j} - x_{i+1,j} \cdot y_{i,j}) \cdot (x_{i,j} + x_{i+1,j})] \quad (78)$$

Težišče stične površine med krempljasto ploščo in  $j$ -tim elementom lesa izračunamo s pomočjo enačbe (79) in (80).

$$x_{T,j} = \frac{S_{y,j}}{A_{ef,j}} = \frac{1}{6 \cdot A_{ef,j}} \sum_{i=1}^n [(x_{i,j} \cdot y_{i+1,j} - x_{i+1,j} \cdot y_{i,j}) \cdot (x_{i,j} + x_{i+1,j})] \quad (79)$$

$$y_{T,j} = \frac{S_{x,j}}{A_{ef,j}} = \frac{1}{6 \cdot A_{ef,j}} \sum_{i=1}^n [(x_{i,j} \cdot y_{i+1,j} - x_{i+1,j} \cdot y_{i,j}) \cdot (y_{i,j} + y_{i+1,j})] \quad (80)$$

Pri tem težišče efektivne stične površine za element 1 označimo s  $T_1(x_{T,1}, y_{T,1})$ , za elementa 2 pa s  $T_2(x_{T,2}, y_{T,2})$ .

Upogibna vztrajnostna momenta efektivne stične površine okrog osi  $x$  oziroma osi  $y$  izračunamo glede na geometrijsko težišče krempljaste plošče v točki  $T(0,0)$ . Uporabimo Steinerjev stavek, pri čemer sta  $I_{x,j}^T$  in  $I_{y,j}^T$  vztrajnostna momenta stične površine glede na njeno težišče.

$$I_{x,j} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n (y_{i,j}^2 + y_{i,j} \cdot y_{i+1,j} + y_{i+1,j}^2) \cdot (x_{i,j} \cdot y_{i+1,j} - x_{i+1,j} \cdot y_{i,j}) \quad (81)$$



$$I_{y,j} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n (x_{i,j}^2 + x_{i,j} \cdot x_{i+1,j} + x_{i+1,j}^2) \cdot (x_{i,j} \cdot y_{i+1,j} - x_{i+1,j} \cdot y_{i,j}) \quad (82)$$

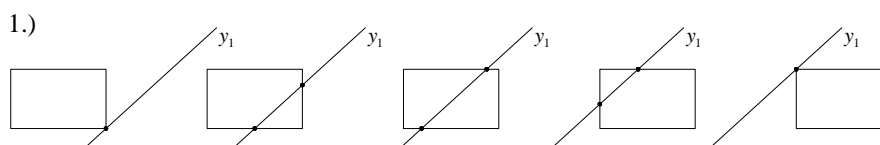
$$I_{x,j}^T = I_{x,j} - y_{T,j}^2 \cdot A_{ef,j} \quad (83)$$

$$I_{y,j}^T = I_{y,j} - x_{T,j}^2 \cdot A_{ef,j} \quad (84)$$

### 5.2.4 Določitev dimenzije plošče, merjene vzdolž stične črte

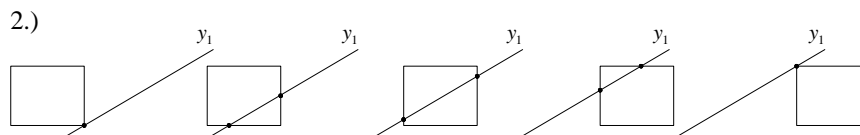
Dolžino plošče vzdolž stične črte določimo s presečiščem premic, ki opisujejo robove krempljaste plošče (enačbe (58)-(61)) ter premice  $y_1$ , ki poteka vzdolž sredine razmika med elementoma (enačba (67)). Postopek določitve presečišč je odvisen od kota  $\delta$  in  $\delta_p$  oziroma od naklona elementa 2 oziroma diagonale plošče glede na os  $x$  (glej enačbi (73) in (74)). Analiziramo dva različna primera:

(i) primer ko  $k_{elem} > k_{diag}$ :



Slika 27: Vozlišča plošče na stični črti,  $k_{elem} > k_{diag}$ .

(ii) primer ko  $k_{elem} < k_{diag}$ :



Slika 28: Vozlišča plošče na stični črti,  $k_{elem} < k_{diag}$ .

Presečiščni točki označimo s  $T_p^L(x_p^L, y_p^L)$  in  $T_p^D(x_p^D, y_p^D)$ . Tako lahko dimenzijo plošče, merjene vzdolž stične črte, izračunamo z izrazom (85):

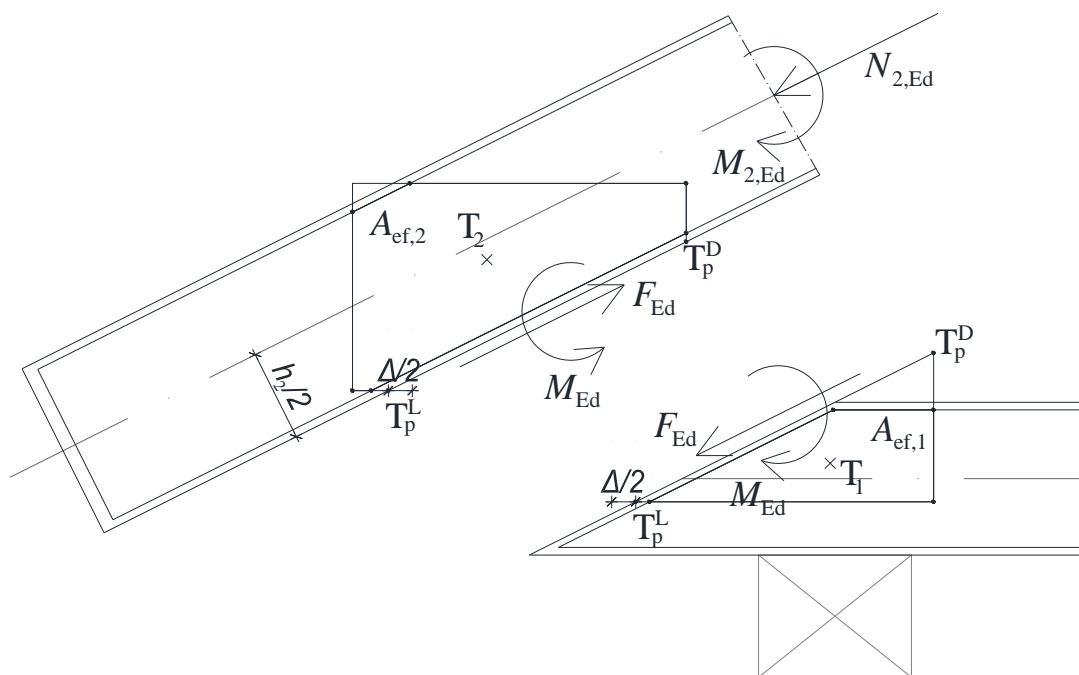
$$l = \sqrt{(x_p^D - x_p^L)^2 + (y_p^D - y_p^L)^2} \quad (85)$$

### 5.3 Obremenitev v težišču efektivnih stičnih površin

Pri projektiranju kolenskega spoja moramo najprej izračunati obremenitve v lesenih elementih. Projektno osno silo v zgornjem pasu  $N_{2,Ed}$  (element 2) izračunamo z analizo konstrukcije, kjer uporabimo poenostavljen statični modela paličja, to pomeni, da v vsakem vozlišču konstrukcije predpostavimo členkasto povezavo. Upogibni element v zgornjem pasu na mestu spoja  $M_{2,Ed}$  pa določimo na modelu kontinuirnega nosilca z vrtljivimi podporami v vozliščih. Vpliv upogiba vozlišč

in delne vpetosti v zvezah upoštevamo z 10-odstotnim zmanjšanjem momentov pri vmesnih podporah elementa [6].

Projektno silo  $F_{Ed}$  in projektni upogibni moment  $M_{Ed}$  v krempljasti plošči izračunamo iz ravnotežnih enačb za zgornji pas (element 2). Predpostavimo, da obremenitev učinkuje na sredini stične črte plošče, ki jo določata točki  $T_p^L$  in  $T_p^D$ .



Slika 29: Projektna obremenitev zgornjega pasu in krempljaste plošče v kolenskem spoju.

Upoštevamo, da so spoji konstrukcije izvedeni tako, da so na obeh straneh lesenih elementov krempljaste plošče enakega tipa, velikosti in smeri. Obremenitev krempljaste plošče je takrat:

$$F_{Ed} = \frac{N_{2,Ed}}{2} \quad (86)$$

$$M_{Ed} = \frac{M_{2,Ed}}{2} - \left( \frac{h_2}{2} + \sin\delta \cdot \frac{\Delta}{2} \right) \cdot F_{Ed} \quad (87)$$

V nadaljevanju določimo še obremenitev, ki deluje v središču efektivne stične površine med krempljasto ploščo in posameznim elementom lesa. Za element 2 obremenitev znaša:

$$F_{A,Ed,2} = F_{Ed} \quad (88)$$

$$M_{A,Ed,2} = M_{Ed} + e_2 \cdot F_{Ed} \quad (89)$$

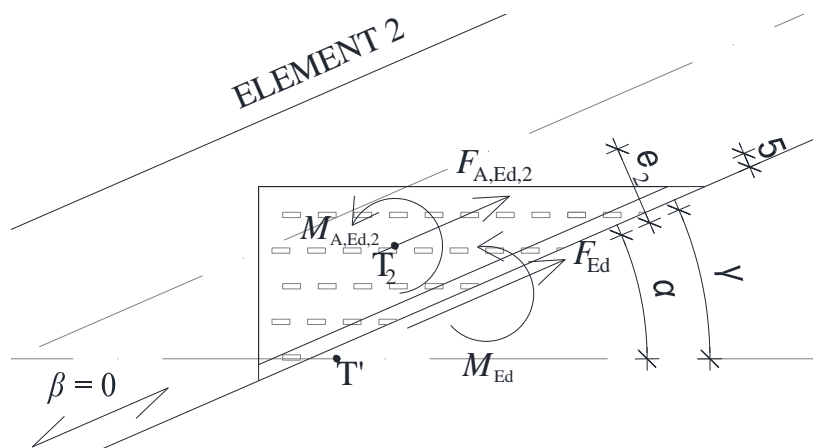
Za element 1 pa:

$$F_{A,Ed,1} = F_{Ed} \quad (90)$$

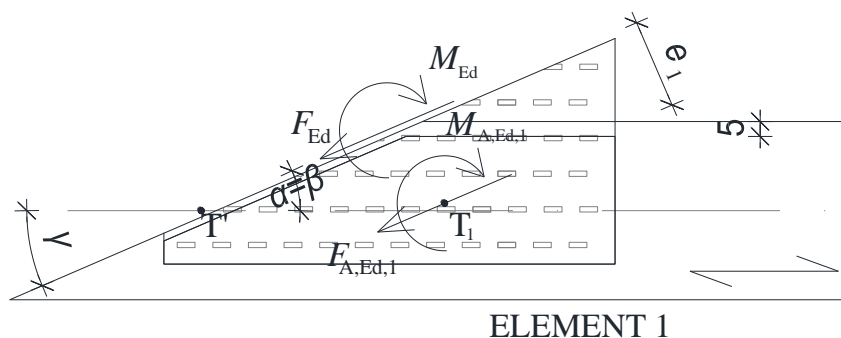
$$M_{A,Ed,1} = M_{Ed} - e_1 \cdot F_{Ed} \quad (91)$$

Pri tem sta  $e_2$  in  $e_1$  pravokotni oddaljenosti središč efektivnih stičnih površin (točki  $T_2$  in  $T_1$ ) od premice  $y_1$ , ki poteka po sredini razmika med elementoma. Obremenitve v središču stičnih površin prikazujemo tudi na sliki 30.

Element 2



Element 1



Slika 30: Obremenitev v središču efektivnih stičnih površin.

#### 5.4 Predstavitev pripomočka za kontrolo nosilnosti kolenskega spoja

S pomočjo izdelanega programskega orodja izvedemo kontrolo nosilnosti kolenskega spoja skladno z zahtevami iz standarda SIST EN 1995-1-1:2005. Te zahteve so detajlno predstavljene že v Poglavju 3. Ker v obravnavanem kolenskem spoju ni nateznih obremenitev, ki bi delovale pravokotno na vlakna lesa, je kontrola razcepa opuščena.

Programsko orodje v aplikaciji Microsoft Excel ima dva delovna lista. Na prvem listu »Račun« vnašamo podatke, izvajamo računske kontrole ter preverjamo pogoje nosilnosti, na drugem listu »Karakteristične trdnosti lesa« pa so za potrebe računskih kontrol zbrane trdnostne karakteristike lesa.

Zgornji del delovnega lista »Račun« je namenjen vnosu podatkov. Podatke vnašamo v celice z belim ozadjem in črno obrobo. Najprej podamo širino ( $L$ ), višino ( $H$ ) in debelino ( $d$ ) kreppljaste plošče (glej sliko 31). V začetnem stanju geometrijsko težišče kreppljaste plošče (točka  $T$ ) sovpada s točko  $T'$ , ki označuje središče spoja med lesenima elementoma. Kreppljasto ploščo lahko premikamo v smeri osi  $x$  oziroma  $y$  s pomočjo gumbov + in - oziroma z neposrednim vnosom vrednosti v polji  $\Delta x$  in  $\Delta y$ .

JEŽEVKA:	PODATKI:	REZULTATI:
L = 24,00 cm	$h_1 = 10$ cm ... višina elementa 1	KONTROLA 1: 0,991 KONTROLA 2: 0,987 KONTROLA 3: 0,292
H = 12,00 cm	$h_2 = 12$ cm ... višina elementa 2	
d = 0,1 cm	$\delta = 23,5$ ° ... kot med elementoma	
$\Delta x = 8,95$ cm + -	$c = 0,5$ cm ... redukcija	
$\Delta y = 1,5$ cm + -	$\Delta = 0,1$ cm ... razmik med elementoma v smeri osi x	
IZRAČUN		

Slika 31: Vnos dimenzij krempljaste plošče ter izbira njene lege.

V nadaljevanju podamo višino spodnjega pasu (element 1) oziroma zgornjega pasu (element 2), podamo kot med lesenima elementoma ( $\delta$ ), velikost redukcije stične površine ob robovih lesa ( $c$ ) ter velikost razmika med elementoma, merjenega v smeri osi  $x$  ( $\Delta$ ) (glej sliko 32).

JEŽEVKA:	PODATKI:	REZULTATI:
L = 24,00 cm	$h_1 = 10$ cm ... višina elementa 1	KONTROLA 1: 0,991 KONTROLA 2: 0,987 KONTROLA 3: 0,292
H = 12,00 cm	$h_2 = 12$ cm ... višina elementa 2	
d = 0,1 cm	$\delta = 23,5$ ° ... kot med elementoma	
$\Delta x = 8,95$ cm + -	$c = 0,5$ cm ... redukcija	
$\Delta y = 1,5$ cm + -	$\Delta = 0,1$ cm ... razmik med elementoma v smeri osi x	
IZRAČUN		

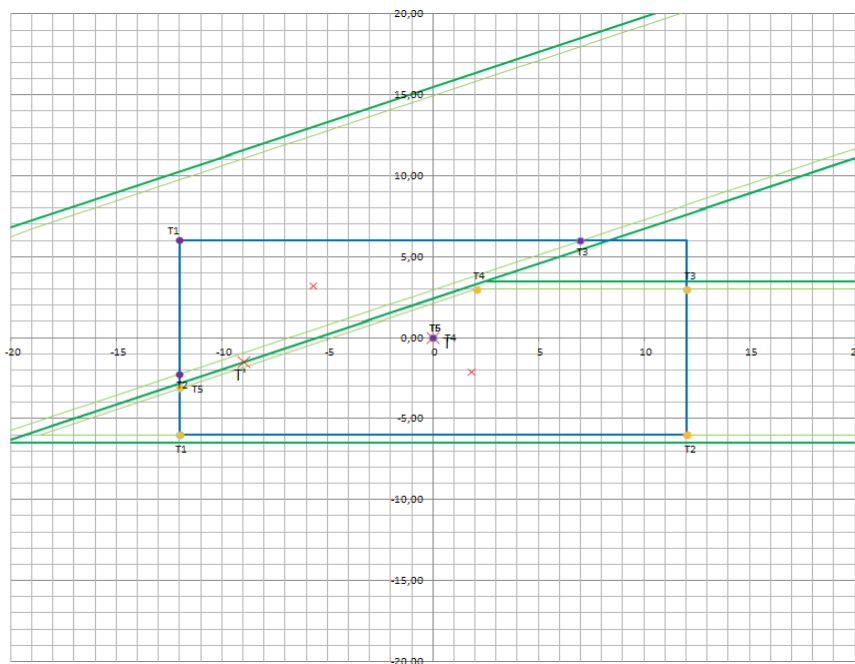
Slika 32: Vnos podatkov o lesenih elementih.

Povzetek računskih kontrol nosilnosti kolenskega spoja lahko spremljamo v desnem zgornjem kotu delovnega lista »Račun« (glej sliko 33). Podrobnosti računskih kontrol so sicer podane v nadaljevanju delovnega lista.

JEŽEVKA:	PODATKI:	REZULTATI:
L = 24,00 cm	$h_1 = 10$ cm ... višina elementa 1	KONTROLA 1: 0,991 KONTROLA 2: 0,987 KONTROLA 3: 0,292
H = 12,00 cm	$h_2 = 12$ cm ... višina elementa 2	
d = 0,1 cm	$\delta = 23,5$ ° ... kot med elementoma	
$\Delta x = 8,95$ cm + -	$c = 0,5$ cm ... redukcija	
$\Delta y = 1,5$ cm + -	$\Delta = 0,1$ cm ... razmik med elementoma v smeri osi x	
IZRAČUN		

Slika 33: Povzetek računskih kontrol nosilnosti kolenskega spoja.

Na delovnem listu »Račun« je podana tudi grafična predstavitev obravnavanega kolenskega spoja (glej sliko 34). Središče spoja (točka T') in geometrijsko težišče krempljaste plošče (točka T), ki je tudi izhodišče koordinatnega sistema, sta označena rdečima križcema. Meje lesenih elementov so označene z odebeljeno zeleno črto, reducirane meja pa s tanko zeleno črto. Meje krempljaste plošče so modre barve. Točke rumene barve označujejo vozlišča efektivne stične površine med krempljasto ploščo in elementom 1, vijolične točke pa vozlišča efektivne stične površine za element 2. Točke so označene z zaporednimi številkami, indeksi naraščajo v nasprotni smeri urinega kazalca. Središči efektivnih stičnih površin sta označeni z manjšima rdečima križcema.



Slika 34: Grafična predstavitev kolenskega spoja.

S pomočjo spustnega seznama izberemo vrsto lesa za element 1 oziroma element 2 (glej sliko 35). Ob izbiri se izpiše pripadajoča povprečna gostota lesa ter materialni faktor.

Po izbiri vrste lesa, se izpiše gostota lesa in materialni faktor.

Nosilnost spoja s krempljastimi ploščami	
Izbira materiala lesenih elementov:	
ELEMENT 1	ELEMENT 2
Homogen les: <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">C24</span>	Homogen les: <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">C27</span>
$\rho_{m,1} = 350 \text{ kg/m}^3$ $k_{p,1} = 1,00$	$\rho_{m,2} = 370 \text{ kg/m}^3$ $k_{p,2} = 1,03$
Obtežba:	
ELEMENT 1	ELEMENT 2
	Izbira vrste lesa. <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">C18 C20 C22 C24 C27 C30 C35 C40</span>

Slika 35: Vnos materiala lesenih elementov iz spustnega seznama.

Na delovnem listu »Račun« podamo tudi projektno vrednost tlačne osne sile ( $N_{2,Ed}$ ) ter upogibnega elementa ( $M_{2,Ed}$ ) v zgornjem pasu (element 2) (glej sliko 36). V programu je privzeto, da pozitivni moment povzroča natezne obremenitve na zgornjem robu zgornjega pasu. Podati moramo tudi modifikacijski faktor za trajanje obtežbe in vlažnost ( $k_{mod}$ ).

Vnos projektne obremenitve zgornjega pasu.

Obtežba:	
$N_{z,Ed} =$	<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">24</span> kN
$M_{z,Ed} =$	<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">0,46</span> kNm
$k_{mod,les} =$	<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">0,9</span>

Slika 36: Vnos projektne obremenitve.

Ko podamo osnovne geometrijske podatke o kolenskem spoju, program izračuna kote v spoju, kot prikazujemo na sliki 37.

Geometrija efektivnih površin:

<b>ELEMENT 2</b>		
$\alpha_2 =$	23,5 °	... kot med vzdolžno osjo krempljaste plošče in smerjo sile [°]
$\beta_2 =$	0 °	... kot med smerjo vlaken lesa in smerjo osne sile v elementu [°]
$\gamma_2 =$	23,5 °	... kot med vzdolžno osjo krempljaste plošče in stične ploskve [°]
<b>ELEMENT 1</b>		
$\alpha_1 =$	23,5 °	... kot med vzdolžno osjo krempljaste plošče in smerjo sile [°]
$\beta_1 =$	23,5 °	... kot med smerjo vlaken lesa in smerjo osne sile v elementu [°]
$\gamma_1 =$	23,5 °	... kot med vzdolžno osjo krempljaste plošče in stične ploskve [°]

Slika 37: Koti v kolenskem spoju.

Na delovnem listu »Račun« podamo tudi trinajst (13) trdnostnih karakteristik uporabljene krempljaste plošče, ki jih dobimo iz tehničnega soglasja, ki mora biti izdano za vsak tip krempljaste plošče (glej sliko 38).

Trdnostne lastnosti krempljaste plošče:

$f_{a,0,0,k}$	0,294	... nosilnost sidranja (bočna) na enoto površine plošče za kota $\alpha=0^\circ$ in $\beta=0^\circ$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
$f_{a,90,0,k}$	0,131	... nosilnost sidranja (bočna) na enoto površine plošče za kota $\alpha=90^\circ$ in $\beta=90^\circ$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
$f_{t,0,k}$	1,7	... natezna nosilnost [kN/cm]
$f_{c,0,k}$	0,85	... tlačna nosilnost [kN/cm]
$f_{v,0,k}$	0,78	... strižna nosilnost [kN/cm]
$f_{t,90,k}$	1,39	... natezna nosilnost [kN/cm]
$f_{c,90,k}$	0,93	... tlačna nosilnost [kN/cm]
$f_{v,90,k}$	0,41	... strižna nosilnost [kN/cm]
$k_1$	-0,0049	... konstanta
$k_2$	0,00258	... konstanta
$\alpha_0$	60	... konstanta [°]
$k_v$	1,7	... konstanta
$\gamma_0$	-5	... konstanta [°]

V program je potrebno vnesti 13 trdnostnih karakteristik uporabljene krempljaste plošče.

Slika 38: Vnos trdnostnih karakteristik krempljaste plošče.

S pritiskom na gumb »Izračun«, ki se nahaja na delu delovnega lista »Račun«, kjer podajamo dimenzije krempljaste plošče ter izbiramo njeno lego (glej sliko 31), program izračuna ter izriše vozlišča efektivnih površin obravnavanega kolenskega spoja, izračuna geometrijske karakteristike stičnih površin ter izvede vse računske kontrole nosilnosti kolenskega spoja skladno s standardom SIST EN 1995-1-1:2005.

Desno od grafičnega prikaza obravnavanega kolenskega spoja se v tabelarični obliki izpišejo koordinate vozlišč efektivnih stičnih površin ter pripadajoče geometrijske karakteristike (glej sliko 39).

PRESEČIŠČA			GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE		
	x [cm]	y [cm]		Element 1	Element 2
<b>Element 2</b>			$A_{ef}$ [cm <sup>2</sup> ]	173,09	78,44
T1	-12,00	6,00	$W_p$ [cm <sup>3</sup> ]	562,64	144,27
T2	-12,00	-2,26	$I_p$ [cm <sup>3</sup> ]	8074,45	1869,61
T3	6,99	6,00	$I$ [cm]	22,13	
T4	0,00	0,00	$I_{tx}$ [cm <sup>3</sup> ]	1043,98	297,27
T5	0,00	0,00	$I_{ty}$ [cm <sup>3</sup> ]	7030,47	1572,34
T6	0,00	0,00	$x_T$ [cm]	1,81	-5,67
<b>Element 1</b>			$y_T$ [cm]	-2,11	3,25
T1	-12,00	-6,00	$e$ [cm]	4,85	3,04
T2	12,00	-6,00	$r_{max}$ [cm]	14,35	12,96
T3	12,00	3,00	$I_x$ [cm <sup>3</sup> ]	1815,18	1124,24
T4	2,05	3,00	$I_y$ [cm <sup>3</sup> ]	7600,04	4092,70
T5	-12,00	-3,11			

Slika 39: Izpis koordinat vozlišč učinkovitih stičnih površin (levo) ter pripadajoče geometrijske karakteristike (desno).

Program izpiše tudi pripadajoče vrednosti karakteristične sidrne trdnosti na enoto površine krempljaste plošče za stično površino med ploščo in elementom 1 oziroma 2 (glej sliko 40).

<b>ELEMENT 1</b>	$f_{s,\alpha,\beta,k,1} = 0,229$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	... karakteristična sidrna trdnost krempljaste plošče za kota $\alpha$ in $\beta$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
	$f_{s,\alpha,0,k,1} = 0,179$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	... karakteristična sidrna trdnost krempljaste plošče vzporedno z vlakni lesa [kN/cm <sup>2</sup> ]
<b>ELEMENT 2</b>	$f_{s,\alpha,\beta,k,2} = 0,235$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	... karakteristična sidrna trdnost krempljaste plošče za kota $\alpha$ in $\beta$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
	$f_{s,\alpha,0,k,2} = 0,179$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	... karakteristična sidrna trdnost krempljaste plošče vzporedno z vlakni lesa [kN/cm <sup>2</sup> ]

Karakteristična sidrna trdnost krempljaste plošče v elementu 1 in 2, za kota  $\alpha$  in  $\beta$ .

Slika 40: Karakteristične sidrne trdnosti na enoto površine krempljaste plošče za stično površino med ploščo in elementom 1 oziroma 2.

Program izvede kontrolo sidrne nosilnosti krempljaste plošče za učinkovito stično površino med ploščo in elementom 1 oziroma elementom 2. Na delovnem listu »Račun« sta to »KONTROLA 1« in »KONTROLA 2« (glej sliko 41). Izvede se tudi kontrolo nosilnosti krempljaste plošče, t.j. »KONTROLA 3« (slika 42). Izračuni na delovnem listu »Račun« so pripravljene tako, da jih je mogoče enostavno natisniti. Primer izpisa je predstavljen v Prilogi B.

**Določitev nosilnosti zveze:**

i) Bočne (sidrne) nosilnosti ježastih plošč

**ELEMENT 1**

$\tau_{F,d,1} = 0,069$  [kN/cm<sup>2</sup>] ... projektna sidrna napetost na posamezno kreppljasto ploščo zaradi sile  $F_{A,Ed}$  [kN/cm<sup>2</sup>]  
 $F_{A,Ed,1} = 12,00$  kN ... projektna sila na posamezno ploščo, ki deluje v središču efektivne površine [kN]  
 $A_{ef,1} = 173,09$  cm<sup>2</sup> ... efektivna površina plošče [cm<sup>2</sup>]  
  
 $\tau_{M,d,1} = -0,191$  [kN/cm<sup>2</sup>] ... projektna sidrna napetost na posamezno kreppljasto ploščo zaradi momenta  $M_{A,Ed}$  [kNcm/cm<sup>2</sup>]  
 $M_{A,Ed,1} = -107,47$  kNcm ... projektni moment, ki deluje na posamezno ploščo (v središču efektivne površine)  
 $W_{p,1} = 562,64$  cm<sup>3</sup> ... odpornostni moment kreppljaste plošče [cm<sup>3</sup>]  
 $\gamma_m = 1,25$  varnostni faktor za kreppljaste plošče

**KONTROLA 1:**

$$\left(\frac{\tau_{F,d}}{f_{a,\alpha,\beta,d}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{M,d}}{f_{a,0,0,d}}\right)^2 = 0,991 \leq 1,0$$

$f_{a,\alpha,\beta,d,1} = 0,165$  [kN/cm<sup>2</sup>]  
 $f_{a,0,0,d} = 0,212$  [kN/cm<sup>2</sup>]

**ELEMENT 2**

$\tau_{F,d,2} = 0,153$  [kN/cm<sup>2</sup>] ... projektna sidrna napetost na posamezno kreppljasto ploščo zaradi sile  $F_{A,Ed}$  [kN/cm<sup>2</sup>]  
 $F_{A,Ed,2} = 12,00$  kN ... projektna sila na posamezno ploščo, ki deluje v središču efektivne površine [kN]  
 $A_{ef,2} = 78,44$  cm<sup>2</sup> ... efektivna površina plošče [cm<sup>2</sup>]  
  
 $\tau_{M,d,2} = -0,088$  [kN/cm<sup>2</sup>] ... projektna sidrna napetost na posamezno kreppljasto ploščo zaradi momenta  $M_{A,Ed}$  [kNcm/cm<sup>2</sup>]  
 $M_{A,Ed,2} = -12,70$  kNcm ... projektni moment, ki deluje na posamezno ploščo (v središču efektivne površine)  
 $W_{p,2} = 144,27$  cm<sup>3</sup> ... odpornostni moment kreppljaste plošče [cm<sup>3</sup>]  
 $\gamma_m = 1,25$  varnostni faktor za sidrno togost

**KONTROLA 2:**

$$\left(\frac{\tau_{F,d}}{f_{a,\alpha,\beta,d}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{M,d}}{f_{a,0,0,d}}\right)^2 = 0,987 \leq 1,0$$

$f_{a,\alpha,\beta,d,2} = 0,170$  [kN/cm<sup>2</sup>]  
 $f_{a,0,0,d} = 0,212$  [kN/cm<sup>2</sup>]

Slika 41: Kontrola nosilnosti kreppljaste plošče skladno s standardom SIST EN 1995-1-1:2005.

ii) Nosilnost kreppljaste plošče

$F_{x,Ed} = 7,46$  kN ... projektna sila v posamezni plošči (polovica sile v lesenem elementu) v smeri osi x [kN]  
 $F_{y,Ed} = -3,38$  kN ... projektna sila v posamezni plošči (polovica sile v lesenem elementu) v smeri osi y [kN]  
 $l = 22,13$  cm ... dolžina stika [cm]  
 $F_{x,Rd} = 14,93$  kN ... projektna nosilnost v posamezni plošči (polovica sile v lesenem elementu) v smeri osi x [kN]  
 $F_{y,Rd} = 16,42$  kN ... projektna nosilnost v posamezni plošči (polovica sile v lesenem elementu) v smeri osi y [kN]  
 $F_{x,Rk} = 17,17$  kN ... karakteristična nosilnost v posamezni plošči v smeri osi x [kN]  
 $F_{y,Rk} = 18,88$  kN ... karakteristična nosilnost v posamezni plošči v smeri osi y [kN]  
 $f_{n,0,k} = 1,70$  kN/cm ... nosilnost stika v smeri daljše stranice plošče  
 $f_{n,90,k} = 0,93$  kN/cm ... nosilnost stika pravokotno na smer daljše stranice plošče  
 $k = 2,24$  ... koeficient  
  
 $\gamma_m = 1,15$  varnostni faktor za jekleno ploščico

**KONTROLA 3:**

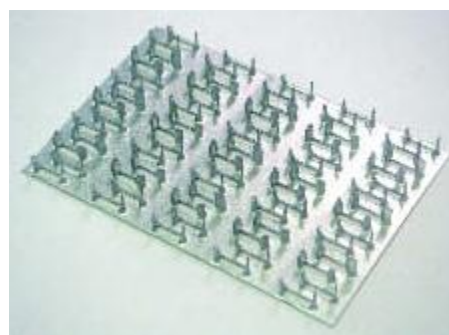
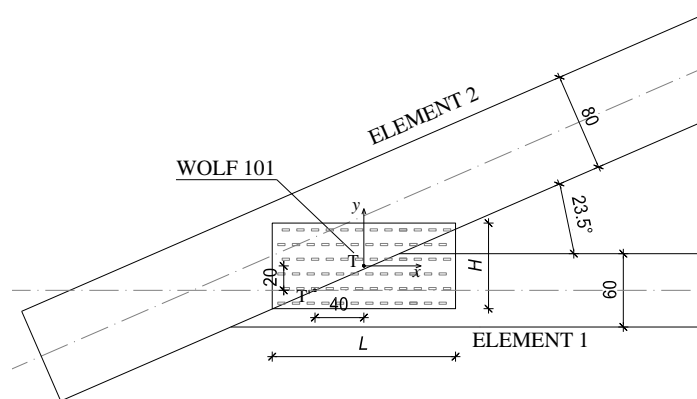
$$\left(\frac{F_{x,Ed}}{F_{x,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{y,Ed}}{F_{y,Rd}}\right)^2 = 0,292 \leq 1,0$$

Slika 42: Kontrola sidrne nosilnosti kolenskega spoja skladno s standardom SIST EN 1995-1-1:2005.



## 6 RAČUNSKI PRIMER

V tem poglavju prikazujemo primer dimenzioniranja kolenskega spoja, kjer sta lesena elementa med seboj spojena s krempljasto ploščo. Izračun izvedemo na dva načina: »pešč« ter s pomočjo izdelanega programskega orodja v programskem okolju Microsoft Excel. Za spajanje lesenih elementov uporabimo krempljasto ploščo proizvajalca Wolf Systems Ltd, vrste Wolf Typ 101 [21]. Na sliki 43 prikazujemo geometrijske podatke spoja. Element 1 (spodnji pas) je pravokotnega prečnega prereza, dimenzij 5/6 cm in trdnostnega razreda C24, element 2 (zgornji pas) pa ima dimenzije 5/8 cm in je trdnostnega razreda C27. Elementa med seboj oklepata kot 23.5°. Predpostavimo, da znaša razmik med elementoma, merjen v smeri osi  $x$ ,  $\Delta = 0.1\text{cm}$ .



VIR: <http://www.bbacerts.co.uk/>

Slika 43: Geometrijski podatki kolenskega spoja.

V preglednici 14 podajamo trdnostne karakteristike za krempljasto ploščo izbranega tipa (Wolf Typ 101). Karakteristike so podane v tehničnem soglasju, ki ga je izdal Deutsches Institut für Bautechnik in je dostopen na spletni strani proizvajalca krempljastih plošč.

Preglednica 14: Trdnostne karakteristike krempljaste plošče Wolf Typ 101.

Karakteristična sidrna trdnost:	$f_{a,0,0,k}$	2.94 N/mm <sup>2</sup>
	$f_{a,90,90,k}$	1.31 N/mm <sup>2</sup>
	$k_1$	-0.0049
	$k_2$	0.00258
	$\alpha_0$	60°
Karakteristična natezna trdnost:	$f_{t,0,k}$	170 N/mm
	$f_{t,90,k}$	139 N/mm
Karakteristična tlačna trdnost:	$f_{c,0,k}$	85 N/mm
	$f_{c,90,k}$	93 N/mm
Karakteristična strižna trdnost:	$f_{v,0,k}$	78 N/mm
	$f_{v,90,k}$	41 N/mm
	$k_v$	1.7
	$\gamma_v = \gamma_0$	-5°

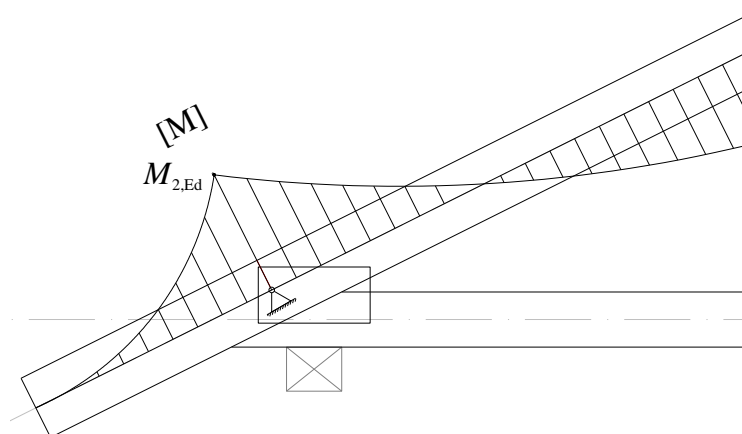
V nadaljevanju podajamo projektne obremenitve v zgornjem pasu (element 2). Projektno osno silo  $N_{2,Ed}$  smo izračunali z analizo konstrukcije, kjer smo uporabili poenostavljen statični modela paličja,

upogibni moment v zgornjem pasu na mestu spoja  $M_{2,Ed}$  pa smo izračunali s pomočjo modela kontinuirnega nosilca z vrtljivimi podporami v vozliščih (glej sliko 44). Obremenitve so:

$$N_{2,Ed} = 8 \text{ kN}$$

$$M_{2,Ed} = 0.35 \text{ kNm}$$

Modifikacijski faktor za trajanje obtežbe in vlažnost je  $k_{mod}=0.9$ .



Slika 44: Potek upogibnih elementov v zgornjem pasu.

Projektno silo  $F_{Ed}$  in projektni upogibni moment  $M_{Ed}$  v krempljasti plošči izračunamo s pomočjo enačbe (86) in (87). Pri tem upoštevamo, da je kolenski spoj izveden tako, da je na obeh straneh lesenih elementov krempljasta plošča enakega tipa, velikosti in smeri.

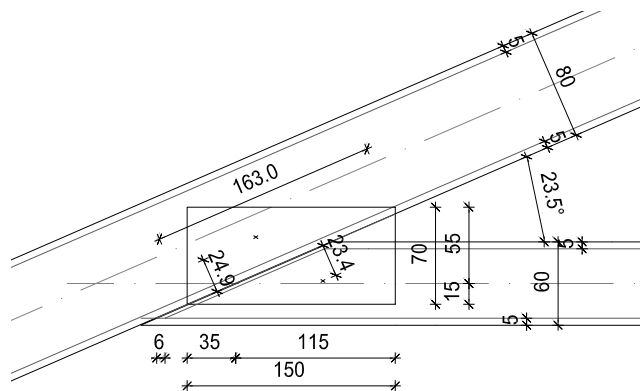
$$F_{Ed} = \frac{N_{2,Ed}}{2} = \frac{8}{2} = 4.0 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{M_{2,Ed}}{2} - \left( \frac{h_2}{2} + \sin\delta \cdot \frac{\Delta}{2} \right) \cdot F_{Ed} = \frac{0.35 \cdot 100}{2} - \left( \frac{8}{2} + \sin 23.5 \cdot \frac{0.1}{2} \right) \cdot \frac{8}{2} = 1.42 \text{ kNcm}$$

## 6.1 Kontrola nosilnosti s »peš« postopkom

### 6.1.1 Sidrna nosilnost krempljaste plošče

Pri računu sidrne nosilnosti krempljaste plošče moramo najprej za izbrano dimenzijo in lego krempljaste plošče določiti geometrijske karakteristike efektivnih stičnih površin med ploščo in elementoma 1 oziroma 2. Na podlagi predhodnih kontrolnih izračunov izberemo krempljasto ploščo dimenzij  $L/H = 150/70$  mm. Ploščo postavimo tako, da je geometrijsko težišče krempljaste plošče (točka T) od točke T', ki označuje središče spoja med lesenima elementoma, oddaljeno za  $\Delta x=4$  cm in  $\Delta y=2$  cm (glej sliko 43).

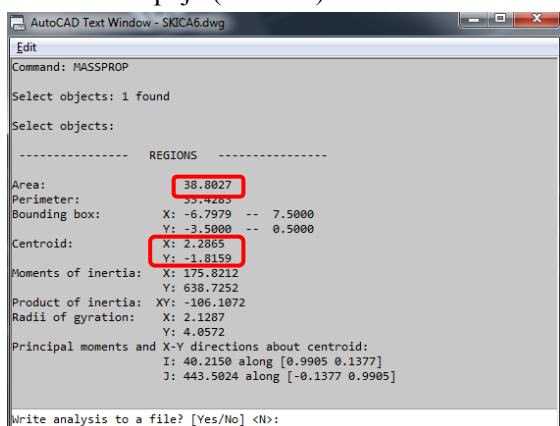


Slika 45: Določitev geometrijskih karakteristik v spoju s pomočjo programa AutoCad.

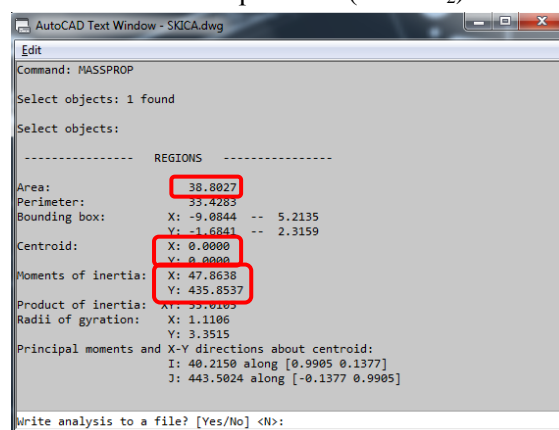
Geometrijske karakteristike stičnih površin izračunamo s pomočjo programa AutoCAD [26]. Prikazujemo jih na sliki 46 in 47, ločeno za element 2 in element 1.

### Element 2

- v središču spoja (točka T):



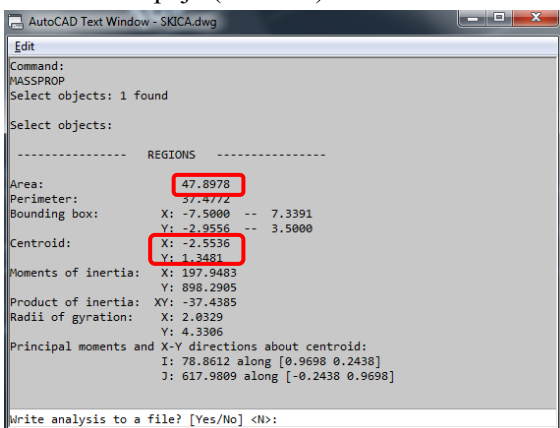
- v težišču efektivne površine (točka T<sub>2</sub>):



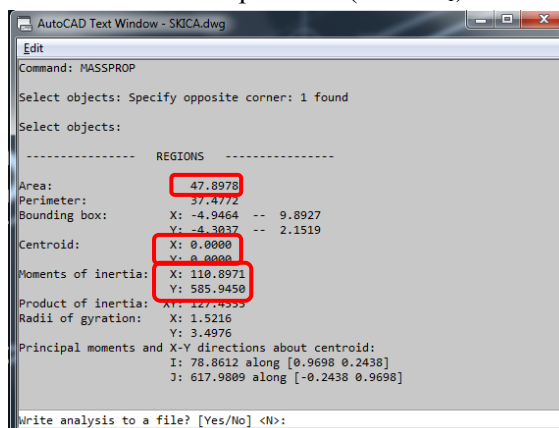
Slika 46: Geometrijske karakteristike efektivne stične površine za element 2, izračunane s pomočjo programa AutoCAD.

### Element 1

- v središču spoja (točka T):



- v težišču efektivne površine (točka T<sub>1</sub>):



Slika 47: Geometrijske karakteristike efektivne stične površine za element 1, izračunane s pomočjo programa AutoCAD.

Pomen posameznih angleških izrazov na slikah 46 in 47 je sledeč:

area (angl.) = ploščina (slo.)

centroid (angl.) = središče (slo.)

Moments of inertia (angl.) = upogibni vztrajnostni momenti (slo.)

S pomočjo programa AutoCAD določimo še pravokotno oddaljenost  $e_j$  središča  $j$ -te efektivne stične površine od premice  $y_1$ , ki poteka po sredini razmika med elementoma, razdaljo do najbolj oddaljenega vozlišča  $r_{\max,j}$  ter dimenzijo plošče  $l$ , merjene vzdolž stične črte (glej sliko 45). Kote  $\alpha_j$ ,  $\beta_j$  in  $\gamma_j$  določimo po pravilih iz Poglavja 3. Geometrijske karakteristike zberemo v preglednici 15.

Preglednica 15: Geometrijske karakteristike efektivnih stičnih površin v kolenskem spoju

	ELEMENT 1	ELEMENT 2
$A_{ef,j}$	38.80 cm <sup>2</sup>	47.90 cm <sup>2</sup>
$I_{Tx,j}$	47.86 cm <sup>4</sup>	110.90 cm <sup>4</sup>
$I_{Ty,j}$	435.85 cm <sup>4</sup>	585.95 cm <sup>4</sup>
$e_j$	2.34 cm	2.49 cm
$r_{\max,j}$	9.24 cm	10.12 cm
$\alpha_j$	23.5°	23.5°
$\beta_j$	23.5°	0°
$\gamma_j$	23.5°	23.5°
$l$	16.30 cm	

Sedaj lahko določimo še obremenitev, ki deluje v središču efektivne stične površine med krempljasto ploščo in posameznim elementom lesa. Uporabimo enačbe (88)-(91).

$$F_{A,Ed,1} = F_{Ed} = 4 \text{ kN}$$

$$F_{A,Ed,2} = F_{Ed} = 4 \text{ kN}$$

$$M_{A,Ed,1} = M_{Ed} - e_1 \cdot F_{Ed} = 1.42 - 2.34 \cdot 4 = -7.94 \text{ kNcm}$$

$$M_{A,Ed,2} = M_{Ed} + e_2 \cdot F_{Ed} = 1.42 + 2.47 \cdot 4 = 11.30 \text{ kNcm}$$

V nadaljevanju izračunamo še karakteristične sidrne trdnosti krempljaste plošče, ločeno za stično površino elementa 1 ter 2. Pri tem uporabimo enačbo (8) ter enačbe (18), (19), (21) in (23).

Element 1:

$$\begin{aligned} \text{za } \beta \leq 45^\circ: \quad f_{a,\alpha,\beta,k,1} &= \max \left\{ \begin{aligned} &f_{a,\alpha,0,k,1} - (f_{a,\alpha,0,k,1} - f_{a,90,90,k}) \frac{\beta_1}{45^\circ} \\ &f_{a,0,0,k} - (f_{a,0,0,k} - f_{a,90,90,k}) \sin(\max(\alpha_1, \beta_1)) \end{aligned} \right\} \\ &= \max \left\{ \begin{aligned} &0.179 - (0.179 - 0.131) \frac{23.5}{45^\circ} = 0.154 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\ &0.294 - (0.294 - 0.131) \sin(23.5) = 0.229 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \end{aligned} \right\} = 0.229 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \end{aligned}$$

$$f_{a,\alpha,0,k,1} = f_{a,0,0,k} + k_1 \alpha = 0.294 + (-0.0049) \cdot 23.5 = 0.179 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Element 2:

$$\begin{aligned} \text{za } \beta \leq 45^\circ: \quad f_{a,\alpha,\beta,k,2} &= \max \left\{ \begin{array}{l} f_{a,\alpha,0,k,2} - (f_{a,\alpha,0,k,2} - f_{a,90,90,k}) \frac{\beta_2}{45^\circ} \\ f_{a,0,0,k} - (f_{a,0,0,k} - f_{a,90,90,k}) \sin(\max(\alpha_2, \beta_2)) \end{array} \right\} \\ &= \max \left\{ \begin{array}{l} 0.179 - (0.179 - 0.131) \frac{0}{45} = 0 \\ 0.294 - (0.294 - 0.131) \sin(23.5) = 0.229 \end{array} \right\} \cdot 1.028 = 0.235 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \end{aligned}$$

$$f_{a,\alpha,0,k,2} = f_{a,0,0,k} + k_1 \alpha = 0.294 + (-0.0049) \cdot 23.5 = 0.179 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$k_{\rho,2} = \sqrt{\frac{\rho_{k,2}}{\rho_{\text{ref}}}} = \sqrt{\frac{370}{350}} = 1.028$$

Projektne sidrne trdnosti plošče pa so:

Element 1:

$$f_{a,\alpha,\beta,d,1} = \frac{f_{a,\alpha,\beta,k,1}}{\gamma_m} k_{\text{mod}} = \frac{0.229}{1.25} \cdot 0.9 = 0.165 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{a,0,0,d,1} = \frac{f_{a,0,0,k}}{\gamma_m} k_{\text{mod}} = \frac{0.294}{1.25} \cdot 0.9 = 0.212 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Element 2:

$$f_{a,\alpha,\beta,d,2} = \frac{f_{a,\alpha,\beta,k,2}}{\gamma_m} k_{\text{mod}} = \frac{0.235}{1.25} \cdot 0.9 = 0.169 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{a,0,0,d,2} = \frac{f_{a,0,0,k}}{\gamma_m} k_{\text{mod}} = \frac{0.294}{1.25} \cdot 0.9 = 0.212 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Projektno sidrno napetost na kreppljasto ploščo zaradi sile  $F_{\text{Ed}}$  in momenta  $M_{\text{Ed}}$  izračunamo s pomočjo enačb (24), (25), (30) in (31). Pri tem preverimo, če je izpolnjen pogoj (17).

Element 1:

$$\tau_{F,d,1} = \frac{F_{A,Ed,1}}{A_{ef,1}} = \frac{4}{38.80} = 0.103 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_{M,d,1} = \frac{M_{A,Ed,1}}{W_{p,1}} = \frac{7.94}{52.35} = 0.152 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$W_{p,1} = \frac{I_{p,1}}{r_{\text{max},1}} = \frac{483.71}{9.24} = 52.35 \text{ cm}^3$$

$$I_{p,1} = I_{T_y,1} + I_{T_x,1} = 47.86 + 435.85 = 483.71 \text{ cm}^4$$

Kontrola 1:

$$\left( \frac{\tau_{F,d,1}}{f_{a,\alpha,\beta,d,1}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{M,d,1}}{f_{a,0,0,d,1}} \right)^2 = \left( \frac{0.103}{0.165} \right)^2 + \left( \frac{0.152}{0.212} \right)^2 = \underline{0.904 \leq 1.0}$$

Element 2:

$$\tau_{F,d,2} = \frac{F_{A,Ed,2}}{A_{ef,2}} = \frac{4}{47.90} = 0.084 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_{M,d,2} = \frac{M_{A,Ed,2}}{W_{p,2}} = \frac{11.30}{68.76} = 0.164 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$W_{p,2} = \frac{I_{p,2}}{r_{max,2}} = \frac{695.85}{10.12} = 68.76 \text{ cm}^3$$

$$I_{p,2} = I_{Ty,2} + I_{Tx,2} = 110.90 + 585.95 = 695.85 \text{ cm}^4$$

Kontrola 2:

$$\left(\frac{\tau_{F,d,2}}{f_{a,\alpha,\beta,d,2}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{M,d,2}}{f_{a,0,0,d,2}}\right)^2 = \left(\frac{0.084}{0.169}\right)^2 + \left(\frac{0.164}{0.212}\right)^2 = \underline{0.845 \leq 1,0}$$

Ugotovimo, da je pri izbrani dimenziji in legi kreppljaste plošče pogoj (17) izpolnjen. Kontrola 1 velja za kontrolo sidrne nosilnosti kreppljaste plošče za efektivno stično površino med ploščo in elementom 1 oziroma Kontrola 2 za element 2.

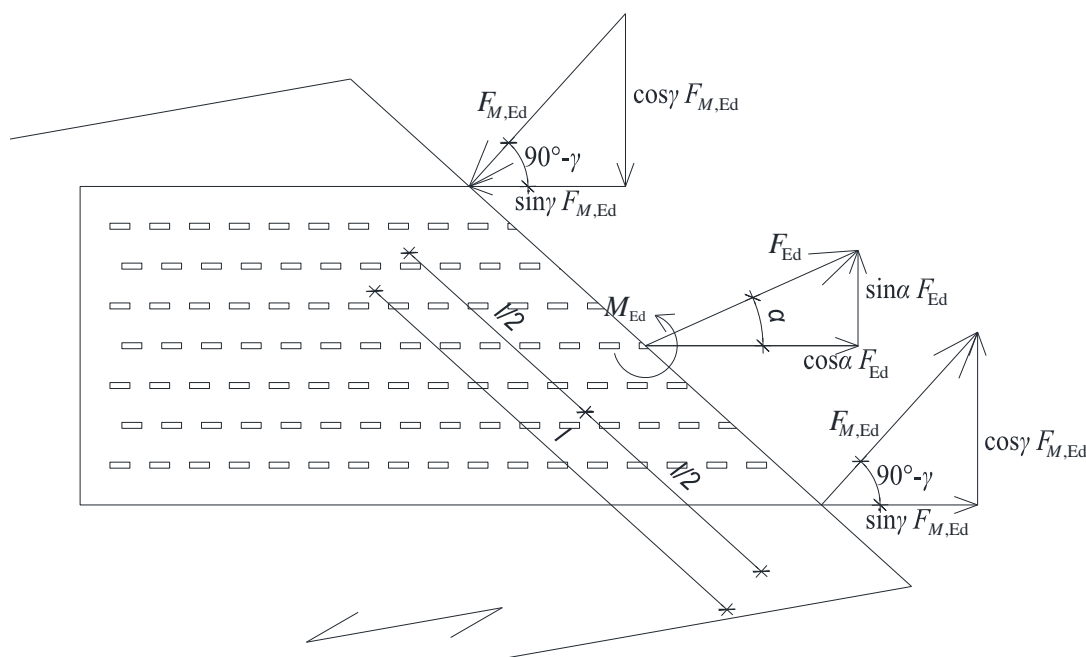
### 6.1.2 Nosilnost kreppljaste plošče na stiku med lesenima elementoma

Pri kontroli nosilnosti plošče najprej izračunamo obremenitev v posamezni plošči.  $F_{Ed}$  je projektna sila v posamezni plošči in je enaka polovici sile v elementu 2 (glej enačbo (39)),  $F_{M,Ed}$  pa je projektna sila zaradi upogibnega momenta  $M_{Ed}$  v posamezni kreppljasti plošči in jo izračunamo s pomočjo enačb (39) in (40).

$$F_{Ed} = \frac{N_{Ed,2}}{2} = \frac{8}{2} = 4.0 \text{ kN}$$

$$F_{M,Ed} = \frac{M_{Ed}}{l/2} = \frac{1.42}{16.30/2} = 0.174 \text{ kN}$$

Za vmesno površino stika s pomočjo enačb (37) in (38) določimo projektni sili v obeh glavnih smereh plošče (v smeri osi  $x$  in  $y$ ). Komponente projektnih sil prikazujemo na sliki 48.

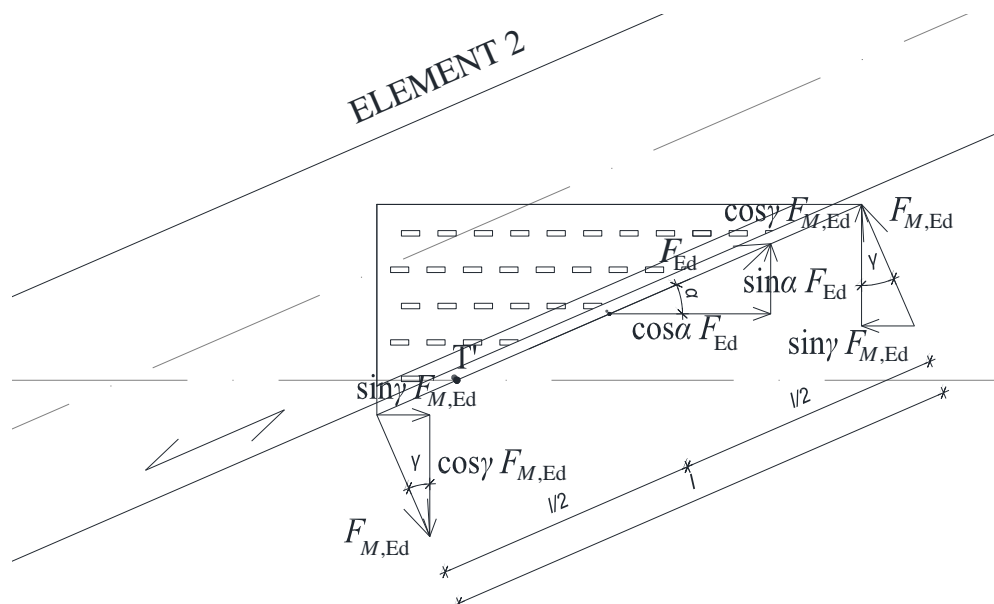


Slika 48: Komponente projektnih sil za vmesno površino stika v obeh glavnih smereh plošče.

$$F_{x,Ed} = F_{Ed} \cos \alpha \pm 2F_{M,Ed} \sin \gamma = 4 \cdot \cos 23.5 + 2 \cdot 0.174 \cdot \sin 23.5 = 3.81 \text{ kN}$$

$$F_{y,Ed} = F_{Ed} \sin \alpha \pm 2F_{M,Ed} \cos \gamma = 4 \cdot \sin 23.5 + 2 \cdot 0.174 \cdot \cos 23.5 = 1.91 \text{ kN}$$

Plošča je lahko na vmesni površini stika bodisi natezno ali pa tlačno obremenjena. Za kolenski spoj velja, da je plošča v smeri osi  $x$  natezno obremenjena, v smeri osi  $y$  pa tlačno (glej sliko 49).



Slika 49: Komponente projektne sile v kreppljasti plošči.

Plošča prenaša obremenitve v smeri osi  $x$  in  $y$  svojo odpornostjo vzporedno ali pravokotno na glavne smeri plošče. Projektne nosilnosti kreppljaste plošče v smeri osi  $x$  oziroma  $y$  izračunamo s pomočjo enačb (41)-(47).

$$F_{x,Rk} = \max \left\{ \begin{array}{l} |f_{n,0,k} l \sin(\gamma - \gamma_0 \sin(2\gamma))| \\ |f_{v,0,k} l \cos \gamma| \end{array} \right\}$$

$$= \max \left\{ \begin{array}{l} |1.70 \cdot 16.30 \cdot \sin(23.5 - (-5) \cdot \sin(2 \cdot 23.5))| = 12.65 \\ |0.78 \cdot 16.30 \cdot \cos 23.5| = 11.66 \end{array} \right\} = 12.65 \text{ kN}$$

$$f_{n,0,k} = f_{t,0,k} = 1.70 \text{ kN/cm}$$

$$F_{x,Rd} = \frac{F_{x,Rk}}{\gamma_s} \cdot k_{mod} = \frac{12.65}{1.15} \cdot 1.0 = 11.00 \text{ kN}$$

$$F_{y,Rk} = \max \left\{ \begin{array}{l} |f_{n,90,k} l \cos \gamma| \\ k f_{v,90,k} l \sin \gamma \end{array} \right\}$$

$$= \max \left\{ \begin{array}{l} |0.93 \cdot 16.30 \cdot \cos 23.5| = 13.90 \text{ kN} \\ 2.24 \cdot 0.41 \cdot 16.30 \cdot \sin 23.5 = 5.97 \text{ kN} \end{array} \right\} = 13.90 \text{ kN}$$

$$f_{n,90,k} = f_{c,90,k} = 0.93 \text{ kN/cm}$$

$$k = 1 + k_v \sin(2\gamma) = 1.0 + 1.7 \cdot \sin(2 \cdot 23.5) = 2.24 \quad (\text{za } F_{x,Ed} > 0)$$

$$F_{y,Rd} = \frac{F_{y,Rk}}{\gamma_s} \cdot k_{mod} = \frac{13.90}{1.15} \cdot 1.0 = 12.09 \text{ kN}$$

Ugotovimo, da je pri izbrani dimenziji in legi kreppljaste plošče izpolnjen tudi pogoj (36), to pomeni, da nosilnost kreppljaste plošče na stiku med lesenima elementoma ni prekoračena. Omenjeno kontrolo imenujemo Kontrola 3.

Kontrola 3:

$$\left(\frac{F_{x,Ed}}{F_{x,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{y,Ed}}{F_{y,Rd}}\right)^2 = \left(\frac{3.81}{11.00}\right)^2 + \left(\frac{1.91}{12.09}\right)^2 = \underline{0.145} \leq 1,0$$

### **6.1.3 Kontrola cepilnih sil**

Ker v obravnavanem kolenskem spoju ni nateznih obremenitev, ki bi delovale pravokotno na vlakna lesa, je kontrola razcepa opuščena.



## 6.2 Kontrola nosilnosti s pomočjo izdelanega programskega orodja v programskem okolju Microsoft Excel in primerjava rezultatov

Podroben opis uporabe programskega orodja smo opisali že v Poglavlju 5.4. Tukaj predstavimo le rezultate računa za izbrano dimenzijo in lego krempljaste plošče. Krempljasta plošča je dimenzij  $L/H = 150/70$  mm in je postavljena tako, da je geometrijsko težišče plošče (točka T) od točke T', ki označuje središče spoja med lesenima elementoma, oddaljeno za  $\Delta x = 4$  cm in  $\Delta y = 2$  cm (dimenzije in lega plošče ustrezajo podatkom iz »peš« računa).

Izpis rezultatov podajamo v prilogi B.

Ugotovimo, da so geometrijske karakteristike efektivnih stičnih površin med ploščo in lesenima elementoma, ki jih je izračunal program, skoraj identične vrednostim, ki smo jih izračunali s programom AutoCAD in uporabili pri »peš« postopku. Primerjavo podajamo v preglednici 16.

Preglednica 16: Geometrijske karakteristike efektivnih stičnih površin, izračunane s programom v Excelu (levo) in s pomočjo AutoCAD-a (desno).

GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE			ELEMENT 1		ELEMENT 2	
	Element 1	Element 2				
$A_{ef,j}$ [cm <sup>2</sup> ]	38,80	47,91	$A_{ef,j}$	38.80 cm <sup>2</sup>	$A_{ef,j}$	47.90 cm <sup>2</sup>
$W_p$ [cm <sup>3</sup> ]	52,35	68,87	$x_{T,j}$	2.29 cm	$x_{T,j}$	-2.55 cm
$I_p$ [cm <sup>3</sup> ]	483,78	697,51	$y_{T,j}$	-1.82 cm	$y_{T,j}$	1.35 cm
$l$ [cm]	16,30		$I_{Tx,j}$	47.86 cm <sup>4</sup>	$I_{Tx,j}$	110.90 cm <sup>4</sup>
$I_{Tx}$ [cm <sup>3</sup> ]	47,86	110,90	$I_{Ty,j}$	435.85 cm <sup>4</sup>	$I_{Ty,j}$	585.95 cm <sup>4</sup>
$I_{Ty}$ [cm <sup>3</sup> ]	435,92	586,60	$e_j$	2.34 cm	$e_j$	2.49 cm
$x_T$ [cm]	2,29	-2,55	$r_{max,j}$	9.24 cm	$r_{max,j}$	10.12 cm
$y_T$ [cm]	-1,82	1,35	$\alpha_j$	23.5°	$\alpha_j$	23.5°
$e$ [cm]	2,34	2,49	$\beta_j$	23.5°	$\beta_j$	0°
$r_{max}$ [cm]	9,24	10,13	$\gamma_j$	23.5°	$\gamma_j$	23.5°
$I_v$ [cm <sup>3</sup> ]	175,83	198,01	$l$	16.30 cm		
$I_w$ [cm <sup>3</sup> ]	638,76	898,54				

Tudi primerjava računskih kontrol nosilnosti spoja pokaže (Kontrola 1, Kontrola 2 in Kontrola 3 v preglednici 17), da se rezultati po obeh postopkih skorajda ujemajo. Manjša odstopanja so posledica zaokroževanj. Lahko zaključimo, da je izdelan program v programskem okolju Microsoft Excel učinkovito orodje za projektiranje kolenskega spoja, kjer za zvezo uporabimo krempljasto ploščo, in uspešno nadomešča zamuden »peš« postopek računa.

Preglednica 17: Kontrole nosilnosti kolenskega spoja s pomočjo izdelanega programskega orodja v Excelu oziroma s »pešč« računom.

	Excel	»pešč«
Kontrola 1	0.903	0.904
Kontrola 2	0.853	0.845
Kontrola 3	0.145	0.145

### 6.3 Vpliv izbire vrste krempljaste plošče na nosilnost kolenskega spoja

Izdelano programsko orodje v nadaljevanju uporabimo za analizo vpliva vrste krempljaste plošče na nosilnost kolenskega spoja. Pri tem lego in dimenzije krempljaste plošče ne spreminjamo ( $L/H = 150/70$  mm). Spreminja pa se debelina krempljaste plošče  $d$ . Pri analizi smo uporabili krempljaste plošče proizvajalca Wolf System in MiTek Inc [20,21]. V preglednici 18 podajamo trdnostne karakteristike za različne tipe krempljastih plošč omenjenih proizvajalcev.

Preglednica 18: Karakteristične trdnosti različnih tipov krempljastih plošč.

		Wolf System			MiTek				
		101	12N	15N	GNT100S	M16S	GNT150S	TOP W	
1	$d =$	1,0	1,25	1,5	1,0	1,5	1,5	1,3	[mm]
2	$f_{a,0,0,k} =$	0,294	0,180	0,231	0,263	0,232	0,267	0,365	[kN/cm <sup>2</sup> ]
3	$f_{a,90,90,k} =$	0,131	0,101	0,130	0,152	0,183	0,156	0,196	[kN/cm <sup>2</sup> ]
4	$f_{t,0,k} =$	1,70	2,53	3,20	2,11	4,60	3,35	2,52	[kN/cm]
5	$f_{c,0,k} =$	0,85	1,75	2,10	0,77	1,27	1,30	1,19	[kN/cm]
6	$f_{v,0,k} =$	0,78	0,83	1,06	0,75	0,86	0,98	1,16	[kN/cm]
7	$f_{t,90,k} =$	1,39	1,60	2,00	1,44	1,56	1,31	1,81	[kN/cm]
8	$f_{c,90,k} =$	0,93	0,97	1,51	0,75	0,70	0,96	1,31	[kN/cm]
9	$f_{v,90,k} =$	0,41	0,78	0,87	0,56	0,70	0,92	0,84	[kN/cm]
10	$k_1 =$	-0,0049	-0,0075	-0,0221	0,002	-0,0174	-0,012	0,006	
11	$k_2 =$	0,00258	-0,0006	0,0031	-0,006	-0,004	-0,008	-0,025	
12	$\alpha_0 =$	60	30	38	27	30,3	30	42	[°]
13	$k_v =$	1,7	0,23	0,7	0,8	0,23	0,53	0,71	
14	$\gamma_0 =$	-5	25	16	2,5	6,8	17	14	[°]

Opazimo, da so nosilnosti krempljastih plošč zelo različne. Če primerjamo trdnostne karakteristike, ki so pomembne pri računu sidrne nosilnosti krempljaste plošče (točke 2, 3, 10, 11 in 12 v preglednici 18), opazimo, da imata plošči Top W in Wolf 101 bistveno večji karakteristični sidrni nosilnosti napram ostalim ploščam, preostale trdnostne karakteristike pa so precej manjše. Pri analizi kolenskega spoja smo ugotovili, da nosilnost krempljaste plošče kot jeklenega materiala ni merodajna, ker je običajno v kolenskih spojih dolžina stika relativno velika. Zato sta ti dve krempljasti plošči najbolj primerni za kolenski spoj. Poleg tega je njuna debelina manjša od debelin ostalih krempljastih plošč, kar pomeni tudi prihranek pri materialu. Do podobnih ugotovitev smo prišli tudi v 3. poglavju.

V primerih stikov, ko je merodajna nosilnost jeklene ploščice kot jeklenega materiala, pa uporabljamo debelejšje ploščice, ki imajo večjo nosilnost. Primer takih krempljastih plošč sta plošči Wolf 15N in M16S, ki imata zelo veliko natezno, tlačno in strižno nosilnost. V splošnem velja, da so trdnostne karakteristike pri debelejših ploščah večje, zanimivo pa je, da za prenos obremenitev na območju stičnih površin ne potrebujemo debelih krempljastih plošč. Plošči Top W in Wolf 101 sta tanjši od ostalih plošč, njuna sidrna nosilnost pa je bistveno večja. Kontrole nosilnosti kolenskega spoja podajamo v preglednici 19.

Preglednica 19: Kontrola nosilnosti kolenskega spoja za različne tipe krempljastih plošč.

	WOLF SYSTEM			MiTek			
	101	12N	15N	GNT100S	M16S	GNT150S	TOP W
Kontrola 1	0,903	<b>2,449</b>	<b>1,586</b>	<b>1,036</b>	<b>1,461</b>	<b>1,178</b>	0,548
Kontrola 2	0,853	<b>2,206</b>	<b>1,339</b>	0,896	<b>1,263</b>	0,997	0,446
Kontrola 3	0,145	0,148	0,086	0,157	0,078	0,113	0,076

## 7 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo obravnavali kolenske spoje pri lesenih konstrukcijah, kjer elemente med seboj povezujemo s krempljastimi ploščami. V splošnem se krempljaste plošče uporabljajo za stikovanje lesenih prefabriciranih elementov. Tako znatno zmanjšamo potrebno delo na gradbišču in pospešimo samo gradnjo. Obstajajo različne vrste lesenih prefabriciranih elementov, ki so spojeni s krempljastimi ploščami in se uporabljajo za različne namene. V diplomski nalogi smo na primeru prefabricirane strešne konstrukcije predstavili različne spoje s krempljastimi ploščami. Za proizvodnjo prefabriciranih elementov s krempljastimi ploščami veljajo posebne zahteve, ki jih določa standard SIST EN 14250:2010. Pri primerjavi spojev v strešni konstrukciji smo ugotovili, da ima čelni spoj veliko nosilnost, njegova togost je primerljiva z lepljenimi nosilci, kolenski spoj pa se obnaša povsem duktilno, njegova nosilnost pa je manjša. V diplomski nalogi smo se osredotočili na analizo kolenskih spojev.

Parametre, ki vplivajo na nosilnost spoja s krempljastimi ploščami, lahko razvrstimo v tri skupine. V prvo skupino uvrstimo mehanske in geometrijske lastnosti sestavnih elementov, kot je vrsta krempljaste plošče, trdnostni razred lesenih elementov, višina lesenih elementov in dimenzije krempljaste plošče. V drugo skupino parametrov uvrščamo geometrijske podatke o stiku (koti  $\alpha$ ,  $\beta$  in  $\gamma$ ), ki so odvisni od vrste spoja. V tretjo skupino pa uvrščamo parametre, ki določajo lego krempljaste plošče. V diplomski nalogi sta to parametra  $\Delta x$  in  $\Delta y$ , ki določata oddaljenost središča krempljaste plošče od središča spoja.

Skladno s standardom SIST EN 1995-1-1:2005 moramo v spoju preveriti sidrno nosilnost krempljastih plošče in nosilnost plošče kot jeklenega materiala. V primeru, da v spoju nastopajo natezne obremenitve, moramo preveriti še razcepno nosilnost lesenega elementa. Zanimivo je, da na sidrno nosilnost spoja debelina krempljastih plošč nima takega vpliva kot ga ima sama vrsta krempljaste plošče.

V okviru diplomske naloge smo s pomočjo uporabniške aplikacije Microsoft Excel izdelali pripomoček za kontrolo nosilnosti spoja lesenih elementov, kjer za vezno sredstvo uporabimo krempljasto ploščo. Zaradi obsežnosti dela smo se omejili le na analizo kolenskega spoja, kjer običajno stikujemo spodnji in zgornji pas. Opravljeno delo predstavlja dobro osnovo tudi za analizo preostalih spojev. V odvisnosti od velikosti in lege krempljaste plošče nam program najprej izračuna geometrijske karakteristike efektivnih stičnih površin med ploščo in elementi ter dimenzijo plošče, merjene vzdolž stične črte. Glede na podano obremenitev v zgornjem pasu nam program izračuna tudi obremenitev v krempljasti plošči ter obremenitve v središču efektivnih stičnih površin. Na koncu pa izvede kontrolo sidrne nosilnosti krempljaste plošče in kontrolo nosilnosti krempljaste plošče kot jeklenega materiala. Program nam omogoča tudi grafični prikaz obravnavanega kolenskega spoja. Ugotovili smo, da smo z izdelanim orodjem neprimerno učinkovitejši pri projektiranju kolenskega spoja v primerjavi s »peš« postopkom računa, kjer največji zalogaj predstavlja določitev geometrijskih karakteristik stičnih površin. Običajno je to iterativen postopek. V programu lahko z navigacijskima gumboma spreminjamo lego plošče in s pritiskom na gumb »IZRAČUN« sproti preverjamo računske kontrole nosilnosti stika. S primerjavo rezultatov smo ugotovili, da so izračuni v programu pravilni.

Vpliv zasuka krepljaste plošče na nosilnost spoja smo zanemarili. Upoštevali smo, da je glavna smer krepljaste plošče vedno vzporedna z enim od lesenih elementov v stiku. Pri pregledu literature nismo zasledili primera, da bi bila krepljaste plošča zasukana glede na lesena elementa. Vsekakor pa analiza stika z dodatno možnostjo zasuka krepljaste plošče predstavlja izziv pri nadaljnjem delu.

## VIRI

- [1] Component industry Timeline. The Structural Building Component industry. 2011. [http://www.sbcleg.com/common/kb/KB\\_SingleWebPage.php?KBID=6127](http://www.sbcleg.com/common/kb/KB_SingleWebPage.php?KBID=6127) (Pridobljeno 4.5.2011.)
- [2] Sanford, A.C. 1958. Grip plate for truss. Patentna prijava: št. prijave 2.827.676. 1958-03-25. United States Patent Office.
- [3] Karadelis, J.N., Brown, P. 2000. Punched metal plate timber fastener under fatigue loading. *Construction and Building Materials* 14, 2: 99-108.
- [4] The Encyclopedia of trusses. 2003. Alpine Engineered Products Inc. <http://www.alpeng.com/images/stories/pdfs/EOT.pdf> (Pridobljeno 4.5.2011.)
- [5] Dokončane stanovanjske stavbe po nadstropjih, pretežno uporabljenem gradbenem materialu in napeljavah centralnega ogrevanja ter plina, 2004-2010. Statistični letopis 2005-2011. Ljubljana, Statistični urad Republike Slovenije. [http://www.stat.si/publikacije/pub\\_letopis\\_prva.asp](http://www.stat.si/publikacije/pub_letopis_prva.asp) (Pridobljeno 20.1.2012.)
- [6] SIST EN 1995-1-1:2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1.del: Splošna pravila in pravila za stavbe.
- [7] Metal web floor system easi-joist. 2007. Wolf Systems GmbH. <http://downloads.wolfssystem.co.uk/default.aspx?moid=591> (Pridobljeno 21.6.2011.)
- [8] AV Birch 3500M Table Press. Wolf Systems GmbH. 2011. <http://www.wolf-system.co.uk/hardwarepresses.asp> (Pridobljeno 16.11.2011.)
- [9] 5 or 10 tone portable site press. MiTek Industries AB. 2011. <http://www.mii.com/site/frameset.aspx?siteid=7&langid=3081&main=%2Fpage%2Fopen%2Easp%3Fpid%3D2301> (Pridobljeno 16.11.2011.)
- [10] SIST EN 14250:2010. Lesene konstrukcije – Zahteve za proizvodnjo predhodno izdelanih konstrukcijskih elementov s kovinskimi ježastimi ploščami.
- [11] Nielsen, J. 2003. Trusses and joints with punched metal plate fasteners. V: Thelandersson, S. (ur.), Larsen, H. J. (ur.). 2003. *Timber Engineering*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd: str. 365-382.
- [12] Gupta, R. 1990. Destructive testing of metal-plate-connected wood truss joints. *Journal of Structural Engineering* 116, 7: 1971-1982.
- [13] Racher, P. 1995. Moment resisting connection. V: *Proceedings of Timber Engineering STEP I*, C16/1-C16/10, Center Hount.
- [14] SIST EN 1075:2000. Lesene konstrukcije – Metode preizkušanja – Spoji s kovinskimi ježastimi ploščami.
- [15] Potrjevanje skladnosti gradbenih proizvodov (Na podlagi postopka P.C.10-002: izdaja 1). 2002. Zavod za gradbeništvo Slovenije [http://www.zag.si/dl/cert\\_potrjevanje.pdf](http://www.zag.si/dl/cert_potrjevanje.pdf) (Pridobljeno 21.11.2011.)
- [16] SIST EN 14545:2008. Lesene konstrukcije – Spojniki (konektorji) – Zahteve.
- [17] Nerjavna jekla: Skupina materialov 2.1, 2.2, 2.3. Precision and Dormer Brands. <http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Internet/Spanish/s004464.nsf/Alldocs/P>

- [roduct\\*2DMachiningSolutions\\*2DPDF\\*2AAMG11\\*2D13/\\$file/2.1-2.3SI.pdf](#)  
(Pridobljeno 4.5.2011.)
- [18] Acroni d.o.o. 2011.  
<http://www.acroni.si/?subpageid=3> (Pridobljeno 21.11.2011.)
- [19] SIST EN 1995-1-1:2005/A101:2006. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij - 1-1.del: Splošna pravila in pravila za stavbe - Nacionalni dodatek
- [20] Punched Metal Plate Fasteners for Structural Timber Products. MiTek Industries AB. 2009.  
<http://www.mitekab.se/ccms.asp?pageID=323> (Pridobljeno 21.6.2011.)
- [21] Wolf Systems GmbH. 2011.  
[http://www.wolfsystem.de/en\\_de/Nailplates/Nailplate-types](http://www.wolfsystem.de/en_de/Nailplates/Nailplate-types)  
(Pridobljeno 20.10.2012.)
- [22] Muršič, M. 1993. Osnove tehniške mehanike 1, Statika. Ljubljana, Slovensko društvo za mehaniko: 325 str.
- [23] Dolenc, M. 2007, Uvod v Visual Basic za aplikacije (VBA) – VBA v programu Excel. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.  
<http://kgi.fgg.uni-lj.si/pouk/racinf/wp-content/uploads/vba-0708.pdf>  
(Pridobljeno 21.6.2011.)
- [24] Urtis, T. 2011. Excel VBA-Hour Trainer, Indianapolis, Wiley Publishing: 397 str.
- [25] Stanek, M., Turk G. 2002. Trdnost. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 37-40 str.  
<http://km.fgg.uni-lj.si/PREDMETI/Trdnost-OG/literat/ucbenik/trdnost1.pdf>  
(Pridobljeno 21.6.2011.)
- [26] Finkelstein, E. 2008. AutoCAD 2008 and AutoCAD LT 2008 Bible. Indianapolis, Wiley Publishing: 1296 str.

## PRILOGA A: ODVISNOST KARAKTERISTIČNE SIDRNE TRDNOSTI KREMLJASTE PLOŠČE V SMERI VLAKEN, V ODVISNOSTI OD KOTA $\alpha$

Vrednosti so izračunane za nekatere tipične krempljaste plošče podjetja MiTek Industries in Wolf System GmbH, katerih tehnična poročila so objavljena na internetu [8]. Karakteristične trdnosti so bile izračunane s pripomočkom, razvitim v tej diplomski nalogi. Vhodni podatki in rezultati so predstavljeni v spodnjih dveh preglednicah.

Preglednica A1: Trdnostne karakteristike krempljastih plošč.

	$f_{a,0,0}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$k_1$	$k_2$	$\alpha_0$ [°]
<b>Proizvajalec MiTek Industries AB</b>				
<b>GNT 100S</b>	0,263	0,002	-0,006	27
<b>GNT 150S</b>	0,267	-0,012	-0,008	30
<b>M16S</b>	0,232	-0,0174	-0,004	30,3
<b>Top W</b>	0,365	0,006	-0,025	42
<b>Proizvajalec Wolf System GmbH</b>				
<b>101</b>	0,294	-0,0049	0,00258	60
<b>12N</b>	0,180	-0,0075	-0,0006	30
<b>15N</b>	0,231	-0,0221	0,0031	38

Preglednica A2: Izračunane vrednosti sidrne trdnosti krempljaste plošče, obremenjene v smeri  $\alpha=0$ .

$f_{a,\alpha,0,k}$	$\alpha$							
	0	10	13,3	20	22,5	27	30	30,3
<b>MiTek Industries AB</b>								
<b>GNT 100S</b>	0,263	0,283	0,290	0,303	0,308	0,317	0,305	0,304
<b>GNT 150S</b>	0,267	0,147	0,107	0,027	-0,003	-0,057	-0,093	-0,099
<b>M16S</b>	0,232	0,058	0,001	-0,116	-0,160	-0,238	-0,290	-0,295
<b>Top W</b>	0,365	0,425	0,445	0,485	0,500	0,527	0,545	0,547
$f_{a,\alpha,0,k}$	$\alpha$							
	0	10	13,3	20	22,5	27	30	30,3
<b>Wolf System GmbH</b>								
<b>101</b>	0,294	0,245	0,229	0,196	0,184	0,162	0,147	0,146
<b>12N</b>	0,180	0,105	0,080	0,030	0,011	-0,023	-0,045	-0,047
<b>15N</b>	0,231	0,010	-0,063	-0,211	-0,266	-0,366	-0,432	-0,439

se nadaljuje...



... nadaljevanje Preglednice A2

$\alpha$								
38	40	42	50	60	66,7	70	80	90
<b>MiTek Industries AB</b>								
0,273	0,265	0,257	0,225	0,185	0,158	0,145	0,105	0,065
-0,253	-0,293	-0,333	-0,493	-0,693	-0,827	-0,893	-1,093	-1,293
-0,460	-0,503	-0,546	-0,717	-0,931	-1,074	-1,145	-1,359	-1,573
0,593	0,605	0,617	0,465	0,275	0,148	0,085	-0,105	-0,295
$\alpha$								
38	40	42	50	60	66,7	70	80	90
<b>Wolf System GmbH</b>								
0,108	0,098	0,088	0,049	0,000	-0,015	-0,023	-0,046	-0,070
-0,110	-0,126	-0,142	-0,207	-0,288	-0,342	-0,369	-0,450	-0,531
-0,609	-0,647	-0,685	-0,837	-1,027	-1,154	-1,217	-1,407	-1,597

## **PRILOGA B: IZPIS REZULTATOV IZ PROGRAMA ZA RAČUNSKI PRIMER**

JEŽEVKA:		PODATKI:		REZULTATI:	
L =	15,00	cm	$h_1 =$	6	cm ... višina elementa 1
H =	7,00	cm	$h_2 =$	8	cm ... višina elementa 2
d =	0,1	cm	$\delta =$	23,5	° ... kot med elementoma
$\Delta x =$	4	cm	c =	0,5	cm ... redukcija ob robu elementa
$\Delta y =$	2	cm	$\Delta =$	0,1	cm ... razmik med elementoma v smeri osi x
					<b>KONTROLA 1:</b> 0,903
					<b>KONTROLA 2:</b> 0,853
					<b>KONTROLA 3:</b> 0,145

### Nosilnost spoja s krempljastimi ploščami

Izbira materiala lesenih elementov:					
<b>ELEMENT 1</b>			<b>ELEMENT 2</b>		
Homogen les:	C24	$\rho_{m,1} =$	350	kg/m <sup>3</sup>	Homogen les:
		$k_{p,1} =$	1,00		C27
					$\rho_{m,2} =$
					370
					kg/m <sup>3</sup>
					$k_{p,2} =$
					1,03

Obtežba:		
$N_{2,Ed} =$	8	kN ... projektna tlačna sila v elementu 2 [kN]
$M_{2,Ed} =$	0,35	KNm ... projektni upogibni moment nad podporo v elementu 2 [kNm]
$k_{mod,les} =$	0,9	... modifikacijski faktor za lesen element

Geometrija efektivnih površin:		
<b>ELEMENT 2</b>		
$\alpha_2 =$	23,5	° ... kot med vzdolžno osjo krempljaste plošče in smerjo sile [°]
$\beta_2 =$	0	° ... kot med smerjo vlaken lesa in smerjo osne sile v elementu [°]
$\gamma_2 =$	23,5	° ... kot med vzdolžno osjo krempljaste plošče in stično ploskvo [°]
<b>ELEMENT 1</b>		
$\alpha_1 =$	23,5	° ... kot med vzdolžno osjo krempljaste plošče in smerjo sile [°]
$\beta_1 =$	23,5	° ... kot med smerjo vlaken lesa in smerjo osne sile v elementu [°]
$\gamma_1 =$	23,5	° ... kot med vzdolžno osjo krempljaste plošče in stično ploskvo [°]

Trdnostne lastnosti krempljaste plošče:		
$f_{a,0,0,k} =$	0,294	... nosilnost sidranja (bočna) na enoto površine plošče za kota $\alpha=0^\circ$ in $\beta=0^\circ$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
$f_{a,90,90,k} =$	0,131	... nosilnost sidranja (bočna) na enoto površine plošče za kota $\alpha=90^\circ$ in $\beta=90^\circ$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
$f_{t,0,k} =$	1,7	... natezna nosilnost plošče na enoto širine plošče za kot $\alpha=0^\circ$ [kN/cm]
$f_{c,0,k} =$	0,85	... tlačna nosilnost plošče na enoto širine plošče za kot $\alpha=0^\circ$ [kN/cm]
$f_{v,0,k} =$	0,78	... strižna nosilnost plošče na enoto širine plošče v smeri x [kN/cm]
$f_{t,90,k} =$	1,39	... natezna nosilnost plošče na enoto širine plošče za kot $\alpha=90^\circ$ [kN/cm]
$f_{c,90,k} =$	0,93	... tlačna nosilnost plošče na enoto širine plošče za kot $\alpha=90^\circ$ [kN/cm]
$f_{v,90,k} =$	0,41	... strižna nosilnost plošče na enoto širine plošče v smeri y [kN/cm]
$k_1 =$	-0,0049	... konstanta
$k_2 =$	0,00258	... konstanta
$\alpha_0 =$	60	... konstanta [°]
$k_v =$	1,7	... konstanta
$\gamma_0 =$	-5	... konstanta [°]
$k_1, k_2$ in $\alpha_0$ so konstante s katerimi zajamemo vpliv oblike krempljaste plošče na sidrno kapaciteto plošče $k_v, \gamma_0$ sta konstanti s katerima zajamemo vpliv oblike krempljaste plošče na strižno nosilnost		
<b>ELEMENT 1</b>		
$f_{a,\alpha,\beta,k,1} =$	0,229	[kN/cm <sup>2</sup> ] ... karakteristična sidrna (bočna) trdnost na enoto površine plošče za kota $\alpha$ in $\beta$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
$f_{a,\alpha,0,k,1} =$	0,179	[kN/cm <sup>2</sup> ] ... karakteristična bočna (sidrna) trdnost plošče vzporedno z vlakni lesa
<b>ELEMENT 2</b>		
$f_{a,\alpha,\beta,k,2} =$	0,235	[kN/cm <sup>2</sup> ] ... karakteristična sidrna (bočna) trdnost na enoto površine plošče za kota $\alpha$ in $\beta$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
$f_{a,\alpha,0,k,2} =$	0,179	[kN/cm <sup>2</sup> ] ... karakteristična bočna (sidrna) trdnost plošče vzporedno z vlakni lesa

**Določitev nosilnosti zveze:**

## i) Bočne (sidrne) nosilnosti ježastih plošč

**ELEMENT 1**

$$\begin{aligned} \tau_{F,d,1} &= 0,103 \quad [\text{kN/cm}^2] \quad \dots \text{ projektna sidrna napetost na posamezno krempljasto ploščo zaradi sile } F_{A,Ed} \quad [\text{kN/cm}^2] \\ F_{A,Ed,1} &= 4,00 \quad \text{kN} \quad \dots \text{ projektna sila na posamezno ploščo, ki deluje v središču efektivne površine} \quad [\text{kN}] \\ A_{ef,1} &= 38,80 \quad \text{cm}^2 \quad \dots \text{ efektivna površina plošče} \quad [\text{cm}^2] \\ \tau_{M,d,1} &= -0,152 \quad [\text{kN/cm}^2] \quad \dots \text{ projektna sidrna napetost na posamezno krempljasto ploščo zaradi momenta } M_{A,Ed} \quad [\text{kNcm/cm}^2] \\ M_{A,Ed,1} &= -7,93 \quad \text{kNcm} \quad \dots \text{ projektni moment, ki deluje na posamezno ploščo (v središču efektivne površine)} \\ W_{p,1} &= 52,35 \quad \text{cm}^3 \quad \dots \text{ odpornostni moment krempljaste plošče} \quad [\text{cm}^3] \\ \gamma_m &= 1,25 \quad \dots \text{ delni varnostni faktor za krempljaste plošče} \end{aligned}$$

**KONTROLA 1:**

$$\left( \frac{\tau_{F,d}}{f_{a,\alpha,\beta,d}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{M,d}}{f_{a,0,0,d}} \right)^2 = 0,903 \leq 1,0$$

$$f_{a,\alpha,\beta,d,1} = 0,165 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

$$f_{a,0,0,d} = 0,212 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

**ELEMENT 2**

$$\begin{aligned} \tau_{F,d,2} &= 0,083 \quad [\text{kN/cm}^2] \quad \dots \text{ projektna sidrna napetost na posamezno krempljasto ploščo zaradi sile } F_{A,Ed} \quad [\text{kN/cm}^2] \\ F_{A,Ed,2} &= 4,00 \quad \text{kN} \quad \dots \text{ projektna sila na posamezno ploščo, ki deluje v središču efektivne površine} \quad [\text{kN}] \\ A_{ef,2} &= 47,91 \quad \text{cm}^2 \quad \dots \text{ efektivna površina plošče} \quad [\text{cm}^2] \\ \tau_{M,d,2} &= 0,165 \quad [\text{kN/cm}^2] \quad \dots \text{ projektna sidrna napetost na posamezno krempljasto ploščo zaradi momenta } M_{A,Ed} \quad [\text{kNcm/cm}^2] \\ M_{A,Ed,2} &= 11,39 \quad \text{kNcm} \quad \dots \text{ projektni moment, ki deluje na posamezno ploščo (v središču efektivne površine)} \\ W_{p,2} &= 68,87 \quad \text{cm}^3 \quad \dots \text{ odpornostni moment krempljaste plošče} \quad [\text{cm}^3] \\ \gamma_m &= 1,25 \quad \dots \text{ delni varnostni faktor za krempljaste plošče} \end{aligned}$$

**KONTROLA 2:**

$$\left( \frac{\tau_{F,d}}{f_{a,\alpha,\beta,d}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{M,d}}{f_{a,0,0,d}} \right)^2 = 0,853 \leq 1,0$$

$$f_{a,\alpha,\beta,d,2} = 0,170 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

$$f_{a,0,0,d} = 0,212 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

## ii) Nosilnost krempljaste plošče

$$\begin{aligned} F_{x,Ed} &= 3,81 \quad \text{kN} \quad \dots \text{ projektna sila v posamezni plošči v smeri osi } x \quad [\text{kN}] \\ F_{y,Ed} &= 1,91 \quad \text{kN} \quad \dots \text{ projektna sila v posamezni plošči v smeri osi } y \quad [\text{kN}] \\ l &= 16,30 \quad \text{cm} \quad \dots \text{ dolžina stika} \quad [\text{cm}] \\ F_{x,Rd} &= 11,00 \quad \text{kN} \quad \dots \text{ projektna nosilnost v posamezni plošči v smeri osi } x \quad [\text{kN}] \\ F_{y,Rd} &= 12,09 \quad \text{kN} \quad \dots \text{ projektna nosilnost v posamezni plošči v smeri osi } y \quad [\text{kN}] \\ F_{x,Rk} &= 12,65 \quad \text{kN} \quad \dots \text{ karakteristična nosilnost v posamezni plošči v smeri osi } x \quad [\text{kN}] \\ F_{y,Rk} &= 13,90 \quad \text{kN} \quad \dots \text{ karakteristična nosilnost v posamezni plošči v smeri osi } y \quad [\text{kN}] \\ f_{n,0,k} &= 1,70 \quad \text{kN/cm} \quad \dots \text{ nosilnost stika v smeri daljše stranice plošče} \\ f_{n,90,k} &= 0,93 \quad \text{kN/cm} \quad \dots \text{ nosilnost stika pravokotno na smer daljše stranice plošče} \\ k &= 2,24 \quad \dots \text{ koeficient} \\ \gamma_m &= 1,15 \quad \dots \text{ delni varnostni faktor za jekleno ploščico} \end{aligned}$$

**KONTROLA 3:**

$$\left( \frac{F_{x,Ed}}{F_{x,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{F_{y,Ed}}{F_{y,Rd}} \right)^2 = 0,145 \leq 1,0$$