

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Seifert, R., 2016. Sovprežna povezava jeklenega nosilca in lesene plošče. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Može, P., somentor Lopatič, J.): 65 str.
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5889/>

Datum arhiviranja: 27-09-2016

University
of Ljubljana
Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Seifert, R., 2016. Sovprežna povezava jeklenega nosilca in lesene plošče. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Može, P., co-supervisor Lopatič, J.): 65 pp.
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5889/>

Archiving Date: 27-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

ROK SEIFERT

**SOVPREŽNA POVEZAVA JEKLENEGA NOSILCA IN
LESENE PLOŠČE**

Diplomska naloga št.: 596/SOG

**SHEAR CONNECTION BETWEEN STEEL BEAM AND
TIMBER PANEL**

Graduation thesis No.: 596/SOG

Mentor:

doc. dr. Primož Može

Somentor:

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 20. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Spodaj podpisani/-a študent/-ka **Rok Seifert**, vpisna številka **26106748**, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Sovprežna povezava jeklenega nosilca in lesene plošče**

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: Ljubljani

Datum: 29.8.2016

Podpis študenta/-ke:

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.014.2:624.072.2+624.011.1:624.073(043.2)
Avtor:	Rok Seifert
Mentor:	doc. dr. Primož Može
Somentor:	izr. prof. dr. Jože Lopatič
Naslov:	Sovprežna povezava jeklenega nosilca in lesene plošče
Tip dokumenta:	Diplomsko delo, visokošolski strokovni študij
Obseg in oprema:	65 strani, 14 preglednic, 79 slik
Ključne besede:	sovprežnost, jeklo, les, preizkus, strižna povezava

POVZETEK

V diplomski nalogi je obravnavano obnašanje dveh upogibno obremenjenih sovprežnih nosilcev. Prvi je sestavljen iz IPE140 jeklenega nosilca in enosmerno lepljene (GL) lesene plošče, drugi pa prav tako iz IPE140 nosilca in križno lepljene (CLT) plošče. Naloga obravnava postopek izdelave in sestavljanja nosilcev, pripravo na test in upogibna testa. Predstavljeni so rezultati preizkusov in obnašanje nosilcev v elastičnem območju na podlagi geometrijskih in materialnih karakteristik, določenih iz izmerjenih podatkov na testu. Iz povosov in po γ -postopku je izračunana stopnja sovprežne povezave. Izračunana je tudi največja nosilnost v plastičnem območju. Cilj diplomskega dela je ugotoviti za koliko se poveča največja nosilnost sovprežnega nosilca v primerjavi z enakim nosilcem brez strižne povezave.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMETALISTIC INFORMATION

UDC: 624.014.2:624.072.2+624.011.1:624.073(043.2)
Author: Rok Seifert
Supervisor: Assist. Prof. Primož Može, Ph.D.
Co-advisor: Assoc. Prof. Jože Lopatič, Ph.D.
Title: Shear connection between steel beam and timber panel
Document type: Graduation thesis – Higher professional studies
Notes: 65 pages, 14 tables, 79 pictures
Key words: composite, steel, timber, test, shear connection

ABSTRACT

This thesis deals with experimental tests of two simply supported composite beams (steel - timber) loaded in bending. The first beam is assembled of a steel beam IPE140 and a glued laminated (GL) timber plate. The second beam has equal steel cross-section and a cross-laminated timber (CLT) plate. The thesis focuses on the manufacturing and construction procedures of the beams, the preparation for testing and on the analysis of test results. The missing material properties are calculated from the test results. The degree of shear connection is calculated from the test results using the γ -procedure. The maximum resistance in ultimate limit state that considers yielding of the materials is calculated as well. The objective of this thesis is to determine the increase of stiffness and resistance of the composite steel-to-timber beam in comparison to the same cross-section without shear connection.

ZAHVALA

Dolga je bila pot do cilja!

Za pomoč, potrpežljivost, dobre nasvete in ažurnost se iskreno zahvaljujem mentorju, doc. dr. Primožu Možetu. Brez vas v tako kratkem času ne bi šlo!

Zahvaljujem se tudi somentorju, izr. prof. dr. Jožetu Lopatiču za vse nasvete in pomoč pri izvedbi testov.

Najlepša hvala podjetjema CBD d.o.o. in LAMO d.o.o. za velikodušno podarjeni leseni plošči.

Hvala vsem sošolkam in sošolcem, za vse skupne ure študija in zabave.

Hvala Simonu za tehnično podporo, Janiju za prevode in izposajo fotografske opreme in seveda Mateju za vse dolge ure nesebične prijateljske pomoči. Podnevi in ponoči!

Posebna zahvala gre očetu in mami. Čeprav sta včasih že obupala nad mano, sta vseeno potrpežljivo dočkala zaključek mojega študija in me pri tem stoddostno podpirala.

Na koncu pa še zahvala tebi Špela. Hvala za vse vzpodbudne besede, potrpežljivost, motivacijo in vso ljubezen. Uspelo mi je!

Vsebina

1	UVOD.....	1
2	PREIZKUŠANCA.....	5
2.1.	OPREMA PREIZKUŠANCEV	6
2.2.	PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV	13
3	PREIZKUŠANJE SOVPREŽNIH NOSILCEV.....	18
3.1.	PREIZKUS NOSILCA Z GL PLOŠČO	18
3.2.	PREIZKUS NOSILCA S CLT PLOŠČO	20
4	ANALIZA PREIZKUSA ZA NOSILEC Z GL PLOŠČO.....	22
4.1.	POMIKI.....	22
4.2.	ZDRSI MED JEKLENIM NOSILCEM IN LESENO PLOŠČO.....	26
4.3.	DEFORMACIJE	26
5	ANALIZA PREIZKUSA ZA NOSILEC S CLT PLOŠČO.....	30
5.1.	POMIKI.....	30
5.2.	ZDRSI	34
5.3.	DEFORMACIJE	34
6	NOTRANJE STATIČNE VELIČINE.....	38
6.1.	STATIČNI MODEL	38
6.2.	NOSILEC Z GL PLOŠČO.....	39
6.3.	NOSILEC S CLT PLOŠČO.....	45
7	DISKUSIJA	50
7.1.	NOSILEC V ELASTIČNEM OBMOČJU.....	50
7.1.1.	NOSILEC Z GL PLOŠČO	50
7.1.2.	NOSILEC S CLT PLOŠČO.....	54
7.2.	NOSILEC V PLASTIČNEM OBMOČJU.....	57
7.2.1.	NOSILEC Z GL PLOŠČO.....	58
7.2.2.	NOSILEC S CLT PLOŠČO.....	61
8	ZAKLJUČEK.....	64
	VIRI.....	65

Kazalo preglednic

Preglednica 1: Oznake merilnih mest in opremljenost preizkušancev	13
Preglednica 2: Zapisnik testa za nosilec z GL ploščo	19
Preglednica 3: Zapisnik testa za nosilec s CLT ploščo	20
Preglednica 4: Izračun notranjega momenta pri 20 kN	43
Preglednica 5: Izračun notranjega momenta pri 40 kN	44
Preglednica 6: Izračun notranjega momenta pri 60 kN	44
Preglednica 7: Izračun notranjega momenta pri 75 kN	44
Preglednica 8: Izračun notranjega momenta pri 20 kN	48
Preglednica 9: Izračun notranjega momenta pri 40 kN	48
Preglednica 10: Izračun notranjega momenta pri 60 kN	48
Preglednica 11: Določitev potrebne strižne povezanosti γ iz pomikov za nosilec z GL ploščo	51
Preglednica 12: Določitev potrebne strižne povezanosti γ iz pomikov za nosilec s CLT ploščo	55
Preglednica 13: Izračun notranjega momenta pri 147 kN za nosilec z GL ploščo (mejno stanje).....	58
Preglednica 14: Izračun notranjega momenta pri 104 kN za nosilec s CLT ploščo (mejno stanje).....	61

Kazalo slik

Slika 1: Prereza obeh nosilcev z dimenzijami.....	1
Slika 2: Sistem obremenjevanja v pogledu	2
Slika 3: Sistem obremenjevanja v tlorisu (za oba nosilca).....	2
Slika 4: Razgrajen 3D model nosilca	2
Slika 5: Dimenzije in postavitve jeklenih ploščic pri nosilcu z GL ploščo (v mm).....	3
Slika 6: Dimenzije in postavitve jeklenih ploščic pri nosilcu s CLT ploščo (v mm).....	3
Slika 7: Sistem obremenjevanja	4
Slika 8: Nosilec z GL ploščo.....	5
Slika 9: Nosilec s CLT ploščo.....	6
Slika 10: Položaj merilnih lističev na jeklenem nosilcu.....	7
Slika 11: Položaj merilnih lističev na CLT (levo) in GL (desno) plošči zgoraj	7
Slika 12: Položaj induktivnih merilcev (levo) in merilec zdrsa (desno)	8
Slika 13: Prerez nosilca z GL ploščo z dimenzijami in položajem merilnih lističev	8
Slika 14: Prerez nosilca z GL ploščo z oznakami merilnih lističev	9
Slika 15: Tloris nosilca z GL ploščo - merilni lističi zgoraj	9
Slika 16: Tloris nosilca z GL ploščo - merilni lističi spodaj	9
Slika 17: Tloris nosilca z GL ploščo – induktivci	10
Slika 18: Pogled nosilca z GL ploščo – induktivci	10
Slika 19: Prerez nosilca s CLT ploščo z dimenzijami in položajem merilnih lističev	11
Slika 20: Prerez nosilca s CLT ploščo z oznakami merilnih lističev	11
Slika 21: Tloris nosilca s CLT ploščo - merilni lističi zgoraj	12
Slika 22: Tloris nosilca s CLT ploščo - merilni lističi spodaj	12
Slika 23: Tloris nosilca s CLT ploščo – induktivci	12
Slika 24: Prerez nosilca s CLT ploščo – induktivci	12
Slika 25: Strojna obdelava ploščic (levo) in detajl sovprežnega spoja (desno).....	14
Slika 26: Jekleni nosilci (levo) in varjenje ploščic (desno).....	15
Slika 27: Razstavljeni nosilci.....	15
Slika 28: Araldite smola in trdilec (levo) in silikoniran spoj (desno)	16
Slika 29: Nalivanje dvokomponentne smole v aplikator (levo) in aplikacija v vtorec (desno)	17
Slika 30: Vmesno stanje, nosilec na meji elastičnosti pri 81 kN.....	19
Slika 31: Vmesno stanje - nosilec na meji elastičnosti pri 59 kN	21
Slika 32: Diagram sila-pomik	23
Slika 33: Diagram sila-pomik sredina razpona	23
Slika 34: Diagram sila-pomik četrtina razpona.....	24
Slika 35: Sistem obremenjevanja (levo) in odziv preizkušanca - upogib pri 138 kN (desno)	24

Slika 36: Odziv preizkušanca -po poružitvi lesene plošče	25
Slika 37: Odziv preizkušanca – porušitev lesene plošče (levo) in deformacije v leseni plošči zaradi tlačnih napetosti (desno).....	25
Slika 38: Odziv preizkušanca – zaostale deformacije po zaključenem testu (podoben odziv pri GL in CLT plošči)	25
Slika 39: Zdrs na koncih.....	26
Slika 40: Deformacije v pasnici spodaj.....	27
Slika 41: Deformacije v pasnici zgoraj	28
Slika 42: Deformacije v stojini.....	28
Slika 43: Deformacije v lesu spodaj.....	29
Slika 44: Deformacije v lesu zgoraj	29
Slika 45: Diagram sila-pomik	31
Slika 46: Diagram sila-pomik sredina razpona	31
Slika 47: Diagram sila-pomik četrtna razpona.....	32
Slika 48: Sistem obremenjevanja (levo) in pogled s strani pred začetkom testa (desno).....	32
Slika 49: Odziv preizkušanca pri 92 kN (levo) in porušitev statičnega sistema (desno)	33
Slika 50: Odziv preizkušanca – točkovno obremenjevanje pri 78 kN (levo) in porušitev (desno).....	33
Slika 51: Profil za pregled zamikov po končanem testiranju	33
Slika 52: Zdrs med lesom in jeklom.....	34
Slika 53: Deformacije - pasnica spodaj.....	35
Slika 54: Deformacije - pasnica zgoraj	36
Slika 55: Deformacije - jeklena stojina	36
Slika 56: Deformacije - les spodaj	37
Slika 57: Deformacije - les zgoraj.....	37
Slika 58: Računski statični model	38
Slika 59: Deformacije po prerezu (modra 20kN, oranžna 40 kN, siva 60 kN, rumena 75 kN)	40
Slika 60: Napetosti pri 20 kN.....	40
Slika 61: Napetosti pri 40 kN.....	41
Slika 62: Napetosti pri 60 kN.....	41
Slika 63: Napetosti pri 75 kN.....	42
Slika 64: Deformacije po prerezu.....	46
Slika 65: Napetosti pri 20 kN.....	46
Slika 66: Napetosti pri 40 kN.....	47
Slika 67: Napetosti pri 60 kN.....	47
Slika 68: Primerjava deformacij pri 20 kN ($\gamma=0,75$)	52
Slika 69: Primerjava deformacij pri 40 kN ($\gamma=0,74$).....	53
Slika 70: Primerjava deformacij pri 60 kN ($\gamma=0,69$).....	53

Slika 71: Primerjava deformacij pri 75 kN ($\gamma=0,67$).....	54
Slika 72: Primerjava deformacij pri 20 kN ($\gamma = 0,66$)	55
Slika 73: Primerjava deformacij pri 40 kN ($\gamma=0,70$).....	56
Slika 74: Primerjava deformacij pri 50 kN ($\gamma=0,70$).....	56
Slika 75: Primerjava deformacij pri 60 kN ($\gamma=0,72$).....	57
Slika 76: Materialni model za les in jeklo pri nosilcu z GL ploščo	58
Slika 77: Materialni model za les in jeklo pri nosilcu s CLT ploščo	58
Slika 78: Deformacije in napetosti v mejnem stanju pri nosilcu z GL ploščo	60
Slika 79: Deformacije in napetosti v mejnem stanju pri nosilcu s CLT ploščo	62

1 UVOD

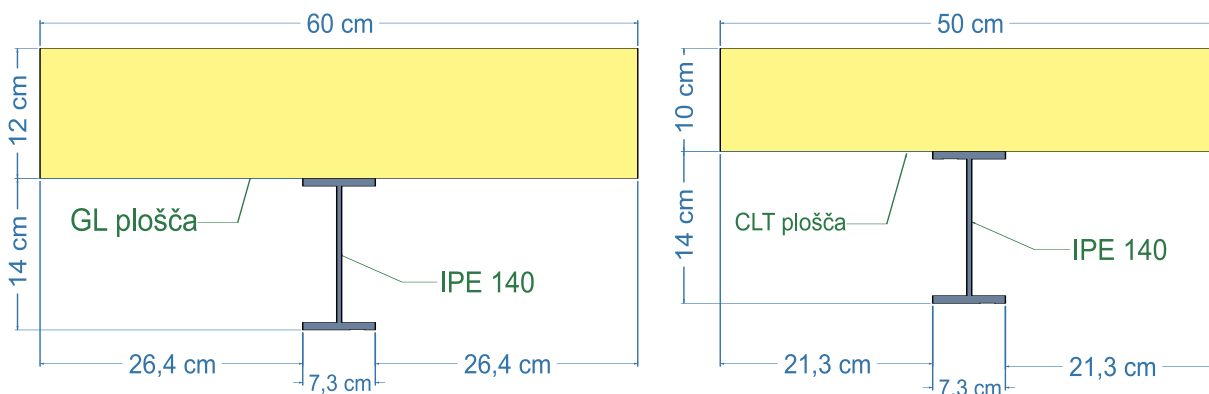
Sovprežna konstrukcija je vsaka konstrukcija, kjer sočasno delujeta vsaj dva različna materiala. Osnovna ideja je, da vsak od različnih materialov prevzema tisto vrsto obremenitve, katero bolje prenaša. Idealno stanje je, ko sta materiala med seboj toga povezana in tako delujeta kot homogen prerez. Najbolj pogosta izvedba sovprežne konstrukcije je iz jekla in betona.

Za potrebe moje diplomske naloge sem se lotil izdelave in kasneje preizkušanja dveh sovprežnih nosilcev iz lesene plošče in jeklenega IPE profila. Oba nosilca sta bila sestavljena iz 4 metrskega IPE140 standardnega vroče valjanega jeklenega profila in lesene plošče. Za prvega sem uporabil lepljeno lamelirano (GL) ploščo z dimenzijami dolžina x širina x višina = 400cm x 60cm x 12cm, za drugega pa križno lepljeno lamelirano (CLT) ploščo z dimenzijami dolžina x širina x višina = 400cm x 50cm x 10cm (slike 1 – 4).

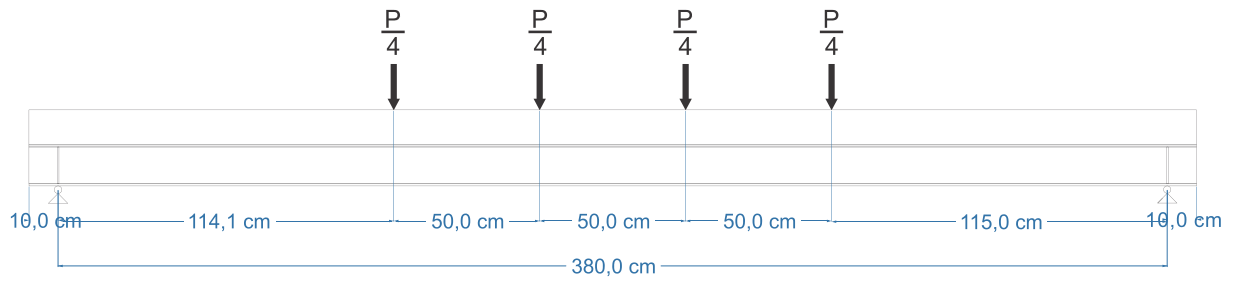
Sovprežnost sem zagotavljal z jeklenimi ploščicami, ki so bile navarjene prečno in pravokotno na zgornjo pasnico jeklenega profila (slike 5 in 6). V vsako od lesenih plošč sem na CNC stroj izrezal utor skozi celotno debelino, jih poveznil na jeklene profile in zalil z dvokomponentno smolo Araldite SW404. Varjenje ploščic in izrezovanje utorov se je izvajalo v domači delavnici, nato sem plošče in profile pripeljal v laboratorij FGG, kjer sem vse opremil z merilnimi lističi in leseni plošči zlepil na jeklena nosilca.

Nosilca sta bila prostoležeče podprta, obtežba pa je bila v sistem vnesena štiritočkovno preko štirih valjev na nosilcu. Razdalja med njimi je bila 50cm (slika 3). Na te valje smo postavili sistem treh prečk in povezav med njimi, sila pa se je v sistem vnašala preko hidravličnega bata (slika 7).

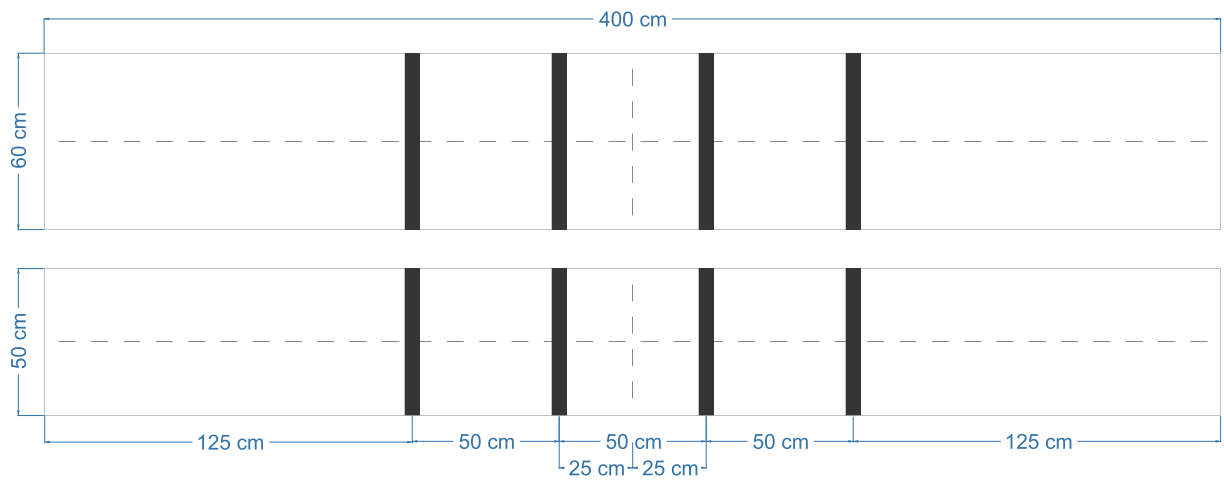
Iz rezultatov testov bom poskušal določiti stopnjo strižne povezave sovprežne konstrukcije in koliko sta se na račun le-te povečala togost in nosilnost konstrukcije.



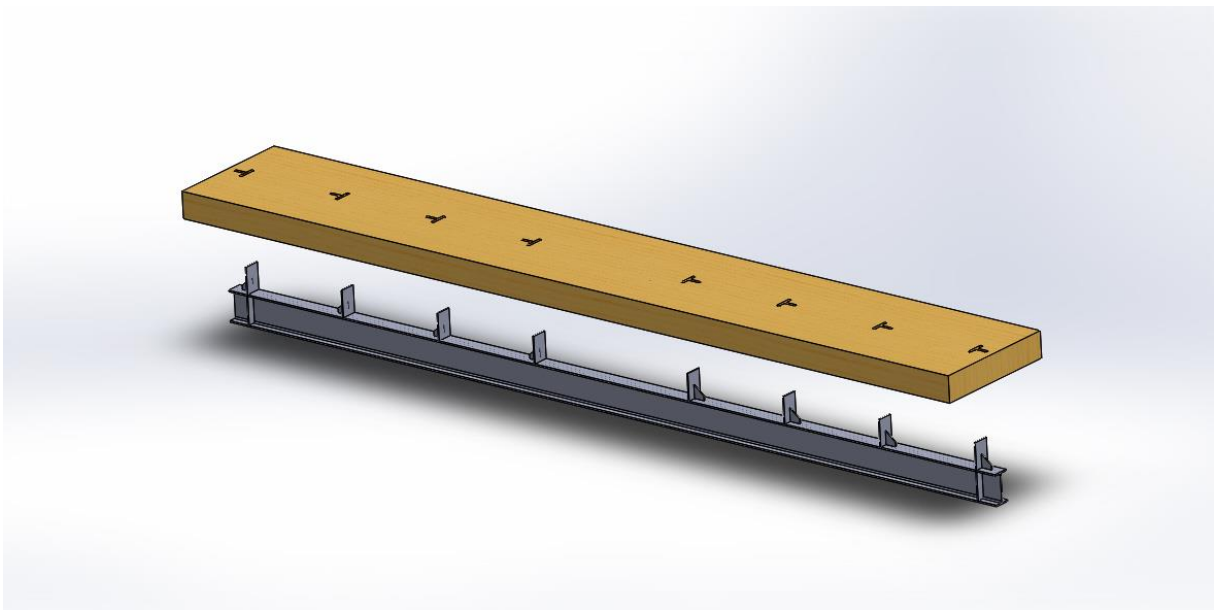
Slika 1: Prereza obeh nosilcev z dimenzijami



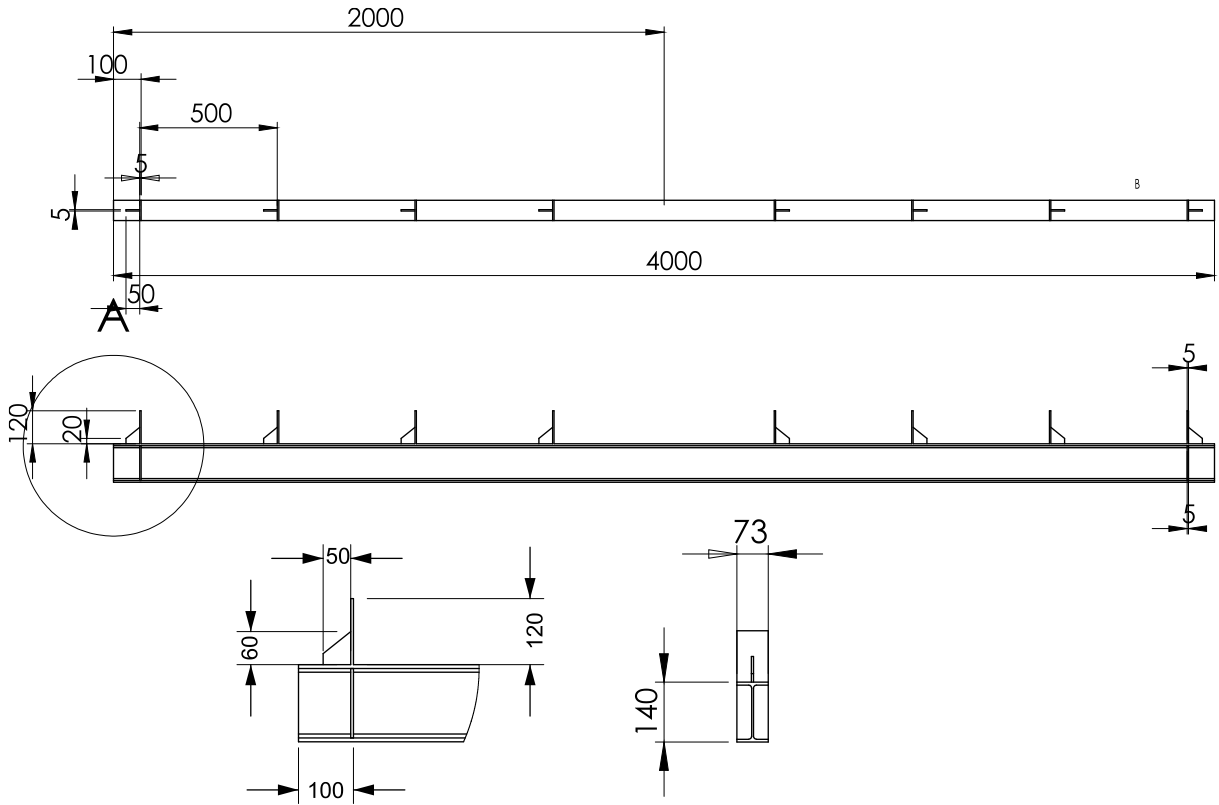
Slika 2: Sistem obremenjevanja v pogledu



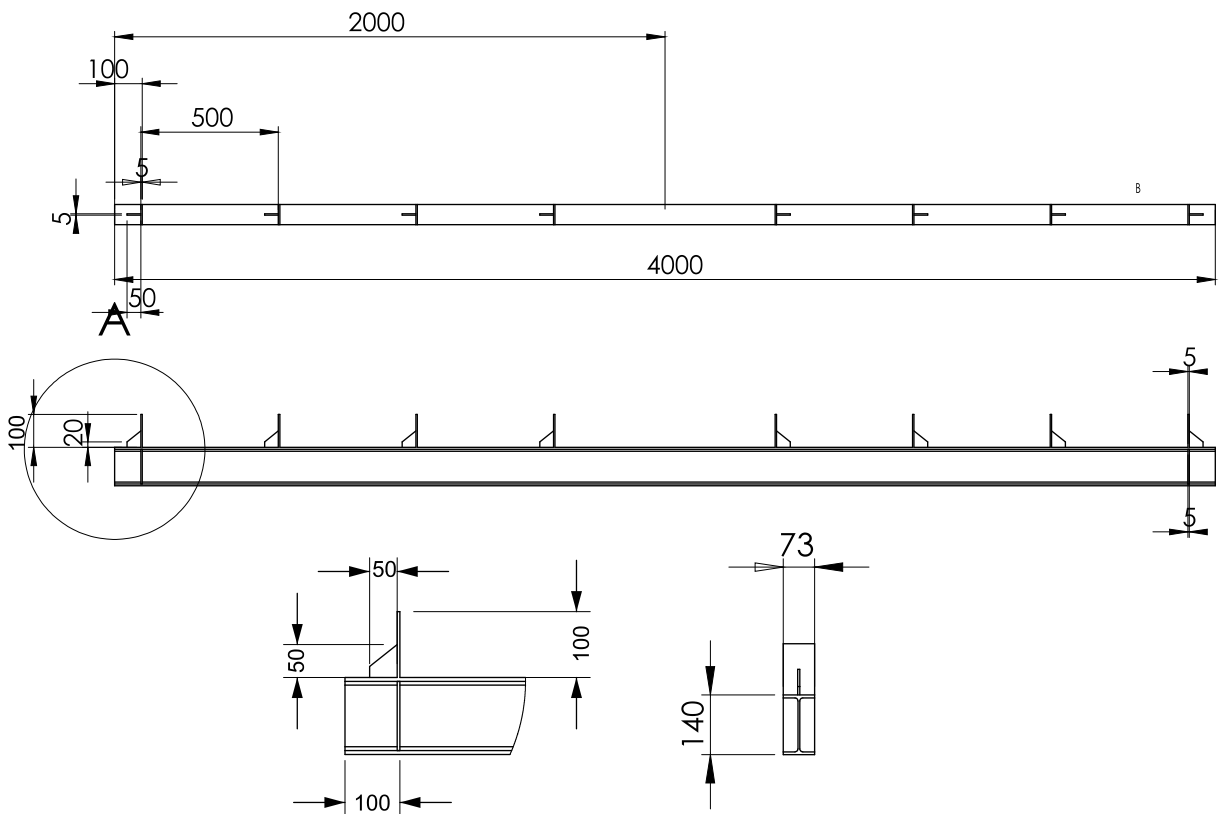
Slika 3: Sistem obremenjevanja v tlorisu (za oba nosilca)



Slika 4: Razgrajen 3D model nosilca



Slika 5: Dimenzije in postavitev jeklenih ploščic pri nosilcu z GL ploščo (v mm)



Slika 6: Dimenzije in postavitev jeklenih ploščic pri nosilcu s CLT ploščo (v mm)



Slika 7: Sistem obremenjevanja

2 PREIZKUŠANCA

Za preizkus sta bila zasnovana in izdelana dva nosilca. Prvi je sestavljen iz IPE140 jeklenega profila in GL plošče (slika 8), drugi pa prav tako iz IPE140 jeklenega profila in CLT plošče (slika 9).

Razlika med njima se pojavi v treh točkah:

- vrsta plošče
- debelina in
- širina plošče

GL plošča (Glue Laminated) je sestavljena iz vzdolžno lepjenih lamel. Posamezna lamela v plošči poteka v vzdolžni smeri po celotni višini in dolžini plošče.



Slika 8: Nosilec z GL ploščo

CLT plošča (Cross Laminated Timber) pa je sestavljena iz treh plasti lepjenih lamel, ki so med seboj zamaknjene za 90°. V zunanjih plasteh rasti potekajo v vzdolžni smeri, v notranji plasti pa v prečni.



Slika 9: Nosilec s CLT ploščo

IPE140 jekleni profil je standardni profil kvalitete S235, kupljen v trgovini z železino.

2.1. OPREMA PREIZKUŠANCEV

Test je bil zasnovan kot upogibni nosilec na katerega smo vnašali silo preko štirih točk. Zanimale so me deformacije, pomiki in obtežba. Deformacije smo izmerili s pomočjo merilnih lističev deformacij, pomike z induktivnimi merilci in digitalnimi uricami pritrjenimi na nosilce. Pomik in silo bata smo izmerili s pomočjo merilne celice, ki se nahaja v samem batu.

Jeklena nosilca sem na sredini razpona opremil z merilnimi lističi (slika 10), in sicer na spodnji strani spodnje pasnice in na spodnji strani zgornje pasnice po dva merilna lističa. Tudi stojini sem opremil z merilnimi lističi, in sicer zgornjo četrtino višine stojine enega in na spodnjo četrtino višine stojine drugega.



Slika 10: Položaj merilnih lističev na jeklenem nosilcu

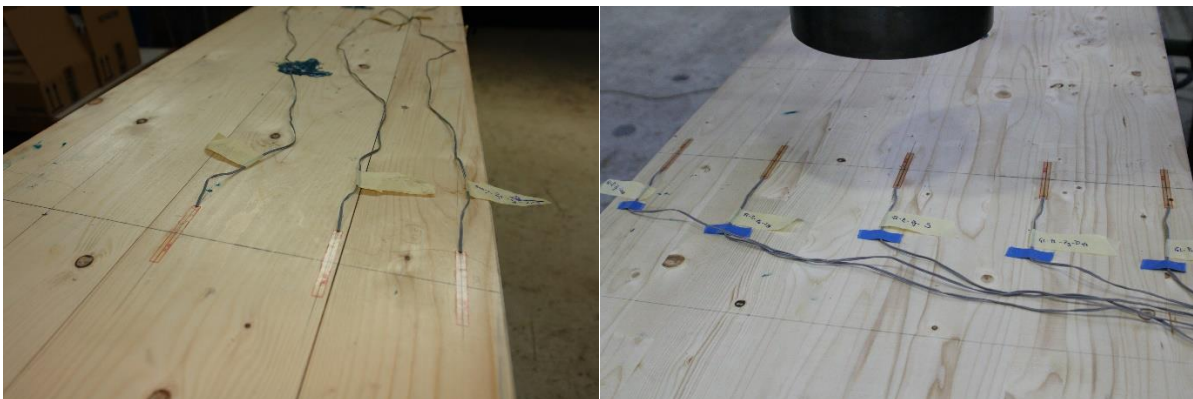
Leseni plošči sta bili z merilnimi lističi opremljeni različno (slika 11):

GL plošča je imela na spodnji strani plošče dva merilna lističa:

- 3 cm od levega spodnjega roba (Pl-Sp-Lrob)
- tik ob levi strani pasnice jeklenega profila (Pl-Sp-Lnot)

Na zgornji strani je bila plošča opremljena s petimi merilnimi lističi:

- 3 cm od levega in desnega roba (Pl-Zg-Lrob, Pl-Zg-Drob)
- 15 cm (t.j. $\frac{1}{4}$ širine plošče) (Pl-Zg-L1/4, Pl-Zg-D1/4)
- na sredini plošče eden (Pl-Zg-S)



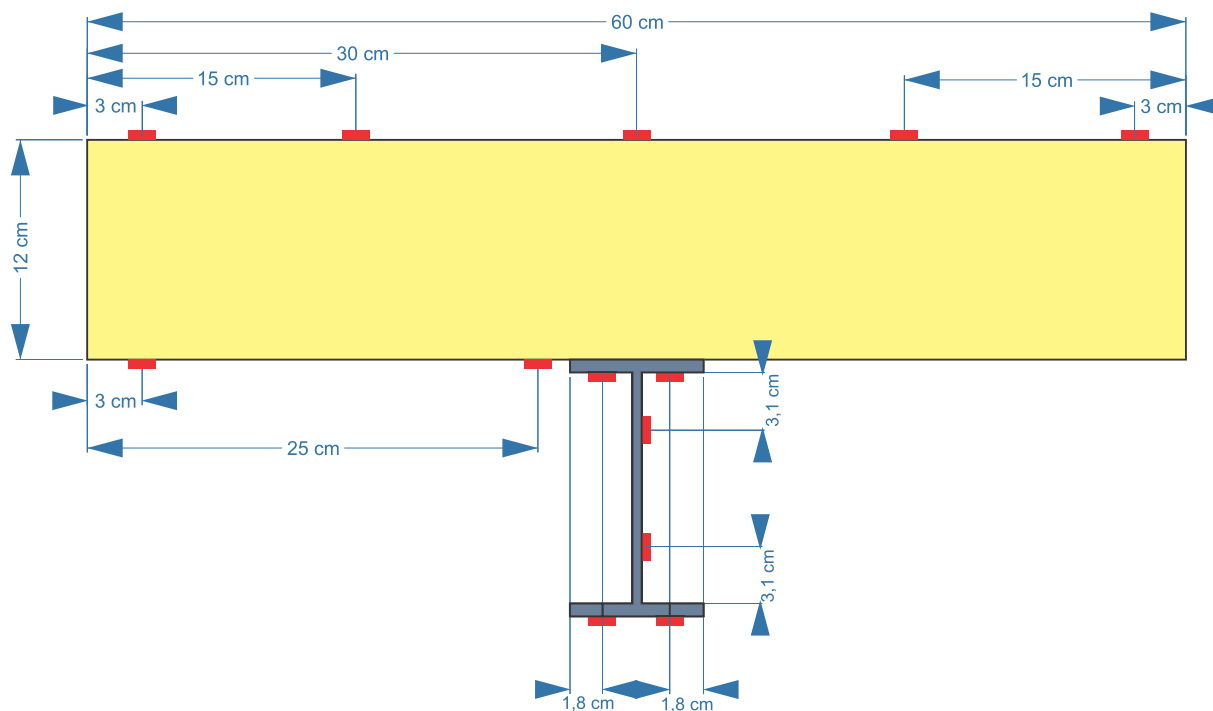
Slika 11: Položaj merilnih lističev na CLT (levo) in GL (desno) plošči zgoraj

Slika 12 prikazuje detajl postavitve induktivnih merilcev na sredini nosilca in postavitev merilca zdrsa med ploščo in jeklenim nosilcem, ki je sestavljen iz induktivnega merilca in mikronske ure.

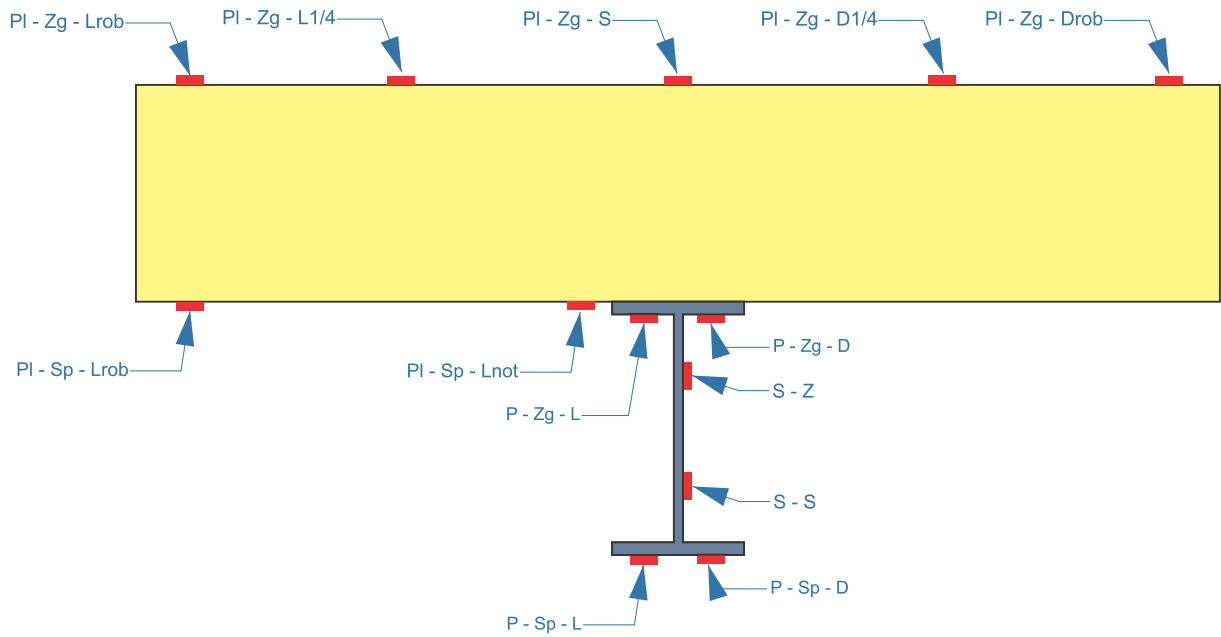
Na slikah 13 do 18 so prikazana mesta postavitve merilnih lističev, induktivnih merilcev in mikroskih uric ter njihove oznake.



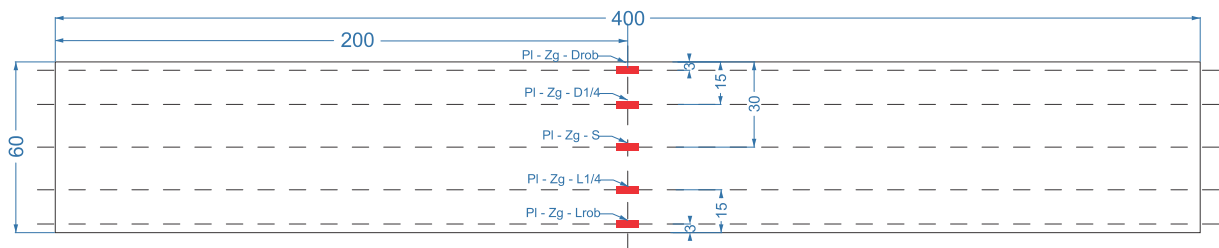
Slika 12: Položaj induktivnih merilcev (levo) in merilec zdrsa (desno)



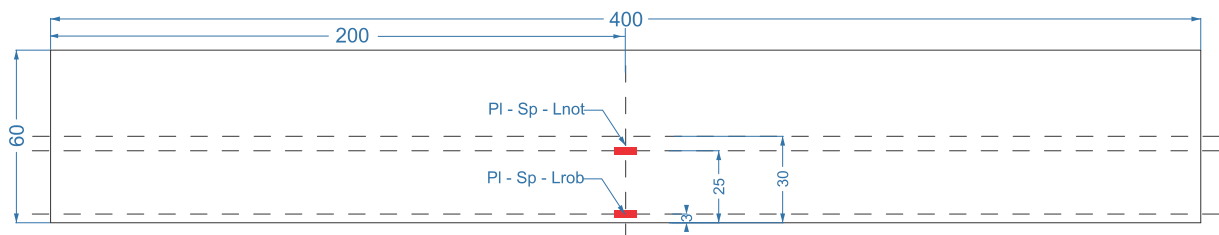
Slika 13: Prerez nosilca z GL ploščo z dimenzijami in položajem merilnih lističev



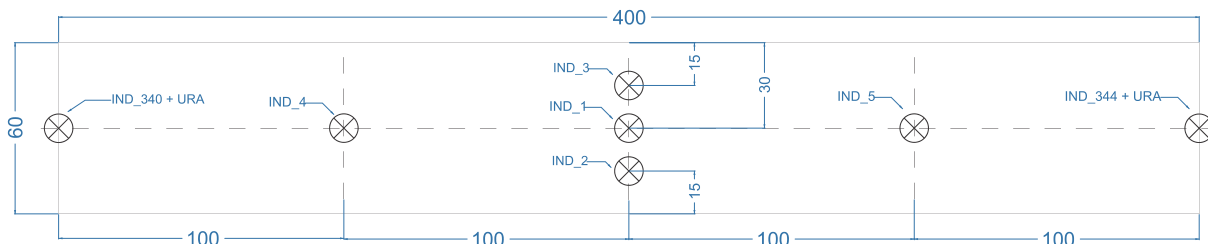
Slika 14: Prerez nosilca z GL ploščo z oznakami merilnih lističev



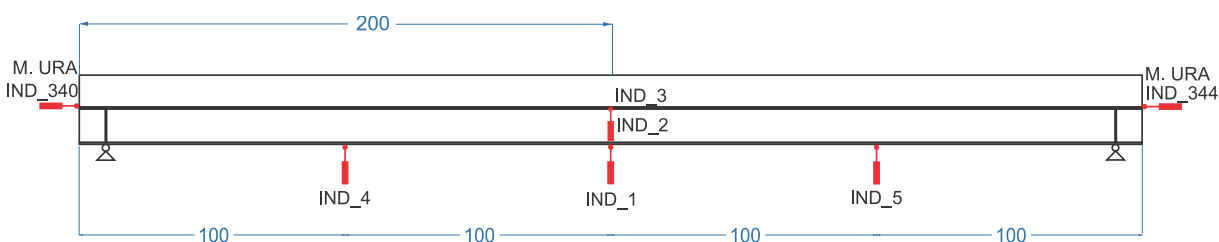
Slika 15: Tloris nosilca z GL ploščo - merilni lističi zgoraj



Slika 16: Tloris nosilca z GL ploščo - merilni lističi spodaj



Slika 17: Tloris nosilca z GL ploščo – induktivci



Slika 18: Pogled nosilca z GL ploščo – induktivci

Na slikah 19 do 24 so prikazana mesta postavitve merilnih lističev, induktivcev in mikronskih uric ter njihove oznake.

CLT plošča je bila na spodnji strani opremljena s štirimi merilnimi lističi:

- 3 cm od levega roba (PI-Sp-Lrob)
- 12,5 cm (t.j. $\frac{1}{4}$ širine plošče) (PI-Sp-L1/4)
- tik ob levi strani jeklene pasnice (PI-Sp-Lnot)
- tik ob desni strani pasnice jeklenega profila (PI-Sp-Dnot)

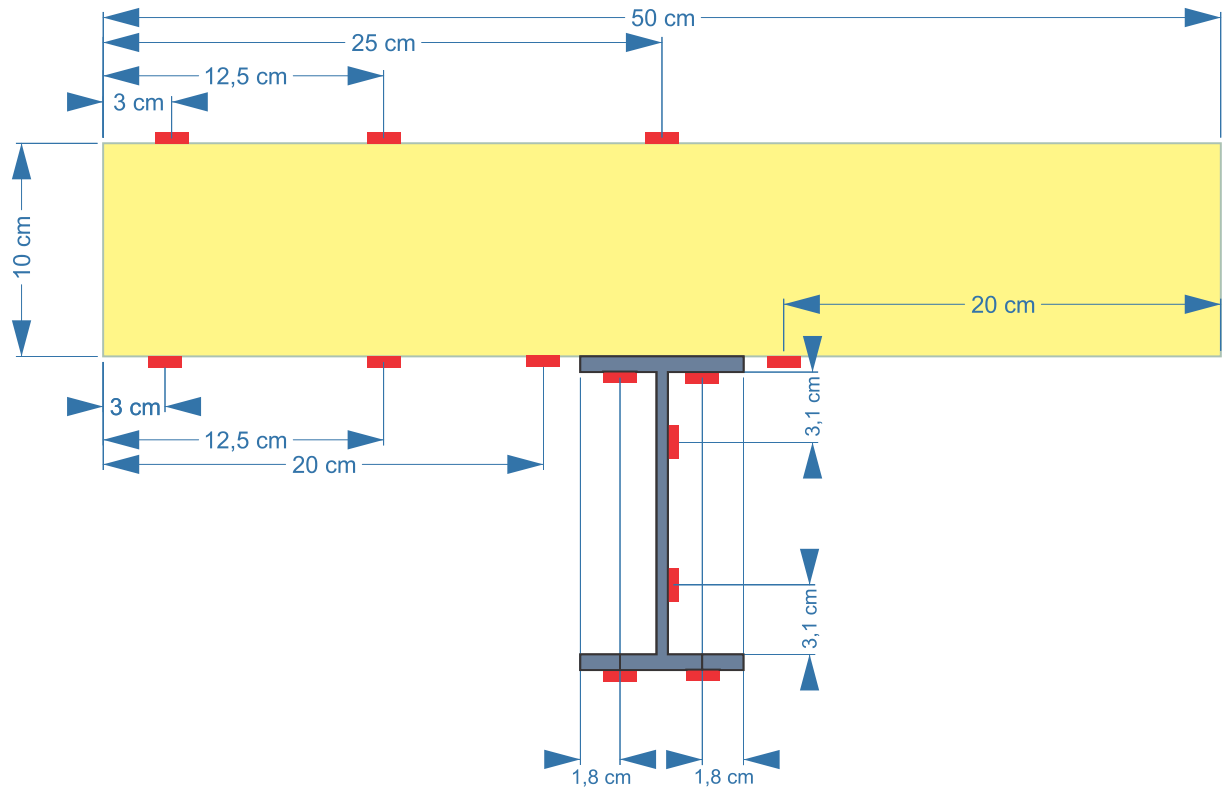
Na zgornji strani pa s tremi merilnimi lističi:

- 3 cm od levega roba plošče (PI-Zg-Lrob)
- 12,5cm (t.j. $\frac{1}{4}$ širine plošče) (PI-Zg-L1/4)
- na sredini plošče (PI-Zg-S)

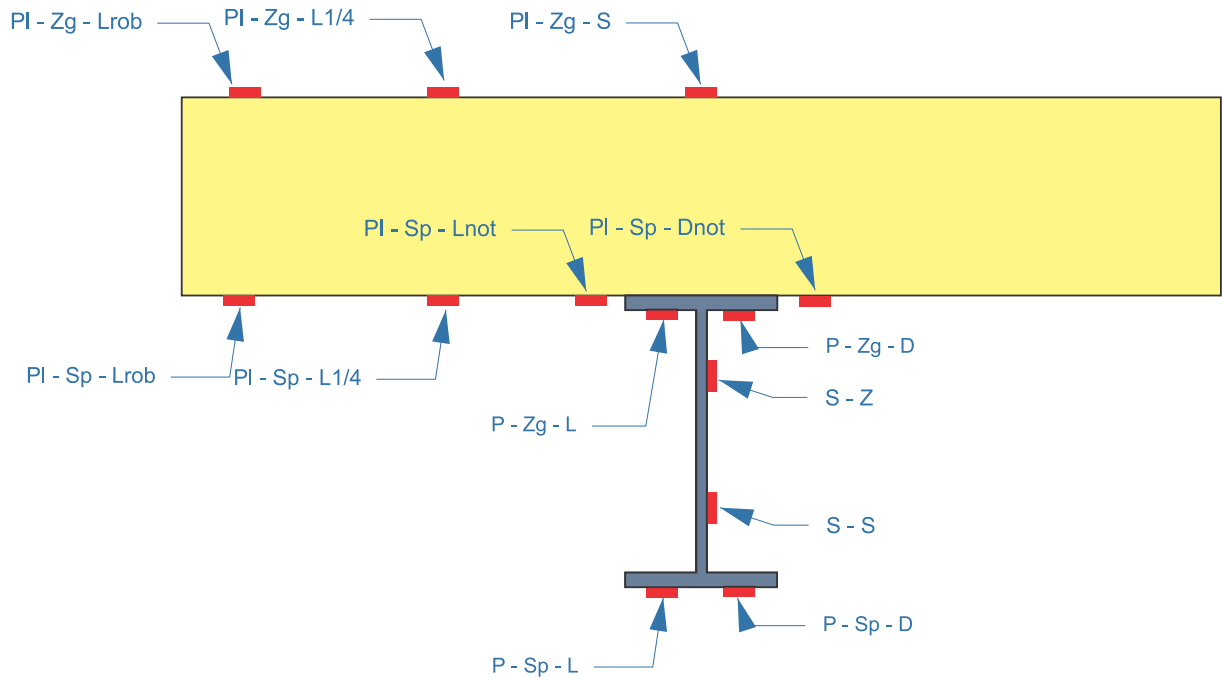
Ko sta bila nosilca položena na podstavka, smo namestili še induktivne merilce pomika (skupno sedem induktivih merilcev):

- na sredini razpona iz spodnje strani po enega na vsako stran lesene plošče (IND2, IND3)
- na sredini razpona enega na spodnji del spodnje pasnice jeklenega nosilca(IND1)
- po enega na četrtno razpona z leve in z desne strani (IND4, IND5)
- po enega na vsak spoj les - jeklo iz strani za merjenje zdrsa. (IND340, IND344)

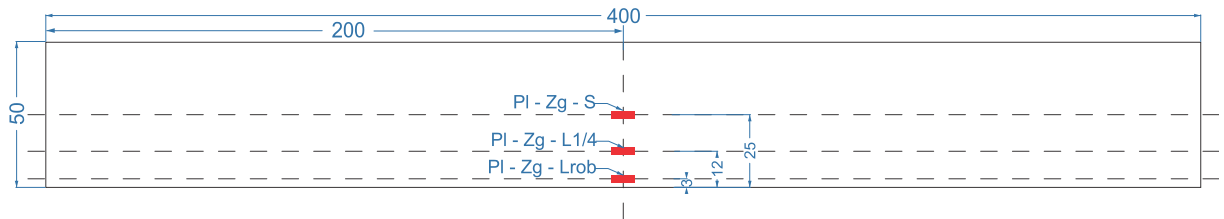
In dve merilni urici Mitutoyo z mikronskim nonijem, ki sta bili prav tako nameščeni iz strani, za merjenje zdrsa med leseno ploščo in jeklenim nosilcem (URA_L, URA_D).



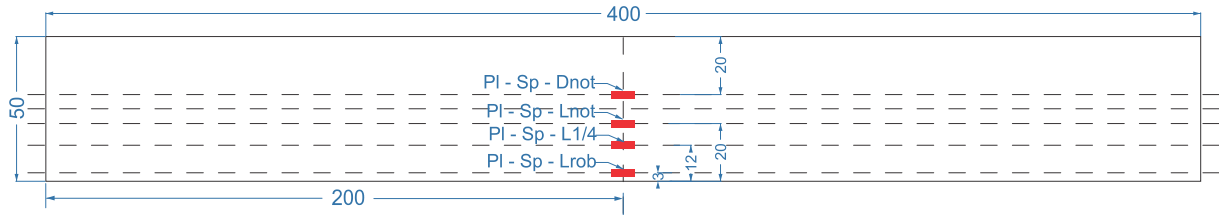
Slika 19: Prerez nosilca s CLT ploščo z dimenzijami in položajem merilnih lističev



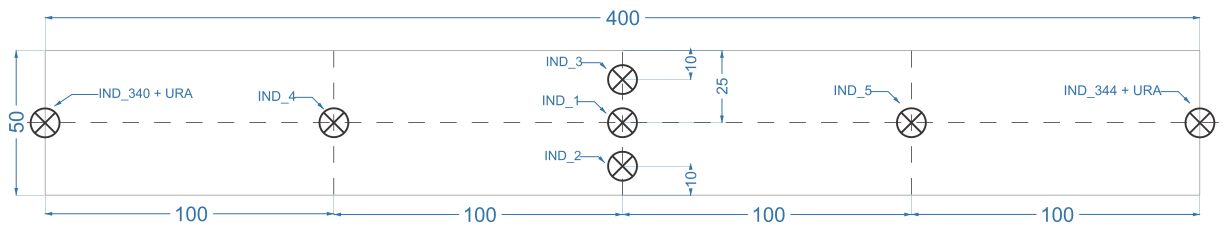
Slika 20: Prerez nosilca s CLT ploščo z oznakami merilnih lističev



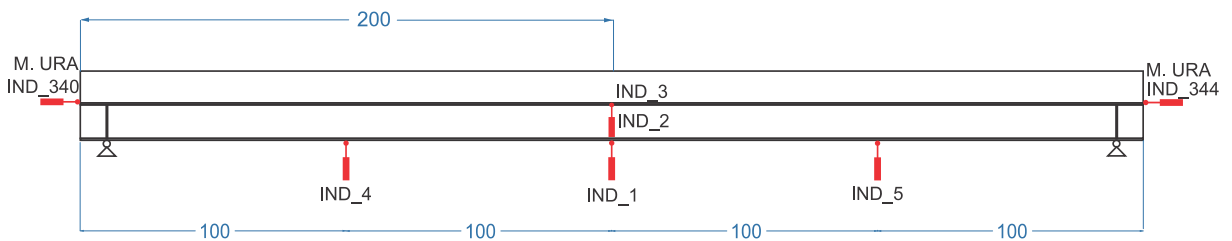
Slika 21: Tloris nosilca s CLT ploščo - merilni lističi zgoraj



Slika 22: Tloris nosilca s CLT ploščo - merilni lističi spodaj



Slika 23: Tloris nosilca s CLT ploščo – induktivci



Slika 24: Prerez nosilca s CLT ploščo – induktivci

V preglednici 1 so prikazana vsa merilna mesta na obeh nosilcih in njihovo poimenovanje.

Preglednica 1: Oznake merilnih mest in opremljenost preizkušancev

Oznaka	Pomen	Vrsta	GL nosilec	CLT nosilec
P-Sp-L	Pasnica spodaj levo	Merilni listič	DA	DA
P-Sp-D	Pasnica spodaj desno	Merilni listič	DA	DA
P-Zg-L	Pasnica zgoraj levo	Merilni listič	DA	DA
P-Zg-D	Pasnica zgoraj desno	Merilni listič	DA	DA
S-Z	Stojina zgoraj	Merilni listič	DA	DA
S-S	Stojina spodaj	Merilni listič	DA	DA
Pl-Sp-Lrob	Plošča spodaj levi rob	Merilni listič	DA	DA
Pl-Sp-L1/4	Plošča spodaj leva četrtnina	Merilni listič	NE	DA
Pl-Sp-Lnot	Plošča spodaj levo ob pasnici	Merilni listič	DA	DA
Pl-Sp-Dnot	Plošča spodaj desno ob pasnici	Merilni listič	NE	DA
Pl-Zg-Lrob	Plošča zgoraj levi rob	Merilni listič	DA	DA
Pl-Zg-Drob	Plošča zgoraj desni rob	Merilni listič	DA	NE
Pl-Zg-L1/4	Plošča zgoraj leva četrtnina	Merilni listič	DA	DA
Pl-Zg-D1/4	Plošča zgoraj desna četrtnina	Merilni listič	DA	NE
Pl-Zg-S	Plošča zgoraj sredina	Merilni listič	DA	DA
IND1	IND1	Induktivni merilec	DA	DA
IND2	IND2	Induktivni merilec	DA	DA
IND3	IND3	Induktivni merilec	DA	DA
IND4	IND4	Induktivni merilec	DA	DA
IND5	IND5	Induktivni merilec	DA	DA
IND340	IND340	Induktivni merilec	DA	DA
IND344	IND344	Induktivni merilec	DA	DA
URA_L	Ura levo	Mitutoyo mikronska ura	DA	DA
URA_D	Ura desno	Mitutoyo mikronska ura	DA	DA

2.2. PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV

Leseni plošči sta bili donirani s strani podjetij CBD d.o.o. in Lamo d.o.o.. Glede na dimenzije le-teh je bil zasnovan preliminarni izračun za dimenzioniranje jeklenih profilov in jeklenih ploščic za zagotavljanje sovprežnosti.

Po končanem dimenzioniranju sem pričel z izdelavo nosilcev. Kupil sem dva standardna IPE 140 profila v trgovini z železnino, ju pripravil za varjenje in očistil rje. Iz ploščate valjane pločevine sem odrezal ploščice in jih na rezkalni stroj pripravil na končno dimenzijo dolžina x širina x višina = 120 mm x 73 mm x 5 mm za GL nosilec (enako tudi za CLT nosilec, le da je bila tam dolžina 100 mm) (slika 25 levo). Prav tako sem na enak način pripravil še oporne ploščice, ki so segale do polovice višine prečne ploščice. Te ploščice so služile kot dodatna opora proti uklonu relativno tanke pločevine. Nato sem ploščice in oporne ploščice privaril s CO₂ varilnim aparatom na nosilca (slika 26) . Prvo 10 cm od konca in nato še tri na rastru 50 cm in postopek ponovil še z druge strani. Enako sem storil na drugem nosilcu.

Na CNC rezkalni stroj sem skozi leseni plošči izrezal utore v obliki črke T (slika 25 desno). Utori so zaradi točnosti naleganja in zaradi zagotavljanja zadostnega prostora za kasnejše zalivanje z dvokomponentno smolo za 5 mm na vsako stran večji kot navarjena pločevina na jeklenih nosilcih.

Sledilo je sestavljanje nosilcev v laboratoriju FGG (slika 27).



Slika 25: Strojna obdelava ploščic (levo) in detajl sovprežnega spoja (desno)



Slika 26: Jekleni nosilci (levo) in varjenje ploščic (desno)



Slika 27: Razstavljena nosilca

Za sestavo nosilcev sem sprva uporabil dvokomponentno poliuretansko lepilo za les. Ko sem že začel z vgradnjo, so se pojavile tri težave:

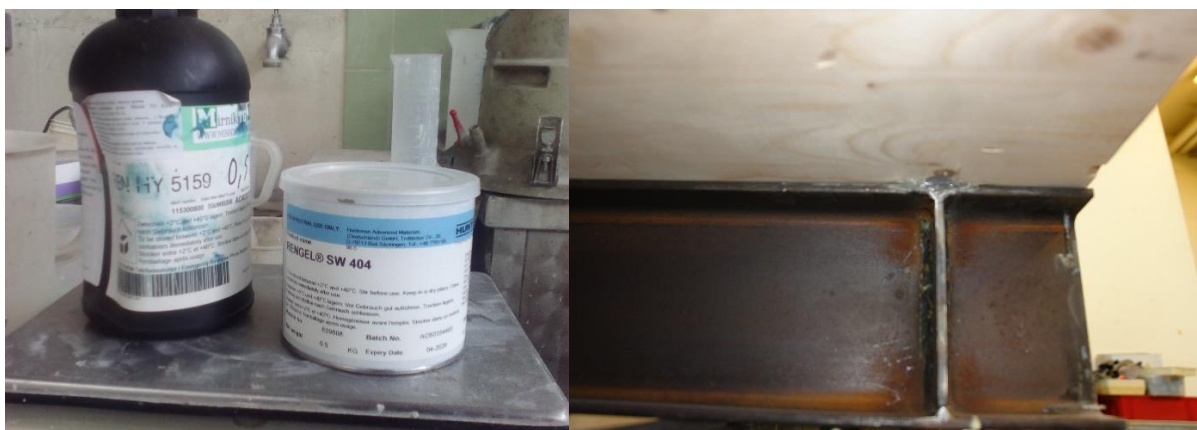
- čas vgrajevanja je bil samo 90 sekund, kar je pomenilo izredno hitro delo z lepilom,
- stiki med lesom in jeklom so bili zatesnjeni samo z lepilnim trakom in je lepilo uhajalo na vseh stikih ven, iztekalo pa je tudi v prostor med leseno ploščo in jeklen nosilec in ju s tem zalepilo skupaj. Tudi zaradi tega bi lahko dobili nepravne rezultate meritev.

- modul elastičnosti lepila je bil samo 175 kN/cm^2 , kar je več kot petkrat manj od modula elastičnosti lesa. To bi pomenilo, da bi se s pričetkom upogibnega testa lepilo v tlaku podalo in stopnja strižne povezave bi bila nizka.

Delno zlepljene nosilce smo morali razdružiti s pomočjo velikega vzvoda in zagozd. Lesene plošče smo minimalno poškodovali le po površini, poškodbe pa so bile estetske narave in se jih je dalo enostavno zbrusiti s tračno brusilko. Večina lepila je ostala na jeklenih nosilcih. Le-to sem potem z dletom izbil iz jeklenih ploščic in s kotno brusilko odstranil preostanek razlitega lepila po profilu.

Odločili smo se uporabiti že preverjeno dvokomponentno smolo Araldite SW404 v kombinaciji s trdilcem HY 5159, ki omogoča 50 minutni čas vgradnje (slika 28 levo).

Ker se je že v prvem poskusu lepljenja s poliuretanskim lepilom izkazalo, da lahko lepilo teče iz utora na tla, med leseno ploščo in jekleni nosilec, sem vse stike zatesnil s silikonom preden smo ploščo poveznili na nosilec (slika 28 desno).



Slika 28: Araldite smola in trdilec (levo) in silikoniran spoj (desno)

Po 24 urah je bil silikon že strjen, zato sem pričel z injektiranjem dvokomponentne smole v utore. Za injektiranje sem uporabil ročno pištolo za injektiranje in prazno kartušo za silikon, ki sem jo predhodno izpraznil in očistil.

Lepilo sem mešal sproti in ga nalival v prazno kartušo po pol kilograma naenkrat. Sledilo je injektiranje v utor in odstranjevanje zračnih mehurjev iz utora s plastično paličico za mešanje (slika 29). Po apliciranju celotne vsebine kartuše v utor, sem izpraznjeno očistil in ponovil celotni postopek. Poraba lepila je znašala približno 1kg za tri utore. Injektiranje je trajalo 1h 45min. Tesnjenje s silikonom je bilo uspešno – nič lepila ni izteklo ven ali pod nosilec.

Po navodilih tehničnega lista za lepilo znaša čas sušenja 24 ur, vendar smo zaradi velike globine injektiranja in priporočila prodajalca ta čas podaljšali. Nosilca sta se sušila tri dni.



Slika 29: Nalivanje dvokomponentne smole v aplikator (levo) in aplikacija v vtor (desno)

3 PREIZKUŠANJE SOVPREŽNIH NOSILCEV

Oba upogibna testa sta bila izvedena v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju UL FGG.

Vsakega izmed nosilcev, ki je bil predhodno opremljen z merilnimi lističi, smo postavili na preizkuševališče, ko je bilo lepilo že suho. Nosilca smo z jeklenim delom navzdol v vodoravnem položaju postavili na dve vrtljivi podpori. Pri nosilcu z GL ploščo je bila leva podpora vpeta, desna pa drsna. Pri nosilcu s CLT ploščo sta bili obe podpori drsni. Ko je bil vsak izmed nosilcev nameščen, smo dodali še induktivne merilce pomikov in mikronske urice in vse skupaj povezali preko modula na računalnik. Nosilca smo zavarovali na bočno zvrnitev.

Sledilo je sestavljanje statičnega sistema za raznos obtežbe. Sestavljen je bil iz treh jeklenih prečk in vmesnih valjev, postavljenih na 2 mm debele plošče iz gume. Celoten sistem smo obremenili s hidravličnim batom in ničili. Teža sistema za nosilec z GL ploščo je znašala 189 kg, za nosilec s CLT ploščo pa 149 kg.

Protokol obremenjevanja je bil približno enak za oba nosilca. Najprej smo nosilca obremenjevali s hitrostjo 2 mm/min do meje elastičnosti jeklenega nosilca, nato pa razbremenili do začetnega stanja. Nosilca smo pustili mirovati 2 – 3 min in nato z isto hitrostjo ponovno pričeli obremenjevati do porušitve.

3.1. PREIZKUS NOSILCA Z GL PLOŠČO

Začetek nalaganja prvega testa (GL plošča) dne 20.6.2016 ob 10:24, pričetek testa isti dan ob 12:09. Hitrost obremenjevanja in razbremenjevanja je znašala 2 mm/min. Potek testa je opisan v preglednici 2.

Na sliki 30 je prikazano vmesno stanje nosilca na testu pri sili 80 kN.

Preglednica 2: Zapisnik testa za nosilec z GL ploščo

Čas	Sila	Pomik	Opis
0 sek	0 kN	Začetni pomik na sredini zaradi lastne teže in teže statičnega sistema obremenjevanja $IND_2 = 0,521$ mm	Slikanje, ni opaznih sprememb
0 – 748,3 sek	0 - 75,47 kN	Končen pomik na sredini $IND_2 = 20,75$ mm,	Slikanje vmesnih stanj, občasno se sliši pokanje
748,3 sek	75,47 kN		Pavza, slikanje, pričetek razbremenjevanja
812,2 – 1414,9 sek	75,47 – 0 kN	Zaostali pomik na sredini $IND_2 = 2,81$ mm	Slikanje, v razbremenjenem položaju počakamo 2-3 min
1498,6 sek	0 kN		Pričetek ponovnega obremenjevanja
1498,6 – 2249,6 sek	0 – 75,5 kN	Pomik na sredini $IND_2 = 21,3$ mm	Slikanje, do tega trenutka brez pokanja, viden upogib nosilca
2249,6 – 4507,4 sek	75,5 – 145,5 kN	Pomik na sredini $IND_2 = 101,53$ mm	Slikanje vmesnih stanj, proti koncu več pokanja
4507,4 sek	145,5 kN		Porušitev, pavza slikanje
4621 sek	136 – 0 kN	Plastificiran jeklen nosilec $IND_2 = 75,58$ mm	razbremenjevanje



Slika 30: Vmesno stanje, nosilec na meji elastičnosti pri 81 kN

3.2. PREIZKUS NOSILCA S CLT PLOŠČO

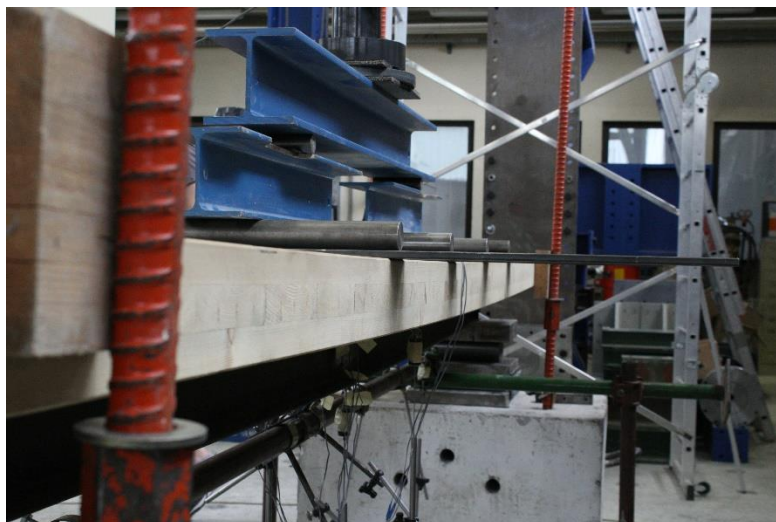
Po poružitvi prvega nosilca smo se takoj lotili demontaže in ponovno nastavili preizkuševališče za nosilec s CLT ploščo. Povezali smo merilne lističe in nastavili induktivne merilce pomikov in mikronski uri. Statični sistem obremenjevanja je bil postavljen na enak način, le da smo tu uporabili krajše in lažje valje. Zato je tu celoten sistem lažji za 40 kg.

S testom pričnemo 20.6.2016 ob 16:14. Obremenjujemo do plastičnega območja jeklenega nosilca, razbremenimo in nato ponovno obremenimo do poružitve. Hitrost obremenjevanja 2 mm/min. Zapisnik testa je opisan v preglednici 3.

Na sliki 31 je prikazano vmesno stanje na testu pri meji elastičnosti nosilca pri 59 kN.

Preglednica 3: Zapisnik testa za nosilec s CLT ploščo

Čas	Sila	Pomik	Opis
0 sek	0 kN	Začetni pomik na sredini zaradi lastne teže in teže statičnega sistema obremenjevanja $IND_2 = 0,46$ mm	Slikanje, ni opaznih sprememb
0 – 545,5 sek	0 – 46,33 kN	Končen pomik na sredini $IND_2 = 14,46$ mm,	Slikanje vmesnih stanj, občasno se sliši pokanje
545,5 – 859 sek	46,33 – 0 kN	Zaostali pomik na sredini $IND_2 = 0,73$ mm	Slikanje, takojšen pričetek razbremenjevanja, v razbremenjenem položaju počakamo 2-3 min
994 sek	0 kN		Pričetek ponovnega obremenjevanja
994 – 2613 sek	0 – 104,1 kN	Pomik na sredini $IND_2 = 77,96$ mm	Slikanje vmesnih stanj, pokanje se pogosto pojavlja od 45kN naprej
2613 sek	104,1 kN	Pomik na sredini $IND_2 = 77,96$ mm	Porušitev statičnega sistema pri močnem puku, hipna razbremenitev



Slika 31: Vmesno stanje - nosilec na meji elastičnosti pri 59 kN

Sila zadnjih 120 sekund praktično ni več naraščala in se je zadrževala nekje v območju 103,5 kN, medtem, ko pa deformacija je naraščala. Glasno je počilo, celoten sistem za obremenjevanje pa se je zapeljal v levo stran in padel na nosilec. Sistem za obremenjevanje je bil namreč labilen in se je pri hipni razbremenitvi zapeljal. Ker nismo zaznali nobene vidne porušitve, smo se odločili nosilec ponovno obremeniti, tokrat s spremenjenim načinom obremenjevanja. Pri obremenjevanju direktno z batom je nosilec odpovedal pri 85,4 kN na podoben način, kot pred njim nosilec z GL ploščo .

4 ANALIZA PREIZKUSA ZA NOSILEC Z GL PLOŠČO

4.1. POMIKI

V nadaljevanju opisujem obnašanje nosilca z GL ploščo v upogibnem testu. Na sliki 32 je prikazan diagram sila – pomik za vsa merilna mesta na preizkušancu, potem pa sta na slikah 33 in 34 diagrama zaradi preglednosti prikazani še po posameznih merilnih mestih.

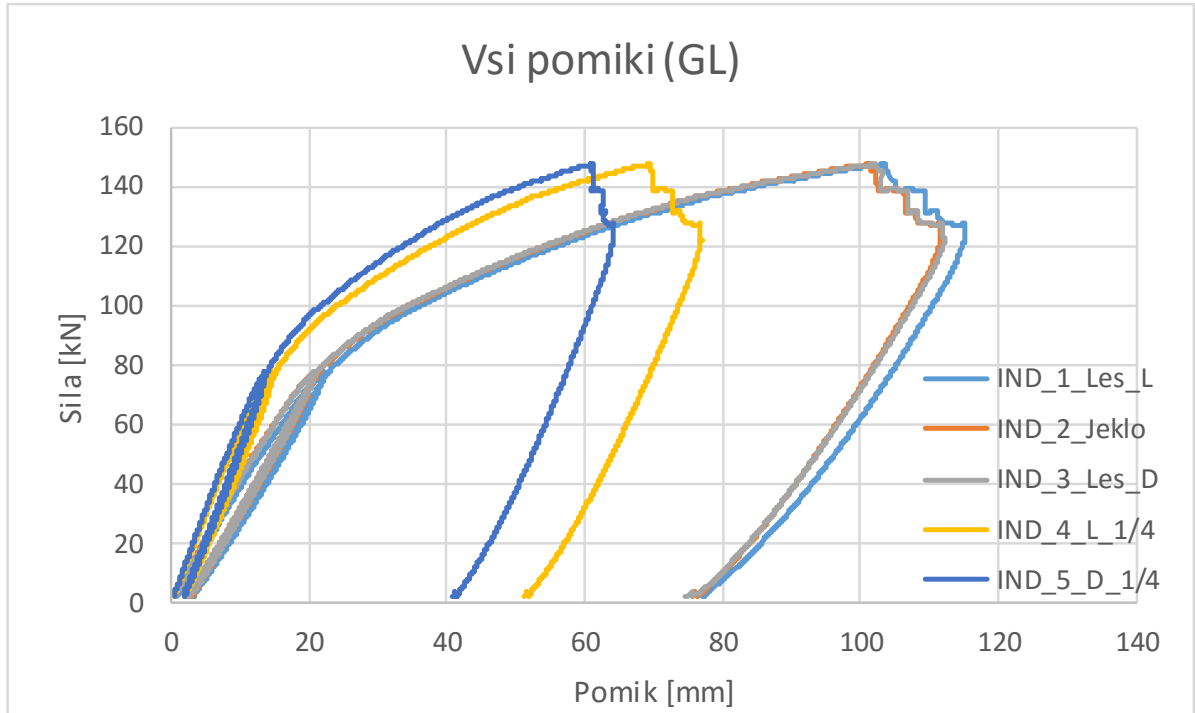
Na slikah 33 in 34 so prikazani pomiki na sredini nosilca z GL ploščo v odvisnosti od sile. Opazno je značilno linearno obnašanje sistema do približno 80 kN, nad to mejo pa je zaznan padec togosti, ki je posledica plastičnega tečenja jeklenega nosilca. Po prvem obremenjevanju ostane nekaj zaostalega pomika pri razbremenitvi. Pomiki se v ponovnem obremenjevanju niso povečali, krivulja pa je sledila krivulji prvega obremenjevanja. Na ta način smo izničili začetne zdrse in posedke v podporah in podložnih gumah v statičnem sistemu obremenjevanja.

Do preloma lesene GL plošče pri 145kN ni bilo opaziti drugačnih porušitev (npr. delaminacije, prestriga pri moznikih, razpok, itd.), slišati je bilo le pokanje v lesu. Porušitev je bila hipna. Po porušitvi smo prenehali z obremenjevanjem. Porušitev nosilca se je zgodila pri pomiku na sredini nosilca 101,53mm.

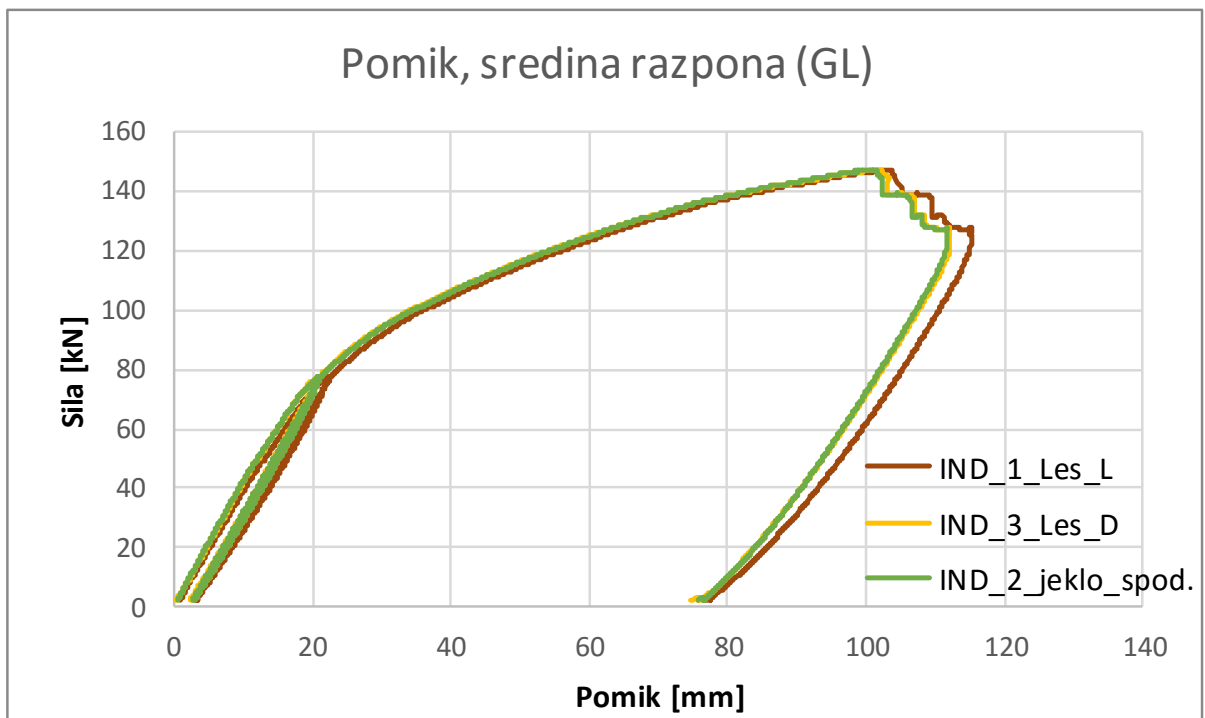
Sile in pomiki so bili ničeni na lastno težo nosilca. Teža statičnega sistema za obremenjevanje je znašala 1,89kN pri nosilcu z GL ploščo in sem jih prištel k obremenitvi hidravličnega bata, zato se diagrami pomikov začenjajo pri približno 2kN.

Na sliki 35 je prikazan sistem upogibnega preizkusa nosilca z GL ploščo in odziv preizkušanca pri 138 kN. Sliki 36 in 37 prikazujeta posledice porušitve v leseni plošči.

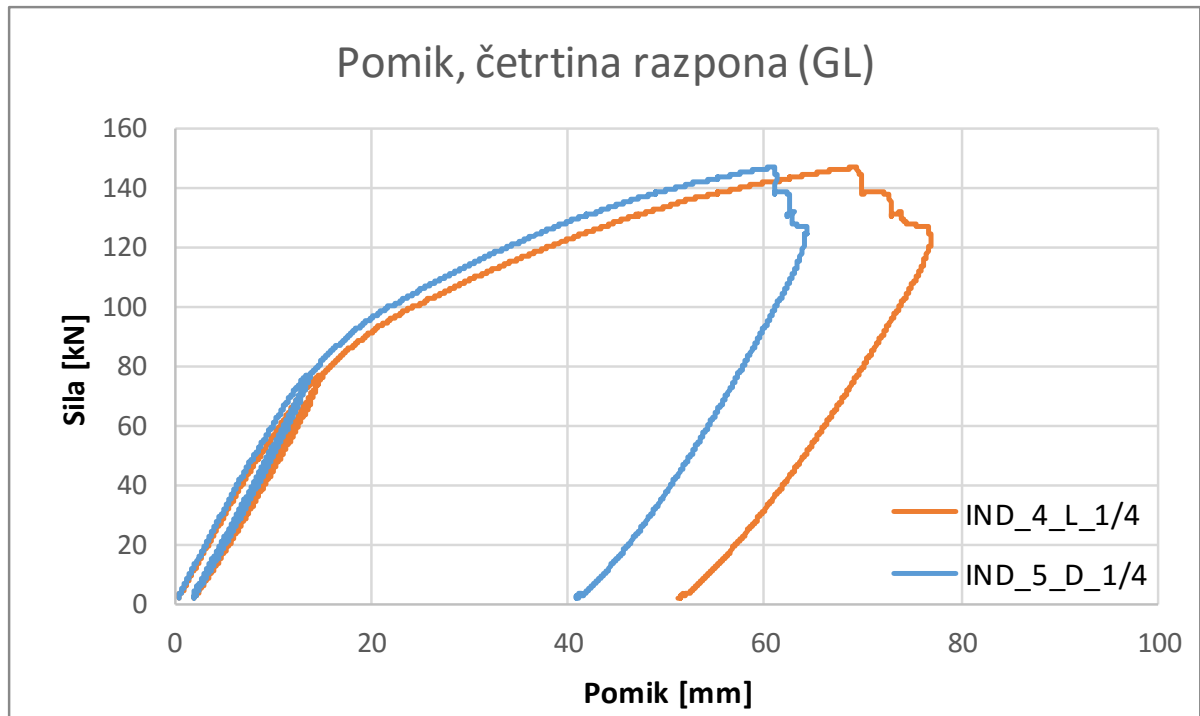
Po koncu obremenjevanja je bilo v jeklenem nosilcu veliko nepovratnih plastičnih deformacij (slika 38).



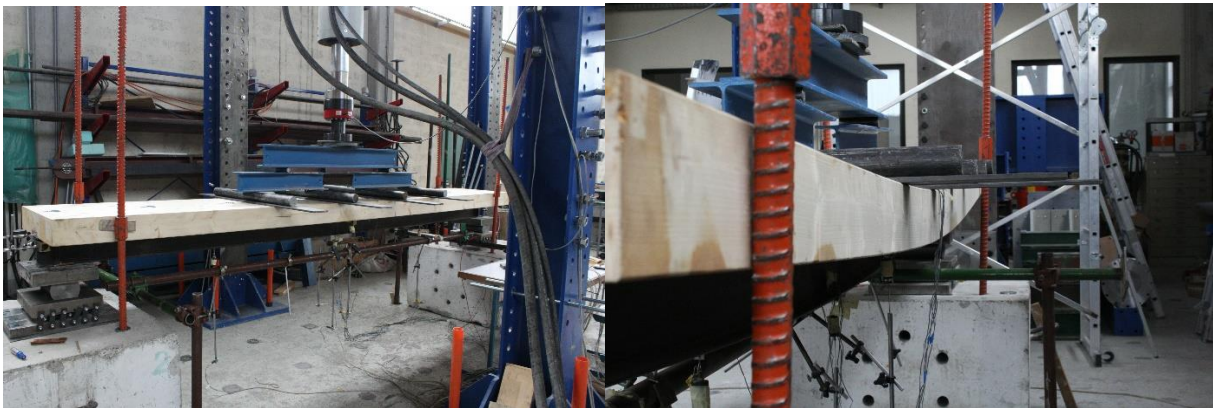
Slika 32: Diagram sila-pomik



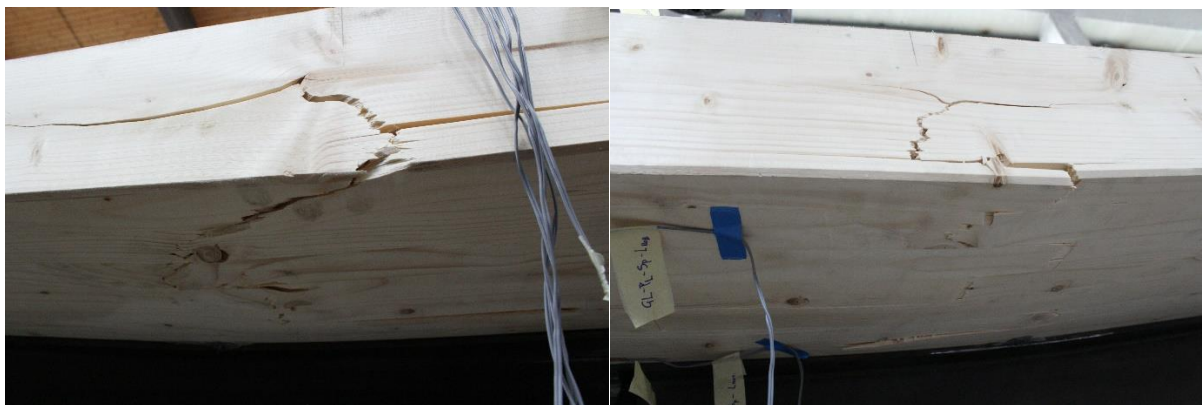
Slika 33: Diagram sila-pomik sredina razpona



Slika 34: Diagram sila-pomik četrtnina razpona



Slika 35: Sistem obremenjevanja (levo) in odziv preizkušanca - upogib pri 138 kN (desno)



Slika 36: Odziv preizkušanca -po porušitvi lesene plošče



Slika 37: Odziv preizkušanca – porušitev lesene plošče (levo) in deformacije v leseni plošči zaradi tlačnih napetosti (desno)



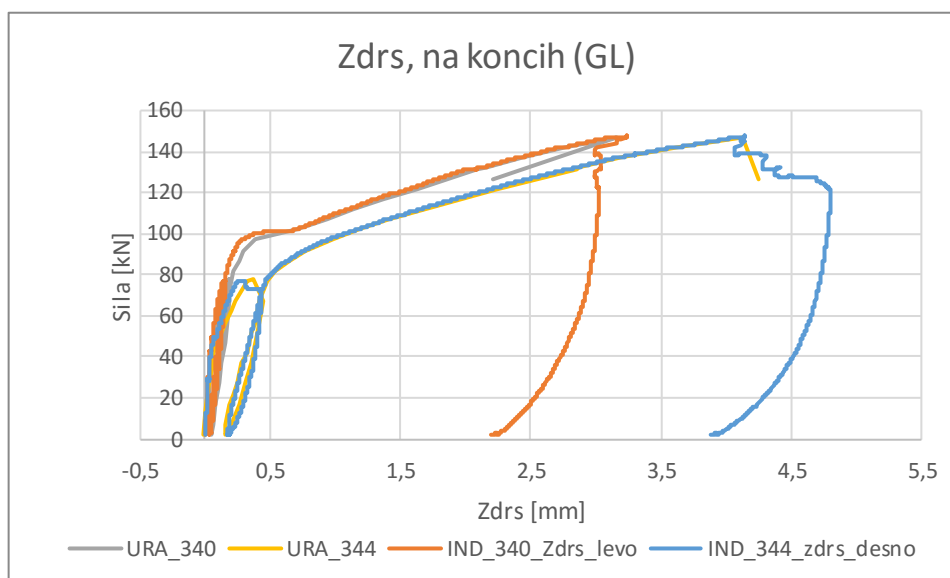
Slika 38: Odziv preizkušanca – zaostale deformacije po zaključenem testu (podoben odziv pri GL in CLT plošči)

4.2. ZDRSI MED JEKLENIM NOSILCEM IN LESENO PLOŠČO

Diagram na sliki 39 prikazuje relativni pomik (zdrs) med GL ploščo in jeklenim profilom merjen z induktivci in mikronskimi urami. Vidimo, da je do približno 80 kN (elastično območje) zdrs praktično nič in da se tudi po razbremenjevanju vrne na začetno stanje. Šele pri večji obremenitvi se začneta lesena plošča in jekleni nosilec med seboj premikati.

Pomik se je v večini izvršil na strani desne podpore, ki vzdolžnega pomika ni imela preprečenega.

Zaradi zajema večje frekvence podatkov iz induktivnih merilcev je diagram bolj podroben in zvezen. Podatke na merilnih uricah smo odčitavali ročno na priližno 5 – 10 kN, zajem podatkov iz induktivcev pa je bil elektronski s frekvenco deset odčitkov na sekundo.



Slika 39: Zdrs na koncih

4.3. DEFORMACIJE

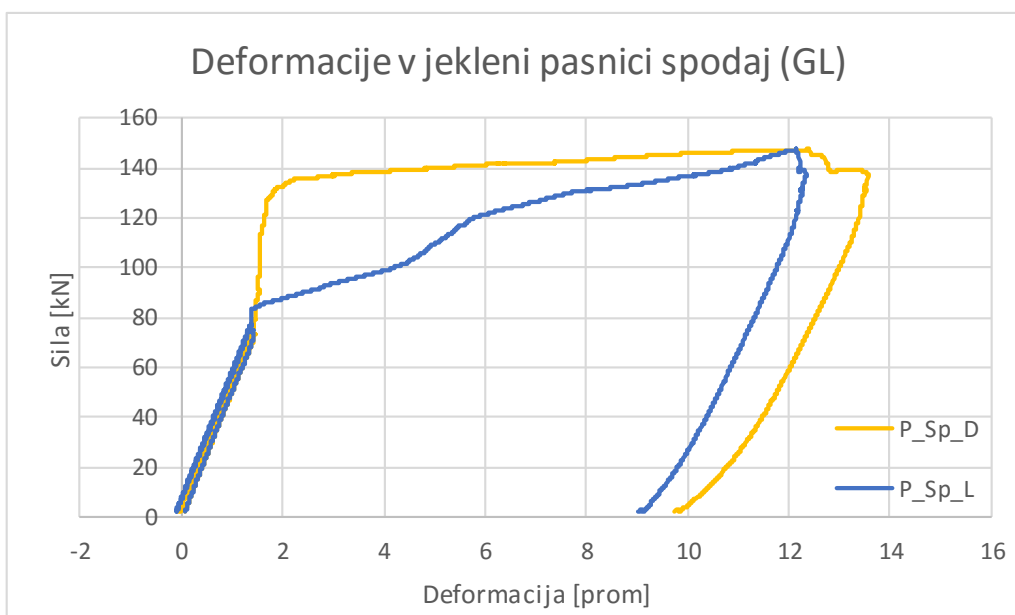
Na slikah 40 do 44 so prikazane deformacije, izmerjene na merilnih lističih. Na sliki 38 je opazen značilen prehod spodnje pasnice iz elastičnega v plastično območje, ki se zgodi pri približno 80 kN. Deformacija na prehodu znaša okoli 1,5 promila, kar krepko presega nominalno deformacijo na meji elastičnosti, ki je

$$\varepsilon = \frac{f_y}{E} = \frac{235 \text{ MPa}}{210000 \text{ MPa}} = 1,12 \cdot 10^{-3} = 1,1 \text{ ‰}$$

Z dejanskimi materialnimi karakteristikami za jeklen profil ne razpolagam, iz podatkov meritev pa lahko sklepam, da je dejanska meja tečenja jeklene pasnice precej višja od nominalne. Ta se po izračunu giblje

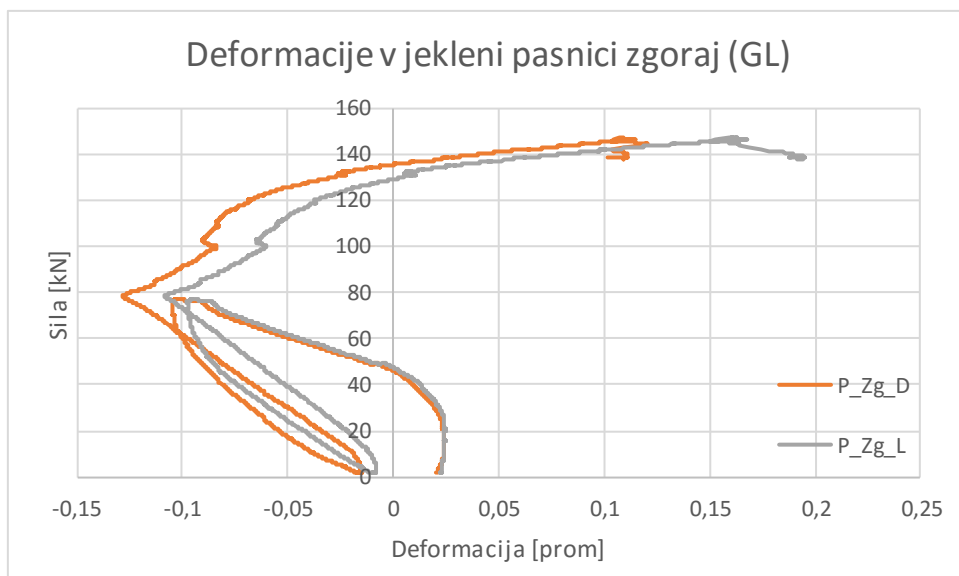
okoli 315 MPa, kar ustreza statistični razporeditvi dejanske napetosti tečenja za jeklo S235. Deformacija spodnje pasnice v mejnem stanju, ko se je porušila lesena plošča, je približno 1,2 %. Pri tej deformaciji je za jeklo značilen plastični plato.

Morda lahko omenim še, da meritve merilnega lističa P-Sp-D (slika 40) ne znam dobro pojasniti. Deformacija je med 80 do 130 kN praktično konstantna, nato pa se v majhnem prirastku sile poveča na 1,2 %. Možno, je da se je zaradi nepopolne geometrije in nesimetrične obtežbe nosilec poravnal, obtežba pa simetrično prerazporedila. Tudi nekaj ostalih meritev kaže podobno sliko (npr. slika 41).

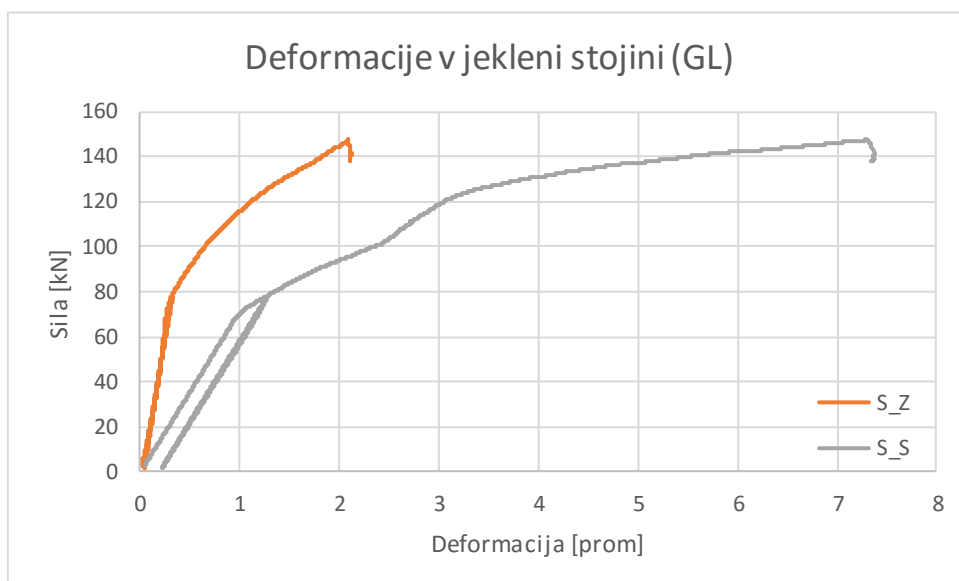


Slika 40: Deformacije v pasnici spodaj

Slika 41 prikazuje deformacije v zgornji pasnici. V začetku prvega obremenjevalnega cikla je zgornja pasnica v nategu. To kaže, da je bila nevtralna os na začetku zelo visoko (v lesu). Pri 50 kN preide v tlak in od tam do meje tečenja jekla pri 80 kN tlačne deformacije naraščajo. Po razbremenjevanju je pasnica v tlaku, kar nakazuje, da se je strižna povezava zmeščala. S tem lahko pojasnim tudi zdrse na sliki 41. V plastičnem območju se začnejo napetosti prerazporejati, nevtralna os se začne dvigati in pri približno 130 kN je celoten jekleni nosilec v nategu. Stojina je skozi test v celoti v nategu (slika 42). To pove, da bila dosežena relativno visoka strižna povezanost.

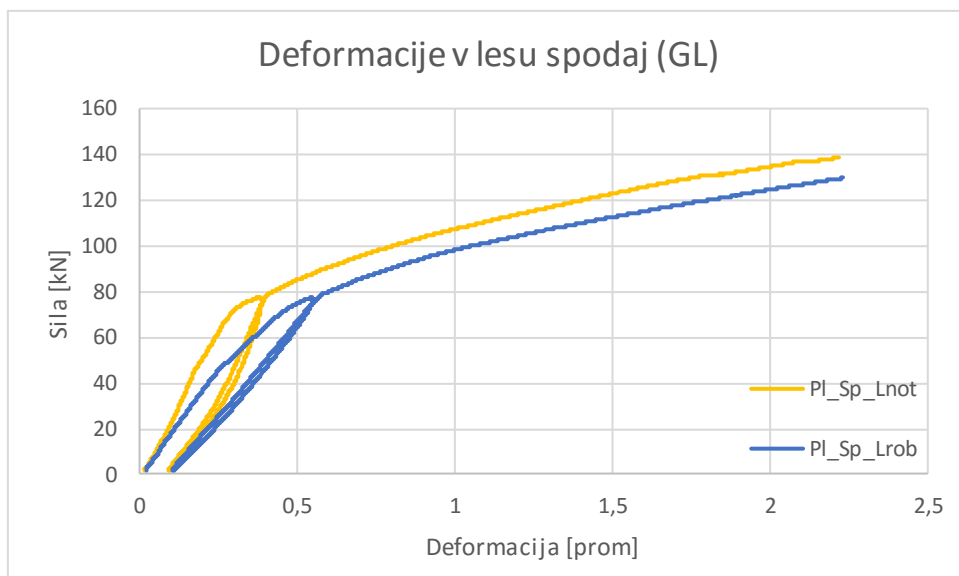


Slika 41: Deformacije v pasnici zgoraj

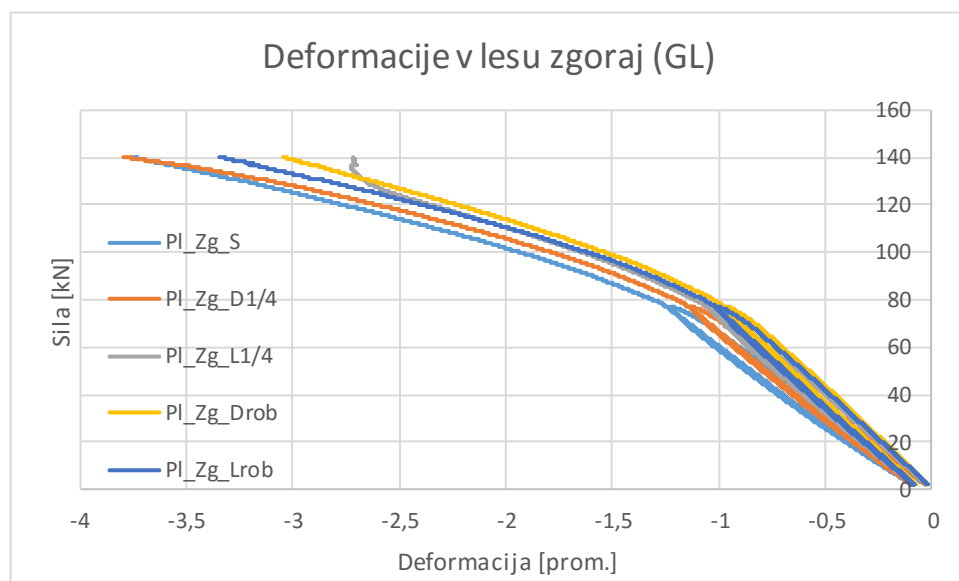


Slika 42: Deformacije v stojini

Diagram deformacije v lesu na slikah 43 in 44 pokažeta, da je leseni prerez upogibno obremenjen z nevtralno osjo pomaknjeno nižje od težiščne osi. Že od začetka obremenjevanja merilni lističi pokažejo nekaj strižnega zaostajanja, saj so deformacije ob jeklenem prerezu manjše kot na robu plošče.



Slika 43: Deformacije v lesu spodaj



Slika 44: Deformacije v lesu zgoraj

5 ANALIZA PREIZKUSA ZA NOSILEC S CLT PLOŠČO

5.1. POMIKI

Podobno kot pri prvem nosilcu z GL ploščo so tudi tu najprej prikazani pomiki na diagramih sila – pomik (slika 45). Najprej na skupnem diagramu, nato pa še po posameznih merilnih mestih.

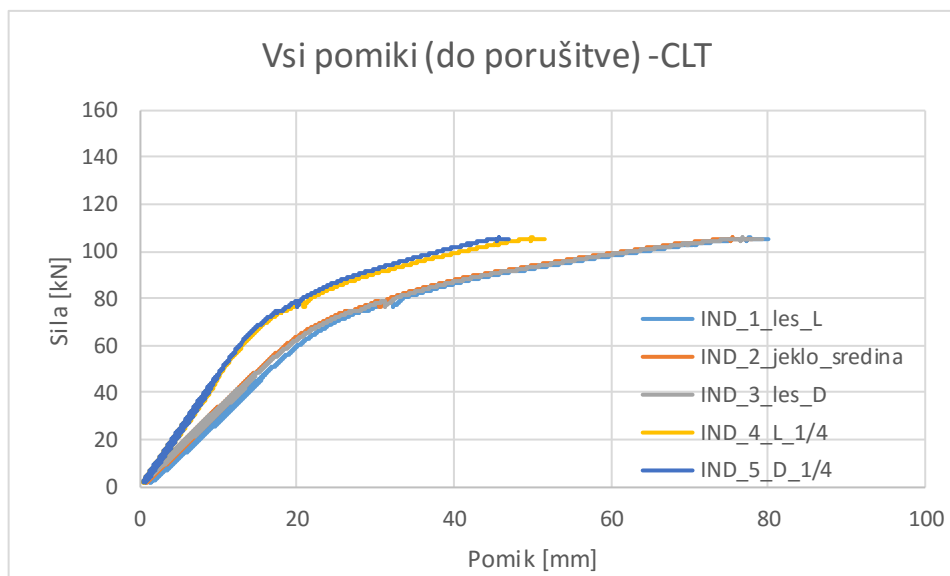
Na sliki 46 vidimo, da je tudi tu obnašanje v začetku linearno do približno 60 kN. Po razbremenjevanju se z manjšimi zaostalimi pomiki vrne skoraj v začetno pozicijo. Pri ponovnem obremenjevanju se pomiki ne povečujejo in sledijo linearni premici prvega obremenjevalnega cikla. Na ta način so zopet izničeni začetni pomiki in posedki na podporah in na podložnih gumah v statičnem sistemu. Po preseženi sili 60 kN je viden padec v togosti, ki se nadaljuje do porušitve.

Pri približno 80 kN je viden trenuten padec sile, kar je posledica zaustavitve testa. Pri konstantnem pomiku je značilen padec sile, če je bil test zaustavljen.

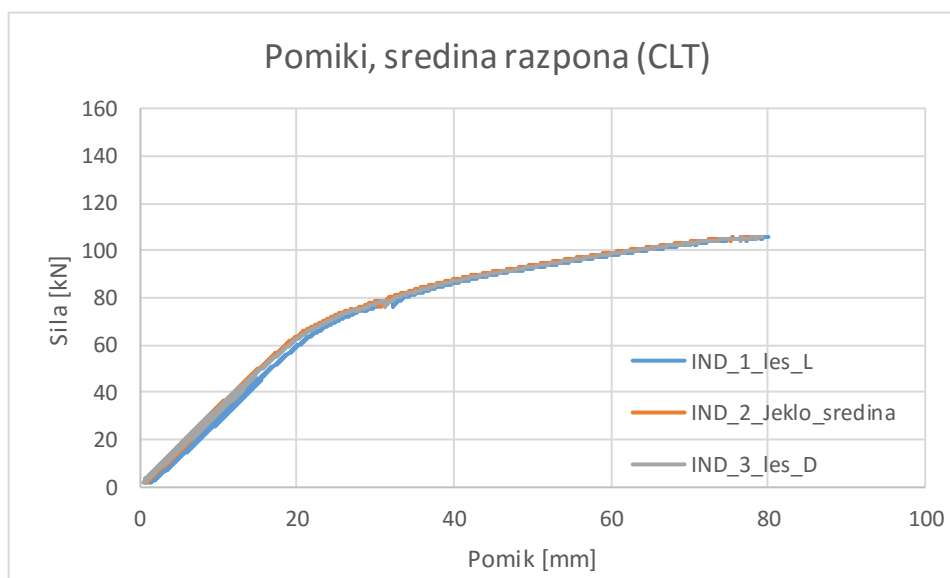
Test je bil izveden z enakim statičnim sistemom obremenjevanja kot pri prvem nosilcu s to razliko, da sta bili obe podpori drsni. Pri 104,1 kN smo dosegli plato (konstantna sila). Ker je bil statični sistem z drsnimi podporami na obeh straneh labilen, prav tako pa je bil labilen sistem obremenjevanja, zaradi platoja pa sistem ni imel togosti, se je sistem obremenjevanja zapeljal in padel na leseni plošči. Plato je lahko posledica popuščanje lesene plošče v strigu, vendar vidnih porušitev nismo zabeležili.

Slika 48 prikazuje sistem upogibnega preizkusa in statični sistem obremenjevanja. Slika 49 prikazuje odziv preizkušanca pri 92 kN – upogib nosilca in padec sistema za obremenjevanje na ploščo nosilca. Na sliki 50 sta fotografiji direktnega obremenjevanja z batom do porušitve.

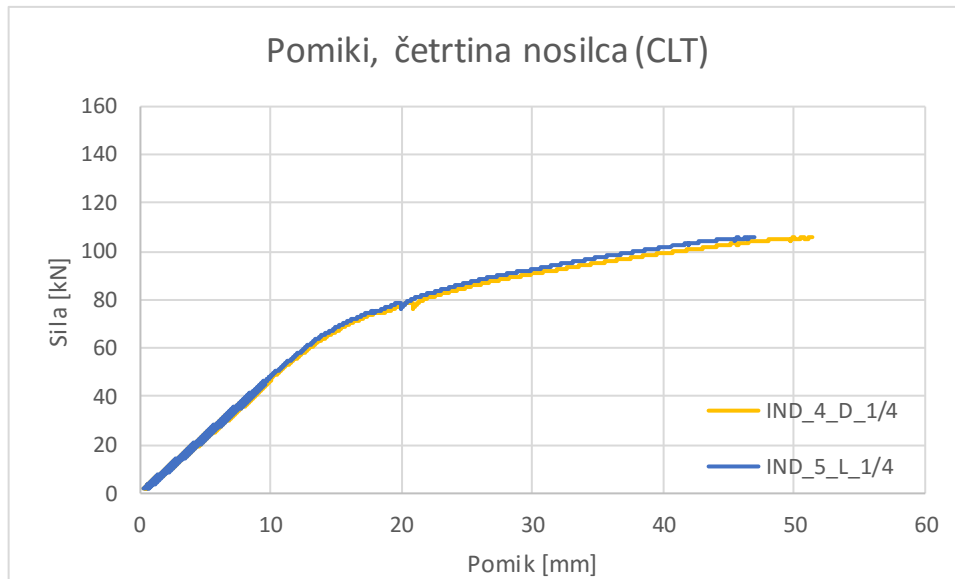
Na sliki 48 so vidne razpoke po zgornjih lamelah, razmiki med vzdolžnimi lamelami so bili tudi več kot 4 mm, podobno stanje je tudi na spodnjih vzdolžnih lamelah. Na sliki 51 so vidne razpoke v lesu v sredinskih lamelah. Na ploščo pod mesti vnašanja sile sem pred testom po višini narisal črte, ki so služile kot indikator zdrsa med lamelami na stranici plošče, vendar zdrs med lamelami ni bil opažen.



Slika 45: Diagram sila-pomik



Slika 46: Diagram sila-pomik sredina razpona



Slika 47: Diagram sila-pomik četrtna razpona



Slika 48: Sistem obremenjevanja (levo) in pogled s strani pred začetkom testa (desno)



Slika 49: Odziv preizkušanca pri 92 kN (levo) in porušitev statičnega sistema (desno)



Slika 50: Odziv preizkušanca – točkovno obremenjevanje pri 78 kN (levo) in porušitev (desno)



Slika 51: Profil za pregled zamikov po končanem testiranju

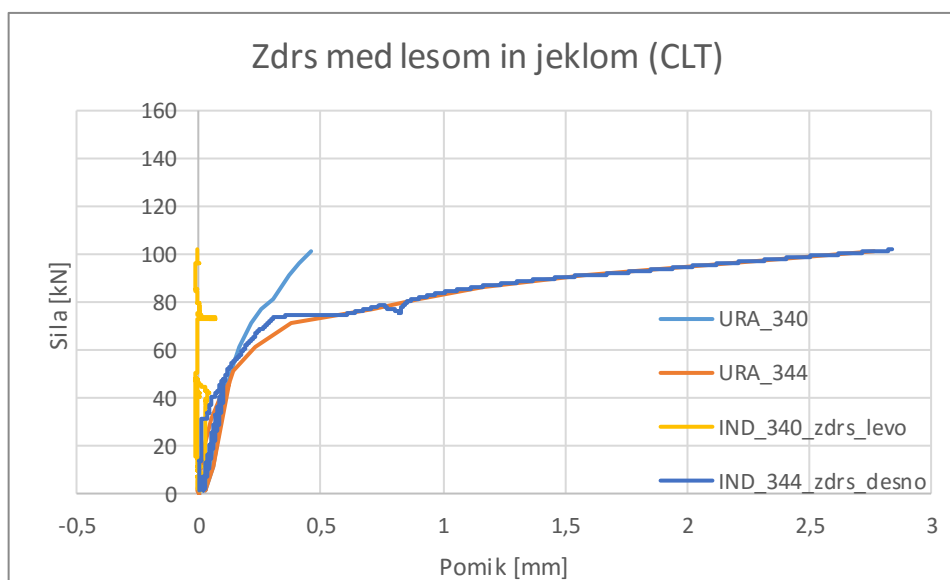
5.2. ZDRSI

Diagram na sliki 52 prikazuje relativni pomik (zdrs) med CLT ploščo in jeklenim profilom. Tudi pri tem testu se je izkazalo, da so bili zdrs v linearnem območju do približno 60 kN skoraj nični in so se tudi po razbremenjevanju vrnil v začetno stanje. Drseti začneta šele pri večji obremenitvi.

Diagram je prikazan samo do največje sile bata. Po porušitvi se je statični sistem obremenjevaja zapeljal v levo in diagrami niso več čitljivi.

Zaradi zajema večje frekvence podatkov iz induktivnih merilcev je zapis le-teh bolj zvezen. Na merilnih uricah smo delali odčitke na priližno 5 – 10 kN obremenitve hidravličnega bata in lahko služijo kot primerjalne vrednosti.

Na sliki 52 opazimo, da je na levi strani zdrs začel hitro naraščati, ko je sila preseгла 60 kN. Meritvi urice in induktivca se za levo stran lepo pokrijeta. Hitro naraščanje zdrsa pa kaže na odpoved lesene plošče pri prenosu strižnih napetosti.



Slika 52: Zdrs med lesom in jeklom

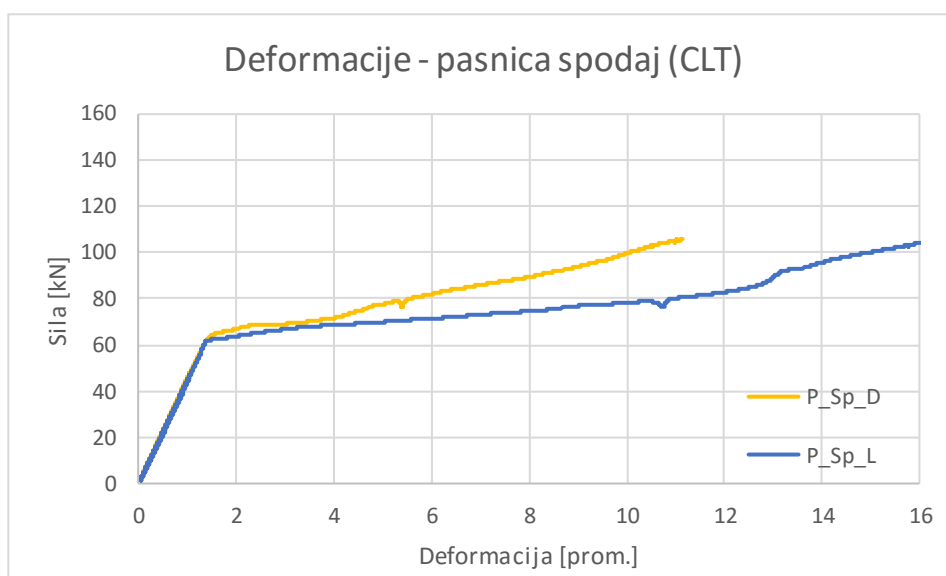
5.3. DEFORMACIJE

Spodnji diagrami (slike 53 do 57) prikazujejo na testu izmerjene deformacije pri nosilcu s CLT ploščo.

Iz diagrama deformacij na spodnji pasnici (slika 53) je razviden začetek plastifikacije spodnje pasnice. Plastifikacija se prične pri približno 60 kN, kjer deformacije znašajo 1,4 promila. To potrdijo tudi izmerjene vrednosti na testu.

To zopet preseže nominalno deformacijo na meji elastičnosti, ki znaša 1,1 promila. Tu ocena dejanske meja tečenja znaša približno $f_y = 29,4 \text{ kN/cm}^2$. Deformacije spodnje pasnice pri porušitvi 104,2 kN narastejo preko 1,5%,

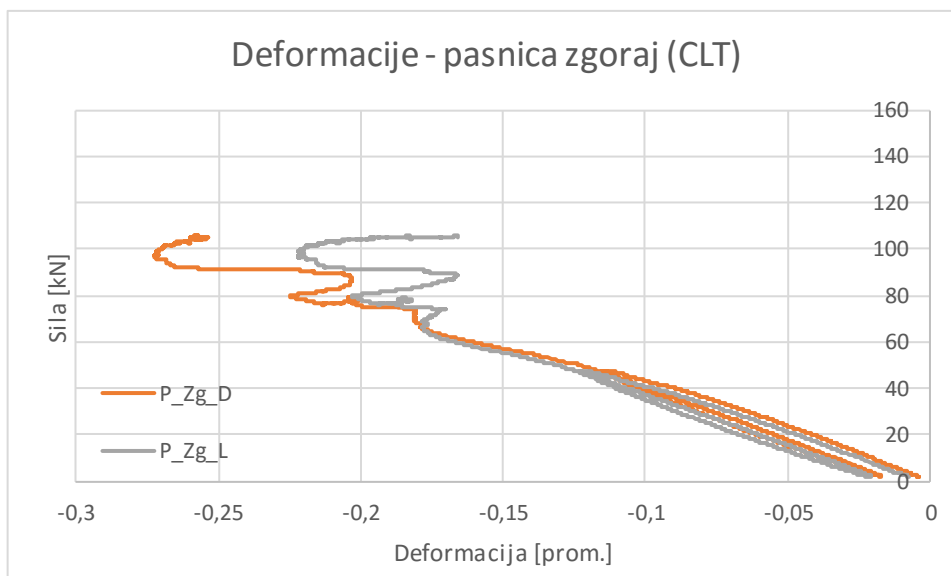
Na diagramu deformacij spodnje pasnice (slika 53) je opaziti, da je deformacija izmerjena na levi strani večja kot na desni. To lahko pripišem nesimetričnosti obtežbe.



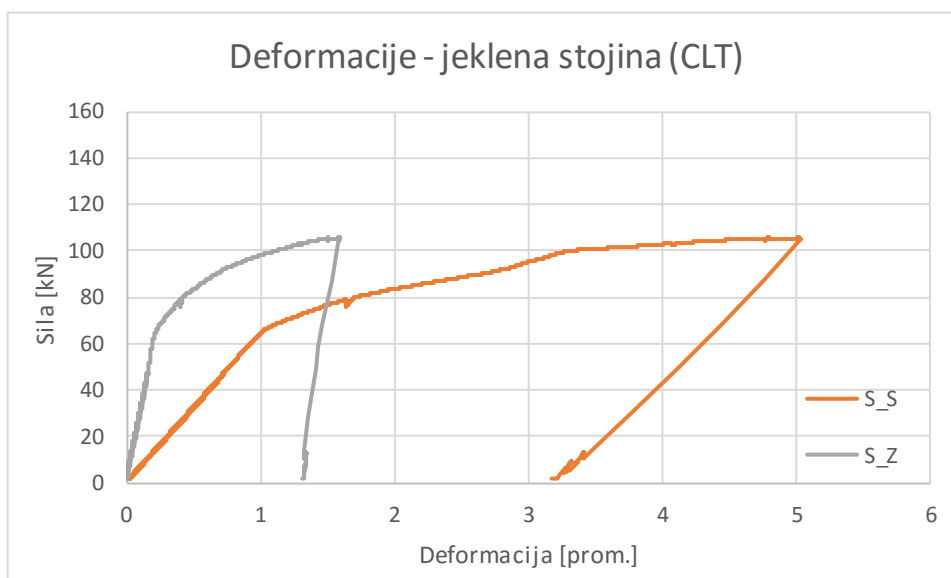
Slika 53: Deformacije - pasnica spodaj

Iz diagrama deformacij v zgornji pasnici (slika 54) vidimo, da je zgornja pasnica skozi celotni preizkus v tlaku. Ko sistem preide v plastično območje (sila nad 70 kN), se napetosti v jeklenemu nosilcu želijo prerazporediti in nevtralna os se v zgornji pasnici začne pomikati navzgor (deformacije se obrnejo proti 0; med 80 in 90 kN). Ker sistem ni sposoben prevzeti večje obtežbe, se deformacije nenadoma obrnejo nazaj proti tlaku (pomik nevtralne osi navzdol; nad 90 kN do približno 100 kN). To pa seveda sprosti strižno povezavo in poveča upogibno obremenitev lesene plošče. Sledi znan scenarij.

Iz slike 55 razberem, da je celotna stojina v nategu. Ker je tudi zgornji merilni listič stojine v nategu, sklepam, da je bila ponovno dosežena visoka stopnja strižne povezave.

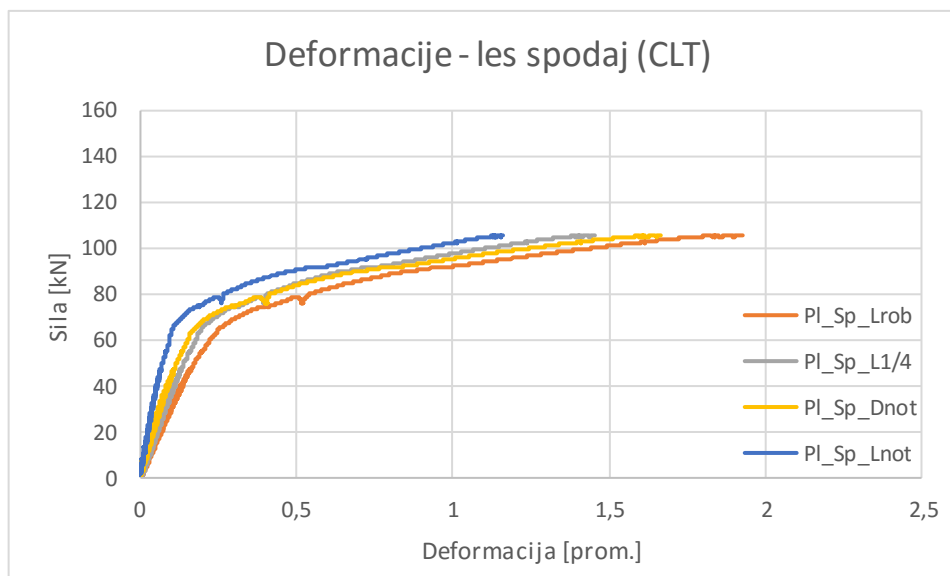


Slika 54: Deformacije - pasnica zgoraj

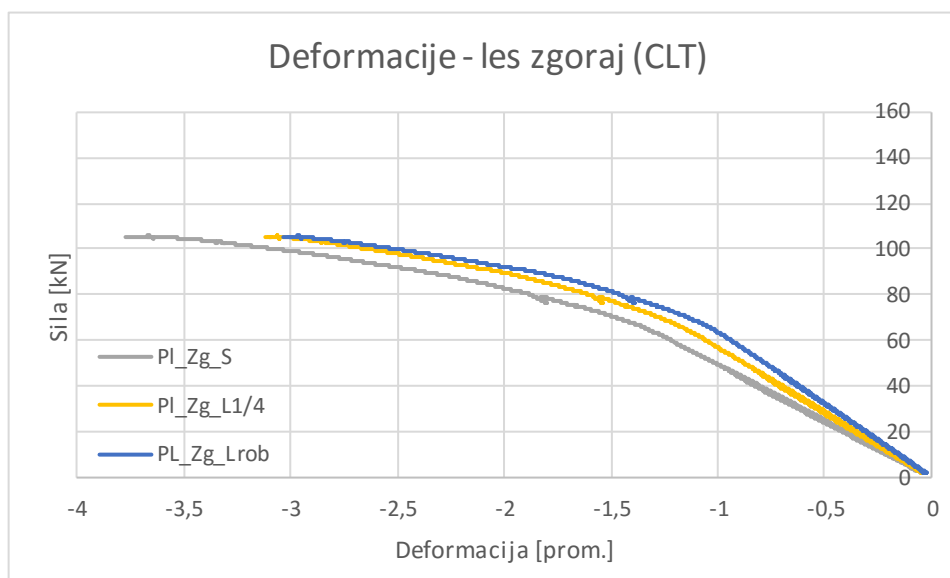


Slika 55: Deformacije - jeklena stojina

Lesena plošča je spodaj natezno obremenjena. To vidimo iz diagrama deformacij v spodnjem delu lesene plošče (slika 56). V tem testu sem imel na spodnji strani plošče več merilnih lističev in iz njih se dobro vidi strižno zaostajanje. Po sredini je vrednost strižnih deformacij najmanjša. Bolj ko se pomikamo proti zunanju roboma, večje so deformacije. Enako se vidi tudi v zgornjem delu plošče (slika 57), kjer so tlačne napetosti po sredini nosilca manjše kot napetosti po robovih. Ponovno je nevtralna os v lesu pomaknjena navzdol od težiščne osi. S tem se v lesu tvori tlačna sila, ki uravnoteži natezno silo v jeklenemu nosilcu.



Slika 56: Deformacije - les spodaj



Slika 57: Deformacije - les zgoraj

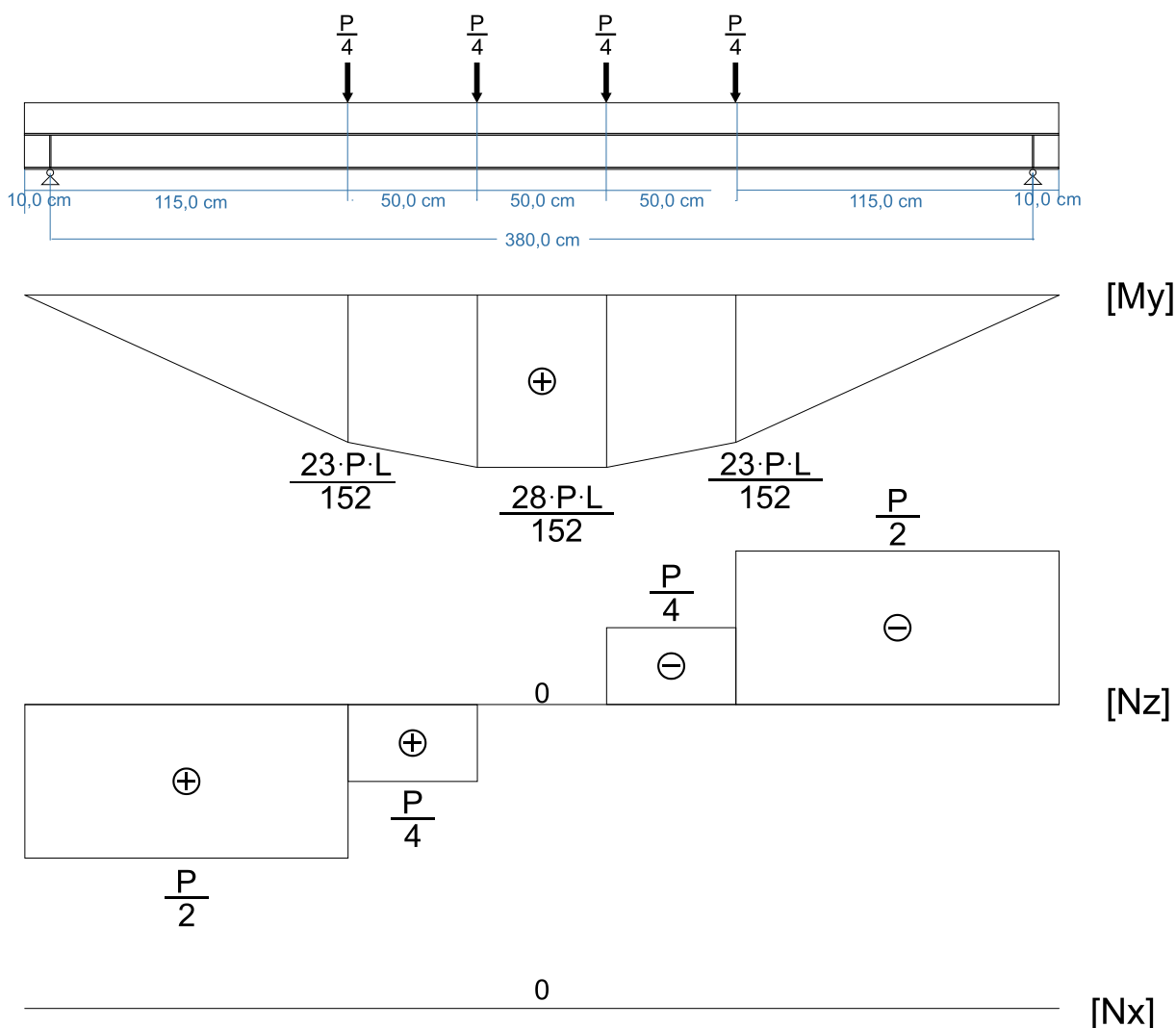
6 NOTRANJE STATIČNE VELIČINE

6.1. STATIČNI MODEL

Statični sistem je za oba preizkušanca enak (slika 58). Predpostavim model prostoležeči nosilec s štiri točkovno obremenitvijo. Tudi dolžina preizkušancev je enaka za oba preizkušanca in znaša $L = 380$ cm med osema rotacije. Odziv obeh preizkušancev je v začetnem delu obremenjevanja linearen (kar je razvidno iz prejšnjih diagramov). Zaradi tega lahko enostavno iz vrednotim notranje statične količine iz podatkov, pridobljenih na testu. Žal nimam podatkov o elastičnem modulu za leseni plošči, ju pa lahko izračunam iz ravnotežnih pogojev. Izračunana elastična modula ustrežata sistemski vrednosti elastičnih modulov določenih za vsak sistem.

Zunanji moment lahko izračunam iz statičnega modela na sliki 58. Njegova maksimalna vrednost na sredini znaša:

$$M_y = \frac{28 \cdot P \cdot L}{152} = 70 \cdot P \quad , \text{ pri dolžini nosilca } L = 380 \text{ cm}$$



Slika 58: Računski statični model

Iz diagramov notranjih sil je razvidno, da so osne sile enake nič. Seveda drugače ne more biti, ker na testu ni bilo vsiljenih horizontalnih sil. Zato se morajo vse tlačne sile, ki nastanejo uravnotežiti z natezno silo, ki nastane v nosilcu.

Velikost maksimalnega zunanjšega momenta za nosilec z GL ploščo lahko tukaj izračunamo po enačbi

$$M_y = \frac{28 P L}{152} = \frac{28 * 145,5 * 380}{152} = 70 * 145,5 = 10185 \text{ kNcm}$$

in analogno tudi velikost zunanjšega momenta za nosilec s CLT ploščo

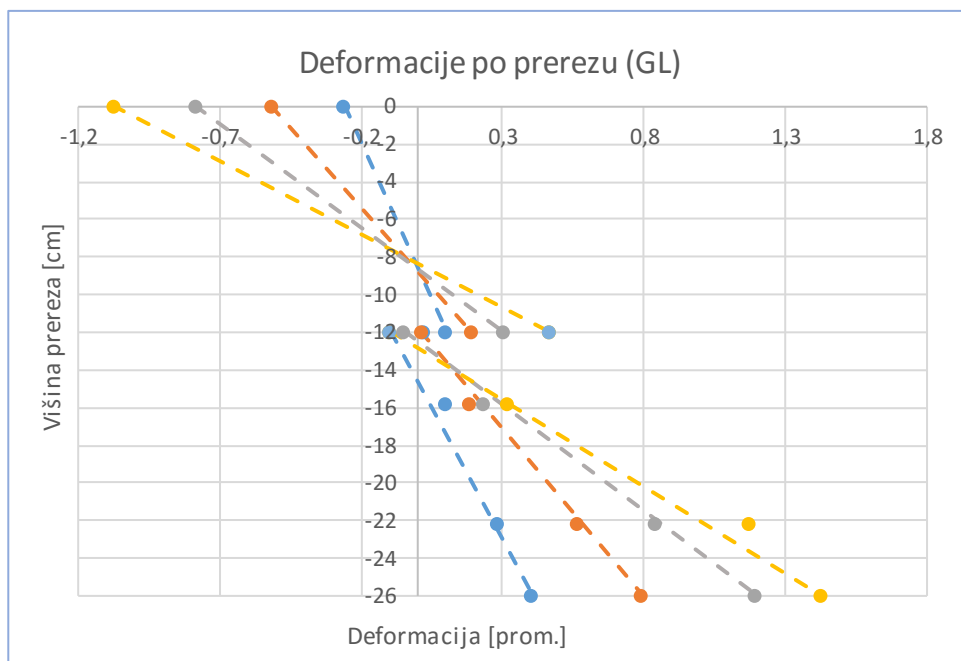
$$M_y = \frac{28 P L}{152} = \frac{28 * 104,2 * 380}{152} = 70 * 104,2 = 7294 \text{ kNcm}$$

Izračunani vrednosti predstavljata največja momenta, ki sta ju nosilca še prenesla, preden sta se porušila.

6.2. NOSILEC Z GL PLOŠČO

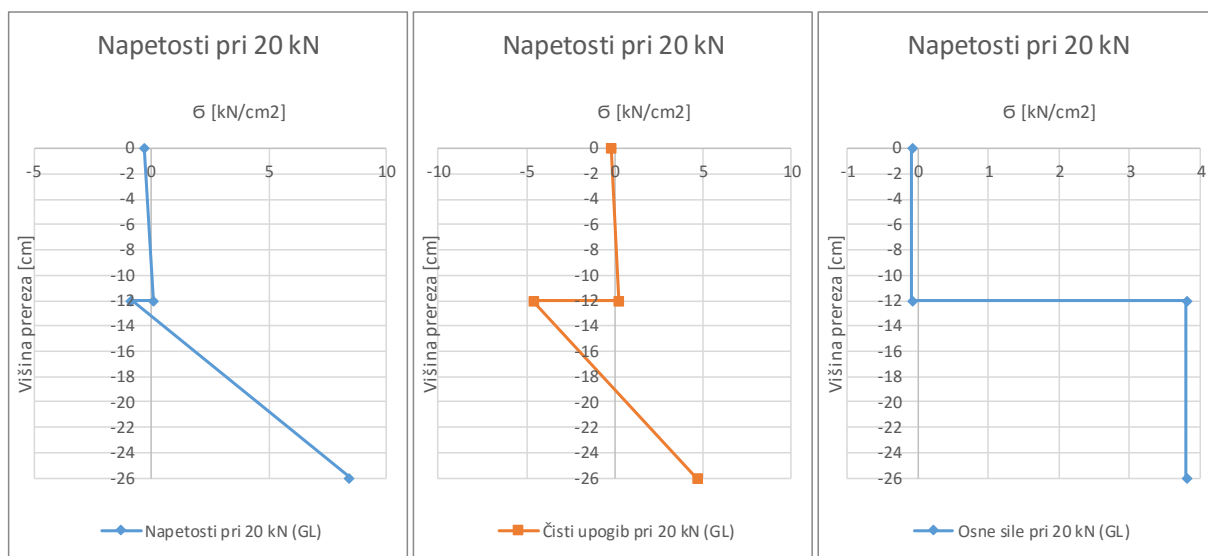
Na sliki 59 so prikazani rezultati direktnih meritev in prikazujejo izmerjene deformacije po prerezu nosilca z GL ploščo pri različnih nivojih obremenitve, ko je bil nosilec v elastičnem območju.

Diagram je narejen ob predpostavkah, da so deformacije po posameznih delih prereza linearne, vrednosti (izmerjenih) deformacij po prerezu pa so vzete kot povprečje meritev na robu in sredini nosilca. Zaradi boljše preglednosti so meritve deformacij prikazane s pikami, linearna aproksimacija teh točk za posamezno silo pa je prikazana s črkanimi črtami.

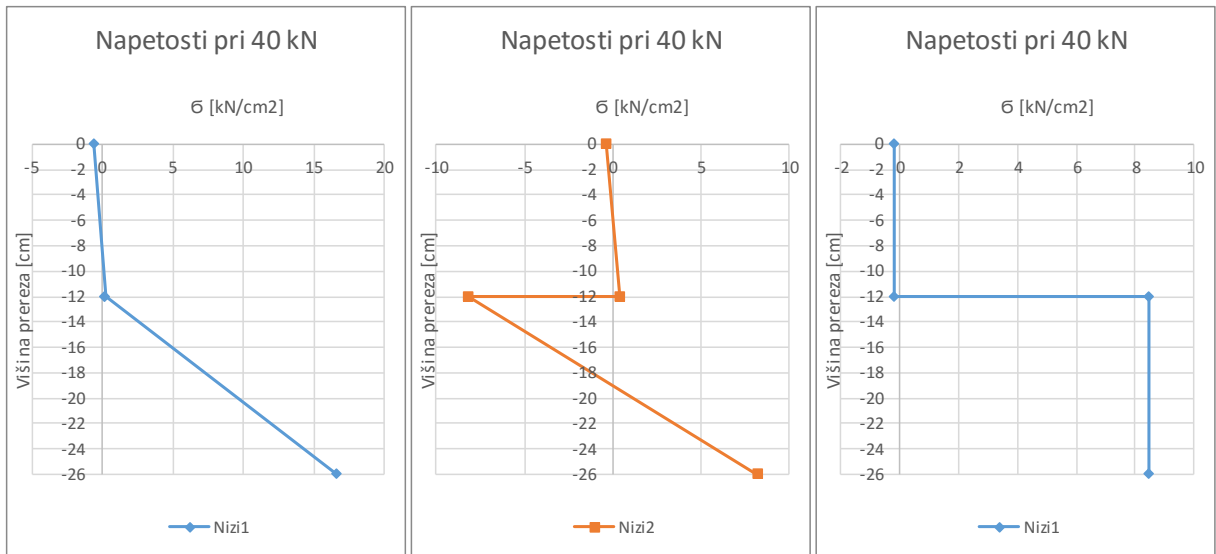


Slika 59: Deformacije po prerezu (modra 20kN, oranžna 40 kN, siva 60 kN, rumena 75 kN)

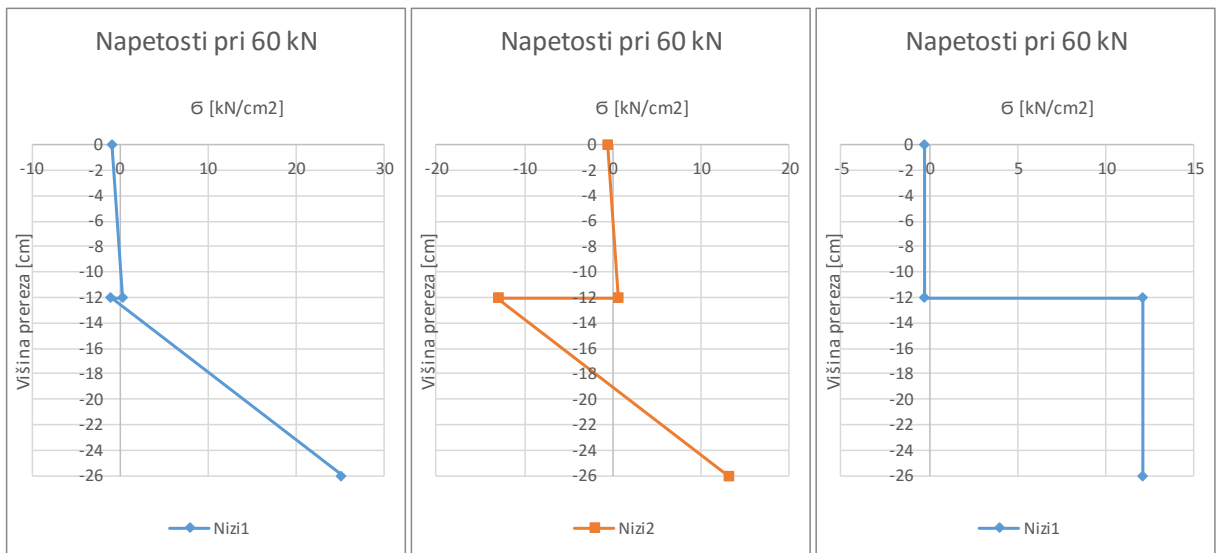
Na tem mestu si bomo pogledali, kaj se dogaja z napetostmi po prerezu v linearnem območju obremenjevanja. Na slikah 60 - 63 so prikazana napetostna stanja, ki pripadajo deformacijam pri različnih zunanjih obremenitvah. Prikazane so vrednosti pri zunanji obremenitvi za 20 kN, 40 kN, 60 kN in 75 kN. Prikaz normalnih napetosti je zaradi lažjega razumevanja razdeljen na napetosti zaradi upogibnih momentov - čisti upogib in na napetosti zaradi osne sile. Prijemališča momentov v čistem upogibu in prijemališča osnih sil se nahajajo v težiščih lesene plošče in jeklenega nosilca.



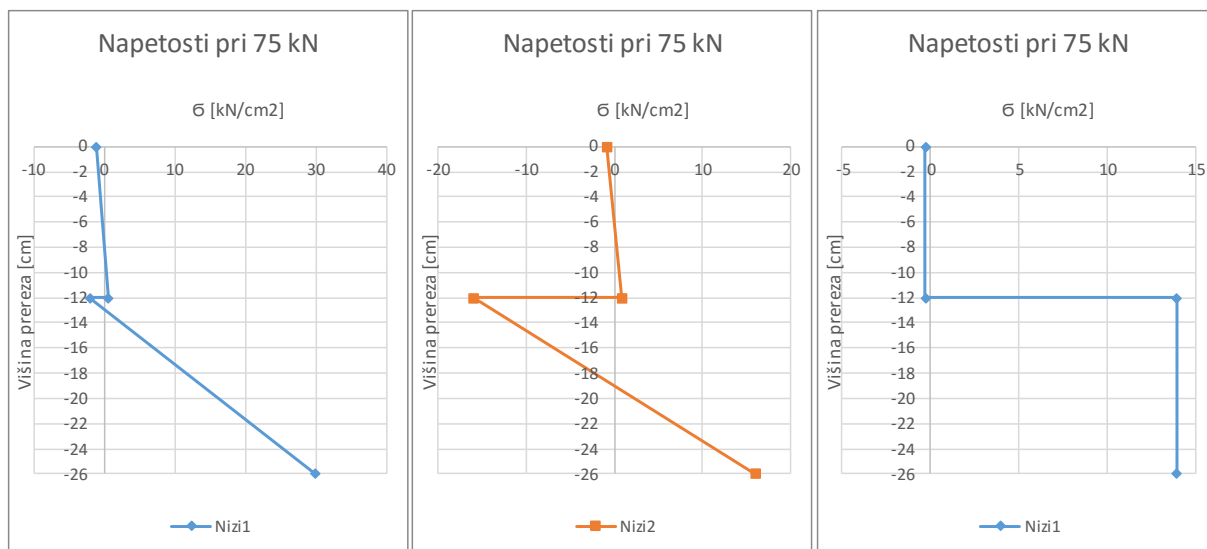
Slika 60: Napetosti pri 20 kN



Slika 61: Napetosti pri 40 kN



Slika 62: Napetosti pri 60 kN



Slika 63: Napetosti pri 75 kN

Iz deformacij in ravnotežja sem izračunal elastični modul za leseni del nosilca z GL ploščo. Izkazalo se je, da povprečni modul elastičnosti znaša $E_{GL} = 1110 \text{ kN/cm}^2$.

Tako sem lahko po enačbi

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

izračunal napetosti po prerezu nosilca pri različnih obremenitvah v linearnem območju, ki so predstavljene v slikah zgoraj.

Vemo, da je 210 GPa dobra ocena elastičnega modula za jeklo, zato bo ta v nadaljnjih računih upoštevan tako. Žal pa ne razpolagam z materialnimi podatki za lesena lepljena nosilca, zato izračunam elastični modul lesa direktno iz ravnotežnih enačb. Osnova sila je enaka nič, saj nimamo zunanjih osnih sil, upogibni moment v prerezu pa je enak zunanjemu momentu.

$$\int_A \sigma \, dA = \sum_i F_i = 0$$

$$\int_A \sigma \cdot z \, dA = \sum_i M_i + \sum_i F_i \cdot z_i = M_y$$

Za potrebe izračuna notranjega momenta je bilo potrebno najprej določiti geometrijske karakteristike in vrednosti napetosti.

σ_{ij} ... normalne napetosti po prerezu iz deformacij v točki prereza ($i = \text{les, jeklo}; j = \text{zgoraj, spodaj}$)

$\sigma_{i,Mj}$... normalne napetosti zaradi upogibnega momenta ($i = \text{les, jeklo}; j = \text{zgoraj, spodaj}$)

$\sigma_{i,Nj}$... normalne napetosti zaradi osne sile ($i = \text{les, jeklo}; j = \text{zgoraj, spodaj}$)

W_i ... odpornostni moment prereza ($i = \text{les, jeklo}$)

A_i ... površina prereza ($i = \text{les, jeklo}$)

M_i ... notranji moment kot produkt normalnih napetosti zaradi upogiba in odpornostnega momenta ($i = \text{les, jeklo}$)

F_i ... notranja sila kot produkt normalnih napetosti zaradi osne sile in površine prereza ($i = \text{les, jeklo}$)

z_i ... razdalja od koordinatnega sistema do prijemališča notranje sile ($i = \text{les, jeklo}$)

Odpornostni moment in površino prereza za jekleni prerez odčitam iz tabele za IPE profile [2], za pravokotni prerez lesene plošče pa ju izračunam po enačbah

$$W_{les} = \frac{b \cdot h^2}{6}, \text{ kjer sta } b \text{ in } h \text{ širina in višina prereza}$$

$$A_{les} = b \cdot h, \text{ kjer sta } b \text{ in } h \text{ širina in višina prereza}$$

Iz vseh podatkov pa lahko izračunam notranje sile in momente s pomočjo spodnjih dveh enačb

$$\sigma = \frac{M}{W} \Rightarrow M = \sigma \cdot W$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \Rightarrow F = \sigma \cdot A$$

V preglednicah 4 do 7 je prikazan izračun ravnotežja notranjih sil in izračun notranjih momentov.

Preglednica 4: Izračun notranjega momenta pri 20 kN

GL pri 20kN		ϵ_{ij}	E_i	σ_{ij}	σ_i, M_j	σ_i, N_j	W_i	A_i	M_i	F_i	z_i	$F_i \times z_i$	$F_i \times z_i + M_i$
i	j	[prom]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[cm ³]	[cm ²]	[kNcm]	[kN]	[cm]	[kNcm]	[kNcm]
les	zg	-0,259	1110	-0,288	-0,200	-0,088	-1440	720	287,78	-63,11	6	-378,67	-90,89
	sp	0,101		0,112	0,200	-0,088	1440						
jeklo	zg	-0,040	21000	-0,845	-4,649	3,805	-77,30	16,40	359,38	62,40	19	1185,51	1544,89
	sp	0,403		8,454	4,649	3,805	77,30						
										ΣF	-0,72	$\Sigma M = Mn$	1454,00

Zunanji moment tukaj znaša

$$M_y = \frac{28 P L}{152} = \frac{28 * 20 * 380}{152} = 70 * 20 = 1400 \text{ kNcm}$$

$$\Sigma F = -0,72 \text{ kN}$$

$$\frac{M_n}{M_y} = \frac{1454}{1400} = 1,04 \rightarrow +4\% \text{ odstopanja}$$

Preglednica 5: Izračun notranjega momenta pri 40 kN

GL pri 40kN		ϵ_{ij}	E_i	σ_{ij}	$\sigma_{i,Mj}$	$\sigma_{i,Nj}$	W_i	A_i	M_i	F_i	z_i	$F_i \times z_i$	$F_i \times z_i + M_i$
i	j	[prom]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[cm ³]	[cm ²]	[kNcm]	[kN]	[cm]	[kNcm]	[kNcm]
les	zg	-0,530	1110	-0,588	-0,398	-0,190	-1440	720	573,50	-136,62	6	-819,71	-246,21
	sp	0,188		0,209	0,398	-0,190	1440						
jeklo	zg	0,011	21000	0,238	-8,211	8,450	-77,30	16,40	634,74	138,57	19	2632,87	3267,60
	sp	0,793		16,661	8,211	8,450	77,30						
										ΣF	1,95	$\Sigma M = Mn$	3021,39

Zunanji moment tukaj znaša

$$M_y = \frac{28 P L}{152} = \frac{28 * 40 * 380}{152} = 70 * 40 = 2800 \text{ kNcm}$$

$$\Sigma F = 1,95 \text{ kN}$$

$$\frac{M_n}{M_y} = \frac{3021,39}{2800} = 1,08 \rightarrow +8\% \text{ odstopanje}$$

Preglednica 6: Izračun notranjega momenta pri 60 kN

GL pri 60kN		ϵ_{ij}	E_i	σ_{ij}	$\sigma_{i,Mj}$	$\sigma_{i,Nj}$	W_i	A_i	M_i	F_i	z_i	$F_i \times z_i$	$F_i \times z_i + M_i$
i	j	[prom]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[cm ³]	[cm ²]	[kNcm]	[kN]	[cm]	[kNcm]	[kNcm]
les	zg	-0,797	1110	-0,884	-0,610	-0,274	-1440	720	878,37	-197,58	6	-1185,48	-307,11
	sp	0,302		0,336	0,610	-0,274	1440						
jeklo	zg	-0,047	21000	-0,979	-13,056	12,077	-77,30	16,40	1009,25	198,06	19	3763,19	4772,44
	sp	1,197		25,133	13,056	12,077	77,30						
										ΣF	0,48	$\Sigma M = Mn$	4465,33

Zunanji moment tukaj znaša

$$M_y = \frac{28 P L}{152} = \frac{28 * 60 * 380}{152} = 70 * 60 = 4200 \text{ kNcm}$$

$$\Sigma F = 0,45 \text{ kN}$$

$$\frac{M_n}{M_y} = \frac{4465,33}{4200} = 1,06 \rightarrow +6\% \text{ odstopanja}$$

Preglednica 7: Izračun notranjega momenta pri 75 kN

GL pri 75kN		ϵ_{ij}	E_i	σ_{ij}	$\sigma_{i,Mj}$	$\sigma_{i,Nj}$	W_i	A_i	M_i	F_i	z_i	$F_i \times z_i$	$F_i \times z_i + M_i$
i	j	[prom]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[cm ³]	[cm ²]	[kNcm]	[kN]	[cm]	[kNcm]	[kNcm]
les	zg	-1,039	1110	-1,153	-0,834	-0,319	-1440	720	1200,70	-230,02	6	-1380,11	-179,40
	sp	0,463		0,514	0,834	-0,319	1440	720	1200,70	-230,02	6	-1380,11	
jeklo	zg	-0,099	21000	-2,074	-16,005	13,931	-77,30	16,40	1237,20	228,48	19	4341,03	5578,23
	sp	1,426		29,937	16,005	13,931	77,30	16,40	1237,20	228,48	19	4341,03	
										ΣF	-1,54	$\Sigma M = Mn$	5398,83

Zunanji moment tukaj znaša

$$M_y = \frac{28 \text{ P L}}{152} = \frac{28 * 80 * 380}{152} = 70 * 75 = 5250 \text{ kNcm}$$

$$\sum F = -1,54 \text{ kN}$$

$$\frac{M_n}{M_y} = \frac{5398,83}{5250} = 1,03 \rightarrow +3\% \text{ odstopanje}$$

Iz preglednic 4 do 7 razberemo, da je seštevek notranjih sil enak nič, razlika med notranjim in zunanjim momentom pa ne presega 8%.

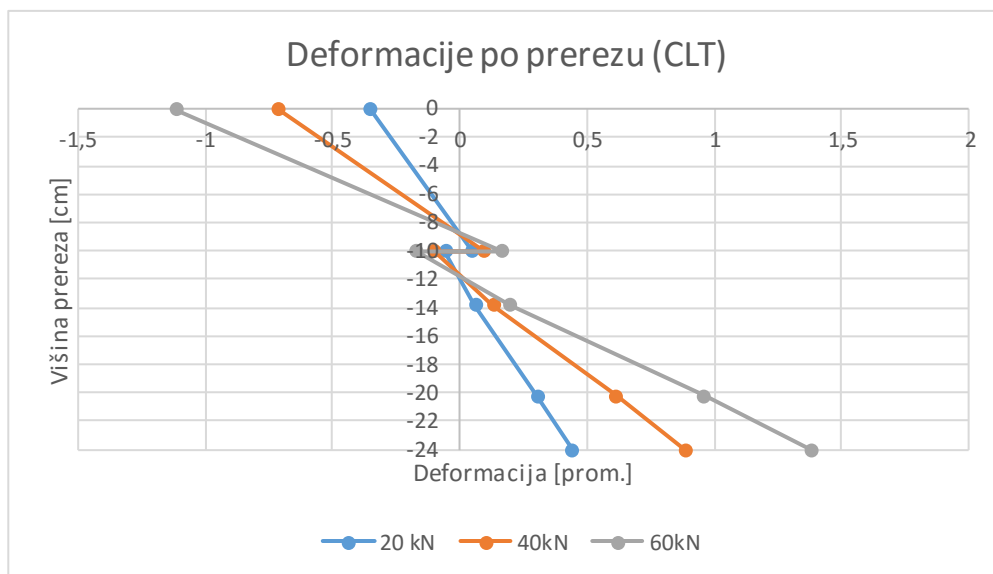
Standard navaja srednjo vrednost elastičnega modula $E_{les} = 1160 \text{ kN/cm}^2$ za lepljen les kvalitete GL24h [1]. Z elastičnim modulom, ki sem ga izračunal iz podatkov, sem se srednji vrednosti zelo dobro približal. Za račun sem uporabil deformacije izmerjene v prvem obremenjevalnem ciklu in za različne zunanje obremenitve dobil relativno konsistenten rezultat za elastični modul, ki sem ga nato povprečil na vrednost $E_{les} = 1110 \text{ kN/cm}^2$. Verjetno izračunan elastični modul ne predstavlja dejanske vrednosti za konkretno leseno ploščo, ampak vrednosti v kateri je upoštevana narava sistema. Kljub temu je izračunana vrednost v območju vrednosti, podane s standardom.

6.3. NOSILEC S CLT PLOŠČO

Na diagramu deformacij po prerezu (slika 64) so rezultati direktnih meritev in prikazujejo izmerjene deformacije na nosilcu s CLT ploščo.

Tudi pri njih veljata predpostavki, da so deformacije po posameznih delih prereza linearne, vrednosti deformacij po prerezu pa so vzete kot povprečje meritev na robu in sredini nosilca. Tukaj so meritve ustrezno in deformacije linearno naraščajo, zato linearna aproksimacija izmerjenim točkam ni potrebna.

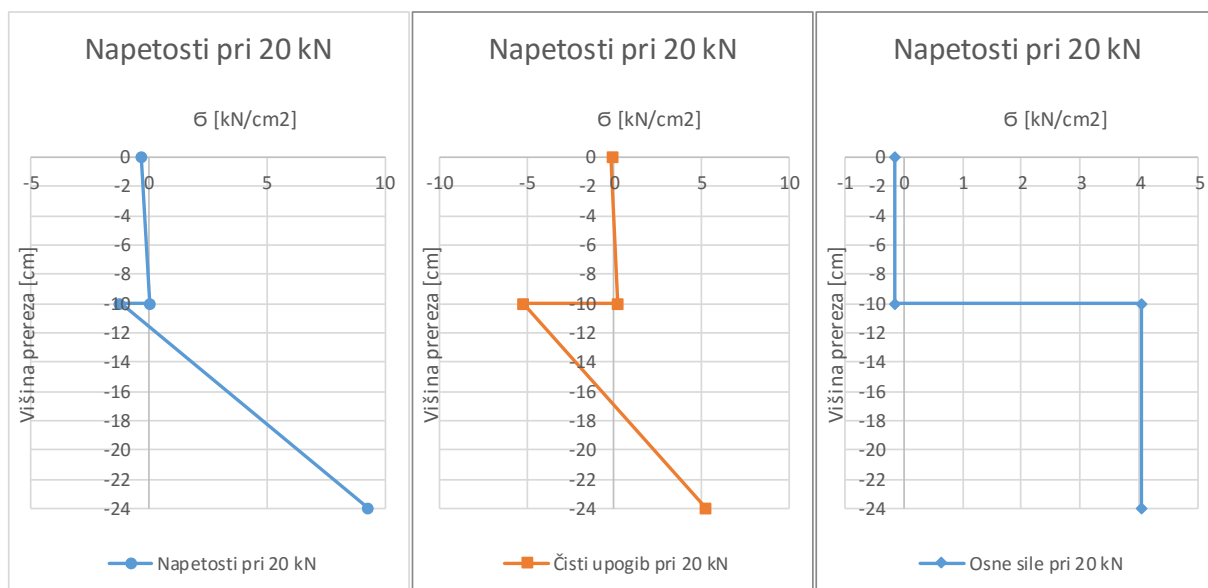
Pri CLT ploščah se lahko pojavi problem, ker so plasti lamel obrnjene tako, da pri upogibnem nosilcu tlačne sile obremenjujejo notranjo plast lamel pravokotno na vlakna. Vemo, da les tako obremenitev prenaša približno desetkrat slabše kot vzporedno z vlakni, zato se lahko zaradi strižnih napetosti pojavi »rolling shear«. Tu ga v računu nisem upošteval in sem leseno ploščo nosilca računal kot običajni lepljen nosilec [3].



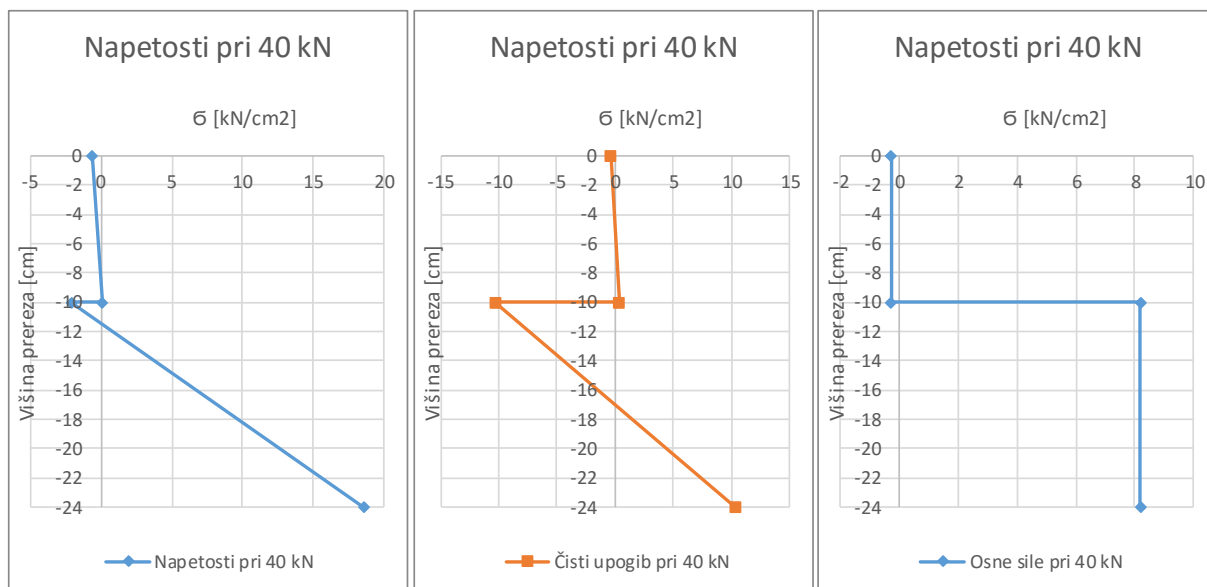
Slika 64: Deformacije po prerezu

Po enakem principu kot pri nosilcu z GL ploščo iz deformacij izračunam elastični modul lesa. Ocenil sem ga na vrednost $E_{CLT} = 873 \text{ kN/cm}^2$.

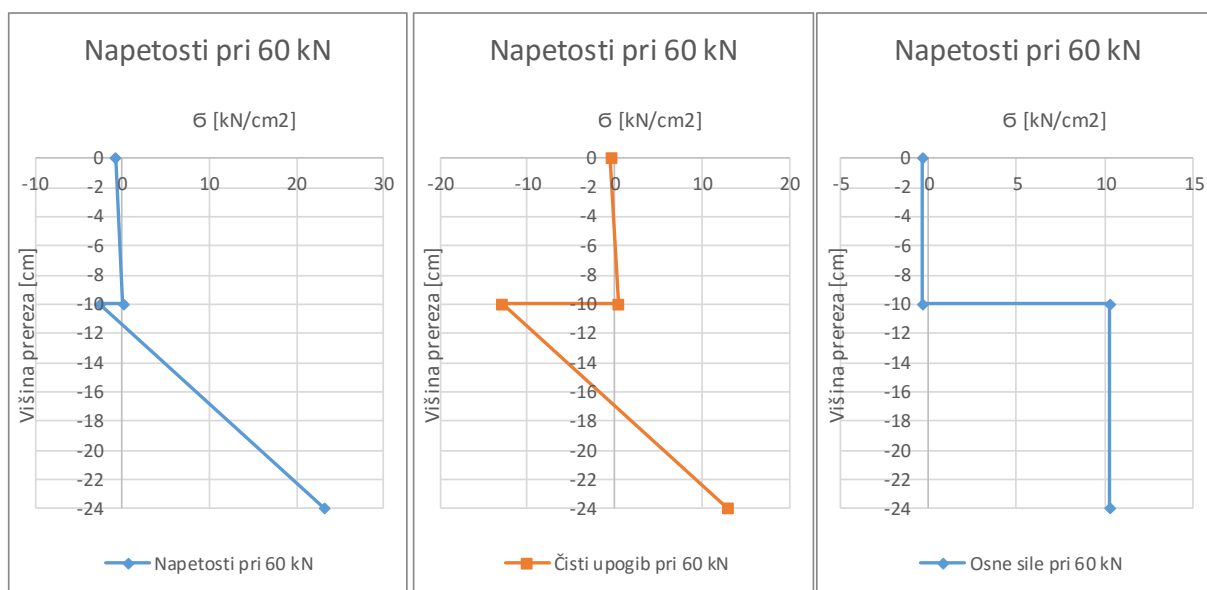
Na slikah 65, 66 in 67 so prikazana napetostna stanja, ki pripadajo deformacijam pri različnih zunanjih obremenitvah. Prikazane so vrednosti pri zunanji obremenitvi za 20 kN, 40 kN in 60 kN. Slednjo sem privzel kot mejno vrednost, kjer se nosilec še obnaša elastično. Prikaz normalnih napetosti je zaradi lažjega razumevanja razdeljen na napetosti zaradi upogibnih momentov - čisti upogib in na napetosti zaradi osne sile. Prijemališča momentov v čistem upogibu in prijemališča osnih sil se nahajajo v težiščih lesene plošče in jeklenega nosilca.



Slika 65: Napetosti pri 20 kN



Slika 66: Napetosti pri 40 kN



Slika 67: Napetosti pri 60 kN

Za potrebe izračuna elastičnega modula v CLT plošči je zopet potrebno določiti materialne karakteristike in izračunati geometrijske količine. Za določitev tega uporabim enake enačbe kot pri nosilcu z GL ploščo.

Preglednice 8, 9 in 10 prikazujejo izračun notranjega ravnotežja sil in izračun notranjega momenta nosilca s CLT ploščo pri različnih obremenitvah v elastičnem območju.

Preglednica 8: Izračun notranjega momenta pri 20 kN

CLT pri 20kN		ϵ_{ij}	E_i	σ_{ij}	$\sigma_{i,Mj}$	$\sigma_{i,Nj}$	W_i	A_i	M_i	F_i	z_i	$F_i \times z_i$	$F_i \times z_i + M_i$
i	j	[prom]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[cm ³]	[cm ²]	[kNcm]	[kN]	[cm]	[kNcm]	[kNcm]
les	zg	-0,352	873	-0,307	-0,174	-0,133	-833,3	500	145,39	-66,48	5	-332,42	-187,03
	sp	0,048		0,041	0,174		833,33						
jeklo	zg	-0,057	21000	-1,198	-5,240	4,042	-77,3	16,4	405,03	66,28	17	1126,77	1531,80
	sp	0,442		9,281	5,240		77,3						
										ΣF	-0,20	$\Sigma M = M_n$	1344,77

Zunanji moment tukaj znaša

$$M_y = \frac{28 P L}{152} = \frac{28 * 20 * 380}{152} = 70 * 20 = 1400 \text{ kNcm}$$

$$\Sigma F = -0,20$$

$$\frac{M_n}{M_y} = \frac{1344,77}{1400} = 0,96 \rightarrow -4\% \text{ odstopanje}$$

Preglednica 9: Izračun notranjega momenta pri 40 kN

CLT pri 40kN		ϵ_{ij}	E_i	σ_{ij}	$\sigma_{i,Mj}$	$\sigma_{i,Nj}$	W_i	A_i	M_i	F_i	z_i	$F_i \times z_i$	$F_i \times z_i + M_i$
i	j	[prom]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[cm ³]	[cm ²]	[kNcm]	[kN]	[cm]	[kNcm]	[kNcm]
les	zg	-0,712	873	-0,622	-0,353	-0,269	-833,3	500	294,13	-134,37	5	-671,87	-377,73
	sp	0,096		0,084	0,353		833,33						
jeklo	zg	-0,102	21000	-2,149	-10,351	8,202	-77,3	16,4	800,13	134,51	17	2286,68	3086,81
	sp	0,883		18,553	10,351		77,3						
										ΣF	0,14	$\Sigma M = M_n$	2709,08

Zunanji moment tukaj znaša

$$M_y = \frac{28 P L}{152} = \frac{28 * 40 * 380}{152} = 70 * 40 = 2800 \text{ kNcm}$$

$$\Sigma F = 2,43$$

$$\frac{M_n}{M_y} = \frac{2709,08}{2800} = 0,97 \rightarrow -3\% \text{ odstopanje}$$

Preglednica 10: Izračun notranjega momenta pri 60 kN

CLT pri 60kN		ϵ_{ij}	E_i	σ_{ij}	$\sigma_{i,Mj}$	$\sigma_{i,Nj}$	W_i	A_i	M_i	F_i	z_i	$F_i \times z_i$	$F_i \times z_i + M_i$
i	j	[prom]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[cm ³]	[cm ²]	[kNcm]	[kN]	[cm]	[kNcm]	[kNcm]
les	zg	-1,115	873	-0,973	-0,559	-0,414	-833,3	500	466,05	-207,10	5	-1035,51	-569,46
	sp	0,166		0,145	0,559		833,33						
jeklo	zg	-0,171	21000	-3,585	-16,252	12,667	-77,3	16,4	1256,25	207,73	17	3531,44	4787,69
	sp	1,377		28,918	16,252		77,3						
										ΣF	0,63	$\Sigma M = M_n$	4218,22

$$M_y = \frac{28 P L}{152} = \frac{28 * 60 * 380}{152} = 70 * 50 = 4200 \text{ kNcm}$$

$$\Sigma F = 2,43$$

$$\frac{M_n}{M_y} = \frac{4218,22}{4200} = 1,004 \rightarrow +4\% \text{ odstopanje}$$

Pri računu elastičnega modula sem dobil zelo konsistenten rezultat in ga predpostavil v vrednosti $E_{CLT} = 873 \text{ kN/cm}^2$ kot povprečje za nadaljnje račune. Tudi tukaj je bila napaka v momentu pričakovana, vendar nikjer ni presegla 4%.

Različni proizvajalci CLT plošč navajajo podobne podatke za elastični modul križno lepljene plošče. Vsi predpostavljajo, da je plošča zlepljena skupaj iz lesenih lamel kvalitete C24. Elastični modul je po plasteh različen in po plasti vzdolžni z vlakni znaša $E_{CLT} = 1100 \text{ kN/cm}^2$, v sredinski plasti, kjer lamele potekajo pravokotno na vzdolžne pa samo 37 kN/cm^2 . Enake vrednosti dobim tudi v standardu [1].

Z izračunano vrednostjo sem se bolj približal 5% fraktili vrednosti elastičnega modula za les kvalitete C24, ki znaša $E_{C24} = 740 \text{ kN/cm}^2$. Vendar pa ima križno lepljena plošča nižji elastični modul kot masivni ali lepljen les, zato lahko rečem, da moj izračunan elastični modul predstavlja nadomestni elastični modul CLT sestava.

7 DISKUSIJA

Namen moje diplomske naloge je, da z upogibnim preizkusom dveh kompozitnih nosilcev pokažem, ali je na račun sovprežne povezave obeh materialov prišlo do povečanja nosilnosti in povečanja togosti nosilca glede na nosilec brez sovprežne povezave. Vse vrednosti v nadaljevanju so izračunane vrednosti bodisi iz upogibnega preizkusa bodisi iz materialnih vrednosti podanih v priročniku [2]. V tem poglavju se bom posvetil tudi prikazu težav na katere sem naletel pri računanju nosilnosti in togosti.

Težava na katero sem naletel je, da sem pri izračunu elastičnega modula pri GL plošči dobil prenizke vrednosti notranjega momenta glede na zunanji moment pri izbrani velikosti zunanje obtežbe. Elastični modul sem računal iz izmerjenih deformacij drugega obremenjevalnega cikla. Podatki kažejo, da je po prvem obremenjevalnem ciklu prišlo do padca deformacij v spodnji pasnici. Verjetno je zaradi zunanje obremenitve nosilec poravnalo. Ta padec v deformaciji pa se potem kaže naprej v vseh nadaljnjih meritvah. Elastične module sem zato izračunal iz podatkov iz prvega obremenjevalnega cikla, kjer sem imel deformacije izmerjene do 75 kN zunanje obremenitve. Vrednosti za notranje momente sem dobil ob pogoju, da je karakteristična vrednost elastičnega modula za jeklo enaka $E_j = 210\text{GPa}$ in da je ta karakteristična vrednost povprečna vrednost. Žal materialnih testov na jeklu nismo naredili, zato ne razpolagam za zadostnimi informacijami za materialne lastnosti jekla.

Z novim izračunom elastičnega modula in predpostavljeno vrednostjo elastičnega modula za jeklo lahko izračunam spremembo togosti in nosilnosti v obeh obravnavanih primerih.

7.1. NOSILEC V ELASTIČNEM OBMOČJU

Meritve pomikov pridobljenih iz induktivnih merilcev lahko prevedemo na upogibke. Po metodi virtualnega dela lahko izračunam pomike točk v sredini nosilca za različne obremenitve najprej pri polni sovprežni povezavi in upoštevam E_{eff} . Pri polni strižni povezavi je izračunani pomik premajhen, saj je potrebno zaradi zdrsov upoštevati delno strižno povezavo, ki jo upoštevam z » γ -postopkom«. Ta postopek je podan tudi v SIST EN 1995-1-1. Koeficient γ predstavlja delež strižne povezave med 0 in 1 [1]. Če je $\gamma = 1$, imamo polno sovprežno povezavo, če pa je enak 0, potem sovprežne povezave ni. Pri ustrezni vrednosti γ dobim pomik, ki ustreza izmerjenemu pomiku. Vsak prirastek game pomeni povečanje togosti nosilca zaradi sovprežnosti v primerjavi z nosilcem brez sovprežne povezave.

7.1.1. NOSILEC Z GL PLOŠČO

Preglednica 11 prikazuje povezavo med izmerjenimi pomiki na testu, izračunanimi pomiki pri polni sovprežni povezavi in izračunanimi pomiki, ko sovprežne povezave ni, ter potrebno stopnjo

sovprežnosti, da so izračunani pomiki enaki izmerjenim. S tem lahko določimo stopnjo sovprežne povezave iz izmerjenih upogibov.

Preglednica 11: Določitev potrebne strižne povezanosti γ iz pomikov za nosilec z GL ploščo

Zunanja sila [kN]	Izračunan pomik (pri $\gamma = 1$ – polna strižna povezava) [cm]	Izmerjen pomik [cm]	Potrebna strižna povezanost	Izračunan pomik (pri $\gamma = 0$ – brez strižne povezave) [cm]
20	0,38	0,48	0,75	1,66
40	0,77	0,96	0,73	3,32
60	1,15	1,53	0,68	4,98
80	1,53	2,06	0,67	6,64

Iz preglednice 11 je razvidno, da se v elastičnem območju nosilca strižna povezava giblje okrog 70% in da se zmanjšuje z nanašanjem obtežbe.

Povečan odstotek strižne povezave pomeni tudi povečanje nosilnosti. To se vidi iz povesa nosilca. Če predpostavim nosilec brez sovprežne povezave ($\gamma = 0$), računsko dobim znatno večje pomike nosilca v primerjavi z izmerjenimi. Večja kot je stopnja strižne povezanosti, večja je nosilnost.

Stopnjo sovprežne povezave γ se da določiti tudi z upoštevanjem meritev. Najprej izračunam efektivno upogibno togost

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^2 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

Kjer je

$$A_i = b_i h_i$$

$$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12}$$

A_i ... površina prereza posameznega elementa ($i = \text{les, jeklo}$)

I_i ... vztrajnostni moment posameznega prereza ($i = \text{les, jeklo}$)

a_1 ... razdalja med sovprežnim težiščem in težiščem v zgornjem elementu

a_2 ... razdalja med sovprežnim težiščem in težiščem v spodnjem elementu

$$a_2 = \frac{\gamma E_1 A_1 (h_1 + h_2)}{\sum_{i=1}^2 (\gamma E_i A_i)}$$

Nato pa lahko po enačbi

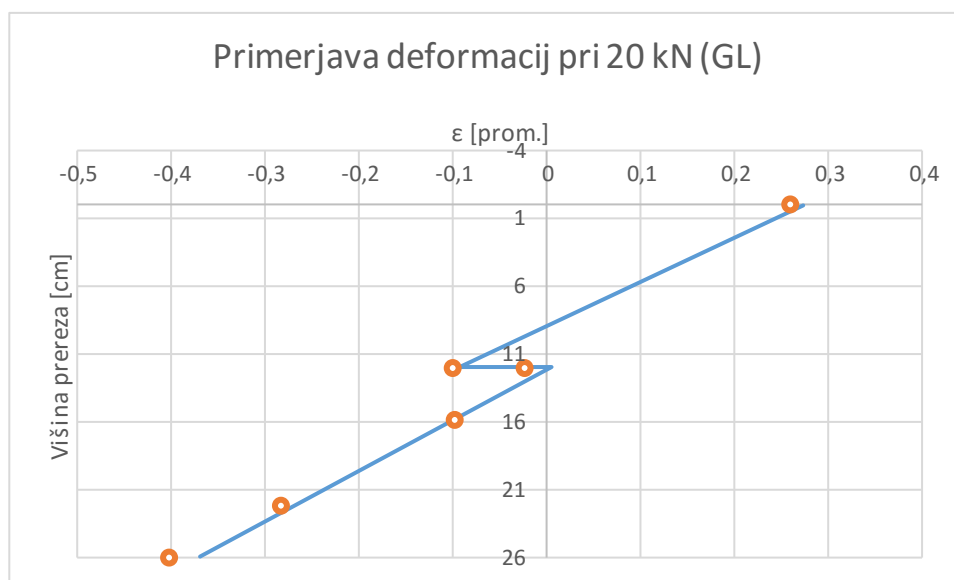
$$\sigma_{md} = \frac{M}{W} = \frac{M}{I_{ef}} \cdot (\gamma z_T \pm \Delta z_i)$$

z_T ...razdalja med težiščem celotnega prereza in lokalnim težiščem i -tega elementa prereza

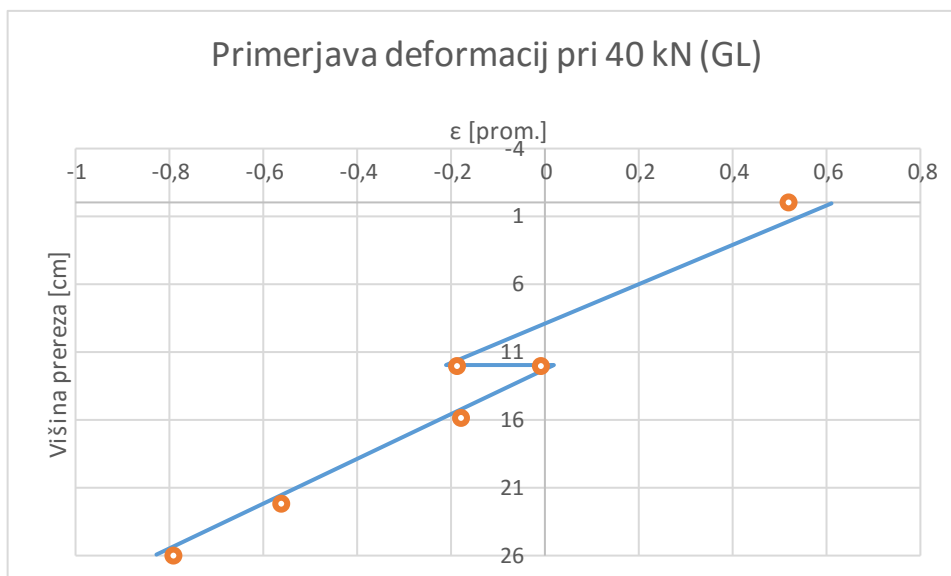
Δz_i ...razdalja med lokalnim težiščem i -tega elementa in točko v kateri računamo napetost

Z upoštevanjem efektivnega vztrajnostnega momenta in delne strižne povezave izračunam napetosti in deformacije v izmerjenih točkah. Pri izračunu upoštevam delno strižno povezavo izračunano v preglednici 11. Pri tem opazujem primerjavo izmerjenih in izračunanih deformacij.

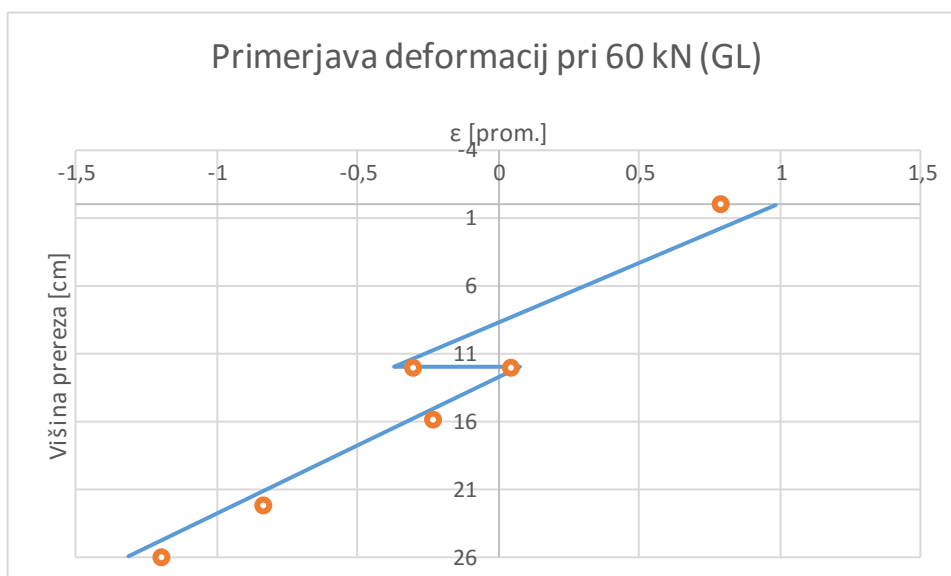
Spodnji diagrami (slika 68 – 71) prikazujejo primerjavo med izmerjeno deformacijo (oranžne točke) in izračunano deformacijo (modra črta), pri upoštevanju deležev strižne povezave γ izračunanih po γ -metodi pridobljene s prilagajanjem.



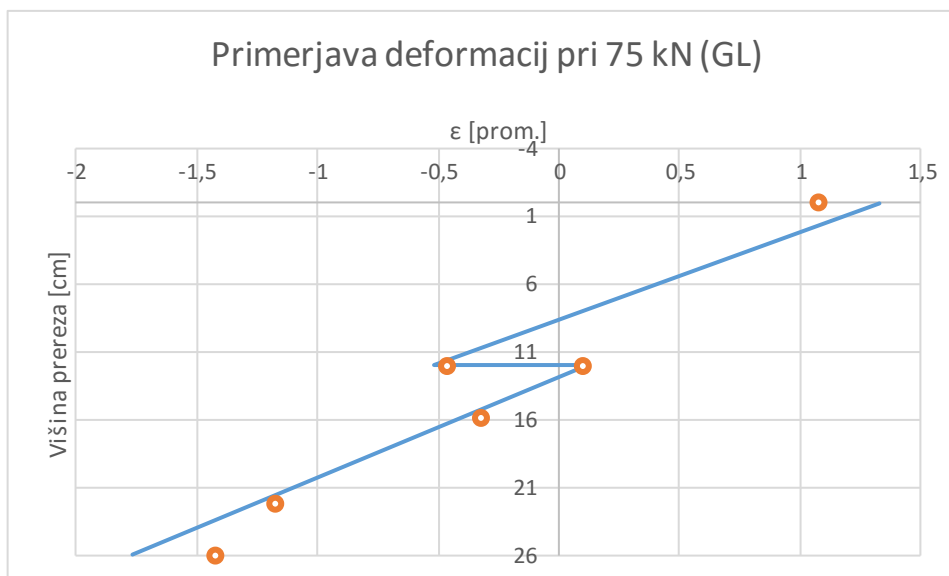
Slika 68: Primerjava deformacij pri 20 kN ($\gamma=0,75$)



Slika 69: Primerjava deformacij pri 40 kN ($\gamma=0,74$)



Slika 70: Primerjava deformacij pri 60 kN ($\gamma=0,69$)



Slika 71: Primerjava deformacij pri 75 kN ($\gamma=0,67$)

Iz diagramov se vidi, da je ujemanje računске in izmerjene vrednosti deformacij dobro.

Vrednosti γ določene po γ -metodi se brez izjeme zelo dobro ujemajo z izračunanimi vrednostmi iz preglednice 11.

7.1.2. NOSILEC S CLT PLOŠČO

Enako kot pri nosilcu z GL ploščo sem tudi pri nosilcu s CLT ploščo izračunal stopnjo potrebne strižne povezave glede na polno sovprežen nosilec in na nosilec brez strižne povezave. Rezultati izračuna so prikazani v preglednici 12.

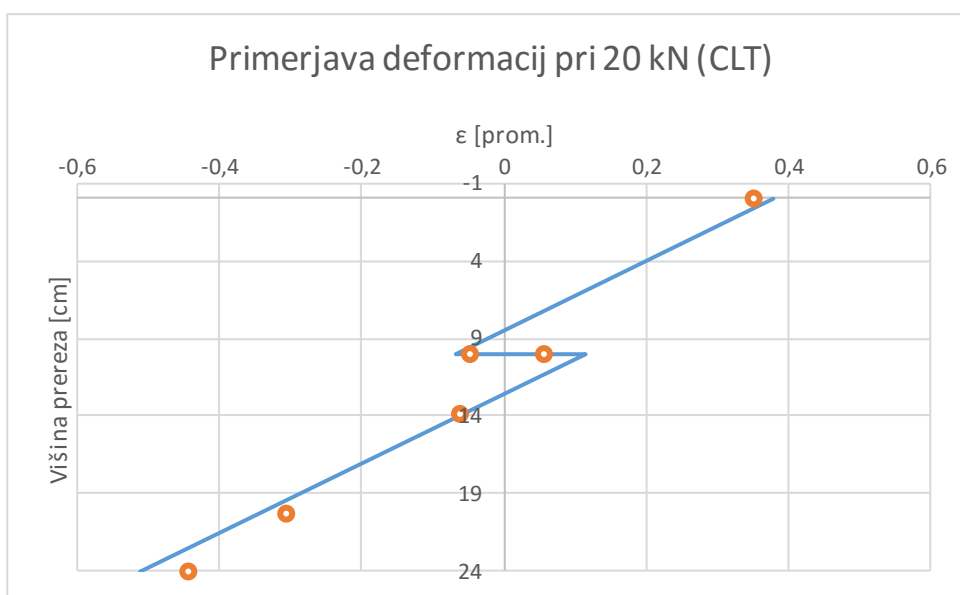
Preglednica 12: Določitev potrebne strižne povezanosti γ iz pomikov za nosilec s CLT ploščo

Zunanja sila [kN]	Izračunan pomik (pri $\gamma = 1$ – polna strižna povezava) [cm]	Izmerjen pomik [cm]	Potrebna strižna povezanost	Izračunan pomik (pri $\gamma=0$ – brez strižne povezave) [cm]
20	0,51	0,72	0,60	1,72
40	1,03	1,35	0,66	3,43
50	1,28	1,67	0,67	4,29
60	1,54	2,02	0,67	5,15

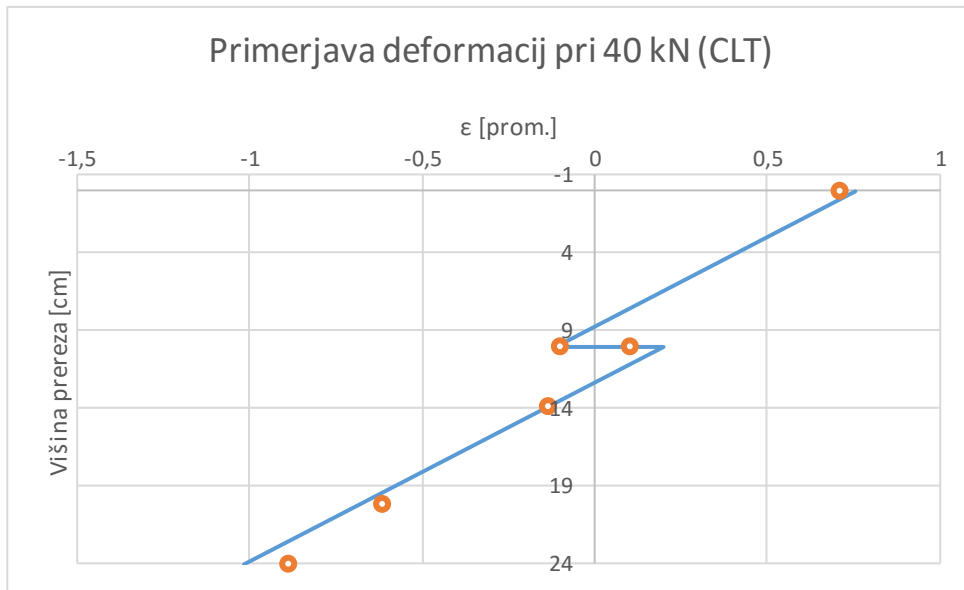
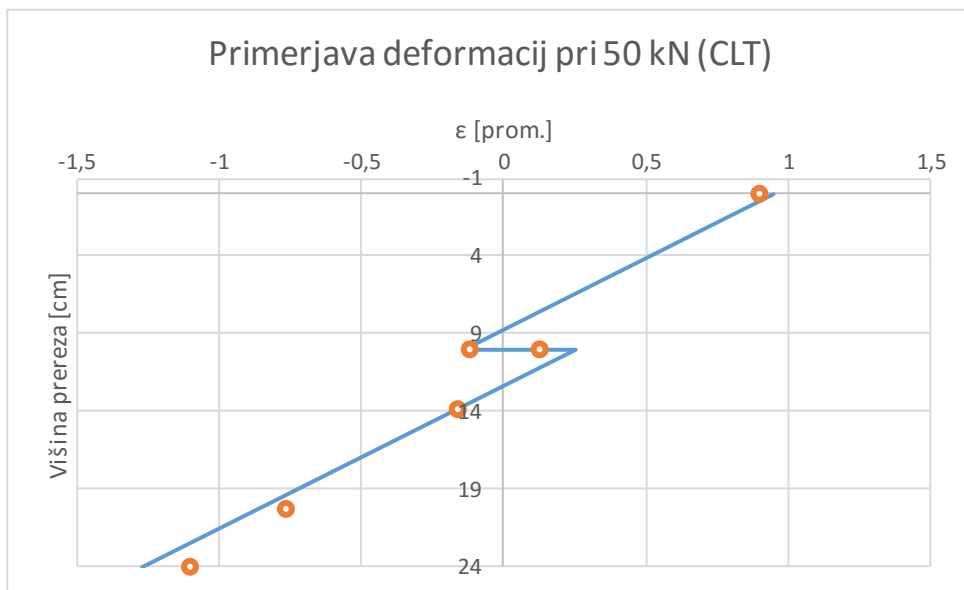
Pri tem nosilcu je stopnja sovprežne povezave še višja in znaša okrog 60% pri 20 kN obtežbe in narašča do meje plastičnosti, kjer znaša skoraj 70%.

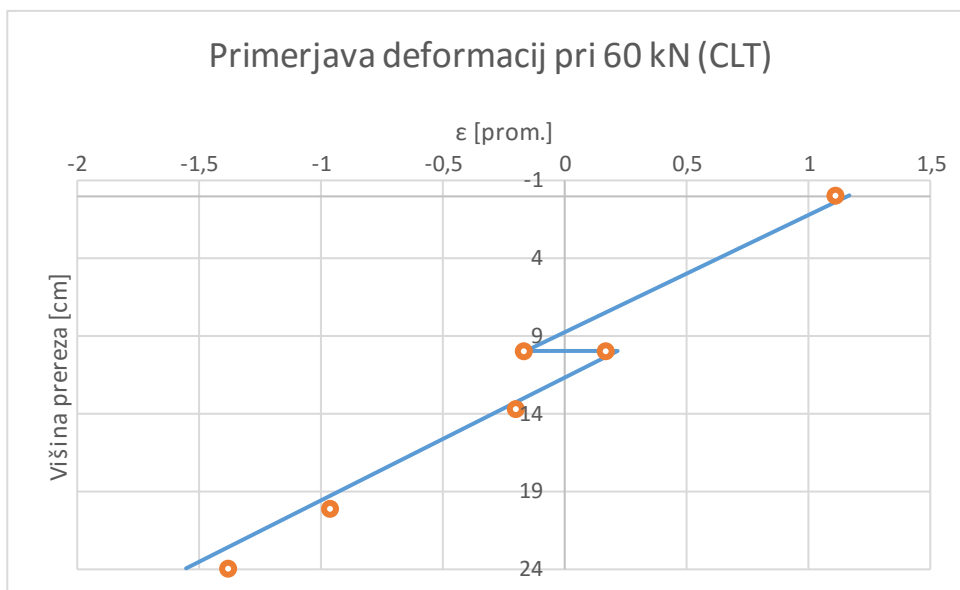
Za izračun stopnje sovprežne povezave po γ – postopku uporabim enake formule in enak postopek kot pri nosilcu z GL ploščo.

Rezultati γ – postopka so prikazani na slikah 72 – 75.



Slika 72: Primerjava deformacij pri 20 kN ($\gamma = 0,66$)

Slika 73: Primerjava deformacij pri 40 kN ($\gamma=0,70$)Slika 74: Primerjava deformacij pri 50 kN ($\gamma=0,70$)



Slika 75: Primerjava deformacij pri 60 kN ($\gamma=0,72$)

Primerjava izračunanih deformacij z upoštevanjem γ z izmerjenimi deformacijami nam pokaže, da znaša stopnja strižne povezave v tem nosilcu okrog 70% in narašča z nanašanjem obtežbe v elastičnem stanju.

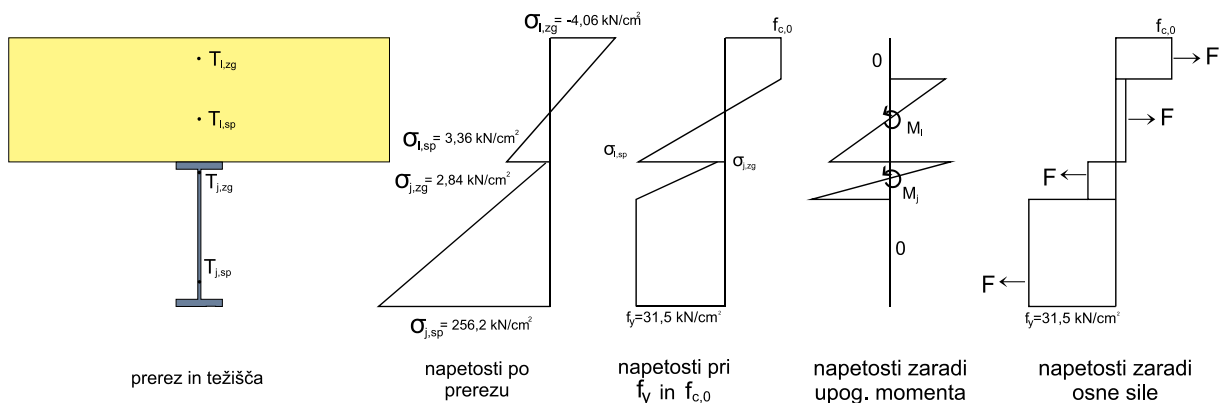
Ujemanje med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi je pri nosilcu s CLT ploščo odlično. Prav tako obe metodi pokažeta vrednosti stopnje strižne povezave, ki se med seboj ne razlikujejo več kot 10% za posamezno obremenitev.

7.2. NOSILEC V PLASTIČNEM OBMOČJU

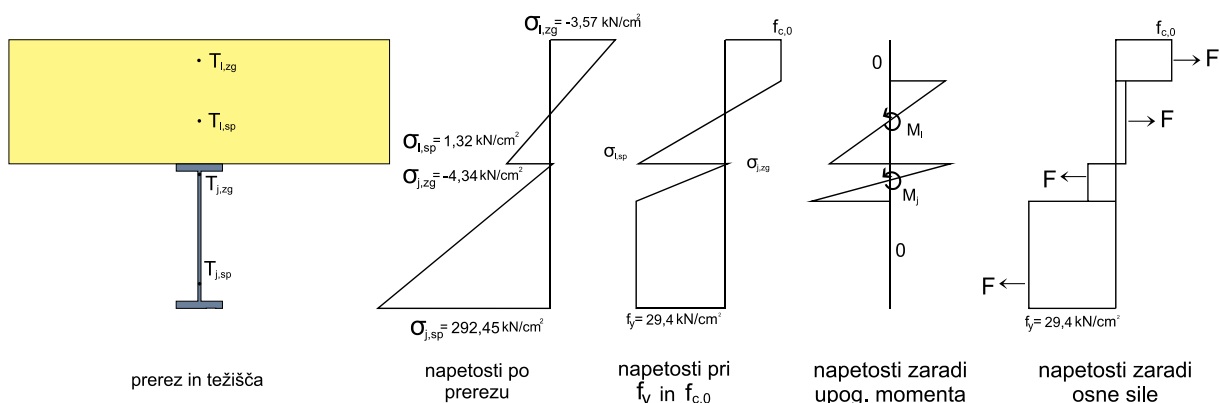
Dogajanje v plastičnem območju je veliko bolj nepredvidljivo kot v elastičnem. Tukaj Hookov zakon ne velja več in zato zveze, da je napetost produkt deformacije in elastičnega modula, ne moremo več uporabljati.

Če želim izračunati mejno plastično nosilnosti, moram predpostaviti materialni model z upoštevanjem plastičnosti. Predpostavim elasto-idealno plastičen materialni model za les in jeklo. Za jeklo uporabim napetosti tečenja, ki sem ju izračunal v poglavjih 4.3 in 5.3. To je 315 MPa za jekleni nosilec v povezavi z GL ploščo in 294 MPa v povezavi z CL ploščo. Tlačno trdnost oziroma mejo tečenja lesa izračunam iz ravnotežja.

Sliki 76 in 77 prikazujeta materialna modela za jeklo in les za izračun notranjega momenta.



Slika 76: Materialni model za les in jeklo pri nosilcu z GL ploščo



Slika 77: Materialni model za les in jeklo pri nosilcu s CLT ploščo

7.2.1. NOSILEC Z GL PLOŠČO

V preglednici 13 je izračunan notranji moment za nosilec z GL ploščo.

Materialne karakteristike so določene na enak način kot pri izračunu elastičnega modula v 6. poglavju.

Preglednica 13: Izračun notranjega momenta pri 147 kN za nosilec z GL ploščo (mejno stanje)

GL pri 147kN		ϵ_{ij}	E_i	σ_{ij}	σ_i, M_j	σ_i, N_j	W_i	A_i	M_i	F_i	z_i	$F_i \times z_i$	$F_i \times z_i + M_i$	
i	j	[prom]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[cm ³]	[cm ²]	[kNcm]	[kN]	[cm]	[kNcm]	[kNcm]	
Les (zgoraj)	zg	-3,195	1110	-3,55	0	-3,55	29,58	103,20	0	-365,99	0,86	-314,75	-314,75	
	sp	-3,195		-3,55	0	-3,55								
Les (spodaj)	zg	-3,195	1110	-3,55	-3,45	-0,10	-1056,80	616,80	3647,01	-58,88	6,86	-403,91	3243,09	
	sp	3,023		3,36	3,45	-0,10								
Jeklo (zgoraj)	zg	0,135	21000	2,84	-14,33	17,17	-0,64	5,46	9,22	93,65	12,41	1161,71	1170,93	
	sp	1,500		31,50	14,33	17,17	0,22							
Jeklo (spodaj)	zg	1,500	21000	31,50	0	31,50	-18,70	10,54	0	331,85	22,40	7433,50	7433,50	
	sp	1,500		31,50	0	31,50	50,67							
										ΣF	0,63		$\Sigma M = Mn$	11532,76

Zunanji moment tukaj znaša

$$M_y = \frac{28 P L}{152} = \frac{28 * 147 * 380}{152} = 70 * 147 = 10290 \text{ kNcm}$$

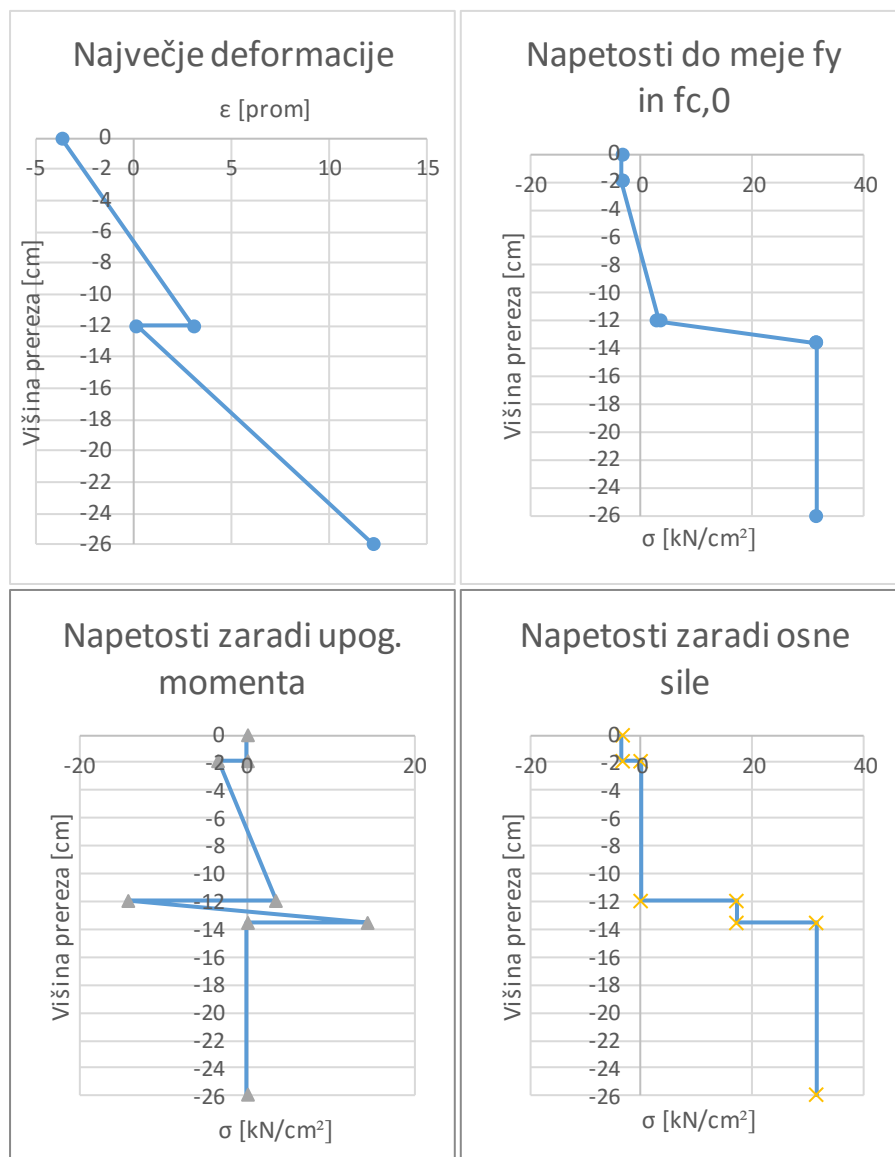
$$\sum F = 0,63 \text{ kN}$$

$$\frac{M_n}{M_y} = \frac{11532,76}{10290} = 1,12 \rightarrow +12\% \text{ odstopanja}$$

Iz pogoja ravnotežja sil in enakosti momentov vidim, da je elastično obnašanje lesene plošče bolj podobno lesu višje trdnosti kot sem jo predpostavil v začetku. Iz podatkov iz tabel v priložniku [1] vidim, da kvaliteta lesa bolj ustreza kvaliteti GL32h kot pa GL24h. Tlačno trdnost bi lahko poimenoval tudi upogibna trdnost, saj je les pretežno v upogibu.

Do odstopanja med zunanjim momentom in vsoto notranjih momentov pride zaradi tega, ker sem za potrebe izračuna moral izbirati med različnimi kvalitetami lesa, da sem lahko prišel do ustrezne meje napetosti, kjer se linearno elastično obnašanje lesa preneha. Tako sem lahko določil izenačitev sil v lesu in jeklu, vendar je na račun tega prišlo do odstopanja v notranjem momentu. Če bi računal z malenkost nižjo tlačno trdnostjo lesa, bi najbrž ujel točno vrednost, vendar v standardu za lepljen les ne obstaja takšna kvaliteta lesa, ki bi se plastificirala pri nižji obremenitvi in še ustrezala pogojem enakosti sil ter zunanjega in notranjega momenta.

Na sliki 78 so prikazane največje izmerjene deformacije pri nosilcu z GL ploščo, napetosti dobljene iz meje elastičnosti jeklenega nosilca in lesene plošče in pa diagrama zapetosti zaradi čistega upogiba in osnih sil.



Slika 78: Deformacije in napetosti v mejnem stanju pri nosilcu z GL ploščo

Seveda pa me kot cilj diplomske naloge zanima, če se je na račun sovprežne povezave povečala največja nosilnost v primerjavi z nosilcem brez sovprežne povezave.

Iz pogoja enakih povosov v nosilcu brez sovprežne povezave lahko rečemo, da je pomik lesene plošče enak pomiku jeklenega nosilca. Torej lahko oceno nosilnosti (z upoštevanjem dejanskih f_y in $f_{c,0}$) nepovezanega sistema dobim kot vsoto elastičnih upogibnih nosilnosti obeh prerezov.

Iz tega lahko dobim precej konzervativno oceno povečanja nosilnosti. V mejnem stanju je dejanski $f_{c,0} = 3,55 \text{ kN/cm}^2$ in dejanski $f_y = 31,5 \text{ kN/cm}^2$.

Nosilnost jeklenega prereza tako znaša

$$M_j = f_y \cdot W = 31,5 \cdot 77,3 = 2434,95 \text{ kNcm}$$

Nosilnost lesenega prereza pa

$$M_L = f_{c,0} \cdot W = 3,55 \cdot 1440 = 5112,00 \text{ kNcm}$$

Iz pogoja da je skupna nosilnost nepovezanega sistema enaka vsoti posameznega prereza sledi

$$M = M_j + M_L = 7546,95 \text{ kNcm}$$

Iz pravkar dobljenega rezultata vidim, da se je nosilnost pri 147 kN povečala za 36 procentov.

7.2.2. NOSILEC S CLT PLOŠČO

V preglednici 13 je enako kot prej izračunan notranji moment v nosilcu s CLT ploščo, slika 79 pa prikazuje deformacijsko in napetostno stanje pri največji obtežbi.

Preglednica 14: Izračun notranjega momenta pri 104 kN za nosilec s CLT ploščo (mejno stanje)

CLT pri 104kN		ϵ_{ij}	E_i	σ_{ij}	$\sigma_{i,Mj}$	$\sigma_{i,Nj}$	W_i	A_i	M_i	F_i	z_i	$F_i \times z_i$	$F_i \times z_i + M_i$
i	j	[prom]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[cm ³]	[cm ²]	[kNcm]	[kN]	[cm]	[kNcm]	[kNcm]
Les (zgoraj)	zg	-2,28	873	-1,99	0	-1,99	55,47	129,00	0	-256,77	1,29	-331,23	-331,23
	sp	-2,28		-1,99	0	-1,99							
Les (spodaj)	zg	-2,28	873	-1,99	-1,66	-0,33	-458,80	371,00	759,61	-124,21	6,29	-781,28	-21,67
	sp	1,51		1,32	1,66	-0,33							
Jeklo (zgoraj)	zg	-0,21	21000	-4,43	-16,92	12,48	-0,64	5,46	10,88	68,10	10,41	708,61	719,49
	sp	1,40		29,40	16,92	12,48	0,22						
Jeklo (spodaj)	zg	1,40	21000	29,40	0	29,40	-18,70	10,64	0	312,82	20,40	6381,45	6381,45
	sp	1,40		29,40	0	29,40	50,67						
ΣF										-0,06		$\Sigma M = Mn$	7460,41

$$M_y = \frac{28 P L}{152} = \frac{28 \cdot 104,2 \cdot 380}{152} = 70 \cdot 104,2 = 7294 \text{ kNcm}$$

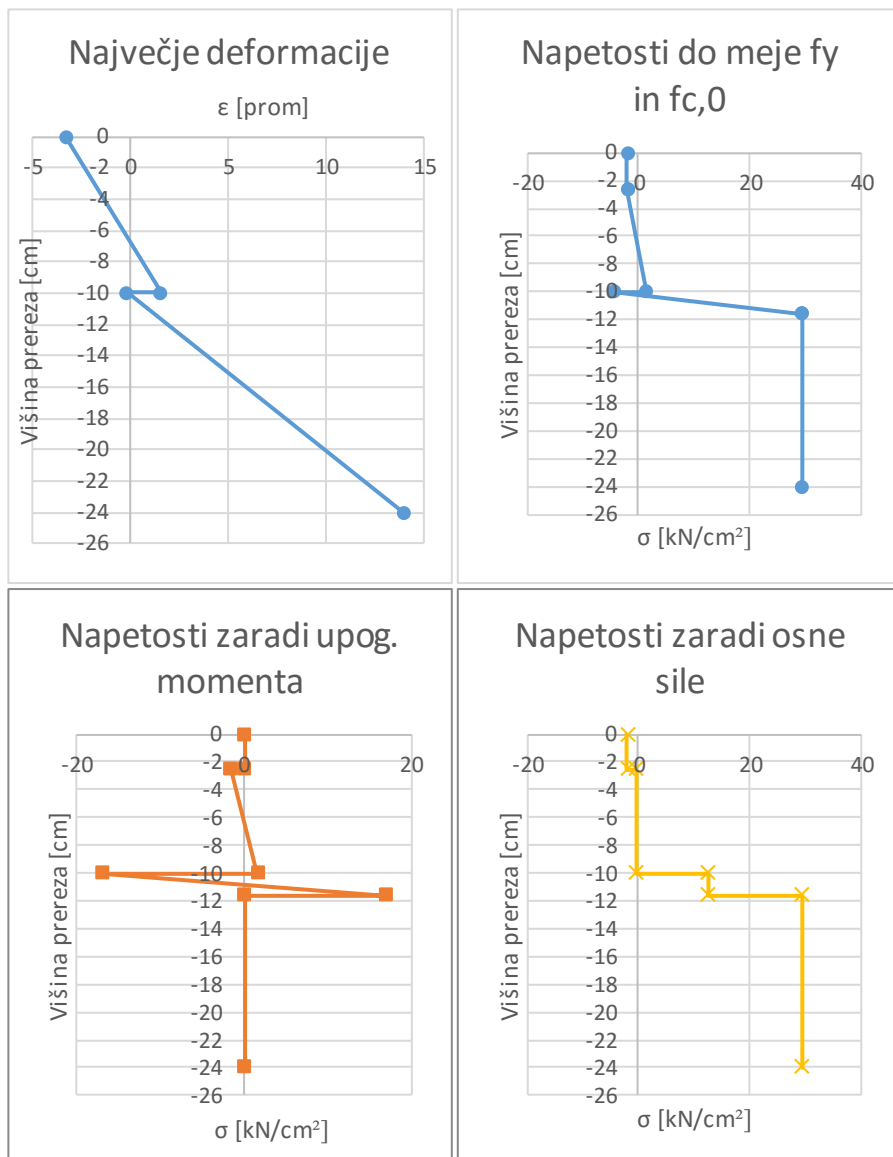
$$\Sigma F = -0,06$$

$$\frac{M_n}{M_y} = \frac{7460,41}{7294} = 1,02 \rightarrow +2\% \text{ odstopanja}$$

Tukaj je ponovno potrebno zapisati, da so sloji v CLT plošči različno orientirani in da je elastični modul po zunanjih dveh slojih veliko večji kot v notranjem. To pomeni, da potek napetosti po prerezu ni enakomeren in so zato napetosti v srednjem sloju veliko manjše kot v zunanjih dveh. Vrednost predpostavljenega elastičnega modula izračunanega iz deformacij dobljenih iz preizkusa, s katerim sem računal notranji moment pa predstavlja nadomestni elastični modul za sistem. Z uporabo te vrednosti nisem napravil velike napake, saj osrednji del lesene plošče k nosilnosti ne doprinese praktično nič.

Pri izračunu notranjega momenta za nosilec s CLT ploščo sem upošteval kvaliteto lesa, ki se pri tlačnih napetostih obnaša linearno elastično do 20 MPa. Zopet sem v računu iskal napetost v lesu, ki bi uravnotežila notranjo silo v jeklenem prerezu. Na račun tega pride do razlike med notranjim momentom in zunanjim momentom, ki pa je zelo majhna. Iz ravnotežja notranjih sil in enakosti zunanjega in

notranjega momenta pri meji nosilnosti lahko sklepam, da karakteristike lesene plošče ustrezajo lesu kvalitete C20.



Slika 79: Deformacije in napetosti v mejnem stanju pri nosilcu s CLT ploščo

V mejnem stanju je dejanski $f_{c,0} = 1,99 \text{ kN/cm}^2$ in dejanski $f_y = 29,4 \text{ kN/cm}^2$.

Enak izračun povečanja nosilnosti pokaže, da je nosilnost jeklenega prereza

$$M_j = f_y \cdot W = 29,4 \cdot 77,3 = 2272,6 \text{ kNcm}$$

In nosilnost lesenega prereza

$$M_L = f_{c,0} \cdot W = 2 \cdot 833,33 = 1658,3 \text{ kNcm}$$

Iz pogoja da je skupna nosilnost nepovezanega sistema enaka vsoti posameznega prereza sledi

$$M = M_j + M_L = 3930,9 \text{ kNcm}$$

Iz tega pa vidim, da se je v mejnem stanju pri 104 kN obtežbe nosilnost povečala za 86 procentov.

8 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu je podano poročilo o upogibnem preizkusu dveh sovprežnih nosilcev. Z izvedenimi testi sem dodobra spoznal sistem prenosa upogibnih obremenitev.

Iz izračunov je razvidno, da je sovprežna povezava pri nosilcu s CLT ploščo že v linearnem območju nad 60% pri nosilcu z GL ploščo pa še 10% višja. To pomeni, da je bil prenos sil na moznike dober in smo dosegli dobro stopnjo strižne povezave ter da se je togost povečala.

V mejnem stanju je nevtralna os pomaknjena v leseni del nosilca in je pri nosilcu z GL ploščo več kot tri četrtine celotnega nosilca v nategu, pri nosilcu s CLT ploščo pa je tri četrtine lesene plošče v tlaku.

Pri obeh nosilcih sem na podlagi konzervativne ocene izračunal povečanje nosilnosti sovprežnega prereza. Nosilnost se je pri nosilcu z GL ploščo povečala za 36% pri nosilcu s CLT ploščo pa za 86%.

Čeprav je pred testiranjem obstajala možnost, da bo pri višjih obtežbah prišlo do prestriga lesenega nosilca v strižni ravnini ob sovprežnih povezavah, se to ni zgodilo. Tudi lepilo se je na tem mestu odlično obneslo. Opaziti ni bilo nobenega zamika lamel v prerezih in nobenih razpok ali drobljenja lepila v utorih. To sem potrdil tudi pri razrezu nosilca po testu.

Izvedba takega nosilca v običajni gradbeniški praksi bi bila izvedljiva pri stropnih konstrukcijah, kjer je statična višina pomembna. Sicer je bila izvedba teh dveh prototipnih nosilcev precej kompleksna in je zahtevala veliko stopnjo natančnosti, bi se dalo serijsko proizvodnjo optimizirati. S strojno izdelavo utorov v lesene plošče in z robotskim varjenjem ploščic za sovprežno povezavo bi zagotovil strojniško natančnost za naleganje spoja. Prav tako bi bilo potrebno razviti sistem za zalivanje dvokomponentne smole v utor s sočasnim vibriranjem nosilca, ki bi omogočalo izhajanje zračnih mehurjev.

VIRI

- [1] Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih, 1. ponatis. - Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije, 2009: 1077 str.
- [2] Žitnik, D., idr. 2009. Gradbeniški priročnik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 693 str.
- [3] Mandegarian, A., Milev, S. 2010. Cross Laminated Timber Civil 510 – Term project, University of British Columbia
- http://www.sigi.ca/engineering/civl510_2010/student_projects/Arshia%20Mandegarian/CLT%20Term%20Project%20by%20Arshia%20and%20Svet.pdf (Pridobljeno 20.8.2016.)
- [4] **SIST EN 1993-1-1:2005/AC:2009** - Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij - 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.
- [5] **SIST EN 1994-1-1:2005/AC:2009** - Evrokod 4: Projektiranje sovprežnih konstrukcij iz jekla in betona - 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.
- [6] **SIST EN 1995-1-1:2005/A101:2006** - Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe – Nacionalni dodatek.