

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andrej VRHOVEC

**VPLIV SESTAVE KRIŽNO LEPLJENEGA LESA NA UPOGIBNO
TRDNOST IN MODUL ELASTIČNOSTI**

DIPLOMSKI DELO
Visokošolski strokovni študij

**INFLUENCE OF COMPOSITION OF CROSS LAMINATED TIMBER
ON THE BENDING STRENGTH AND MODULUS OF ELASTICITY**

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2014

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija. Opravljeno je bilo na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

Praktičen del diplomskega dela je potekal (dobava ter sušenje materiala in širinsko lepljenje, debelinsko lepljenje plošč) pri podjetju Mizarstvo Grm. Razžagovanje plošč v preizkušance ter testiranja so potekala v laboratorijih Oddelka za lesarstvo.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Milana Šerneka ter za somentorja viš. pred. mag. Bogdana Šego, za recenzenta pa doc. dr. Sergeja Medveda.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega diplomskega dela na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je projekt, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identičen tiskani verziji.

Andrej Vrhovec

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 630*833:630*824.839
KG	križno lepljen les/modul elastičnosti/upogibna trdnost/poliuretanska lepila/lepljenje
AV	VRHOVEC, Andrej
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/ŠEGA, Bogdan (somentor)/MEDVED, Sergej (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, Cesta VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2014
IN	VPLIV SESTAVE KRIŽNO LEPLJENEGA LESA NA UPOGIBNO TRDNOST IN MODUL ELASTIČNOSTI
TD	Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
OP	XII, 46 str., 5 pregl., 34 sl., 10 pril., 42 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Ugotavljali smo vpliv sestave križno lepljenih lesnih plošč na upogibno trdnost in modul elastičnosti. Testirali smo 6 plošč, 3 različno debelih slojev in 2 plošči s 5 sloji. Ugotovili smo, da debelina slojev ne vpliva na upogibno trdnost in modul elastičnosti izdelanih plošč ter da se z večanjem števila slojev izboljšujejo lastnosti v prečni, slabšajo pa v vzdolžni smeri plošče. Upogibna trdnost je bila pri obremenjevanju po robu višja kot pri obremenjevanju po ploskvi, in to ne glede na usmerjenost preizkušancev. Modul elastičnosti je bil višji pri obremenjevanju po ploskvi v vzdolžni kot tudi po robu v prečni smeri. Vse rezultate testiranja smo preverili matematično na osnovi teoretičnih izračunov. Izračunane vrednosti so se dokaj dobro ujemale z rezultati testiranja. Do odstopanj je prihajalo le pri upogibni trdnosti ploskovno obremenjenih preizkušancev v vzdolžni smeri. Lastnosti plošče pa so bile zelo odvisne od kakovosti lesa in lepilnih spojev. S testiranjem preizkušancev smo potrdili domnevo, da ima križno lepljen les ustrezne trdnostne lastnosti za uporabo v gradbene namene.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs
DC UDC 630*833:630*824.839
CX cross laminated timber/modulus of elasticity/bending strength/polyurethane adhesive/adhesive bonding
AU VRHOVEC, Andrej
AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/ŠEGA, Bogdan (co-supervisor)/MEDVED, Sergej (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, Cesta VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2014
TI INFLUENCE OF COMPOSITION OF CROSS LAMINATED TIMBER ON THE BENDING STRENGTH AND MODULUS OF ELASTICITY
DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
NO XII, 46 p., 5 tab., 34 fig., 10 ann., 42 ref.
LA sl
AL sl/en
AB The composition influence of the cross laminated timber panels on the bending strength and the modulus of elasticity was researched. 6 panels having 3 differently thick layers, and 2 panels with 5 layers were tested. It was found out that the thickness of the layers did not influence the bending strength or the modulus of elasticity; the higher number of layers improved the quality in transverse direction, and deteriorated it in the longitudinal direction. The bending strength was higher at edgewise bending as compared to the flatwise bending in any direction. The modulus of elasticity was higher at flatwise bending longitudinal direction and at the edgewise bending in transverse direction. All the data were verified mathematically on the basis of theoretical evaluations. The calculated results were very similar to the test results. It came to deviations at the bending strength of the longitudinal flatwise loaded test. The panel properties were highly depending on the wood quality and the quality of the laminated joints. Testing the samples the supposition was confirmed that the cross laminated timber had the proper attributes for construction building.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PRILOG	X
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XI
SLOVARČEK	XII
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 CILJ NALOGE	1
1.3 DELOVNE HIPOTEZE	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 SPLOŠNI DEL	3
2.2 MASIVNI LEPLJENI KOMPOZITI	4
2.3 PLOŠČE IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA (KLL)	7
2.4 PRIMER IZRAČUNA TRDNOSTNIH LASTNOSTI KLL	9
2.4.1 Izračun vrednosti k_1 faktorja za vzdolžno smer po ploskvi	10
2.4.2 Izračun vrednosti k_2 faktorja za prečno smer po ploskvi	11
2.4.3 Izračun vrednosti k_3 faktorja za vzdolžno smer po robu	11
2.4.4 Izračun vrednosti k_4 faktorja v prečni smeri po robu	12
3 MATERIALI IN METODE	13
3.1 MATERIALI	13
3.1.1 Les	13
3.1.2 Lepilo	14
3.1.3 Sestava plošč	15
3.2 METODE	17
3.2.1 Lepljenje	17
3.2.2 Izdelava preizkušancev	19
3.2.3 Priprava	20
3.2.4 Ugotavljanje lastnosti	21

3.2.4.1	Vlažnost	21
3.2.4.2	Gostota	22
3.2.4.3	Upogibna trdnost in modul elastičnosti	23

4 REZULTATI **28**

4.1	GOSTOTA	28
4.2	VLAŽNOST	29
4.3	UPOGIBNA TRDNOST IN MODUL ELASTIČNOSTI	30
4.3.1	Rezultati na podlagi preskusa – izmerjene vrednosti	30
4.3.2	Rezultati na podlagi izračuna – izračunane vrednosti	34

5 RAZPRAVA IN SKLEPI **35**

5.1	RAZPRAVA	35
5.2	SKLEPI	40

6 POVZETEK **41**

7 VIRI IN LITERATURA **42**

7.1	PISNI VIRI	42
7.2	ELEKTRONSKI VIRI	44

ZAHVALA

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Profil zobatih spojev, geometrijske karakteristike (prirejeno po R. Brandner).	5
Preglednica 2: Vrste izdelanih plošč in njihove karakteristike.	15
Preglednica 3: Preglednica enačb za teoretični izračun upogibne trdnosti in modula elastičnosti.	26
Preglednica 4: Upogibne lastnosti, vlažnost in gostota preizkušancev.	31
Preglednica 5: Primerjava rezultatov upogibnega testa z vrednostmi izračunanimi z matematično metodo.	34

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz geometrije zobatega spoja (R. Brandner).	5
Slika 2: Primer velikega zobatega spoja (R. Brandner).	6
Slika 3: Dolžinski spoji KVH lesa (KVH-Si).	6
Slika 4: Lepljeni nosilec iz masivnega lesa.	7
Slika 5: Različni primeri postavitve slojev v križno lepljenih ploščah (FPInnovations, 2011).	8
Slika 6: Shematski prikaz prečnega prereza KLL plošče.	10
Slika 7: Shematski prikaz testiranja križno lepljenje plošče po ploskvi v vzdolžni smeri (Gagnon, Popovski, 2011).	11
Slika 8: Shematski prikaz testiranja križno lepljenje plošče v prečni smeri (Gagnon, Popovski, 2011).	11
Slika 9: Shematski prikaz testiranja križno lepljenje plošče po robu v vzdolžni smeri (Gagnon, Popovski, 2011).	12
Slika 10: Shematski prikaz testiranja križno lepljenje plošče po robu v prečni smeri (Gagnon, Popovski, 2011).	12
Slika 11: Decimirani in skobljani elementi za izdelavo plošč.	13
Slika 12: Shema kemijske reakcije lepila Purbond (Bayer Material Science - Purbond®, 2006).	14
Slika 13: Plošča tipa A.	16
Slika 14: Plošča tipa B.	16
Slika 15: Plošča tipa C.	17
Slika 16: Plošča tipa D.	17
Slika 17: Širinsko lepljenje lamel.	18
Slika 18: Ploskovni elementi obžagani na točne dimenzije.	18
Slika 19: Stiskanje plošč po širini s povezovalnim trakom pred končnim stiskanjem v stiskalnici.	19
Slika 20: Prikaz plošče tipa D pred razžagovanjem.	19
Slika 21: Plošče tipa D, razžagane v preizkušance.	20

Slika 22: Univerzalni stroj za preizkušanje mehanskih lastnosti lesa Zwick Z100 in pripravljen preizkušanelec za testiranje. _____	21
Slika 23: Uporovni merilnik vlažnosti (Merilec..., 2014). _____	21
Slika 24: Merjenje dimenzij preizkušancev za ugotavljanje gostote. _____	23
Slika 25: Shematski prikaz testiranja na upogib (EN 408:2011). _____	24
Slika 26: Prikaz razmerja med pritiskno silo in povodom. _____	25
Slika 27: Izmerjena gostota preizkušancev. _____	29
Slika 28: Izmerjena vlažnost preizkušancev. _____	30
Slika 29: Vpliv debeline slojev in sestave plošče na upogibno trdnost KLL. _____	32
Slika 30: Vpliv debeline slojev in sestave plošče na modul elastičnosti KLL. _____	33
Slika 31: Izmerjena in izračunana upogibna trdnost za različne sestave plošč. _____	35
Slika 32: Prikaz preizkušanca s slabimi mehanskimi lastnostmi. _____	37
Slika 33: Primer preizkušanca s slabo strižno trdnostjo ploskovnih lepilnih spojev. _____	37
Slika 34: Izmerjeni in izračunani moduli elastičnosti za različne sestave plošč. _____	38

KAZALO PRILOG

Priloga A: Tehnični list za lepilo Purbond HB S209

Priloga B: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 15 mm, testirane po ploskvi

Priloga C: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 15 mm, testirane po robu

Priloga D: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 20 mm, testirane po ploskvi

Priloga E: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 20 mm, testirane po robu

Priloga F: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 25 mm, testirane po ploskvi

Priloga G: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 25 mm, testirane po robu

Priloga H: Poročilo za 5 slojne plošče, debeline 15 mm, testirane po ploskvi

Priloga I: Poročilo za 5 slojne plošče, debeline 15 mm, testirane po robu

Priloga J: Slike lomov pri preizkušancih

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

Razlaga oznak za oceno loma:

k	kohezijski lom po lesu
kl	kohezijski lom po lepilu
a	adhezijski lom
sp	srednji prečni sloj
sv	srednji vzdolžni sloj
konci	konca preskušanca
aps	adhezijski lom ploskovnega spoja
sl	strižni lom
n	lom v natezni coni
t	lom v tlačni coni
tn	tlačno-natezna porušitev
sl	spojene sp. lamele
zpl	zunanja prečna lamela
spl	spodnja prečna lamela
komp	kompresijski les
grca	lom po grči
nv	naklon vlaken
jl	juvenilni les

SLOVARČEK

Aklimatizacijski - nanašajoč se na aklimatizacijo, prilagajanje, prilagoditev novim življenjskim razmeram, drugačnemu okolju

Anizotropija - pojav, da ima snov v različnih smereh različne lastnosti

Anomalija - odstopanje, odstop od pravil; nepravilnost, izjemnost, anomalija vode lastnost vode, da ima pri štirih stopinjah največjo gostoto

Dezintegracija - razpadanje, razkrajanje kake celote

KLL - križno lepljen les

Kompoziten - sestavljen, zložen: trdo gorivo kompozitnega tipa

Lamelirati - iz lamel sestavljati nov proizvod: lamelirati les, pločevino

Longitudinalen - vzdolžen, podolžen, dolžinski

Nehomogén - ki ni homogen: nehomogena snov / nehomogena struktura zemljišča / dežela z nehomogenim prebivalstvom ♦ mat. nehomogena algebrajska enačba, v kateri so členi različnih stopenj

Smolika - izcejanje smole pri drevju

1 UVOD

Les je edina naravna in obnovljiva surovina, ki je skozi stoletja obdržala sloves materiala, primerne za konstrukcijsko gradnjo, istočasno pa je tudi okolju in človeku prijazen material. V zadnjih desetletjih je vse večje povpraševanje po lesenih gradbenih elementih, s tem pa začenjajo močno konkurirati armirano-betonskim gradbenim elementom. Razlog za to so tudi razni lesni kompoziti, pri katerih so pomanjkljivosti lesa minimizirane ali povsem izločene. Uporaba sintetičnih lepil in razna vezna okovja veliko pripomorejo k stabilnosti lesenih konstrukcij. Veliko pripomore tudi pravilna orientiranost lesa, saj ima zaradi tega les kot kompozit boljšo dimenzijsko stabilnost. Les je tudi odličen toplotni in zvočni izolator.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Masivnemu lesu lahko izboljšamo mehanske in estetske lastnosti s tem, da vse anomalije izžagamo, nato pa takšne kose v proizvodnji lepimo v večje elemente oziroma v lesne kompozite. Lepljenje v večje elemente se začne z lepljenjem manjših kosov v daljše lamele po dolžini, sledi širinsko lepljenje, nato pa še debelinsko lepljenje (blokovno). Na ta način v lesu zmanjšamo njegovo naravno delovanje na minimalno vrednost, s tem tudi pridemo do večjih presekov in površin lesnih kompozitov.

1.2 CILJ NALOGE

Cilj naloge je ugotoviti, kako sestava križno lepljenega lesa vpliva na upogibno trdnost in modul elastičnosti v vzdolžni in prečni smeri plošče pri ploskovnih oziroma robnih obremenitvah. Istočasno pa bomo ocenili, kaj so glavni vzroki za nastanek loma (npr. slabši lepilni spoji, anomalije v lesu). Po koncu testiranja pa bomo tudi ugotovili vlažnost in gostoto preizkušancev.

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da se s tem, ko se povečuje število slojev v plošči, ki so med seboj zamaknjeni za 90° , znižuje upogibna trdnost križno lepljenega lesa v vzdolžni smeri, povečuje pa se upogibna trdnost v prečni smeri. Predvidevamo tudi, da se s tem, ko se povečuje število slojev, lastnosti enakomerneje porazdelijo tako v vzdolžni kot v prečni smeri plošče.

2 PREGLED OBJAV

2.1 SPLOŠNI DEL

Les se že od nekdaj uporablja za veliko namenov. S pričetkom izdelave lesnih kompozitov pa postaja nepogrešljiv vir materiala. Les se uporablja za kurjavo in izdelavo papirja, za notranje in zunanje pohištvo, strešne konstrukcije, brunarice in podobno. Že v starodavnih časih so ga uporabljali, da so z njim gradili primitivna zatočišča, ki so ljudi ščitila pred nepredvidljivimi vremenskimi pojavi. Kmalu za tem pa se je začela gradnja dosti bolj sofisticiranih bivališč.

Les je okolju prijazen material. Njegova reciklaža je lahka. Med samo proizvodnjo predelave lesa je poraba energije veliko nižja kot v primerjavi z drugimi materiali (Ribič, 2012). Polega tega ima les majhno težo glede na svojo nosilnost, kar je velika prednost pri gradnji, transportu in pri potresni odpornosti objektov, grajenih z lesnimi kompoziti. Prednost lesenih kompozitov je tudi v naravnemu videzu estetske zgradbe lesa (Wang, Pirvu, 2011). Elegantne in prijetne oblike objektov so ugodne za življenje v njih. Z začetkom izdelave križno lepljenih plošč pa je postal še bolj zanimiv gradbeni material za arhitekto in gradbinca.

Lesni kompoziti so se začeli pojavljati v 20. stoletju, k temu pa so veliko pripomogla sintetična lepila in ustrezna tehnologija, katera je dovoljevala izdelovanje večjih lesnih kompozitov (Ireneusz, 2011). Ene izmed prvih predstavnikov lesenih kompozitov so bile furnirne vezane plošče, ki so se največ uporabljale za potrebe letalske industrije med I. svetovno vojno. Med II. svetovno vojno in po njej pa je bilo zaznati močan napredek v razvoju sintetičnih lepil in v uporabi le-teh. Vzporedno so se začeli pospešeno razvijati kompoziti iz dezintegriranega lesa (lesna vlakna in iveri).

2.2 MASIVNI LEPLJENI KOMPOZITI

Izdelovanje lameliranega lepljenega lesa se je zelo razmahnilo v 70. letih prejšnjega stoletja. Uvrščamo ga v sodobno kompozitno gradivo, ki ima enakomernejše in boljše mehanske lastnosti kot masivni les (Jesenko, 2008). Sestavljen je iz lamel (do 45 mm debeline), kjer vlakna potekajo vzporedno. Spoji, ki se uporabljajo za nosilne lesene konstrukcije, so lepljeni z lepili za konstrukcijsko uporabo z visoko trdnostjo in trajnostjo, pri tem pa so odporni proti vodi, povišani vlažnosti in temperaturi ter raznim biološkim dejavnikom (Lulić, 2014). Lepila, ki se uporabljajo za proizvodnjo lameliranega lepljenega lesa, so največkrat (Resnik, 1989):

- ~ Melamin-urea-formaldehidna lepila,
- ~ Resorcionol-fenol-formaldehidna lepila,
- ~ Poliuretanska lepila.

Melamin-urea-formaldehidna lepila uvrščamo v skupino aminoplastov. Utrjevanje poteka po principu polikondenzacije. Vsak dodaten delež melamina v lepilni mešanici znatno izboljša strižno trdnost lepilnega spoja in njegovo vodoodpornost (Resnik, 1989).

Resorcionol-fenol-formaldehidna lepila so ena najkakovostnejših lepil za les in spadajo med polikondenzacijska lepila. Namenjena so za lepljene kompozitov v gradbeništvu in imajo visoko trdnost. Lepilni spoji so odporni proti staranju. Lepila so odporna proti kislinam, šibkim lugom, topilom, glivam in mikroorganizmom. Odporna so tudi proti vroči vodi in visokim temperaturam.

Poliuretanska lepila so eno- in dvo-komponentna lepila. Enokomponentno poliuretensko lepilo izkorišča naravno vlago v lesu za kemijsko reakcijo utrjevanja in povezovanja elementov v celoto.¹ Lepilo je zelo kakovostno.

Elementi lesa se po dolžini lahko spajajo na topi in poševni spoj, vendar pa poševni spoji niso primerni za lameliran lepljen les in križno lepljen les (KLL). Najpogosteje se za

¹ Več o lepilu je opisano v poglavju o lepilih ter v prilogi.

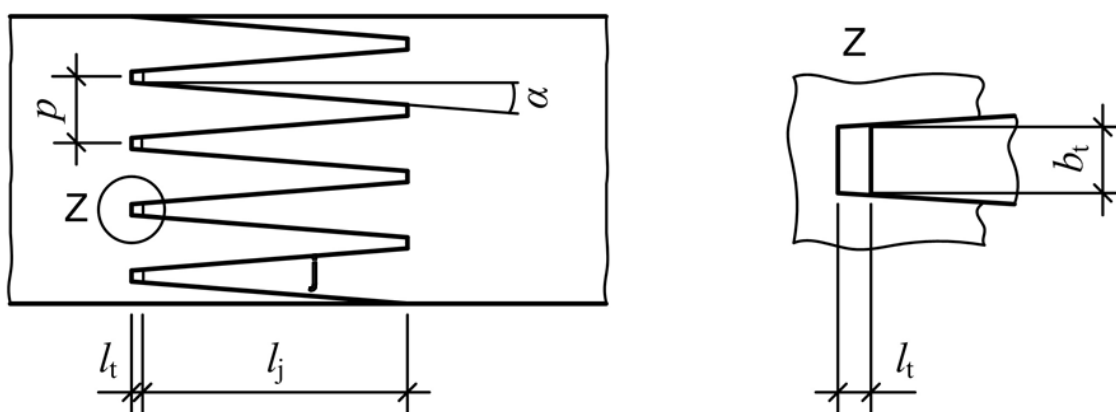
lameliran lepljen les in križno lepljen les uporabljajo zobati spoji različnih geometrijskih karakteristik (preglednica 1), ki so določeni s standardom EN 14080:13 (slika 1).

Preglednica 1: Profil zobatih spojev, geometrijske karakteristike (prirejeno po R. Brandner).

l_{FJ} [mm]	p [mm]	b_t [mm]	b_n [mm]	l_t [mm]	α [°]
15	3,8	0,42	0,52	0,5	5,6
20	5,0	0,50	0,60	0,5	5,7
20	6,2	1,00	1,11	0,5	6,0
50 ¹⁾	12,0	2,00	2,48	3,0	4,6

¹⁾ Priporočena vrsta zobatega spoja za večje dimenzije lesa, celih križno lepljenih plošč ali lameliranega lesa je prikazana na sliki 2.

l_{FJ} dolžina zobatega spoja
 p razdalja
 b_t tipska višina
 b_n osnovna višina
 l_t prostor za odvečno lepilo
 α kot zoba



Slika 1: Shematski prikaz geometrije zobatega spoja (R. Brandner).



Slika 2: Primer velikega zobatega spoja (R. Brandner).

Poznamo 3 najpogostejše uporabljene tipe lesnih kompozitov za stavbno gradnjo:

- ~ Dolžinsko spojen konstrukcijski masivni les (KVH- konstruktionsvollholz) je tehnično posušen izdelek iz masivnega lesa iglavcev (smreka, jelka, bor, macesen ali duglazija), razvrščen glede na trdnost (C24 po evropskih standardih) in je po potrebi spojen z dolžinskim spojem (Kuzman, 2008). KVH se razvršča po dveh razredih. KvH-Si se uporablja za namene, kjer je izdelek v celotni viden ali kot vidna kvaliteta (slika 3), KvH-NSi pa je oznaka za kvaliteto, pri kateri nadalje pritrjujemo še dodatne elemente (mavčne ali farmacel plošče, KVH-NSi les se zelo veliko uporablja za skeletne konstrukcije stanovanjskih hiš in raznih manjših objektov) (Kuzman, 2008).



Slika 3: Dolžinski spoji KVH lesa (KVH-Si).

- ~ Lepljen lameliran les (BSH - Brettischichtholz) je sestavljen iz dolžinsko spojenih lamel (zobati spoj), katere so nato zlepljene po debelini, njihova debelina pa

predstavlja višino nosilca (slika 4). Debelina lamel v debelinsko lepljenih nosilcih naj ne bi presegala 45 mm. Dimenzije nosilcev pa so neomejene, kvečjemu je njihova omejitev transport. Debelinsko lepljeni nosilci so lahko ravni, izdelujejo pa se tudi nosilci s krivo osjo. Naše najbolj znano podjetje za izdelavo takih nosilcev je HOJA d. d., ki izdeluje ravne nosilce in krivljeni nosilci. Vgrajujejo se v trgovske centre, proizvodno - poslovne objekte, športne dvorane ter kopališča. Njihova dolžina je pogojena s transportom. Do 18 m dolžine se lahko transportirajo s spremstvom, daljši nosilci pa se transportirajo z izrednimi prevozi, saj dolžine takih nosilcev dosega tudi več kot 50 m (Šernek, 2012).



Slika 4: Lepljeni nosilec iz masivnega lesa.

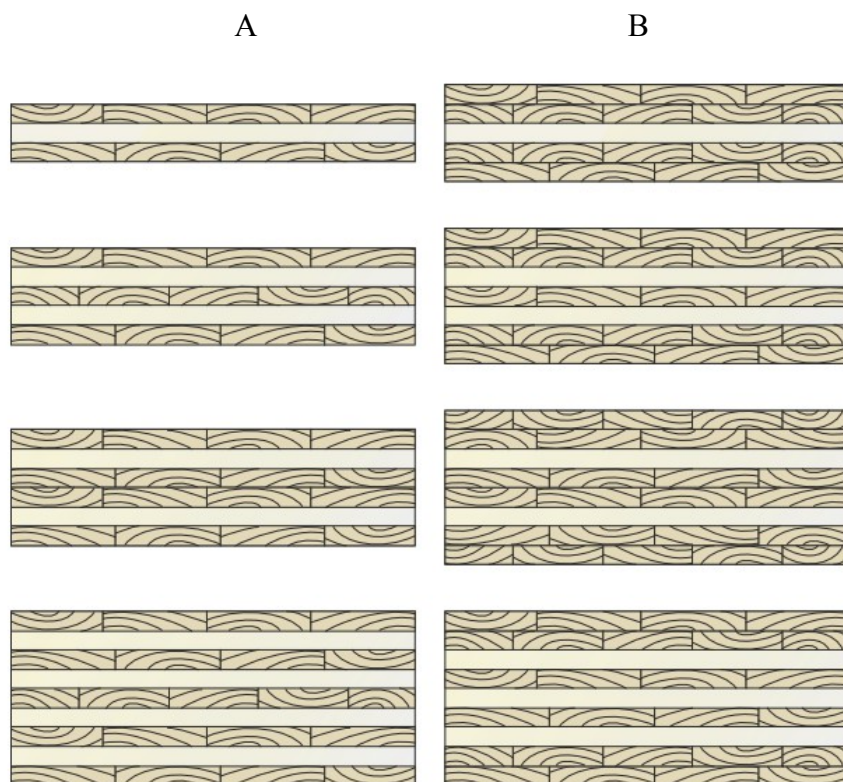
Plošče iz križno lepljenega lesa (Kreuzlagen Holz) so bolj podrobno opisane v naslednjem poglavju, saj predstavljajo temo diplomskega dela.

2.3 PLOŠČE IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA (KLL)

Križno lepljen les (Kreuzlagen Holz) je inovativen lesni kompozit, ki so ga razvili v Avstriji, na Technische Universität Graz (dr. Schichofer in Sägeindustrie Steiermark), pred dvema desetletjema (sredina 1990). Od začetka je bilo povpraševanje po KLL ploščah majhno, po letu 2000 pa je njihova uporaba začela strmo naraščati. Temu so botrovale predvsem velike prednosti na energijski rabi, zvočni in toplotni izolativnosti (les je odličen

izolator), predvsem pa so našle odobravanje pri ljudeh z okoljsko ozaveščenostjo (»zelena gradnja«). Prednost je tudi v tem, da so arhitekti začeli načrtovati in oblikovati kompleksne zasnove objektov iz lesnih kompozitov (Craft, 2011). Gradijo se 8 in več nadstropne stolpnice iz KLL plošč, razni načini »parazitskega« dograjevanja ter prehodni mostovi. Hitrost gradnje s KLL ploščami je zelo hitra, saj se vsi elementi zgradbe že pripravijo in oblikujejo (razni izrezi ter utori za vezna okovja) v sami proizvodnji. Na samem mestu postavitve sledi nadaljnja sestava teh panelov po načrtu proizvajalca (Dujič, 2008).

Za izdelavo KLL se uporablja les iglavcev po strogih okoljevarstvenih zahtevah, z vidika gospodarjenja z gozdom. Les, za izdelavo plošč, je tehnično posušen na 12 % (± 2 %) vlažnosti, s tem pa se zagotovi naravna zaščita pred škodljivci (glive, insekti, plesni). Križno lepljene plošče so sestavljene iz lihega števila slojev (3, 5, 7 in več, vse do maksimalne debeline 60 cm), posamezne plasti v plošči pa so običajno orientirane pod kotom 90° (pravokotno na sosednji sloj). V posebnih situacijah pa se izdelujejo plošče z dvojnimi zunanjimi nosilnimi sloji v primeru, da je to potrebno glede na statične izračune (slika 5).



Slika 5: Različni primeri postavitve slojev v križno lepljenih ploščah (FPInnovations, 2011).

Slika 5 prikazuje postavitev slojev v križno lepljenih ploščah. Stolpec A prikazuje možnosti križno lepljenih plošče, pri katerih je vsak naslednji sloj orientiran za 90° glede na predhodni sloj. Stolpec B pa prikazuje možnosti križno lepljenih plošče, pri katerih so vlakna lesa zunanjih dveh slojev, v enem primeru tudi sredinska sloja, orientirana vzdolžno na obeh straneh, torej zgoraj in spodaj. To pripomore k boljši upogibni trdnosti in večjemu elastičnemu modulu v vzdolžni smeri. Pri gradnji se tako izdelane plošče uporabljajo za konzolne previse in večje razpone (tla, večji previsi čez stene).

Ta način izdelave se je uveljavil, ker je les v sami osnovi izrazito nehomogen in anizotropen material. S tem, ko les razžagamo, izžagamo določene napake (barvne diskoloracije, večje izpadljive grče, izrazito kompresijski les) in ga z ustreznimi lepili zlepimo, dobimo lesni kompozit, ki je dimenzijsko bolj stabilen, saj s tehnološkim postopkom izdelave križno lepljenih plošč vse te neugodnosti zmanjšamo (Nardin, 2012). Elastični modul lesa v smeri vlaken je bistveno večji (do 30-krat) kot pa elastični modul pravokotno na vlakna, zato se primarna obtežba pogojuje po smeri orientacije vlaken, ki so na zunanjih plasteh križno lepljenih plošč, in je odvisna od debeline, števila in orientiranosti posameznih plasti v sami plošči (Gavrič, 2009). V kolikor se pojavijo dodatne potrebe po doseganju višjih strižnih trdnosti, se lahko dodajo v sredico plošče dodatni sloji, pri katerih smer vlaken poteka v smeri zunanjih slojev (Jesenko, 2008).

Namen diplomskega dela je raziskati vpliv sestave križno lepljenega lesa na upogibno trdnost in modul elastičnosti. Raziskovali smo ali debelina posameznega sloja, število slojev, vlažnost lesa ter gostota lesa kakorkoli vplivajo na upogibno trdnost in na elastični modul KLL.

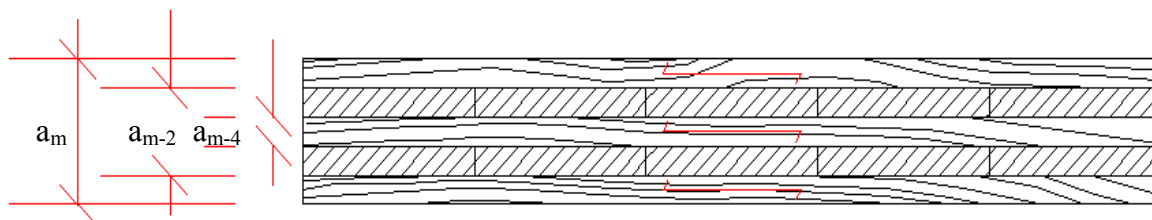
2.4 PRIMER IZRAČUNA TRDNOSTNIH LASTNOSTI KLL

Trdnostne lastnosti KLL plošč lahko teoretično računamo s pomočjo k faktorja. Vrednost k faktorja se spreminja glede na smer preizkušanja trdnostnih lastnosti KLL plošč. Poznani so 4 faktorji za 4 različne smeri obremenjevanja (Gagnon, Popovski, 2011).

Te 4 vrste faktorjev so:

- ~ faktor za vzdolžno smer preizkušanja po ploskvi (k_1),
- ~ faktor za prečno smer preizkušanja po ploskvi (k_2),
- ~ faktor za vzdolžno smer preizkušanja po robu (k_3),
- ~ faktor za prečno smer preizkušanja po robu (k_4).

Shematski prerez 5 slojne KLL plošče, z označenimi sloji, ki jih uporabljamo pri računanju vrednosti faktorja, je prikazan na sliki 6.



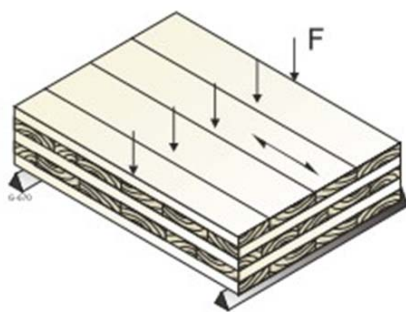
Slika 6: Shematski prikaz prečnega prereza KLL plošče.

Razlaga neznank v enačbah za računanje koeficienta k za vse 4 smeri preizkušanja KLL plošč.

k	koeficient (za različne smeri so različne vrednosti koeficienta: k_1, k_2, k_3, k_4)
E_{90}	elastični modul za prečno smer
E_0	elastični modul za vzdolžno smer
a_m	debelina plošče
a_{m-2}	debelina osrednjih slojev plošče (brez zunanjih slojev)
a_{m-4}	debelina srednjega sloja plošče

2.4.1 Izračun vrednosti k_1 faktorja za vzdolžno smer po ploskvi

Vrednosti k_1 se izračuna po formuli 1 in velja za primer, ko deluje sila v smeri pravokotno na ploskev, pri tem pa so lesna vlakna zunanjih dveh slojev orientirana v vzdolžni smeri plošče (slika 7).

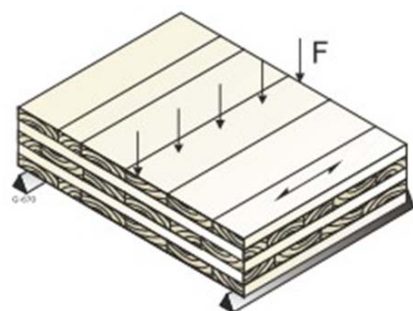


$$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) * \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3} \quad \dots(01)$$

Slika 7: Shematski prikaz testiranja križno lepljene plošče po ploskvi v vzdolžni smeri (Gagnon, Popovski, 2011).

2.4.2 Izračun vrednosti k_2 faktorja za prečno smer po ploskvi

Vrednost k_2 se izračuna po formuli 2 in velja za primer, ko deluje sila v smeri pravokotno na ploskev, pri tem pa so lesna vlakna zunanjih dveh slojev orientirana v prečni smeri plošče (slika 8).

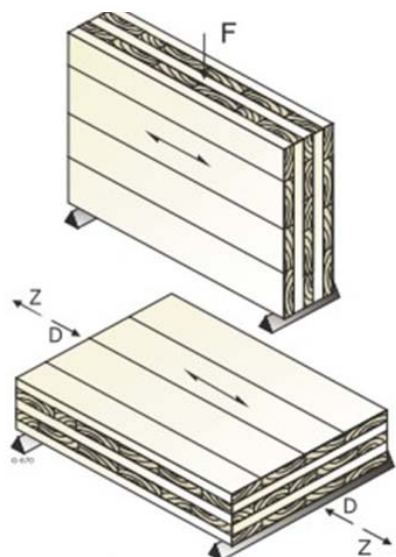


$$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) * \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3} \quad \dots(02)$$

Slika 8: Shematski prikaz testiranja križno lepljene plošče v prečni smeri (Gagnon, Popovski, 2011).

2.4.3 Izračun vrednosti k_3 faktorja za vzdolžno smer po robu

Vrednost k_3 se izračuna po formuli 3 in velja za primer, ko deluje sila v smeri pravokotno na rob, pri tem pa so lesna vlakna zunanjih dveh slojev orientirana v vzdolžni smeri plošče (slika 9).

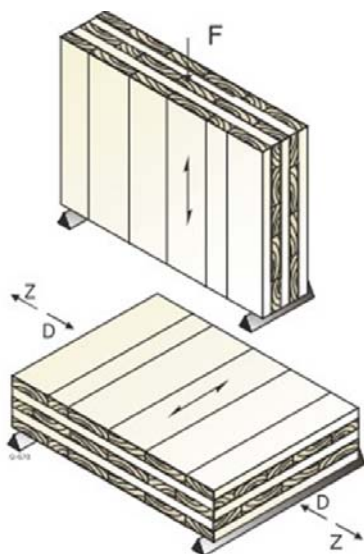


$$k_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) * \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m} \dots (03)$$

Slika 9: Shematski prikaz testiranja križno lepljene plošče po robu v vzdolžni smeri (Gagnon, Popovski, 2011).

2.4.4 Izračun vrednosti k_4 faktorja v prečni smeri po robu

Vrednost k_4 se izračuna po formuli 4 in velja za primer, ko deluje sila v smeri pravokotno na rob, pri tem pa so lesna vlakna zunanjih dveh slojev orientirana v prečni smeri plošče (slika 10).



$$k_4 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) * \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m} \dots (04)$$

Slika 10: Shematski prikaz testiranja križno lepljene plošče po robu v prečni smeri (Gagnon, Popovski, 2011).

3 MATERIALI IN METODE

3.1 MATERIALI

3.1.1 Les

Za izdelavo plošč iz KLL se uporablja večinoma les smreke (*Picea Abies*, Karst.), lahko pa tudi ostale vrste iglavcev. Smreka ima neobarvano jedrovino, zato se beljava in jedrovina barvno ne ločita. Les smreke je rumenkasto-bel. Gostota je nizka do srednja, zato je krčenje zmerno. Smreka je elastična in trdna, tudi suši se brez težav. Lahko se cepi in lepo se lušči. Les je malo nagnjen k zvijanju in pokanju in se z lahkoto obdeluje z ročnimi orodji ali strojno. Zelo dobro se lepi, dobro se tudi žeblija in vijači (Čufar, 2006).

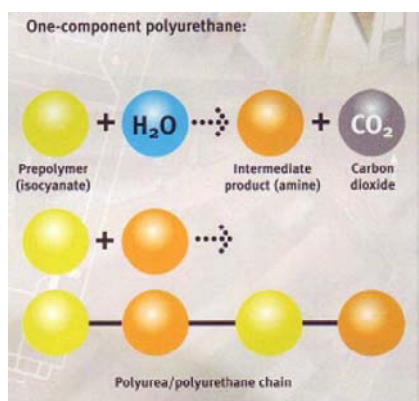
Za izdelavo križno lepljenih plošč v naši raziskavi smo uporabili zračno suh les smreke, debeline 32 in 50 mm, ki se je še nadalje tehnično sušil v komorni sušilnici na končno vlažnost 10 %. Plošče, izdelane za preizkušance, so imele neto 0,69 m³ lesa. Vse površine lamel so bile skobljane. Lamelle, uporabljene za izdelavo križno lepljenih plošč (slika 11), so bile širine 100 mm, njihova dolžina in debelina pa sta se spreminjali glede na tip plošče (preglednica 2).



Slika 11: Decimirani in skobljani elementi za izdelavo plošč.

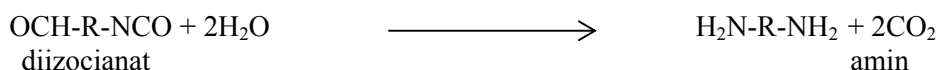
3.1.2 Lepilo

Za izdelavo križno lepljenih plošč smo uporabili enokomponentno poliuretansko lepilo za visoko-obremenjene lesene konstrukcije Purbond HB S209. Lepilo izkorišča naravno vlago v lesu za kemijsko reakcijo utrjevanja in povezovanja elementov v celoto, brez potrebe po topilih (slika 12). Med lepljenjem oddaja majhne količine CO₂, zato se lahko med utrjevanjem lepila pojavi penjenje. Lepilo je brez vonja. Zaradi njegove visoke sposobnosti povezovanja je njegova poraba majhna. Ker so Purbond lepila brez formaldehida, so lepljene konstrukcije popolnoma primerljive z naravnim masivnim lesom (Bayer Material Science - Purbond®, 2006). Manj ugodno pa je samo delo z lepilom, saj je njegovo odstranjevanje z orodij in vseh predmetov, ki pridejo v stik z njim, precej trdovratno. V prilogi je tehnični list, v katerem so navodila in tehnični podatki za uporabo lepila Purbond HB S209 (priloga A).



Slika 12: Shema kemijske reakcije lepila Purbond (Bayer Material Science - Purbond®, 2006).

Lepilo za utrjevanje ne potrebuje dodatnih komponent (kot npr. trdilec). Formula prikazuje način utrjevanja lepila (Resnik, 1989).



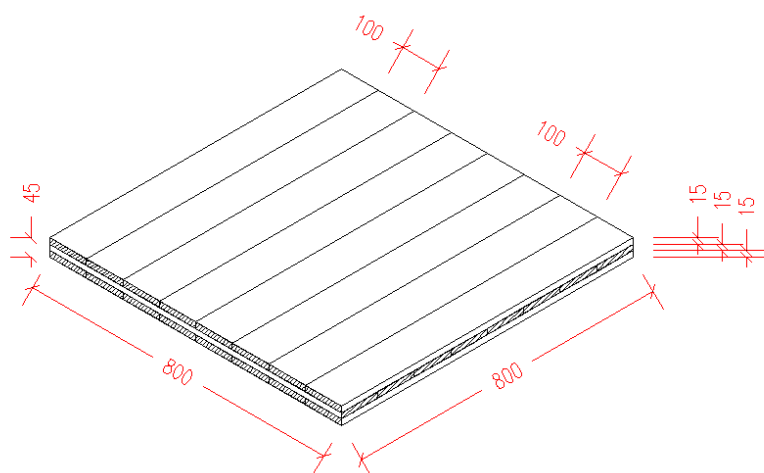
Za utrjevanje tega lepila, ki poteka izključno zaradi vlage, se zahteva minimalna relativna zračna vlaga 40 %. Med skladiščenjem moramo lepilu preprečiti stik z vlogo ali vodo. Te vrste lepil se uporabljajo za lepljenje lesnih kompozitov, kjer je potrebna visoka trdnost in obstojnost spojev pri izpostavljenosti različnim vremenskim razmeram.

3.1.3 Sestava plošč

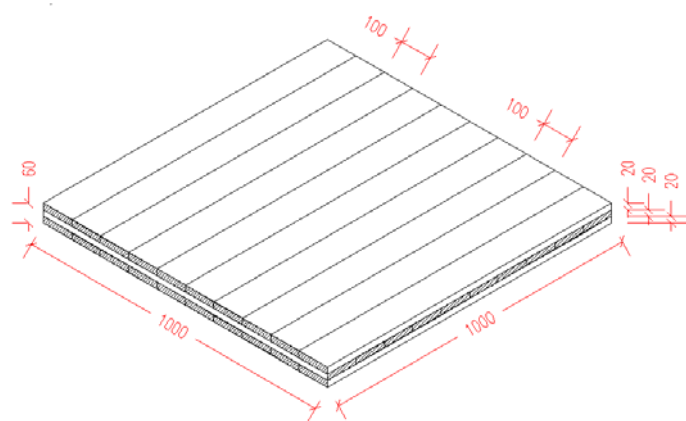
Zlepljenih je bilo 8 KLL plošč za testiranje. Sestavljene so bile iz 3 plasti z debelinami slojev 15 mm (slika 13), 20 mm (slika 14) ter 25 mm (slika 15). Izdelali smo tudi 5 slojno ploščo, ki je imela debelino sloja 15 mm (slika 16). Širina lamel v slojih je bila pri vseh 8 ploščah 100 mm. Vrste izdelanih plošč in njihove karakteristike so predstavljene v preglednici 2.

Preglednica 2: Vrste izdelanih plošč in njihove karakteristike.

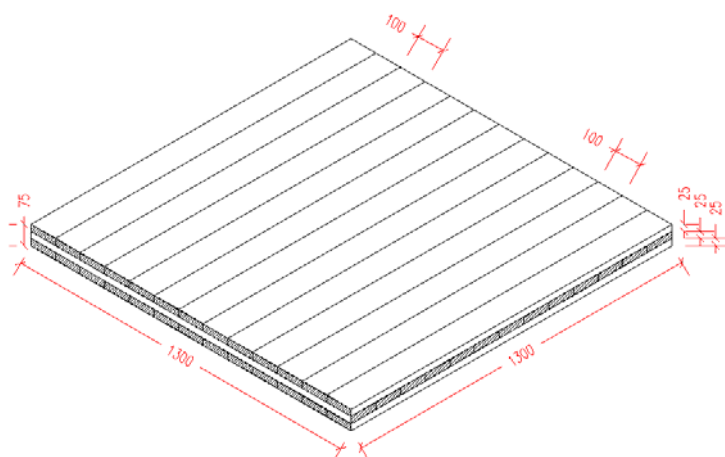
Plošča	Število plošč	Debelina sloja (mm)	Število slojev	Debelina plošče (mm)	Razdalja med podporama, min. 15 x h (mm)	Dolžina in širina plošče (mm)	Širina lamel (mm)	Število lamel v sloju
A	2	15	3	45	675	800	100	8
B	2	20	3	60	900	1000	100	10
C	2	25	3	75	1125	1300	100	13
D	2	15	5	75	1125	1300	100	13



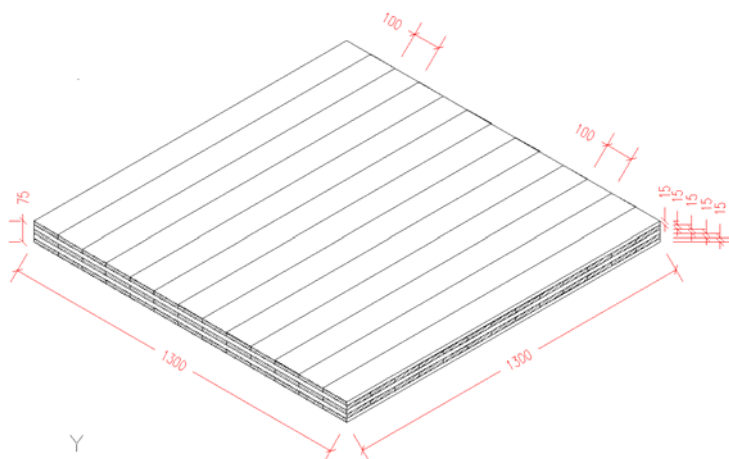
Slika 13: Plošča tipa A.



Slika 14: Plošča tipa B.



Slika 15: Plošča tipa C.



Slika 16: Plošča tipa D.

3.2 METODE

3.2.1 Lepljenje

Naslednji postopek izdelave plošč je bilo širinsko lepljenje posameznih spojev. Na razpolago smo imeli debelinski skobeljni stroj širine 600 mm, čemur smo prilagajali širino sloja. Ploskovne elemente smo zlepili širinsko po 5 lamel, kar je znašalo 500 mm širine, za plošče dimenzij 800 x 800 mm po 4 lamele (slika 17). Plošče, ki so bile široke 1300 mm,

smo izdelali tako, da smo dodatno zlepili še po 3 lamele skupaj, da je bilo končno ploskovno skobljanje vseh plošč izvedljivo za izdelavo križno lepljenih plošč.

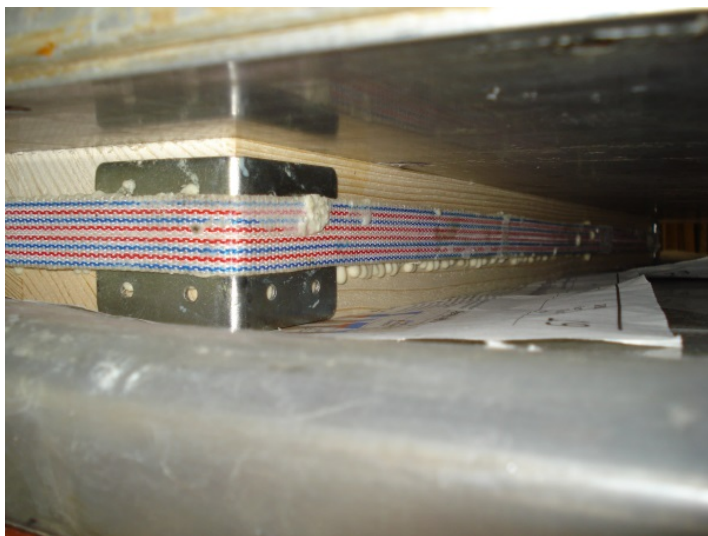


Slika 17: Širinsko lepljenje lamel.

Sledilo je ploskovno lepljenje (blokovno) slojev v ploščo, ki smo ga izvedli pri Mizarstvu Grm. Najprej smo vse plošče obžagali na CNC formatnem krožnem žagalnem stroju, da smo jih lahko pred lepljenjem v stiskalnici še povezali s povezovalni trakom po vogalih in s tem stisnili plošče tudi po širini (slika 19). Obrez na CNC formatnem krožnem žagalnem stroju je bil potreben, ker je bilo zaželeno, da so vsi elementi obrezani na točno dimenzijo.



Slika 18: Ploskovni elementi obžagani na točne dimenzije.



Slika 19: Stiskanje plošč po širini s povezovalnim trakom pred končnim stiskanjem v stiskalnici.

3.2.2 Izdelava preizkušancev

V mizarški delavnici Oddelka za lesarstvo smo plošče razžagali v preizkušance ustreznih dimenzij. Preizkušanci so bili kvadratnega prereza (45 mm debela križno lepljena plošča je imela preizkušance prereza 45 x 45 mm dolžine 800 mm), ostali 3 tipi plošč so bili razžagani po istem principu glede na debelino plošče (slika 20). Izdelali smo 4 tipe plošč, za vsak tip po 2 plošči, da smo imeli dovolj preizkušancev, ki smo jih testirali po ploskvi ter po robu in sicer v vzdolžni ter prečni smeri.



Slika 20: Prikaz plošče tipa D pred razžagovanjem.



Slika 21: Plošče tipa D, razžagane v preizkušance.

Vseh osem plošč smo razžagali v preizkušance, jih ustrezno označili ter dali v klimatizacijsko komoro, kjer so se teden dni klimatizirali pri 20 °C in 65 % relativni zračni vlažnosti. Številčenje je bilo po sistemu, da so bile lihe številke oznaka za preizkušance, ki smo jih testirali po ploskvi (vzdolžno in prečno orientirani preizkušanci testirani po ploskvi), medtem ko si bile sode številke za preizkušance, ki so bili testirani po robu (vzdolžno in prečno orientirani preizkušanci testirani po robu).

3.2.3 Priprava

Sledila je priprava stroja za testiranje. Uporabljali smo univerzalni testirni stroj ZWICK Z100. Na njem smo testirali upogibno trdnost in določili elastični modul preizkušancem. Uporabili smo postopek po standardu za štiri točkovni upogib. Preizkušanec je bil položen na spodnji dve podpori, nato pa smo ga zgoraj obremenili s silo, ki je delovala na dveh točkah (slika 22).



Slika 22: Univerzalni stroj za preizkušanje mehanskih lastnosti lesa Zwick Z100 in pripravljen preizkušaneec za testiranje.

3.2.4 Ugotavljanje lastnosti

3.2.4.1 Vlažnost

Les, ki smo ga uporabili za izdelavo plošč (deske, plohi), se je v komorni sušilnici posušil na 9 - 10 % vlažnosti. Vlažnost lesa smo merili z uporovnim merilnikom vlažnosti (slika 23).



Slika 23: Uporovni merilnik vlažnosti (Merilec..., 2014).

Med izdelavo plošč se je vlažnost elementov rahlo povečala (približno na 12 - 13 %), kar je bila posledica višje relativne vlažnosti okolice. Testnim vzorcem smo vlažnost merili še po končanem testiranju z metodo tehtanja. Vzorce za tehtanje smo izžagali iz preizkušancev, zato so bili izrezi opravljeni čim bližje mestom lomov, dimenzije so bile kockaste oblike in so izhajale iz debeline preizkušancev. Vlažnost smo ugotavljali po standardu SIST EN 322:1993. Najprej smo stehali maso izžaganih preizkušancev, na laboratorijski tehtnici na 0,01 g natančno. Nato smo jih posušili do absolutno suhega stanja in ponovno stehali.

Vlažnost preizkušanca smo izračunali po enačbi:

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \times 100\% \quad \dots(5)$$

Kjer je:

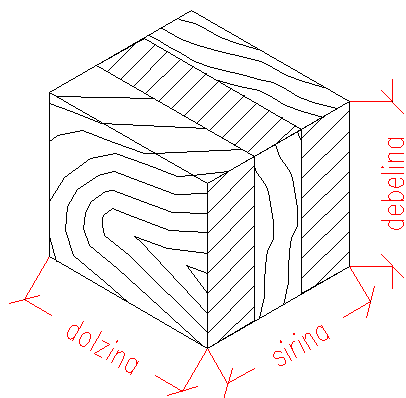
u ... vlažnost [%]

m_u ... masa preizkušanca po testiranju [g]

m_0 ... masa absolutno suhega preizkušanca [g]

3.2.4.2 Gostota

Gostoto lesa smo določili po standardu SIST EN 323:1993. Za merjenje gostote smo uporabili iste preizkušance kot pri merjenju vlažnosti, katerim smo še dodatno izmerili širino, debelino in dolžino (slika 24). To smo opravili na 0,01 mm natančno s kljunastim merilom.



Slika 24: Merjenje dimenzij preizkušancev za ugotavljanje gostote.

Gostoto smo izračunali po enačbi:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \dots(6)$$

$$V = b_1 \times b_2 \times t \quad \dots(7)$$

Kjer je:

ρ ...gostota preizkušanca [kg/m³]

m ... masa preizkušanca [kg]

V ...prostornina preizkušanca [m³]

b_1 ...širina preizkušanca [m]

b_2 ...dolžina preizkušanca [m]

t ...debelina preizkušanca [m]

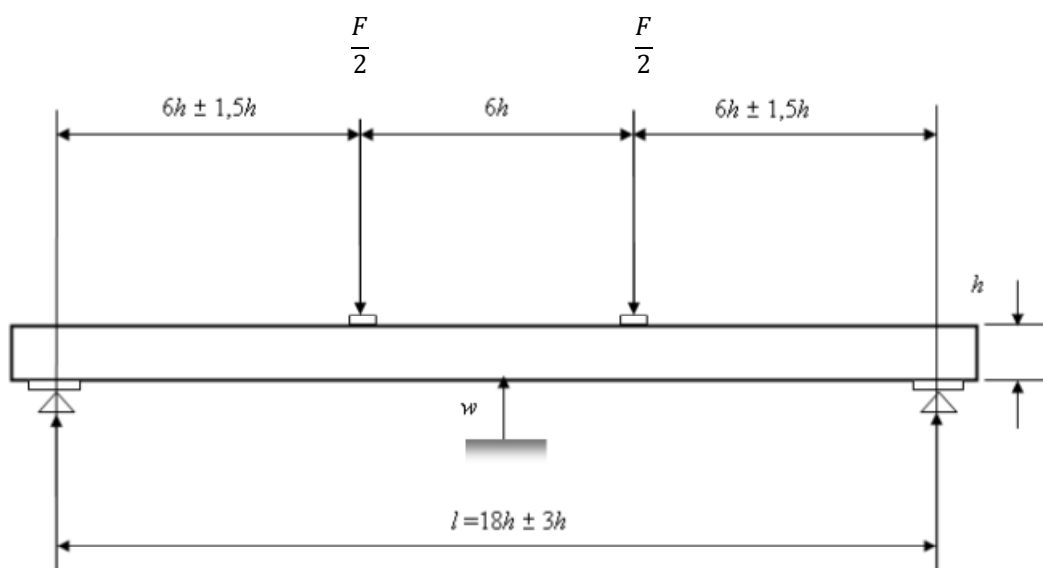
3.2.4.3 Upogibna trdnost in modul elastičnosti

Ugotavljanje lastnosti na podlagi preskusa

Upogibna trdnost in modul elastičnosti sta dve pomembni mehanski lastnosti lesa. Vrednost obeh lastnosti variira glede na kvaliteto uporabljenega lesa. Upogibna trdnost je odpor lesnega nosilca med oporami proti maksimalni sili, ki deluje pravokotno na os nosilca (Leban, 2004). Modul elastičnosti je fizikalna količina, določena pri raztezanju in

stiskanju teles kot razmerje med mehansko napetostjo (sila na enoto preseka) in relativnim raztezkom v Hookovem zakonu (Wikipedia, 2011).

Osnovni standard, ki opredeljuje zahteve za izdelavo KLL, je prEN 16351:2011. Ta v dodatku G podaja zahteve glede ugotavljanja upogibnih lastnosti. Shema testiranja prikazuje, kako so preizkušanci podprti ter kolikšna mora biti razdalja med pritisknima in podpornima točkama. Le-ta se je spreminjala v odvisnosti od debeline plošč. Preizkušanci so imeli širino in višino enako, obe dimenziji pa sta izhajali iz debeline plošče (debelinsko različni so bili 3 tipi plošč).



Slika 25: Shematski prikaz testiranja na upogib (EN 408:2011).

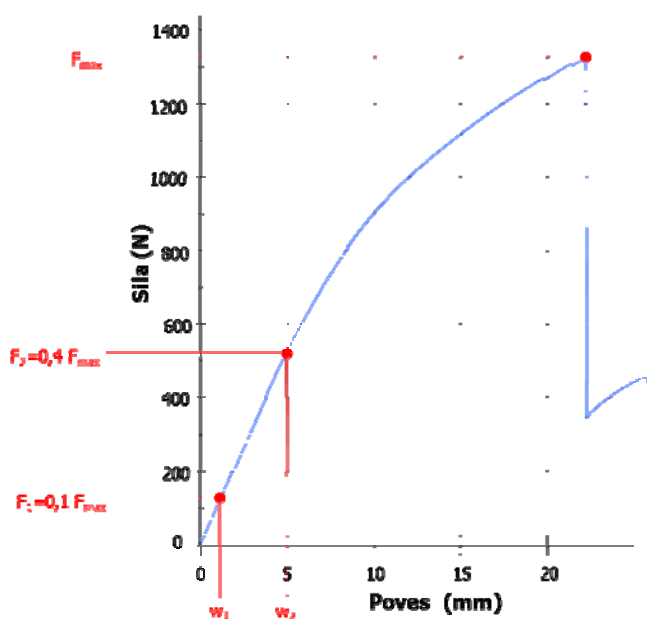
Kjer je:

$\frac{F}{2}$ - sila potrebna za obremenjevanje

h – višina preizkušancev

l - razdalja med podporama

w - naprava za merjenje povesa



Slika 26: Prikaz razmerja med pritisko silo in povesom.

Slika 26 prikazuje razmerje med silo in povesom pri upogibni obremenitvi. Točki 1 (w_1 , F_1) in 2 (w_2 , F_2) se nahajata na linearnem delu krivulje loma (v območju, kjer velja Hookov zakon). Pri najvišji točki (F_{max}) pride do zloma preizkušanca.

Upogibno trdnost smo izračunali po formuli (8):

$$\sigma = \frac{F \cdot a}{I} \quad \dots(8)$$

Modul elastičnosti smo izračunali po formuli (9):

$$E = \frac{F \cdot a^3}{48 \cdot I \cdot \Delta} \quad \dots(9)$$

Kjer je:

- F pritiska sila na delovnem orodju
- a razdalja med mestom obremenjevanja in najbližjo podporo

b	širina preizkušanca
h	debelina preizkušanca
l	razdalja med podporama
$w_2 - w_1$	porast deformacije – povesa, ki ustreza spremembi sile $F_2 - F_1$
$F_2 - F_1$	porast sile v N na regresijski premici, za katero velja, da je korelacijski koeficient vsaj 0,99
G	strižni modul; ker je le-ta neznan, se upošteva glede na EN 408, da je njegova vrednost neskončno velika

Ugotavljanje lastnosti na podlagi izračuna

Upogibno trdnost in modul elastičnosti se lahko pridobi tudi z izračunom. Pri tem upoštevamo, da so vrednost za upogibno trdnost in modul elastičnosti posameznih slojev križno lepljenih plošč enake vrednosti za masivni les in jih lahko vzamemo iz literature. Pri izračunih za naše preizkušance smo vzeli povprečne vrednosti: upogibna trdnost 66 N/mm², elastični modul 11000 N/mm² (Čufar, 2006). Pri tem velja, da je za vsako smer poteka testiranja drugačna formula (preglednica 3).

Preglednica 3: Preglednica enačb za teoretični izračun upogibne trdnosti in modula elastičnosti.

$f_{m,0,ef} = f_{m,0} \times k_1$	enačba za izračun upogibne trdnosti v smeri vlaken po ploskvi
$E_{m,0,ef} = E_0 \times k_1$	enačba za izračun modula elastičnosti v smeri vlaken po ploskvi
$f_{m,90,ef} = f_m \times k_2 \times a_m / a_{m-2}$	enačba za izračun upogibne trdnosti prečno na vlakna po ploskvi
$E_{m,90,ef} = E_0 \times k_2$	enačba za izračun modula elastičnosti prečno na vlakna po ploskvi
$f_{m,0,ef} = f_{m,0} \times k_3$	enačba za izračun upogibne trdnosti v smeri vlaken po robu
$E_{m,90,ef} = E_0 \times k_3$	enačba za izračun modula elastičnosti v smeri vlaken po robu
$f_{m,90,ef} = f_{m,0} \times k_4$	enačba za izračun upogibne trdnosti prečno na smer vlaken po robu
$E_{m,90,ef} = E_0 \times k_4$	enačba za izračun modula elastičnosti prečno na smer vlaken po robu

Kjer je:

$f_{m,0,ef}$	upogibna trdnost v smeri vlaken
$f_{m,90,ef}$	upogibna trdnost v smeri prečno na vlakna
$E_{m,0,ef}$	elastični modul v smeri vlaken

$E_{m,90,ef}$	elastični modul v smeri prečno na vlakna
k_1, k_2, k_3, k_4	vrednosti faktorja k za različne smeri preizkušanja

Vrednosti faktorja k smo izračunali po formulah iz poglavja 2.4.

Za KLL tudi velja, da se modul elastičnosti za prečne sloje ne vrednoti z vrednostjo 0, tako kot to velja za furnirne vezane plošče, ampak se vrednost za smer prečno na vlakna izračuna po naslednji formuli (Gagnon, Popovski, 2011):

$$E_{90} = \frac{E_0}{30} \quad \dots(10)$$

Kjer je:

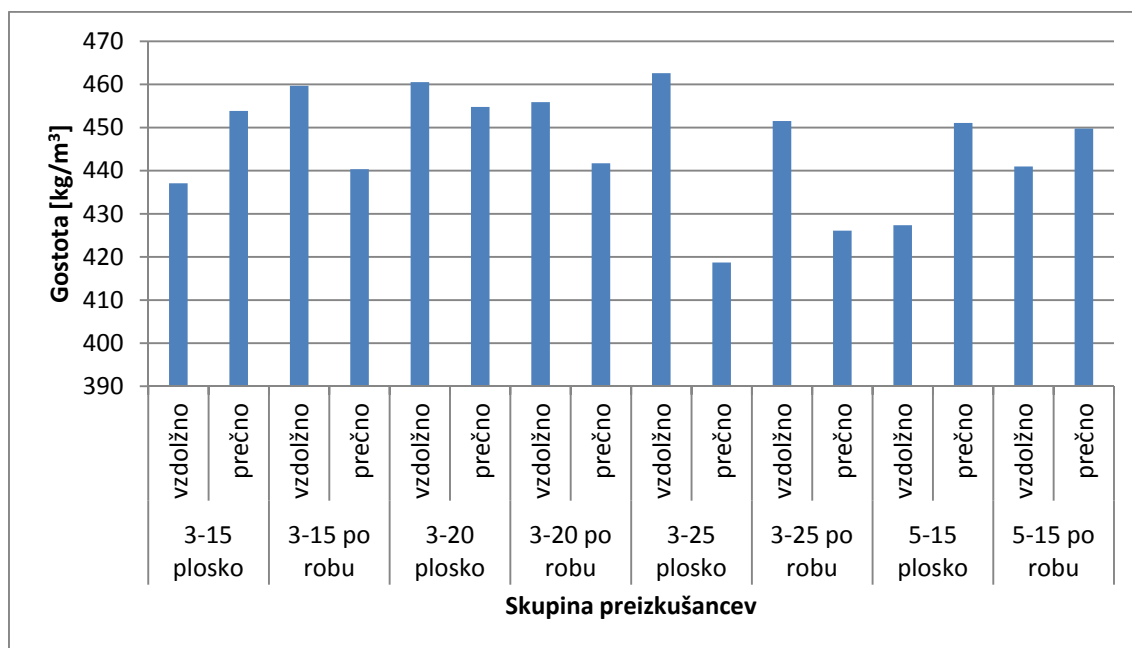
E_{90}	elastični modul pravokotno na lesna vlakna
E_0	elastični modul vzdolžno na lesna vlakna

4 REZULTATI

Izdelali smo 8 križno lepljenih plošč oziroma štiri različne vrste, kar pomeni dve plošči enake sestave. Iz ene plošče so bili preizkušanci izžagani vzdolžno, iz druge pa prečno. Iz vsake plošče smo izdelali 14 preizkušancev, 7 preizkušancev je bilo testiranih po ploskvi, ostalih 7 pa smo testirali po robu. Testiranje na univerzalnem stroju Zwick Z100 je podalo osnovne podatke za izračun upogibne trdnosti in modula elastičnosti. Računalniški program nam je izrisal grafe za vse skupine preizkušancev, ki so zbrani v prilogah.

4.1 GOSTOTA

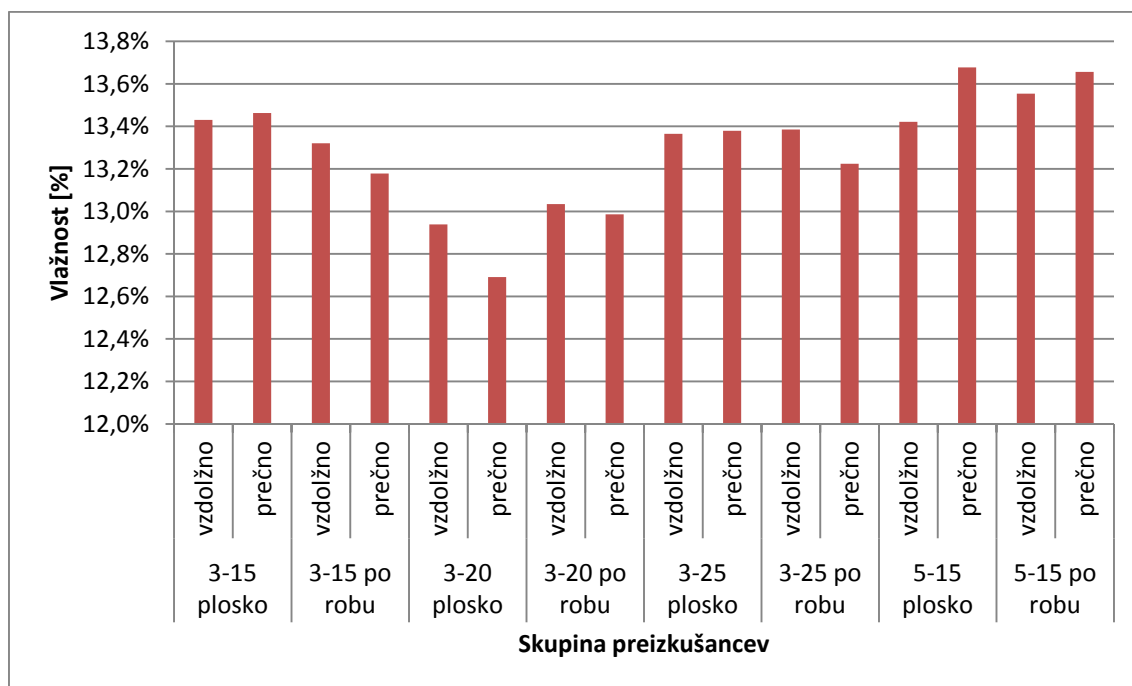
Ugotovili smo, da je bila gostota preizkušancev različna (slika 27). Najnižja gostota je bila pri preizkušancih v skupini 3-25 prečno, testiranih po ploskvi (pod 420 kg/m^3), najvišja pa je bila ugotovljena v skupini preizkušancev 3-25 vzdolžno, ravno tako testiranih po ploskvi (nad 460 kg/m^3). Do razlike v gostoti lesa prihaja predvsem zaradi zgradbe uporabljenega lesa. Na gostoto lesa vplivajo dejavniki, kot so kompresijski les, raznovrstne anomalije (grče, smolike,...). Pomemben delež k temu prispeva tudi delež ranega in kasnega lesa.



Slika 27: Izmerjena gostota preizkušancev.

4.2 VLAŽNOST

Ravnovesna vlažnost lesa preizkušancev je zelo malo variirala (slika 28), saj so bili vsi preizkušanci sklimatizirani v standardni klimi. Ugotovili smo, da se je vlažnost spreminjala od preizkušanca do preizkušanca za vsega 1 %. Preizkušanci iz skupine 3-20, testirani po ploskvi prečno, so imeli najnižjo vlažnost, ki je znašala 12,7 %, medtem ko je bila najvišja vlažnost preizkušancev v skupini 5-15, testiranih po ploskvi prečno, in sicer 13,7 %.



Slika 28: Izmerjena vlažnost preizkušancev.

4.3 UPOGIBNA TRDNOST IN MODUL ELASTIČNOSTI

Testirali smo predhodno pripravljene križno zlepljene lesene plošče, ki smo jih razžagali v preizkušance, kot to zahteva standard. Plošče so bile zlepljene brez dolžinskih spajanj lamel.

4.3.1 Rezultati na podlagi preskusa – izmerjene vrednosti

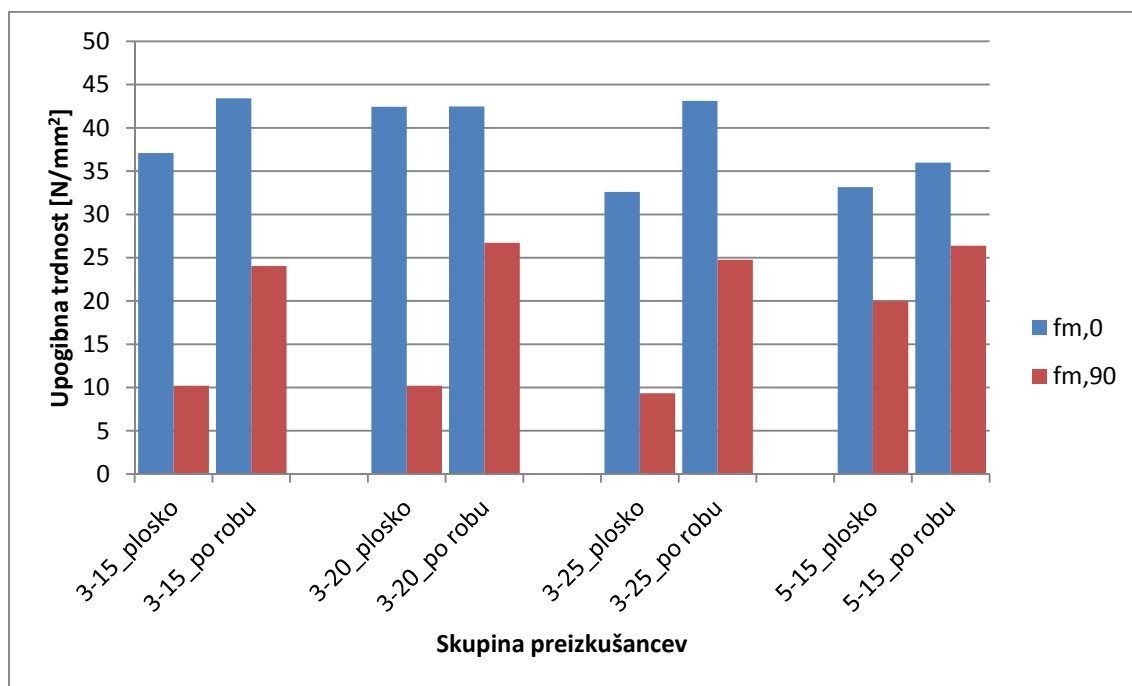
V preglednici 4 so prikazani rezultati upogibnega testiranja. Prikazani so podatki za vse 4 tipe plošč. Oznaka plosko pomeni, da je bil preizkušanec obremenjen po ploskvi plošč, oznaka po robu označuje preizkušance, ki so bili obremenjeni po robu.

Preglednica 4: Upogibne lastnosti, vlažnost in gostota preizkušancev.

Oznaka KLL	$f_{m,0}$ [N/mm ²]	$f_{m,90}$ [N/mm ²]	$E_{m,g,0}$ [N/mm ²]	$E_{m,g,90}$ [N/mm ²]	u [%]	ρ [kg/m ³]
3-15_plosko	37,1	10,2	8197	710	13,4	445
3-15_po robu	43,4	24,0	7047	4155	13,2	450
3-20_plosko	42,4	10,2	8484	692	12,8	458
3-20_po robu	42,5	26,7	7123	4188	13,0	449
3-25_plosko	32,6	9,3	8146	662	13,4	441
3-25_po robu	43,1	24,8	7247	3908	13,3	439
5-15_plosko	33,1	20,0	6989	2206	13,5	439
5-15_po robu	36,0	26,4	6248	4433	13,6	445

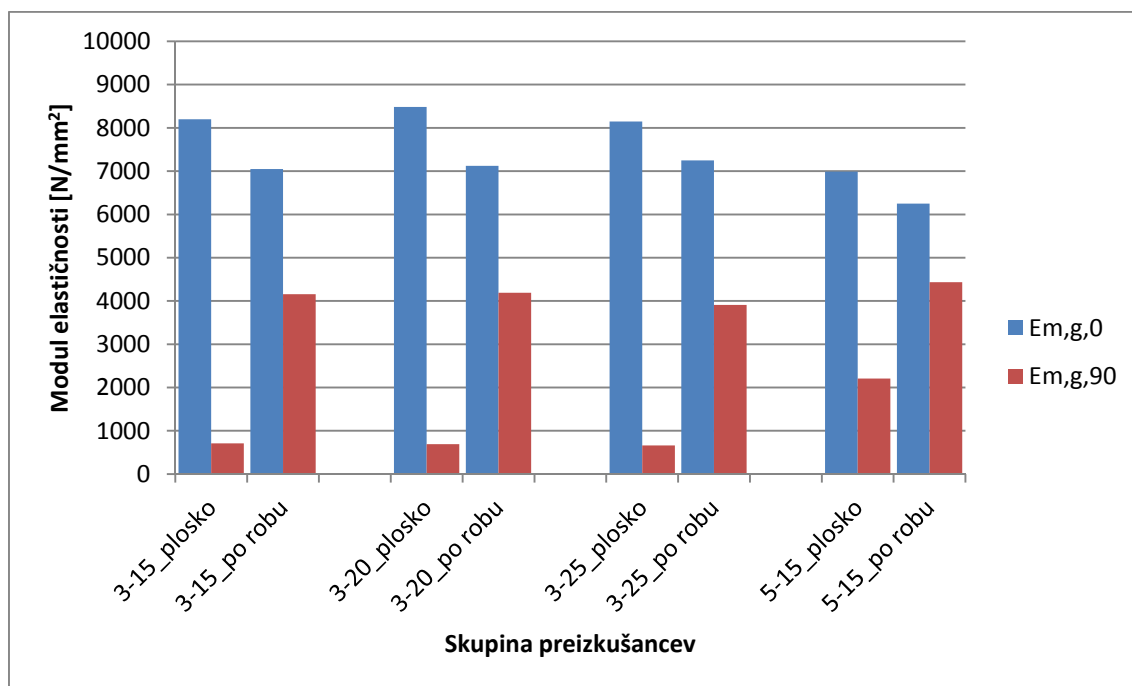
Legenda:

3_15 oznaka za tip plošče, 3 pomeni da je 3 slojna, 15 pomeni da je sloj debel 15 mm
 $f_{m,0}$ upogibna trdnost za vzdolžno smer
 $f_{m,90}$ upogibna trdnost za prečno smer
 $E_{m,g,0}$ elastični modul za vzdolžno smer
 $E_{m,g,90}$ elastični modul za prečno smer
u izmerjena vlažnost lesa
 ρ izmerjena gostota lesa



Slika 29: Vpliv debeline slojev in sestave plošče na upogibno trdnost KLL.

Graf na sliki 29 nazorno prikazuje, da je pri vseh 4 tipih plošč vrednost $f_{m,0}$ (testirano v vzdolžni smeri vlaken) znatno večja od $f_{m,90}$ (testirano prečno na lesna vlakna). 5 slojni preizkušanci, testirani po ploskvi v prečni smeri (oznaka $f_{m,90}$), imajo dvakratno višjo vrednost upogibne trdnosti v primerjavi s 3 slojnimi preizkušanci. Vrednosti, izmerjene po robu (sestava plošče_po robu, $f_{m,90}$), za prečno smer preizkušanja so pri vseh tipih preizkušancev zelo podobne.



Slika 30: Vpliv debeline slojev in sestave plošče na modul elastičnosti KLL.

Slika 30 prikazuje modul elastičnosti križno lepljenih plošč. Vrednosti za modul elastičnosti so za 3 slojne plošče zelo podobne ($E_{m,g,0}$ in $E_{m,g,90}$), če primerjamo iste načine obremenitve. Višja vrednost modula elastičnosti se pojavi pri 5 slojnih preizkušancih, testiranih po ploskvi v prečni smeri (5-15_po robu, $E_{m,g,90}$). Vrednosti za 5 slojno ploščo, testirano v vzdolžni smeri po ploskvi in po robu ($E_{m,g,0}$), so nekoliko nižje od vrednosti 3 slojnih plošč. Za modul elastičnosti je značilno, da so vrednosti, pridobljene s testiranjem v prečni smeri po robu ($E_{m,g,90}$), približno enake za vse plošče.

4.3.2 Rezultati na podlagi izračuna – izračunane vrednosti

Preglednica 5: Primerjava rezultatov upogibnega testa z vrednostmi izračunanimi z matematično metodo.

Oznaka CLT	$f_{m,0}$ [N/mm ²]	$f_{m,0-i}$ [N/mm ²]	$f_{m,90}$ [N/mm ²]	$f_{m,90-i}$ [N/mm ²]	$E_{m,g,0}$ [N/mm ²]	$E_{m,g,0-i}$ [N/mm ²]	$E_{m,g,90}$ [N/mm ²]	$E_{m,g,90-i}$ [N/mm ²]
3-15_plosko	37,1	63,6	10,2	13,7	8197	10606	710	760
3-15_po robu	43,4	44,7	24,0	23,5	7047	7455	4155	3911
3-20_plosko	42,4	63,6	10,2	13,7	8484	10606	692	760
3-20_po robu	42,5	44,7	26,7	23,5	7123	7455	4188	3911
3-25_plosko	32,6	63,6	9,3	13,7	8146	10606	662	760
3-25_po robu	43,1	44,7	24,8	23,5	7247	7455	3908	3911
5-15_plosko	33,1	52,7	20,0	25,8	6989	8788	2206	2578
5-15_po robu	36,0	40,5	26,4	27,7	6248	6747	4433	4620

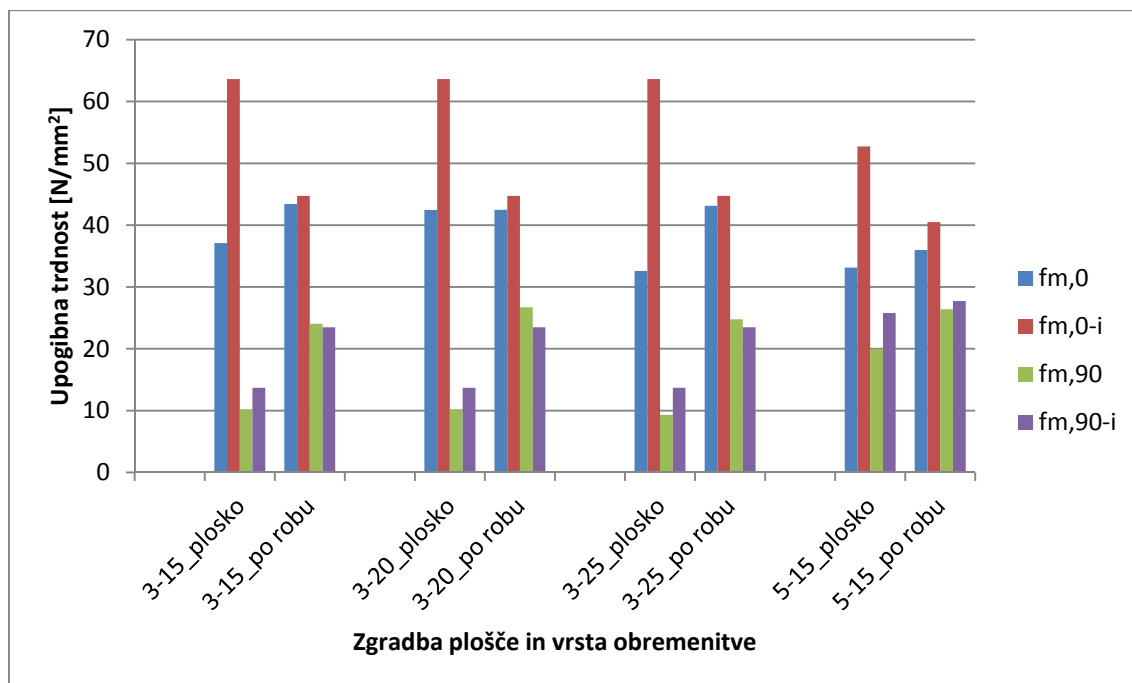
Preglednica 5 prikazuje rezultate, pridobljene z testiranjem preizkušancev, ter rezultate, ki smo jih izračunali z matematično metodo. Prvi stolpec prikazuje rezultate pridobljene s testiranjem preizkušancev, za vse vzorce s preizkušanjem po ploskvi in orientacijo vlaken vzdolžno ($f_{m,0}$). Drugi stolpec prikazuje rezultate, pridobljene z matematičnim izračunom ($f_{m,0-i}$). Oznaka –i označuje stolpce, kjer smo vrednosti matematično izračunali.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Za namen tega raziskovalnega dela smo izdelali 4 tipe križno lepljenih plošč. 3 tipi plošč so bili 3 slojni, 1 tip plošč pa 5 slojni. Plošče smo lepili s konstrukcijskim poliuretanskim lepilom Purbond HB S209. Izvedli smo štiri točkovni upogibni preskus in ugotavljali vpliv sestave plošče na lastnosti. Določili smo tudi gostoto in vlažnost plošč v času preskušanja.

Rezultati so pokazali, da sta upogibna trdnost in modul elastičnosti odvisna od števila in usmerjenosti slojev križno lepljenih plošč, debelina slojev pa ne igra bistvene vloge. To trditev podkrepimo tako z rezultati preizkušanja kot tudi z matematično metodo. Na sliki 31 so prikazane upogibne trdnosti, pridobljene s testiranjem preizkušancev in z matematično metodo.



Slika 31: Izmerjena in izračunana upogibna trdnost za različne sestave plošč.

Oznaki $f_{m,0}$ in $f_{m,90}$ sta vrednosti preizkušancev, pridobljene s testiranjem. Oznaki $f_{m,0-i}$ ter $f_{m,90-i}$ pa predstavljata vrednosti, pridobljene z matematično metodo. Na sliki 31 vidimo, da je izračunana upogibna trdnost preizkušancev višja kot vrednost, pridobljena s testiranjem preizkušancev. Predvsem pride to do izraza za obremenjevanje preizkušancev po ploskvi, saj so izračunane vrednosti višje kot pri testiranjih. Do razlike pride zaradi različne zgradbe lesa in anomalij v lesu ter zaradi lepilnih spojev, ki so se med testiranjem v nekaterih primerih porušili prej kot les. Vrednosti za upogibne obremenitve po robu, pridobljene z matematično metodo ($f_{m,90-i}$), se zelo približajo vrednostim, pridobljenim s testiranjem ($f_{m,90}$).

Večjo upogibno trdnost so dosegli preizkušanci, ki so bili obremenjeni po robu v smeri lesnih vlaken ($f_{m,0}$), sledili so preizkušanci iz skupine plosko v smeri lesnih vlaken. V določeni točki se je preizkušanec nalomil, ob še večji obremenitvi pa se je zlomil. Povesi so bili, v primerjavi s preizkušanci, ki so bili obremenjeni prečno na lesna vlakna po ploskvi ($f_{m,90}$), veliko manjši.

Pri preizkušancih, testiranih po robu, je bil poves tako v vzdolžni kot tudi v prečni smeri manjši. Preizkušanci, obremenjeni v vzdolžni smeri po robu, so tudi prenesli višje obremenitve kot tisti, ki so bili obremenjeni po ploskvi v vzdolžni smeri ($f_{m,0}$). Za vseh 16 skupin preizkušancev so priloženi grafi in vrednosti obremenitev v prilogah.

V izračunih smo uporabili povprečno upogibno trdnost smrekovine 66 N/mm^2 (Čufar, 2006). Izračunane in izmerjene trdnosti se zelo dobro ujemajo pri preizkušancih, ki so bili obremenjeni po robu, večja odstopanja opazimo pri vzdolžnih ploskovno obremenjenih preizkušancih.



Slika 32: Prikaz preizkušanca s slabimi mehanskimi lastnostmi.

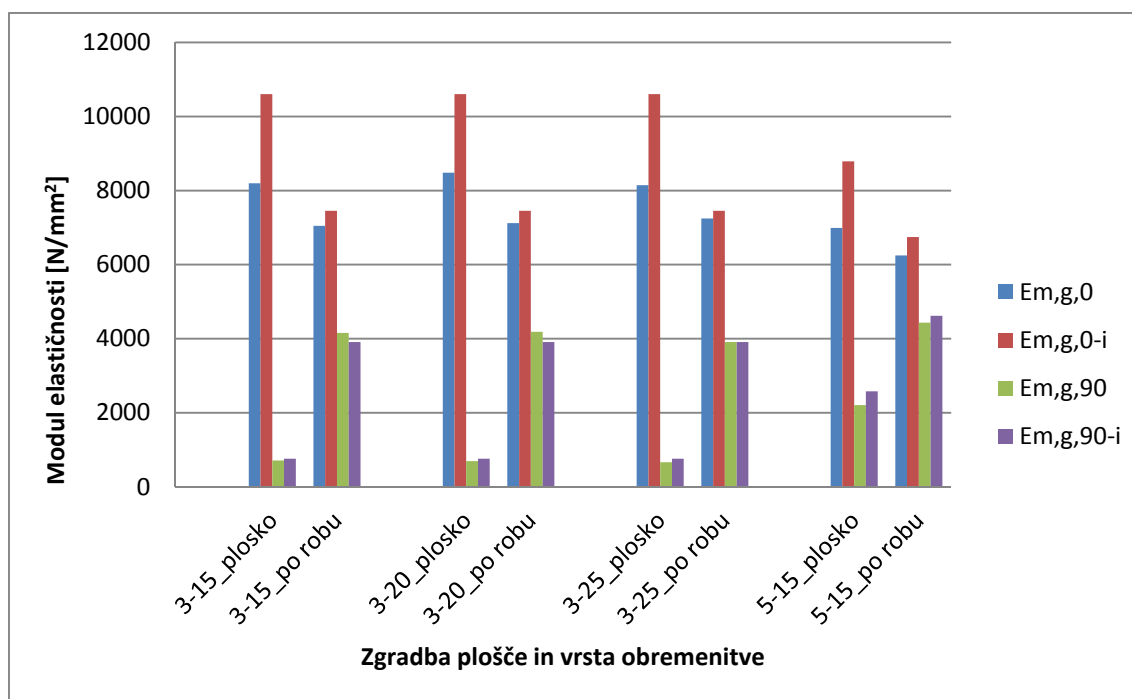


Slika 33: Primer preizkušanca s slabo strižno trdnostjo ploskovnih lepilnih spojev.

Vzrok temu je lahko trdnost lesa, uporabljenega za izdelavo plošč, kot tudi strižna trdnost ploskovnih lepilnih spojev. Les, uporabljen za izdelavo križno lepljenih plošč, ne sme imeti nobenih večjih napak v svoji zgradbi. Na sliki 32 je prikazana rastna napak lamele v širinsko zlepljenem elementu (vzdolžna smolika v smeri rasti drevesa), ki zelo zmanjša mehanske lastnosti lesa. Slika 33 prikazuje preizkušanca iz skupine 3-25_plosko, testiran v

vzdolžni smeri, pri katerem se je zgornja lamela odslojila zaradi slabe strižne trdnosti ploskovnega lepilnega spoja.

Za modul elastičnosti smo ugotovili večjo primerljivost med rezultati, pridobljenimi s preizkušanjem in matematično metodo.



Slika 34: Izmerjeni in izračunani moduli elastičnosti za različne sestave plošč.

Oznaki $E_{m,0}$ in $E_{m,90}$ sta vrednosti preizkušancev, pridobljeni iz testiranj. Oznaki $E_{m,0-i}$ ter $E_{m,90-i}$ predstavljata vrednosti, pridobljene z matematično metodo. V grafu so prikazani rezultati za modul elastičnosti, pridobljeni s testiranjem preizkušancev, in rezultati, ki smo jih pridobili z matematično metodo (slika 34).

Večje module elastičnosti so dosegali preizkušanci obremenjeni po ploskvi v smeri lesnih vlaken ($E_{m,g,0}$), medtem ko so imeli preizkušanci, obremenjeni prečno na lesna vlakna ($E_{m,g,90}$), tudi do $10 \times$ manjši modul elastičnosti. Zaradi tega je prihajalo do večjih povosov (tudi do 120 mm).

V izračunih smo uporabili povprečni modul elastičnosti smrekovine 11000 N/mm^2 (Čufar, 2006). Izračunane in izmerjene trdnosti se zelo dobro ujemajo pri preizkušancih, ki so bili obremenjeni po robu, večja odstopanja pa opazimo pri vzdolžnih ploskovno obremenjenih preizkušancih.

Graf na sliki 34 prikazuje, da je vrednost, pridobljena z matematičnim izračunom za modul elastičnosti, bolj primerljiva z vrednostmi, pridobljenimi s preizkušanjem po ploskvi prečno ($E_{m,g,90}$), po robu vzdolžno ($E_{m,g,0}$) in po robu prečno na vlakna ($E_{m,g,90}$). V primeru testiranja po ploskvi pride do večje razlike med rezultati, pridobljenimi s testiranjem in z izračunom. Do razhajanj pride zaradi različne zgradbe lesa in anomalij v lesu ter zaradi slabih lepilnih spojev.

Deformacije preizkušancev so bile očitne. Najprej se je deformacija pokazala na tistih delih, ki so imeli vraščene anomalije, to so grče (vrasle in izpadle), kompresijski les, različne smeri rasti med sloji preizkušancev (radialna, tangencialna). Preizkušanci so se prej začeli lomiti na mestih, kjer so bile vidne napake. Do deformacij je prihajalo tudi na mestih spojev, ki so bili slabše zlepljeni. Lomi so se pričeli na spodnji strani, kjer je prihajalo do natezne napetosti, zaradi česar je prihajalo do trganja lesnih vlaken. Na zgornji strani se je začela pojavljati deformacija zaradi tlačne napetosti, kar je privedlo do stiskanja lesnega tkiva. V prilogi so priložene fotografije deformiranih preizkušancev.

5.2 SKLEPI

Na osnovi raziskave različno sestavljenih križno lepljenih plošč, ki smo jih testirali na upogib, smo ugotovili, da:

- ~ debelina slojev križno lepljenega lesa ne vpliva značilno na upogibno trdnost in modul elastičnosti,
- ~ ima število in usmerjenost slojev pomemben vpliv na upogibno trdnost in modul elastičnosti,
- ~ ima pomemben vpliv na upogibne lastnosti plošče tudi ustrezna trdnost lepilnih spojev,
- ~ na upogibno trdnost in modul elastičnosti križno lepljenih plošč vpliva kvaliteta uporabljenega lesa oz. prisotne anomalije v zgradbi lesa,
- ~ so najvišje trdnosti dosegli preizkušanci, ki so bili obremenjeni po robu, z orientacijo vlaken v vzdolžni smeri,
- ~ z večanjem števila med sabo pravokotno orientiranih slojev se manjšajo razlike med upogibnimi lastnostmi v vzdolžni in prečni smeri plošče.

6 POVZETEK

V diplomskem delu je predstavljen vpliv sestave križno lepljenega lesa na upogibno trdnost in modul elastičnosti. Križno lepljen les smo izdelali iz posušenih smrekovih lamel. Po mehanski obdelavi robov smo lamele širinsko zlepili ter tako izdelali posamezne sloje KLL. Sledila je mehanska priprava površin slojev in ploskovno lepljenje med sabo križno orientiranih slojev. Uporabili smo konstrukcijsko enokomponentno poliuretansko lepilo Purbond HB S209. Plošče so bile dveh različnih sestav (3 slojne in 5 slojne plošče) ter različnih debelin slojev. Debeline slojev so bile 15 mm, 20 mm in 25 mm za 3 slojne plošče ter 15 mm za 5 slojne plošče. Po dokončni utrditvi lepila je sledilo razžagovanje plošč v preizkušance. Te smo nato sedem dni klimatizirali v standardni klimi pri 20 °C in 65 % relativni zračni vlažnosti, nato pa smo pričeli s testiranjem preizkušancev. Testiranje je potekalo na univerzalnem stroju Zwick Z100. Izvajali smo 4 točkovni upogibni preizkus po metodi, ki je podana v standardu EN 408. Določili smo upogibno trdnost in modul elastičnosti ploskovno in robno obremenjenih preizkušancev. Po končanem upogibnem preizkusu smo ugotovili še vlažnost in gostoto posameznega preizkušanca.

Iz preizkusov je razvidno, da debelina slojev ne vpliva na upogibno trdnost in modul elastičnosti izdelanih plošč. Prav tako je jasno, da se z večanjem števila slojev preizkušancev izboljšujejo lastnosti v prečni smeri, slabšajo pa lastnosti v vzdolžni smeri plošče. Upogibna trdnost je bila pri obremenjevanju po robu višja kot pri obremenjevanju po ploskvi in to ne glede na usmerjenost preizkušancev. Modul elastičnosti je bil višji pri obremenjevanju po ploskvi v vzdolžni smeri in obremenjevanju preizkušancev po robu v prečni smeri.

Vse podatke testiranja smo preverili tudi matematično. Izračunane vrednosti se dokaj dobro ujemajo z rezultati testiranja. Do značilnih odstopanj je prihajalo le pri upogibni trdnosti ploskovno obremenjenih preizkušancev v vzdolžni smeri. Ugotovili smo tudi, da so lastnosti plošče zelo odvisne od kakovosti lesa in lepilnih spojev.

7 VIRI IN LITERATURA

7.1 PISNI VIRI

1. Craft S. 2011. Fire performance of cross-laminated timber assemblies. Québec, FPInnovations: 38 str.
2. Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 185 str.
3. EN 14080:2013. Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber. 2013.
4. EN 408:2010+A1:2012. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. 2011.
5. FPInnovations. 2011. Introduction to cross-laminated timber. Québec: 54 str.
6. Gagnon S., Popovski M. 2011. Structural design of cross-laminated timber elements. Québec, FPInnovations: 86 str.
7. Gavrić I. 2009. Študija modularnih enot iz križno lepljenega lesa. Diplomsko delo. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 105 str.
8. Ireneusz B. 2011. Cross and diagonal laminated timber as innovative material for beam elements. Karlsruhe, KIT Scientific Publishing: 134 str.
9. Jesenko R. 2008. Masiven križno lepljen les kot gradbeni element. Diplomsko delo. Žiri, ECD Kranj: 58 str.
10. Kuzman K. M. 2008. Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 309 str.
11. Kuzman K. M. 2010. Les v sodobni slovenski arhitekturi. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 129 str.
12. Kuzman K. M. 2012. Lesene konstrukcije v stanovanjski in javni gradnji. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 145 str.

13. Lulić A. 2014. Projektiranje nosilnih elementov konstrukcije iz križno lepljenih lesenih plošč. Diplomsko delo. Ljubljana: 118 str.
14. Nardin N. 2012. Idejni tehnološki projekt za izdelavo križno lepljenega lesa. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 53 str.
15. Pirvu C., Karacabeyli E., Schickhofer G. 2011. Duration of load and creep factors for cross-laminated timber panels, Québec, FPIInnovations: 30 str.
16. prEN 16351. Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. 2011.
17. Resnik J. 1989. Lepila in lepljenje lesa. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, VTOZD za lesarstvo: 103 str.
18. Ribič B. 2012. Primerjava okvirne in križno lepljene masivne panelne montažne lesene stanovanjske gradnje z vidika stroškov materiala. Diplomsko delo. Maribor: 62 str.
19. SIST EN 322:1993. Wood-based panels - Determination of moisture content. 1993.
20. SIST EN 323:1993. Wood-based panels - Determination of density. 1993.
21. Wang B., Pirvu C., Lum C. 2011. Cross-laminated timber manufacturing. Québec, FPIInnovations: 66 str.

7.2 ELEKTRONSKI VIRI

1. Bogensperger T., Fitz M., Hamm P., Schickhofer G. 2010. Investigation of vibration behaviour of floors made of Cross Laminated Timber (CLT). Dusseldorf, Springer – V D I Verlag: 45 – 52 str.
http://www.soundtherm.ch/index_htm_files/Internoise_2013_printed.pdf (26. feb. 2014)
2. Brandner R. Production and technology of cross laminated timber (CLT): A state of the art report. Graz: 33 str.
http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CEoQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.iom3.org%2Ffileproxy%2F457425&ei=0jXqUtP6A6Pa4ASi7IGAAG&usg=AFQjCNFhDA_ZXeprrCH7DKslidz93T5Jg&sig2=rx9MIVSmd9m5g8D6hPs92Q&bvm=bv.60444564,d.bGE&cad=rja (26. feb. 2014)
3. Dujič B. 2008. Konstrukcije iz križno lepljenih lesenih panelov – Nova pot sodobnega gradbeništva. Les, 60, 11/12: 415 – 422
<http://www.lesena-gradnja.si/html/pages/si-clanki-konstrukcije-krizno-lepljen-les.htm> (25. feb. 2014)
4. Fragiaco M., Dujic B., Sustersic I. 2011. Elastic and ductile design of multi-storey crosslam massive wooden buildings under seismic actions. Engineering structures, 33, 11: 3043 – 3053
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029611002203> (26. feb. 2014)
5. Frangi A., Fontana M., Bochicchio G. 2007. Experimental and numerical analysis of the fire behaviour of cross-laminated timber panels. Berlin, Ernst & Sohn-a Wiley: 387 – 397 str.
<http://www.iafss.org/publications/fss/9/1279/view> (26. feb. 2014)
6. Gsell D., Feltrin G., Schubert S., Steiger R., Motavalli M. 2007. Cross-laminated timber plates: Evaluation and verification of homogenized elastic properties. Journal of structural engineering-asce, 133, 1: 132 – 138
<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9445%282007%29133%3A1%28132%29> (25. feb. 2014)
7. Gulzow A., Richter K., Steiger R. 2011. Influence of wood moisture content on bending and shear stiffness of cross laminated timber panels. European journal of

- wood and wood products, 69, 2: 193 – 197
<http://link.springer.com/article/10.1007/s00107-010-0416-z#page-1> (26. feb. 2014)
8. Hookov zakon. 2014. Wikipedia.
http://sl.wikipedia.org/wiki/Hookov_zakon (25. feb. 2014)
9. Jacquier N, Girhammar A. U. 2012. Tests on shear connections in prefabricated composite cross – laminated – timber and concrete elements. V: World Conference on Timber Engineering. Auckland: 10 str.
http://www.ewpa.com/Archive/2012/july/Paper_202.pdf (26. feb. 2014)
10. Kuzman M. K., Oblak L., Vratusa S. 2010. Glued laminated timber in architecture. Drvna industrija, 61, 3: 197 – 204
http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0CD oQFjAG&url=http%3A%2F%2Fhrcak.srce.hr%2Ffile%2F88694&ei=jTQOU9_q Lon-ygO09IKIBQ&usg=AFQjCNG8FNGRkYPyhfhvqVpEu_IV4GFTjQ&bvm=bv.61965928,d.bGQ (26. feb. 2014)
11. Les v osmih nadstropjih. 2013. CBD gradbeno in poslovno projektiranje d. o. o.
<http://www.cbd.si/raziskave-in-razvoj-2/56-les-v-osmih-nadstropjih> (21. feb. 2014)
12. Menis A., Fragiaco M., Clemente I. 2012. Numerical investigation of the fire resistance of protected cross-laminated timber floor panels. Structural engineering international, 22, 4: 523 – 532
<http://www.ingentaconnect.com/content/iabse/sei/2012/00000022/00000004/art00011> (26. feb. 2014)
13. Merilec vlage v lesu in gradbenih materialih. 1 meritev.
http://www.lmeritev.si/art/Merilec_vlage_v_gradbenih_materialih_MERILNA_OPREMA_ZA_OKOLJSKO_MERJENJE/Merilnik_vlage_v_lesu_EXTEC_MO210 (26. feb. 2014)
14. Modifikacija lesa. 2013. Wikipedia.
http://sl.wikipedia.org/wiki/Modifikacija_lesa (26. feb. 2014)
15. Naturally Wood. 2014. Cross laminated timber (CLT).
www.naturallywood.com (4. feb. 2014)

16. Sturzenbecher R., Hofstetter K., Eberhardsteiner J. 2010. Structural design of Cross Laminated Timber (CLT) by advanced plate theories. *Composites science and technology*, 70, 9: 1368 – 1379
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353810001612> (26. feb. 2014)
17. Šernek M. 2008. Konstrukcijski kompozitni les. V: *Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 84 – 88
http://www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/Konstrukcijski_kompozitni_les.pdf (25. feb. 2014)
18. Šernek M. 2012. Lesni kompozit za gradnjo. V: *Čar lesa*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 6 str.
http://www.carlesa.si/Files/2012/Posvet/04_M_Sernek-Lesni_kompoziti_za_gradnjo.pdf (25. feb. 2014)
19. Vessby J., Enquist B., Petersson H., Alsmarker T. 2009. Experimental study of cross-laminated timber wall panels. *European journal of wood and wood products*, 67, 2: 211 – 218
<http://link.springer.com/article/10.1007/s00107-009-0313-5#page-1> (26. feb. 2014)
20. Wetzig M., Hass P., Hansel A., Niemz P. 2011. Investigation on bonding of three-layer cross laminated timber using hardwood. *Bautechnik*, 88, 10: 687 – 693
<http://structurae.net/refs/items/index.cfm?id=r0066231> (26. feb. 2014)
21. Woodsolutions. 2013. Cross Laminated Timber CLT.
<http://woodsolutions.com.au/Wood-Product-Categories/Cross-Laminated-Timber-CLT> (4. feb. 2014)

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Milanu Šerneku za strokovno usmerjanje skozi celotno izdelavo diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi somentorju viš. pred. mag. Bogdanu Šegi za vso pomoč pri testiranju in nato pri sami izdelavi diplomskega dela.

Zahvala gre tudi doc. dr. Sergeju Medvedu za strokovno recenzijo diplomskega dela.

PRILOGE

Priloga A: Tehnični list za lepilo Purbond HB S209

Purbond HB S209 je eno-komponento poliuretan lepilo za visoko-obremenilne lesene konstrukcije.

Lastnosti:

Purbond HB S209 je reaktivno, tekoče eno-komponento poliuretansko lepilo, ki za sušenje potrebuje vlago oz. vlažnost. Efekt rahlega penjenja med sušenjem je normalen pojav kemične reakcije. Purbond HB S209 je proizveden brez topil in formaldehidov.

Tehnični podatki:

~ Kemična kompozicija:	Isocyanatni pre-polymer
~ Viskoznost:	24.000 mPa.s
~ Odprti čas:	20 min
~ Čas stiskanja:	50 min
~ Barva:	bež
~ Specifična teža:	cca 1160 kg/m ³
~ Vsebnost trdnega deleža:	100 %
~ Stopnja vžiga:	nizka
~ Kemična odpornost:	odporen proti blagim lužilom, kislinam in topilom
~ Pakiranje:	50, 200 kg sod ali 1000 kg kontejner
~ Ostalo:	glej priložen varnostni list!!!

Navodila za uporabo pri končnih spojih (zobati spoji):

Priprava

Purbond HB S209 se procesira direktno iz zaprtega sistema direktno iz embalaže. Avtomatski nanos mora biti posebno opremljen s primernim nanašalnim sistemom za PURBOND HB S 309. Vsi deli nanašalca, ki prihajajo v stik z lepilom, se morajo čistiti s PURBOND ločilnim sredstvom. Vsi strojni deli, ki so kakorkoli v kontaktu z lepilom, morajo biti predčasno pravilno premazani s PUR Release / PUR odstopnim sredstvom.

<u>Lesna vlažnost</u>	Lesna vlažnost obdelovanca ne sme biti nižja od 8 %, najvišja lesna vlažnost ne sme presegati 18 %.
<u>Nanos</u>	Količina nanosa je približno med 120 in 160 g/m ² .
<u>Odpri čas</u>	Površine naj bi bile stisnjene skupaj takoj, a pod noben pogoj ne kasneje kot 20 min po nanosu lepila. Odpri čas je odvisen od obstoječih klimatskih pogojev: višje temperature in vlažnost zahtevajo MANJ odprtega časa. Absolutno potrebno pa je, da je lepilo še vedno lepljivo, ko ga damo pod vpliv pritiska.
<u>Čas stiskanja</u>	Le ta je odvisen od obstoječih klimatskih pogojev okolice in od trenutne temperature materiala.
<u>Minimalni čas</u>	Stiskanja naj poteka pod pogoji 20°C in 65 % vlažnosti je 50 min.
<u>Pritisk</u>	Pritisk, ki je odvisen od dolžine in širine spoja, mora zagotoviti popolno prileganje zobatega spoja. Upoštevati se morajo specifikacije v skladu z EN 385 in/ali DIN 68140-1.
<u>Končni spoj</u>	Trdnost končnega spoja je dosežena približno po 2 urah. Medtem pa je priporočljivo zlepljene dele skladiščiti na temperaturi 20°C.

Ostala priporočila:

Prosimo, da upoštevate sledeča navodila po DIN 1052 za proizvodnjo laminiranih brunov-nosilcev: vsebnost vlage v lesu ne sme presegati 15 %. Vsebnost vlage na površini spoja pa ne sme biti pod 6 %. Lepilno linijo omogočite tanko kot je le mogoče (max. 0,3 mm). Temperatura materialov in prostora mora bit vsaj 20°C. Priporočamo vam, da sočasno opravljate svoje teste v skladu z EN 385 ob upoštevanju EN 386 med samo proizvodnjo.

Navodila za uporabo pri končnih spojih (ploskovni spoji):

Purbond HB S209 trenutno ni odobren za ploskovno lepljenje konstrukcijskega lesa!

<u>Priprava</u>	Purbond HB S209 je eno-komponentno lepilo in ga lahko polnimo direktno v primerno napravo za nanos. Stroji za spoje morajo biti opremljeni s primernim nanašalnim sistemom. Vsi strojni deli, ki so kakorkoli v kontaktu z lepilom, morajo biti predčasno pravilno premazani s PUR Release / PUR odstopnim sredstvom.
<u>Nanos</u>	Purbond HB S209 se nanaša avtomatično v ponavljajočem procesu ob

	uporabi posebnega kombiniranega sistema. Količina nanosa je približno med 140-180g/m ² . Deli morajo biti stisnjeni skupaj takoj, najkasneje v 20 min.
<u>Pritisk</u>	Zelo pomembno je podan osnovni začetni pritisk od 0,6 do 1 N/mm ² .
<u>Nadaljevanje</u>	Zlepljeni deli gredo lahko v nadaljnjo obdelavo po 50 min.
<u>Končni spoj</u>	Trdnost končnega spoja je dosežena približno po 2 urah. Medtem pa je priporočljivo zlepljene dele skladiščiti na temperaturi 20°C.
<u>Previdnostni ukrepi</u>	Toplo priporočamo nošenje zaščitnih rokavic in očal med rokovanjem z lepilom.
<u>Čiščenje</u>	Za odstranjevanje osušenega lepila na opremi in strojih priporočamo PUR Solvent/ PUR topilo. Pred čiščenjem se prepričajte, da so vsi deli odporni na PUR Solvent/ PUR topilo.

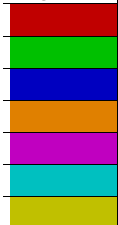
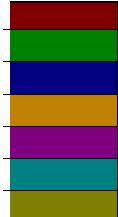
OPOZORILO: Svetujemo, da natančno pregledate varnostni list izdelka!

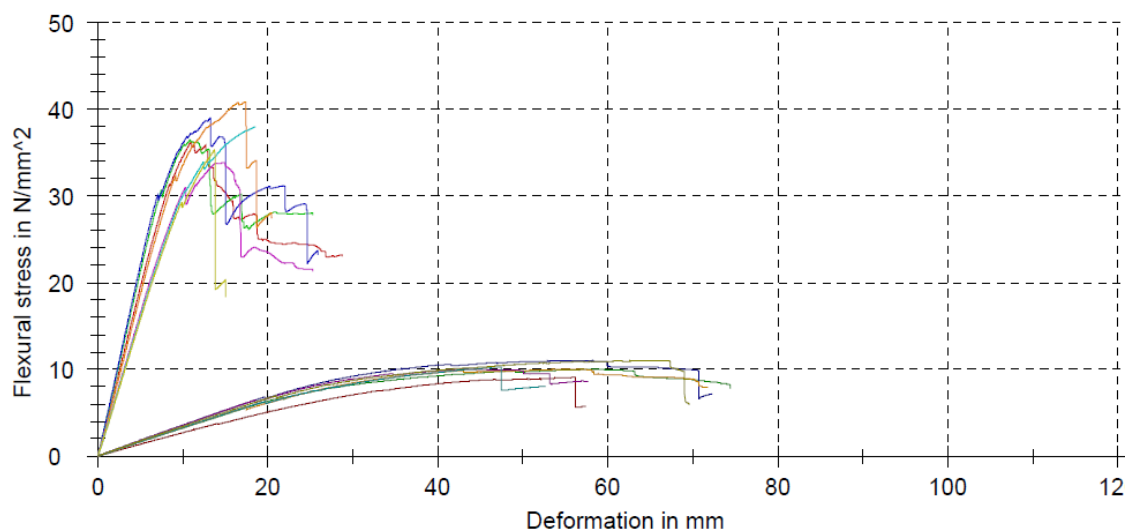
Garancija:

Te informacije smo podali na podlagi testiranj doseženih v FMPA Stuttgart, na osnovi naših laboratorijskih aplikacij in izkušnjah uporabnikov.

<u>Proizvajala</u>	PURBOND , Švica
<u>Distribucija in uvoz</u>	K.L.P. d.o.o., Murnova 16, Mengeš, Slovenija
<u>Prodajno skladišče</u>	Ljubljanska 45, 1241 Kamnik, Slovenija
<u>Kontakt</u>	tel: (00386) 01 830 36 50 fax: (00386) 01 830 36 59 e-mail: info@klp.si
<u>Skladiščenje</u>	6 mesece pri 20°C

Priloga B: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 15 mm, testirane po ploskvi

Legenda		ID	t mm	b mm	F1 N	F2 N	w1 mm	w2 mm	Fmax N	Em N/mm ²	f _m N/mm ²	Vzrok loma
	Vzdolžno	1	45,72	45,54	1134	1702	1,90	2,82	5672	8660	36,2	k-sp-k+a
		3	45,88	45,13	1139	1709	1,75	2,60	5697	9370	36,4	k-sp-k+a
		5	45,94	45,19	1225	1837	1,82	2,69	6124	9760	39,0	k-sp-k+a
		7	46,02	45,28	1290	1935	2,27	3,35	6449	8270	40,9	n-sl
		9	45,64	45,31	1051	1576	2,12	3,13	5255	7340	33,8	k-sp-k+a
		11	46,03	45,25	1199	1798	2,42	3,59	5994	7090	38,0	n-sl
		13	46,03	45,29	1117	1676	2,30	3,41	5586	6960	35,4	n-sl
	Prečno	1	45,00	45,01	273	409	6,69	10,13	1363	589	9,09	k-zp+sv-n
		3	45,93	45,06	312	469	6,12	9,24	1562	698	9,98	k-zp+sv-n
		5	45,86	45,23	344	516	6,09	9,23	1718	762	11,0	k-zp+sv-t
		7	45,82	45,22	313	470	6,02	9,15	1566	706	10,0	k-zp+sv-n
		9	45,88	45,22	315	473	5,59	8,46	1575	767	10,1	k-zp+sv-n
		11	45,91	45,25	323	485	6,23	9,40	1615	711	10,3	k-zp+sv-n
		13	45,81	45,21	343	515	6,34	9,61	1716	734	11,0	k-zp+sv-n



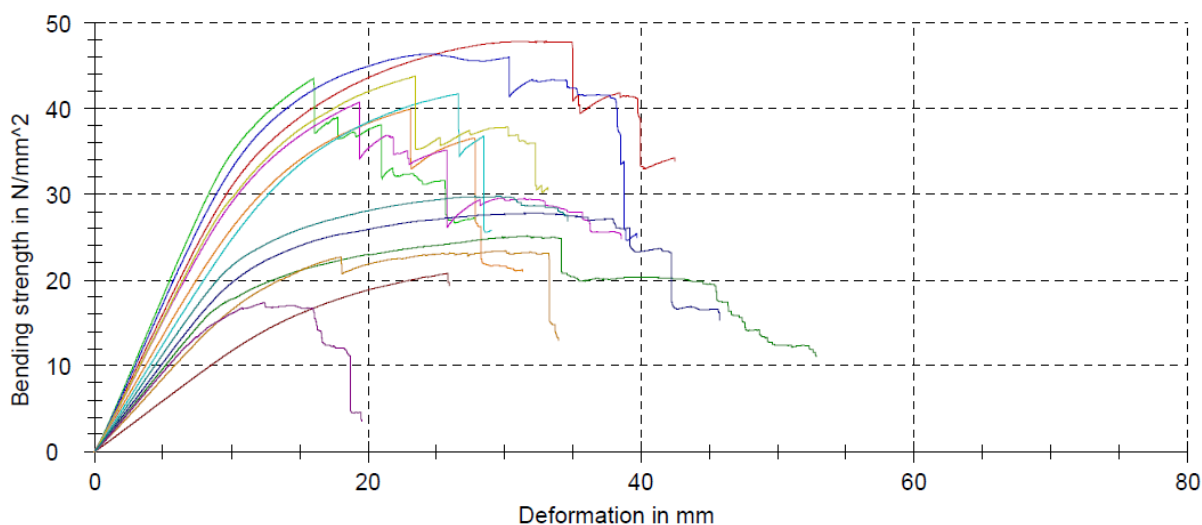
Povprečne vrednosti

Vzdolžna n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	37,1	8210	275
s	2,36	1120	59
v	6,37	13,65	21,33

Prečna n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	10,2	710	426
s	0,654	59,8	128
v	6,41	8,42	30,08

Priloga C: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 15 mm, testirane po robu

ID		ID	t mm	b mm	F1 N	F2 N	w1 mm	w2 mm	Fmax N	Em N/mm ²	f _m N/mm ²	Vzrok loma
	Vzdolžno	2	45,15	45,89	1473	2210	3,02	4,47	7367	7330	47,8	k+tn+nv-komp
		4	45,14	45,86	1339	2009	2,49	3,65	6697	8330	43,5	k-tn
		6	45,36	46,01	1444	2167	2,76	4,06	7222	7910	46,3	k+tn-komp
		8	45,17	45,90	1231	1847	2,99	4,43	6157	6150	39,9	k+tn-komp
		10	45,28	45,83	1260	1890	2,74	4,04	6300	6970	40,7	k+tn+aps
		12	45,29	45,99	1296	1943	3,38	5,01	6478	5680	41,7	k+tn+jv
		14	45,25	45,95	1356	2034	2,90	4,28	6780	7010	43,8	k+tn+komp
	Prečno	2	45,81	45,21	649	973	3,53	5,26	3245	2620	20,8	k+spl-komp
		4	45,81	45,21	785	1178	2,64	3,91	3925	4340	25,1	k+spl
		6	45,11	45,73	851	1277	2,73	4,04	4256	4700	27,8	k+tn-komp
		8	45,36	45,78	726	1089	2,81	4,14	3629	3900	23,4	k+tn-jl
		10	45,24	45,97	538	806	1,94	2,85	2688	4190	17,4	k+tn+zpl-grca
		12	45,25	45,91	102	154	0,56	0,85	512	2550	3,31	k+tn-komp
		14	45,30	45,72	919	1379	2,66	3,94	4596	5150	29,8	k+tn



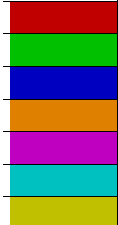
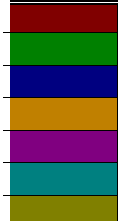
Povprečne vrednosti

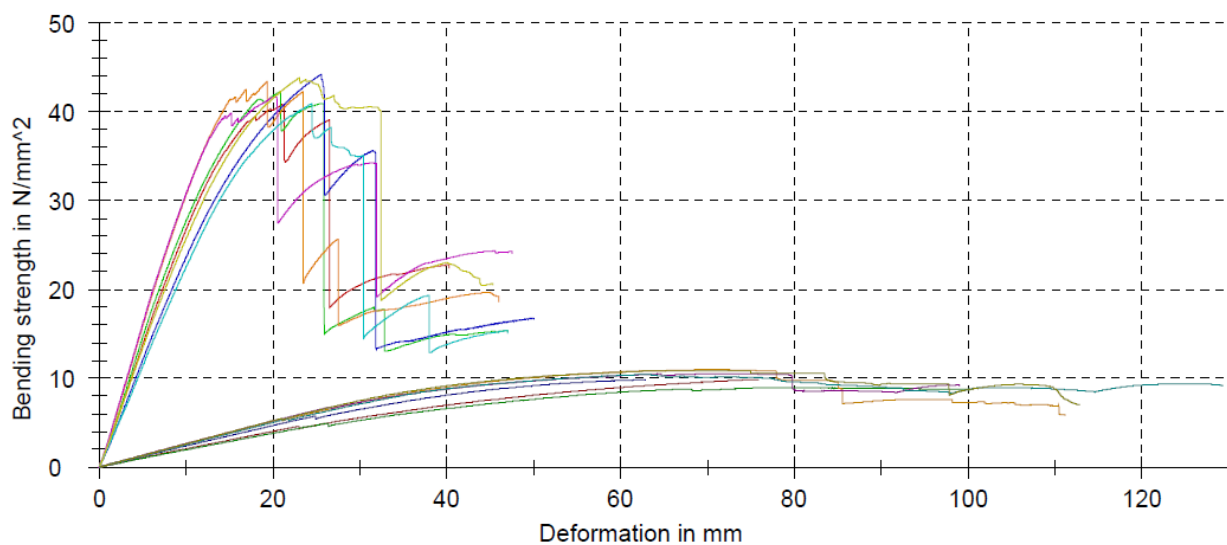
Vzdolžno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	43,4	7050	289
s	2,90	926	48
v	6,69	13,13	16,55

Prečno n = 6 ²	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	24,0	4150	353
s	4,55	866	140
v	18,95	20,87	39,69

² Izločili smo meritev preizkušanece številko 12.

Priloga D: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 20 mm, testirane po ploskvi

Legenda		ID	t	b	F1	F2	w1	w2	Fmax	Em	f _m	Vzrok loma
			mm	mm	N	N	mm	mm	N	N/mm ²	N/mm ²	
	Vzdolžno	1	60,96	60,05	2248	3372	3,05	4,46	11239	8470	40,8	kl+s-konci
		3	60,80	60,20	2322	3484	3,01	4,37	11612	9160	42,3	kl+s-konci
		5	60,66	59,99	2410	3615	3,74	5,49	12049	7400	44,2	kl+s-konci
		7	60,87	60,24	2393	3590	2,84	4,15	11966	9720	43,4	a+s-konci
		9	60,72	60,18	2283	3425	2,65	3,92	11417	9660	41,7	a+s-konci
		11	60,75	60,22	2243	3365	3,68	5,39	11217	7030	40,9	a+s-konci
		13	60,78	60,17	2406	3609	3,31	4,91	12029	8020	43,8	a+s-konci
	Prečno	1	60,24	59,93	531	796	9,53	14,58	2653	586	9,88	a-spl+sv-n-komp
		3	60,92	59,93	491	736	9,12	13,94	2454	546	8,94	k-spl+sv-n-komp
		5	60,64	60,14	538	807	8,20	12,43	2689	683	9,85	k-zpl+sv-n
		7	60,55	60,11	598	896	8,34	12,54	2988	769	11,0	k-zp+sv-n
		9	60,78	60,17	577	866	7,94	12,03	2887	754	10,5	k+a-spl+sv-n
		11	60,60	60,18	570	854	8,25	12,39	2848	741	10,4	k+a-spl+n
		13	60,84	60,19	597	896	8,35	12,46	2986	773	10,9	k+a-spl+n

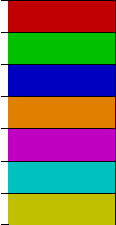
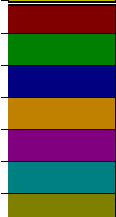


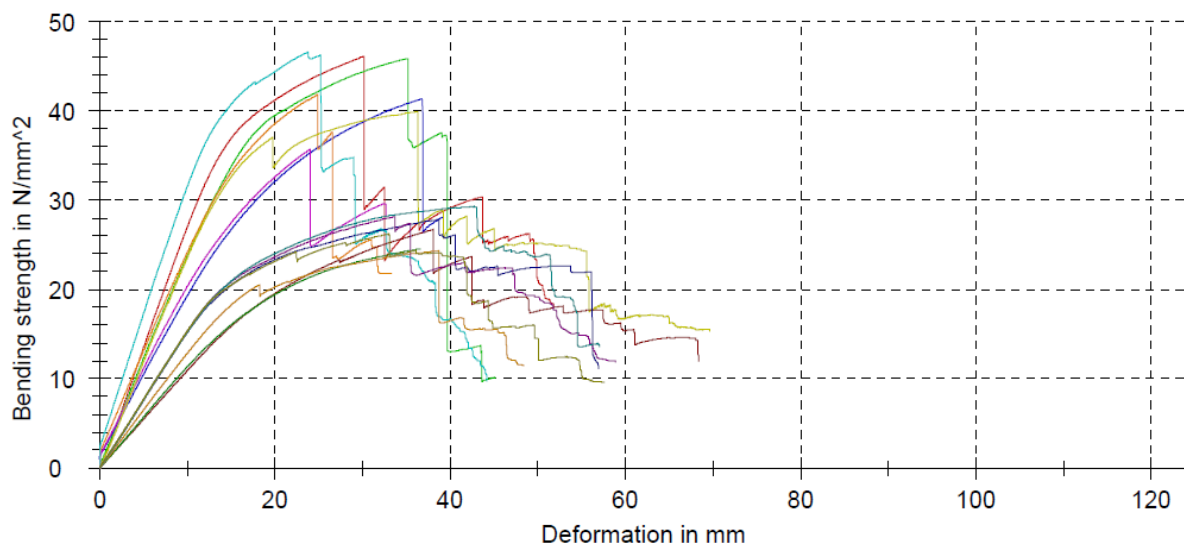
Povprečne vrednosti

Vzdolžno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	42,4	8490	334
s	1,40	1070	50
v	3,30	12,60	15,08

Prečno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	10,2	693	462
s	0,710	92,7	105
v	6,95	13,37	22,67

Priloga E: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 20 mm, testirane po robu

Legenda		ID	t mm	b mm	F1 N	F2 N	w1 mm	w2 mm	Fmax N	Em N/mm ²	f _m N/mm ²	Vzrok loma
	Vzdolžno	2	60,06	61,02	2505	3758	3,52	5,15	12527	8400	46,1	k+a+tn
		4	60,04	60,78	2481	3722	3,74	5,62	12407	7240	45,9	k+tn-komp
		6	60,36	60,74	2260	3391	3,82	6,06	11302	5460	41,4	k+tn-komp
		8	60,29	60,75	2279	3419	2,93	4,76	11397	6690	41,8	k+tn
		10	60,22	61,02	1951	2926	3,01	4,80	9755	5890	35,7	k+tn+aps
		12	60,78	60,17	2558	3836	2,37	3,92	12788	8800	46,6	k+tn+aps-komp
		14	60,15	60,88	2171	3257	3,44	5,06	10856	7330	39,9	k+tn+aps-komp
	Prečno	2	60,05	60,81	1445	2168	4,90	7,34	7227	3250	26,7	k-zpl+sv-n-komp
		4	60,07	61,01	1334	2001	4,35	6,44	6671	3490	24,5	k-zpl+sv-n-jl
		6	60,11	60,99	1513	2270	3,74	5,49	7567	4700	27,8	k-zpl+sv-tn
		8	60,08	60,67	1315	1972	3,78	5,63	6573	3900	24,3	k-zpl+sv-tn
		12	60,06	60,82	1525	2287	3,75	5,54	7623	4670	28,1	k-zpl+sv-tn
		10	60,78	60,17	1606	2410	3,90	5,75	8032	4640	29,3	k-zpl+sv-tn
		14	60,28	60,64	1425	2138	3,46	5,12	7127	4680	26,2	k-zpl+sv-tn



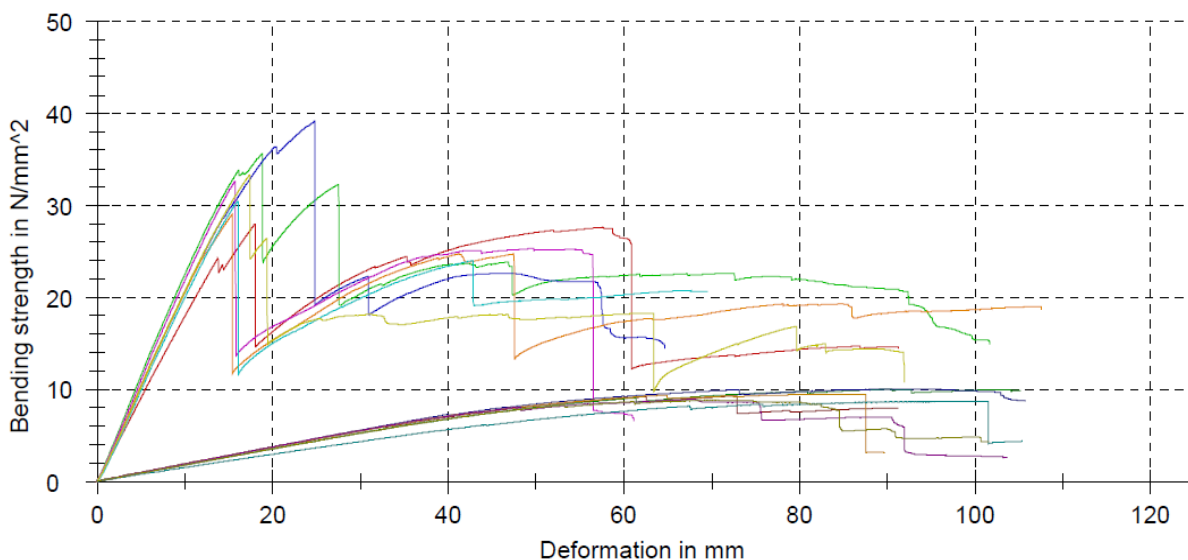
Povprečne vrednosti

Vzdolžno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	42,5	7120	327
s	3,99	1220	94
v	9,40	17,19	28,73

Prečno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	26,7	4190	307
s	1,85	630	66
v	6,92	15,03	21,31

Priloga F: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 25 mm, testirane po ploskvi

Legenda		ID	t	b	F1	F2	w1	w2	Fmax	Em	fm	Vzrok loma
			mm	mm	N	N	mm	mm		N/mm ²	N/mm ²	
	Vzdolžno	1	76,59	76,06	2430	3645	3,12	4,64	12149	6870	27,9	k+kl+n+s
		3	76,38	76,13	3082	4624	3,17	4,66	15412	8960	35,6	k+kl+n+s-konci
		5	76,46	75,77	3380	5070	3,91	5,67	16899	8350	39,1	k-sp+n+sl
		7	76,59	76,24	2532	3799	2,88	4,23	12662	8030	29,0	k+aps-grca-komp
		9	76,19	76,02	2809	4214	3,07	4,50	14046	8550	32,7	k+kl-konci
		11	76,30	76,17	2631	3946	3,25	4,67	13153	8030	30,4	k+kl+a+nv-konci
		13	76,46	76,16	2894	4341	3,40	4,91	14469	8270	33,3	k+n+s+nv-konci
	Prečno	1	76,36	76,40	807	1210	9,89	14,93	4034	691	9,29	k-spl+sv+n
		3	76,18	76,44	866	1299	11,20	16,91	4328	658	10,0	k-spl
		5	75,78	76,37	857	1286	10,70	16,11	4287	699	10,0	kl-spl+a
		7	76,18	76,51	819	1228	9,97	15,11	4093	690	9,46	k-spl+sv-nv-n
		9	76,37	76,41	776	1164	9,49	14,31	3881	695	8,93	k-spl+sv-n
		11	76,31	76,34	755	1133	11,67	17,69	3775	541	8,71	k+sv-nv-n-komp
		13	76,27	76,71	770	1155	10,08	15,12	3851	659	8,85	k-spl+sv-n-nv



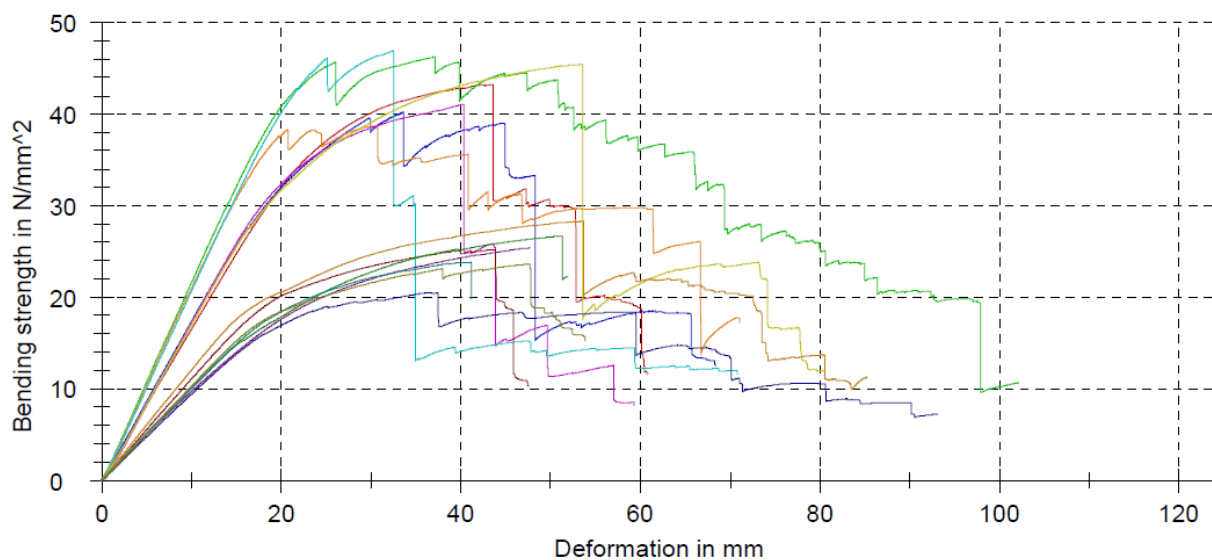
Povprečne vrednosti

Vzdolžno n = 7	fm N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	32,6	8150	269
s	3,90	651	56
v	11,97	7,99	20,78

Prečno n = 7	fm N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	9,33	662	333
s	0,537	56,0	38
v	5,76	8,47	11,33

Priloga G: Poročilo za 3 slojne plošče, debeline 25 mm, testirane po robu

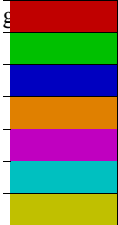
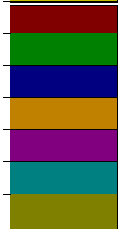
Legenda		ID	t mm	b mm	F1 N	F2 N	w1 mm	w2 mm	Fmax N	Em N/mm ²	f _m N/mm ²	Vzrok loma
      	Vzdolžno	2	76,06	76,67	3737	5605	5,26	7,87	18684	6200	43,2	k+a+tn-komp
		4	75,88	76,12	3952	5928	4,35	6,44	19761	8420	46,3	k+a+tn+nv-grca
		6	75,96	76,41	3458	5187	4,70	6,99	17291	6640	40,2	k+a+tn+aps-komp
		8	76,09	76,24	3325	4987	3,82	5,56	16623	8360	38,6	k+a+tn+aps-komp
		10	76,16	76,29	3546	5318	5,00	7,33	17728	6620	41,1	k+a+tn+nv-komp
		12	75,87	76,51	4029	6044	4,69	6,89	20145	8070	46,9	k+a+tn+jl-grca
		14	76,21	76,31	3924	5885	5,47	8,07	19618	6510	45,4	k+a+tn
      	Prečno	2	76,41	76,22	2185	3278	4,58	6,81	10925	4230	25,2	k-zpl+sv-tn
		4	76,31	76,11	2303	3454	5,24	7,89	11514	3750	26,7	k-zpl+sv-tn-jl
		6	76,49	76,46	1784	2676	4,34	6,48	8920	3610	20,5	k-zpl+sv-tn-grca
		8	76,42	76,29	2456	3684	4,69	7,02	12279	4540	28,3	k-zp+sv-tn
		10	76,44	76,24	2204	3306	5,08	7,74	11021	3570	25,4	k-zp+sv-n-komp
		12	76,08	76,16	2046	3070	4,74	7,11	10232	3780	23,8	k-zp+sv-n-komp
		14	76,14	76,09	2028	3041	4,60	6,87	10138	3900	23,6	k-zp+sv-tn

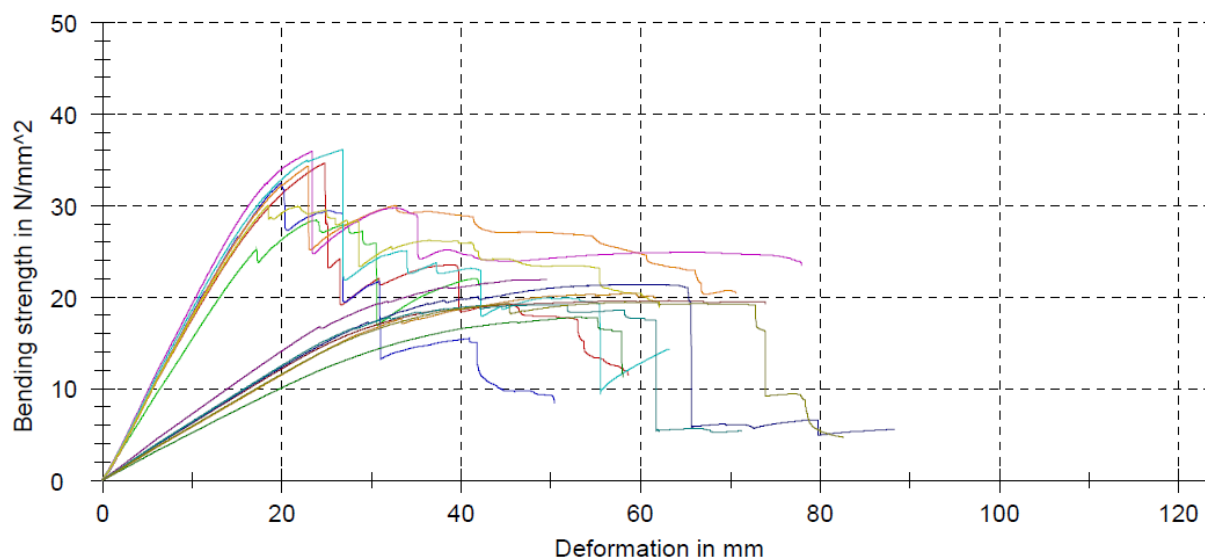


Povprečne vrednosti

Vzdolžno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s	Prečno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	43,1	7260	324	x	24,8	3910	243
s	3,22	973	67	s	2,48	353	94
v	7,46	13,41	20,71	v	10,02	9,04	38,77

Priloga H: Poročilo za 5 slojne plošče, debeline 15 mm, testirane po ploskvi

Legenda		ID	t mm	b mm	F1 N	F2 N	w1 mm	w2 mm	Fmax N	Em N/mm ²	f _m N/mm ²	Vzrok loma
	Vzdolžno	1	76,88	76,09	3040	4560	3,94	5,81	15199	6910	34,7	a+s+aps-konci
		3	77,26	76,11	2519	3778	3,65	5,46	12594	5820	28,4	a+s-konci
		5	77,18	76,24	2874	4311	3,73	5,41	14369	7200	32,5	a+s+aps+grca-konci
		7	77,57	76,03	3063	4594	3,96	5,73	15313	7160	34,3	k+kl+tn-konci
		9	77,46	76,01	3195	4793	3,81	5,56	15977	7550	35,9	k+a-zpl+aps-konci
		1	77,49	76,09	3216	4824	3,95	5,76	16081	7340	36,1	k+a-zpl+aps+s
		1	77,61	75,97	2680	4020	3,46	5,05	13401	6970	30,0	k+aps+tn+grca
	Prečno	1	77,23	75,98	1732	2598	6,16	9,41	8660	2230	19,6	k+a+s-zpl+komp
		3	77,31	76,21	1584	2375	6,80	10,35	7918	1860	17,8	k+a+s+grca
		5	77,17	76,28	1894	2841	6,73	10,22	9471	2270	21,4	k+a+s-konci
		7	77,17	75,99	1802	2703	6,92	10,54	9009	2090	20,4	k+a+s-konci
		9	77,13	76,17	1938	2907	5,92	9,06	9690	2590	21,9	k+a+aps-konci
		1	77,41	76,02	1702	2553	5,86	8,95	8509	2280	19,2	k+a+aps
		1	77,31	76,06	1723	2585	6,47	9,88	8617	2110	19,4	k+a-konci

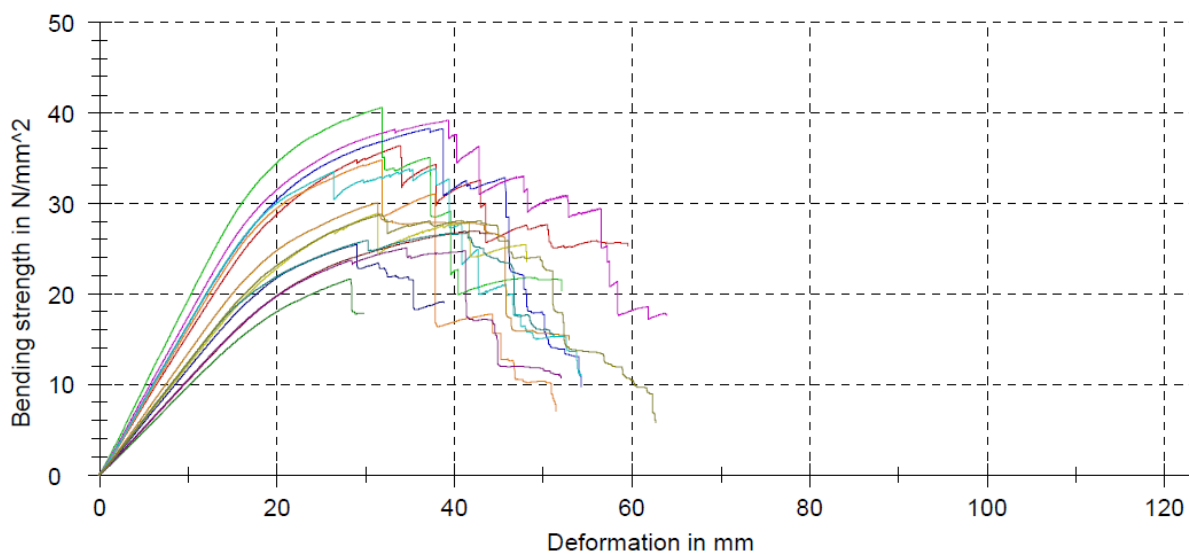


Povprečne vrednosti

Vzdolžno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s	Prečno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	33,1	6990	290	x	20,0	2200	307
s	2,96	560	70	s	1,40	223	59
v	8,93	8,01	24,09	v	7,00	10,10	19,21

Priloga I: Poročilo za 5 slojne plošče, debeline 15 mm, testirane po robu

Legenda		ID	t mm	b mm	F1 N	F2 N	w1 mm	w2 mm	Fmax N	Em N/mm ²	f _m N/mm ²	Vzrok loma
	Vzdolžno	2	76,05	77,24	3169	4753	4,74	7,03	15843	5990	36,4	k-t-n
		4	75,82	77,42	3524	5285	4,23	6,28	17618	7540	40,6	k+a-tn
		6	76,22	77,09	3341	5011	4,68	6,93	16703	6400	38,3	k+a-tn
		8	76,11	77,17	3031	4546	4,40	6,48	15153	6290	34,8	k+a-tn-grca
		10	75,91	77,67	3417	5125	4,53	6,73	17084	6740	39,2	k+a-tn-nv
		12	77,61	75,97	3018	4528	4,21	6,19	15092	6310	33,8	k+a-tn
		14	76,37	77,31	2537	3805	4,82	7,15	12683	4630	28,9	k+a-tn
	Prečno	2	76,07	77,37	2351	3526	5,24	7,77	11755	4020	26,9	k-zpl-k-sv
		4	76,03	77,25	1885	2828	4,53	6,71	9427	3750	21,7	k-zpl+k-
		6	75,86	77,45	2212	3318	4,43	6,56	11060	4540	25,5	k-zpl+k-sv+grca
		8	76,11	77,21	2622	3932	4,60	6,76	13108	5230	30,1	k-zpl+k-sv+tn
		10	76,03	77,29	2184	3276	4,86	7,19	10919	4040	25,1	k-zpl+k-sv+tn
		12	76,15	77,18	2330	3495	4,38	6,49	11651	4790	26,7	k-zpl+k-sv+tn
		14	76,15	76,87	2504	3755	4,74	7,01	12518	4780	28,8	k-zpl+k-sv+a



Povprečne vrednosti

Vzdolžno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s	Prečno n = 7	f _m N/mm ²	Em N/mm ²	tTest s
x	36,0	6270	335	x	26,4	4450	271
s	3,95	878	32	s	2,73	529	82
v	10,98	13,99	9,69	v	10,35	11,90	30,36

Priloga J: Slike lomov pri preizkušancih



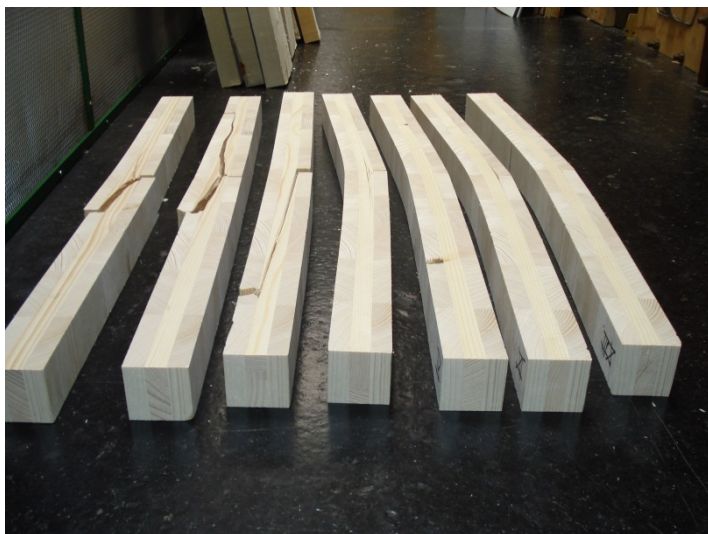
Slika preizkušanca iz skupine 3-20 plosko, obremenjen po ploskvi v prečni smeri vlaken.
Lom se je začel pri izpadli grči.



Slika preizkušanca iz skupine 3-25 po robu, obremenjen po robu v vzdolžni smeri vlaken.
Lom se je začel zaradi kompresijskega lesa na spodnji strani preizkušanca, kjer je potekala natezna sila.



Slika preizkušancev 3-20 po robu, obremenjenih po robu v prečni smeri vlaken. Lom je nastal zaradi velike vrasle grče.



Slika skupine preizkušancev 3-20 plosko, obremenjenih po ploskvi prečno. V tej skupini je redko prihajalo do lomov. Zlomljena sta 1. in 2. preizkušanec z leve strani. Ostali pa so imeli velike povese – do 120 mm.



Slika preizkušancev 3-25 plosko med obremenjevanjem. Obremenitev je potekala ploskovno v vzdolžni smeri vlaken. Lom je nastal zaradi slabe strižne trdnosti ploskovnega lepilnega sloja med prvim vzdolžnim in drugim prečnim slojem.



Slika preizkušanca iz skupine 3-20 po robu, obremenjen po robu v vzdolžni smeri vlaken. Nazoren prikaz delovanja sil, zgoraj deformacije tlačne obremenitve, spodaj natezna obremenitve.



Slika preizkušanca iz skupine 5-15 plosko, obremenjen po ploskvi v vzdolžni smeri vlaken. Nazoren prikaz, da se je lom začel pri grči, kjer je bil les najbolj oslabljen. Deformacija se je razširila na preostale sloje.



Slika preizkušanca 5-15 po robu, obremenjen v smeri lesnih vlaken. Deformacija je nastala zaradi kompresijskega lesa na spodnji strani preizkušanca. Na zgornji strani je deloval tlak, kar je povzročilo gnetenje lesnega tkiva. Na spodnji strani je deloval nateg, zato se je začelo trganje lesna tkiva.