

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:

Ocepek, J., 2014. Vpliv razvrščanja lesenih lamel na trdnost in deformabilnost lesenih lepljenih nosilcev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Turk, G., somentor Saje, D.): 56 str.

Datum arhiviranja: 21-10-2014

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:

Ocepek, J., 2014. Vpliv razvrščanja lesenih lamel na trdnost in deformabilnost lesenih lepljenih nosilcev. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Turk, G., co-supervisor Saje, D.): 56 pp.

Archiving Date: 21-10-2014

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 STROKOVNI
ŠTUDIJ PRVE STOPNJE
OPERATIVNO GRADBENIŠTVO

Kandidat:

JERNEJ OCEPEK

**VPLIV RAZVRŠČANJA LESENIH LAMEL NA TRDNOST IN
DEFORMABILNOST LESENIH LEPLJENIH NOSILCEV**

Diplomska naloga št.: 51/OG-MK

**EFFECT OF WOOD GRADING ON MECHANICAL
PROPERTIES OF GLUED LAMINATED TIMBER**

Graduation thesis No.: 51/OG-MK

Mentor:

prof. dr. Goran Turk

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Somentor:

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, 20. 06. 2014

STRAN ZA POPRAVKE:

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE:

Podpisani Jernej Ocepek izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Vpliv razvrščanja lesenih lamel na trdnost in deformabilnost lesenih lepljenih nosilcev.«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 1.6.2014

Jernej Ocepek

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.072.2:691.11(043.2)
Avtor:	Jernej Ocepek
Mentor:	prof. dr. Goran Turk
Somentor:	doc. dr. Drago Saje
Naslov:	Vpliv razvrščanja lesenih lamel na trdnost in deformabilnost lesenih lepljenih nosilcev
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski strokovni študij
Oprema:	56 str., 25 pregl., 27 sl.
Ključne besede:	leseni lepljeni nosilci, razvrščanje lesa, mehanske lastnosti lepljencev, neporušne metode

Izveček:

Pri proizvodnji lepljenih nosilcev je kvaliteta vgrajenega materiala ključnega pomena, saj neposredno narekuje kvaliteto proizvoda. Mehanske lastnosti je pri lesu težko določiti, saj lahko točne podatke dobimo le s poružitvijo vzorca. Mehanske lastnosti lesa pa lahko tudi ocenimo s katero od neporušnih metod in ga nato razvrstimo v ustrezne trdnostne razrede. V diplomskem delu sem opisal nekaj neporušnih metod za določanje mehanskih lastnosti lesa. Opisal sem proizvodno linijo lepljenih nosilcev slovenskega proizvajalca Hoja d.d., kjer sem izvedel del meritev, uporabljenih pri raziskovalnem delu. Na koncu sem na svojem vzorcu, ki je obsegal 205 kosov lesa, kot tudi na vzorcu več kot 1000 kosov lesa iz vse Slovenije pokazal, da je mogoče z ustrezno razvrščenim lesom in pametnim zlaganje lamel, sestavljati lepljene nosilce najvišjih trdnostnih razredov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.072.2:691.11(043.2)
Author: Jernej Ocepek
Supervisor: assoc. prof. Goran Turk Ph.D.
Co-advisor: asist. prof. Drago Saje Ph.D.
Title: Effect of wood grading on mechanical properties of glued laminated timber
Document type: Graduation Thesis – Higher professional studies
Notes: 56 p., 25 tab., 27 fig.
Key words: glued laminated timber, wood grading, mechanical properties of glulam, non-destructive methods

Abstract:

In glued laminated timber (glulam) manufacture, the quality of wood used in the process is of utmost importance, for it dictates the quality of the finished product. The mechanical properties of wood are hard to determine, and can be accurately measured only by destruction of the measured samples. Mechanical properties can also be estimated with any of the several non-destructive methods, described in my thesis, that can assign a specific strength class to a piece of timber. I have also described the production line of glulam on the case of Slovenian company Hoja d.d., where I did the measurements used in my thesis. Based on mathematical model using my sample of 205 measurements and on the data collected by the previous studies, I have shown, that using properly graded timber, we could produce glulam of the highest quality using only Slovenian wood.

ZAHVALA

Hvala staršema za vso podporo in pomoč v času študija. Hvala tudi moji Eti, ki me je vztrajno bodrila ob koncu študijske ere.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 LES	3
2.1 Lastnosti lesa	3
2.2 Les v gradbeništvu	4
2.3 Leseni lepljeni nosilci (Glulam)	5
2.3.1 Lepljeni nosilci skozi čas	5
2.3.2 Proizvodnja lepljenega lameliranega lesa (Hoja d.d.)	6
2.4 Trdnost in deformabilnost lesa	12
2.5 Razvrščanje lesa	15
2.5.1 Vizualno razvrščanje lesa	15
2.5.2 Strojno razvrščanje lesa	16
3 MERITVE LASTNOSTI LESA	22
3.1 Naprava za merjenje trdnosti podjetja ILKON	22
3.2 Potek meritev	23
3.3 Rezultati meritev	27
3.3.1 Statistično vrednotenje rezultatov meritev	28
3.3.2 Numerično modeliranje lepljenih nosilcev in primerjanje njihovih efektivnih upogibnih togosti	33
3.3.3 Trdnostni razredi lepljenih nosilcev	38
3.4 Določanje mehanskih karakteristik lepljenih nosilcev na reprezentativnem vzorcu	38
3.4.1 Primerjava efektivnih upogibnih togosti v odvisnosti od načina zlaganja na reprezentativnem vzorcu	39
3.4.2 Določanje karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev na reprezentativnem vzorcu	40
4. PRAKTIČNI PRIMER	46
5. UGOTOVITVE	52
6. ZAKLJUČEK	54
VIRI	55

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Kriterij standarda za vizualno razvrščanje SIST DIN 4074-1:2009, za tramove, deske in plohe, ki so pretežno upogibno obremenjeni po robu.....	16
Preglednica 3.1: Zahtevane mejne lastnosti za posamezne trdnostne razrede po SIST EN 338	23
Preglednica 3.2: Račun statistike H , normalna porazdelitev.....	31
Preglednica 3.3: Račun statistike H , normalna logaritemska porazdelitev.....	32
Preglednica 3.4: Prikaz rezultatov numeričnih modelov glede na način zlaganja.....	36
Preglednica 3.5: Prikaz rezultatov numeričnih modelov glede na način zlaganja in povečanih dimenzij vgrajenih lamel.....	37
Preglednica 3.6: Sestave lepljenih nosilcev po standardu SIST EN 1194:2000.....	38
Preglednica 3.7: Prikaz rezultatov numeričnih modelov glede na način zlaganja (reprezentativen vzorec slovenskega lesa).....	39
Preglednica 3.8: Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti masivnega lesa, SIST EN 338:2003.....	41
Preglednica 3.9: Račun karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev (12 lamel).....	42
Preglednica 3.10: Kombinacije razvrščanja konstrukcijskega lesa v trdnostne razrede I.....	43
Preglednica 3.11: Račun karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev, tretji način (12 lamel).....	43
Preglednica 3.12: Kombinacije razvrščanja konstrukcijskega lesa v trdnostne razrede II.....	44
Preglednica 3.13: Račun karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev, četrti način (12 lamel).....	45
Preglednica 4.1: Račun razmerja MSN/MSU za lepljen nosilec kvalitete $GL24h$	48
Preglednica 4.2: Račun razmerja MSN/MSU za lepljen nosilec kvalitete $GL28h$	48
Preglednica 4.3: Račun razmerja MSN/MSU za lepljen nosilec kvalitete $GL32h$	48
Preglednica 4.4: Račun razmerja MSN/MSU za lepljen nosilec kvalitete $GL36h$	48
Preglednica 4.5: Merodajnost pogojev nosilnosti z omejitvijo povesa $W_{inst} = \frac{L}{300}$	50
Preglednica 4.6: Povečanje nosilnosti (merodajno MSU).....	50
Preglednica 4.7: Povečanje nosilnosti (merodajno MSN).....	50
Preglednica 4.8: Višina polno izkoriščenega prereza $GL24h$	50
Preglednica 4.9: Višina polno izkoriščenega prereza $GL28h$	51

Preglednica 4.10: Višina polno izkoriščenega prereza <i>GL32h</i>	51
Preglednica 4.11: Višina polno izkoriščenega prereza <i>GL36h</i>	51

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Najpogosteje uporabljeni prerezi lesenih lepljenih nosilcev.....	6
Slika 2.2: Natezni diagram $\sigma - \varepsilon$	14
Slika 2.3: Tlačni diagram $\sigma - \varepsilon$	14
Slika 2.4: Model nanašanja obremenitev s pomočjo valjev.....	17
Slika 2.5: Ultrazvočni merilnik 1.....	18
Slika 2.6: Ultrazvočni merilnik 2.....	19
Slika 2.7: Merilnik frekvence.....	20
Slika 3.1: Lamela, pripravljena na meritev.....	24
Slika 3.2: Merjenje preizkušancev.....	24
Slika 3.3: Lamela, trdnostni razred C30.....	25
Slika 3.4: Merjenje vlažnosti preizkušancev.....	26
Slika 3.5: Primer jasnega (levo) in motenega odčitka (desno).....	26
Slika 3.6: Primer počene lamele.....	27
Slika 3.7: Rezultati razvrščanja lesenih lamel v trdnostne razrede.....	27
Slika 3.8: Histogram vzorca 205 lamel.....	28
Slika 3.9: Naključno zložene lamele (8 lamel).....	34
Slika 3.10: Pametno zložene lamele, prvi način (8 lamel).....	35
Slika 3.11: Pametno zložene lamele, drugi način (8 lamel).....	35
Slika 3.12: Pametno zložene lamele, tretji način (8 lamel).....	36
Slika 3.13: Grafični prikaz rezultatov numeričnih modelov.....	37
Slika 3.14: Grafični prikaz rezultatov numeričnih modelov pri večjih dimenzijah vgrajenih lamel.....	38
Slika 3.15: Grafični prikaz rezultatov numeričnih modelov (reprezentativen vzorec slovenskega lesa).....	40
Slika 3.16: Pametno zložene lamele, računanje karakteristične upogibne trdnosti (12 lamel).....	42
Slika 3.17: Diagram izračunane zveze med $f_{m,g,k}$ in E_{mean} zloženih nosilcev I.....	43
Slika 3.18: Diagram izračunane zveze med $f_{m,g,k}$ in E_{mean} zloženih nosilcev II.....	44
Slika 3.19: Diagram izračunane zveze med $f_{m,g,k}$ in E_{mean} zloženih nosilcev III.....	45

Slika 4.1: Model prosto ležečega nosilca.....47

1 UVOD

V diplomski nalogi sem preučeval učinek, ki ga ima razvrščanje lesenih lamel na mehanske lastnosti lesenih lepljenih nosilcev.

Slovenija je zelo bogata z lesom, saj je več kot polovica površin prekritih z gozdom. Kljub temu se je v gradbeništvu 20. stoletja les, v primerjavi z ostalimi materiali, kot sta na primer jeklo in beton, uporabljal razmeroma malo.

V sedemdesetih letih 20. stoletja je zaradi vse večjega ekološkega ozaveščanja, visoke estetske vrednosti lesa in novih tehnologij lepljenja masivnih lesenih elementov poljubnih oblik, uporaba lesa pričela ponovno vztrajno rasti.

Les je zelo nehomogen material in njegove mehanske lastnosti je težko natančno določiti. Odvisne so od vrste lesa, načina razreza, rastišča ter celo od vrste prsti, v kateri drevo raste. Mehanske lastnosti se lahko občutno spreminjajo med istimi drevesnimi vrstami in celo znotraj istega debla. Testiranje delčka lesne mase in posplošitev mehanskih lastnosti na celoten material pri lesu ne pride v poštev zaradi nehomogenosti materiala. Zaradi tega so lesene konstrukcije in leseni lepljeni elementi, ob uporabi visokih varnostnih faktorjev za material, pogosto predimenzionirane in prodane pod zasluženno ceno. (Madsen, 1992)

Za trdno in ekonomično gradnjo je zelo pomembno poznavanje mehanskih lastnosti materiala, ki se upoštevajo v statičnem računu. Porušitev preizkušanca je zaenkrat edina zanesljiva metoda za določanje trdnosti lesa. Trdnost lesa lahko ocenimo, če upoštevamo vrednosti meritev z različnimi neporušnimi metodami, kot so na primer: iskanje lastne frekvence, ultrazvočna metoda, vizualno ocenjevanje, merjenje površin grč. Boljše ocene dobimo s kombinacijo večih neporušnih metod.

Pri praktičnem raziskovalnem delu sem s pomočjo merjenja lastne frekvence meril trdnost lesenih lamel, namenjenih za izdelavo lesenih lepljenih nosilcev v podjetju Hoja d.d. S pomočjo izmerjenih vrednosti in z uporabo numeričnega modela sem tvoril »potencialne«

nosilce in opazoval njihove mehanske lastnosti. Pri zlaganju lamel sem se poslužil naključnega in pametnega zlaganja. Na koncu sem svoje ugotovitve preizkusil na praktičnem, računskem primeru.

V svoji diplomski nalogi sem želel pokazati, da se razvrščanje konstrukcijskega lesa, ne le izplača, temveč je nujno potrebno za zagotavljanje kvalitetnega in konstantnega produkta.

Kot metodo merjenja sem izbral metodo nihanja, ki spada med strojne, neporušne metode. Trenutno sta za strojno razvrščanje slovenskega konstrukcijskega lesa s strani CEN (evropskega komiteja za standardizacijo) certificirani le napravi dveh proizvajalcev: Microtec in Brookhuis. Za namen svoje diplome sem se poslužil naprave slovenskega proizvajalca ILKON. Njihova naprava je trenutno še v postopku certificiranja.

Meritve so bile opravljene zunaj proizvodne hale v razmeroma tihem in kontroliranem okolju. Izmerjenih je bilo 205 posušenih lesenih lamel, ki so bile pripravljene za dolžinsko spajanje in čez nekaj dni vgrajene v lesene lepljene nosilce.

2 LES

2.1 Lastnosti lesa

Les je naravna organska vlaknasta snov, ki jo proizvajajo drevesa. Sestavljena je iz celuloze in hemi-celuloze, olesenela pa zaradi lignina. Danes se les uporablja predvsem za pohištvo, gradnjo in ogrevanje, v preteklosti pa je bila odvisnost od lesa še mnogo večja in je njegova uporaba segala skoraj na vsa področja človeškega življenja. Les že tisočletja velja za enega najbolj priljubljenih in uporabljenih naravnih materialov.

Gozdovi predstavljajo največji ponor in skladišče ogljika na Zemlji. S procesom fotosinteze se CO₂, ki je eden glavnih toplogrednih plinov, veže v lesno snov in je kot tak odstranjen iz atmosfere, zato je les pomemben tudi iz ekološkega vidika. Pri izdelavi lesenih proizvodov se ogljik še naprej skladišči, pametna sečnja pa naredi prostor za nastanek nove biomase.

(Ozmec, 2013)

Les je material, ki naredi bivalno okolje prijetnejše in udobnejše. Primerno obdelan in ustrezno posušen zadržuje toploto v prostorih, ne prevaja električnega toka ter lepo zveni v glasbilih. Les uravnava vlago v prostoru in ob ustrezni obdelavi lepo diši. Njegova tekstura nam je prvinsko blizu, njegov otip pa domač - pa naj bo stružen, izrezljan ali obrabljen.

(Polanc in Leban, 2010)

Pri obdelavi in uporabi lesa je zelo pomembno poznavanje njegovih lastnosti, ki se zelo razlikujejo, najbolj glede na drevesno vrsto, podnebje v katerem les raste in tip prsti, v kateri drevo raste. Pomembno vlogo pa imajo tudi načini obdelave in priprave tehničnega lesa kot so sušenje, razrez, impregnacija, skladiščenje, ...

Lastnosti lesa je mogoče razdeliti v štiri glavne skupine:

- **fizikalne lastnosti** (so posledica zgradbe lesa): poroznost, gostota, vlažnost, krčenje, nabrekanje, prevodnostne lastnosti lesa,

- **mehanske lastnosti** (predstavljajo odpornost proti vplivom zunanjih mehanskih sil): trdnost, trdota, prožnost, žilavost, cepljivost,
- **estetske lastnosti:** barva, vonj, tekstura, sijaj, finost,
- **fizikalno-kemijske lastnosti:** trajnost, gorljivost.

Zaradi širokega spektra uporabnosti lahko vsaka od naštetih lastnosti igra pomembno vlogo pri izbiri ustreznega lesa.

2.2 Les v gradbeništvu

Les je, skupaj z glino in kamnom, eden najstarejših gradbenih materialov. Njegova uporaba je segala od začasnih, transportnih bivališč iz vej in grmovja in prvih brunaric v neolitiku, do katedral srednjega veka in modernih lesenih zgradb našega časa. Primitivni načini lesene gradnje so bili osnova za razvoj vseh kasnejših sistemov gradbenih konstrukcij. (Madsen, 1992)

Les je lahek, elastičen material in z ozirom na lastno težo, 50 % močnejši od jekla. Kljub visoki vsebnosti ogljika, ki ga naredi vnetljivega, les odlikuje nizka toplotna prevodnost. V primeru požara se na masivnih lesenih elementih ustvarja plast oglja, ki ima nižjo toplotno prevodnost kot les in s tem še dodatno ščiti vitalne dele nosilne konstrukcije in podaljšuje čas, v katerem je mogoča varna evakuacija. Les je obnovljiv vir, ki ga je ob dobrem gospodarjenju mogoče izkoriščati tako rekoč v nedogled. Pridobiva in uporablja se lokalno, za njegovo pridobivanje je v primerjavi z ostalimi materiali potrebno razmeroma malo vložene energije, kar ima za posledico nižji emisijski pečat na okolico.

Če lesena konstrukcija ni izpostavljena izmenjajočim se različnim stopnjam vlažnosti in je ustrezno zaščiten, je lahko njena življenska doba tudi več sto let. Ko konstrukcija preneha služiti svojemu namenu, se lahko v celoti razgradi. Pa naj bo to v obliki druge konstrukcije,

konstrukcijskih elementov, zmlatega lesa za prefabricirane lesne elemente ali ogrevanje. Tudi zavržen les se organsko razkroji in vrne v tokokrog sorazmeroma hitro.

Les je ekološki in obnovljiv gradbeni material. S svojimi dobrimi fizikalno gradbenimi lastnostmi in možnostjo hitre gradnje se lahko hitro postavi ob bok jeklu in betonu. Poleg tega je les toplotno izolativen in ustvarja prijetnejše bivalno okolje. Zaradi manjše teže in naravne duktilnosti lesa ustrezno projektirana lesena konstrukcija razmeroma dobro prenaša potresne obtežbe.

Les je bil skozi celotno človeško zgodovino eden glavnih gradbenih materialov in tudi danes lahko, pri manjših zgradbah, z upoštevanjem vseh modernih evropskih standardov, les zastopa 95 % objekta. (Madsen, 1992)

2.3 Leseni lepljeni nosilci (Glulam)

2.3.1 Lepljeni nosilci skozi čas

Prva zgradba z nosilno konstrukcijo iz lepljenega lesa v zgodovini je bila hala kralja Edwarda College-a v Southamptonu. Zgrajena je bila pred več kot 150 leti (leta 1860).

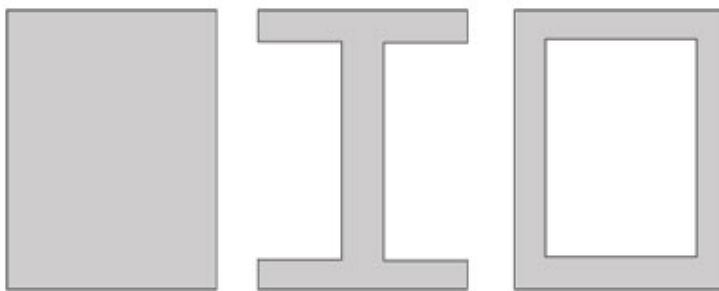


Hala kralja Edwarda College-a v Southamptonu (Müller, 2000)

Leta 1906 je dvorni tesarski mojster Otto Hetzer patentiral upognjeni, lepljeni večslojni nosilec iz dveh ali več lamel (DRP št. 197773). Patent predstavlja prvega v vrsti patentov na področju lepljenega lesa.

Danes leseni lepljeni nosilci spadajo med industrijske gradbene elemente z visoko stopnjo prefabrikacije. Napredek pri odpornosti in obstojnosti lepil ter tehnologiji lepljenja omogoča premagovanje vedno večjih razponov in izvedbo novih, ugodnejših statičnih sistemom. Možnost lepljenja različnih oblik omogoča prilagajanje sodobnim arhitekturnim potrebam. Omejitve lepljenim konstrukcijam, zaradi vse večjih dimenzij prefabriciranih elementov, predstavlja le transport le-teh s produkcijskih linij na gradbišče.

V sodobnem gradbeništvu se najpogosteje uporabljajo lepljeni nosilci pravokotnega prereza, *I* prereza in škatlastega (sestavljenega) prereza.



Slika 2.1: Najpogosteje uporabljeni prerezi lesenih lepljenih nosilcev

Lameliran les ima v primerjavi z masivnim lesom prednosti, kot so: boljša dimenzijska stabilnost, večja upogibna in strižna nosilnost, pri sušenju skoraj ni razpok, manjše torzijske deformacije, možnost izvedbe različnih prečnih prerezov in prerezov večjih dimenzij, kot jih dopušča masiven les.

2.3.2 Proizvodnja lepljenega lameliranega lesa (Hoja d.d.)

Podjetje Hoja d.d. ima dolgoletne izkušnje na področju predelave hlodovine. Leta 1968 so v Ljubljani odprli obrat za proizvodnjo lesenih lepljenih konstrukcij. Zelo vzpodbudni rezultati

testiranja so, poleg porasta uporabe lesenih lepljenih konstrukcij v Evropi, prispevali k še večjemu razvoju in povečali prodajo tega proizvoda.

Proizvodni proces je prilagojen izdelavi lameliranih lepljenih nosilcev, ki se uporabljajo kot premostitveni konstrukcijski elementi. Izdelani so iz dolžinsko spojenih lamel lesa smreke ali jelke.

Prvi korak pri proizvodnji lesenih lepljenih nosilcev je nabava in skladiščenje hlodovine, ki jo je potrebno pred uporabo razžagati. Žaganje poteka na dveh žagah oz. linijah. Količina in dimenzije žaganega lesa pa se določijo na podlagi obstoječe zaloge, odprtih delovnih nalogov ter ponudb.

Razžagan les se nato pripravi za sušenje. V tem koraku se les na grobo presortira. Izločijo se kosi z vidnimi sledmi lesnih škodljivcev, počeni kosi, modrikasti kosi in vsi ostali kosi, ki ne ustrezajo notranjim pravilom podjetja.

Pravilno pripravljen oz. letvičen les se odpelje v lesno sušilnico, kjer se na podlagi vrste in trenutne vlažnosti lesa izbere ustrezen program sušenja. Med sušenjem se nenehno preverja stopnja vlažnosti. Tehnično suh les, t.j. les, ki je primeren za vgradnjo v lepljene nosilce, mora imeti stopnjo vlažnosti 10 (+- 2) %.

Ko je les ustrezno suh, se razletviči in razvrsti v posamezne zložaje in do uporabe skladišči na suhem v notranjosti proizvodne hale.



Skladiščenje letvičenega lesa pri podjetju Hoja d.d. (Andoljšek, 2010)

Postopek proizvodnje lameliranih lesenih nosilcev poteka v zaprti proizvodni hali. Pred vgradnjo se vsakemu kosu lesa avtomatsko izmeri vlažnost, ki mora biti v dovoljenih mejah 10 (+- 2) %. Vse kose, ki ne ustrezajo temu pogoju, odstranijo iz proizvodne linije.

V podjetju vizualno določajo oz. ocenjujejo kvaliteto lesa. Delavec označi problematične dele, ki jih nato naprava čelilnik avtomatsko izreže.



Vizualno določanje kvalitete lamel pred izrezom napak in dolžinskim spajanjem (Andoljšek, 2010)

Izrezane lamele se nato dolžinsko spoji z uporabo zobatih spojev. Pri dolžinskem spajanju so natančno določene napake, ki so še dopustne. Lamele, ki ne ustrezajo kriterijem, izločijo iz linije. Z dolžinskim spajanjem se rešujejo tudi nekatere druge napake lesenih lamel, kot je na primer spiralna zavrtost. Takšne lamele se na več mestih prereže, obrne okrog vzdolžne osi in ponovno spoji.



Transport dolžinsko spojenih lamel do vmesnega skladišča (Andoljšek, 2010)

Sledi razrez dolžinsko spojenih »neskončnih« lamel na ustrezno dolžino (čeljenje), ki je pogojena z maksimalno dolžino preše ali oblikovnika. Po postopku čeljenja morajo lamele mirovati dokler se lepilo v celoti ne strdi. Čas vezanja se razlikuje od lepila do lepila in je podan s strani proizvajalca.

Po ustreznem odležanem času se lamele spusti skozi lamelni skobeljnik, ki jih skoblja na ustrezno širino in debelino. Sledi nanos lepila, ki se nanaša na posebnem stroju. Komponenti lepila (smola in trdivec) se nanašata ločeno in v ustreznem razmerju.



Skobljalnik v podjetju Hoja d.d. (Andoljšek, 2010)



Nanašanje dvo-komponentnega lepila. (Andoljšek, 2010)

Tako obdelane lamele se nato zložijo na v naprej pripravljen oblikovnik in stisnejo do potrebne tlaka lepljenja z vijačnimi svorami.



Lepljenje lamel (Andoljšek, 2010)

Po končanem času stiskanja (pri podjetju Hoja d.d. je to 20 ur) sledi površinsko skobljanje lepljenega nosilca. Potrebno je paziti na videz in tudi na dimenzijsko ustreznost nosilca.

Končna obdelava nosilcev, kot je razrez na končne dimenzije, skobljanje robov in sanacija smolnih kanalov, se izvaja z ročnim orodjem.

Sledi še posebna obdelava, ki je odvisna od posameznega naročila in lahko zajema barvanje, rezanje pod poljubnimi koti, pritrditev montažnega okovja, izdelavo utorov, ...

Zadnja faza zajema odvoz na gradbišče in montažo gradbenega elementa. Zaradi velikih dimenzij lesenih lepljenih nosilcev, se ti pogosto odvažajo ponoči in s posebnimi prevozi.



Izredni prevoz lepljenega nosilca na gradbišče (Andoljšek, 2010)

2.4 Trdnost in deformabilnost lesa

Les je zelo anizotropen material, t.j. material, ki ima pri različnih smereh obremenjevanja različne mehanske lastnosti. Njegova trdnost je - poleg botanične vrste, postopka obdelave lesa, njegove vlažnosti, strukture, rastišča - odvisna tudi od načina oz. vrste obremenjevanja (tlak, nateg, strig).

Normalne napetosti (tlak):

- Napetosti v smeri vlaken (σ_{\parallel}) → Trdnost v smeri vlaken (f_{\parallel})
- Napetosti pravokotno na vlakna (σ_{\perp}) → Trdnost pravokotno na vlakna (f_{\perp})
- Napetosti pod kotom α glede na vlakna (σ_{α}) → Trdnost pod kotom α (f_{α})

$$f_{\perp} \leq f_{\alpha} \leq f_{\parallel}$$

Strižne napetosti:

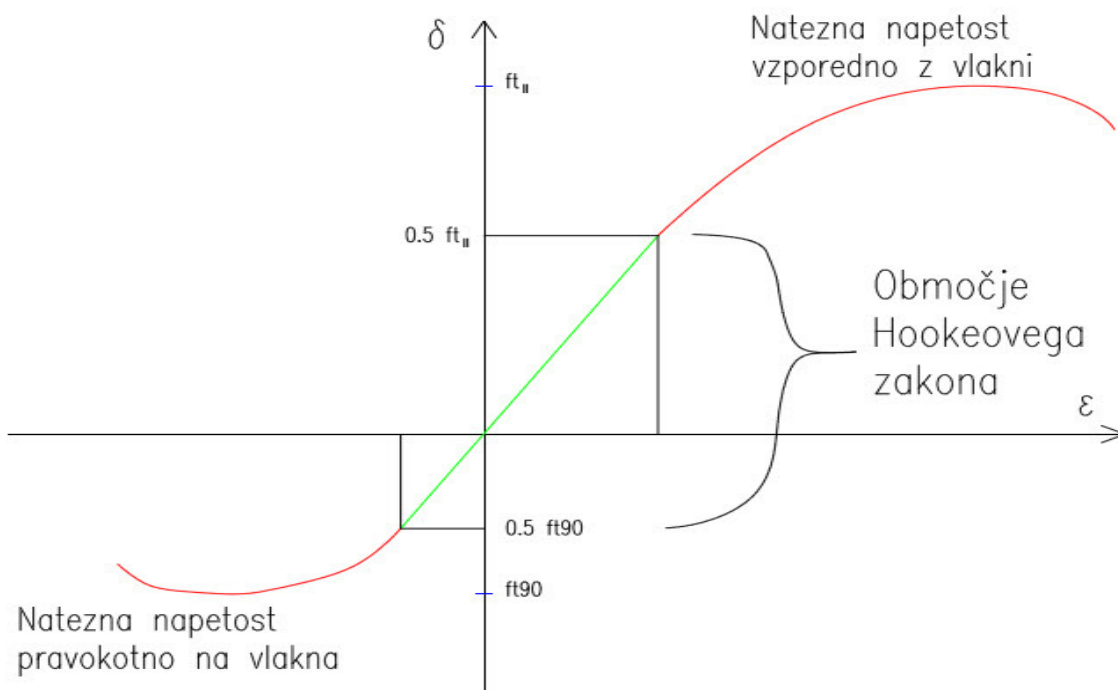
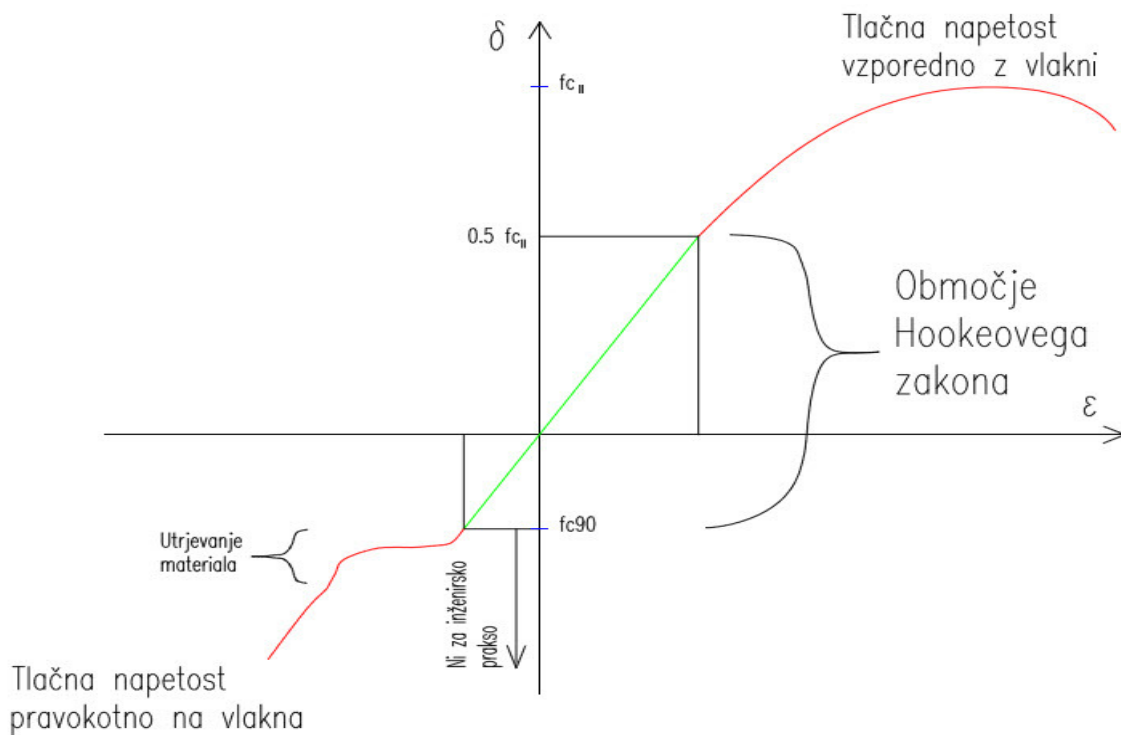
- Napetosti v ravnini vlaken (τ_{\parallel}) → Trdnost v smeri vlaken ($f v_{\parallel}$)
- Napetosti pravokotno na vlakna τ_{\perp} → Trdnost pravokotno na vlakna ($f v_{\perp}$)

$$f v_{\perp} \geq f v_{\parallel}$$

Trdnost je mogoče popolnoma natančno določiti le s standardnimi preiskavami, ki privedejo do porušitve vzorca. Zaradi nehomogenosti lesa pa dobimo velik raztros rezultatov.

Pri preizkušanju (obremenjevanju do porušitve) lesenih preizkušancev prikažemo deformabilnost elementa kot zvezo med napetostmi (σ) in deformacijami (ε).

Zaradi anizotropije lesa dobimo zelo različne deformacije glede na smer obremenjevanja. Rezultati takšnega eksperimentalnega dela so t.i. konstitutivni zakoni, ki kažejo na to, da se les obnaša linearno-elastično nekje do polovice trdnosti za dano smer obremenjevanja ($0.5f$). Za to območje lahko predpostavimo Hookeov zakon. Pri nadaljnem obremenjevanju postanejo deformacije nelinearne. (Lopatič, 2010)

Slika 2.2: Natezni diagram $\sigma - \epsilon$ Slika 2.3: Tlačni diagram $\sigma - \epsilon$

2.5 Razvrščanje lesa

Razvrščanje lesa je ena najpomembnejših dejavnosti, ki prispevajo k donosnosti lesno predelovalnih obratov. (Madsen, 1992)

V Sloveniji se za razvrščanje masivnega žaganega lesa uporablja standard EN 14081:2005. Obvezen je od leta 2006, nanj pa se sklicuje tudi Evrokod 5, ki predpisuje pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti. To pomeni, da morajo biti vsi leseni elementi, ki so zajeti v statičnem računu kot nosilni elementi, ustrezno razvrščeni v pripadajoče trdnostne razrede in ožigosani z oznako CE. Kljub temu, da je zakon v veljavi že polnih 8 let, pa v Sloveniji les razvršča le nekaj žag. (Plos, 2012)

Poznavanje mehanskih lastnosti gradiv v konstrukterstvu je ključnega pomena, zato konstrukcijski les razvrščamo v različne trdnostne razrede.

Za zdaj edina točna metoda za določanje trdnosti lesa je porušitev preizkušanca. Poznamo pa tudi nekaj neporušnih metod s katerimi je mogoče oceniti, oz. posredno meriti, nekatere mehanske lastnosti. Najboljše ocene dobimo s kombinacijo večih načinov meritev.

Standard EN 14081:2005, dovoljuje 2 načina razvrščanja. Vizualno in strojno. Pri vizualnem razvrščanju je potrebno upoštevati enega izmed nacionalnih vizualnih standardov, navedenih v EN 1912:2010. Pri strojnem razvrščanju pa smemo uporabljati zgolj naprave, navedene v standardu EN 14081-4.

2.5.1 Vizualno razvrščanje lesa

Slovenski standard za vizualno razvrščanje lesa SIST DIN 4074-1:2009 je zaradi naše geografske navezanosti na nemško govoreče države, povzet po nemškem standardu. Ta dovoljuje razvrščanje konstrukcijskega lesa v 3 trdnostne razrede: S7, S10 in S13, ki jih lahko prevedemo na trdnostne razrede C18, C24 in C30. (Plos, 2012)

Preglednica 2.1: Kriterij standarda za vizualno razvrščanje SIST DIN 4074-1:2009, za tramove, deske in plohe, ki so pretežno upogibno obremenjeni po robu

Značilnosti razvrščanja	Vizualni razredi		
	S7, S7K	S10, S10K	S13, S13K
1. Grče	do 3/5	do 2/5 ^a	do 1/5
2. Naklon vlaken	do 12 %	do 12 %	do 7 %
3. Stržen	dovoljen	dovoljen	ni dovoljen ^b
4. Širina branike - splošno - duglazija	do 6 mm do 8 mm	do 6 mm do 8 mm	do 4 mm do 6 mm
5. Razpoke - zaradi krčenja ^c - zaradi strele, kolesivost	do 1/2 ni dovoljeno	do 1/2 ni dovoljeno	do 2/5 ni dovoljeno
6. Lisičavost	do 1/4	do 1/4	do 1/5
7. Ukrivljenost ^f - vzdolžna ukrivljenost - zvitost	do 8 mm 1 mm / 25 mm širine	do 8 mm 1 mm / 25 mm širine	do 8 mm 1 mm / 25 mm širine
8. Obarvanost, trohnoba ¹ - modrikavost - rjave in rdeče proge - rjava in bela trohnoba	dovoljena do 2/5 ni dovoljena	dovoljena do 2/5 ni dovoljena	dovoljena do 1/5 ni dovoljena
9. Kompresijski les	do 2/5	do 2/5	do 1/5
10. Obžrtost zaradi žuželk	dopustni rovi premera do 2 mm		
11. Ostale značilnosti	je potrebno smiselno upoštevati		
^a pri smreki in duglaziji do 1/2 pri širini branik do 4 mm pri smreki in 5 mm pri duglaziji. Delež v pošiljki (partiji) ne sme preseči 25 %. ^b pri tramovih s širino > 120 mm dovoljen ^c pri lesu, ki se ne razvršča v suhem stanju, značilnosti ne upoštevamo			

Od vizualnih metod za razvrščanje konstrukcijskega lesa poznamo tudi metodo »KAR« (knot area ratio oz. delež ploščin grč), ki določa trdnost preizkušancev na podlagi količine in lege grč in jih razvršča v dva trdnostna razreda. Zasledimo ga lahko v britanskem BS 4978. Zaradi zamudnosti in težavnosti natančnih meritev pa se uporablja predvsem v raziskovalne namene.

2.5.2 Strojno razvrščanje lesa

- 2.5.2.1 Metoda merjenja statičnega modula

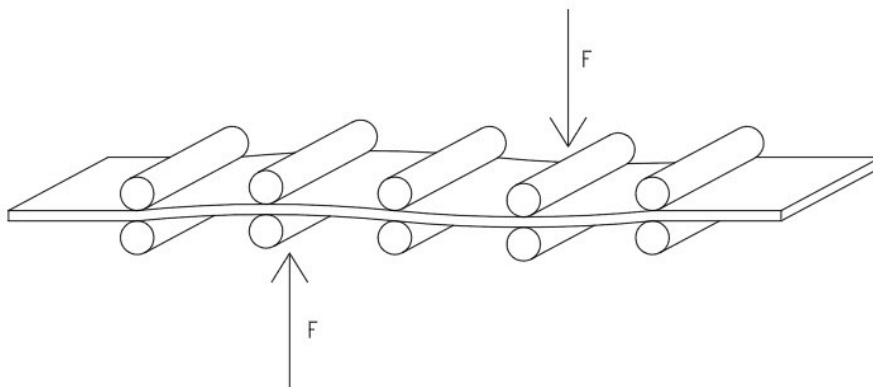
Pri tej metodi les s pomočjo valjev obremenimo v elastičnem območju. Razmerje med silo in pomikom ter dimenzijami preizkušanca je podano z enačbo:

$$w = \frac{FL^3}{48EI}$$

Kjer je

- w pomik na sredini razpona,
- F sila na sredini razpona,
- L razdalja med podporama,
- E statični modul elastičnosti,
- I vztrajnostni moment.

Naprave merijo pomike pri dani sili, ali pa silo, ki je potrebna za dane pomike. Rezultat meritev je statični modul elastičnosti (ME). Ob poznavanju (ME) lahko ocenimo trdnost preizkušanca. Najpogosteje se takšne naprave uporabljajo v Severni Ameriki.



Slika 2.4: Model nanašanja obremenitev s pomočjo valjev

- 2.5.2.2 Metoda z rentgenom

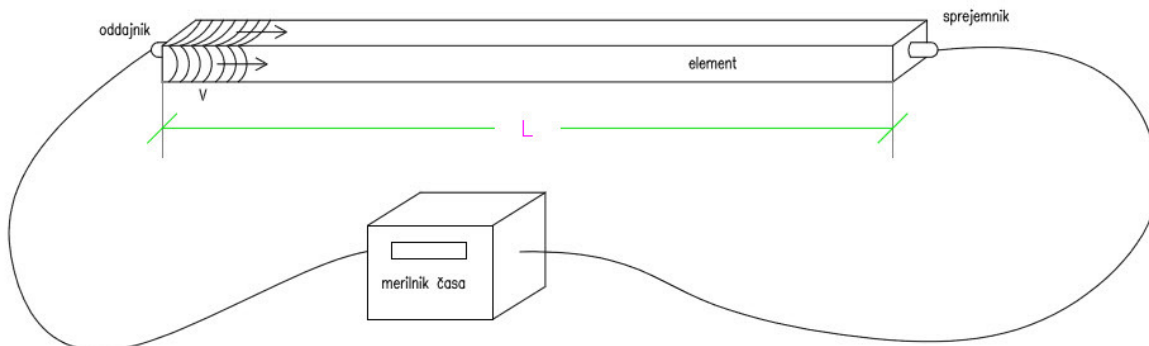
Pri tej metodi so potrebne predhodne meritve naprav, ki delujejo na principu ali metode nihanja ali ultrazvočne metode. Takšna naprava nato s pomočjo rentgenske tehnologije lesene

kose razdeli na odseke z enako gostoto in za vsak odsek posebej izračuna dinamični modul elastičnosti (posredno s tem vsakemu odseku oceni tudi trdnost). Največkrat se takšne naprave uporabljajo pri proizvodnji lepljenih nosilcev (glulam), ki se lepijo iz posameznih dolžinsko spojenih lamel. (Plos, 2012)

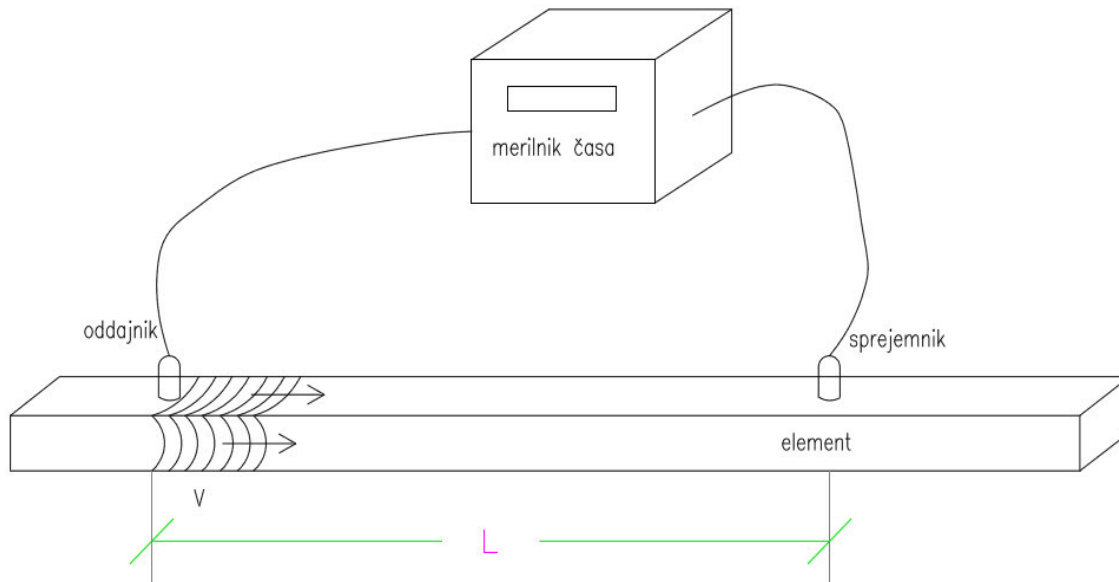
- 2.5.2.3 Ultrazvočna metoda

Naprave merijo čas (Δt) preleta zvoka od oddajnika do prejemnika. Ob poznavanju dolžine poti (L) lahko izračunamo hitrost (V).

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$



Slika 2.5: Ultrazvočni merilnik 1



Slika 2.6: Ultrazvočni merilnik 2

Hitrost potovanja valov je sorazmerna z gostoto medija, po katerem se valovanje širi. Gostoto (ρ) lahko natančno izmerimo ali pa privzamemo karakteristično vrednost merjenega lesa.

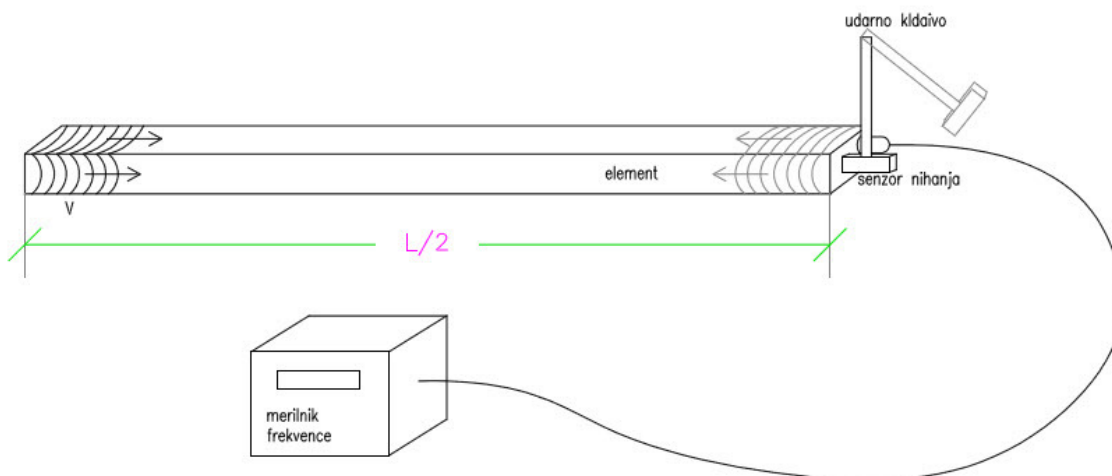
Iz teh dveh vrednosti lahko določimo dinamični modul elastičnosti (E_{din}), ki je preko preiskav posredno povezan s trdnostnim razredom lesa.

$$E_{din} = \frac{\rho}{v^2}$$

Dinamični modul elastičnosti (E_{din}) je v znanem razmerju z modulom elastičnosti (ME).

- 2.5.2.4 Metoda vzdolžnega nihanja

Pri tej metodi najprej vzbudimo vzdolžno nihanje z udarcem kladiva, nato pa s pomočjo tipala - senzorja nihanja merimo lastno frekvenco (f). Tipalo je lahko laser, piezometer ali mikrofoni.



Slika 2.7: Merilnik frekvence

Navadno opazujemo prvo lastno frekvenco, lahko pa opazujemo tudi ostale, saj so v znanem razmerju s prvo. Valovna dolžina (λ) prve nihajne oblike je enaka dvokratni dolžini (L) elementa. (Plos, 2012)

Valovne dolžine vseh nihajnih oblik lahko izračunamo po enačbi:

$$\lambda = \frac{2L}{n}$$

Kjer je

L dolžina kosa lesa,

n zaporedna številka nihajne oblike.

Za razliko od prečnega nihanja, pri vzdolžnem nihanju način podpiranja ni tako pomemben.

Pomembno je le to, da elementa ne vpenjamo. Ko izmerimo lastno frekvenco (f) in pripadajočo valovno dolžino (λ), lahko hitrost valovanja (V) izračunamo po enačbi :

$$V = f\lambda$$

Dinamični modul elastičnosti lesa se, ob poznavanju hitrosti preleta valovanja, določi na enak način kot pri ultrazvočni metodi in sicer:

$$E_{din} = \frac{\rho}{v^2}$$

Dinamični modul elastičnosti (E_{din}) je v znanem razmerju z modulom elastičnosti (ME).

3 MERITVE LASTNOSTI LESA

3.1 Naprava za merjenje trdnosti podjetja ILKON

Naprava je bila, tekom njenega razvoja, umerjena na več kot 1000 kosih slovenskega lesa (smreke). Postopek je potekal tako, da so vsakemu kosu posebej izmerili dinamični modul elastičnosti z različnimi napravami, potem pa kos lesa obremenjevali do porušitve in s tem izmerili globalni modul elastičnosti in trdnost. Na podlagi primerjanja meritev so izračunane korelacije, ki povedo, v kakšnem medsebojnem sorazmerju so posamezne spremenljivke.

Če se vrednost korelacije približuje 1, govorimo o močni linearni odvisnosti dveh spremenljivk. Če se vrednost približuje vrednosti -1, govorimo o močni obratno sorazmerni odvisnosti dveh spremenljivk. Če pa se vrednost približuje 0, je tako linearna kot obratno sorazmerna korelacija šibka. (Plos, 2012)

Tako je bila izračunana tudi korelacija med dinamičnim modulom elastičnosti, dobljenim z neporušno metodo vzdolžnega nihanja in upogibno trdnostjo, dobljeno s porušitvijo preizkušanca.

Korelacija znaša 0,8, kar priča o dobri linearni odvisnosti med omenjenima parametroma.

Ob poznavanju mejnih vrednosti za trdnostne razrede, ki so določene po SIST EN 338 in znani korelaciji med trdnostjo in dinamičnim modulom elastičnosti, lahko z dovolj veliko natančnostjo ocenimo trdnost posameznega preizkušanca.

Preglednica 3.1: Zahtevane mejne lastnosti za posamezne trdnostne razrede po SIST EN 338

Razred	F_r [N/mm^2]	E_r [N/mm^2]	ρ_r [kg/m^3]
C50	50	16000	460
C45	45	15000	440
C40	40	14000	420
C35	35	13000	400
C30	30	12000	380
C27	27	11500	370
C24	24	11000	350
C18	18	9000	320
C16	16	8000	310

Preden sem opravil svoje meritve, je bilo potrebno napravi spremeniti nastavitve na način, ki omogoča razvrščanje v trdnostne razrede C18, C24, C30 in C40.

3.2 Potek meritev

Najprej je bilo potrebno pripeljati material (naključni zložaj letvičenih lamel) na ustrezno mesto in pripraviti točkovni podpori, ki sta omogočali neovirano vzdolžno nihanje lamel.



Slika 3.1: Lamela, pripravljena na meritev

Sledila je priprava naprave, ki za svojo delovanje potrebuje računalnik, ter ostalega potrebnega orodja, kot so meter, kladio, svinčnik in beležka. Naprava je bila nastavljena za merjenje kombinacije trdnostnih razredov C18, C24, C30 ter C40.

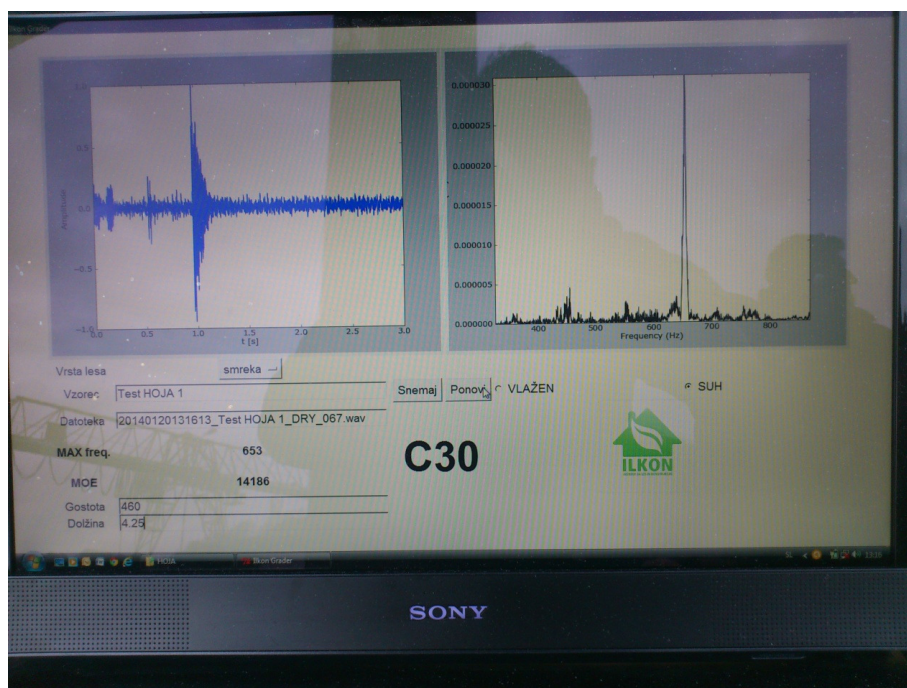
Pred merjenjem je bilo potrebno za vsak kos izmeriti in vnesti njegovo dolžino in ostale dimenzije. Za točne rezultate bi bilo sicer potrebno vsak kos tudi tehtati in izračunati gostoto, a bi bil takšen način preveč zamuden, zato sem gostoto (ρ) posameznega kosa lesa predpostavil. ρ (povprečna) = 460 kg/m³



Slika 3.2: Merjenje preizkušancev

Sledil je vnos podatkov elementa v programski del naprave in udarec s kladivom v smeri vzdolžne osi lamele.

Naprava je nato s pomočjo mikrofona zaznala nihanje lamele in izračunala njeno 1. lastno frekvenco, s pomočjo dolžine in gostote preizkušanca pa še dinamični modul elastičnosti. Na podlagi eksperimentalno dobljenih nastavitvev je na koncu še ocenila trdnostni razred lamele.



Slika 3.3: Lamela, trdnostni razred C30

Sledila je označba lamele za možnost ponovnega testiranja v naslednjih fazah proizvodnje in primerjanja rezultatov.

Med meritvami sem nekajkrat napravil tudi test vlažnosti lesa. Rezultati so se gibali med 7 % in 10 %.



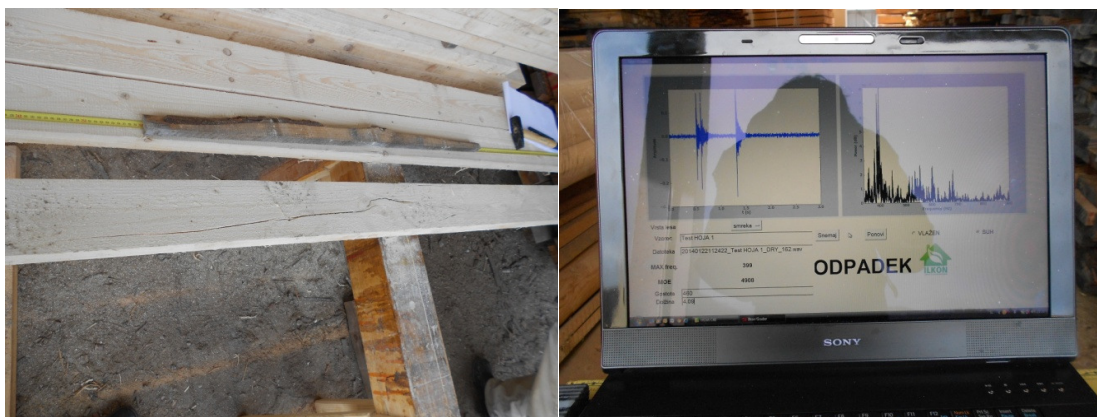
Slika 3.4: Merjenje vlažnosti preizkušancev

Meritve je spremljal tudi tehnolog podjetja Hoja d.d., dolgoletni strokovnjak za vizualno razvrščanje. Zanimivo je bilo, da so bile njegove napovedi pred posameznimi meritvami velikokrat napačne, kljub temu, da je ocenjevanje potekalo precej počasneje, kot poteka na proizvodni liniji. Vizualno ocenjene lamele so bile tako podcenjene, kot tudi precenjene.

Nekaj težav pri določanju rezultatov je imela naprava pri vzdolžno počenih in spiralno zavutih kosih, manjše težave pa je povzročal tudi šum v ozadju, ki se je s svojo frekvenco mešal v odčitke in oteževal izvajanje meritev. Nekaj meritev je bilo zaradi tega potrebno ponoviti.



Slika 3.5: Primer jasnega (levo) in motenega odčitka (desno)

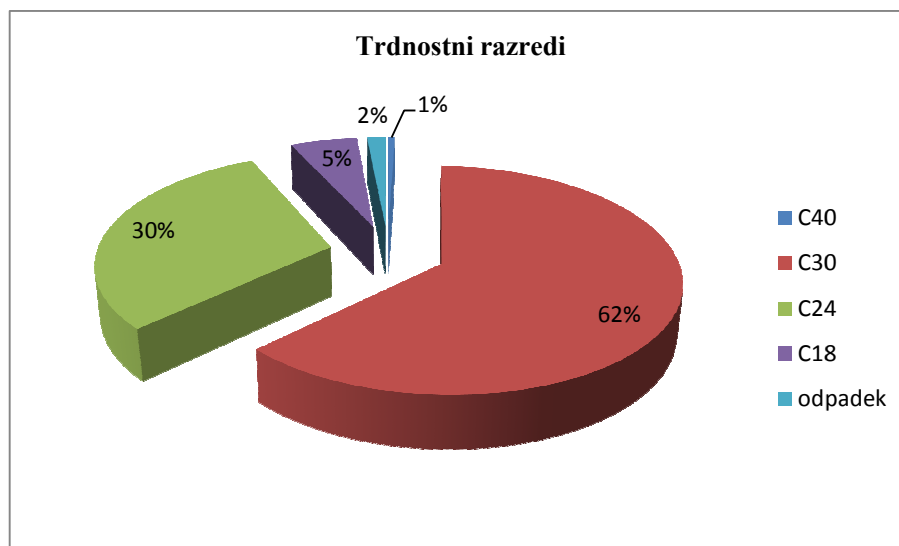


Slika 3.6: Primer počene lamele

Zaradi mehanskih poškodb sem moral 3 lamele umakniti iz vzorca in uvrstiti med odpadke.

Po končanem merjenju vseh lamel, sem želel tem istim lamelam izmeriti trdnost tudi v proizvodni hali, ob prisotnosti ropota proizvodnje, kasneje pa izmeriti še trdnost dolžinsko spojenih lamel, a je bil hrup, ki se je mešal v odčitke prevelik, rezultati meritev pa nezanesljivi.

3.3 Rezultati meritev



Slika 3.7: Rezultati razvrščanja lesenih lamel v trdnostne razrede

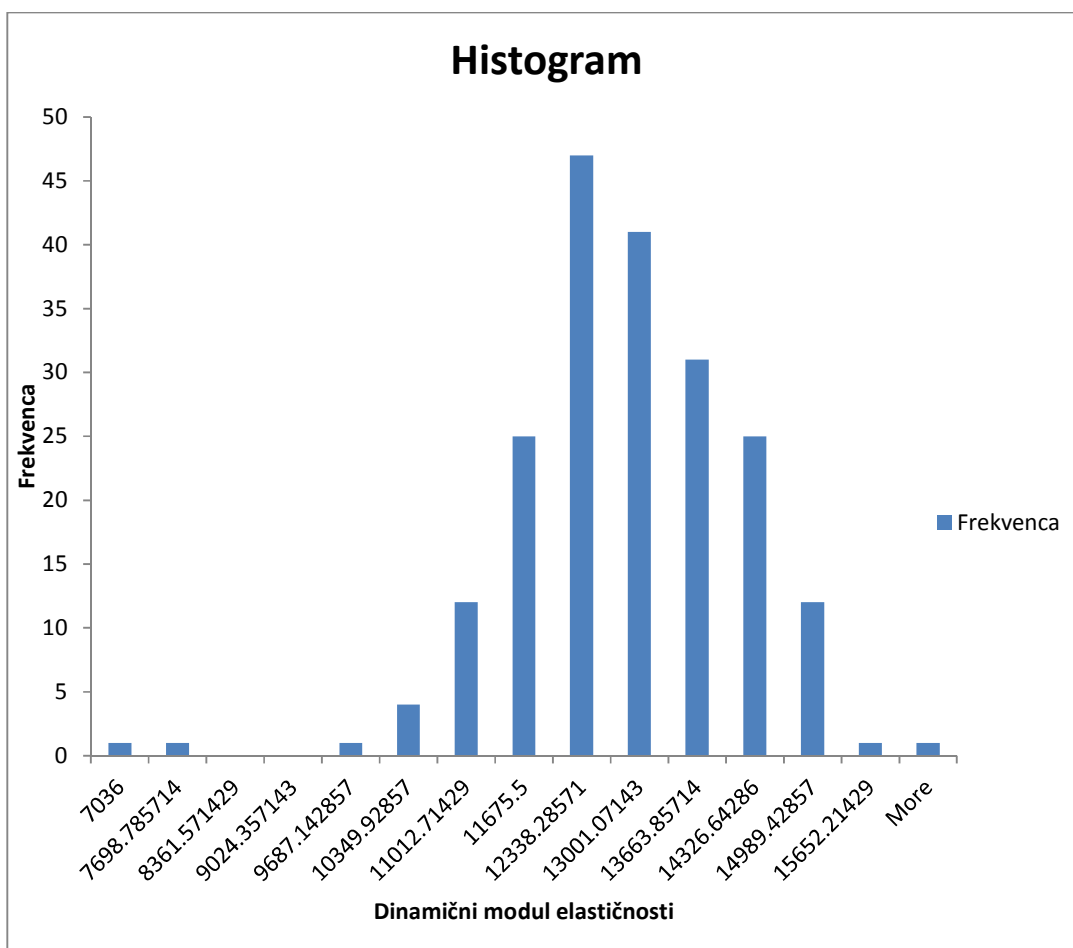
3.3.1 Statistično vrednotenje rezultatov meritev

Srednje vrednosti izmerjenih dinamičnih modulov elastičnosti:

- Aritmetična sredina = 12533 N/mm^2
- Mediana = 12537 N/mm^2
- Modus = 11635 N/mm^2

Varianca in standardni odklon meritev:

- Varianca = 1650796
- Standardna deviacija = 1248 N/mm^2



Slika 3.8: Histogram vzorca 205 lamel

Porazdelitev rezultatov:

- **Preizkus Kolmogorova in Smirnova:**

Pri tem preizkusu želimo ugotoviti, ali lahko na podlagi vzorca zavrnemo ničelno domnevo o porazdelitvi populacije. (Turk, 2012)

H_0 - slučajna spremenljivka χ je porazdeljena normalno.

H_1 - slučajna spremenljivka χ ni porazdeljena normalno.

α [izbrano tveganje] = 0.05

\bar{X} [pričakovana vrednost] = 12533 N/mm²

S_X^* [standardna deviacija] = 1285 N/mm²

Statistika D_n je določena z enačbo

$$D_n = \max |F_x - F_x^*|; n = (1, j)$$

Kjer je

F_x porazdelitvena funkcija (normalna),

$F_x^* = \frac{j}{n}$ empirično porazdeljena funkcija,

j zaporedna številka meritve (številčimo od najmanjše do največje vrednosti),

n vrednost meritve.

$$D_n = 0.04421$$

Območje zavrnitve [0.0952, 1]

Vrednost statistike D_n ne pade v območje zavrnitve, zato ničelne hipoteze ne morem zavrniti.

Ob tveganju $\alpha = 0.05$ ne morem trditi, da porazdelitev ni normalna s pričakovano vrednostjo

$\bar{X} = 12533 \text{ N/mm}^2$ in standardno deviacijo $S_X^* = 1285 \text{ N/mm}^2$.

- **Preizkus Kolmogorova in Smirnova:**

H_0 - slučajna spremenljivka χ je porazdeljena logaritemsko normalno.

H_1 - slučajna spremenljivka χ ni porazdeljena logaritemsko normalno.

α [izbrano tveganje] = 0.05

m_Y [pričakovana vrednost] = 12533 N/mm²

σ_Y^2 [varianca] = 0.01

Statistika D_n je določena z enačbo

$$D_n = \max |F_x - F_x^*|; n = (1, j)$$

Kjer je

F_x porazdelitvena funkcija (logaritemsko normalna),

$F_x^* = \frac{j}{n}$ empirično porazdeljena funkcija,

j zaporedna številka meritve (številčimo od najmanjše do največje vrednosti),

n vrednost meritve.

$$D_n = 0.0514$$

Območje zavrnitve [0.0952, 1]

Vrednost statistike D_n ne pade v območje zavrnitve, zato ničelne hipoteze ne morem zavrniti.

Ob tveganju $\alpha = 0.05$ ne morem trditi, da porazdelitev ni logaritemsko normalna s pričakovano vrednostjo $m_Y = 12533$ N/mm² in varianco $\sigma_Y^2 = 0.01$.

- **Preizkus skladnosti - test χ^2 :**

H_0 - slučajna spremenljivka χ je porazdeljena normalno.

H_1 - slučajna spremenljivka χ ni porazdeljena normalno.

$$p \text{ [št. ocenjenih parametrov]} = 2$$

$$k \text{ [št. razredov]} = 7$$

$$v \text{ [št. prostostnih stopenj]} = k - p - 1 = 5$$

$$\alpha \text{ [izbrano tveganje]} = 0.05$$

$$\bar{X} \text{ [pričakovana vrednost]} = 12533 \text{ N/mm}^2$$

$$S_X^* \text{ [standardna deviacija]} = 1285 \text{ N/mm}^2$$

Statistiko H izračunamo po enačbi:

$$H = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n'_i)^2}{n_i}$$

Kjer je

n_i teoretične velikosti razredov,

n'_i opazovane velikosti razredov.

Preglednica 3.2: Račun statistike H , normalna porazdelitev

H_0 - slučajna spremenljivka χ je porazdeljena normalno.						
razred	interval	zg. meja	dejansko število	F_u	teoretično število	H_i
I	[0, 10999]	10999	18	0.12	23.47	1.28
II	[11000, 11999]	11999	48	0.34	44.96	0.21
III	[12000, 12999]	12999	66	0.64	61.15	0.38
IV	[13000, 13499]	13499	27	0.77	26.74	0.00
V	[13500, 13999]	13999	20	0.87	20.03	0.00
VI	[14000, 14999]	14999	21	0.97	20.10	0.04
VII	[15000, inf.)	1E+26	2	1.00	5.55	2.27
						4.18

$$H = 4.18$$

Meja kritičnega območja [$\chi^2_{1-\alpha, 5}, \infty$)

$$\chi^2_{0.95, 5} = 11.07$$

Vrednost statistike H ne pade v območje zavrnitve, zato ničelne hipoteze ne morem zavrniti. Ob tveganju $\alpha = 0.05$ ne morem trditi, da porazdelitev ni normalna s pričakovano vrednostjo $\bar{X} = 12533 \text{ N/mm}^2$ in standardno deviacijo $S_{\bar{X}}^* = 1285 \text{ N/mm}^2$.

- **Preizkus skladnosti - test χ^2 :**

H_0 - slučajna spremenljivka χ je porazdeljena logaritemsko normalno.

H_1 - slučajna spremenljivka χ ni porazdeljena logaritemsko normalno.

p [št. ocenjenih parametrov] = 2

k [št. razredov] = 7

ν [št. prostostnih stopenj] = $k - p - 1 = 5$

α [izbrano tveganje] = 0.05

m_Y [pričakovana vrednost] = 12468 N/mm^2

σ_Y^2 [varianca] = 0.01

Statistiko H izračunamo po enačbi:

$$H = \sum_{i=1}^k \frac{(ni - n'i)^2}{ni}$$

Kjer je

ni teoretične velikosti razredov,

$n'i$ opazovane velikosti razredov.

Preglednica 3.3: Račun statistike H , normalna logaritemska porazdelitev

H_0 - slučajna spremenljivka χ je porazdeljena logaritemsko normalno						
razred	interval	zg. meja	dejansko število	Fu	teoretično število	Hi
I	[0, 10999]	10999	18.00	0.11	22.24	0.81
II	[11000, 11999]	11999	48.00	0.35	49.24	0.03
III	[12000, 12999]	12999	66.00	0.66	61.51	0.33
IV	[13000, 13499]	13499	27.00	0.78	24.87	0.18
V	[13500, 13999]	13999	20.00	0.87	18.16	0.19
VI	[14000, 14999]	14999	21.00	0.96	18.85	0.25
VII	[15000, inf.)	1E+26	2.00	1.00	7.14	3.70
						5.48

$$H = 5.48$$

Meja kritičnega območja [$\chi^2_{1-\alpha, \nu, \infty}$)

$$\chi^2_{0.95, 5} = 11.07$$

Vrednost statistike H ne pade v območje zavrnitve, zato ničelne hipoteze ne morem zavrniti. Ob tveganju $\alpha = 0.05$ ne morem trditi, da porazdelitev ni logaritemsko normalna s pričakovano vrednostjo $m_Y = 12533 \text{ N/mm}^2$ in varianco $\sigma_Y^2 = 0.01$.

3.3.2 Numerično modeliranje lepljenih nosilcev in primerjanje njihovih efektivnih upogibnih togosti

Iz vrednosti izmerjenega dinamičnega modula elastičnosti (E_{din}) je mogoče oceniti modul elastičnosti (ME) po eksperimentalno dobljeni, linearni enačbi:

$$(ME) = 795.12 \text{ MPa} + E_{din} \cdot 0.815$$

Dobljene vrednosti sem uporabil za modeliranje numeričnega modela za računanje efektivne upogibne togosti $(EI)_{eff}$ lepljenega nosilca. Nosilce sem sestavljal na štiri načine, pri vsakem od teh načinov sem računsko sestavil 1000 lepljencev iz osmih lamel, ki so bile zložene ena na drugo in »zlepljene«.

Efektivno upogibno togost $(EI)_{eff}$ sem določal s pomočjo modificiranega Steinerjevega izraza:

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i l_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

Kjer je

E_i modul elastičnosti,

A_i ploščina prečnega prereza posamezne lamele, $A_i = b_i h_i$,

l_i vztrajnostni moment posamezne lamele, $l_i = \frac{b_i h_i^3}{12}$,

a_i razdalja med težiščem posamezne lamele in celotnim elementom,

γ_i koeficient togosti veznih sredstev, $\gamma_i = \frac{1}{1+k_i}$,

k_i koeficient podajnosti veznih sredstev,

predpostavil sem, da so vsi lepljeni stiki ne-podajni ($k_i = 0$),

b [širina posamezne lamele] = 13 cm,

h [višina posamezne lamele] = 4 cm.

- I.) V prvi skupini so bili nosilci, kjer sem vseh osem lamel vsakega nosilca izbral naključno iz zaloge vrednosti vseh merjenih lamel.

lamela 8
lamela 7
lamela 6
lamela 5
lamela 4
lamela 3
lamela 2
lamela 1

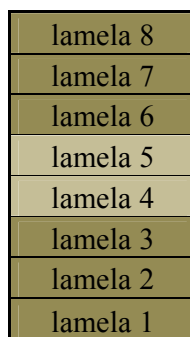
Slika 3.9: Naključno zložene lamele (8 lamel)

Tisoč primerov da rezultate:

$(EI)_{eff}$ - povprečna = 3903.2 kNm²

Standardni odklon = 169.9 kNm²

- II.) V drugi skupini so bili nosilci, kjer sem zgornje tri in spodnje tri lamele vsakega nosilca izbral iz baze najboljših treh četrтин meritev, sredinski dve pa iz preostale četrтine meritev.



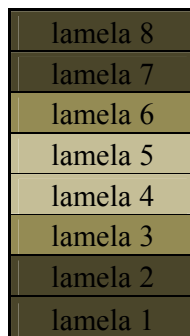
Slika 3.10: Pametno zložene lamele, prvi način (8 lamel)

Tisoč primerov da rezultate:

$$(EI)_{eff} - \text{povprečna} = 4041 \text{ kNm}^2$$

$$\text{Standardni odklon} = 122.9 \text{ kNm}^2$$

- III.) V tretji skupini so bili nosilci, kjer sem zgornji dve in spodnji dve lameli izbral iz najboljše polovice vseh meritev, sredinski dve lameli iz najslabše četrte meritev, vmesni dve lameli pa iz preostale četrte meritev.



Slika 3.11: Pametno zložene lamele, drugi način (8 lamel)

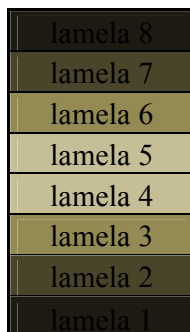
Tisoč primerov da rezultate:

$$(EI)_{eff} - \text{povprečna} = 4068 \text{ kNm}^2$$

$$\text{Standardni odklon} = 135.2 \text{ kNm}^2$$

- IV.) Za račun četrte skupine sem vse meritve razdelil na četrte od najboljše do najslabše. Lamele pa sem izbral tako, da sem za zgornjo in spodnjo lamelo črpal iz

najboljše četrtine meritev, za naslednji dve iz druge najboljše četrtine in tako simetrično naprej do sredine, kjer sem uporabil lamele iz najslabše četrtine.



Slika 3.12: Pametno zložene lamele, tretji način (8 lamel).

Tisoč primerov da rezultate:

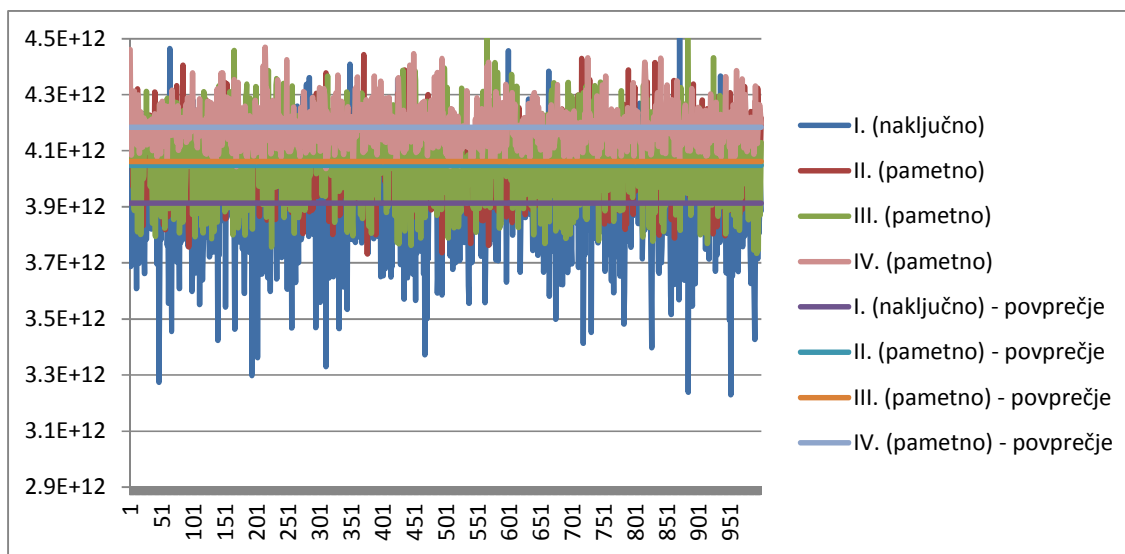
$$(EI)_{eff} - \text{povprečna} = 4180.5 \text{ kNm}^2$$

$$\text{Standardni odklon} = 70.2 \text{ kNm}^2$$

Preglednica 3.4: Prikaz rezultatov numeričnih modelov glede na način zlaganja

	I.	II.	III.	IV.
$(EI)_{eff} - \text{povprečna} [kNm^2]$	3903.2	4041.0	4068.0	4180.5
standardni odklon $[kNm^2]$	169.9	122.9	135.2	70.2
povečanje $(EI)_{eff} [\%]$	0.0	3.5	4.2	7.1

Rezultati prikazujejo povprečne vrednosti efektivnih upogibnih togosti $(EI)_{eff}$ v odvisnosti od vrste zlaganja, pri čemer se povprečne efektivne upogibne togosti povečujejo, varianca oz. standardni odklon pa zmanjšuje.



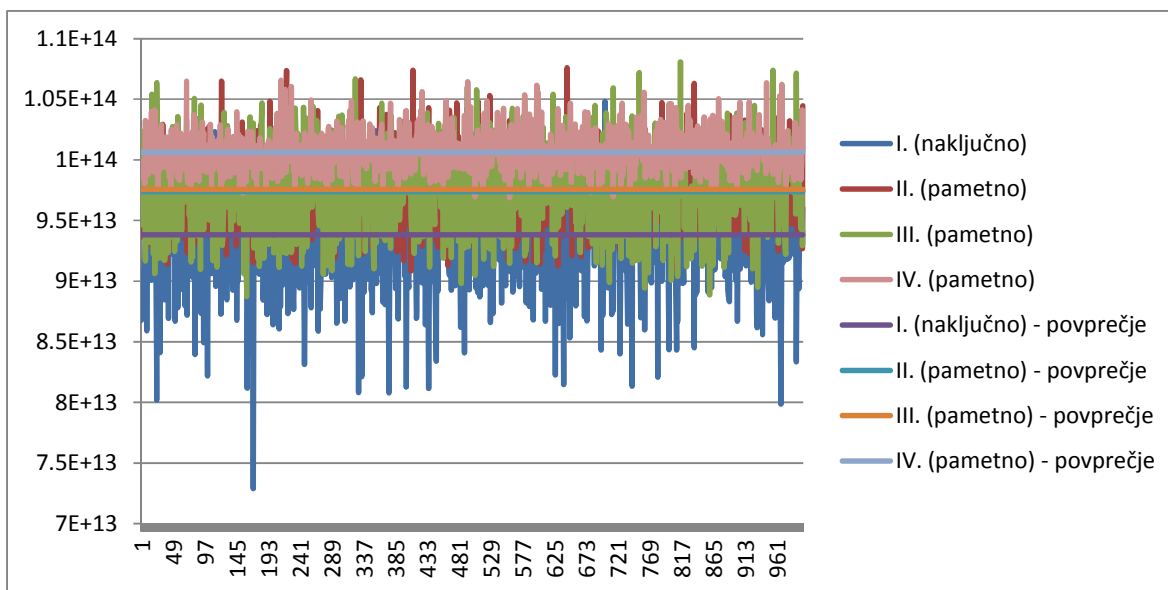
Slika 3.13: Grafični prikaz rezultatov numeričnih modelov

V nadaljevanju sem želel ugotoviti, kaj se zgodi z razmerjem togosti pri različnih načinih zlaganja, če povečam dimenzije lamel in s tem dimenzije celotnega prečnega prereza, zato sem eksperiment ponovil z lamelami širine 20 cm in višine 10 cm (skupaj 8 lamel).

Preglednica 3.5: Prikaz rezultatov numeričnih modelov glede na način zlaganja in povečanih dimenzij vgrajenih lamel

	<i>I.</i>	<i>II.</i>	<i>III.</i>	<i>IV.</i>
$(EI)_{eff}$ - povprečna [kNm^2]	93825.8	97387.6	97573.5	100637.8
standardni odklon [kNm^2]	4143.7	2879.5	3367.2	1665.9
povečanje $(EI)_{eff}$ [%]	0.0	3.8	4.0	7.3

Razmerja povprečnih efektivnih upogibnih togosti, odvisna od načina zlaganja, kljub občutno večjim absolutnim efektivnim upogibnim togostim pri večjih dimenzijah vgrajenih lamel, ostajajo približno enaka. Tudi v tem primeru se povprečne efektivne upogibne togosti povečujejo, varianca oz. standardni odklon pa zmanjšuje.



Slika 3.14: Grafični prikaz rezultatov numeričnih modelov pri večjih dimenzijah vgrajenih lamel

3.3.3 Trdnostni razredi lepljenih nosilcev

Standard SIST EN 1194:2000 v aneksu B navaja omejitve in pogoje za posamezni trdnostni razred pri sestavljanju lesenih lepljenih nosilcev.

Preglednica 3.6: Sestave lepljenih nosilcev po standardu SIST EN 1194:2000

trdnostni razred	GL24	GL28	GL32
homogena sestava	C24	C30	C40
kombinirana sestava zun./not. laminacija	C24/C18	C30/C24	C40/C30

Iz mojega vzorca 205 lamel bi bilo mogoče sestavljati lepljene nosilce kvalitete GL28h z 38 % odpadkom in lepljene nosilce kvalitete GL28c z 8 % odpadkom.

3.4 Določanje mehanskih karakteristik lepljenih nosilcev na reprezentativnem vzorcu

Ker so bile lamele v mojem primeru izbrane le iz enega zložaja, bi o reprezentativnosti za ves slovenski les težko govoril.

Majhen raztros rezultatov meritev ob poznavanju tehnologije žaganja in spravljanja lesa kaže na to, da bi lahko prihajale vse moje lamele iz le nekaj dreves.

Zato sem izračune ponovil še za meritve, opravljene na več kot 1000 kosih slovenskega smrekovega lesa. Meritve so bile opravljene leta 2011 v okviru projekta L2-2214 (Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti). Vzorci za testiranje so bili naključno izbrani iz žag po celi Sloveniji in kot taki predstavljajo reprezentativen vzorec lesa, ki ga imamo pri nas.

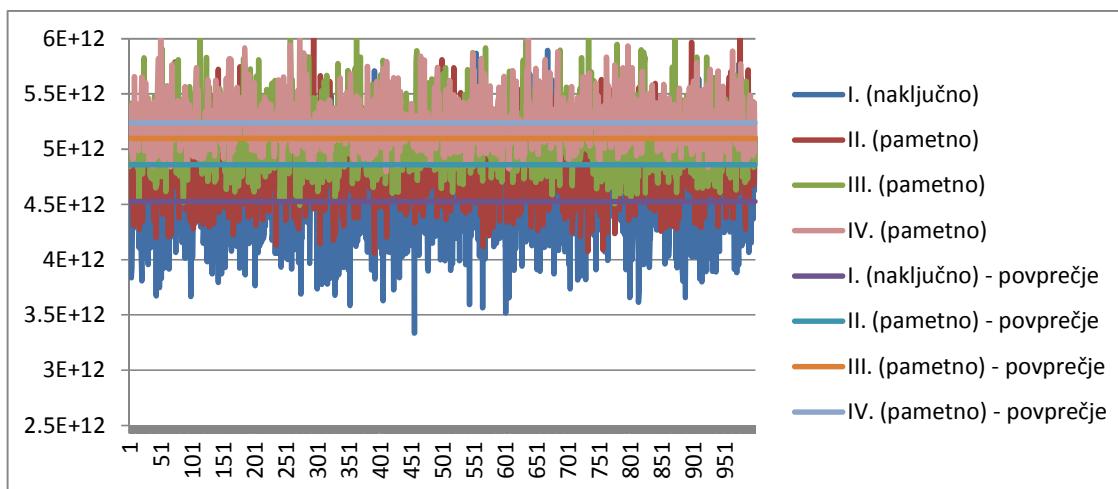
3.4.1 Primerjava efektivnih upogibnih togosti v odvisnosti od načina zlaganja na reprezentativnem vzorcu

Nosilce sem zlagal na enak način, kot v poglavju 3.3.2.

Preglednica 3.7: Prikaz rezultatov numeričnih modelov glede na način zlaganja (reprezentativen vzorec slovenskega lesa)

	<i>I.</i>	<i>II.</i>	<i>III.</i>	<i>IV.</i>
$(EI)_{eff}$ - povprečna [kNm^2]	4518.7	4867.5	5095.8	5242.8
standardni odklon [kNm^2]	408.3	347.1	285.7	227.8
povečanje $(EI)_{eff}$ [%]	0.0	7.7	12.8	16.0

Iz rezultatov je razvidno, da bi samo s pametnim zlaganjem lahko dosegli tudi do 16 % večje togosti, kot z naključnim zlaganjem. Tudi v tem primeru se povprečne efektivne upogibne togosti povečujejo, varianca oz. standardni odklon pa zmanjšuje.



Slika 3.15: Grafični prikaz rezultatov numeričnih modelov (reprezentativen vzorec slovenskega lesa)

3.4.2 Določanje karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev na reprezentativnem vzorcu

Prvi korak pri določitvi karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev je bila ocena karakteristične upogibne trdnosti posameznih lamel.

Karakteristično upogibno trdnost posamezne lamele sem ocenil s pomočjo izmerjenega dinamičnega modula elastičnosti in empirično dobljene enačbe. Enačba je plod pretekle raziskave (L2-2214) in temelji na izračunani korelaciji med upogibno trdnostjo, izmerjeno s porušitvijo vzorca in dinamičnim modulom elastičnosti.

Za račun karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev sem uporabil standard SIST EN 1194:2000, ki v aneksu A predpisuje poenostavitve za račun mehanskih lastnosti lepljenih nosilcev.

Standard SIST EN 1194:2000 za določanje mehanskih lastnosti lepljenih nosilcev narekuje uporabo karakterističnih nateznih trdnosti vgrajenega lesa.

$$f_{m,g,k} = 7 + 1.15 f_{t,0,k}$$

Kjer je

$f_{m,g,k}$ karakteristična upogibna trdnost lepljenega nosilca,

$f_{t,0,k}$ karakteristična natezna trdnost v smeri vlaken.

Iz meritev dinamičnega modula elastičnosti sem lahko izračunal karakteristično upogibno trdnost posamezne lamele s pomočjo katere je bilo lamelam mogoče oceniti karakteristično natezno trdnost. Oceno sem podal s pomočjo preglednice 'Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti masivnega lesa' – SIST EN 338:2003, kjer sem primerjal razmerja med karakteristično upogibno trdnostjo in karakteristično natezno trdnostjo posameznih trdnostnih razredov (C18, C24, C27, C30, C35 in C40).

Preglednica 3.8: Karakteristične trdnosti in togostne lastnosti masivnega lesa, SIST EN 338:2003

	C18	C24	C27	C30	C35	C40
$f_{t,0,k}$ [MPa]	11	14	16	18	21	24
$f_{m,k}$ [MPa]	18	24	27	30	35	40
razmerje	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Pri svojem nadaljnjem izračunu sem predvidel razmerje : $\frac{f_{t,0,k}}{f_{m,k}} = 0.6$

*** Leta 1998 je bil objavljen članek (Johansson, Carl-Johan, Laminations for glued laminated timber : establishment of strength classes for visual strength grades and machine settings for glulam laminations of Nordic origin : a Nordic wood project / Carl-Johan Johansson ... [et al.]), ki za norveški les določa omenjeno razmerje še znatno višje in sicer:*

$$\frac{f_{t,0,k}}{f_{m,k}} = 0.75.$$

Tako ocenjene karakteristične natezne trdnosti sem uporabil za račun mehanskih lastnosti lepljenega nosilca.

Ker je pri poenostavitvah za določanje karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev višina posameznega robnega pasu omejena na najmanj dve lameli (oziroma eno šestino višine

celotnega prereza), sem se odločil prerez lepljenega nosilca povečati na dvanajst lamel. Pri tem načinu na bolj obremenjena robna pasova, namesto boljše polovice, odpade le najboljša tretjina lamel, ostale pa se vgradijo v manj obremenjeni srednji del.

b [širina posamezne lamele] = 13 cm

h [višina posamezne lamele] = 4 cm

lamela 12
lamela 11
lamela 10
lamela 9
lamela 8
lamela 7
lamela 6
lamela 5
lamela 4
lamela 3
lamela 2
lamela 1

Slika 3.16: Pametno zložene lamele, računanje karakteristične upogibne trdnosti (12 lamel)

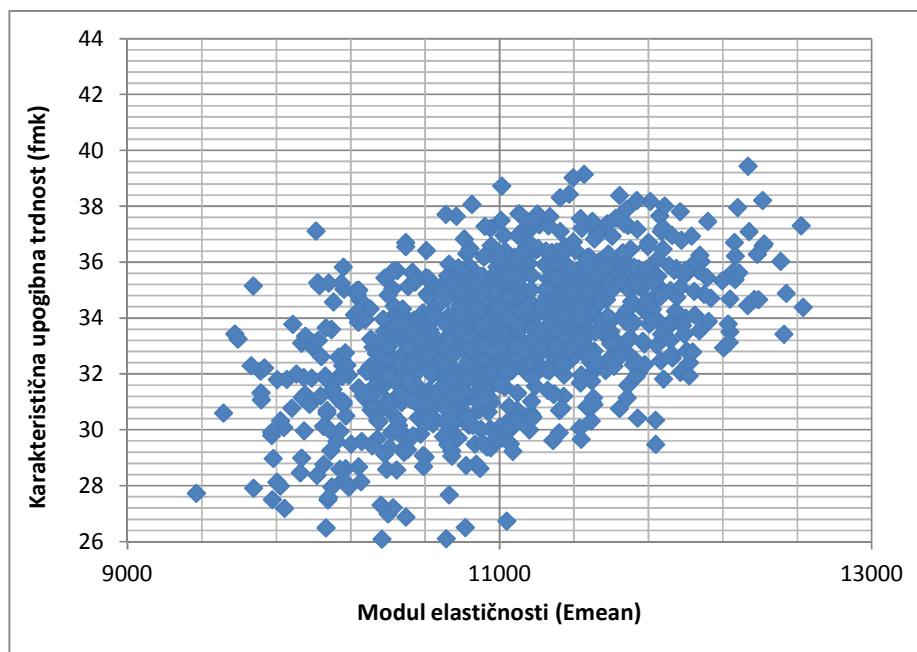
- I.) Z naključnim izbiranjem lamel v posameznem pasu, kjer sem za robna pasova izbral najboljšo tretjino lamel, za sredinski pas pa preostali dve tretjini, sem zložil 1000 lepljenecv in jim določil karakteristično upogibno trdnost. Odpad lesa je bil v tem primeru 0 %.

Preglednica 3.9: Račun karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev (12 lamel)

$f_{m,g,k}$	
povprečna vrednost [MPa]	33.05
standardni odklon [MPa]	2.45

Kjer je

$f_{m,g,k}$ karakteristična upogibna trdnost lepljenega nosilca.



Slika 3.17: Diagram izračunane zveze med $f_{m,g,k}$ in E_{mean} zloženih nosilcev I

- II.) Pri naslednjem načinu zlaganja sem izbral kombinacijo razvrščanja iz raziskave (L2-2214). Odpad je v tem primeru nekoliko večji, in sicer 9 %.

Preglednica 3.10: Kombinacije razvrščanja konstrukcijskega lesa v trdnostne razrede I (Plos, 2012)

Kombinacija I	
C40	51%
C24	40%
C16	6%
ostanek	3%

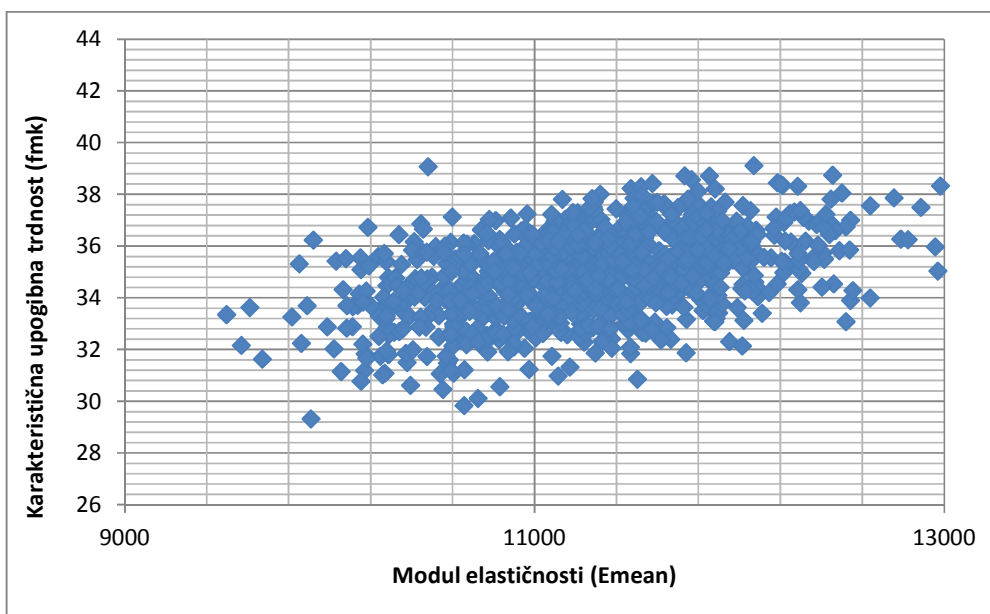
Preglednica prikazuje rezultate za izbrano kombinacijo razvrščanja konstrukcijskega lesa v trdnostne razrede C40, C30, C16 in ostanek. V mojem primeru sem ves les, ki je bil uvrščen v trdnostni razred C16 in v ostanek, obravnaval kot odpad in kot tak ni vključen v računsko analizo.

Preglednica 3.11: Račun karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev, tretji način (12 lamel)

$f_{m,g,k}$	
povprečna vrednost [MPa]	35.60
standardni odklon [MPa]	2.12

Kjer je

$f_{m,g,k}$ karakteristična upogibna trdnost lepljenega nosilca.



Slika 3.18: Diagram izračunane zveze med $f_{m,g,k}$ in E_{mean} zloženih nosilcev II

- III.) Pri zadnjem načinu zlaganja sem izbral spet drugačno kombinacijo razvrščanja. Odpad je tukaj največji in je 26 %.

Preglednica 3.12: Kombinacije razvrščanja konstrukcijskega lesa v trdnostne razrede II (Plos, 2012)

Kombinacija II	
C40	51%
C30	23%
C16	26%
ostanek	0%

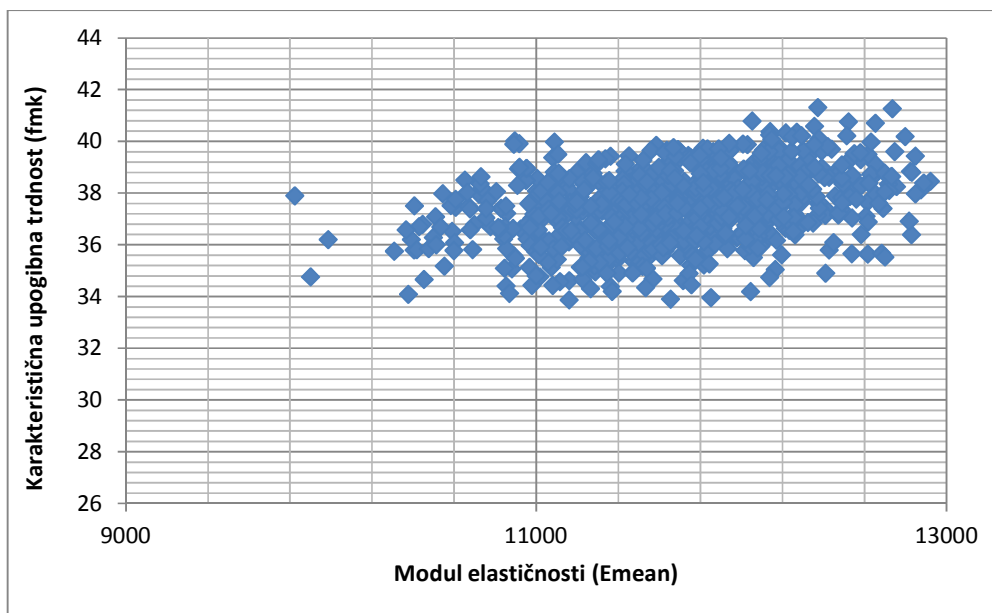
V tem primeru sem ves les, ki je bil uvrščen v trdnostni razred C16 obravnaval kot odpadke in kot tak ni vključen v računsko analizo.

Preglednica 3.13: Račun karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev, četrti način (12 lamel)

$f_{m,g,k}$	
povprečna vrednost [MPa]	37.80
standardni odklon [MPa]	1.39

Kjer je

$f_{m,g,k}$ karakteristična upogibna trdnost lepljenega nosilca.



Slika 3.19: Diagram izračunane zveze med $f_{m,g,k}$ in E_{mean} zloženih nosilcev III

Rezultati kažejo na to, da imamo tudi v Sloveniji dovolj dober les za lepljene nosilce visokih nosilnosti. Z vgradnjo slabših lamel v najmanj obremenjen sredinski del prereza pa bi lahko odpadke še zmanjšali.

4. PRAKTIČNI PRIMER

Za praktični primer sem izbral prosto ležeč, bočno podprt upogibni nosilec iz lamelirano lepljenega lesa. Obravnaval sem trdnostne razrede (*GL24*, *GL28*, *GL32*, *GL36*) standarda SIST EN 1194; 1999.

Pokazal sem, kaj se dogaja z razmerjem izkoriščenosti prereza med mejnim stanjem nosilnosti (*MSN*) in mejnim stanjem uporabnosti (*MSU*) oz. kateri izmed pogojev nosilnosti je merodajen v odvisnosti od prečnega prereza ter razpona.

- Mejno stanje nosilnosti (*MSN*):

$$\text{izkoriščenost prereza} = \frac{M_d}{M_{d,max}}$$

$$M_d = \frac{(1.35 g_k + 1.5 q_k) L^2}{8}$$

$$M_{d,max} = f_{md} W$$

$$f_{md} = k_{mod} \frac{f_{md}}{\gamma_m}$$

$$W = \frac{bh^2}{6}$$

Kjer je

$$k_{mod} = 0.8$$

$$\gamma_m = 1.25$$

- Mejno stanje uporabnosti (*MSU*):

$$\text{izkoriščenost prereza} = \frac{W_{inst}}{W_{inst,lim}}$$

** V vseh mojih primerih je bolj kritičen trenutni povos (W_{inst}), zato razmerja s končnim povosom zaradi lezenja (W_{fin}) niso prikazana.

$$W_{inst} = \frac{5 (g_k + q_k) L^4}{384 E_{0,mean} I}$$

$$W_{inst,lim} = \frac{L}{300}$$

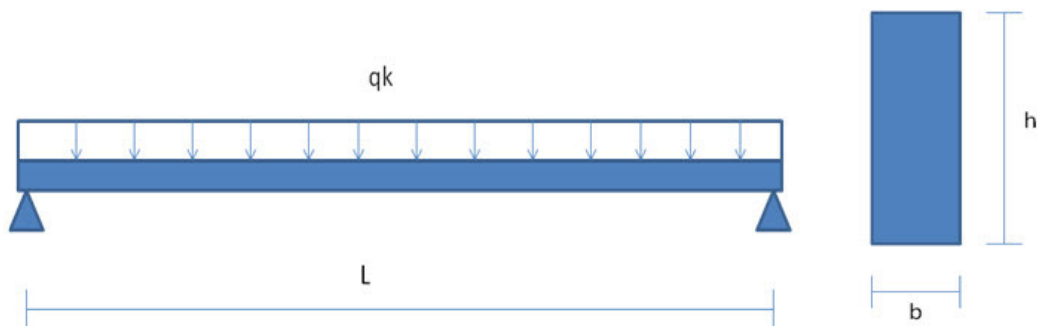
$$I = \frac{bh^3}{12}$$

- Za namen tega računa sem predpostavil konstantne:

L (razpon) = 10 m

b (širina prereza) = 0.2 m

q_k (zvezna obtežba) = 10 kN/m



Slika 4.1: Model prosto ležečega nosilca

Višino prereza (h) sem spreminjal in opazoval, kaj se dogaja z izkoriščenostjo prereza pri različnih kvalitetah lepljenih nosilcev.

Preglednica 4.1: Račun razmerja MSN/MSU za lepljen nosilec kvalitete $GL24h$

$GL24h$	$h [m]$								
$b [m] = 0.2$	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
izkoriščenost MSN	2.36	1.52	1.07	0.79	0.61	0.48	0.40	0.33	0.28
izkoriščenost MSU	3.26	1.69	0.98	0.62	0.42	0.30	0.22	0.17	0.13
razmerje MSN/MSU	0.72	0.90	1.09	1.27	1.45	1.62	1.80	1.94	2.15

Preglednica 4.2: Račun razmerja MSN/MSU za lepljen nosilec kvalitete $GL28h$

$GL28h$	$h [m]$								
$b [m] = 0.2$	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
izkoriščenost MSN	2.03	1.31	0.92	0.68	0.52	0.42	0.34	0.28	0.24
izkoriščenost MSU	3.01	1.56	0.91	0.58	0.39	0.28	0.20	0.15	0.12
razmerje MSN/MSU	0.67	0.84	1.01	1.17	1.34	1.49	1.71	1.89	2.01

Preglednica 4.3: Račun razmerja MSN/MSU za lepljen nosilec kvalitete $GL32h$

$GL32h$	$h [m]$								
$b [m] = 0.2$	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
izkoriščenost MSN	1.78	1.15	0.80	0.60	0.46	0.37	0.30	0.25	0.21
izkoriščenost MSU	2.78	1.44	0.84	0.53	0.36	0.26	0.19	0.14	0.11
razmerje MSN/MSU	0.64	0.80	0.96	1.13	1.28	1.41	1.58	1.78	1.92

Preglednica 4.4: Račun razmerja MSN/MSU za lepljen nosilec kvalitete $GL36h$

$GL36h$	$h [m]$								
$b [m] = 0.2$	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
izkoriščenost MSN	1.58	1.02	0.72	0.53	0.41	0.33	0.27	0.22	0.19
izkoriščenost MSU	2.60	1.34	0.78	0.50	0.34	0.24	0.18	0.13	0.10
razmerje MSN/MSU	0.61	0.76	0.92	1.06	1.21	1.36	1.49	1.71	1.89

- V nadaljevanju sem poiskal pogoje za merodajnost mejnega stanja nosilnosti (*MSN*) in mejnega stanja uporabnosti (*MSU*) tudi računsko.

$$\frac{\text{izkoriščenost } MSN}{\text{izkoriščenost } MSU} > 1$$

$$\frac{\frac{M_d}{M_{d,max}}}{\frac{W_{inst}}{W_{inst,lim}}} > 1$$

$$M_d W_{inst,lim} > M_{d,max} W_{inst}$$

$$\frac{q_d L^2}{8} \frac{L}{300} > f_{m,d} \frac{bh^2}{6} \frac{5q_k L^4}{384 E_{0,mean} \frac{bh^3}{12}}$$

$$\frac{q_d L^3}{2400} > \frac{10 f_{m,d} q_k L^4}{384 E_{0,mean} h}$$

$$h > \frac{q_k 62,5 f_{m,d}}{q_d E_{0,mean}} L$$

Kjer so

M_d	projektni moment,
$M_{d,max}$	maksimalni moment, ki ga prenese prerez,
W_{inst}	trenutni povos,
$W_{inst,lim}$	dovoljeni trenutni povos,
q_d	projektna obtežba,
q_k	karakteristična obtežba,
L	razpon,
$f_{m,d}$	projektna upogibna trdnost,
b	širina prereza,
h	višina prereza,
$E_{0,mean}$	modul elastičnosti.

Preglednica 4.5: Merodajnost pogojev nosilnosti z omejitvijo povesa $W_{inst} = \frac{L}{300}$

	merodajnost MSN		merodajnost MSU
<i>GL24h</i>	$h >$	0.056 L	$> h$
<i>GL28h</i>	$h >$	0.060 L	$> h$
<i>GL32h</i>	$h >$	0.063 L	$> h$
<i>GL36h</i>	$h >$	0.067 L	$> h$

Izpeljava kaže na to, da je merodajnost pogoja nosilnosti pri posamezni kvaliteti nosilca in omejitvi povesa odvisna od razmerja med višino prereza (h), razponom (L), obtežbo (q) in mehanskimi lastnostmi nosilca, ne pa tudi od širine prereza (b).

- Primerjava razlike v nosilnosti različnih kvalitet lepljenih nosilcev.

Preglednica 4.6: Povečanje nosilnosti (merodajno *MSU*)

merodajno <i>MSU</i>				
	<i>GL24h</i>	<i>GL28h</i>	<i>GL32h</i>	<i>GL36h</i>
povečanje nosilnosti [%]	0.0	8.6	17.8	26.1

Preglednica 4.7: Povečanje nosilnosti (merodajno *MSN*)

merodajno <i>MSN</i>				
	<i>GL24h</i>	<i>GL28h</i>	<i>GL32h</i>	<i>GL36h</i>
povečanje nosilnosti [%]	0.0	16.7	33.3	50.0

- Višina nosilca (h), pri polno izkoriščenem prerezu:

$$L \text{ (razpon)} = 10 \text{ m}$$

$$b \text{ (širina prereza)} = 0.2 \text{ m}$$

$$q_k \text{ (zvezna obtežba)} = 18 \text{ kN/m}$$

Preglednica 4.8: Višina polno izkoriščenega prereza *GL24h*

<i>GL24h</i>	h [m]	merodajni pogoj	izkoriščenost <i>MSU</i>
	0.83	<i>MSN</i>	0.66

Preglednica 4.9: Višina polno izkoriščenega prereza *GL28h*

<i>GL28h</i>	<i>h [m]</i>	merodajni pogoj	izkoriščenost <i>MSU</i>
	0.77	<i>MSN</i>	0.76

Preglednica 4.10: Višina polno izkoriščenega prereza *GL32h*

<i>GL32h</i>	<i>h [m]</i>	merodajni pogoj	izkoriščenost <i>MSU</i>
	0.72	<i>MSN</i>	0.85

Preglednica 4.11: Višina polno izkoriščenega prereza *GL36h*.

<i>GL36h</i>	<i>h [m]</i>	merodajni pogoj	izkoriščenost <i>MSU</i>
	0.68	<i>MSN</i>	0.95

Iz rezultatov je razvidno, da lahko z uporabo lepljenih nosilcev večjih nosilnosti prevzamemo iste obtežbe z manj materiala. S tem prihranimo tudi na konstrukcijski višini.

5. UGOTOVITVE

- S pomočjo standarda SIST EN 1194:2000 (aneks B) sem pokazal, da bi bilo mogoče iz mojih vzorčnih lamel sestavljati lepljene nosilce kvalitete *GL28c* z minimalnim odpadom materiala (8 %).
- Izpostavil sem pomembnost, ki jo ima zlaganje lamel na mehanske lastnosti lepljenih nosilcev. Efektivna upogibna togost $(EI)_{eff}$ pri pametno zloženih nosilcih je bila več kot 7 % višja kot pri naključno zloženih nosilcih. Pri pametnem zlaganju pa je poleg višje togosti zelo pomemben tudi manjši raztros v kvaliteti, kar priča o večji konsistenci končnega produkta.
- Poleg svojega vzorca sem obravnaval tudi vzorec, ki je reprezentativen za vso Slovenijo. Pomen zlaganja lamel je v tem primeru še bolj izrazit, saj je razlika efektivnih upogibnih togosti med naključno zloženimi in pametno zloženimi nosilci kar 16 %.
- Na podlagi vzorca, ki je reprezentativen za vso Slovenijo, sem izračunal karakteristične upogibne trdnosti lepljenih nosilcev, ki bi jih bilo mogoče sestavljati iz takšne zaloge lesa. Pokazal sem, da je slovenski les dovolj kvaliteten za izdelavo lepljenih nosilcev najvišjih trdnosti.
- S pomočjo praktičnega in računskega primera sem opazoval mejo med merodajnostjo mejnega stanja nosilnosti in mejnega stanja uporabnosti. Ugotovil sem, da je merodajnost pogoja nosilnosti pri dani omejitvi povesa, odvisna od razmerja višine prereza (h), razpona (L), obtežbe (q) in mehanskih lastnosti nosilca.
- Na praktičnem primeru sem ugotovil, da je mogoče z uporabo lepljenega nosilca boljše kvalitete prenesti tudi do 50 % večjo obtežbo ali pri isti obtežbi uporabiti do 18 % manj lesa.

- Med pisanjem diplomskega dela sem bil seznanjen z dejstvom, da je v pripravi standard, ki bo dovoljeval vgradnjo slabših lamel v najmanj obremenjene dele (oz. v sredino) nosilcev. Samo ta ukrep bi lahko zmanjšal odpadek pri nosilcih najvišjih trdnosti tudi za 10 %.

6. ZAKLJUČEK

Pri svojem raziskovalnem delu sem s pomočjo matematičnih modelov na primeru dveh skupin vzorcev ugotovil, da proces razvrščanja lesa znatno prispeva k učinkovitosti izdelave lesenih lepljenih nosilcev. Z razvrščanjem lesa pridobimo neprecenljive podatke o njegovih mehanskih lastnostih, poznavanje katerih je ključnega pomena za dobro načrtovanje nosilnosti lepljenih elementov. Z ustreznim pristopom lahko izdelujemo nosilce, ki imajo boljše mehanske lastnosti od, tako rekoč standardne kvalitete, *GL24*.

Povese, ki so merodajni pri mejnem stanju uporabnosti (*MSU*) lahko z ukrepom pametnega zlaganja, ki ga omogoča ustrezno razvrščen les, brez odpadka zmanjšamo za 16%, kar je ekvivalent zvišanju trdnosti za 2 razreda. Takšne ugotovitve podpira tudi račun karakterističnih upogibnih trdnosti pametno zloženih lepljenih nosilcev, ki prav tako brez odpadka presegajo mejne vrednosti lepljencev kvalitete *GL32*. Z nekaj odpadka pa bi lahko iz slovenskega lesa brez težav dosegli celo najvišje trdnostne razrede lepljenih nosilcev (*GL36*).

Finančna analiza v diplomsko delo sicer ni vključena, predvidevam pa, da kakovostnejši produkti, ki širijo meje uporabe, širša paleta izvedbenih možnosti, ki potencialno širi trg tudi v tujino in navsezadnje manjši odpadek materiala, zaradi bolj tehnološkega procesa izdelave, lahko pomenijo finančno ugodnejšo perspektivo.

VIRI

- Andoljšek, J. 2010. Inženirske konstrukcije iz lepljenega lameliranega lesa v Sloveniji. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta (samozaložba J. Andoljšek): 121 f.
- Lopatič, J. 2010. Lesene konstrukcije, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 107 str.
- Madsen, B. 1992. Structural behaviour of timber. North Vancouver, Timber Engineering Ltd: 437 str.
- Müller, C. 2000. Holzleimbau. Laminated Timber Construction. Basel; Berlin; Boston; Birkhäuser: 208 str.
- Ozmeč, R. 2013. Opredelitev in lastnosti lesa. Magistrska naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko (samozaložba R. Ozmeč): 86 f.
- Plos, M. 2012. Razvrščanje konstrukcijskega lesa v različne kombinacije trdnostnih razredov. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Plos): 66 f.
- Polanc, J., Leban, I. 2010. Les – zgradba in lastnosti. Ljubljana, Zveza lesarjev Slovenije, Lesarska založba: 64 str.
- Turk, G. 2012. Verjetnostni račun in statistika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 264 str.
- SIST EN 1194:2000. Lesene konstrukcije – Lepljeni lamelirani les – Trdnostni razredi in ugotavljanje značilnih vrednosti.

SIST EN 338:2010. Konstrukcijski les - Trdnostni razredi.

SIST EN 384:2010. Konstrukcijski les - Ugotavljanje značilnih vrednosti mehanskih lastnosti in gostote.

SIST EN 408:2010. Lesene konstrukcije - Konstrukcijski les in lepljeni lamelirani les - Ugotavljanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti.

SIST EN 1912:2004+A4:2010. Konstrukcijski les - Trdnostni razredi - Določitev trdnostnih razredov na podlagi vizualnega razvrščanja in vrste lesa.

SIST EN 14080:2004. Timber structures – Glued laminated timber – Requirements