

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni študij gradbeništva,  
Konstrukcijska smer

Kandidat:

**Matevž Jerman**

**NOSILNI ELEMENTI IZ  
KONSTRUKCIJSKEGA KOMPOZITNEGA  
LESA**

**Diplomska naloga št.: 3139**

**Mentor:**  
doc. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 2010

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani MATEVŽ JERMAN izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »NOSILNE KONSTRUKCIJE IZ KONSTRUKCIJSKEGA KOMPOZITNEGA LESA«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 13.10.2010

---

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

**UDK:** 624.011.1(043.2)  
**Avtor:** Matevž Jerman  
**Mentor:** doc.dr. Jože Lopatič  
**Naslov:** KONSTRUKCIJSKI KOMPOZITNIN LES  
**Obseg in oprema:** 90 str., 18 preg., 7 graf., 64 sl., 78 en.  
**Ključne besede:** konstrukcijski kompozitni les, križno lepljene lesene plošče, LVL, LSL, PSL, OSB, CLT, numerično modeliranje

### **Izvelek**

Diplomska naloga je sestavljena iz dveh delov. Prvi del predstavlja nekoliko obširnejši pregled lastnosti in možnosti uporabe konstrukcijskega kompozitnega lesa. Predstavim proizvodni proces, možne oblike ter možnosti uporabe v gradbeništvu vsake izmed vrst konstrukcijskega kompozitnega lesa. V nadaljevanju se osredotočim na križno lepljen kompozitni les. Podrobneje predstavim možnosti uporabe. Natančneje opišem Blass-ovo metodo izračuna karakteristik nadomestnega homogenega prereza, ki temelji na sestavnih koeficientih. Opišem tudi problem strižne deformacije pravokotno na smer vlaken v ravnini sloja desk, oziroma "rolling shear". Sledi primerjalna analiza križno lepljenih lesenih plošč, opravljena v programu SAP2000. Analizo izvedem na štirih različno debelih ploščah, različnih dolžin. Ugotovim, da je s tem programskim orodjem možno izvesti analizo na več načinov, projektant pa mora trezno presoditi, kateri način je za njegove potrebe najbolj primeren.

---

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 624.011.1(043.2)  
**Author:** Matevž Jerman  
**Supervisor:** Assist.Prof.dr. Jože Lopatič  
**Title:** STRUCTURAL COMPOSIT LUMBER  
**Notes:** 90 p., 18 tab., 7 gr., 64 fig., 78 eq.  
**Key words:** structural composite timber, cross laminated wooden slabs  
LVL, LSL, PSL, OSB, CLT, numerical modeling

### **Abstract**

The study consists of two major parts. In the first part, there is a wider presentation of characteristics and ways of use of structural composite timber. I try to present production process of all kinds of structural composite timber, possible shapes and sizes and it's use in construction. After that, the main focus is on cross-laminated timber. Among other, possibilities of using it in civil engineering are shown. This is followed by a short explanation of basic theory of thin-waled laminates, Blass's method for calculating characteristics for a substitute homogenous profile section. The problem o deformation perpendicular to the grain in the plane of the plate (Rolling-shear) is allso described. This is followed by comparative analysis of cross-laminated timber, made in a computer programe SAP2000. The analysis is made on four plates that have diferent thicknes and have diferent lenghts. Four diferent analysis are made. Almost all of the results can be used for further studies, if the engineer makes the judgment that the analisys is suitable for his needs.

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Jožetu Lopatiču. Zahvala tudi družini in prijateljem, ki mi vseskozi stojijo ob strani. Hvala tudi ostalim, ki so kakorkoli pripomogli pri nastanku te diplomske naloge in me spodbujali v celotnem času študija.

## KAZALO VSEBINE

<b>1.</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>KONSTRUKCIJSKI KOMPOZITNI LES</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Slojnat furnirni les (LVL)</b>	<b>10</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Postopek izdelave slojnatega furnirnega lesa</b>	<b>11</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Uporaba slojnatega furnirnega lesa</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Slojnat kompozitni les iz vzporedno razporejenih lesenih trakov (PSL)</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Postopek izdelave slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih leseni trakov</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Uporaba slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih leseni trakov</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Slojnat kompozitni les iz prosto razvrščenih lesenih trakov (LSL)</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Postopek izdelave slojnatega kompozitnega lesa iz prosto razvrščenih leseni trakov</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Uporaba slojnatega kompozitnega lesa iz prosto razvrščenih lesenih trakov</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Iverna plošča z usmerjenim iverjem (OSB)</b>	<b>20</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Postopek izdelave iverne plošče z usmerjenim iverjem</b>	<b>21</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Uporaba iverne plošče z usmerjenim iverjem</b>	<b>23</b>
<b>2.5</b>	<b>Leseni I-nosilci</b>	<b>24</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Postopek izdelave lesenih I-nosilcev</b>	<b>26</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Uporaba lesenih I-nosilcev</b>	<b>28</b>
<b>2.6</b>	<b>Dvoslojni in troslojni dolžinsko spojen lepljen les (Duo in Trio nosilci)</b>	<b>28</b>
<b>2.6.1</b>	<b>Postopek izdelave DUO in TRIO nosilcev</b>	<b>29</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Uporaba DUO in TRIO nosilcev</b>	<b>30</b>
<b>2.7</b>	<b>Križno lepljene lesene plošče (CLT)</b>	<b>31</b>
<b>2.7.1</b>	<b>Postopek izdelave križno lepljenih lesenih plošč</b>	<b>33</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Uporaba križno lepljenih lesenih plošč</b>	<b>34</b>
<b>2.7.3</b>	<b>Ponudba križno lepljenih lesenih plošč</b>	<b>36</b>

---

<b>3.</b>	<b>PRIMERJALNA ANALIZA KRIŽNO LEPLJENIH</b>	<b>37</b>
	<b>LESENIH PLOŠČ</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Tehnične karakteristike</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Materialne karakteristike križno lepeljnih lesenih plošč podjetja KLH</b>	<b>38</b>
<b>3.3</b>	<b>Osnovne metode analize kompozitnih plošč</b>	<b>38</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Klasična teorija laminatov – CPLT (Classical Laminate Plate Theory)</b>	<b>39</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Strižna teorija prvega reda – FOSDT (First Order Shear Deformation Theory)</b>	<b>40</b>
<b>3.4</b>	<b>Računalniški programi</b>	<b>41</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Program Excel</b>	<b>41</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Program SAP 2000</b>	<b>41</b>
<b>3.5</b>	<b>Izračun efektivnega vztrajnostnega momenta <math>I_{ef}</math> oziroma efektivnega modula elastičnosti <math>E_{ef}</math> na več različnih načinov ter primerjava dobljenih rezultatov</b>	<b>41</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Izračun efektivnega vztrajnostnega momenta <math>I_{ef}</math>, v katerem kot nosilne upoštevamo le vzdolžne sloje glede na proizvodno dolžino plošč</b>	<b>42</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Izračun <math>(EI)_{ef}</math>, v katerem kot nosilne upoštevam tako vzdolžne kot prečne sloje glede na proizvodno dolžino plošče</b>	<b>47</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Izračun <math>(EI)_{ef}</math> po priporočilih proizvajalca KLH</b>	<b>51</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Izračun <math>(EI)_{ef}</math> po predlogu Blass</b>	<b>55</b>
<b>3.5.5</b>	<b>Primerjava <math>(EI)_{ef}</math> po Blassu in <math>(EI)_{ef}</math> po priporočilih KLH</b>	<b>61</b>
<b>3.6</b>	<b>Strižna deformacija v ravnini pravokotni na smer vlaken oziroma "rolling shear"</b>	<b>64</b>
<b>3.7</b>	<b>Modeliranje s programom SAP 2000</b>	<b>68</b>
<b>3.7.1</b>	<b>Modeliranje plošč s pomočjo tankih lupinastih elementov in s karakteristikami nadomestnega homogenega prereza izračunanimi po predlogu Blassa</b>	<b>69</b>
<b>3.7.2</b>	<b>Modeliranje plošč s pomočjo tankih lupinastih končnih elementov in s karakteristikami nadomestnega homogenega prereza izračunanimi po</b>	

<b>priporočilih proizvajalca KLH</b>	<b>73</b>
<b>3.7.3 Modeliranje plošč s pomočjo slojevitih lupinastih elementov</b>	<b>78</b>
<b>3.7.4 Modeliranje plošč s pomočjo prostorskih elementov</b>	<b>83</b>
<b>3.7.5 Primerjava rezultatov doblejnih s programom SAP2000</b>	<b>86</b>
<b>4. ZAKLJUČKI</b>	<b>89</b>
<b>5. VIRI</b>	<b>91</b>



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Primerjava lastnosti elementov z različnim koeficientom variabilnosti (Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen).....	6
Preglednica 2.2: Primerjava upogibnih trdnost nosilcev visokih 286mm .....	8
Preglednica 3.1: Debeline in tipi obravnavanih križno lepljenih lesenih plošč, vrednosti izračunanih efektivnih vztrajnostnih momentov, kjer smo kot nosilne upoštevali le vzdolžne sloje glede na proizvodno dolžino .....	46
Preglednica 3.2: Debeline in tipi obravnavanih križno lepljenih lesenih plošč, vrednosti izračunanih efektivnih vztrajnostnih momentov, kjer smo kot nosilne upoštevali tako vzdolžne kot prečne sloje glede na proizvodno dolžino .....	50
Preglednica 3.3: Debeline in tipi obravnavanih plošč, vrednosti izračunanih efektivnih vztrajnostnih momentov po priporočilih proizvajalca KLH .....	54
Preglednica 3.4: Sestavni koeficienti za lesene križno lepljene plošče (Blass, 2004) .....	56
Preglednica 3.5: Efektivne trdnosti in togosti lesenih križno lepljenih plošč (Blass, 2004) .....	58
Preglednica 3.6: Debeline in tipi obravnavanih plošč, vrednosti sestavnih koeficientov ter efektivnih modulov elastičnosti izračunanih po predlogu Blassa.....	60
Preglednica 3.7: Primerjava $(EI)_{ef}$ izračunanih po priporočilih Blassa in $(EI)_{ef}$ po priporočilih KLH .....	61
Preglednica 3.8: Izmere uporabljenih plošč ( <a href="http://www.rz.uni-karlsruhe.de">www.rz.uni-karlsruhe.de</a> ).....	66
Preglednica 3.9: Plošče izbrane za modeliranje v programu SAP2000 .....	68
Preglednica 3.10: Izračunani pomiki, za različne dolžine in debeline plošč, s programom SAP200, z upoštevanjem karakteristik dobljenih po priporočilih Blassa .....	72
Preglednica 3.11: Izračunani pomiki za različne dolžine in debeline plošč, s programom SAP2000, z uporabo tankih lupinastih elementov in z	

uporabo efektivnega vztrajnostnega momenta izračunanega po priporočilih proizvajalca križno lepljenih plošč KLH .....	76
Preglednica 3.12: Izračunani pomiki za različne dolžine in debeline plošč s programom SAP2000, z uporabo slojevitih lupinastih elementov ..	81
Preglednica 3.13: Izračunani pomiki za različne dolžine in debeline plošč s programom SAP2000, z uporabo prostorskih elementov .....	85

---

## KAZALO GRAFIKONOV

Graf 3.1: Prikaz razlik med $(EI)_{ef}$ izračunan na 4 različne načine.....	63
Graf 3.2: Efektivni modul elastičnosti napram razmerju dolžin/debelina za upogib pravokotno na ravnino plošče in vzporedno z potekom vlaken zunanjega sloja.....	67
Graf 3.3: Razmerje med upogibnimi in strižnimi deformacijami glede na razmerje dolžina/debelina ( <a href="http://www.rz.uni-karlsruhe.de">www.rz.uni-karlsruhe.de</a> ) .....	67
Graf 3.4: Primerjava vertikalnih pomikov na sredini razpona tri slojne križno lepljene lesene plošče debeline 95 mm.....	87
Graf 3.5: Primerjava vertikalnih pomikov na sredini razpona pet slojne križno lepljene lesene plošče debeline 146 mm.....	87
Graf 3.6: Primerjava vertikalnih pomikov na sredini razpona sedem slojne križno lepljene lesene plošče debeline 226 mm.....	88
Graf 3.7: Primerjava vertikalnih pomikov na sredini razpona osem slojne križno lepljene lesene plošče debeline 248 mm.....	88

## KAZALO SLIK

Slika 1.1: Primer »dolge hiše« ( <a href="http://www.blm.gov/">http://www.blm.gov/</a> ) .....	1
Slika 1.2: Trinadstropna pagoda Slika 1.3: Borgundska cerkev .....	2
Slika 2.1: Shema razdelitve lesnih kompozitov (Vir: Šernjavič D., Lepljen les za konstrukcijske namene) .....	9
Slika 2.2: Primerjava trdnostnih lastnosti masivnega lesa (C24), lameliranega lepljenega lesa (GL32) in slojnatega furnirnega lesa .....	11
Slika 2.3: Shematskin prikaz proizvodnje LVL .....	12
Slika 2.4: LVL Microllam® ( <a href="http://www.ultralam.com/ultralam_history.php">http://www.ultralam.com/ultralam_history.php</a> ) .....	13
Slika 2.5: LVL Ultrallam® ( <a href="http://www.taittimber.com.au">http://www.taittimber.com.au</a> ).....	14
Slika 2.6: Izdelki PSL Slika 2.7: Glavne proizvodnje faze PSL .....	15
Slika 2.8: Shematski prikaz proizvodnje slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih lesenih trakov (Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen).....	16
Slika 2.9: Primer stika PSL elementov Slika 2.10: Konstrukcija iz PSL elementov .....	17
Slika 2.11: Shematski prikaz proizvodnje slojnatega kompozitnega lesa iz prosto razvrščenih lesenih trakov (Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen).....	19
Slika 2.12: Primer uporabe LSL ( <a href="http://www.big-creek.com">http://www.big-creek.com</a> ).....	20
Slika 2.13: Primer uporabe LSL ( <a href="http://archrecord.construction.com">http://archrecord.construction.com</a> ).....	20
Slika 2.14: OSB plošča pred stiskanjem Slika 2.15: OSB plošča .....	21
Slika 2.16: Shema postopka izdelave iverne plošče z usmerjenim iverjem (Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen).....	23
Slika 2.17: Uporaba ivernih plošč z usmerjenim iverjem za predelne stene ( <a href="http://www.norbord.com/images/OSB3.jpg">http://www.norbord.com/images/OSB3.jpg</a> ).....	24
Slika 2.18: Uporaba iverne plošče z usmerjenim iverjem kot talna obloga ( <a href="http://livemodern.com/">http://livemodern.com/</a> ) .....	24
Slika 2.19: Prečni prerez lesenega I-nosilca.....	25
Slika 2.20: Leseni I-nosilci Slika 2.21: Primer uporabe lesenih I-nosilcev ..	26
Slika 2.22: Shematski prikaz proizvodnje I-nosilcev .....	27
Slika 2.23: Prečni prerez DUO in TRIO nosilcev ( <a href="http://www.kvh.eu/">http://www.kvh.eu/</a> ) .....	29

---

Slika 2.24: Naprava za stiskanje DUO in TRIO nosilcev ( <a href="http://www.ledinek.com">www.ledinek.com</a> ) .....	30
Slika 2.25: Primer uporabe DUO in TRIO nosilcev.....	31
Slika 2.26: Detajl ostrešja iz DUO oziroma TRIO nosilcev .....	31
Slika 2.27: 5 slojne križno lepljene      Slika 2.28: Možnosti uporabe križno.....	33
Slika 2.29: Notranjost stanovanjske stavbe iz CLT med gradnjo .....	34
Slika 2.30: Poslovni objekt iz CLT med gradnjo    Slika 2.31: Murray grove tower	35
Slika 2.32: Murray grove tower; zasnova, končni izgled.....	35
Slika 3.1: Nedeformirana in deformirana plošča v skladu s Kirchhoff-ovimi predpostavkami ( <a href="http://www-g.eng.cam.ac.uk">www-g.eng.cam.ac.uk</a> ) .....	40
Slika 3.2: 3-slojna plošča z označenimi debelinami, sloji in le tem pripadajočimi ročicami .....	42
Slika 3.3: Prikaz številčenja slojev pri 5 slojni plošči .....	43
Slika 3.4: Prikaz številčenja slojev pri 7 slojni plošči .....	44
Slika 3.5: Prikaz številčenja slojev pri 7 slojni ss plošči, zunanji dve plasti sta enako orientirani.....	44
Slika 3.6: Prikaz številčenja slojev pri 8 slojni ss plošči, zunanji in pa srednji dve plasti sta enako orientirani .....	45
Slika 3.7: Nosilec preko enega polja .....	53
Slika 3.8: Sestava in oznake slojev križno lepljene plošče (m=5) .....	57
Slika 3.9: Prikaz napetostno-deformacijskega stanja v slojevitem elementu in v odgovarjajočem nadomestnem enoslojnem elementu (Blass, 2004) .....	59
Slika 3.10: Napetosti, ki se pojavijo v lesu zaradi strižne obremenitve .....	64
Slika 3.11: Porušitev zaradi delovanja strižne obremenitve pravokotno na smer vlaknen (obe sliki: <a href="http://www.rz.uni-karlsruhe.de">www.rz.uni-karlsruhe.de</a> ) .....	65
Slika 3.12: Upogibne in strižne napetosti 5 slojne lesene kompozitne plošče obremenjene pravokotno na ravnino plošče, upogib a) vzporedno z vlakni zunanje plasti b) pravokotno na vlakna zunanje plasti ( <a href="http://www.rz.uni-karlsruhe.de">www.rz.uni-karlsruhe.de</a> ) .....	65
Slika 3.13: Materialne karakteristike za 3 slojno križno lepljeno leseno ploščo, debeline 95 mm, izračunane po predlogu Blassa.....	70

---

Slika 3.14: Geometrijske karakteristike 3 slojne križno lepljene lesene plošče debeline 9,5 cm in korekcijski faktorji .....	71
Slika 3.15: Pomik 3 slojne, 8 metrske križno lepljene lesene plošče, izračunan s programom SAP200, z upoštevanjem karakteristik dobljenih po priporočilih Blassa .....	73
Slika 3.16: Prikaz osem metrske križno lepljene lesene plošče razdeljene na končne elemente dimenzije 20 cm x 20 cm .....	74
Slika 3.17: Materialne karakteristike za križno lepljeno leseno ploščo v programu SAP200 verzija 10.0.1 .....	74
Slika 3.18: Geometrijske karakteristike osem slojne, osem metrske plošče, debeline 24,8 cm in korekcijski faktorji .....	75
Slika 3.19: Prikaz deformirane osem metrske, osem slojne križno lepljene plošče in pomikov na sredini razpona .....	77
Slika 3.20: Prikaz napetosti v smeri plošče, na zgornji ploskvi osem metrske, osem slojne križno lepljene lesene plošče [ $\text{kN/m}^2 \cdot 10^{-3}$ ] .....	77
Slika 3.21: Prikaz napetosti v smeri plošče, na spodnji ploskvi osem metrske, osem slojne križno lepljene lesene plošče [ $\text{kN/m}^2 \cdot 10^{-3}$ ] .....	78
Slika 3.22: Prikaz sestave slojevitega lupinastega sedem slojnega križno lepljen lesenega elementa v programu SAP2000 .....	79
Slika 3.23: Materialne karakteristike lesa .....	80
Slika 3.24: Normalne napetosti v vzdolžni smeri, na vrhu zgornjega nosilnega sloja, sedem slojne križno lepljene lesene plošče [ $\text{kN/m}^2 \cdot 10^{-3}$ ] .....	82
Slika 3.25: Normalne napetosti v vzdolžni smeri, v sredini petega (šteto od spodaj navzgor) sloja, gledano v pozitivni smeri osi z, sedem križno lepljene lesene [ $\text{kN/m}^2 \cdot 10^{-3}$ ] .....	82
Slika 3.26: Normalne napetosti v vzdolžni smeri, v sredini tretjega (šteto od spodaj navzgor) sloja, gledano v pozitivni smeri osi z, sedem križno lepljene lesene [ $\text{kN/m}^2 \cdot 10^{-3}$ ] .....	82
Slika 3.27: Normalne napetosti v vzdolžni smeri, na spodnjem robu spodnjega nosilnega sloja, sedem slojne križno lepljene lesene plošče [ $\text{kN/m}^2 \cdot 10^{-3}$ ] .....	83

---

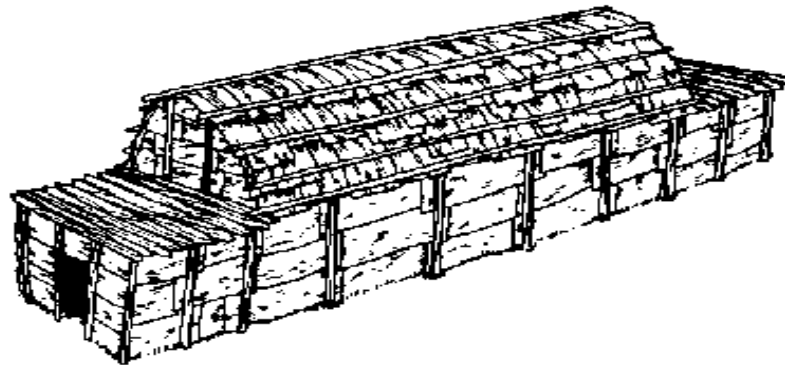
Slika 3.28: materialne karakteristike za križno lepljeno leseno ploščo v programu SAP2000 verzija 14 .....	84
Slika 3.29: Plošča modelirana s prostorskimi končnimi elementi.....	86





## 1. UVOD

Od nekdanj je človek potreboval zaščito pred snegom, vetrom, dežjem in mrazom. V ta namen se je že od starodavnih časov uporabljal les in iz njega sprva gradil precej primitivna skrivališča pred različni vremenskimi pojavi, kmalu pa tudi že dosti bolj sofisticirane zgradbe. Arheološke najdbe potrjujejo obstoj »Dolge hiše« iz obdobja 3000 let pred našim štetjem, gradili so jih naši predniki v centralni Evropi, bile so do 45 metrov dolge in do 7 metrov široke (slika 1) . Na Japonskem še vedno stoji trinadstropna lesena pagoda (slika 2), ki je bila zgrajena v sedmem stoletju našega štetja, na Norveškem pa je ohranjena Borgundska cerkev (slika 3), zgrajena v dvanajstem stoletju našega štetja. Zadnja primera pričata o obstojnosti lesa, seveda če je le ta primerno zaščiten in vzdrževan. Drugo področje gradnje z lesom je mostogradnja. Leta 55 pred našim štetjem je dal Julius Caesar postaviti 140 metrov dolg lesen most, gradnja je trajala vsega 10 dni. V Švici pa je še vedno ohranjen 222 metrov dolg »Chapel Bridge«, zgrajen leta 1333, v švicarskem Luzernu.



Slika 1.1: Primer »dolge hiše« ( <http://www.blm.gov/>)



Slika 1.2: Trinadstropna pagoda  
(<http://www.woodyjoe.com>)



Slika 1.3: Borgundska cerkev  
(<http://upload.wikimedia.org/>)

Leta 1999 je bilo po celem svetu posekanih približno 3300 milijonov kubičnih metrov lesa, od tega se ga je 55% porabilo za kurjavo, kakih 27% za izdelavo papirja in lesne kaše, ostalih 18% pa za žagan les in druge lesne gradbene proizvode. Les se uporablja kot glavni gradbeni material pri gradnji stanovanjskih hiš, večnadstropnih stanovanjskih in poslovnih objektih, športnih in industrijskih halah, nadstreških, mostovih in še bi lahko naštevali. Pri manjših konstrukcijah, kot so enostanovanjske in večstanovanjske hiše, poslovnih ter poslovno-stanovanjskih objektih, so glavni tipi nosilnih konstrukcij naslednji: kladna/brunasta nosilna konstrukcija, predalčna nosilna konstrukcija, steburna nosilna konstrukcija, panelna nosilna konstrukcija, okvirna nosilna konstrukcija in pa masivna nosilna konstrukcija. Za gradnjo inženirskih objektov, kjer se uporabljajo predvsem elementi iz lepljenega lameliranega lesa in elementi iz slojnatega furnirnega lesa (konstrukcijski kompozitni les iz zlepljenih furnirnih trakov), pa nosilno konstrukcijo predstavljajo predvsem upogibni nosilci in loki. Pri kompleksnejših konstrukcijskih sistemih pa so iz lesa lahko le posamezni deli nosilne konstrukcije kot so stebri, grede okvirjev, osnovni elementi branastih konstrukcij, paličij in lokov.

Uporaba lesa, za gradnjo, prinaša veliko prednosti v primerjavi z drugimi običajnimi konstrukcijskimi materiali kot sta na primer beton in jeklo. Les je okolju prijazen in ga je lahko reciklirati, poraba energije med proizvodnjo oziroma obdelavo je zelo nizka v primerjavi z drugimi materiali. Ima majhno težo glede na nosilnost, kar je velika prednost pri gradnji, transportu in pa seveda pri potresni odpornosti zgradbe. Poleg vsega tega pa so lesene zgradbe zelo estetske, elegantne in prijetne za življenje, zaradi česar je les priljubljen tudi med arhitekti.

Čeprav se les kot gradbeni material uporablja že tisočletja in se ga v gradbene namene porabi približno 600 milijonov kubičnih metrov letno, pa to ne pomeni, da o njem zares veliko vemo, oziroma da zelo dobro znanstveno razumemo njegovo obnašanje in pa same materialne karakteristike. Ravno obratno, znanje o gradnji z lesom je v veliki meri temeljilo na empiričnih dognanjih in pa obrtniških spretnostih. To pa se s prihodom modernih lesnih kompozitnih materialov počasi spreminja.

Lesni kompoziti so se pojavili v 20. stoletju in so se razvijali istočasno z razvojem sintetičnih lepil in ustreznih tehnologij za izdelavo lesnih kompozitov. Kot prvi lesni kompoziti so razcvet doživele vezane plošče (med I. svetovno vojno), ki so se uporabljale predvsem za izdelavo letal. Med in po II. svetovni vojni so se pospešeno razvijala sintetična lepila, istočasno pa je močno napredoval razvoj kompozitov iz dezintegriranega lesa (vlakna, iveri).

Danes so lesni kompoziti v našem življenju nenadomestljivi, saj je njihova uporaba razširjena na mnogo različnih področjih kot so uporaba v konstrukcijske namene, stavbno in stanovanjsko pohištvo, itd. Njihova prednost pred masivnim lesom je dimenzijska stabilnost, skoraj neomejene količine in dimenzije, z ustreznimi prekrivnimi sredstvi pa lahko dosežemo visoko odpornost proti vremenskim pojavom, zanimive teksture in izgled površin. Z ustreznimi dodatki pa lahko dosežemo tudi izboljšano odpornost proti vlagi, glivam, insektom, ognju, itd. Med lesne kompozite štejemo proizvode narejene iz lesnih iveri, furnirjev, letev in desk, ki so pod vplivom pritiska in temperature spojeni z lepili. Tako lesna industrija po svetu z različnimi tehnologijami obdelave in predelave lesa proizvaja na desetine različnih proizvodov, polproizvodov in kompozitov. Lesni kompoziti se med seboj razlikujejo predvsem po:

- načinu izdelave,
- sestavi (lastnosti lepila, mehanske lastnosti lesa),
- namembnosti (izolativna, nosilna,...),
- mehanskih lastnostih (trdota, trdnost, odpornost proti obrabi,...),
- reoloških lastnostih (lezenje, krčenje,...),
- fizikalnih lastnostih (dimenzijska stabilnost, toplotna in zvočna izolativnost, elektrostatičnost, vlažnost, prostorninska teža,...) in
- estetskih lastnostih (tekstura, barva, dekorativnost).

## 2. KONSTRUKCIJSKI KOMPOZITNI LES

Les je človeku skozi njegovo zgodovino predstavljal surovino za izdelavo mnogih izdelkov in konstrukcij, brez katerih si napredka človeške vrste najbrž niti ne znamo predstavljati, s pomočjo sodobnih tehnoloških postopkov za obdelavo lesa, pa se je njegova uporabnost še povečala. Običajni žagan les vsebuje napake, ki lahko predstavljajo velike probleme, poleg tega pa je še omejenih dimenzij.

Konstrukcijski kompozitni les lahko proizvedemo v najrazličnejših velikostih in presekih, lahko zlepimo več posameznih elementov skupaj in tako tvorimo T nosilce, I nosilce, razne škatlaste prereze in pa različne sendvič konstrukcije. Ena glavnih prednosti konstrukcijskega kompozitnega lesa pa je način izdelave, kjer večje kose sestavljamo iz manjših delcev (furnirjev, ivri ter vlaken). Pri tem procesu pride do razpršitve naravnih makro napak v lesu, zaradi česar so mehanske in fizikalne lastnosti končnega izdelka veliko bolj konsistentne. To pa pomeni večjo varnost oziroma nižjo verjetnost porušitve, kar je razvidno iz naslednjega primera, povzetega po Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen:

Nosilce, dimenzij 38\*89mm, obremenimo z enakomerno porazdeljeno osno obremenitvijo 3,84 MPa in standardno deviacijo 0,769 MPa. Predpostavimo, da imajo nosilci enakomerno porazdeljeno nosilnost. Po teoriji gradbene zanesljivosti (structural reliability) lahko, ob predpostavki, da imamo podano obremenitev ( $U$ ) in nosilnost ( $R$ ), ki morata biti enakomerno porazdeljeni in medsebojno neodvisni, s pomočjo indeksa zanesljivosti, oziroma »Hasofer-Lind« varnostnega indeksa  $\beta$ , izračunamo verjetnost porušitve ( $P_f$ ) po naslednji enačbi:

$$\beta = \frac{R' - U'}{\sqrt{Rsd^2 - Usd^2}} \quad (2.1)$$

$$(2.2)$$

pri čemer so:

- $P_f$  verjetnost porušitve,
- $U'$  povprečna obremenitev,
- $Usd$  standardna deviacija obremenitve,

- $R'$  povprečna nosilnost,
- $R_{sd}$  standardna deviacija nosilnosti,
- $\varphi(x)$  funkcija verjetnosti normalne porazdelitve (tabelirana vrednost) in
- $\beta$  indeks zanesljivosti oziroma »Hasofer-Lind« varnostni indeks.

V našem primeru imamo 3 elemente z enako povprečno nosilnostjo  $R' = 35$  MPa, vendar z različnim koeficientom variacije trdnosti, kot je prikazano v preglednici 2.1. Vrednosti koeficienta variacije trdnosti odgovarjajo sledečim vrstam lesa: vizualno razvrščen masivni les (35%), strojno razvrščen masivni les (20%) in konstrukcijski kompozitni les (10%). Elemente iz različnega lesa tako lahko primerjamo med seboj na podlagi  $\beta$  in  $P_f$ . Iz primera je jasno razvidno izboljšanje lastnosti obratno sorazmerno z naraščanjem koeficienta variacije trdnosti.

Preglednica 2.1: Primerjava lastnosti elementov z različnim koeficientom variabilnosti (Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen)

Primer	Povprečna nosilnost (MPa)	Ocenjeni koeficient variacije trdnosti (%)	Standardna deviacija nosilnosti (MPa)	$\beta$	$P_f$
Masivni les (viz. razvrščen)	35	35	12,25	2,54	$\approx 0,0055$
Masivni les (ročno razvrščen)	35	20	7	4,484	$\approx 0,000005$
Konstrukcijski kompozitni les (SCL)	35	10	3,5	8,711	$\approx 0$

Pod imenom konstrukcijski kompozitni les (structural composit lumber) razumemo lesne proizvode sestavljene iz listov furnirja, trakov furnirja ali dolgih in tankih ploščatih iveri kateri so zlepjeni v obliko določenega konstrukcijskega proizvoda.

Glavni predstavniki konstrukcijskega kompozitnega lesa so :

- LVL slojnat furnirni les (laminated veneer lumber),
- PSL slojnat kompozitni les iz vzporedno razporejenih lesenih trakov (paralel strand lumber),
- LSL slojnat kompozitni les iz prosto razvrščenih lesenih trakov (laminated strand lumber).

Poleg teh, pa bom podrobneje opisal in predstavil še:

- OSB iverna plošča z usmerjenim iverjem (oriented strand board),
- Lesene I-nosilce,
- Dvoslojni in troslojni dolžinsko spojen lepljen les (Duo in trio nosilci)
- CLT križno lepljene lesene plošče (cros laminated timber).

Pri slojnatem furnirnem lesu, slojnatem kompozitnem lesu iz vzporedno razporejenih trakov ter slojnatem kompozitnem lesu iz prosto razvrščenih trakov je orientacija vlaken osnovnih lesenih gradnikov vzporedna z vzdolžno osjo proizvoda. Podobno je pri nosilcih iz dvoslojnega in troslojnega dolžinsko spojenega les, le da so osnovni gradniki le teh veliko večjih dimenzij (gre v bistvu za lepljen lameliran lesen proizvod). Pri ivernih ploščah z usmerjenim iverjem in pa križno lepljenih lesenih ploščah pa se smeri vlaken osnovnih lesenih gradnikov v večih plasteh večkrat križajo. Vsem tem materialom je skupno to, da se za njihovo proizvodnjo uporabljajo bolj ali manj zapleteni in dragi tehnološki postopki, za vse se uporabljajo posebna konstrukcijska lepila z visoko trdnostjo in trajnostjo, ki so poleg tega odporna proti vodi, povišani vlažnosti (v večini primerov) in povišani temperaturi. Zelo pomembna prednost je visok procent izrabe lesne surovine, prav tako pa se lahko uporablja hlodovina manjših presekov in nekoliko slabše kakovosti, kar pri žaganem lesu ne pride v poštev.

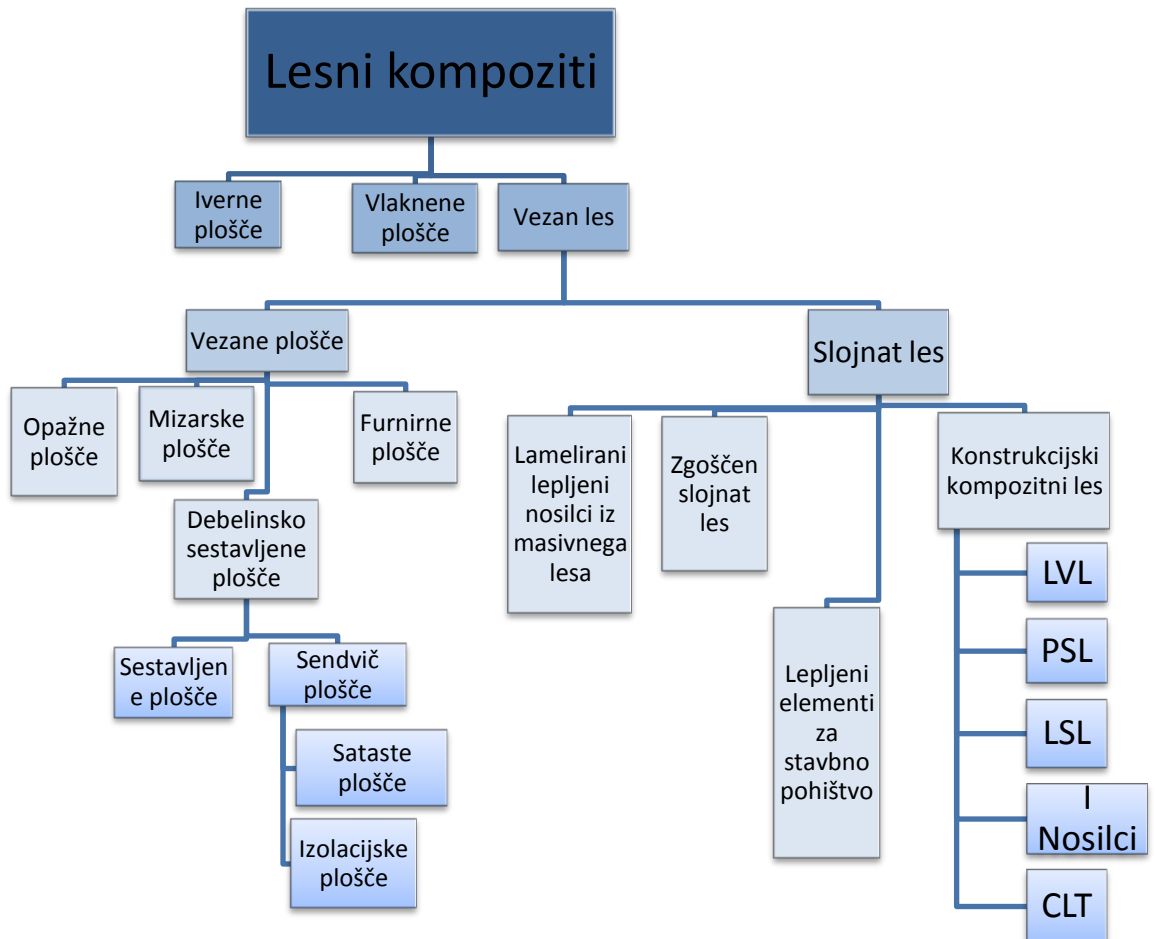
Preglednica številka 2.2 prikazuje primerjavo upogibnih trdnosti nosilcev statične višine 286mm, ki so iz vizualno razvrščenega masivnega lesa, strojno razvrščenega

masivnega lesa, slojnatega kompozitnega lesa iz vzporednih iveri in slojnatega furnirnega lesa. Opazimo lahko, da čeprav imajo skoraj enako upogibno trdnost, imata predstavnika konstrukcijskega kompozitnega lesa precej višjo upogibno trdnost pri 5% fraktili, kot strojno razvrščen les, le-ta pa veliko višjo kot vizualno razvrščen les.

Preglednica 2.2: Primerjava upogibnih trdnost nosilcev visokih 286mm  
(Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen)

Vrsta	Trdnostni razred	Botanična vrsta	Upogibna trdnost (5% fraktila) (MPa)
Masivni vizuelno razvrščen les	Posebej izbran boljši les	Smreka	20
	Običajni gradbeni les	Smreka	13
Masivni strojno razvrščen les	2400f-2.0E	Smreka	35
	1650f-1.5E	Smreka	24
Slojnat kompozitni les iz vzporedno razporejenih lesenih trakov	2900f, 2.0E	Smreka	42
Slojnat furnirni les	2600f, 1.9E	Smreka	38



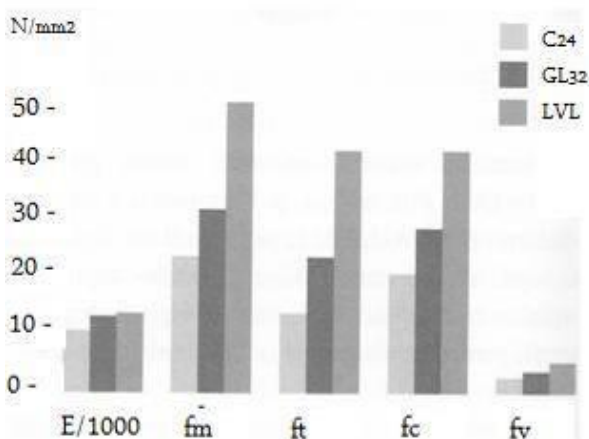


Slika 2.1: Shema razdelitve lesnih kompozitov (Vir: Šernjavič D., Lepljen les za konstrukcijske namene)

## 2.1 Slojnat furnirni les (LVL)

Slojnat furnirni les oziroma laminated veneer lumber (LVL) je bil prvi komercialni proizvod iz skupine SCL. Prvič so ga začeli uporabljati za izdelavo letalskih propelerjev med Drugo svetovno vojno, vendar tu ni šlo za širšo komercialno rabo. Okrog leta 1960 so ga začeli ponovno proizvajati v ZDA, vendar proizvod ni tržno uspel, zato so ga umaknili s trga. Leta 1968 pa je ameriško podjetje Trust Joist Corporation (danes kanadski Trust Joist MacMillan) razvilo in začelo proizvajati slojnat furnirni les na kontinuiran način pod tržnim imenom Mikrollam<sup>TM</sup>. Prva poskusna proizvodnja slojnat furnirni les v Evropi pa je stekla na Finskem leta 1975, prva redna proizvodna linija pa je stekla leta 1980, pod tržnim imenom Kerto<sup>TM</sup>. Večino LVL danes proizvedejo v ZDA, Avstraliji, Novi Zelandiji, na Finskem in Japonskem.

Slojnat furnirni les je lesni kompozit sestavljen iz najmanj petih furnirnih listov, katerih lesna vlakna so usmerjena vzporedno z vzdolžno osjo elementa. Zato ima slojnat furnirni les veliko nosilnost vzdolž glavne osi elementa. Za izboljšanje lastnosti elementa, ko gre za povezovanje z ostalo konstrukcijo, je možno nekatere vmesne liste obrniti pravokotno na vzdolžno os elementa, vendar mora biti njihova postavitvev po debelini simetrična. Tako, kot za ostali konstrukcijski les, velja tudi za slojnat furnirni les, da gre zaradi rekonstrukcijske narave procesa proizvodnje, pri kateri pride do delne eliminacije in disperzije napak, za zelo zanesljiv in predvidljiv les. To je tudi razlog, da so mehanske in fizikalne lastnosti (modul elastičnosti ( $E$ ), upogibna trdnost ( $f_m$ ), tlačna trdnost ( $f_c$ ), natezna trdnost ( $f_t$ ) in strižna trdnost ( $f_v$ )) nosilcev iz slojnatega furnirnirnega lesa v vzdolžni smeri večje od nosilcev iz masivnega ali pa lepljenega lameliranega lesa (slika 2.2).



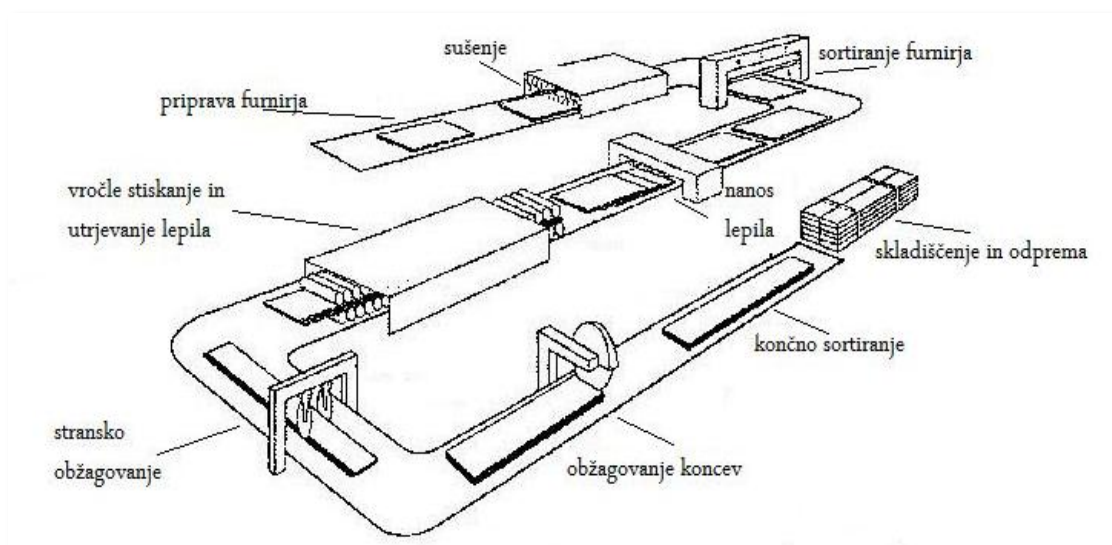
Slika 2.2: Primerjava trdnostnih lastnosti masivnega lesa (C24), lameliranega lepljenega lesa (GL32) in slojnatega furnirnega lesa (Šernjavič D., Lepljen les za konstrukcijske namene)

### 2.1.1 Postopek izdelave slojnatega furnirnega lesa

Obstajata dva načina industrijske proizvodnje slojnatega furnirnega lesa, diskontinuirani in pa tehnološko zahtevnejši ter tudi pogostejši kontinuirani način, ki je shematsko prikazan na sliki 2.3. Običajno se za izdelavo slojnatega furnirnega lesa uporablja furnir iz lesa iglavcev (smreka, jelka, macesen, duglazija, bor), v zadnjem času pa tudi furnir iz lesa listavcev nizke ali srednje gostote (topol). Uporablja se lahko ali samo eno botanično vrsto lesa ali pa kombinacijo več vrst. Podobno kot pri proizvodnji vezanih plošč se tudi tu postopek proizvodnje začne z rotacijskim lupljenjem debel, tako da dobimo furnirne liste debeline med 2,5 in 4,8 mm. Liste nato osušijo na vlažnost 6-8% in vizualno lahko pa tudi strojno pregledajo (uporabljajo se nedestruktivne metode, kot so ultrazvočna kontrola, preverjanje gostote,...), ter izločijo tiste z napakami, ostale pa sortirajo glede na trdnost in kvaliteto. Furnirje oblepijo z vodo odpornim fenol-formaldehidnim lepilom in jih ročno ali pa strojno zložijo tako, da so furnirji z boljšimi lastnostmi na zunanji strani, tisti s slabšimi pa v notranjosti slojnatega furnirnega lesa, seveda pa upoštevajo tudi zeleno število furnirnih listov in s tem debelino slojnatega furnirnega lesa. Tako dobijo izdelke z večjo upogibno nosilnostjo. Zelo pomembna pa je kontrola zamika spojev, ki morajo biti zamaknjeni za najmanj 10 do 12 cm in pa dolžina prekrivanja furnirnih listov, ki naj

bi bila  $6-12 \cdot d$ , pri čemer je  $d$  debelina furnirnega lista. Ustrezno zloženi in oblepljeni listi furnirja nadaljujejo svojo proizvodno pot skozi vročo stiskalnico, kjer vse skupaj stisnejo s tlakom do 15 barov in segrejejo na temperaturo  $150-180$  °C, pri kateri lepilo začne vezati. Debelina plošč iz slojnatega furnirnega lesa je iz ekonomskih razlogov omejena približno na 80 mm, ker bi bil čas stiskanja pri večjih debelinah predolg in tako poraba energije prevelika. Debelejši slojnat furnirni les pa je možno proizvajati s hladnim lepljenjem več tanjših LVL proizvodov med seboj. Stiskanju sledi razžagovanje na želeno dolžino in razžagovanje na želeno širno, skladiščenje in odprema.

Največja višina nosilca je omejena s širino stiskalnice, ki običajno ne presega dveh metrov. Dolžina nosilca iz slojnatega furnirnega lesa pa je pri kontinuiranem načinu proizvodnje praktično neomejena, omejena je predvsem z omejitvami pri transportu, tako da običajno ne presega 25m.



Slika 2.3: Shematski prikaz proizvodnje LVL  
(Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen)

## 2.1.2 Uporaba slojnatega furnirnega lesa

Slojnat furnirnri les razvrščamo v štiri razrede:

- Slojnat furnirnri les za splošno rabo in notranjo opremo za uporabo v suhih prostorih (LVL)
- Nosilni slojnat furnirnri les za uporabo v suhem okolju (LVL/1)
- Nosilni slojnat furnirnri les za uporabo v vlažnem okolju (LVL/2)
- Nosilni slojnat furnirnri les za zunanjo uporabo (LVL/3)

V splošnem ima slojnat furnirnri les širok spekter uporabe in sicer za: stranice pri tovornjakih, pode prevoznih kontejnerjev, sredice smuči in snežnih desk, sanke, železniške pragove, električne in telefonske drogove, okvirje oken in vrat, predvsem pa se uporablja v konstrukcijske namene. Primeri konstrukcijske uporabe: plošče za zidarske odre, različni tipi sestavljenih nosilcev (nosilec z LVL robovi, COMPLY™, lepljeni nosilec z LVL v nateznem delu,...), samostojni nosilci. Na finske stoji največja konstrukcija narejena iz slojnatega furnirnega lesa - Oulu-Dome njen premer je 115m.



Slika 2.4: LVL Microllam® ([http://www.ultralam.com/ultralam\\_history.php](http://www.ultralam.com/ultralam_history.php))



Slika 2.5: LVL Ultrallam<sup>®</sup> (<http://www.taittimber.com.au>)

## 2.2 Slojnat kompozitni les iz vzporedno razporejenih lesenih trakov (PSL)

Slojnat kompozitni les iz vzporedno razporejenih lesenih trakov oziroma parallel strand lumber (PSL) so začeli razvijati v 70. letih prejšnjega stoletja v kanadski firmi Macmillan Bloedel Limited. Na trg so ga plasirali leta 1986 izdelanega po patentiranem postopku in izdelanega pod imenom Parallam<sup>®</sup> PSL. Ker pa je prišlo do spremembe lastništva v firmi je uradni proizvajalec Parallam<sup>®</sup> PSL sedaj Trust joist<sup>™</sup> A Weyerhaeuser Business. Odkar se je pojavil na trgu se njegov tržni delež (na ameriškem trgu) vztrajno dviguje.

Začetna ideja razvoja slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih lesenih trakov je bila izkoristiti ostanke dreves pri proizvodnji žaganega lesa in ostalih vrst konstrukcijskega lesa. To pomeni porabiti veje in odrezke ter ostale ostanke za proizvodnjo konstrukcijskega kompozitnega lesa. Le-ta pa naj bi bil sčasoma sposoben nadomestiti žagan les večjih prerezov (žagan les večjih prerezov je izredno drag, zaradi redkosti debel primernih dimenzij). Po več kot desetletju raziskav in razvoja so razvili konstrukcijski les iz vzporedno usmerjenih trakov luščenega furnirja (neenakih dimenzij) ki so med seboj z vodoodpornim lepilom zlepljeni v obliko nosilca.



Slika 2.6: Izdelki PSL

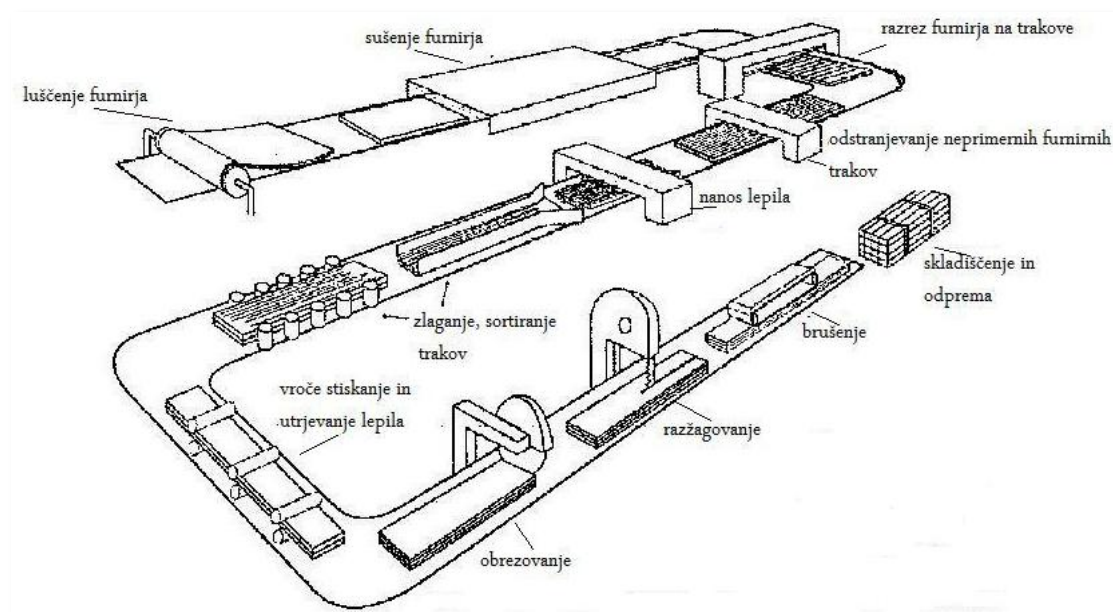
Slika 2.7: Glavne proizvodnje faze PSL

(obe sliki: [www.unitized.ca](http://www.unitized.ca))

### 2.2.1 Postopek izdelave slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih lesenih trakov

Slika 2.8 prikazuje posplošeno shemo proizvodnje slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih lesenih trakov. Furnir, kot osnovni material pridobijo z direktnim luščenjem iz drobne hlodovine duglazije, bora, tulipanovca, trobelike... Furnirske plošče so običajno debele 3,2 mm, široke 1,2 m in dolge 2,4 m. Plošče nato posušijo na želeno vlažnost, ki je okoli 11% in jih razrežejo na trakove širne približno 19 mm. Maksimalna dolžina tako nastalih trakov je očitno 2,4 m, ni pa nujno oziroma obvezno, da so vsi trakovi enake dolžine. Nekateri trakovi se zlomijo med procesom rezanja, uporablja pa se tudi furnirne plošče, ki zaradi neprimernih dimenzij (prekratke, preozke, niso pravokotne) niso primerne za izdelavo vezanih plošč ali pa slojnatega furnirnega lesa. Izkoristek surovine je tako pri proizvodnji slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih lesenih trakov zelo visok – do 80%. Z uporabo tega, za druge vrste konstrukcijskega lesa neprimernega furnirja, se ekonomičnost slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih lesenih trakov še poveča. Sledi proces izločanja prekratkih in/ali prešibkih trakov. Trakovi potujejo po tekočem traku, ki je vmes prekinjen za določen razmak (odvisno od želenih lastnosti končnega izdelka). Prekratki trakovi bodo avtomatično popadali skozi prekinitev v odpadni koš, prešibki trakovi pa se bodo pri prehodu čez ta razmak zlomili pod lastno težo in se na ta način izločili iz

sledečih proizvodnih korakov. Sledi korak oblepljanja trakov s fenol-formaldehidnim ali pa s fenol-rezorcin-formaldehidnim lepilom. Možna sta dva načina; nanos lepila z valjem ali pa enostavno pomakanje trakov v lepilo, pri čemer je treba odvečno lepilo odstraniti s pomočjo močnega toka zraka. Oblepljeni trakovi potujejo v sortirno postajo, kjer jih sortirajo tako, da tvorijo nesprieto ploščo. Ta pa nato potuje skozi »neskončno« stiskalnico, kjer vse skupaj s pomočjo mikrovalovne energije segrejejo do temperature pri kateri začne lepilo vezati. Ker proces stiskanja poteka v »neskončni« stiskalnici, je edina omejitev za dolžino nosilcev možnost transporta. Običajno so elementi dolgi do 20 m. Dobljeni element nato razžagajo na željeno dolžino in širino, ter obrusijo do točno potrebne dimenzije. Običajno dimenzije nosilcev sovpadajo z uveljavljenimi dimenzijami, ki se uporabljajo v gradbeništvu, seveda pa je možno naročiti tudi izven serijske elemente. Dobljene elemente je možno spajati med seboj in tako dobimo elemente še večjih prereзов. Uporablja se tehnike spajanja, ki se jih uporablja tudi pri proizvodnji lepljenih lameliranih nosilcev. Za kontrolo gostote, na koncu procesa opravijo še tehtanje elementov. Slojnat kompozitni les iz vzporedno razporejenih lesenih trakov ima končno vlažnost nekje med 8% in 12%. Celoten proizvodni proces pa zagotavlja, da so izdelki odporni proti krčenju, zvijanju, cepljenju ter upogibanju, ki so posledica klimatskih sprememb.



Slika 2.8: Shematski prikaz proizvodnje slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih lesenih trakov (Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen)



## 2.2.2 Uporaba slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih lesenih trakov

V stanovanjski gradnji se slojnat kompozitni les iz vzporedno razporejenih lesenih trakov uporablja za stebre in grede pri predalčnih konstrukcijah, ter za izdelavo stebrov, gred, preklad in veznikov pri okvirnem tipu konstrukcije. Pri gradnji industrijskih in poslovnih objektov, pa je slojnat kompozitni les iz vzporedno razporejenih lesenih trakov primeren za izdelavo srednjih in velikih gradnikov konstrukcije. Ker se v prerezu slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih lesenih trakov elementov pojavljajo tehnološke pore, je material zelo dovzeten za razne zaščitne premaze, ker lahko pronicajo daleč v notranjost elementa.



Slika 2.9: Primer stika PSL elementov  
([www.big-creek.com](http://www.big-creek.com))



Slika 2.10: Konstrukcija iz PSL elementov  
([www.structuremag.org](http://www.structuremag.org))

## 2.3 Slojnat kompozitni les iz prosto razvrščenih lesenih trakov (LSL)

Slojnat kompozitni les iz prosto razvrščenih lesenih trakov ali laminated strand lumber (LSL) so razvili v Kanadi in ga kmalu po letu 1990 plasirali na trg pod tržnim imenom TimberStrand<sup>®</sup> LSL, v Evropi pa je poznan kot Intrallam<sup>™</sup>.

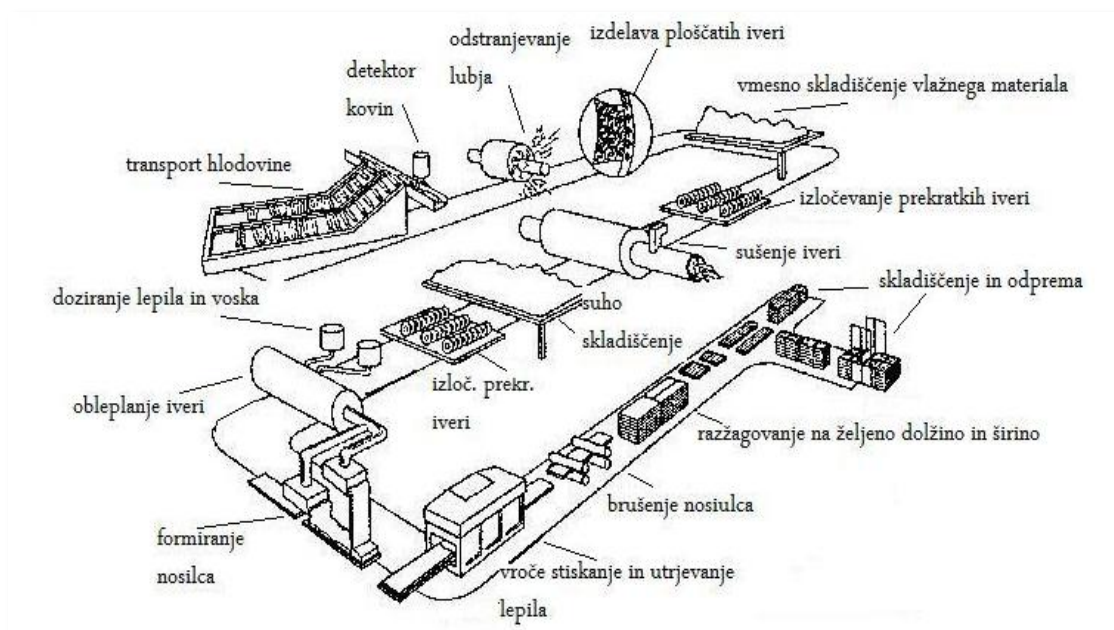
Razvili so ga z namenom, da bi z izrabo do tedaj neizkoriščenega lesa nadomestili

nekatero izdelke večjih dimenzij iz žaganega lesa. Trenutno se za LSL uporablja hitro rastoče vrste, ki se ponašajo s trdim lesom, kot so topol, trepetlika in tulipanovec. Za proizvodnjo slojnatega kompozitnega lesa iz prosto razvrščenih lesenih trakov lahko uporabljamo manj kakovosten les, kot za proizvodnjo slojnatega furnirnega lesa in slojnatega kompozitnega lesa iz vzporedno razporejenih lesenih trakov. Izraba lesne surovine je v tem primeru izredno visoka, lahko presega 80%.

### **2.3.1 Postopek izdelave slojnatega kompozitnega lesa iz prosto razvrščenih lesenih trakov**

Postopek izdelave slojnatega kompozitnega lesa iz prosto razvrščenih lesenih trakov se začne s transportom predhodno namočene hlodovine (zato da med procesom izdelave trakov/iveri ne nastane preveč majhnih delcev, kot so prah in male trske), odstranjevanjem neželenih »dodatkov« (kovine) in odstranjevanjem lubja s hlodovine. Nato s posebnim strojem hlodovino narežejo na trakove, ki so dolgi do 300 mm, široki med 13 in 25 mm, ter debeli med 0,9 in 1,3 mm. Nato posebna naprava odstrani vse neprimerne delce, temu pa sledi sušenje na primerno vlažnost (3-7%). Sušenju sledi oblepljanje oziroma mešanje trakov z zrnji poliuretanskega lepila ter voska. S pozornim spremljanjem postopka mešanja zagotavljajo konstantno razmerje les/vezivo. S posebnim trosilnikom nato natresejo material na tekoči trak. Trosilnik je zasnovan tako, da se večina trakov poravnava z vzdolžno osjo bodočega proizvoda iz slojnatega kompozitnega lesa iz prosto razvrščenih lesenih trakov. S pomočjo kontrole teže natresenega materiala, zagotavljajo enakomerno porazdelitev trakov vzdolž tekočega traku. Sledi zlepljanje, ki poteka v posebni stiskalnici, pod visokim pritiskom in pa pri temperaturi pri kateri lepilo začne vezati. Med stiskanjem s posebnimi iglami injicirajo paro v jedro stiskanca in tako pospešijo proces vezanja, kar ima za posledico znižanje stroškov izdelave. Injiciranje pare v jedro stiskanca omogoča izdelavo relativno debelih elementov s konstantno gostoto po prerezu elementa. Z nedestruktivnimi metodami nato pregledajo/testirajo elemente, s čimer se prepričajo da ne vsebujejo neželenih napak kot so žepi zraka v elementu. Dobljene plošče, ki imajo vsebnost vlage med 6 in 8

%, nato razžagajo in obrusijo na zelene dimenzije, ki lahko znašajo 140 mm po debelini, 2,4 m v širino in do 15 m v dolžino. Proizvodnji proces zagotavlja, da je dobljeni material močan, konsistenten, relativno odporen proti krčenju, zvijanju, cepljenju in upogibanju zaradi sušenja in krčenja lesa.



Slika 2.11: Shematski prikaz proizvodnje slojnatega kompozitnega lesa iz prosto razvrščenih lesenih trakov (Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen)

### 2.3.2 Uporaba slojnatega kompozitnega lesa iz prosto razvrščenih lesenih trakov

Slojnat kompozitni les iz prosto razvrščenih lesenih trakov se uporablja predvsem pri gradnji nizkih stanovanjskih objektov za izdelavo stebrov, tramov, desk, pohodnih plošč, lažjih veznikov, stopnišč,...



Slika 2.12: Primer uporabe LSL (<http://www.big-creek.com>)



Slika 2.13: Primer uporabe LSL (<http://archrecord.construction.com>)

## 2.4 Iverna plošča z usmerjenim iverjem (OSB)

Iverna plošča z usmerjenim iverjem oziroma oriented strand board (OSB) je na ameriški trg prodrla na začetku sedemdesetih let dvajsetega stoletja, na evropski trg pa ne dolgo za tem. Iverna plošča z usmerjenim iverjem spada med ploščaste kompozite, kamor sodijo na primer tudi iverne in pa furnirne vezane plošče, ki pa jih je, vsaj v gradbeništvu, iverna plošča z usmerjenim iverjem v večji meri že izpodrinila. Osnovi element za iverne plošče z usmerjenim iverjem plošče so iveri pridobljene predvsem iz iglavcev (predvsem smreke in bora), v ZDA pa se

uporablja tudi les listavcev. Izdelovalci pogosto mešajo posamezne vrste lesa med seboj. Kot vezivno sredstvo se uporabljajo urea-formaldehidna (UF), melamin-formaldehinda (MF), melamin-urea-formaldehidna (MUF) in MDI (Methyl Diphenyl Diisocyanate) lepila. Lepljenje oziroma stiskanje poteka pri temperaturah med 180 in 220 °C in pritisku med 3 in 7 N/mm<sup>2</sup>. Končni izdelki imajo debelino med 6 in 40 mm , ter gostoto med 550 in 750 kg/m<sup>3</sup>. Tipično so iverne plošče z usmerjenim iverjem narejene iz treh medsebojno pravokotnih plasti. Iveri v zgornji in spodnji plasti so v večji meri orientirane vzporedno z vzdolžno osjo plošče, iveri v vmesni plasti pa so lahko ali pravokotno orientirane glede na vzdolžno os plošče, v tem primeru so lastnosti plošče bolj podobne lastnostim furnirne plošče, ali pa so razporejene popolnoma naključno, v tem primeru pa imajo plošče podobne lastnosti ivernim ploščam. Razmerje med debelinami zunanjih-vrhnjih in pa notranjih slojev se giblje nekje med 60:40 do 40:60. Povprečna iver je dimenzij (debelina/širina/dolžina približno) 0,8/13/100 mm, največji delci pa so dimenzij 2/50/200 mm.



Slika 2.14: OSB plošča pred stiskanjem

(<http://commons.wikimedia.org>)



Slika 2.15: OSB plošča

(<http://ibud.ua>)

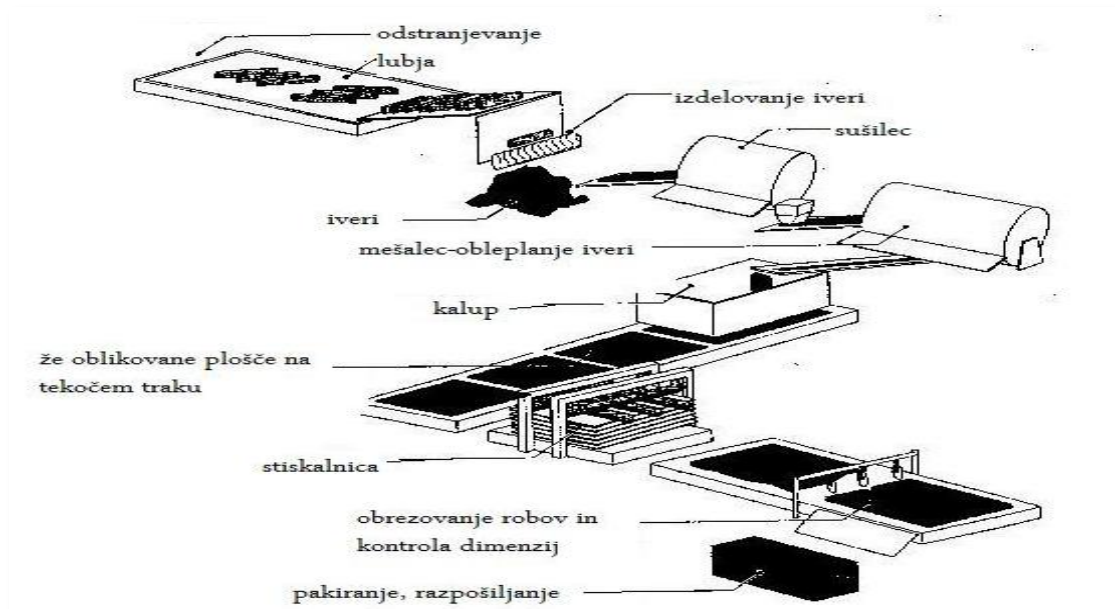
#### 2.4.1 Postopek izdelave iverne plošče z usmerjenim iverjem

Sveže nasekano hlodovino namočijo v bazene s toplo vodo, s čimer zmehčajo les in se na ta način izognejo preveliki količini prahu in žaganja nastalega med odstranjevanjem lubja in proizvodnjo iveri (strands). Po mehčanju z debel strojno odstranijo lubje nato pa jih dajo v posebne napravo ki hlode »nastrga« na iveri. Iveri

nato presejejo in tako odstranijo vse neželene delce. Nekaj predrobnih delcev po navadi dodajo nazaj med iveri za srednjo plast, ti delci zapolnijo vrzeli med večjimi delci. Na ta način dosežejo enakomernejšo gostoto OSB plošče. V cilindričnem sušilcu posušijo iveri tako, da vsebujejo od 3 do 7 % vlage. Osušene iveri nato stresejo v posebne mešalce kjer jih oblepijo z lepilom. Moderni proizvodni obrati imajo običajno dva taka mešalca in sicer, enega za zunanje sloje kjer uporabljajo fenolno-formaldehidna lepila, ter enega za vmesne sloje, kjer običajno uporabljajo MDI lepila. Prednost MDI lepil je krajši čas potreben za vezanje, posledično to pomeni krajši čas stiskanja in segrevanja, kar privede do znižanja stroškov. Razlog zakaj ne uporabljajo za vse plasti ekološko manj škodljivih in ekonomsko ugodnejših MDI lepil tiči v tem, da se le ta lepijo na kovinske površine in jih je potrebno potem odstranjevati s kemičnimi preparati. Točna količina dodanih lepil je poslovna skrivnost posameznih proizvajalcev, se pa giblje nekje med 2 in 2,75 % (razmerje mas). Za boljšo vodo odpornost pa dodajo še približno 1,5% voska. S posebnimi usmerjevalnimi stroji dosežejo želeno razporeditev iveri. Dobljene nepovezane »blazine« iveri nato po tekočem traku potujejo do stiskalnice. Stiskalne plošče segrejejo na želeno temperaturo, nato na njih položijo nepovezane »blazino« iveri in jo začnejo stiskati. Tako se vrhnja sloja bodoče plošče iz usmerjenih iveri segrejeta z direktnim prenosom toplote iz plošč, pri tem pa se vlaga v iveri počasi upari in potuje proti notranjosti plošče ter tako segreje še jedro plošče. Pri tem pride do polimerizacije lepila, ki poveže iveri v trdno celoto. Ker je prehod pare skozi ploščo neenakomeren, kar je posledica neenakomernosti porazdelitve materiala – zunanji sloj ima lahko 30% večjo, notranji pa 30% manjšo gostoto od povprečne gostote plošče – je tudi proces polimerizacije precej neenakomeren. Zato plošče, ko pridejo iz stiskalnice za 24 ur hranijo v ogrevanih skladiščih, da se proces vezanja izvrši do konca. Kvaliteta izdelka je odvisna od načina kontrole celotnega proizvodnega procesa. Najpomembnejši faktorji so:

- razvrščanje hlodovine po vrsti, velikosti in vsebnosti vlage,
- kontrola dimenzij, kvalitete in vlažnosti iveri po sušenju,
- konsistenca mešanja iveri z lepili in voskom,
- orientiranost iveri pred stiskanjem in enakomernost razporeditve iveri,
- temperatura stiskanja,

- tlak stiskanja,
- hitrost stiskanja,
- kontrola debeline in kvalitete robov ter ploskev plošče in
- kontrola dimenzij in izgleda končnega izdelka.



Slika 2.16: Shema postopka izdelave iverne plošče z usmerjenim iverjem (Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen)

#### 2.4.2 Uporaba iverne plošče z usmerjenim iverjem

Iverne plošče z usmerjenim iverjem se lahko uporabljajo za konstrukcijske ali pa nekonstrukcijske namene povsod tam, kjer se potrebuje velika tanka dimenzijsko stabilna plošča. Kot vse lesene plošče, tudi nezaščitena iverna plošča z usmerjenim iverjem nabrekne če je izpostavljena visoki vlagi, zato naj bi se nezaščitene OSB plošče uporabljalo le v nadzorovanih pogojih oziroma v zaprtih prostorih. Tako lahko iverne plošče z usmerjenim iverjem uporabimo za: embalažo, palete za suho shrambo, sedala in naslonjala stolov, mize, okrasne stenske elemente, pode, ograje, jedra pohištvenih elementov, stojine I-nosilcev in drugo.



Slika 2.17: Uporaba ivernih plošč z usmerjenim iverjem za predelne stene  
(<http://www.norbord.com/images/OSB3.jpg>)



Slika 2.18: Uporaba iverne plošče z usmerjenim iverjem kot talna obloga  
(<http://livemodern.com/>)

## 2.5 Leseni I-nosilci

Lesene I-nosilce so prvič proizvedli v dvajsetih letih 20. stoletja, razvoj za širšo rabo pa je trajal še nadaljnjih 20-30 let, ko so take elemente uporabljal za izgradnjo lesenih letal. Prvi komercialni produkti tega tipa pa so prišli na trg leta 1968, iz podjetja Trus -Joist Corporation. Prizvodnja je potekala na kontinuirni način, projektantom pa so nudili vrsto tabeliranih informacij (nosilnost/razpon, lastnosti



prerezov,...), ki so lajšali načrtovanje. Razvit je bil z namenom nadomestiti žagan les večjih dimenzij, ki bi ga uporabljali kot nosilce in pa stebre tako za uporabo pri gradnji stanovanjskih, kot tudi pri gradnji industrijskih in poslovnih objektov. Proizvodnja je hitro rasla in še vedno raste, tako naj bi bilo leta 1997 proizvedenih okoli 120 milijonov tekočih metrov I-nosilcev, leta 2005 pa že skoraj 300 milijonov tekočih metrov.



Slika 2.19: Prečni prerez lesenega I-nosilca  
(<http://www.trada.co.uk/>)

Leseni I-nosilec je prvotno upogibni element, katerega prečni prerez je I oblike. Narejen je iz dveh različnih tipov lesa, ki jih v proizvodnem postopku zlepimo skupaj. Prvi tip, ki se uporablja za izdelavo pasnic, je žagan les (tako vizualno kot strojno razvrščen les) ali pa slojnat furnirni les ter slojnat kompozitni les iz prosto razvrščenih lesenih trakov. Za izdelavo stojine pa se običajno uporablja iverne plošče iz usmerjenih iveri ali pa vezane plošče. V primerjavi z žaganim lesom ima I-nosilec namenu primernejšo obliko, boljše razmerje lastna teža/nosilnost, boljšo dimenzijsko stabilnost in manj spremenljive mehanske lastnosti. Ker so I-nosilci narejeni v tovarni, se jih lahko že predhodno opremi z odprtinami v stojini namenjenimi instalacijam. Kritični element, ko gre za I-nosilce, je spoj med stojino in pasnicami, ter spoj posameznih delov stojine med seboj, tako da dobimo stojino primerne dolžine. Običajno ima vsak proizvajalec patentiran svoj spoj med stojino in pasnico, prav tako pa obstaja več načinov povezovanja delov stojine med seboj. Najpogostejši je način z utorom in peresom. Tudi pasnice je včasih potrebno povezovati med seboj, običajno se za to uporabi tako imenovani lepljeni zobčasti spoj. Za lepljenje se uporabljajo fenol-formaldehidna ali pa fenol-resorcinolna lepila.

Za določanju mehanskih in fizikalnih lastnosti imajo proizvajalci na voljo dve opciji – eksperimentalno metodo ali pa računsko metodo. Prvotno so se zanašali predvsem na računsko metodo, ker so leseni I-nosilci narejeni iz materialov katerih mehanske in fizikalne lastnosti so razmeroma dobro poznane. Z razvojem lesenih I-nosilcev, ko se je začelo uporabljati različne vrste materialov, nosilce pa se je začelo proizvajati v vseh mogočih velikostih in tipih, pa se proizvajalci vedno bolj zanašajo na eksperimentalne metode. Tako je vsakodnevno preverjanje kvalitete proizvodov veliko lažje in direktno, možno je testirati različne postavitve in kombinacije lesenih I-nosilcev. Tako danes večina proizvajalcev uporablja povsem eksperimentalne metode ali pa kombinacijo eksperimentalno/računskih metod, pri katerih leseni I-nosilec naravnih velikosti podvržejo obremenitvam do porušitve.



Slika 2.20: Leseni I-nosilci

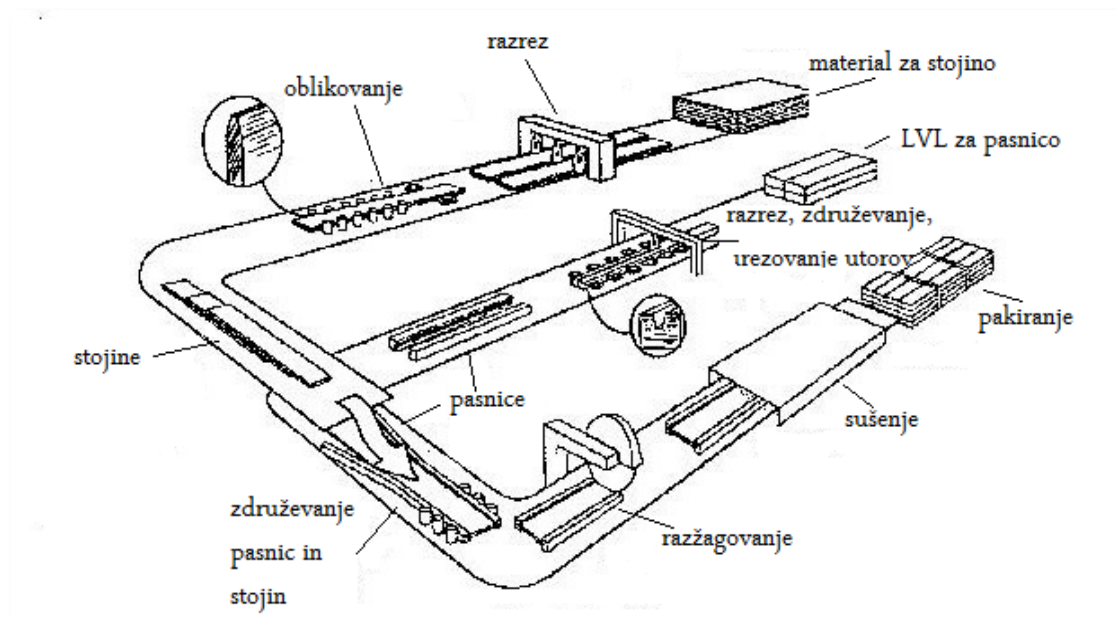
Slika 2.21: Primer uporabe lesenih I-nosilcev

(obe sliki: [www.apawood.org](http://www.apawood.org))

### 2.5.1 Postopek izdelave lesenih I-nosilcev

Postopek proizvodnje lesenih I-nosilcev se razlikuje od proizvajalca do proizvajalca, osnovni in najpogostejši postopek pa je prikazan na sliki 2.22. Zalogo pasnic, ki ima vlažnost med 8 in 18%, dobavljajo iz obratov kjer proizvajajo slojnat furnirni les, oziroma žagajo masivni les. Krajše elemente z uporabo lepljenih zobčastih spojev zlepijo na primerno dolžino. Vzdolž pasnice naredijo utor v

katerega bodo kasneje namestili stojino. Oblika in velikost tega utora je odvisna od namena in proizvajalca. Pri tem utoru je zelo pomembno, da zagotovimo zadostno površino, kjer bosta pasnica in stojina zlepljeni med seboj, da se vzdolžna strižna obremenitev prenese na stojino, brez da bi prej že prišlo do poškodbe pasnice. Zalogo stojin, z vlažnostjo med 5 in 10% dobavljajo iz obratov kjer proizvajajo OSB ali pa vezane plošče. Plošče razžagajo na primerne širine in jih po potrebi zlepijo na primerno dolžino. Robove stojine primerno zbrusijo, tako da ustreza utoru v pasnici in tako tvorita celoto. Tudi tu gre predvsem za zagotavljanje zadostne površine za prenos strižne obremenitve med pasnicami in stojino. Kot že omenjeno se za spajanje uporabljajo predvsem fenolna lepila, lahko pa tudi polimerna MDI (Methyl Diphenyl Diisocyanate) lepila. V posebnih stiskalnicah se nato združi pasnice in stojine s čimer se zagotavlja ustrezen stik. Dobljene I-nosilce nato po potrebi razžagajo na želene dolžine, nato pa jih dajo v peči ali pa posebna ogrevana skladišča, kjer znaša temperature med 21 in 65 °C, pri čemer pride do aktivacije lepil. Sledi končni pregled ustreznosti proizvoda, pakiranje in razpošiljanje končnim uporabnikom.



Slika 2.22: Shematski prikaz proizvodnje I-nosilcev  
(Timber Engineering, S.Thelandersson, H.J.Larsen)

## 2.5.2 Uporaba lesenih I-nosilcev

Lesene I-nosilce se uporablja povsod tam, kjer je potrebno premostiti večje ali manjše razdalje ter pri tem zagotavljati čim manjšo lastno težo konstrukcije. Tako se jih uporablja za pode, ostrešja, stenske elemente, lahko se jih uporablja tudi kot stebre. Zelo pomembno pa je, da vedno zagotavljamo ustrezno bočno stabilnost, ker se I-nosilci, dokler niso dokončno vgrajeni, radi uklonijo izven svoje ravnine.

## 2.6 Dvoslojni in troslojni dolžinsko spojen lepljen les (Duo in Trio nosilci)

DUO in TRIO nosilci predstavljajo visoko kvaliteten lesni produkt, zasnovan za premoščanje večjih razponov in prevzem visokih koristnih obtežb v eno in dvo stanovanjski gradnji. DUO tramovi so sestavljeni iz dveh predskobljanih lamel, katerih vlakna potekajo vzporedno, srce lesa (jedro) pa je obrnjeno navzven, s čimer zagotovimo večjo odpornost lesa proti pokanju. TRIO nosilci pa so sestavljeni iz treh vzdolžno zlepljenih lamel, srce lesa pa je orientirano podobno kot pri DUO nosilcih. Posebna zasnova in tehnološko dovršen proizvodni sistem prinašata DUO /TRIO nosilcem posebne prednosti kot so:

- visoka trdnost in togost pri nizki lastni teži,
- zelo stabilna oblika in močno zmanjšana občutljivost materiala na pokanje,
- prijaznost okolju,
- kakovostna površina, primerna za vidne dele,
- dobra odpornost proti vdoru vlage, plesnim in škodljivcem,
- vlažnost nižja od 15% in
- majhne deformacije zaradi krčenja.

Zaradi visoko stabilne oblike in nizke vlažnosti lesa so Duo in Trio nosilci posebej primerni za:

- gradnjo neprepustnih oblog za stavbe, npr. gradnjo lesenih okvirov, ogrodij ali ostrešij ter
- izdelavo vidnih gradbenih elementov, ki morajo izpolnjevati visoke oblikovne zahteve.

Postopek za projektiranja konstrukcij iz DUO in TRIO nosilcev je enak kot pri masivnem lesu.



Slika 2.23: Prečni prerez DUO in TRIO nosilcev (<http://www.kvh.eu/>)

### 2.6.1 Postopek izdelave DUO in TRIO nosilcev

Gradbeni les najprej posušimo na približno 12% (v skladu s pričakovano vlažnostjo v okolju kasnejše uporabe). Tako izključimo možnost večje deformacije lesa pri gradnji. Posušeni les predskobljamo in vizualno ali avtomatsko sortiramo. Pri tem se označijo in izrežejo napake v lesu, kot so velike grče ali nerobljen les. Po sortiranju različno dolgim lamelam na obeh koncih najprej vrezkamo zobati profil na stroju za dolžinsko spajanje. Te lamele pod pritiskom zlepimo in tako dobimo teoretično brezkončne lamele. Te razrežemo na želene dolžine in jih vodimo na prečni transporter. Po štiristranskem skobljanju na širše strani tramov nanesemo lepilo, jih zložimo v dva ali tri sloje in stisnemo. Ko se lepilo posuši, obdelovance poskobljamo in jim posnamemo robove. Uporablja se lepila, ki zagotavljajo barvno nevtralen, komaj opazen spoj. Lepila ustrezajo vsem okoljski standardom. Med postopkom se izvaja kontrola kvalitete, ki zagotavlja konstantno visoko kvaliteto izdelkov.



Slika 2.24: Naprava za stiskanje DUO in TRIO nosilcev ( [www.ledinek.com](http://www.ledinek.com))

### 2.6.2 Uporaba DUO in TRIO nosilcev

DUO in TRIO nosilce se lahko uporablja za izgradnjo nosilnih konstrukcij v eno in več stanovanjski gradnji, lahko se jih uporablja tudi zunaj, za izdelavo raznih nadstreškov. Delo z DUO in TRIO nosilci je enako kot z masivnim lesom, izogibati se je potrebno prevelikim nihanjem vlažnosti okolice. Primerni so tudi za uporabo v kemijsko agresivnih okoljih. Nosilce se dobavlja v dimenzijah prečnega prereza od  $b/h=8\text{cm}/10\text{cm}$  pa vse do  $24\text{cm}/24\text{cm}$ . Uporaba DUO in TRIO nosilcev je ekonomična in prinaša določene prednosti:

- suha gradnja,
- ni potrebe po zaključni obdelavi, ker so nosilci že sami po sebi prijetni za oko,
- uporaba kemičnih prezervativnih sredstev ni potrebna,
- zaradi zelo stabilne oblike prihaja do manj deformacij,



Slika 2.25: Primer uporabe DUO in TRIO nosilcev

([www.kvh.eu](http://www.kvh.eu))



Slika 2.26: Detajl ostrešja iz DUO oziroma TRIO nosilcev

([www.kvh.eu](http://www.kvh.eu))

## 2.7 Križno lepljene lesene plošče (CLT)

Križno lepljene lesene plošče oziroma cross-laminated timber (CLT) so narejene iz tehnično suhih smrekovih desk ( $v = 12\%$ ,  $\pm 2\%$ ), ki so v plasteh zložene pravokotno druga na drugo in med seboj zlepljene. Nam najbližje in največje podjetje, ki take plošče proizvaja je KLH iz Avstrije, pri katerem PEFC certifikat zagotavlja, da vgrajen žagan les izvira iz gozdov, ki so pod nadzorom trajnostnega gospodarjenja z gozdovi. Največja dimenzija plošč, ki jih izdelujejo je 16,5 m v dolžino in 2,95 v širino, debeline pa dosega tudi 50 cm in več. Največja ovira za velikost je možnost transporta. Standardne širine plošč so tako 2,40 m, 2,50 m, 2,72

m, 2,95 m, kar predstavlja običajne višine etaž pri lesenih objektih. Debeline plošč pa so naslednje:

3-slojna DQ: 57, 72, 94 mm

3-slojna DL: 60, 78, 90, 95, 108, 120 mm

5-slojna DQ: 95, 128, 158 mm

5-slojna DL: 117, 125, 140, 146, 162, 182, 200 mm

7-slojna DL: 202, 208, 226, 230, 260, 280 mm

8-slojna DL: 248, 300, 320 mm

Pri čemer oznaka DQ pomeni, da je orientacija vrhnjih slojev prečno na proizvodno dolžino, oznaka DL pa da je orientacija vrhnjih slojev v smeri proizvodne dolžine. Deformacije v ravnini plošče so zanemarljive, pravokotno na ravnino plošče pa znašajo 0,2 mm/m za vsak procent spremembe vlažnosti lesa. Hitrost gorenja križno lepljeni lesenih plošč je 0,76 mm/min, ko je požar na obeh straneh plošče in 0,67 mm/min, ko je požar le na eni strani plošče. Tako imajo 3-slojne plošče praviloma požarno odpornost 30 min (REI 30), pri 5-slojnih ploščah je mogoče zagotoviti tudi požarno odpornost 60 min (REI 60), pri večslojnih ploščah (7 in več) pa tudi višje vrednosti požarne odpornosti (REI 90, REI 120, itd.). Odpornost konstrukcije narejene iz CLT plošč na delovanje vodoravnih obtežb kot sta veter in potres, je seveda odvisna od statične zasnove objekta, od nosilnosti posameznih elementov, od izvedbe stikov med stenami in ploščami ter od sidranja stenskih elementov v temeljno konstrukcijo. Z eksperimentalnimi raziskavami so dokazali da so 3-slojne in 5-slojne DQ plošče, ki se uporabljajo za stene sposobne prevzemati velike vodoravne obremenitve tako v ravnini stene kot tudi pravokotno nanjo, če so le ustrezno vgrajene v celotno konstrukcijo. Pred kratkim, so na Japonskem izvedli preizkus na potresni mizi, pri katerem so 6 nadstropno konstrukcijo v merilu 1:1, narejeno povsem iz CLT plošč, izpostavili dvema zaporednima potresoma iz Kobeja, ki se je zgodil leta 1995 in je zahteval več kot 6000 življenj. Stavba je po preizkusu še vedno stala, posamezni elementi (stene, plošče) so bili praktično nepoškodovani, prizadeti so bili le spoji med elementi, ki pa se jih da hitro in enostavno sanirati (v bistvu jih je bilo treba le ponovno zategniti). Stavbo so kasneje razstavili, prepeljali v Italijo in jo tam ponovno sestavili! Glavna prednost križno lepljenih lesenih plošč, kar se tiče potresne odpornosti, pred ostalimi



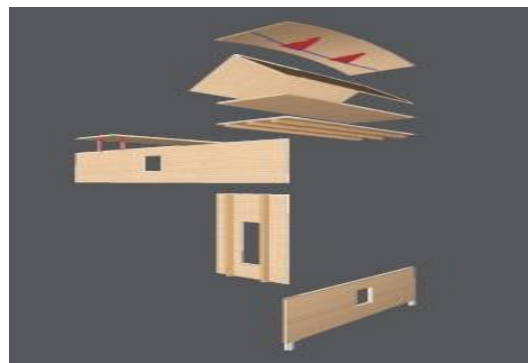
konvencionalnimi gradbenimi material, je majhna lastna teža materiala, ki se giblje med 4,8-5,0 kN/m<sup>3</sup>. Za primerjavo, armiran beton ima lastno težo 25 kN/m<sup>3</sup>, jeklo pa med 60 in 80 kN/ m<sup>3</sup>. Poleg tega pa ima križno lepljen lesen v primerjavi z drugimi gradbenimi materiali še odlične toplotno izolativne sposobnosti ( $\lambda=0,13$  W/m<sup>2</sup>K), specifična toplotna kapaciteta pa je 1600 J/kgK.

### 2.7.1 Postopek izdelave križno lepljenih lesenih plošč

Odvisno od vrste uporabe in od zahtev po nosilnosti so plošče izdelane iz različnega števila slojev (3,5,7,8). Posamezne plasti so potem zlepljene med seboj z lepilom Purebond, ki ne vsebuje topil ali formaldehida. Lepilo je preizkušeno na inštitutu za preizkušanje materialov v Stuttgartu, v skladu s standardi DIN 68141, DIN 1052 ter EN 301, ki podajajo bistvene zahteve za izdelavo nosilnih lepljeni lesnih elementov in konstrukcij. S križnim lepljenjem pod visokim pritiskom se doseže, da so plošče dimenzijsko stabilne, kar pomeni, da je delovanje lesa zmanjšano na minimalno vrednost, oz. je zanemarljivo. V Avstrijski firmi KLH proizvodnja poteka s pomočjo CNC tehnologije, kar omogoča takojšen in pa izredno natančen razrez po sestavnih načrtih konstrukcije. Razrez lahko ob pogoju ustrezne opreme opravi tudi podjetje, ki je usposobljeno za obdelavo lesenih elementov in za gradnjo lesenih konstrukcij. Plošče se nato s tovornjaki dostavi na gradbišče, razloži ter s pomočjo gradbenega žerjava sestavi v želeno konstrukcijo. Tak postopek omogoča izredno kratek čas gradnje, kar znatno zniža siceršnje stroške gradnje.



Slika 2.27: 5 slojne križno lepljene lesene plošče



Slika 2.28: Možnosti uporabe križno lepljenih lesenih za nosilne elemente hiše

(obe sliki <http://www.klh.at/>)

### 2.7.2 Uporaba križno lepljenih lesenih plošč

Uporaba križno lepljenih lesenih plošč je tako rekoč neomejena. Uporablja se jih kot stenske in kot stropne masivne elemente, iz križno lepljenih lesenih plošč se lahko izdeluje nosilce različnih prerezov. Uporablja se za gradnjo enostanovanjskih in večstanovanjskih objektov, industrijskih ter poslovnih objektov. Iz križno lepljenih lesenih lahko zgradimo tudi razgledni stolp ali pa kar most (60cm debela križno lepljena lesena plošča), možna je izdelava prednapetih stropnih in strešnih konstrukcij. Uporablja se tudi za izdelavo stopnišč, predelnih sten, streh, balkonov,... Možna je kombinacija z ostalimi gradbenimi materiali, kot so jeklo, beton, steklo. V Londonu stoji 9 nadstropna, 30 metrov visoka, poslovno stanovanjska stavba (Murray grove tower), narejena popolnoma iz križno lepljenih lesenih plošč. Beton so uporabili izključno samo za temelje in plavajoči pod. Stavba je bila postavljena v sedemindvajsetih dneh, vključno z opremljanjem, pa so potrebovali 46 tednov, kar je še vedno 40% manj, kot če bi stavbo gradili iz armiranega betona. Čar stavbe je tudi v tem, da jo je možno popolnoma reciklirati.



Slika 2.29: Notranjost stanovanjske stavbe iz CLT med gradnjo

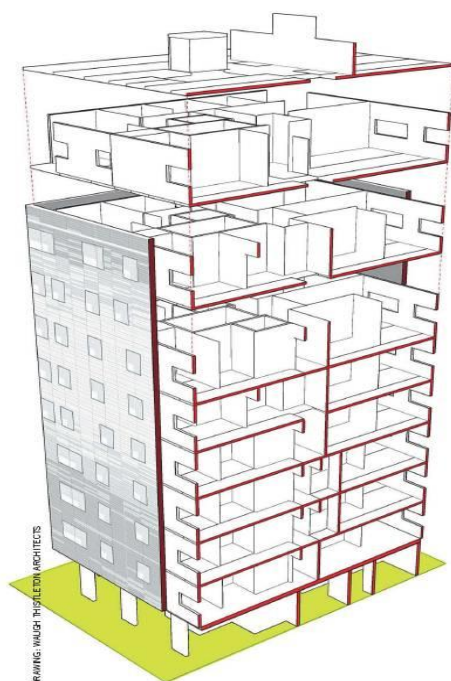
(<http://www.klh.at/>)



Slika 2.30: Poslovni objekt iz CLT med gradnjo  
(<http://www.klh.at/>)



Slika 2.31: Murray grove tower  
(<http://redigitaleditions.com/>)



Slika 2.32: Murray grove tower; zasnova, končni izgled  
(<http://redigitaleditions.com/>)

---

### 2.7.3 Ponudba križno lepljenih lesenih plošč

Na evropskem trgu se pojavlja vedno več proizvajalcev oziroma ponudnikov križno lepljenih lesenih plošč. Tako je tu Finska StoraEnso, pri kateri križno lepljene lesene plošče predstavljajo le zelo majhen segment celotne proizvodnje (izdelujejo še papir za tisk, pisarniški papir, papirno kašo, leseno ter papirnato embalažo in različne lesne proizvode ter polproizvode kot so CLT, Duo in Trio nosilce, masivni žagan les, elemente za vrata in okna, euro palete,... ). Njihove plošče so do 2,95 m široke, do 16 m dolge in debeline od 57 mm pa do 400 mm. Potem sta tu avstrijska Binderholz ter KLH, ki sta oba specializirana le za CLT plošče. Glavna razlika pri njuni ponudbi CLT plošč je v tem da Binderholz ponuja plošče širine le 1,25 m, dolžine do 24 m ter debeline od 66 mm do 341 mm, medtem ko je pri KLH-ju možno dobiti plošče širine do 295cm, dolžine do 16,5 m ter debeline od 57 mm do 500 mm. Razlikujejo se še v načinu spajanja plošč v končni izdelek (vijaki, kotniki, mozniki, tesnenje,...). Nemčija se ponaša s svojo firmo Finnforest, ki poleg CLT plošč, ki jih tržijo pod imenom Leno in so do 4,8 m široke, do 20 m dolge ter od 50 mm pa do 300 mm debele, proizvaja še OSB plošče, vezane plošče, I-nosilce, rezan masivni les,... V Angliji imajo B&K timber structures, v ZDA Smartwoods in tako naprej.

### 3. PRIMERJALNA ANALIZA KRIŽNO LEPLJENIH LESENIH PLOŠČ

V tem poglavju si bomo podrobneje ogledali sestavo križno lepljenih lesenih plošč, osnove teorij plošč, ki jih uporabljamo za obravnavanje plošč. Sledi izračun efektivnega vztrajnostnega momenta  $I_{ef}$  oziroma efektivnega modula elastičnosti  $E_{ef}$ , na več načinov, ter primerjava le teh med seboj. Podrobneje si ogledamo poseben pojav, ki se pojavlja pri križno lepljenih lesenih ploščah, strižno deformacijo pravokotno na smer vlaken v ravnini plošč ali "Rolling shear". V programu SAP2000 pa modeliramo križno lepljene lesene plošče z uporabo več različnih elementov, ter dobljene rezultate primerjamo med seboj.

#### 3.1 Tehnične karakteristike

Debelina plošč:	57 mm do 320 mm
Proizvodne obračunske širine:	240 cm, 250 cm, 272 cm, 295 cm
Največja dolžina plošč:	16,50 m
Število slojev plošč:	3, 5, 7, 8
Deformacije zaradi delovanja lesa:	v ravnini plošče zanemarljive pravokotno na ravnino plošče 0,2 mm/m za vsak % spremembe vlažnost
Vlažnost:	12 % (+/- 2 %) – tehnično suh les
Hitrost gorenja:	0,67 mm/min v skrajnem zunanem sloju ali dvosloju 0,76 mm/min v več kot samo skrajnem zunanem sloju
Vrednost $\lambda$ :	0,13 W/(m <sup>2</sup> K)
Specifična toplotna kapaciteta:	1600 J/(kgK)
Prostorninska teža:	4,8-5,0 kN/m <sup>3</sup>

### 3.2 Materialne karakteristike križno lepljenih lesenih plošč podjetja KLH

E-modul - v smeri vlaken lesa:	12000 N/mm <sup>2</sup>	
E-modul - pravokotno na vlakna:	370 N/mm <sup>2</sup>	
G-modul - pravokotno na vlakna:	50 N/mm <sup>2</sup>	
G-modul – v smeri vlaken lesa:	670 N/mm <sup>2</sup>	
Upogib	10,0 N/mm <sup>2</sup>	
Nateg vzporedno z vlakni	8,5 N/mm <sup>2</sup>	
Nateg pravokotno na vlakna	0,05 N/mm <sup>2</sup>	
Tlak vzporedno z vlakni	10,0 N/mm <sup>2</sup>	
Tlak pravokotno na vlakna	2,5 N/mm <sup>2</sup>	tlak pravokotno na vlakna
Tlak pravokotno na vlakna	3,0 N/mm <sup>2</sup>	tlak pravokotno na vlakna – neto prerez z upoštevanjem manjših zarez
Strig pravokotno na ravnino plošče	0,6 N/mm <sup>2</sup>	

### 3.3 Osnovne metode analize kompozitnih plošč

Kompozitne plošče lahko analiziramo na več različnih načinov:

- z ekvivalentno enoplastno teorijo (2D)
- klasična teorija laminatov
- strižna teorija laminatov
- s tridimenzionalno teorijo elastičnosti
- tradicionalna 3D formulacija
- večplastna formulacija
- s kombinacijo gornjih 2D in 3D teorij

Ker računalniški program s katerim bomo analizirali križno lepljene lesene plošče uporablja 2D metodo, bomo podrobneje opisali le prva dva načina.

### 3.3.1 Klasična teorija laminatov – CPLT (Classical Laminate Plate Theory)

Najenostavnejša ekvivalentna enoplastna teorija (ESL-Equivalent Single Layer) je tako imenovana klasična teorija laminatov oziroma Classical Laminate Plate Theory (CLPT), ki je razširjena Kirchhoff-ova teorija plošč. Temelji na naslednjih predpostavkah:

- normale na središčno ploskev ostanejo ravne tudi po deformaciji
- normale na središčno ploskev ostanejo pravokotne na središčno ploskev tudi po deformaciji
- normale na središčno ploskev se ne raztegajo ali skrčijo

Iz druge predpostavke lahko sklepamo, da sta deformaciji  $\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0$ , torej prečne strižne deformacije zanemarimo.

Ostali dve predpostavki pa nam povesta, da je prečni pomik neodvisen od koordinate  $z$  in da je prečna deformacija  $\varepsilon_{zz} = 0$ .

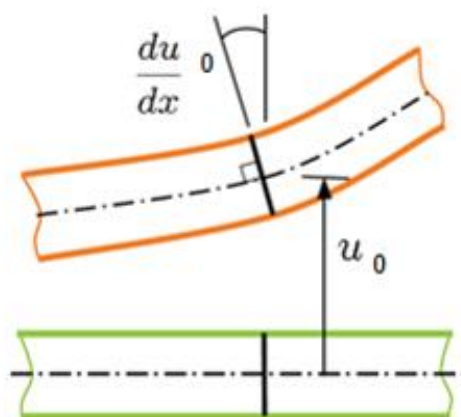
Zapišemo lahko naslednje enačbe:

$$\text{—} \quad (3.1)$$

$$\text{—} \quad (3.2)$$

$$(3.3)$$

Pri tem so  $u_0$ ,  $v_0$  in  $w_0$  pomiki poljubne točke središčne ravnine laminata vzdolž  $x, y$  in  $z$  osi. Ko enkrat poznamo pomike središčne ploskve ( $u_0$ ,  $v_0$ ,  $w_0$ ), potem poznamo tudi deformacije v plošči. Deformacije se spreminjajo linearno po debelini laminata, napetosti pa linearno po debelini posameznega sloja.



Slika 3.1: Nedeformirana in deformirana plošča v skladu s Kirchhoff-ovimi predpostavkami ([www-g.eng.cam.ac.uk](http://www-g.eng.cam.ac.uk))

### 3.3.2 Strižna teorija prvega reda – FOSDT (First Order Shear Deformation Theory)

Naslednja teorija po hierarhiji ekvivalentne enoplastne teorije je strižna teorija prvega reda oziroma First Order Shear Deformation Theory (FOSDT). Osnovana je na naslednjih predpostavkah o pomikih:

$$(3.4)$$

$$(3.5)$$

$$(3.6)$$

Pri tem sta  $u_0$  in  $\theta_0$  zasuka okrog osi  $y$  in  $x$  osi. Strižna teorija prvega reda razširi kinematiko klasične teorije laminatov in vključi prečne strižne deformacije, pri čemer so le-te konstantne po slojih.



### **3.4 Računalniški programi**

Za izračune in pa modeliranje plošč sem uporabljal programa Microsoft Office Excel in SAP 2000.

#### **3.4.1 Program Excel**

Excel je del programskega paketa MS Office. Program, omogoča tabelarične račune podatkov, ima zmožnosti numeričnega iskanja rešitve enačb, ponuja veliko različnih možnosti izdelave grafov, ter različnih vrst kalkulacij.

#### **3.4.2 Program SAP 2000**

SAP 2000 je program za analizo konstrukcij po metodi končnih elementov, ki ga je razvilo podjetje Computers & Structures inc. iz Berkleyja v Kaliforniji. Program se uporablja pri pouku predmetov, ki se ukvarjajo z računalniškim projektiranjem konstrukcij, na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo. Ima uporabniku prijazen CAD vmesnik in solidno bazo končnih elementov. Za analizo sem uporabljal verziji programa 10.0.1. ter 14.0.1.

### **3.5 Izračun efektivnega vztrajnostnega moemnta $I_{ef}$ oziroma efektivnega modula elastičnosti $E_{ef}$ na več različnih načinov ter primerjava dobljenih rezultatov**

V tem poglavju bom prikazal štiri različne načine izračuna  $(EI)_{ef}$ , ter primerjavo med dobljenimi rezultati. Začel bom z najbolj grobim izračunom in nadaljeval z vedno bolj točnimi. Vse izračune bom delal za nosilec preko enega polja, širine 1 m in dolžin 2 m, 4 m, 6 m, 8 m. Izračune pa bom izvedel za vse tipske debeline plošč.

### 3.5.1 Izračun efektivnega vztrajnostnega momenta $I_{ef}$ , v katerem kot nosilne upoštevamo le vzdolžne sloje glede na proizvodno dolžino plošč

Prvi postopek za izračun  $(EI)_{ef}$  je najbolj enostaven, pridobljeni rezultati pa bodo služili predvsem kot orientacija in primerjava pri ostalih postopkih.

Pri tem postopku bomo kot nosilne plasti upoštevali le tiste katerih vlakna tečejo vzporedno z glavno nosilno smerjo križno lepljenih panelov. Poleg tega pa ne bomo upoštevali deformacije prečnih slojev ( $\gamma_i = 1$ ). Dolžina elementa ne vpliva na izračun efektivnih vztrajnostnih momentov.

Izračun :

$$\text{---} \quad (3.7)$$

$$(3.8)$$

$$(3.9)$$

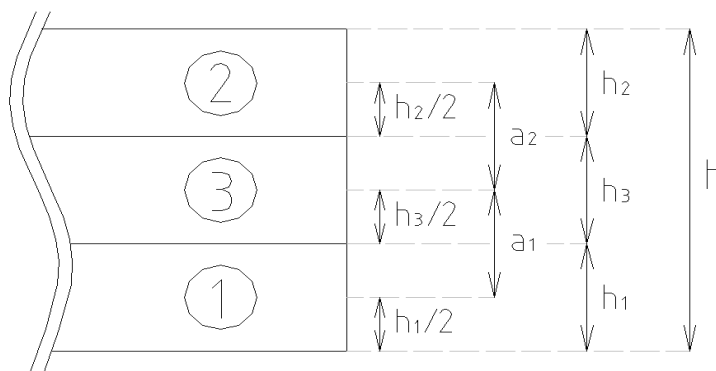
$$(3.10)$$

$a_i$  : (razdalja od težišča plošče do težišča i-tega sloja)

• 3 slojna plošča:

$$\text{---} \quad (3.11)$$

$$\text{---} \quad (3.12)$$



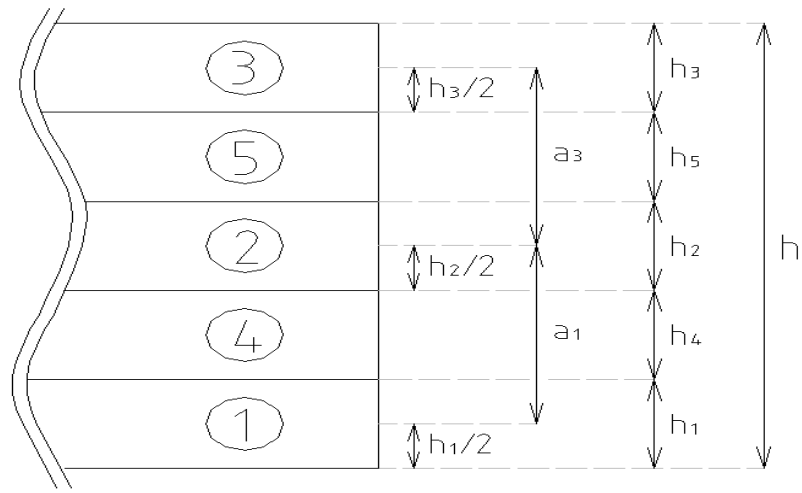
Slika 3.2: 3-slojna plošča z označenimi debelinami, sloji in le tem pripadajočimi ročicami

• 5 slojna plošča :

— — (3.13)

(3.14)

— — (3.15)



Slika 3.3: Prikaz številčenja slojev pri 5 slojni plošči

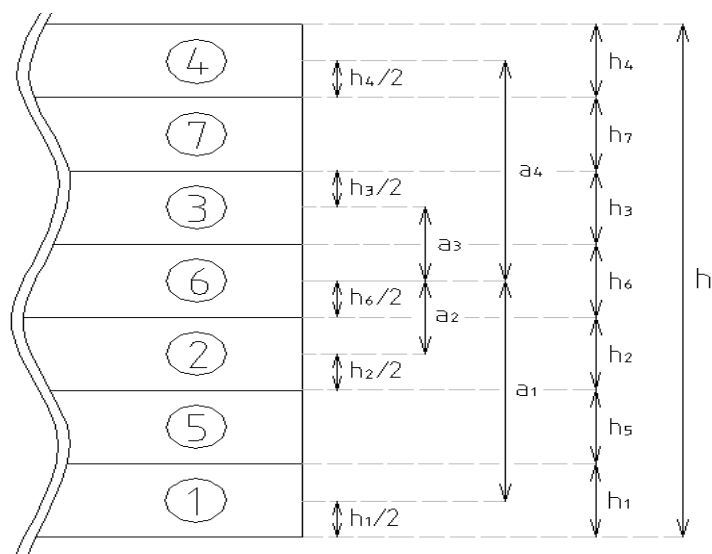
• 7 slojna plošča :

— — (3.16)

— — (3.17)

— — (3.18)

— — (3.19)



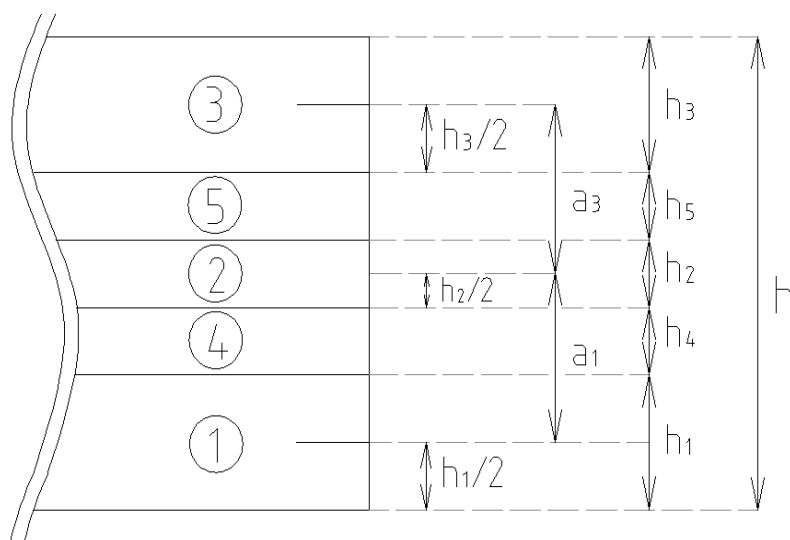
Slika 3.4: Prikaz številčenja slojev pri 7 slojni plošči

- 7 slojna ss plošča (zgornji in spodnji plasti sta enako orientirani ter med seboj toga zlepljeni skupaj, tako da jo obravnavamo kot 5 slojno ploščo)

$$- \quad - \quad (3.20)$$

$$(3.21)$$

$$- \quad - \quad (3.22)$$



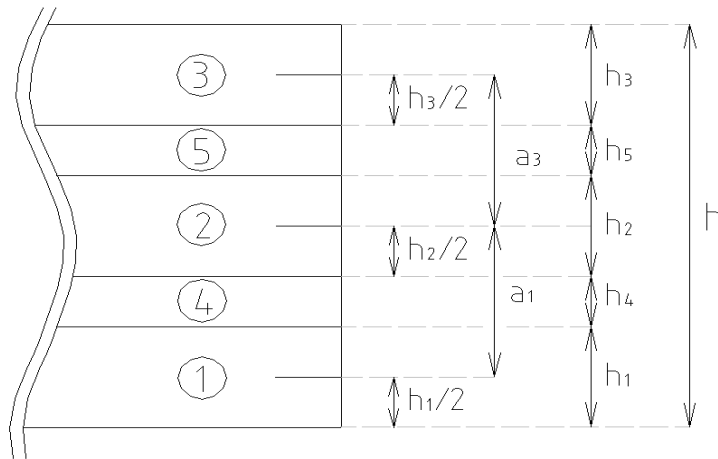
Slika 3.5: Prikaz številčenja slojev pri 7 slojni ss plošči, zunanji dve plasti sta enako orientirani

- 8 slojna ss plošča (zgornji in spodnji plasti ter srednji dve so enako orientirani ter med seboj togo zlepljene skupaj, tako da jo obravnavamo kot 5 slojno ploščo

— — (3.23)

(3.24)

— — (3.25)



Slika 3. 6: Prikaz številčenja slojev pri 8 slojni ss plošči, zunanji in pa srednji dve plasti sta enako orientirani

Preglednica 3.1: Debeline in tipi obravnavanih križno lepljenih lesenih plošč, vrednosti izračunanih efektivnih vztrajnostnih momentov, kjer smo kot nosilne upoštevali le vzdolžne sloje glede na proizvodno dolžino

Plošča			$I_{\text{eff}}^1$ [cm <sup>4</sup> ]
Število slojev	Skupna debelina [mm]	Debelina posameznih slojev [mm]	
3s	60	19/22/19	1711,267
3s	78	19/40/19	3421,267
3s	90	34/22/34	5986,267
3s	95	34/27/34	6980,767
3s	108	34/40/34	9964,267
3s	120	40/40/40	13866,67
5s	117	19/30/19/30/19	9295,275
5s	125	19/34/19/34/19	10845,68
5s	140	34/19/34/19/34	20083,8
5s	146	34/22/34/22/34	22307,4
5s	162	34/30/34/30/34	28835,4
5s	182	34/40/34/40/34	38219,4
5s	200	40/40/40/40/40	52800
7s	202	34/22/34/22/34/22/34	54622,13
7s	226	34/30/34/30/34/30/34	70942,13
7ss	208	68/19/34/19/68	72208,07
7ss	230	68/30/34/30/68	94797,67
8ss	248	68/22/68/22/68	118021,8

### 3.5.2 Izračun $(EI)_{ef}$ , v katerem kot nosilne upoštevam tako vzdolžne kot prečne sloje glede na proizvodno dolžino plošče

Pri tem postopku smo upoštevali tako vzdolžne kot tudi prečne sloje, deformacije prečnih slojev pa tako kot v prejšnem postopku še vedno ne bom upošteval ( $\gamma_i = 1$ ). Dolžina elementa ne vpliva na izračun efektivnih vztrajnostnih momentov. V tem primeru bodo rezultati že nekoliko bolj točni, vendar zaradi neodvisnosti od dolžine elementa  $L$ , pri krajših razponih še vedno daleč od želenih.

Izračun :

$$\text{—————} \quad (3.26)$$

$$(3.27)$$

$$\text{—————} \quad (3.28)$$

$$, \quad (3.29)$$

pri čemer je  $m$  število različno orientiranih plasti.

$a_i$ : (razdalja od težišča plošče do težišča  $i$ -tega sloja)

• 3 slojna plošča :

$$\text{— —} \quad (3.30)$$

$$\text{— —} \quad (3.31)$$

$$(3.32)$$

$n = 2, m = 3$

• 5 slojna plošča :

$$\text{— —} \quad (3.33)$$

$$(3.34)$$

$$\text{— —} \quad (3.35)$$

$$(3.36)$$

$$\text{— —} \quad (3.37)$$

$n = 3, m = 5$

• 7 slojna plošča :

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.38)$$

$$\text{—} \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.39)$$

$$\text{—} \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.40)$$

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.41)$$

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.42)$$

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.43)$$

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.44)$$

$$n = 4, m = 7$$

• 7 slojna ss plošča (zgornji in spodnji plasti sta enako orientirani ter med seboj togo zlepljeni skupaj, tako da jo obravnavamo kot 5 slojno ploščo)

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.45)$$

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.46)$$

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.47)$$

$$\text{—} \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.48)$$

$$\text{—} \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.49)$$

$$n = 3, m = 5$$

• 8 slojna ss plošča (zgornji in spodnji plasti ter srednji dve so enako orientirani ter med seboj togo zlepljene skupaj, tako da jo obravnavamo kot 5 slojno ploščo)

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.50)$$

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.51)$$

$$\text{—} \quad \quad \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.52)$$

$$\text{—} \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.53)$$

$$\text{—} \quad \text{—} \quad \quad \quad (3.54)$$

$$n = 3, m = 5$$



Iz preglednic 3.1 in 3.2 lahko vidimo, da se vrednosti efektivnih vztrajnostnih momentov v primerih, ko upoštevamo oziroma ne upoštevamo nosilnost slojev pravokotnih na proizvodno dolžino, razlikujejo le malenkostno. Kot vidimo v spodnji preglednici te razlike le redko presežejo 1%, to pa zato ker je razlika med elastičnim modulom vzdolž glavne nosilne smeri  $E_{o,mean}$  in pa pravokotno nanjo  $E_{90,mean}$ , zelo velika:

$$\frac{E_{90,mean}}{E_{o,mean}} = \dots \quad (3.55)$$

Na velikost razlike, pa najbolj vpliva debelina slojev pravokotnih na proizvodno dolžino – v tem primeru nenosilnih slojev. Pomanjkljivost teh dveh načinov izračuna efektivnih vztrajnostnih momentov je tudi v tem, da ne zajameta vpliva dolžine samega elementa in pa strižne deformacije slojev prečno na proizvodno dolžino "rolling shear". Obe omenjeni pomanjkljivosti pa naslednja metoda zajema s pomočjo modificiranega faktorja togosti veznih sredstev  $\gamma$ .

Preglednica 3.2: Debeline in tipi obravnavanih križno lepljenih lesenih plošč, vrednosti izračunanih efektivnih vztrajnostnih momentov, kjer smo kot nosilne upoštevali tako vzdolžne kot prečne sloje glede na proizvodno dolžino

Plošča			$I_{\text{eff}}^2$ [cm <sup>4</sup> ]	
Število slojev	Skupna debelina [mm]	Debelina posameznih slojev [mm]		[%]
3s	60	19/22/19	1714,003	0,16
3s	78	19/40/19	3437,711	0,48
3s	90	34/22/34	5989,003	0,05
3s	95	34/27/34	6985,824	0,07
3s	108	34/40/34	9980,711	0,16
3s	120	40/40/40	13883,11	0,12
5s	117	19/30/19/30/19	9420,196	1,34
5s	125	19/34/19/34/19	11013,11	1,54
5s	140	34/19/34/19/34	20169,61	0,43
5s	146	34/22/34/22/34	22419,23	0,5
5s	162	34/30/34/30/34	29038,72	0,71
5s	182	34/40/34/40/34	38589,98	0,97
5s	200	40/40/40/40/40	53227,56	0,81
7s	202	34/22/34/22/34/22/34	55055,79	0,79
7s	226	34/30/34/30/34/30/34	71720,71	1,1
7ss	208	68/19/34/19/68	72212,41	0,006
7ss	230	68/30/34/30/68	95000,98	0,21
8ss	248	68/22/68/22/68	118301	0,24

### 3.5.3 Izračun $(EI)_{ef}$ po priporočilih proizvajalca KLH

Pri natančnejšem izračunu nosilnosti navzkrižno lepljenih lesenih masivnih plošč moramo upoštevati podajno prečno povezavo med posameznimi sloji (vpliv strižne deformacije zaradi »rolling shear« v prečnih slojih). Natančen postopek izračuna je naveden v standardu EN 1995-1-1 v dodatku B, ki določa pravila za dimenzioniranje sestavljenih upogibnih elementov.

V bistvu določimo efektivni vztrajnostni moment  $I_{eff}$  in neto površino  $A_{net}$ .

Uporabljen računski postopek je po priporočilih standarda Ö-Norm B 4100/2, poglavje 4.1.7 oziroma dobljen z modifikacijo izrazov za sestavljene elemente iz EC5, na sledeči način. V enačbi

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_i * A_i}{l_i^2 * k_i}} \quad (3.56)$$

kjer  $k_i$  predstavlja togost posameznega spoja,

$$k_i = \frac{K_i}{s_i} \quad (3.57)$$

pri čemer sta:

$K_i$  modul zdrsa veznega sredstva v mejnem stanju,

$s_i$  računska razdalja med veznimi sredstvi,

se  $k_i$  zamenja z . Pri tem so:

$b$  širina elementa ,

$G_r$  strižni modul pravokotno na smer vlaken lesa v ravnini sloja desk  
"Rolling shear" ki po navedbah proizvajalca KLH znaša  $5 \text{ kN/cm}^2$  ,

$h_i^*$  debelina slojev pravokotno na proizvodno dolžino plošč.

Tako dobimo naslednjo enačbo za izračun efektivnega vztrajnostnega momenta:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_i * A_i * h_i^*}{l_i^2 * G_r * b}} \quad (3.58)$$

Nosilnosti prečnih slojev glede na proizvodno dolžino se pri računu ne upošteva.

$a_i$ : (razdalja od težišča plošče do težišča i-tega sloja)

• 3 slojna plošča:

---

— — (3.59)

— — (3.60)

• 5 slojna plošča :

— — (3.61)

(3.62)

— — (0.63)

• 7 slojna plošča :

— — (3.64)

— — (3.65)

— — (3.66)

— — (3.67)

• 7 slojna ss plošča (zgornji in spodnji plasti sta enako orientirani ter med seboj togo zlepljeni skupaj, tako da jo obravnavamo kot 5 slojno ploščo)

— — (3.68)

(3.69)

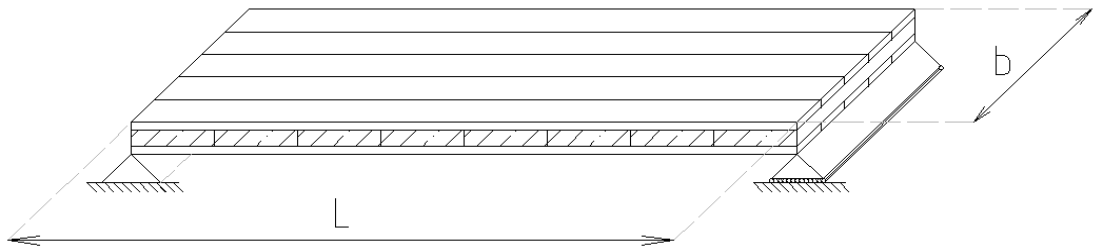
— — (3.70)

• 8 slojna ss plošča (zgornji in spodnji plasti ter srednji dve so enako orientirani ter med seboj togo zlepljene skupaj, tako da jo obravnavamo kot 5 slojno ploščo)

— — (371)

(3.72)

— — (3.73)



Slika 3.7: Nosilec preko enega polja

V preglednici številka 3.3 so prikazani rezultati izračuna efektivnega vztrajnostnega momenta za vse tipske debeline plošč. Račun sem izvedel za nosilec preko enega polja širine 1m, in pa štiri različne dolžine (2, 4, 6 in 8 metrov).

Rezultati se večinoma ujemajo z rezultati, ki jih podaja proizvajalec KLH, do bolj opaznih razlik pa pride predvsem pri krajših razponih (2 in 4 m), ter pri tanjših ploščah. Tako je največje odstopanje 21% pri troslojni plošči, skupne debeline 12 cm (posamezni sloji so debeli 4 cm) in razponu 2m. Pri več kot 75% primerih pa je razlika manjša od 0,5% ali pa se rezultati popolnoma ujemajo. Odstopanja pa vedno nastopijo na varno stran (izračunane vrednosti so manjše od podanih).

Preglednica 3.3: Debeline in tipi obravnavanih plošč, vrednosti izračunanih  
 efektivnih vztrajnostnih momentov po priporočilih proizvajalca KLH

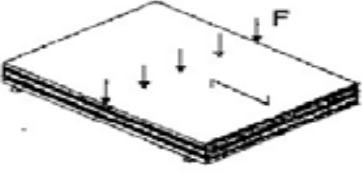

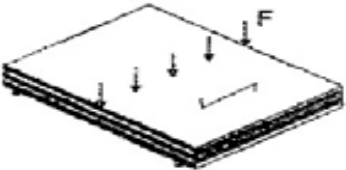

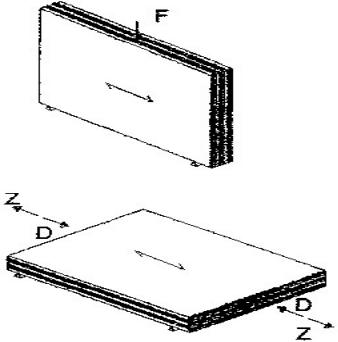

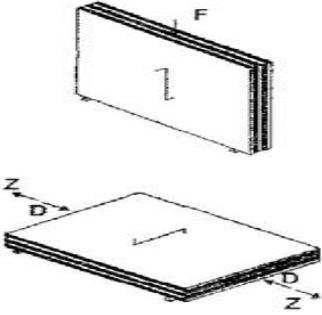

Plošča			$I_{\text{eff}}$ [cm <sup>4</sup> ]			
Število slojev	Skupna debelina [mm]	Debelina posameznih slojev [mm]	L=2m	L=4m	L=6m	L=8m
3s	60	19/22/19	1394,406	1618,2	1668,52	1683,94
3s	78	19/40/19	2394,887	3086,82	3263,78	3330,79
3s	90	34/22/34	4349,726	5454,76	5736,19	5842,65
3s	95	34/27/34	4753,07	6223,93	6620,45	6772,91
3s	108	34/40/34	5811,491	8404,08	9199,66	9518,14
3s	120	40/40/40	7639,256	11415,4	12647,5	13151,1
5s	117	19/30/19/30/19	6992,801	8585,28	8965,46	9106,77
5s	125	19/34/19/34/19	7892,159	9913,94	10410,5	10596,4
5s	140	34/19/34/19/34	14798,56	18416,5	19305	19637,8
5s	146	34/22/34/22/34	15761,24	20181,4	21307,1	21732,9
5s	162	34/30/34/30/34	18346,97	25181,3	27083,7	27822,2
5s	182	34/40/34/40/34	21608,3	31978,7	35161	36434,9
5s	200	40/40/40/40/40	27890,36	42994,8	47923,3	49937,6
7s	202	34/22/34/22/34/22/34	38256,72	49307,1	52121,4	53186
7s	226	34/30/34/30/34/30/34	44721,07	61806,8	66562,8	68409,1
7ss	208	68/19/34/19/68	43322,48	61508,2	66986,8	69166,9
7ss	230	68/30/34/30/68	45979,3	74100,3	84238,1	88533,6
8ss	248	68/22/68/22/68	66273,36	98046,9	108149	112241

Primerjava vrednosti iz preglednice številka 3.3 s tistimi iz preglednic številka 3.1 in 3.2, pa nam pove da sta prva dva načina povsem neprimerna za uporabo. Pogojno uporabni bi bili le pri največjih razponih, kjer je vpliv strižne deformacije prečnih slojev že tako majhen, da se vrednosti dobljene po izračunu ki ga priporoča proizvajalec ne razlikujejo veliko od tistih dobljenih po prvih dveh metodah.

### **3.5.4 Izračun $(EI)_{ef}$ po predlogu Blass**

Postopek za izračun efektivnih modulov elastičnosti in trdnosti križno lepljenih panelov, s katerim zajamemo lastnosti posameznih slojev, je predlagal prof. Blass. Metoda temelji na sestavnih koeficientih, ki predstavljajo razmerje med trdnostjo oz. modulom elastičnosti obravnavanega križno lepljenega prereza in trdnostjo oz. modulom elastičnosti namišljenega homogenega prereza, ki ima vlakna vseh plasti vzporedna s smerjo napetosti. Obnašanje križno lepljenega panelnega elementa torej opišemo z efektivnimi vrednostmi trdnosti oz. modulov elastičnosti, ki bi ustrezali homogenemu prerezu enake debeline. (Blass, 2004)

Preglednica 3.4: Sestavni koeficienti za lesene križno lepljene plošče (Blass, 2004)

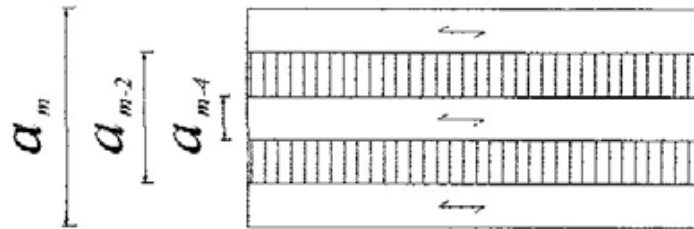
	$k_i$
	
	
	
	

kjer pomeni:

- debelina srednje plasti križno lepljenega panela,
- celotna debelina križno lepljenega panela,
- modul elastičnosti posamezne plasti križno lepljenega panela v smeri vlaken in
- modul elastičnosti posamezne plasti križno lepljenega panela v smeri



pravokotno na vlakna.



Slika 3.8: Sestava in oznake slojev križno lepljene plošče ( $m=5$ )

(Blass, 2004)

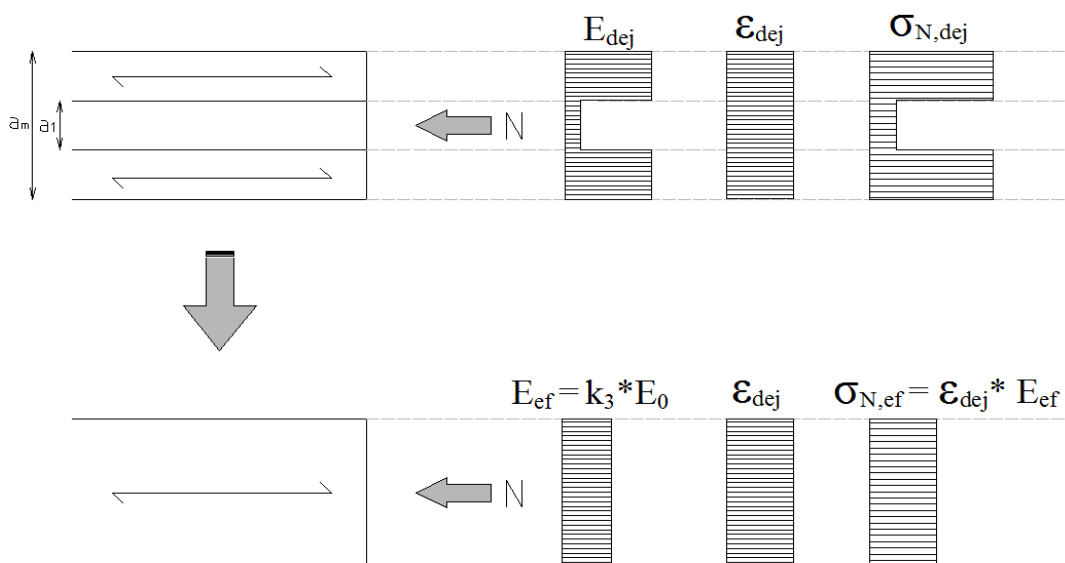
Za izračun različnih vrst napetosti se uporabljajo različni sestavni koeficienti. V primeru obremenitve pravokotno na ravnino panela ustreza normalnim napetostim v smeri vzporedno s smerjo vlaken zunanjih plasti sestavni koeficient  $k_1$ , normalnim napetostim v smeri pravokotno na smer vlaken zunanjih plasti pa koeficient  $k_2$ . Podobno je za obremenitev v ravnini panela, kjer normalnim napetostim v smeri vzporedno s smerjo vlaken zunanjih plasti ustreza sestavni koeficient  $k_3$ , normalnim napetostim v smeri pravokotno na smer vlaken zunanjih plasti pa koeficient  $k_4$ . Enačbe za izračun koeficientov prikazuje preglednica 4. Načeloma so deske posameznih plasti križno lepljenega panela trdnostnega razreda C24. Ker pa ta način izračuna trdnostnih ter togostnih karakteristik ne upošteva laminacije materiala in posledično negativnega vpliva, ki ga ta prinaša, so materialne karakteristike naše nadomestne plošče veliko boljše kot pa karakteristike prvotnega materiala (C24). Na podlagi mnogih testov je bilo ugotovljeno, da lahko za izračun efektivnih trdnosti in togosti lesenih masivnih križno lepljenih panelov narejenih iz materiala trdnostnega razreda C24 uporabimo lastnosti materiala trdnostnega razreda GL28h.

S pomočjo sestavnih koeficientov in trdnostnih ter togostnih lastnosti lesa GL28h tako določimo efektivne trdnosti in togosti lesenih masivnih križno lepljenih panelov za različne vrste napetosti v skladu z naslednjo tabelo.

Preglednica 3.5: Efektivne trdnosti in togosti lesenih križno lepljenih plošč (Blass, 2004)

Obtežba	Glede na smer vlaken zunanjih plasti	Efektivna trdnost	Efektivni moduli elastičnosti
Obtežba pravokotno na ravnino plošče			
Upogib	Vzporedno	$f_{m,0,ef} = f_{m,0} \cdot k_1$	$E_{m,0,ef} = E_0 \cdot k_1$
	Pravokotno	$f_{m,90,ef} = f_{m,0} \cdot k_2 \cdot \frac{a_m}{a_{m-2}}$	$E_{m,90,ef} = E_0 \cdot k_2$
Obtežba v ravnini plošče			
Upogib	Vzporedno	$f_{m,0,ef} = f_{m,0} \cdot k_3$	$E_{m,0,ef} = E_0 \cdot k_3$
	Pravokotno	$f_{m,90,ef} = f_{m,0} \cdot k_4$	$E_{m,90,ef} = E_0 \cdot k_4$
Nateg	Vzporedno	$f_{t,0,ef} = f_{t,0} \cdot k_3$	$E_{t,0,ef} = E_0 \cdot k_3$
	Pravokotno	$f_{t,90,ef} = f_{t,0} \cdot k_4$	$E_{t,90,ef} = E_0 \cdot k_4$
Tlak	Vzporedno	$f_{c,0,ef} = f_{c,0} \cdot k_3$	$E_{c,0,ef} = E_0 \cdot k_3$
	Pravokotno	$F_{c,90,ef} = f_{c,0} \cdot k_4$	$E_{c,90,ef} = E_0 \cdot k_4$

Na ta način križno lepljeni prerez panelnega elementa nadomestimo z namišljenim homogenim prerezom, ki ima vlakna vseh plasti vzporedna, in mu določimo efektivna elastična modula v smeri vzporedno in pravokotno glede na namišljeno smer vlaken (Slika 3.9).



Slika 3.9: Prikaz napetostno-deformacijskega stanja v slojevitom elementu in v odgovarjajočem nadomestnem enoslojnem elementu (Blass, 2004)

V naslednji tabeli podajam vrednosti sestavnih koeficientov  $k_1$  in  $k_2$ , ter efektivne vrednosti modulov elastičnosti  $E_{m,0,ef}$  in  $E_{m,90,ef}$  za vseh 18 obravnavanih debelin plošč. Za ta račun sem vzel elastične module za les trdnostnega razreda GL28h:

$$E_{0,mean} = 1260 \text{ kN/cm}^2,$$

$$E_{90,mean} = 42 \text{ kN/cm}^2.$$

Razlog, zakaj podajam samo  $k_1$  in  $k_2$  ter  $E_{m,0,ef}$  in  $E_{m,90,ef}$  je v tem, da bom obravnaval le plošče ne pa tudi stene. Tako, da me zanima le obnašanje pri obremenitvah pravokotnih na ravnino plošče.

Opazimo lahko da izračunani efektivni moduli elastičnosti od izhodiščnega modula elastičnosti odstopajo zelo različno. Pri  $E_{m,0,ef}$  so ta odstopanja od le 1,4% pa vse do 32,3%. Pri  $E_{m,90,ef}$  pa vrednosti v določenih primerih že kar nepredstavljivo narastejo in sicer od 42,4% pa vse do 1000,1%. Največje razlike pri  $E_{m,90,ef}$  nastanejo pri ploščah, ki imajo relativno debele vmesne nenosilne sloje, ki so v tem primeru orientirani pravokotno na proizvodno dolžino in najmanjše pri ploščah, ki imajo te sloje relativno tanke. Ravno obratno pa velja za  $E_{m,0,ef}$ , kjer velja, da debelejši kot so nosilni sloji, glede na celotno debelino plošče, ki so v tem primeru orientirani vzdolž proizvodne dolžine, manjše je odstopanje od  $E_{0,mean}$  in tanjši ko so nosilni sloji, glede na celotno debelino plošče, večje je odstopanje od  $E_{0,mean}$ .

Preglednica 3.6: Debeline in tipi obravnavanih plošč, vrednosti sestavnih koeficientov ter efektivnih modulov elastičnosti izračunanih po predlogu Blassa

Plošča			$k_i$		$E_{m,i,ef}$	
Število slojev	Skupna debelina [mm]	Debelina posameznih slojev [mm]	$k_1$	$k_2$	$E_{m,0,ef}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$E_{m,90,ef}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
3s	60	19/22/19	0,952347	0,08099	1142,8	97,2
3s	78	19/40/19	0,869631	0,1637	1095,7	206,3
3s	90	34/22/34	0,98558	0,04745	1242,2	59,8
3s	95	34/27/34	0,97781	0,05553	1232	70
3s	108	34/40/34	0,95088	0,08245	1198,1	103,9
3s	120	40/40/40	0,96419	0,06914	1214,9	87,1
5s	117	19/30/19/30/19	0,706562	0,33689	890,3	424,5
5s	125	19/34/19/34/19	0,67748	0,36698	853,6	462,4
5s	140	34/19/34/19/34	0,882357	0,15503	1111,8	195,3
5s	146	34/22/34/22/34	0,864807	0,17319	1089,7	218,2
5s	162	34/30/34/30/34	0,82001	0,21945	1033,31	276,5
5s	182	34/40/34/40/34	0,76874	0,27257	968,6	343,4
5s	200	40/40/40/40/40	0,79893	0,24133	1003,7	304,1
7s	202	34/22/34/22/34/22/34	0,802061	0,2381	1010,6	300
7s	226	34/30/34/30/34/30/34	0,74625	0,29584	940,3	372,8
7ss	208	68/19/34/19/68	0,964128	0,07044	1214,8	88,8
7ss	230	68/30/34/30/68	0,93713	0,09837	1180,8	123,9
8ss	248	68/22/68/22/68	0,93089	0,10483	1172,9	132,1

### 3.5.5 Primerjava $(EI)_{ef}$ po Blassu in $(EI)_{ef}$ po priporočilih KLH

Preglednica 3.7: Primerjava  $(EI)_{ef}$  izračunanih po priporočilih Blassa in  $(EI)_{ef}$  po priporočilih KLH

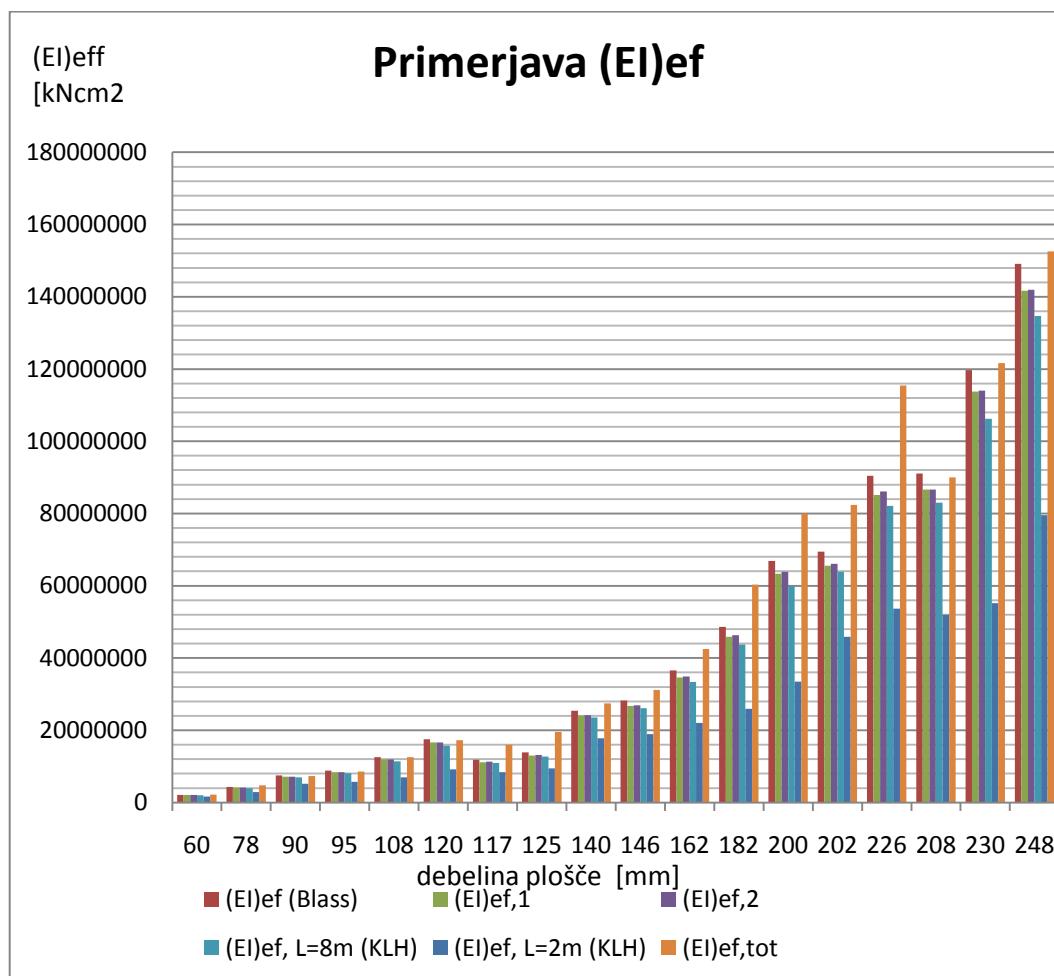
Število slojev	Skupna debelina [mm]	Račun po Blassu $(EI)_{ef}$ [kNcm <sup>2</sup> ]	Račun po priporočilih KLH $(EI)_{ef}$ [kNcm <sup>2</sup> ]			
			L=2m	L=4m	L=6m	L=8m
3s	60	2057040	1673287,2	1941843,6	2002225,2	2020724,4
3s	78	4333493,5	2873864,4	3704184	3916530	3996950,4
3s	90	7546365	5219671,2	6545715,6	6883430,4	7011182,4
3s	95	8802640	5703684	7468719,6	7944535,2	8127487,2
3s	108	12577653,8	6973789,2	10084897	11039591	11421773
3s	120	17494560	9167107,2	13698444	15176988	15781272
5s	117	11882834,1	8391361,2	10302330	10758553	10928128
5s	125	13893193,6	9470590,8	11896728	12492564	12715704
5s	140	25423530,6	17758272	22099776	23166000	23565324
5s	146	28260279,8	18913488	24217656	25568520	26079528
5s	162	36609140	22016364	30217536	32500404	33386604
5s	182	48660526,8	25929960	38374392	42193164	43721892
5s	200	66913667,9	33468432	51593748	57507936	59925072
7s	202	69415082,2	45908064	59168520	62545668	63823188
7s	226	90450277,9	53665284	74168196	79875372	82090884
7ss	208	91099066,8	51986976	73809876	80384208	83000256
7ss	230	119723674	55175160	88920312	101085672	106240284
8ss	248	149084973	79528032	117656316	129778920	134689680

---

V zgornji tabeli je podana primerjava med  $(EI)_{ef}$  izračunanem po Blassu in pa  $(EI)_{ef}$  izračunanem po priporočilih KLH za 4 pregledne razpone plošč. Vrednosti se približno ujemajo (razlike manjše od 10%) pri razponih 8 in več metrov, pri manjših razponih, pa so te razlike veliko večje. Do teh velikih razlik pride zaradi upoštevanja vpliva strižne deformacije.

Vpliv strižne deformacije, pravokotno na smer vlaken lesa, v ravnini sloja desk, pride najbolj do izraza pri krajših razponih. Na spodnjem grafu lahko vidimo primerjavo med vrednostmi  $(EI)_{ef}$ , ki je bil izračunan na 4 različne načine. Kot primerjalni vrednosti pa sta podani še vrednosti  $(EI)_{ef}$  izračunani na podlagi bruto dimenzij prereza, brez upoštevanja strižne deformacije ter manjše nosilnosti prečnih slojev  $(EI)_{ef,tot}$  in vrednost  $(EI)_{ef}$  za dvometrski razpon, izračunana po priporočilih proizvajalca. Iz grafa je razvidno, da največje vrednosti dosežajo rezultati dobljeni po Blassu, v nekaterih primerih celo presegajo tiste dobljene z uporabo bruto izmer prereza. So pa te vrednosti veliko višje od vrednosti dobljenih po priporočilih proizvajalca za dvometrski razpon. Iz tega sledi, da za uporabo pri dimenzioniranju krajših razponov, način računa po Blassu ni najbolj primeren, oziroma ni primeren!

Graf 3.1: Prikaz razlik med  $(EI)_{ef}$  izračunan na 4 različne načine



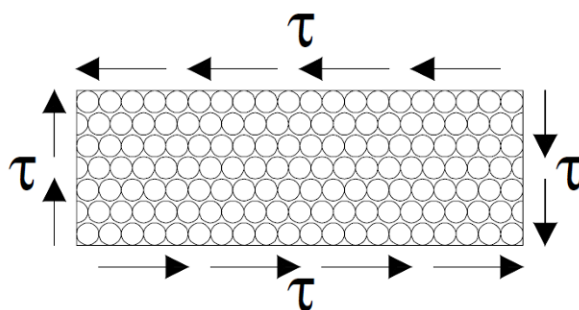
Opazim tudi to, da se vrednosti dobljene na popolnoma enostaven način (način 1 in pa način 2), le malo razlikujejo od tistih dobljenih po priporočilih Blassa, še vedno pa so, v primerjavi z Blassom, na varni strani. Iz tega bi lahko sklepali, da sta tudi ta dva načina, pri večjih razponih, popolnoma primerna, če ne drugače, vsaj za hitre ocene stanja.

V nobenem primeru, pa ti trije načini (1., 2. in pa Blass) niso primerni za uporabo pri dimenzioniranju krajših razponov, ker v računu ni upoštevan vpliv strižne deformacije na nosilnost plošče.

Za boljše razumevanje tega vpliva bom na kratko razložiti, kaj strižna deformacija v ravnini pravokotni na smer vlaken oziroma "rolling shear" je.

### 3.6 Strižna deformacija v ravnini pravokotni na smer vlaken oziroma "rolling shear"

Strižna deformacija v ravnini pravokotni na smer vlaken ("Rolling shear") je definirana kot strižna obremenitev, ki vodi do strižnega deformiranja v ravnini, ki je pravokotna na smer vlaken. Zaradi zelo nizke odpornosti proti taki obremenitvi, lahko pride do velikih strižnih deformacij. Na sliki številka 3.10 je shematski prikaz napetosti, ki se pojavijo zaradi delovanja strižne obremenitve preavokotno na smer vlaken.

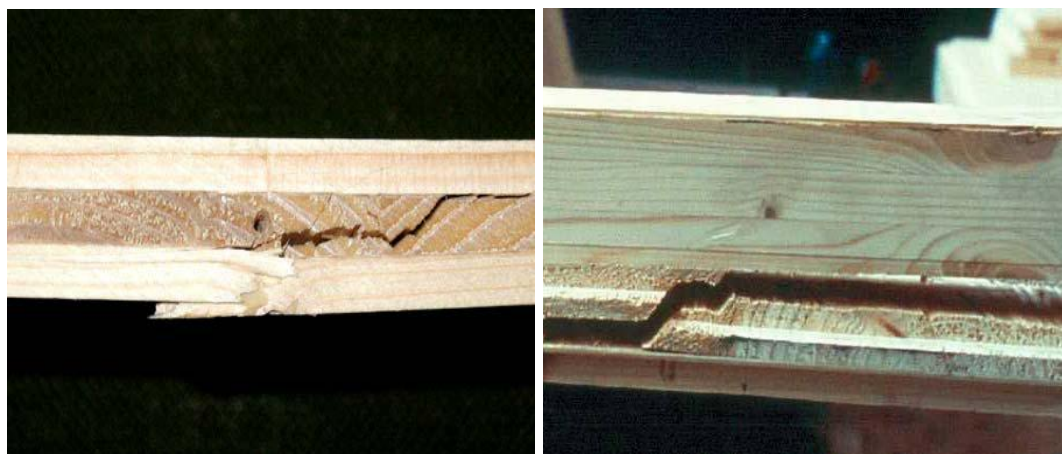


Slika 3.10: Napetosti, ki se pojavijo v lesu zaradi strižne obremenitve  
([www.rz.uni-karlsruhe.de](http://www.rz.uni-karlsruhe.de))

V EN 1995-1-1-Design of timber structures je podano razmerje za mehak les  $G_{R,mean} / G_{mean} = 0,1$ . Za roling shear odpornost, pa je podana vrednost  $f_{R,k} = 1,0$   $N/mm^2$ , ne glede na to, v kateri razred les spada.

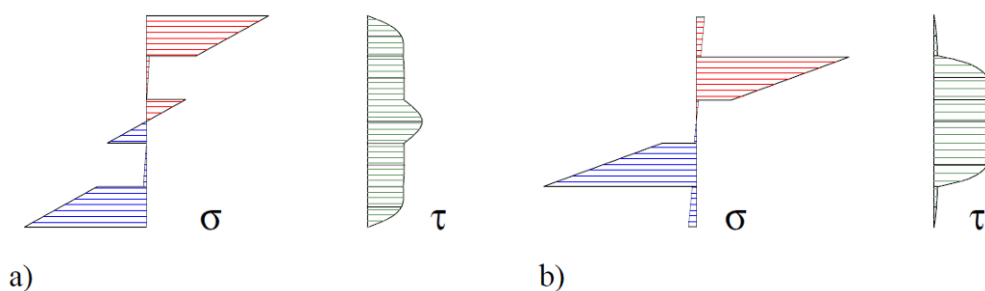
Neuhaus je na podlagi torzijskih preizkusov za smrekov les z 9 procentno vlažnostjo, določil "rolling shear" modul  $G_{R,mean} = 48$   $N/mm^2$ . Aicher je s pomočjo metode končnih elementov analiziral "rolling shear" modul  $G_{R,mean}$ , za različne orientacije vlaken v prečnem prerezu. Odvisno od te orientacije je dobil vrednosti med 50  $N/mm^2$  in 200  $N/mm^2$ . Eksperimentalno pa je Archer prišel do rezultatov 50  $N/mm^2$ . Na sliki številka 3.11 je prikazana porušitev zaradi "rolling shear" na dveh primerih.





Slika 3.11: Porušitev zaradi delovanja strižne obremenitve preavokotno na smer vlaken (obe sliki: [www.rz.uni-karlsruhe.de](http://www.rz.uni-karlsruhe.de))

Razporeditve napetosti in velikosti deformacij v kompozitnih ploščah obremenjenih pravokotno na svojo ravnino so močno odvisne od strižnih deformacij v plošči. Ker je "rolling shear" modul zelo majhen, se strižne deformacije zelo hitro povečajo v odvisnosti od debeline plasti, ki je le tem podvržena. Bernoullijeve hipoteze, ki pravi da prečni prerez ostane po deformaciji raven in pa linearnega poteka napetosti in deformacij zaradi strižnih deformacij ne moremo upoštevati. Na sliki številka 3.12 je prikazan potek upogibnih in strižnih napetosti v 5 slojni plošči. Plošča je obtežena pravokotno na svojo ravnino, napetosti pa so prikazane za upogib vzporedno in pa pravokotno na potek vlaken zunanjega sloja desk.



Slika 3.12: Upogibne in strižne napetosti 5 slojne lesene kompozitne plošče obremenjene pravokotno na ravnino plošče, upogib a) vzporedno z vlakni zunanje plasti b) pravokotno na vlakna zunanje plasti ([www.rz.uni-karlsruhe.de](http://www.rz.uni-karlsruhe.de))

Analiza razporeditve napetosti in deformacij je bila opravljena na dveh različnih ploščah dimenzij, ki so prikazane v preglednici številka 3.8. Upoštevane so bile naslednje lastnosti materiala:

Elastični modul vzporedno z vlakni	$E_0 = 12500 \text{ N/mm}^2$
Elastični modul pravokotno na vlakna	$E_{90} = E_0 / 30$
Strižni modul	$G = 500 \text{ N/mm}^2$
“Rolling shear” modul	$G_R = 50 \text{ N/mm}^2$

Preglednica 3.8: Izmere uporabljenih plošč ([www.rz.uni-karlsruhe.de](http://www.rz.uni-karlsruhe.de))

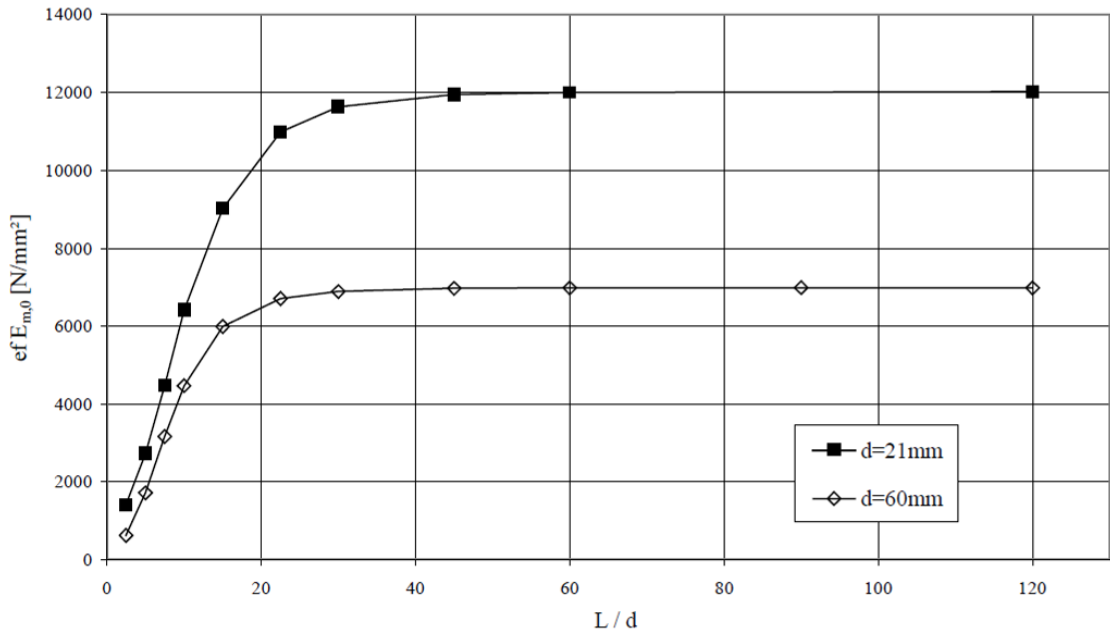
Število slojev	Skupna debelina [mm]	Debelina slojev [mm]
3	21	6,9/7,2/6,9
3	60	6,9/46,2/6,9

Za različne dolžine (s čemer se je spreminjalo razmerje med dolžino in debelino) smo izračunali efektivni elastični modul. Vpliv striga smo opazovali pri razmerjih dolžina/debelina manjših od 30, pri upogibu pravokotno na ravnino plošče in vzporedno z potekom vlaken lesa zunanjih slojev: z manjšanjem razmerja dolžina/debelina je vpliv striga naraščal in posledično se je manjšal efektivni elastični modul (efektivni elastični modul je: efektivna upogibna trdnost deljeno z vztrajnostnim momentom). Seveda je tu zelo pomemben delež debeline slojev z vlakni pravokotno na smer upogiba. Obe ugotovitvi sta jasno razvidni iz grafa številka 3.2.

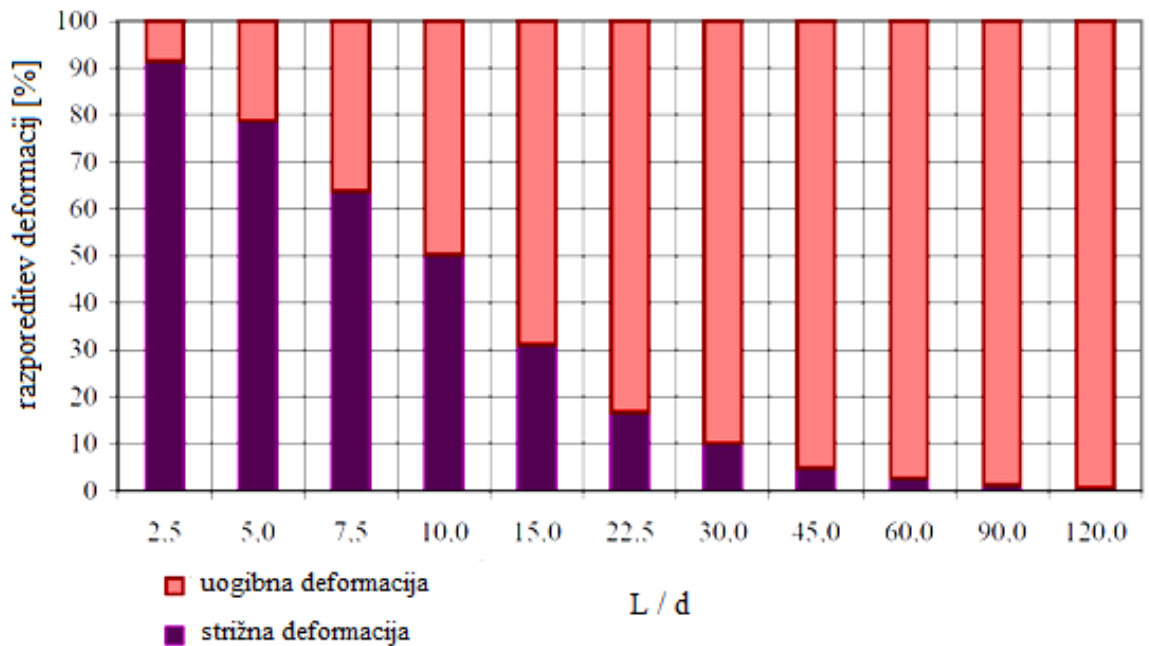
Na grafu številka 3.3 vidimo kako se spreminja razmerje med upogibno in strižno deformacijo glede na razmerje med dolžino in debelino plošče (debeline 60 mm) pri upogibu pravokotno na ravnino plošče in vzporedno s potekom vlaken zunanjih slojev. Zaradi tega, ker je “rolling shear” modul zelo majhen, se odstotek strižnih deformacij, pri majhnih razmerjih med dolžino in debelino, zelo hitro poveča. Zato je majhnih razmerjih med dolžino in debelino plošč, treba biti pozoren na strižno deformacijo v prečnih slojih.

Graf 3.2: Efektivni modul elastičnosti napram razmerju dolžin/debelina za upogib pravokotno na ravnino plošče in vzporedno z potekom vlaken zunanjšega sloja

(www.rz.uni-karlsruhe.de)



Graf 3.3: Razmerje med upogibnimi in strižnimi deformacijami glede na razmerje dolžina/debelina (www.rz.uni-karlsruhe.de)



### 3.7 Modeliranje s programom SAP 2000

V programu SAP 2000 smo izvedli primerjavo rezultatov analize pri različnih načinih modeliranja plošč, ter pri uporabi vhodnih podatkov dobljenih na različne načine. Prvi način bo uporaba materialnih karakteristik dobljenih po Blassu. Izmere prereza ostanejo nespremenje, v program pa podajamo izračunani  $E_{ef}$ . Za modeliranje bomo uporabili "Shell-Thin" ploskovne končne elemente. Pri drugem načinu bomo uporabili podatke izračunane po priporočilih KLH. Ponovno bomo za modeliranje uporabili "Shell-Thin" ploskovne končne elemente. Pri tretjem načinu pa bomo za modeliranje plošč uporabili "Shell-Layered" elemente, pri čemer se v program vnaša dejanske debeline in materialne karakteristike posameznih slojev. Za tretji način se pričakuje najbolj realne rezultate. Opravili pa bomo tudi modeliranje s "Solid" končnimi elementi. Vse dobljene rezultate bomo primerjali s podanimi diagrami za dimenzioniranje podjetja KLH. Primerjave bomo naredili za 4 različne plošče in več različnih dolžin plošč, pri konstantni širini 1 meter. Izbrali smo naslednje štiri plošče:

Preglednica 3.9: Plošče izbrane za modeliranje v programu SAP2000

Število slojev	Skupna debelina [mm]	Debelina posameznih slojev [mm]	Površina celotnega prereza [cm <sup>2</sup> ]	Vztrajnostni moment celotnega prereza [cm <sup>4</sup> ]
3s	95	34/27/34	950	7145
5s	146	34/22/34/22/34	1460	25934
7s	226	34/30/34/30/34/30/34	2260	96193
8ss	248	68/22/68/22/68	2480	127108

Plošče bomo obremenili z obtežbo, ki povzroča predpisan maksimalni pomik, le to pa bomo dobili iz diagramov za dimenzioniranje po priporočilih proizvajalca KLH.

### **3.7.1 Modeliranje plošč s pomočjo tankih lupinastih elementov in s karakteristikami nadomestnega homogenega prereza izračunanimi po predlogu Blassa**

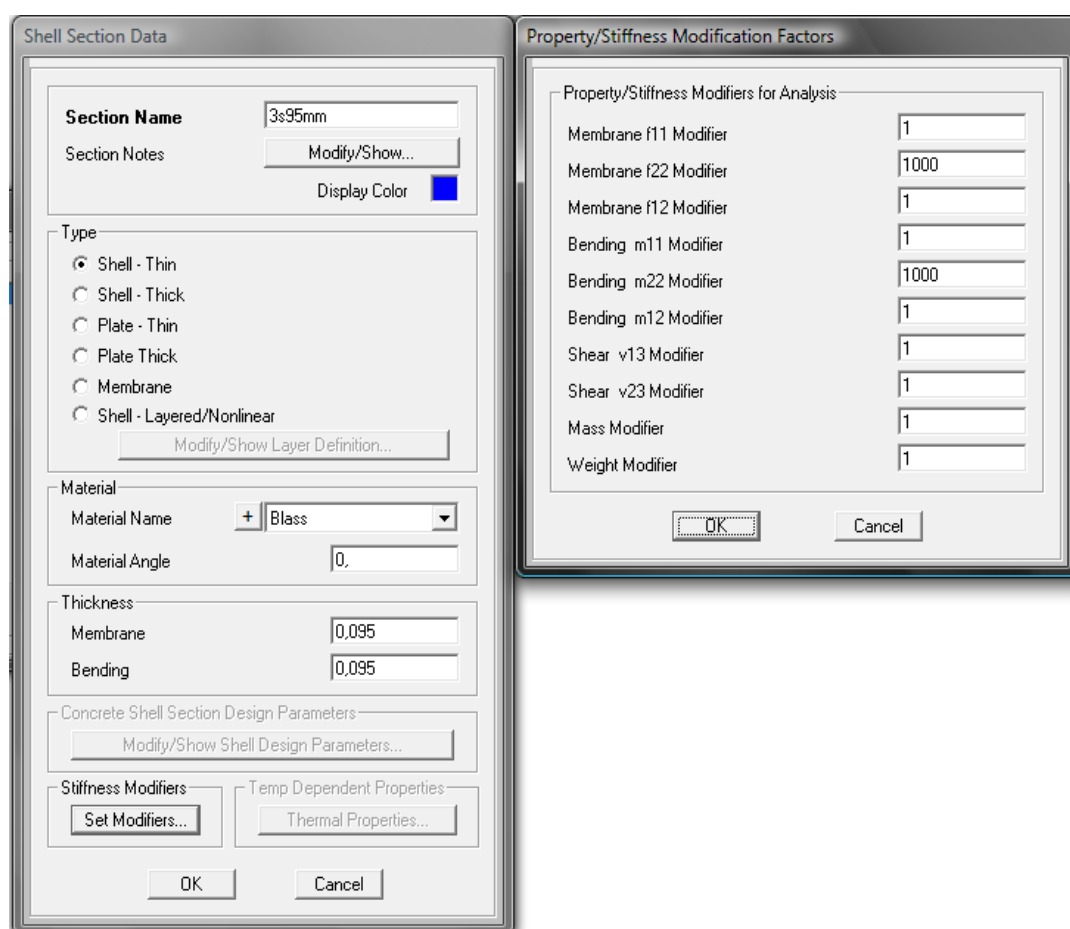
Križno lepljene plošče modeliramo s tankimi lupinastimi elementi (Shell), to je s ploskovnimi elementi, točneje s "Shell-Thin" elementi. Ko uporabimo te elemente program izvede analize na podlagi Kirchohoff – ovih predpostavk. V grobem to pomeni, da pri analizi ne upošteva prečnih strižnih deformacij. Ploščo smo razdelili na končne elemente z dimenzijami 20 cm x 20 cm. Tako, da je plošča po širini vedno razdeljena na pet končnih elementov, po dolžini pa na  $L \times 5$  končnih elementov. Za končne elemente je namreč pomembno, da so si dimenzije elementov čim bolj podobne. S korekcijskimi faktorji ploskovnemu elementu tudi povečamo osno in upogibno togost v prečni smeri, sicer nam program ne vrača merodajnih rezultatov. Ker smo izračunali efektivna modula elastičnosti  $E_{m,0,ef}$  in  $E_{m,90,ef}$ , ki ju uporabljamo v programu, v katerih je zajeta spremenjena narava samega prereza, nam ostalih togostnih karakteristik ni potrebno korigirati s korekcijskimi faktorji. Materialne karakteristike so neodvisne od dolžine obravnavane plošče. Odvisne so le od števila in debeline posameznih slojev. Tako je ta metoda analize dokaj hitra in enostavna.

**Material Property Data**

Material Name	Blass	Material Type	Other	Symmetry Type	Orthotropic		
Modulus of Elasticity	E1	12320000	Weight and Mass	Weight per Unit Volume	5,415	Units	KN, m, C
	E2	700000,		Mass per Unit Volume	0,		
	E3	700000,					
Poisson's Ratio	U12	0,467	Advanced Material Property Data	Nonlinear Material Data...	Material Damping Properties...		
	U13	0,372		Time Dependent Properties...	Thermal Properties...		
	U23	0,245					
Coeff of Thermal Expansion	A1	1,000E-05					
	A2	1,000E-05					
	A3	1,000E-05					
Shear Modulus	G12	690000,					
	G13	50000,					
	G23	690000,					

OK Cancel

Slika 3.13: Materialne karakteristike za 3 slojno križno lepljeno leseno ploščo, debeline 95 mm, izračunane po predlogu Blassa



Slika 3.14: Geometrijske karakteristike 3 slojne križno lepljene lesene plošče debeline 9,5 cm in korekcijski faktorji

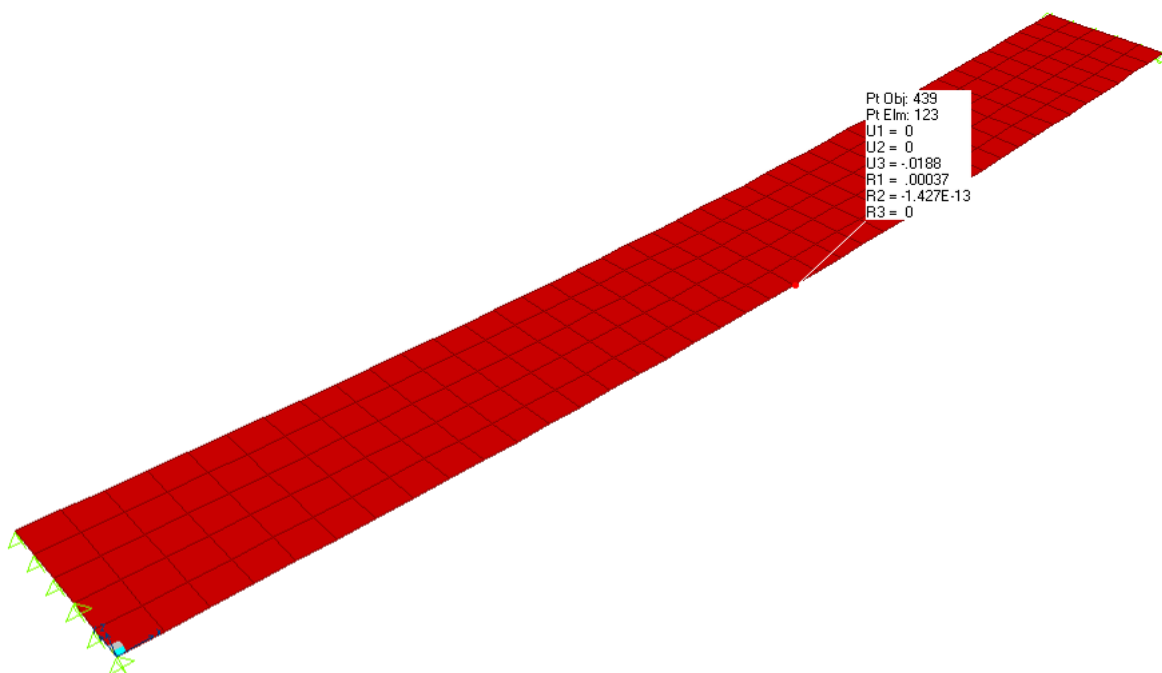
Plošče smo obtežili s podano maksimalno obtežbo za dovoljeni pomik, ki v našem primeru znaša  $L/400$ . Izračunani pomiki so praviloma manjši od predpisanih maksimalnih za to obtežbo, po priporočilih za dimenzioniranje križno lepljenih lesenih plošč firme KLH.

Iz spodnje preglednice, kjer so prikazani izračuni pomikov, narejeni s programom SAP2000, s pomočjo efektivnih elastičnih modulov izračunanih po priporočilih Blassa, lahko ugotovimo, da so dobljeni pomiki sicer manjši od priporočenih, kar pa nas ne sme zavesti! Ker so prikazani pomiki manjši, bi to vodilo do tega, da bi izbrali tanjše plošče ter se posledično premikali na nevarno stran priporočenih dimenzij prerezov za določene obtežbe.

Preglednica 3.10: Izračunani pomiki, za različne dolžine in debeline plošč, s programom SAP2000, z upoštevanjem karakteristik dobljenih po priporočilih Blassa

	Dolžina plošče [m]	Obtežba [kN/m <sup>2</sup> ]	L/400 [cm]	Izračunani pomiki s programom SAP2000, z upoštevanjem karakteristik dobljenih po priporočilih Blassa [cm]
3 slojna plošča Debeline 95 mm	3	5,43	0,75	0,66
	4	2,39	1,00	0,91
	5	1,20	1,25	1,11
	6	0,75	1,50	1,44
	7	0,50	1,75	1,78
	8	0,31	2,00	1,88
5 slojna plošča debeline 146 mm	4	7,27	0,01	0,87
	5	3,90	1,25	1,13
	6	2,31	1,50	1,38
	7	1,39	1,75	1,54
	8	1,00	2,00	1,89
7 slojna plošča debeline 226 mm	6	7,08	1,50	1,32
	7	4,54	1,75	1,57
	8	3,12	2,00	1,82
	9	2,20	2,25	2,08
	10	1,62	2,50	2,33
8 slojna plošča debeline 248 mm	7	7,39	1,75	1,55
	8	5,08	2,00	1,82
	9	3,60	2,25	2,06
	10	2,62	2,50	2,29



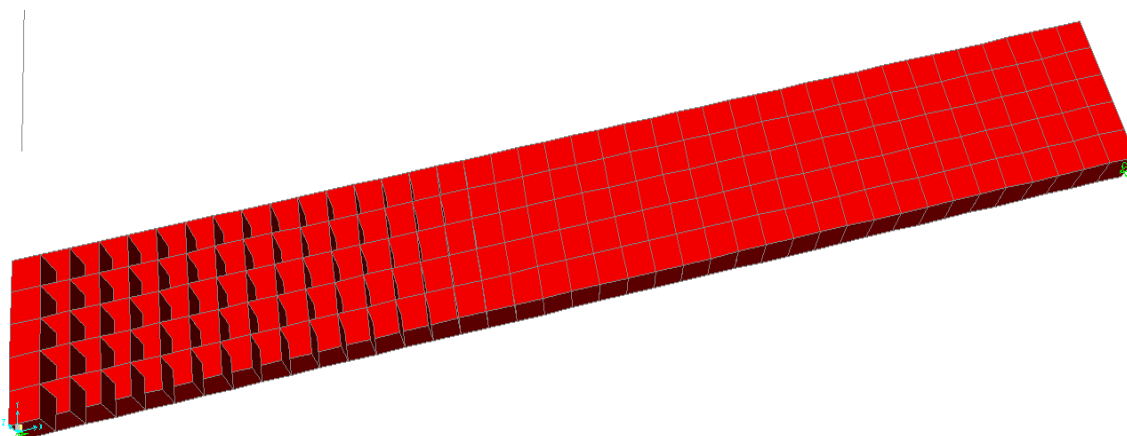


Slika 3.15: Pomik 3 slojne, 8 metrske križno lepljene lesene plošče, izračunan s programom SAP2000, z upoštevanjem karakteristik dobljenih po priporočilih Blassa

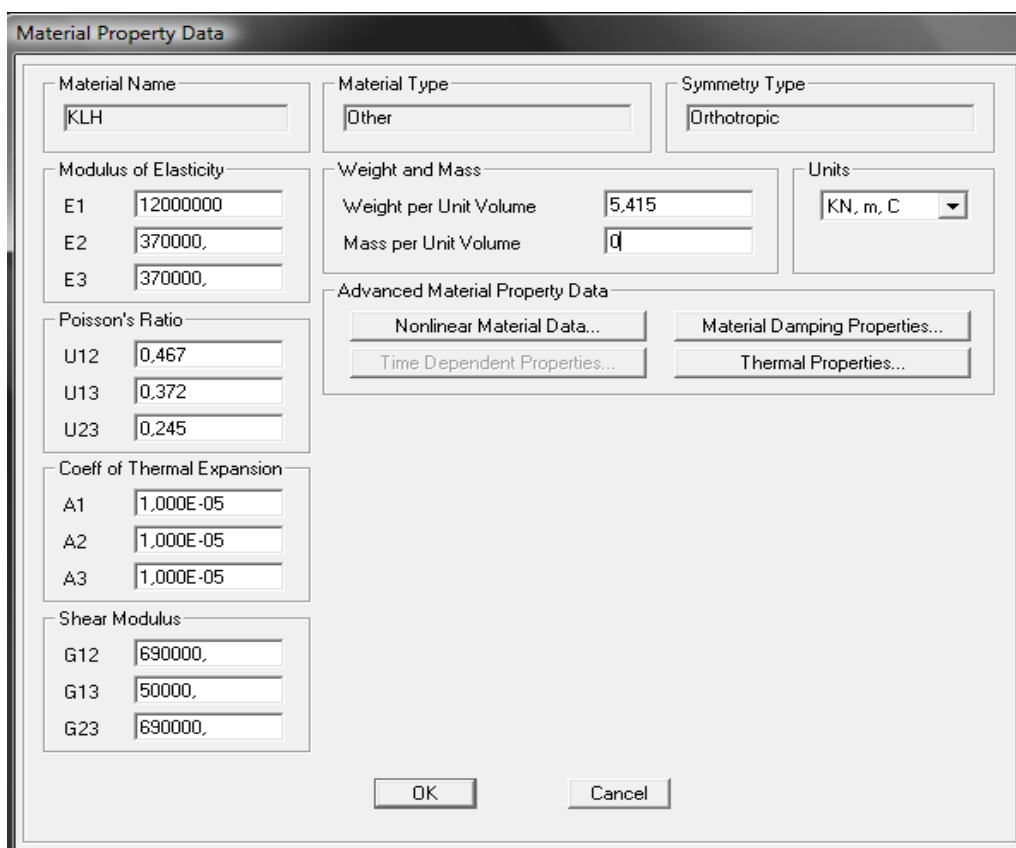
### 3.7.2 Modeliranje plošč s pomočjo tankih lupinastih končnih elementov in s karakteristikami nadomestnega homogenega prereza izračunanimi po priporočilih proizvajalca KLH

Križno lepljeno leseno ploščo ponovno modeliramo s tankimi lupinastimi končnimi elementi dimenzije 20 cm x 20 cm. Tokrat smo vhodne parametre za nadomestne enoslojne končne elemente izračunali po priporočilih izdelovalca križno lepljenih lesenih plošč KLH. Tokrat smo namesto efektivnega modula elastičnosti, za opis homogenega prereza izračunali efektivni vztrajnostni moment. Le ta se razlikuje v odvisnosti od debeline in od širine plošče. V program SAP2000 podamo originalne materialne karakteristike (slika 3.17) in pa dimenzije prereza. Dolžino in širino plošče podamo s pomočjo mreže, kamor vrišemo "tloris" plošče, debelino pa podamo v obrazec na sliki 3.18. Togostne karakteristike plošč nato primerno korigiramo s korekcijskimi faktorji, kar je prikazano na sliki 3.18. Korekcijski faktorji predstavljajo razmerje med neto površino prereza in celotno površino prerezo oziroma med efektivnim vztrajnostnim momentom izračunanim po

priporočilih KLH in vztrajnostnim momentom neto prereza. Plošče bomo ponovno obremenjevali s kritično obtežbo za maksimalni dovoljeni pomik, ki tako kot v prejšnjem primeru znaša  $L/400$ . Pričakujemo pomike enake maksimalnim dovoljenim, ki so določeni z veljavnimi predpisi.

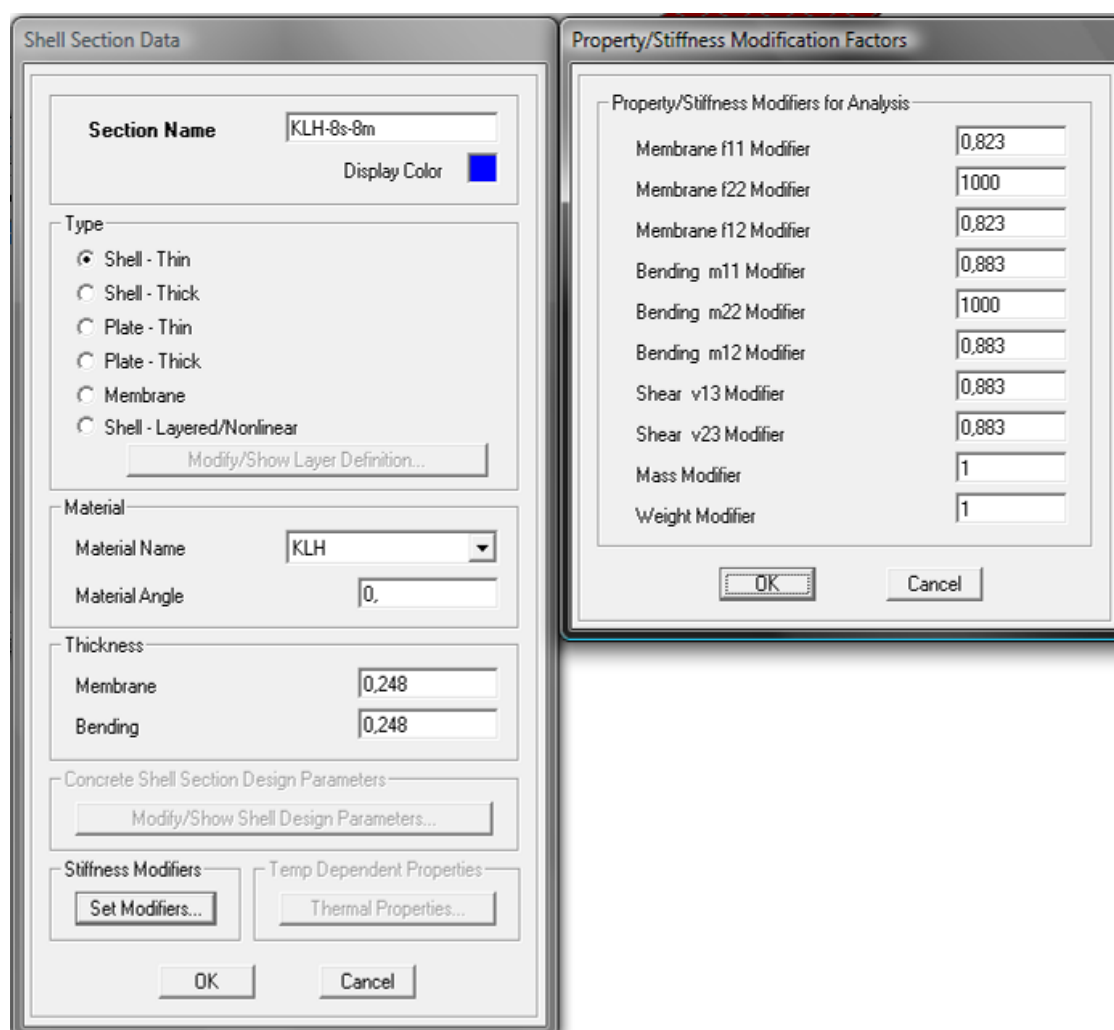


Slika 3.16: Prikaz osem metrske križno lepljene lesene plošče razdeljene na končne elemente dimenzije 20 cm x 20 cm



Material Property Data		
Material Name	KLH	
Material Type	Other	Symmetry Type: Orthotropic
Modulus of Elasticity	E1: 12000000 E2: 370000. E3: 370000.	Weight and Mass: Weight per Unit Volume: 5,415 Mass per Unit Volume: 0
Poisson's Ratio	U12: 0,467 U13: 0,372 U23: 0,245	Units: KN, m, C
Coeff of Thermal Expansion	A1: 1,000E-05 A2: 1,000E-05 A3: 1,000E-05	Advanced Material Property Data: Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties... Thermal Properties...
Shear Modulus	G12: 690000. G13: 50000. G23: 690000.	
OK Cancel		

Slika 3.17: Materialne karakteristike za križno lepljeno leseno ploščo v programu SAP200 verzija 10.0.1

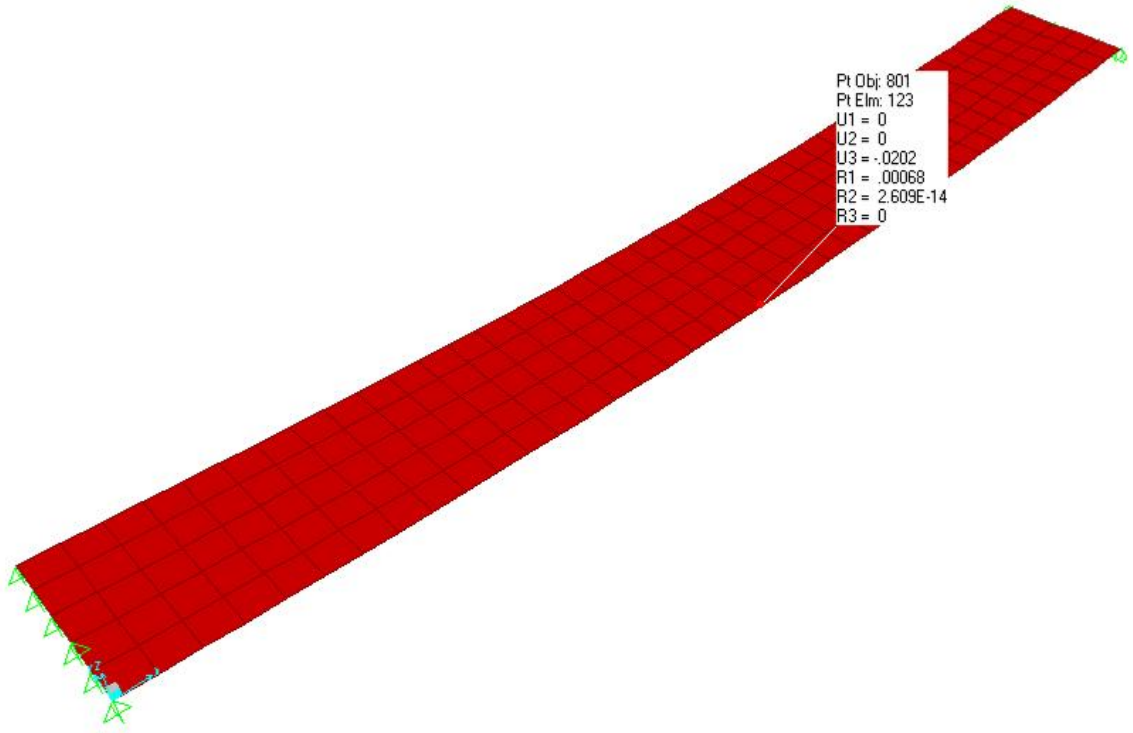


Slika 3.18: Geometrijske karakteristike osem slojne, osem metrske plošče, debeline 24,8 cm in korekcijski faktorji

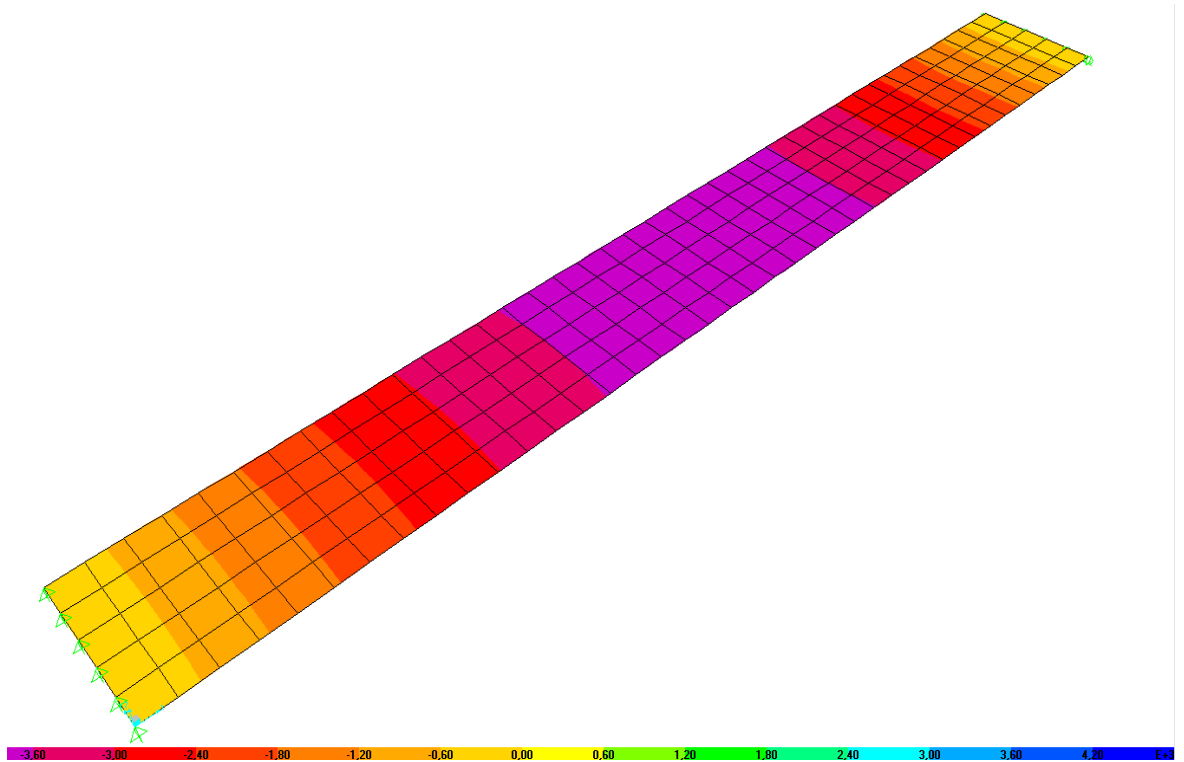
Kot je razvidno iz preglednice 3.11, se dobljeni rezultati skoraj popolnoma ujemajo s predpisanimi maksimalnimi pomiki. Do opaznejših razlik pride le pri tanjših ploščah. To pa se je pokazalo že pri izračunu efektivnih vztrajnostnih momentov. Ta način je torej inženirsko dovolj točen in s tem primeren za uporabo pri dimenzioniranju križno lepljenih lesenih plošč. V primerjavi s prejšnjim pa je zahtevnejši v toliko, ker je potrebno za vsako dolžino ( in širino) plošče določiti efektivni vztrajnostni moment, iz katerega nato izračunamo korekcijski faktor, ki ga uporabimo v programu.

Preglednica 3.11: Izračunani pomiki za različne dolžine in debeline plošč, s programom SAP2000, z uporabo tankih lupinastih elementov in z uporabo efektivnega vztrajnostnega momenta izračunanega po priporočilih proizvajalca križno lepljenih plošč KLH

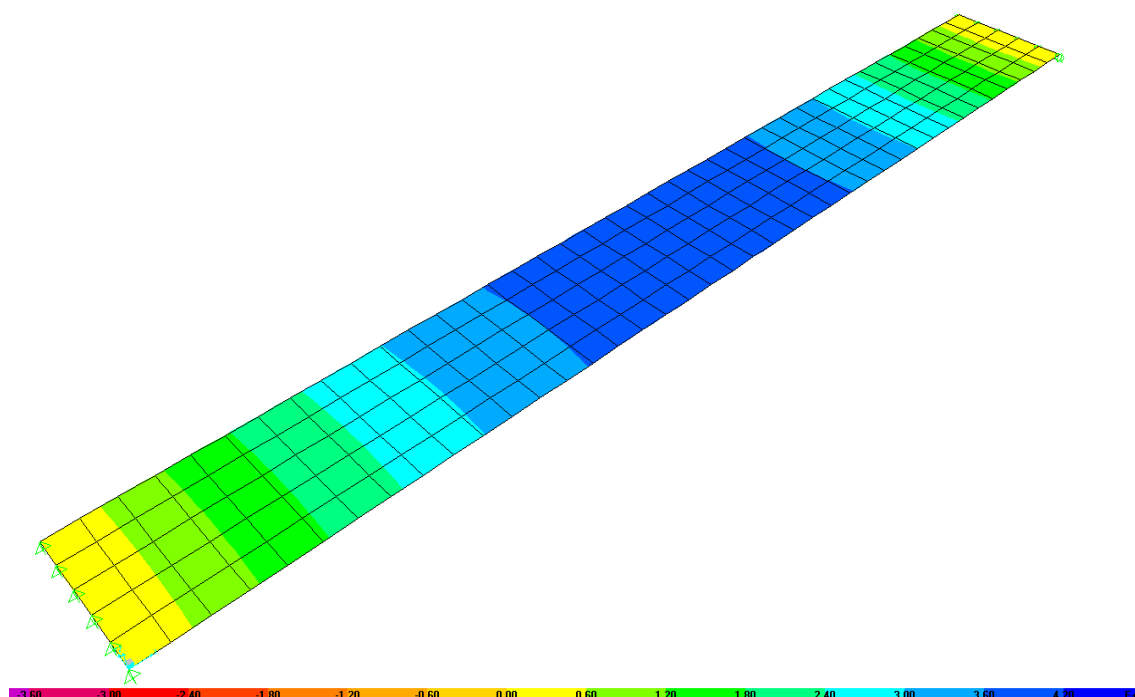
	Dolžina plošče [m]	Obtežba [kN/m <sup>2</sup> ]	L/400 [cm]	Izračunani pomiki s programom SAP2000, z upoštevanjem karakteristi doblejnih po priporočilih KLH [cm]
3 slojna plošča debeline 95 mm	3	5,43	0,75	0,85
	4	2,39	1,00	1,07
	5	1,20	1,25	1,26
	6	0,75	1,50	1,60
	7	0,50	1,75	1,95
	8	0,31	2,00	2,04
5 slojna plošča debeline 146 mm	4	7,27	1,00	1,02
	5	3,90	1,25	1,28
	6	2,31	1,50	1,54
	7	1,39	1,75	1,69
	8	1,00	2,00	2,05
7 slojna plošča debeline 226 mm	6	7,08	1,50	1,51
	7	4,54	1,75	1,75
	8	3,12	2,00	2,04
	9	2,20	2,25	2,28
	10	1,62	2,50	2,54
8 slojna plošča debeline 248 mm	7	7,39	1,75	1,75
	8	5,08	2,00	2,02
	9	3,60	2,25	2,27
	10	2,62	2,50	2,49



Slika 3.19: Prikaz deformirane osem metrske, osem slojne križno lepljene plošče in pomikov na sredini razpona



Slika 3.20: Prikaz napetosti v smeri plošče, na zgornji ploskvi osem metrske, osem slojne križno lepljene lesene plošče [ $\text{kN/m}^2 \cdot 10^{-3}$ ]



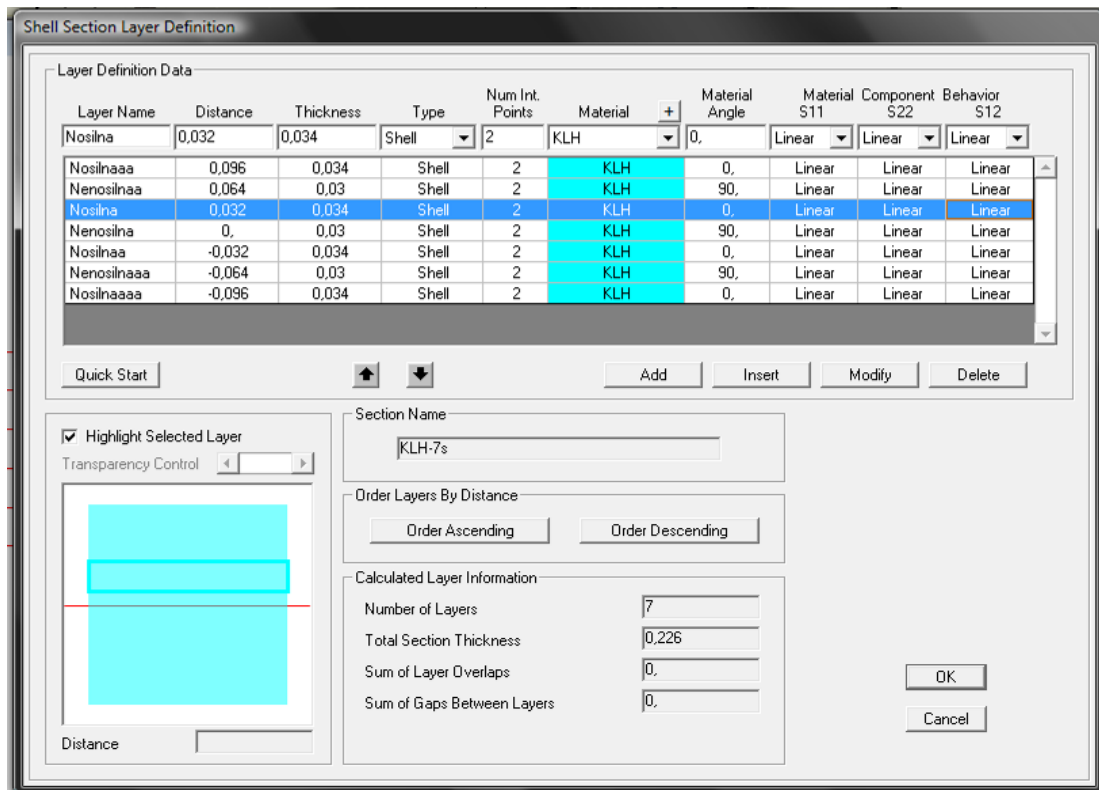
Slika 3.21: Prikaz napetosti v smeri plošče, na spodnji ploskvi osem metrske, osem slojne križno lepljene lesene plošče [ $\text{kN/m}^2 \cdot 10^{-3}$ ]

### 3.7.3 Modeliranje plošč s pomočjo slojevitih lupinastih elementov

Križno lepljeno leseno ploščo sedaj modeliramo s slojevitimi lupinastimi elementi (shell-layered). Pri računski analizi program uporablja FSDT (First Order Shear Deformation Theory), ki v analizi upošteva tudi prečne strižne deformacije. Ploščo dejansko modeliramo z več plastmi. Plasti imajo karakteristike materiala kot jih podaja proizvajalec KLH. Plasti med seboj zasukamo za 90 stopinj in tako dobimo križno lepljeno leseno ploščo. Ker v tem postopku ne uporabljamo nobenih efektivnih karakteristik, ker ne modeliramo s pomočjo homogenizacije prereza, temveč se najbolj približamo dejanskemu stanju, pričakujemo najbolj realne rezultate. Za to analizo zmanjšamo poissonove količnike. Analizo smo opravili v programu SAP2000 verzija 14.

V tabeli številka 3.12 so prikazane vrednosti izračunanih pomikov. Opazimo lahko, da izračunane vrednosti pomikov odstopajo od predpisanih vrednosti pomikov za določeno obtežbo. Izračunani pomiki so večji od predpisanih oz. od tistih, ki jih za enako obtežbo podaja izdelovalec lesenih križno lepljenih plošč KLH le pri

najkrajših razponih in pri križno lepljenih lesenih ploščah z majhnim številom slojev, drugače pa so izračunani pomiki manjši.



Slika 3.22: Prikaz sestave slojevitega lupinastega sedem slojnega križno lepljen lesenega elementa v programu SAP2000

The image shows a 'Material Property Data' dialog box with the following fields and values:

Field	Value
Material Name	Shell-Layered
Material Type	Other
Symmetry Type	Orthotropic
Modulus of Elasticity (E1)	12000000
Modulus of Elasticity (E2)	370000
Modulus of Elasticity (E3)	370000
Poisson's Ratio (U12)	0.1
Poisson's Ratio (U13)	0.1
Poisson's Ratio (U23)	0.1
Coeff of Thermal Expansion (A1)	1.000E-05
Coeff of Thermal Expansion (A2)	1.000E-05
Coeff of Thermal Expansion (A3)	1.000E-05
Shear Modulus (G12)	690000
Shear Modulus (G13)	50000
Shear Modulus (G23)	50000
Weight per Unit Volume	5.415
Mass per Unit Volume	0
Units	KN, m, C

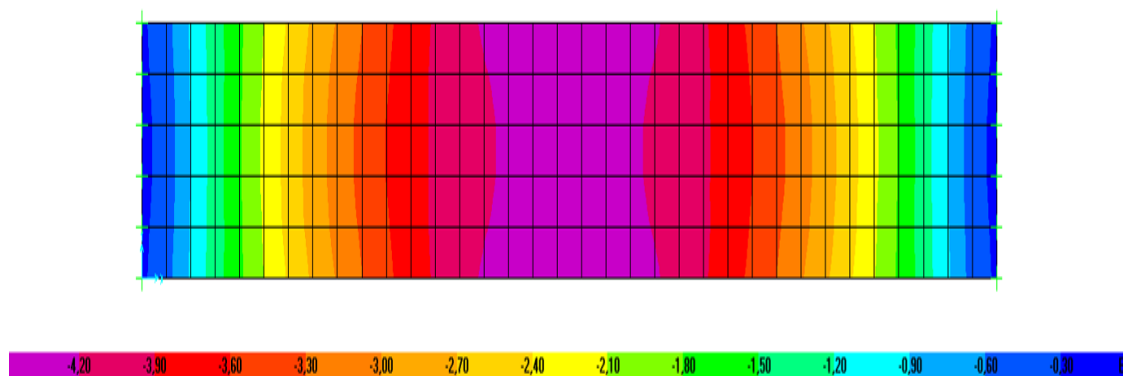
Slika 3.23: Materialne karakteristike lesa

Ker pa to pomeni večje dimenzije prerezov, kar ima za posledico praviloma večje stroške, pa to seveda ni vedno zaželeno. Ta način modeliranja je dobrodošel predvsem zato, ker ponuja temeljit vpogled v napetostno stanje vsake plasti (slike 3.24-3.27). Omogoča prikaz napetosti na petih točkah po preseku posameznega sloja in sicer na zgornjem ter spodnjem robu sloja, na sredini sloja, med sredino sloja in zgornjim robom sloja ter med sredino sloja in spodnjim robom sloja.

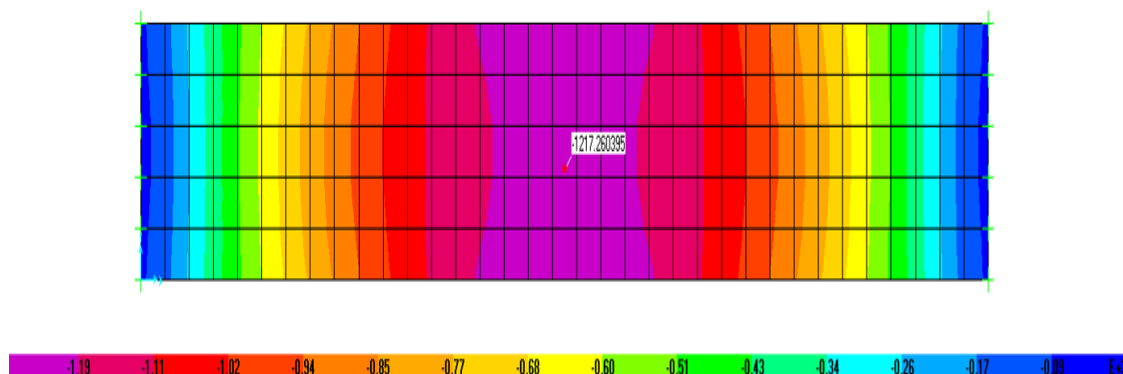


Preglednica 3.12: Izračunani pomiki za različne dolžine in debeline plošč s programom SAP2000, z uporabo slojevitih lupinastih elementov

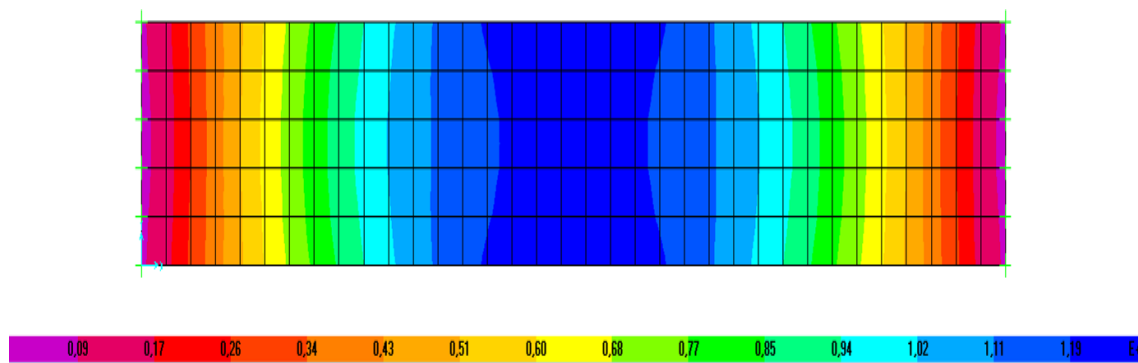
	Dolžina plošče [m]	Obtežba [kN/m <sup>2</sup> ]	L/400 [cm]	Izračunan pomik s program SAP2000, z uporabo slojevitih lupinastih elementov [cm]
3 slojna plošča Debeline 95 mm	3	5,43	0,75	0,77
	4	2,39	1,00	0,95
	5	1,20	1,25	1,09
	6	0,75	1,50	1,38
	7	0,50	1,75	1,66
	8	0,31	2,00	1,74
5 slojna plošča debeline 146 mm	4	7,27	1,00	0,91
	5	3,90	1,25	1,07
	6	2,31	1,50	1,23
	7	1,39	1,75	1,32
	8	1,00	2,00	1,58
7 slojna plošča debeline 226 mm	6	7,08	1,50	1,04
	7	4,54	1,75	1,47
	8	3,12	2,00	1,64
	9	2,20	2,25	1,79
	10	1,62	2,50	2,11
8 slojna plošča debeline 248 mm	7	7,39	1,75	1,68
	8	5,08	2,00	1,85
	9	3,60	2,25	2,00
	10	2,62	2,50	2,15



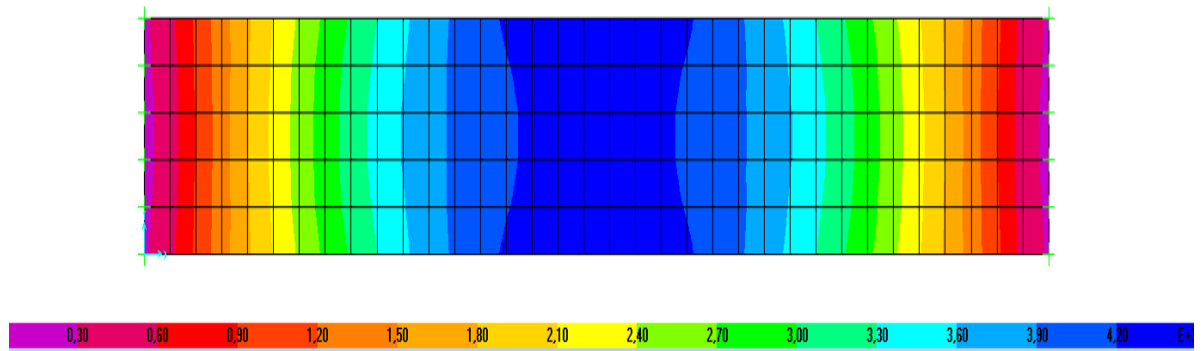
Slika 3.24: Normalne napetosti v vzdolžni smeri, na vrhu zgornjega nosilnega sloja, sedem slojne križno lepljene lesene plošče [kN/m<sup>2</sup>\*10<sup>-3</sup>]



Slika 3.25: Normalne napetosti v vzdolžni smeri, v sredini petega (šteto od spodaj navzgor) sloja, gledano v pozitivni smeri osi z, sedem križno lepljene lesene [kN/m<sup>2</sup>\*10<sup>-3</sup>]



Slika 3.26: Normalne napetosti v vzdolžni smeri, v sredini tretjega (šteto od spodaj navzgor) sloja, gledano v pozitivni smeri osi z, sedem križno lepljene lesene [kN/m<sup>2</sup>\*10<sup>-3</sup>]



Slika 3.27: Normalne napetosti v vzdolžni smeri, na spodnjem robu spodnjega nosilnega sloja, sedem slojne križno lepljene lesene plošče [ $\text{kN/m}^2 \cdot 10^{-3}$ ]

### 3.7.4 Modeliranje plošč s pomočjo prostorskih elementov

Prostorski (Solid) elementi, ki jih ponuja SAP 2000, so končni elementi z dejanskim volumnom. Končni element ima 8 oglišč v prostoru. S prostorskimi elementi načeloma najpriljubiteje opišemo naš model konstrukcije. Vendar moramo konstrukcijo modelirati s predhodno izračunanim nadomestnim prerezom. Prostorski končni elementi v programu SAP 2000 namreč ne omogočajo prilagajanja geometrijskih karakteristik s pomočjo redukcijskih faktorjev. Torej moramo nadomestni prerez izračunati tako, da bo ustrezal tako reduciranim vrednostim za osno, kot tudi za upogibno togost. Primer postopka izračuna nadomestnega prereza za 3 slojno ploščo dolžine 6 m :

$$\text{—————} \tag{3.74}$$

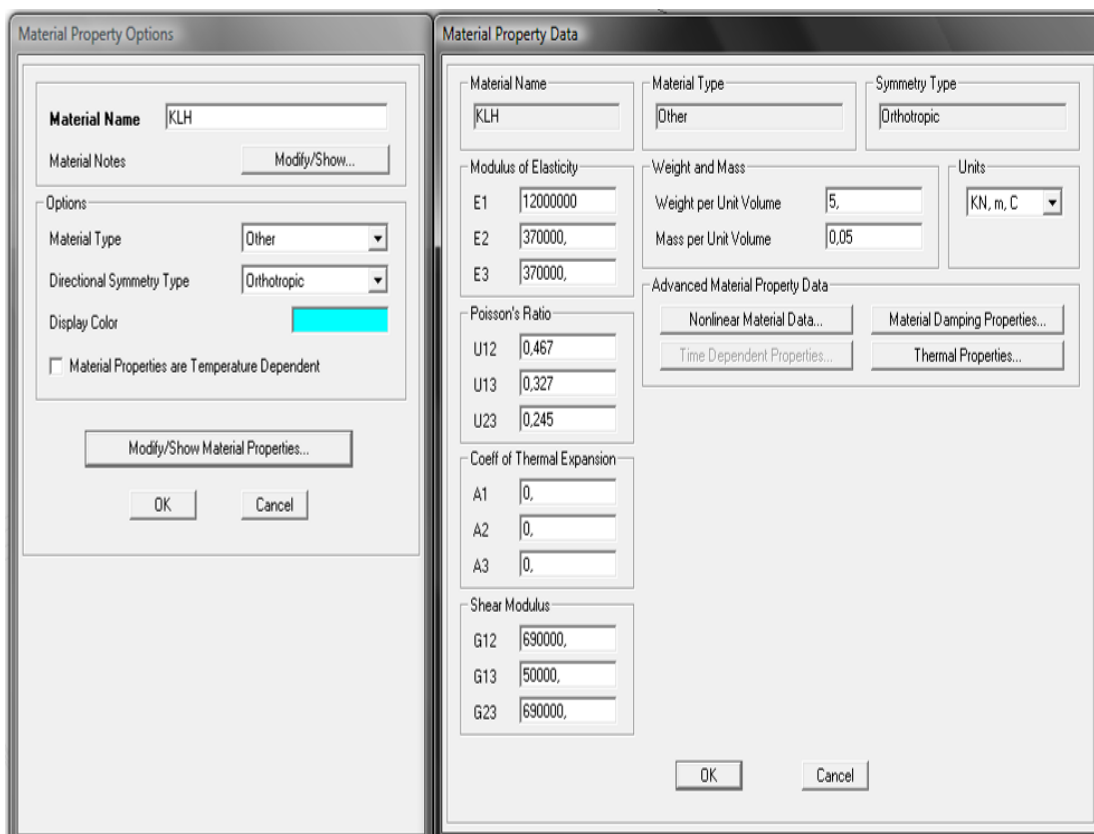
$$\text{———} \quad \text{=====} \quad \text{=====} \tag{3.75}$$

$$\text{—————} \tag{3.76}$$

Dimenzije nadomestnega prereza so torej  $b / h = \quad \text{cm} / 10,808 \text{ cm}$ .

Ker je nov prerez ožji od dejanskega, moramo povečati tudi enakomerno porazdeljeno ploskovno obtežbo. Le to pri trislojni plošči dolžine 6 m povečamo za faktor

—————, tako dobimo  $q^* = 1,598 \times 0,75 \text{ kN/m}^2 = 1,192 \text{ kN/m}^2$ . Križno lepljene lesene plošče bomo modelirali z enim slojem, ki bo imel višino  $h$ , po širini jih bomo razdelili na štiri enako široke elemente, po dolžin pa bodo končni elementi merili 20 cm.

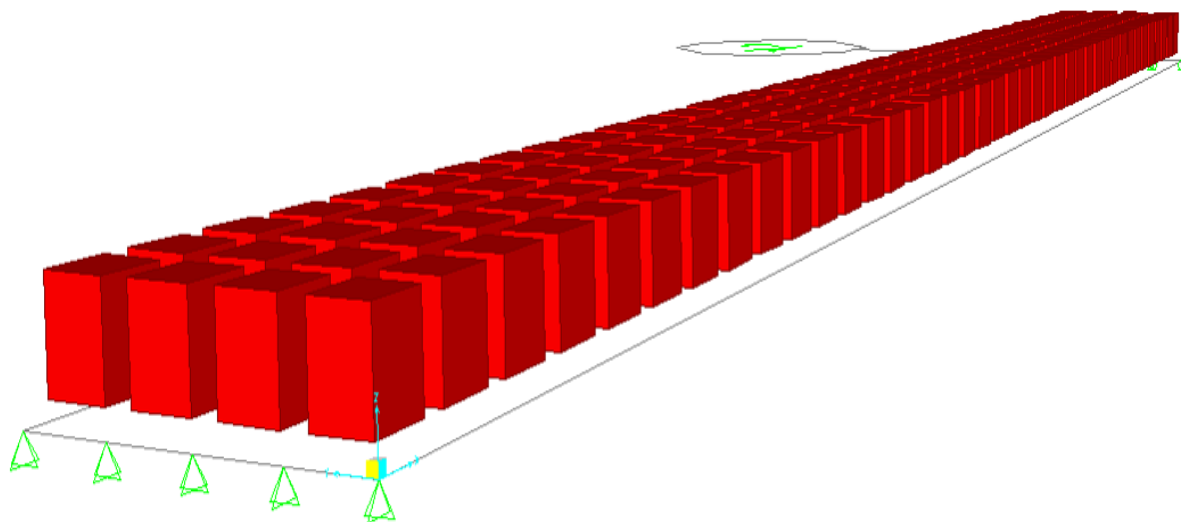


Slika 3.28: materialne karakteristike za križno lepljeno leseno ploščo v programu SAP2000 verzija 14

V preglednici številka 3.13 so navedeni pomiki izračunani z uporabo prostorskih končnih elementov v programu SAP2000. Rezultati so, podobno kot pri uporabi slojevitih lupinastih končnih elementov, malo večji od dovoljenih za določeno vrednost razpetine.

Preglednica 3.13: Izračunani pomiki za različne dolžine in debeline plošč s programom SAP2000, z uporabo prostorskih elementov

	Dolžina plošče [m]	Nadomestna obtežba [kN/cm <sup>2</sup> ]	Nadomestna širina prereza [cm]	Nadomestna višina prereza [cm]	L/400 [cm]	Izračunani pomiki z uporabo prostorskih končnih elementov [cm]
3 slojna plošča debeline 95 mm	3	8,045	67,50	10,07	0,75	0,82
	4	3,683	64,89	10,48	1,00	1,10
	5	1,886	63,62	10,69	1,25	1,26
	6	1,192	62,9	10,81	1,50	1,60
	7	0,8	62,48	10,88	1,75	1,96
	8	0,498	62,2	10,93	2,00	2,06
5 slojna plošča debeline 146 mm	4	10,981	66,2	15,41	1,00	1,32
	5	5,996	65,04	15,68	1,25	1,54
	6	3,586	64,41	15,84	1,50	1,75
	7	2,171	64,02	15,93	1,75	1,87
	8	1,567	63,79	15,99	2,00	2,23
7 slojna plošča debeline 226 mm	6	12,616	56,12	24,24	1,50	2,08
	7	8,157	55,66	24,44	1,75	2,25
	8	5,635	55,36	24,57	2,00	2,47
	9	3,99	55,13	24,67	2,25	2,67
	10	2,947	54,98	24,74	2,50	2,90
8 slojna plošča debeline 248 mm	7	9,239	79,99	25,5	1,75	2,33
	8	6,398	79,39	25,69	2,00	2,53
	9	4,557	78,99	25,83	2,25	2,73
	10	3,329	78,68	25,93	2,50	2,90

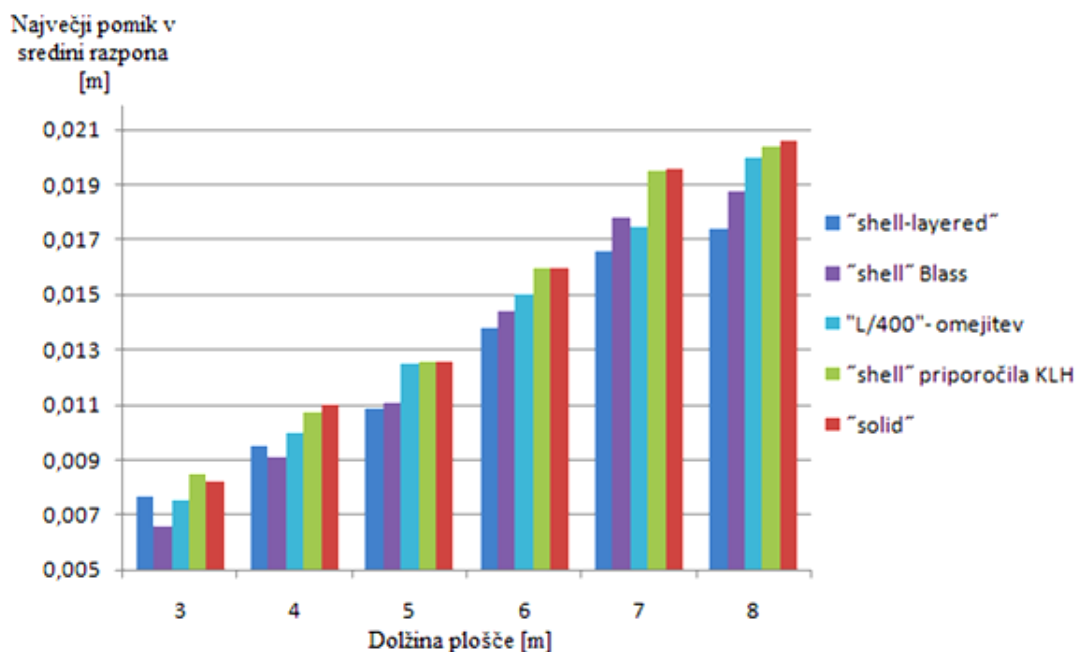


Slika 3.29: Plošča modelirana s prostorskimi končnimi elementi

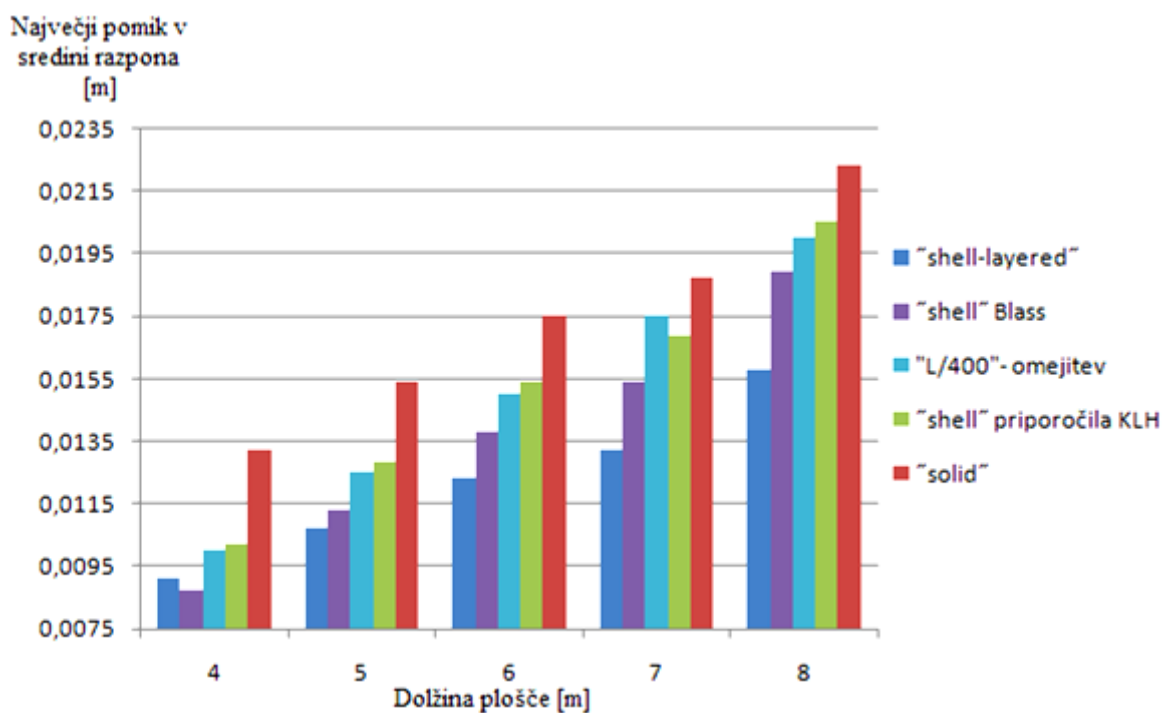
### 3.7.5 Primerjava rezultatov dolejnih s programom SAP2000

Na grafih 3.4, 3.5, 3.6 in 3.7 so prikazani pomiki na sredini križno lepljenih lesenih plošč. Pri vseh načinih analize smo za določeno dolžino plošče uporabili enako obtežbo. S primerjavo rezultatov v podnjih grafoih, lahko pridemo do določenih ugotovitev. Očitno so med posameznimi načini analize precejšnje razlike. Prostorski model je od obravnavanih najmanj primeren za modeliranje križno lepljenih lesenih plošč. Glede na to, da se pri analizi s takim modelom pojavljajo največji pomiki, lahko sklepamo, da imajo plošče v tem primeru najmanjšo togost v smeri osi  $y$ . Debelejša ko je plošča, bolj so očitne te razlike. Ostali trije načini analize načeloma bolj točno opišejo dejansko stanje. S tem, da pri modeliranju plošč z lupinastimi končnimi elementi dobimo praviloma manjše pomike kot pri modeliranju s slojevitimi lupinastimi končnimi elementi. To izvira predvsem iz tega, da program SAP2000, pri obravnavi z lupinastimi končnimi elementi uporablja Kirchhoff-ovo formulacijo problema, pri čemer zanemari prečne strižne deformacije. Pri modeliranju s slojevitimi lupinastimi končnimi elementi pa program SAP2000 na podlagi Reissner-Mindlin-ove formulacije problema, strižne deformacije upošteva.

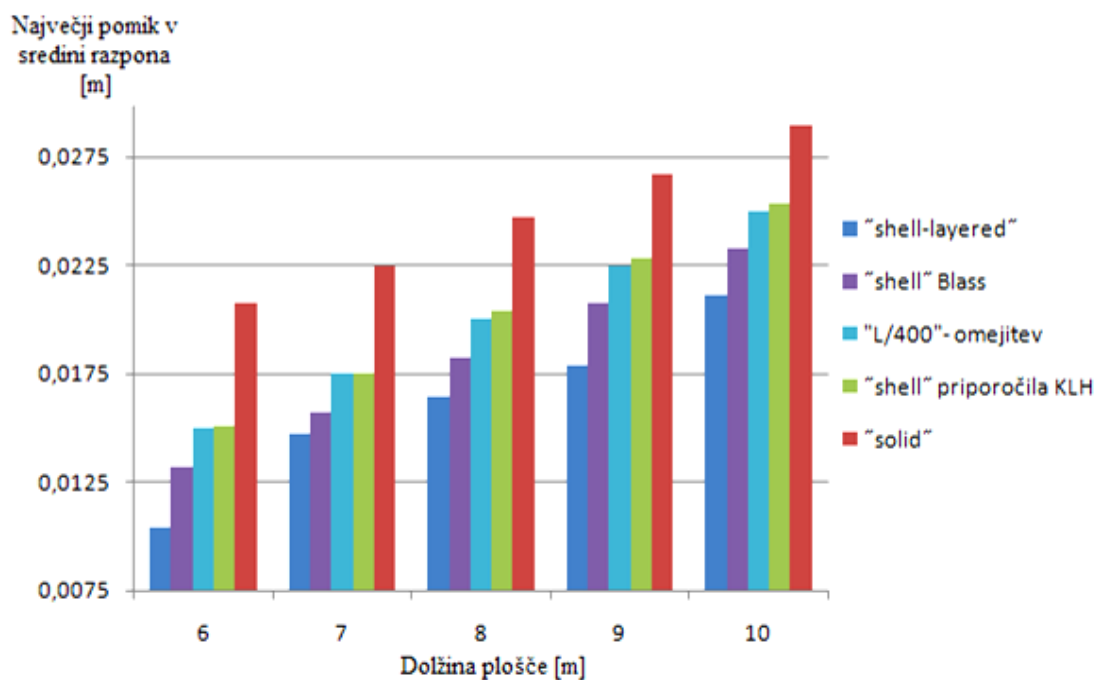
Graf 3.4: Primerjava vertikalnih pomikov na sredini razpona tri slojne križno lepljene lesene plošče debeline 95 mm



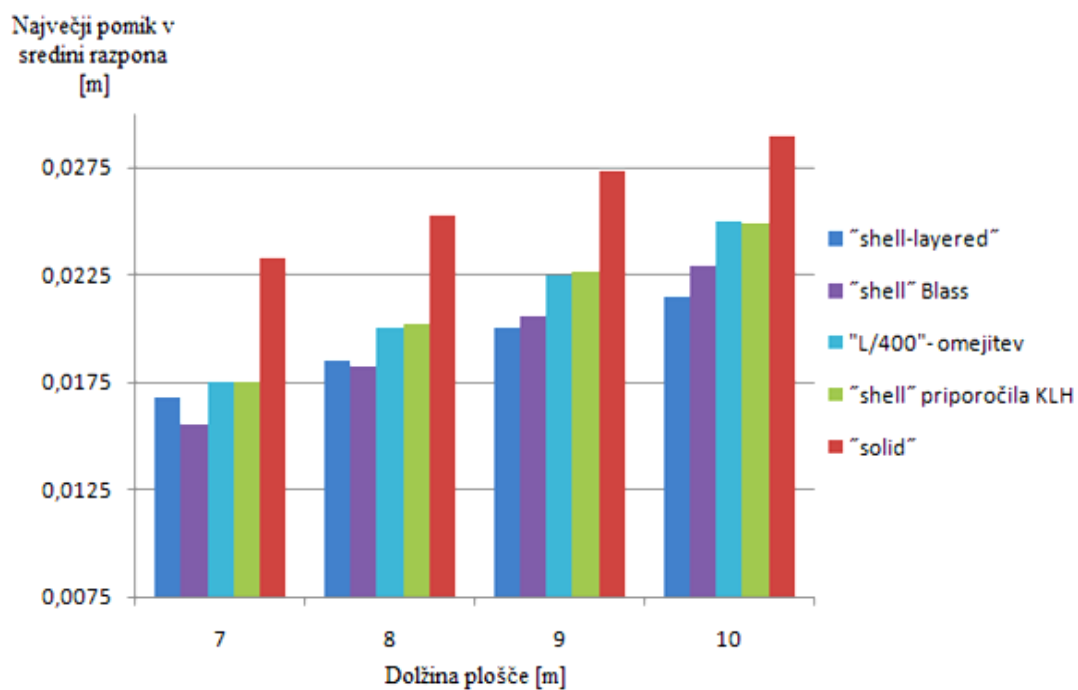
Graf 3.5: Primerjava vertikalnih pomikov na sredini razpona pet slojne križno lepljene lesene plošče debeline 146 mm



Graf 3.6: Primerjava vertikalnih pomikov na sredini razpona sedem slojne križno lepljene lesene plošče debeline 226 mm



Graf 3.7: Primerjava vertikalnih pomikov na sredini razpona osem slojne križno lepljene lesene plošče debeline 248 mm





---

## 4. ZAKLJUČKI

V prvem delu diplomske naloge je bil povdarek na raziskavi različnih vrst konstrukcijskega kompozitnega lesa, njihovimi prednostmi in razlikami, načini izdelave in uporabe.

Konstrukcijski kompozitni les, oziroma nosilni elementi iz konstrukcijskega kompozitnega lesa, vedno bolj izpodrivajo nosilne elemente iz masivnega lesa. Razlogov za to je več. Med pomembnejšimi je ta, da smo pri konstrukcijskem kompozitnem lesu manj omejeni pri izbiri dimenzij, ker nam ni potrebno čakati, da drevo zraste do potrebnih dimenzij, ampak enostavno element željenih dimenzij izdelamo v tovarni. Seveda lahko dimenzije konstrukcijskega kompozitnega lesa, tako prečne kot vzdolžne, dosegajo izmere, ki jih žagan masivni les nikoli ne bi dosegel. Posebej očitno je to pri križno lepljenih lesenih ploščah in pa pri lepljenih lameliranih nosilcih.

Druga velika prednost je velika izraba lesne surovine, v nekaterih primerih presega 80%, česar pri žaganem masivnem lesu nikakor ne moremo doseči. To pa je v današnjih časih, ko je potrebno vse surovine čim bolj izrabiti, še kako pomembno. Pomembna prednost konstrukcijskega kompozitnega lesa izvira iz samega načina izdelave, kjer osnovno surovino najprej zmeljemo, narežemo ali pa nažagamo na manjše elemente, ki jih nato zlepimo skupaj. S tem pride do disperzije naravnih makro napak v lesu, zaradi česar so mehanske in fizikalne lastnosti končnega izdelka veliko bolj konsistentne. Lahko bi celo rekli, da lažje nadziramo kvaliteto materiala.

Poleg vsega tega pa imamo na razpolago različne vrste konstrukcijskega kompozitnega lesa, tako da imamo vedno možnost izbrati najbolj primeren material za določene potrebe.

Drugi del pa predstavlja podrobnejši pregled križno lepljenih lesenih plošč. Opisani so problemi, na katere naletimo pri načrtovanju konstrukcij iz križno lepljenih lesenih plošč in različni načini na katere jih lahko obravnavamo s programskim orodjem SAP2000.

Pri izračunu efektivnega vztrajnostnega momenta oziroma efektivnega modula elastičnosti lahko pridemo do zaključka, da je za točne rezultate nujno potrebno

upoštevati strižno deformacijo v ravnini pravokotni na smer vlaken. Še posebej to velja za krajše razpone, pri daljših razponih pa se vpliv strižne deformacije v ravnini pravokotni na smer vlaken nekoliko izgubi. Tako da bi za hitre ocene stanja, ko gre za križno lepljene plošče večjih izmer, lahko uporabljali tudi enostavnejše metode, ki vpliva strižne deformacije v ravnini pravokotni na smer vlaken ne upoštevajo.

Za modeliranje križno lepljenih lesenih plošč s programom SAP2000, pa velja, da moramo biti pri izbiri modela še kako pazljivi, ker prihaja med posameznimi modeli do velikih odstopanj. Za določeno mero odstopanj so seveda krivi tudi različni vhodni podatki, kar je razvidno iz primerjave rezultatov, ko smo enkrat uporabili podatke izračunane po priporočilih proizvajalca KLH, drugič pa tiste dobljene po priporočilih Blassa, obakrat pa smo modelirali s tankimi lupinastimi elementi. Ko smo uporabljali prostorske elemente rezultati niso bili najbolj primerljivi. Dokaj dobro pa se je obneslo modeliranje s pomočjo slojevith lupinastih elementov.

## 5. VIRI

Bjelanović, A., Rajčić, V. 2007. Drvene konstrukcije prema europskim normama; 395 str.

Blass, H. J., Fellmoser, P. 2004. Design of Solid Wood Panels with Cross Layers. V: Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2004, June 14-17, 2004, Lahti, Finland; 543-548 str.

Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe. 2005.: 112 str.

Görlacher, R. (1984): Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 42, 219-222 str.

Janowiak, J., J., Bukowski, S., W. 2000. Toughness properties for several composite lumber materials. Forest product journal. 50, 5: 51-54

KLH Massivholz GmbH, Statika, angleška verzija

KLH Massivholz GmbH, European Technical Approval  
<http://www.klh.at/> (15.5.2010)

Lopatič J. 2006. Lesene konstrukcije, študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG

Neuhaus, F.H. (1981): Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit. Bochum, Ruhr-Universität, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 81-8

Porteus, J., Kermani, A. 2007. Structural timber design to Eurocode 5. 293 str.

---

S.Thelandersson, S., Larsen, H. J. 2003. Timber Engineering. 81 str.,

Šernek, M., Jošt, M. 2004. Konstrukcijski kompozitni les. Les, 7-8, 56 str.

Šernjavič, D., 2008, Lepljen les za konstrukcijske namene, Diplomsko delo,  
Ljubljana Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 5 str.  
[http://www.digitalna-knjiznica.bf.uni-lj.si/vs\\_scernjavic\\_danilo.pdf](http://www.digitalna-knjiznica.bf.uni-lj.si/vs_scernjavic_danilo.pdf) (6.5.2010)

Šušteršič, I., 2008. Analiza prednapetih križno lepljenih plošč. Diplomaska naloga.  
Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za  
gradbeništvo, Univerzitetni študij, Konstrukcijska smer: 33-35 str.

Štrus, K. 2008. Analiza dinamičnega odziva 7-etažne lesene masivne konstrukcije  
na potresni mizi. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za  
gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Univerzitetni študij,  
Konstrukcijska smer: 42 str.

Blass, H.J., Fellmoser, P., 2004. Influence of rolling shear modulus on strenght and  
stiffness of structural bonded timber elements. International council for research  
and innovation in building and construction, WCTS 2004, August 2004, Edinburgh,  
England; 1-2, 5-8 str.  
<http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~gc20/IHB/PUBLIC/40.pdf> (14.7.2010)

Slike objavljene na internetnih naslovih:

[http://www.klh.m2online.at/fileadmin/klh/bilder/2007/Prospekte/PDF/071018\\_KLH\\_engl\\_A4.pdf](http://www.klh.m2online.at/fileadmin/klh/bilder/2007/Prospekte/PDF/071018_KLH_engl_A4.pdf) (19.5.2010)

[http://www.blm.gov/education/00\\_resources/articles/hupobi/et/et8.jpeg](http://www.blm.gov/education/00_resources/articles/hupobi/et/et8.jpeg) (3.5.2010)

<http://www.klh.at/> (8.6.2010)

<http://redigitaleditions.com/Olive/ODE/BDC/LandingPage/LandingPage.aspx?href=QkRDLzIwMDkvMDYvMDE.&pageno=Njg.&entity=QXIwNjgwMQ..&view=ZW50aXR5> (6.11.2009)

[http://www.woodyjoe.com/mokei/image/yakushiji\\_toto.jpg](http://www.woodyjoe.com/mokei/image/yakushiji_toto.jpg) (19.5.2010)

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/Borgund\\_stave\\_church.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/Borgund_stave_church.jpg)  
(18.5.2010)

[http://www.big-creek.com/files/images/products/Index/TimberStrand\\_Picture\\_1.jpg](http://www.big-creek.com/files/images/products/Index/TimberStrand_Picture_1.jpg)  
(17.5.2010)

[http://www.unitized.ca/pics/timberstrand\\_1.jpg](http://www.unitized.ca/pics/timberstrand_1.jpg) (19.5.2010)

<http://archrecord.construction.com/products/ProductFocus/images/0802pf6.jpg>  
(17.5.2010)

[http://www.taittimber.com.au/gallery/trus\\_joist/microllam.jpg](http://www.taittimber.com.au/gallery/trus_joist/microllam.jpg) (18.5.2010)

[http://www.canadianarchitect.com/common\\_scripts/xtq\\_images/85639-56059.jpg](http://www.canadianarchitect.com/common_scripts/xtq_images/85639-56059.jpg)  
(23.5.2010)

[http://www.woodaware.info/fireframe/images/dynamic/I-joist\\_samples.JPG](http://www.woodaware.info/fireframe/images/dynamic/I-joist_samples.JPG)  
(18.5.2010)

<http://www.apawood.org/paBlog/images/Image/IJGlulam.jpg> (23.5.2010)

<http://livemodern.com/forums/materialsmethods/ploneboardconversation.2006-11-21.6254665087/574938342/image> (18.5.2010)

<http://www.trada.co.uk/images/topics/engineeredwood/I-JOIST.jpeg> (23.5.2010)

