

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 program Gradbeništvo,  
Konstrukcijska smer

Kandidatka:

**Maja Golubovič**

# **Sodobni nosilni sistemi lesenih ostrešij inženirskih objektov**

**Diplomska naloga št.: 424**

**Mentor:**  
doc. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 17. 6. 2011

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana Maja Golubovič izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom  
»Sodobni nosilni sistemi lesenih ostrešij inženirskih objektov«.

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

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

Ljubljana, 8.6.2011

Maja Golubovič

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

**UDK:** 694.3/.5(043.2)  
**Avtor:** Maja Golubovič  
**Mentor:** doc. dr. Jože Lopatič  
**Naslov:** Sodobni nosilni sistemi lesenih ostrešij inženirskih objektov  
**Obseg in oprema:** 54 str., 5 pregl., 38 sl.  
**Ključne besede:** leseno ostrešje, lepljen lameliran les, paličje, veliki razponi

### **Izvleček**

Diplomsko delo obravnava nosilne sisteme ostrešij z večjimi razponi iz lesenih elementov. Prvi del prikazuje splošne lastnosti lesa. Opišemo tudi mehanske lastnosti in z informativnimi vrednostmi prikažemo njihovo odvisnost od vrste lesa ter smeri obremenjevanja. Predstavimo najpogosteje uporabljena vezna sredstva. V nadaljevanju predstavimo vse potrebno za dokaz nosilnosti in posebnosti za lepljeni lamelirani les. V drugem delu se osredotočimo na lepljeni lamelirani les, opišemo njegovo proizvodnjo ter prednosti in slabosti v primerjavi z masivnim lesom. Posvetimo se posebnostim, ki jih ni pri uporabi masivnega lesa. Podrobneje analiziramo obnašanje takih elementov, vrste porušitve ter lastnosti, ki do njih vodijo. Prikažemo modeliranje lepljenih lameliranih elementov, prikazani so modeli za ročno ter računalniško analizo, ki se vedno izpopolnjujejo. Naslednja tema tega poglavja so lepila, katerih izbira je poleg lesa bistvenega pomena pri lepljenih lameliranih nosilcih. Prikažemo posebnosti strešnih lokov, kjer ugotavljamo, kako izbira statičnega sistema ter vzdolžno spajanje vpliva na globalno stabilnost konstrukcije.

V tretjem delu prikažemo lesena paličja, predstavimo različne oblike strešne konstrukcije v povezavi z možnostjo razpona, ki ga posamezna konstrukcija dopušča. Analiziramo najpogosteje uporabljene elemente za povezovanje lesenih delov paličja. Analiziramo, kako je potekal razvoj modelov paličja in njihova optimizacija in ugotovimo, da deformacije v palični konstrukciji pogosto nastanejo zaradi premikov v vozliščih. Poleg lepljenega lameliranega lesa so predstavljene še druge možnosti uporabe kompozitnega konstrukcijskega lesa v nameri povečevanja razponov lesenih ostrešij.

Prikazani so primeri lesenih ostrešij z največjimi razponi. Ugotavljamo, da se za največje razpone uporabljajo tako paličja kot lepljeni lamelirani les, kombinacija obojega ali druge kompozitne konstrukcije.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

<b>UDK:</b>	<b>694.3/.5(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Maja Golubovič</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assist. Prof. Jože Lopatič Ph. D.</b>
<b>Title:</b>	<b>Modern load-bearing systems of wooden roofs of engineering buildings</b>
<b>Notes:</b>	<b>54 p., 5 tab., 38 fig.</b>
<b>Key words:</b>	<b>wooden roof systems, glued laminated timber, trusses, great span</b>

### **Abstract**

This diploma thesis deals with long span load bearing roof systems made of wooden elements. The first part explains the general characteristics of wood. It also describes the mechanical properties and presents their relation to wood type and the direction of loading by means of informational values. This part continues with the presentation of most commonly used fasteners as well as all required elements for proving the load-bearing capacity and specific features of glued laminated timber (glulam).

The second part concentrates on glued laminated timber and describes its production and advantages and weaknesses in comparison to solid wood. It concentrates on particularities that are not connected to the use of solid wood. It analyzes the behaviour of these elements, the types of failure and the characteristics that lead to failure. Modelling of glued laminated elements is analyzed and the models for manual and computer analysis are shown that are continuously perfected. The next theme of this chapter are glues, the choice of which, besides the choice of wood, is of vital importance in the production of glued laminated trusses. The specificities of roof bows are shown, where the influence of the choice of statics system and longitudinal connections on the global stability of the construction is determined.

The third part presents wooden trusses and different forms of roof constructions in relation to the greatest possible span, allowed by each construction. The analysis of most commonly used elements for connecting wooden parts of a truss is made. The development of models of trusses and their optimisation leads to the conclusion that deformations in the truss often result from movements at joints. The diploma thesis presents other possibilities of using composite construction timber that is not glued laminated timber (glulam), with the intention of increasing the span of wooden load-bearing structures of roofs.

Some examples of wooden load-bearing structures of roofs are presented and the diploma thesis notes that greatest spans are achieved both by trusses and by glued laminated timber, a combination of both or by other composite structures.

## **ZAHVALA**

Hvala vsem, ki ste mi omogočili, da je to diplomsko delo nastalo, posebej mentorju, doc.dr. Jože Lopatiču. Hvala Majdi, staršem in starim staršem za vso finančno in moralno podporo med študijem.

Hvala tudi Google Prevajalniku za vso nesebično pomoč.

## **KAZALO VSEBINE**

<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 LES KOT KONSTRUKCIJSKI MATERIAL</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Splošno</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Vezna sredstva</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Dokaz nosilnosti</b>	<b>6</b>
<b>3 LEPLJENI LAMELIRANI LES</b>	<b>9</b>
<b>3.1 Splošno</b>	<b>9</b>
<b>3.2 Prednosti pred masivnim lesom</b>	<b>10</b>
<b>3.3 Mehanske karakteristike</b>	<b>12</b>
<b>3.3.1 Splošno</b>	<b>12</b>
<b>3.3.2 Vrste porušitve</b>	<b>14</b>
<b>3.3.3 Učinek lameliranja</b>	<b>14</b>
<b>3.3.4 Učinek prostornine</b>	<b>14</b>
<b>3.3.5 Učinek porazdelitve napetosti</b>	<b>15</b>
<b>3.3.6 Porazdelitev obremenitve med lamele</b>	<b>15</b>
<b>3.4 Modeliranje</b>	<b>16</b>
<b>3.4.1 Splošno</b>	<b>16</b>
<b>3.4.2 Modeli za ročno analizo</b>	<b>17</b>
<b>3.4.3 Modeli za računalniško analizo</b>	<b>17</b>
<b>3.4.3.1 Foschi in Barrett model</b>	<b>18</b>

<b>3.4.3.2 Karlsruhe model</b>	<b>18</b>
<b>3.4.3.3 PROLAM model</b>	<b>19</b>
<b>3.4.3.4 Renaudin model</b>	<b>19</b>
<b>3.4.3.5 Serrano in sod. model</b>	<b>19</b>
<b>3.5 Lepila</b>	<b>20</b>
<b>3.6 Veliki strešni loki iz lepljenih lameliranih nosilcev</b>	<b>21</b>
<b>4 PALIČJA</b>	<b>23</b>
<b>4.1 Lesena ostrešja sestavljena iz paličja</b>	<b>23</b>
<b>4.2 Možnosti razpona</b>	<b>23</b>
<b>4.3 Povezave med elementi paličja</b>	<b>24</b>
<b>4.4 Modeliranje paličja</b>	<b>25</b>
<b>4.4.1 Modeliranje samega paličja</b>	<b>26</b>
<b>4.5 Optimizacija paličja</b>	<b>28</b>
<b>5 KOMPOZITI</b>	<b>30</b>
<b>6 PRIMERI NEKATERIH KONSTRUKCIJ Z NAJVEČJIMI RAZPETINAMI</b>	<b>31</b>
<b>6.1 Superior Dome</b>	<b>31</b>
<b>6.2 Richmond Olympic Oval</b>	<b>34</b>
<b>6.3 Nekatero druge impozantne lesene konstrukcije velikih razponov</b>	<b>37</b>
<b>6.3.1 Prostorski okvir kot spiralna površina</b>	<b>38</b>
<b>6.3.2 Prostorska konstrukcija z oporniki</b>	<b>38</b>
<b>6.3.3 Ploskovne konstrukcije v prostoru</b>	<b>39</b>
<b>6.3.4 Lupine z lepljenimi lameliranimi rebri</b>	<b>40</b>
<b>6.3.5 Konstrukcije z rebrastimi krožnimi oboki</b>	<b>41</b>

<b>6.3.6 Konstrukcije s kupolasto lupino</b>	<b>43</b>
<b>7 ZAKLJUČEK</b>	<b>49</b>
<b>VIRI</b>	<b>51</b>



## KAZALO SLIK

Slika 1: Proizvodnja lepljenih nosilcev Danskega podjetja Lilleheden	9
Slika 2: Proizvodnja lepljenega lameliranega lesa	11
Slika 3: Prerezi lameliranih lepljenih nosilcev	12
Slika 4: Tipi povezav med lamelami	13
Slika 5: Ločna strešna konstrukcija iz lepljenih lameliranih nosilcev, razporeditev	22
Slika 6: Upogibni momenti in pripadajoča osna sila, glede na obtežbo na zgornji sliki	22
Slika 7: Primer uporabe krempljastih plošč pri paličnih ostrešjih	25
Slika 8: Trije različni modeli paličja ostrešja	26
Slika 9: Povezava med elementi paličja, ki že prevzema momente, imenovana »heel joint«	27
Slika 10: Primer popolno centričnega vozlišča, vse mere so v cm	29
Slika 11: Konstrukcija geodetske kupole	32
Slika 12: Zunanost in notranost Superior Dome	32
Slika 13: Pogled navzgor na kupolo s sredine igrišča	33
Slika 14: Lepljeni lamelirani nosilci v kombinaciji z jeklom	34
Slika 15: Votli leseno/jekleni trikotni prerezi	35
Slika 16: Dejanski izgled votlih leseno/jeklenih trikotniških prerezov	35
Slika 17: Previs strehe podpirajo podporniki iz lepljenih lameliranih elementov	36
Slika 18: Pogled na celotno konstrukcijo z zunanje strani	37
Slika 19: Opazovalni stolp v Lausanne, Švica	38
Slika 20: Prostorska strešna konstrukcija, zgrajena leta 1980	38
Slika 21: Prostorska strešna konstrukcija, zgrajena leta 1981	39
Slika 22: Mreža primarnih in sekundarnih nosilnih mrež	39
Slika 23: Avditorij univerze Weiherstephan	39
Slika 24: Hiperbolični paraboloid, s prikazanimi smermi reakcij in osnih sil	40
Slika 25: Rebrasta lupinasta konstrukcije v Rosenheimu, Nemčija, iz leta 1972	40
Slika 26: Lupinasta konstrukcija, Dortmund, Nemčija	41
Slika 27: Nadstrešek nad tribunami	41
Slika 28: Rebrasta strešna konstrukcija v Chaumontu, Francija	42
Slika 29: Športna dvorana v Berlinu, z markantno strešno konstrukcijo	42

Slika 30: Strešna konstrukcije športne dvorana v Arlsheimu	43
Slika 31: Kupolasta lesena streha	44
Slika 32: Strešna kupola, s horizontalnimi lepljenimi lameliranimi elementi za prevzem horizontalnih sil	44
Slika 33: Strešna kupola na vrtcem	45
Slika 34: Strešna kupola krožne oblike	45
Slika 35: Kupola, ki pokriva bazene v St.Quentinu, Francija	46
Slika 36: Postavitev prvega »dežnika«	46
Slika 37: Posebno obliko konstrukcije veter obremenjuje navpično navzdol	47
Slika 38: Rob lupine ob nosilcih in jeklene povezave med rebri	48

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Informativne tlačne in natezne trdnosti lesa glede na vrsto lesa	4
Preglednica 2: Strižne trdnosti lesa glede na vrsto lesa	4
Preglednica 3: Modul elastičnosti in strižni modul glede na vrsto lesa	5
Preglednica 4: Priporočani delni faktorji $\gamma_M$ za lastnosti materiala in odpornosti	8
Preglednica 5: Palični nosilci in okviri iz masivnega in lameliranega lesa	23

## 1 UVOD

Les je eden izmed materialov, s katerim je človek gradil najprej. Že v prazgodovini je bil uporabljen za osnovne človekove potrebe po preživetju, saj ga je zavaroval pred naravnimi in človeškimi sovražniki. S časom njegove uporabe in hkratnim razvojem človeka je le ta ugotovil, da ni vseeno s kakšnim lesom gradi. Ni bilo vseeno, če je bil les bolj trd, mehak, suh, moker, star ali mlad.

In ker je razvoj neprestan, smo prišli do tega, da ni dovolj, da les uporabimo samo v njegovi naravni danosti, ampak ga v želji po večjih razponih uporabimo na drugačne načine: kot paličja, kjer s členkastimi vezmi dosegamo meje v razponih ali kot lepljeni les, kjer z večanjem prereza lahko zelo povečamo razpetine.

Drugi pogoji, ki nam narekujejo uporabo izboljšanih, visokoinženirskih lesenih nosilnih konstrukcij, pa so predvsem večanje razlike med povpraševanjem in ponudbo samega masivnega lesa. To je logična posledica naraščanja števila svetovnega prebivalstva in s tem hkrati tudi gostejše naseljenosti. Trenutna poraba lesa v svetovnem merilu znaša približno 3,5 milijarde kubičnih metrov, vendar se je v zadnjih 30 letih podvojila in predvidevajo, da bo poraba lesa v letu 2050 znašala že 5,2 milijarde kubičnih metrov (Lam in Prion, 2003).

S tem, ko zmanjšujemo količine gozdov, pa moramo to zmanjševanje nekako uravnotežiti. Sami gozdovi so za kvaliteto življenja izrednega pomena in človeštvo se tega začinja zavedati šele zdaj. Gozdovi so del ekosistema, ki varuje vodne vire, recikliranje in predelavo hranil, zagotavlja skladiščenje CO<sub>2</sub>, ustvarja kisik, vpliva na globalno klimo in ustvarja bivališča in življenjske pogoje za številne živalske in rastlinske vrste. Zagotavljajo pa nam višjo kvaliteto bivanja, saj nam ponujajo parke, rekreacijske površine in inspiracijo (Lam in Prion, 2003). Čeprav je trenutna poraba lesa manjša od proizvodnje, pa je za konstrukcijski les zaloga starejšega kakovostnejšega lesa omejena. Tudi zato so zmeraj potrebne nove tehnologije za izboljšanje karakteristik lesa, ki je na voljo in večji izkoristek samih naravnih virov.

To pa vse vodi do uporabe sofisticiranih inženirskih lesenih konstrukcij, s čimer pa lahko gradimo »večje« in »višje«...

Ta želja po »več« in z njo tekmovalnost pa je že v človeški naravi. Zato sem v tej diplomski nalogi analizirala tudi nekatere primere največjih lesenih konstrukcij v svojem razredu, to je nosilne konstrukcije streh.

## 2 LES KOT KONSTRUKCIJSKI MATERIAL

### 2.1 Splošno

Les je zelo specifičen gradbeni material, saj ne moremo vnaprej izbrati njegove lastnosti in ga potem »ustvariti«, kot to delamo pri betonu in jeklu. Les lahko samo izkoristimo takšen, kot je, vendar ga lahko prilagajamo (sušimo in obdelujemo) in ga optimiziramo, da kar najbolj izkoristimo tiste njegove lastnosti, ki jih najbolj potrebujemo.

Zelo pomembna je vlažnost lesa, ki pomeni razmerje med maso vode v lesu in maso popolnoma suhega lesa. Izrazimo jo v % in se lahko znatno spreminja. Pomembna pa je zato, ker vpliva na mehanske lastnosti lesa. Pri spremembah vlažnosti les spreminja svojo prostornino, nabreka in se krči, kar se v manjši meri dogaja tudi pri spremembah temperature. Naslednja takšna lastnost lesa je poroznost oziroma prostornina por, ki je definirana z enačbo:

$$p = \frac{g - g_s}{g},$$
 kjer je  $p$  poroznost,  $g_s$  je prostorninska masa suhega lesa in  $g$  je specifična masa

lesne snovi. Poroznost izražamo v odstotkih in se giblje med 55% (trše vrste lesa – hrast, bukev) in 75% (mehkejše vrste lesa – bor, jelka).

Pomembna lastnost za razumevanje obnašanja lesa je tudi prostorninska teža, ki pomeni lesno maso na enoto prostornine. Odvisna je od botanične vrste lesa in njegove poroznosti (Lopatič, 2006).

Pri določanju lastnosti lesa moramo upoštevati tudi njegovo trajnost. Trajnost lesa je odvisna od vrste lesa, od pogojev okolja (vlažnost) in spreminjanja le teh. Tako je najvišja življenjska doba lesa pričakovana v vedno suhih pogojih, sledijo vedno mokri pogoji (les vedno moker), bistveno krajšo pričakovano življenjsko dobo pa ima les v izmenljivih pogojih.

Les je izrazito anizotropen material, kar pomeni, da je njegova lastnost odvisna od smeri opazovanja. Tako pri mehanskih lastnostih lesa definiramo:

- Tlačno trdnost pri:
  - § tlaku vzporedno z vlakni ( $f_{c||} = f_{c,0}$ ),
  - § tlaku prečno na vlakna ( $f_{c\perp} = f_{c,90}$ ) in
  - § tlaku poševno na vlakna ( $f_{c,\alpha}$ ).
  
- Natezno trdnost pri:
  - § nategu v smeri vlaken ( $f_{t||} = f_{t,0}$ ) in
  - § nategu pravokotno na vlakna ( $f_{t\perp} = f_{t,90}$ ).

Preglednica 1: Informativne tlačne in natezne trdnosti lesa glede na vrsto lesa (Lopatič, 2006, str. 13.)

Vrsta lesa	VRSTE NAPETOSTI			
	Nateg		Tlak	
	$f_{t  } = f_{t,0}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{t\perp} = f_{t,90}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{c  } = f_{c,0}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$f_{c\perp} = f_{c,90}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
jelka, smreka, bor	9-12	0,15-0,20	3,0-4,5	0,6
topol, vrba, breza, lipa	8-10	0,20-0,25	2,5-3,5	0,9
hrast, bukev, jesen, brest	10-15	0,25-0,35	5,0-7,0	1,3
trdi eksotični les	12-18	0,35-0,60		

- Upogibno trdnost.
- Strižno trdnost pri:
  - § strigu v smeri vlaken in
  - § strigu pravokotno na vlakna.

Preglednica 2: Strižne trdnosti lesa glede na vrsto lesa (Berdajs in sod., 2006, str. 236.)

Vrsta lesa	V smeri vlaken [kN/cm <sup>2</sup> ]	Pravokotno na vlakna [kN/cm <sup>2</sup> ]
iglavci	0,30 – 0,40	2,30
listavci	0,40 – 0,80	2,70

- Modul elastičnosti:
  - § vzporedno z vlakni ( $E_{\parallel}$ ) in
  - § prečno na vlakna (radialno  $E_r$  ali tangencialno  $E_t$ ).
  
- Strižni modul ( $G$ ).

Preglednica 3: Modul elastičnosti in strižni modul glede na vrsto lesa (Lopatič, 2006, str. 14.)

Vrsta lesa	E [kN/cm <sup>2</sup> ]		G [kN/cm <sup>2</sup> ]
	$E_{\parallel}$	$E_{\perp}$	
smreka, jelka	700-1400	23-47	44-88
hrast, bukev	1000-2000	64-133	60-125

V zgornjih preglednicah je viden močan vpliv anizotropije, saj so prav vse trdnosti in tudi modul elastičnosti zelo razlikujejo glede na smer vlaken v lesu. Opazimo tudi, da so natezne trdnosti prečno na vlakna skoraj zanemarljive, zato konstrukcijskih elementov ni priporočljivo obremenjevati z nategom prečno na vlakna.

Po mehanskih lastnostih razvrščamo les v trdnostne razrede:

- $C_i = C_i(f_{mk}, E_{0,mean}, \rho)$  za iglavce in
- $D_i = D_i(f_{mk}, E_{0,mean}, \rho)$  za listavce,

kjer je  $f_{mk}$  karakteristična upogibna trdnosti lesa,  $E_{0,mean}$  je povprečen modul elastičnosti lesa vzporedno z vlakni in  $\rho$  je gostota lesa (Lopatič, 2006).

## 2.2 Vezna sredstva

Pomemben element lesenih konstrukcij so poleg samega lesa vezna sredstva, ki preprečujejo pomik posameznih delov v stiku. Vezna sredstva, ki v stiku prevzamejo silo so statična vezna sredstva, tista, ki pa samo preprečujejo pomike pa so konstrukcijska vezna sredstva (Berdajs in sod., 2006)



Vezna sredstva se delijo na mehanska in kemijska. Kovinska pritrdilna vezna sredstva morajo zadostiti zahtevam EN 14592, kovinska spojna sredstva pa EN 14545 (po EN 1995-1-1:2005, 2005). Med najbolj uporabljanimi mehanskimi veznimi sredstvi so žebliji, vijaki in mozniki. V lesenih konstrukcijah se uporabljajo žebliji z okroglim prerezom in ploščato glavo, ki se pri zabijanju vtisnejo v les. Pri kontroli nosilnosti se izračuna tudi nosilnost žeblijanega spoja, ki ga izračunamo glede na število žeblijev, njihovo razporeditev, razdalje med njimi in globino. Manj pogosto se za spoje uporabljajo skobe, ki se večinoma uporabljajo le pri začasnih konstrukcijah.

Več se uporabljajo mozniki, leseni ali jekleni. Pri lesenih se uporablja les najvišje kakovosti, pri dimenzioniranju moramo upoštevati tudi nosilnost moznika. Dimenzije jeklenih moznikov pa so večinoma tipske.

Vedno pogosteje pa se uporabljajo lepila, ki so kemijska vezna sredstva in so v tej nalogi podrobneje obravnavana v poglavju 3.4.

### **2.3 Dokaz nosilnosti**

Za projektiranje konstrukcij je v Sloveniji obvezna uporaba Evrokodov, za lesene konstrukcije je to Evrokod 5, natančneje imenovan SIST EN 1995, ki je razdeljen na dva dela EN 1995-1 Splošno in EN 1995-2 Mostovi. Vendar mora biti projektiranje lesenih konstrukcij tudi v skladu s standardom EN 1990:2000.

Bistvo dokaza nosilnosti je, da dokažemo, da projektne napetosti v prerezih niso večje od projektnih trdnosti. Ta pogoj velja tudi za dokaz deformacij.

Za dokaz nosilnosti moramo izpolniti mejna stanja nosilnosti, za dokaz deformacij pa mejna stanja uporabnosti. Pri tem moramo upoštevati še splošna načela projektiranja, kot so lastnosti materialov, časovno odvisno obnašanje materialov, podnebne pogoje in projektne situacije (EN 1995-1-1:2005, 2005).

Sistem določitve konstrukcij v razrede uporabe je namenjen prav razvrščanju glede na pogoje okolja. Ti razredi uporabe so 1., 2. in 3. razred.

Lepljeni lamelirani les kot material, ki nas v tem primeru podrobneje zanima, mora zadostiti naslednji pogojem (EN 1995-1-1:2005, 2005):

- ustrezati zahtevam EN 14080,
- upoštevati je mogoče tudi vpliv velikosti elementa na trdnost,
- za lepljeni lamelirani les s pravokotnim prečnim prerezom je referenčna višina pri upogibu ali širina pri nategu 600mm. Za višine upogibnih ali širine nateznih elementov, ki so manjše od 600mm, se lahko karakteristične vrednosti  $f_{m,k}$  in  $f_{t,0,k}$  povečajo s faktorjem  $k_h$ , ki je določen z izrazom:

$$k_h = \min \left\{ \left( \frac{600}{h} \right)^{0,1} \right. \\ \left. \left[ 1,1 \right] \right\}.$$

kjer je  $h$  višina upogibnih elementov ali širina nateznih elementov v mm,

- polni zobati spoji, ki izpolnjujejo zahteve ENV 387 in pri katerih se v spoji spremeni smer vlaken, se ne smejo uporabljati za proizvode, vgrajene v 3. razredu uporabe,
- upoštevati je treba vpliv velikosti elementa na natezno trdnost pravokotno na lesena vlakna.

Posebnost pri projektiranju lepljenega lameliranega lesa in ostalega konstrukcijskega kompozitnega lesa je tudi drugačen delni faktor  $\gamma_M$  za lastnosti materiala in odpornosti, kot pri masivnem lesu. Ti faktorji s priporočenimi vrednostmi so podani v EN 1995-1-1:2005, potrjuje pa jih tudi Slovenski nacionalni dodatek in so prikazani v spodnji preglednici:

Preglednica 4: Priporočani delni faktorji  $\gamma_M$  za lastnosti materiala in odpornosti  
 (EN 1995-1-1:2005, 2005, str.26.)

Osnovne kombinacije	
Masivni les	1,3
Lepljeni lamelirani les	1,25
LVL, vezani les, OSB	1,2
Iverne plošče	1,3
Vlaknene plošče, trde	1,3
Vlaknene plošče, srednje trde	1,3
Vlaknene plošče, MDF	1,3
Vlaknene plošče, mehke	1,3
Zveze	1,3
Kovinske ježaste plošče	1,25
Nezgodne kombinacije	1,0

Vedno pa je potrebno uporabiti tudi modifikacijski faktorj  $k_{mod}$ . Če je obtežna situacija sestavljena iz vplivov, ki pripadajo različnim razredom trajanja obtežbe, moramo  $k_{mod}$  uporabiti za vpliv z najkrajšim časom trajanja (EN 1995-1-1:2005, 2005). Tudi tukaj je posebej omenjen lepjen lamelirani les, za katerega pa v tem primeru veljajo enaki faktorji, kot za masivni les.

Prav tako je potrebno uporabiti enak koeficient lezenja,  $k_{def}$ , kot če bi šlo za masivni les.

Faktor  $k_{def}$  je za lepjen lamelirani les določen z vrednosti 0,6 za prvi razred uporabe, 0,8 za drugi in 2,0 za tretji razred uporabe (EN 1995-1-1:2005, 2005).

### 3 LEPLJENI LAMELIRANI LES

#### 3.1 Splošno

Za nosilne konstrukcije iz lepljenega lameliranega lesa se lahko uporabijo vse vrste lesa, pomembno je le kakšno vrsto lepila izberemo glede na uporabljen les (Serrano, 2003). Vendar se večinoma uporablja mehek les, saj je trši les povezan s težavami pri lepljenju. Najpogosteje se uporabljajo deske oziroma lamele debeline 40-50 mm in dolžine 1,5-5,0 m. Tanjše lamele so zahtevane za ukrivljene nosilce. Lamele se potem posušijo na enotno vlažnost, 12-15%. Oцени se tudi njihova trdnost. Za vzdolžno spajanje se najpogosteje uporabljajo zobčasti spoji. Ta neprekinjena lamela se potem razreže na želene dolžine. Sledi odstranitev nečistoč okrog spojev in lamele se zlepijo skupaj in tvorijo želen prerez. Med odprtim časom lepila se konstrukcija zlega skupaj in stisne. Z uporabo mikrovalov se čas lepljenja lahko skrajša.

Teoretično se lahko ustvari lepljeni les poljubnih dimenzij. Vendar se zaradi praktičnih razlogov (transport in zmogljivosti proizvodnje) običajno uporabljajo maksimalne dolžine med 16 in 20 dolžinskimi metri. Druga omejitev pa je tudi odprti čas posameznih lepil. Prav tako se lahko ustvarja lepljeni les poljubnih oblik, ukrivljenosti.



Slika 1: Proizvodnja lepljenih nosilcev Danskega podjetja Lilleheden  
(<http://www.lilleheden.dk/uk/glulam.asp>, pridobljeno 30.12.2010)

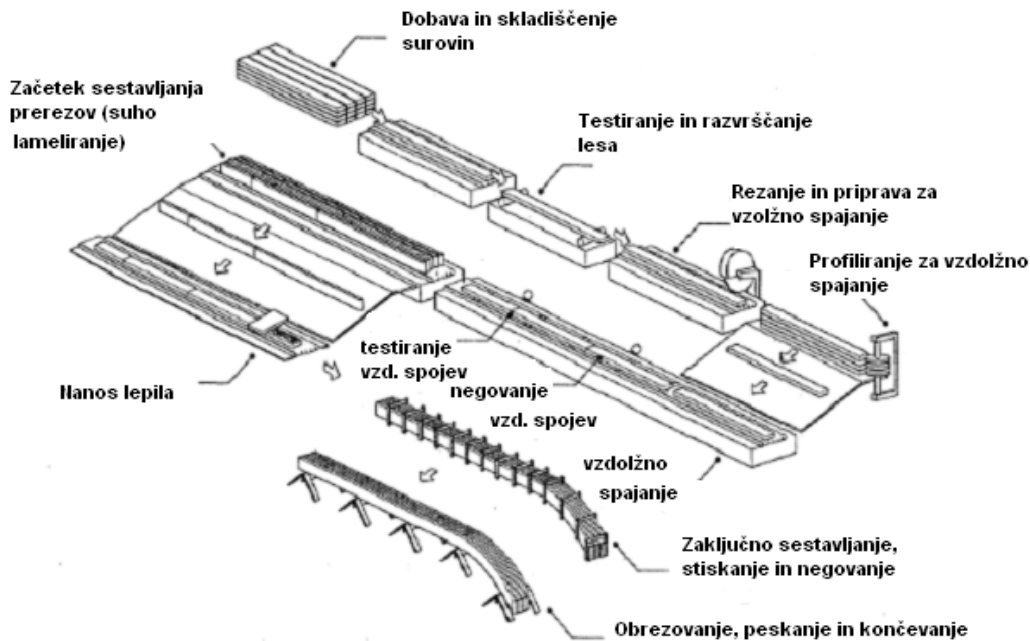
Lepljeni les je visoko tehnološki produkt, ki zahteva kontrole tekom proizvodnje. Kontrolirajo se natezne trdnosti v vzdolžnih spojih med posameznimi lamelami, kot tudi različni testi samega prereza. Tudi samo lepilo mora biti kontrolirano in mora zadostiti želenim karakteristikam.

### 3.2 Prednosti pred masivnim lesom

Lepljeni les so razvili, ker so želeli tvoriti »ukrivljene« elemente, kar ni mogoče pri masivnem lesu. Kasneje so se ugotovile mnoge druge prednosti, ki jih prinaša lepljeni les (Stalaker in Harris, 1997):

- Večja trdnost (natančno izbran lamelirani les lahko uporabimo tako, da so nepravilnosti na manj obremenjenih mestih, prav tako pa lahko uporabimo kvalitetnejši les na območjih večjih napetosti, na manj obremenjenih mestih pa slabši les).
- Večji prerezi (z večjim prerezom dobimo večji vztrajnostni moment, pa tudi posek prvinskih gozdov predstavlja problem pri iskanju velikih prerezov masivnega lesa).
- Brez nezaželenih deformacij (masiven les velikih prerezov je težko enakomerno posušiti, zato prihaja do različnih sprememb oblike in dimenzij. Pri lameliranem lesu, debeline do 50mm pa enakomerno sušenje lamel ne predstavlja problema).
- Raznolikost oblik (možne so mnoge, atraktivne oblike, ki so se prej pojavljale le pri jeklenih in armiranobetonskih konstrukcijah).
- Spremenljivost prereza (s spreminjanjem prereza variramo nosilnost elementa vzdolž njegove osi in uporabimo samo takšen prerez, kot je potreben, da zadosti nosilnosti)
- Poves (pojav deformacije že zaradi stalne obtežbe lahko preprečimo tako, da pred lepljenjem ukrivimo lamele, da nastane rahlo ukrivljen nosilec in s tem izravnamo kasnejše deformacije; pri navadnih žaganih masivnih nosilcih pa tega ne moremo doseči).
- Požarna odpornost (lepljeni les velikih prerezov ima večjo požarno odpornost od elementov iz masivnega lesa).
- ekonomičnost (pogosto so lepljeni lamelirani nosilci bolj ekonomični od jeklenih ali armiranobetonskih, seveda so dražji od masivnega lesa – vendar tega ne moremo

uporabiti zaradi omejenih dimenzij itd, ampak se dražji začetni strošek obrestuje zaradi vseh drugih prednosti).



Slika 2: Proizvodnja lepljenega lameliranega lesa (original v angleščini, Lam in Prion, 2003, str.87)

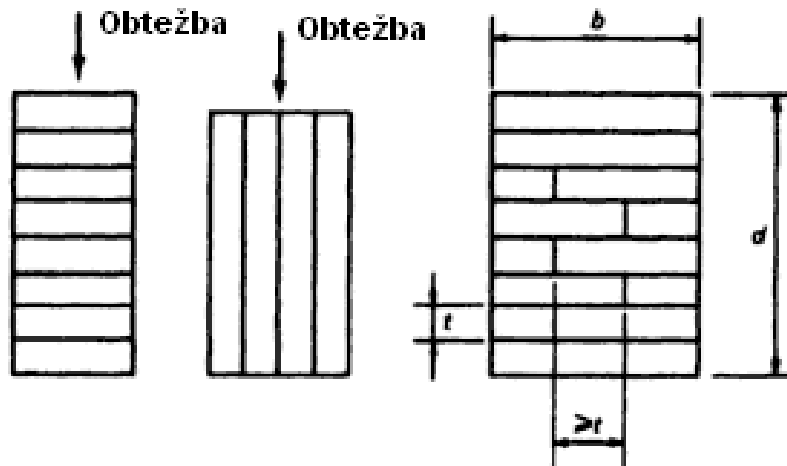
V primerjavi z masivnim lesom ima lepljeni lamelirani les tudi določene pomanjkljivosti, kot so zahtevnost proizvodnje, problem transporta in zaostale napetosti. Te se pojavljajo, ker se v spremenljivih pogojih vlažnosti lamele v nosilcu različno krčijo in raztezajo. Lahko se pojavijo tudi v kombinaciji nepravilnosti v samem lesu in tlačnih napetosti, ko se lamele obnašajo neenakomerno, to so pa tudi upogibne napetosti zaradi krivljenja lamel. To bi bila morda odločilna karakteristika, če bi morali izbirati med masivnim lesom in tvoriti palično konstrukcijo ali pa izbrati lepljeni lamelirani les za uporabo za ostrejša večjih razponov.

### 3.3 Mehanske karakteristike

#### 3.3.1 Splošno

Ko govorimo o trdnosti lepljenega lesa, večinoma govorimo o upogibni trdnosti. V preteklosti se je mnogo raziskav nanašalo na lepljene nosilce. Ugotovili so, da lepljeni nosilci nimajo večje upogibne trdnosti, ampak je raztros rezultatov te trdnosti manjši. Tak zaključek je ostal vse do danes (Serrano, 2003).

Kar pomeni, da rezanje masivnega lesa na manjše kose prinaša to, da so napake z nizko trdnostjo bolj enakomerno razporejene in da ima vsaka taka napaka manjši vpliv na trdnost celotnega nosilca kot pri masivnem lesu. Študija nosilnosti lepljenih konstrukcijskih elementov je povezana z nosilnostjo masivnih elementov. Lahko se primerja upogibna nosilnost lepljenega in masivnega elementa ali pa upogibna nosilnost 1 lamele lepljenega elementa napram celemu elementu.

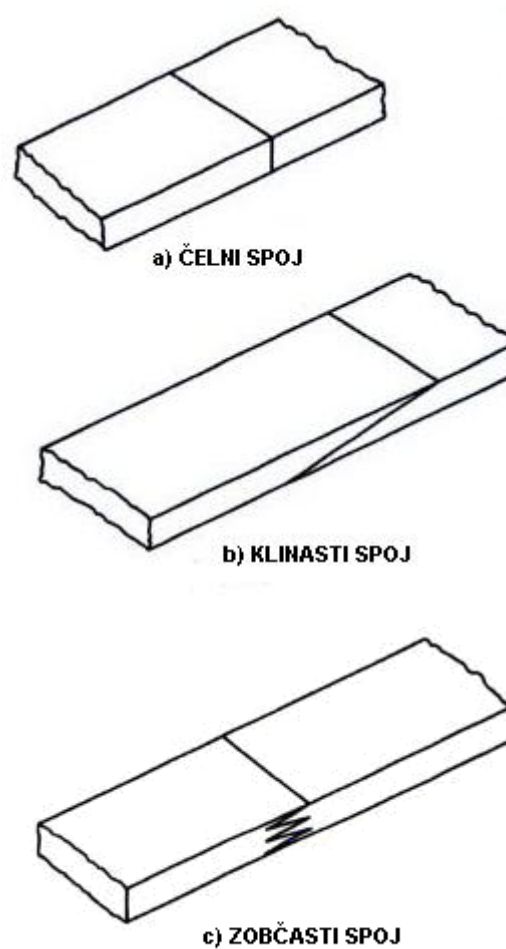


Slika 3: Prerezi lameliranih lepljenih nosilcev (original v angleščini, Stalnaker in Harris, 1997, str.158)

Za vzdolžno povezavo med lamelami obstajajo različne vrste stikov (Stalnaker in Harris, 1997). Čelni spoj (imenovan »butt joint«) ne prenaša nobenih nateznih napetosti in je zato njegova uporaba v nosilnih konstrukcijah prepovedana, torej za nas nezanimiva. Klinasti spoj

(imenovan »scarf joint«) je že vez s polno nosilnostjo. Njegova učinkovitost je odvisna od naklona same povezave. Najpogosteje pa se uporablja zobčasti spoj (imenovan »finger joint«), saj lahko z njegovo geometrijo poljubno spreminjamo njegovo nosilnost. Prednost takega spoja glede na klinasti spoj je v tem, da dobimo manj odpadnega lesa.

Različne raziskave so pokazale različne rezultate, realna ocena pravi, da je v 40-60% primerov, kjer so zobčasti spoji izpostavljeni največjim nateznim napetostim (pri upogibnem nosilcu) so le-te tudi vzrok porušitve v tej točki. Upoštevali smo podatke, ki jih je predstavil Colling (1990) cit. po Serrano (2003).



Slika 4: Tipi povezav med lamelami (original v angleščini, Stalnaker in Harris, 1997, str.162)



### 3.3.2 Vrste porušitve

Da bi razumeli obnašanje lepljenih lameliranih elementov (imenovanih »glulam«), moramo najprej razumeti različne vrste porušitev, ki se pojavljajo. Poleg porušitve zaradi nestabilnosti, lahko do porušitve konstrukcije vodijo naslednje oblike obremenitev ali njihove kombinacije: upogibne, natezne vzporedno z vlakni, strižne in natezne obremenitve prečno na vlakna. Upogibno porušitev večinoma določa natezna trdnost zunanjih elementov. Sama porušitev izvira iz spoja. Gre za upogibno napetost vzporedno z vlakni, porušitev zaradi prekoračene napetosti prečno na vlakna pa se pojavlja pri določenih tipih konstrukcije, kot so predalčni nosilci.

### 3.3.3 Učinek lameliranja

Namen lepljenih nosilcev je v tem, da dosežemo večjo upogibno odpornost elementa od natezne odpornosti njegovih sestavnih delov – lamel. Količnik med natezno odpornostjo lamele in upogibno odpornostjo elementa se imenuje efekt lameliranja (Serrano, 2003).

Izražen je s količnikom  $k_{lam}$ , ki je definiran kot:  $k_{lam} = \frac{f_m}{f_t}$ , kjer je  $f_m$  upogibna odpornost celega prereza,  $f_t$  pa je natezna odpornost lamele na natezni strani elementa. Upoštevati moramo predpostavko, da je območje oslabitve hkrati najmanj podajno območje.

### 3.3.4 Učinek prostornine

Znano dejstvo je, da je odpornost nosilnega elementa odvisna od absolutne velikosti same konstrukcije, kar velja posebej za konstrukcije, kjer je pričakovana krhka porušitev. To se da razložiti s teorijo šibkega člena, imenovano Weibullova teorija (Weibull, 1939, cit. po Serrano, 2003), ki pravi, da je trdnost konstrukcije odvisna izključno od odpornosti njenega najšibkejšega člena. Ker je verjetnost, da se zgodi več napak, večja v večjih volumnih kot v manjših, odpornost pada z velikostjo.

Weibullovo teorijo lahko uporabimo za materiale, kjer je možna krhka porušitev, kot je les v nategu. Pri upogibni porušitvi je ne moremo uporabiti, saj se takrat pojavljata tako nateg kot tlak, tlačni les pa se obnaša izrazito duktilno.

Učinek volumna oziroma volumski faktor,  $k_{vol}$ , je mogoče izraziti kot  $k_{vol} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^\eta, \eta < 0$ , kjer je  $V$  trenutni volumen,  $V_0$  pa je referenčni volumen, glede na katerega je definirana trdnost materiala (Serrano, 2003). Tipične vrednosti  $\eta$  se gibljejo med -0,1 in -0,4. Učinek volumna je pogosto izražen z dolžino in višino elementa.

### 3.3.5 Učinek porazdelitve napetosti

Porazdelitev napetosti je še en izmed vzrokov za večjo upogibno odpornost elementa, kot je natezna odpornost lamele na natezni strani. Dejstvo je, da je pri materialih, pri katerih lahko pride do krhke porušitve, upogibna trdnost večja od natezne trdnosti (Serrano, 2003).

Predpostavimo, da se trdnost materiala spreminja prostorsko in da pride do porušitve lamele in celotnega elementa, ko pride na določeni točki do napetosti, ki je enaka odpornosti v tej točki. Pri primeru enakomernih natezних napetosti pride do porušitve, ko je odpornost presežena. Pri upogibno obremenjenih elementih pa pri enaki vrednosti napetosti še ne bo prišlo do porušitve, saj bo ta največja napetost dosežena samo na robu, v notranjih delih elementa pa bo manjša.

Ker razporeditev napetosti v samem prerezu vpliva na verjetnost porušitve, ima poleg geometrije in oblike obremenitve (nateg oziroma upogib) vpliv na porušitev elementa tudi razporeditev obtežbe (npr. upogibna obremenitev v eni ali treh točkah).

### 3.3.6 Porazdelitev obremenitve med lamele

Pomembno vprašanje za obnašanje lepljenih lameliranih elementov je tudi prevzemanje obremenitev med lamelami. To je povezano z okrepitevami (ko sosednja lamela večje togosti in trdnosti prevzame obremenitev lamele na mestu grč in drugih nepravilnosti) in je izjemno pomembno, da ima element take karakteristike (Serrano, 2003).

Prevzemanje obremenitve je pomembno tudi za situacije, ko pride do porušitve lamele, členka ali druge šibke točke. Sprostitev deformacijske energije lahko vodi do porušitve celotnega nosilca ali pa le manjše oslabilte nosilca, ko so sosednje lamele sposobne prevzeti preostale napetosti. Ko pride do porušitve zunanje, natezne lamele, se ponavadi poruši celoten nosilec. Da bi takšne porušitve preprečili, mora biti debelina natezne lamele majhna, do 10mm (Serrano in Larsen, 1999, cit. po Serrano, 2003).

### **3.4 Modeliranje**

#### **3.4.1 Splošno**

Do zdaj smo se ukvarjali s splošnimi karakteristikami lepljenih lameliranih nosilcev, sedaj pa se bomo posvetili različnim pristopom in vidikom dimenzioniranja takih elementov.

Pri modeliranju lepljenih lameliranih elementov moramo upoštevati naslednje posebnosti:

- spremenljivost karakteristik materiala, kot sta trdnost in togost,
- vpliv vzdolžnih spojev lamel in
- povezovalne linije med lamelami.

V odvisnosti od pristopa k dimenzioniranju, mora biti izpolnjen tudi kriterij porazdelitve obremenitve in kriterij globalne porušitve (Serrano, 2003).

Velika večina teoretičnih modelov lepljenih lameliranih nosilcev temelji na metodi Monte Carlo<sup>1</sup>.

Veliko modelov temelji na uporabi programov z uporabo končnih elementov in pogosto se uporablja ploskovni model. Nekatere od predlaganih metod temeljijo na teoriji nosilcev.

Upoštevamo predpostavko o linearni porazdelitvi deformacij po prerezi in odziv nosilca določamo z analizo kritičnih prerezov.

Večina modelov je preprostih. Bolj natančno in zahtevno je opisovanje verjetnosti materialnih karakteristik, kot sta trdnost in togost.

---

<sup>1</sup> Metode Monte Carlo so razvili v 40-ih letih prejšnjega stoletja pri procesu razvoju jedrskega orožja. Pomenijo pa generiranje naključnih spremenljivk z uporabo določene funkcije oziroma algoritmov ([en.wikipedia.org/wiki/Monte\\_Carlo\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method), pridobljeno 10.1.2011).

Ponavadi se le nekateri parametri določajo z enoosnimi testi za poznavanje trdnosti in togosti vzporedno z vlakni. Da bi dobili vse želene parametre že pri najenostavnejših elementih pa so potrebni sofisticirani preizkusi in zahtevni računalniški algoritmi.

### 3.4.2 Modeli za ročno analizo

Najpogosteje je za analizo uporabljen najenostavnejši možen model lepljenega lameliranega elementa. Vključuje pa uporabo determinističnih konvencionalnih metod (Bernouli, Euler, cit. po Serrano, 2003) in linearno elastično obnašanje z eno samo točko maksimalne napetosti, ki vodi do porušitve. To pomeni, da je za čisti upogib zmeraj kritična zunanja lamela, saj ne upoštevamo različnih togosti lamel. Če upoštevamo metodo preoblikovanih prerezov, ki upošteva različne togosti lamel, ta dovoljuje drugačne oblike porušitve.

Največji korak nazaj pri takšnih analizah je, da ni nobenih podatkov o kakšnih porazdelitvah, npr. porazdelitev upogibne odpornosti. Da bi dobili zahtevane podatke, moramo uporabiti Weibullovo teorijo o porušitvi krhkih materialov.

Pri porušitvi zaradi osnega natega je obnašanje krhko. V tem primeru lahko uporabimo posebne značilnosti lepljenih lameliranih elementov, opisanih v prejšnjem poglavju.

Ena od zgodnjih empiričnih metod za določanje karakteristik lepljenih lameliranih nosilcev je metoda, imenovana  $I_k / I_g$ . Ta metoda reducira vztrajnostni moment glede na spoje, s tem upošteva zmanjšanje odpornosti v samih spojih.  $I_k$  in  $I_g$  se nanašata na vztrajnostni moment spojev v prerezu in vztrajnostni moment prereza elementa. Ta metoda se večinoma uporablja v Združenih državah Amerike in v Kanadi. Glede na to, da metoda upošteva redukcije odpornosti ne glede na to, če se tak spoj nahaja v tlačni ali natezni coni, je ta metoda nerealistična.

### 3.4.3 Modeli za računalniško analizo

Predlaganih je veliko načinov teoretičnih kompleksnejših metod za analizo napovedovanja dopustne obremenitve lepljenih lameliranih elementov. V nadaljevanju so predstavljene nekatere najbolj znane. Modeli predstavljajo različne pristope, vendar vsi temeljijo na istem

principu: razdelitev modela na cone, ki jim je predpisana materialna karakteristika. Vsi ti modeli temeljijo na računalniških simulacijah (Serrano, 2003).

#### **3.4.3.1 Foschi in Barrett model**

Model temelji na metodi Monte Carlo (Foschi in Barret, 1980, cit. po Serrano, 2003). Nosilec je porazdeljen na manjše enote in za vsako enoto so dobljene karakteristike z upoštevanjem verjetnostne funkcije. Upoštevati moramo naslednje predpostavke:

- obnašanje materiala je linearno elastično v tlaku in nategu
- ne upošteva se periodičnosti in gostote nepravilnosti v materialu
- upošteva se krhka porušitev najšibkejšega člena
- trdnostne in togostne karakteristike temeljijo na testih, kjer so preskušanci večjih dimenzij od enot, upoštevanih v takem modelu
- zanemarjen je vpliv vzdolžnih spojev med lamelami

#### **3.4.3.2 Karlsruhe model**

Model temelji na enaki razdelitvi nosilca na manjše enote, kot model Foschi in Barrett (Ehlback in sod., 1985a-c, Colling, 1990, cit. po Serrano, 2003). Vsaki taki enoti so določene naključne karakteristike. Vzdolž neprekinjene lamele so vsaki enoti določene materialne vrednosti in predpostavljeno je, da je vsaka lamela sestavljena iz dveh »materialov«: lesa in spoja med lesenimi elementi. Najprej se s porazdelitveno funkcijo določi pozicija vsakega spoja. Predpostavljeno je, da je gostota konstantna vzdolž lamele, vendar lahko variira med lamelami. Za določitev modula elastičnosti sta potrebna razmerje med površino nepravilnosti v lamelah in gostota lesa lamele. Razmerje med površino nepravilnosti se določi za vsako enoto z upoštevanjem faktorjev, ki pomenijo vpliv takšnih nepravilnosti na dolžino same enote. Na analogen način se določajo karakteristike spojev oziroma povezav med lamelami. Model predstavlja korak naprej, saj upošteva vzdolžne povezave med lamelami, nelinearno obnašanja v tlaku in postopno porušitev (obnašanje modela je izračunano iterativno, saj se po porušitvi nateznega elementa le ta odstrani in račun se ponovi).

Pomanjkljivost Karlsruhe metode je enostavnost mreže elementov in kriterij porušitve.

Čeprav se upošteva postopna porušitev, se ta lahko opazuje šele, ko je dosežena maksimalna obtežba. Namesto tega so upoštevani štirje različni kriteriji porušitve:

- Ko porazdelitev napetosti, ko smo odstranili porušeno lamelo, vodi do porušitve še ene lamele, to pomeni porušitev celotnega nosilca (t.j. krhka porušitev v nategu).

- Ko pride do porušitve elementa v nategu v definiranem območju okrog že prej porušenega elementa, pride do porušitve nosilca. S tem se upošteva visoke strižne napetosti v tem območju.
- Ko pride do porušitve spoja, pride do porušitve celotnega elementa. To se zgodi zaradi dejstva, da poteka tak spoj po celotni širini lamele in ne samo na delu širine, kot je to pri nepravilnostih v lameli.
- Ko ni izpolnjen nobeden od zgornjih kriterijev, predpostavimo, da pride do porušitve elementa, ko se poruši peta lamela v nategu.

#### **3.4.3.3 PROLAM model**

Model uporablja metodo preoblikovanega prereza v kombinaciji s teorijo nosilcev. S tem se določi dopustna obremenitev v različnih prerezih vzdolž elementa. Odpornost elementa pomeni odpornost najšibkejšega prereza. Dovoljena je postopna porušitev spojev in lamel, kar pomeni, da porušitev ene lamele še ne vodi nujno do globalne porušitve.

#### **3.4.3.4 Renaudin model**

Model lepljenega lameliranega nosilca, ki ga opisuje Renaudin (1997, cit. po Serrano, 2003) je precej podoben Karlsruhe modelu. Uporablja se ravninski model skupaj z dvema tipoma enodimenizionalnih elementov. Prvi je les, s katerim zajamemo vpliv vozlov in spojev; drugi so medlamelni elementi, ki zajemajo mehansko obnašanje medlamelnih povezovalnih linij.

Porušitev elementa lesa vodi k prerazporeditvi napetosti. Po porušitvi medlamelnega elementa pa so dovoljeni zamiki prekinjene lamele.

Ta model predstavlja napredek glede na ostale v tem, da upošteva medlamelne vezi.

#### **3.4.3.5 Serrano in sod. model**

Ta model prinaša še dodatno izboljšanje, saj dovoljuje porušitve tudi v povezovalnih vezeh med lamelami, kar je bil tudi cilj te študije (Serrano in sod., 2000, cit. po Serrano, 2003). Sam les izven območja spajanja je obravnavan kot homogen material z determinističnimi lastnostmi. Se pa da ta pristop glede medlamelnih vezi vključiti v zgoraj opisane modele, da dobimo tudi bolj sofisticirane materialne parametre.

Eden od dobljenih rezultatov se nanaša na efekt lameliranja. Kot je bilo pričakovano, je upogibna trdnost nosilca večja od natezne trdnosti lamel. V tem primeru dobimo povečano

trdnost zaradi dejstva, da je zunanja lamela izpostavljena neenakomerni porazdelitvi napetosti, ko vrednotimo trdnosti nosilca, pa je za referenco uporabljena nominalna napetost zunanjega roba.

Zaradi stohaistične narave porazdelitve napetosti se lahko zgodi, da točka porušitve ni nujno na zunanjem nateznem robu. Torej namesto, da interpretiramo rezultate kot povečanje trdnosti zunanjih lamel, bi morali razumeti, da se zaradi spremembe višine prereza spremeni točka porušitve v samem spoju.

Drugi pomemben rezultat tega izboljšane modela je, da ima duktilnost povezave med lamelami velik vpliv na odpornost nosilca.

### 3.5 Lepila

Konstrukcijski nosilni element, kot je lepljeni lamelirani element, je tipičnih dimenzij do nekaj 10m. Če upoštevamo to razmerje, se nam zdi nepomembno upoštevanje lepljenih stikov, saj le ti predstavljajo zelo majhen del geometrije nosilcev (tipična debelina lepila med lamelami je velikosti  $10^{-4}$  do  $10^{-3}$  m). Z uporabo ekstremno krhkih lepil, ki so v uporabi danes, pride do tega, da je obnašanje lepljenega stika enako obnašanju samega lesa.

Če imajo lepljeni stiki izrazito drugačne zahteve, kot so zahteve za les, se moramo takim stikom resno posvetiti pri dimenzioniranju takih elementov.

Pri nas se morajo uporabljati lepila, ki zadostijo standardom SIST EN 301

(<http://www.ditles.si/Gradiva/GATE-PS-Srpcic.pdf>, pridobljeno 12.1.2011).

»Konstrukcijska lepila morajo omogočiti izdelavo stikov s takšno trdnostjo in trajnostjo, da bo učinkovitost povezave zagotovljena v izbranem razredu uporabnosti ves čas pričakovane življenjske dobe konstrukcije.« (Evrokod SIST EN 1995-1-1:2005).

Pri lesenih konstrukcijah se najpogosteje uporabljajo naravna in umetna lepila (iz umetnih smol). Pomembno je, da je strižna trdnost lepila večja od strižne trdnosti lepljenega lesa, lepljenega stika ne smemo obremenjevati prečno na spoj, ker ga take natezne obremenitve hitro porušijo.

Pomembno je, da lepimo les z največ 15% vlage, samo pri določenih temperaturi: med 18 in 25°C (Berdajs in sod., 2006). Poznati in upoštevati moramo tehnične smernice uporabe lepila,

zelo pomemben je njegov odprti čas. Pomembna je tudi sama obdelava stičnih ploskev in natančna namestitev lepljenih elementov.

Danes se vse velike konstrukcije lepijo strojno, v kontroliranih delovnih pogojih.

### **3.6 Veliki strešni loki iz lepljenih lameliranih nosilcev**

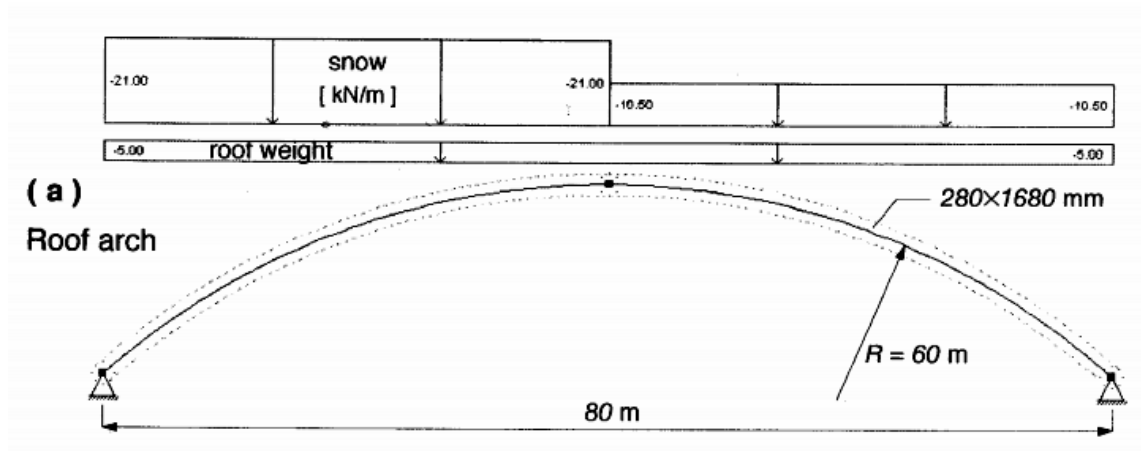
Omejitve pri velikosti takšnih lokov so večinoma povezane z možnostjo proizvodnje in transporta. Če nimamo spojev, ki prenašajo momente, je največji možen razpon okrog 60m (Kolbein in Wollebaek, 2004).

Če pogledamo obtežne primere, je, vsaj pri nas, prevladujoča obtežba, v kombinaciji z lastno težo, sneg. Pri sami sestavi lokov, je pomembno tudi iz koliko delov so sestavljeni. V primerjavi lokov iz dveh elementov s tistim s tremi deli, se pri tridelnem maksimalni moment poveča, vendar se povečajo tudi osna sila in maksimalni pomiki.

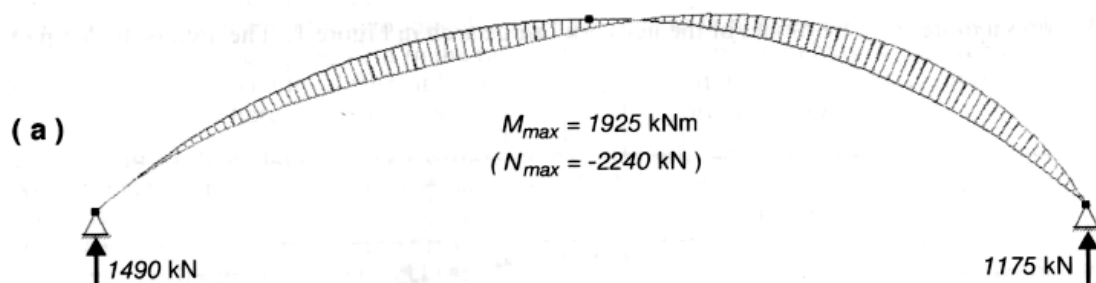
Pri razponu okrog 80m in pri loku iz dveh delov se pojavijo veliki upogibni momenti, ki pa potekajo skozi pretežen del loka. Zato morajo spoji prevzeti zelo veliko momenta. Takšni spoji so tehnično še izvedljivi, vendar niso ekonomični in estetski. Primer takega strešnega loka je na slikah na naslednji strani, kjer je vidna razporeditev najneugodnejše obtežbe in kjer so prikazani največji upogibni momenti s pripadajočo osno silo, glede na prej omenjeno obtežbo (Kolbein in Wollebaek, 2004).

Loki na slikah 5 in 6 so sestavljeni iz dveh elementov, elementi so med seboj povezani z momentnimi spoji.





Slika 5: Ločna strešna konstrukcija iz lepljenih lameliranih nosilcev, razporeditev najneugodnejše obtežbe (Kolbein in Wollebaek, 2004, str.56)



Slika 6: Upogibni momenti in pripadajoča osna sila, glede na obtežbo na zgornji sliki (Kolbein in Wollebaek, 2004, str. 57)

## 4 PALIČJA

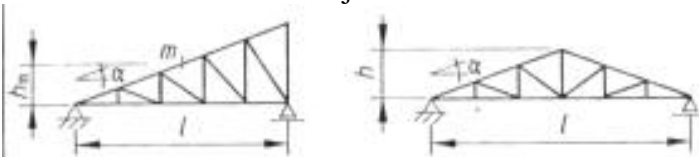
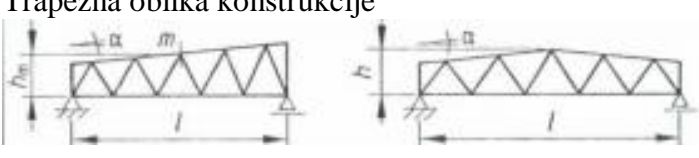
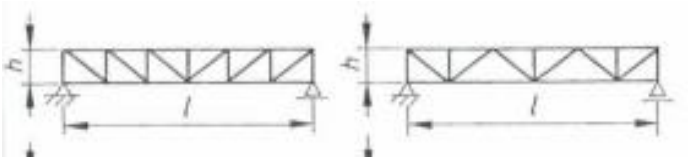
### 4.1 Lesena ostrešja sestavljena iz paličja

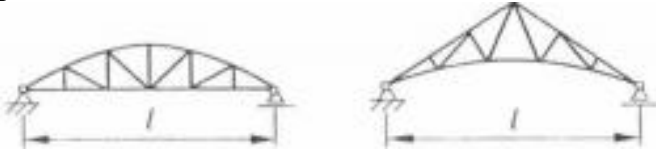
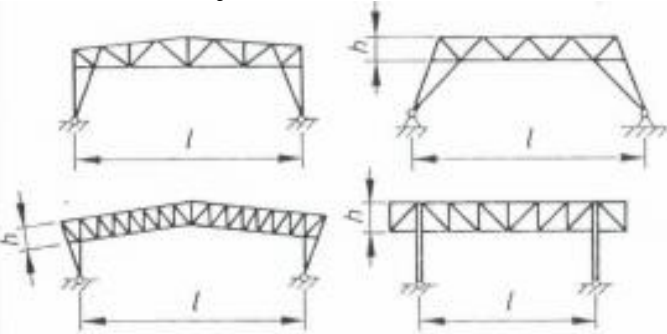
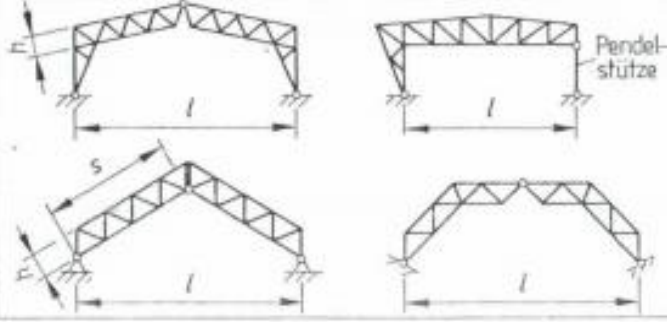
V splošnem paličje prenaša samo osne sile in zato je potrebno posvetiti posebno pozornost tridimenzionalni stabilnosti konstrukcije. Izven ravninsko stabilnost lahko zagotovimo npr. z nateznimi jeklenimi diagonalami. Uklonske dolžine se lahko zmanjšajo s prečnimi ojačitvami.

### 4.2 Možnosti razpona

Preglednica 5: Palični nosilci in okviri iz masivnega in lameliranega lesa

(original v nemščini, Neuhaus, 1994, str.344.)

Konstrukcijski sistemi	Razpon $l$ (v metrih)	Višina nosilca $h$ (v metrih)	Naklon $\alpha$
<p>Trikotna oblika konstrukcije</p> 	<p>Enokapnica 10 do 20 Dvokapnica 10 do 30</p>	<p><math>h, h_m</math> <math>\geq 1/10</math></p>	<p><math>10^\circ</math> do <math>30^\circ</math></p>
<p>Trapezna oblika konstrukcije</p> 	<p>10 do 30</p>	<p><math>h, h_m</math> <math>\geq 1/12</math></p>	<p><math>3^\circ</math> do <math>8^\circ</math></p>
<p>Konstrukcija z vzporednimi pasovi</p> 	<p>Elementi iz lameliranega lesa 20 do 60</p>	<p><math>\geq 1/12</math>  <math>\geq 1/15</math></p>	

<p>Konstrukcija z ukrivljenimi spodnjimi in/ali zgornjimi pasovi</p> 	<p>Elementi iz masivnega lesa 15 do 40 Elementi iz lameliranega lesa 25 do 60</p>		
<p>Dvočlenski okvirji</p> 	<p>Elementi iz masivnega lesa 15 do 30 Elementi iz lameliranega lesa 25 do 50</p>	<p>1/12 do 1/18  1/12 do 1/18</p>	
<p>Tričlenski okvirji</p> 		<p>1/12 do 1/15 <math>\geq s/12</math>  1/12 do 1/15 <math>\geq s/12</math></p>	

### 4.3 Povezave med elementi paličja

Za razpone med 30 in 40 m se kot glavno vezno sredstvo (poleg samih elementov paličja) uporabljajo jeklene žebličaste plošče (Nielsen, 2003), imenovane krempljaste plošče (Lopatič, 2006). Le te so vgrajene v les s pomočjo hidravlične opreme.

Jeklene žebličaste spojne plošče so iz galvaniziranega jekla, debeline od 1 do 2 mm (<http://www.bovanail.com/projects/>, pridobljeno 13.1.2011).

Take povezave so sicer najenostavnejše za izvedbo, vendar imajo najmanjšo estetsko vrednost.



Slika 7: Primer uporabe krepljastih plošč pri paličnih ostrešjih  
 (<http://www.bovanail.com/projects/>, pridobljeno 13.1.2001)

Plošče so velikosti od 30 cm<sup>2</sup> do 1m<sup>2</sup>. Ponavadi se v eni vezi uporabita dve simetrični plošči. Za zmanjšanje razmaka med elementi lesa v posameznem vozlišču in zagotovitve učinkovitosti vgrajenih plošč, se les obdela z vseh štirih strani (Nielsen, 2003).

#### 4.4 Modeliranje paličja

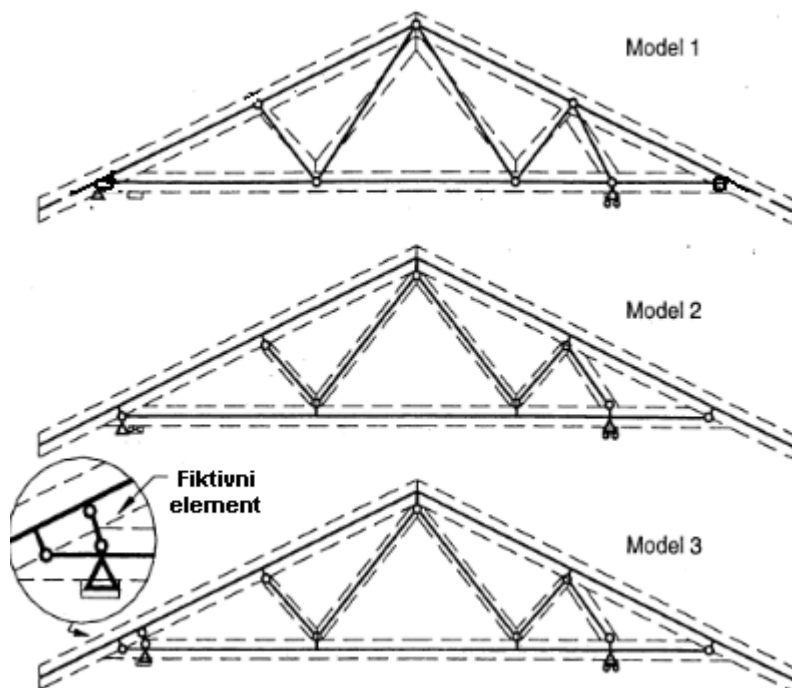
Ker je splošno paličje del kompleksne tridimenzionalne konstrukcije, je za njegovo modeliranje potreben tridimenzionalen model. Leseni elementi v paličju, kot so nosilci in letve (ki so sicer izraziti linijski elementi), se lahko modelirajo z modeli nosilcev v prostoru. V takem modelu mora biti podana togost med elementi, ki se stikujejo in vse ekscentričnosti (Nielsen, 2003). Elementi so lahko podvrženi torziji in izven ravninskem upogibanju, povezovalne letve so obremenjene tlačno, natezno in upogibno.

Vendar se v realnosti tridimenzionalni modeli razdelijo na enostavne ravninske statične modele, kjer se obtežbe dodajo direktno in vplivi se lahko prenašajo od enega modela na drugega, da se tvori realno tridimenzionalno stanje.

V modeliranju paličja predstavljajo leseni elementi manjši problem od dimenzioniranja vozlišč (Nielsen, 2003).

#### 4.4.1 Modeliranje samega paličja

Na sliki 8 je prikazan razvoj modelov paličja.



Slika 8: Trije različni modeli paličja ostrešja (original v angleščini, Nielsen, 2003, str.370)

Model 1 je najbolj preprost, nosilci so prikazani kot enostavni linijski elementi palic, povezave med njimi pa so enostavni členki. Porazdeljena obtežba je dodana kot točkovna obtežba v členkih. S tem modelom je mogoč izračun notranjih statičnih količin brez uporabe računalniških orodij.

Model 2 je že izboljššan. Špirovci so modelirani kot kontinuirani nosilci in majhni pomožni elementi, vključujoč ekscentričnosti med sistemskimi povezavami v posameznem vozlišču. Sistemske linije so že bližje sredini lesenih elementov. Porazdelitve momentov v špirovcih so podane direktno. Povezave so še vedno narejene v obliki členkov.

Pri modelu 3 so uporabljeni spoji, imenovani »heel joint« (Nielsen, 2003), podrobneje vidni na naslednji sliki, ki že lahko prevzemajo momente. Uvede se fiktiven palični element. Togost povezave in s tem porazdelitev momenta v sami povezavi je odvisna od togosti virtualne povezave in njene natančne pozicije. Fiktivna palica je pozicionirana od vozlišča v špirovcu v bližini mesta stičenja do spodnjega vozlišča v bližini podpore. V splošnem je togost

fiktivnega elementa enaka togosti špirovca. Z uvedbo te palice se spremeni tudi model podpiranja, konzole.



Slika 9: Povezava med elementi paličja, ki že prevzema momente, imenovana »heel joint« (<http://www.forestryforum.com/board/index.php?topic=29272.20>, pridobljeno 17.1.2011)

Tako modeliranje ima velik vpliv na porazdelitev momenta in kontroliranje dimenzij lesenih nosilcev.

Danes veliko komercialnih programov temelji na uvedbi fiktivnega elementa. Uporabniki lahko uporabijo veliko različnih modelov, ki pa imajo še nekaj pomanjkljivosti (še vedno je potrebno določiti karakteristike povezovalnih elementov, deformacija samih povezav ni zajeta v deformaciji konstrukcije).

Najbolj sofisticiran je danes Foschijev model, ki je sestavljen iz elementa nosilca, pomožnih elementov, kontaktnega elementa, elementa, ki prenaša sile iz vozlišča v lesu do vozlišča na plošči in elementa plošče. Prednost tega modela je, da vključuje deformacije vozlišč v računu notranjih sil in deformacij.

#### 4.5 Optimizacija paličja

V zadnjih desetletjih je optimizacija konstrukcij postala opazen del procesa modeliranja in dimenzioniranja konstrukcij. Glede na druge oblike konstrukcij je paličje relativno enostavno in precej lahko je tvoriti matematični model (Šilih in sod., 2009). Pišejo o tem, da je pa po drugi strani optimizacija paličja s klasično metodo ponavljanja analize, glede na veliko število samih palic v paličjih, neprimerna.

Najpomembnejši parametri so tip konfiguracije palične konstrukcije, razmerje med razponi in višino konstrukcije in število vmesnih elementov (diagonal in vertikal).

Namen analize konstrukcije je dobiti odziv popolnoma znane konstrukcije. Pri sami optimizaciji so parametri spremenljivi in so v samem procesu optimizirani. Druga naloga je optimizacija oblike paličja, kjer se optimizirajo koordinate vozlišč. Pri tem pridemo do pomembne značilnosti lesenih paličij, kjer sama vozlišča niso tako toga, kot pri betonskih ali jeklenih paličjih. Nezaželeni zamiki v vozliščih pomenijo zmanjšanje togosti paličja in posledično povečanja deformacij nosilca. Prav zato je izbira oblike in tipa vozlišča dodaten pomemben parameter paličja. Podajnost vozlišč je v veliki meri odvisna od izbire veznih sredstev. Na konstruiranje vplivajo poleg vrste veznih sredstev tudi njihove dimenzije, število in razporeditev.

Za les je značilna samo delna duktilnost v tlaku, v nategu pa ni nobene duktilnosti. Jekleni mozniki zaradi svoje fleksibilnosti nudijo potrebno duktilnost in disipacijo energije (Šilih in sod., 2009).

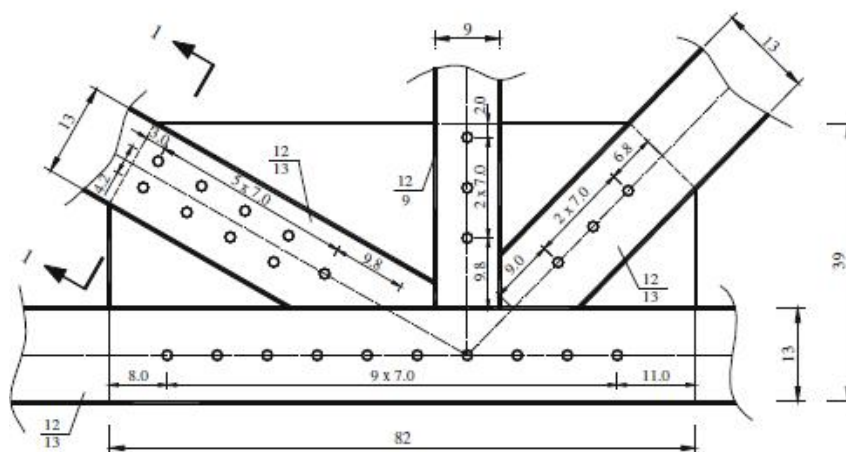
Lesene konstrukcije vzdržujejo dober odziv pri vetrni in potresni obremenitvi. Posebno lesena paličja so znana po svojem ugodnem arhitekturnem učinku, majhni lastni teži in enostavni proizvodnji. Prav lesene paličje konstrukcije so najugodnejše za ostrešja, kjer želimo premostiti razpone, večje od 20m.

Če analiziramo palično konstrukcijo, kot so to storili Šilih in sod. (2009) v svojem članku, dobimo sledeče rezultate:

- minimalni strošek proizvodnje in minimalno maso lesa dobimo v primeru, ko imamo najmanj elementov paličja,
- pri primerjavi deformacij ugotovimo, da se paličje z najmanj elementi tudi najmanj deformira, saj imamo manjše število podajnih spojev.

Vendar je višina konstrukcije v realnosti omejena, zato če pregledamo ostale variante, vidimo, da pri večjem številu zgornjih elementov, optimalna višina bistveno ne variira. Pri tem bi pričakovali, da pri podobni višini palične konstrukcije dobimo večjo togost konstrukcije, če povečamo število povezovalnih elementov (vertikal in diagonal). Vendar, če upoštevamo tudi podajnost vozlišč, se pri povečanju števila elementov paličja, togost celotne konstrukcije zmanjša in s tem poveča njena deformabilnost. Ugotovili so, da deformacije zaradi zdrsov v samem vozlišču pomenijo več kot 40% vseh deformacij.

To pomeni, da se moramo pri računu paličnih konstrukcij posebej posvetiti tudi vozliščem. Le ta morajo biti popolnoma centrična, v elementih paličja se ne smejo pojaviti dodatni upogibni momenti zaradi ekscentričnosti vozlišča. Primer takega popolno centričnega vozlišča je na sliki 10.



Slika 10: Primer popolno centričnega vozlišča, vse mere so v cm (Šilih in sod., 2009, str. 293)



## 5 KOMPOZITI

Poleg že predstavljenih lepljenih lameliranih nosilcev in paličij, se za večje razpone lesenih ostrešij lahko uporabijo tudi nekatere druge metode obdelave lesa, ki so predstavljene v nadaljevanju.

V svojem delu Ceccotti (2003) piše, da je danes lepljenje elementov lesenih konstrukcij že zasenčilo druge tehnike mehanskega povezovanja med elementi. Uporaba mehanskega spajanja pa je še vedno zelo pomembna s kulturnega in ekonomskega vidika. Kompozitna tehnologija je pogosto uporabljena v primerih renoviranja, ko hočemo ohraniti kulturno vrednost, v primerih prefabriciranih elementov, kjer sta majhna teža in enostavnost izvedbe pomembni karakteristiki in v primerih, ko moramo konstrukcijo sestaviti na mestu samem in ne moremo ustvariti optimalnih pogojev za tehnologije lepljenja.

Z ustvarjanjem lesenih kompozitov lahko tvorimo konstrukcije različnih prevezov. Lahko so sestavljeni iz masivnega lesa, lepljenih lameliranih elementov (podrobneje so predstavljeni v poglavju 1 tega diplomskega dela), ali konstrukcij, ki temeljijo na lesnih proizvodih (OSB ploščah, vezanih ploščah, ...). Uporabljajo se tudi kompozitni sestavi, kjer sta uporabljena les in beton ali les in jeklo.

S sestavljenimi prerezi se podrobneje ukvarjajo druge diplomske naloge, tukaj so samo omenjeni kot ena od možnosti, ki so uporabljene za doseganje našega cilja – povečevanje razmaka med podporami in ustvarjanje konstrukcij, ki nudijo velike neprekinjene prostore.

## 6 PRIMERI NEKATERIH KONSTRUKCIJ Z NAJVEČJIMI RAZPETINAMI

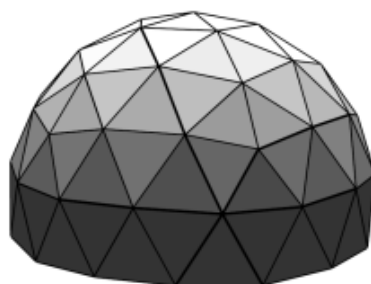
### 6.1 Superior Dome

V Guinnessovi knjigi rekordov leta 2010 je lesena kupolna konstrukcija, imenovana Superior Dome na 5. mestu vseh kupolastih konstrukcij na svetu (največjih v premeru). Prve štiri konstrukcije na seznamu so jeklene kupole, torej je Superior Dome največja kupola na svetu, kjer je kot konstrukcijski material uporabljen les.

Dvorana Superior Dome je bila odprta septembra 1991 kot stadion v študentskem naselju Northern Michigan University v mestu Marquette, v Ameriški zvezni državi Michigan. Je domači stadion ekipe ameriškega nogometa imenovane Northern Michigan Wildcats ([http://www.search.com/reference/Superior\\_Dome](http://www.search.com/reference/Superior_Dome), pridobljeno 22.1.2011).

Kupola pokriva površino 21.000m<sup>2</sup>, sestavljena je iz 781 nosilcev severnoameriške drevesne vrste duglazija. Duglazija je iglasto drevo iz družine borovk, ki zraste v višino do 75m. Drevo porašča gozdove Severne Amerike in raste zelo hitro, zaradi česar je gospodarsko še bolj pomemben. Drevesno vrsto odlikuje velika trdnost glede na lastno težo, v kombinaciji z določeno vrsto macesnov pa daje največji modul elastičnosti v severnoameriških vrstah mehkega lesa (<http://www.bearcreeklumber.com/species/douglasfir.html>, pridobljeno 22.1.2011). V isti kombinaciji ima še druge ugodne karakteristike, kot so velika upogibna trdnost, natezne trdnosti vzporedno z vlakni, prenašanje velike prečne sile ter imajo veliko tlačno trdnost vzporedno in prečno na vlakna.

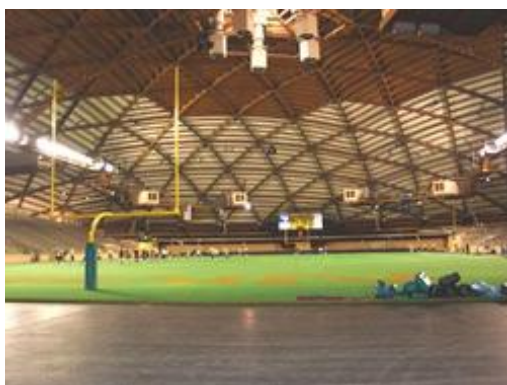
Sama konstrukcija je geodetska kupola (angleško »geodesic dome«), kar pomeni, da je princip same konstrukcije sferična konstrukcija, ki temelji na mreži krožnic, ki ležijo na sferi.



Slika 11: Konstrukcija geodetske kupole

([http://www.plunk.org/~grantham/public/geodesic\\_domes/geodesic\\_domes.html](http://www.plunk.org/~grantham/public/geodesic_domes/geodesic_domes.html), pridobljeno 22.1.2011)

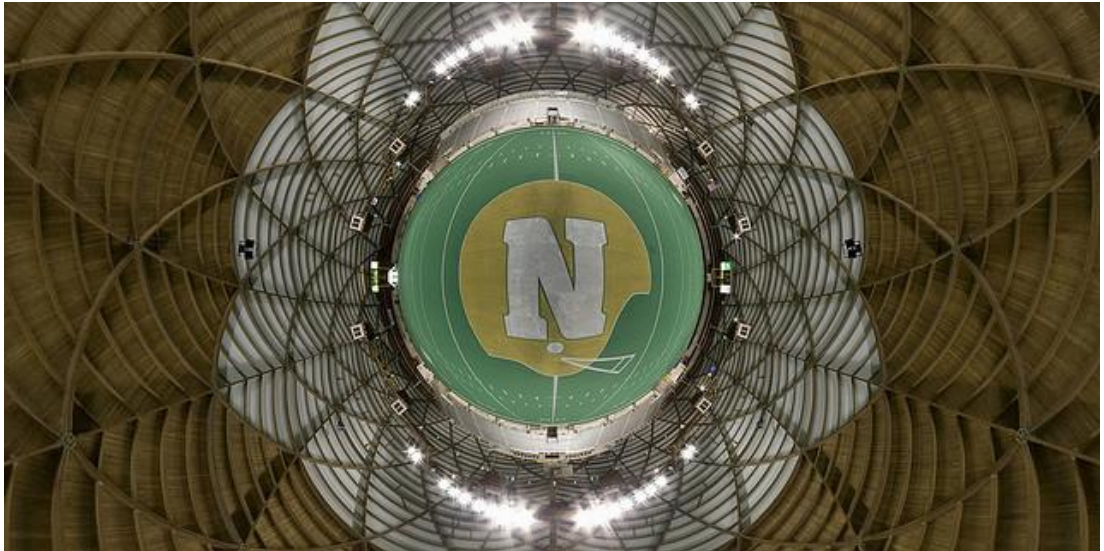
Sama dvorana ima 8.000 trajnih sedišč, lahko pa sprejme do 16.000 obiskovalcev. Premer kupole je 163,4m. Projektna obtežba snega je  $2,87 \text{ kN/m}^2$ , projektna hitrost vetra je  $130 \text{ km/h}$  ([http://en.wikipedia.org/wiki/Superior\\_Dome](http://en.wikipedia.org/wiki/Superior_Dome), 22.1.2011). Ti obtežbi nam kažeta, da leži kupola na zelo zahtevnem vremenskem območju, kar se tiče projektiranja.



Slika 12: Zunanost in notranost Superior Dome

(<http://webb.nmu.edu/SportsAthletics/SiteSections/Facilities/SuperiorDome.shtml>, pridobljeno 22.1.2011)

Značilnost stavbe so tudi dvižne preproge umetne trave, kar tvori igrišča za ameriški nogomet, nogomet, hokej na travi. Pod to preprogo je sintetična igralna površina, kjer so tri igrišča za košarko/odbojko, dve teniški igrišči in 200m dolga tekaška proga. Torej je konstrukcija resnično superiorna, saj ponuja stvari, ki so v Sloveniji samo sanje.



Slika 13: Pogled navzgor na kupolo s sredine igrišča

(<http://www.flickr.com/photos/dynamite360/2058073900/>, pridobljeno 22.1.2011)

## 6.2 Richmond Olympic Oval

Konstrukcija je zgrajena v mestu Richmond v Kanadi in je bila ena od prizorišč zimskih olimpijskih iger 2010, v njej je namreč potekalo hitrostno drsanje. Dimenzije same stavbe so okrog 100 x 215 m, z njo pa so želeli prikazati lesene produkte in inovativne tehnologije svojih krajev (<http://www.worldbuildingsdirectory.com/project.cfm?id=1194>, pridobljeno 23.1.2011).

Veliko lastnosti konstrukcije se omenja v presežkih:

- razpon konstrukcije je blizu 100m, kar pomeni za kompozitno konstrukcijo iz lepljenega lameliranega lesa in jekla najdaljši ločni razpon na svetu,
- površina strehe iz vezanega lesa in (od hrošča uničenih) borovcev znaša 2,5 ha in spada med največje na svetu,
- prefabricirani leseni valoviti paneli (standardnih dimenzij lesa 38 x 89mm) tvorijo enostavno ukrivljeno konstrukcijo, kar je edinstven svetovni primer,
- zelo redko uporabljena integracija strojnih in elektroinstalacij v prefabricirane lokove.



Slika 14: Lepljeni lamelirani nosilci v kombinaciji z jeklom

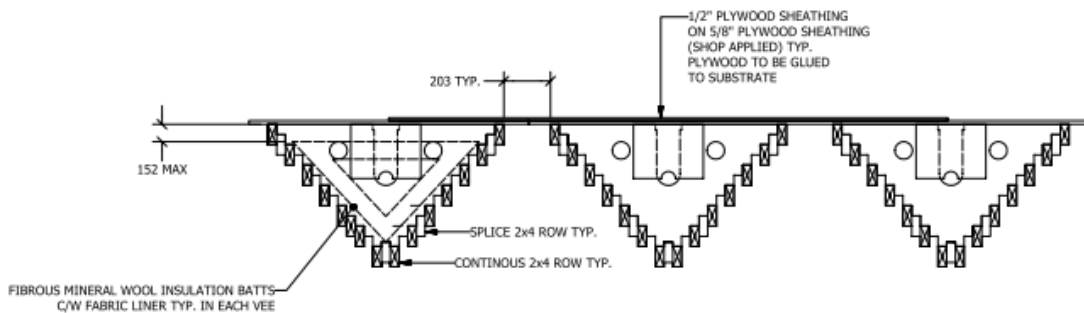
(<http://www.worldbuildingsdirectory.com/project.cfm?id=1194>, pridobljeno 23.1.2011)



Konstrukcija je zasnovana v obliki lesenih lokov, ki premoščajo razpon med betonskimi oporniki. S tem tvorijo asketski videz konstrukcije, kar je ravno nasprotno od konstrukcij z ogromno elementi, kot so palične prostorske konstrukcije.

Prefabricirani paneli pa premagujejo razpon 14,2m med primarnimi nosilci.

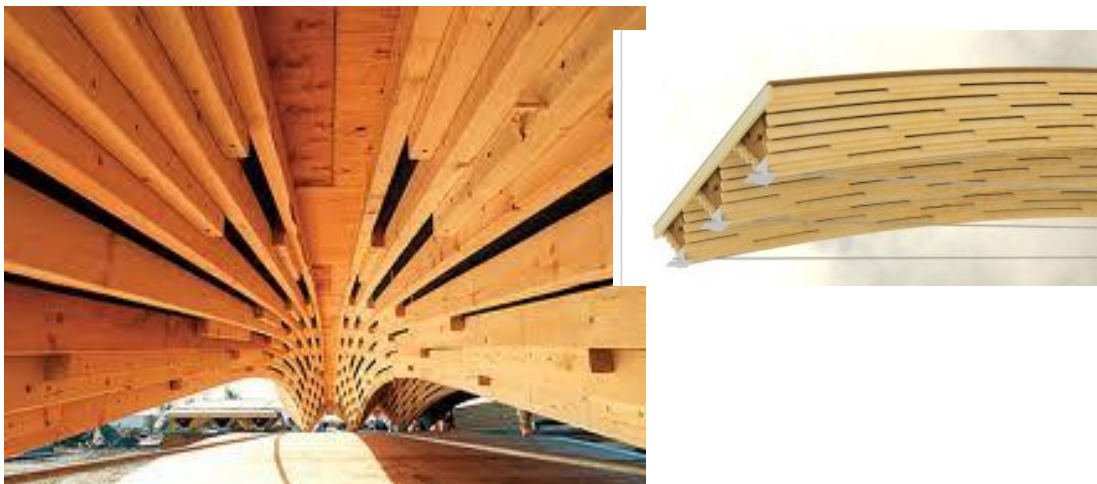
Kompozitni leseno jekleni lokovi so v prerezu konstruirani kot votli trikotniki, z namenom, da skrijejo inštalacije, zagotovijo stabilnosti konstrukcije in ustvarijo izjemno estetsko vrednost.



Slika 15: Votli leseno/jekleni trikotni prerezi

([http://www.naturallywood.com/.../Richmond\\_Olympic\\_Oval\\_Case\\_Study\(1\).pdf](http://www.naturallywood.com/.../Richmond_Olympic_Oval_Case_Study(1).pdf),

pridobljeno 23.1.2011)



Slika 16: Dejanski izgled votlih leseno/jeklenih trikotniških prerezov

(levo: <http://ceu.construction.com/article.php?L=221&C=694&P=5>, pridobljeno 23.1.2011;

desno: <http://www.alexschreyer.net/cad/richmond-olympic-oval-design/>, pridobljeno

23.1.2011)

Porabljenih je bilo  $2400\text{m}^3$  smrekovega, borovega in jelkega lesa (poškodovanega od hrošča). Uporabili so 19.000 listov vezanega lesa duglazije, dimenzij  $1,2 \times 2,4 \text{ m}$ ;  $2400\text{m}^3$  lesa duglazije v lameliranih lesenih nosilcih.

Na severni in južni strani objekta, kjer se streha razteza čez zidove, jo podpirajo leseni lamelirani podporniki v skupni količini  $70\text{m}^3$  (na sliki spodaj).

Da bi zadostili požarnim predpisom, so pri izdelavi lesenih panelov vključili linije škropilcev (t.i. »šprinklerjev«), črno akustično linijo tkanine in mineralno volno.



Slika 17: Previs strehe podpirajo podporniki iz lepljenih lameliranih elementov  
([http://www.naturallywood.com/.../Richmond Olympic Oval Case Study\(1\).pdf](http://www.naturallywood.com/.../Richmond_Olympic_Oval_Case_Study(1).pdf),  
pridobljeno 23.1.2011)

Vezane plošče, ki pokrivajo celotno konstrukcijo so že ukrivljene v lokove. Skupaj ta zgornja »koža« vezanega lesa in lamelirani leseni lokovi tvorijo kompozitno reakcijo. Ta strešna konstrukcija vsebuje tudi spodnji natezni pas, ki tvori krivino, s katero se posledično poveča učinkovita globina celotne konstrukcije.



Slika 18: Pogled na celotno konstrukcijo z zunanje strani

([http://www.iald.org/media/article.asp?ARTICLE\\_ID=668&](http://www.iald.org/media/article.asp?ARTICLE_ID=668&), pridobljeno 23.1.2011)

### 6.3 Nekatere druge impozantne lesene konstrukcije velikih razponov

Poleg količinske porabe lesa, je pri inženirskih objektih pomembna tudi detajlna študija za ohranjanje majhne teže konstrukcije. Za optimizacijo moramo upoštevati več kriterijev. Sem spada izbira statičnega sistema, ki dovoljuje prenos obremenitev med elementi. Naslednji kriterij je, da se vgradijo tlačni elementi, ki zmanjšajo razpon primarnega nosilnega sistema in prenašajo upogibne napetosti (ki zahtevajo velike prereze) na normalne napetosti. Če so ti elementi prostorsko razporejeni, lahko direktno stabilizirajo globalno konstrukcijo. Zelo pomemben kriterij pri dimenzioniranju so tudi detajli, predvsem zaradi ekonomskega vidika. Zato jih je nujno poenostaviti ali zmanjšati njihovo kvantiteto (na primer, tlačni elementi so lahko spojeni samo s kontaktom), piše Natterer, 2004.

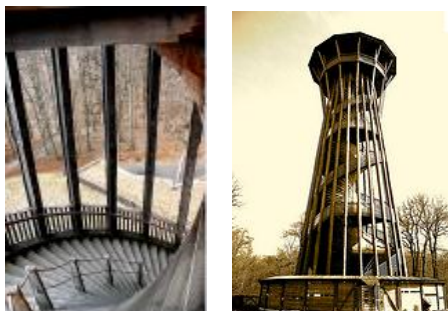
Prostorske lupinaste konstrukcije, rebraste ali prekinjene lupine zadostijo prvima dvema kriterijema. Večino napetosti pri takšnih konstrukcijah predstavljajo osne napetosti, ki jih povzročajo stalne obtežbe. Neugodna pri takih konstrukcijah so številna vozlišča, ki pa jih lahko poenostavimo na različne načine.

Vse te tehnologije zahtevajo zelo dobro sodelovanje med arhitekti in gradbeniki na celotni poti razvoja določene konstrukcije, da izrabimo vse prednosti lesa, ko so raznolikost oblik in tekstur.



### 6.3.1 Prostorski okvir kot spiralna površina

Primer take konstrukcije je stolp v Lausanne, Švica. Višina stolpa je 36m, spodnji premer je 12m, premer zgornje ploščadi je 6m. Sestavlja ga 24 polkrožnih stebrov razporejenih okrog spiralnega stopnišča. Stebri si iz lesa duglazija, prereza 20x40cm. Zgornja in dve vmesni ploščadi so narejeni iz vertikalno žebljanega lameliranega lesa (Natterer, 2004).



Slika 19: Opazovalni stolp v Lausanne, Švica

(<http://www.flickr.com/photos/dafres/page69/>, pridobljeno 23.1.2011)

### 6.3.2 Prostorska konstrukcija z oporniki

Taka ostrešja so bila zelo popularna v 80-ih letih prejšnjega stoletja, dokaz za to so objekti, ki se uporabljajo za javne jedilnice v Nemčiji.

Na sliki 6.3.2.1 je razpon med glavnimi nosilci 7,2m in tvori s sekundarnimi nosilci kvadratno mrežo 2,4 x 2,4m. Obtežba se prenaša preko prostorskih lesenih »snopov« do betonskih stebrov, ki so med seboj razmaknjeni 7,2m (Natterer, 2004).



Slika 20: Prostorska strešna konstrukcija, zgrajena leta 1980 (Natterer, 2004, str. 17)

Na sliki 21 je konstrukcija, kjer je razmak med betonskimi stebri že 14,4m. Trikotni strešni elementi so med seboj staknjeni v svoji najvišji in najnižji točki.



Slika 21: Prostorska strešna konstrukcija, zgrajena leta 1981 (Natterer, 2004, str. 17)

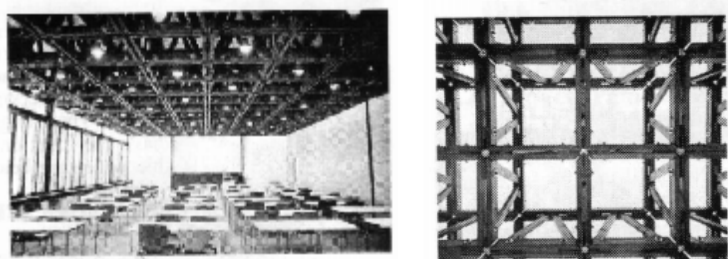
### 6.3.3 Ploskovne konstrukcije v prostoru

Mreža iz lepljenega lameliranega lesa je nosilna stropna/strešna konstrukcija cerkve v mestu Kolbermoor v južnem delu Nemčije. Vezi nosilne konstrukcije so jeklene. Dvojni nosilci so povezani v nosilcu s krempljastimi ploščami in vijaki. Sekundarni nosilci iz masivnega lesa tvorijo sekundarno mrežo, ki porazdeli obtežbo v dve smereh (na sliki spodaj).



Slika 22: Mreža primarnih in sekundarnih nosilnih mrež (Natterer, 2004, str. 18)

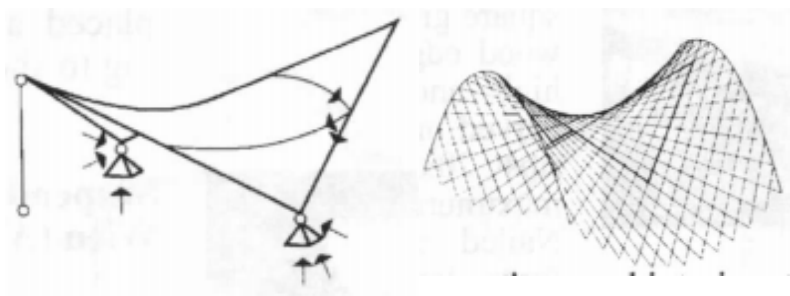
Avditorij univerze Weiherstephan je strešna konstrukcija palična mreža na vogalnih stebrih razpona 9,6 x 9,6m. Globina paličja je 1,2m. Titive so dvojni nosilci, diagonale med njimi pa so enojni. V enem spodnjem vozlišču titive se združi osem 6/14cm elementov dvojnih tetiv in štiri elementi diagonal dimenzij 6/12cm (slika 23).



Slika 23: Avditorij univerze Weiherstephan (Natterer, 2004, str. 18)

### 6.3.4 Lupine z lepljenimi lameliranimi rebri

V sedlastih oblikah je obtežba prenesena na robne elemente z nateznimi silami med dvema zgornjima točkama in tlačnimi silami med dvema spodnjima točkama. Robni elementi prenesajo te obremenitve do podpor z osnimi tlačnimi silami. Ko obliko lupine narekujejo upogibni momenti, te lupine imenujemo rebraste (Natterer, 2004).



Slika 24: Hiperbolični paraboloid, s prikazanimi smermi reakcij in osnih sil  
 (Natterer, 2004, str. 19)

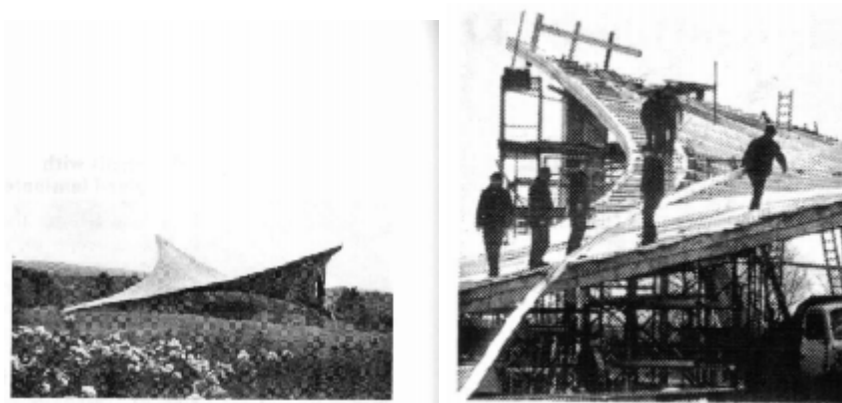
Na sliki 25 je taka rebrasta lupinasta konstrukcija iz treh 18,0 metrskih konzolnih hiperboličnih paraboloidov. Robni nosilci dimenzij 22/80 so lepljeni v krivini in sidrani na jeklene votle stebre. Samo lupino sestavljajo rebra dimenzij 4/10 cm, ki se križajo pod pravim kotom in dve plasti 2,4cm debelih plošč.



Slika 25: Rebrasta lupinasta konstrukcije v Rosenheimu, Nemčija, iz leta 1972  
 (Natterer, 2004, str. 19)

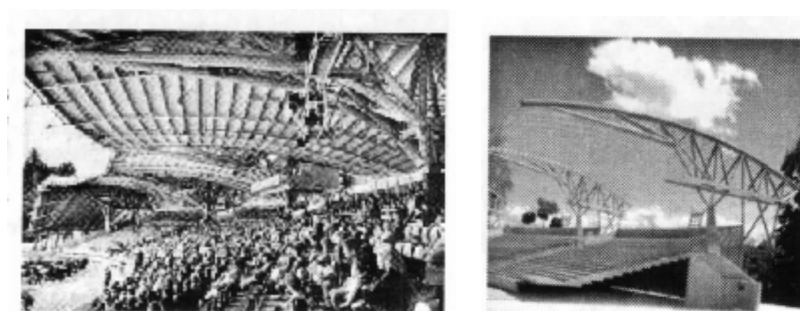
Primer prekinjene lesene lupine je konstrukcija v Dortmundu, ki leži na kvadratnih tleh. Lamelirani leseni robni nosilci so 18cm visoki in 1,4m široki, ukrivljeni v dveh oseh (slika 26). Upognjena rebra so dimenzij 20 x 20cm z največjim razponom 65m. Na rebra so žebljane

tri plasti plošč, postavljene pod kotom  $45^\circ$ , kar jim omogoča strižna odpornost (Natterer, 2004).



Slika 26: Lupinasta konstrukcija, Dortmund, Nemčija (Natterer, 2004, str. 20)

Še en primer prekinjene strešne lupine je izveden kot nadstrešek nad tribunami odprtega prireditvenega prostora. Ta konstrukcija je prikazana na sliki 27 in pokriva površino  $30 \times 100\text{m}$ . Sestavljajo jo štiri palične konzole, ki so projektirane na zelo veliko snežno obtežbo ( $6,0 \text{ kN/m}^2$ ). Okrogle lesene konzole so dolge  $30\text{m}$  in so na razmaku  $25\text{m}$ . Prekinjena strešna konstrukcija je iz lameliranih lesenih paličij in žebeljanih plošč.



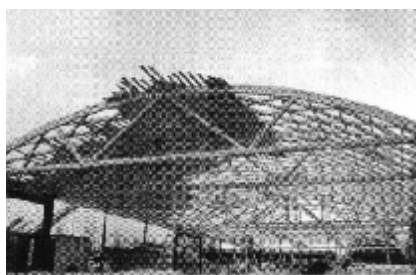
Slika 27: Nadstrešek nad tribunami (Natterer, 2004, str. 20)

### 6.3.5 Konstrukcije z rebrastimi krožnimi oboki

Mrežne konstrukcije, predstavljene v tem poglavju, imajo naslednje prednosti: enostavno in poceni izvedbo, uporabo nelepljenih desk, estetsko razgibano nosilno konstrukcijo.

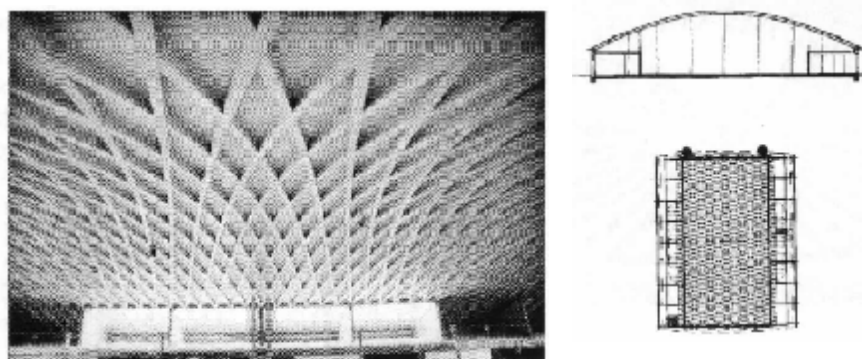
Rebra so sestavljena iz več plasti desk, križno privijačena skupaj s pomočjo gradbenega odra. V eni smeri so deske kontinuirane, v prečni pa samo zapolnjujejo praznino. V naslednji plasti desk pa je ravno obratno.

Ena od takih konstrukcij je v Chaumontu v Franciji, zgrajena leta 1993. Rebrasta lupina je narejena iz križno potekajočih reber, kjer 4 deske, vsaka debeline 35mm, tvorijo rebra. Obtežba na konstrukcijo je okrog 1,20 kN/m<sup>2</sup>. Notranji volumen ponuja dobro akustiko zaradi vidnih lesenih reber in načina sestavljanja desk (vidno na sliki 28).



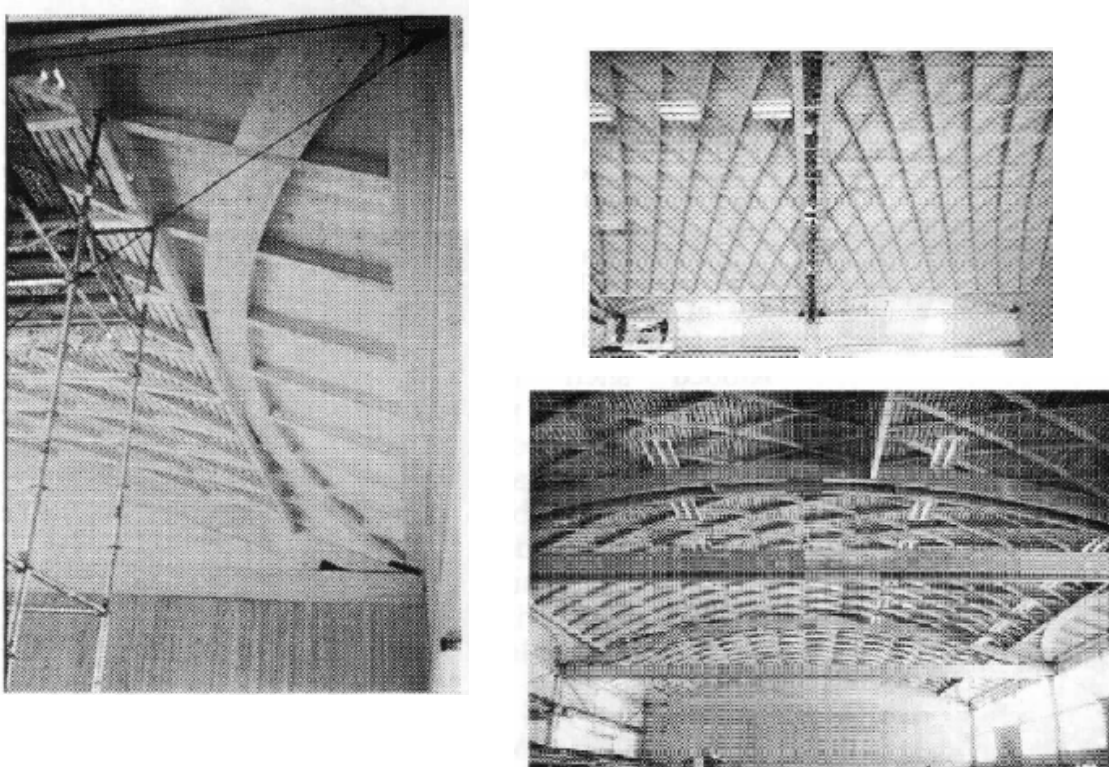
Slika 28: Rebrasta strešna konstrukcija v Chaumontu, Francija (Natterer, 2004, str. 21)

Ena od lepših takih konstrukcij je prav gotovo športna dvorana v Berlinu iz leta 1997. Razpon strešnega oboka je 25,4m. Mreža konstrukcije vsebuje 3 prehode in kontinuirane plasti desk. Dva toga razdelilna ločna nosilca sta pozicionirana na zunanji strani strešne konstrukcije.



Slika 29: Športna dvorana v Berlinu, z markantno strešno konstrukcijo (Natterer, 2004, str.

V Arlesheimu v Švici obstaja še ena športna dvorana s podobno zasnovo strešne konstrukcije. Ta dvorana je nekaj leta mlajša, saj je zgrajena leta 2000. Dimenzije dvorane so 35 x 54m. Streha vsebuje ločno konstrukcijo, kjer so lamelirani ukrivljeni nosilci porazdeljeni tako, da lahko prenašajo horizontalne sile iz loka v podpore. Prečni loki pa prevzemajo nesimetrično obtežbo, ki deluje na konstrukcijo (na sliki 30).

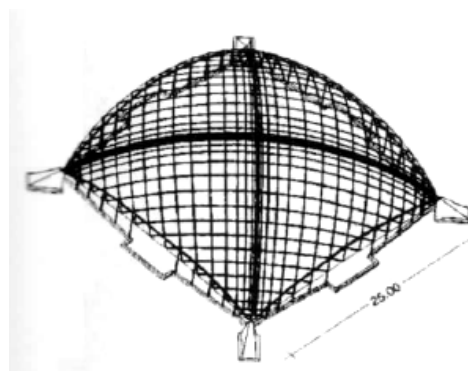


Slika 30: Strešna konstrukcije športne dvorane v Arlsheimu (Natterer, 2004, str. 22)

### 6.3.6 Konstrukcije s kupolasto lupino

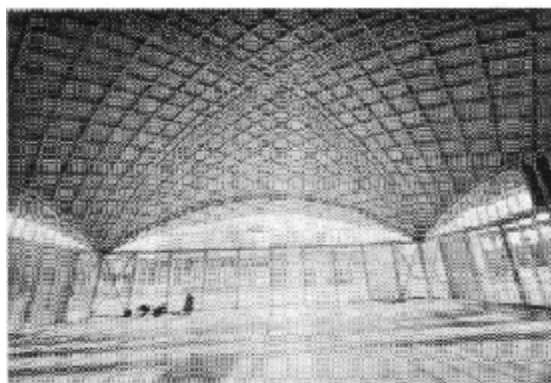
Naslednji projekti so prav tako mrežaste konstrukcije kot tiste v prejšnjem poglavju, z istimi prednostmi in uporabljene so enake konstrukcijske metode, s tem, da je oblika lupine drugačne – ukrivljena je v dveh smereh (Natterer, 2004).

Takšna konstrukcija je v Švicarskem mestu Ecublens. Sferična kupola ima naslednje dimezije: radij 27,5m na talni površini 25 x 25m in višino 6,8m. V vozliščih so deske medsebojno vijačene. Deske, diagonalno vijačene na rebra imajo funkcijo stabilizacije celotne ravnine strehe. Za konstrukcijo je bilo potrebnih 32m<sup>3</sup> desk.



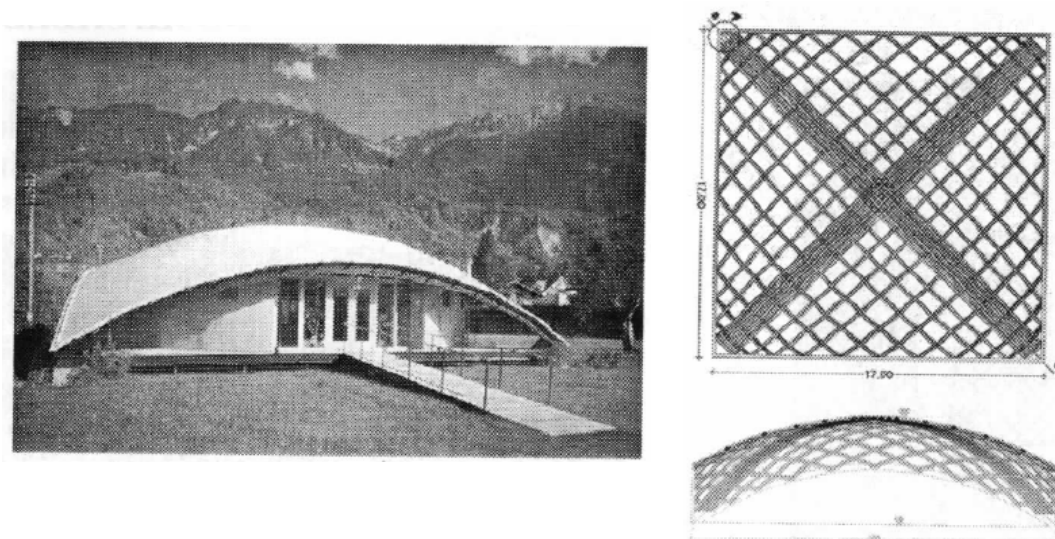
Slika 31: Kupolasta lesena streha (Natterer, 2004, str. 23)

Kvadratna rebrasta kupola v Ober-Ramstadtu je dimenzij 20 x 25m in višine 4m, s tem, da je dejanska najvišja točka kupole na višini 11m. Za prevzem horizontalnih sil je na obodu konstrukcije horizontalni element iz lepljenega lameliranega lesa, pozicioniran okrog celotne kupole, kar je vidno tudi na sliki 32.



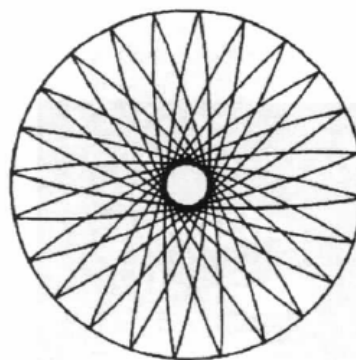
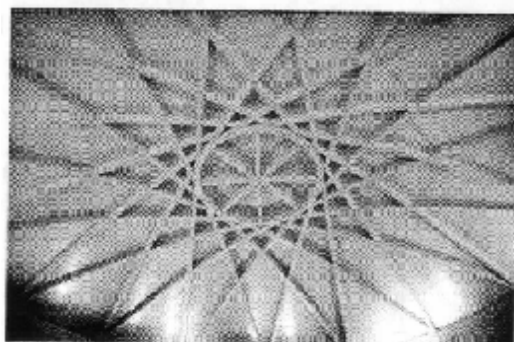
Slika 32: Strešna kupola, s horizontalnimi lepljenimi lameliranimi elementi za prevzem horizontalnih sil (Natterer, 2004, str. 23)

Nekoliko nekonvencionalna je strešna konstrukcija vrta v Triesnu v Avstriji, v bližini švicarske meje. Nekonvencionalna pa zato, ker samo strešno konstrukcijo prekriva prosojna plast izolacije, da se poveča izkoristek svetlobe. Kupola te strehe se razprostira na površini 17 x 17m, obremenitev celotne strehe pa prevzamejo samo štiri betonske podpore.



Slika 33: Strešna kupola na vrtcem (Natterer, 2004, str. 24)

V stavbi v Nantesu, Francija, pa okrogli leseni stebri nosijo ortogonalne glavne nosilce kvadratne oblike. Nad njimi je mreža iz masivnega lesa z notranjo okroglo mrežno rebrasto konstrukcijo. Horizontalne sile se prenašajo z obodnimi, na krožnici ležečimi lepljenimi lameliranimi nosilci. Vertikalne sile se iz lupine prenašajo na lesene stebre.



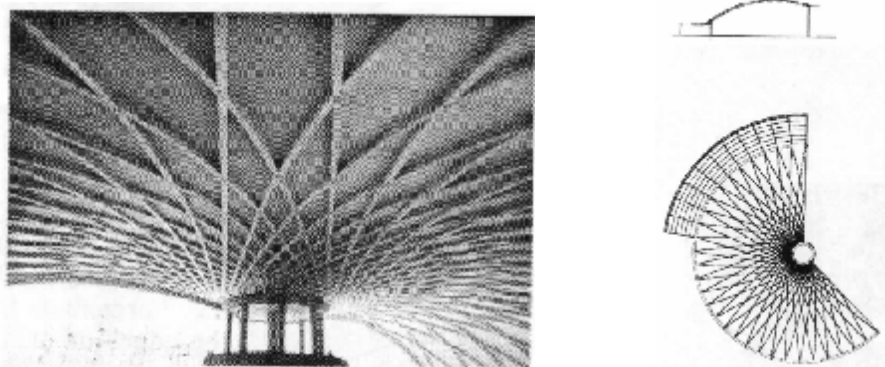
Slika 34: Strešna kupola krožne oblike (Natterer, 2004, str. 24)

Kompleksnejša krožnična kupola je strešna konstrukcija, ki pokriva plavalni bazen v St. Quentinu v Franciji, zgrajena leta 1997.

Ta konstrukcija ima premer 54m (Natterer, 2004) in tlorisno obliko krožnega izseka z odprtino velikosti kota  $225^\circ$ . Deske v rebrih so poldnevniške oblike, saj se s tem izognemo ukrivljenosti v dveh smereh. Do prvega vozlišča so deske v rebrih zlepljene, potem pa so



naprej proti središču krožnice žebljane skupaj. Podeskana je tudi površina strehe, to prispeva k togosti kupole.



Slika 35: Kupola, ki pokriva bazene v St. Quentinu, Francija (Natterer, 2004, str. 24)

Za sejem EXPO 2000 je bila skonstruirana velika strešna konstrukcija v obliki 10 kvadratnih »dežnikov«, skupne velikosti 16.000m<sup>2</sup>. Vsak tak dežnik pokriva površino 40 x 40m in je visok približno 26m. Sestavljen je iz štirih dvojno ukrivljenih lupinastih površin, konstruiran kot delno lepljeni lamelirani les iz prekinjenih lupin. Lupine visijo preko 26m in so obešene na štirih nosilcih (<http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/3-6-1.pdf>, pridobljeno 25.1.2011). V sredini dežnika jeklena konstrukcija prenaša obtežbe na konstrukcijo stolpa. Dežniki so povezani na zunanjih upogibnih robovih lupin in na koncu nosilcev. Sestavni deli konstrukcije so bili večinoma izdelani v tovarni v bližini samega mesta gradnje. Žerjavi so potem sestavili vnaprej narejene dele korak po koraku.

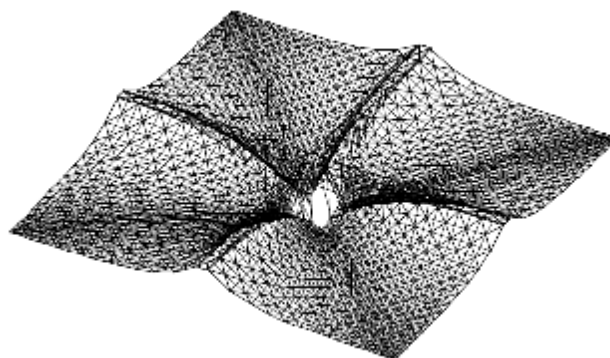


Slika 36: Postavitev prvega »dežnika«

(<http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/3-6-1.pdf>, pridobljeno 25.1.2011).

Glavni namen te konstrukcije je bilo narediti zaščito pred vetrom. Ta arhitektonsko in tehnično zelo zahtevna inovativna konstrukcija je simbolizira tudi »človeško bitje, naravo, tehnologijo« (cit. po <http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/3-6-1.pdf>, pridobljeno 25.1.2011, original v angleščini).

Glavna obtežba lupinaste strehe je lastna teža ter obtežba snega in vetra. Obtežba vetra je bila simulirana v vetrovnem tunelu in dobili so nasprotno rezultate od pričakovanih. Veter obremenjuje konstrukcijo v navpični smeri navzdol, kar sovpada s smerjo lastne teže in obtežbe snega. Glede na posebno obliko konstrukcije (krilo obrnjeno navzdol) veter povzroča negativen tlak pod lupino in jo vleče navzdol.



Slika 37: Posebno obliko konstrukcije veter obremenjuje navpično navzdol (<http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/3-6-1.pdf>, pridobljeno 25.1.2011).

Največji pričakovani pomiki, vključujoč deformabilnost stolpa in jeklene konstrukcije, so 13 cm na koncu nosilcev in 36 cm na koncu nepodprtega dela lupine. Takšni pomiki se pojavijo zaradi hkratnega delovanja obtežbe z vetrom in snegom.



Slika 38: Rob lupine ob nosilcih in jeklene povezave med rebri  
(<http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/3-6-1.pdf>, pridobljeno 25.1.2011).

## 7 ZAKLJUČEK

V osnovi je les kot konstrukcijski material pogosto izbran zaradi svoje majhne lastne teže. Enostavnost izvedbe paličnih konstrukcij in zakompliciranost izvedbe lepljenih lameliranih elementov in drugega kompozitnega konstrukcijskega lesa je na prvi pogled lahko razlog za izbiro konstrukcijskega sistema. Vendar skozi celotno analizo obeh tipov konstrukcij ugotovimo, da je projektiranje spojev med samimi elementi tisto najzahtevnejše. Če torej želimo ustvariti estetsko zanimivo palično konstrukcijo, se moramo detajlno posvetiti tudi vozliščem, kar zahteva uporabo naprednih računalniških modelov.

Ugotavljamo, da vse te kompleksne lesene konstrukcije zahtevajo veliko inženirskega sodelovanja med različnimi strokami, kakor tudi sofisticirano in precizno proizvodnjo samih elementov. Možnosti proizvodnje moramo imeti v mislih celoten čas modeliranja take konstrukcije, saj je velikost elementov omejena z velikostjo proizvodnje in možnostjo transporta. Te zahteve so značilne za vse vrste obravnavanih konstrukcij v tej diplomski nalogi, saj se s tem takoj spremeni celoten sistem konstrukcije, ker dobimo nove spoje med elementi. Kakor že prej ugotovljeno, pa so spoji šibki členi obravnavanih konstrukcij. To potrjujejo tudi analize spojev in njihove uporabe.

V vseh teh primerih oblik nosilnih sistemov vidimo, kar smo predvidevali že v uvodu: človek ima vedno željo ustvariti nekaj naprednejšega od že obstoječega ali kakšnega prejšnjega projekta. S tem vedno iščemo tudi vedno enostavnejše načine za izvedbo tega. To vse sovпада z naravnim okoljem, kjer je edina nespremenljiva stvar to, da se vse vedno spreminja, izpopolnjuje, raste, se krči,...

Vedno bolj pa tudi se zavedamo tudi svoje povezanosti z naravo, stremimo k kvalitetnejšemu življenju in življenjskim pogojem. Ker je človeško bivanje neprimerljivo prijetnejše v naravnih okoljih se uporaba konstrukcijskega lesa spet povečuje od časov, ko je bila nekako potisnjena na stran. To se je zgodilo z masovno »proizvodnjo« betonskih in armiranobetonskih konstrukcij. Ta trend se v času iskanja čim hitrejšega zaslužka sicer še

nadaljuje, vendar dobivajo objekti iz bolj naravnih materialov vedno večjo materialno in tudi moralno vrednost.

Ugotovila sem tudi, da imajo v tem diplomskem delu obravnavane konstrukcije še eno skupno točko (poleg velikih razpetin in kompleksnosti izvedbe): vsi obravnavani objekti so edinstveni, noben se ne gradi masovno, ampak je en točno določen tip in velikost konstrukcije uporabljen samo v enem samem primeru. To pomeni, da je bilo v projektiranje ene same konstrukcije vloženo veliko dela, vsa nova dognanja pa vplivajo na naslednje projekte, kjer se spet pojavijo nove ugotovitve.

Na začetku pisanja diplomske naloge sem predvidevala, da bo ena oblika nosilne konstrukcije izstopala od ostalih (paličje ali lepljene lamelirane konstrukcije) pri gradnji inženirskih objektov večjih razponov. Vendar sem prišla do zaključka, da se pri najbolj dovršenih konstrukcijah nosilni sistemi med seboj vedno dopolnjujejo. S tem se dosegajo vedno novi mejniki pri gradnji z lesom.

## VIRI

AS. 2011.

<http://www.alexschreyer.net/cad/richmond-olympic-oval-design/> (pridobljeno 23.1.2011).

Bear Creek Lumber. 2011.

<http://www.bearcreeklumber.com/species/douglasfir.html> (pridobljeno 22.1.2011).

Bell, K., Wollebaek, L., 2004. Large, mechanically joined glulam arches. 8<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering. Volume I: Presentations held on Monday. 14.-17.6.2004. Lahti, Finland. str. 55-66.

Berdajs, A., Galonja, S., Gruden, T., Murn, Z., Musi, A., Petek, I., Slokan, I., Smolej, B., Štembal-Capuder, M., Žitnik, D., Žitnik, J. 2006. Gradbeniški priročnik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 560 str.

Burger, Norbert , Müller, Alan , Natterer, Johannes. 2000. The "EXPO-roof" in Hanover - A new dimension for ripped shells in timber.

<http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/3-6-1.pdf> (pridobljeno 25.1.2011).

Ceccotti, A. 2003. Composite Structures. V: Thelandersson, S. (ur.), Larsen, H.J. (ur.) 2003. Timber engineering. Chichester, John Wiley&Sons: str. 409-427.

Complex solution for producers of timber roof structures. 2006.

<http://www.bovanail.com/projects/> (pridobljeno 13.1.2001).

Continuing Education Center. 2011.

<http://ceu.construction.com/article.php?L=221&C=694&P=5> (pridobljeno 23.1.2011).

Društvo inženirjev in tehnikov lesarstva. 2008.

<http://www.ditles.si/Gradiva/GATE-PS-Srpcic.pdf> (pridobljeno 12.1.2011).

Flickr. 2011.

<http://www.flickr.com/photos/dafres/page69/> (pridobljeno 23.1.2011).

Flickr. 2011.

<http://www.flickr.com/photos/dynamite360/2058073900/> (pridobljeno 22.1.2011).

Geodesic Domes. 2006.

[http://www.plunk.org/~grantham/public/geodesic\\_domes/geodesic\\_domes.html](http://www.plunk.org/~grantham/public/geodesic_domes/geodesic_domes.html) (pridobljeno 22.1.2011).

International Association of lighting designers. 2011.

[http://www.iald.org/media/article.asp?ARTICLE\\_ID=668&](http://www.iald.org/media/article.asp?ARTICLE_ID=668&) (pridobljeno 23.1.2011).

Lam, F., Prion, H.G.L. 2003. Engineered Wood Products for Structural Purposes. V: Thelandersson, S. (ur.), Larsen, H.J. (ur.) 2003. Timber engineering. Chichester, John Wiley&Sons: str. 81-102.

Lilleheden. 2010.

<http://www.lilleheden.dk/uk/glulam.asp> (pridobljeno 30.12.2010).

Lopatič, J. 2006. Lesene konstrukcije, študijsko gradivo VSŠ. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 91 str.

Natterer, J.K., 2004. A way to sustainable architecture by new technologies for engineered timber structures. 8<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering. Volume II: Presentations held on Tuesday and Thursday. 14.-17.6.2004, Lahti, Finland. str. 9-26.

Naturally: wood. 2011.

[http://www.naturallywood.com/.../Richmond Olympic Oval Case Study\(1\).pdf](http://www.naturallywood.com/.../Richmond_Olympic_Oval_Case_Study(1).pdf)

(pridobljeno 23.1.2011).

Neuhaus, H. 1994. Lehrbuch des Ingenieurholzbaus. Stuttgart, B.G.Teubner Stuttgart: 491 str.

Nielsen, J. 2003. Trusses and Joints with Punched Metal Plate Fasteners. V: Thelandersson, S. (ur.), Larsen, H.J. (ur.) 2003. Timber engineering. Chichester, John Wiley&Sons: str. 365-382.

Northern Michigan University. 2011.

<http://webb.nmu.edu/SportsAthletics/SiteSections/Facilities/SuperiorDome.shtml> (pridobljeno 22.1.2011).

Search.com Reference. 2011.

[http://www.search.com/reference/Superior Dome](http://www.search.com/reference/Superior_Dome) (pridobljeno 22.1.2011).

Serrano, E. 2003. Mechanical Performance and Modeling of Glulam. V: Thelandersson, S. (ur.), Larsen, H.J. (ur.) 2003. Timber engineering. Chichester, John Wiley&Sons: str. 67-79.

SIST EN 1995-1-1:2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1.del: Splošna pravila in pravila za stavbe: 124 str.

Stalnaker, J.J., Harris, E.C. 1997. Structural design in Wood. Norwell, Kluwer Academic Publishers: str. 157-197.

Šilih, S., Kravanja, S., Premrov, M. 2010. Shape and discrete sizing optimization of timber trusses by considering of joint flexibility. Advances in Engineering Software, 41, str. 286-294.

The Forestry Forum. 2006.

<http://www.forestryforum.com/board/index.php?topic=29272.20> (pridobljeno 17.1.2011).



Wikipedia. The Free Encyclopedia. 2011.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Monte\\_Carlo\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method) (pridobljeno 10.1.2011).

Wikipedia. The Free Encyclopedia. 2011.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Superior\\_Dome](http://en.wikipedia.org/wiki/Superior_Dome) (pridobljeno 22.1.2011).

World Buildings Directory. Online Database. 2011.

<http://www.worldbuildingsdirectory.com/project.cfm?id=1194> (pridobljeno 23.1.2011).