

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Bizjak, M., 2016. Nosilni sistemi sodobnih lesenih konstrukcij velikih razponov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Lopatič, J.): 125 str.

Datum arhiviranja: 19-07-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Bizjak, M., 2016. Nosilni sistemi sodobnih lesenih konstrukcij velikih razponov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Lopatič, J.): 125 pp.

Archiving Date: 19-07-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER**

Kandidat:

MATEJ BIZJAK

**NOSILNI SISTEMI SODOBNIH LESENIH
KONSTRUKCIJ VELIKIH RAZPONOV**

Diplomska naloga št.: 3472/KS

**LOAD-BEARING SYSTEMS OF MODERN LARGE SPAN
TIMBER STRUCTURES**

Graduation thesis No.: 3472/KS

Mentor:

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 08. 07. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani študent Matej Bizjak, vpisna številka 26106636, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Nosilni sistemi sodobnih lesenih konstrukcij velikih razponov.

IZJAVLJAM

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

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

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

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

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

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

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

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

V/Na: _____

Datum: _____

Matej Bizjak

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.011.1(497.4)(043.2)
Avtor:	Matej Bizjak
Mentor:	izr. prof. dr. Jože Lopatič
Naslov:	Nosilni sistemi sodobnih lesenih konstrukcij velikih razponov
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	125 str., 1 pregl., 164 sl.
Ključne besede:	lesene konstrukcije, nosilni sistemi, veliki razponi, vezna sredstva, strešne konstrukcije, leseni mostovi

IZVLEČEK

V diplomski nalogi so predstavljeni nosilni sistemi sodobnih lesenih konstrukcij, ki so primerni predvsem za velike razpone. Za lažjo predstavo o dejanskih možnih razponih sodobnih lesenih konstrukcij so v nalogi predstavljeni tudi že realizirani primeri večjih lesenih konstrukcij zgrajeni predvsem po svetu. Predpogoj za doseganje velikih razponov je predvsem v sodobnih lesenih proizvodih, ki so predstavljeni v drugem poglavju. Prav tako pa je pomembna izbira ustreznega nosilnega sistema. V nalogi so zaobjeti leseni nosilni sistemi tako za strešne konstrukcije večjih objektov kot tudi za lesene mostove večjih razponov.

V splošnem sem nosilne sisteme razdelil na ravninske in prostorske. Podrobneje so predstavljeni predvsem sistemi, ki so primerni za velike razpone. Vključene so bile tudi njihove značilnosti in najpogosteje uporabljena vezna sredstva. Pri lesenih mostovih so prav tako predstavljeni prevladujoči nosilni sistemi ter njihova uporaba v praksi.

Predstavil sem tudi obete za razvoj lesenih konstrukcij, ki so odvisni predvsem od novih raziskav in razvoja materialov in veznih sredstev ter razvoja programske opreme za projektiranje.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK:	624.011.1(497.4)(043.2)
Author:	Matej Bizjak
Supervisor:	assoc. prof. Jože Lopatič, Ph. D.
Title:	Load-bearing systems of modern large span timber structures
Document type:	Graduation thesis - University studies
Volume and equipment:	125 p., 1 tab., 164 fig.
Key words:	timber structures, load-bearing systems, large spans, fasteners, roof constructions, timber bridges

ABSTRACT

This graduation thesis presents load-bearing systems of modern timber structures, suitable for large spans. For easier understanding of wooden wide span capabilities thesis presents already finished structures built around the world. A precondition to achieve large span lies in modern wooden products which are described in second chapter. Choice of suitable load-bearing system is also important. Thesis also covers timber load-bearing systems of large objects and wide span timber bridges.

In general I divided supporting systems in planar and spatial. Systems suitable for wide spans are described in detail. Their features and most commonly used fasteners are also described. I introduced the dominant load-bearing systems of timber bridges and their usage in practice.

This thesis also presents forecasts for the development of timber structures in the future, which depend on the research and development of materials, fasteners and software.

ZAHVALA

Za strokovno pomoč pri nastajanju diplomske naloge se najprej zahvaljujem mentorju, izr. prof. dr. Jožetu Lopatiču.

Na tem mestu bi se rad zahvalil celotni družini za vso finančno in moralno podporo ter sošolcem za nesebično pomoč tekom študija.

KAZALO VSEBINE

Stran za popravke, errate	I
Izjava o avtorstvu	II
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract	IV
Zahvala	V
1 UVOD	1
2 SODOBNI KONSTRUKCIJSKI LESENI PROIZVODI	4
2.1 Konstrukcijski kompozitni les	4
2.2 Lameliran lepljen les	5
2.2.1 Mehanske lastnosti	6
2.2.2 Uporaba lameliranega lepljenega lesa	7
2.3 Križno lepljen les	7
2.3.1 Uporaba križno lepljenih plošč	9
3 NOSILNI SISTEMI LESENIH KONSTRUKCIJ VELIKIH RAZPONOV	11
3.1 Učinkovitost konstrukcijskih sistemov	11
4 DELITEV NOSILNIH SISTEMOV LESENIH KONSTRUKCIJ VELIKIH RAZPONOV	13
4.1 Upogibni nosilci	17
4.1.1 Prečni prerezi upogibnih nosilcev	17
4.1.2 Vrste upogibnih nosilcev glede na obliko	18
4.1.2.1 Nosilci s spremenljivo višino in ukrivljeno osjo	18
4.1.2.2 Nosilci z izbočeno obliko	21
4.1.3 Nosilni sistemi iz nosilcev	21
4.1.3.1 The Bangor Aurora Aquatic & Leisure Complex	22
4.2 Ravninski palični nosilni sistemi	24
4.2.1 Lesena palična ostrešja	24
4.2.2 Geometrijske oblike paličja	25
4.2.2.1 Ravni palični nosilci z vzporednimi pasovi	26
4.2.2.2 Trikotna paličja	27
4.2.2.3 Paličja z ukrivljenim pasovi	28
4.2.3 Možni razponi paličja	28
4.2.4 Model geometrije ravninskega paličja	33
4.2.5 Vrste povezav med elementi paličja	35
4.2.6 Primeri izvedenih ravninskih paličnih konstrukcij	37
4.2.6.1 Trade Fair Hall 11	37

4.3	Tročlenski nosilci z povezjem	39
4.3.1	Oblike in vrste tročlenskih povezij	40
4.3.1.1	Tročlenski nosilci z vezmi	40
4.3.1.2	Tročlenski nosilci z jeklenimi vezmi in lesenimi oporniki	41
4.3.2	Primer konstrukcij s tročlenskimi povezji	42
4.3.2.1	Hokejska dvorana Dina Arena	42
4.4	Portalni okvirji	43
4.4.1	Statični sistem okvirjev	44
4.4.2	Vrste lesenih portalnih okvirjev	45
4.4.3	Primeri okvirnih konstrukcij	51
4.5	Strešni ločni nosilni sistemi	52
4.5.1	Splošno o ločnih sistemih	52
4.5.2	Geometrija ločnih nosilnih sistemov	52
4.5.3	Veliki strešni ločni sistemi iz lameliranega lesa	53
4.5.4	Možni razponi lokov	56
4.5.5	Spoji v podporah	57
4.5.6	Spoji v temenu	58
4.5.7	Primeri velikih strešnih lokov	58
4.5.7.1	Hamar olympic hall – The Viking Ship	58
4.5.7.2	The Richmond olympic oval	60
4.6	Lesene prostorske konstrukcije	63
4.6.1	Splošno o prostorskih konstrukcijah	63
4.6.2	Razdelitev prostorskih konstrukcij	64
4.6.3	Geometrijska oblika	64
4.6.4	Konstrukcijska zasnova	64
4.6.5	Vrste površin	65
4.6.6	Vrste prostorskih strešnih konstrukcij	65
4.6.6.1	Zložene (nagubane) ploskovne konstrukcije	65
4.7	Lupine	68
4.7.1	Splošno o lupinah	68
4.7.1.1	Oblike lupin	69
4.7.2	Primeri lesenih lupinastih konstrukcij	71
4.7.3	Leseni rešetkasti oboki (timber lattice barrel vaults)	72
4.7.3.1	Razstavne dvorane v Riminiju	73
4.7.3.2	Hanse razstavna dvorana v Rostocku	74
4.8	Lesene kupole	75
4.8.1	Radialno rebraste kupole	76

4.8.2	»Schwedler« kupole	77
4.8.3	Trosmerne mrežne kupole	77
4.8.4	Mrežaste kupole	78
4.8.5	Geodetske kupole	78
4.8.6	Primeri lesenih kupol	80
4.8.6.1	Tacoma Dome	80
4.8.6.2	Superior Dome	81
4.8.6.3	Odate Jukai Dome	82
4.9	Viseče lupine (Suspended Shells)	84
4.9.1	Primeri lesenih visečih lupin	84
4.9.1.1	Tovarna odpadkov na Dunaju	84
4.10	Hiperbolične lupine	85
4.11	Lesene mrežne lupine (gridshell)	85
4.11.1	Konstrukcijski principi mrežnih lupin	86
4.11.2	Primeri lesenih konstrukcij mrežastih lupin	90
4.11.2.1	Mrežna lupina Mannheim Multihalle	90
4.11.3	Mrežna lupina Savill Garden	93
5	NOSILNI SISTEMI LESENIH MOSTOV VELIKIH RAZPONOV	96
5.1	Splošno o sodobnih lesenih	96
5.2	Delitev mostov	97
5.2.1	Brvi	97
5.2.2	Cestni mostovi	98
5.3	Vrste nosilnih sistemov lesenih	98
5.3.1	Gredni mostovi	99
5.3.2	Ločni mostovi	99
5.3.3	Palični mostovi	102
5.3.4	Mostovi s poševnimi vrvmi in viseči mostovi	102
5.3.5	Primeri lesenih mostov velikih razponov	103
5.3.5.1	Flisa Bridge	103
5.3.5.2	Most Tynset	105
5.3.5.3	Most Maicasagi	107
6	PRIMERI LESENIH KONSTRUKCIJ V SLOVENIJI	110
7	ZAKLJUČEK	112
	VIRI	114

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Osnovne oblike in variante paličnih nosilcev in paličnih okvirjev

29

KAZALO SLIK

Slika 1: Palična strešna konstrukcija [2].	1
Slika 2: Leseni palični ločni most Colossus iz leta 1812 [4].	2
Slika 3: Lesena ostrešna konstrukcija železniške postaje v Bruslju iz leta 1910 [7].	2
Slika 4: Shematska predstavitev vrst konstrukcijskega kompozitnega lesa [11].	4
Slika 5: Shematski prikaz SCL proizvodnje.	5
Slika 6: Shematski prikaz proizvodnje lameliranega lepljenega lesa, prirejeno po [14].	6
Slika 7: Križno lepljena plošča [16].	8
Slika 8: Sestava križno lepljene plošče in omejitve dimenzij, prirejeno po [18].	8
Slika 9: Večnadstropna stavba Forte iz CLT [19].	9
Slika 10: Zasnova večnadstropne stavbe HoHo towers na Dunaju [20].	9
Slika 11: Elephant house živalskega vrta v Zürichu [22].	10
Slika 12: Notranjost Elephant housa [22].	10
Slika 13: Princip obnašanja različnih ravninskih nosilnih sistemov, prirejeno po [3].	12
Slika 14: Skupine nosilnih sistemov [12].	14
Slika 15: Običajni statični sistemi pri lepljenem lesu, prirejeno po [23].	15
Slika 16: Običajni statični sistemi pri lepljenem lesu, prirejeno po [23].	16
Slika 17: Prečni prerezi elementov iz lepljenega lesa [12].	17
Slika 18: Tipične oblike nosilcev iz lameliranega lesa [5].	18
Slika 19: Prikaz poteka normalnih σ_0 in prečnih normalnih napetosti σ_{90} pri dvokapnem nosilcu [23].	18
Slika 20: Temensko območje sedlastega nosilca [13].	19
Slika 21: Del sedlastega nosilca – prikaz prečnih oz. radialnih napetosti v temenskem območju. (Račun s programom SAP 2000; les GL28h, L = 16 m, b/h _{ap} = 20/171 cm, q _d = n 21kN/m; α_{ap} = 5,13 m; največja napetost $\sigma_{t,90}$ = 0,097kN/cm ² v modrem območju) [13].	19
Slika 22: Izdelava izbočenega nosilca, prirejeno po [24].	21
Slika 23: Razporeditev upogibnih momentov pri prostoležečem nosilcu podprtem z stebroma, prirejeno po [25].	21
Slika 24: Primer strešne konstrukcije v obliki gerberjevega nosilca [23].	22
Slika 25: Primera strešne konstrukcije z dvokapnimi in sedlastimi nosilci [23].	22
Slika 26: Primer uporabe sedlastega nosilca pri strešni konstrukciji hale v Ötisheimu v Nemčiji [26].	22
Slika 27: Lesena stavba The Bangor Aurora Aquatic & Leisure Complex [27].	23
Slika 28: Lesena konstrukcija iz ukrivljenih lepljenih nosilcev z razponom 43,5 m [28].	23
Slika 29: Strešna konstrukcija ravnega paličja s paralelnimi pasovi, povzeto po [30].	25
Slika 30: Dva primera različnih obtežnih situacij idealnih oblik paličij (a) stabilna trikotna oblika in (b) nestabilna oblika štiri členskega mehanizma [24].	25
Slika 31: Dva tipična primera oblike paličja s prečnimi povezavami [24].	26

- Slika 32: Ravni palični nosilci z (a) tlačnimi diagonalami (Howe paličje), (b) nateznimi diagonalami (Pratt paličje) (c) kombinacijo tlačnih in nateznih diagonal (Warren paličje) [24]. 27
- Slika 33: Trikotna paličja (a) z Howe obliko diagonalami in dvignjenim robom, (b) trikotno paličje, 27
- Slika 34: Ukrivljena paličja (a) parabolična oblika paličja z ravnim spodnjim pasom, (b) parabolična oblika paličja z dvignjenim spodnjim paraboličnim pasom, (c) paličje v obliki ribjega trebuha [24]. 28
- Slika 35: Trije možni modeli lesenega paličnega ostrešja, prirejeno po [32]. 33
- Slika 36: Primer statičnega modela paličja: (1) Podpora, (2) Sistemska linija, (3) Polje, (4) Notranji element, (5) Fiktivni element, (6) Zunanji element [33]. 34
- Slika 37: Razmerje med višino h prečnega prereza elementa in dimenzijo razdaljo med obema sistemskima osema pasov H , pri katerem lahko zanemarimo dodaten upogibni moment v vozlišču [3]. 35
- Slika 38: Primer ekscentrično izvedenega spoja in pojav razpoke v lesu zaradi dodatnega upogibnega momenta, prirejeno po [24]. 35
- Slika 39: Primer krempljastih plošč in njihove uporabe pri konstrukciji hale [34]. 35
- Slika 40: Primer izvedbe spoja paličja z jeklenimi pločevinami pritrjenimi s pomočjo vijakov (a) in s pomočjo jeklenih trnov (b) [3]. 36
- Slika 41: Primer tipičnega detajla spoja paličja iz jeklenih pločevin in jeklenih paličnih moznikov pogosto uporabljenega na Norveškem in Švedskem, prirejeno po [3]. 36
- Slika 42: Primeri stikov paličja z dvema ali tremi prečnimi elementi [24]. 37
- Slika 43: Detajl paličnega spoja s tlačno leseno diagonalo in natezno jekleno palico, prirejeno po [24]. 37
- Slika 44: Razstavna hala Trade Fair Hall 11 z leseno strešno konstrukcijo [36]. 38
- Slika 45: Leseno palično ostrešje hale [36]. 38
- Slika 46: Primer ravnega nosilca z spodnjim povezjem [23]. 39
- Slika 47: Statični sistemi prednapetih nosilcev (a-c) z različno razporejenimi tlačnimi elementi ali (d) s paraboličnim potekom povezja [24]. 39
- Slika 48: Tročlenski nosilci (a) z vezjo in (b) brez vezi [24]. 40
- Slika 49: Tročlenski nosilci (a) z lesenimi razporami in jeklenimi vezmi (b) primarni nosilci podprti s sekundarno palično konstrukcijo [24]. 41
- Slika 50: Tipična izvedba sidranja nateznih palic: (a) v primeru manjših nateznih sil, (b) v primeru večjih nateznih sil, prirejeno po [24]. 42
- Slika 51: Tipičen tročlenski nosilni sistem z jeklenimi vezmi in razporami iz lepljencev [37]. 42
- Slika 52: Hokejska dvorana s tročlenskim nosilnim sistemom z jeklenimi vezmi in lesenimi razporami [37]. 43
- Slika 53: Levo, detajl izvedbe spoja v slemenu; desno, slika strešne konstrukcije z jeklenimi vezmi [38]. 43

Slika 54: Razporeditev upogibnih momentov pri togem, dvočlenskem in tročlenskem portalnem okvirju, prirejeno po [40].	45
Slika 55: Prikaz tipičnih izvedb slemenskih (kronskih) členkastih spojev pri lesenih okvirjih [42].	46
Slika 56: Prikaz različnih izvedb tročlenskih lesenih okvirjih [23]	46
Slika 57: Dve vrsti izvedbe zobčastih stikov pri okvirjih, prirejeno po [42].	47
Slika 58: Prikaz detajla izvedbe lepljenega zobatega spoja [23].	47
Slika 59: Prikaz različnih vijačenih kolenskih spojev [42].	48
Slika 60: Različne oblike sestavljenih podpornih nog okvirjev [42].	48
Slika 61: Detajl sestavljene podporne noge z vijačenim stikom med strešnim nosilcem in	49
Slika 62: Detajl kontaktnega tlačnega priključka med strešnim nosilcem in podporno nogo [23].	49
Slika 63: Uporaba vbočno ukrivljene okvirne konstrukcije pri sakralnem objektu [45].	50
Slika 64: Uporaba ukrivljene okvirne konstrukcije pri kopališkem objektu [45].	50
Slika 65: Uporaba ukrivljene okvirne konstrukcije z lepljenim vogalnim elementom [45].	50
Slika 66: Radij ukrivljenosti pri ukrivljeni okvirni konstrukciji [24].	51
Slika 67: Primer uporabe ukrivljene okvirne konstrukcije za jahalno šolo [23].	51
Slika 68: Primer športne dvorane za curling, iz ukrivljenih lepljenih okvirjev, Calgary, Kanada [46].	51
Slika 69: Diagrami osnih sil in upogibnih momentov krožnih in paraboličnih lokov [47].	53
Slika 70: Upogibna napetost v obremenjenem nosilcu (1) se spreminja po prerezu. Tlačne napetosti so na vrhu in natezne na spodnjem robu. V težišču prereza so napetosti enake 0. Lok (2) pa ima po celotnem prerezu samo tlačne napetost [23].	54
Slika 71: Ločni nosilni sistemi z natezno vezjo podprti s stebri [24].	54
Slika 72: Lok nameščen direktno na temelje, kjer se horizontalna sila prenaša (a) preko temeljnih podpornikov, (b) preko natezne vezi v temeljni plošči, prirejeno po [24].	55
Slika 73: Statični sistem (a) tročlenskega loka, (b) dvočlenskega loka s priporočenimi mesti togih povezav [24].	55
Slika 74: Trikotno porazdeljena obtežba ločnih konstrukcij (a) običajni lok (b) palična konstrukcija sestavljena iz ukrivljenega spodnjega in zgornjega pasu z vmesnimi paličnimi elementi. Nosilno konstrukcijo (b) si lahko predstavljamo kot tročlenski palični sistem [24].	56
Slika 75: Trije različni tipi lokov z možnimi razponi, prirejeno po [24].	56
Slika 76: Osne sile in upogibni momenti pri paličnem zgoraj in pri polnem tročlenskem loku spodaj pri simetrični enakomerni obtežbi 10kN/m, prirejeno po [48].	57
Slika 77: Spoji podpor loka z (a) členkastim diskastim spojem pritrjenim na tlačno ploščo, (b) jekleno vezno pločevino in tečajem, (c) stransko U jekleno pločevino in sornikom [24].	57
Slika 78: Spoji v temenu z (a) zmožničeno jekleno ploščo s tečajem in sornikom, (b) stransko jekleno pločevino in tečajem, (c) notranjo jekleno pločevino, tečajem in bočnima zavarovalnima pločevinama [48].	58
Slika 79: Lesena športna dvorana The Viking ship v Hamarju [49].	59

Slika 80: Dimenzije najdaljših paličnih lokov, prirejeno po [48].	59
Slika 81: Lesena konstrukcija med gradnjo [50]	59
Slika 82: Notranjost lesene športne dvorane z jasno vidnimi bočnimi podporami [50].	60
Slika 83: Zunanost lesene športne dvorane The Richmond Olympic Oval [53].	60
Slika 84: Gradnja ločnega lesenega ostrešja [54].	61
Slika 85: Notranjost športne dvorane [55].	61
Slika 86: Hibridni ločni nosilec [52].	61
Slika 87: Podporna armiranobetonska konstrukcija [56].	62
Slika 88: Prečni prerez WoodWave strešnih panelov [57].	62
Slika 89: Dvigovanje WoodWave strešnih panelov [58].	62
Slika 90: Trojni nosilni mehanizem nagubane ploskovne konstrukcije, ki združuje mehanizme plošče, stene in paličja. Leva slika ponazarja poenostavljen prenos napetosti enojno nagubane konstrukcije. Desna slika ponazarja obnašanje stene, plošče in paličja [61].	66
Slika 91: Geometrija spoja »lastovičji rep« (a), geometrija Nejiri Arigata spoja (b) [63].	66
Slika 92: Topologija nagubanih ploskovnih konstrukcij in njihovih prečnih prevezov, prirejeno po [60].	67
Slika 93: Primer zložene lesene konstrukcije iz CLT plošč [64].	68
Slika 94: Rezultante napetosti in obtežne komponente pri elementu lupine v primeru membranskega napetostnega stanja [65].	69
Slika 95: Motnje membranskega napetostnega stanja (od b do e) [64].	69
Slika 96: Ploskev z negativno (a), pozitivno (b) in nično Gaussovo ukrivljenostjo (c) [65].	70
Slika 97: Rotacijske lupine: (a) Sferična lupina – kupola, (b) stožec, (c) hiperboloid, (d) valj [65].	70
Slika 98: Translacijske lupine: (a) Parabolična paraboloid, (b) cilindrični paraboloid, (c) hiperbolični paraboloid [65].	71
Slika 99: Primer premonosne lupine: hiperbolični paraboloid [65].	71
Slika 100: Oblike Zollingerjevih rešetkastih konstrukcij: Levo, koničasti obok; na sredini, krožno ukrivljen obok; desno, segmentni obok [67].	72
Slika 101: Levo, leseno Zollingerjevo rešetkasto ostrešje [68].	72
Slika 102: Desno, izvedba Zollingerjevih spojev [66].	72
Slika 103: Razstavni kompleks v Riminiju, Italija [70].	73
Slika 104: Lesen rešetkast obok z jeklenimi nateznimi vezmi [70].	74
Slika 105: Razstavna hala Hanse z lesenim rešetkastim obokom [70].	74
Slika 106: Različne vrste kupol [72].	76
Slika 107: Primarni in sekundarni elementi tipične radialno rebraste kupolaste konstrukcije. Meridianska rebra in vmesni krožni obroči so običajno iz lesa. Ostali elementi pa so običajno iz jekla. Povzeto po [3].	77
Slika 108: Geodetska sfera [65].	78

Slika 109: Geometrija in variacije geodetske kupole [72].	79
Slika 110: Oblikovanje modificirane geodetske sferične mreže [73].	79
Slika 111: Lesena kupola Tacoma Dome [75].	80
Slika 112: Značilna mreža modificirane geodetske kupole Tacoma Dome, s spodnjo trikotno mrežo in zgornjo diamantno mrežo [76].	80
Slika 113: Gradnja lesenega zunanjega ovoja strešne konstrukcije [78].	81
Slika 114: Lesena kupola Superior Dome iz zraka [80].	81
Slika 115: Notranji pogled na leseno konstrukcijo kupole [81].	82
Slika 116: Pogled iz zraka na dvorano Odate Jukai Dome in dvorana med gradnjo[84].	82
Slika 117: Levo, prostorsko leseno paličje kupole glede na daljši razpon [85].	83
Slika 118: Desno, prostorsko leseno paličje kupole na krajši razpon [86].	83
Slika 119: Jeklena spojna sredstva kupole [87].	83
Slika 120: Desno, nosilni sistem kupole, levo lesena mrežna nosilna struktura [89].	84
Slika 121: Lesena konstrukcija viseče lupine na Dunaju [90].	84
Slika 122: Dimenzije lesene viseče konstrukcije [90].	85
Slika 123: Majhen element s strižno silo vzdolž robov. Robni nosilec prenese sile do podpor.	85
Slika 124: Ravna matrika iz lamel (a) je deformirana v sferično strukturo (b), s krivljenjem lamel in deformiranjem mreže z pravokotnimi vzorci v mrežo z rombastimi [65].	86
Slika 125: Levo- lupinast element, na sredini – mrežno lupinast element z normalnimi silami, desno - mrežno lupinast element z diagonalnimi vezmi [65].	87
Slika 126: Enoplastna in dvoplastna razporeditev lamel [91].	88
Slika 127: Prikaz tlorisa in prečnega prereza dvoslojnega sistema z nameščenimi vmesnimi strižnimi povezavami [91].	88
Slika 128: Levo - podolgovata luknja z vijakom, desno - jeklena plošča z vijaki nameščenimi na zunanji strani [91].	89
Slika 129: Levo – povezovalne plošče s podaljšanimi vijaki in diagonalno ojačitvijo, desno - povezovalne plošče z nosilnim sistemom za pritrnitev zasteklitve [91].	89
Slika 130: Pogled iz zraka na Mannheim Multihalle [92].	90
Slika 131: Notranji pogled na Mannheim Multihalle [93].	90
Slika 132: Dimenzije Mannheim Multihalle [94].	91
Slika 133: Tipični vozliščni spoj [65].	91
Slika 134: Zgoraj - prikaz uporabe različnih robnih podpor, spodaj – detajl spoja med kabli in jeklenim stebrom [65].	92
Slika 135: Levo – dvigovanje mreže s pomočjo viličarjev, desno – stebri odri in vmesna opora [65].	93
Slika 136: Savill Garden mrežna lupinasta konstrukcija [95].	93
Slika 137: Notranji pogled na strešno konstrukcijo [65].	94

Slika 138: Jeklena obročna cev s poševnimi stebri [65].	94
Slika 139: Strešna konstrukcija med gradnjo z začasnimi gradbenimi odri [65].	94
Slika 140: Strešna konstrukcija med gradnjo [65].	95
Slika 141: Robni jekleni podporni okvir [97].	95
Slika 142: Lesena brv Bow River [100].	97
Slika 143: Steien Bridge z ločnim nosilnim sistemom in poševnimi vešali [101].	98
Slika 144: Možne zasnove lesenih ločnih mostov [98].	100
Slika 145: Upogibni momenti v loku pri dveh različnih razporeditvah kablov [98].	101
Slika 146: Kombinacija natega pravokotno na vlakna in strižnih napetosti – pojav problema pri lokih z vertikalnimi vešali [98].	101
Slika 147: Primer paličnega nosilnega sistema za cestne mostove, a) pod voziščno konstrukcijo in b) nad voziščno konstrukcijo [98].	102
Slika 148: Zgoraj viseči most, spodaj mostovi s poševnimi vrvmi [23].	103
Slika 149: Lesen palični most Flisa [104].	104
Slika 150: Dimenzije mosta Flisa [103].	104
Slika 151: Primer zagotavljanja stabilnosti mostu: Levo – jeklen okvir U oblike na mestu podpore, desno – vertikalni jeklen steber v lesenem paličju [105].	105
Slika 152: Gradnja krovne konstrukcije [106].	105
Slika 153: Razponi leseni cestnega mostu Tynset [107].	106
Slika 154: Leseni most Tynset [108].	106
Slika 155: Glavni palični lok mosta Tynset z vidno zavarovalno konstrukcijo in razširitvijo zgornjega pasu [109].	106
Slika 156: Lesen most Maicasagi [111].	107
Slika 157: Pregled postopne gradnje mostu: Zgoraj – lepljena pasnica s transportnimi spoji, sredina – vgrajena notranja stojina, spodaj – vgrajena zunanja stojina in diafragma [110].	107
Slika 158: Prečni prerez lesenega škatlastega nosilca [110].	108
Slika 159: Transportna spoja – levo na zgornji pasnici, desno na spodnji pasnici [112].	108
Slika 160: Montaža mostu [112].	109
Slika 161: Tročlenska okvirna lesena konstrukcija športne dvorane Banex [114].	110
Slika 162: Lesena konstrukcija mostu čez Mali graben [115].	111
Slika 163: Prečne povezave obeh nosilcev in zavarovalna konstrukcija [115].	111

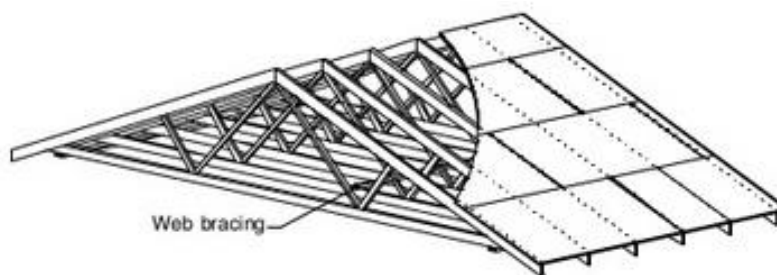
Ta stran je namenoma prazna

1 UVOD

Les je naraven material, ki nam omogoča raznovrstno gradnjo različnih gradbenih objektov in spada med najstarejše gradbene materiale. Sprva so ga uporabljali za gradnjo enostavnih bivališč, kasneje pa so ga začeli uporabljati tudi za gradnjo večjih objektov kot so leseni mostovi. Lesena gradnja je strmo naraščala vse do izbruhov velikih požarov v mestih, po katerih se je zanimanje zanje zmanjšalo. Začasno sta ga v drugi polovici devetnajstega stoletja izpodrinila nova materiala, jeklo in armiran beton, s katerima so dosegli razcvet pri gradnji zahtevnih inženjerskih konstrukcij.

Les so v preteklosti največkrat uporabljali za stanovanjsko gradnjo, pri kateri so uporabljali tradicionalne nosilne sisteme. Nekatere vrste teh nosilnih sistemov se uporabljajo še danes, kljub temu, da je taka gradnja počasna, saj je potrebno večji del gradbenih del izvesti na mestu gradnje stavbe. Novejši razvoj lesenih konstrukcij pa temelji predvsem na gradnji sistemov z veliko stopnjo prefabrikacije. Na osnovi nekaterih tradicionalnih nosilnih sistemov so se zato razvile nove vrste nosilnih konstrukcij, ki se trenutno množično uporabljajo pri stanovanjski gradnji. Med najnovejše sisteme uvrščamo masivne nosilne konstrukcije, ki so se razvile s pojavom tehnologije izdelave masivnih prefabriciranih panelnih elementov iz križno lepljenega lesa. Z razvojem teh elementov in sodobnih veznih sredstev se les uporablja tudi pri gradnji visokih stavb [1].

V preteklosti so bili za premoščanje večjih razponov omejeni zaradi nezadostnih dimenzij tako prečnih prereзов nosilcev iz žaganega masivnega lesa, kot tudi zaradi dolžin, ki so bile omejene na 5 do 7 metrov, zato so razvili različne vrste paličnih nosilnih sistemov, s katerimi so lahko dosegali večje razpone. Sistemi so se uporabljali večinoma za strešne in mostne konstrukcije. Strešne palične konstrukcije, izdelane iz masivnega žaganega lesa, se običajno uporabljajo za premoščanje razponov do 12 metrov, vendar lahko v nekaterih primerih z ustrezno zasnovo premoščajo tudi razpetine med 30 in 40 metrov [2]. Podobne strešne palične konstrukcije se uporabljajo še danes (slika 1).



Slika 1: Palična strešna konstrukcija [2].

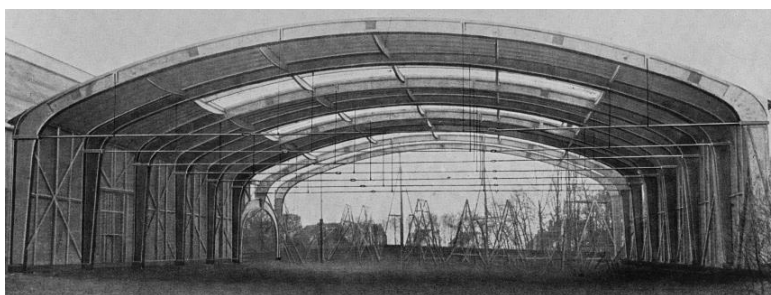
Poleg strešnih paličnih konstrukcij tudi mostovi spadajo med prve primere lesenih konstrukcij z velikimi razponi. Zaradi potreb po premoščanju ovir kot je reka ali dolina, je bilo človeštvo spodbujeno k iskanju novih ustreznih konstrukcij, ki bi dosegale velike razpone. Med primeri lesenih

mostov lahko izpostavimo most Colossus v Ameriki (slika 2). Zgrajen je bil leta 1812 in je imel razpon 104 m, s čimer je presegal vse tedanje mostove. Glavni nosilni sistem mostu je bil sestavljen iz štirih lesenih paličnih lokov. Puščica spodnjega pasu je znašala približno 6 m. Paličja so imela vgrajene tudi železne diagonalne elemente, iz konstrukcijskega vidika pa so se obnašala zelo podobno kot lokovi brez členkov (vpeti lokovi) [3]. Kljub takim lesenim konstrukcijam velikih razponov so les izpodrinili drugi gradbeni materiali.



Slika 2: Leseni palični ločni most Colossus iz leta 1812 [4].

Največji preboj lesenih konstrukcij večjih dimenzij je leta 1906 omogočil Otto Hetzer, ki je patentiral lamelirane lepljene konstrukcije, kot jih poznamo danes [5]. Tedanja tehnologija proizvodnje lepil in zaščitnih sredstev lesenih lameliranih lepljencev še ni omogočala zadostne trdnosti in trajnosti, zato konstrukcije niso uspeli konkurirati preizkušenim tradicionalnim gradbenim materialom. Ena njegovih prvih konstrukcij, pri kateri je bil uporabljen nov patentiran lameliran lepljen les, je bila železniška postaja v Bruslju leta 1910. Konstrukcija je bila sestavljena iz dvočlenskih ukrivljenih okvirjev, ki so bili povezani z jeklenimi nateznimi vezmi. Lesena strešna konstrukcija je imela za takraten čas impresiven 43 metrski razpon [6].



Slika 3: Lesena ostrešna konstrukcija železniške postaje v Bruslju iz leta 1910 [7].

Z napredkom in čedalje večjim tehnološkim razvojem novih lepil in zaščitnih sredstev, kot jih poznamo danes, pa so se možnosti uporabe lesenih lameliranih lepljenih konstrukcij povečale in omogočile nove razsežnosti pri gradnji z lesom.

Poleg lameliranega lepljenega lesa so bile razvite tudi druge vrste sodobnega konstrukcijskega lesa, kot je npr. kompozitni konstrukcijski les. Sodobne lesene konstrukcije pa so tesno povezane tudi z razvojem veznih sredstev. Trenutno so največkrat uporabljena kovinska vezna sredstva, ki omogočajo veliko nosilnost in duktilnost spojev. Prav tako kot pri konstrukcijskem lesu, v zadnjem času potekajo

raziskave tudi pri odkrivanju in testiranju novih veznih sredstev. Novejši visokotehnološko in računalniško vodeni postopki proizvodnje, kot so CNC (angl. computerised numerical control) stroji in uporaba tridimenzionalnih CAD modelov, omogočajo nove raziskave obnašanja tako materialov, kot tudi konstrukcij, ter z računalniško podprtim modeliranjem obnašanja konstrukcij na zunanje vplive z inženirskim znanjem načrtujemo čedalje drznejše in zahtevnejše lesene konstrukcije [8]. Trenutni sodobni leseni proizvodi v kombinaciji s sodobnimi veznimi sredstvi omogočajo konstruiranja nosilnih sistemov, ki lahko premoščajo razpone blizu 200 metrov.

Konstrukcije iz lesenih lameliranih lepljencev imajo poleg ugodnih mehanskih lastnosti tudi dobre psihološko – estetske učinke. Poleg tega ima les tudi ugodne fizikalne lastnosti, saj zmanjšuje učinek kondenza, zato je uporaben tudi pri gradnji strešnih konstrukcij bazenov in kopališč. Ker je les naraven material, je potreba energije za njegovo predelavo v gradbeni material manjša, kot za ostale materiale, kot sta jeklo in beton [9]. V današnjem času, ko svetovni razvoj stremi k trajnostni gradnji, imajo lesene konstrukcije poglobitno prednost pred drugimi materiali. Zaradi velikega ekološkega vpliva na okolje, dobrega estetskega izgleda in dobrih mehanskih in deformacijskih lastnosti lesenih konstrukcij, se ljudje po svetu vse bolj pogosto odločajo za leseno gradnjo. Največje pobude za povečano leseno gradnjo izhajajo predvsem iz Skandinavskih držav kot so Finska, Švedska in Norveška ter iz Severne Amerike, v Evropi pa se lesena gradnja povečuje predvsem v osrednjem delu. V naši neposredni bližini je v leseni gradnji najbolj napredna Avstrija. Z lastnim razvojem modernih lesenih proizvodov spada celo med največje proizvajalce in izvoznike lesenih lameliranih proizvodov na svetu.

Slovenija na področju lesene gradnje še veliko zaostaja za ostalimi državami v Evropi. Kljub temu, da spada med države z največjo stopnjo gozdnatosti, saj je za Švedsko, Finsko in Estonijo uvrščena na četrto mesto v Evropski uniji, slabo izkorišča svoj obnovljiv gradbeni material [10]. Pri gradnji stanovanjskih stavb še vedno prevladuje masivna gradnja iz armiranega betona in opeke, a se v zadnjem času na tržišču pojavlja tudi čedalje več ponudnikov lesenih montažnih stavb različnih nosilnih sistemov. Uporaba lesa pri gradnji večjih inženirskih konstrukcij je pri nas zastopana predvsem pri gradnji športnih dvoran, kjer se v veliki meri uporabljajo predvsem leseni ločni nosilci in okvirni nosilni sistemi, hkrati so to tudi lesene konstrukcije z največjimi razponi.

2 SODOBNI KONSTRUKCIJSKI LESENI PROIZVODI

Les ima v naravni obliki poleg nekaterih dobrih lastnosti tudi številne pomanjkljivosti, ki imajo v sodobnem gradbeništvu pomembno vlogo. Neugodne so predvsem velika variabilnost lastnosti masivnega lesa, njegove dimenzijske in oblikovne spremembe, povezane s spremembo vlažnosti, slaba odpornost proti biološkim škodljivcem in vremenskim vplivom, ter omejenost v dimenzijah. Dolžine konstrukcijskega žaganega lesa so pogojene z naravno danostjo drevesnih debel, iz katerih izdelujejo potrebne elemente. Prav tako so elementi iz žaganega lesa omejeni glede oblike in dimenzij prečnega prereza. Te slabosti omejujejo uporabo masivnega lesa pri oblikovanju in dimenzioniranju lesenih konstrukcij velikih razponov. Zaradi novih tehnoloških dosežkov pri proizvodnji lesenih elementov so razvili nove vrste konstrukcijskega lesa, ki omogočajo svobodnejšo gradnjo sodobnih konstrukcij.

2.1 Konstrukcijski kompozitni les

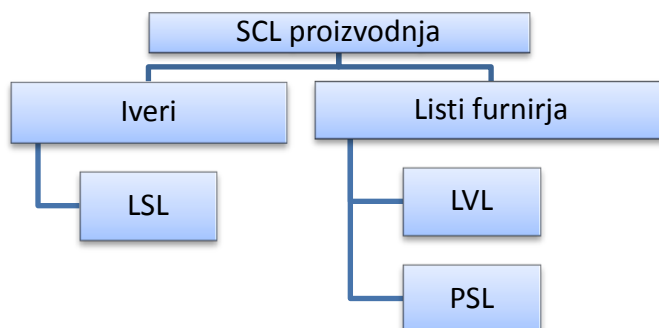
Konstrukcijski kompozitni les (angleško structural composite lumber – SCL) je pojem za lesne proizvode, sestavljene iz listov furnirja, trakov furnirja ali dolgih in tankih ploščatih iveri. Mehanske lastnosti teh proizvodov so odvisne od orientacije vlaken, ki so pri proizvodnji natančno kontrolirane. Tehnološki proces je omogočil, da deblo lahko razžagamo, ga obdelamo, ter vlakna orientiramo in zlepimo tako, da dobimo nov lesen konstrukcijski proizvod s kar najmanjšim izgubami materiala pri proizvodnji. Vse večja uporabnost SCL se kaže predvsem pri večjih razponih in večjih dimenzijah prečnih prerezov elementov, ki se uporabljajo pri konstrukcijah. Na tržišču imajo SCL komercialna imena kot so Parallam™, Ganglam™ in Microlam™, vendar jih v splošnem delimo na tri skupine (slika 4) [11]. Delimo jih glede na obliko in velikost uporabljenih lesenih vlaken, ki so med seboj povezana s pomočjo lepil, ter tako preoblikovane v nov proizvod [11]:

1. LVL (laminated veneer lumber) ali slojnato furniran les,
2. PSL (parallel strand lumber) ali elementi iz usmerjenih trakov luščenega furnirja in
3. LSL (laminated strand lumber) ali elementi iz dolgih ploščatih usmerjenih iveri.



Slika 4: Shematska predstavitev vrst konstrukcijskega kompozitnega lesa [11].

Konstrukcijski kompozitni proizvodi so proizvedeni na dva osnovna načina. Najprej deblo olupijo tako, da iz njega lahko proizvedejo ploščate liste furnirja ali pa tanke ploščate iveri (slika 5).



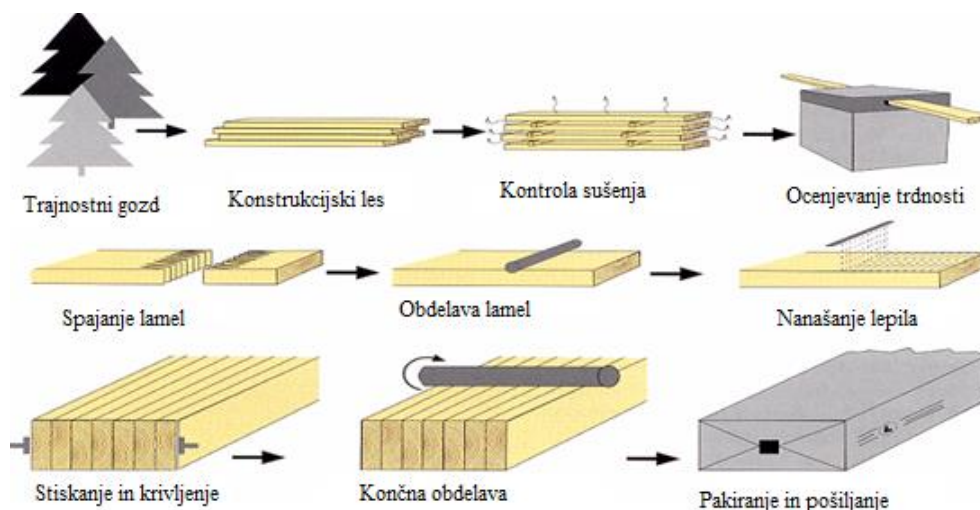
Slika 5: Shematski prikaz SCL proizvodnje.

Ploščate listne furnirje lahko nato razrežejo na manjše trakove ali pa jih uporabijo kar v celoti. Ta osnovna lesna gradnika nato usmerijo vzdolžno s smerjo elementa in jih zlepijo s konstrukcijskim lepilom in nato pod vplivom tlaka in visoke temperature, oblikujejo v nove lesene kompozitne proizvode. Konstrukcijska lepila, uporabljena pri tem procesu, imajo visoko trdnost in trajnost, so odporna proti vlagi in povišani temperaturi, pa tudi proti biološkim vplivom. Z razpršitvijo naravnih napak lesa, z orientacijo in razvrščanjem ter kontrolami preko celotnega procesa, dobimo enovit konstrukcijski lesen proizvod. Poleg tega je ekonomičnost uporabljene lesene surovine večja kot bi bila pri tradicionalnih žaganih elementih, saj pri proizvodnji zavržejo znatno manjši del surovine. Proizvodnja kompozitnega lesa je najbolj razširjena v Severni Ameriki. Uporabljajo ga za gradnjo hiš, stanovanjskih in poslovnih stavb ter hal in čedalje bolj izpodrinja uporabo tradicionalnega žaganega lesa. V Sloveniji je uporaba kompozitnega lesa pri gradnji še vedno dokaj redka [11].

2.2 Lameliran lepljen les

Lameliran lepljen les (angl. Glued laminated timber = glulam) je eden izmed najstarejših konstrukcijskih kompozitnih proizvodov. Ima boljše in bolj enakomerne mehanske lastnosti kot masiven les. Lameliran lepljen les je proizvod, sestavljen iz več med seboj zlepljenih tankih lamel, pri čemer vlakna potekajo v smeri dolžine elementa. Lamele manjših debelin lahko pred lepljenjem krivimo, zato lahko z njimi oblikujemo tudi ukrivljene elemente. Proizvodi imajo zaradi sodobnih sintetičnih lepil, namenjenih konstrukcijski uporabi, visoko trdnost in trajnost, so odporni proti vodi, povišani vlagi in temperaturi, pa tudi proti zunanjim in biološkim dejavnikom. Tehnologija proizvodnje omogoča svobodno oblikovanje geometrije elementov. Lahko imajo poljubne oblike prečnih prereзов, lahko so ravni ali poljubno ukrivljeni in imajo konstantno ali spremenljivo višino. Zaradi izpopolnjenega tehnološkega procesa proizvodnje lahko izdelamo elemente, ki predstavljajo le del nosilnega sistema ali pa kar že celotni nosilni sistem [12].

Postopek proizvodnje lepljenega lameliranega lesa se prične z ustrezno pripravo lesa (slika 6). Uporabljajo se lahko vse vrste lesa, najpogosteje pa se uporablja les smreke. Masiven les razčaga na deske, jih najprej sušijo naravno, nato pa še tehnično na želeno stopnjo vlažnosti. Posebej je pomembno, da imajo vse deske enakomerno vlažnost, saj se les pri kasnejših spremembah vlažnosti lahko krči in širi, izrazito različno v različnih smereh. Po sušenju sledi proces ugotavljanja fizikalnih in mehanskih lastnosti lesa ter odstranjevanje napak v lesu (večje grče). Zaradi omejitev dimenzij desk, žag in sušilnic, je potrebno posamezne lamele spajati med seboj tako, da se doseže zahtevana dolžina nosilcev. To dosežejo s strojnim rezkanjem, s katerim izdelajo simetrične zobate spoje. V naslednji fazi procesa lamele spajajo z zobatimi spoji tako, da dobijo lamele zahtevanih dolžin. Teoretično bi lahko s tem postopkom spajanja dosegli neskončno dolge lamele. Na tem mestu glede na kvaliteto lamele določijo njihov položaj v končnem sestavu elementa. Sledi proces, pri katerem spojene lamele obojestransko skobljajo, nanje ploskovno nanesejo lepilo in jih sestavijo v nosilec. Pri sestavljanju večslojnega nosilca je potrebno lamele zlepiti tako, da se zmanjšajo nezaželene napetosti v ravnini lepljenja. To dosežejo tako, da lamele pravilno orientirajo glede na potek letnic, zato morajo biti lamele obrnjene tako, da so konveksni deli letnic v stiku lepljenja. Ta sestav nato stisnejo pod pritiskom med 6 in 10 barov pri temperaturi 20 °C. Tlak stiskanja je odvisen od vrste lesa in debeline lamel ter od vrste uporabljenega lepila. Po procesu stiskanja sledi še končna obdelava elementa, pri kateri se ga zaščiti s zaščitnimi sredstvi kot so fungocidi, insekticidi in ognjevarni premazi [11].



Slika 6: Shematski prikaz proizvodnje lameliranega lepljenega lesa, prirejeno po [14].

2.2.1 Mehanske lastnosti

Lepljen les ima v splošnem enake trdnostne karakteristike kot običajen konstrukcijski les. Trdnost variira glede na smer obremenitve in smerjo vlaken, vsebnost vlage in trajanje obtežbe. Lepljen les ima v nasprotju s konstrukcijskim lesom enakih dimenzij, zaradi večje razpršitve napak v lesu, večjo trdnost in togost. Mehanske lastnosti lepljenega lameliranega lesa se določajo eksperimentalno po

postopkih, predpisanih v standardu SIST EN 408. Razvrščen je v trdnostne razrede, ki so opisani v SIST EN 1194. V njem je določena razvrstitev in uporaba dveh vrst lepljenega lameliranega lesa. Delimo ga na homogenega z oznako GL_h in na kombiniranega z oznako GL_c. Številka poleg oznake GL predstavlja karakteristično upogibno trdnost v MPa. Ker so robna mesta elementov običajno kritična, ima kombiniran lepljen lameliran les notranji del prereza sestavljen iz lesa nižjega trdnostnega razreda, zunanji del, kjer mora biti minimalna debelina vsaj 1/6 višine elementa oziroma dve lameli, pa je sestavljen iz lamel višjega trdnostnega razreda [13]. Nekateri proizvajalci, zlasti v Ameriki, pa proizvajajo tudi elemente, pri katerih so prerezi sestavljeni nesimetrično. Pri teh elementih je na spodnjem delu, ki je običajno najbolj obremenjen, uporabljen les višje trdnosti, na zgornjem, manj obremenjenem, pa je les manjše trdnosti. Ta struktura prereza omogoča še večjo ekonomičnost kot pri navadnem simetričnem kombiniranem prerezu, kjer je les višje trdnosti uporabljen na obeh straneh.

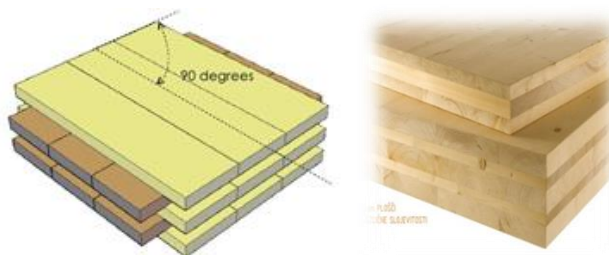
2.2.2 Uporaba lameliranega lepljenega lesa

Lepljen lameliran les se uporablja za konstrukcije, pri katerih je zahtevana velika trdnost, dimenzijska stabilnost in lep estetski izgled. Omogočajo svobodno arhitektonsko oblikovanje in je najprimernejši lesni kompozit za nosilne sisteme velikih razponov. Iz lameliranega lepljenega lesa izdelujejo linijske nosilne elemente, pri katerih dolžina prevladuje pred ostalima dvema dimenzijama prečnega prereza. Elementi lahko predstavljajo samostojni nosilni sistem ali pa so le sestavni del večjih kompleksnejših konstrukcijskih sistemov kot so stebri, grede okvirjev ter osnovni elementi paličij, branastih konstrukcij in lokov. Poleg tega lahko posamezni lamelirani leseni elementi predstavljajo osnovne gradnike rebrastih in mrežastih lupinastih konstrukcij, ki omogočajo premoščanje največjih razponov [1]. Uporablja se za gradnjo strešnih nosilnih konstrukcij športnih dvoran, pokritih bazenov in kopališč, sakralnih objektov, industrijskih objektov, razstavnih objektov, šolskih objektov, pa tudi za nosilne konstrukcije pri mostovih. Lepljen lameliran les lahko v kombinaciji z drugimi sodobnimi lesenimi kompoziti uporabimo tudi za bolj zahtevne nosilne konstrukcije, s katerimi premoščamo še večje razpone, kar odpira nove možnosti pri gradnji z lesom.

2.3 Križno lepljen les

Konstrukcijski elementi iz križno lepljenega lesa so sodobno kompozitno gradivo. Spada med novejšo proizvode, saj so ga začeli proizvajati šele v 90. letih prejšnjega stoletja v Avstriji. Njegova uporaba se je začela povečevati po letu 2000, ko je v ospredje prodirala ideja o večji trajnostni gradnji. Najbolj množično je razširjena v Skandinavskih državah in v srednji Evropi. V zadnjih letih so konstrukcije iz križno lepljenega lesa povzročile preporod v leseni gradnji tudi drugod po svetu. Nam najbližji proizvajalec je Avstrijsko podjetje KLH, ki je obenem tudi največji svetovni proizvajalec elementov iz

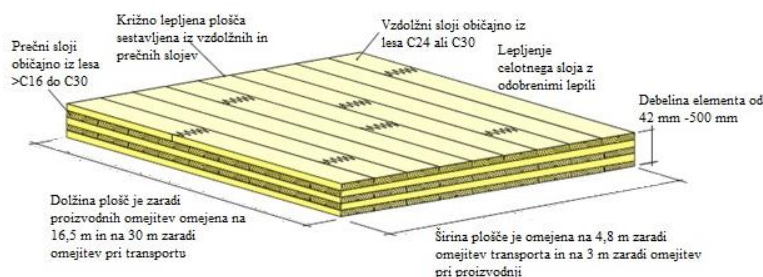
križno lepljenega lesa. Svoje proizvode trži pod imenom KLH®. Drugje po svetu so znane tudi pod imenom CLT (ang. cross laminated timber) in X-lam (angl. cross lam) [15].



Slika 7: Križno lepljena plošča [16].

Križno lepljeni leseni elementi imajo v primerjavi z elementi iz masivnega lesa in enosmernega lepljenega lesa bolj enakomerne mehanske lastnosti. Sestavljeni so iz križno zloženih lesenih lamel oziroma desk ter zlepljeni pod visokim pritiskom tako, da sestavljajo večje masivne elemente. Pri proizvodnji se za osnovno surovino najpogosteje uporablja les iglavcev, ki je tehnično posušen na 12 % (± 2 %) vlažnost. Zaradi procesa sušenja je lesu omogočena naravna zaščita pred škodljivci kot so glive, insekti in plesni. Število slojev je v veliki meri odvisno od uporabnosti in zahtevane nosilnosti plošče. Plošča ima lahko tri, pet, sedem ali več slojev, ki so v lihem številu simetrično razporejeni glede na osrednji sloj. Medsebojna orientiranost posameznega sloja je 90° glede na predhodnega (slika 7) [17].

Glavna prednost križnega lepljenja je v tem da lahko s tem dosežemo dvosmerno nosilnost lesenih ploskovnih elementov. Tako lepljenje lesa zagotavlja tudi dimenzijsko stabilnost plošč, pri čemer se zmanjša vpliv naravnega delovanja lesa, kot sta krčenje in nabrekanje. Križno lepljene plošče zaradi križno orientiranih slojev predstavljajo ploskovne elemente. Uporablja se jih tako za stropne, kot tudi za stenske elemente. Če posamezne plošče ustrezno povežemo med seboj lahko dosežemo veliko odpornost na vodoravne vplive, kot sta veter in potres. V primerjavi z armiranim betonom in jeklom, ima križno lepljen les manjšo specifično težo, višjo požarno odpornost in večjo toplotno izolativnost. Pri večslojnih ploščah in ognjevarnih oblogah lahko dosežejo požarno odpornost tudi do 120 min [17]. Križno lepljene plošče lahko podobno kot lepljen les tudi krivimo, pri čemer pa je potrebno uporabiti tanjše lamele.



Slika 8: Sestava križno lepljene plošče in omejitve dimenzij, prirejeno po [18].

2.3.1 Uporaba križno lepljenih plošč

Plošče iz križno lepljenega lesa predstavljajo ploskovne nosilne elemente. Uporabljajo se kot stenski, stropni in strešni elementi velikih formatov. Največji element je bil izdelan v velikosti 50 m² [16]. Za doseganje večje svobode v arhitekturi in za doseganje večjih razponov jih lahko uporabimo v kombinaciji z lesenim lameliranim lesom ali pa z jeklom. V nekaterih primerih se križno lepljen les uporablja tudi za izdelavo premostitvenih nosilcev pri mostovih. Sistemi gradnje s križno lepljenimi ploščami se povečuje zlasti pri gradnji montažnih stanovanjskih hiš, obenem pa v zadnjih letih narašča tudi tovrstna gradnja večnadstropnih stavb in objektov večjih dimenzij. Najvišja lesena stavba na svetu, zgrajena iz križno lepljenih plošč, je trenutno večstanovanjski objekt Forte v mestu Melbourne v Avstraliji, ki je bila tudi prva stavba, zgrajena iz križno lepljenih plošč v Avstraliji. Objekt ima masiven nosilni sistem in z 10-imi nadstropji meri v višino kar 32,17 metrov. Najvišjo leseno stavbo s hibridnim nosilnim sistemom so zgradili na Norveškem, v mestu Bergen. Stavba Treet, po slovensko drevo, ima 14 nadstropij in je visoka kar 52,8 metra. V prihodnosti želijo zgraditi še višje objekte, saj nameravajo na Dunaju zgraditi najvišji leseni nebotičnik na svetu HoHo tower, ki naj bi bil visok kar 84 metrov.



Slika 9: Večnadstropna stavba Forte iz CLT [19].



Slika 10: Zasnova večnadstropne stavbe HoHo towers na Dunaju [20].

Križno lepljene plošče se ne uporabljajo le pri gradnji visokih stavb, ampak tudi pri konstrukcijah z velikimi razponi. Ena izmed najnovejših konstrukcij je stavba Elephant house v živalskem vrtu v Zürichu. Prosto oblikovana lesena lupinasta konstrukcija v obliki kupole ima 80 m razpona in pokriva površino veliko skoraj 6000 m² [21].



Slika 11: Elephant house živalskega vrta v Zürichu [22].



Slika 12: Notranjost Elephant housa [22].

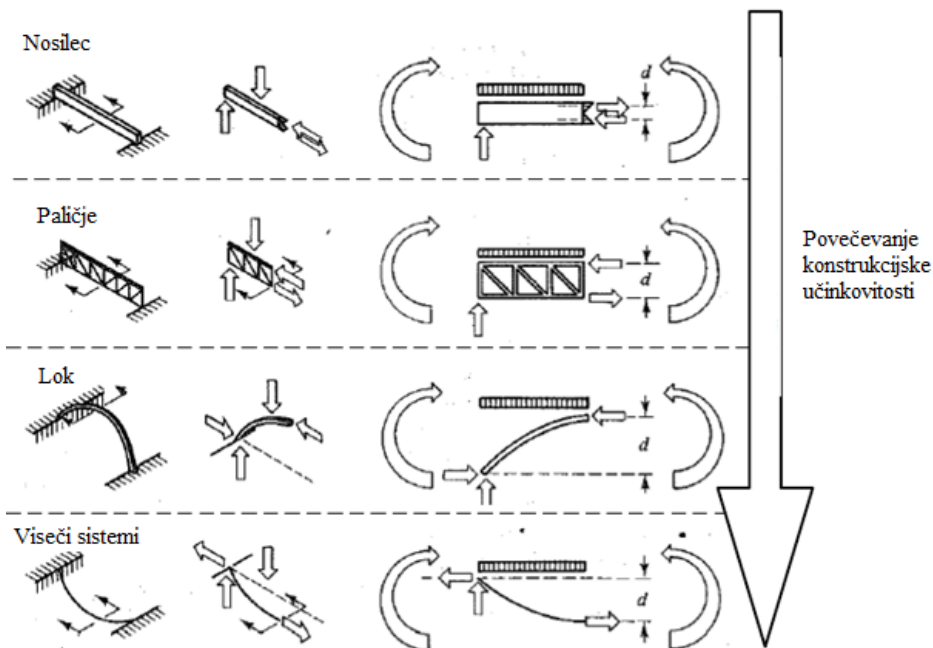
3 NOSILNI SISTEMI LESENIH KONSTRUKCIJ VELIKIH RAZPONOV

3.1 Učinkovitost konstrukcijskih sistemov

Najpomembnejši parameter za načrtovanje učinkovitih nosilnih konstrukcij je odnos med konstrukcijsko obliko in razporeditvijo obtežbe. V splošnem je za doseganje učinkovitosti konstrukcijskega sistema potrebno zagotoviti čim hitrejši prenos obtežbe do temeljev. Najlažje je to zagotoviti s čim krajšo in najbolj učinkovito potjo prenosa sil, ter s tem prispevati k ohranjanju čim manjše lastne teže. Kljub temu pa je v praksi težko zagotoviti idealni mehanizem prenosa sil v temelje, saj se morajo zaradi zagotavljanja večjih odprtih prostorov obtežbe razpršiti po daljših poteh [3].

V splošnem so konstrukcije bolj učinkovite v primeru, če obtežbe v sistemu povzročijo osne sile, kot če povzročijo upogibne momente. Glavni razlog za to je enakomerna razporeditev notranjih napetosti pri osno obremenjenih konstrukcijah ali konstrukcijskih elementih, kar omogoča izkoriščenost celotnega prereza do trdnosti materiala. Drugače pa je v primeru upogibno obremenjenih konstrukcij, ko se največje napetosti pojavijo v zunanjih vlaknih, obenem pa so napetosti v nevtralni coni enake nič. Pri tem upogibne napetosti spreminjajo predznak. Prav tako so osno obremenjene konstrukcije bolj odporne na deformiranje. Deformacije, ki se pojavljajo pri upogibnih obremenitvah so običajno veliko večje, kot pri čistih osnih obremenitvah. Kljub temu pa osno obremenjeni elementi postajajo dimenzijsko čedalje večji in težji, kadar morajo zagotavljati ustrezno uklonsko stabilnost. Z vidika konstrukcijske učinkovitosti obstaja razlika med nateznimi elementi in vitkimi tlačno obremenjenimi elementi, saj so natezni elementi bolj učinkoviti kot tlačno obremenjeni, vendar se za razliko od njih tlačni elementi pojavijo skoraj v vsaki konstrukciji, zato morajo imeti manjše vitkosti, s čimer se zmanjša možnost pojava uklona. To lahko zagotovimo bodisi s čim krajšimi tlačnimi elementi, bodisi s prečnimi podporami, kjer so te mogoče [3].

Lesene konstrukcije, ki prevzamejo obremenitve pretežno z nategom so zelo redke. Kljub temu obstajajo izjeme, kot so nekateri viseči mostovi in viseče lupine. Enako so natezno obremenjeni tudi številni elementi sestavljenih konstrukcij, kot so natezne vezi pri paličjih. Čeprav so natezno obremenjeni elementi bolj učinkoviti kot tlačni, je potrebno poudariti težave pri načrtovanju spojev na koncih lesenih elementov, kjer se lahko pojavijo porušitve zaradi cepljenja lesenih vlaken [3].



Slika 13: Princip obnašanja različnih ravninskih nosilnih sistemov, prirejeno po [3].

Iz konstrukcijskega vidika so paličja zaradi večje notranje ročice bolj učinkoviti kot običajni upogibni nosilci. Viseči sistemi in loki, ki so oblikovani po principu verižnice, so prav tako zelo učinkoviti nosilni sistemi, saj se, ko je lok obrnjen v nasprotni smeri in ima podobno obliko kot viseči sistem, ter sta oba obremenjena z enako obtežbo, v obeh primerih pojavijo samo osne sile. Poleg tega so velikosti sil v obeh primerih enake. Kljub temu pa se pojavijo razlike pri prevzemu sil, ki se pojavijo v obeh sistemih. Pri ločnem sistemu se pojavijo tlačne sile, kar lahko povzroči bočno nestabilnost (uklon), še preden material doseže svojo največjo trdnost. S tega vidika so ločni sistemi manj učinkoviti kot viseči [3].

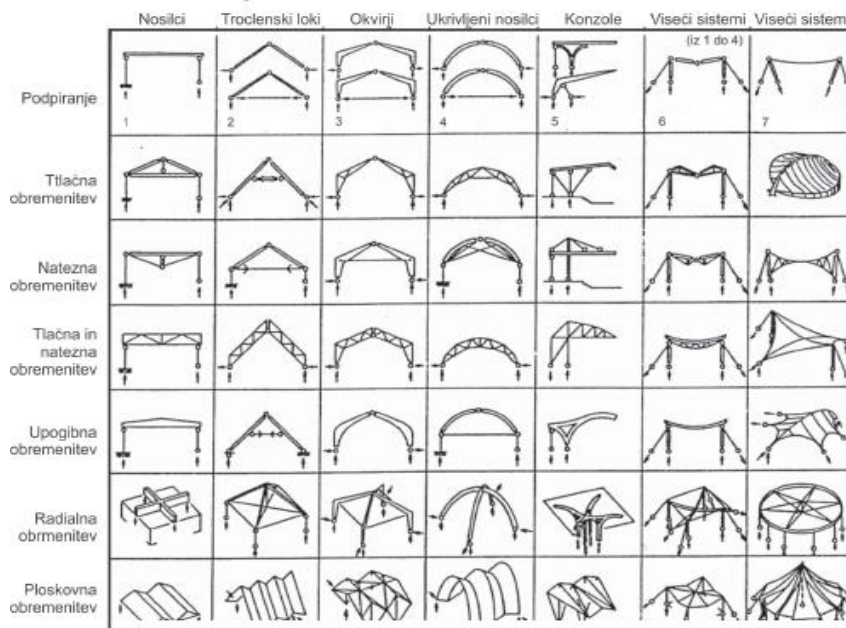
4 DELITEV NOSILNIH SISTEMOV LESENIH KONSTRUKCIJ VELIKIH RAZPONOV

Inovacije pri razvoju sodobnih lesnih proizvodov in novih oblik veznih sredstev omogočajo svobodno arhitekturno oblikovanje lesenih konstrukcij. Napredek v leseni gradnji je omogočil inženirjem konstruiranje čedalje drznejših konstrukcij s čedalje večjimi razpetinami in dimenzijami, ki so bile poprej domena gradbenih materialov kot sta jeklo in armiran beton. Zaradi svojih prednosti pred drugimi materiali, še zlasti zaradi majhne teže v primerjavi z nosilnostjo in velike stopnje prefabrikacije, se pogosto uporabljajo za nosilne sisteme konstrukcij, kot so športni in rekreacijski objekti, razstavnici in industrijski objekti, kulturni, sakralni in šolski objekti ter mostovi.

Za doseganje večjih razponov pri sodobnih konstrukcijah je najprimernejša izvedba iz lameliranega lepljenega lesa. Njegova uporaba omogoča zelo svobodno oblikovanje konstrukcij in izvedbo raznovrstnih oblik prečnih prerezov. Poleg tega je zaradi zmožnosti izvedbe velikih prerezov ter izboljšanih mehanskih lastnosti idealen sodoben proizvod za premoščanje velikih razponov. Pri kompleksnejših konstrukcijah se lahko poleg lepljenega lesa uporabljajo tudi druge vrste konstrukcijskega kompozitnega lesa kot sta LVL in PSL.

Tehnologija proizvodnje lameliranega lepljenega lesa omogoča izdelavo preprostih ravnih nosilcev velikih razponov in tudi poljubno oblikovane ukrivljene elemente s konstantno ali spremenljivo višino. Takšni elementi lahko predstavljajo že kar celotni nosilni sistem v primeru posameznih upogibnih nosilcev ali lokov. Pri kompleksnejših konstrukcijskih sistemih lahko predstavljajo le sestavne dele, kot so stebri in grede okvirjev ter osnovne elemente paličij, lokov in branastih konstrukcij. Pogosto predstavljajo lepljeni lamelirani leseni elementi tudi osnovne gradnike rebrastih in mrežastih lupinastih konstrukcij, ki omogočajo premoščanje največjih razponov [1]. V primeru kupolaste nosilne konstrukcije lahko dosežemo razpone, večje od 150 metrov.

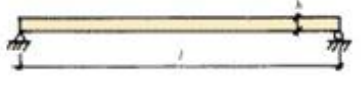
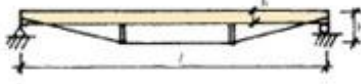

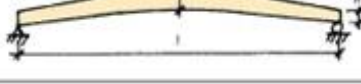
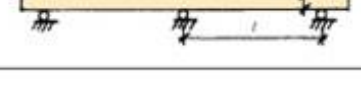
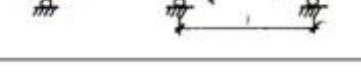
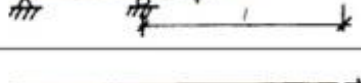
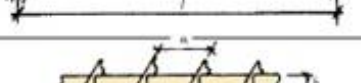
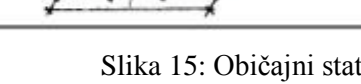
Nosilne sisteme razvrščamo glede na prevladujoče obremenitve (npr. paličja – osna obremenitev, nosilci – upogibna obremenitev) in prevladujoč način raznosa obtežbe (ravninske in prostorske konstrukcije, med katere spadajo kupole, prostorske okvirne konstrukcije, prostorsko paličje, brane in lupine) [12] (slika 14).



Slika 14: Skupine nosilnih sistemov [12].

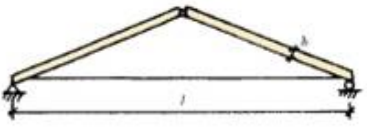
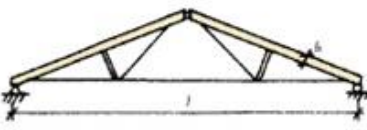
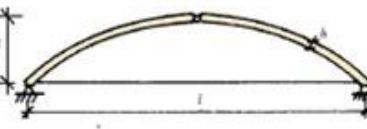



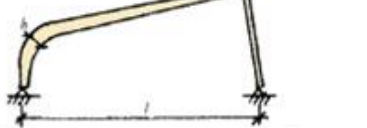

Pri ravninskih nosilnih sistemih je potrebno izkoriščanje polne upogibne nosilnosti in zaradi delovanja horizontalnih sil, kot sta veter in potres, zagotoviti bočno stabilnost. To lahko zagotovimo z namestitvijo sekundarnih zavarovalnih nosilnih konstrukcij. Te so lahko izvedene z jeklenimi nateznimi vezmi ali lesenimi elementi, ki povezujejo primarne nosilne konstrukcije. Pri prostorskih nosilnih sistemih pa je običajno stabilnost že zagotovljena s primarno nosilno konstrukcijo.

V naslednji tabeli so prikazani najpogostejši statični sistemi nosilcev in bran iz lameliranega lepljenega lesu pri čemer so navedene še omejitve razponov in informacijske višine prerezov.

SKICA SISTEMA	IME	PRIPOROČEN NAKLON	PRIPOROČEN RAZPON	VIŠINE PREREZOV
	Raven nosilec na dveh podporah	• 3•	< 30	$h \sim \frac{l}{17}$
	Raven nosilec z nateznim povezjem	3-30•	< 50	$h \sim \frac{l}{40}$ $H \sim \frac{l}{12}$
	Simetričen enoali dvo kapni nosilec	3-10•	10-30	$h \sim \frac{l}{30}$ $H \sim \frac{l}{16}$
	Sedlast nosilec	3-15•	10-20	$h \sim \frac{l}{30}$ $H \sim \frac{l}{16}$
	Raven kontinuiran nosilec	• 3•	< 25	$h \sim \frac{l}{20}$
	Raven kontinuiran nosilec z ojačitvami na mestu podpor	• 3•	< 25	$h \sim \frac{l}{24}$ $H \sim \frac{l}{16}$
	Konzolni/previsni nosilec na dveh podporah	< 10•	< 15	$h \sim \frac{l}{10}$
	Raven palični nosilec na dveh podporah	• 3•	30-85	$h \sim \frac{l}{10}$
	Brana	• 3•	12-25	$h \sim \frac{l}{20}$ ($a = 2,4 - 7,2$ m)

Slika 15: Običajni statični sistemi pri lepljenem lesu, prirejeno po [23].

Pregled najpogostejših izvedb tročlenskih okvirjev in lokov ter lupin iz lameliranega lepljenega lesa, pri čemer so navedene še omejitve razponov in priporočene višine prerezov:

SKICA SISTEMA	IME	PRIPOROČEN NAKLON	PRIPOROČEN RAZPON	VIŠINE PREREZOV
	Tročlenski nosilci z ali brez vezi	• 14°	15 - 50	$h \sim \frac{l}{30}$
	Tročlenski nosilci z jeklenimi vezmi in lesenimi oporniki	• 14°	20 - 100	$h \sim \frac{l}{40}$
	Tročlenski (dvočlenski) lokovi z ali brez vezi	$\frac{f}{l} \cdot 0,14$	20 - 100	$h \sim \frac{l}{50}$
	Tročlenski portalni okvirji z zobatimi kolenskimi spoji	• 14°	15 - 25	$h \sim \frac{s_1+s_2}{13}$
	Tročlenski portalni okvirji s sestavljeno podporno nogo	• 14°	10 - 35	$h \sim \frac{s_1+s_2}{15}$
	Tročlenski portalni okvirji z ukrivljeno podporno nogo	• 14°	15 - 50	$h \sim \frac{s_1+s_2}{15}$
	Polovični portalni okvirji podprti s stebri	• 20°	10 - 25	$h \sim \frac{l}{25}$
	Hiperbolične paraboloidne lupine (HP lupine)	$\frac{f_1+f_2}{l_1+l_2} \cdot 0,2$	$l_1 \sim l_2$ 15 - 60	$h \sim b \sim \frac{l}{70}$

Slika 16: Običajni statični sistemi pri lepljenem lesu, prirejeno po [23].

4.1 Upogibni nosilci

Nosilci spadajo med osnovne nosilne linijske elemente. Lahko predstavljajo že kar samostojen nosilni sistem, vendar so največkrat uporabljeni kot element pri kompleksnejših nosilnih sistemih. Lahko so izdelani iz konstrukcijskega žaganega lesa, za namen premoščanja večjih razponov pri sodobni leseni gradnji pa se najpogosteje uporablja lepljen lameliran les. Najbolj pogosto uporabljena oblika nosilnega sistema iz lepljenega lesa je sestavljena iz nosilcev, ki prevzamejo pretežno upogibne obremenitve in iz stebrov, ki podpirajo nosilce na obeh koncih. Za manjše razpone se največkrat uporabljajo nosilci s konstantno višino prečnega prereza. Tehnologija proizvodnje lepljenega lesa pa omogoča izdelavo elementov različnih višin in oblik, zato lahko s spreminjanjem višine nosilca približno sledimo poteku upogibnih momentov ali prečnih sil. S tem zagotovimo večjo izkoriščenost prereza glede na normalne upogibne ali strižne napetosti in večjo ekonomičnost uporabljenega materiala. Z ustrezno izbiro oblike in geometrije konstrukcij lahko premoščamo čedalje večje razpone [13]. Nosilci lahko dosežejo dolžino tudi do 30 metrov, vendar pa se pri doseganju večjih dolžin srečujemo z omejitvami transporta elementov do gradbišča in v manjši meri z omejitvami povezanimi s tehnološkim postopkom izdelave.

4.1.1 Prečni prerezi upogibnih nosilcev

Prečni prerezi nosilcev iz lepljenega lameliranega lesa so sestavljeni iz lamel debeline do 45 mm, ki so med seboj zlepljene. Z razvojem sodobnih lepil se je povečalo tudi število najrazličnejših oblik prečnih prerezov nosilcev in stebrov (Slika 17). Lepljenci imajo najpogosteje pravokotni prerez, prerez I oblike ali sestavljen škatlasti prerez. Z možnostjo prilagajanja geometrije prereza poteku notranjih napetosti lahko na robovih, kjer se pojavljajo večje napetosti, uporabimo material z večjo nosilnostjo. V primeru nosilcev iz lameliranega lepljenega lesa, na robove, običajno v zunanji šestini višine, prilepimo boljši material z višjo trdnostjo, v sredini pa slabšega. Na najbolj obremenjenih robnih mestih se za ojačitev lahko uporablja tudi kompozitni les, kot je LVL ali pa karbonska vlakna. S tem zagotovimo prilagajanje kvalitete materiala glede na razpored napetosti po prerezu in posredno zmanjšamo količino uporabljenega lesa [13].



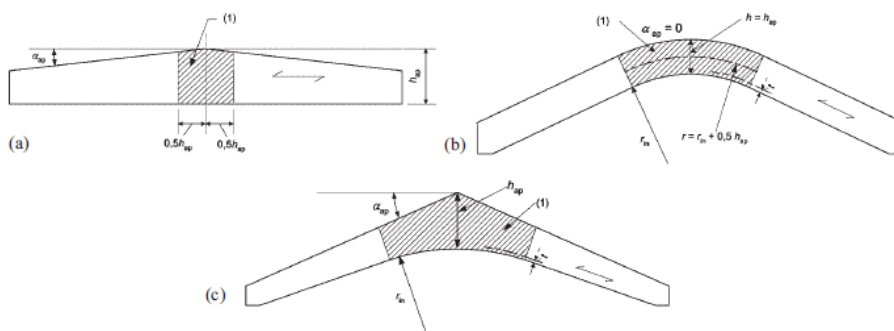
Slika 17: Prečni prerezi elementov iz lepljenega lesa [12].

4.1.2 Vrste upogibnih nosilcev glede na obliko

Glavna prednost lepljenih lesenih elementov je svobodno oblikovanje geometrije in možnost krivljenja lamel, zato imamo v praksi pogosto opraviti z elementi s spremenljivo višino, z ukrivljeno osjo, ali pa s kombinacijo obojega.

Nosilce glede na tipične oblike delimo na :

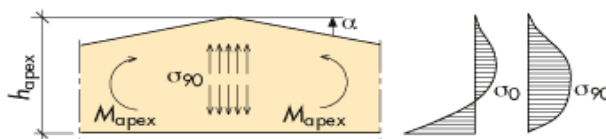
- nosilce s konstantno višino,
- nosilce spremenljive višine – enokapni in dvokapni (slika 18a),
- nosilce z ukrivljeno osjo (slika 18b),
- nosilce z ukrivljeno osjo in spremenljive višine (sedlasti nosilci) (slika 18c) in
- vbočene nosilce.



Slika 18: Tipične oblike nosilcev iz lameliranega lesa [5].

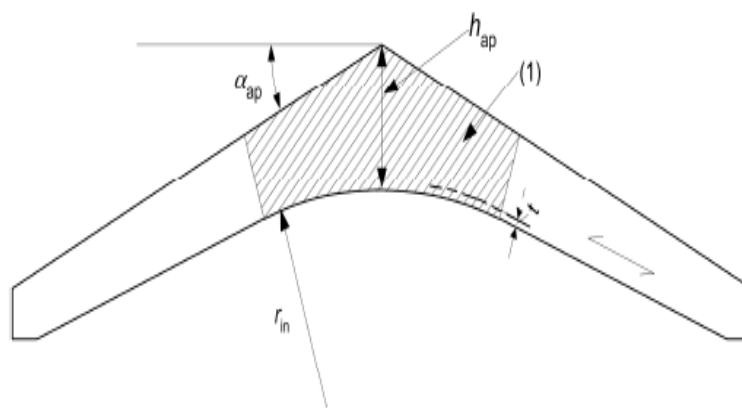
4.1.2.1 Nosilci s spremenljivo višino in ukrivljeno osjo

Pri nosilcih s spremenljivo višino in ukrivljeno osjo dobimo območja, v katerih razporeditev vzdolžnih normalnih napetosti σ_0 po prečnih prerezih ni linearna, tako kot v primeru ravnih nosilcev s konstantno višino. V tem primeru se lahko pojavijo tudi prečne normalne napetosti σ_{90} v smeri pravokotno na vlakna, ki so v določenih primerih geometrije in obremenitve elementa natezne, kar je kritično, glede na to, da je računaska trdnost lesa pravokotno na vlakna veliko manjša od trdnosti v smeri vlaken (slika 19). Poleg teh napetosti se pri nosilcih spremenljive višine na mestu nagnjenega roba pojavijo tudi razmeroma velike strižne napetosti τ [5].

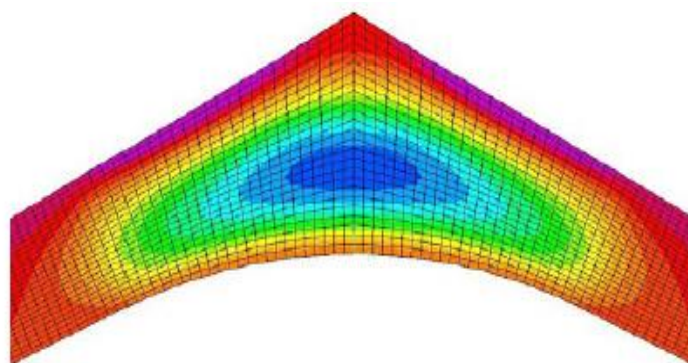


Slika 19: Prikaz poteka normalnih σ_0 in prečnih normalnih napetosti σ_{90} pri dvokapnem nosilcu [23].

Pri dvokapnih nosilcih s spremenljivo višino in ukrivljenih nosilcih s konstantno in spremenljivo višino je potrebno posebej obravnavati temensko območje in območje izven temena (slika 20). V ta namen so v standardih EC5 navedeni poenostavljeni izrazi, ki temeljijo na predpostavki o linearni zvezi med deformacijami in napetostmi. Pri tem bolj zapleteno napetostno stanje v nosilcih različnih oblik upoštevamo s korekcijskimi faktorji, s katerimi pomnožimo izračunane projektne napetosti ali projektno trdnost. Na poševnem robu eno ali dvokapnih nosilcih je potrebno zmanjšati projektno trdnost zaradi nagnjenosti roba glede na smer vlaken lesa (izraz 1.2). V temenskem območju moramo pri vseh tipih nosilcev upoštevati povečanje upogibnih napetosti zaradi nagnjenosti zgornjega roba in v primeru ukrivljenih elementov še zaradi ukrivljenosti lamel (izraz 1.3). Poleg tega pa se v nosilcih zaradi predkrivljenja lamel pojavljajo zaostale napetosti, ki zmanjšujejo nosilnost nosilcev. Zaradi tega je potrebno pri teh elementih upoštevati zmanjšano projektno upogibno trdnost v odvisnosti od razmerja radija ukrivljenosti in debeline lamele. Prečne napetosti pa moramo primerjati s projektno natezno trdnostjo v smeri pravokotno na vlakna, ki je korigirana s faktorjema, pri katerima je upoštevan učinek porazdelitve napetosti ter prostornine temenskega dela (izraz 1.5) [13].



Slika 20: Temensko območje sedlastega nosilca [13].



Slika 21: Del sedlastega nosilca – prikaz prečnih oz. radialnih napetosti v temenskem območju.

(Račun s programom SAP 2000; les GL28h, $L = 16$ m, $b/h_{ap} = 20/171$ cm, $q_d = n$ 21kN/m; $\alpha_{ap} = 5,13$ m; največja napetost $\sigma_{t,90} = 0,097$ kN/cm² v modrem območju) [13].

Napetosti ob zgornji in spodnji površini, brez upoštevanja spremenljive višine so določeni z naslednjim izrazom:

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = \frac{6M_d}{bh^2}, \quad \text{izraz 1.1}$$

Pri čemer je:

$\sigma_{m,\alpha,d}$: projektna upogibna napetost.

Kontrola napetosti ob nagnjenem robu je enaka izrazu:

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} f_{m,d}, \quad \text{izraz 1.2}$$

Pri čemer so:

$\sigma_{m,\alpha,d}$: projektna upogibna napetost na nagnjenem robu,

$f_{m,d}$: projektna upogibna trdnost,

$k_{m,\alpha}$: pa redukcijski faktor, ki upošteva vpliv večosnega napetostnega stanja.

V temenskem območju mora biti izpolnjen pogoj glede vzdolžnih upogibnih napetosti in je enak izrazu:

$$\sigma_{m,d} = k_\ell \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2}, \quad \text{izraz 1.3}$$

Pri čemer je:

k_ℓ : koeficient, ki zajame tako vpliv nagnjenega roba, kot tudi vpliv ukrivljene osi elementa.

Pri tem je $\sigma_{m,d}$ upogibna napetost v temenskem območju:

$$\sigma_{m,d} \leq k_r f_{m,d}, \quad \text{izraz 1.4}$$

k_r : pa koeficient, s katerim zajamemo vpliv predhodnih napetosti zaradi krivljenja lamel. V primeru natezних napetosti v prečni smeri je potrebno izvesti še kontrolo prečnih oz. radialnih napetosti

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d}. \quad \text{izraz 1.5}$$

Pri čemer so:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2}$$

$M_{ap,d}$: največja prečna natezna napetost v temenskem območju zaradi upogibnega momenta,

k_{dis} : koeficient vpliva razporeditve napetosti v temenskem delu,

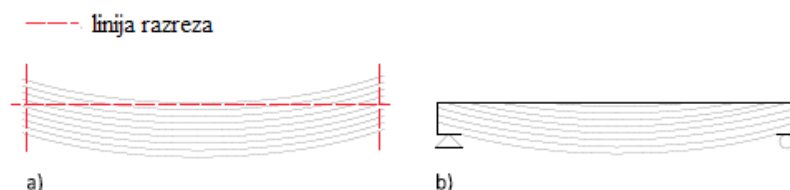
k_{vol} : koeficient vpliva volumna,

$f_{t,90,d}$: projektna natezna trdnost pravokotno na vlakna,

k_p : pa koeficient s katerim zajamemo vpliv nagnjenosti roba in ukrivljenosti lamel.

4.1.2.2 Nosilci z izbočeno obliko

Nosilci te oblike imajo spodnji rob v obliki parabole, ki sledi razporeditvi upogibnih momentov po elementu. Spodnje ukrivljene lamele potekajo neprekinjeno vse do podpor, kar zmanjša možnost pojava napetosti, ki delujejo pravokotno na vlakna [24]. Zaradi ugodne oblike nosilca, ki omogoča odlično razporeditev napetosti, lahko premoščamo razmeroma velike razpone tudi do 35 metrov.

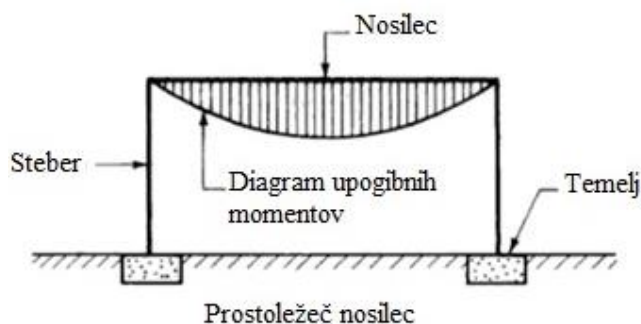


Slika 22: Izdelava izbočenega nosilca, prirejeno po [24].

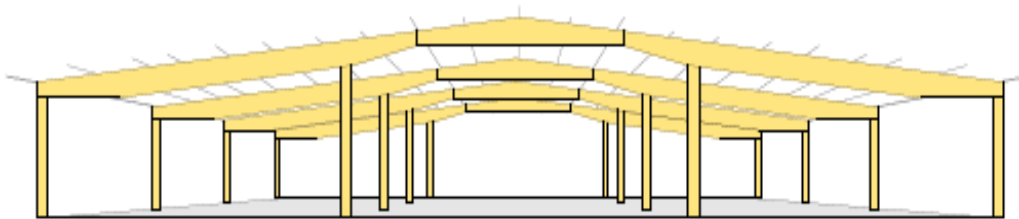
4.1.3 Nosilni sistemi iz nosilcev

Gredni nosilci se uporabljajo predvsem v kombinaciji s stebri, ki jih podpirajo na obeh koncih. Kombinacija teh dveh elementov lahko tvori ravninski okvirni nosilni sistem ali pa so lahko nosilci tudi vrtljivo podprti. Medsebojno povezavo nosilcev in stebrov zagotavljajo sodobna vezna sredstva, običajno so to jeklene plošče v kombinaciji z vijaki. Za premoščanje manjših razponov se uporabljajo nosilci s konstantno višino, pri večjih razponih pa je zaradi ekonomičnosti smiselno uporabiti nosilce s spremenljivo višino, ki sledijo obremenitvi elementa. Nosilci z ukrivljeno osjo in spremenljive višine lahko dosežejo razpone tudi do 30 metrov. Ti nosilni sistemi se največkrat uporabljajo za strešne konstrukcije večjih hal, pogosto pa se za nosilne sisteme uporabljajo tudi v obliki gerberjevega nosilca.

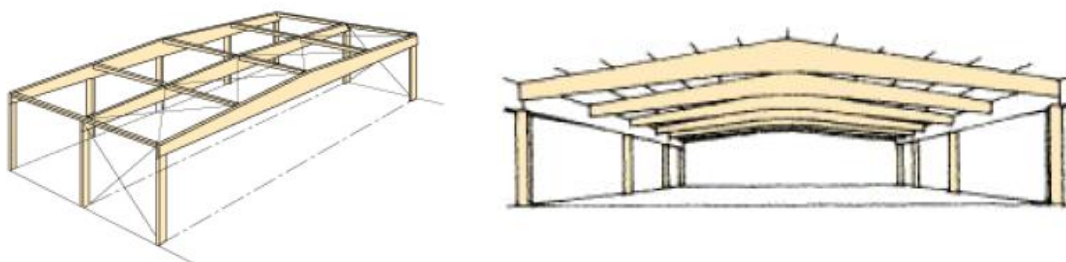
Zaradi delovanja horizontalnih obtežb, kot sta veter in potres, je potrebno zagotoviti horizontalno stabilnost celotne konstrukcije, zato je potrebno vgraditi dodatno zavarovalno konstrukcijo – zavetrovanja v obliki nateznih diagonal. Obstajajo različni načini izvedbe zavarovalne konstrukcije. Najpogosteje se uporabljajo jeklene natezne palične diagonale.



Slika 23: Razporeditev upogibnih momentov pri prostoležečem nosilcu podprtem z stebroma, prirejeno po [25].



Slika 24: Primer strešne konstrukcije v obliki gerberjevega nosilca [23].



Slika 25: Primera strešne konstrukcije z dvokapnimi in sedlastimi nosilci [23].



Slika 26: Primer uporabe sedlastega nosilca pri strešni konstrukciji hale v Ötisheimu v Nemčiji [26].

V zgornjem primeru je strešna konstrukcija sestavljena iz sedlastih nosilcev, ki so na obeh koncih podprti z betonskimi stebri. Stiki med nosilci in stebri so izvedeni z vijačenimi spoji. Vgrajene jeklene diagonale zagotavljajo horizontalno stabilnost konstrukcije.

4.1.3.1 The Bangor Aurora Aquatic & Leisure Complex

Lesena konstrukcija The Bangor Aurora Aquatic & Leisure Complex se nahaja v Severni Irski. Konstrukcija ima okvirni nosilni sistem, sestavljen iz lepljenih nosilcev, ki so podprti z jeklenimi stebri. Leseno ostrežje je sestavljeno iz 27-ih primarnih lepljenih nosilcev, ukrivljenih v S obliki. Vsak

ukrivljen nosilec je dolg 70 m in ima prečni prerez 420 mm x 1500 mm. Zaradi dolžine so jih zaradi omejitve pri transportu razdelili na dva dela in jih ponovno spojili na samem gradbišču. Ti nosilci so podprti z jeklenimi stebri s krožnim prečnim prerezom. Največji razpon med jeklenimi stebri znaša kar 43,6 m. Za zagotavljanje horizontalne stabilnosti so uporabili jeklene natezne vezi. Na primarno lepljenih nosilcih so nameščeni še dodatni lepljeni špirovci, ki služijo kot podkonstrukcija za prekrivanje s trapezno pločevino [27].



Slika 27: Lesena stavba The Bangor Aurora Aquatic & Leisure Complex [27].



Slika 28: Lesena konstrukcija iz ukrivljenih lepljenih nosilcev z razponom 43,5 m [28].

4.2 Ravninski palični nosilni sistemi

V zadnjem desetletju se palični nosilni sistemi pogosto uporabljajo pri različnih vrstah konstrukcij, najpogosteje pa za strešne konstrukcije. Prednost sistema je v njegovi prijetni arhitekturni podobi, lažji zasnovi in enostavni izdelavi. Palični nosilni sistemi se uporabljajo v primerih, pri katerih bi bila uporaba upogibnih nosilcev neekonomična, saj bi bilo za premoščanje večjih razponov potrebno uporabiti prereze s prevelikimi dimenzijami in s tem tudi večjimi količinami materiala. Primerni so predvsem za strešne konstrukcije, pri katerih je zahtevan majhen naklon strehe in kjer ni dodatnih omejitev glede višine lesene konstrukcije. Lahko predstavljajo tako ravninske, kot tudi prostorske nosilne sisteme. V tem poglavju bo poudarek predvsem na ravninskih paličjih. Ta so razširjeni povsod po svetu in se uporabljajo predvsem kot nosilni sistemi strešnih konstrukcij večjih javnih stavb, športnih objektov, industrijskih in razstavnih hal ter drugi večjih objektov [29].

Med poglavitne prednosti lahko štejemo tudi dejstvo, da so lahko posamezni odseki izdelani v proizvodnih halah v primernih velikostih za transport in nato sestavljeni na gradbišču. Slabost paličnega sistema pa je predvsem v velikem številu včasih tudi zapletenih vozlišč. Preprosti palični nosilni sistemi so podobno kot upogibni nosilci vrtljivo podprti v dveh točkah. Paličja imajo številne prednosti v primerjavi z masivnimi nosilnimi konstrukcijami in sicer [23]:

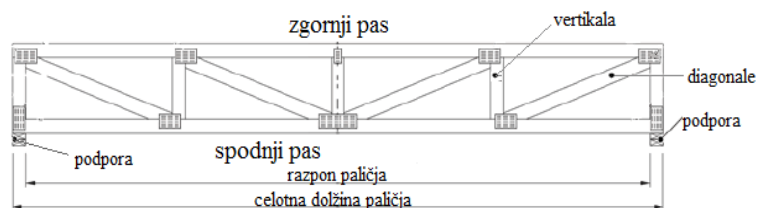
- veliko izkoriščenost materiala, ki omogoča večjo ekonomičnost konstrukcije,
- veliko svobodo oblikovanja,
- sestavljanje iz enostavno izdelanih manjših odsekov, ki omogočajo lažji transport in
- in majhno lastno težo, ki omogoča enostavno gradnjo na gradbišču, z nizkimi stroški prevoza.

4.2.1 Lesena palična ostrešja

Elementi paličja v splošnem prenašajo samo osne sile, tako tlačne kot natezne, zato jim je potrebno zagotoviti ustrezno stabilnost za zagotavljanje zadostne nosilnosti. Stabilnost izven ravnine lahko zagotovimo s sekundarnimi nosilnimi konstrukcijami. Elementi so v vozliščih med seboj povezani s sodobnimi veznimi sredstvi. Kot najbolj učinkovite so se izkazale palične konstrukcije z pločevinami in vijaki. Njihova uporaba omogoča sestavo paličnih strešnih nosilnih sistemov, s katerimi lahko premoščamo razpone, večje od 20 metrov [29].

Lesena paličja so običajno vrtljivo podprta na dveh mestih. Uporaba lameliranega lepljenega lesa je ekonomična pri razponih, večjih od 25 metrov. Vmesni prostor med elementi strešnih paličij omogoča namestitve vseh potrebnih strojnih inštalacij. V primeru velikih razponov so posamezna ravninska paličja nameščena v medsebojni razdalji med 5 in 12 metri. Strešne lege so običajno nameščene na medsebojni razdalji od 1,2 do 2,4 metra in so pogosto prekrite s trapezno pločevino. Namesto strešnih

leg se lahko neposredno na zgornji pas strešnega paličja namesti višjo in debelejšo trapezno pločevino. Z večanjem razpona je bolj ekonomična uporaba manj gostega rastra paličja [24].

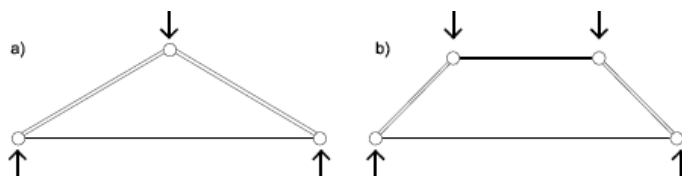


Slika 29: Strešna konstrukcija ravnega paličja s paralelnimi pasovi, povzeto po [30].

4.2.2 Geometrijske oblike paličja

Paličja so nosilni sistemi, sestavljeni iz ravnih ali skoraj ravnih paličnih elementov, ki so na obeh koncih medsebojno povezani tako, da polja tvorijo trikotne oblike. Te trikotne enote paličja predstavljajo geometrijsko stabilne oblike. Ta oblika omogoča, da lahko z dodajanjem novih elementov enostavno formiramo nove geometrijske oblike. Na primer spodnje vozlišče trikotne oblike (slika 30) lahko razstavimo in dodamo elementa, tako da se formira paralelogram [24].

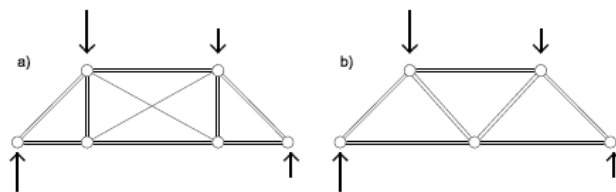
Pri zasnovi paličja je ugodno, če porazdeljeno obtežbo razdelimo na točkovno obtežbo kar se da učinkovito in ekonomično. Učinkovitost je odvisna od oblike paličja in arhitekturnih zahtev. Na sliki 30 sta dva primera različnih oblik paličij, obremenjenih s točkovno obtežbo [24].



Slika 30: Dva primera različnih obtežnih situacij idealnih oblik paličij (a) stabilna trikotna oblika in (b) nestabilna oblika štiri členskega mehanizma [24].

V primeru simetrične obtežbe se obremenitve v paličju prenašajo brez dodatnih prečnih povezav, saj zaradi idealne geometrijske oblike obtežba ne povzroča dodatnih momentov. Oblika s prečnimi ojačitvami je najpogosteje uporabljena, saj obtežbe kot so sneg, veter in stalne obtežbe v splošnem povzročajo nesimetrične obtežne kombinacije. Nesimetrične obtežbe se običajno pojavijo tudi zaradi proizvodnih in montažnih nepopolnosti [24].

Oblika modela paličja mora biti optimizirana tako, da ima čimbolj idealno obliko ter vsebuje dodatne prečne povezave za prenašanje nesimetričnih obremenitev. V tem primeru se obremenitve notranjih palic in v spojih zmanjšajo, pri čemer morajo biti spoji izvedeni karseda enostavno in ekonomično [24].



Slika 31: Dva tipična primera oblike paličja s prečnimi povezavami [24].

Pri optimizaciji paličja je potrebno upoštevati naslednje zahteve [24]:

- število priključkov mora biti čim manjše, saj je izdelava posameznega spoja draga in tudi večje kot je število spojev, večje so deformacije celotnega paličnega sistema,
- dolžina tlačnih elementov naj ne bo prevelika in naj ne bo preveč vitkih prereзов, saj lahko v nasprotnem primeru pride do nevarnosti uklona,
- lokalne deformacije elementov paličja ne smejo biti prevelike,
- paličja naj imajo karseda harmonično zasnovano obliko, npr. simetrija kotov diagonal
- ter koti med posameznimi pasovi paličja in prečnimi diagonalnimi elementi ne smejo biti premajhni, običajno znašajo $45^{\circ} \pm 10^{\circ}$.

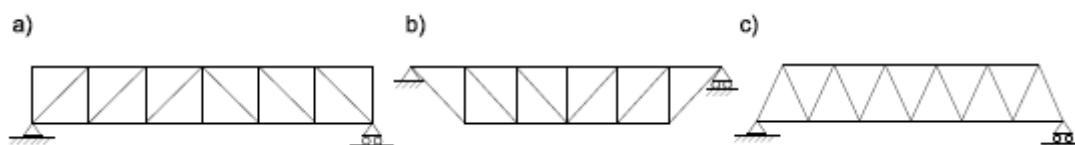
Transportiranje večjih paličnih sistemov je pogosto omejeno zaradi njihove višine in dolžine. Zaradi tega morajo biti paličja skrbno načrtovana v primeru, ko so višja od 3 m ali daljša od 20 m. Problem transportiranja je mogoče rešiti tako, da se paličje razdeli na manjše dele in sestavi na gradbišču. Običajno so veliki palični nosilci sestavljeni iz enega ali več spojev, v nekaterih primerih pa so lahko celotna paličja sestavljena na gradbišču. Če je le mogoče, je bolje, če se paličja izdelajo v proizvodnih halah, v katerih lahko zadostijo zahtevam po večji natančnosti izdelave spojev [24].

V splošnem obstajajo številne alternativne oblike paličij. Ena izmed bolj pogostih so tročlenski palični nosilci z ali brez povezja, ki jih bom podrobneje predstavil v naslednjem poglavju. V nadaljevanju so predstavljene nekatere osnovne oblike paličnih nosilcev z enostavnim podpiranjem.

4.2.2.1 Ravni palični nosilci z vzporednimi pasovi

Ravni rešetkasti palični nosilci so pred drugimi vrstami nosilnih sistemov, kot so leseni nosilci izdelani iz masivnih lepljencev ali sestavljenim I nosilcem, ekonomični pri razponih večjih od 25 do 30 m. Obremenitve v vmesnih diagonalnih elementih so običajno velike, zaradi česar je težje zagotoviti ustrezno zasnovo spojev. Vmesni diagonalni elementi so lahko zasnovani tako, da so tlačno obremenjeni (Howe paličje, slika 32a), natezno obremenjeni (Pratt paličje, slika 32b) ali da so obremenjeni tako tlačno kot natezno (Waren paličje, slika 32c) [24].

Tlačno obremenjene diagonale omogočajo enostavnejšo zasnovo spoja, saj se lahko del obtežbe prenaša preko kontaktnega pritiska, vendar je potrebno pri daljših diagonalah zagotoviti ustrezno uklonsko stabilnost. V primeru paličja na sliki 32b lahko natezne diagonale delujejo kot natezna vez, ki podpira zgornji pas paličja. Pri tej obliki se paličje nahaja pod težiščem podpor, kar v primeru strešne konstrukcije zmanjša uporabno vertikalno višino objekta [24].

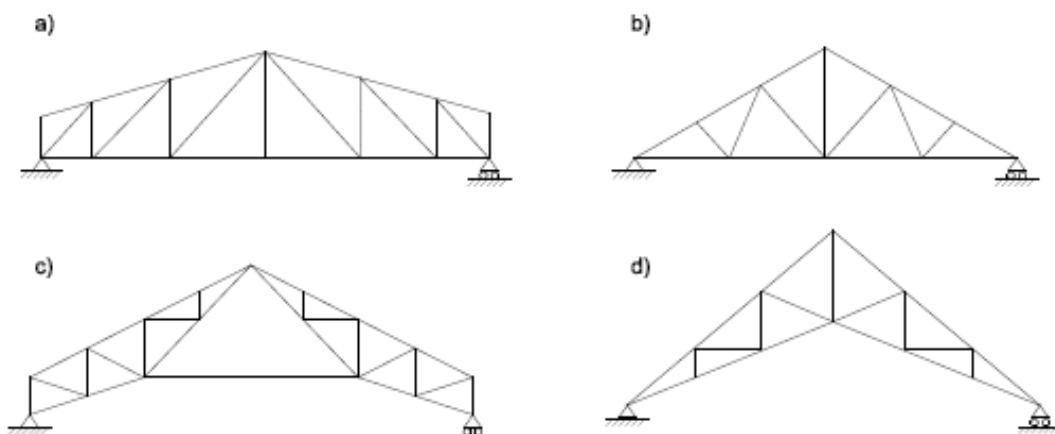


Slika 32: Ravni palični nosilci z (a) tlačnimi diagonalami (Howe paličje), (b) nateznimi diagonalami (Pratt paličje) (c) kombinacijo tlačnih in nateznych diagonal (Warren paličje) [24].

Ravni palični nosilci imajo lahko predhodno nadvišanje, s katerim dosežemo vizualno manjše pomike zaradi vpliva zunanje obtežbe. Velikost nadvišanja je odvisna od lastne teže in deformacij, ki jih povzroči dominantna obtežba. V primeru strešnih konstrukcij je največkrat dominantna obtežba snega [24].

4.2.2.2 Trikotna paličja

Trikotna oblika paličja omogoča enakomerno razporeditev zunanje obtežbe. Del zunanje obtežbe, ki deluje na zgornji pas, se preko momentne obremenitve direktno prenese v podpore, del obtežbe pa se prenaša preko vmesnih diagonalnih elementov. Preko diagonalnih elementov se prenašajo manjše do srednje velike sile, pri katerih je zasnova spojev enostavnejša. Na spodnji sliki so prikazane pogosto uporabljene oblike trikotnih paličij z ravnim spodnjim pasom. Če je na sredini paličja zahtevana večja višina, se lahko spodnji pas dvigne (slika 33c in 33d) [24].

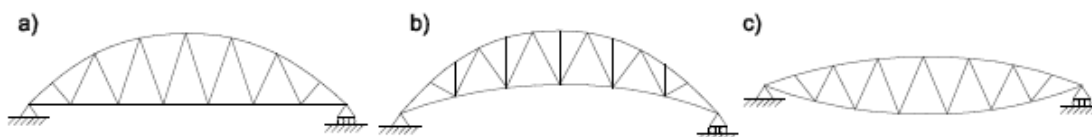


Slika 33: Trikotna paličja (a) z Howe obliko diagonalami in dvignjenim robom, (b) trikotno paličje, (c) trikotno paličje z dvignjenim spodnjim pasom (d) škarjasto paličje [24].

4.2.2.3 Paličja z ukrivljenim pasovi

Pri paličjih velikih razponov sta lahko zgornji in tudi spodnji pas ukrivljena. S tem zagotovimo večjo nosilnost paličnega nosilnega sistema. V primeru enakomerne razporeditve obtežbe, brez lokalnih velikih točkovnih obremenitev, enovit ukrivljen pas paličja prenaša skoraj celotno zunanjo obtežbo. Vmesni diagonalni in vertikalni elementi zato prevzamejo zelo majhne obremenitve, pri katerih so spoji z obema pasoma paličja enostavno izvedeni. Ukrivljena paličja iz lamiliranega lepljenega lesa omogočajo doseganje razponov tudi do 60 m [24].

Parabolična oblika pasov omogoča odlične pogoje prevzema obremenitev, ki jih povzročajo zunanje obtežbe. Zaradi lažje proizvodnje je v praksi bolj ugodno uporabljati krožno obliko ločnih paličij. Zaradi velikih dimenzij in za namen lažjega transporta so paličja običajno sestavljena iz dveh ali več ukrivljenih delov, ki so med seboj spojeni z togimi spoji. Za spodnji ravni pas paličja se lahko uporablja tudi jeklo [24]. Palični ločni nosilni sistemi so podrobneje predstavljeni v poglavju strešni ločni nosilni sistemi.



Slika 34: Ukrivljena paličja (a) parabolična oblika paličja z ravnim spodnjim pasom, (b) parabolična oblika paličja z dvignjenim spodnjim paraboličnim pasom, (c) paličje v obliki ribjega trebuha [24].

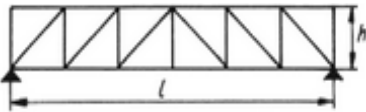
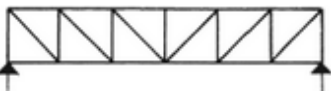


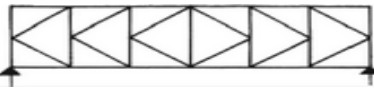
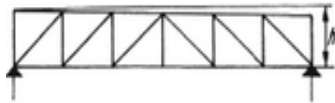

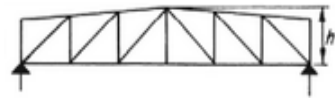


4.2.3 Možni razponi paličja

Palični nosilni sistemi imajo lahko raznolike geometrijske oblike. Poleg paličij z vzporednima pasoma, trikotnih oblik in z ukrivljenimi pasovi, se uporabljajo tudi druge oblike. Za premoščanje večjih razponov so najprimernejši dvočlenski in tročlenski palični okvirji. Ti okvirji imajo lahko prav tako ukrivljena pasova, ki omogočata bolj učinkovito prenašanje obremenitev. Največje razpone lahko premoščamo s paličnimi dvočlenskimi ločnimi nosilnimi sistemi. Njihove prednosti sem natančneje predstavil v poglavju ločnih nosilnih sistemov.

Različne oblike prinašajo različne omejitve glede razponov. Vendar je potrebno zaradi ekonomičnosti uporabljenega materiala potrebno upoštevati tudi omejitve glede sistemskih višin. V primeru paličnih ostrešij so priporočene tudi omejitve glede naklona streh. Na preglednicah 1 so povzete različne oblike paličnih nosilnih sistemov z priporočenimi vrednostmi konstrukcijskih parametrov.

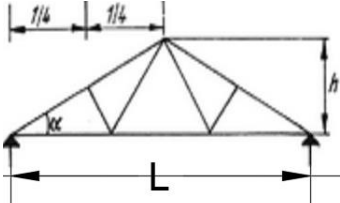
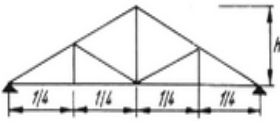
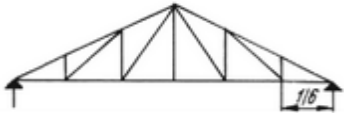
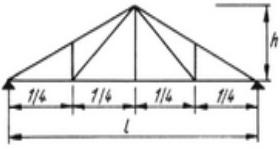
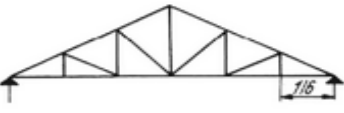
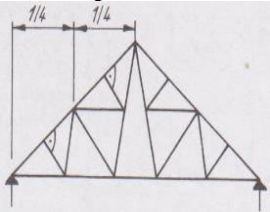
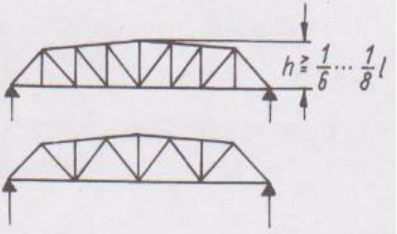
Preglednica 1: Osnovne oblike in variante paličnih nosilcev in paličnih okvirjev

(original v nemščini, ki je prirejen po [31])

Osnovne oblike ter vrste nosilnega sistema z shematičnim prikazom	Priporočene vrednosti parametrov in variante	Opombe
Palični nosilec z vzporednima pasoma		
- s tlačnimi diagonalami	Razpon: 10 - 60 m Sistemska višina: $h = L/12$ do $L/6$ (odvisno od razpona in obtežbe)	Uporabljajo se lahko tudi za sekundarne nosilne sisteme in zavetrovanja, ki so iz masivnega ali lameliranega lesa ali tudi v obliki jeklenih okroglih palic; N- paličja so znana tudi kot Pratt paličja; paličja sestavljena samo iz nagnjenih diagonal znana tudi kot Warren paličja; K-paličja so zelo ugodna pri uporabi zavetrovalnih konstrukcij
		
- z nateznimi diagonalami	Medsebojna razdalja: 4 - 12 m	
		
- s kombinacijo nateznih in tlačnih diagonal		
		
- s K - diagonalami		
		
		
Palični nosilec z nagnjenim zgornjim pasom		
- s tlačnimi diagonalami	Razpon: 10 - 60 m Sistemska višina: $h = L/12$ do $L/6$ (odvisno od razpona in obtežbe)	Zgornji pas stešnih konstrukcij omogoča prilagajanje in je primeren za nagibe steh od 10 do 25 % (6 do 15°), uporabljajo se lahko vse osnovne oblike paličij z vzporednima pasoma
		
- z nateznimi diagonalami	$\alpha \approx 1 - 6^\circ$ Medsebojna razdalja: 4 - 12 m	
		
Trapezna oblika paličnega nosilca		
- s tlačnimi diagonalami	Razpon: 10 - 60 m Sistemska višina: $h = L/10$ do $L/6$ (odvisno od razpona in obtežbe)	Zgornji pas stešnih konstrukcij omogoča prilagajanje in je primeren za nagibe steh od 10 do 25 % (6 do 15°), uporabljajo se lahko vse osnovne oblike paličij z vzporednima pasoma
		
- z nateznimi diagonalami	$\alpha \approx 1 - 8^\circ$ Medsebojna razdalja: 4 - 12 m	
		
		

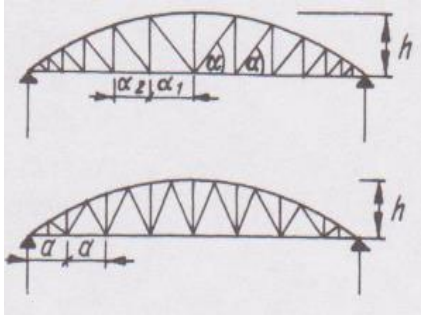
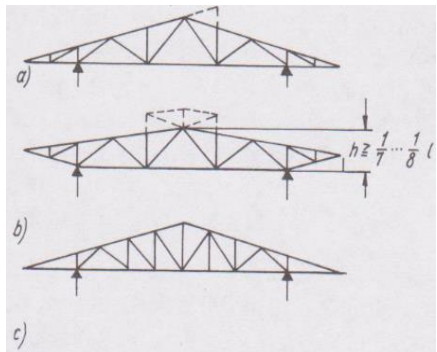
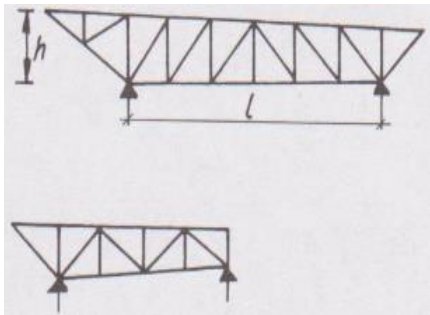
se nadaljuje ...

...nadaljevanje preglednice 1

Osnovne oblike ter vrste nosilnega sistema z shematičnim prikazom	Priporočene vrednosti parametrov in variante	Opombe
Trikotni palični nosilec - z W povezjem 	Razpon: 6 - 30 m Sistemska višina: $h = L/7$ do $L/6$ $\alpha \approx 12 - 30^\circ$ Medsebojna razdalja: 4 - 12 m	Ekonomična oblika paličja za Brett in Bohlen povezja, kjer dolge diagonale prevzamejo natezne, kratke pa tlačne sile. V primeru manjših statičnih višin ($L/9$) je težje izvesti priključek s podporami.
Trikotni palični nosilec - z tlačnimi daigonalami 	Razpon: 12 - 30 m (6 poljni) Sistemska višina: $h = L/7$ do $L/6$	
Trikotni palični nosilec - z nateznimi daigonalami 	Razpon: 12 - 30 m Sistemska višina: $h = L/7$ do $L/6$	Oblika paličja, ki se imenuje tudi angleško povezje. Druga oblika paličja se imenuje belgijsko povezje. 
Trikotni palični nosilec 	Razpon: 15 - 60 m Sistemska višina: $h = L/7$ do $L/6$	Oblika paličja se imenuje tudi Fink povezje. Primerno je za strme strehe velikih razponov.
Mansardni palični nosilec 	Razpon: 15 - 60 m Sistemska višina: $h = L/8$ do $L/6$ $\alpha \approx 3 - 6^\circ$ Medsebojna razdalja: 4 - 12 m	Primerna predvsem za velike razpone iz lesenih veznih elementov. Razmiki med vozlišči so v splošnem enaki, vendar z različnimi nakloni diagonal.

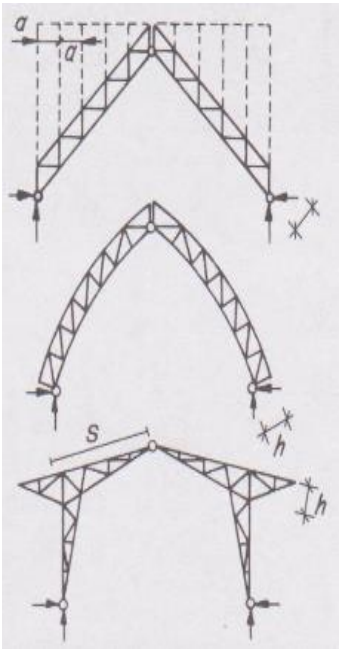
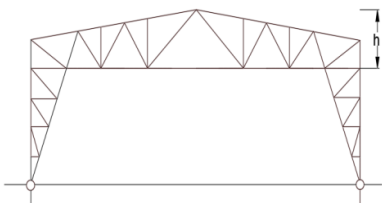
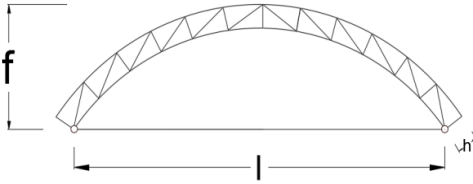
se nadaljuje ...

...nadaljevanje preglednice 1

Osnovne oblike ter vrste nosilnega sistema z shematičnim prikazom	Priporočene vrednosti parametrov in variante	Opombe
Parabolično paličje (Ločno paličje) 	Razpon: 10 - 80 m Sistemska višina: $h = L/8$ do $L/6$ Medsebojna razdalja: 4 - 12 m	Parabolično paličje je primerno za strešne konstrukcije velikih razponov z manjšimi nakloni. Zgornji paraboličen pas prevzame večinoma porazdeljene obtežbe, zaradi česar povezovalni elementi prevzamejo le manjši del obtežbe. Vmesni elementi podpirajo zgornji pas in mu s tem zagotavljajo večjo uklonsko stabilnost. Vmesna vozlišča so med seboj enako ali različno oddaljena. Bolj ugodna je slednja.
Trikotno paličje s previsi 	Razpon: 10 - 40 m Sistemska višina: $h = L/8$ do $L/6$ Medsebojna razdalja: 4 - 12 m	Paličja so primerna za strešne konstrukcije skladiščnih hal. Konzole omogočajo dodaten uporaben prostor. Paličje omogoča tudi izvedbo strešnih svetlobnikov.
Palični nosilci z nagnjenim zgornjim pasom in previsi 	Razpon: 10 - 30 m Sistemska višina: $h = L/12$ do $L/6$ $\alpha \approx 1 - 6^\circ$ Medsebojna razdalja: 4 - 10 m	Trikotna paličja z konzolami so primerna za strešne konstrukcije tribun in parkirnih objektov.

se nadaljuje ...

...nadaljevanje preglednice 1

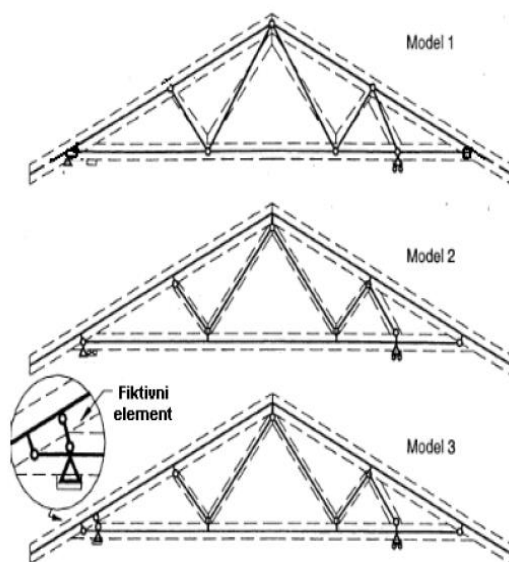
Osnovne oblike ter vrste nosilnega sistema z shematičnim prikazom	Priporočene vrednosti parametrov in variante	Opombe
<p>Tročlenski palični lokovi in palični okvir</p> 	<p>Razpon: 20 - 90 m Sistemska višina: $h = L/25$ do $L/15$ Medsebojna razdalja: 4 - 8 m</p> <p>$L =$ možen razpon</p> <p>Palični okvir Razpon: 10 - 50 m Sistemska višina: $h = S/14$ do $S/10$ Medsebojna razdalja: 4 - 10 m</p>	<p>Za dvorane velikih razponov so tročlenska paličja najprimernejši statični sistem, saj so statično določeni in s tem poenostavijo statičen izračun ter obenem omogočajo enostavnejšo izvedbo. Prav tako omogočajo enakomernjše obremenitve temeljnih tal.</p>
<p>Dvočlenski okvirno paličje</p> 	<p>Razpon: 10 - 60 m Sistemska višina: $h = 1/10$ do $1/15 L$ $\alpha \approx 3 - 8^\circ$ Medsebojna razdalja: 4 - 8 m</p>	<p>V primeru, ko členkasto povezavo v slemenu okvirja zamenjamo z togo povezavo, dobimo enostaven statičen nedoločen dvočlenski sistem. Primeren je predvsem za dvorane z velikimi strešnimi nosilnimi sistemi.</p>
<p>Dvočlenski palični lok</p> 	<p>Razpon: 40 - 120 m Sistemska višina: $h = L/40$ do $L/20$ $f = L/8 \pm L/5$ Medsebojna razdalja: 4 - 12 m</p>	<p>Primerno za različne predvsem športne dvorane z največjimi razponi. Ugodna geometrija pasov omogoča prevzem velikih obremenitev.</p>

4.2.4 Model geometrije ravninskega paličja

V splošnem predstavljajo paličja del dejanske tridimenzionalne konstrukcije, zaradi česar bi bilo potrebno celoten statični sistem modelirati s tridimenzionalnim modelom. Vsi elementi paličja, kot so leseni nosilci in prečne letve, so prav tako lahko modelirani kot tridimenzionalni nosilni elementi. V tem modelu morajo biti podane tako togosti povezav kot tudi vse ekscentričnosti elementov. Palični sistemi so lahko izpostavljeni torziji in izven ravninskemu upogibanju, pri čemer so prečne letve natezno, tlačno in upogibno obremenjene. Modeliranje celotnega paličja s tridimenzionalnim modelom je v praksi zelo zahteven in kompleksen problem, ki bi ga bilo potrebno še dodatno preiskati, preden bi bil uporaben v analizi [32].

Trenutno v programih ne modeliramo strešnih konstrukcij z realnim tridimenzionalnim modelom, ampak jih v splošnem razdelimo na preproste ravninske statične modele. Obremenitve so podane direktno na model paličja, pri čemer se vplivi prenašajo iz enega ravninskega paličja na drugega ter s tem posredno tvorijo tridimenzionalen model. Modeliranje celotnega paličja predstavlja le manjši problem v primerjavi z modeliranjem vozlišč [32].

V preteklosti so bili razviti različni modeli ravninskega paličja. Na sliki 35 so prikazani trije možni modeli paličja tipične trikotne oblike.



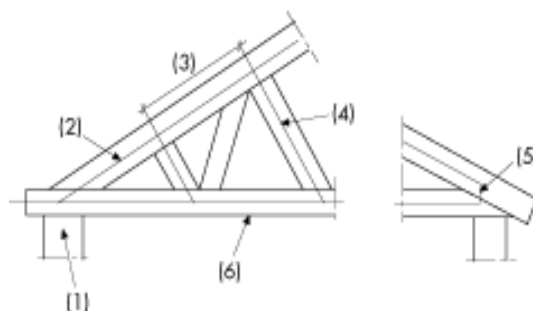
Slika 35: Trije možni modeli lesenega paličnega ostrešja, prirejeno po [32].

Model 1 je najbolj enostaven. Tu so vsi elementi modelirani kot linijski palični elementi, ki so medsebojno povezani z enostavnimi vozliščih. Porazdeljena obtežba je predstavljena kot točkovna obtežba, ki deluje v vozliščih. Ta model omogoča določanje notranjih sil z ročno analizo, pri čemer je porazdelitev momentov zajeta z enostavnimi faktorji [32].

Model 2 je naprednejši od prvega, saj so pasovi modelirani kot kontinuirani nosilci, ki so s prečnimi elementi povezani z preko kratkih pomožnih elementov. Ti elementi predstavljajo ekscentričnost med sistemsko linijo in posameznim vozliščem. Sistemska linija je pri tem modelu vedno bližja sredini lesenega elementa. Razporeditev momentov je podana neposredno na strešne nosilce. Vozlišča so izvedena v členkasti izvedbi, vendar se nahajajo na mestu sistemske linije [32].

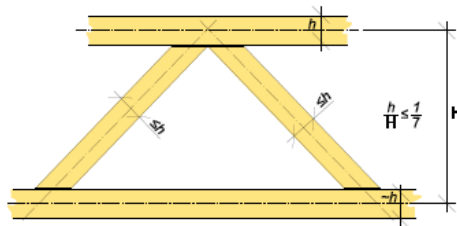
Model 3 vključuje spoj »heel joint« s fiktivnim paličnim elementom. To je model spoja, ki že omogoča prevzemanje večjih momentov. Togost spoja in posredno zaradi tega tudi razporeditev momentov je odvisna od mesta in togosti fiktivnega elementa. Fiktivni element poteka od zgornjega vozlišča na mestu stikovanja s strešnim nosilcem in do spodnjega vozlišča, ki se nahaja v bližini podpore. Togost fiktivnega elementa je v splošnem enaka togosti strešnega nosilca. Zaradi velikega vpliva razporeditve momentov so bile razviti tudi druge oblike »heel joint« modelov. Trenutno je model paličja na osnovi uporabe fiktivnega elementa najbolj uporabljen model pri komercialnih programih. Kljub temu je potrebno pri analizi dodatno upoštevati tudi deformacije vozlišč paličja [32].

Najbolj napreden je Foschijev model, ki vključuje tudi vpliv deformacij vozlišč na izračun notranjih sil [32].



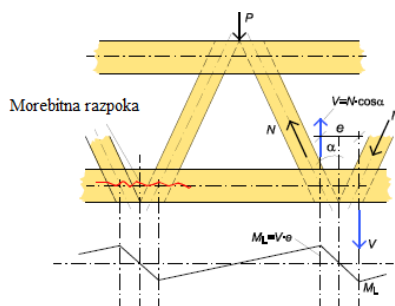
Slika 36: Primer statičnega modela paličja: (1) Podpora, (2) Sistemska linija, (3) Polje, (4) Notranji element, (5) Fiktivni element, (6) Zunanji element [33].

Pri realnih paličjih se pojavijo tudi dodatni momenti v paličnih elementih, ki jih pri idealiziranem modelu zanemarimo. Zaradi tega mora biti upogibna togost posameznega elementa paličja manjša v primerjavi z upogibno togostjo celotnega paličja. V tem primeru so upogibni momenti v vozliščih majhni in ne povzročajo večjih računskih napak ter jih zato ni potrebno upoštevati pri končnih izračunih. Pri paličju lahko v tem primeru predpostavimo členkaste povezave med elementi. Upogibna togost elementov paličja se lahko šteje za majhno v primerjavi z upogibno togostjo celotnega paličja, če razmerje dimenzij prečnega prereza elementa pasu h in sistemska višina paličja h ni večje od $1/7$ [3].



Slika 37: Razmerje med višino h prečnega prereza elementa in dimenzijo razdaljo med obema sistemskima osema pasov H , pri katerem lahko zanemarimo dodaten upogibni moment v vozlišču [3].

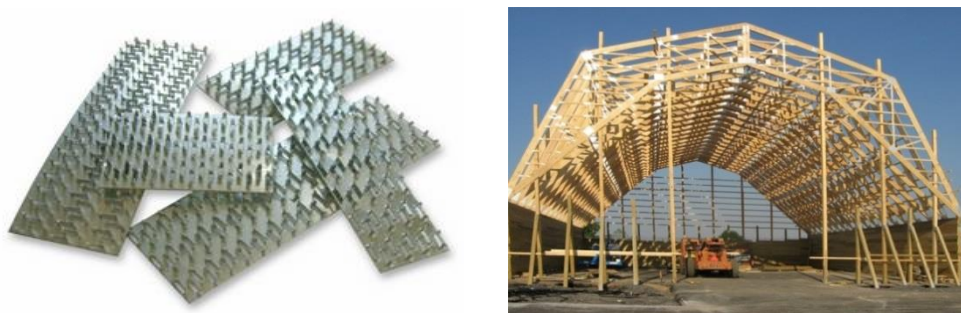
Poleg tega se je potrebno izogibati ekscentričnosti vozlišč, ki v elementih paličja povzročajo dodatne upogibne momente. Pri tem lahko pride do pojava prečnih natezni napetosti in posledično do nevarnosti cepljenja vlaken lesa.



Slika 38: Primer ekscentrično izvedenega spoja in pojav razpoke v lesu zaradi dodatnega upogibnega momenta, prirejeno po [24].

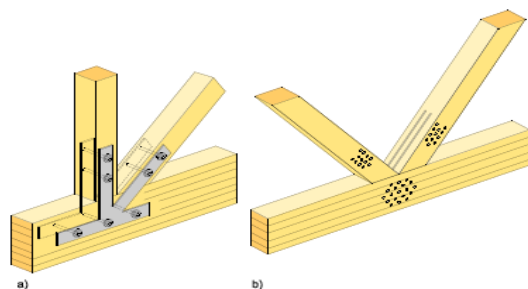
4.2.5 Vrste povezav med elementi paličja

Pri sodobnih lesenih lahkih paličnih sistemih se za spajanje najpogosteje uporabljajo krempljaste plošče [1]. Običajno sta v vozliščih paličja nameščeni dve simetrični plošči enakih velikosti. Paličja so proizvedena v proizvodnih obratih, kjer jih sestavijo in jim s pomočjo hidravlične stiskalnice vstavijo krempljaste plošče. Zaradi omejitev pri proizvodnji in transportu večjih strešnih paličij je potrebno zagotoviti tudi možnost spajanja posameznih delov na gradbišču. Krempljaste plošče se uporabljajo za strešne palične konstrukcije, ki lahko premoščajo razpone med 30 in 40 metri [32].



Slika 39: Primer krempljastih plošč in njihove uporabe pri konstrukciji hale [34].

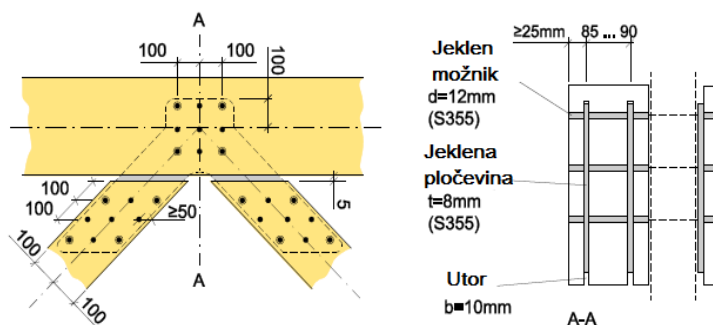
Poleg krempljastih plošč se pri lesenih paličjih uporabljajo tudi lepljeni spoji. Vendar pri konstrukcijah, ki dosegajo večje razpone, prevladujejo spoji, izvedeni s kombinacijo jeklenih pločevin in vijakov ali strižnih paličnih moznikov - trnov. Sodobna lesena paličja večjih razponov imajo spoje med pasovi in prečkami izvedene z vijaki ali jeklenimi paličnimi mozniki. Na mestu spoja se uporabljata dva načina namestitve jeklenih pločevin. Pri prvem načinu sta jekleni pločevini nameščeni na obeh zunanjih straneh elementa in privijačeni z vijaki (slika 40a) ali pa so jeklene pločevine nameščene znotraj spoja in povezane z jeklenimi trni (slika 40b).



Slika 40: Primer izvedbe spoja paličja z jeklenimi pločevinami pritrjenimi s pomočjo vijakov (a) in s pomočjo jeklenih trnov (b) [3].

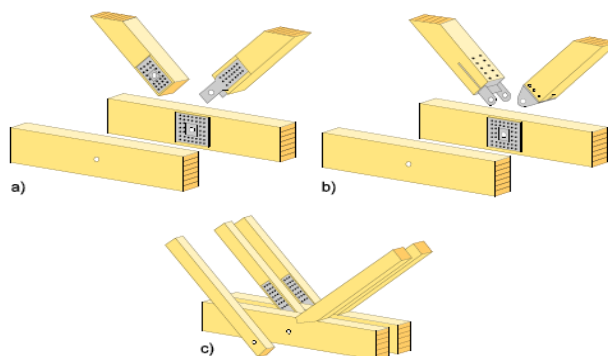
Mozničeni spoji z večjim številom jeklenih pločevin vgrajenih znotraj veznih elementov so primerni za paličja z katerimi lahko dosegajo razpone, večje od 80-ih metrov [24].

V preteklosti so bile na Norveškem in Švedskem zgrajene že številne palične konstrukcije, kjer so uporabili mozničene spoje z vmesnimi jeklenimi pločevinami. Pri teh konstrukcijah se vgradi večje število vmesnih jeklenih pločevin debeline $t = 8$ mm in jeklene moznike z premerom $d = 12$ mm. Elementi paličja so običajno iz lepljenega lameliranega lesa GL30c ali GL30h, odvisno od velikosti obremenitev. Jekleni deli spoja so običajno narejeni iz običajnega jekla kvalitete S355. Optimizacijo nosilnosti in duktilnosti konstrukcijskih spojev zagotovijo z ustreznim številom vmesnih jeklenih pločevin in medsebojnimi in robnimi razdaljami jeklenih moznikov. Pri velikem številu vmesnih jeklenih plošč je potrebno zagotoviti ustrezne dimenzije prečnega prereza lesenih elementov, ki omogočajo ustrezno nosilnost, kljub oslABLJENEM prerezu [3].



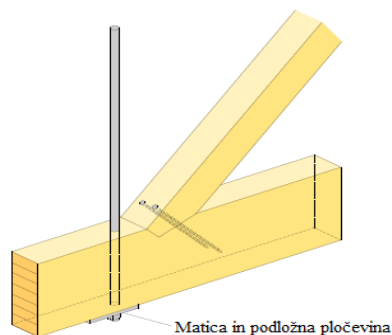
Slika 41: Primer tipičnega detajla spoja paličja iz jeklenih pločevin in jeklenih paličnih moznikov pogosto uporabljenega na Norveškem in Švedskem, prirejeno po [3].

Običajno so prečke paličja sestavljene iz dveh ali treh delov. Večji kot je razpon, večje so notranje sile v elementih in več paralelnih delov je potrebno. Slika 42 prikazuje tipične oblike takih spojev paličnih konstrukcij. V primeru spoja (a) in (b) se sila v prečko prenaša preko vijaka, ki poteka skozi vse elemente. Luknje v lesenih elementih (a) so običajno malenkost večje kot luknja pri veznih jeklenih pločevinah [24].



Slika 42: Primeri stikov paličja z dvema ali tremi prečnimi elementi [24].

V primeru, če so diagonalni elementi v tlaku (Howe paličje), se lahko za vertikalne elemente uporabljajo jeklene palice, ki pa v nobenem primeru ne smejo (morejo) biti tlačno obremenjene. Spoj z jekleno palico in lesenima pasoma je izveden tako, da je skozi pas izvrtana luknja, skozi katero se namesti jeklena palica, ki je zasidrana z matico in podložno pločevino, ki onemogoča iztrganje. V splošnem so lahko jeklene palice prednapete z določeno silo [24].



Slika 43: Detajl paličnega spoja s tlačno leseno diagonalo in natezno jekleno palico, prirejeno po [24].

4.2.6 Primeri izvedenih ravninskih paličnih konstrukcij

4.2.6.1 Trade Fair Hall 11

Razstavna hala Trade Fair Hall 11 se nahaja v nemškem mestu Frankfurt. Konstrukcija je bila dokončana leta 2009 in se razteza čez 196,7 m x 114,8 m veliko površino, v višino pa meri 27 m. Celotna konstrukcija prekriva 156 m x 76 m velik notranji prostor in z 11900 m² uporabne površine spada med največje razstavne stavbe v Frankfurtu [35].



Slika 44: Razstavna hala Trade Fair Hall 11 z leseno strešno konstrukcijo [36].

Razstavna hala ima dve etaži, pri čemer je prostor spodnje etaže omejen s podpornimi armirano betonskimi stebri, ki podpirajo stropno ploščo zgornje etaže. V zgornji etaži se nahaja odprt razstavni prostor brez vmesnih podpor, preko katerega se razteza veliko leseno ostrešje z razpetino 79 m. Sprva so načrtovali ostrešje v jekleni izvedbi, vendar so se tekom podrobnega načrtovanja odločili za leseno izvedbo. Poleg tega, da je bila izvedba v lesu cenejša od jeklene, je bilo odločilno tudi dejstvo, da ima leseno ostrešje za 100 ton manjšo maso od jeklenega in da je les obnovljiv in okolju prijazen material [35].



Slika 45: Leseno palično ostrešje hale [36].

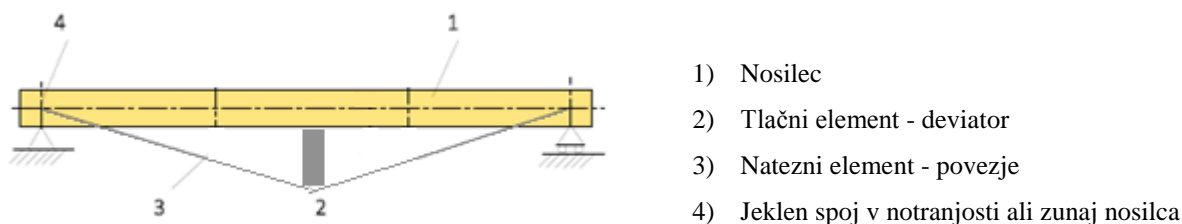
Ostrešje hale 11 je vrtljivo podprta konstrukcija, sestavljena iz lesenih paličnih nosilcev, z vzporednima pasoma z razponom 79 m in 17,4 m dolgima previsoma na obeh straneh. Lesena paličja so nameščena na medsebojni razdalji 10,4 m in podprta z armirano betonskimi stebri. Palični nosilci iz lepljenega lesa imajo maksimalno višino 6,6 m, diagonalne elemente pa imajo izvedene iz okroglih jeklenih palic. Vsaka diagonala je sestavljena iz ene ali dveh jeklenih vezi z zadostnim prerezemom za prevzemanje obremenitev. Diagonale, ki so pri gravitacijskih obtežbah natezne so dimenzionirane na lastno težo prevladujoče obtežne kombinacije. Sestavljene so iz dveh vzporednih okroglih jeklenih palic, nameščene v vsakem polju. Diagonale v nasprotni smeri so nameščene za primer dvizne obtežne kombinacije, ki se lahko pojavi v previsih ali v glavnem razponu. Dolgi previsi pa imajo diagonalne elemente izvedene iz lepljenega lesa in lahko opravljajo funkcijo vezi in razpor [35].

Zgornji pasovi paličja so med seboj povezani z lesenimi sekundarnimi nosilci. Ker previsi potekajo po vseh straneh stavbe, morajo sekundarni nosilci imeti zadostno konstrukcijsko višino, ki zagotavlja zadostno odpornost proti velikim upogibnim napetostim v previsih. Zaradi velikih obremenitev ima v dveh poljih na vsakem koncu stavbe vsak četrti sekundarni nosilec enako konstrukcijsko višino kot primarni palični nosilec. Prav tako pa so zaradi dolgih previsov po vseh štirih straneh morali zagotoviti ustrezno sidranje proti dvigu strehe. To so zagotovili z vgradnjo dodatnih jeklenih kablov, ki se aktivirajo v primeru vetrne dvižne sile in potekajo vzporedno z vertikalnim lesenim stebrom na mestu podpore [35].

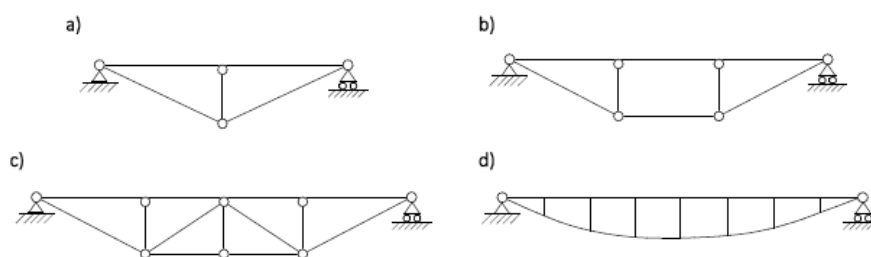
4.3 Tročlenski nosilci z povezjem

Za premoščanje večjih razponov, pri katerih uporaba običajnih grednih lepljenih nosilcev ni več ekonomsko upravičena in kjer ločnih in okvirnih nosilnih sistemov ni mogoče uporabiti zaradi različnih razlogov, je uporaba nosilnih sistemov s povezji bolj primerna. Za premoščanje manjših razponov se za osnovni material uporablja masiven les večjih nosilnosti, je pa za premoščanje večjih razponov lameliran lepljen les še vedno prevladujoč material. Najbolj pogosta oblika nosilnega sistema z povezjem, ki ga lahko štejemo med enostavne palične nosilne sisteme, je tročlensko povezje.

Prehodna oblika med običajnim grednim nosilcem in tročlenskim okvirnim nosilcem s povezjem je raven nosilec z nateznim povezjem, nameščenim na spodnji strani. Ta oblika paličja ima manj spojev, ki obenem omogočajo tudi lažje dimenzioniranje in izvedbo kot pri običajnih paličjih. Trenutno obstajajo na tržišču specializirana podjetja, ki proizvajajo prefabricirane jeklene elemente, ki se uporabljajo za natezne povezne elemente in njihove spoje. S tem nosilnim sistemom lahko premoščamo razpone, velike do 50 m [23].



Slika 46: Primer ravnega nosilca z spodnjim povezjem [23].

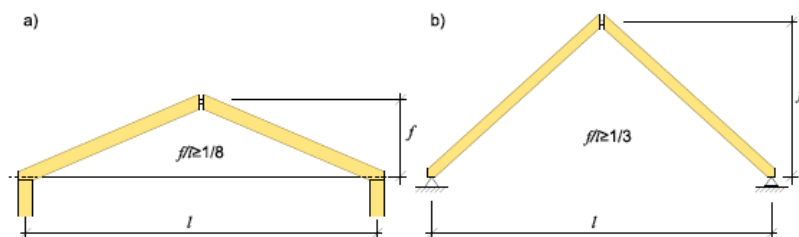


Slika 47: Statični sistemi prednapetih nosilcev (a-c) z različno razporejenimi tlačnimi elementi ali (d) s paraboličnim potekom povezja [24].

4.3.1 Oblike in vrste tročlenskih povezij

4.3.1.1 Tročlenski nosilci z vezmi

V najpreprostejši nosilni obliki so tročlenski nosilci z vezmi sestavljeni iz dveh nasprotno nagnjenih nosilcev, ki sta v slemenu medsebojno povezana s členkastim spojem. Na podoben način so členkasto pritrjeni na spodnjem koncu na nepremične temeljne opornike. Na mestu podpiranja sta lahko medsebojno povezana z natezno vezjo, običajno jekleno, ki zagotavlja večjo natezno nosilnost, kot pri leseni izvedbi. Natezna vez omogoča prevzem vodoravnih sil, ki jih povzročajo obtežbe, ki delujejo na tročlenski nosilec, zato je lahko taka konstrukcija v tem primeru podprta s stebri. V primeru, ko pa je konstrukcija podprta z nepomičnimi temeljnimi oporniki, pa se horizontalna sila lahko prenaša direktno v temeljna tla ali pa preko natezne vezi, ki je nameščena znotraj talne plošče. Nosilci so običajno s konstantno višino, vendar se lahko uporabljajo tudi druge oblike. Naklon strehe ne sme biti manjši od 14° , saj se sicer povečajo horizontalne sile in pomiki v slemenskem spoju in v podporah [23].



Slika 48: Tročlenski nosilci (a) z vezjo in (b) brez vezi [24].

Pri tročlenskem nosilcu, podprtem s stebri, je priporočljiv naklon strehe, ki je večji od 14° ($f/l \geq 1/8$), saj s tem omejimo pojav prevelikih pomikov v slemenu in na zgornjem mestu podpornih stebrov. V primeru, ko je tročlenski okvirni nosilec podprt direktno s temeljnimi oporniki, pa je priporočljiv naklon strehe, ki je večji od 30° ($f/l \geq 1/3$), saj je s tem zagotovljen zadosten prostor pod streho [24].

Lepljeni lamelirani nosilci so zasnovani kot upogibno in tlačno obremenjeni elementi, pri katerih je potrebno zagotoviti bočno stabilnost. Najpogosteje je bočna stabilnost zagotovljena z namestitvijo sekundarne konstrukcije v obliki strešnih leg, lahko pa se namestijo tudi strešni ploskovni elementi, kot so trapezne ploščevine. Poleg zagotavljanja bočne stabilnosti, sekundarne konstrukcije sodelujejo tudi pri prevzemu horizontalnih obtežb.

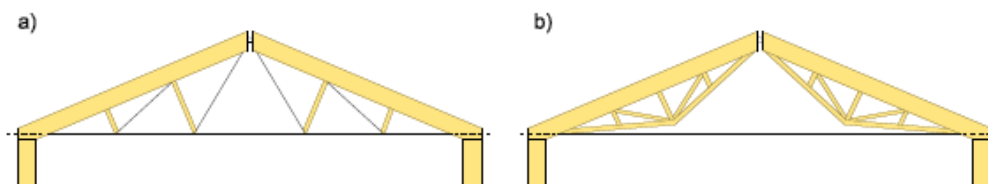
Natezni vezni elementi iz lepljenega lameliranega lesa se običajno uporabljajo za do 25 m velike razpone, pri večjih pa se uporabljajo jeklene vezi. Za velike razpone se najpogosteje uporabljajo vezi iz jekla zaradi visoke trdnosti, vendar je uporaba pogosto omejena zaradi deformacij, ki jih povzroča raztezanje nateznega elementa [23].

Spoj v slemenu se izvede kot členkast spoj, ki preprečuje prenos upogibnih momentov in je zasnovan za prenašanje velikega tlaka v horizontalni smeri. Ta tlačna sila je nasprotno enake velikosti, kot sila v nateznem elementu. V primeru obtežne kombinacije, pri kateri se zunanja obtežba razlikuje med posameznima polovicama strehe, se v slemenskem členkastem spoju pojavi še strižna obremenitev [23].

Ta tip nosilnega sistema je primeren za razpone med 15 in 50 metri. Za večje razpone je tročlenski okvirni nosilec zasnovan v kombinaciji z jeklenim povezjem in lesenimi oporniki [24].

4.3.1.2 Tročlenski nosilci z jeklenimi vezmi in lesenimi oporniki

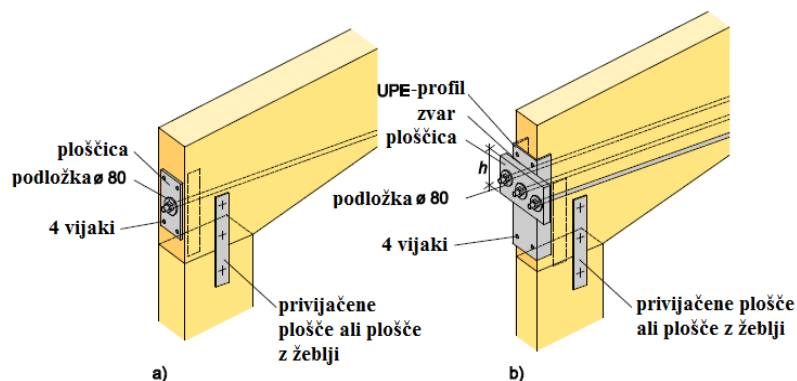
V primeru premoščanja velikih razponov nad 50 metrov je mogoče strešne nosilce pri tročlenskih okvirnih nosilcih zasnovati v kombinaciji z jeklenimi vezmi in lesenimi deviatorji. Zaradi uvedbe ene ali več vmesnih podpor se upogibni momenti v strešnih nosilcih zmanjšajo, medtem ko se vzdolžne sile povečujejo v enakem obsegu [23].



Slika 49: Tročlenski nosilci (a) z lesenimi razporami in jeklenimi vezmi (b) primarni nosilci podprti s sekundarno palično konstrukcijo [24].

Dolžina nateznega elementa se spreminja kot posledica obtežbe in temperaturnih sprememb ter morebitnih deformacij v vozliščih. Strešni nosilci so upogibno in tlačno obremenjeni. Pri teh elementih je potrebno zagotoviti stabilnost glede uklona in bočne zvrnitve.

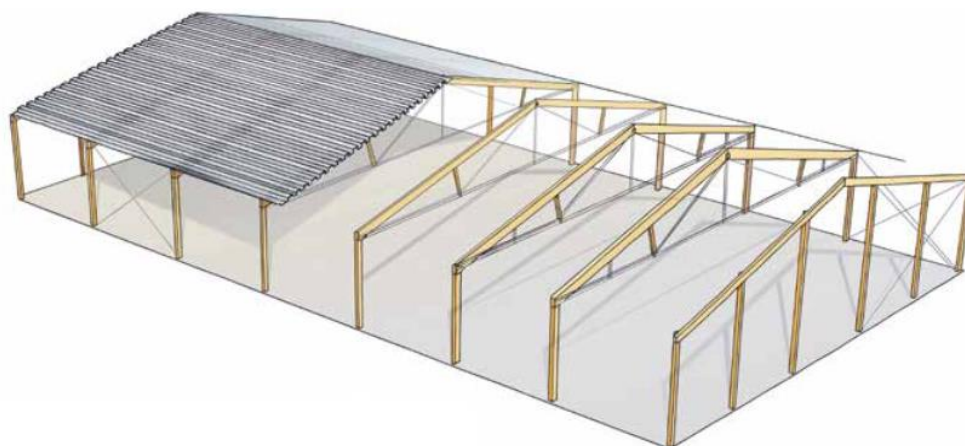
Zasnova nateznih vezi omogoča uporabo enostavnih in funkcionalnih vozlišč, saj lahko zato z izbiro ustreznega števila jeklenih palic povežemo vsako razporo z natezno vezjo in med seboj. V določenih primerih se lahko uporablja tudi jeklo visoke trdnosti [23]. Jeklene natezne palice so primerne za prevzem tako manjših kot tudi večjih nateznih sil. Za prevzem manjših sil se lahko uporabi samo ena natezna palica, ki poteka skozi središče lepljenega nosilca, v katerem je bila izvrtana luknja, natezna vez pa je nato s pomočjo sidrne plošče zasidrana na koncu lepljenega nosilca (slika 50a). Za prevzem večjih sil so lahko natezne palice nameščene na obeh straneh nosilca in tudi sredinska skozi središče nosilca, kot pri prvem primeru. V tem primeru UPE profil, nameščen na mestu sidrišča, s povečanjem kontaktne površine omogoča ugodnejšo razporeditev tlačnih kontaktnih napetosti (slika 50b) [24].



Slika 50: Tipična izvedba sidranja nateznih palic: (a) v primeru manjših nateznih sil, (b) v primeru večjih nateznih sil, prirejeno po [24].

4.3.2 Primer konstrukcij s tročlenskimi povezji

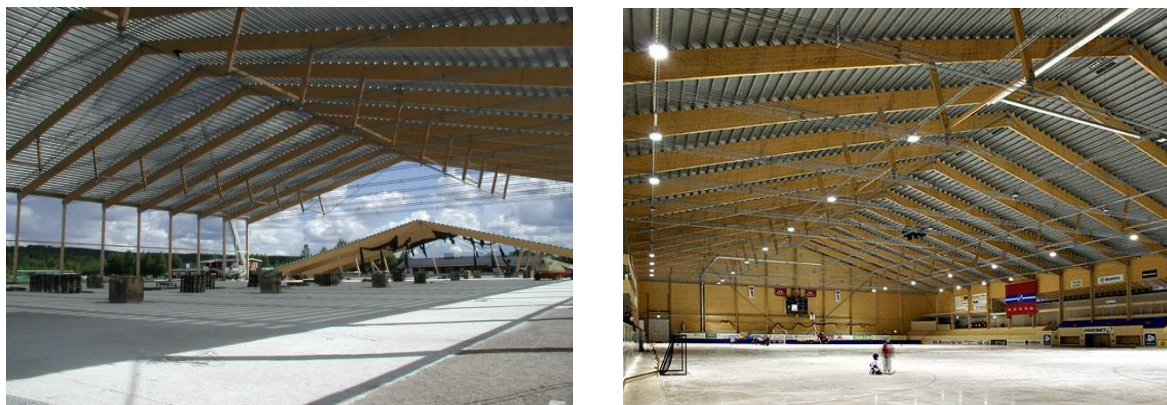
Tročlenska povezja se največkrat uporabljajo v kombinaciji s podporno konstrukcijo iz stebrov in skupaj tvorijo nosilni sistem, ki se uporablja za premoščanje večjih razponov. Pogosto se uporabljajo za nosilne sisteme športnih objektov, pri katerih je zaželen velik odprt prostor brez vmesnih stebrov, ki bi omejevali funkcionalnost prostora. Najbolj primeren nosilni sistem za doseganje teh pogojev so tročlenski okvirni nosilci z jeklenim povezjem in podporniki iz lepljenega lesa, s katerimi lahko premoščamo 70 ali več metrov velike razpone.



Slika 51: Tipičen tročlenski nosilni sistem z jeklenimi vezmi in razporami iz lepljencev [37].

4.3.2.1 Hokejska dvorana Dina Arena

Hokejska dvorana Dina Arena, ki je bila zgrajena v mestu Edsbyn na Švedskem je bila dokončana leta 2005. Sprejme lahko do 5000 ljudi in je namenjena igranju posebnega švedskega športa, ki se imenuje brandy (hokeju podoben šport). Dvorana se razteza na površini 120 m x 72 m, na mestu slemena pa dosega višino 23 metrov [38].



Slika 52: Hokejska dvorana s tročlenskim nosilnim sistemom z jeklenimi vezmi in lesenimi razporami [37].



Slika 53: Levo, detajl izvedbe spoja v slemenu; desno, slika strešne konstrukcije z jeklenimi vezmi [38].

Športni objekt je zgrajen s pomočjo tročlenskih nosilnih sistemov z jeklenimi vezmi in razporami iz lepljenega lesa, ki so nameščeni na stebre iz lepljenega lesa. Bočno stabilnost okvirne konstrukcije so zagotovili z jeklenim povezjem. Za nosilno konstrukcijo in za fasadne elemente je bil uporabljen lameliran lepljen les. Posamezni nosilci so dolgi 36 metrov. Dvorana ima 72 metrov razpona in izkazuje vse prednosti lameliranega lepljenega lesa. Ta jim je omogočil postopno gradnjo. Uporabili so 400 m³ lesa za nosilni sistem in 360 m³ lepljenega lesa za fasadne elemente in tribuno. Za strešno kritino so uporabili trapezno pločevino z vmesno izolacijo [38].

4.4 Portalni okvirji

Leseni portalni okvirji, ki so največkrat izvedeni iz lepljenega lameliranega lesa ali slojnatega furniranega lesa (LVL), so zelo pogosto uporabljeni sistemi pri sodobnih konstrukcijah velikih razponov. S pravilno zasnovo in izbiro ustreznih veznih sredstev lahko premoščajo celo 50 metrske razpone. Najprimernejši so za objekte z velikimi odprtimi prostori in visokimi stropi. Izvedba sistema iz lameliranega lesa predstavlja bolj ekonomično alternativo jeklenim okvirnim konstrukcijam,

uporabljenim pri javnih in industrijskih objektih. Njihova uporaba se je povečala zaradi številnih prednosti, ki jih ponuja lameliran les, predvsem zaradi prijetnega estetskega učinka in oblikovanja ter doseganja večjih dimenzij prečnih prerezov in ugodnih lastnosti glede razmerja med specifično težo in nosilnostjo, ki je le dve tretjini razmerja teže/nosilnosti pri jeklu in samo ena šestina tega razmerja pri armiranem betonu [39].

4.4.1 Statični sistem okvirjev

Portalni okvirni nosilni sistemi so najbolj pogosto uporabljeni ravninski statični sistemi za lesene konstrukcije velikih dimenzij. V splošnem so portalni okvirji lahko izvedeni kot togi, dvočlenski ali tročlenski (slika 54). Na mestu členkastega spoja je omogočena prosta rotacija, zaradi česar se upogibni momenti ne morejo prenašati na druge elemente, vendar lahko obenem prenašajo vpliv osne sile in prečne sile. V praksi po navadi ni potrebno zagotoviti popolnega članka, v katerem bi se lahko element prosto rotiral, ampak lahko členek modeliramo z manj togim spojem, pri katerem je omogočena dovolj velika rotacija [40]. Pri statični zasnovi portalnih okvirjev so običajno členki nameščeni na mestu priključka med temelji in elementi ter na sredini ali na najvišjem delu razpetine celotne konstrukcije. Glede na vrsto in število členkastih spojev delimo portalne okvirne nosilne sisteme na tri osnovne oblike :

Togi portalni okvirji

Vsi elementi okvirnega sistema so med seboj in s temelji povezani s togimi spoji, zaradi česar so upogibni momenti manjši in bolj enakomerno porazdeljeni po elementih, kot pri drugih dveh sistemih. Upogibni momenti v primerjavi z vrtljivo podprtim nosilcem, pri katerem so upogibni momenti na sredini elementa večji, zahtevajo manjši prečni prerez. Pri togih okvirjih je značilno tudi, da se tako upogibni moment kot tudi sile prenašajo v temelje, zato se večinoma uporabljajo za premoščanje srednje velikih razponov, pri katerih so upogibni momenti, ki se prenašajo v temelje, manjši [40]. Sistem togega okvira je sicer res najbolj ekonomičen, ima pa najbolj neugoden mehanizem prenašanja obremenitev v temeljna tla, zato je njegova uporaba upravičena v primerih dobro nosilnih temeljnih tal [41]. Pri lesenih konstrukcijah je zelo redko uporabljen, saj ne omogoča prostih deformacij v primeru krčenja in nabrekanja lesa, poleg tega pa je v primeru velikih razponov potrebno celotno konstrukcijo razdeliti na manjše segmente in jih spojiti na mestu gradnje, izvedba togih spojev pa je pri lesenih konstrukcijah zelo težko izvedljiva in tudi dražja.

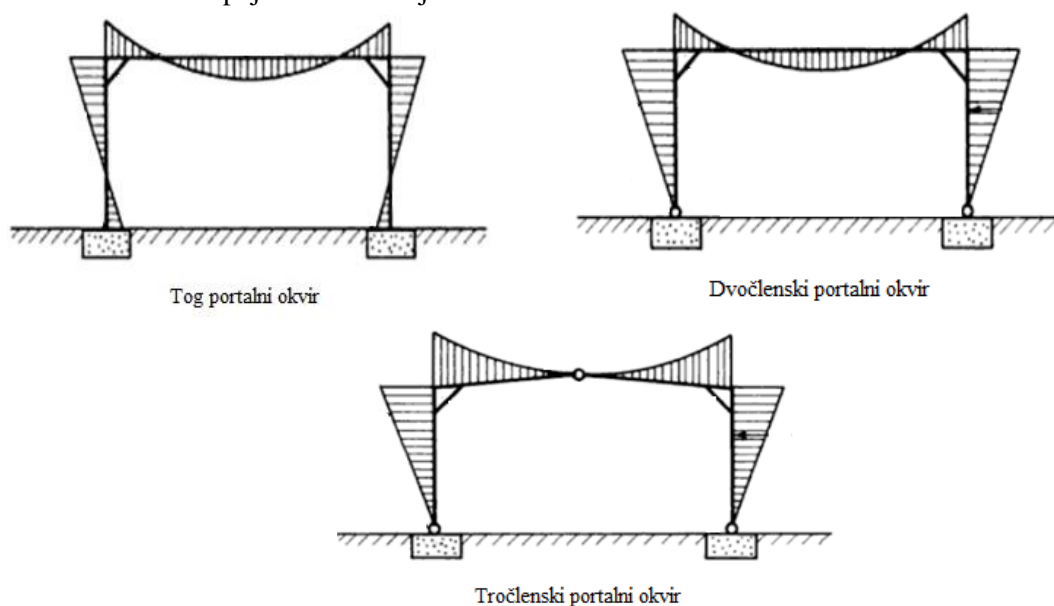
Dvočlenski portalni okvirji

Pri tej obliki okvirja sta uporabljena členkasta spoja na mestu temeljev, ki omogočata prosto rotacijo. Upogibni momenti se zato ne prenašajo v temelje, kar sicer omogoča boljše pogoje za prevzem obremenitev, vendar se posredno zaradi tega v okviru povečajo največji upogibni momenti.

Dvočlenski portalni okvirji se uporabljajo za konstrukcije, pri katerih slabo nosilna temeljna tla ne morejo prevzemati večjih obremenitev zaradi pojava velikih upogibnih momentov na mestu podpiranja.

Tročlenski portalni okvirji

Ta zasnova omogoča stabilen sistem proti delovanju horizontalnih sil v svoji ravnini in je statično določen. Poleg tega omogoča, da obremenitve zaradi neenakomernega posedanja temeljev ali nepredvidenih deformacij, v stikih nimajo vpliva na razporeditev momentov v elementih okvirja. Upogibna obremenitev se zato ne prenaša v temeljna tla, kot pri običajnih okvirjih s togim vpetjem, ampak se momenti porazdelijo po elementih. Največji upogibni momenti se pojavijo na vogalnih mestih, zaradi česar morajo biti prečni prerezi elementov na teh mestih večji. Tročlenski portalni okvirji so zaradi svoje statične določenosti enostavnejši za konstruiranje in omogočajo enostavnejšo gradnjo, saj je konstrukcija lahko sestavljena iz vsaj dveh prefabriciranih elementov, ki sta na mestu členkov enostavno spojena med seboj.

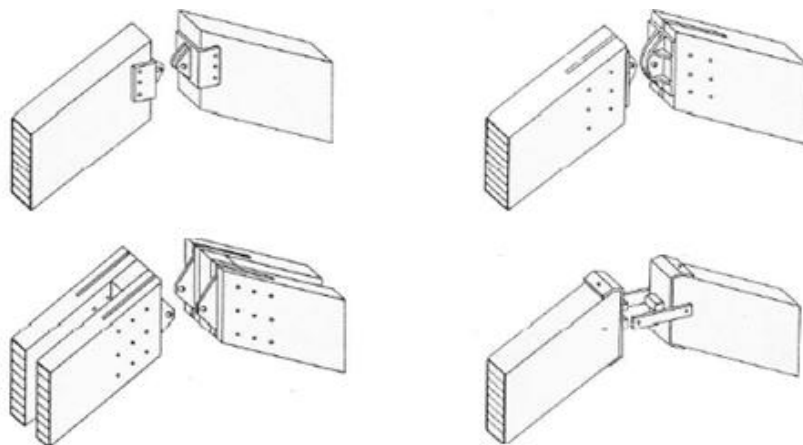


Slika 54: Razporeditev upogibnih momentov pri togem, dvočlenskem in tročlenskem portalnem okvirju, prirejeno po [40].

4.4.2 Vrste lesenih portalnih okvirjev

Leseni portalni okvirji so najpogosteje uporabljeni kot tročlenski. Izvedeni so predvsem iz lepljenega lesa, ki poleg velike trdnosti omogoča tudi ukrivljene oblike. Tročlenski portalni okvirji so v osnovi sestavljeni iz lepljenih nosilcev, ki so medsebojno povezani s posebej oblikovanimi členkastimi spoji na tak način, da predstavljajo statično določeno konstrukcijo. Vsak del strešnega nosilca se stika v skupnem slemenskem ali kronskega členkastem (angl. crown hinge) spoju, ki omogoča vzpostavitev ravninskega statičnega sistema z različnimi nakloni strehe. Kronskega členkasti stiki so izvedeni na

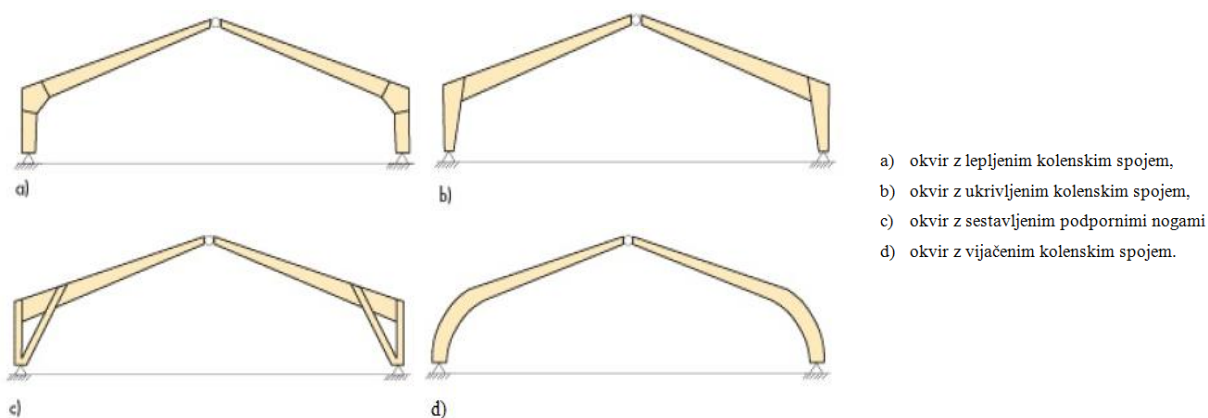
različne načine, saj so v veliki meri odvisni od specializiranih proizvajalcev veznih sredstev. Proces gradnje portalnih okvirjev poteka zelo hitro, saj velika stopnja prefabrikacije spojev in elementov omogočata enostavno in hitro spajanje posameznih elementov v končno okvirno konstrukcijo. Najbolj običajne izvedbe slemenskih spojev so predstavljene na spodnji sliki in se pogosto uporabljajo tudi pri ločnih konstrukcijah.



Slika 55: Prikaz tipičnih izvedb slemenskih (kronskih) členkastih spojev pri lesenih okvirjih [42].

Spoji v slemenskem delu so izdelani iz jeklenih plošč, ki so na lepljena lesena nosilca pritrjeni z vijaki ali trni. Večina spojev ima iz jekla oblikovan tečaj, ki omogoča v fazi montaže enostavno izvedbo spojitve posameznega elementa z vgradnjo jeklenega zatiča.

Različne horizontalne obremenitve, ki se pojavijo v ravnini okvirja, se prenašajo na strešne nosilce in preko posamezne podporne noge preko členkasto izvedenih temeljnih podpornikov v temeljna tla. Na mestih stika med strešnim nosilcem in podporno nogo se izvedejo toge povezave, ki morajo prenašati velike obremenitve, predvsem upogibne. Pri dvo in tročlenskih okvirjih so podporne noge izvedene na različne načine in so lahko sestavljene tudi iz več delov.



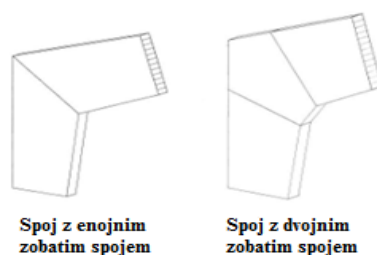
- a) okvir z lepljenim kolenskim spojem,
- b) okvir z ukrivljenim kolenskim spojem,
- c) okvir z sestavljenimi podpornimi nogami
- d) okvir z vijačenim kolenskim spojem.

Slika 56: Prikaz različnih izvedb tročlenskih lesenih okvirjih [23]

Glede vrste in načina izvedbe kolenskih spojev (angl. knee joints) se portalni okvirji delijo na različne vrste:

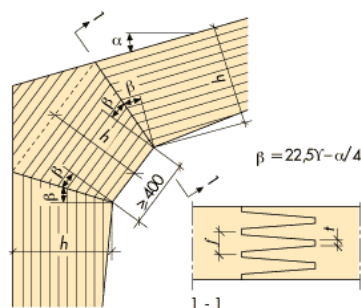
Tročlenski okvir z zobatim kolenskim spojem

Ti nosilni sistemi se uporabljajo pri konstrukcijah, s katerimi lahko premoščamo tudi 40 metrov velike razpore. Pri tej vrsti okvirja se za stikovanje strešnega nosilca in podporne noge uporabi posebna vrsta spoja, ki omogoči vzpostavitev portalnega okvirnega sistema in ob tem predstavlja bolj ekonomično alternativo izvedbi okvirja z ukrivljenimi lameliranimi lepljenci [43].



Slika 57: Dve vrsti izvedbe zobčastih stikov pri okvirjih, prirejeno po [42].

Kolenski stik je lahko izveden z enojnim ali dvojnimi zobatimi lepljenimi stikom (slika 57). Pri priključku z dvojnimi zobatimi lepljenimi stikom je običajno sestavljen iz spojnega kosa iz lepljenega lesa, ki ima oblikovane dolge zobate stike, ki omogočajo učinkovitejše medsebojno povezovanje in zagotavljajo večjo trdnost spoja. Tak spoj omogoča togo povezavo med podporno nogo in strešnim nosilcem in zagotavlja odpornost proti povečanim upogibnim momentom, ki se na tem mestu pojavijo pri tročlenski zasnovi okvirjev [23].

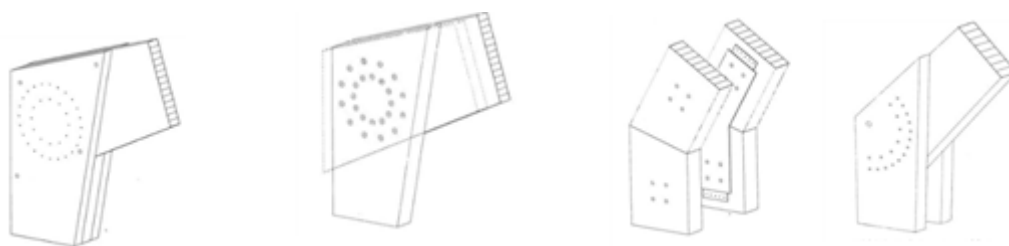


Slika 58: Prikaz detajla izvedbe lepljenega zobatega spoja [23].

Tročlenski okvir z vijachenim kolenskim spojem

Pri tej vrsti okvirja je kolenski spoj običajno zasnovan tako, da je na strešni nosilec privijačena podporna noga, sestavljena iz dveh delov. Druga možnost izvedbe spoja je uporaba samo enega elementa, pritrjenega z jeklenimi strižnimi ploščami, ki so privijačene na zunanji strani elementa. Višini prečnega prereza podporne noge in strešnega nosilca sta lahko enaki, vendar mora imeti vsak del podporne noge 0,6 do 0,7 kratno širino strešnega nosilca [23].

Vijaki morajo biti razvrščeni glede na minimalne predpisane razdalje glede na središče priključka. Za doseganje večje togosti in nosilnosti spoja lahko poleg vijakov uporabimo tudi druga vezna sredstva. Pri spoju lahko uporabimo jeklene moznike, ki so praviloma cenejši in jih je lažje namestiti, vendar mora imeti spoj poleg tega nameščene vsaj štiri vijake. Za zagotavljanje robustnosti spoja vijake razvrstimo v koncentrične kroge, pri čemer ni priporočljivo uporabiti več kot dveh krogov vijakov. Iz izkušenj se je izkazalo, da je pri preverjanju nosilnosti spoja najbolj pogosto kritična strižna nosilnost [23].

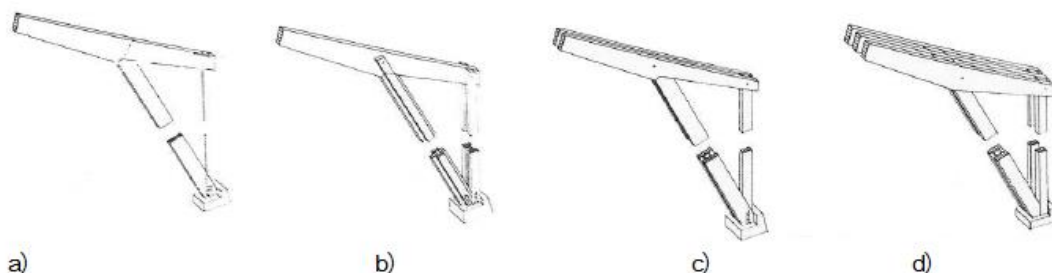


Slika 59: Prikaz različnih vijačenih kolenskih spojev [42].

Tročlenski okvir s sestavljeno podporno nogo

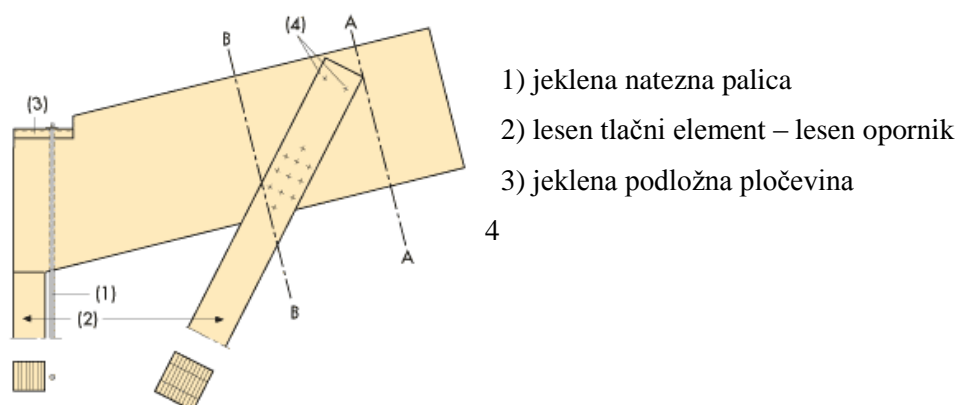
Sestavljena podpora noga je lahko oblikovana na različne načine. Podporna noga je lahko sestavljena iz tlačnega in nateznega dela (Slika 60):

- noga z enojnim tlačnim lesenim elementom ter z jekleno natezno palico,
- noga z enojnim tlačnim lesenim elementom z dvojno stransko ojačitvijo iz lesenih desk in z dvojnimi nateznimi lesenimi elementi na robu,
- noga z dvojnimi tlačnimi deli pritrjena na dvojni nosilec in z enojnim nateznim delom in
- noga z dvojnimi tlačnimi deli pritrjena na trojni nosilec in z dvojnimi nateznimi deli.

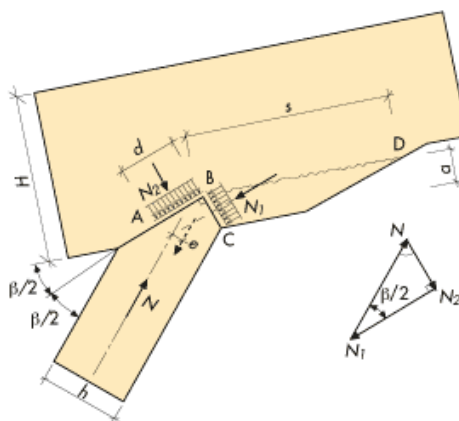


Slika 60: Različne oblike sestavljenih podpornih nog okvirjev [42].

Zunanja podpora noga pri okvirju mora prevzeti osne obremenitve, ki se pojavljajo v kombinaciji z momentno obremenitvijo zaradi vetra. Na tem mestu pride do velikih nateznih sil, ki jih lahko prevzamemo z nateznimi jeklenimi palicami, ki so sidrane v temelju. Natezni elementi morajo biti priključeni na zgornji strani strešnega nosilca, saj s tem zmanjšamo verjetnost pojava cepljenja lesa. Upogibne in tlačne obremenitve pa prevzame navadna lesena opora (Slika 61) [23].



Slika 61: Detajl sestavljene podporne noge z vijachenim stikom med strešnim nosilcem in oporo [23].



Slika 62: Detajl kontaktnega tlačnega priključka med strešnim nosilcem in podporno nogo [23].

Notranja podporna noga se obnaša kot steber, ki je tlačno in upogibno obremenjen. Upogibne obremenitve so običajno posledica ekscentrične obremenitve. Povezava med strešnim nosilcem okvirja in podpornimi nogami je zasnovana tako, da pride do prenosa tlačnih sil v glavnem na spodnjem robu strešnega nosilca okvirja preko kontaktnega stika na podporno nogo (Slika 62) [23].

Tročlenski okvir z ukrivljeno podporno nogo

Z ukrivljenostjo okvirne konstrukcije dosežemo velik estetski učinek, zato je uporaba takega okvirja zelo zaželena pri gradnji sakralnih objektov in večjih dvoran. Glede na ostale oblike okvirjev lahko z ukrivljenimi okvirji premoščamo razpone, tudi do 50 metrov. Za doseganje večjih razponov pa posameznih polovic okvirja ni več mogoče transportirati v enem kosu [44].

Pri ukrivljenih okvirjih so najbolj pogoste tri oblike:

- Vbočno ukrivljen okvir, pri katerem sta strešni nosilec in podporna noga izdelana iz neprekinjenih lamel, ki so ukrivljene v dveh nasprotnih smereh (Slika 63). Ta oblika je največkrat uporabljena pri gradnji sakralnih objektov.



Slika 63: Uporaba vbočno ukrivljene okvirne konstrukcije pri sakralnem objektu [45].

b) Ukrivljen okvir brez dodatnega vogalnega elementa (slika 64)



Slika 64: Uporaba ukrivljene okvirne konstrukcije pri kopališkem objektu [45].

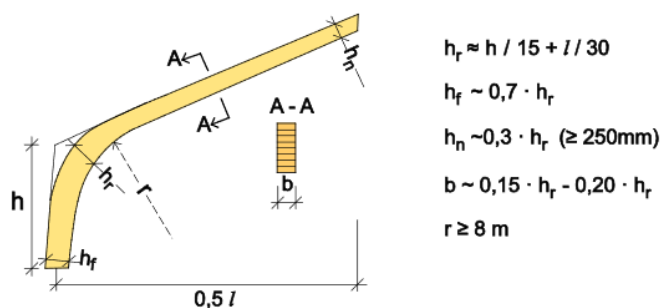
c) Ukrivljen okvir z dodatnim vogalnim elementom (slika 65)



Slika 65: Uporaba ukrivljene okvirne konstrukcije z lepljenim vogalnim elementom [45].

Ukrivljene lamele potekajo neprekinjeno od temelja do vrha okvirne konstrukcije. Lamelle teh elementov morajo biti zaradi krivljenja tanjše in so uporabljene tudi na mestih z ravno osjo, kjer sicer niso potrebne, zato je na teh ravnih delih lameliran les s tanjšimi lamelami neekonomično uporabljen, saj tanjše kot so uporabljene lamele, dražji je lameliran element.

Posebno pozornost je potrebno nameniti izbranemu radiju ukrivljenosti v območju podporne noge (slika 66). Priporočljiv radij ukrivljenosti naj bi bil večji od 8 metrov, obenem pa naj bi bila debelina lamel med 1,6 – 2,5 cm. Manjši radiji se lahko uporabljajo, vendar je za njihovo izvedbo potrebno uporabiti tanjše lamele, ki pa prinesejo višje stroške [23].



Slika 66: Radij ukrivljenosti pri ukrivljeni okvirni konstrukciji [24].

4.4.3 Primeri okvirnih konstrukcij

Okvirne nosilne konstrukcije se uporabljajo za etažne strešne konstrukcije, kjer se premoščajo večji razponi z velikimi odprtimi prostori brez vmesnih stebrov, ki bi drugače omejevali funkcionalnost stavbe. Okvirna lesena gradnja je v zadnjih letih zelo razširjena zaradi velike stopnje prefabrikacije gradnje in posledično hitrejše gradnje. Uporablja se tako za gradnjo javnih, kot tudi za gradnjo industrijskih stavb. Razširjena je v številni državah, uporablja pa se predvsem za gradnjo trgovinskih centrov, skladiščnih in proizvodnih hal.



Slika 67: Primer uporabe ukrivljene okvirne konstrukcije za jahalno šolo [23].



Slika 68: Primer športne dvorane za curling, iz ukrivljenih lepljenih okvirjev, Calgary, Kanada [46].

4.5 Strešni ločni nosilni sistemi

4.5.1 Splošno o ločnih sistemih

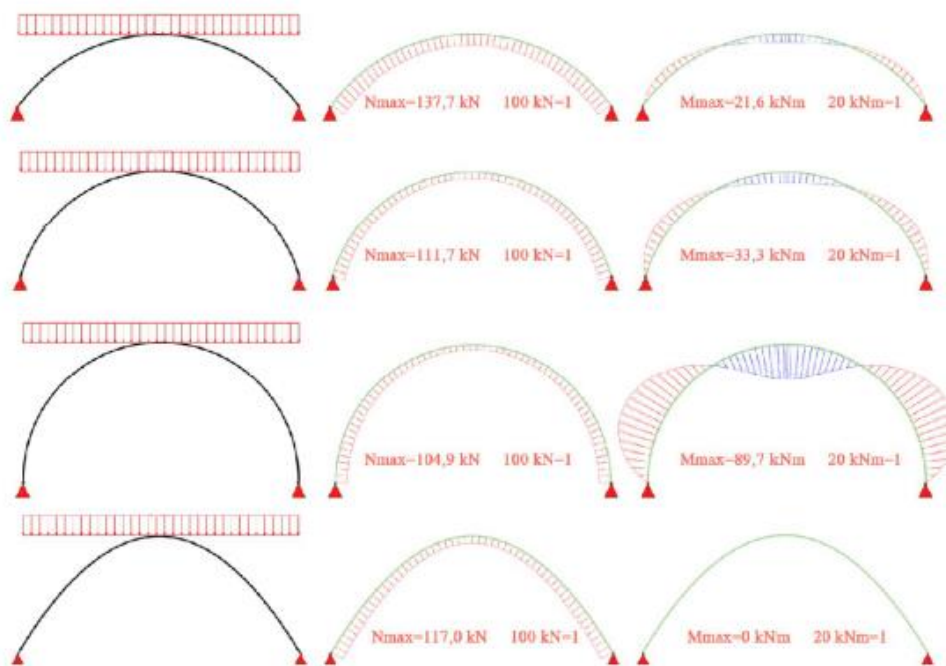
Lok je eden osnovnih in najpogosteje uporabljenih linijskih konstrukcijskih elementov za konstrukcije velikih razponov. Na osnovi geometrijskih oblik loka so bili razviti številni konstrukcijski nosilni sistemi. Najprej je bil razvit ločni nosilni sistem, nato kupolasti nosilni sistem in kasneje še enostavni in dvojno ukrivljeni lupinasti nosilni sistemi.

Razvoj novih sodobnih materialov, med katere spada tudi lamemeliran lepljen les, katerega lahko poljubno krivimo, je omogočil, da se les uporablja tudi pri ločnih nosilnih sistemih. Značilnosti obnašanja loka so odvisne od številnih parametrov. Med najbolj pomembnimi je izbira statičnega sistema, geometrija prečnega in geometrija vzdolžnega prereza ter razpona in puščice loka. Glede na poznavanje vzdolžne geometrije loka, npr. razpona in puščice loka, jih delimo v tri različne skupine. Loke lahko zato v odvisnosti razmerja med razponom in puščico loka, delimo na plitke, če je razmerje večje od 4, srednje globoke, če je razmerje med 1 in 4, če pa je razmerje manjše od 1, pa na globoke. Vendar pa se pri zasnovi ločnih sistemov pojavita dva glavna problema. Prvi je zasnova loka, ki mu mora omogočati, da je lok samostojec in drugi problem je ustrezna zasnova podpor, ki morajo omogočati prevzem velikih horizontalnih sil. Stabilnost lokov in njihova lastnost, da so samostojeci, je tesno povezana z obliko tlačne linije ali opornice (angl. thrust line) [47].

4.5.2 Geometrija ločnih nosilnih sistemov

Loki so v osnovi ukrivljeni nosilci, ki imajo velik radij v primerjavi z dimenzijami prečnega prereza. Pri tem pa geometrijska oblika loka predstavlja eno izmed najpomembnejših karakteristik, saj je od nje odvisna vrsta in razporeditev napetosti, ki se pojavijo v loku. Neodvisno od vrste obtežbe je pri ločnih sistemih osna tlačna sila prevladujoča v primerjavi z upogibnimi momenti in prečnimi silami. Tlačna osna sila se pojavi zaradi nepomičnih podpor loka in zaradi ukrivljene oblike ločnih osi, ki imajo najpogosteje krožno, parabolično ali obliko polinoma višjega reda [47].

V primeru loka parabolične oblike je upogibni moment vedno enak nič. S puščico loka pa lahko reguliramo velikost osne sile. Manjša kot je puščica loka večje horizontalne sile se pojavljajo na mestu podpiranja (Slika 69).



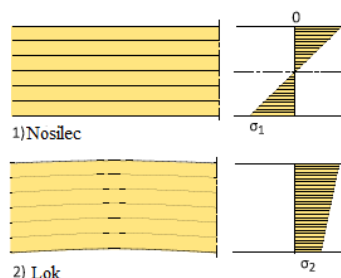
Slika 69: Diagrami osnih sil in upogibnih momentov krožnih in parabolčnih lokov [47].

4.5.3 Veliki strešni ločni sistemi iz lameliranega lesa

V primeru strešnih konstrukcij velikih razponov so leseni ločni nosilni sistemi najprimernejša rešitev tako iz nosilnega kot tudi iz estetskega vidika. Ne samo, da loki omogočajo vitko zasnovane konstrukcije brez vmesnih podpor lahko z njimi dosegamo tudi velike razpone, saj jim oblika poleg tega omogoča tudi učinkovito izkoriščanje tlačne trdnosti lesa [48].

Ločna oblika konstrukcije je zelo primerna za izvedbo iz lepljenega lesa, saj brez večjega povečanja stroškov omogoča proizvodnjo elementov ukrivljenih oblik različnih dimenzij. Običajno so uporabljeni pravokotni prečni prerezi konstantne višine, vendar se za doseganje večjih razponov uporabljajo tudi sestavljeni I ali škatlasti prečni prerezi, tudi v kombinaciji z drugimi materiali. Izbira najbolj funkcionalne in učinkovite oblike loka je odvisna od zagotavljanja tako imenovane tlačne linije, ki je za vsako vrsto obtežbe drugačna. Lok, ki natančno sledi tlačni liniji in je izpostavljen le vertikalni obremenitvi, bo obremenjen samo tlačno po celotni dolžini, brez dodatnih upogibnih momentov. Če je obtežba enakomerno porazdeljena, je linija v obliki parabole, v primeru točkovno razporejene obtežbe pa je oblika poligonalna, vendar se obtežbe ali obtežne kombinacije, kot so lastna teža, sneg, veter, asimetrična in ekscentrična obtežba tako snega kot tudi vetra pri večini konstrukcij običajno razlikujejo od idealnih porazdelitev, saj tlačna linija loka ne more zadostiti vsem pogojem obtežnih kombinacij in mora biti oblika izbrana v odvisnosti od največje prevladujoče obtežbe ali dolgotrajne obtežbe na tak način, da bo lok ob različnih obtežnih kombinacijah imel kar se da optimalno razporeditev tlačnih napetosti s čim manjšimi upogibnimi momenti [23].

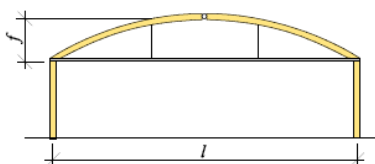
Zaradi dejstva, da ločni sistemi bolje izkoriščajo material, je konstrukcijska višina loka samo $1/3$ višine običajnega ravnega upogibnega nosilca enakega razpona in obtežbe. Primer razlike razporeditve napetosti po prerezu ravnega upogibnega nosilca v primerjavi z lokom je prikazan na spodnji sliki [23].



Slika 70: Upogibna napetost v obremenjenem nosilcu (1) se spreminja po prerezu. Tlačne napetosti so na vrhu in natezne na spodnjem robu. V težišču prereza so napetosti enake 0. Lok (2) pa ima po celotnem prerezu samo tlačne napetost [23].

Odlične konstrukcijsko oblikovne možnosti lepljenega lesa skupaj z veliko nosilnostjo omogočajo gradnjo konstrukcij velikih razponov. Po svetu so bile že zgrajene konstrukcije z razponi preko 100 metrov.

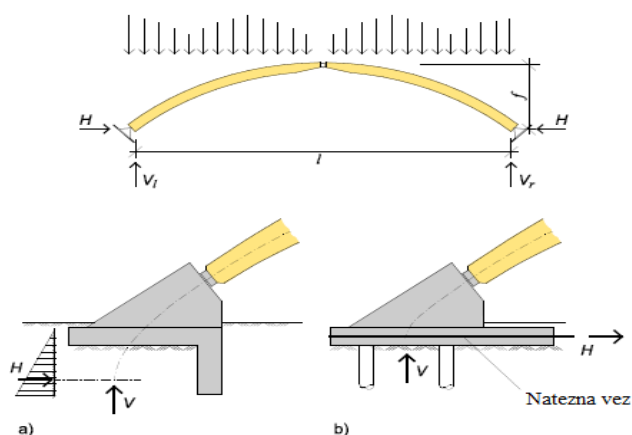
Najbolj pogosto je uporabljena krožna oblika loka, za večje razpone pa je bolj ekonomična uporaba paraboličnih lokov. Razmerje med puščico in razponom f/l je običajno $0,14 - 0,15$. Za povečanje svetle višine blizu podpor se lahko izbere tudi eliptična ali druga oblika loka. Drug način povečanja svetle višine je namestitev loka na stebre (slika 71) [24].



Slika 71: Ločni nosilni sistemi z natezno vezjo podprti s stebri [24].

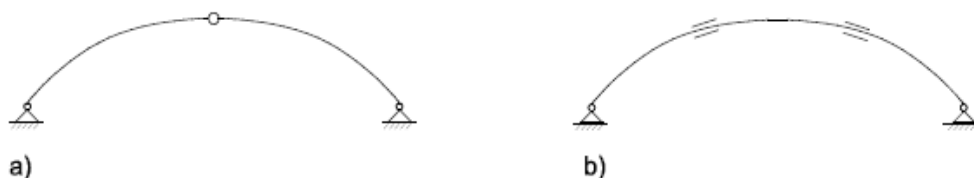
Vpliv ločnega mehanizma povzroči pojav horizontalnih reakcijskih sil na mestu podpor. Za prevzem teh sil loki zahtevajo ustrezno podpiranje, ki ga lahko zagotovijo z ustreznimi temelji ali pa z posebnimi nateznimi vezmi. Te so lahko vidne (slika 71) ali pa so pri konstrukcijah hal nameščene pod talno ploščo. V primeru, ko je ločna konstrukcija nameščena direktno na temeljno betonsko ploščo ali podporno konstrukcijo in imajo temeljna tla zadostno nosilnost, se lahko horizontalna sila prenaša direktno v temeljna tla (slika 72a), če pa so temeljna tla slabše nosilna, se horizontalno silo prevzame z nateznimi vezmi, ki so nameščene pod temeljno ploščo ali pa so vlite kar v ploščo (slika 72b). Zaradi omejevanja velikosti horizontalnih reakcijskih sil mora biti puščica loka f enaka ali večja od $0,14$

razpetine. V primeru parabolične in krožne oblike je ta kot nagiba na mestu podpor enak 30° . Običajno pa je smiselno izbrati razmerje med puščico in razponom f/l med 0,14 in 0,30 [24].



Slika 72: Lok nameščen direktno na temelje, kjer se horizontalna sila prenaša (a) preko temeljnih podpornikov, (b) preko natezne vezi v temeljni plošči, prirejeno po [24].

Pri ločnih nosilnih sistemih so nekatere lastnosti odvisne predvsem od števila členkastih spojev. Ustrezna izbira med dvo ali tročlenskim sistemom je podobna kot pri portalnih okvirjih. Glavna slabost dvočlenskega loka je v tem, da je statično nedoločen in je zaradi tega občutljiv na spremembe vlažnosti v lesu ali posedkov temeljnih tal, zato so najpogosteje leseni ločni sistemi zasnovani kot tročlenski loki s členkastimi spoji v podporah in s členkastim spojem v temenu. Poleg tega so statično določeni, kar omogoča enostavne izračune in niso občutljivi na posedanje temeljev. Prav tako so stabilni v svoji ravnini in ne prenašajo nobenih upogibnih momentov v temeljna tla. Tročlenski loki so uporabljeni za konstrukcije z razponi med 60 in 70 m. Za konstrukcije večjih razponov se zaradi oteženega transporta posameznih prevelikih elementov lok razdeli na tri ali več segmentov (slika 73b) ter se jih nato s ustreznimi spoji poveže med seboj na mestu gradnje. Ti spoji morajo biti togi, priporočljivo pa je, da se nahajajo na mestih majhnih momentov [24].

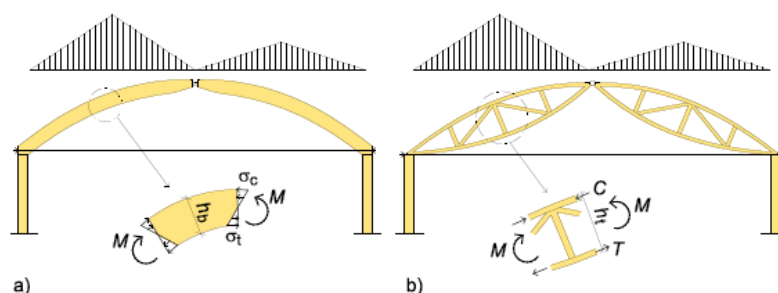


Slika 73: Statični sistem (a) tročlenskega loka, (b) dvočlenskega loka s priporočenimi mesti togih povezav [24].

Uporaba ločnih sistemov pa ni priporočljiva pri konstrukcijah, ki so podvržene velikim točkovnim obtežbam. Posamezna točkovna obtežba bo povečala razdaljo med tlačno linijo in težiščno linijo ločne konstrukcije ter tako povečala upogibne momente, zato velike točkovne obtežbe odločilno vplivajo na obnašanje ločnega konstrukcijskega sistema, saj le-ta omogoča veliko odpornost predvsem v tlaku

[24]. V primeru strešnih konstrukcij z večjo enakomerno razporejeno lastno težo so vplivi točkovne obtežbe manjši, ker lastna teža omogoča neke vrste »prednapetje« ločnega sistema.

Med obtežbami strešnih konstrukcij je sneg največkrat prevladujoča in največja obtežba. V standardu SIST EN 1991-3 in nekaterih nacionalnih predpisih upoštevajo nakopičenje snega s trikotno razporejeno obtežbo na obeh straneh loka. Takšna obremenitev povzroči v loku izjemno velike upogibne momente, še posebej v primeru velikih razponov. Ta učinek se lahko zmanjša s povečanjem ročice notranjega momenta. To lahko dosežemo z ustrežno izbiro strešne konstrukcije, pri kateri je vsaka polovica strehe sestavljena iz ukrivljenih paličnih konstrukcij. Pri tem sta spodnji in zgornji pas paličja vsake polovice strehe nasprotno ukrivljena [24].

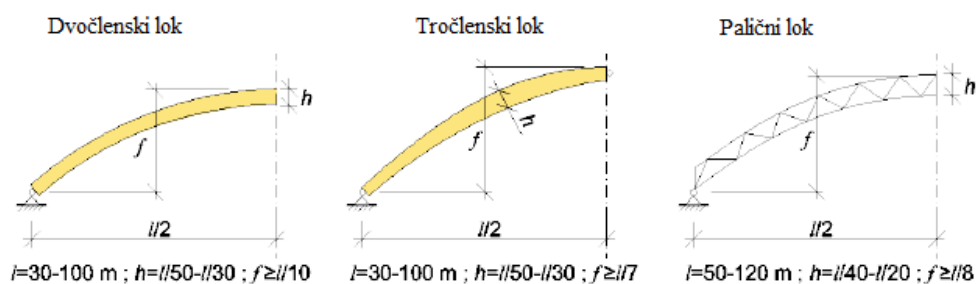


Slika 74: Trikotno porazdeljena obtežba ločnih konstrukcij (a) običajni lok (b) palična konstrukcija sestavljena iz ukrivljenega spodnjega in zgornjega pasu z vmesnimi paličnimi elementi. Nosilno konstrukcijo (b) si lahko predstavljamo kot tročlenski palični sistem [24].

Če so loki radialno razporejeni, dobimo kupoli podobno obliko. Pri pravi kupoli se pojavi tudi učinek lupin, ki zahteva posebno tangencialno zasnovano strukturo. V primeru velikih razponov, še zlasti, če se območje, ki ga želimo premoščati razteza v več smereh, je uporaba kupol zelo primerna rešitev. V tem poglavju sem se osredotočil predvsem na ravninske ločne nosilne sisteme.

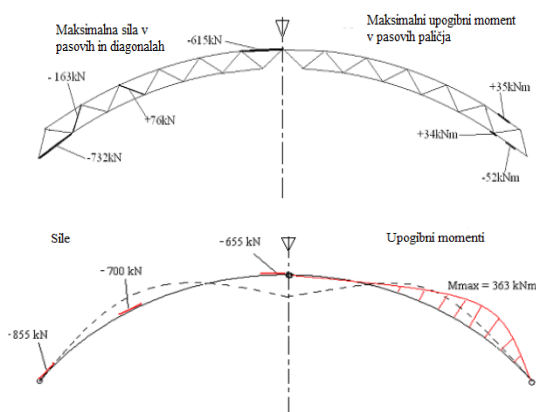
4.5.4 Možni razponi lokov

V splošnem sta oblika in običajno tudi puščica loka določeni iz arhitekturnega ali funkcionalnega vidika. Zaradi ekonomičnosti in omejitev horizontalnih reakcij v podporah je potrebno upoštevati razmerja dimenzij ločnih sistemov.



Slika 75: Trije različni tipi lokov z možnimi razponi, prirejeno po[24].

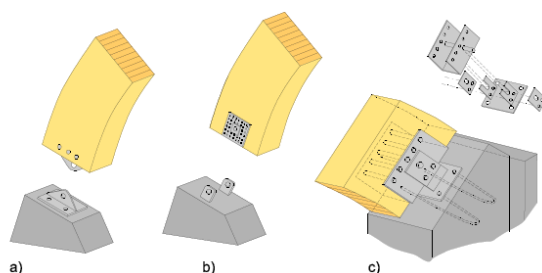
Za doseganje največjih razponov so najprimernejši palični loki. Pri primerjavi notranjih sil so pri preprostem tročlenskem loku v primerjavi s paličnim lokom večji predvsem upogibni momenti (slika 76), a to ni edini razlog, da so palični loki konkurenčnejši v primerjavi z drugimi oblikami lokov. Pri 100 in več metrskih razponih lokov sta pomembna dejavnika tudi proces gradnje in montaže. To pomeni, da se konstrukcija razdeli na več delov, se nato transportira in sestavi na mestu gradbišča. Pri povezavah med posameznimi segmenti je zelo težko doseči zadostno togost, saj je potrebno zagotoviti neprekinjeno togost celotnega loka. Ta problem je manj izrazit pri paličnih lokih, saj se lahko pri njih uporabljajo delno togi spoji [48].



Slika 76: Osne sile in upogibni momenti pri paličnem zgoraj in pri polnem tročlenskem loku spodaj pri simetrični enakomerni obtežbi 10kN/m, prirejeno po [48].

4.5.5 Spoji v podporah

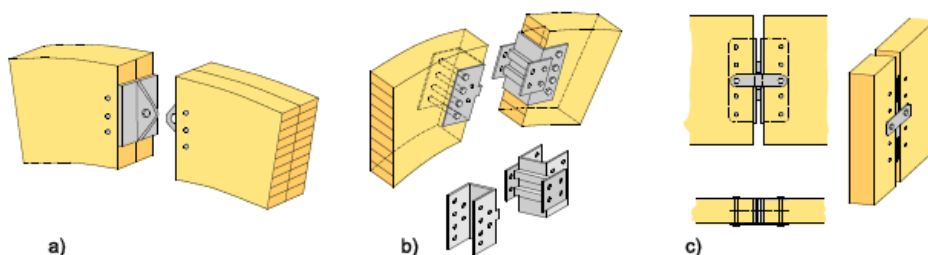
Spoji v podporah pri dvo ali tročlenskih lokih so zasnovani bolj ali manj kot členkasti spoji, ki omogočajo prosti zasuk v svoji ravnini in s tem onemogočajo prenašanja upogibnih momentov v temeljna tla. Za majhne razpone do okoli 25 m se zaradi zmanjšanja stroškov uporabljajo nepopolni členkasti spoji. Kljub temu, da se prenašajo momenti, so ti tako majhni, da jih ni potrebno upoštevati pri zasnovi loka, ampak samo pri dimenzioniranju podpore in sidrišča. Pri večjih razponih pa so sile v podporah tako velike, da je potrebno zagotoviti popolno členkasto oblikovano podporo, kot je bila predvidena pri statični zasnovi [23].



Slika 77: Spoji podpor loka z (a) členkastim diskastim spojem pritrjenim na tlačno ploščo, (b) jekleno vezno pločevino in tečajem, (c) stransko U jekleno pločevino in sornikom [24].

4.5.6 Spoji v temenu

Spoji v temenu tročlenskih lokov prenašajo horizontalne in vertikalne sile. Upogibni moment na mestu spoja je tako majhen, da ga ni potrebno upoštevati pri izračunih. Členkast spoj ne sme preprečevati zasukov posameznega dela loka, saj lahko v nasprotnem primeru pride do dodatnih napetosti, ki bi povzročile nepredvidene poškodbe, še posebej nevarne so napetosti pravokotno na lesna vlakna [48].



Slika 78: Spoji v temenu z (a) zmožničeno jekleno ploščo s tečajem in sornikom, (b) stransko jekleno pločevino in tečajem, (c) notranjo jekleno pločevino, tečajem in bočnima zavarovalnima pločevinama [48].

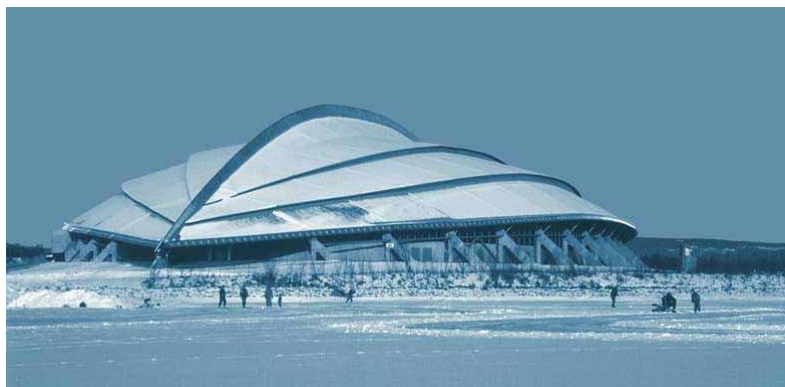
4.5.7 Primeri velikih strešnih lokov

Po svetu so bile zgrajene že številne ločne konstrukcije velikih razponov. Razširjene so predvsem v državah z razvito lesnopredelovalno industrijo. Zaradi možnosti pokrivanja razsežnih prostorov z velikimi površinami so najpogosteje namenjeni predvsem za športne objekte. Najdemo jih lahko tako v Evropi, predvsem v centralnem delu, v skandinavskih državah, kot tudi v Severni Ameriki. Tu se Kanada ponaša tudi z največjo ločno konstrukcijo Richmond Olympic Oval areno s kar 100 m razponom.

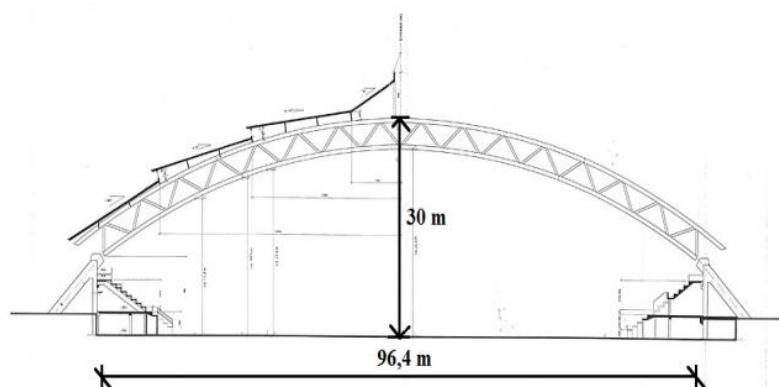
Na Norveškem so v začetku 90-ih let za namen zimskih olimpijskih iger leta 1994 zgradili številne lesene športne dvorane velikih razponov [48]. Z uporabo lesa so svetovni javnosti želeli prikazati tedanje zmožnosti lesene gradnje. Zaradi dobrih lastnosti lesenega ločnega nosilnega sistema so ga uporabil pri dveh večjih športnih dvoranah.

4.5.7.1 Hamar olympic hall – The Viking Ship

Večnamenska športna dvorana Hamar Olympic Hall ali Viking Ship arena, je bila zgrajena v mestu Hamar za namen zimskih olimpijskih iger v Lillehammerju leta 1994. Dokončana je bila leta 1992. Arhitekti so se pri oblikovanju zgledovali po narobe obrnjeni tradicionalni obliki ribiškega čolna oselver, ki je že 1000 let značilen za Norveško. Dvorana je dolga 260 m in prekriva 27000 m² velik prostor. Posebnost lesene konstrukcije je tudi v tem, da se nahaja na območju z velikimi količinami snega, zato je bila dimenzionirana na obtežbo snega 3,5 kN/m² [3].



Slika 79: Lesena športna dvorana The Viking ship v Hamarju [49].



Slika 80: Dimenzije najdaljših paličnih lokov, prirejeno po [48].



Slika 81: Lesena konstrukcija med gradnjo [50]

Primarna nosilna konstrukcija je sestavljena iz 17 paralelnih tročlenskih paličnih lokov z 10-imi različnimi razponi, pri čemer največji meri kar 96,4 m, največja višina stavbe pa je 37 m. Razdalja največjega ločnega paličja med sistemskima linijama obeh pasov meri 3,45 m. Tročlenski palični loki imajo trikotno oblikovano mrežo, pri kateri so vozliščni spoji izvedeni z jeklenimi ploščami, ki so nameščene znotraj elementov in pričvrščeni z jeklenimi paličnimi mozniki - trni. Zaradi zahtevane oblike ostrešja, ki ponazarja narobe obrnjen čoln, so dodali še hrbtni lok, ki je nameščen predvsem zaradi estetskega izgleda in poteka po celotni dolžini konstrukcije. Hkrati pa omogoča raznos obtežbe

med prečne loke. Podprt je s preostalimi prečnimi paličnimi loki. Ločni okvirji so podprti z armiranobetonskimi stebri, ki omogočajo prevzem horizontalnih obremenitev. Za zagotavljanje bočne stabilnosti paličnih lokov so med posameznimi spodnjimi in zgornjimi pasovi paličja nameščene prečne lesene lege, ki potekajo po celotni dolžini konstrukcije (slika 82). Zunanje in notranje stene so obložene z lesenimi paneli, ki so zaščiteni pred zunanjimi vplivi [51].



Slika 82: Notranjost lesene športne dvorane z jasno vidnimi bočnimi podporami [50].

4.5.7.2 The Richmond olympic oval

Večnamenska dvorana je bila zgrajena za zimske olimpijske igre, ki so se odvijale v Kanadskem mestu Vancouver leta 2010. Dvorana obsega 47000 m² veliko površino. Načrtovana je bila za izvedbo hitrostnega drsanja v času olimpijskih iger, po koncu iger pa služi kot visoko zmogljiva športna dvorana za raznovrstne športe. Glavna dvorana ima približno 100 m velik razpon, ki preko celotne dolžine konstrukcije prehaja v ukrivljen previsen nadstrešek. Lesena športna dvorana je zanimiva predvsem zaradi raznolike uporabe lesenih proizvodov in tehnik še posebej zaradi dveh vidikov. Za primarno nosilno konstrukcijo so uporabili hibridni lameliran lepljeni leseni in jekleni ločni nosilni sistem. Pri sekundarnem nosilnem sistemu pa so uporabili inovativne montažne panelne sisteme iz vezanega lesa [52].



Slika 83: Zunanost lesene športne dvorane The Richmond Olympic Oval [53].

Primarni dvočlenski ločni nosilni sistem je sestavljen iz dveh 1,6 m visokih ukrivljenih lepljenih nosilcev V profila, ki sta med seboj povezana z jeklenimi ogrodji. S tem je zagotovljeno učinkovito

obnašanje hibridnega paličja, ki spada med največje loke take vrste na svetu. Celotna strešna konstrukcija je sestavljena iz 14-ih lokov, ki so nameščeni na medsebojni razdalji 14,3 m. Vsak lok je sestavljen iz 4-ih manjših, 24,7 m dolgih segmentov, ki so jih nato v fazi montaže spojili med seboj in s tem dosegli celovit razpon. Podprti so s poševnimi armirano betonskimi stebri, ki omogočajo prevzem velikih horizontalnih sil. Previsni nadstreški na južni in severni strani objekta, ki segajo čez obodne stene, so podprti z lesenimi lameliranimi stebri, ki so s členkasto oblikovanimi jeklenimi spoji pritrjeni na armiranobetonske stebre [52].



Slika 84: Gradnja ločnega lesenega ostrešja [54].



Slika 85: Notranjost športne dvorane [55].



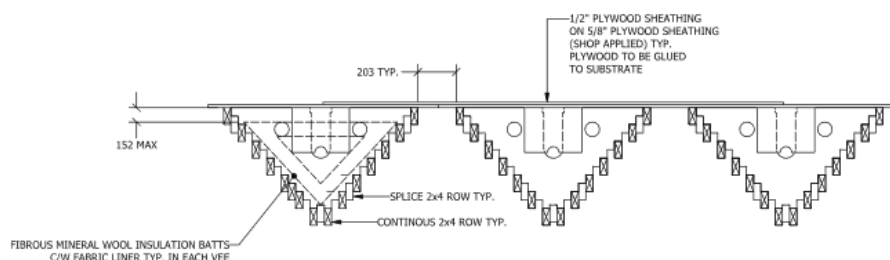
Slika 86: Hibridni ločni nosilec [52].



Slika 87: Podporna armiranobetonska konstrukcija [56].

Zaradi dobrih lastnosti lesa v tlaku so za sekundarni nosilni sistem med ločne nosilce, namesto konvencionalnih prečnih bočnih ojačitev iz lepljenega lesa in jeklene strešne kritine, namestili inovativne ukrivljene nosilne lesene panele. Ta edinstveni nosilni sistem, ki ga je prav za ta projekt razvilo podjetje StructureCraft Builders Inc. in je znan pod imenom Woodwave Structural Panel® (slika 88) je sestavljen iz konstrukcijskega lesa dimenzij 38 mm x 89 mm, vezanega lesa in prednapetega jekla. Za celotno strešno konstrukcijo so uporabili 450 lesenih panelov [52].

Tipičen WoodWave strešni panel je sestavljen iz treh paralelnih V nosilcev. Vsako nosilec predstavlja votel, trikotno oblikovan lok, ki je dolg 12,8 m, širok 1,2 m in 66 cm visok. Med seboj so povezani z dvoslojno, 28 mm debelo membrano iz vezanega lesa, kar omogoča oblikovanje kompozitnih 3,6 x 12,8 m velikih panelov. Na mestu gradnje so posamezne panele s pomočjo vrhnjega sloja vezanega lesa povezali med seboj in s tem ustvarili diafragmo. Kotne noge trikotnega prečnega prereza loka so sestavljene iz lesenih letev, ki so spojene med seboj na tak način, da so med deskami vrzeli, ki omogočajo prosto potovanje zraka v prerez, kar ustvarja odlične akustične lastnosti. Zaradi votle zasnove panelov so vanj namestili vso potrebno strojno inštalacijo in sprinkler gasilni sistem, s katerim so zadostili še zahtevam požarnih predpisov [52].



Slika 88: Prečni prerez WoodWave strešnih panelov [57].



Slika 89: Dvigovanje WoodWave strešnih panelov [58].

4.6 Lesene prostorske konstrukcije

4.6.1 Splošno o prostorskih konstrukcijah

Lesene prostorske konstrukcije lahko razumemo kot tridimenzionalni konstrukcijski sistem, ki je sposoben prenašanja vseh obremenitev naravnost v podporne sisteme in temelje. Celotno prostorsko konstrukcijo si lahko predstavljamo kot en element – prostorski objekt. Pri načrtovanju in testiranju prostorskih konstrukcij je potrebno upoštevati medsebojno sodelovanje posameznih nosilnih elementov, poleg tega pa ni mogoče uporabiti poenostavitve z razstavitvijo prostorskih konstrukcij na posamezne neodvisne dele, saj to ne bi ponazarjalo realnega obnašanja konstrukcije [59].

Razvoj prostorskih konstrukcij poteka zadnjih 50 let v tesni povezavi z razvojem računalniških tehnologij in programske opreme. Napredna orodja so omogočila oblikovanje poljubnih oblik elementov in nosilnih konstrukcij. Ta razvoj je opaziti tudi na področju lesenih prostorskih konstrukcij [59].

Uporaba prostorskih konstrukcij prinaša določene prednosti v primerjavi z ravninskimi konstrukcijami in sicer [59]:

- vsi konstrukcijski elementi prispevajo k nosilnosti, kar pogosto privede do prihranka pri količini uporabljenega materiala,
- obtežbe se bolj enakomerno razporedijo po podporah,
- omogočajo večji izbor načinov podpiranja in večjo raznolikost oblik,
- pomiki so v primerjavi z ravninskimi konstrukcijami s podobno lastno težo manjši,
- prostorske konstrukcije omogočajo visoko stopnjo varnosti proti poružitvi. Porušitev omejenega števila elementov ne vodi nujno k poružitvi celotne konstrukcije, zato imajo posledično dobro odpornost proti poškodbam povzročenih zaradi požara, eksplozij in potresnih aktivnosti,
- prostorske konstrukcije so običajno modularne, kar omogoča visoko stopnjo prefabrikacije in s tem povezane prednosti, kot so natančnost gradnje, lažji transport in montaža,
- pri prostorskih nosilnih konstrukcijah je namestitev raznovrstnih inštalacij lažja,
- prostorske konstrukcije omogočajo veliko raznolikost pri oblikovanju, poleg tega pa lahko s standardnim modulom ustvarimo raznolike ravne prostorske mreže, mrežaste lupine in konstrukcije svobodnih oblik. Te konstrukcije imajo lahko zelo estetski in neobičajen izgled.

Uporaba prostorskih konstrukcij pa prinaša tudi nekaj slabosti, kot so [59] npr. :

- njihova cena je visoka, ko jih primerjamo z alternativnimi konstrukcijskimi sistemi, še zlasti pri manjših razponih, kjer je bolj smotrna uporaba ravninskih okvirnih sistemov,

- številčnost in kompleksnost spojev lahko zahteva daljši čas montaže na gradbišču, kar je odvisno predvsem od izbire vrste spojev in modularne mreže,
- zaradi velikega števila in relativno velike površine elementov prostorskih konstrukcij je v primeru zahteve po večji požarni odpornosti njihova izvedba dražja.

4.6.2 Razdelitev prostorskih konstrukcij

Prostorske konstrukcije lahko razdelimo glede na različne kriterije. Osnovna razdelitve se lahko izvedejo glede na:

- geometrijsko obliko,
- konstrukcijske zasnove in
- vrsto površin.

4.6.3 Geometrijska oblika

Geometrijske oblike prostorskih konstrukcij lahko razvrstimo glede na različne vidike. Površine prostorskih konstrukcij je mogoče ustvariti s translacijo ali rotacijo segmentov ali krivulj po načelu opisne geometrije. Na primer, cilindrično površino lahko definiramo kot rotacijsko površino, tvorjeno iz rotacije črte okoli središčne osi ali kot translacijsko površino, tvorjeno iz translacije krožnice po ravni liniji. Podobno lahko definiramo tudi hiperbolične paraboloidne površine kot linijsko površino, ki jo tvorimo s translacijo parabole na hiperboli. Geometrijske oblike je potrebno opredeliti z vidika statičnega obnašanja in konstrukcijske analize, saj ima ukrivljenost največji vpliv na statično učinkovitost prostorskih konstrukcij [59].

Prostorske konstrukcije lahko glede na geometrijsko obliko razdelimo na:

- ravne ploščaste prostorske konstrukcije (ang. Slab spatial structures),
- zložene (nagubane) ploskovne konstrukcije (ang. Folded plate structures),
- lupine z enojno ukrivljenostjo in
- lupine z dvojno ukrivljenostjo.

4.6.4 Konstrukcijska zasnova

Konstrukcijska zasnova zajema način realizacije posamezne geometrijske oblike. Na primer valjasta ploskev je lahko zasnovana v obliki obokov ali pa je lahko valjasto ukrivljena ploskev zasukana in ima zato visečo zasnovo [59]. V nekaterih primerih ima lahko konstrukcija tudi šotorasto obliko, katere primer je konstrukcija lesene reciklirane tovarne na Dunaju.

4.6.5 Vrste površin

Nosilni del ravnine prostorskih konstrukcij (brez strešne kritine in izolacijskih slojev) je lahko oblikovan kot kompaktna konstrukcija, pri kateri se lahko debelina spreminja v odvisnosti od velikosti obremenitev. Ta konstrukcijska vrsta se imenuje neprekinjena konstrukcija. Mrežasta struktura nastane v primeru, ko je površina sestavljena iz paličij, ki lahko ležijo v ravnini ali na ukrivljeni ploskvi in so medsebojno povezani v vozliščih [59].

Glede na vrsto nosilnih elementov lahko prostorske konstrukcije delimo na palične, kompaktne ali kombinirane konstrukcije. Palične konstrukcije so sestavljene iz prostorsko razporejenih in medsebojno spojenih palic. Kompaktne konstrukcije so kot zložene plošče, lupine pa so sestavljene iz ploskovnih elementov. Kombinirana konstrukcija je oblikovana iz medsebojno povezanih palic in ploskovnih elementov, ki so v vozliščih in na robovih pritrjena na paličja [59].

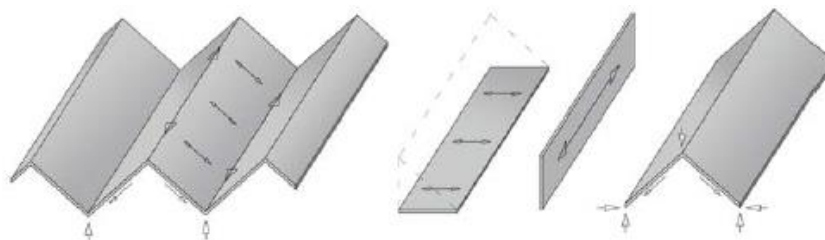
4.6.6 Vrste prostorskih strešnih konstrukcij

4.6.6.1 Zložene (nagubane) ploskovne konstrukcije

Nagubane konstrukcije so ene izmed najbolj učinkovitih nosilnih sistemov. Sestavljene so iz nagnjenih tankostenskih elementov. Lesene zložene ploskovne konstrukcije se uporabljajo že od prve polovice 20. stoletja. Stene so bile običajno izdelane iz plošč velikih površin, najpogosteje iz vezanega lesa, med seboj pa so bile povezane pod kotom $40^\circ - 50^\circ$. Prednost teh konstrukcij je predvsem v veliki oblikovni raznolikosti in veliki statični učinkovitosti v primerjavi z drugimi ravninskimi konstrukcijami [59].

Nagubane konstrukcije so sestavljene iz več nagnjenih ravninskih ploščastih konstrukcij, ki so medsebojno spojene tako, da tvorijo globalno prepognjeno - nagubano obliko. Ta oblika konstrukcije vzpostavi statični nosilni sistem, ki združuje obnašanje tako mehanizma stene in mehanizma plošče [60].

Njihovo konstrukcijsko obnašanje izhaja predvsem iz razporeditve njihovih konstrukcijskih elementov v parih, ki so medsebojno spojeni s strižnimi povezavami. Konstrukcijske lastnosti prepognjenih konstrukcij so odvisne od oblike prepogibanja (vzdolžne ali piramidne), od geometrije osnovne oblike (ravninska, kupolasta, svobodna oblika), od uporabljenega materiala, od vrste povezav med različnimi nagubanimi ravninami in od načina podpiranja [61].



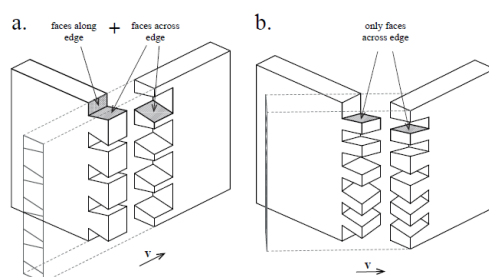
Slika 90: Trojni nosilni mehanizem nagubane ploskovne konstrukcije, ki združuje mehanizme plošče, stene in paličja. Leva slika ponazarja poenostavljen prenos napetosti enojno nagubane konstrukcije.

Desna slika ponazarja obnašanje stene, plošče in paličja [61].

Prenos notranjih obremenitev nagubanih konstrukcij poteka preko poševne ravnine, bodisi preko mehanizma plošče (obremenitev pravokotno na središčno ravnino) ali preko mehanizma stene (obremenitev vzporedno z ravnino). Najprej se zunanje obremenitve prenesejo preko plošče do krajšega roba nagubanega elementa. Tam se reakcijska osna sila porazdeli med sosednje elemente in se prenaša preko stenskega mehanizma, ki nato sile prenese v podpore (slika 90) [61].

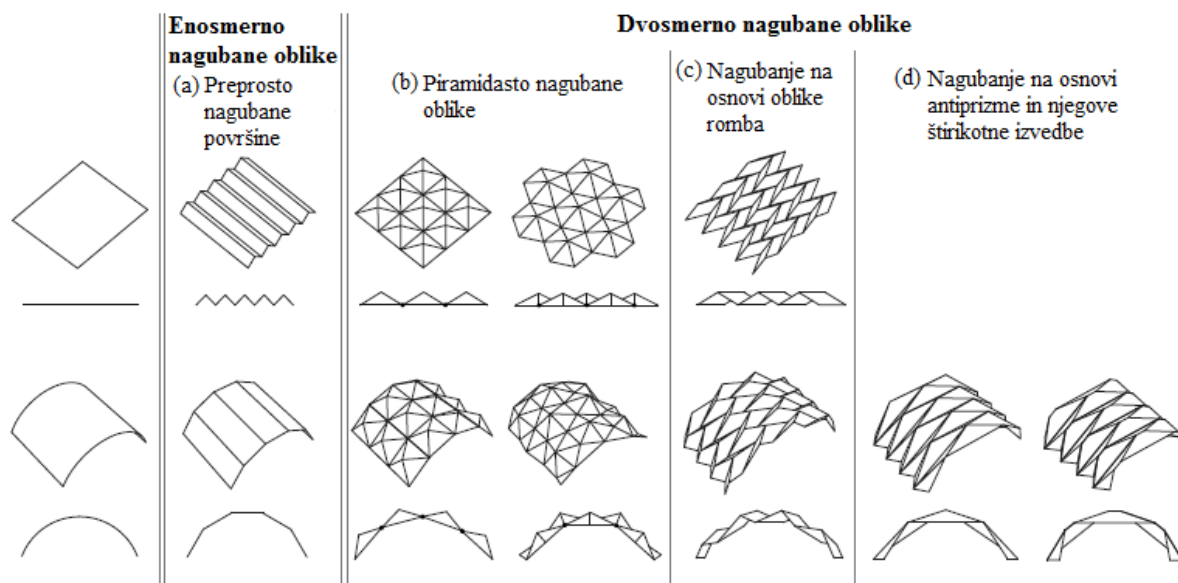
V zadnjem desetletju številne raziskave potekajo v smeri odkrivanja in preizkušanje novih oblik nagubanih ploskovnih konstrukcij. Lesene vezane plošče so nadomestili sodobni konstrukcijski lesni proizvodi. Trenutno se za visoko nosilne konstrukcije najpogosteje uporabljajo LVL, CLT in masivne panelne plošče. Zaradi pojava velikih napetosti na mestih spoja med posameznimi ploskovnimi elementi tako v slemenu kot tudi v spodnjem spojnem delu, je potrebno zagotoviti zadostno togost s pomočjo veznih sredstev. Ker uporaba lepljenih stikov na samem mestu gradnje ni mogoča zaradi pomanjkanja konstantnih pogojev za utrjevanje lepila, so spoji običajno izvedeni s kovinskimi veznimi sredstvi. Z raziskovanjem in obnašanjem nosilnih konstrukcij so ugotovili, da lesni vijaki, ki so med seboj razporejeni v zadostni razdalji, ne zagotavljajo zadostne nosilnosti in togosti [60].

Glede na navedeno so v nadaljnjih raziskavah preizkusili uporabo rogljičenih spojev (spoji na lastovičji rep), ki se uporabljajo pri pohištveni industriji [62]. Ti stiki so izvedeni s pomočjo CNC tehnologije, ki omogoča natančno in hitro izdelavo. Glavna prednost uporabe spojev teh oblik je, da poleg svoje nosilnosti, omogočajo tudi hitro in natančno pozicioniranje posameznih tankih elementov [60].



Slika 91: Geometrija spoja »lastovičji rep« (a), geometrija Nejiri Arigata spoja (b) [63].

Sodobne oblike nagubanih ploskovnih konstrukcij se delijo na dve različni osnovni skupini oblik glede njihove sposobnosti oblikovanja ravnih in enojno ukrivljenih površin. Pri opisovanju teh oblik je potrebno uporabiti terminologijo, ki izhaja iz računalniške grafike, kjer je površina predstavljena kot poligonalna mreža. Topologija te mreže je opredeljena z nizom točk in dodatnim informacijami, kako so medsebojno povezane. Prostorska razporeditev točk, kot tudi njihova povezanost, je lahko pravilna ali nepravilna, s čimer se ustvari oblika, ki je bodisi sestavljena iz enake ali raznolike osnovne poligonalne mrežne geometrije [60].



Slika 92: Topologija nagubanih ploskovnih konstrukcij in njihovih prečnih prerezov, prirejeno po [60].

Prva skupina (slika 92a) predstavlja enostavno nagubane površine, ki so sestavljene iz štirikotno oblikovanih elementov. Takšne nagubane oblike so najpogosteje uporabljene v praksi, vendar je njihova uporaba pri prekrivanju večjih površin omejena zaradi omejitev velikosti lesenih panelov. To omejitev se da rešiti z oblikovanjem novega nagubanja s pomočjo prostorske mreže. Pri tem dobimo dvosmerno nagubane oblike. Te oblike so sestavljene iz več elementov, ki so razporejeni v dveh ločenih smereh konstrukcije. Prva skupina dvosmernih nagubanih oblik (slika 92b) predstavljajo piramidasto nagubane oblike, ki jih dobimo s pomočjo navpično dvignjene srednje točke polja. Pri tej obliki obstajajo tri različne oblike osnovnih ploskev, ki omogočajo tako oblikovanje nagubanja. Osnovne ploskve so lahko v obliki enakostraničnega trikotnika, kvadratov ali šestkotnikov, poleg teh treh osnovnih geometrijskih oblik pa je možno uporabiti tudi druge nepravilne geometrijske poligonalne oblike. Druga skupina dvosmerno nagubanih konstrukcij (slika 92c) je sestavljena na osnovi oblike romba. Tretja skupina pa ima osnovno površino oblikovano kot antiprizme. Druga izvedba te skupine je izpeljanka iz prve pri kateri se antiprizmi doda še dve točki in se vse poveže med seboj tako, da tvorijo trapezoidno obliko površine [60].



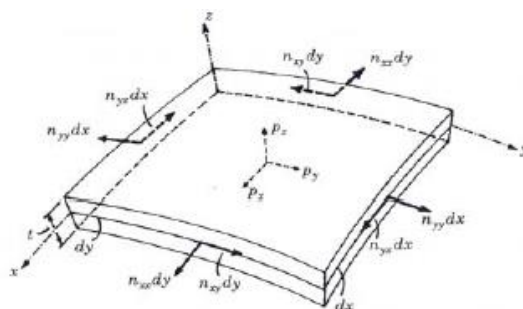
Slika 93: Primer zložene lesene konstrukcije iz CLT plošč [64].

4.7 Lupine

4.7.1 Splošno o lupinah

Lupinaste konstrukcije so zelo učinkovite pri premoščanju velikih razponov s čim manj uporabljenega materiala. Lupine so tanke in toge membrane, ki samostojno tvorijo strešno konstrukcijo, hkrati dajejo obliko površini strehe. Debelina lupine je zelo majhna v primerjavi z njenimi ostalimi dimenzijami. Trdnost in togost lupine sta odvisni od njene debeline in ukrivljenosti. Površine lupin imajo lahko enojno ali dvojno ukrivljenost. Dvojno ukrivljene površine lupin so običajno bolj toge kot enojno ukrivljene, vitkost lupin pa je možna zaradi površinskega obnašanja konstrukcije, ki je pogojena z natančno zasnovano, jasno zasnovanimi detajli in skrbno proizvodnjo. Lupinasta površinska struktura je lahko kompaktna (narejena iz lepljenih plasti medsebojno prekrizanih desk), neprekinjeno ojačana ali pa ima mrežasto (lamelirano) strukturo [59].

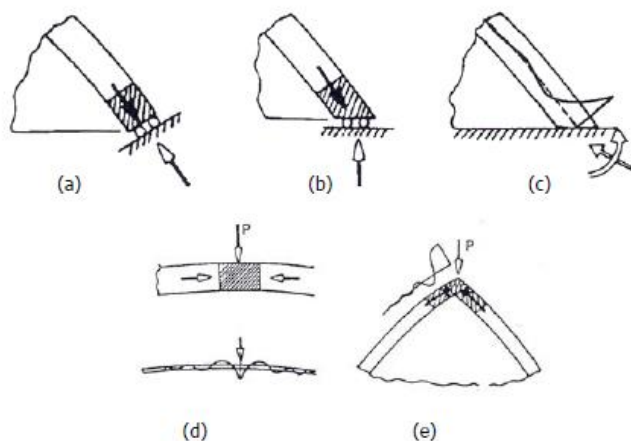
Pri tankih in enakomerno porazdeljenih obremenjenih lupinah se vzpostavi membransko napetostno stanje. V tem napetostnem stanju se pojavijo samo normalne in strižne napetosti v ravnini, ki so enakomerno porazdeljene po višini prečnega prereza. Upogibne napetosti so zanemarljivo majhne v primerjavi z normalnimi membranskimi napetostmi. Teorijo takšnega napetostnega stanja povzame membranska teorija. Zaradi ukrivljenosti so lupine z vzpostavitvijo membranskega stanja odporne tako na ravninske obremenitve, kot tudi na obremenitve, ki delujejo izven ravnine. Lupinaste konstrukcije so tako kot druge vrste nosilnih konstrukcij najbolj optimalno izkoriščene v primeru, ko so notranji upogibni momenti čim manjši [64].



Slika 94: Rezultante napetosti in obtežne komponente pri elementu lupine v primeru membranskega napetostnega stanja [65].

V nekaterih primerih membranska teorija ne more zadostiti ravnotežnim in/ali robnim pogojem, zato je potrebno upoštevati upogibno teorijo [64].

- robni pogoji ne zadoščajo zahtevam popolnega membranskega stanja (slika 95b in c),
- lupina je obremenjena s točkovno obtežbo (slika 95d),
- v lupini pride do spremembe geometrije (slika 95e).



Slika 95: Motnje membranskega napetostnega stanja (od b do e) [64].

Za zagotavljanje odpornosti sil pri motnjah membranskega stanja lupin, so potrebni dodatni konstrukcijski elementi. Pri številnih primerih se pri lupinastih konstrukcijah dodajajo rebra in/ali robni nosilci, ki omogočajo zadostno odpornost proti zunanjim obtežbam s kombinacijo membranskega in upogibnega mehanizma [65].

4.7.1.1 Oblike lupin

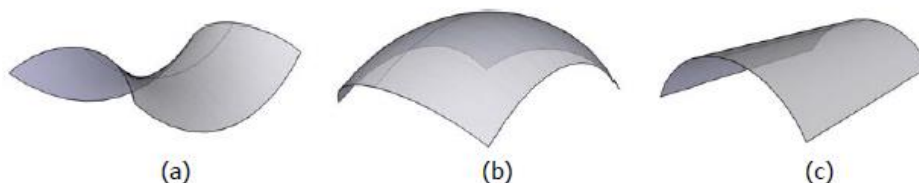
Raznolikost oblik lupin je zelo velika. Vsako površino, ki je zvita v eni ali več smereh, lahko prištevamo med lupine. Eden od načinov definiranja lupinastih površin je uporaba Gaussove ukrivljenosti, druga možnost pa je razlikovanje načina, po katerem se površina oblikuje.

1) Gaussova ukrivljenost:

Lupino lahko opišemo s krivuljami. Skozi točko na lupini lahko potekajo različne krivulje, ki imajo različen radij ukrivljenosti. Krivulji, ki imata najmanjšo in največjo ukrivljenost predstavljata glavni ukrivljenosti κ_1 in κ_2 . Produkt teh dveh ukrivljenosti predstavlja Gaussovo ukrivljenost: $K_g = \kappa_1 \times \kappa_2$

Glede na Gaussovo ukrivljenost imamo lahko tri različne oblike površin, ki so predstavljene na spodnji sliki [65]:

- $K_g < 0$: Glavni ukrivljenosti sta nasprotni. Dobljena oblika se imenuje tudi antiklastična ploskev.
- $K_g > 0$: Glavni ukrivljenosti imata enak predznak. Dobljena oblika se imenuje tudi sinklastična ploskev.
- $K_g = 0$: Vsaj ena ukrivljenost je enaka 0. Ta oblika se imenuje tudi cilindrična površina ali ravnina, če sta obe ukrivljenosti enaki 0.



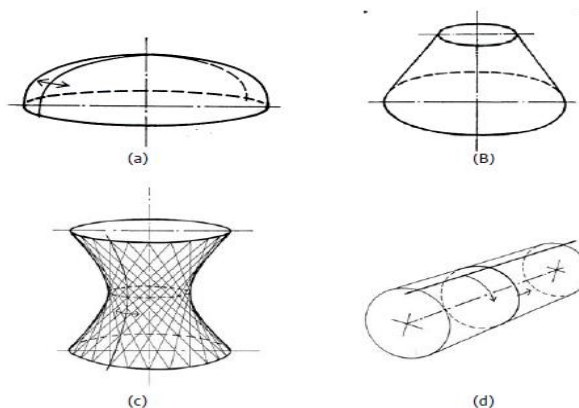
Slika 96: Ploskev z negativno (a), pozitivno (b) in nično Gaussovo ukrivljenostjo (c) [65].

2) Generiranje lupin

Generiranje lupin je določanje oblik lupin s pomočjo analitično opisljive geometrije. Obstajajo različne možnosti generiranja:

- Rotacijske lupine:

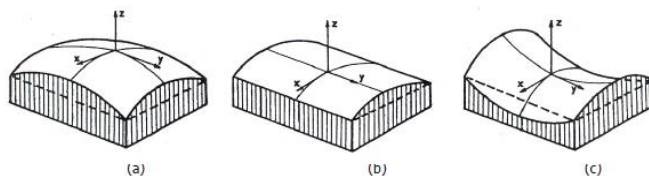
Rotacijske lupine dobimo tako, da poljubno krivuljo zavrtimo okoli neke premice, ki leži v isti ravnini kot krivulja. Tipični primeri rotacijskih lupin so stožec, kupola, hiperboloid in tudi cileinder [65].



Slika 97: Rotacijske lupine: (a) Sferična lupina – kupola, (b) stožec, (c) hiperboloid, (d) valj [65].

- **Translacijske lupine:**

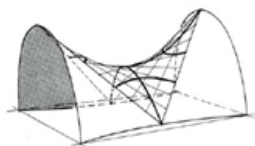
Translacijske lupine dobimo tako, da neko krivuljo premikamo vzdolž druge krivulje, medtem pa je orientacija krivulje konstantna. Tipični primeri translacijskih lupin so paraboloidna in hiperbolična paraboloida, ki obenem spadata tudi med premonosne lupine.



Slika 98: Translacijske lupine: (a) Parabolična paraboloid, (b) cilindrični paraboloid, (c) hiperbolični paraboloid [65].

- **Premonosne lupine:**

Premonosne lupine generiramo iz ravnih linij, ki potujejo po dveh robnih krivuljah. Tipični primeri premonosnih lupin so hiperbolični paraboloid, valj, stožec in hiperboloid.



Slika 99: Primer premonosne lupine: hiperbolični paraboloid [65].

4.7.2 Primeri lesenih lupinastih konstrukcij

Lupine omogočajo svobodno oblikovanje, zato obstaja veliko različnih možnosti glede oblikovanja lesenih konstrukcij. Glede na najbolj pogosto uporabljene oblike lahko sodobne lesene lupinaste konstrukcije razdelimo na:

- cilindrične lupine (rešetkasti oboki),
- sferične lupine in kupole (radialno rebraste kupole, rešetkaste kupole, geodetske kupole),
- hiperbolične lupine in
- poljubno oblikovane lupine (viseče lupine in mrežne lupine).

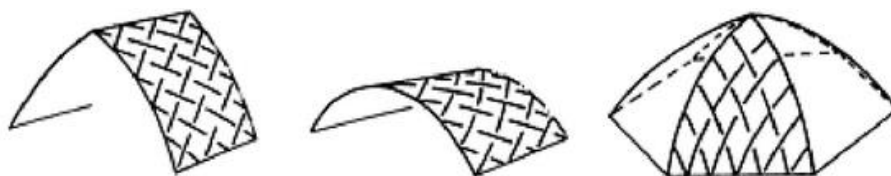
Iz konstrukcijskega vidika zgornje lupinaste konstrukcije težko enolično uvrščamo med konstrukcije z lupinastim obnašanjem, ko pa gledamo z vidika oblikovanja, jih lahko zaradi ukrivljenosti konstrukcij štejemo med lupine. Te konstrukcije se načrtujejo kot lupine, vendar jim je težko zagotoviti popolno lupinasto obnašanje [65].

Pri slovenskem poimenovanju lupinastih konstrukcij izhajam iz angleškega poimenovanja, kjer imajo v številni literaturi rešetkaste (angl. lattice) in mrežne (angl. grid) lupine enak pomen. Kljub temu pa med rešetkaste lupine najpogosteje uvrščamo konstrukcije s trikotno mrežno strukturo in mrežaste

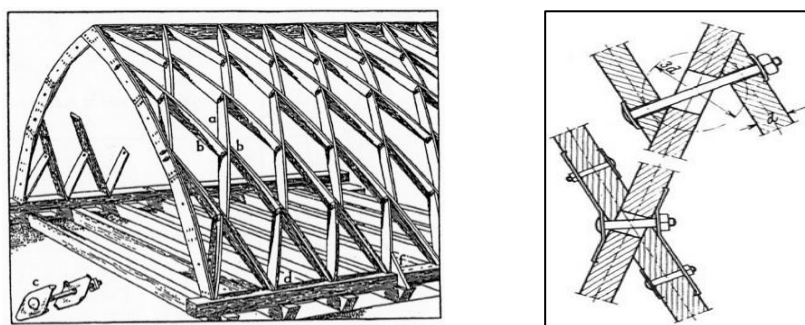
lupine s kvadratno mrežno strukturo. Izraz rešetkasta lupina se bo uporabljal za lupine, kjer so rebrasti elementi medsebojno povezani v vozliščih. Lahko jo tudi kombiniramo s konstrukcijsko neprekinjenimi plastmi, ki zagotavljajo globalno membransko obnašanje. Mrežna lupina pa je drugačna vrsta konstrukcije. Pri mrežnih lupinah rebra potekajo neprekinjeno med podporami in so medsebojno povezane na mestih križanja elementov [65].

4.7.3 Leseni rešetkasti oboki (timber lattice barrel vaults)

Oboki spadajo med starejše, v gradbeništvu uporabljane, lupinaste nosilne sisteme. V začetku 20. stoletja so bili prvi poizkusi izgradnje rešetkaste lupine, ki omogoča tridimenzionalno prenašanje obremenitve. Leta 1920 je inženir Fritz Zollinger z uporabo tedanje oblike lameliranega lesa zasnoval tridimenzionalni okvir. Z razprtjem dveh delov lesenega elementa je oblikoval diamanten rešetkast vzorec. S tem načinom je lahko ustvaril tridimenzionalno ukrivljeno obliko rešetkaste lupinaste konstrukcije. Sistem je zasnoval tako, da je skozi vsak spoj neprekinjeno potekal po en lesen element, nanj pa sta bila parno in pod kotom z vijaki spojena elementa. Tako zasnovan sistem je imel diamantno rešetkasto obliko, ki je omogočala raznolike oblike ostrešij, vključno s krožno ukrivljenimi, segmentnimi in koničastimi loki (slika 100). Pomanjkljivost tedanje Zollingerjeve oblike konstrukcije pa je bila predvsem v relativno veliki deformaciji konstrukcije, ki so se pojavile zaradi številnih podajnih spojev na mestu medsebojnega križanja lameliranih elementov, saj posamezni elementi niso bili v liniji delovanja sil in so zaradi same zasnove konstrukcije spoji ekscentrični. V tej konstrukciji se sčasoma, zaradi neizogibnega pojava krčenja lesa pravokotno na vlakna, pojavijo zdrsi v vozliščih, ki lahko dolgoročno vodijo k velikim deformacijami in povesom konstrukcije [66].



Slika 100: Oblike Zollingerjevih rešetkastih konstrukcij: Levo, koničasti obok; na sredini, krožno ukrivljen obok; desno, segmentni obok [67].



Slika 101: Levo, leseno Zollingerjevo rešetkasto ostrešje [68].

Slika 102: Desno, izvedba Zollingerjevih spojev [66].

Z razvojem modernih veznih sredstev je mogoče uporabiti Zollingerjev nosilni sistem, predvsem pri cilindričnih lesenih obokih in tudi pri sodobnih lesenih konstrukcijah. V zadnjih letih številne sodobne lesene konstrukcije kot so razstavne dvorane zgrajene v Riminiju, 2001, Rostocku, 2002 in Friedrichshafu, 2002, demonstrirajo možne rešitve pri zagotavljanju zadostne togosti spojev pri uporabi Zollingerjeve oblike konstrukcije. Oblika tako še danes nudi ekonomično, učinkovito in estetsko možnost izvedbe lesenih valjastih obokov tudi za velike razpone.

4.7.3.1 Razstavne dvorane v Riminiju

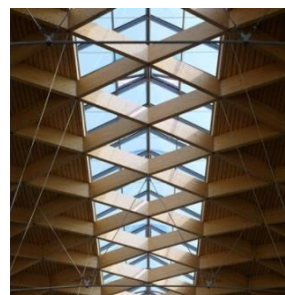
Razstavni kompleks v italijanskem mestu Rimini je sestavljen iz dvanajstih razstavnih hal, kongresnih in konferenčnih prostorov ter iz ostalih pripadajočih objektov. Celoten razstavni kompleks predstavlja 80000 m² razstavnih površin in 50000m² površin, namenjenih storitvenim in skladiščnim prostorom. Gradnja je potekala dve leti in je bila dokončana leta 2001 [69].



Slika 103: Razstavni kompleks v Riminiju, Italija [70].

Razstavne hale nimajo nobenih vmesnih stebrov in lahko s svojim 60 m velikim razponom in približno 100 m dolge pokrivajo površino veliko kar 6000 m². Ostrešja hal so zasnovana iz lesenih rešetkastih cilindričnih obokov, ki so sestavljena iz lameliranega lesa. Podporna konstrukcija posamezne hale je zgrajena iz armirnega betona. Stene in stebri omogočajo vertikalno nosilnost lesene ostrešne konstrukcije in stabilnost celotne stavbe tudi glede na horizontalne zunanje sile kot sta veter in potres. Lesen rešetkast obok je na stene pritrjen s pomočjo kovinskih veznih sredstev. Visok je 10 m, njegovo teme pa se nahaja 20 m nad tlemi. Vse od dvanajstih razstavnih hal imajo enako geometrijo in se raztezajo 60 metrov med armirano betonsko podporno konstrukcijo. Dolžina posamezne hale znaša 96 m [69].

Leseno ostrešje posamezne hale je sestavljeno iz 1280 lesenih lameliranih lepljenih reber enakih dimenzij. Pri tem je bila uporabljena Zollingerjeva zasnova mrežaste lesene strukture v obliki diamanta. Vsak lesen lepljenec s prečnimi dimenzijami 160 mm x 700 mm je dolg 3,5 m. Lesena rebra so v 693 vozliščih spojena z jeklenimi veznimi elementi [69].



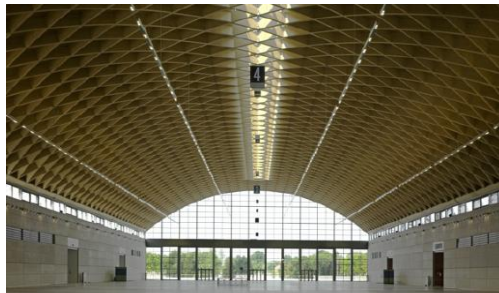
Slika 104: Lesen rešetkast obok z jeklenimi nateznimi vezmi [70].

Kot rezultat dodatnih raziskav je bil razvit poseben jeklen vezni element. Na jekleni cevni element so privarili štiri pare kovinskih plošč, na katere so s pomočjo jeklenih paličnih moznikov in vijakov pritrdili lesene elemente. Jeklene cevi so po montaži nato napolnili s tesnilno maso, tako da je ostal viden samo spodnji del cevi. S temi ukrepi so konstrukciji zagotovili tudi požarno odpornost R30 [69].

Sile iz strešne konstrukcije se na armirano betonske stene prenašajo preko jeklenega škatlastega nosilca. Horizontalne sile pri strešni konstrukcije prevzamejo prednapete jeklene natezne vezi s 60 mm premerom, medsebojno nameščene na razdalji 12 m. Natezne vezi so povezane z diagonalnimi nateznimi palicami premera 32 mm. Te palice so nato privijačili v vozlišča strešne konstrukcije, preko katerih se sile lahko prenašajo na lesena rebra. Natezne jeklene vezi so bile prenapete z silo 850 kN, s čimer so dosegli ravnovesje med horizontalno silo, ki jo povzroči lastna teža lesenega ostrešja, poleg tega pa natezne vezi in diagonalne palice zagotavljajo stabilnost konstrukcije v primeru nesimetričnih obtežb vetra ali snega [69].

4.7.3.2 Hanse razstavna dvorana v Rostocku

Razstavna dvorana Hanse v nemškem mestu Rostocku ima eno izmed največjih lesenih ostrešij, ki za nosilno konstrukcijo uporabljajo rešetkasti obok. Sestavljena je iz lesenih lepljencev, ki imajo tako kot prejšnja razstavna hala rebra z Zollingerjevo diamantno obliko, vendar brez jeklenega nateznega povezja. Leseno ostrešje je podprto z jeklenimi stebri. Zaradi uporabe lesenih lepljencev in sodobnih veznih sredstev ima ostrešje razpon 87,5 m in se razteza 165 m v dolžino [70].



Slika 105: Razstavna hala Hanse z lesnim rešetkastim obokom [70].

4.8 Lesene kupole

Kupole so zelo učinkovit nosilni sistem za konstrukcije, kjer so zahtevani veliki odprti prostori brez vmesnih podpor. Zaradi dokaj lahke prostorske konstrukcije so bile v preteklosti kupole velikih razponov zgrajene predvsem iz jekla. Razvoj lepljenega lesa in sodobnih veznih sredstev pa je omogočil tudi uporabo lesa pri kupolah z zelo velikimi razponi. Racionalno industrializirane metode gradnje so zaradi lepega zunanjega izgleda, lahke konstrukcije in velike ekonomičnosti spodbudile še nadaljnji razvoj prostorskih konstrukcij. Kot posledica tega so bile po svetu, še zlasti v zadnjih desetletjih, zgrajene številne prostorske konstrukcije. Veliko je primerov sodobnih, zelo konkurenčnih kupol iz lepljenega lesa z razponi, večjimi tudi od 160 m. Namenjene so predvsem kot večnamenske dvorane in športne arene, v zadnjem času pa jih gradijo tudi z namenom skladiščenja velikih količin razsutega materiala.

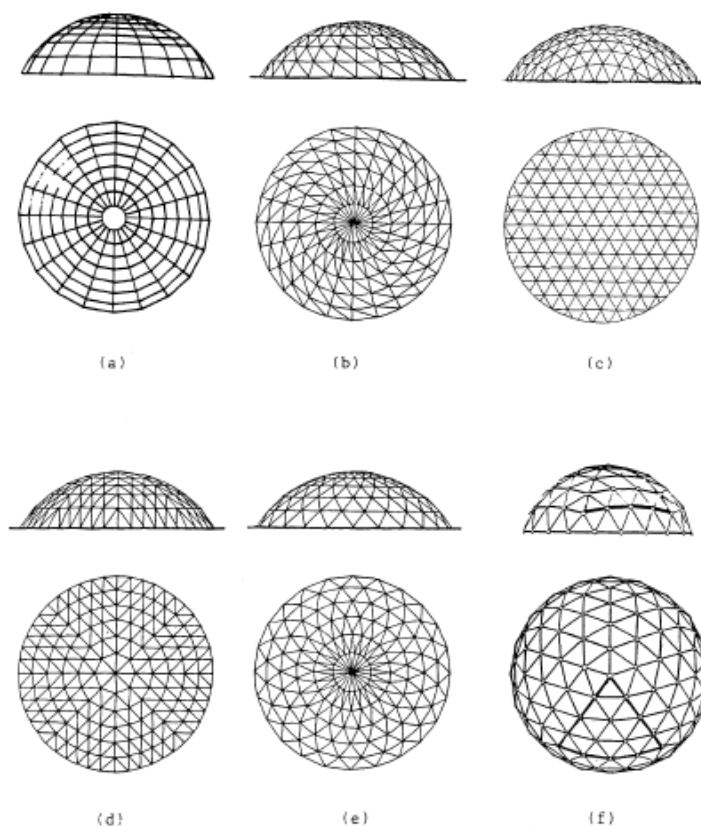
Kupola spada med lupine s sinklastično ploskvijo, kar pomeni, da ima ukrivljenost v vsaki točki kupolaste ploskve enak predznak v vseh smereh. Njena ploskev ima pozitivno Gaussovo ukrivljenost. Prav tako ne spada med odvojne ploskve, zaradi česar kupole ne moremo sploščiti v ravno ploskev brez izkrivljanja in raztezanja. Vse te karakteristike nakazujejo na to, da kupole ni mogoče zgraditi samo iz elementov enakih dolžin. Prednosti kupolaste oblike pa si lahko predstavljamo s pomočjo tridimenzionalnega ločnega sistema, saj lahko s primernim oblikovanjem dosežemo nosilni sistem, pri katerem so vsi elementi obremenjeni samo z osnimi silami, brez upogibnih ali torzijskih momentnih obremenitev, zaradi česar je ta konstrukcijski sistem zelo atraktiven in učinkovit v primeru optimizacije oblike, pri kateri bi dosegli samo osne obremenitve [71]. Pri teh pogojih pa se uporaba lesa kot konstrukcijskega materiala, še posebej zaradi svoje velike nosilnosti v primerjavi z lastno težo, izkaže za zelo učinkovito pri gradnji kupolastih konstrukcij.

Kupole so lupinaste konstrukcije, ki prenašajo obremenitev predvsem z membranskimi silami. S tem je zagotovljen zelo učinkovit sistem prenašanja obremenitev, ki se preko nateznih, tlačnih in strižnih sil porazdelijo v ravnini lupine, kar pomeni, da se napetosti enakomerno porazdelijo po vsem prečnem prerezu in s tem omogočajo tankostenske izvedbo konstrukcije, vendar pa je potrebno pri teh konstrukcijah zagotoviti zadostno stabilnost zaradi nevarnosti pojava lokalnega uklona, ki se pojavi v primeru velikih tlačnih obremenitev [59].

Lesene kupole imajo običajno obliko geodetske kupole. Kupole s kompaktno konstrukcijo so zelo redko uporabljene in še to samo za majhne razpone. Najpogosteje imajo kupole nosilno konstrukcijo zasnovano iz neprekinjeno ojačitvenih reber, najpogosteje z radialnimi rebri, ali pa z mrežno strukturo kot je prikazano na sliki 106 [59]. Glede na obliko pa so lahko kupole sferične, elipsoidne ali pa imajo

lahko še kakšno drugačno obliko. Kljub velikemu številu različnih variant nosilnih sistemov kupol, pa se v praksi najpogosteje uporabljajo naslednje vrste:

1. Radialno rebraste kupole (slika 106a),
2. »Schwedler« kupole (slika 106b),
3. Trosmerne mrežne kupole (slika 106a c),
4. Mrežaste kupole (slika 106d in e) in
5. Geodetske kupole (slika 106f).

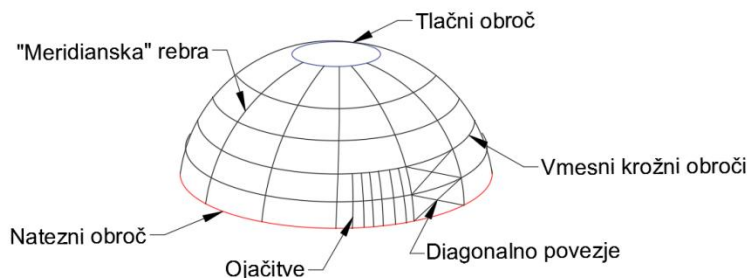


Slika 106: Različne vrste kupol [72].

4.8.1 Radialno rebraste kupole

Radialno rebrasta kupola je ena izmed najstarejših konstrukcijskih oblik kupol in je poleg geodetskih kupol največkrat uporabljena pri lesenih izvedbah. Osnovni nosilni element predstavljajo glavna meridianska tročlenska ločna rebra, ki potekajo iz podpornega nateznega obroča pa vse do tlačnega obroča na vrhu. Horizontalni paralelni obročni elementi predstavljajo nosilne elemente, ki prevzamejo tangencialne obremenitve, ki z glavnimi rebri tvorijo mrežo s trapezno obliko [65]. Taka zasnova, kjer se glavna rebra končajo na mestu tlačnega obroča in ne potekajo neprekinjeno vse do vrha, je zelo pogosto uporabljena pri kupolah. Prednost je predvsem v tem, da omogoča povezavo vseh reber, ki se približujejo skupni točki, poleg tega pa se tvori velika odprtina, ki se lahko uporabi za razsvetljavo in

prezračevanje. Prav tako tak konstrukcijski sistem postane statično določen. Glavna pomanjkljivost te strukture je predvsem njena geometrija, saj se dolžine horizontalnih obročnih elementov občutno spreminjajo po višini kupole.



Slika 107: Primarni in sekundarni elementi tipične radialno rebraste kupolaste konstrukcije. Meridianska rebra in vmesni krožni obroči so običajno iz lesa. Ostali elementi pa so običajno iz jekla.
Povzeto po [3].

4.8.2 »Schwedler« kupole

»Schwedler« kupole so tako kot radialno rebraste kupole sestavljene iz meridijskih reber, ki so medsebojno spojena s številnimi horizontalnimi poligonalnimi obroči. Ti obroči ojačajo konstrukcijo tako, da omogočajo prevzem nesimetričnih obremenitev. Osnovna mreža je sestavljena iz trapeznih oblik, ki se formirajo s presekom meridijskih reber in horizontalnih obročev. Vsak tak trapez je nato z diagonalnimi elementi razdeljen še na dva trikotnika (slika 106b). V nekaterih primerih je lahko trapez povezan tudi z dvema navzkrižnima diagonalnima elementoma [72].

To vrsto kupol je osnoval nemški inženir J.W. Schwedler leta 1863 in se po njem tudi imenuje. Glavna prednost Schwedlerjeve kupole je v tem, da so povezave med elementi predpostavljene kot členkasti ter naj bi jo zato lahko analizirali kot statično določeno konstrukcijo. Kljub temu pa se v elementih poleg osnih sil v praksi pojavljajo tudi dodatne upogibno in torzijske momentne obremenitve, zaradi česar je za dejanske razporeditve napetosti potrebno uporabiti podrobnejšo analizo, ki se izvede s pomočjo računalnika [72].

4.8.3 Trosmerne mrežne kupole

Konstrukcijo trosmerne mrežne kupole si lahko predstavljamo kot ukrivljeno obliko trosmerne mreže. Mreža kupole je sestavljena iz niza vzporednih črt, ki potekajo v treh različnih smereh. Vzporedne črte se med seboj stikajo v vozlišči tako, da tvorijo trikotno obliko mreže. Teoretične analize trosmerne mrežnih kupol so pokazale, da so tudi v primeru nesimetričnih obremenitev, sile pri tej strukturi enakomerno porazdeljene, kar omogoča večjo ekonomičnost uporabljenega materiala [72].

4.8.4 Mrežaste kupole

Mrežaste kupole so sestavljene iz križno razporejenih dvosmernih diagonalnih reber, tako da tvorijo mrežo v obliki romba. Podobno kot pri rešetkastih obokih, ima vsako rebro dolžino, ki je dvakrat daljša kot je dolžina stranskega elementa diamantnega vzorca. Mrežaste kupole se med seboj lahko še dodatno razlikujejo glede na obliko mrežastega vzorca. Pri meridianskih rebrih, kot je prikazano na sliki 106d, je krožni tloris kupole razdeljen na več posameznih sektorjev, vsak sektor pa je nato razdeljen še z vzporednimi rebri, ki oblikujejo mrežo v obliki rombov enakih velikosti. Kupole iz ukrivljenih reber, kot je prikazano na sliki 106e, pa imajo rombasto mrežo različnih velikosti, ki se postopoma povečuje od središča kupole in se oblikuje iz diagonalnih reber, ki potekajo vzdolžno po radialni smeri. V nekaterih primerih se zaradi vgradnje strešnih leg, ki podpirajo strešno kritino, uporabljajo koncentrični obroči zaradi katerih nastane trikotna mreža [72].

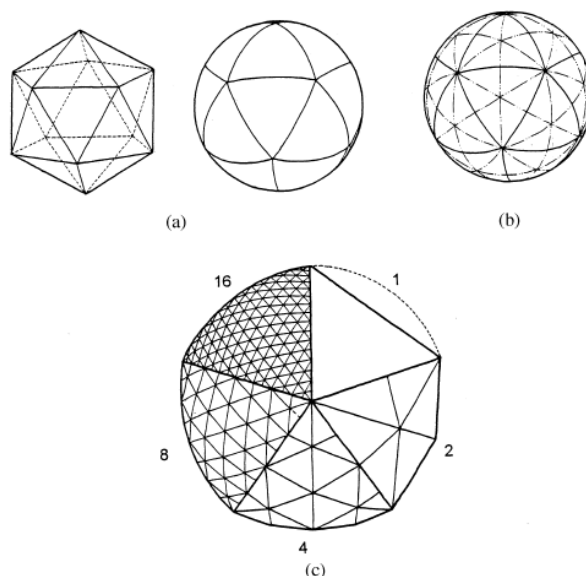
4.8.5 Geodetske kupole

Geodetsko kupolo (angl. »geodesic dome«) je razvil ameriški oblikovalec Buckminster Fuller. Zasnova kupole temelji na principu sferične konstrukcije, kjer osnovno mrežo predstavljajo krožnice, ki ležijo na sferi. Mreže tvorijo trikotno mrežo s skoraj enakostraničnimi sferičnimi trikotniki. Fuller je pri svoji originalni zasnovi geodetske kupole za osnovo uporabil geometrijsko telo ikozaeder, s katerim je celotno površino sfere aproksimirana z dvajsetimi manjšimi enakostraničnimi trikotniki, kar je obenem tudi največje število enakostraničnih trikotnikov, s katerimi lahko ponazorimo sfero. Pri kupolah večjih razponov lahko vsakega od teh trikotnikov nadalje razdelimo še na štiri manjše trikotnikov [72].



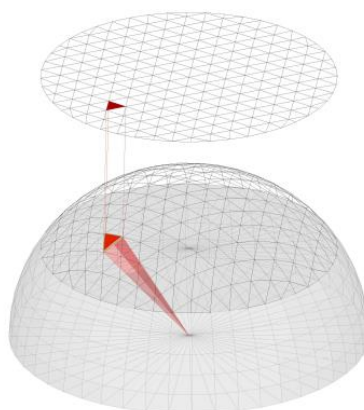
Slika 108: Geodetska sfera [65].

V praksi se je izkazalo, da je glavni problem geodetske kupole v njenih nepravilnih robnih dolžinah. Ta lastnost povzroča probleme še zlasti pri načrtovanju podpor v primeru geodetske kupole, ki ni v obliki polkrogle. Da bi lahko rešili ta problem so razvili novo vrsto sferične kupole. Za zagotavljanje enakomernih robnih dolžin se za zunanji obroč uporablja trikotne elemente, vsi ostali obroči pa so oblikovani kot pri šesterokotnih elementih kupole in pri katerih so rebra vzporedna v vseh treh smereh [65].



Slika 109: Geometrija in variacije geodetske kupole [72].

Zaradi svoje specifične geometrijske zasnove imajo geodetske kupole številne prednosti pred ostalimi oblikami kupol. Mogoča je enostavna predizdelava nosilnih elementov, saj se dolžine posameznih elementov med seboj ne razlikujejo preveč niti pri kupolah velikih razponov, zato je lahko njihova proizvodnja masovna. Zaradi enakomerne razporeditve mreže elementov se obtežba enakomerno porazdeli po konstrukciji. Posamezni elementi geodetske kupole so običajno lahki, zato sta njihov transport in montaža zelo enostavna. Geodetska kupola je na splošno zelo odporen in tog nosilni sistem, hkrati pa je primeren za konstrukcije velikih razsežnosti. Glavna slabost geodetskih kupol pa izhaja predvsem iz nepravilnih dolžin obodnih elementov, prav tako pa se lahko pojavijo arhitekturni problemi v primeru uporabe nekaterih drugačnih oblik kupol. Konstruktivno pa je geodetska kupola visoko statično nedoločena konstrukcija, pri kateri je potrebno uporabiti računalniške analize [71].



Slika 110: Oblikovanje modificirane geodetske sferične mreže [73].

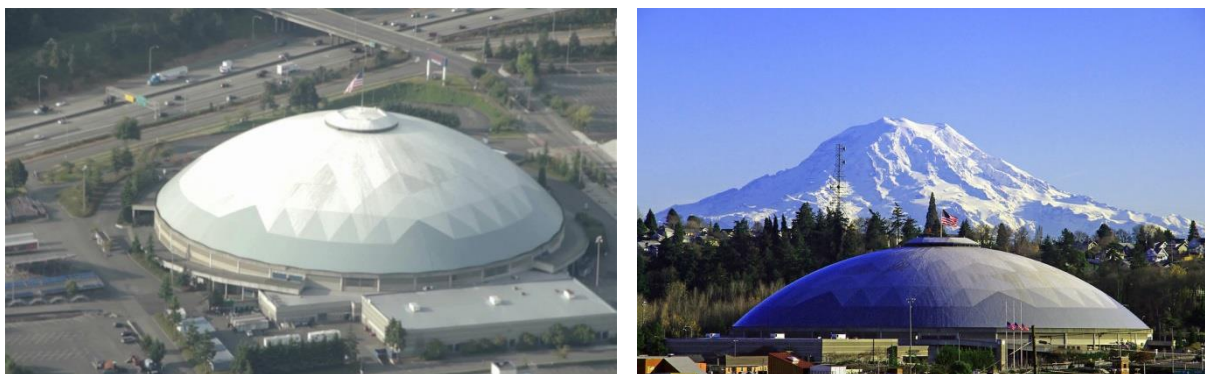
Vozlišča in elementi so generirani iz začetne virtualne ravnine, ki se nahaja nad sfero in vsebuje pravilno mrežo enakostraničnih trikotnikov, ki so projicirani na sferično ploskev z uporabo

večstopenjskega algoritma. Kljub zanemarljivim manjšim nepravilnostim v podpornem območju se generira preplet treh ločnih sistemov, ki imajo naraven estetski izgled in predstavljajo učinkovit podporni sistem [73].

4.8.6 Primeri lesenih kupol

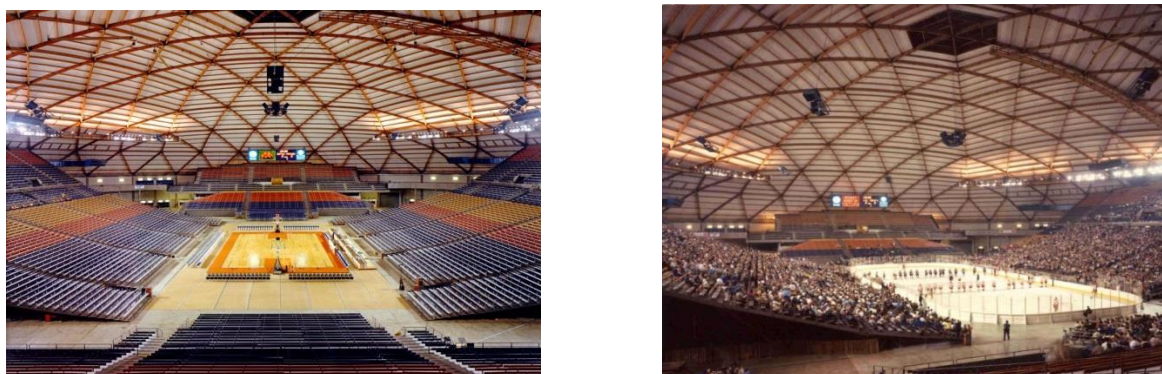
4.8.6.1 Tacoma Dome

Z razponom 161,5 m in višino 46 m, Tacoma Dome uvrščamo med največje lesene konstrukcije na svetu. Stoji v mestu Tacoma v Ameriški zvezni državi Washington, kjer so jo dokončali leta 1983. Večnamenska arena lahko sprejme do 23000 gledalcev in je namenjena raznovrstnim športnim dejavnostim kot so ameriški nogomet, rodeo, hokej na ledu, košarka, tenis in motokros [74].



Slika 111: Lesena kupola Tacoma Dome [75].

Za osnovno nosilno konstrukcijo je uporabljena modificirano geodetska kupola, pri kateri gre za kombinacija šesterokotnih in trikotnih elementov mreže. Na spodnjem delu obroča je mreža sestavljena iz trikotnikov, ki iz zunanosti izgledajo kot krožno paličje Warenove oblike, na višjih obročih pa je mreža oblikovana kot zaporedje diamantov. V vsakem vozlišču je med seboj povezanih po šest elementov in lahko opazimo osnovno trikotno oblikovano mrežo.



Slika 112: Značilna mreža modificirane geodetske kupole Tacoma Dome, s spodnjo trikotno mrežo in zgornjo diamantno mrežo [76].

Kupolasta konstrukcija je zgrajena iz lepljenega lameliranega lesa. Glavni nosilni elementi so lepljenci iz severno ameriškega iglastega lesa vrste duglazije, ki merijo med 170 mm in 220 mm v širino in 750 mm v višino, dolgi pa so 15 m. Posamezne elemente so pri montaži najprej na tleh med seboj povezali tako, da so formirali module, ki so bili zadosti lahki za dvigovanje in so bili stabilni. Tak postopek gradnje jim je omogočil enostavno in hitro izgradnjo celotne konstrukcije, zato so za gradnjo lesene konstrukcije potrebovali le dva meseca. Za podporno konstrukcijo kupole so uporabili prednapeti betonski obroč, ki preprečuje vodoravne premike lesene konstrukcije [59].

Za zunanji ovoj so prav tako uporabili les duglazije. Ovoj je sestavljen iz plasti debeline 50 mm, ki so jih med seboj spojili z zobčastimi spoji. Nanj so nato namestili neprepustno membrano iz sodobnih poliuretanskega materiala [77].



Slika 113: Gradnja lesenega zunanjega ovoja strešne konstrukcije [78].

4.8.6.2 Superior Dome

Superior Dome je trenutno največja lesena kupolasta konstrukcija na svetu. Leta 2010 jo je Guinnessova knjiga rekordov opredelila kot peto največjo kupolo na svetu. Kupola s 163,4 m velikim premerom in višino 44 m pokriva kar 20900 m² veliko površino. Nahaja se v študentskem kampusu Northern Michigan v mestu Marquette v ameriški zvezni državi Michigan. Primarno je domači stadion ekipi ameriškega nogometa poimenovani tudi Northern Michigan Wildcats, vendar v njej potekajo tudi druge dejavnosti. Dvorana omogoča 8000 sedež, izjemoma pa lahko sprejme tudi do 16000 obiskovalcev [79].



Slika 114: Lesena kupola Superior Dome iz zraka [80].

Superior Dome ima podobno kot Tacoma Dome nosilno konstrukcijo v obliki modificirane geodetske kupole. Dimenzionirana je na obtežbo snega $2,87 \text{ kN/m}^2$ in lahko prenese obtežbo vetra pri hitrosti 130 km/h . Kupolasta nosilna konstrukcija je zgrajena iz 781 duglazijinih lepljenih nosilcev in je prekrita z leseno strešno kritino [79].



Slika 115: Notranji pogled na leseno konstrukcijo kupole [81].

4.8.6.3 Odate Jukai Dome

Odate Jukai Dome je velika lesena kupolasta dvorana, ki se nahaja v mestu Odate, v severno Japonskem prefektu Akita [82]. Gradnjo so dokončali leta 1997. Lesena konstrukcija ima ovalno tlorisno obliko in ima zato v dveh smereh različna razpona. Daljši razpon znaša 178 m , krajšo pa 157 m . Konstrukcija je visoka 52 m in prekriva površino veliko kar 23218 m^2 . Stadion je v glavnem namenjen igranju basebala, vendar je lahko zaradi delno odstranljivih tribun namenjen tudi drugim dejavnostim [83].



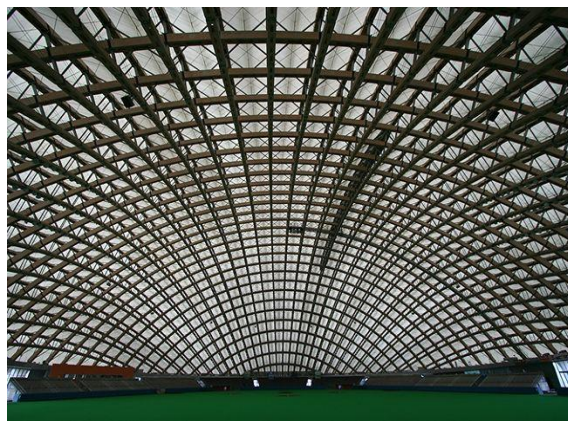
Slika 116: Pogled iz zraka na dvorano Odate Jukai Dome in dvorana med gradnjo[84].

Osnovno nosilno leseno konstrukcijo Odate Jukai Dome predstavlja tridimenzionalno večplastno ukrivljeno paličje, ki tvori ovalno ploskev kupole. Paličje je sestavljeno iz treh plasti elementov, ki so med seboj pravokotno razporejeni in povezani z jeklenimi veznimi sredstvi. Za zagotavljanje zadostne

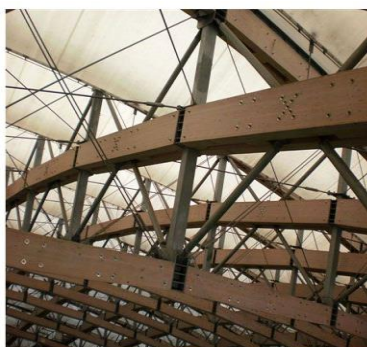
togosti so v vsakem spoju nameščene jeklene diagonalne vezi. Pri leseni strešni konstrukciji so za osnovne lesene nosilce uporabili les vrste Akito [82].



Slika 117: Levo, prostorsko leseno paličje kupole glede na daljši razpon [85].



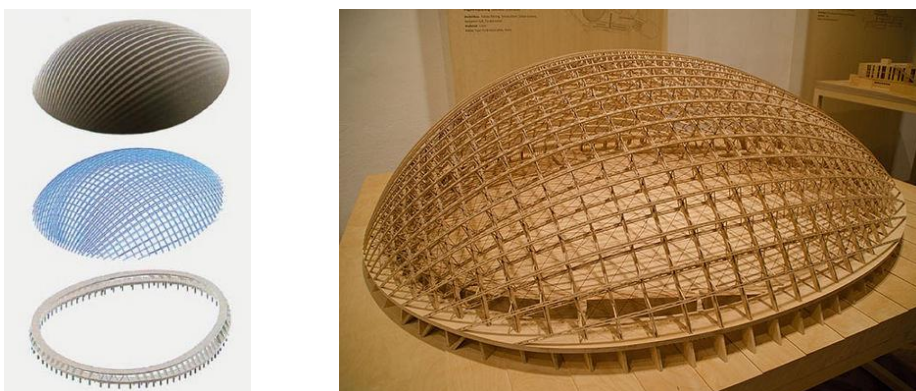
Slika 118: Desno, prostorsko leseno paličje kupole na krajši razpon [86].



Slika 119: Jeklena spojna sredstva kupole [87].

Leseno ostrešje je prekrito s posebno dvoslojno, s teflonom prevlečeno membrano, narejeno iz prosojnih fluoretilenskih in s smolo prevlečenih steklenih vlaken. Ta membrana je zato zelo močna in lahka. Stadion se nahaja na področju Japonske, kjer lahko pade tudi do 3 m snega, zaradi česar je kupola aerodinamično oblikovana, kar ji omogoča odpornost proti močnim vetrovom in močnemu sneženju. Problem prekomernega kopičenja snega na strehi pa je preprečen s stalnim kroženjem toplega zraka med dvema plastema teflonske membrane. Tako kroženje zraka otrese sneg s strehe in omogoča uporabo stadiona v vseh vremenskih pogojih, teflonska membrana pa zaradi svoje prosojnosti omogoča prehajanje dovolj naravne svetlobe v prostor tako, da podnevi dodatna osvetlitev ni potrebna [88].

Podporno konstrukcijo kupole predstavlja armiranobetonski obroč, ki je podprt s poševnimi stebri. Nahajajo se na mestih, kjer potekajo glavni nosilci lesenega paličja in preprečujejo horizontalne pomike ostrešja.



Slika 120: Desno, nosilni sistem kupole, levo lesena mrežna nosilna struktura [89].

4.9 Viseče lupine (Suspended Shells)

Pri visečih lupinah se obremenitve v podpore prenašajo preko nateznih sil in ne s tlačnimi, kot je zaželeno pri običajnih lupinah. Za zagotavljanje zadostne togosti pred vplivom srka vetra in za doseganje zadostne prednapetosti mora biti oblika lupine ukrivljena v dveh smereh. Šotori so dober primer takih visečih konstrukcij. Pri lesu je to viseča mrežasta lupinasta konstrukcija [65].

4.9.1 Primeri lesenih visečih lupin

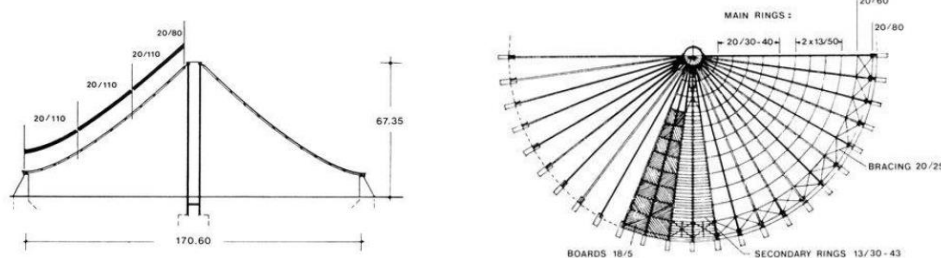
4.9.1.1 Tovarna odpadkov na Dunaju

Največja viseča lupina, zgrajena iz lesa je ostrešje, ki pokriva tovarno odpadkov na Dunaju. Tovarna je bila zgrajena leta 1982 in je sestavljena iz 48 radialnih reber, ki visijo iz armiranobetonskega stolpa, ki je visok 67,35 m. Dolžina posameznega rebra je 82 m, skupni premer objekta pa je 170,6 m. Geometrija teh reber je oblikovana tako, da so v primeru lastne teže samo natezno obremenjeni, brez upogibnih obremenitev. Oblika je bila zato podobna diagramom upogibnih momentov, ki se pojavijo pri trikotnih obtežbah – parabolična krivulja, parabolično oblikovana rebra pa so bila nameščena tako, da se na njihovih spodnjih delih ne more ustavljati padavinska voda [90].



Slika 121: Lesena konstrukcija viseče lupine na Dunaju [90].

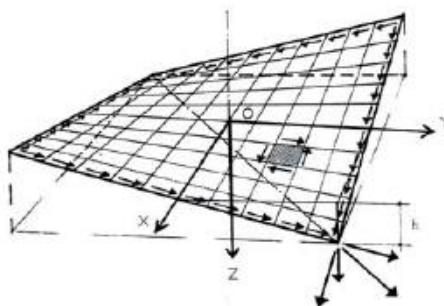
Asimetrične obtežbe, v glavnem zaradi obtežbe snega, so se preko obročnih sekundarnih nosilcev enakomerno razporedile po površini strehe in obremenile rebra z upogibom. Ojačenje okoli oboda in dodatne diagonalno nameščene plasti desk so mrežo reber z dodatnimi prečnimi ojačitvami povezale v stabilno strižno odporno konstrukcijo z lupinastim obnašanjem. Konstrukcija je po obodu podprta z 11 m visokimi, v pogledu trikotno oblikovanimi armiranobetonskimi stebri, ki omogočajo sidranje lesenih reber [90].



Slika 122: Dimenzije lesene viseče konstrukcije [90].

4.10 Hiperbolične lupine

Hiperbolične lupine predstavljajo zelo učinkovit nosilni sistem lesenih konstrukcij. Njihova glavna prednost je v tem, da ima material po ploskvi enakomerne napetosti, ker se porazdeljene vertikalne obtežbe po hiperbolični lupini prenašajo le preko strižnih sil. Strižne sile so konstantne vzdolž opisanih ravnih črt. Vzdolž robov robni nosilec prevzame sile in jih prenese v podpore kot normalne sile [65].



Slika 123: Majhen element s strižno silo vzdolž robov. Robni nosilec prenese sile do podpor.
[65].

4.11 Lesene mrežne lupine (gridshell)

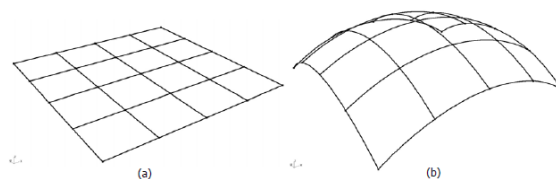
Mrežne lupine v zadnjih desetletjih postajajo zelo zanimiva vrsta nosilnega sistema predvsem zaradi možnosti oblikovanja konstrukcij svobodnih oblik. Zanimanje se je povečalo predvsem za lesene mrežaste lupine. Z uporabo lesenih mrež je možno dokaj enostavno oblikovanje dvojno ukrivljenih konstrukcij. Ena izmed prvih velikih mrežastih lesenih konstrukcij je bila zgrajena že leta 1975 v nemškem mestu Mannheim. Konstrukcija je, kljub temu da naj bi tam stala samo eno leto, v uporabi še danes. Čeprav je bila lesena konstrukcija velik uspeh, se mrežaste lupine niso tako pogosto

uporabljale. Vzrok za njeno majhno uporabo je bil predvsem v visokih stroških gradnje, saj je bil proces gradnje in načrtovanja zelo zahteven. Proces načrtovanja in iskanja primerne oblike ni bil enostavno izvršljiv, saj je bil zanj potreben iterativni postopek pri katerem bi našli primerno gladko površino, sestavljeno iz ravnih letev. Pri procesu načrtovanja je bil v zadnjih desetletjih dosežen velik napredek. Z razvojem računalniško podprtih metod načrtovanja je pri iterativnih procesih omogočena uporaba računalnikov, s tem pa omogočena poenostavitev celotnega procesa načrtovanja mrežnih lupin. Računalniška tehnologija in novejši postopki lepljenja lesa pri procesu gradnje so v današnjem času omogočili ponoven napredek pri uporabi mrežastih lupinastih konstrukcijah. Novejši konstrukciji s tem nosilnim sistemom sta odprta muzeja Weald and Dowland v angleških mestih Sussex in Savill Garden v bližini Windsorskega gradu. Oba projekta ponazarjata odlične možnosti uporabe mrežnih lupin tudi pri sodobnih lesenih konstrukcijah. Takšne lupine so ugodne tudi z vidika trajnostnega razvoja, saj je uporaba materiala minimalizirana hkrati pa uporabljamo les, ki ga uvrščamo med trajnostne gradbene materiale. Glavne prednosti lesenih mrežnih lupinastih konstrukcij so torej omogočanje velikih razponov, lahka konstrukcija, cenovna ugodnost in trajnostna gradnja [65].

Prednost uporabe lesenih mrežnih lupin se pokaže v fazi gradnje, saj lahko kompleksne oblike oblikujemo dokaj enostavno. To dosežemo s postavitvijo ravnih matrik iz neprekinjenih lesenih lamel, ki potekajo v dveh smereh. S povezavami lamel na mestu križanja s členkastimi spoji se lahko mrežo deformira s krivljenjem lamel, tako da pravokotno oblikovana mreža deformira v rombične oblike. Ko je dosežena zahtevana oblika konstrukcije, se lamele pritrdijo na robnih mestih s fiksiranjem vozliščnih spojev. Zaradi zahteve po enostavni gradnji je ta metoda uporabna le za materiale, ki so lahki, omogočajo krivljenje brez večjih težav in imajo zadostno nosilnost po končani gradnji, zato pri tej vrsti nosilnega sistema pridejo do izraza dobre lastnosti lesa, saj je les lahek material in se relativno enostavno ukrivlja pri čemer ima dobre trdnostne lastnosti [65].

4.11.1 Konstrukcijski principi mrežnih lupin

Mrežni lupinast nosilni konstrukcijski sistem temelji na uporabi neprekinjenih lamel, ki so spojene na mestu medsebojnega križanja. Konstrukcija je zasnovana iz začetno oblikovane ravne matrične mreže s pravokotnimi vzorci, ki se nato z ukrivljanjem lamel preoblikujejo v mrežo z rombastim vzorcem. Po vzpostavitvi želene oblike se spoje fiksira in sistem je ojača še z diagonalnimi vezmi [65].

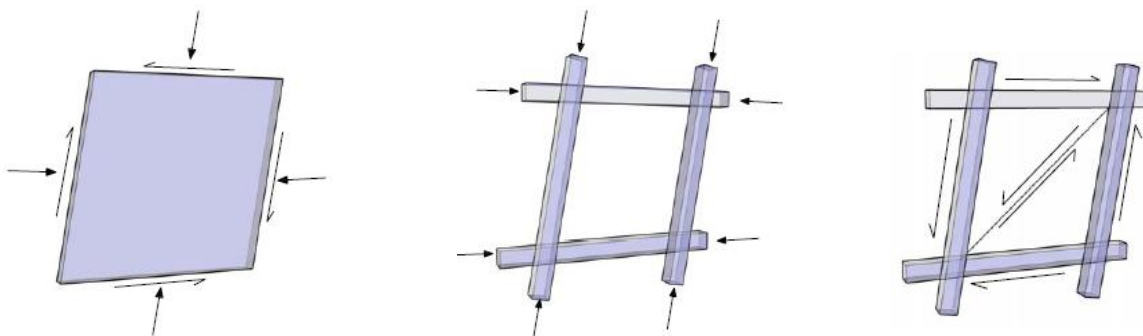


Slika 124: Ravna matrika iz lamel (a) je deformirana v sferično strukturo (b), s krivljenjem lamel in deformiranjem mreže z pravokotnimi vzorci v mrežo z rombastimi [65].

Tak postopek je mogoč zaradi nizke torzijske togosti lesa in zaradi zagotavljanja zasukov v vozliščih. Deformacija mreže lamel je možna na dva načina. Osnovna nedeformirana ravna mreža se lahko nahaja na tleh in jo nato potisnejo navzgor, ali pa je sestavljena nad tlemi in je spuščena s pomočjo gravitacije [91].

Definicija mrežnih lupin predpostavlja, da so mrežne lupinaste konstrukcije prave lupine, vendar to ne drži v celoti. Pri neprekinjenih lupinah se obtežba razdeli na ploskovne elemente, v katerih se vzpostavi napetostno stanje z strižnimi in normalnimi napetostmi (slika 126). Tako je vzpostavljen precej tog sistem, saj vsak element neprekinjene površine prenaša notranje napetosti na sosednjega [65].

Pri mrežnih lupinah pa se lupinasto vedenje posnema s sistemom linijskih neprekinjenih elementov. Te linijske neprekinjene plasti omogočajo prenos vsega materiala lupinastega elementa samo v robove. Rezultat je sistem štirih lamel, ki so medsebojno spojene v vozliščih [65].



Slika 125: Levo- lupinast element, na sredini – mrežno lupinast element z normalnimi silami, desno - mrežno lupinast element z diagonalnimi vezmi [65].

Mrežne lupinaste konstrukcije si lahko predstavljamo tudi kot zaporedje vzporednih vitkih lokov s skupnim delovanjem in prevzemanjem obremenitev. Ko je pri konstrukciji zahtevano lupinasto obnašanje, se v njih pojavijo strižne sile in jih je zato potrebno vključiti tudi pri elementih mrežnih lupin. Tako obnašanje lahko zagotovimo z diagonalno povezavo lamel in s tem mrežni lupini zagotovimo še dodatno diagonalno togost. Na tak način se strižna sila prenaša iz enega roba mrežnega lupinastega elementa na nasprotnega. S tem ukrepom zagotovimo medsebojno sodelovanje posameznih lamel in vzpostavimo obnašanje, ki je čedalje bolj podobno neprekinjenim lupinam [65].

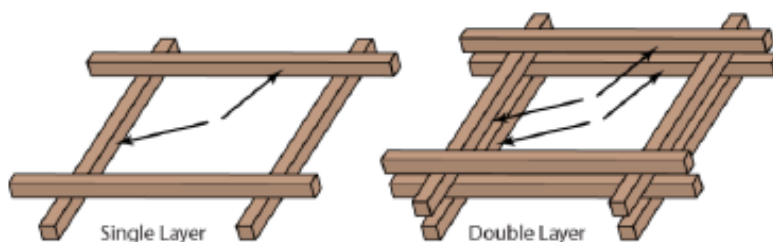
Diagonalno togost lahko v splošnem zagotovimo na več načinov, in sicer:

- s togimi spoji,
- s prečnimi vezmi,
- s togimi prečnimi ojačitvami in
- z neprekinjenimi plastmi.

Trikotno oblikovanje mreže lahko dosežemo z uporabo prečnih vezi ali ojačitev. Z uporabo togih ojačitev se konstrukcija obnaša podobno kot neprekinjena lupina. Diagonalno togost je možno zagotoviti tudi z uporabo neprekinjenih plasti na vrhu mrežne lamelne konstrukcije, ki obenem zagotavlja tudi togost celotne konstrukcije in stropa. Utrjevanje s prečnimi vezmi pa dopušča več možnih izvedb. Diagonalno togost lahko dosežemo tudi z spreminjanem sile prednapetja, debeline ali vrste materiala [65].

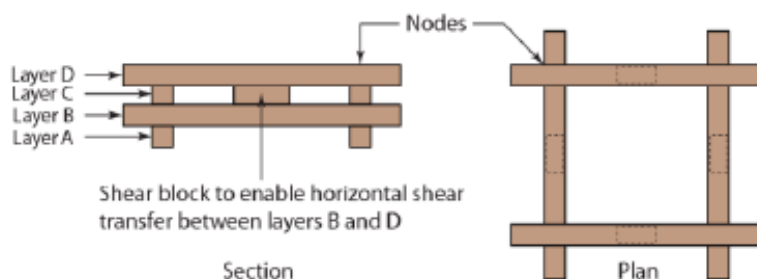
Diagonalno togost je najtežje doseči z togimi spoji v vozliščih. V tem primeru se strižne sile prenašajo preko upogibnih momentov vse do podpor, kar lahko dosežemo z veznimi sredstvi ali pa z lepljenjem stikov. Vsa mehanska vezna sredstva so rotacijsko delno podajna, to pa zmanjša togost konstrukcije. Lepljenje omogoča toge momentne spoje, vendar prihaja do problemov zagotavljanja idealnih pogojev lepljenja in s tem zagotavljanja optimalne kakovosti izvedbe spojev [65].

Mrežne lupine imajo lahko mrežo sestavljeno iz enojnega ali večplastnega sistema, pri katerem je vsak osnovni sklop sestavljen iz štirih lamel razporejenih v dveh smereh (slika 127). Običajno se uporablja dvoplasten sistem, ki omogoča doseganje večje ukrivljenosti in s tem tudi zanimivejše oblike [91].



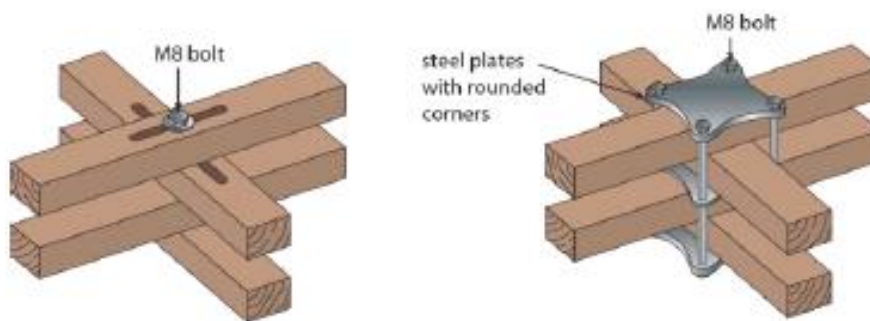
Slika 126: Enoplastna in dvoplastna razporeditev lamel [91].

Pri mrežnih lupinah z dvoplastno razporeditvijo lamel je potrebno zagotoviti prenos strižne sile med spodnjo in zgornjo lamelo. To se lahko doseže preko samih vozliščnih povezav ali pa z uporabo dodatnih strižnih povezav, ki se jih vstavi med lamele (slika 128). Tako sestavljena struktura ima bistveno večjo nosilnost kot pa posamezna lamela [91].



Slika 127: Prikaz tlorisa in prečnega prereza dvoslojnega sistema z nameščenimi vmesnimi strižnimi povezavami [91].

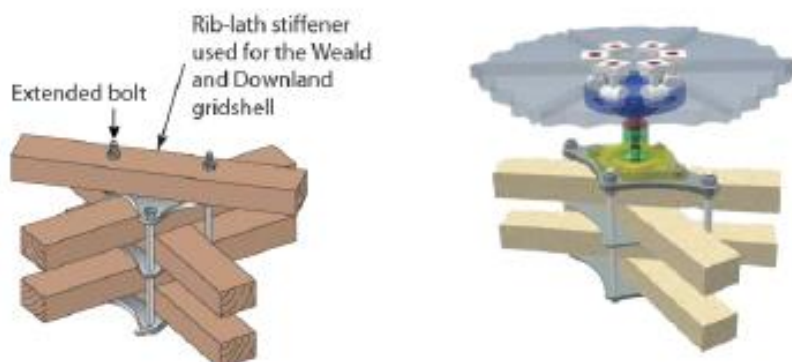
Velika prednost tehnike gradnje lesenih mrežnih lupinastih konstrukcij je uporaba identičnih vozliščnih veznih spojev po celotni konstrukciji. Zaradi tehnike same gradnje je potrebno pri večplastni zasnovi v vozliščnih stikih zagotoviti določeno stopnjo prostega pomika in prav tako zasuka. Ta problem se da rešiti s pravilno načrtovanimi veznimi spoji (slika 129) [91].



Slika 128: Levo - podolgovata luknja z vijakom, desno - jeklena plošča z vijaki nameščenimi na zunanji strani [91].

Pri prvem primeru ima vozliščni spoj izvedene podolgovate luknje na zgornjih dveh lamelah, ki omogočata relativne zamike med elementi. Po končnem formiranju oblike konstrukcije se vijak privijači in s tem vnese zadostne povezovalne sile v spoj [91].

V zadnjem času pa se pri lesenih mrežnih lupinastih konstrukcijah uporabljajo vozliščni spoji, ki imajo med posameznimi sloji lamel nameščene jeklene plošče in so med seboj povezani s 4-imi vijaki, kateri pa ne potekajo skozi lamele. Pri tej vrsti spoja se zunanje lamele prosto premikajo glede na osrednje plasti, poleg tega pa je velika prednost teh spojev tudi v tem, da se izognemo dražjemu vrtnanju lukenj v lamele. Omogočajo pa tudi druge posebne nadgradnje, ki jih želimo uporabiti pri konstrukcijah. V primeru, ko želimo namestiti dodatne diagonalne ojačitve jih lahko privijačimo na dva nasprotujoča si vijaka, ki sta bila poprej podaljšana. Ti spoji lahko vključujejo tudi nosilne sisteme za namestitev zasteklitve, kar omogoča še dodatne možnosti uporabe mrežnih lupinastih konstrukcij [91].



Slika 129: Levo – povezovalne plošče s podaljšanimi vijaki in diagonalno ojačitvijo, desno - povezovalne plošče z nosilnim sistemom za pritrditev zasteklitve [91].

4.11.2 Primeri lesenih konstrukcij mrežastih lupin

4.11.2.1 Mrežna lupina Mannheim Multihalle

Mannheim Multihalle stoji v nemškem mestu Mannheim in je prva konstrukcija z nosilnim sistemom mrežaste lupine. Sprva je bila namenjena kot začasni paviljon, namenjen vrtni razstavi, ki se je odvijala v letu 1975, vendar pa zaradi velikega zanimanja ostala v uporabi vse do danes. Leseno mrežno lupinasto konstrukcijo je zasnoval Otto Frei s partnerji, ki je bil znan po načrtovanju konstrukcij z nateznimi mrežami in po uporabi modela z obešanjem pri iskanju primernih oblik konstrukcij. S pomočjo tega modela je bila načrtovana tudi Multihalle v Mannheimu [65].

Kompleks je sestavljen iz več dvoran, ki so namenjene različnim dejavnostim kot so razstave, koncerti, teater, športne aktivnosti in podobno. Posamezne dvorane so med seboj povezane s pokritimi hodniki.



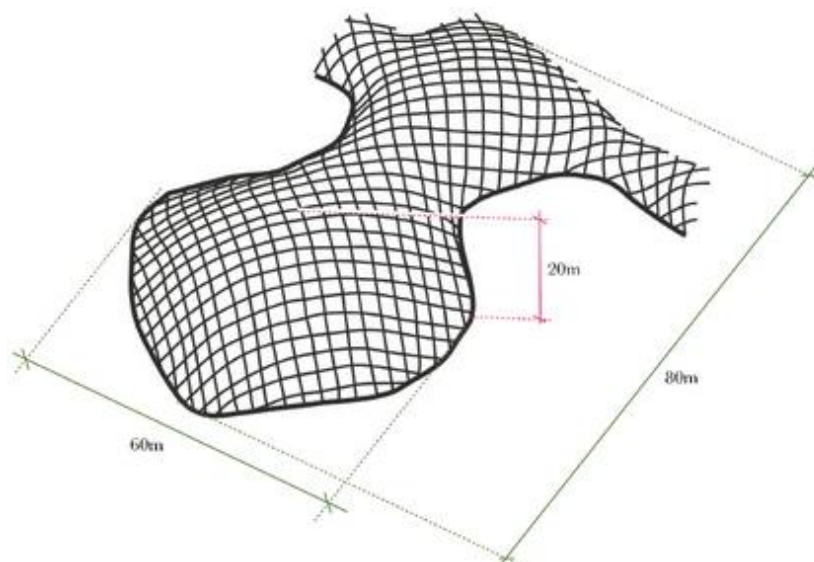
Slika 130: Pogled iz zraka na Mannheim Multihalle [92].



Slika 131: Notranji pogled na Mannheim Multihalle [93].

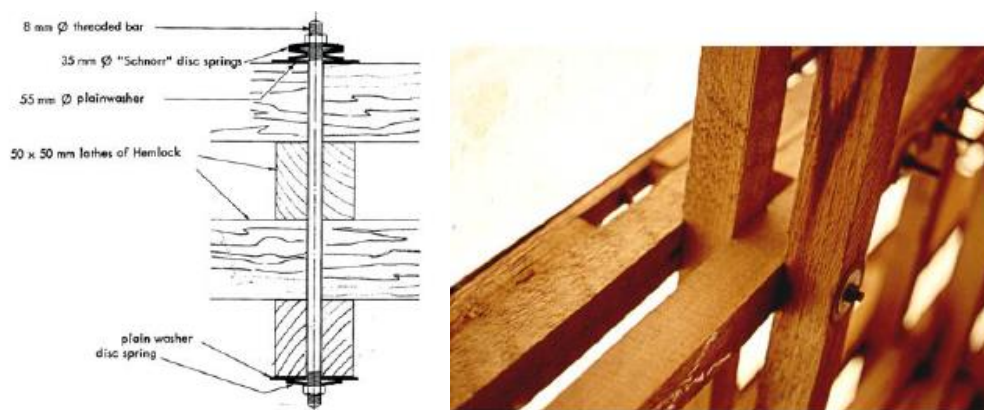
Lesena mrežna lupina je zasnovana tako, da predstavlja obliko sosednjih hribov. Lesena konstrukcija, je prekrita s PVC prekrivno plastjo in prekriva površino veliko 3600 m^2 . Zaradi proste oblike konstrukcije možni razponi variirajo po konstrukciji. Največji razpon predstavlja kupoli podobna

konstrukcija, ki premošča 60 m x 60 m velik prostor. Mreža ima v vzdolžni smeri razpon 80 m in je sestavljena iz dvoplastne matrike lamel iz borovega lesa vrste Hemlock. Izbran je bil zato, ker se je uspešno izkazal pri preizkušanju glede krčenja in lezenja. Prav tako pa ima ta vrsta lesa izredno ravna vlakna in je razpoložljiv v daljših dimenzijah [65].



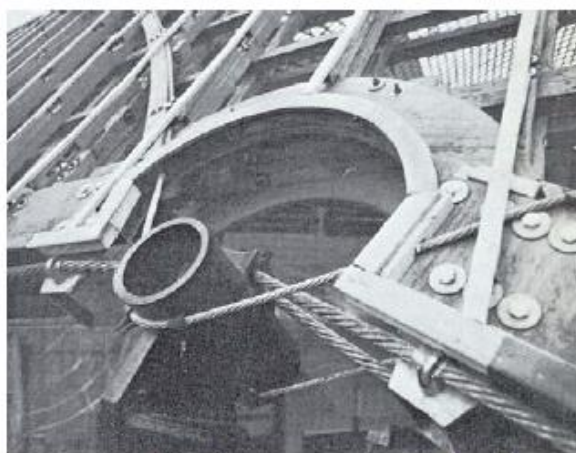
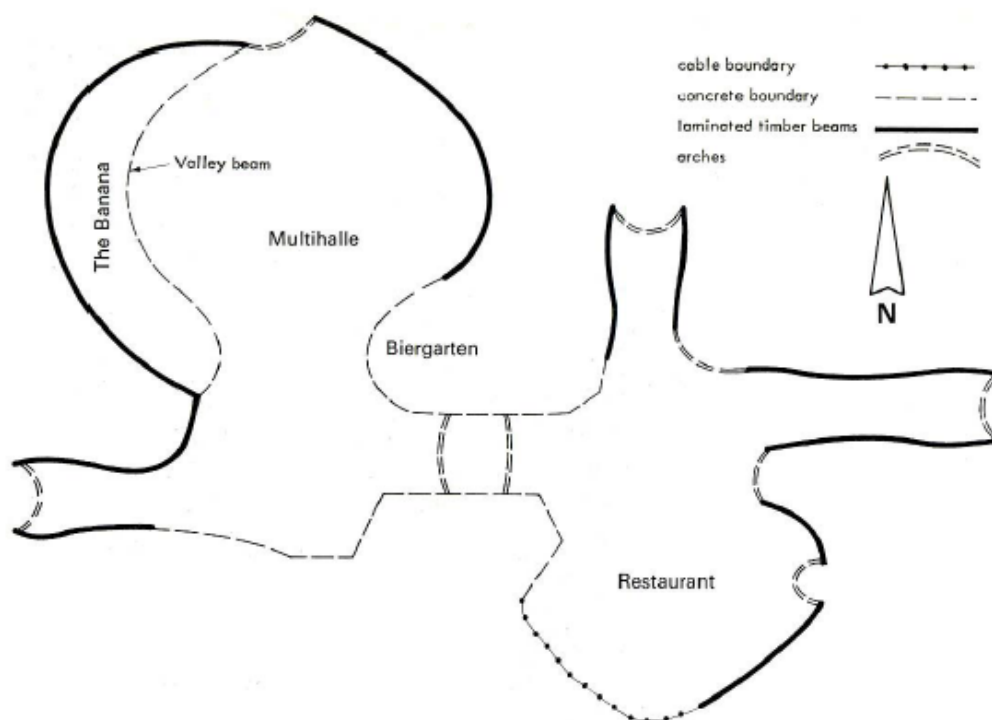
Slika 132: Dimenzije Mannheim Multihalle [94].

Lamele imajo prečni prerez 50 mm x 50 mm in so nameščene 500 mm narazen. Lamele dolge tudi do 40 m, so izdelali iz več manjših kosov in jih med seboj spojili z zobčastimi spoji. Za celotno lupinasto konstrukcijo so uporabili približno 72000 m lamel. Diagonalna togost in stabilnost je zagotovljena z diagonalnimi vezmi. Uporabili so par 6 mm debelih jeklenic nameščenih na razdalji 4,5 m v dveh smereh. Lamele so v vozliščih med seboj spojene z vijaki. Zaradi zagotavljanja zadostnega zdrsa pri formiranju končne oblike imajo lamele izvrtane podolgovate luknje, po končanem oblikovanju pa so zaradi zagotavljanja zadostne strižne odpornosti vijake privijačili. Pri testiranju spojev se je pokazalo, da bi se zaradi krčenja in nabrekanja lesa, napetosti v vijakih tekom časa zmanjšale, zato so pod matico vijakov namestili vzmetno podložko (slika 134) [65].



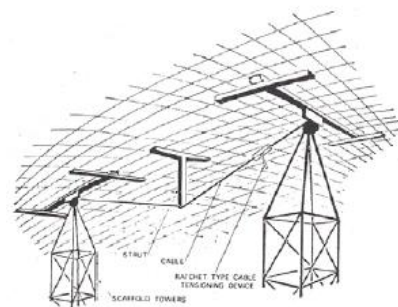
Slika 133: Tipični vozliščni spoj [65].

Mreža je podprta s štirimi različnimi robnimi podpornimi sistemi. Podprta je z armiranobetonskimi temelji, kabli, lameliranim lepljenimi nosilci in loki. Prvotno je bilo načrtovano, da bi bile vse robne podpore na stebrih z robnimi kabli. Kabelski robni podporni sistemi so nameščeni na mestih, kjer je robna sila več ali manj konstantna in na mestih, kjer bi sprememba v kotih med robno sistemsko linijo in jeklenimi stebri povzročila prevelike reakcije v podporah. Na ostalih mestih, kjer niso mogli zadostiti zgornjim kriterijem, pa so uporabili lamelirane lesene nosilce dimenzij 60 x 500 mm. Ti nosilci potekajo po obeh straneh robne linije mreže, na katero so nato s vijaki pritrdili lamele. Na mestih, kjer mreža poteka vse do armiranobetonskih podpor so prav tako najprej namestili nosilec in jo šele nato pritrdili na podporo [65].



Slika 134: Zgoraj - prikaz uporabe različnih robnih podpor, spodaj – detajl spoja med kabli in jeklenim stebrom [65].

Mannheim mrežno lupino so postavili s pomočjo dvigovanja od spodaj. Za dvigovanje mreže so uporabili viličarje, na katere so namestili stebrne odre. S tem so zagotovili neovirano vodoravne premike mreže, ki se pojavljajo pri deformacijah. Zaradi ugodnejšega raznos sile so med stebrnim odrom in mrežo namestili leseno podporo H oblike [65].



Slika 135: Levo – dvigovanje mreže s pomočjo viličarjev, desno – stebrni odri in vmesna opora [65].

4.11.3 Mrežna lupina Savill Garden

Stavba je bila odprta junija 2006 in je najnovejša konstrukcija z leseno mrežno lupinasto zasnovo. Nahaja se v angleškem mestu Windsor in je del kraljevega parka Windsor Great Park. Ostrešje ima oblikovano simetrično površino sestavljeno iz centralne kupole in manjši kupoli na obeh straneh ter z rahlo dvignjenimi konicami. Streha je dolga 98 m, največji razpon je 28 m, z višino pa variira med 4,5m in 8,5 m. Obliko lahko opišemo kot sinusoidni val v longitudinalni smeri in parabolo v prečni smeri. Lesena konstrukcija je sestavljena iz dvoslojne mreže lamel z rastrom velikosti 1 m. Pri tem so za lamele uporabili macesnov les, ki se je pri preizkušanju izkazal za najbolj primerne. Dimenzija uporabljenih lamel je 80 mm x 50 mm. Za vmesno povezavo obeh slojev in za zagotavljanje strižne odpornosti so namestili še lesene strižne bloke dimenzij 80 mm x 120 mm x 300 mm [65].



Slika 136: Savill Garden mrežna lupinasta konstrukcija [95].

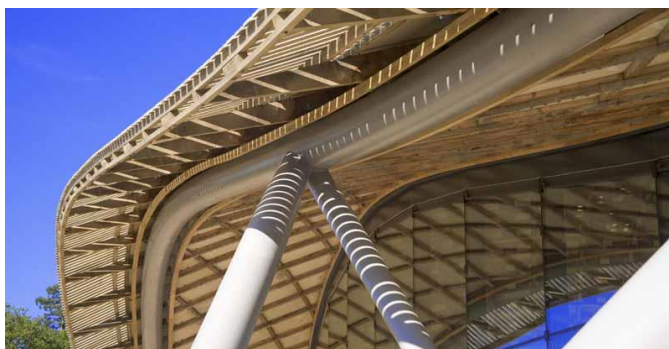
Pri zagotavljanja lupinastega obnašanja konstrukcije so zaradi varčevanja in elegantnejšega izgleda namesto kabelskih diagonalnih ojačitev na vrhu lamelne mreže namestili sloj iz lesenih vezanih plošč. Nosilnost za lastno težo konstrukcije omogoča že lesen mrežen lupinast nosilni sistem, saj so v primeru, ko na konstrukciji ne deluje nobena druga obtežba, napetosti v lamelah in vezanih ploščah zelo majhne. Do bolj kritičnega stanja pride v primeru delovanja obtežbe vetra in snega. V tem

primeru se zunanja obtežba preko ploskovne konstrukcije iz vezanega lesa prenaša do jeklenega robnega okvira in ta preko jeklenih stebrov vse do temeljev [96].

Pri gradnji so uporabili 6 m dolge lamele, ki so jih medsebojno spojili z zobčastimi spoji in lepilom in jih na gradbišču spojili do dolžine 35 m. Te lamele so nato položili na začasen gradbeni oder, kar jim je omogočilo natančno ročno postavljanje lamel na pravo mesto. Ko so bile lamele na pravilnem mestu, so jih privijačili. Tak postopek gradnje je relativno enostaven, vendar so za dokončanje lesenega ostrešja potrebovali celo leto [96].



Slika 137: Notranji pogled na strešno konstrukcijo [65].



Slika 138: Jeklena obročna cev s poševnimi stebri [65].



Slika 139: Strešna konstrukcija med gradnjo z začasnimi gradbenimi odri [65].



Slika 140: Strešna konstrukcija med gradnjo [65].



Slika 141: Robni jekleni podporni okvir [97].

5 NOSILNI SISTEMI LESENIH MOSTOV VELIKIH RAZPONOV

5.1 Splošno o sodobnih lesenih

Povečano zanimanje za gradnjo lesenih mostov se je pojavilo šele v zadnjih dveh desetletjih. Trenutno je njihova uporaba razširjena v številnih Evropskih državah in v Severni Ameriki. Glavni razlog za zanimanje zanje je predvsem v čedalje večji okoljski ozaveščenosti in želji po trajnostni gradnji pri čemer ima konstrukcijski les odločilne prednosti pred drugimi materiali. Razvoj lameliranega lepljenega lesa je s svojimi dobrimi mehanskimi lastnostmi omogočil uporabo pri leseni mostogradnji, poleg tega pa so nove inovativne tehnologije uporabe lesa omogočile razvoj, ki se kaže v prečno prednapetih lepljenih lameliranih lesenih prekladnih konstrukcijah in boljših sodobnih veznih sredstvih, ki omogočajo tudi nadaljnji razvoj lesenih mostov [98]. Les je zelo odporen tudi proti sredstvom za tajanje, ki se jih uporablja pri vzdrževanju cest v državah z izrazitimi zimskimi razmerami. Prav ta sredstva pri armiranobetonskih in jeklenih mostovih tekom njihove življenjske dobe povzročijo korozijo nezaščitenih delov in zato postane njihova obnova zelo zahtevna in draga. Prednost lesenih mostov je tudi dokaj enostavna in hitra gradnja, saj je pri večini mostov mogoče posamezne elemente izdelati že v proizvodnih halah in jih nato na mestu gradnje samo sestaviti.

V preteklosti so leseni mostovi zaradi slabih zaščitnih sredstev veljali za neobstoje konstrukcije, ki so s časom postopoma propadale in zaradi tega postale nezanimive za nadaljnji razvoj. Sodobna zaščitna sredstva pa lahko s pravilno globinsko in površinsko zaščito omogočajo lesenim mostovom dolgo življenjsko dobo. Dodatno lahko s pravilno izvedbo konstrukcijskih detajlov dosežemo, da imajo sodobni leseni mostovi brez večjih obnovitvenih posegov življenjsko dobo med 50 in 100 leti [98].

Zaradi vseh dobrih lastnosti lesa in čedalje večje okoljske ozaveščenosti pa so nekatere države celo sprejele iniciativo o povečanju gradnje lesenih mostov. ZDA so bile leta 1989 ena prvih držav, ki so sprejele iniciativo, ki je znana pod imenom »Timber Bridge Initiative«. Podoben predlog so leta 1994 sprejele tudi štiri skandinavske države (Norveška, Švedska, Finska, Danska), tako imenovan »Nordijski projekt« [99]. V teh državah trenutno zgradijo največ lesenih mostov in vlagajo v nadaljnji razvoj sodobnih nosilnih sistemov. Obseg gradnje lesenih mostov se je povečal tudi v Kanadi, saj se s svojo lesnopredelovalno industrijo uvršča med največje svetovne proizvajalke lesenih proizvodov.

Trenutni sodobni trendi razvoja stremijo h gradnji lesenih mostov s čedalje večjimi razponi in večjimi nosilnostmi. Kljub temu, da trenutna tehnologija ne omogoča tako velikih razponov, kot pri jeklenih in armiranobetonskih mostovih, leseni mostovi vseeno omogočajo že precej velike razpone. Z ustreznimi izbranimi nosilnimi sistemi in sodobnimi lesenimi materiali namreč lahko današnji leseni mostovi dosežajo razpone tudi do 100 m.

5.2 Delitev mostov

Sodobne lesene mostove glede na namembnost delimo na cestne mostove in na mostove namenjene pešcem in kolesarjem, ki jih lahko poimenujemo tudi brvi. Mostovi namenjeni cestnemu prometu so imeli v preteklosti zaradi velikih prometnih obtežb načeloma le manjše razpone. Uporaba lepljenega lameliranega lesa pri cestnih mostovih danes omogoča doseganje večjih razponov s čedalje večjimi cestnimi obtežbami.

Delitev lesenih mostov po namembnosti:

- cestni mostovi in
- mostovi namenjeni pešcem in kolesarjem ali brvi.

5.2.1 Brvi

Brvi so lahko poljubnih oblik in velikosti. Najpogosteje imajo enostaven nosilni sistem iz grednih nosilcev iz masivnega lepljenega lameliranega lesa ali pa so izvedeni kot palični nosilci. Najpogostejši so razponi med 15 in 30 metri. Poleg tega pa se v zadnjem času za nosilne sisteme uporabljajo številne inovativne in spektakularne oblike brvi [98]. Zaradi manjših možnih obtežb, zlasti koristne obtežbe, lahko dosegajo velike razpone. Med brvi z največjim razponom uvrščamo brv Bow River, ki premošča reko Bow v kanadskem mestu Banff, saj njen glavni razpon meri kar 80 m [100].



Slika 142: Lesena brv Bow River [100].

5.2.2 Cestni mostovi

Večina lesenih cestnih mostov za običajen promet ima manjše razpone (5 do 20 m), zgrajeni pa so iz grednih nosilcev, običajno iz leseno-betonskih sovprežnih konstrukcij. Kljub temu se v zadnjem času pojavljajo mostovi z večjimi razponi tudi na bolj obremenjenih cestah [98]. Največ jih je trenutno zgrajenih v severni Ameriki in v Evropi. Trenutno najdaljši leseni cestni most, ki je še v gradnji je Steien Bridge na Norveškem, bo imel razpon 88 m in ima ločni nosilni sistem z mrežnimi vešali [101].



Slika 143: Steien Bridge z ločnim nosilnim sistemom in poševnimi vešali [101].

5.3 Vrste nosilnih sistemov lesenih

Iz konstrukcijskega vidika je nosilni sistem mostov razdeljen na glavno nosilno prekladno konstrukcijo in podporno konstrukcijo. Prekladna konstrukcija je sestavljena predvsem iz horizontalne nosilne konstrukcije, ki se razteza preko podporne nosilne konstrukcije. Prekladna konstrukcija vključuje cestni krovni sloj, glavne nosilce, ki nosijo krovno plast in glavno nosilno konstrukcijo kot so gredni nosilci ali loki, ki prevzamejo lastno in prometno obtežbo, pa tudi obtežbo vetra in potresa, ki jo prenesejo v podporno konstrukcijo. Pri večini mostov, namenjenih pešcem, je krovna konstrukcija v celoti narejena iz lesa, kar pa običajno ne velja pri cestnih mostovih. Poleg lesa se uporabljajo tudi drugi standardni gradbeni materiali kot so armiran beton in jeklo. Uporabljajo se v različnih kombinacijah, od popolnoma armiranobetonske krovne konstrukcije pa vse do popolne lesene konstrukcije. Pri tem je potrebno poudariti, da se mostove uvršča med lesene, če je glavna nosilna konstrukcija sestavljena pretežno iz lesa [98].

Podporna konstrukcija v obliki opornikov in vmesnih podpor prenese celotno obremenitev v temeljna tla. Te podpore so pri lesenih mostovih običajno narejene iz armiranega betona, saj omogočajo prevzem velikih obremenitev in boljšo trajnost.

Glede na glavno nosilno konstrukcijo so najpogostejše naslednje vrste lesenih mostov:

- gredne mostove,
- palične mostove,
- ločne mostove,
- mrežne ločne mostove,
- mostove z vešali in razpirali,
- mostove na poševnih vrveh in
- viseče mostove.

Vrsta najprimernejšega uporabljenega nosilnega sistema je odvisna predvsem od:

- zahtevanega razpona in svetle višine mostu, ki je pogojena z vrsto prometa (dimenzije vozil) za katerega je namenjen,
- zunanje izgleda mostu, saj mostovi dominirajo pokrajini v kateri stojijo in
- nosilnosti temeljnih tal.

5.3.1 Gredni mostovi

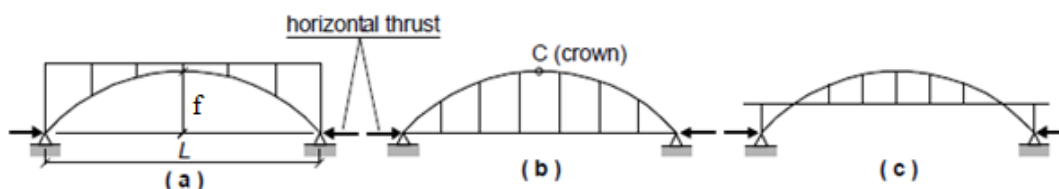
Gredni mostovi so mostovi z najenostavnejšo obliko nosilnega sistema. Nosilna konstrukcija je sestavljena iz vzdolžnih nosilcev, ki so položeni preko podpor. Nosilci lahko potekajo čez eno ali več polj. Za doseganje večjih razponov so na te nosilce običajno nameščene še prečno prednapete lepljene lamelirane lesene voziščne konstrukcije ali pa so izvedene sovprežne armiranobetonske plošče. Pri manjših razponih in obremenitvah lahko prednapeta lamelirana lepljena lesena voziščna konstrukcija predstavlja kar primarni nosilni sistem. Glavna pomanjkljivost grednih mostov je v tem, da so njihovi razponi omejeni. Leseni gredni mostovi so konkurenčni za razpone do 20 m in je zato za večje razpone potrebno uporabiti druge vrste primarnih nosilnih sistemov.

5.3.2 Ločni mostovi

Veliko število sodobnih lesenih mostov ima primarni ločni nosilni sistem. Ločni sistem omogoča v primeru enakomerno porazdeljene obtežbe ugodno odpornost, saj jo skoraj v celoti prenese preko osnega tlaka in s tem izkorišča celoten prečni prerez. Ločni sistem zato spada med najbolj ekonomične sisteme.

Obstajajo tri različne zasnove uporabe ločnega sistema pri lesenih mostovih, kot je prikazano na sliki 144. Lok ima običajno obliko parabole ali krožnice. Razmerje med razponom (L) in puščico (f), torej L/f je v območju med 4 in 8. Uporabljen material je zaradi možnosti ukrivljenja običajno kar lepljen les. Za manjše razpone do 50 m so običajno uporabljeni veliki prečni prerezi pravokotnih oblik,

medtem ko so palični loki najugodnejši za večje razpone. Pri tem so največje dimenzije posameznih ločnih elementov pogojene s proizvodnimi in transportnimi omejitvami, zato je večina takih lesenih lokov zasnovana kot tročlenski lok s členkastim spojem v temenu loka. Taka zasnova omogoča statično določen sistem, pri katerem sprememba pri vlažnosti, temperaturi in posedkov na mestu podpor ne vplivajo na notranje statične količine [98].



Slika 144: Možne zasnove lesenih ločnih mostov [98].

Na sliki 144a se lok nahaja pod voziščno konstrukcijo, ki jo podpira lok preko tlačnih lesenih elementov. V primeru slike 144b se lok nahaja nad voziščno konstrukcijo, ki je obešena na lok z jeklenimi nateznimi elementi. V zadnjem primeru imamo vmesno zasnovo. V vseh treh primerih se vertikalna obremenitev kot sta lastna teža in prometna obtežba običajno prenese na lok z vertikalnimi elementi, ki jo nato do podpor prenese večinoma preko osnega tlaka. V podporah ima ta tlačna sila razmeroma veliko horizontalno komponento. V primeru a) in c) se lahko horizontalne reakcije potisk zagotovi le s samimi podporami, to je v primeru slabih temeljnih tal težje zagotoviti. V primeru b) imamo dve možnosti za uravnoteženje horizontalnih sil. Prva možnost je podobna kot pri ostalih dveh s pravilno načrtovanimi podporami ali druga pa je z natezno vezjo, ki povezuje obe ločni podpori [98].

Ko imamo podporno konstrukcijo pod krovno, kot je prikazano na sliki 145a imamo tri tipične prednosti:

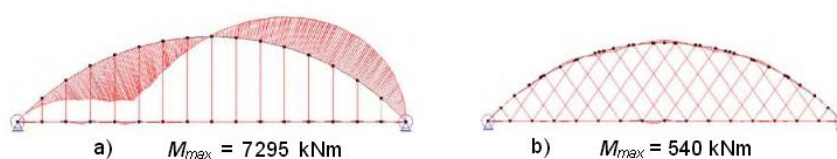
1. voziščna konstrukcija služi kot zaščitna streha podporni konstrukciji,
2. ni omejitev glede števila paralelnih lokov in
3. prečno togost in stabilnost podpornega sistema je običajno enostavno zagotoviti.

Kljub temu pa v mnogih primerih topografija terena mostov ne dovoljuje take zasnove in morajo loki potekati nad krovno konstrukcijo, kot je prikazano na sliki 145b. Pri tej zasnovi in pri vmesni zasnovi 145c sta pri dvopasovnem mostu običajno nameščena dva loka, ki se nahajata vsak na eni strani mostu [98].

Pri lokih, ki so nameščeni nad krovno konstrukcijo je potrebno zagotoviti zadostno bočno stabilnost. V primeru zadostne višine lahko med loke namestimo zavarovalno konstrukcijo. S tem, ko namestimo zavarovalno konstrukcijo, loka povežemo med seboj in tako zagotovimo zadostno bočno togost celotnemu ločnemu sistemu. Kljub temu bo na spodnjem delu loka dokaj velik del nepodprt, saj zaradi zahtevane svetle višine tam ne moremo namestiti dodatne lesene podkonstrukcije. V nekaterih

primerih se lahko na teh mestih uporabljajo jeklene prečne ojačitve z zadostno upogibno togostjo. S tem se tvori okvirni sistem, ki omogoča zadostno prečno togost lokov [98].

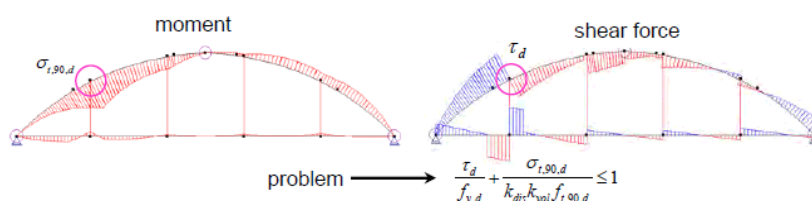
V primeru vertikalnih vešal ali stebrov v primeru, ko se lok nahaja pod krovno konstrukcijo, bo velika koncentrirana osna sila, ki se pojavi zaradi realnih ali projektnih obremenitev težkih tovornjakov, poleg osnih sil povzročila velike upogibne momente in strižne sile v lokih. S tem namenom so bile izvedene študije z uporabo poševno razporejenih vešal, ki ga poimenujejo tudi mrežni sistem vešal. V študiji sta Bell in Wollebek [102]. demonstrirali glavne razlike med dvočlenskima 80-metrskima lokoma z vertikalnimi in poševnimi vešali (slika 145).



Slika 145: Upogibni momenti v loku pri dveh različnih razporeditvah kablov [98].

Zgornja loka imata približno enako prometno obtežbo, ki pa je postavljena na najbolj kritično mesto, kjer povzroča največje upogibne momente v posameznem primeru. Osna tlačna sila, ki se pojavi vzdolž loka, je podobna v obeh primerih. Iz diagramov upogibnih momentov vidimo, da mrežni ločni sistem omogoča ugodnejši prenos obtežbe iz krovne konstrukcije v lok. To še posebej pride do izraza v primeru, ko se prometna obtežba nahaja v bližini podpor. Kljub temu pa imajo mrežni ločni sistemi tudi nekatere pomanjkljivosti [98].

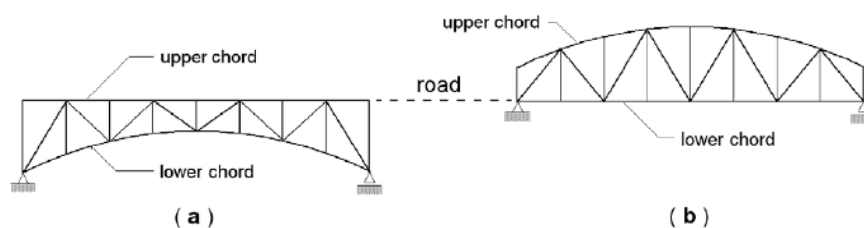
V loku se pojavijo velike upogibne in strižne sile, ki jih povzročajo koncentrirane obtežbe navpičnih vešal, ko prevzemajo koncentrirano prometno obtežbo. V tem primeru pride do težav v povezavi z nategom pravokotno na lesena vlakna. Na sliki 146 je prikazan primer diagrama upogibnih in prečnih sil, ki so problematične pri koncentrirani prometni obtežbi. Upogibni moment na levi strani loka povzroča nateg na konkavni strani in s tem povzroči natezne napetosti pravokotno na lesena vlakna. Na mestu z največjim upogibnim momentom in s tem tudi največjimi napetostmi pravokotno na vlakna ($\sigma_{t,90,d}$) se poleg tega pojavijo tudi velike strižne napetosti (τ_d). Tu je potrebno zadostiti kombiniranemu pogoju, ki je predpisan v SIST EN 1995-1-1, kar pa je v nekaterih primerih kar težko izvedljivo [98].



Slika 146: Kombinacija natega pravokotno na vlakna in strižnih napetosti – pojav problema pri lokih z vertikalnimi vešali [98].

5.3.3 Palični mostovi

Palični mostovi predstavljajo alternativo ločnim nosilnim sistemom, namenjenih cestnemu prometu z razponom, večjim od 20 m. Podobno kot pri ločnem sistemu imamo tudi tukaj tri različne zasnove glede položaja primarnega nosilnega sistema. Paličje se lahko nahaja pod voziščno konstrukcijo (slika 147a), kar omogoča uporabo večjega števila paličij. Prav tako se lahko nahaja nad krovno konstrukcijo ali (kar je manj pogosto) se lahko voziščna konstrukcija nahaja med zgornjim in spodnjim pasom paličja [98].



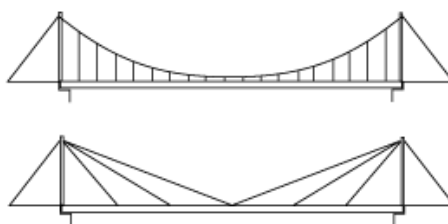
Slika 147: Primer paličnega nosilnega sistema za cestne mostove, a) pod voziščno konstrukcijo in b) nad voziščno konstrukcijo [98].

V primeru, ko se paličje nahaja pod krovno konstrukcijo, je spodnji pas pri večjih razponih običajno ukrivljen (slika 147a), ko pa se paličje nahaja nad voziščno konstrukcijo pa ima lahko prav tako ukrivljen zgornji pas (slika 147b). Paličja v nasprotju z ločnimi sistemi za prevzem vertikalnih obtežb ne potrebujejo v podporah nobenih horizontalnih reakcij. Prav tako imajo manj omejitev glede proizvodnje in transporta, saj lahko posamezne pasove sestavimo iz manjših elementov, ki jih med seboj spojimo v vozliščih. Ti spoji zahtevajo natančno načrtovanje in montažo. Za vezna sredstva se pri modernih paličnih mostovih največkrat uporabljajo jeklene plošče, ki so pritrjene z jeklenimi paličnimi trni ali vijaki. V primeru, ko se paličje nahaja nad krovno konstrukcijo, je potrebno zagotoviti ustrezno bočno stabilnost zgornjega pasu [98].

Pri paličnih konstrukcijah so možne različne variacije razporeditve elementov kot so Warren, modificiran Warren in Pratt paličje (slika 32b in c). Uporabljajo se tudi starejše oblike paličja kot sta parabolčna oblika (angl. bowstrig) in trikotno okvirno paličje (angl. kingpost). Tradicionalne sisteme so modificirali s sodobnimi lesenimi materiali, veznimi sredstvi, sodobnimi krovni konstrukcijami in modernimi zaščitnimi sredstvi in jih uporabili pri najdaljših sodobnih lesenih mostnih konstrukcijah [98].

5.3.4 Mostovi s poševnimi vrvmi in viseči mostovi

Mostovi s poševnimi vrvmi in viseči mostovi so sestavljeni iz relativno toge voziščne konstrukcije, ki s pomočjo vertikalnih vrvi visi na obešalnih kablkih med dvema stolpoma. Celotna obtežba se preko nateznih kablov prenaša na stolpe.



Slika 148: Zgoraj viseči most, spodaj mostovi s poševnimi vrvmi [23].

Most s poševnimi vrvmi je sestavljen iz grednih mostnih nosilcev, ki so togo podprti na dveh ali več mestih. Med togimi podporami so nosilci, podprti s poševnimi kablji iz enega ali več pilonov. Zaradi poševno nameščenih kablov reakcije v podporah povzročijo tlačne sile v voziščni konstrukciji. To je neke vrste prednapetje, ki dodatno poveča upogibno odpornost nosilcev. Pri načrtovanju teh mostov je potrebno paziti na različne togosti in temperaturne raztezne karakteristike materialov [23].

Podobno kot pri prostoležečem grednem nosilnim sistemom je nosilec in voziščni konstrukciji potrebno zagotoviti zadostno stabilnost. Zagotoviti je potrebno uklonsko stabilnost in odpornost proti vplivom vetra in potresa. Na območjih, kjer se lesena konstrukcija priključuje na temelje se običajno uporabljajo jekleni okvirji.

Sodobni mostovi s poševnimi vešali in viseči mostovi se uporabljajo za pešce in kolesarje ter za lažji cestni promet. Večina teh mostov pa premošča večje razpone, ki jih zaradi podpiranja in konfiguracije terena z drugimi vrstami nosilnih sistemov ne bi mogli doseči. Ti mostovi imajo vitko zasnovano voziščne konstrukcije, kar omogoča še dodaten estetski učinek.

Kljub temu, da so trenutno leseni viseči in kabelski mostovi namenjeni predvsem pešcem in kolesarjem, pa trenutno na Norveškem potekajo projekti za lesene štiripasovne mostove, ki bi bili namenjeni celo za običajni cestni promet.

5.3.5 Primeri lesenih mostov velikih razponov

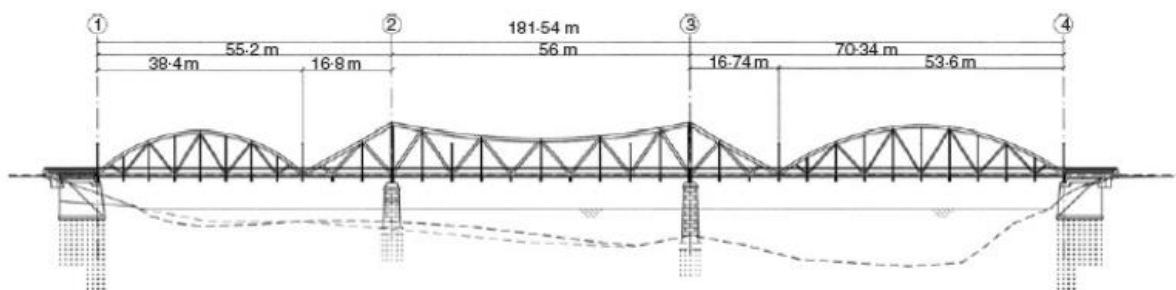
5.3.5.1 Flisa Bridge

Z glavnim razponom 71 m in skupno dolžino 180 m, most Flisa premošča reko Glomma v pokrajini Hendmark na Norveškem. Vse od njegovega dokončanja leta 2003 je to največji leseni cestni most na svetu. Palični most je širok je 10 m in je sestavljen iz lepljenih elementov prečnih dimenzij 600 mm x 710 mm. Celoten palični most so zaradi lažje proizvodnje in transporta, razdelili na manjše segmente dolžine 28 m in jih nato medsebojno spojili na samem mestu gradnje [103].



Slika 149: Lesen palični most Flisa [104].

Lesen most je zamenjal dotrajan jekleni most, ki je imel samo en vozni pas. Zaradi lahke lesene konstrukcije, zmanjšanja stroškov in dobre ohranjenosti so lahko uporabili kar obstoječo podporno konstrukcijo. Konzolni palični most ima podobno zasnovo kot stari jekleni most. Odločili so se za palični nosilni sistem z dvema različnima zasnovama paličja, saj se most razprostira čez tri nesimetrična polja. Dve prostoležeči podprti paličji se nahajata v krajnih poljih z dolžinama 53,6 m in 38,4 m. Osrednje paličje pa je dolgo 89,54 m. Celoten palični most ima v osnovi statični sistem gerberjevega nosilca [103].



Slika 150: Dimenzije mosta Flisa [103].

Na obeh robnih poljih so uporabili paličje s paraboličnim zgornjim pasom in z modificirano Warrenovo razporeditvijo polnil. Glavno previsno paličje ima konkavno oblikovane zgornje pasnice. Največja višina stranskih paličij v temenu znaša 8 m in 9 m. Bočna stabilnost zgornjih pasnic paličij je zagotovljena z leseno palično zavetrovalno podkonstrukcijo. Na vsakem koncu razpona so togo na prečne nosilce nameščeni jekleni stebri. Srednje previsno paličje z ukrivljeno zgornjo pasnico ima najvišjo višino 9,5 m. Podobno kot pri ostalih dveh paličjih je tudi tukaj bočna stabilnost izvedena z lesenim paličjem. Nad podpornima stebroma so na zunanji strani paličja nameščeni jekleni stebri, ki zagotavljajo prenos bočnih obremenitev na spodnje prečne nosilce, ki se nahajajo pod krovno konstrukcijo. Ti jekleni stebri skupaj s prečnimi nosilci tvorijo okvirno konstrukcijo U oblike, ki zagotavlja ustrezno bočno stabilnost [103].



Slika 151: Primer zagotavljanja stabilnosti mostu: Levo – jeklen okvir U oblike na mestu podpore, desno – vertikalni jeklen steber v lesenem paličju [105].

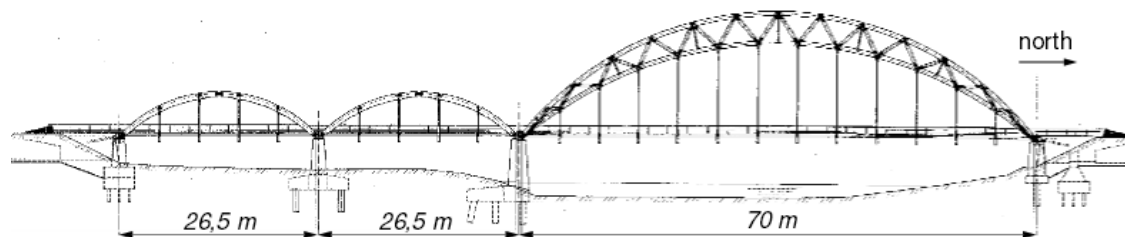
Flisa most ima voziščno konstrukcijo sestavljeno iz prečno prednapetega lameliranega lesa, ki je zaščiten z membrano, na katero so nato namestili asfaltno plast. Vse lesene elemente so dvakratno zaščitili [103].



Slika 152: Gradnja krovne konstrukcije [106].

5.3.5.2 Most Tynset

Most Tynset je bil zgrajen leta 2001 v mestu Tynset na Norveškem in je namenjen normalnemu cestnemu prometu. Glavna nosilna konstrukcija mostu je sestavljena iz treh krožnih lokov, pri čemer sta dva z razponom 26,5 m iz masivnega lameliranega lesa, večji lok z razponom 70 m pa je palični (slika 153). Na glavni lamelirani palični lok je pritrjenih 12 vertikalnih jeklenih vešal, ki nosijo prečne jeklene nosilce, ki podpirajo prednapeto lamelirano leseno voziščno konstrukcijo. Most ima dva pasova za običajen promet in en pas za lažji promet kot so pešci in kolesarji. Skupna širina voziščne konstrukcije znaša 11,7 m [107].



Slika 153: Razponi leseni cestnega mostu Tynset [107].

Glavni lameliran palični lok je sestavljen iz dveh pasov. Dimenzije prečnega prereza zgornjega pasu so 710 mm x 600 mm, spodnjega pa 710 mm x 560 mm. Vsak diagonalni element je sestavljen iz dveh lepljenih nosilcev z dimenzijami 240 mm x 400 mm. Na spodnjem delu pod 10 m višine se širina zgornjega pasu razširi z 710 mm na vse do 1100 mm v podpori [107].



Slika 154: Leseni most Tynset [108].



Slika 155: Glavni palični lok mosta Tynset z vidno zavarovalno konstrukcijo in razširitvijo zgornjega pasu [109].

Bočna stabilnost je zagotovljena z zavarovalno palično konstrukcijo K oblike, ki je nameščena med zgornjima pasovima paličnega loka. Spodnji pas pa je ojačan s 5-imi poševnimi ojačitvami, ki so nameščene med pasom in prečno zavetrovalno konstrukcijo. Prosta svetla višina mostu znaša 6,8 m. Vertikalna vešala so iz polnih jeklenih palic s 70 mm premerom. Celotna količina lepljenega lesa, ki so ga uporabili za en palični lok znaša približno 85 m³. Vodoravno silo v velikosti 3100 kN, ki jo povzroča lok, pa prevzame armiranobetonski opornik [107].

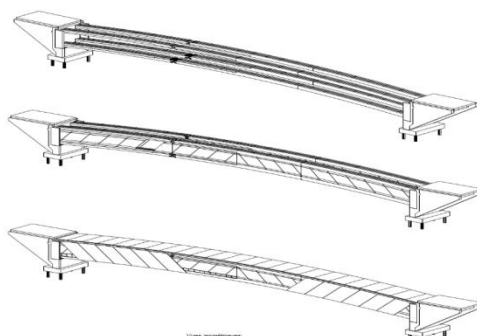
5.3.5.3 Most Maicasagi

Cestni leseni most premošča reko Maicasagi v severno kanadski pokrajini Quebec. Dokončan je bil leta 2012 in je najdaljši cestni leseni most z enojnim razponom. Poleg tega, da premošča 67,5 m velik razpon je dimenzioniran na zelo težka tovorna vozila s 1800 kN veliko skupno prometno obtežbo. Zaradi tega se uvršča med mostove z največjo nosilnostjo. Za leseno konstrukcijo so se odločili zaradi cenovne ugodnosti in zahtev po zelo kratkem časa gradnje [110].



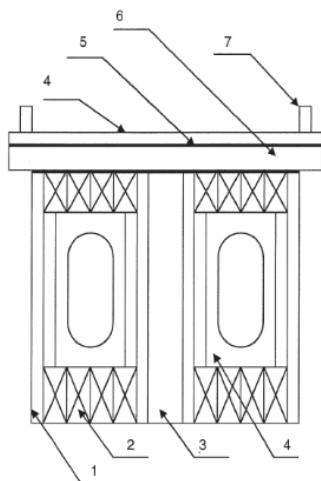
Slika 156: Lesen most Maicasagi [111].

Nosilni sistem mostu je prostoležeči in rahlo ukrivljen gredni nosilec z razponom 67,5 m. Zaradi proizvodnih problemov (maksimalna še možna proizvodna dolžina elementa le 24 m) in transportnih omejitev so celoten most razdelili na 3 manjše segmente. S tem so se izognili spoju na sredini razpona, kjer se pojavljajo največji upogibni momenti (slika 157) [110].



Slika 157: Pregled postopne gradnje mostu: Zgoraj – lepljena pasnica s transportnimi spoji, sredina – vgrajena notranja stojina, spodaj – vgrajena zunanja stojina in diafragma [110].

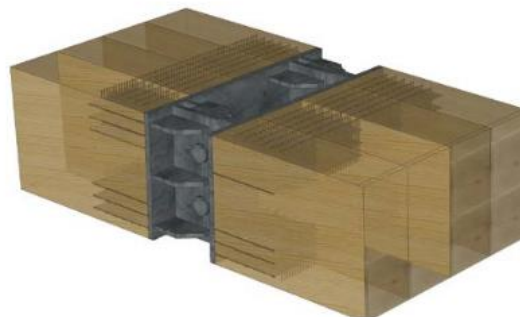
Most je sestavljen predvsem iz lameliranega lepljenega lesa in križno lepljenega lesa. Osnovno nosilno konstrukcijo predstavljata dva velika škatlasta nosilca, ki sta visoka 3,6 m in široka 1,5 m. Skupaj podpirata krovno konstrukcijo iz križno lepljenega lesa s skupno širino 5 m. Obe zgornji in spodnji pasnici škatlastega nosilca sta sestavljeni iz 4 lesenih lepljenih blokov in iz dveh križno lepljenih lesenih stojin, ki sta pod kotom 45° nameščeni vsaka na eni strani. Zunanje stojine so pritrjene direktno na lepljene nosilce, in sicer s pomočjo samovrtalnih vijakov, notranje stojine pa so nanj pritrjene s pomočjo jeklenih profilov (slika 158) [110].



- Dva ukrivljena škatlasta nosilca sestavljena iz lepljenih elementov, ki predstavljajo zgornji in spodnji pas (2),
- Križno lepljene plošče (CLT), ki povezujejo spodnji in zgornji pas (1),
- Križno lepljene plošče (CLT), ki so uporabljene za zagotavljanje togih diafragem, prečnih ojačitev in za krovno konstrukcijo (3), (4), (6),
- Nenosilne vezane plošče za krovno konstrukcijo (5),
- Odbojna ograja (7).

Slika 158: Prečni prerez lesenega škatlastega nosilca [110].

Transportni spoji so sestavljeni iz togih jeklenih plošč s štirimi tečaji. Ti so na spodnjo natezno pasnico pritrjeni z lesnimi jeklenimi vijaki in na zgornjo tlačno pasnico z običajnimi metričnimi vijaki (slika 159). Na mestu gradnje so nato v vsak jeklen tečaj namestili po štiri zatiče na vsako pasnico in s tem zagotovili togo povezavo posameznih segmentov mostu [110].



Slika 159: Transportna spoja – levo na zgornji pasnici, desno na spodnji pasnici [112].

Ker ima most dva škatlasta nosilca, ki so jih nato vzdolž referenčne osi spojili, so v proizvodnji morali sestaviti skupno 6 prefabriciranih elementov. Te elemente so nato s pomočjo avtodvigal dvignili na želeno mesto in jih s pomočjo zatičev spojili med seboj. Po končani montaži osnovnih nosilnih

elementov so na mestu stojine namestili še dodatno plast CLT panelov, ki so jih zaščitili s poševno nameščenimi lesenimi elementi. Zaradi zagotavljanja zračnosti lesa imajo elementi stojine izvrtane luknje. Vsi škatlasti nosilci so zaradi svoje velikosti dostopni za morebitne vzdrževalne preglede [110].



Slika 160: Montaža mostu [112].

6 PRIMERI LESENIH KONSTRUKCIJ V SLOVENIJI

V zadnjih letih se zaradi vse večje ekološke ozaveščenosti in trajnostne gradnje uporaba lesa povečuje tudi v Sloveniji, vendar močno zaostajamo v proizvodnji in porabi lepljenega lesa za geografsko primerljivo Avstrijo, pri čemer je pogozdenost obeh držav primerljiva [12].

Čeprav je trenutno les najbolj množično uporabljen pri stanovanjski montažni gradnji so po Sloveniji zgrajeni že številni objekti z relativno velikimi razponi, enako kot po svetu pa najpogostejše konstrukcije z največjimi razponi predstavljajo večnamenski športni objekti [1]. Pri teh konstrukcijah se uporabljajo lamelirani lepljeni leseni nosilci raznih oblik in dimenzij, ki so razširjeni na našem tržišču. Uporaba in razširjenost lepljenih konstrukcij je tako kot drugod po svetu v veliki meri odvisna od proizvajalcev in ponudnikov posameznih lepljenih nosilnih elementov. V Sloveniji je trenutno največji proizvajalec lepljencev podjetje Hoja iz Škofljice, ki z svojimi dolgoletnimi izkušnjami ponuja elemente z relativno velikimi razponi in lahko konkurira tudi drugim svetovno uveljavljenim proizvajalcem. Njihovi začetki segajo že v leto 1968, trenutno 3500 m³ proizvedenih lepljenih elementov letno, pa je največji slovenski proizvajalec vse od tedaj [113]. V zadnjem času pa na našem trgu zastopane tudi drugi tuji proizvajalci predvsem iz sosednje Avstrije in Italije. Med temi bi izpostavil predvsem podjetje Rubner, ki s svojimi lesenimi proizvodi in konstrukcijami dosegajo zavidljive razpone.

V Sloveniji so bile v preteklem času zgrajene večinoma lepljene konstrukcije podjetja Hoja. Pri konstrukcijah se najpogosteje uporabljajo prostoležeči nosilci z zakrivljeno osjo, ravni prostoležeči nosilci, tročlenski okvirni sistemi, tročlenski nosilec z vezjo, prostoležeči nosilci z naklonom in tročlenski ločni nosilci. Za doseganje razponov preko 35 m pa se najpogosteje uporabljajo tročlenski okvirni in tročlenski ločni nosilni sistemi. Konstrukcije večjih razponov so namenjene predvsem za športne dvorane, javne prostore in večje industrijske hale. Ena izmed takih konstrukcij je tudi športna dvorana Banex v Slovenskih Konjicah, ki ima tročlenski okvirni nosilni sistem. Največji razpon dvorane pa znaša 38 m (slika 161) [114].



Slika 161: Tročlenska okvirna lesena konstrukcija športne dvorane Banex [114].

Poleg lesenih strešnih konstrukcij so v Sloveniji zgrajeni tudi leseni mostovi, ki so namenjeni predvsem pešcem in kolesarjem. Pri teh mostovih so največkrat uporabljeni prostoležeči ravni nosilci in tročlenski ločni nosilni sistemi. Sodobnih lesenih mostov večjih razponov, kot se pojavljajo v drugih razvitih državah, in bi bili namenjeni cestnem prometu, pa trenutno v Sloveniji ni. Eden izmed največjih razponov pa ima pred kratkim zgrajen leseni most, ki poteka preko Malega grabna na cesti dveh cesarjev v Ljubljani. Njegov razpon znaša malo preko 40 m in je zgrajen iz dveh prostoležečih lesenih lepljenih nosilcev, ki sta med seboj povezana z prečnimi jeklenimi profili. Za zagotavljanje stabilnosti in prevzem horizontalnih sil je med prečnimi jeklenimi profili nameščena še zavarovalna konstrukcija iz jeklenih palic [115].



Slika 162: Lesena konstrukcija mostu čez Mali graben [115].



Slika 163: Prečne povezave obeh nosilcev in zavarovalna konstrukcija [115].

7 ZAKLJUČEK

Les je naraven in okolju prijazen konstrukcijski material. Sodobna nizko ogljična družba stremi k čedalje večji okoljski ozaveščenosti in nizkim ogljičnim izpustom v ozračje, zato ima les odločilno prednost pred ostalimi gradbenimi materiali. Poleg ekološkega vidika pa ima les tudi zelo dobre mehanske lastnosti, ki v fazi načrtovanja velikokrat pretehtajo pri izbiri ustreznega materiala. Ena pglavitnih prednosti lesa je predvsem v njegova velika nosilnost v primerjavi z lastno težo. Ker je les naraven material in je anizotropen, ima tudi nekatere pomanjkljivosti, ki jih je potrebno upoštevati v fazi načrtovanja. Razvoj sodobnih lesenih materialov poteka v smeri zmanjšanja pomanjkljivosti lesa in k razvoju čedalje boljših lesenih materialov, tako iz vidika nosilnosti, kot tudi iz vidika obstojnosti lesenih konstrukcij. Razviti so bili številni sodobni leseni materiali kot so lameliran lepljen les, proizvodi iz skupine konstrukcijskega kompozitnega lesa in najsodobnejši CLT plošče.

Poleg sodobnih lesenih konstrukcijskih materialov je lesena gradnja odvisna predvsem od ustreznih veznih sredstev. Les se spaja težje kot drugi materiali, zato se pri številnih konstrukcijah uporabljajo predvsem jeklena vezna sredstva. Pri konstrukcijah velikih razponov se uporabljajo predvsem jeklene plošče v kombinaciji z jeklenimi trni in vijaki, trenutni razvoj pa poteka v smeri odkrivanja novih veznih sredstev, ki bi omogočala še večje nosilnosti in boljše obnašanje. Glavni vidik uporabe sodobnih veznih sredstev je predvsem enostavnost gradnje in posredno tudi hitrost, kar se je v preteklosti izkazalo za zelo pozitiven dejavnik lesene gradnje tudi v primeru velikih konstrukcij.

Z razvojem sodobnih materialov in veznih sredstev se je odprlo novo področje uporabe lesa za konstrukcije tako pri gradnji visokih objektov kot tudi za konstrukcije velikih razponov.

V diplomski nalogi je razčlenjen predvsem vidik uporabe lesa pri konstrukcijah velikih razponov. Nosilni sistemi, primerni predvsem za velike razpone, so podobni kot pri drugih gradbenih materialih, vendar so leseni sistemi najučinkovitejši predvsem zaradi ugodnega razmerja med nosilnostjo in lastno težo. Lesene konstrukcije so zaradi tega ugodne tudi v primeru slabo nosilnih temeljnih tal. Po svetu so bile zgrajene številne lesene konstrukcije velikih razponov. Množično se uporabljajo okvirni nosilni sistemi, s katerimi lahko v nekaterih primerih premoščamo razpone velike tudi do 50 m.

Za večje razpone se uporabljajo palični ravninski nosilni sistemi. Pri teh nosilnih sistemih je potrebno izpostaviti predvsem lesene športne dvorane na Norveškem, ki so jih zgradili za namen olimpijskih iger. Z njimi so želeli predstaviti prednosti lesene gradnje in primernost lesa tudi za velike razpone. Zgradili so številne lesene športne objekte zavidljivih razponov, saj so v primeru Hamar Olympic Hall dosegli kar 96,4 m velik razpon. Pri tem objektu so uporabili ločni palični nosilni sistem, ki izkorišča dobro nosilnost lesa predvsem v tlaku. Kljub temu pa imajo tudi palični nosilni sistemi določene

omejitve, saj se pri velikih razponih pojavi problem glede zagotavljanja zadostne stabilnosti. Iz realiziranih projektov pa so se pri velikih razponih izkazale predvsem prostorske konstrukcije. Kljub temu, da les omogoča oblikovanje številnih različnih prostorskih nosilnih sistemov, je potrebno med temi izpostaviti predvsem kupolasti nosilni sistem.

Lesene kupolaste konstrukcije trenutno dosegajo največje razpone in se lahko uvrščajo ob bok tudi jeklenim kupolam, ki se trenutno uvrščajo med največje konstrukcije na svetu. Realen prikaz zmožnosti sodobnih lesenih je najlažje predstaviti iz praktičnih primerov že realiziranih objektov. Zato so diplomskem delu predstavljene najpogostejše vrste lesenih kupol. Med temi je trenutno največja Superior Dome v ZDA, ki dosega 163,4 m velik razpon. Kupolast sistem je ugoden predvsem zaradi ugodnega raznosa obtežbe in stabilnosti. Sodobni vezni materiali obenem omogočajo dodatno poenostavitev pri gradnji kupol ter pospešijo celotno gradnjo. Razširjene so tudi v Evropi, kjer sta bile v letu 2015 dograjeni dve kupoli v Italijanskem mestu Brindisi. Večja ima premer kar 143 m, pri gradnji pa so uporabili vse sodobne tehnologije lesene gradnje.

Velik napredek trenutno poleg inženirskih ostrešij poteka tudi v leseni mostogradnji. Tu prevladujejo predvsem skupine držav, ki so sprejele iniciative o povečani uporabi lesa pri mostovih. Za velike razpone se v praksi uporabljajo predvsem palični in ločni nosilni sistemi, ki s pridom izkoriščajo dobre lastnosti obnašanja lesa predvsem v tlaku. Trenutno je mejni razpon dosežen prav s tema dvema sistemoma. Največji razpon med cestnimi mostovi kar 70,34 m ima trenutno palični cestni most Flisa na Norveškem. Zato ker želijo inženirji doseči še večje razpone, po svetu potekajo načrtovanja še daljših lesenih mostov namenjenih celo avtocestnemu prometu.

Na tem mestu pa bi rad izpostavil še leseno gradnjo v Sloveniji. Kljub temu da smo z lesom zelo bogata država pa trenutno uporaba lesa še ni tako množično razširjena kot v drugih primerljivih državah. V preteklih letih so bila zgrajene številne leseni objekti, kjer so za večje razpone uporabljali predvsem lameliran lepljen les. Pri teh objektih pa je najbolj pogosto uporabljen okvirni nosilni sistem s katerimi so dosegli 38 m velik razpon. Iz vidika uporabe lesa za večje razpone ima Slovenija v prihodnosti še velik potencial. Trenutno največji razpon mostu za pešce in kolesarje malo preko 40 m pa ima most preko Malega grabna na Cesti dveh cesarjev v Ljubljani.

Glede vseh predstavljenih nosilnih sistemov lesenih konstrukcij z velikim razponom tako iz inženirskega vidika kot tudi iz arhitekturnega vidika lahko sklepam, da ima lesena gradnja še veliko neodkrita potenciala. Z raziskavami in razvojem materialov in veznih sredstev ter z razvojem postopkov in programske opreme za projektiranje se lahko razponi bodočih lesenih konstrukcij celo kosajo z največjimi jeklenimi. V diplomski predstavljeni realizirani leseni projekti dokazujejo ravno to trditev. Zato lahko enostavno zaključim, da je les gradbeni material prihodnosti.

VIRI

- [1] Lopatič, J. 2009. Konstrukcijski sistemi naprednih lesenih konstrukcij. V: Kuzman, M. K. (ur.). Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: str.132-137.
- [2] Thelandersson, S. 2003. Timber Engineering – General Introduction. V: Thelandersson, S.(ur.),Larssen, H.J.(ur.). Timber Engineering. London, John Wiley & Sons: str. 7-11.
- [3] Crocetti, R. 2016. Large – Span Timber Structures. Proceedings of the World Congress on Civil, Structural and Environmental Engineering 2016. Češka.
http://www.avestia.com/CSEE2016_Proceedings/files/paper/ICSENM/124.pdf (Pridobljeno 10.5.2016.)
- [4] Structuremag. 2016.
<http://www.structuremag.org/?p=2622> (Pridobljeno 14.4.2016.)
- [5] Lopatič, J. 2010. Študijsko gradivo, Lesene konstrukcije 2.
- [6] Müller, C. 1998. Entwicklung des Holzleimbaues unter besonderer Berücksichtigung der Erfindungen von Otto Hetzer - ein Beitrag zur Geschichte der Bautechnik, str. 45
<https://e-pub.uni-weimar.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/38> (Pridobljeno 14. 4. 2016.)
- [7] Bildindex. 2016.
<http://www.bildindex.de/obj20718671.html#home> (Pridobljeno 14.4.2016.)
- [8] Hascher, R. 2015. Introduction. V: Hascher, R. (ur.) in sod. Emergent Timber Technologies, Materials, Structures, Engineering Projects, Basel, Birkhäuser, str. 6 - 7
- [9] Saje, F. 2009. Sodobne lesene konstrukcije. V: Kuzman, M. K. (ur.). Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: str. 138-143.
- [10] Delo. 2013.
<http://www.delo.si/gospodarstvo/okolje/najbolj-gozdnata-v-eu-je-svedska-slovenija-je-cetrta.html>
(Pridobljeno 12.4.2016.)

- [11] Šernjak, M. 2009, Konstrukcijski kompozitni les. V: Kuzman, M. K. (ur.). Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: str. 84-88.
- [12] Hrovatin, J., Kitek Kuzman, M., Kušar, J. 2006. Leseni lepljeni lamelirani konstrukcijski elementi. Les (Ljubljana) letnik 58. številka 4 (2006) str. 106-114.
<http://www.dlib.si/?URN=URN:NBN:SI:DOC-SSRC785Z> (Pridobljeno 20.11.2015.)
- [13] Kuzman, M. K., Vratuša, Š. 2009. Lesene lepljene konstrukcije v arhitekturi. V: Kuzman, M. K. (ur.). Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: str. 144-151.
- [14] Glulam. 2015.
http://www.glulam.co.uk/images_site/production.gif (Pridobljen 20.11.2015.)
- [15] Crespell, P., Gagnon, S. 2010. Cross Laminated Timber: a Primer. FPInnovations publication
https://fpinnovations.ca/MediaCentre/Brochures/cross_laminated_timber_the_book.pdf
(Pridobljen 14.11.2015.)
- [16] CBD. 2015.
<http://www.cbd.si/lesena-gradnja/krizno-lepljen-les-xlam> (Pridobljeno 28. 10. 2015.)
- [17] Dujič, B. 2008. Konstrukcije iz križno lepljenih lesenih panelov - nova pot sodobnega gradbeništva.
http://www.lesotekahise.si/uploads/images/naslovnice/Kri%C5%BEno_lepljene_konstrukcije.%20Dr.Bruno%20Dujic%C4%8D.pdf (Pridobljeno 15.11.2015.)
- [18] Augustin, M., 2008. V: Augustin, M.(ur.) in sod. Leonardo da Vinci Pilot Projects “Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS” . Handbook 1 – Timber Structures : str. 63-98
http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook1_final.pdf (Pridobljeno 22. 11. 2015.)
- [19] Thefifthestate. 2015.
<http://www.thefifthestate.com.au/articles/clt-could-spark-local-manufacturing-industry/51883>
(Pridobljeno 22. 11. 2015.)

- [20] Hoho-wien. 2016.
http://www.hoho-wien.at/wp-content/uploads/Au%C3%9Fenansicht_Ausschnitt1.jpg
(Pridobljeno 4. 3. 2016.)
- [21] Jeska, S. 2015. Elephant house, Zurich Zoo. V: Hascher, R. (ur.) in sod. Emergent Timber Technologies, Materials, Structures, Engineering Projects, Basel, Birkhäuser: str. 137 - 144
- [22] Platform-ad. 2016.
<http://www.platform-ad.com/elephant-house-zoo-zurich/> (Pridobljeno 4. 3. 2016.)
- [23] Svensklimitra - Glulam handbook. 2016.
www.svensklimitra.se/en/limHTML/ (Pridobljeno 10. 1. 2016.)
- [24] Crocetti, R. 2015. 7 – 11. poglavje. V: Vesanen, T. (ur.), Viljakainen, M. (ur.) in sod. LIIMAPUUKÄSIKIRJA osa 2 - Priročnik za lepljene konstrukcije 2.del. Helsinki.
http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuuk%C3%A4sikirja%20Osa%202_0.pdf
(Pridobljeno 15. 1. 2016.)
- [25] Chudley, R., Greeno, R. 2006. Building Construction Handbook. UK, Butterworth-Heinemann: str. 422.
- [26] Hess-timber. 2015.
<http://www.hess-timber.com> (Pridobljeno 29. 11. 2015)
- [27] Mcadamdesign. 2015.
<http://www.mcadamdesign.co.uk/news11-14-Structural-Award-Bangor-Aurora.htm>
(Pridobljeno 29. 11. 2015)
- [28] Farrans. 2015.
<http://www.farrans.com/fs/img/news/slideshow/rs-900x/bangor-pool-2-16-1-12-151.jpg>
(Pridobljeno 29. 11. 2015)
- [29] Premrov, M., Tajnik, M. 2008. Planar timber structures. V: Augustin, M.(ur.) in sod. Leonardo da Vinci Pilot Projects “Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS” . Handbook 1 – Timber Structures : str. 158 – 170.
http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook1_final.pdf (Pridobljeno 22. 11. 2015.)

- [30] Cwc. 2015.
<http://cwc.ca/wp-content/uploads/trusses-ApplicationsHistoryDesignandManufacturing.pdf>
(Pridobljeno 22. 11. 2015.)
- [31] Rug, W., Mönck, W. 2008. Holzbau: Bemessung und Konstruktion. Berlin, Beuth Verlag : str 425 – 427.
- [32] Nielson, J. 2003. Trusses and Joints with Punched Metal Fasteners. V: Thelandersson, S.(ur.), Larssen, H.J. (ur.). Timber Engineering. London, John Wiley & Sons: str. 365-382.
- [33] SIST EN 1995-1-1:2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1.del: Splošna pravila in pravila za stavbe: 124 str.
- [34] Mii. 2015.
<http://www.mii.com/miilib/31/C/%7BC53A8DAF-FC4B-4A67-87ED-C330ECE3F8C6%7D.jpg> (Pridobljeno 15. 12. 2015.)
- [35] Pascha, K., S. 2015a. Trade fair hall 11. V: Hascher, R. (ur.). Emergent Timber Technologies, Materials, Structures, Engineering Projects, Basel, Birkhäuser: str. 95 – 100.
- [36] Timberconstruction.wiehag. 2016.
<http://timberconstruction.wiehag.com/typo3temp/pics> (Pridobljeno 3. 2. 2016.)
- [37] Martinsons. 2016.
<http://www.martinsons.se/om-martinsons> (Pridobljeno 10. 2. 2016.)
- [38] Edsbynarena. 2016.
<http://edsbynarena.se/> (Pridobljeno 10. 2. 2016.)
- [39] Basté, J. C. 2012. Design method for strut-beam connection in hinged frames. Masters Dissertation, Division of Structural Mechanics, LTD, Lund University, Sweden : str. 11
<http://www.byggmek.lth.se/fileadmin/byggnadsmekanik/publications/tvsm5000/web5150.pdf>
(Pridobljeno 10. 12. 2015.)
- [40] Chudley, R., Greeno, R. 2006. Building Construction Handbook. UK, Butterworth- Heinemann: str. 422

- [41] Ertastan, E. 2005. The performance of medium and long span timber roof structures: a comparative study between structural timber and steel. Master of Science in Building Science in Architecture. Turčija. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University.
<https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12606810/index.pdf> (Pridobljeno 11. 12. 2015.)
- [42] Natterer, J., Winter, W. 2004. Built examples: structures. V: Herzog, T. in sod. Timber Construction Manual. Basel, Birkhäuser: str. 196, 201, 203, 212 – 213.
- [43] E. C. Ozelton. 2008. Timber Designers' Manual, UK, Blackwell Publisher, 3. izdaja : str. 348-349
- [44] Malo, K. A., Angst, V. 2008. Glued Laminated Timber. V: Augustin, M.(ur.) in sod. Leonardo da Vinci Pilot Projects “Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS” . Handbook 1 – Timber Structures : str. 58 – 61.
http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook1_final.pdf (Pridobljeno 14. 12. 2015.)
- [45] Timberslabsolution. 2015.
<http://www.timberlabsolutions.com> (Pridobljeno 14. 12. 2015.)
- [46] Walsh-industries. 2015.
http://www.walsh-industries.com/Walsh_Industries_Website/Industry_Links_files/EWS-X440-A.pdf (Pridobljeno 14. 12. 2015.)
- [47] Milošević, V., Milošević, N., Milošević, B., 2014. Thrust Line Dependence on the Load and SAG. International conference of Contemporary achievements in civil engineering 2014. Subotica, Srbija: str. 365 – 368.
<http://www.gf.uns.ac.rs/~zbornik/doc/ZR25.49.pdf> (Pridobljeno 13. 2. 2016.)
- [48] Fayrre, A., Journot, J - B. 2005. Timber trussed arch for long span. Master's Thesis in the International Master's Programme in Structural Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Göteborg, Švedska, Chalmers University of Technology: str.
<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/10772.pdf> (Pridobljeno 13. 2. 2016.)
- [49] Oslopinclub. 2016.
<http://www.oslopinclub.org/images/vikingskipet.jpg> (Pridobljeno 15. 2. 2016.)

- [50] Nielstorp. 2016.
<http://nielstorp.no/wp-content/uploads/2015/03/> (Pridobljen 15. 2. 2016.)
- [51] Ansell, M., 2015. Wood Composites. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. UK. Cambridge Woodhead Publishing: str. 422.
- [52] Cwc - Richmond Olypic Oval. 2016.
http://cwc.ca/wp-content/uploads/publications-casestudy-RichmondOval_low-res.pdf
(Pridobljeno 16. 2. 2016.)
- [53] Cannondesign - Richmond Olypic Oval. 2016.
<http://www.cannondesign.com/assets/NewOvalFeature.jpg> (Pridobljeno 16. 2. 2016.)
- [54] Fastepp - Richmond Olypic Oval. 2016.
<http://www.fastepp.com/index.php/en/projects-2/recreational/richmond-olympic-oval-roof>
(Pridobljeno 16. 2. 2016.)
- [55] Images.adsttc - Richmond Olypic Oval. 2016.
http://images.adsttc.com/media/images/5008/83f5/28ba/0d50/da00/0d16/medium_jpg/stringio.jpg?1414536155 (Pridobljeno 16. 2. 2016.)
- [56] Cisc-icca - Richmond Olypic Oval. 2016.
<http://www.cisc-icca.ca/projects/international/2010/richmond-speed-skating-oval> (Pridobljeno 16. 2. 2016.)
- [57] Aia - Richmond Olypic Oval. 2016.
<http://aia.org/aiaucmp/groups/aia/documents/pdf/aiab085779.pdf> (Pridobljeno 16. 2. 2016.)
- [58] Lh5.ggpht - Richmond Olypic Oval. 2016.
http://lh5.ggpht.com/Uzm9uY6ln_c/TDz6-f3X3oI/AAAAAAAAABog/SdoMrDLYQGI/image_thumb24.png?imgmax=800 (Pridobljeno 16. 2. 2016.)
- [59] Materna, A., Lokaj, A. 2008. Spatial structures. V: Augustin, M.(ur.) in sod. Leonardo da Vinci Pilot Projects “Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS”. Handbook 1 – Timber Structures : str. 170 – 177.
http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook1_final.pdf (Pridobljeno 20. 2. 2016.)

- [60] Stitic, A., Weinand, Y. 2015. Timber Folded Plate Structures – Topological and Structural Considerations. Švica, International Journal of Space Structures Vol. 30 No. 2, 2015: str. 169 – 171.
https://www.researchgate.net/publication/281664766_Timber_Folded_Plate_Structures_-_Topological_and_Structural_Considerations (Pridobljeno 5. 3. 2016.)
- [61] Trautz, M., Herkrath, R. 2009. The application of folded plate principles on spatial structures with regular, irregular and free - form geometries. Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures. Editorial Universitat Politècnica de València: str. 3.
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/6765/PAP_TRAUTZ_1019.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Pridobljeno 5.3.2016.)
- [62] Roche, S., Mattoni, G., Weinand, Y. 2015. Rotation Stiffness at Ridges of Timber Folded – plate Structures. Švica, International Journal of Space Structures Vol. 30 No. 2 2015: str. 153 – 155.
https://infoscience.epfl.ch/record/211095/files/Space%2030-2_08.pdf (Pridobljeno 5.3.2016.)
- [63] Robeller, C., W., M., 2015. Integral Mechanical Attachment for Timber Folded Plate Structures. Doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne EPFL: str. 22, 98.
https://infoscience.epfl.ch/record/205759/files/EPFL_TH6564.pdf (Pridobljeno 5.3.2016.)
- [64] Architecturelab. 2016.
<http://architecturelab.net/st-loup-chapel-localarchitecture/> (Pridobljeno 5.3.2016.)
- [65] Hoefakker, J., H., 2010. Theory Review for Cylindrical Shells and Parametric Study of Chimneys and Tanks. Doctoral thesis Delft University of Technology, Eburon Academic Publishers, Delft, str. 7 – 9.
http://repository.tudelft.nl/assets/uuid...ae33.../JH_Hoefakker_Proefschrift.pdf
(Pridobljeno 14.3.2016.)
- [65] Toussaint, M.H. 2007. A Design Tool for Timber Gridshells, The Development of a Grid Generation Tool. Master's thesis. Netherlands, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section of Structural and Building Engineering, Structural Design Lab: str. 14 – 38, 50 – 55.
<http://repository.tudelft.nl/> (Pridobljeno 20. 3. 2016.)
- [66] Pascha, K., S. 2015b. Historical design typologies. V: Hascher, R. (ur.). et.al. Emergent Timber Technologies, Materials, Structures, Engineering Projects, Basel, Birkhäuser: str. 10 – 12.

- [67] Makowski, Z.,S., 1985. Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults. London. Elsevier Applied Science Publishers: str. 408.
- [68] Roofstructures.thumblr. 2016.
<http://roofstructures.tumblr.com/> (Pridobljeno 20. 3. 2016.)
- [69] Ruske, W., 2004. Timber construction for Trade, Industry, Administration. Basel. Birkhäuser: str. 90-95.
- [70] Gmp-architekten. 2016.
<http://www.gmp-architekten.com/projects.html> (Pridobljeno 22. 3. 2016.)
- [71] Hung, W.H. 2009. A comparative study of structural material for dome construction. Masters of Engineering in Civil and Environmental Engineering, Massachusetts: str. 20.
<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/51573> (Pridobljeno 11. 4. 2016.)
- [72] Lan, T. T. 1999. Space Frame Structures. V: Chen W-F. Handbook of Structural Engineering. Boca Raton. CRC Press LLC: str. 18 – 21.
http://3dspaceco.com/public/user_data/shokouh/ (Pridobljeno 11. 4. 2016.)
- [73] Häring, C. 2012. Dome Structures. Saldome 2. Seminário Coberturas de Madeira, P.B. Lourenço e J.M. Branco (eds.): str. 129 – 130.
http://www.hms.civil.uminho.pt/events/coberturas_madeira/127_132.pdf (Pridobljeno 14. 4. 2016.)
- [74] Wikipedia – Tacoma Dome. 2016.
https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Dome (Pridobljeno 15. 4. 2016.)
- [75] Pond5- Tacoma Dome. 2016.
<http://www.pond5.com/stock-footage/12610626/close-aerial-view-tacoma-dome-event-center.html> (Pridobljeno 15. 4. 2016.)
- [76] Static.digischool - Tacoma Dome. 2016.
<http://static.digischool.nl/ckv2/ckv3/kunstentechniek1/koepelhout> (Pridobljeno 15. 4. 2016.)
- [77] Westernwoodstructures – Tacoma Dome. 2016.
<http://westernwoodstructures.blogspot.si/2012/08/the-tacoma-dome.html> (Pridobljeno 15. 4. 2016.)

- [78] Panoramio – Tacoma Dome. 2016.
<http://www.panoramio.com/photo> (Pridobljeno 15. 4. 2016.)
- [79] Othilia, G. 2013. Geodesic Structures. Intenational Journal of Education and Research. Vol. 1 No. 5 maj 2013: str. 1- 3.
<http://www.ijern.com/images/May-2013/23.pdf> (Pridobljeno 15. 4. 2016.)
- [80] Ww1.prweb – Superior Dome. 2016.
<http://ww1.prweb.com/prfiles/2012/03/09/9270208/CloseUp.jpg> (Pridobljeno 16. 4. 2016.)
- [81] Jimwestphoto – Superior Dome. 2016.
<http://jimwestphoto.com/gallery/albums/upload%2012-20-07> (Pridobljeno 16. 4. 2016.)
- [82] Wikiwand – Odate Jukai Dome. 2016.
http://www.wikiwand.com/en/Odate_Jukai_Dome (Pridobljeno 16. 4. 2016.)
- [83] Wooddays – Odate Jukai Dome. 2016.
www.wooddays.eu (Pridobljeno 16. 4. 2016.)
- [84] Drive.nissan – Odate Jukai Dome. 2016.
http://drive.nissan.co.jp/C/IMAGEC/1/37075/37075_2_xl.jpg (Pridobljeno 16. 4. 2016.)
- [85] Upload.wikimedia – Odate Jukai Dome. 2016.
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/03/Oodatedome.jpg/440px-Oodatedome.jpg> (Pridobljeno 16. 4. 2016.)
- [86] Promolegno – Odate Jukai Dome. 2016.
<http://www.promolegno.com/fileadmin/proholz/media> (Pridobljeno 16. 4. 2016.)
- [87] Woodcn – Odate Jukai Dome. 2016.
www.woodcn.org.img.800cdn.com/uploadfile/project (Pridobljeno 16. 4. 2016.)
- [88] Wikipedia – Odate Jukai Dome. 2016.
https://en.wikipedia.org/wiki/Odate_Jukai_Dome (Pridobljeno 16. 4. 2016.)
- [89] Cdn.agrarverlag – Odate Jukai Dome. 2016.
<https://cdn.agrarverlag.at/imgsrv/to/mmedia/image/> (Pridobljeno 16. 4. 2016.)

- [90] Natterer, J., Winter, W., 1988. Design and Erection of Hanging Timber Shell in Vienna. IABSE Proceedings P – 129/88. str. 90 – 91.
<http://retro.seals.ch> (Pridobljeno 22. 4. 2016.)
- [91] Naicu, D., Harris, R. in Williams, C. 2014. Timber Gridshells: Design methods and their application to a temporary pavilion. In: World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2014, 8.10.2014 – 8.14.2014, Quebec City.
<http://opus.bath.ac.uk/41279/> (Pridobljeno 24. 4. 2016.)
- [92] Detail – Manheim Multihalle. 2016.
http://www.detail.de/fileadmin/_migrated/pics (Pridobljeno 24. 4. 2016.)
- [93] S-media-cache-ak0.pinimg – Manheim Multihalle. 2016.
<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com> (Pridobljeno 24. 4. 2016.)
- [94] Shells.princeton – Manheim Multihalle. 2016.
<http://shells.princeton.edu/Mann1.html> (Pridobljeno 24. 4. 2016.)
- [95] H4x – Savill Garden. 2016.
<http://h4x.co.uk/savill-building-large.jpg> (Pridobljeno 24. 4. 2016.)
- [96] Harris, R., Roynon, J., 2008, The Savill Garden Gridshell Design and Construction. In: World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2008, 6.2.2008 - 6.5.2008, Miyazaki.
<http://opus.bath.ac.uk/13582/> (Pridobljeno 24. 4. 2016.)
- [97] Fewrightstannergate – Savill Garden. 2016.
<https://fewrightstannergate.files.wordpress.com/2013/02/savill-gardens1.jpg>
(Pridobljeno 24. 4. 2016.)
- [98] Bell, K. 2008. Timber Bridges. V: Augustin, M.(ur.) in sod. Leonardo da Vinci Pilot Projects “Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS”. Handbook 1 – Timber Structures : str. 209 – 217.
http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook1_final.pdf (Pridobljeno 22. 11. 2015.)
- [99] Freedman, G., Mettem, C., Larsen, P., Edwards, S., Reynolds, T., Enjily, V. 2002. Timber Bridges and Foundations.
[http://www.forestry.gov.uk/pdf/intectbfrep.pdf/\\$FILE/intectbfrep.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/intectbfrep.pdf/$FILE/intectbfrep.pdf) (Pridobljeno 27. 4. 2016.)

- [100] Structurecraft – Bow River pedestrian bridge. 2016.
<http://www.structurecraft.com/projects/bow-river-pedestrian-bridge> (Pridobljeno 27. 4. 2016.)
- [101] Spotidoc – Steien Bridge. 2016.
<http://spotidoc.com/doc/2810014/bridge---sweco> (Pridobljeno 27. 4. 2016.)
- [102] Bell, K., Wollebaek, L. 2004. Large, mechanically joined glulam arches. 8th World Conference on Timber Engineering. Lahti, Finland: str. 55-66.
http://support.sbcindustry.com/Archive/2004/jun/Paper_010.pdf?PHPSESSID=ju29kfh90oviu5o371pv47cgf3 (Pridobljeno 27. 4. 2016.)
- [103] Tung, H. 2009. Critical analysis of the Flisa Bridge. Proceeding of Bridge Engineering 2 Conference 2009, University of Bath, Bath, UK.
<http://www.bath.ac.uk/ace/uploads/StudentProjects/Bridgeconference2009/Papers/TUNG.pdf> (Pridobljen 5. 5. 2016.)
- [104] Static.panoramio – Flisa Bridge. 2016.
<http://static.panoramio.com/photos/large/12574185.jpg> (Pridobljeno 5. 5. 2016.)
- [105] Vegvesen – Flisa Bridge. 2016.
<http://www.vegvesen.no/attachment/202445/binary/392747> (Pridobljeno 5. 5. 2016.)
- [106] Puuinfo – Flisa Bridge. 2016.
http://puuinfo.ee/pdf/seminar_uutpohjalapuitechituses/Large_timber_structures_in_Norway.pdf (Pridobljeno 5. 5. 2016.)
- [107] Bell, K. and Karlsrud, E. 2001. Large glulam arch bridges – a feasibility study, Proceedings of the IABSE conference on Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finska.
http://folk.ntnu.no/bell/Projects/Network_arch.pdf (Pridobljeno 5. 5. 2016.)
- [108] 4.bp.blogspot – Tynset Bridge. 2016.
http://4.bp.blogspot.com/_9Ib4JyeM6bU/TGAdY8QOfwI/AAAAAAAAABQ4/QohfpQBx3G0/s1600/Trondheim+August+136.JPG (Pridobljeno 5. 5. 2016.)
- [109] Media.thumblr – Tynset Bridge. 2016.
http://61.media.tumblr.com/d1e7c8200d1804e02e8b702b52bc863c/tumblr_nu3g1kGaES1u16ksoo1_500.jpg (Pridobljeno 5. 5. 2016.)

- [110] Oberholzer, M. 2012. Heavy – duty bridge with 68 m span in northern Canada. 18. Internationales Holzbau-Forum 2012.
http://www.forum-holzbau.ch/pdf/ihf12_oberholzer.pdf (Pridobljeno 5. 5. 2016.)
- [111] Uqac – Maicasagi Bridge. 2016.
http://www.uqac.ca/espace-bois/wp-content/uploads/2016/01/Pont-Maicasagi_creditNordic_w.jpg (Pridobljeno 5. 5. 2016.)
- [112] Nordic – Maicasagi Bridge. 2016.
<http://nordic.ca/data/files/article/0400%20Conception%20et%20construction%20dun%20pont%20%C3%A0%20Chibougamau.pdf> (Pridobljeno 5. 5. 2016.)
- [113] Andoljšek, J. 2010. Inženirske konstrukcije iz lepljenega lesa v Sloveniji. Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Biotehnična fakulteta (samozaložba J. Andoljšek): str. 48 - 81.
- [114] Lesena gradnja – Tenis dvorana Banex. 2016.
<http://www.lesena-gradnja.si/html/pages/si-index.php> (Pridobljeno 6. 5. 2016.)
- [115] Ljubljanski projekti – Lesen most čez Mali graben. 2016.
<http://ljublanski.projekti.si/most-%C4%8Dez-mali-graben.aspx> (Pridobljeno 15. 5. 2016.)
- [116] Outsider – Lesen most čez Mali graben. 2016.
<http://outsider.si/drzno-poeticno-preprosto/> (Pridobljeno 15. 5. 2016.)