

Alicja Maciejko - Grześkowiak

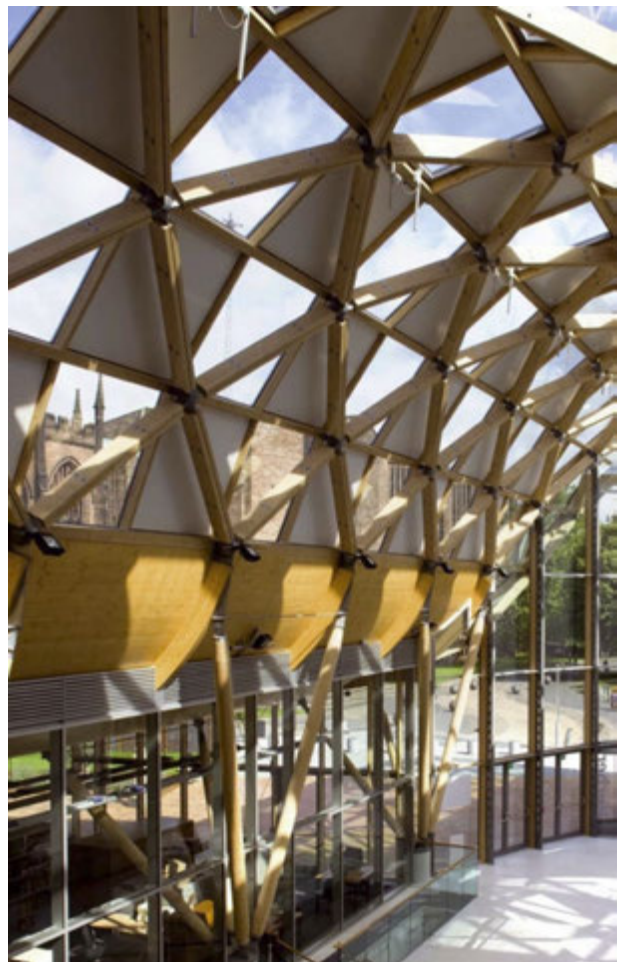
**Analiza przydatności konstrukcji
z drewna klejonego o dużych rozpiętościach
do realizacji form architektury współczesnej**

rozprawa doktorska

**PROMOTOR: PROF. DR INŻ. JERZY JASIEŃKO
WYDZIAŁ ARCHITEKTURY POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
WROCŁAW 2010**



*Każdy, kto poszukuje pięknej przestrzeni,
tu ją odnajdzie.
W nieskończoności leśnej struktury,
w labiryncie splątanych konarów,
w świetle załamywanym przez liście...
[357]*



Spis treści

1. Wprowadzenie.....	6
1.1. Cel i zakres rozprawy.....	6
1.2. Teza	12
1.3. Metoda badawcza.....	13
1.4. Stan wiedzy	14
2. Drewno w konstrukcjach o dużych rozpiętościach.....	20
2.1. Poszukiwanie i kształtowanie form z drewna klejonego o dużych rozpiętościach na tle współczesnych uwarunkowań dla architektury.....	20
2.2. Ewolucja możliwości technicznych i konstrukcyjnych zastosowania drewna, jako materiału do budownictwa dużych rozpiętości.....	24
2.3. Zakres możliwości drewna klejonego dla budownictwa dużych rozpiętości.....	28
3. Analiza współczesnych form architektury z drewna klejonego w odniesieniu do układów konstrukcyjnych dużych rozpiętości. Funkcja konstrukcji w budowaniu form architektonicznych.....	36
3.1. Wprowadzenie.....	36
3.2. Obiekty o dużych rozpiętościach, w których zastosowanie odpowiednich materiałów i technik konstrukcyjnych jest aspektem dominującym.....	38
3.3. Obiekty, których formy wynikają z zastosowania optymalnych, czytelnych rozwiązań konstrukcyjnych.....	41
3.4. Obiekty ekspresyjnie podkreślające dystrybucję sił wynikającą z dynamicznych rozwiązań konstrukcyjnych.....	42
3.5. Obiekty o formach swobodnych, ściśle zintegrowanych z ekspozycją konstrukcji.....	46
3.6. Obiekty „rzeźby” i symbole.....	50
3.7. Obiekty o formach zniekształconych celowo.....	54
3.8. Obiekty o prostych, uniwersalnych formach, bez eksponowania elementów konstrukcyjnych.....	56
3.9. Obiekty o prostych formach z eksponowaną, unikatową strukturą konstrukcyjną, bazującą na rozwiązaniach inspirowanych budową organiczną tworów natury.....	57
3.10. Obiekty o prostych formach z eksponowaną prostą konstrukcją rytmiczną lub bazującą na podstawowych zależnościach geometrycznych.....	61
3.11. Obiekty jako elementy spójnego krajobrazu.....	62
3.12. Obiekty podporządkowane ideologii ekologicznej.....	64

4. Historia rozwoju budownictwa o dużych rozpiętościach z udziałem drewna.....	69
4.1. Pierwsze przekroje złożone i elementy łukowe z drewna, system L'orme'a, Zollingera, Emy'ego, Otto Hetzera.....	69
4.2. Rozwój technologii drewna klejonego w Europie i w Stanach Zjednoczonych.....	80
5. Analiza systemów konstrukcyjnych z drewna klejonego.....	83
5.1. Modelowanie elementów konstrukcyjnych z drewna klejonego.....	83
5.2. Efektywność konstrukcyjna w aspekcie przekrojów poprzecznych elementów nośnych.....	91
5.3. Kształtowanie konstrukcji z drewna klejonego. Geometria i organizacja układu przestrzennego.....	98
5.4. Klasyfikacja systemów konstrukcyjnych z drewna klejonego.....	108
5.5. Układy formowane z belek prostych.	115
5.5.1. Układy płaskie z belek prostych.....	116
5.5.2. Układy płaskie z belek prostych, hybrydowych drewniano - stalowych, kratownice.....	123
5.5.3. Ruszty i struktury przestrzenne.....	129
5.6. Układy ramowe z drewna klejonego	135
5.7. Układy formowane z belek zakrzywionych	141
5.7.1. Układy płaskie z belek zakrzywionych.....	143
5.7.2. Układy płaskie z belek zakrzywionych hybrydowych, drewniano- stalowych, kratownice hybrydowe.	148
5.7.3. Układy trójprzegubowe z belek zakrzywionych	150
5.7.4. Przestrzenne kratownice zakrzywionych, hybrydowe, drewniano stalowe o układach trójprzegubowych.....	155
5.7.5. Kopuły żebrowe i siatkowe.....	159
5.8. Konstrukcje wiszące z drewna klejonego.....	166
5.9. Systemy siatkowe z drewna klejonego.....	172
5.10. Konstrukcje wspornikowe z drewna klejonego.....	184
6. Ekspresja materiału w obiektach o dużych rozpiętościach - wykorzystanie cech „naturalnego” drewna	187
6.1. Ekspresja materiału.....	187
6.2. Eksperymenty z konstrukcją: statyka - rzeźba - formy organiczne.....	190
6.3. Ekologia konstrukcji z drewna klejonego.....	200

7. Efektywność wykorzystania materiału w tworzeniu konstrukcji dużych rozpiętości z drewna klejonego - problemy i możliwości.....	204
7.1. Projektowanie koncepcyjne konstrukcji z drewna klejonego.....	204
7.2. Problemy i możliwości efektywnego wykorzystania drewna klejonego jako materiału konstrukcyjnego.....	207
7.2.1. Klasy wytrzymałościowe konstrukcji z drewna klejonego.....	209
7.2.2. Ognioodporność konstrukcji z drewna klejonego.....	213
7.2.3. Odporność konstrukcji z drewna klejonego na czynniki zewnętrzne.....	217
7.2.4. Wpływ wilgotności na odkształcenia konstrukcji z drewna klejonego.....	220
7.3. Problematyka doboru i rozwój połączeń konstrukcyjnych w konstrukcjach z drewna klejonego warstwowo.....	223
7.4. Badania konstrukcji w tunelach aerodynamicznych.....	240
8. Wnioski i podsumowanie	243
Literatura.....	249
Załącznik.....	264

1. Wprowadzenie

1.1. Cel i zakres rozprawy

Celem rozprawy jest analiza zmian w kształtowaniu form budownictwa drewnianego dużych rozpiętości, jakie powstały w XX wieku i na początku XXI wieku pod wpływem nowych możliwości technologicznych, jak też zmian w doktrynie ochrony środowiska naturalnego wobec, związanych z tym, możliwości kształtowania nowych form architektonicznych. Rozprawa przedstawia analizę zrealizowanych układów konstrukcyjnych, które wskazują, jak różne są techniczne sposoby kreowania przekryć dużych rozpiętości przy użyciu konstrukcji drewnianych, nawet uwzględniając bardzo wiele wymagań stawianych współczesnej architekturze, np. w zakresie bezpieczeństwa konstrukcji. Analiza tych rozwiązań pozwala na wyodrębnienie reguł kształtowania współczesnych form i układów konstrukcyjnych na tle problematyki związanej z projektowaniem i procesem wytwarzania elementów wielkogabarytowych z drewna. Sposób prezentacji tematu odzwierciedla poszukiwanie w różnych, nawet odległych od siebie wątkach projektowania architektury odpowiedzi na pytania, w jakim zakresie budownictwo drewniane jest atrakcyjne i uzasadnione, jakie są obecnie możliwości budownictwa drewnianego i czy są one wykorzystywane, a także, jakie są perspektywy jego rozwoju dla kształtowania nowatorskich form architektury współczesnej. Celem rozprawy jest również pokazanie, jak ważna jest rola architektów w projektowaniu koncepcyjnym konstrukcji, zgodnie z poglądem, iż „projektowanie koncepcyjne konstrukcji jest najbardziej istotną fazą w jej powstaniu. Ono określa jej jakość i zasługuje na uwagę i szacunek. Większość problemów występujących w końcowej analizie konstrukcji i wykonawstwie (...) jest konsekwencją niedbałego projektu koncepcyjnego. Ogólnym celem projektu koncepcyjnego jest holistyczna jakość budowli”, [152].

Badaniami zostały objęte obiekty architektoniczne dużych rozpiętości powstałe w drugiej połowie XX wieku i najnowsze, zrealizowane w pierwszym dziesięcioleciu XXI wieku. Przykłady zostały dobrane ze względu na oryginalność, innowacyjność oraz indywidualny charakter form. Są to, przede wszystkim, prestiżowe budynki użyteczności publicznej, obiekty sportowe oraz wybrane hale przemysłowe, w których zastosowania elementów dużych rozpiętości są determinowane przez wymagania technologiczne

i funkcjonalne, [8]. Konstrukcje z drewna klejonego, ze względu na wiele zalet, zajmują tu ważne miejsce obok hal stalowych i żelbetowych. Interesujące są także liczne, zrealizowane obiekty inżynierskie, takie jak mosty i wieże, budynki wielokondygnacyjne i mieszkalne wykonane z drewna klejonego, które jednak pominięto. Obiekty te są publikowane w wielu opracowaniach, między innymi w [17], [51], [85], [106], [104], [116], [178]. Ważną przesłanką dla doboru przykładów do analizy był aspekt proekologiczny. W pracy przedstawiono przykłady obiektów, które wpisują się w idee zrównoważonego rozwoju i powstały w ramach programów proekologicznych, wspieranych przez rządy państw UE i inne organizacje.

Przeprowadzone analizy pozwoliły na wyróżnienie następujących grup obiektów, w których zastosowanie konstrukcji z drewna klejonego może być atrakcyjne, uzasadnione technicznie oraz inspirujące dla kreowania interesujących i nowatorskich form architektonicznych, wpływających pozytywnie na krajobraz i otoczenie człowieka. Analizą objęto:

- 1) prestiżowe budynki użyteczności publicznej,
- 2) budynki o charakterze proekologicznym,
- 3) obiekty sportowe o dużych rozpiętościach: areny, stadiony, hale wielofunkcyjne,
- 4) hale przemysłowe,
- 5) hale wystawowe,
- 6) budynki w całości wykonane z drewna ze względu na jego wysoką odporność chemiczną lub przy wymogu zwiększonej wilgotności, np. w magazynach soli, zboża, węgla i innych.

Obszar analizy istniejących obiektów architektonicznych dotyczy przede wszystkim krajów europejskich, ale przedstawiono także przykłady ze Stanów Zjednoczonych, krajów Dalekiego Wschodu oraz z Australii. Istotną różnicą w estetyce tych obiektów jest wykorzystanie różnych gatunków drewna. Nie odczytuje się natomiast różnic, które mogłyby wynikać z odmiennych technologicznie procesów produkcyjnych lub z innych uwarunkowań dla budynków funkcjonujących w różnych strefach klimatycznych. Dostrzegalna jest natomiast pewna unifikacja w wykorzystaniu tych samych rozwiązań przestrzennych i systemów konstrukcyjnych. Widoczna jest także uprzywilejowana pozycja drewna jako szczególnie cenionego materiału konstrukcyjnego (w krajach Dalekiego Wschodu, szczególnie w Japonii). W Europie i w krajach Dalekiego Wschodu obserwuje

się duże zastosowanie konstrukcji z drewna klejonego w obiektach proekologicznych oraz w obiektach harmonijnie zintegrowanych z krajobrazem naturalnym.

Po przeprowadzonej selekcji zawężono przedstawiane realizacje do kilkudziesięciu najbardziej interesujących obiektów oraz wyróżniono kilkadziesiąt rozwiązań w zakresie form przestrzennych i sklasyfikowanych układów konstrukcyjnych. Układy te, z wyjątkiem najprostszych układów belkowo-słupowych o stosunkowo małych rozpiętościach, bardzo często łączą różne systemy i materiały w układy hybrydowe.

Rozprawa składa się z analizy problemu na tle kilku równoległe występujących zagadnień, które uporządkowano w kolejnych rozdziałach. W rozdziale 2 zawarto problematykę ważną dla koncepcyjnego projektowania architektonicznego. Poszukiwania form budownictwa drewnianego dużych rozpiętości pokazano na tle współczesnych tendencji, w szerokim kontekście aspektów architektonicznych, technicznych, konstrukcyjnych i ekologicznych. Określono także uwarunkowania mające największy wpływ na sposób kształtowania form architektury współczesnej oraz przedstawiono czynniki, które powodują, że zastosowanie konstrukcji z drewna klejonego jest atrakcyjne dla twórców architektury i technicznie uzasadnione. Tłem dla tych zagadnień jest historia powstania i rozwoju konstrukcji z drewna klejonego, którą przedstawiono w rozdziale 4.

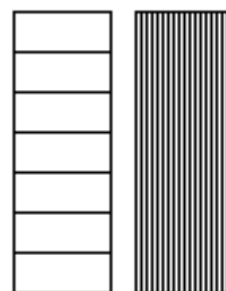
Ważnymi elementami rozprawy są analizy formalne zrealizowanych obiektów architektonicznych. W rozdziale 3 przeprowadzono analizę istniejących rozwiązań w odniesieniu do budowy konstrukcyjnej form, na tle wiodących tendencji w architekturze współczesnej, natomiast w rozdziale 5 przeprowadzono analizę istniejących obiektów pod kątem zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, które uporządkowano wg własnej klasyfikacji. W rozdziale tym pokazano także, jaki jest zakres modelowania elementów konstrukcyjnych i kreowania nowatorskich układów przestrzennych pod kątem pełnego wykorzystania możliwości produkcyjnych oraz uwzględnienia wyników najnowszych badań naukowych i osiągnięć technicznych. Rozdział 6 pokazuje, odrębnie od zagadnień konstrukcyjnych, plastyczne i symboliczne własności konstrukcji drewnianych, które występują w formach inspirowanych naturalnym pochodzeniem materiału. W rozdziale 7 zawarto problemy szeroko rozumianego projektowania koncepcyjnego konstrukcji na tle problemów technicznych oraz badań naukowych, takich jak: badanie trwałości, ognioodporności i bezpieczeństwa użytkowania konstrukcji, rozwój technologii w zakresie wzmocnienia przekrojów i zwiększania właściwości nośnych elementów konstrukcyj-

nych, rozwój i perspektywy stosowania nowatorskich sposobów połączeń. Załącznik zawiera informacja na temat własnych projektów.

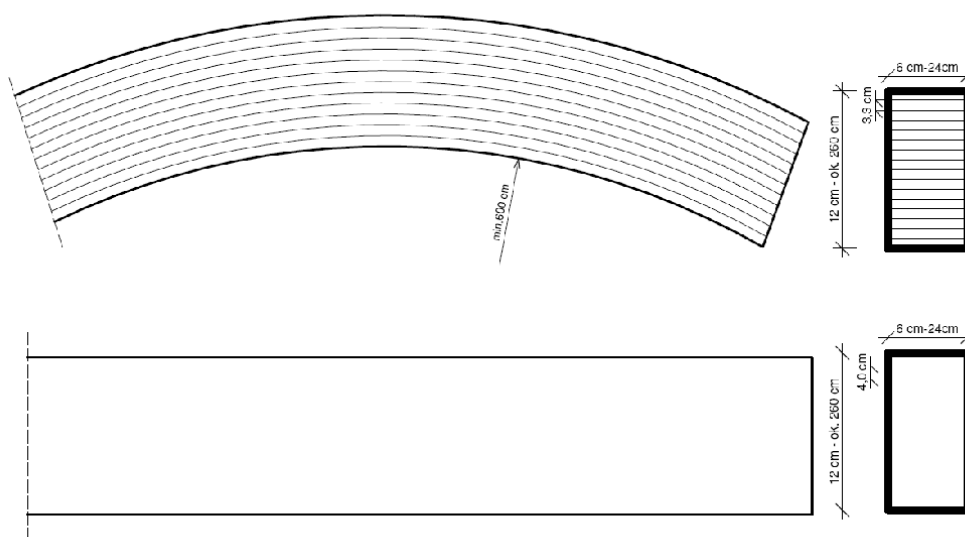
Zawarte w temacie pojęcie *dużych rozpiętości*, rozumiane intuicyjnie jako duża odległość pomiędzy dwiema przeciwległymi podporami bez stosowania podpór pośrednich, przyjęto za [140]: „Określenie duża rozpiętość nie jest terminem precyzyjnym i jego znaczenie zależy od rozpatrywanego czasu i miejsca oraz wielu innych czynników. (...) Kamienne lub ceglane sklepienia naw gotyckich katedr o rozpiętościach powyżej 20 m mogą być uznane za przekrycia o dużej rozpiętości. Również rozpiętość łuku przęsła mostowego wykonanego z kamienia i cegły, o wielkości około 50 i więcej metrów jest traktowana jako bardzo duża.(...) za dużą można przyjąć rozpiętość przestrzennych struktur prętowych około 100 metrów i więcej.” Dla budownictwa z drewna klejonego przyjęto za dużą, rozpiętość od kilkunastu metrów do ok. 200 m. (180 m ma średnica największej jak do tej pory kopuły wykonanej z drewna klejonego [344]).

Pojęcie *drewno klejone* jest precyzyjnie zdefiniowane w normach dotyczących projektowania i procesów produkcyjnych. Ogólnie można przyjąć, że drewno klejone jest jednym z nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, obok stali i żelbetu, odpowiednim dla budownictwa dużych rozpiętości. Praca nie zawiera analiz w zakresie porównania tych technologii, nie ma także na celu wykazania, że drewno klejone jest najlepszym materiałem konstrukcyjnym dla realizowania dużych rozpiętości. Odnosząc się do architektury współczesnej, wydaje się, że inne materiały konstrukcyjne są technicznie bardziej odpowiednie do pokonania dużo większych rozpiętości, np. konstrukcje stalowe wykazują więcej potencjału w zakresie innowacyjnego kształtowania form architektonicznych oraz są częściej stosowane przy realizacji współczesnych obiektów dużych rozpiętości. Dotyczy to szczególnie przekryć trybun stadionów, hal widowiskowych, kopuł i innych budynków użyteczności publicznej. Takie porównania przeprowadzono już w innych opracowaniach [231], [106], [22], co potwierdzono powołaniami. **Drewno klejone jest jednak jednym z najlepszych materiałów konstrukcyjnych, który umożliwia kreowanie zurbanizowanych i wolnych przestrzeni w sposób przyjazny człowiekowi.** Pominęto szczegółowe rozważania, wynikające z analizy kolejnych etapów historii rozwoju architektury dużych rozpiętości, odmiennych w charakterze kształtowania struktury konstrukcyjnej, które następowały po sobie, począwszy od XIX wieku. Jest to problem szeroko omawiany w wielu publikacjach, [57], [59], [66], [67], [68], [71], [151], [155], [164], [165].

Na rys. 1.1 do 1.3 przedstawiono podstawowe przekroje elementów z drewna klejonego warstwowo, a na rys. 1.4 – jedno z pierwszych, ważnych zastosowań tych elementów.



Rys.1.1. Przekrój poprzeczny elementu z drewna klejonego warstwowo (niem. HOLZLEIMBAU, ang. GLULAM: Glue Laminated Timber) i sklejkki klejonej (LVL-USA, Kerto – Europa)



Rys.1.2. Konstrukcyjne drewno klejone. Drewno klejone warstwowo to element konstrukcyjny utworzony przez sklejenie w układ prostokątny lub inny warstw drewna o równoległym układzie włókien. Belki proste wytwarza się z desek o wysokości przekroju 40 mm, belki łukowe -z desek o wysokości przekroju 33 mm, [343], [335], [329], [327], [314], [308].



Rys.1.3. Przykładowe przekroje słupów i belek o dowolnych kształtach wytwarzane przy użyciu zestawu sterowanego numerycznie, CNC, [343], [335], [329], [327], [314], [308].



Rys.1.4. Jedno z pierwszych zastosowań drewna klejonego Schiebebühnenhalle, Stuttgart 1915. Otto Hetzer AG, Weimar [251].

Dążenie do pokonywania dużych rozpiętości było tematem wielu działań architektonicznych. W XX wieku pojawiły się materiały i technologie, które umożliwiły pokonywanie nawet kilkusetmetrowych rozpiętości: konstrukcje stalowe, żelbetowe, stalowo-żelbetowe, cięgnowe, prętowo-cięgnowe, pneumatyczne i inne, także drewniane i drewniano-stalowe. Zbudowano, między innymi, kilkadziesiąt obiektów o rozpiętości powyżej 200 m [344], [258], [209], [154], [155], [140], [116], [113]. Współcześnie, choć obiekty dużych rozpiętości nie stanowią już wizji „lepszej przyszłości”, pozostają jednak nadal rozwijającą się dziedziną budownictwa. Przesłanki pragmatyczne i ekonomiczne powodują, że rozpiętości obiektów podlegają ograniczeniom. Granicę wyznaczają choćby fizyczne możliwości zgromadzenia ludzi pod jednym dachem i względy bezpieczeństwa. Jednak duże rozpiętości wciąż fascynują architektów i inżynierów, co widać na przykładach unikatowych budowli, które powstały w ostatnich latach. Z drugiej strony widoczna jest tendencja do indywidualizowania dzieł architektury oraz wzrasta zainteresowanie rozwiązaniami proekologicznymi, co świadczy o tym, że trzeba analizować i wzbogacać możliwości techniczne materiałów naturalnych. Warto też zadać pytanie: czy w przetworzonym drewnie, nie do końca sprawdzonym i wykorzystanym technicznie materiale konstrukcyjnym, tkwią nowe możliwości?

Eksperymentalne traktowanie drewna w budownictwie dużych rozpiętości na tle innych materiałów konstrukcyjnych jest poparciem przedstawionej w rozdz. 1.2 tezy. Oznacza ono, że poszukiwania nowych form budownictwa drewnianego nie są jeszcze skończone. Budownictwo drewniane rozwija się, z jednej strony - w kierunku innowacji

technologicznych, z drugiej strony - w kierunku artystycznych i rzeźbiarskich działań projektantów. Powstają unikatowe, rzeźbiarskie budowle, modelowane, w dużo większej skali, na podobieństwo np.: instrumentów muzycznych, i to pomimo coraz bardziej restrykcyjnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa użytkowego, odporności biologicznej, ogniowej i chemicznej konstrukcji. Związki pomiędzy architektonicznymi aspiracjami twórców, wymaganiami bezpieczeństwa i wprowadzanymi innowacjami technologicznymi, a co za tym idzie, nowymi możliwościami w projektowaniu drewna mogą prowadzić do powstania wielu unikatowych budowli o konstrukcji drewnianej. Według Piera Luigi Nervi: „Przy wszystkich ograniczeniach stwarzanych przez wymogi techniczne, zawsze pozostaje margines wolności wystarczający na pokazanie osobowości twórcy i, jeżeli jest on artystą, pozwalający na to, aby jego dzieło, w sztywnym rygorze technologicznym stało się rzeczywistym i prawdziwym dziełem sztuki” [120].

1.2. Teza

Wykorzystanie drewna klejonego do kreowania konstrukcji nośnej prestiżowych obiektów architektonicznych dużych rozpiętości doprowadziło do powstania nowatorskiej, charakterystycznej w wyrazie, proekologicznej architektury, która stała się nową jakością na tle istniejących realizacji. Oznacza to, że wykorzystanie drewna w architekturze jest ponownie atrakcyjne wizualnie, uzasadnione technicznie i ekonomicznie oraz odpowiednie dla realizowania dużych rozpiętości, a wielowiekowa obecność drewna w architekturze jest kontynuowana.

Współczesne kształtowanie konstrukcji z drewna klejonego związane jest ze stosowaniem następujących zasad:

- 1) eksperymentalne traktowanie drewna jako materiału konstrukcyjnego dla obiektów dużych rozpiętości (pomimo kilkudziesięcioletniego funkcjonowania technologii),
- 2) silne związanie z tradycyjnym budownictwem drewnianym poprzez nowatorskie odwzorowywanie reguł konstruowania układów nośnych oraz projektowania łączników,
- 3) eksponowanie struktury nośnej w celu podkreślenia ekspresji materiału i uczytelnienia zasady dystrybucji sił,

- 4) wykorzystywanie równocześnie różnych systemów konstrukcyjnych i łączenie elementów drewnianych w układy hybrydowe z innymi materiałami konstrukcyjnymi, szczególnie ze stalą o przekrojach wiotkich (liny, ciągna, sploty),
- 5) inspiracja dla poszukiwania form na bazie czterech odmiennych źródeł: statyki, rzeźby, rytmu i natury,
- 6) wykorzystanie dwóch typów dźwigara: prostego o przekroju prostokątnym (typ 1), łukowego o przekroju prostokątnym i jednej płaszczyźnie gięcia (typ 2) dla projektowania różnorodnych układów konstrukcyjnych dużych rozpiętości, zarówno prostych i uniwersalnych, hybrydowych, drewniano – stalowych, jak też „miękkich”, nieregularnych i organicznych,
- 7) poszukiwania nowych rozwiązań pod wpływem rozwoju metod projektowania, analizy statycznej, wprowadzania nowych technik połączeń, a także pod wpływem analizy form naturalnych,
- 8) uzyskanie wartości ekologicznych.

1.3. Metoda badawcza

Przyjęta w pracy metoda badawcza polega na analizie form architektury dużych rozpiętości z drewna klejonego w połączeniu z zastosowaną technologią i układem konstrukcyjnym oraz wyodrębnieniu obszaru możliwych rozwiązań i perspektyw. Analiza przydatności konstrukcji z drewna klejonego do kreowania form architektonicznych o dużych rozpiętościach, w kontekście przedstawionej problematyki, opiera się na:

- 1) badaniu współczesnych wymagań dla obiektów architektonicznych o dużych rozpiętościach,
- 2) badaniu możliwości drewna klejonego, jako materiału dla budownictwa o dużych rozpiętościach,
- 3) badaniu istniejących obiektów wielkokubaturowych i konstrukcji z drewna klejonego o formach unikatowych i uważanych za innowacyjne oraz halowych, wielokrotnie powielanych ze względu na swój uniwersalny charakter,
- 4) badaniu systemów konstrukcyjnych z drewna klejonego oraz możliwości ich wpływu na projektowane formy architektoniczne.

1.4. Stan wiedzy

Zagadnienia związane z konstrukcjami z drewna klejonego są szeroko omawiane w literaturze światowej. Publikacje związane z architekturą skupiają się na prezentacji nowych, innowacyjnych form, możliwości estetycznych, konstrukcyjnych i technicznych, w odniesieniu do całych obiektów, natomiast aspekty badania samego materiału w zakresie przydatności do zastosowania w konstrukcji, ekologii i technologii materiałowej dotyczą przede wszystkim problemów takich jak:

- 1) badanie w zakresie wytrzymałości, trwałość i odporność drewna na czynniki zewnętrzne,
- 2) zagadnienia konserwatorskie, wzmocnienie i naprawa konstrukcji zabytkowych,
- 3) projektowanie konstrukcyjne, analizy i metody obliczeniowe,
- 4) normalizacja procesów produkcyjnych i klasyfikacja materiału,
- 5) wykorzystanie drewna w budownictwie mieszkaniowym,
- 6) badania w kierunku zwiększenia wytrzymałości i wprowadzania materiałów kompozytowych w przekrój nośny elementów z drewna klejonego,
- 7) badania i udoskonalanie połączeń,
- 8) badania materiałów kompozytowych na bazie drewna,
- 9) badania konstrukcji z drewna w zakresie odporności sejsmicznej,
- 10) badania konstrukcji z drewna w zakresie odporności ogniowej,
- 11) badania konstrukcji z drewna w zakresie trwałości,
- 12) standaryzacja produktów konstrukcyjnych, wprowadzanych do produkcji i wspomaganie producentów konstrukcji z drewna klejonego oraz produktów pochodnych,
- 13) problemów projektowania wg normy EUROCODE 5,

W Polsce badania naukowe w zakresie problemów dotyczących właściwości drewna jako materiału konstrukcyjnego oraz badania w odniesieniu do materiałów kompozytowych, wprowadzanych w przekrój w celu podniesienia jego nośności, badania w zakresie możliwości wytrzymałościowych, itp., nie odbiegają od podobnych badań prowadzonych na całym świecie. Polscy naukowcy biorą udział w międzynarodowych konferencjach organizowanych m. in. przez IABSE, World Conference on Timber Engineering, Lightweight Structures In Civil Engineering (LSCS), (w 2002 roku w Warszawie), poświęconych budownictwu z drewna i produktów pochodnych, a także w konferencjach odby-

wających się w Polsce, m. innymi: „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, organizowanych przez Politechnikę Szczecińską. Tematyka konferencji obejmuje w szczególności zagadnienia takie jak:

- 1) ciekawe obiekty zrealizowane w Polsce i za granicą z drewna klejonego warstwowo,
- 2) wyniki badań właściwości sprężysto - wytrzymałościowych nowych tworzyw uzyskanych na bazie drewna,
- 3) prace badawcze z zakresu belkowych, płytowych i kratowych konstrukcji zespolonych z drewna, materiałów drewnopochodnych i stali,
- 4) zagadnienia odporności ogniowej drewnianych budynków mieszkalnych i obiektów inżynierskich,
- 5) kleje do wykonywania drewnianych konstrukcji nośnych,
- 6) środki i sposoby zabezpieczenia drewna i materiałów drewnopochodnych przed korozją biologiczną,
- 7) analiza podstawowych wad i usterek obniżających trwałość konstrukcji drewnianych,
- 8) problemy praktycznego zastosowania wyrobów na bazie drewna.

Duży zakres badań w dziedzinie budownictwa drewnianego dotyczy badania konstrukcji zabytkowych. Dla środowiska naukowego zagadnienia techniczne są w dużo większym stopniu interesujące niż aspekty związane z samym projektowaniem form. Problemy związane z kreowaniem nowych, innowacyjnych form i projektowaniem nowatorskich układów konstrukcyjnych dużych rozpiętości nie pojawiają się często w opracowaniach naukowych polskich naukowców. Być może wynika to z tego, iż pomimo zwiększającego się zainteresowania drewnem klejonym w Polsce, wciąż nie obserwuje się realizacji projektów wdrażających nowatorskie rozwiązania konstrukcyjne oraz idee ekologiczne. Projektuje się, przede wszystkim, obiekty halowe dla budownictwa sportowego, przemysłowego oraz kościoły. Projektowanie interesujących i innowacyjnych konstrukcji z drewna klejonego jest ograniczone, a jeśli one powstają, autorami projektów konstrukcyjnych bardzo często są firmy zagraniczne, związane z producentami konstrukcji z drewna klejonego. W polskim piśmiennictwie ukazują się w większości prezentacje obiektów zrealizowanych za granicą, [300]. Nie ma natomiast specjalistycznych tytułów związanych z budownictwem drewnianym, które wydaje się za granicą, między innymi: [306], [355], [326], [325]. Opracowania te koncentrują się na specjalistycznych zagadnieniach konstrukcyjnych, technicznych, ale także estetycznych, oraz

pokazują zrealizowane, prestiżowe obiekty architektoniczne. Większość publikacji omija typową architektoniczną praktykę i skupia się na formach innowacyjnych i obiektach unikatowych. Eksponuje się strukturę konstrukcyjną. Informacje o obiekcie przekazywane są w formie ilustracji. Istnieje widoczna luka w badaniu wartości estetycznych i możliwości ekspresyjnych, jakie stwarza zastosowanie drewna. Nie ma opracowania w języku polskim, które kompleksowo ujęłoby temat atrakcyjności konstrukcji z drewna klejonego w obiektach dużych rozpiętości, z punktu widzenia poprawy jakości architektury i w kontekście zagadnień ochrony środowiska. Mało jest literatury przetłumaczonej na język polski, która pokazuje możliwości zastosowań konstrukcji z drewna klejonego w formie schematów, układów konstrukcyjnych, detali i specyfikacji technicznej. Wyjątek stanowi przełożona z niemieckiego w 2004 i wznowiona w 2006 r. pozycja „Budownictwo drewniane” autorstwa Helmutha Neuhausa [121], dotycząca projektowania konstrukcyjnego. Wcześniej, powszechnie znane i dostępne dla architektów było opracowanie [104], autorstwa Z. Mielczarka. Prof. Mielczarek z Politechniki Szczecińskiej jest autorem wielu prac naukowo-badawczych o konstrukcjach z drewna klejonego [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107]. Prowadzi m. in. badania łuków z drewna klejonego, na stanowisku badawczym w skali zbliżonej do naturalnej, o rozpiętości 18 m. Jego badania koncentrują się także na zmniejszaniu zużycia tarcicy w belkach zespolonych z drewna i materiałów drewnopochodnych o kształtach trapezowych, dwuspadowych, belkach wzmacnianych nakładkami z tworzyw sztucznych lub zewnętrznymi cięgnami stalowymi, zastosowaniu drewna okrągłego, młodnikowego do budowy konstrukcji strukturalnych.

W literaturze światowej ważną specjalistyczną pozycją, obejmującą zakres kilkuset prezentacji zrealizowanych konstrukcji z drewna klejonego, jest *Holzbau Atlas* autorstwa J. Natterera, T. Herzoga, M. Volza, [116]. Publikacją na temat historii rozwoju technologii jest *Holzleimbau. Laminated Timber Construction* autorstwa Ch. Muellera, [113]. Na podstawie tej pracy powstała część historyczna rozprawy. Interesujące dla potrzeb rozprawy są publikacje w literaturze światowej, dotyczące innowacji w zastosowaniu konstrukcji z drewna klejonego oraz możliwości drewna w budownictwie dużych rozpiętości z uwzględnieniem “zrównoważonego rozwoju” (ang. *sustainable world*). m. in.: [175], [90], [156], [145]. Kilkanaście innych opracowań analizuje konkretne obiekty i zastosowane, nowatorskie systemy konstrukcyjne z drewna, a także zaawansowanie w tworzeniu specjalistycznych programów komputerowych do produkcji i projektowania konstrukcji z drewna klejonego.

Na konferencji w Lahti, 2001, IABSE Conference: *Innovative Wooden Structures and Bridges* zaprezentowano ok. 100 artykułów. Kilkadziesiąt dotyczyło problematyki mostowej. Większość autorów skupiała się na badaniach wytrzymałościowych drewna i materiałów kompozytowych oraz na badaniu połączeń stalowych. Kilka prac (*Architecture and Innovation*) poświęcono analizie innowacyjnych rozwiązań zastosowanych w konkretnych obiektach. Wnioski płynące z tych opracowań są korzystne dla konstrukcji z drewna klejonego i wskazują na produkty z drewna i materiałów drewnopochodnych jako odpowiednie do wykorzystania w przyszłości, także w nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych, [73], [75], [86], [89], [125], [149], [150], [156].

Ważnym aspektem poruszonym w pracach naukowych jest problem trwałości konstrukcji poddawanej w trakcie użytkowania wpływom czynników zewnętrznych, przede wszystkim, wilgoci, grzybów, pleśni i owadów. Po kilkudziesięciu latach funkcjonowania obiektów z drewna klejonego w Polsce, wiele z nich uległo awariom technicznym, szczególnie w strefach przypodporowych i konieczna jest ich naprawa i wzmacnianie. Prowadzone są badania w kierunku przeciwdziałaniu awariom budowlanym konstrukcji z drewna klejonego oraz opracowywane są sposoby naprawy, konserwacji i wzmacniania zwłaszcza stref przypodporowych, [68], [4], [126]. W ostatnich latach miało miejsce kilka katastrof budowlanych, m. in. dotyczyły one konstrukcji z drewna klejonego o dużej rozpiętości, np. Ballerup Super Arena w Danii pod Kopenhagą o rozpiętości ok. 70 m. Konstrukcja ta jest prezentowana w dalszej treści rozprawy (rys. 5.86). Po ustaleniu przyczyny awarii okazało się, że katastrofa powstała na skutek niedokładności w wykonawstwie w obszarze węzłów. Bardzo ważne dla jakości i przyszłości konstrukcji z drewna klejonego jest zwiększenie precyzji i prawidłowości wykonawstwa, szczególnie w strefach połączeń, a także przestrzeganie odpowiednich warunków technicznych użytkowania konstrukcji, prawidłowa konserwacja i nieprzekraczanie założonych w fazie projektowej obciążeń. Każda katastrofa obiektu z drewna klejonego potrafi, w pewnym stopniu, zniewyczyć działania naukowe i techniczne dowodzące atrakcyjności drewna w budownictwie dużych rozpiętości i zahamować, coraz bardziej powszechne, stosowanie konstrukcji z drewna klejonego. Wiele awarii dotyczy także nieprawidłowego projektowania podpór oraz jest związanych z przyjmowaniem do obliczeń wyższej klasy wytrzymałościowej elementów nośnych od faktycznie dostarczonych i wbudowanych (rozdział 7.2.1).

Dostępne powszechnie są również prace instytutów badawczych, takich jak Instytut Techniki Budowlanej ITB oraz Polski Komitet Normalizacyjny, Instytut Otto – Grafa

w Stutgarcie, w Niemczech. Obecnie polskie normy zostały zastąpione normami europejskimi. W Stanach Zjednoczonych działa: AITC American Institute of Timber Construction, APA - The Engineered Wood Association, w Niemczech: Informationsdienst-holz, Bauen mit Holz, w krajach skandynawskich: Timberbuild for the 21st century, The Nordic Timber Council (NTC), Svenskt limträ, Puuinfo, Wood For Good, w Wielkiej Brytanii: Glued Laminated Timber Association (GLTA), w Australii: Glued Laminated Timber Association of Australia (GLTAA). GLULAM European Glued Laminated Timber Industries - międzynarodowe stowarzyszenie przemysłu drewna klejonego, a także rozpoznawalne są biura inżynierskie, zajmujące się projektowaniem innowacyjnych konstrukcji z drewna klejonego: Julius Natterer, Sobek Werner, Arup, Buro Happold, Takenaka. Organizowane są także międzynarodowe i krajowe konkursy tematyczne, których zadaniem jest wyłonienie najbardziej wartościowych obiektów z drewna klejonego. Są to między innymi konkursy Holzbau Preis, organizowane przez Informationsdienst-holz oraz GLULAM Preis. GLULAM zostało założone w 1966 i ma 10 członków: Austrię, Danię, Finlandię, Niemcy, Włochy, Holandię, Belgię, Norwegię, Szwecję i Szwajcarię. Głównym zadaniem tych organizacji jest działanie na rzecz interesów członków na poziomie międzynarodowym, standaryzacja produkcji i metod projektowania, sporządzanie raportów i statystyk.

Wszystkie te instytuty zajmują się problemami technicznymi i konstrukcyjnymi, związanymi z produkcją i projektowaniem konstrukcji z drewna klejonego.

Obecnie w Polsce projektuje się rocznie kilkadziesiąt obiektów z zastosowaniem konstrukcji z drewna klejonego, z czego większość to projekty hal. Projekty unikatowe i innowacyjne a także projekty wdrażające najnowsze osiągnięcia naukowe w Polsce nie powstają lub nie są znane i publikowane. Także w konkursach architektonicznych na prestiżowe obiekty użyteczności publicznej konstrukcje z drewna klejonego pojawiają się rzadko. Takie obiekty są projektowane w Europie zachodniej, szczególnie w Niemczech, Francji, Wielkiej Brytanii, a także w krajach skandynawskich. Obecnie w Europie produkuje się już ponad milion m³ konstrukcji z drewna rocznie, a produkcja powiększa się rocznie o kilka procent, [335], [328], [329], [327], [314], [308]. Najmniejsze zastosowanie konstrukcji z drewna klejonego miało miejsce w Wielkiej Brytanii, jednak ostatnio powstało tam kilka znaczących obiektów o dużych rozpiętościach. Realizacje te były poparte działaniami organizacji proekologicznych i rządowych. Coraz intensywniej rozwija się export z krajów europejskich poza Europę, przede wszystkim, do Japonii, Malezji,

Korei Południowej, na Cypr. Polska, która sama produkuje konstrukcje z drewna klejonego jest także rynkiem zbytu dla producentów europejskich. Sprzedaż na polski rynek nie jest jednak większa niż kilkanaście procent całej produkcji każdego z producentów i dotyczy, przede wszystkim, wielkowymiarowych konstrukcji dla obiektów użyteczności publicznej [328], [329], [335]. Chłonność polskiego rynku określa się na kilkanaście tysięcy m³ drewna klejonego rocznie, z tendencją wzrostu. Przeciętna, pełnowymiarowa hala sportowa to ok. 60 -100 m³ zużycia drewna klejonego. Szacunkowo oznacza to wybudowanie rocznie w Polsce ponad 100 obiektów. Dane te, w połączeniu z dużym zapotrzebowaniem w Polsce na obiekty użyteczności publicznej, szczególnie obiekty sportowe, wskazują na duże możliwości rozwoju zastosowań różnorodnych konstrukcji z drewna klejonego, także o charakterze innowacyjnym w obszarze formy architektonicznej i konstrukcji.

2. Drewno w konstrukcjach o dużych rozpiętościach

2.1. Poszukiwanie i kształtowanie form z drewna klejonego o dużych rozpiętościach na tle współczesnych uwarunkowań dla architektury

Na kształtowanie współczesnej architektury mają wpływ wybory konstrukcyjne, materiałowe i ekonomiczne. To uniwersalne stwierdzenie jest aktualne od początków architektury, bowiem świadomość zależności architektury od technologii i techniki miał już Witruwiusz, co opisał w najstarszym traktacie o architekturze [177]. W przypadku obiektów o dużych rozpiętościach, zależność ta zacieśnia się, ponieważ dużo większą wagę mają tu rozwiązania konstrukcyjne, nierozzerwalnie związane z technologią zastosowanego materiału konstrukcyjnego. Pod wpływem presji ekonomicznej powstają natomiast nowatorskie i „lżejsze” rozwiązania. Samo kształtowanie konstrukcji dużych rozpiętości ma duży udział w działaniach twórczych, związanych z poszukiwaniem nowych form przestrzennych. Formy budynków dużych rozpiętości z drewna klejonego mogą być zarówno rzeźbiarskie, dynamiczne, symboliczne i zaskakujące, jak też uniwersalne, rytmiczne, „zanikające”, płynne i zmienne lub nawiązujące do rozwiązań występujących w naturze. Pomimo różnego kształtowania konstrukcji, struktura przestrzenna jest w nich ważna i eksponowana.

Twórcze poszukiwania nowych form w obiektach dużych rozpiętości w zakresie sposobu i genezy kształtowania konstrukcji z drewna klejonego opierają się na czterech podstawowych źródłach. Są to:

- I. Statyka: nadawanie układom konstrukcyjnym czytelnych i optymalnych zasad geometrycznych wynikających z analiz statycznych i technologii materiałowej. Ekspozycja dystrybucji sił. W nawiązaniu do powyższego stwierdzenia wyróżniono następujące obiekty:
 - 1) Obiekty o maksymalnie dużych rozpiętościach, w których zastosowanie odpowiednich materiałów i technik konstrukcyjnych jest aspektem dominującym.
 - 2) Obiekty, których formy wynikają z zastosowania optymalnych, czytelnych rozwiązań konstrukcyjnych.

- 3) Obiekty ekspresyjnie podkreślające dystrybucję sił wynikającą z dynamicznych rozwiązań konstrukcyjnych
- II. Rzeźbiarskość: nowatorskie, wyraziste, intuicyjne i swobodne porządkowanie struktury nośnej w nowe, niekiedy abstrakcyjne i trudne do odczytania układy przestrzenne. Wyróżniono tu następujące obiekty:
- 1) Obiekty o formach swobodnych, ściśle zintegrowanych z ekspozycją konstrukcji.
 - 2) Obiekty „rzeźby” i symbole.
 - 3) Obiekty o formach zniekształconych celowo
- III. Rytm: prosta budowa konstrukcyjna bazująca na rytmicznych, powtarzalnych układach przestrzennych. W nawiązaniu do powyższej charakterystyki wyróżniono następujące obiekty:
- 1) Obiekty o prostych, uniwersalnych formach, bez eksponowania elementów konstrukcyjnych.
 - 2) Obiekty o prostych formach z wyeksponowaną prostą, rytmiczną konstrukcją lub konstrukcją bazującą na podstawowych zależnościach geometrycznych.
 - 3) Obiekty o prostych formach z wyeksponowaną unikatową strukturą konstrukcyjną, np. bazującą na rozwiązaniach inspirowanych budową organiczną tworów natury.
- IV. Natura: układy zintegrowane z otaczającym środowiskiem, wtopione w krajobraz; techniki budowlane i eksploatacja są tu podporządkowane idei ekologicznej. W nawiązaniu do powyższej charakterystyki wyróżniono następujące obiekty:
- 1) Obiekty jako elementy spójne w krajobrazie.
 - 2) Obiekty podporządkowane ideologii ekologicznej.

Poszukiwania nowatorskich, twórczych i innowacyjnych form należy prowadzić w powiązaniu z wysokimi wymaganiami stawianymi obiektom architektonicznym o dużych rozpiętościach, które dotyczą innych, niekonstrukcyjnych czynników, związanych z ekonomią, funkcją, znaczeniem wizualnym, społecznym. Są to:

I. Wymogi ekonomiczne i użytkowe (społeczne) związane z funkcją:

- 1) optymalny koszt wybudowania w stosunku do założonej funkcji i estetyki,
- 2) trwałość w zadanym czasie i ekonomia dla obiektów czasowych np. pawilonów wystawowych,

II. Wymogi techniczne i konstrukcyjne:

- 1) ekonomia i bezpieczeństwo użytkowania - odporność na warunki atmosferyczne, zagrożenie ogniowe, korozję biologiczną i chemiczną,
- 2) bezpieczeństwo konstrukcji, łatwość konserwacji i napraw konstrukcji,
- 3) ekonomika konstrukcyjna, zaufanie do materiału konstrukcyjnego,
- 4) trwałość materiałów budowlanych,
- 5) optymalne zarządzanie mikroklimatem wnętrza,
- 6) konstrukcje mobilne,
- 7) ekologia w zakresie pozyskiwania surowca i produkcji materiałów budowlanych.

III. Wymogi związane z czynnikami wizualnymi:

- 1) atrakcyjność i innowacyjność bryły lub wpisanie w kontekst otoczenia,
- 2) wyrażenie idei, przesłania społecznego,
- 3) oddziaływanie i dialog z otoczeniem,
- 4) zmienność efektów wizualnych i percepcji bryły,
- 5) zatarcie równowagi pomiędzy funkcją, formą i konstrukcją – efekty dematerializacji lub eksponowana rzeźbiarskość.

IV. Wymogi związane z czynnikami emocjonalnymi:

- 1) możliwość kształtowania swobodnych form na podstawie percepcji emocjonalnej – forma na pograniczu architektury i sztuki, [143],
- 2) zapewnienie komfortu psychofizycznego,
- 3) tymczasowość i zmienność architektury, wytworzona na potrzeby krótkich wydarzeń i okresów.
- 4) ekologia w szeroko pojętym znaczeniu całego „życia” obiektu, bioklimatyka, [148].

Obiekty o dużych rozpiętościach z drewna klejonego, choć są formami o różnym sposobie kształtowania konstrukcji, spełniają niemal wszystkie przedstawione wymagania i wpisują się w tendencje współczesnej architektury, szczególnie w idee budownictwa ekologicznego, bioklimatycznego i bardzo atrakcyjnego wizualnie. Natomiast wiedza specjalistów, że są to systemy trwałe, dopracowane technicznie i bezpieczne, nie została jeszcze w pełni przeniesiona na praktykę realizacyjną. O ile podstawowe materiały konstrukcyjne, np. stal, są rozpowszechnione w budownictwie dużych rozpiętości ze względu na oczywiste, konstrukcje z drewna klejonego na ich tle wciąż cechuje eksperymentalne traktowanie, a jego właściwości i zachowanie podczas eksploatacji są mniej rozpoznane. Trzeba pamiętać, że najstarsze systemy konstrukcyjne z drewna klejonego mają

dopiero kilkadziesiąt lat i w wielu przypadkach, podczas użytkowania tych obiektów ujawniły się wady, konstrukcje wymagały napraw i wzmocnień. Współczesne tendencje projektowe zmierzają właśnie w stronę eksperymentowania z formą i materiałami konstrukcyjnymi, zwłaszcza w obiektach prestiżowych, stąd tak dużo realizacji o indywidualnych rozwiązaniach. Sposób ewaluowania pierwszych konstrukcji z drewna do konstrukcji dużych rozpiętości przebiegał od poprawy możliwości technicznych materiału do możliwości kształtowania skomplikowanych układów konstrukcyjnych. Następnie, co jest charakterystyczne dla ostatnich lat - wykorzystania aspektów technicznych i konstrukcyjnych do tworzenia architektury o wartościach dodanych. Czy owa faza rozwoju wydaje się ostateczna? Trwają badania nad wynalezieniem czynników polepszających konstrukcyjne właściwości drewna. Widoczny jest rozwój w kierunku wzmocniania przekrojów nośnych włóknami węglowymi, szklanymi i aramidowymi, udoskonalania procesów produkcyjnych, np. mechaniczne badanie wytrzymałości i sortowanie we wstępnej fazie produkcji elementów ponadgabarytowych oraz ich obróbki zestawami sterowanymi numerycznie, CNC. Warto się zastanowić, co byłoby pożądane dla nowego materiału na bazie drewna. Większa wytrzymałość, lekkość, niezawodność, różnorodność i plastyczność dla budowania form, jeszcze większa łatwość projektowania, szybkość rozbiórki i przekształceń w „inny obiekt”, niekoniecznie architektoniczny? Czy jest możliwe następne rewolucyjne odkrycie, które zmieni zakres zastosowania drewna i w jakim kierunku? Futurystyczne wizje dotyczące architektury od wielu lat mówią o niezidentyfikowanych materiałach budowlanych i rozpiętościach powiększających się na coraz większe obszary obejmujące nawet całe miasta (w ostatnich latach np. Kopia nad Houston, która ma szansę zostać urzeczywistniona za pomocą nowego plastiku). Tymczasem na początku XXI w. rozwój w kierunku powiększania rozpiętości nie jest aż tak spektakularny. Coraz więcej mówi się o problemie recyklingu i zagospodarowania obiektów, które się zestarzały, nie tylko wśród ekologów. Współcześni architekci „wizjonerzy” coraz powszechniej rozważają ten problem. Rem Koolhaas, np. mówi: „Razem z Oswaldem Mathiasem Ungerssem opracowaliśmy teorię, że już niedługo równie ważne jak budowanie miast będzie planowanie ich upadku. Prawie w każdym mieście mamy sporo pustostanów. To przestrzeń, z którą trzeba umieć się obchodzić” [300]. W świetle powyższego poglądu, perspektywa rozwoju naturalnych materiałów budowlanych, w tym drewna, wydaje się bardzo obiecująca z oczywistych powodów - łatwego i taniego pozyskania, recyklingu i utylizacji. Jeśli chodzi o projektowanie obiektów o wyjątkowym znaczeniu i dużych rozpię-

tościach, decydujące dla dalszego rozwoju jest, przede wszystkim, zdaniem autora, odpowiedniość materiału dla realizowania nowatorskich koncepcji architektonicznych, przy jednoczesnej prostocie i intuicyjnym rozumieniu zasad projektowania. Ze względu na plastyczność modelowania, ekspresję materiału i różnorodne możliwości konstrukcyjne, lekkość i łatwość adaptacji do innych form i funkcji, a także ze względu na symboliczną i faktyczną „przynależność do dwóch światów”, natury i technologii, drewno stwarza dwie możliwości projektowania:

- 1) projektowanie analityczne: układ konstrukcyjny \implies forma,
- 2) projektowanie intuicyjne: forma \implies układ konstrukcyjny.

2.2. Ewolucja możliwości technicznych i konstrukcyjnych zastosowania drewna, jako materiału do budownictwa dużych rozpiętości.

Ewolucję zastosowania drewna jako materiału odpowiedniego dla budownictwa dużych rozpiętości niewątpliwie można uznać za duże osiągnięcie techniczne. Ze względu na liczne wady, uzyskanie z drewna materiału odpowiedniego dla budownictwa dużych rozpiętości wiązało się z pokonaniem wielu trudności, które w dużym stopniu występują do dziś.

I. Drewno w technologii tradycyjnej - rozpiętości do 25 m:

- 1) rozwiązania tradycyjne stosowane od pokoleń,
- 2) efektywne wykorzystanie możliwości materiału poprzez efektowne konstrukcje więźb dachowych i konstrukcji szkieletowych - wyczerpanie możliwości w zakresie zwiększania rozpiętości,
- 3) badanie dalszych możliwości materiału w odniesieniu do zwiększania rozpiętości a także wyeliminowania naturalnych wad,
- 4) pierwsze próby z drewnem giętym,
- 5) praca nad ulepszaniem połączeń konstrukcyjnych,
- 6) wynalezienie kleju i pierwsze próby z belkami klejonymi,
- 7) optymalizacja projektowania pod wpływem czynników ekonomicznych (brak stali w czasie II wojny światowej).

II. Drewno klejone w układach belkowych prostych i łukowych- rozpiętości od 20 do 80 m:

- 1) wprowadzenie elementu kompozytowego,
- 2) wprowadzenie pras do produkcji elementów łukowych,
- 3) niska energochłonność wytworzenia prefabrykatu – konkurencyjność produkcji,
- 4) wysokie ceny stali,
- 5) wynalezienie kleju wodoodpornego i możliwości zastosowania konstrukcji na zewnątrz,
- 6) zmiana w projektowaniu połączeń – blachy wbudowane, okucia stalowe, łączniki SFS,
- 7) różnorodność układów nośnych,
- 8) ujednoczenie procesu technologicznego,
- 9) ujednoczenie procesu projektowego,
- 10) ujednoczenie norm,
- 11) optymalizacja i rozpoznanie doskonałych właściwości nośnych dźwigarów pełnych w układach belkowo - słupowych oraz trójprzegubowych, wykorzystanie efektywności konstrukcyjnej.

III. Drewno klejone w układach hybrydowych - rozpiętości od 20 do 200 m:

- 1) przekształcenie prostych konstrukcji belkowych z drewna klejonego w skomplikowane hybrydowe układy konstrukcyjne z wykorzystaniem elementów stalowych i ciągnowych,
- 2) nowe możliwości projektowania: struktury przestrzenne, jedno - i dwukrzywiznowe układy siatkowe i wiszące,
- 3) wprowadzanie nowych możliwości modelowania dźwigarów - obróbka zestawem sterowanym numerycznie CNC,
- 4) badanie wytrzymałości tarcicy metodą maszynową,
- 5) dostępność programów wspomagających projektowanie,
- 6) wyeliminowanie problemów związanych z odpornością ogniową przez rozwój metod obliczania wytrzymałości ogniowej konstrukcji,
- 7) eliminowanie wad konstrukcyjnych surowca w trakcie procesu produkcyjnego, chemiczne wzmocnianie właściwości nośnych.

IV. Drewno klejone w układach rzeźbiarskich i w obiektach uwzględniających postulaty ekologiczne:

- 1) wykorzystanie aspektów technicznych i konstrukcyjnych do tworzenia architektury o wartościach dodanych – obiekty symbole,

- 2) wykorzystanie pozytywnego oddziaływania materiału na szeroko rozumiane środowisko,
- 3) eksponowanie estetyki, kolorytu i rysunku drewna,
- 4) poprawa możliwości w zakresie wykończenia i barwienia powierzchni,
- 5) różnorodność form i możliwość eksponowania struktury konstrukcyjnej,
- 6) uwzględnienie postulatów ekologicznych w całym zakresie pojęcia,
- 7) oddziaływanie konstrukcji w kierunku wartości związanych z odczuciami odbiorców, modą, czynnikami społecznymi, np. odpowiedzialnością za zasoby naturalne ziemi.

Powyższy schemat uświadamia, że systemy z drewna klejonego stosowane współcześnie, w samej idei i sposobie konstruowania, bazują na tradycyjnych metodach ciesielskich i są ich naturalną kontynuacją. Połączenie warstw poziomych drewna w przekrój prostokątny naśladuje pierwotny przekrój poprzeczny belki drewnianej, bo spoiny klejowe są niemal niewidoczne. Naturalna kontynuacja tradycji zostaje zachowana, co jest niewątpliwie zaletą konstrukcji z drewna klejonego w sensie estetycznym i społecznym. Jednak to przede wszystkim ogromne zwiększenie gabarytów elementów nośnych, a także działania w celu zwiększenia wytrzymałości materiału i nośności konstrukcji poprzez dodanie elementów stalowych i kompozytowych, możliwe dzięki najnowszym osiągnięciom technologicznym, pozwalają na swobodne realizowanie konstrukcji, które stały się aktualne we współczesnej architekturze.

Po wynalezieniu technologii drewna klejonego i wprowadzeniu sprawdzonych form konstrukcyjnych, takich jak: konstrukcje łukowe, kratownice, kopuły, nastąpił okres fascynacji tą technologią. Powstało wiele prestiżowych obiektów sportowych i wystawowych. W tym czasie dokonał się proces dopracowania rozwiązań technicznych, który pomyślnie został zakończony ugruntowywaną pozycją drewna klejonego. W latach 60 i 70 XX wieku osiągnięto największą rozpiętość dla konstrukcji z układów belkowych pełnych z drewna klejonego, czyli ok. 100 m i rozwój budownictwa z drewna klejonego wydawał się zakończony. Tymczasem pojawiła się dalsza fascynacja konstrukcjami z drewna. Rozpoczął się rozwój, nie tyle w kierunku „coraz większych rozpiętości”, ale w kierunku wykorzystania możliwości technicznych drewna w połączeniach z innymi materiałami konstrukcyjnymi dla tworzenia innowacyjnych form architektonicznych i wykorzystania ich wspólnego potencjału a także podkreślania jego cech ekologicznych. Poprawę bezpieczeństwa współczesnych konstrukcji powodują: ujednolicanie procesów produkcyjnych, podporządkowanych wymogom normowym, co do doboru tarcicy wg

ściśle ustalonych klas wytrzymałości, wprowadzenie sortowania maszynowego tarcicy w wielu europejskich zakładach produkcyjnych wraz z mechanicznym badaniem wytrzymałości oraz możliwość obróbki w trzech płaszczyznach, a także prowadzone badania w kierunku poprawy jakości połączeń i poprawienia właściwości nośnych poprzez wzmacnianie przekrojów elementami kompozytowymi. Problemem wszystkich eksperymentów konstrukcyjnych w budownictwie drewnianym była nieodpowiednia nośność połączeń. Technologia klejenia drewna uczyniła z naturalnego surowca materiał w dużym stopniu przewidywalny, sklasyfikowany, znormalizowany, co pozwala traktować go na zasadach porównywalnych do takich materiałów, jak np. wspomniane wcześniej stal i żelbet. Techniczna możliwość wykonywania obiektów o dużych rozpiętościach z drewna klejonego stawia ten materiał na niemal równoważnej pozycji w stosunku do innych materiałów konstrukcyjnych. Coraz częściej materiał ten zastępuje droższą stal. Początki popularyzacji zastosowania konstrukcji z drewna klejonego wiążą się z niskim kosztem pozyskania surowca i przypadają na okres II wojny światowej, gdy zaczęto je wykorzystywać do budowy hangarów lotniczych w związku z brakiem stali, wykorzystywanej w tamtym czasie w przemyśle zbrojeniowym.

Podsumowując, należy stwierdzić, że do rozwoju konstrukcji dużych rozpiętości z drewna klejonego przyczyniły się przede wszystkim:

- 1) wynalezienie klejów i technik klejenia,
- 2) wzrastające potrzeby budowania obiektów o dużych rozpiętościach,
- 3) potrzeby zwiększenia efektywności rozwiązań stosowanych tradycyjnie związane z próbami oszczędności surowca,
- 4) mała dostępność stali dla budownictwa (wykorzystanie jej w przemyśle zbrojeniowym w I połowie XX wieku),
- 5) rozwój statyki i wiedzy o wytrzymałości materiałów,
- 6) uproszczenie połączeń pomiędzy elementami konstrukcyjnymi,
- 7) wyeliminowanie czasochłonnych i pracochłonnych połączeń ciesielskich.

Rozwój technologii doprowadził do powstania nowych możliwości konstrukcyjnych drewna, takich jak:

- 1) możliwość uzyskania jednolitego przekroju pełnego o określonych wymiarach – brak ograniczeń takich jak grubość i długość pnia surowca,

- 2) możliwość uzyskania konstrukcji o żądanej rozpiętości – brak ograniczeń takich jak długość pnia, jakie występują przy drewnie litym (jedyne ograniczenie to możliwości transportowe),
- 3) możliwość zwiększania rozpiętości poprzez stosowanie konstrukcji hybrydowych,
- 4) możliwość uzyskania elementów o ściśle określonych właściwościach wytrzymałościowych (poprzez normalizację produkcji i projektowania),
- 5) możliwość stosowania zaawansowanej techniki obróbki maszynowej za pomocą maszyn stolarskich a także zestawów sterowanych numerycznie, CNC,
- 6) wykorzystanie krótkich elementów prefabrykowanych: optymalizacja ekonomiczna i wysoka wydajność materiałowa,
- 7) ekonomiczne scalanie konstrukcji na budowie - krótki czas montażu, ograniczenie elementów składowych, modułowość (montaż konstrukcji z drewna klejonego o rozpiętości ok. 100 m może trwać zaledwie kilka tygodni),
- 8) wysoka odporność ogniowa, która wynika z zastosowanych przekrojów,
- 9) możliwość plastycznego kształtowania elementów, która wiąże się z kreatywnością w różnicowaniu form architektonicznych.

Architektura zyskała jeszcze jeden materiał konstrukcyjny, który pozwala na zróżnicowanie i indywidualizację form, powiększyła się swoboda realizowania koncepcji architektonicznych przy wykorzystaniu różnorodnych układów konstrukcyjnych. Przekształcenie tradycyjnej technologii przyniosło wymierne korzyści. Uzyskano elementy konstrukcyjne o zwiększonej nośności. Możliwe stały się także - optymalizacja zachowania statycznego konstrukcji i doprowadzenie do dużego bezpieczeństwa użytkowego.

2.3. Zakres możliwości drewna klejonego dla budownictwa dużych rozpiętości

Hipoteza obiecujących perspektyw dla nowych możliwości kształtowania form architektonicznych o dużych rozpiętościach z drewna klejonego opiera się, jak już wspomniano, na przeciwstawnych cechach charakterystycznych dla drewna. Z technicznego i konstrukcyjnego punktu widzenia są to, przede wszystkim, cechy związane z zastosowaną technologią i naturalnym pochodzeniem surowca a także z możliwościami w tworzeniu różnorodnych, także nowatorskich form i układów konstrukcyjnych - z punktu widzenia jakości dzieł architektury - z estetyką, aspektem społecznym, ekonomicznym i ekologicznym.

nym. Stosowanie drewna klejonego z pewnością wprowadza dodatkowe treści, wartości i idee. Poniżej wyodrębniono najbardziej atrakcyjny, z punktu widzenia architektury, zakres cech, które mogą powodować poszerzenie możliwości zastosowań dla konstrukcji z drewna klejonego, biorąc pod uwagę zarówno cechy techniczne jak też typowo architektoniczne i artystyczne – wizualne i estetyczne.

I. Cechy techniczne i konstrukcyjne:

- 1) niska masa w stosunku do nośności, podnosząca ekonomikę zastosowania,
- 2) prefabrykacja z możliwością dostosowania elementów do warunków zastanych na budowie,
- 3) możliwość stosowania drewna klejonego w postaci różnych elementów: belki, słupy, stropy, ściany monolityczne i struktury,
- 4) możliwość stosowania drewna klejonego w postaci różnych układów statycznych, konstrukcyjnych,
- 5) możliwość wykorzystania nowych materiałów na bazie drewna, które zwiększają nośność konstrukcji przy jednoczesnym obniżeniu masy.

II. Cechy architektoniczne:

- 1) możliwości tworzenia nowoczesnej architektury, przy wykorzystaniu intuicji i wyobraźni, dla konstruowania układów przestrzennych,
- 2) estetyka form architektonicznych tkwiąca w samym materiale, jego strukturze, kolorze i sposobie oddziaływania a także zdolności do wyrażania wartości architektonicznych „niematerialnych”,
- 3) przynależność drewnianej struktury do „dwóch światów”- przyrody i technologii - pozwala eksponować w formach architektonicznych zarówno plastyczność przyrody jak i czystość, i przejrzystość, wynikającą z rozwiązań statycznych, zależności technicznych, technologicznych i ekonomicznych: wartości estetyczne form architektonicznych wynikają z zastosowanych elementów geometrycznych w określonych zestawieniach i rytmach, które są charakterystyczne zarówno dla układów przestrzennych prostokreślnych jak i dwukrzywiznowych, organicznych,
- 4) możliwości wpisania się architektury o dużych rozpiętościach, wcześniej postrzeganej jako czysto inżynierskiej i technologicznej, w ideę budownictwa proekologicznego,

- 5) kontynuacja tradycji budownictwa drewnianego, co ma pozytywne znaczenie dla oddziaływania form architektonicznych na sferę psychofizyczną odbiorców.

Oprócz powyższych aspektów, decydujących o architektonicznym wyrazie dzieł architektury, podstawą do wyboru materiału konstrukcyjnego jest także spełnienie podstawowych wymagań związanych m. in. z bezpieczeństwem użytkowym oraz ekonomią, które są brane pod uwagę nie tylko w ostatecznej fazie projektowania architektonicznego, ale już w fazie planowania inwestycji. Są tu zarówno zalety jak też wady, które należy brać pod uwagę:

I. Przygotowanie produkcji:

- 1) stosunkowo długi czas wzrostu surowca, jednak nie wymagający dużego zaangażowania finansowego,
- 2) łatwość pozyskania surowca,
- 3) niskie nakłady energetyczne związane z pozyskaniem surowca,
- 4) dość dobra dostępność surowca, jednak uzależniona od warunków lokalnych, klimatycznych i sezonowych,
- 5) krótki czas oczekiwania na przygotowanie produkcji – 2-8 tygodni,
- 6) niejednokrotnie daleki transport do zakładu produkcyjnego – bardzo często łamana jest tu zasada pozyskiwania surowców w regionie budowy.

II. Produkcja:

- 1) zmienna jakość surowca, trudności w oszacowaniu parametrów wytrzymałościowych,
- 2) konieczność suszenia surowca do odpowiedniej wilgotności (12%),
- 3) konieczność eliminowania z tarcicy naturalnych wad,
- 4) krótki czas wyprodukowania elementów konstrukcyjnych związany z wykorzystaniem obróbki maszynowej,
- 5) stosunkowo niski koszt i nakłady energetyczne wyprodukowania,
- 6) możliwość uzyskania jednorodnego przekroju na całej długości elementu - wyeliminowane są w dużym stopniu poprzez proces produkcyjny splekania, splot i skręt włókien, inkluzje (sęki),
- 7) łatwość kształtowania form zakrzywionych,

- 8) możliwość obróbki mechanicznej zestawem sterowanym numerycznie i duża precyzja wykonania.

III. Dostawa i transport:

- 1) niska masa własna – obniżony koszt zużycia energii podczas transportu,
- 2) trudny i specjalistyczny transport elementów ponadgabarytowych (dotyczy także konstrukcji wytwarzanych z innych materiałów),
- 3) możliwości uszkodzeń i zniszczeń w czasie transportu.

IV. Magazynowanie:

- 1) możliwości prostego i długiego magazynowania surowca lub gotowych elementów konstrukcyjnych,
- 2) konieczność zapewnienia odpowiednich warunków magazynowania.

V. Realizacja:

- 1) łatwość obróbki mechanicznej, także na montażu,
- 2) łatwość montażu- wiele elementów można montować ręcznie,
- 3) delikatność materiału i możliwości uszkodzeń i zniszczeń w trakcie transportu, montażu i nieodpowiedniego użytkowania,
- 4) niska masa własna,
- 5) ognioodporność uzyskiwana poprzez właściwy dobór przekroju poprzecznego,
- 6) konieczna ochrona przed zawilgoceniem, na stykach z innymi materiałami,
- 7) rzeźbiarski charakter kształtowania form, który wpływa w znaczący sposób na postrzeganie architektury drewnianej jako atrakcyjnej,
- 8) możliwość uzyskania ciekawych form detali.

VI. Użytkowanie:

- 1) izolacyjność cieplna,
- 2) odporność na czynniki chemiczne,
- 3) brak emisji szkodliwych substancji,
- 4) możliwość nieskomplikowanego dokonywania napraw i wzmocnień w trakcie użytkowania,
- 5) jakość i trwałość materiału związana jednak z prawidłową eksploatacją,
- 6) nakłady związane z konserwacją konstrukcji- konieczność impregnacji i stosowania innych zabezpieczeń przeciw warunkom atmosferycznym,
- 7) czas prawidłowego funkcjonowania konstrukcji uzależniony jest od prawidłowej konserwacji,

- 8) wymagana jest dbałość o stan techniczny obiektu, czyli możliwości dokonywania napraw, uzupełnień i wzmocnień w okresie eksploatacji,
- 9) niska odporność na czynniki atmosferyczne przy braku prawidłowej konserwacji,
- 10) możliwe pękanie drewna podczas eksploatacji pod wpływem zmieniających się gwałtownie czynników atmosferycznych, np. wilgotności.

VII. Zakończenie użytkowania:

- 1) możliwość i prostota recyklingu po okresie eksploatacji,
- 2) proste prace rozbiórkowe przy stosunkowo niskich nakładach,
- 3) możliwość pozyskania energii.

Drewno klejone powstaje z naturalnego surowca, który ulega tylko częściowym przetworzeniom, stąd jego wykorzystanie w elementach konstrukcyjnych musi być objęte kontrolą technologiczną, zawartą w szczegółowych normach i restrykcyjnie przestrzegana. Ze względu na naturalne, różnorodne pochodzenie materiału w elementach konstrukcyjnych poszczególne próbki, odpowiednio posegregowane przechowywane są często przez wiele lat w laboratoriach zakładów produkcyjnych, [335]. Wartość konstrukcyjna drewna w dużym stopniu zależy od warunków lokalnych, w jakich wzrastają drzewa, będące surowcem dla drewna klejonego, takich jak klimat, ukształtowanie terenu, stan gleby i powietrza, etc. Rozmiar i własności mechaniczne komórek drewna zależą od wilgoci, temperatury, występowania szkodników i wielu innych czynników. Przed przystąpieniem do produkcji niezbędne jest zatem przeprowadzenie podziału na klasy wytrzymałościowe zgodnie z EN 518 lub EN 519 i wykorzystywanie wyłącznie drewna suszonego o wilgotności. 12% (rozdział 7.2.1.).

Współcześnie osiągnięcie wysokiej klasy ognioodporności, której brak był podstawowym problemem w tradycyjnym zastosowaniu drewna, jest kluczowym atutem (rozdział 7.2.2.). Drewno wykazuje małą odporność na działanie czynników atmosferycznych, gdy jest na nie bezpośrednio narażone, szczególnie w strefach węzłów i to jest najczęstszą przyczyną awarii i niskiej trwałości konstrukcji. Stąd ważnym zagadnieniem jest jego prawidłowe zastosowanie w warunkach odpowiedniej wilgotności, ochrona i konserwacja (rozdział 7.2.3.). Wykorzystywanie gatunków nie występujących lokalnie nie jest ograniczeniem, lecz podraża proces produkcyjny. Producenci drewna klejonego niejednokrotnie sprowadzają tarcicę z odległych terenów. Źródła pozyskiwania tarcicy są bardzo często takie same dla zakładów znajdujących się w różnych krajach. Proces *pozy-*

skanie-wbudowanie odbywający się w zakładach produkcyjnych, z których gotowe prefabrykowane wyroby lub ich części są przewożone nawet po 1000 kilometrów, nie jest korzystny z punktu widzenia idei ekologiczności.

Podkreślanym najczęściej walorem konstrukcji z drewna klejonego jest to, że do produkcji elementów z drewna klejonego używa się materiału, który pozyskiwany jest z naturalnych, odnawialnych źródeł. Niezbędna jest jednak kontrolowana gospodarka zasobami leśnymi, poprzez zakładanie lasów, które w założeniu mają się stać źródłem materiału konstrukcyjnego. W trakcie wzrostu lasów potrzeba ingerencji człowieka jest minimalna. Lasy ponadto są dostarczycielem tlenu a zarazem magazynują szkodliwy dwutlenek węgla (średnio drzewo absorbuje 1 tonę dwutlenku węgla na każdy metr sześcienny przyrostu i produkuje 727 kg tlenu), [212]. Do produkcji drewna klejonego zużywa się także mniej energii niż przy produkcji innych materiałów konstrukcyjnych, takich jak stal, aluminium, cegła, beton. Inżynierowie z Ove Arup&Partners przeprowadzili w latach 90 XX w. doświadczenia, które potwierdziły, że belka stalowa o wymiarach 305/165 mm ma podobne właściwości nośne jak belka z klejonego drewna świerkowego o wymiarach 550/135mm, ale do jej produkcji zużywa się sześć razy więcej energii niż przy produkcji belki drewnianej. Dla porównania - wytworzenie belki żelbetowej o porównywalnej nośności, o wymiarach 400/250mm, zużywa pięć razy więcej energii niż wytworzenie adekwatnej belki z drewna klejonego. Drewno jest bardziej opłacalne, szczególnie z punktu widzenia produkcji, nawet jeśli koszty jednostkowe betonu i stali wydają się niższe, [231]. Elementy z drewna klejonego można odzyskiwać do powtórnego przetworzenia lub do wytworzenia energii. Elementy z drewna klejonego cechuje niska emisja zanieczyszczeń podczas produkcji, w porównaniu z innymi materiałami. Nie posiadają one toksycznych domieszek chemicznych, a ilość stosowanych klejów jest minimalizowana, natomiast preparaty stosowane do impregnacji biologicznej są w dużej mierze produkowane na bazie wody. Drewno ulega naturalnej biodegradacji i to jest obecnie bardzo ważną jego zaletą. Zbudowane w ostatnich 50 latach tzw. „blokowiska” pustoszeją, szczególnie w państwach Europy Zachodniej, a ich rozbiórka, utylizacja i recykling materiałów, z których je zbudowano, są bardziej kosztowne niż samo ich wybudowanie. Tego problemu nie ma w przypadku budownictwa drewnianego. Z wielu drewnianych domów mieszkalnych pozostało już niewiele. Pierwotna wada drewna, czyli zdolność do naturalnej biodegradacji nabiera zatem nowej wartości. Inną zaletą jest możliwość długoterminowego składowania surowca przed jego wbudowaniem (przy zachowaniu odpowiednich

warunków) a także trwałość (czas) użytkowania konstrukcji. Wykorzystanie surowca przy produkcji elementów z drewna klejonego wynosi 99%. Odpady powstałe w procesie produkcyjnym są m. in. wykorzystywane do ogrzewania zakładów produkcyjnych. Lasy będące miejscem pozyskania surowca do produkcji przyczyniają się do osłabienia efektu cieplarnianego. „Produkty z drewna zdecydowanie odgrywają rolę w osłabieniu efektu cieplarnianego przez zmniejszenie zawartości węgla w atmosferze. Ich specyficzne właściwości, takie jak pojemność magazynowania węgla, odnawialność surowca i to, że produkcja z drewna jest mniej energochłonna niż z innych materiałów, powodują, że w kontekście polityki walki ze zmianami klimatycznymi i zmniejszeniu efektu cieplarnianego produkty z drewna są produktami z wyboru. W szczególności, redukcja ważnych gazów cieplarnianych (CO₂) może mieć miejsce dzięki zastąpieniu materiałów wysokoenergochłonnych produktami z drewna czy drewnopochodnymi”, [212].

Pomimo wielu zalet omawianego materiału największą uciążliwość przy wykorzystaniu dla budownictwa dużych rozpiętości na terenie Polski wiąże się z praktyką projektową i wspomnianym na wstępie brakiem transferu osiągnięć naukowych i technologicznych do praktyki projektowej lub wprowadzanie tych osiągnięć z długim opóźnieniem. Problemy te, przede wszystkim, wynikają z następujących faktów:

- 1) panującego stereotypu o braku odporności ogniowej konstrukcji z drewna klejonego nie tylko wśród inwestorów, ale też projektantów,
- 2) nieprzestrzegania zasad prawidłowej ochrony drewna, co prowadzi do przekonania że drewno jest nietrwałe, ulega uszkodzeniom i awariom,
- 3) trudności w obliczaniu odporności ogniowej, wynikające z nieprecyzyjnych przepisów,
- 4) braku powszechnego dostępu do wiedzy i materiałów do projektowania,
- 5) braku wspierania inicjatyw budownictwa ekologicznego, które jest kluczowe w innych krajach UE,
- 6) braku jednoznacznych ustaleń normowych, co do klas wytrzymałościowych i rozbieżności pomiędzy normami europejskimi, np.: Eurocod i niemieckimi DIN,
- 7) nieumiejętne przyjmowanie odpowiednich klas wytrzymałościowych i ciężaru drewna klejonego do obliczeń konstrukcyjnych,
- 8) wysoki stopień skomplikowania i słaba dostępność programów obliczeniowych oraz programów do sporządzania wstępnego wymiarowania, którymi mógłby dysponować architekt,

- 9) braku ofert na polskim rynku biur konstrukcyjnych, które specjalizują się w konstrukcjach z drewna klejonego i mogłyby wykonać tzw. „twórczy” projekt innowacyjny (nowatorskie formy),
- 10) zbyt mała liczba wyspecjalizowanych biur projektowych, producentów i wykonawców.

W związku z powyższymi faktami wzrastają nakłady finansowe na projekty związane z uzyskaniem nietypowych innowacyjnych form w stosunku do innych technologii, stąd, jeśli są podejmowane, dyktowane są prestiżem i symboliką materiału. Jednocześnie wzrasta świadomość wartości architektonicznych i psychofizycznych związanych z użyciem drewna klejonego, takich jak oddziaływanie na odbiorców, jakość form i faktur etc. Nie bez znaczenia jest powracająca moda na stosowanie drewna i innych materiałów naturalnych.

3. Analiza współczesnych form architektury z drewna klejonego w odniesieniu do układów konstrukcyjnych dużych rozpiętości

Funkcja konstrukcji w budowaniu form architektonicznych

3.1. Wprowadzenie

Analiza istniejących rozwiązań w zakresie form architektury współczesnej dużych rozpiętości z drewna klejonego ma na celu pokazanie ważnej funkcji konstrukcji w budowaniu atrakcyjnych form architektonicznych a także wyodrębnienie najbardziej charakterystycznych dla drewna klejonego rozwiązań, które mogą być przydatne dla twórczego projektowania obiektów architektury w przyszłości.

Współczesna architektura pokazuje, jak różne mogą być sposoby kształtowania układów nośnych. Wynikają one z różnorodnych inspiracji, możliwości i przesłanek. Architektura współczesnych obiektów dużych rozpiętości z drewna klejonego to olbrzymia liczba realizacji oraz charakteryzujących je postaw twórczych. Wiele z nich wykorzystuje najnowocześniejsze osiągnięcia techniczne i naukowe. Przekrycie obiektów dużych rozpiętości wymaga zastosowanych nietypowych układów konstrukcyjnych a także rozwiązywania skomplikowanych, wielopłaszczyznowych problemów technicznych. Poszukiwania efektywności konstrukcyjnej, wykorzystanie nowych materiałów prowadzą ku nowym, indywidualnym formom. Innowacyjne formy powstają także jako wynik intuicyjnych działań projektowych, mających na celu stworzenie charakterystycznego i niepowtarzalnego obiektu. Twórcze poszukiwania form, w zakresie genezy kształtowania konstrukcji z drewna klejonego opierają się, w zależności od wielu czynników, w tym – rozpiętości, funkcji i charakteru budynku, na czterech podstawowych źródłach. Są to: statyka, rzeźbiarskość, rytm i natura. Przeprowadzona analiza istniejących obiektów pokazała, że czerpanie inspiracji z tych źródeł to wiodące tendencje we współczesnej architekturze. Budowanie formy jest polem wielu eksperymentów, przy czym duży udział mają tu nie tylko techniki konstrukcyjne i zastosowane materiały, ale także, jak wspomniano, wartości ekologiczne i społeczne. Widoczna jest olbrzymia zależność form od zastosowanej konstrukcji (rozpiętości) lub działania w kierunku zerwania tej zależności. Przekrycia sprawiają wrażenie oderwanych od ziemi owadów lub latawców. Same budynki stają się

coraz bardziej ażurowe, „niematerialne”. Widoczna jest, z jednej strony, oszczędność form, upraszczanie układów konstrukcyjnych, dominacja faktur materiałów, z drugiej - ekspresja i rzeźbiarskie traktowanie obiektów. Masywne, klasyczne budowle ustępują miejsca lekkim i eterycznym lub też obiektom, w których struktura przejmuje funkcję dominującą.

W celu przeprowadzenia oryginalnej, własnej analizy dokonano podziału kilkudziesięciu wybranych obiektów z drewna klejonego na grupy obiektów, biorąc pod uwagę dominujące aspekty związane z budowaniem form. Podział ten należy traktować jako uproszczony, sporządzony na potrzeby rozprawy, ponieważ projektowanie formy w architekturze dużych rozpiętości wynika z bardzo wielu czynników, jest skomplikowane, poddyktowane zamysłem twórcy i może łączyć wiele przeciwstawnych cech. Stąd możliwy byłby również inny podział, przywołujący inne kryteria. W wielu obiektach wyróżnione cechy dopełniają się i przenikają. Charakterystyczne jest to, że, w większości przytoczonych przykładów, podejście inżynierskie, polegające na spełnieniu określonych warunków technicznych, w twórczy sposób łączy się z podejściem „wizjonerskim”, typowym dla projektowania dzieł architektury. (Tabela 1)

Tabela 1: Podział istniejących rozwiązań współczesnych form architektury dużych rozpiętości z drewna klejonego w odniesieniu do układów konstrukcyjnych.

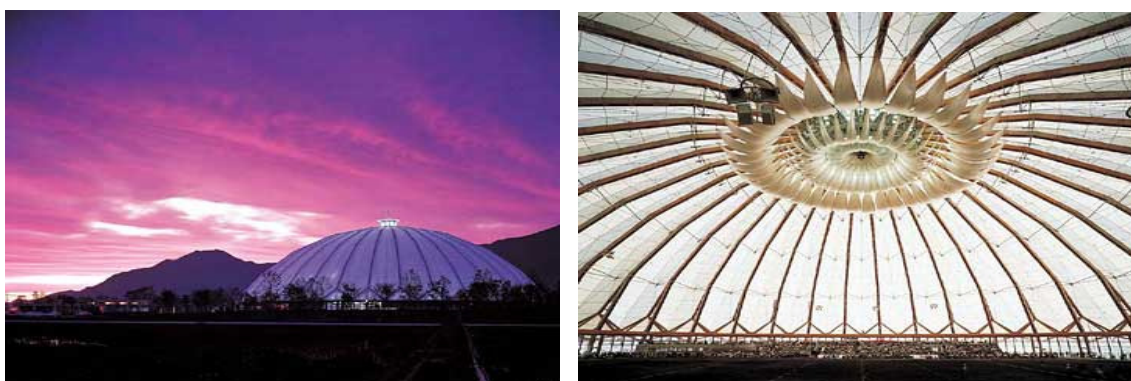
Dominujące aspekty w budowie konstrukcyjnej form.	Obiekty w zależności od zastosowanej techniki, rozpiętości i układów konstrukcyjnych.	Ilość przykładów.
<p><u>Statyka</u> :</p> <p>nadawanie układom konstrukcyjnym czytelnych i optymalnych zasad geometrycznych wynikających z analiz statycznych i technologii materiałowej, eksponowanie dystrybucji sił.</p>	<p>Obiekty o maksymalnie dużych rozpiętościach, w których zastosowanie odpowiednich materiałów i technik konstrukcyjnych jest aspektem dominującym.</p>	4
	<p>Obiekty, których formy wynikają z zastosowania optymalnych, czytelnych rozwiązań konstrukcyjnych.</p>	4
	<p>Obiekty ekspresyjnie podkreślające dystrybucję sił wynikającą z dynamicznych rozwiązań konstrukcyjnych.</p>	9

<u>Rzeźbiarskość:</u> nowatorskie, wyraziste, intuicyjne i swobodne porządkowanie układów nośnych w nowe, niekiedy abstrakcyjne i trudne do odczytania układy przestrzenne.	Obiekty o formach swobodnych, ściśle zintegrowanych z ekspozycją konstrukcji.	10
	Obiekty „rzeźby” i symbole.	11
	Obiekty o formach zniekształconych celowo.	5
<u>Rytm:</u> prosta budowa konstrukcyjna bazująca na rytmicznych, powtarzalnych układach przestrzennych	Obiekty o prostych, uniwersalnych formach, bez ekspozycji elementów konstrukcyjnych	4
	Obiekty o prostych formach z wyeksponowaną prostą konstrukcją rytmiczną lub konstrukcją bazującą na podstawowych zależnościach geometrycznych.	9
	Obiekty o prostych formach z wyeksponowaną, unikatową strukturą konstrukcyjną, np. bazującą na rozwiązaniach inspirowanych budową organiczną tworców natury.	4
<u>Natura:</u> układy zintegrowane z otaczającym środowiskiem, wtopione w krajobraz, techniki budowlane i eksploatacja budynków podporządkowane idei ekologicznej.	Obiekty, jako elementy spójne w krajobrazie.	3
	Obiekty podporządkowane ideologii ekologicznej.	6

3.2. Obiekty o dużych rozpiętościach, w których zastosowanie odpowiednich materiałów i technik konstrukcyjnych jest aspektem dominującym

Charakterystyczną cechą tych obiektów jest efektywne i ekonomiczne zastosowanie konstrukcji w celu osiągnięcia maksymalnie dużych rozpiętości. Zawęża się tu ilość układów konstrukcyjnych możliwych do zastosowania. Wybór ogranicza się do konstrukcji hybrydowych z udziałem elementów stalowych. Walorem tych konstrukcji jest lekkość,

duża nośność i możliwość efektywnego zwiększania rozpiętości przy jednoczesnym zmniejszaniu gabarytów elementów nośnych. Dźwigary nośne składają się z kratownic przestrzennych z wykorzystaniem materiałów kompozytowych i najnowocześniejszych rozwiązań technologicznych. Konstrukcje najczęściej są ukształtowane w układy kopułowe i formy owalne. W stosunku do innych technologii, drewno klejone jest w dużo mniejszym stopniu wykorzystywane w obiektach o bardzo dużych rozpiętościach, zwłaszcza w konstrukcjach przekryć stadionów i aren sportowych, które stanowią największą grupę tego typu obiektów. Ich przekrycia są często mobilne. Nie spotkano się z próbą zastosowania konstrukcji z drewna klejonego dla przekrycia dachu rozsuwanego. Obiekty te charakteryzują się z reguły czytelnym i dominującym układem konstrukcyjnym nawiązującym do przebiegu sił. Elementy konstrukcyjne są eksponowane we wnętrzu, nie tylko z powodów ekonomicznych i wizualnych, ale także akustycznych, natomiast same formy są proste, jednorodne i oszczędne. W wielu obiektach strukturę konstrukcyjną pokazuje się na zewnątrz obiektu, przez ekspozycję elementów konstrukcji (żebra kopuły Izumo Dome), a także przypór (fundamentów). Faktura i koloryt drewna kontrastują z materiałami stosowanymi na pokrycia dachów i ścian, często połyskującymi i metalicznymi, takimi jak blacha, szkło, lub odmienne fakturalnie. Najczęściej są to obiekty wolnostojące, oddalone od centrów miast, dominujące na tle przestrzeni, która je otacza, lub obiekty, które „przykrywają” przestrzeń miejską, w celu ich ochrony przed niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi (kopuły nad miastem Hudson). Przykłady omawianej architektury przedstawiono na rys.3.1 do 3.4.



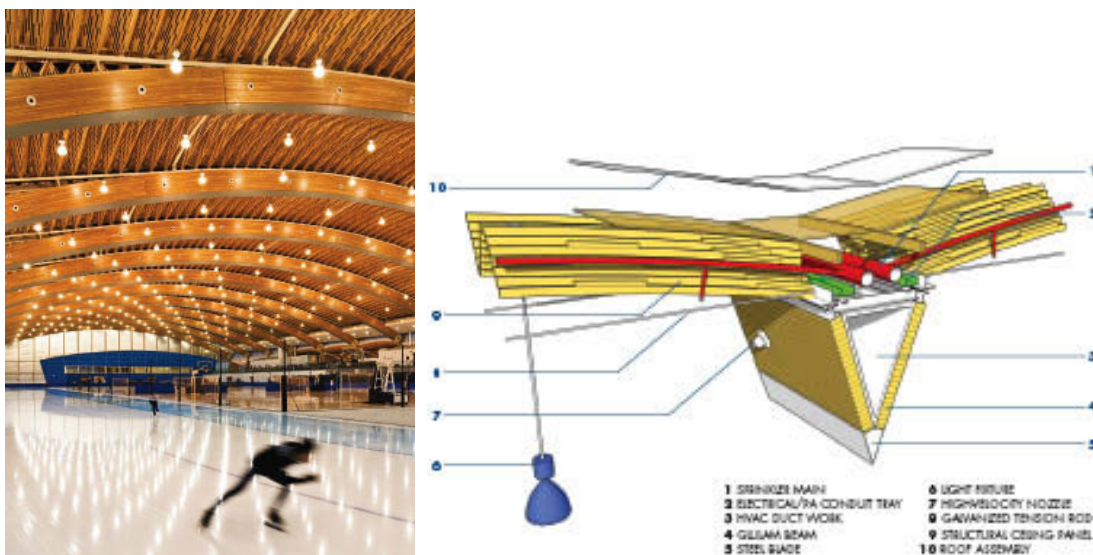
Rys. 3.1. Kopuła Izumo Dome w Japonii. Architektura: Kimio Saito. Konstrukcja: Kajima Construction. Realizacja: 1992. Rozpiętość: 143m, [60], [168].



Rys. 3.2. Kopia Odate Jukai Dome Park, Dewa-Sanchi prefecture, Honshu, Japonia. Stadion piłkarski. Architektura: Toyo Ito & Associates, Konstrukcja: Takenaka Corporation, Realizacja: 1992- 1997, [208].



Rys. 3.3. Joensuu Arena. Przekrycie boiska piłkarskiego. Architektura: Pro Ark Oy Marjatta Hara-Pietila. Realizacja: 2004, [337].



Rys. 3.4. Hala lodowiska w Richmond "Olympic Oval". Architektura: Cannon Design. Realizacja: 2009 r. Rozpiętość 100 m. Nowatorski, kompozytowy system konstruowania dźwigara głównego i konstrukcji pokrycia dachu, [310].

3.3. Obiekty, których formy wynikają z zastosowania optymalnych, czytelnych rozwiązań konstrukcyjnych

Cechą charakterystyczną takich obiektów jest eksponowanie jednorodnej zasady konstrukcyjnej, z jednoczesnym redukowaniem formy budynku. Charakterystyczne dla projektowania tego typu konstrukcji jest powielanie sprawdzonych wzorców i rozwiązań w celu osiągnięcia, w pewnym sensie, klasycznych form. Konstrukcja ukształtowana jest z reguły na siatce modularnej, w geometrycznie uporządkowanym układzie. Porządek struktury wynika ze sposobu łączenia elementów składowych oraz statycznych zależności pomiędzy nimi. Kształtowanie elementów konstrukcyjnych wprowadza określony rytm, na który składają się elementy nośne: słupy, dźwigary, żebra o różnych formach. Mogą to być dźwigary proste, łuki, łuki wzmocnione, hybrydowe drewniano - stalowe, kratownice drewniane i kratownice hybrydowe drewniano - stalowe, usztywnione przestrzennie przez elementy drugorzędne, takie jak płatwie, rygle, elementy stężające. Formy konstrukcyjne z jednej strony są podporządkowane zasadzie jak najpełniejszego, optymalnego przeniesienia sił działających na konstrukcję, z drugiej strony są przystosowane do warunków funkcjonalnych (forma wynika z funkcji) i ekonomicznych. Przykłady omawianych obiektów pokazano na rys. 3.5 do 3.8.



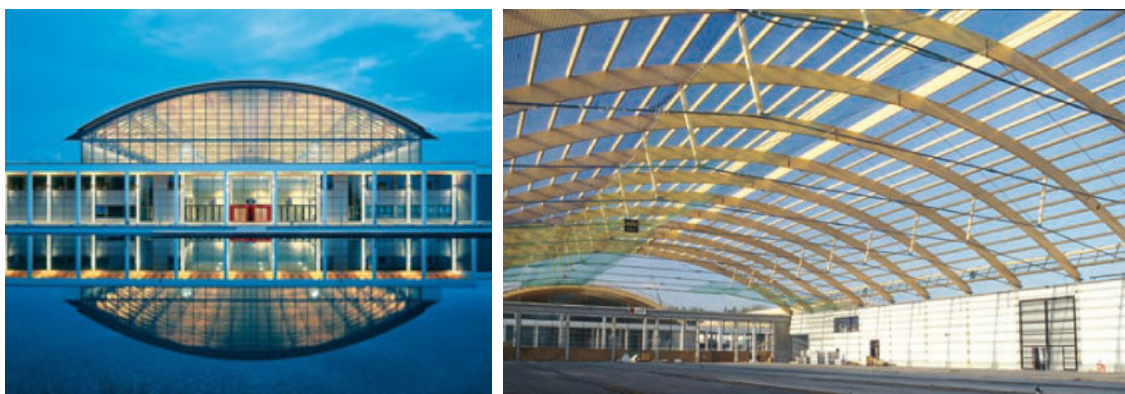
Rys. 3.5. Terminal lotniczy Beijing Capital International w Chinach. Architektura: Foster + Partners, [302].



Rys. 3.6. Hala tenisowa w Tyrolu w Austrii. Architektura: Reitter Helmut. Realizacja: 1996. Rozpiętość: 40m, [321].



Rys. 3.7. Hala sportowa w Salzburgu. Wymiary: 118 x 120 m. Dźwigary o wymiarach: 24 x 217 cm, [307].



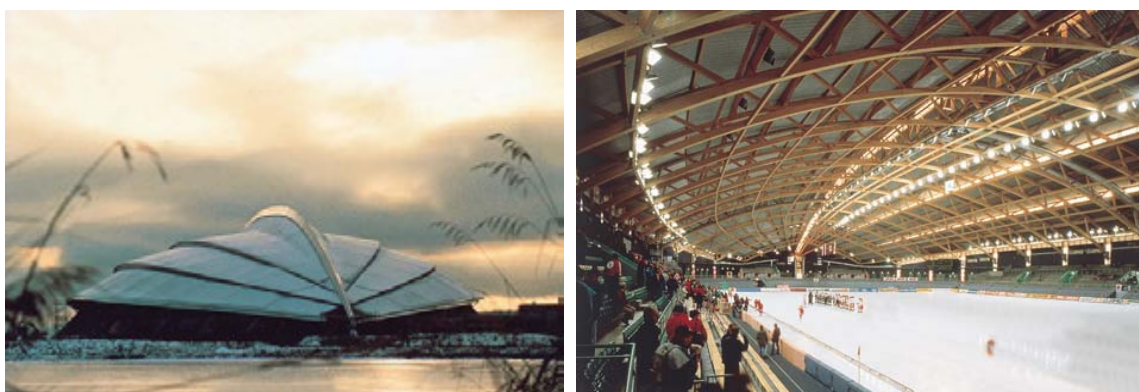
Rys. 3.8. Hala ekspozycyjna w Friedrichshafen w Niemczech, [327].

3.4. Obiekty ekspresyjnie podkreślające dystrybucję sił wynikającą z dynamicznych rozwiązań konstrukcyjnych

Dynamiczne rozwiązania konstrukcyjne pojawiły się w architekturze na początku XX wieku. Jest ona wręcz nazywana, ze względu na liczne rewolucyjne, konstrukcyjne dokonania, „symbolem stanów równowagi” [65]. Architektura, która jest w swej istocie sta-

tyczna, przywołała nowe, metaforyczne obrazy płynności, lekkości i ruchu, powstałe pod wpływem odwzorowywania natury w ruchu i kopiowania kształtów aerodynamicznych, [65]. Są to obiekty o wielkiej sile ekspresji. Do dziś wywołują wiele skojarzeń i, jak na przykład opera w Sydney, „obojętnie czy chcemy tego czy nie, jest cechą, symbolem naszych czasów”, [49]. Dzieła architektoniczne są to „jakby symbole stanów równowagi (...), wywołują wrażenia statyczności (...), wrażenie ruchu, a raczej jego możliwości, powstające zawsze skoro odchylenia od pionu lub poziomemu staną się widoczne”, [57].

Obiekty te pokazują ogromne możliwości drewna klejonego w budowaniu różnych form architektonicznych, w których pokazanie dynamiki i dystrybucji sił jest dominujące. Wyeksponowanie dynamicznego układu nośnego niemal automatycznie narzuca ekspozycję struktury, a elementy konstrukcyjne wykorzystuje się jako zamierzone układy budujące ekspresję – cykle i dominanty. Obiekty te charakteryzują się czytelnym przebiegiem sił oraz rozwiązań konstrukcyjnych i technicznych. Są to zarówno obiekty o dużych rozpiętościach: 60, 80, 100 metrów, jak też obiekty o stosunkowo małych rozpiętościach, w których konstrukcję zastosowano w nietypowy, zaskakujący sposób (rys. 3.9 – 3.17).



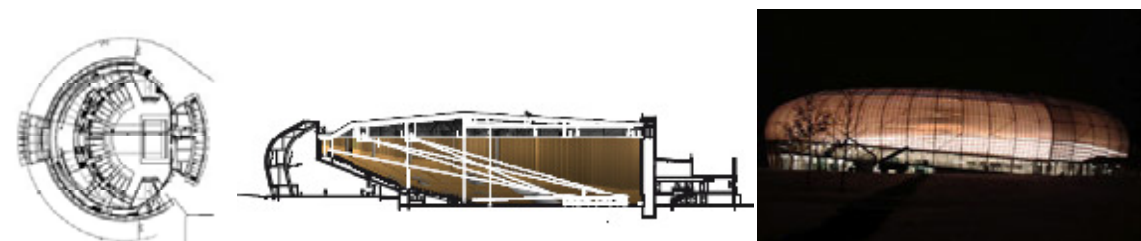
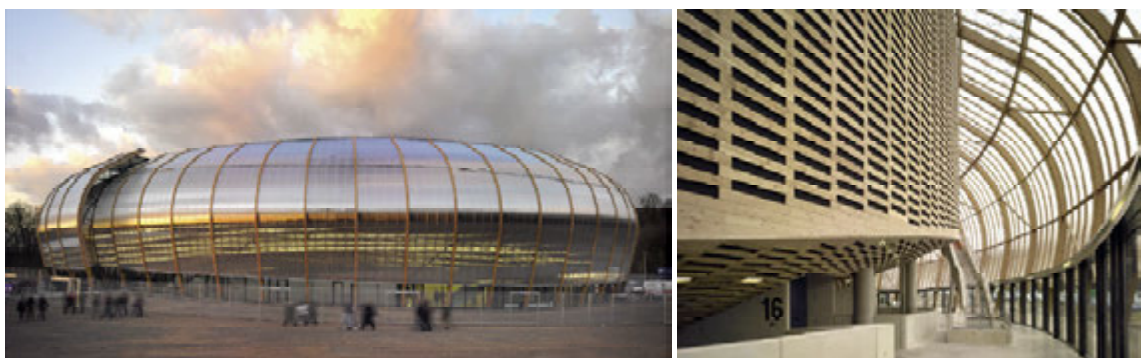
Rys. 3.9. Hala olimpijska w Hamar w Norwegii, [347].



Rys. 3.10. Hala olimpijska łyżwiarstwa szybkiego w Nagano. Architektura: Kajima, [207].



Rys. 3.11. Katedra w Oakland. Architektura: Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM). Realizacja 2008, [300].



Rys. 3.12. Hala koncertowa w Limoges. Architektura: Bernard Tschumi & Atelier 4. Konstrukcja: J.Natterer. Realizacja 2007, [210], [333].



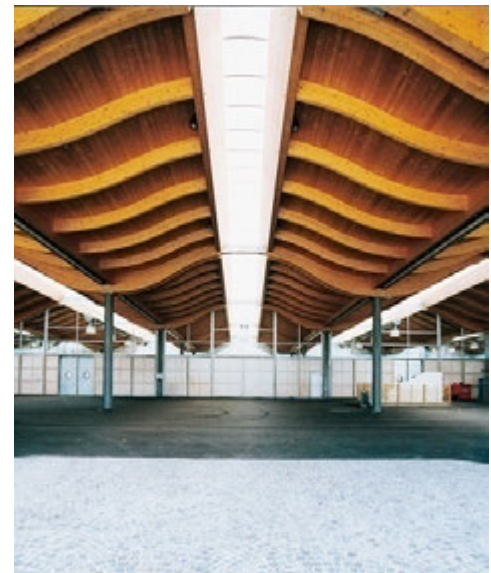
Rys. 3.13. Centrum ekspozycyjne. Architektura: Gerold Gassner, Höchst, [320].



Rys. 3.14. Pawilon niemiecki na Expo 2000 w Hanowerze, [327].



Rys. 3.15. Centrum wystawowe Weber Haus, Rheinau-Linx w Niemczech. Architektura: Hermann Architekten. Konstrukcja: Fischer & Friedrich, [327], [225].



Rys. 3.16. Przekrycie faliste w Mezzocorona we Włoszech, [327].



Rys. 3.17. Winnica Bodegas Ysios w Hiszpanii. Architektura: Santiago Calatrava. Efekt przesuwającej się fali o długości 196 m i rozpiętości 26 m uzyskano za pomocą sinusoidalnie rozmieszczonych prostych belek z drewna klejonego.. „Falistość” nawiązująca do pasma gór staje się tu oczywista, [72].

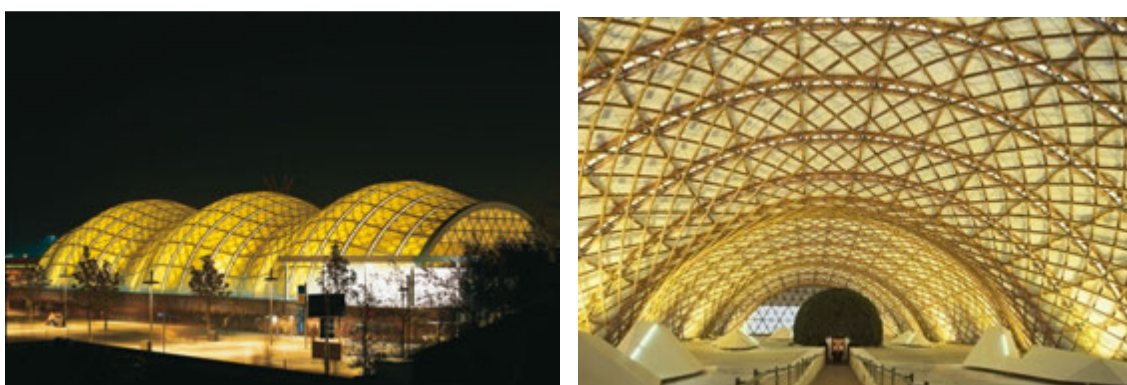
3.5. Obiekty o formach swobodnych, ściśle zintegrowanych z ekspozycją konstrukcji

Poszukiwania nowych form koncentrują się bardzo często na odwzorowaniu form miękkich, mających swój pierwowzór w naturze. Formy te, pomimo pozornie nieregularnych kształtów, są w olbrzymim stopniu zintegrowane z zastosowanym rozwiązaniem konstrukcyjnym. Budynki te są oryginalne, zaskakujące, a także są najbardziej skomplikowane technicznie i montażowo. Stanowią efekt postępu technologicznego w zakresie wykorzystania drewna a także projektowych programów obliczeniowych. Obiekty te, pomimo trudnego montażu, są dość efektywne, ponieważ konstrukcje składają się z po-

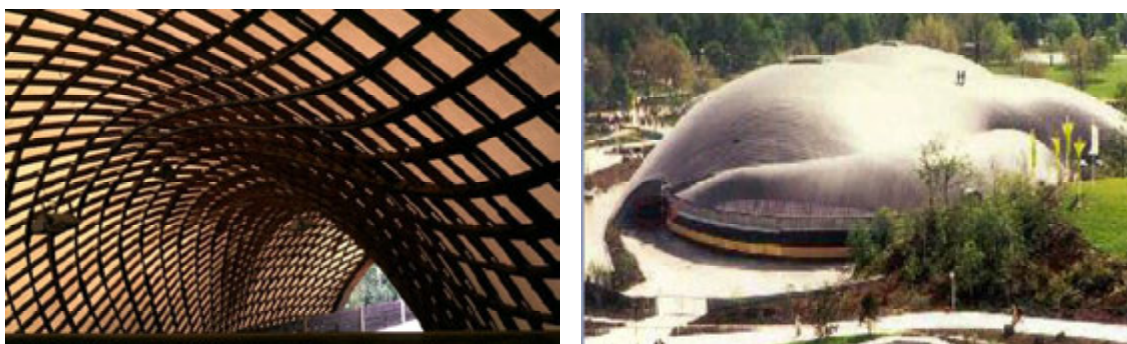
wtarzalnych elementów o małych gabarytach, które są montowane bezpośrednio. Inną grupą obiektów o formach swobodnych są obiekty o nowatorskiej nieregularnej konstrukcji, którą dostosowuje się do oryginalnych zamierzeń projektowych, wykorzystując „wizjonerskie” podejście konstrukcyjne, (rys. 3.18 – 3.26).



Rys. 3.18. Herbert Galeria i Muzeum Coventry. Architektura Pringle Richards Scharratt Architects, [214].



Rys. 3.19. Pawilon Japoński na Expo 2000 w Hanoverze. Architektura: Shigeru Ban, [327].



Rys. 3.20. Multihall w Mannheim. Architektura: Frei Otto, [192].



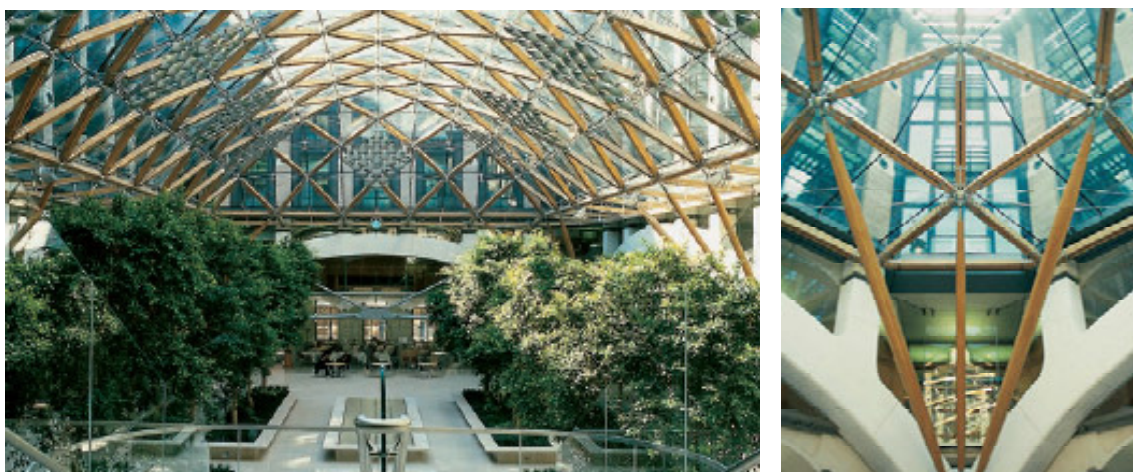
Rys. 3.21. Centrum nasion i sadzonek w Marche-en-Famenne, Belgia. Architektura: Samyn and Partners. Realizacja: 1994, [312].



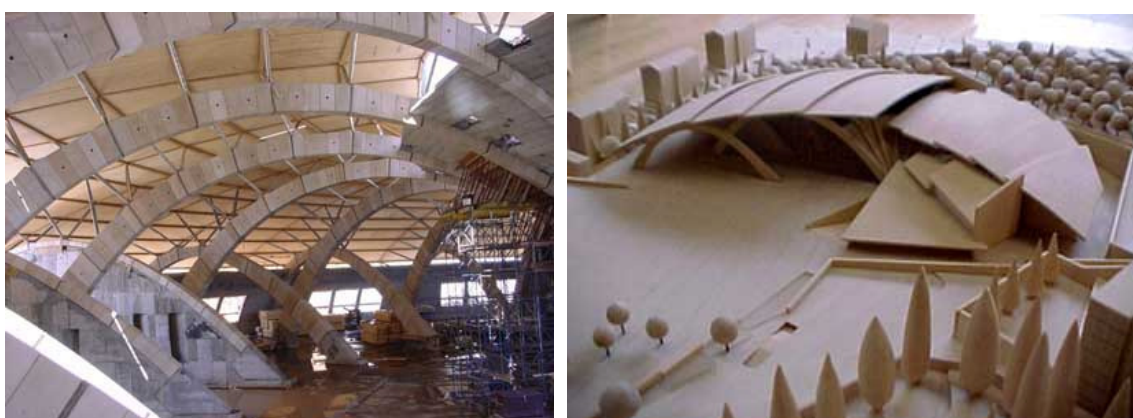
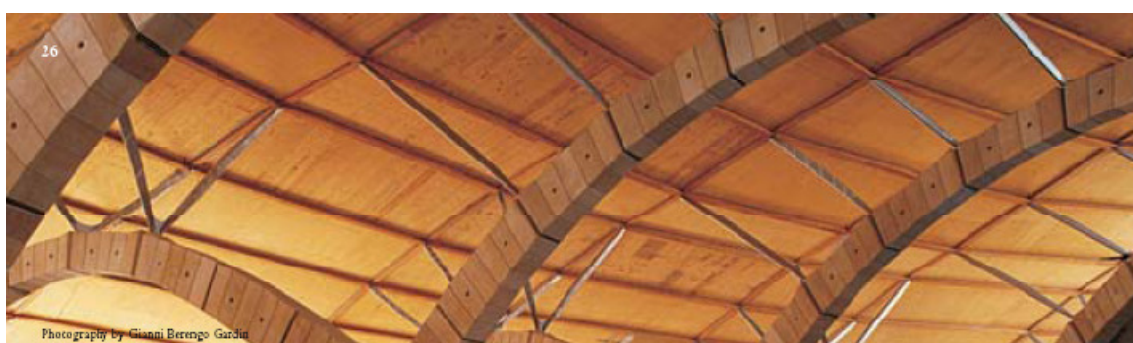
Rys. 3.22. Building Conservation Centre w Wielkiej Brytani, [352].



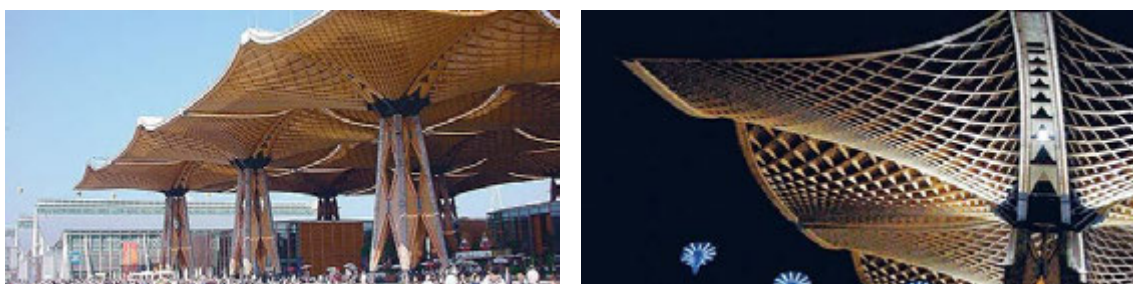
Rys. 3.23. Serpentine Galery w Londynie. Architektura: Alvaro Siza, Eduardo Souta de Moura, [215].



Rys. 3.24. Portcullis House w Westminster w Londynie. Architektura: Hopkins. Konstrukcja: Arup, [266].



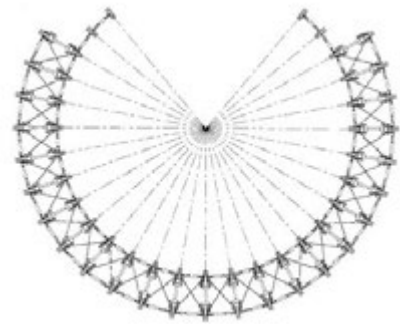
Rys. 3.25. Padre Pio Pilgrimage Church, Architektura: Renzo Piano, konstrukcja: Ove Arup Engineers, [293].



Rys. 3.26. Expo Dach w Hanowerze. Architektura: Herzog + Partner. Realizacja: 2000r., [314].

3.6. Obiekty „rzeźby” i symbole

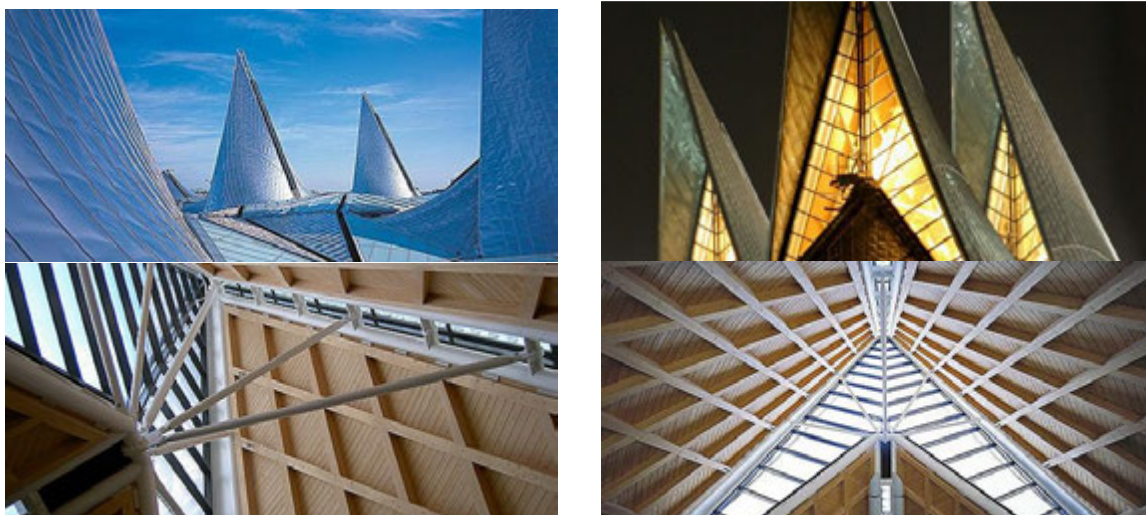
Obiekty rzeźby i symbole a także obiekty o formach zniekształconych celowo łączą się w pewną grupę form, które silnie oddziałują na miejsca i odbiorców, czasem wręcz szokują mocną, dominującą architekturą, oderwaną od idei porządku konstrukcyjnego. Formy są tu sugestywne, o dynamicznych i ekspresyjnych zależnościach konstrukcyjnych a układy nośne są niejasne. Występują nieregularne bryły, płaszczyzny elewacji czy konstrukcji, pozornie lub celowo zdeformowane. Przekrycia są wsparte w zaskakujących miejscach. Wiele z tych obiektów reprezentuje dokonania dekonstruktywistyczne, tworząc zaprzeczenie dla zastosowania logicznych układów konstrukcyjnych, lub reprezentuje projekty w nurcie nazywanym high - tech, (dominującym w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych), w którym technika decydowała o formie i jakości architektury. W widoczny sposób dąży się do zależności architektury od siły postrzegania a w związku z tym - do eksponowania efektownych form, nietypowych konstrukcji i efektów wizualnych, uzyskiwanych także poprzez deformację brył. Obiekty te są lokalizowane w miejscach uprzywilejowanych, w centrach miast, na wyniesieniu, osi, placu, są mocno zaakcentowane w otaczającej przestrzeni. Wyznacza się im funkcję kulturotwórczą, ustanawia dominantą dla danego obszaru. Widoczna jest nadrzędność budynków „rzeźb” w stosunku do otoczenia. „Bryła jest adorowana oraz analizowana. Będąc celem twórczego wysiłku, zaistniała jako obiekt sztuki. Po okresie traktowaniu architektury w sposób fasadowy, nadszedł czas na swobodę i rzeźbiarstwo”, [49]. Najbardziej znanym przykładem prestiżowego obiektu o rzeźbiarskim charakterze jest wspomniana opera w Sydney, Jørno Utzona, natomiast współcześnie, twórczość Franka O. Ghery, która zostanie przedstawiona poniżej na kilku przykładach dotyczących brył o celowo zniekształconych formach. „Nowe poszukiwania to świadome odwracanie, przesuwanie, przekręcanie i deformowanie brył, mające na celu rozproszenie jednolitego porządku i spowodowania dezorientacji nie zawsze logicznie założonych strukturalnych kształtach, tworzących częściej symbol i znak niż pragmatycznie wyszukaną racjonalną formę”, [143]. Bryły w konstrukcji szkieletowej z drewna klejonego, projektuje się jak rzeźbiarskie dzieła sztuki poprzez eksponowanie konstrukcji, która staje się widoczna i dominująca. Każdy z tych budynków jest inny i był indywidualnie projektowany. Niejednokrotnie są to budynki o unikatowych i niekonwencjonalnych rozwiązaniach, gdzie forma nie jest identyfikowana z zastosowanym układem konstrukcyjnym, (rys. 3.27 – 3.37).



Rys. 3.27. Centrum kultury w Nowej Kaledonii: Jean-Marie Tjibaou. Architektura: Renzo Piano, [301].



Rys. 3.28. University of Reims. Architektura: Dominique Calvi. Konstrukcja: Ingénierie Structures Bois. Realizacja 2005-2006, [314].



Rys. 3.29. Law Court Antwerpen. Architektura: Richard Rogers Partnership. Realizacja 2004, [314].



Rys. 3.30. Law Courts, Bordeaux Francja. Architektura: Richard Rogers. Realizacja 1998, [347].



Rys. 3.31. Auditorium w Rzymie, [327].

Rys. 3.32. Dormitory, Barcelona Spain, [327].

Rys. 3.33. Centrum naukowe Universum, Bremen, Niemcy, [327].



Rys. 3.34. Theaterum Anatomicum, Bregenz, Atelier für Baukunst, [320].



Rys. 3.35. Eksperymentalne centrum sztuki i mediów w Troy, NY. Architektura: Grimshaw Architects Davis Brody Bond Aedas, [302].



Rys. 3.36. Hoshakuji Station Takanezawa w Japonii. Architektura: Kengo Kuma & Associates. Konstrukcja: JR East and Oak Structural Engineering. Realizacja 2006, [302].



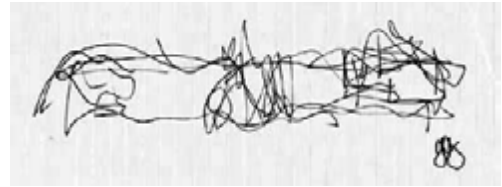
Rys. 3.37. Hotel Lobby w Dubaju, [302].

3.7. Obiekty o formach zniekształconych celowo

W tych obiektach elementem dominującym są zniekształcenia w odbiorze form, płaszczyzn i co się z tym wiąże, efekt zniekształcenia konstrukcji. Zniekształcenia dotyczą budynków o mniejszych rozpiętościach, gdyż z technicznego punktu widzenia, konstrukcje dużych rozpiętości wykorzystują niemal do maksimum możliwości materiałowe, wytrzymałościowe i statyczne, natomiast w konstrukcjach form zniekształconych występują miejscowe przeciążenia konstrukcji i zagrożenia lokalną utratą stateczności. „Zapewnienie dostatecznej sztywności i niezmienności nieregularnych układów wymaga znacznie dokładniejszego rozpoznania i symulacji występujących obciążeń. Wzrasta problem utraty stateczności ustroju z uwagi na miejscowe przeciążenia”, [143], (rys. 3.38 – 3.42).



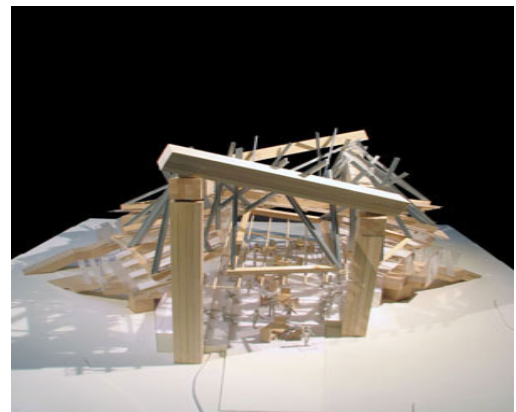
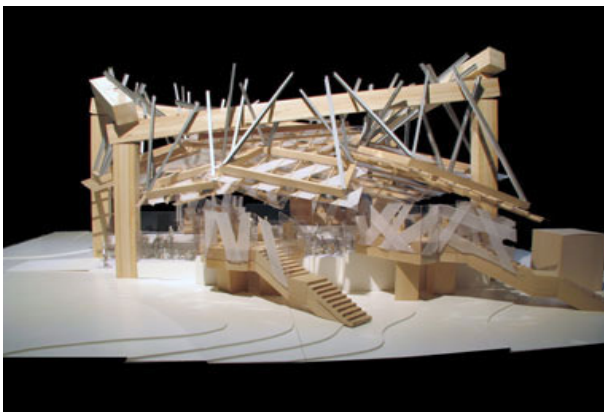
Rys. 3.38. Hall Winery St. Helena Napa Valley, California Gehry Partners, LLP, Realizacja 2003 r., [302].



Rys. 3.39. Galeria Sztuki Ontario w Kanadzie. Architektura F. Gehry. Realizacja 2008 r. Rys. Szkic koncepcyjny autora projektu, [302].



Rys. 3.40. Fondation Louis Vuitton Paris, France. Architektura F. Gehry. Rys. Szkic koncepcyjny autora projektu, [302].



Rys. 3.41. Serpentine Gallery. Architektura: Frank Gehry, Samuel Gehry. Konstrukcja: Arup, [302].



Rys. 3.42. Musikprobensa alinthannhausen. Architektura: R. Schineis. Konstrukcja: Ludwig+Weiler, [225].

3.8. Obiekty o prostych, uniwersalnych formach, bez eksponowania elementów konstrukcyjnych

Charakterystyczną cechą tych obiektów jest zredukowanie do minimum formy bez eksponowania układu elementów konstrukcyjnych. Są to mniejsze obiekty, sale sportowe, wystawowe lub produkcyjne, w których zakładaną rozpiętość można uzyskać za pomocą pełnych dźwigarów prostych. Kształty elementów są oszczędne, wykończenie wewnętrzne i zewnętrzne jest ujednolicone. Forma budynków jest prosta, najczęściej sprowadzona do prostych brył geometrycznych, (rys. 3.43 – 3.46).



Rys. 3.43. Sala sportowa w Borex w Szwajcarii, [327].



Rys. 3.44. Centrum dystrybucji w Bobingen w Niemczech, [327].



Rys. 3.45. Hala sportowa w Erdin. Architektura: Claus + Forster Architekten. Konstrukcja: Planungsgesellschaft Dittrich, [225].



Rys. 3.46. Centrum informacyjne Tiergartenschloss, Aesfeld. Architektura: Farwick + Grote, Ahaus. Konstrukcja: Prof. Dr.-Ing. L. Strathmann, [226].

3.9. Obiekty o prostych formach z wyeksponowaną, unikatową strukturą konstrukcyjną, bazującą na rozwiązaniach inspirowanych budową organiczną tworów natury

Charakterystyczną cechą tych obiektów jest zredukowanie do minimum formy z jednoczesnym eksponowaniem układu elementów konstrukcyjnych, zastosowanych w innowacyjny sposób. Kształtuje się je w układy siatek i rytmów: dynamicznych, diagonalnych lub nieregularnych, a także struktur przestrzennych inspirowanych budową orga-

niczną tworów natury. Układ konstrukcyjny jest rozbudowany ze względu na wielość, różnorodność i rozczłonkowanie poszczególnych jego elementów, natomiast zewnętrzna powłoka, w kontraście, jest jednorodna, ujednolicona, określona prostą formą. Pokazanie ciekawej konstrukcji, odsłanianie wnętrza, odbywa się najczęściej poprzez zastosowanie przeziernych (szkło, membrany) fragmentów dachów czy elewacji. Transparentna, prosta fasada odsłania wewnętrzną strukturę budynku, pokazuje budowę formy. Inną formą eksponowania budowy konstrukcyjnej jest pokazanie jej na zewnątrz fasady, która z kolei jest drugorzędowa i zminimalizowana. Wymaga to odpowiedniego zaprojektowania i ochrony przed czynnikami atmosferycznymi elementów z drewna klejonego. W każdym z tych przykładów zastosowano unikatową, trudną technicznie konstrukcję dachów lub fasad. W przedstawionych obiektach, szkieletowy system konstrukcji z drewna klejonego został oddzielony od przeziernych powłok elewacji i dachów, zacierając granice pomiędzy wnętrzem i zewnątrz, i wzmacniając oddziaływanie struktury nośnej, (rys. 3.47 – 3.55).



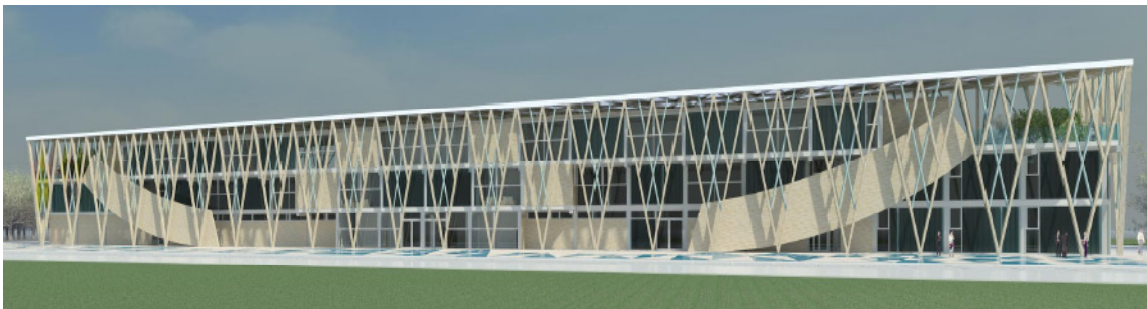
Rys. 3.47. Vertretung des Landes Nordrhein-Westfalen beim Bund in Berlin. Architektura: Petzinka Pink Architekten, Düsseldorf. Konstrukcja: Petzinka Pink Tichelmann, [225].



Rys. 3.48. Hala sportowa w Misato w Japoni. Architektura: Taira Nishizawa Architects. Konstrukcja: Arup Japan, [302].



Rys. 3.49. Trumpf Canteen Ditzingen w Niemczech. Architektura: Barkow Leibinger Architekten. Realizacja 2008, [341].



Rys. 3.50. Koncepcja Centrum Sportu Wawer w Warszawie. Architektura: A. Maciejko, M. Strzelecki, [357].



Rys. 3.51. Centrum wystawowe Bau und Energie w Monachium. Architektura: Kresing Architekten. Konstrukcja: Ganter und Wiemeler, [226].



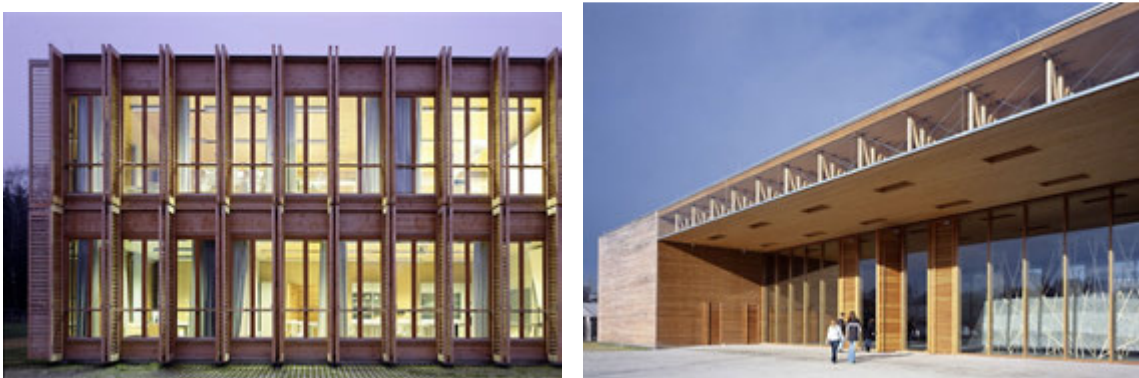
Rys. 3.52. Centrum rządowe w Herne – Soding, Niemcy. Architektura: Jourda And Perraudin, [206], [327].



Rys. 3.53. Kantyna Studencka Uniwersytetu w Karlsruhe. Architektura: J. Mayer H. Realizacja: 2005, [213].



Rys. 3.54. Budynek ratusza miejskiego w Yusuhara. Architektura: Kochi Kengo Kuma & associated, [268].



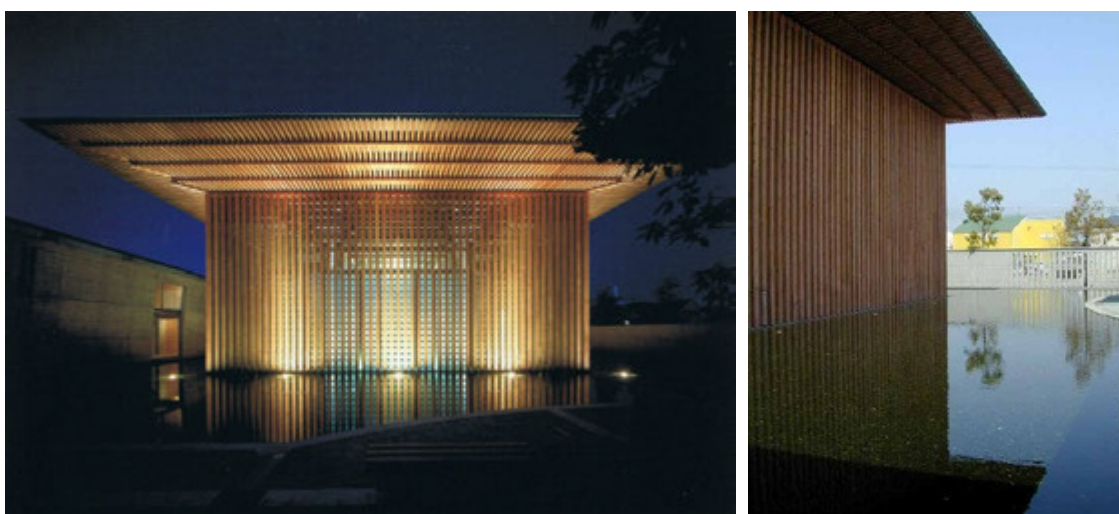
Rys. 3.55. Dual sports hall, Borex-Crassier, 2004-200. Architektura: Mahler Günster Fuchs. Konstrukcja: Merz kaufmann partner, [356].

3.10. Obiekty o prostych formach z wyeksponowaną prostą konstrukcją rytmiczną lub bazującą na podstawowych zależnościach geometrycznych

Cechą charakterystyczną dla tych obiektów jest zarówno jednorodna prosta forma i wyeksponowana logika „porządku konstrukcyjnego” jak też prosta konstrukcja z rozczłonkowaną strukturą prostych elementów konstrukcyjnych, gdzie występują w odbiorze płaszczyznowym, efekty gry światłocienia, które uzyskuje się za pomocą rytmów pionowych lub poziomych elementów, rusztów, prostych kratownic i jednopłaszczyznowych siatek. Zastosowanie np. prostej drewnianej siatki prętowej daje efekt transparentności i lekkości, (rys. 3.5.6 – 3.59).



Rys. 3.56. Muzeum Ando Hiroshige 2000 w Bato Nasu w Japonii. Architektura: Kengo Kuma, [299].



Rys. 3.57. Świątynia Komyo-ji w Saijo, prefektura Ehime w Japonii. Architektura: Tadao Ando, [47].



Rys. 3.58. Kaplica Versöhnung, w Berlinie. Architektura: Dipl.-Ing. Rudolf Reitermann, Prof. Peter Sassenroth. Konstrukcja: Pichler Ingenieure Dipl.-Ing. Andreas Schulz, [326].



Rys. 3.59. Suntory Museum of Art Tokyo w Japonii. Architektura: Kengo Kuma & Associates. Realizacja 2007, [302].

3.11. Obiekty jako elementy spójnego krajobrazu

Obiekty te stanowią spójny element krajobrazu (otoczenia) poprzez liczne odniesienia do budowy tworów naturalnych, pożądanymi formami powierzchni ziemi i jej budowy geomorficznej. Miękkie, horyzontalne linie architektury, łukowe przekrycia sięgające ziemi lub wtapiające się w naturalne wzniesienia, nie zakłócają krajobrazu, przeciwnie, podkreślają jego formę i plastykę. Poprzez charakterystyczne, miękkie ukształtowanie, budynki często naśladują strukturę wody, fal morskich, jaskiń, tworów ziemnych, kamieni, kryształów, roślin, owadów, budowę szkieletową organizmów żywych, piany, pajęczyny, etc. Łagodne łuki o niskim wyniesieniu są odbierane jak część krajobrazu. Łukowo zakrzywione są też linie krajobrazów, horyzontu, rzeczne zakola, wzgórza, niemal wszystkie płaszczyzny i formy przyrody. Konstrukcja z drewna klejonego, stosowana w tego typu budynkach, jest rozwiązaniem stosowanym intuicyjnie, często traktowana

jest jako element naturalny przyrody. Drewno, które w oczywisty sposób przywołuje las i formy drzew, dopasowuje się do krajobrazu poprzez oddziaływanie wizualne i psychofizyczne, fakturę powierzchni i koloryt. Budowa konstrukcyjna to najczęściej struktura łukowa, siatkowa, wisząca lub hybrydowa, o pojedynczych lub podwójnych zakrzywieniach, stosowana w połączeniu z innymi materiałami naturalnymi. Budowa tych obiektów podporządkowana jest idei budownictwa zrównoważonego, w jak największym stopniu przyjaznego naturze i człowiekowi, (rys. 3.60 – 3.62). Rozwinięcie tej tematyki zawarto w rozdziale 6.



Rys. 3.60. Visitor Centre / Pavilion Windsor, England 2006, Glen Howells Architects Buro Happold & Robert Haskins Waters Engineers, [355].



Rys. 3.61. Botanical Museum in Koshi Architektura: Hiroshi Naito, Nobuharu Kawamura, Tetsuya Kambayashi, Daijiron Takakusa, Taku Yoshikawa, Konstrukcja: Kunio Watanabe, Structural Design Group, [224].



Rys. 3.62. Art Pavilion The Imagination, Zeewolde, Holandia. Architektura: René van Zuuk Architekten, [302].

3.12. Obiekty podporządkowane ideologii ekologicznej

Drewno jest szczególnie chętnie wykorzystywane w obiektach, które mają związek z naturą - w muzeach przyrodniczych, w parkach narodowych, w obiektach, które mają służyć rekreacji lub gdzie trzeba stworzyć odpowiedni mikroklimat. Jednak istnieje także duża grupa budynków użyteczności publicznej podporządkowanych idei ekologicznej, które znajdują się w miastach, w przestrzeni wysoko zurbanizowanej i obsługują przestrzenie miejskie o dużym natężeniu ruchu, hale dworców, zadania peronów, hale wystawowe i koncertowe, galerie, palmiarnie, budynki uniwersytetów, czy siedziby instytucji rządowych, jak np. siedziba parlamentu w Edynburgu, (rys. 5.50) lub centrum rządowe w Herne, (rys. 5.48). Stosowanie drewna w obiektach użyteczności publicznej często wiąże się ze zmianą przepisów budowlanych, które niejednokrotnie utrudniają lub uniemożliwiają zastosowanie materiałów naturalnych. Obiekty te często powstają pod wpływem instytucji rządowych, w ramach programów, które promują budownictwo ekologiczne w bardzo szerokim znaczeniu tego pojęcia. Zastosowanie elementów z drewna klejonego jest prostym połączeniem idei proekologicznych z zapewnieniem dużych rozpiętości dla przestrzeni wystawowych. Przesłanie ekologiczne towarzyszyło wystawie *Człowiek – natura – technika* na Expo 2000 w Hanowerze. Na wystawie zaprezentowano wiele nowatorskich rozwiązań z wykorzystaniem materiałów i technik przyjaznych dla środowiska, (pawilony niemiecki, rumuński, węgierski, szwajcarski, japoński, pawilon nadziei i najbardziej znany epodach). Pawilon Szwajcarski (rys. 3.65) to przykład wyeks-

ponowania walorów drewna poprzez niekonwencjonalną konstrukcję ścian, stworzoną bez używania trwałych połączeń. Po zakończeniu wystawy elementy konstrukcyjne pozostały wartościowym materiałem konstrukcyjnym możliwym do ponownego wykorzystania.

Palmiarnia Sheffield Winter Gardens w Wielkiej Brytanii, (rys. 3.66), w której zgromadzono tropikalną florę z całego świata, jest przykładem budynku zbudowanego z ekologicznych materiałów budowlanych. Obiekt wykonany został w ramach: „Assessing environmental impact of innovative Glulam Timber construction.” Był to projekt, którego celem było przedstawienie potencjalnych, „zrównoważonych”, właściwości konstrukcji z drewna klejonego, szczególnie przy użyciu innowacyjnych technologii, jako alternatywa dla stali, żelbetu i aluminium, podkreślenie walorów ekologicznych drewna, pokazanie nowatorskiej formy oraz śmiałego podejścia do naturalnego materiału konstrukcyjnego w tego typu budynku. Zastosowano tu drewno modrzewiowe, które jest bardziej odporne na wilgoć niż drewno świerkowe lub sosnowe. Celowo nie zostało ono zaimpregnowane, aby uniknąć działania jakichkolwiek preparatów chemicznych, które mogłyby wpłynąć niekorzystnie na eksponowaną tam florę, a także z powodu założenia uzyskania srebrnoszarego koloru powierzchni konstrukcji w wyniku naturalnych procesów starzeniowych.

W ostatnich latach w Finlandii zbudowano kilka prestiżowych obiektów w całości podporządkowanych twórczemu wykorzystaniu materiałów naturalnych, m. in. Sibeliusstalo, halę koncertową i centrum kongresowe w Lahtii, (rys. 3.63). Jest to obiekt użyteczności publicznej wykonany w całości z drewna, wykorzystujący drewno w sposób nowatorski i bardzo szeroki. Konstrukcja z drewna klejonego, w formie „lasu”, w całości eksponowana, jest jedną z najciekawszych i najpiękniejszych konstrukcji z drewna klejonego. Ukształtowanie konstrukcji umożliwiło też uzyskanie odpowiedniej akustyki. Hala koncertowa Sibeliusstalo nazywana jest *budynkiem instrumentem*, [290].

Melta House, Fiński Instytut Leśnictwa [272], (rys. 3.64), to największy budynek biurowy z drewna klejonego w Europie i zarazem największe centrum badań leśnych na świecie. Drewno zastosowano tu na konstrukcję nośną w postaci trzykondygnacyjnego szkieletu z drewna klejonego a także, jako materiał wykończeniowy. Wejście umieszczono pomiędzy ścianami ze stuletniego dębu, a same ściany są chronione przed wpływem warunków atmosferycznych za pomocy smoły sosnowej, która jest tradycyjnym, fińskim środkiem do konserwacji drewna. Budowla została wypromowana przez szereg fińskich

programów rządowych, tak jak wspomniana wcześniej Hala Koncertowa Sibeliusa w Lahti.

Innym przykładem budownictwa podporządkowanego idei ekologicznej i środowiskowej jest Centrum kultury w Nowej Kaledonii, zrealizowane w latach 1991 –98, (rys.3.67). Założenie składa się z 10 pawilonów o rzeźbiarskiej formie, która eksponuje konstrukcję z drewna klejonego. Założeniem projektowym było wpisanie obiektu w środowisko naturalne i wykorzystanie miejscowych tradycji budowlanych związanych z budownictwem drewnianym. Konstrukcję żebrową budynków tworzą wysokie, cienkie, pionowe elementy drewniane, zbiegające się u szczytu. Tworzą one szkielet nośny dla zewnętrznej ściany osłonowej. Elementy pionowe zostały wzmocnione prętami ze stali nierdzewnej. Zastosowano tu drewno klejone i naturalne, beton oraz koral, stalowe ramy, szklane panele, korę drzew i aluminium.



Rys. 3.63. Sala koncertowa Sibeliusa w Lahti, Finlandia. Architektura: Hannu Tikka and Kimmo Lintula, Realizacja 2000, [337], [336].



Rys. 3.64. Melta House. Fiński Instytut leśnictwa Joensuu w Finlandii, [217].



Rys. 3.65. Pawilon Szwajcarski na Expo 2000 w Hannoverze. Architektura: Peter Zumthor, Haldenstein, Konstrukcja Conzett - Bronzini – Gartmann, [313].



Rys. 3.66. Palmiarnia Sheffield Winter Gardens. Wielka Brytania Architektura: Pringle, Richards, Sharratt Architects. konstrukcja: Buro Happold Ltd. Realizacja 2002, [314].



Rys. 3.67. Centrum kultury w Nowej Kaledonii: Jean-Marie Tjibaou. Architektura: Renzo Piano, [301].



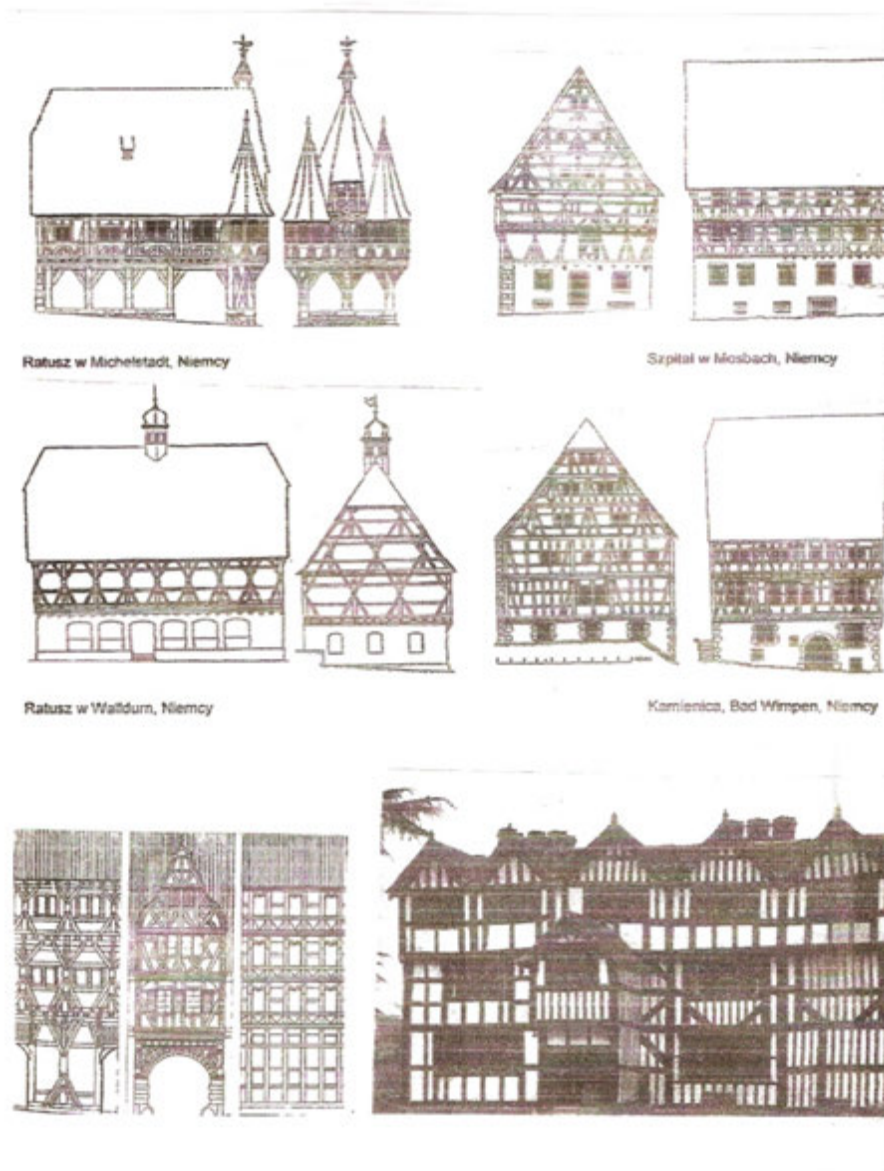
Rys. 3.68. Centrum rządowe w Herne – Sodingen, Niemcy. Architektura: Jourda And Perraudin, [206], [327].

4. Historia rozwoju budownictwa o dużych rozpiętościach z udziałem drewna

4.1. Pierwsze przekroje złożone i elementy łukowe z drewna, system L'orme'a, Zollingera, Emy'ego, Otto Hetzera

Formy konstrukcji drewnianych, stosowane w budownictwie tradycyjnym, wynikały z intuicyjnego traktowania właściwości konstrukcyjnych podstawowego budulca elementów nośnych pni i gałęzi drzew. Stosowanie określonych przekrojów elementów konstrukcyjnych wynikało z doświadczeń cieśli, przekazywanych z pokolenia na pokolenie, a rozwiązania stosowane np. w elewacjach wynikały nie tylko z przesłanek konstrukcyjnych, ale także z mody, chęci ukazania kunsztu rzemieślnika i zamożności właścicieli. Rozwiązania te powstawały bez poparcia w obliczeniach statycznych. Najbardziej powszechne belki drewniane, ciosane z pni drzew, stosowane w technologii tradycyjnej do początków XX wieku, przez setki lat wystarczały potrzebom budownictwa, także przy budowaniu mostów drewnianych i nieco większych obiektów. Występowały tu także belki gięte. Liczne przykłady ciekawych zastosowań drewna litego zostały opisane przez Jacoba Leupolda [92]. Przy większych rozpiętościach zmniejszano rozstawy belek lub powiększano ich przekroje, a także zwiększano liczbę elementów konstrukcyjnych. Zabiegi te, a także próby optymalizacji elementów konstrukcyjnych, widać na przykładach bogatych konstrukcji kamienic, imponujących osiągnięciami ciesielskimi. Jednak ze względu na swoje wady, takie jak: ograniczenia gabarytowe, palność i podatność na naturalne zniszczenia, a także w wyniku rozwoju budownictwa stalowego, konstrukcje drewniane na początku XX straciły swoją uprzywilejowaną pozycję na rzecz stali i żelbetu, szczególnie w budownictwie dużych rozpiętości. Niemniej jednak, równolegle powstawały imponujące konstrukcje kratownic drewnianych w obiektach przemysłowych, co ilustrują liczne przykłady. Wielkości elementów wykonanych z drewna były ograniczone do rozmiarów surowca, przekrycia drewniane osiągały zazwyczaj kilkanaście metrów, a wraz ze wzrostem rozpiętości wzrastał stopień skomplikowania i wysokość konstrukcji. „W różnych systemach konstrukcyjnych ograniczenia te można było ominąć, ale zawsze do pewnej wielkości, poza którą budowanie z drewna stawało się niemożliwe”, [33]. Jed-

nak zalety konstrukcyjne drewna, a przede wszystkim, intuicyjna wiedza o zdolności drewna do przenoszenia zarówno ściskania jak i rozciągania, niskie koszty produkcji, powszechna dostępność surowca, powodowały zachowanie drewna w budownictwie dużych rozpiętości.



Rys. 4. 1 Przykłady zastosowań drewna w konstrukcjach tradycyjnych, [112].

Poszukiwania udoskonalania konstrukcji drewnianych podążały w kierunku zwiększenia efektywności tradycyjnych systemów drewnianych. Ograniczenia technologii tradycyjnej, które wynikają z budowy i możliwości sposobów zastosowania prostej belki drewnianej w różnorodnych układach, próbowano pokonać poprzez zwiększoną

precyzję wykonania, a także dodanie czynnika, który poprawi zdolność nośną przekrojów. Do powstania kompozytów o nowych możliwościach przyczyniło się rewolucyjne, w tym przypadku, dokonanie - czyli wynalezienie i zastosowanie kleju przy łączeniu elementów drewnianych. Wcześniej do łączenia poszczególnych elementów wykorzystywano połączenia ciesielskie lub żelazne i stalowe.

Bezpośrednią przyczyną poszukiwań nowych możliwości w pokonywaniu dużych rozpiętości przy zastosowaniu drewna była także mała dostępność stali w pierwszej połowie XX wieku, ze względu na wykorzystanie jej w przemyśle zbrojeniowym. Oczywistym powodem była tu także, przyjmowana naturalnie, intuicyjna wiedza o walorach konstrukcyjnych drewna, zakodowana przez tysiące lat stosowania. Jak silny był wpływ tradycji na projektowanie pierwszych konstrukcji dużych rozpiętości widać na przykładzie ich początków: pierwsze konstrukcje żelazne mają cechy tradycyjnego budownictwa drewnianego.

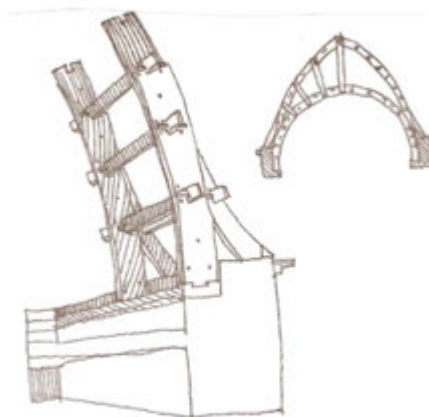
Pierwszy krok w kierunku zwiększenia nośności konstrukcji przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia materiału to próby połączenia dwóch fragmentów drewna w przekroje złożone. Belki proste, złożone z fragmentów drewna, a także pierwsze próby układów łukowych okazały się bardziej efektywne głównie ze względu na to, że mogły przenosić siły osiowe. Już w 1809 Carl Friedrich Wiebeking, w swoim dziele pt. „Beitrag zur Brueckenbaukunde”, [173] proponował klejenie wysoko zakrzywionego drewna dla celów budowlanych. Projekt dotyczył belek policzkowych schodów. Od tego momentu to połączenia między elementami belek a także ich nośność stanowiły słabe punkty i główny problem techniczny. Problematyczne były także uszkodzenia, takie jak pęknięcia drewna, powodowane łatwiejszym wnikaniem pomiędzy elementy wilgoci, która oprócz szkodników biotechnicznych najbardziej przyczynia się do destrukcji drewna.

Pierwsze eksperymenty z łukami drewnianymi miały miejsce w XVI wieku. Znany włoski architekt Andrea Palladio projektował drewniane konstrukcje dachowe i mosty, wzorując się na pracach rzymskich budowniczych, [104]. Drewniany most nad rzeką Cismone opisał Palladio w swej książce: „Cztery księgi o architekturze”, [127] z 1570 roku. Prostem dotąd przeszłom mostu nadał formę kratownicy w kształcie łuku, co czyniło most bardziej przydatnym do przenoszenia obciążeń.



Rys. 4. 2 Andrea Pallado, schemat konstrukcji mostu nad rzeką Cismone z 1570 roku. Łukowe przęsła wzmocniane układem stężeń, [113].

W 1561 roku także francuski architekt Philbert de l'Orme (1515-1577) w swej pracy „Nouvelles Inventions pour bien bastir et a petits fraiz” przedstawił wynalazek złożonej belki łukowej. Były to konstrukcje wykonane z kilku ułożonych pionowo desek o długości 1,3 m. Końcówki desek w miejscach połączeń były przycinane do kształtu łuku i spajane drewnianymi kołkami. Podłużne brzegi desek były przycięte do kształtu łuku. Pojedyncze łuki były umieszczane w rozstawie ok. 1 m, a ich wybočeniom zapobiegały poprzeczne stężenia. l'Orme dowodził, że oprócz korzyści, wynikających z przekrycia bez podpór pośrednich, jego system wymagał dużo mniejszego zużycia materiału niż tradycyjny. Wiązary l'Orm'a stosowano przy rozpiętościach ok. 15 m., ale zaprojektował on także konstrukcję dachową bazyliki o rozpiętości 48,75 m., co było już niezwykłym wydarzeniem. l'Orme zaprojektował też kopułę drewnianą o średnicy 60 m przy odbudowie klasztoru na Montmartre w Paryżu. Dwieście lat później konstrukcja tej kopuły posłużyła jako model przy projektowaniu zadaszania magazynu ziarna w Paryżu. De l'Orme wierzył w możliwości budowy mostów o rozpiętościach 200 – 400 m. Przełom w wykorzystaniu drewnianych konstrukcji łukowych nastąpił wraz z ogłoszeniem konkursu na projekt „Halle au ble” (wspomniany już magazyn ziarna) w Paryżu w 1783 roku. Do konkursu stanęli Legrand i Molinos ze swoją drewnianą kopułą opartą na systemie l'Orme, Le Camus de Mezieres z kopułą kamienną i Belarger z kopułą żeliwną. Do realizacji wybrano kopułę drewnianą. Konstrukcja kopuły o średnicy 41 m składała się z dwugłęziowych promienistych żeber, ale jej szczególną cechą były 24 pasy okien. Poziome pierścienie przejmowały siły poziome. Kopuła spłonęła w 1802 roku i została zastąpiona kopułą żeliwną.

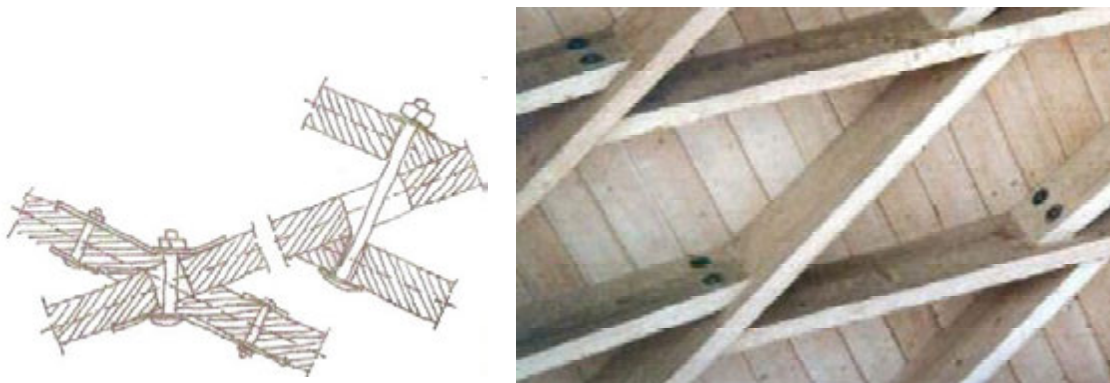


Rys. 4. 3 System L'Orm'a w projekcie przekrycia łukowego z 1561 roku, [113].

Wybudowanie drewnianej kopuły magazynu ziarna w Paryżu przyczyniło się do rozpowszechnienia tego rodzaju konstrukcji w Europie. W latach 1787 – 89 Niemiec Carl Gotthard Langhans zaprojektował drewnianą kopułę o średnicy 16 m dla Królewskiej Szkoły Weterynarii w Berlinie. Dawid Gilly z Prus opisał tę i inne konstrukcje Langhans'a w pracy „Ueber Erfindung Construction und Vortheile der Bochlendaecher” z 1797 r., [50]. Zainspirowany tymi konstrukcjami Heinrich Genz z Berlina, inspektor Budynków Królewskich w 1802 r zaprojektował teatr Bad Lauchstaedt używając dwuczęściowych belek złożonych o rozpiętości 16,5 m. Półkoliste dwuprzegubowe żebra były rozstawione co 3 m. Budynek stoi do dziś i pokazuje słabe strony systemu L'orme'a. Mała nośność żeber na zginanie i poziomy rozpór przy podporach doprowadziły do poważnych deformacji i utraty stateczności żeber już w pierwszych dziesięcioleciach eksploatacji obiektu. Genz zaniedbał także zastosowanie poprzecznych stężeń, co poważnie zmniejszyło stateczność konstrukcji. Konieczna była zatem dobudowa podpór a także, w 1906 roku, renowacja podpór oraz wzmocnienie żeber dodatkowym (trzecim) dźwigarem. Niekorzystne w tej formie konstrukcji są czasochłonna produkcja tarcicy o skomplikowanej obróbce oraz niższa nośność na zginanie. Każde odchylenie krzywizny łuku od tzw. linii ciśnień doprowadzało do narastania odkształceń. W tym czasie (1822 – 1827) Georg Moeller zaprojektował największą w Niemczech kopułę o rozpiętości 33,5 m w Ludwigskirche w Darmstadt.

Okolo 1904 r złożony element de l'Orme'a został przekształcony w trójwymiarową ramę przez Fritza Zollinger'a (1880-1945), Miejskiego Inspektora Budowlanego w Mer-

seburgu koło Lipska. Zaproponował on nowe rozwiązanie, tworząc rombowa, w kształcie zakrzywioną, podobną do powłoki konstrukcję. Górne brzegi pojedynczych desek odpowiadały kształtowi krzywizny dachu. Przy każdym połączeniu ukośnym deski były połączone sworzniami. Zastosowano tu połączenie – guasi – sztywne, co skutkuje poważnymi deformacjami.



Rys. 4.4 System Zollingera – schemat konstruowania siatki z 1904 roku, [113].

Rys. 4.5 System Zollingera – schemat siatki konstruowanej współcześnie, [335]

Powyżej przytoczono przykłady złożonych belek drewnianych z zastosowaniem pionowych różnorodnie, wielokrotnie łączonych desek. Pierwsze zastosowanie poziomych, lecz jeszcze nie klejonych przekrojów złożonych to most nad rzeką River Limmat niedaleko Wettingen w Szwajcarii, wzniesiony przez Hansa Ulricha Grubenmanna w latach 1764-1766, o rozpiętości 61m. Silne usztywnienie stężeniami było umiejscowione na poziomie pomostu. Szczególną cechą tego mostu były belki stężące w płaszczyźnie traktu komunikacyjnego, nadające mostowi dużą sztywność. Most został spalony na rozkaz Francuskiego generała Massena w 1799 r.



Rys. 4.6 Theodor Burr, Most nad rzeką Delaware w USA, 1806 r., [113].

W Ameryce Północnej Theodore Burr w latach 1804-1806 wybudował most nad rzeką Delaware o rozpiętości 60 m. Most składał się z dwóch złożonych łuków z podwieszonym, usztywnionym pomostem. Ta forma konstrukcji została później nazwana systemem

Emy'ego. Nazwa pochodzi z publikacji opisującej tę konstrukcję, autorstwa francuskiego oficera inżynierii Emy pt. „Description d'un nouveau system d'arcs” wydanej w 1828 roku, [40]. Oddzielne warstwy tarcicy były połączone za pomocą śrub i obejm, które miały spowodować wzrost tarcia pomiędzy lamelami, co z kolei miało prowadzić do przeniesienia sił rozwarstwiających. Niska sztywność elementów prowadziła do poważnych ugięć. Aby poprawić sztywność dla dużych rozpiętości, Emy zaproponował dwu - lub trzy - segmentowe łuki, ukośnie ścięte przy podporach, zaopatrzone w dodatkowe stężenia. Emy zaproponował też używanie tych form konstrukcji dla dachów wielkich hal o rozpiętościach ok 100 m, [41]. Paul Joseph Ardant opublikował w 1847 szczegółowe studium naukowe konstrukcji łukowych. W testach obciążeniowych na kolistych łukach de l'Orme'a i Emy'ego porównał on reakcje na podporach i ugięcia konstrukcji w różnych wariantach obciążeń aż do zniszczenia. Ardant zaproponował usztywnienie łuku Emy poprzez kratownicę prostą o pełnych przekrojach prętów drewnianych, poprawiając przez to sztywność konstrukcji. Kombinacja systemu de L'orma i Emy'ego z półkolistymi żebrami o rozpiętości ponad 56 m została zaprojektowana w hali dla IV Festiwalu Niemieckich Chórów, który miał miejsce w Wiedniu w 1890 roku. Jednakże dalszy rozwój, które ostatecznie doprowadził do powstania konstrukcji z drewna klejonego, nie podążał bezpośrednio drogą tego rozwiązania.

W 1842 Georg Ludwig Friedrich Laves zaprojektował belkę o krzywiznie odpowiadającej obwiedni momentów zginających. Rozciął belkę po długości i następnie połączył przy użyciu przewiązek drewnianych, umieszczonych pomiędzy nimi. Zwiększony dystans pomiędzy górnym i dolnym pasem wskutek zwiększenia rozmieszczenia sił wewnętrznych poprawił zdolność nośną przekroju złożonego.

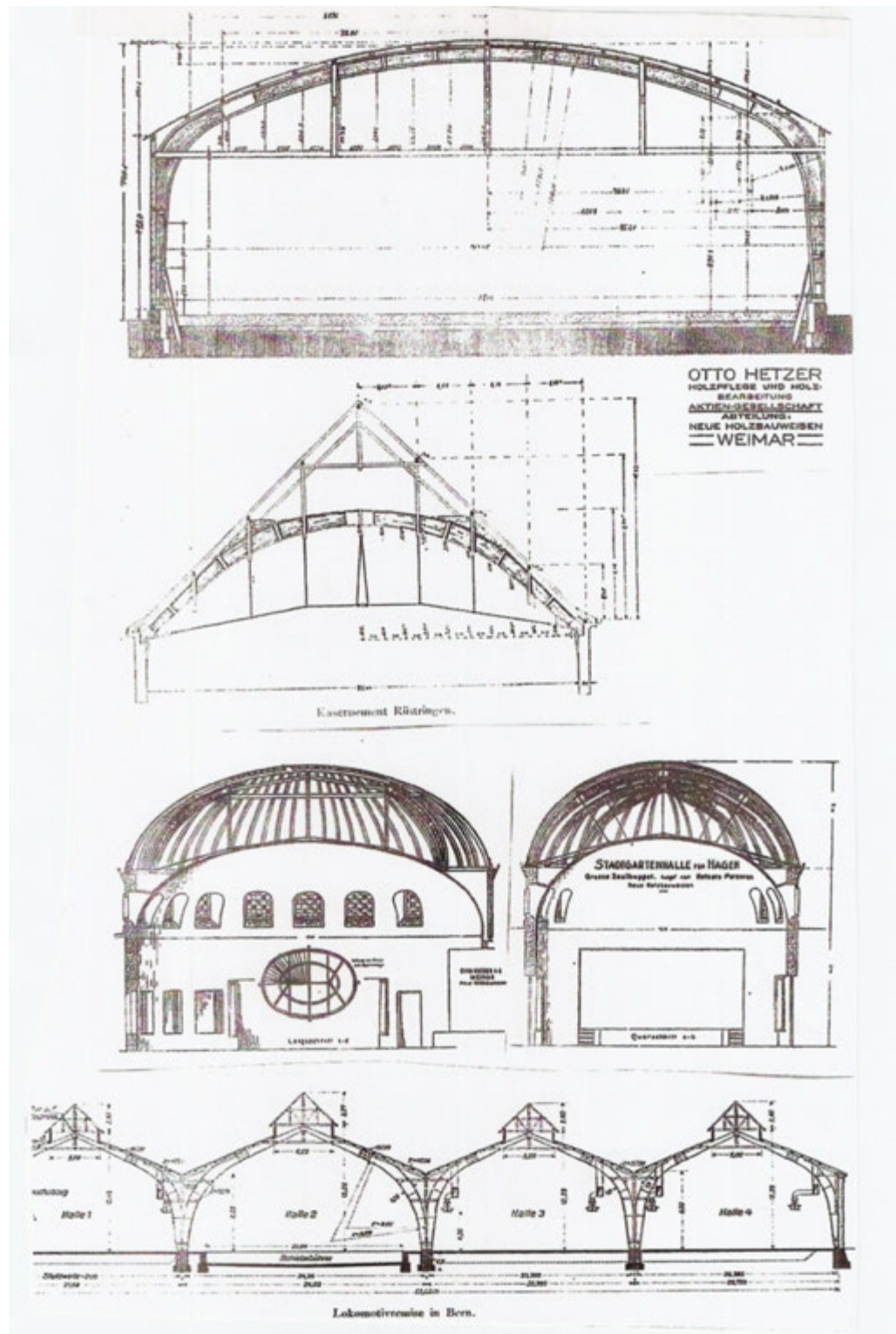
Dalszy rozwój projektu de l'Orme'a to wynaleziony w 1902 złożony element Stephan'a. Przykład tej formy konstrukcji (1906 r.) można wciąż zobaczyć na dworcu kopenhaskim. Pomimo że system Stephan'a zastosowano w dużej liczbie konstrukcji, nie mógł on zastąpić przekrojów z drewna klejonego. Głównym powodem były duża liczba węzłów i, tym samym, kosztowny proces wytworzenia.

Za pierwszą konstrukcją zbudowaną przy użyciu drewna klejonego powszechnie uznaje się salę zebrań w King Edward College w Southampton (1860 r.). Pozostała ona jednak pojedynczą budowlą wzniesioną tą technologią, nie powodując, w tym czasie kontynuacji.

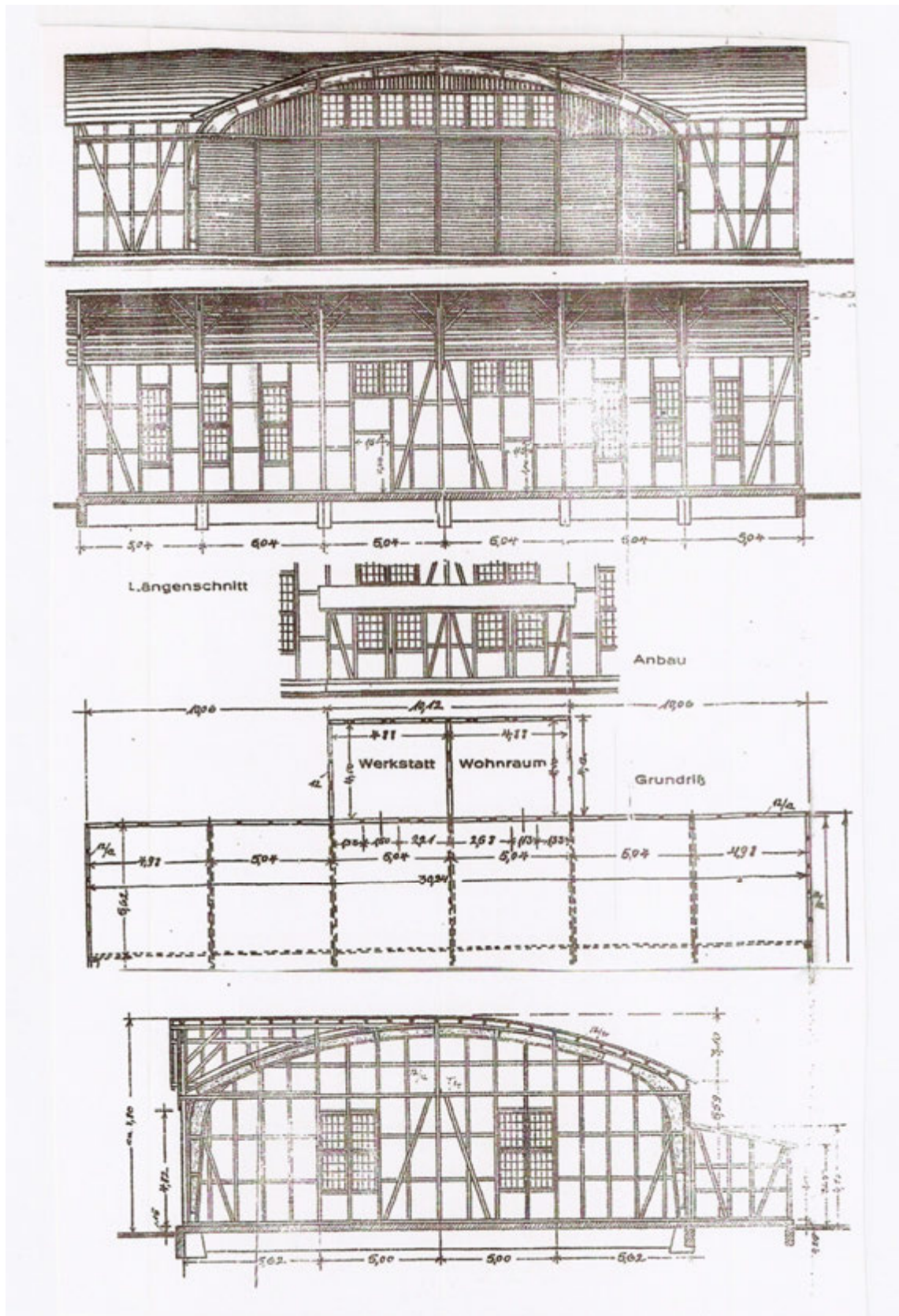
Najsłabszą stroną prezentowanych rozwiązań były łączniki. Punktem wyjścia dla nowych poszukiwań stało się zatem wynalezienie odpowiednich technik łączących. Za najważniejszą postać w rozwoju konstrukcji z drewna klejonego uważa się Otto Hetzer'a z Weimaru. Chociaż nie wynalazł on drewna klejonego, to z pewnością udoskonalił tę technikę, by uczynić ją odpowiednią dla praktycznych zastosowań. W okresie 1891-1910 Otto Hetzerowi przyznano patenty na pięć nowych projektów. W tym czasie wzniesiono na brukselskiej wystawie światowej 1910 roku halę wystawową o rozpiętości 43 m. (rekord nie pobity do 1930 r) . Hala była dziełem monachijskiego inżyniera Kuegler'a i firmy Steinbeis & Cons. z Rosenheim. Patenty, które Otto Hetzer otrzymał w latach 1891-1910, jasno odzwierciedlają problemy i rozwój w budownictwie z drewna klejonego. Otto Heter rozwiązał problem dotyczący optymalizacji przekroju w zależności od obciążenia oraz wynalazł metodę połączenia lameli za pomocą kleju. Połączenie kilku oddzielnych fragmentów drewna w przekrój złożony stanowiło efektywny środek zapobiegający skręcaniu i pękaniu cienkich przekrojów drewnianych. Do dzisiaj utrzymuje się opinia, że użycie drewna klejonego prowadzi do jednorodności materiału i stąd do mniejszego użycia surowca, co z kolei pozwala na osiągnięcie większej nośności i sztywności w konstrukcji. Przykładowe propozycje rozwiązań proponowanych przez Otto Hetzera przedstawiono na schematach, rys. 4.7 – 4.10.



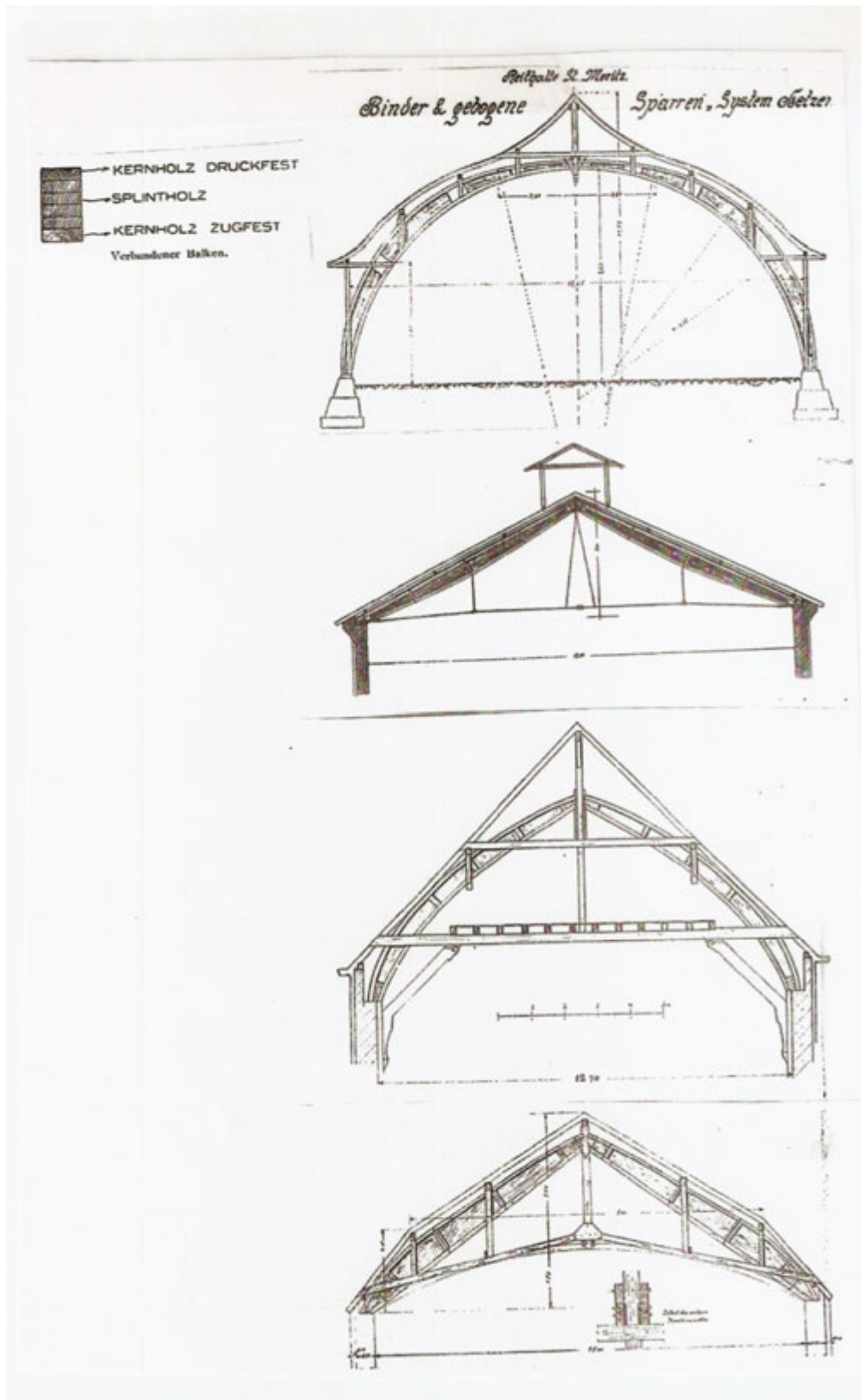
Rys. 4. 7 Hala dworca w Sztokholmie z 1925 r, [259].



Rys. 4. 8 Konstrukcje Otto Hetzera opublikowane w broszurze: Denkschrift ueber Hetzer's neue Holzba-
uweisen z 1913 roku, [219].



Rys. 4. 9 Konstrukcje Otto Hetzera opublikowane w broszurze: Denkschrift ueber Hetzer's neue Holzba-
uweisen z 1913 roku, [219].



Rys. 4.10 Konstrukcje opublikowane w broszurze: Denkschrift ueber Hetzer's neue Holzbauweisen z 1913 roku. Przekrój konstrukcji z drewna klejonego, [219].

4.2. Rozwój technologii drewna klejonego w Europie i w Stanach Zjednoczonych

Firma Otto Hetzera rozpowszechniła licencje na swoje patenty opisane wcześniej w innych europejskich krajach, takich jak Szwajcaria, Holandia, Szwecja i Włochy. Do Szwajcarii patenty Hetzera sprowadzili w 1909 r., po serii własnych prób, inżynierowie Turner i Chopard z Zurychu i od tego czasu zaczęli popularyzację drewna klejonego. Inżynierowie Turner i Chopard byli zaangażowani w wiele projektów. Projektowali m. in. arenę jeździecką w St Moritz, kopyły uniwersytetu w Zurychu i wiele hal wystawowych. Bernhard Turner przeprowadził się do Izraela w 1935, gdzie w Hajfie, z synem, Leopoldem, założył B.&L. Turner, Consulting Engineers. W Kopenhadze firma H.J. Kornerup-Koch budowała konstrukcje z drewna klejonego od 1914. W 1929 przy użyciu tej technologii skonstruowano między innymi most drogowy w Kopenhadze. Konstrukcje te były też rozpowszechniane w Norwegii i w Szwecji przez inżyniera Guttorm'a N. Brekke (1885-1980 r.). W 1918 roku w Mysen w Norwegii wybudował on fabrykę i założył zakład konstrukcyjny Traekonstruktioner A/S. Elementy z drewna klejonego były tu produkowane do 1924. Brekke w 1919 r. założył także Tragkonstruktion AG w Toreboda, w Szwecji. Dzięki swej centralnej lokalizacji fabryka dostarczała elementy do Norwegii, jak również działała na terenie Szwecji. W latach 20 – tych i 30 – tych XX wieku zaprojektowano i wyprodukowano tu wiele konstrukcji, m. in. cztery zadaszania peronów połączonych przejściem z dachem podpartym na łukach z drewna klejonego (1922 r.) i dworzec główny w Sztokholmie (1925 r.), gdzie zastosowano podobną konstrukcję. W Holandii importer drewna G.J. Horsting założył Nederandsche Maatschappij voor Houtconstructies (Nemaho). W latach trzydziestych Nemaho eksportował wielkie hale do Surinamy, Antyli i Kolumbii, hangar lotniczy do Curacao i fabrykę nawozów do Durbanu w Płd. Afryce.

Europejskie osiągnięcia w dziedzinie konstrukcji z drewna klejonego były znane i śledzone w Ameryce Północnej od 1920 r. US Department of Agriculture Forest Products Laboratory w Madison wysłał obserwatora, M. Knight'a, do Szwajcarii w celu zdobycia informacji o tej technologii konstrukcyjnej. Chociaż raport M. Knight'a dochodził do pozytywnych konkluzji, podjęto decyzję o porzuceniu jakichkolwiek dalszych eksperymentów z drewnem klejonym. Ten stan trwał do 1934, kiedy to zostały podjęte dalsze badania przez Maxa Hanish'a seniora. Max Hanish studiował architekturę i konstrukcje w Królewskiej Szkole Budownictwa w Deutsch-Krone i Sterlitz w Meklemburgii

w Niemczech. Z konstrukcjami Otto Hetzera zetknął się w 1906 w Weimarze. Wyemigrował do USA w 1923. Pierwsze zastosowanie drewna klejonego miało tu miejsce w 1934 w szkolnej sali zebrań w Peshtigo, Wisconsin. Produkcja była przeprowadzona we współpracy z Thompson Boat Manufacturing Company w Peshtigo. Manufaktura konstrukcji z drewna klejonego umożliwiała przedsiębiorstwu kompensację sezonowych wahań w budowaniu statków, która była podstawową jego działalnością. Ta współpraca doprowadziła do powstania pierwszego przedsiębiorstwa produkującego drewno klejone w Ameryce Północnej -Unit Structures Inc., zarządzanego przez Petera Thompsona i Maxa Hanish'a. Odpowiedzialna za sprawdzenie konstrukcji była Wisconsin Industrial Commission, ale, jako że komisja ta miała niewielkie doświadczenie w klejonych komponentach budowlanych, domagała się dodatkowych mechanicznych złączy, takich jak nity i metalowe taśmy. To spowodowało, że Unit Structures przeprowadziły bardziej precyzyjne studia, wykonane przez USDAFLP. Belki wyprodukowane przez Unit Structures były użyte w testowej konstrukcji i poddane długotrwałym badaniom nośności. W następnych latach zaprojektowano wiele konstrukcji dachowych kościołów, sal szkolnych, fabryk i innych obiektów. Po przystąpieniu Ameryki Północnej do wojny w 1941 z drewna klejonego budowano obiekty militarne, takie jak hangar lotniczy w Fargo, North Dakota, dla St. Paul's Northwest Airlines o rozpiętości 46,7 m. Była to, w tym czasie, największa hala typu szedowego. W 1942 zostały wybudowane dwa dalsze hangary w St. Paul, każdy o rozpiętości 52.6 m. Od 1970 przedsiębiorstwo funkcjonowało pod nazwą Sentinel Structures i do dziś wciąż produkuje konstrukcje dachowe i halowe jak również mosty i krzywoliniowe belki dla przemysłu stoczniowego. Wprowadzenie ram z drewna klejonego w Stanach Zjednoczonych w latach 50 - tych XX wieku zrewolucjonizowało podejście do drewnianego elementu nośnego, który można już było wyprodukować w fabryce, w różnorodnych kształtach, długości i wielkości i przetransportować na budowę jako gotowy do montażu, [142].

W Polsce Przedsiębiorstwo Wielkowymiarowych Konstrukcji Drewnianych w Cierpicach k. Torunia powstało w 1975 roku i funkcjonuje do dziś. Od 1996 roku jako Przedsiębiorstwo Produkcyjno - Handlowe Andrewex, [190]. Zakład w Cierpicach był wytwórcą wielu obiektów sportowych z drewna klejonego. Najważniejsze z nich, obiekty o największych rozpiętościach, wybudowano w Polsce w latach 70 - tych i 80 - tych XX w. Były to m. in. hala lekkoatletyczna w Spale o wymiarach 115x 50 m z 1983 roku, hala sportowa w Bełchatowie o tych samych wymiarach, hala klubu sportowego Znicz

w Pruszkowie o wym. 54x74 m z 1975 r., klubu Sportowego Wybrzeże o wymiarach 50x60 m z 1980 roku, MOSIR w Zgierzu o rozpiętości 60 i długości 72 m. z 1978 r., ujeżdżalnia koni „Hipodrom Sopot S.A o wymiarach 50x90 m z 1978 roku i inne mniejsze hale sportowe o rozpiętościach ok. 30 m. Inne ciekawe, oryginalne polskie obiekty to kopuła kościoła Matki Boskiej Częstochowskiej z 1993 roku o średnicy 40 m, centrum sztuki Japońskiej „Manggha” w Krakowie.

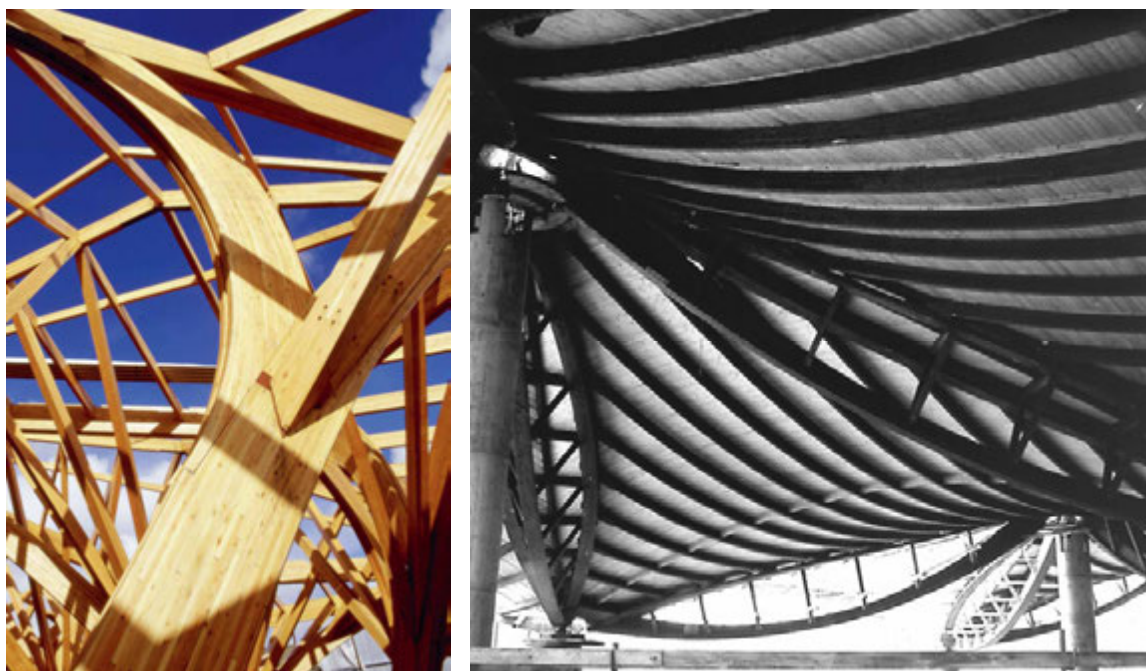
5. Analiza systemów konstrukcyjnych z drewna klejonego

5.1. Modelowanie elementów konstrukcyjnych z drewna klejonego

Podstawowym zagadnieniem przy produkcji elementów nośnych z drewna klejonego warstwowo jest uwzględnienie ograniczonej możliwości ich kształtowania. W rzeczywistości, choć ustroje konstrukcyjne wyglądają na swobodne i organiczne, dźwigary i inne elementy konstrukcyjne podlegają znacznym ograniczeniom w zakresie kształtowania przekrojów i form. Jest to, przede wszystkim, ograniczenie w nadawaniu krzywizn. Formowanie łuków jest jednopłaszczyznowe i możliwe jedynie w płaszczyźnie poprzecznej do przebiegu lameli, tzn. w płaszczyźnie produkowanego elementu. Uzyskanie krzywizn z płaszczyzny produkowanego elementu jest niemożliwe do uzyskania w trakcie tradycyjnego procesu klejenia. Uzyskanie elementu zakrzywionego z płaszczyzny uzyskuje się poprzez połączenie - sklejenie w pionie - kilku wyprodukowanych wcześniej belek łukowych o mniejszych przekrojach i może powodować obniżenie nośności przekroju. Wyprodukowanie elementów zakrzywionych w dwóch lub kilku płaszczyznach jest obecnie możliwe, ale jest to proces skomplikowany technicznie i drogi. Przykładem ukształtowania podwójnej krzywizny dźwigara wraz ze zmiennym przekrojem poprzecznym elementów są przęsła mostu Leonarda Da Vinci w Norwegii (rys. 5.9). Nie zastosowano tu jednak gięcia elementów w dwóch płaszczyznach, ponieważ utrudnia to sama budowa drewna, która generuje, w naturalny sposób, łatwość nadawania deformacji od zginania wzdłuż włókien. Dźwigar powstał jako połączenie za pomocą kleju oraz łączników WT i SFS, kilku łukowych belek i następnie, poprzez obróbkę (docinanie) drugiej płaszczyzny do docelowej formy łukowej. Nawiązanie do organicznych form konarów drzew (gałęzi), które wyginają się miękko w kilku płaszczyznach odbywa się zatem za pomocą skomplikowanych metod.

Znakomita większość systemów konstrukcyjnych z drewna klejonego składa się z belek prostych i łukowych (o stałych lub zmiennych promieniach), o przekrojach prostokątnych lub modelowanych poprzez obróbkę mechaniczną za pomocą zestawu sterowanego numerycznie CNC oraz różnorodnych łączników, mechanicznych, stalowych lub klejowych, scalających poszczególne elementy konstrukcji oraz innych elementów, z innych

materiałów, np. ściągi i ciągna stalowe. Modelowanie kształtów elementów z drewna klejonego odbywa się poprzez sklejanie w docelowe formy, proste lub krzywoliniowe. Plastyczna właściwość stosunkowo cienkich (do 40 mm grubości) struganych desek (lameli), używanych do klejenia elementów konstrukcyjnych, pozwala na nadawanie łuków w płaszczyźnie elementu w ograniczonym zakresie. Możliwy do uzyskania promień gięcia wynosi 600 cm. Dla mniejszych promieni gięcia stosuje się odpowiednio cieńszą tarcicę. Elementy umieszcza się w prasach. Drugim etapem formowania elementów jest obróbka mechaniczna, tj. obróbka na długości, docinanie spadków lub krzywizn, nacinanie gniazd na elementy dochodzące, etc. Obróbka odbywa się za pomocą ręcznych pił lub specjalistycznych zestawów sterowanych numerycznie CNC, które są używane dla elementów o mniejszych gabarytach, ze względu na ograniczone wymiary maszyn. Nawet ustroje o formach pozornie swobodnych składają się z belek prostych i łukowych ukształtowanych w różnych konfiguracjach przestrzennych.



Rys. 5.1. Przykłady konstrukcji o formach pozornie swobodnych, składających się z belek prostych i łukowych, [294], [335].

I. Zasady kształtowania belek z drewna klejonego

Modelowanie belek z drewna klejonego odbywa się zgodnie z następującymi zasadami:

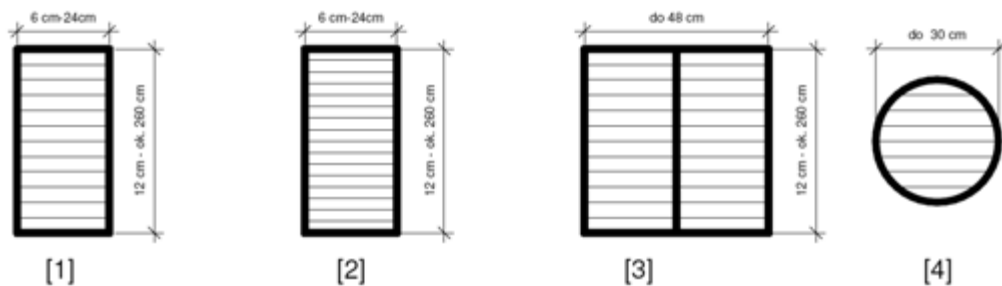
- 1) Elementy konstrukcyjne są jednorodne i pełne.
- 2) Nadawanie krzywizn możliwe jest w płaszczyźnie pionowej elementu.

- 3) Kształtowanie przekroju o różnych klasach wytrzymałości odbywa się poprzez zróżnicowania klas wytrzymałościowych tarcicy (przekroje C – mieszane, i H - homogeniczne) wg wytycznych normowych, [359], [360], [361], [365], [372], [373], [373].
- 4) Belki są klejone w jednym odcinku do długości nawet 65 m, w zależności od rodzaju prasy w zakładzie produkcyjnym. Połączenia czołowe lameli wykonuje się w postaci złączy klinowych. Zalecenia co do produkcji złączy i rozmieszczenie w poszczególnych lamelach przekroju poprzecznego na długości elementu objęte są normą [359], [360].
- 5) Dla osiągnięcia prawidłowej pracy elementu na ścinanie wymagane jest pozostawienie dolnego, nośnego pasa dźwigarów bez docinania.
- 6) Różnorodne kształty belek prostych w widoku podłużnym można uzyskać jedynie poprzez modelowanie (docinanie) pasa górnego. Niedopuszczalne jest docinanie dolnego pasa ze względu na możliwości rozwarstwienia drewna wzdłuż włókien.
- 7) Efekt zmiennej wysokości pasa dolnego można uzyskać tylko poprzez zastosowanie elementów łukowych, gdzie dolny pas zawsze składa się z pełnych lameli.
- 8) Możliwa jest perforacja dźwigarów pełnych po przeprowadzeniu obliczeń, jednak jest energochłonna, podobnie jak szlifowanie powierzchni i modelowanie (docinanie) przekroju poprzecznego.
- 9) Możliwe jest zwiększenie nośności dźwigarów poprzez fabryczne wklejanie w przekrój wkładek stalowych lub wkładek z materiałów kompozytowych (węglowych, szklanych lub aramidowych).
- 10) Dźwigary kratowe są złożone z elementów prostych lub łukowych i elementów łączonych, np. stalowych blach wbudowanych. Scalanie elementów odbywa się w fabryce bądź, po analizie możliwości transportowych, w całości lub częściowo na budowie. Gniazda, ze względu na dużą odpowiedzialność węzłów powinny być zawsze wykonane fabrycznie.
- 11) Poszczególne elementy z drewna klejonego są docinane do żądanych długości. Można jednak pozostawić końcówki niedocięte, wtedy obrabia się je na placu budowy.

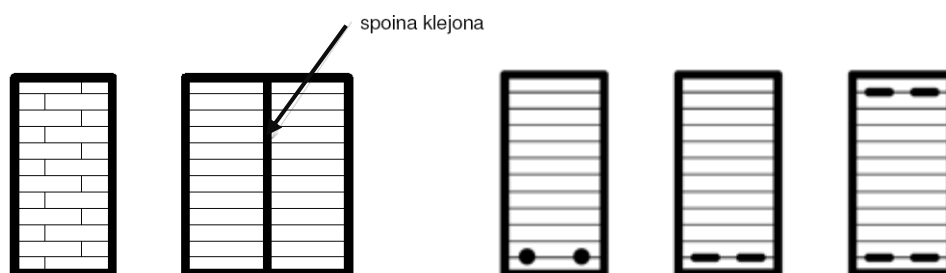
II. Podstawowe wielkości elementów produkcyjnych

- 1) Długość elementów: do 65 m, ograniczenie długości ze względu na transport; maksymalna długość do bezpiecznego przewozu przez Polskę - 42 m.

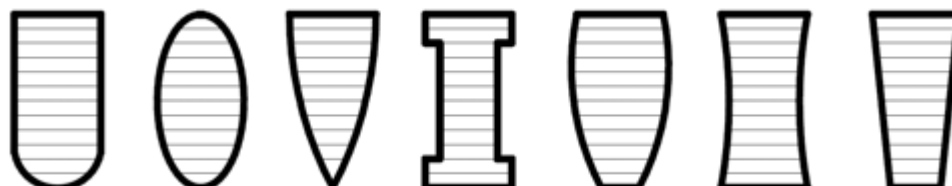
- 2) Wysokość elementów: od 10 do 260 cm. Przekrój należy dobierać uwzględniając wysokość lameli. Dla belek prostych wymiar powinien być pochodną 40 mm, minimalnie należy stosować trzy warstwy lameli, czyli 12 cm; dla belek łukowych wymiar stanowi pochodną 33 mm, minimalnie trzy warstwy- ok. 10 cm.
- 3) Wysokość tarcicy: najwyższe lamele (deski) użyte w procesie klejenia nie mogą przekroczyć wysokości przekroju 45 mm.
- 4) Szerokość elementów: 6 - 30 cm. Różnorodne szerokości elementów uzyskuje się, sklejając lamele o zadanej szerokości, które są zamawiane i docinane już w tartakach, następnie sklejane i docinane. Dobór szerokości elementów zależy od warunków obciążeniowych, jakim są poddane i rozstawu elementów. Zaleca się stosowanie lameli o szerokości do 24 cm. Optymalne są szerokości od 16 do 22 cm, nawet dla elementów o długości 30 m, ponieważ większą nośność elementów uzyskuje się, zwiększając ich wysokość, a nie szerokość, przy czym stosunek szerokości do wysokości może wynieść nawet 1:10. Gdy jednak okoliczności projektowe nie pozwalają na przekroczenie danej wysokości elementów, można zastosować dźwigar dwugałęziowy, złożony z dwóch przekrojów węższych.
- 5) Szerokość transportowa wynosi ok. 3, 5 m: można stosować wartość – do 4, 5 m jednak konieczna jest analiza trasy dojazdu na miejsce wbudowania.
- 6) Promień krzywizny: belki łukowe skleja się z lameli o wysokości 33 mm przy promieniu, który jest większy/równy 600 cm. Dla uzyskania elementu o mniejszym promieniu krzywizny stosuje się lamele o niższej wysokości przekroju, co jednak zwiększa koszty produkcji takich elementów. Przy projektowaniu dźwigarów można stosować wyginanie dwupłaszczyznowe lub łączyć różne promienie krzywizny dla jednego elementu.
- 7) Odchyłki wymiarów: zaletą elementów konstrukcyjnych z drewna klejonego jest wysoka precyzja wykonania, niemniej jednak norma PN – EN 390 [361] dopuszcza możliwość niewielkich odchyłów: dla szerokość: ± 2 mm., dla wysokości elementów: gdy $h < 400$ mm: $+4/-2$ mm, gdy $h > 400$ mm: $+1/-0,5$ %, dla długości elementów: $l < 2$ m: ± 2 mm, $2 - 20$ m: $\pm 0,1$ %, $l > 20$ m: ± 20 mm.



Rys. 5.2. Przekroje belek z drewna klejonego: [1] belki proste, [2] belki łukowe, [3] belki podwójne klejone, [4] belki okrągłe, słupy okrągłe.



Rys. 5.3. Przykładowe zwiększenie efektywności przekroju z drewna klejonego. Przekroje blokowe dla belek o szerokości powyżej 24 cm. Przekroje wzmocnione poprzez wklejanie wkładek wzmacniających usytuowanych wewnątrz przekroju, co prowadzi do powstania nowego materiału konstrukcyjnego.



Rys. 5.4. Przekroje słupów i belek o dowolnych kształtach wycinane za pomocą zestawu sterowanego numerycznie CNC.

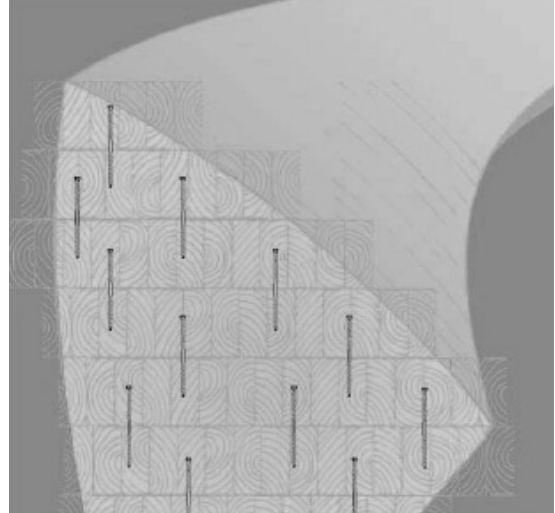


Rys. 5.5. Dźwigar łukowy podczas klejenia. Transport i rozładunek dźwigarów łukowych na placu budowy. Dźwigary łukowe przed obróbką, [335].



Rys. 5.6. Dźwigary nośne konstrukcji Expodachu w Hanowerze podczas obróbki za pomocą zestawu sterowanego numerycznie CNC w zakładzie produkcyjnym, [335].

Rys. 5.7. Scalanie elementów kratownicowych, [340].



Rys. 5.8. Kształtowanie przekroju dźwigara nośnego giętego w dwóch płaszczyznach. Most Leonarda Da Vinci w Norwegii, [340].



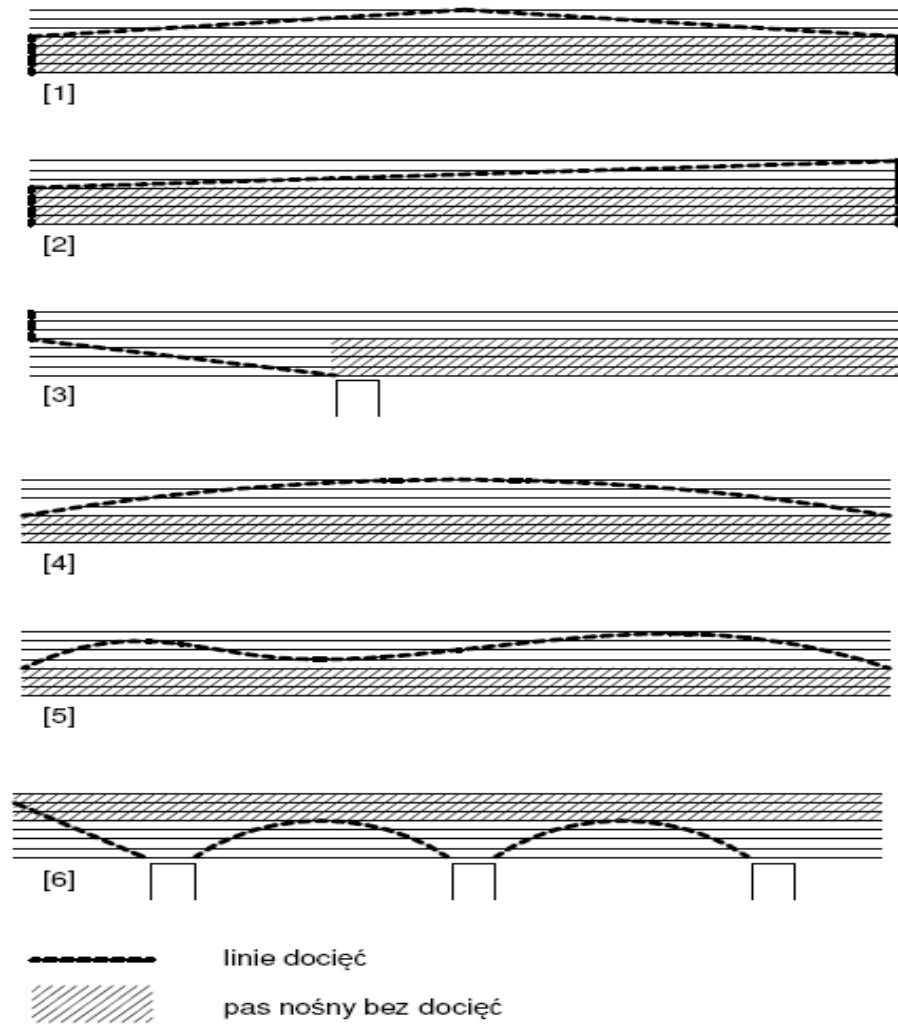
Rys. 5.9. Elementy łukowe pergoli w Jastarni, [335].



Rys. 5.10. Dach nad wejściem do Muzeum Mazurskiego Parku Narodowego w Krempnej, [335].



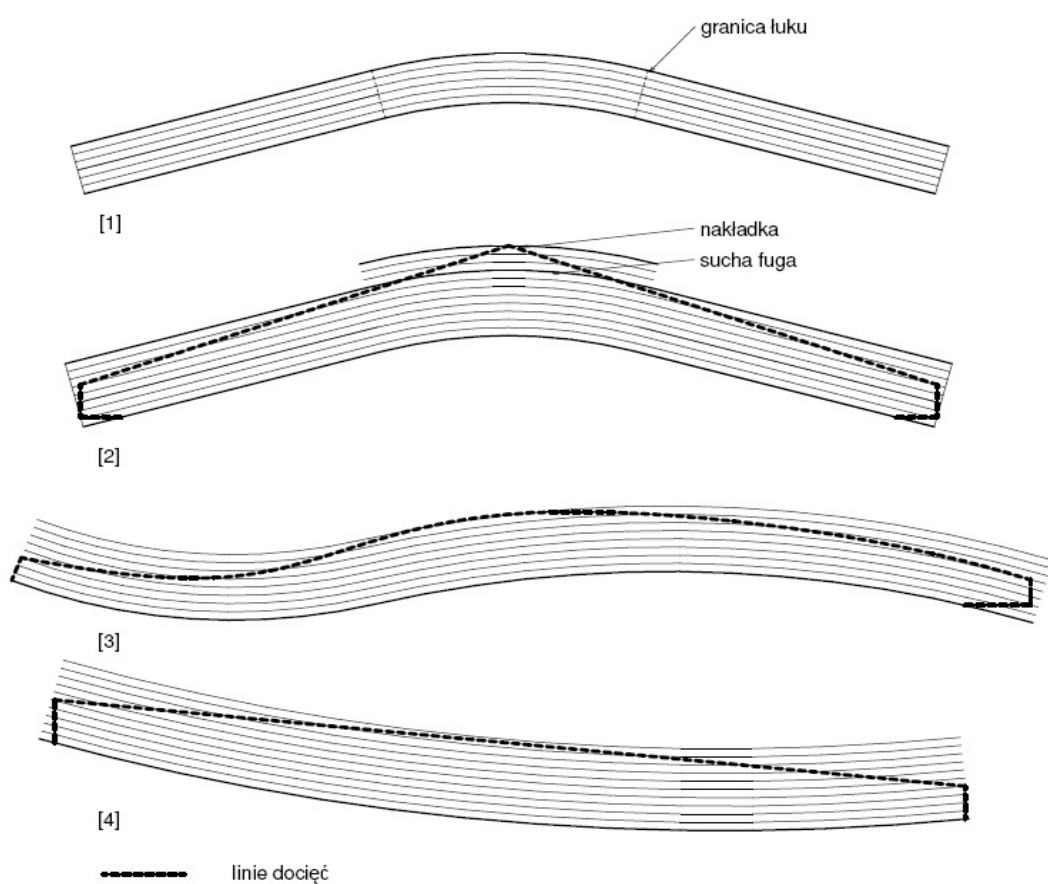
Rys. 5.11. Przykład kształtowania dźwigara poprzez wycinanie: Mehrzweckhalle Hauki-Halli, Finland. Architektura: Markku Suomela, Marita Maraharju. Konstrukcja: Bois-Consult Natterer SA, [333].



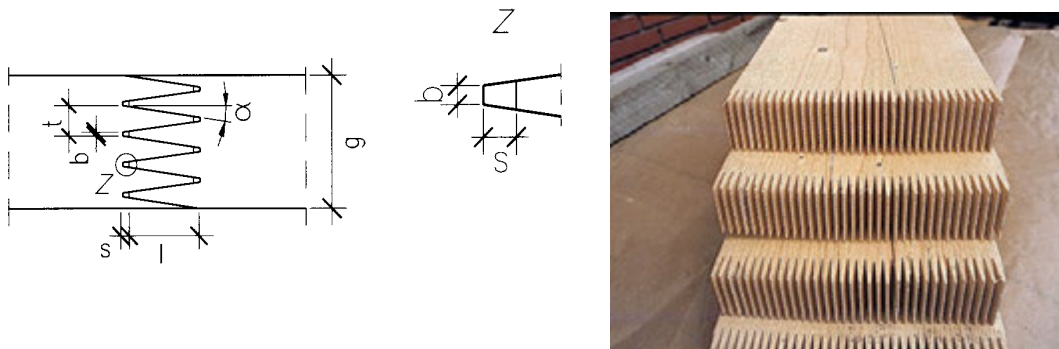
Rys. 5.12. Zasady modelowanie dźwigarów prostych dużych gabarytów poprzez podstawową obróbkę maszynami ręcznymi, [357].



Rys. 5.13. Konstruowanie belek o wygięciu w płaszczyźnie poziomej, [357].



Rys. 5.14. Zasady modelowania dźwigarów łukowych dużych gabarytów poprzez podstawową obróbkę maszynami ręcznymi, [357].



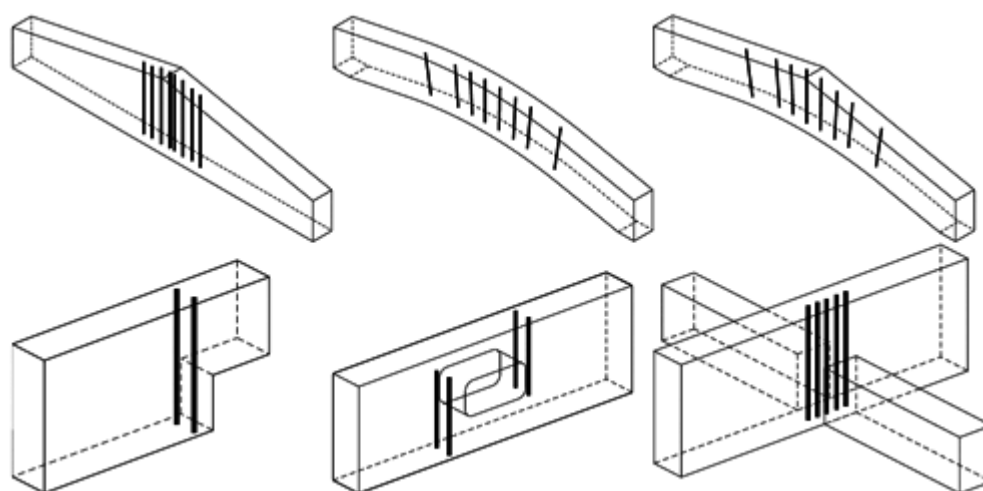
Rys. 5.15. Połączenie desek (lameli) na długości poprzez złącze klinowe, [335].

5.2. Efektywność konstrukcyjna w aspekcie przekrojów poprzecznych elementów nośnych

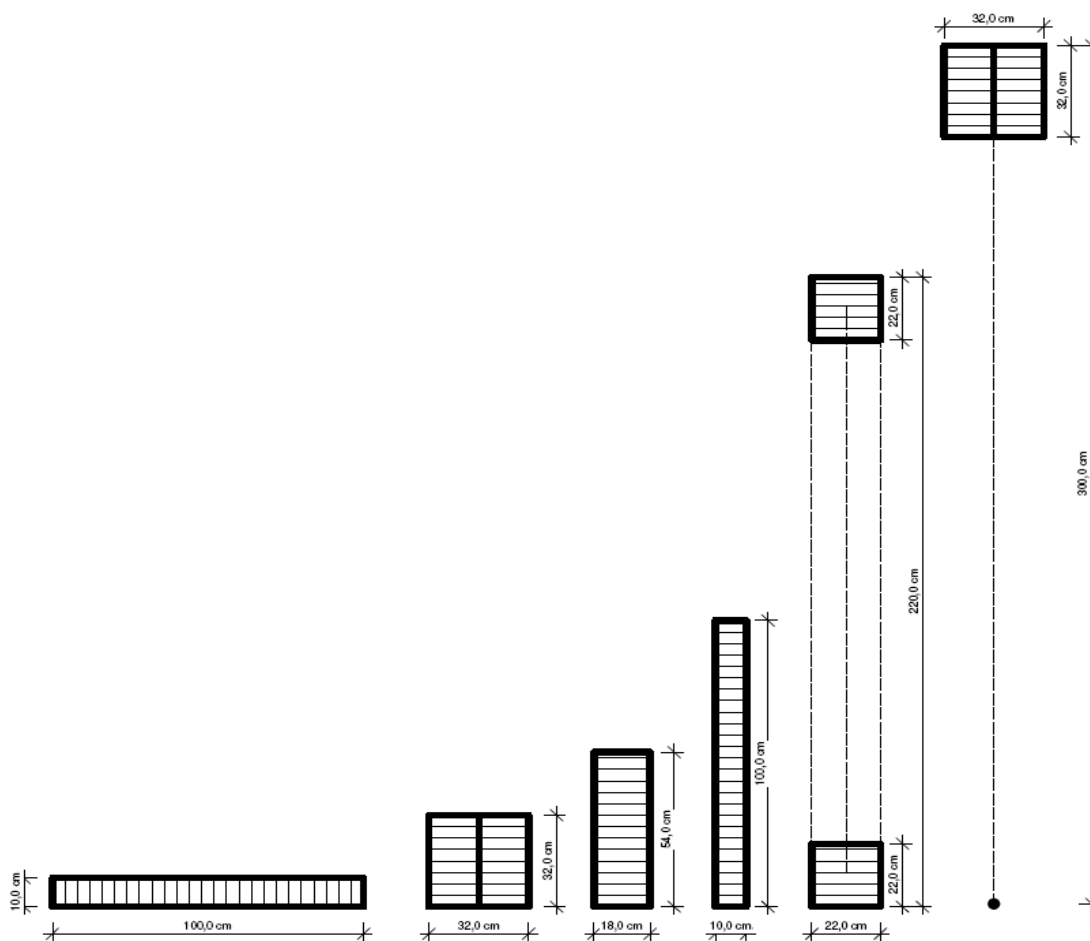
Drewno jest materiałem, który stosunkowo łatwo połączyć z innymi materiałami w układy kompozytowe i hybrydowe, i w tym kierunku są prowadzone badania naukowe. Zastosowanie drewna jako materiału wysoko przetworzonego tzw. EWP (Engineered Wood Products), współpracującego z innymi rodzajami materiałów, jest oceniane jako najbardziej prawdopodobna perspektywa dla nowoczesnych rozwiązań architektonicznych i konstrukcyjnych o dużych rozpiętościach. Obecnie wykorzystuje się materiały konstrukcyjne drewnopochodne (płyty pilśniowe, wiórowe, MDF, HDF, OSB i inne, produkowane z takich surowców jak kora, trzcina i rośliny szybko rosnące) łączone elementami drewnianymi w przekroje skrzynkowe lub dwuteowe. Te rozwiązania, pomimo efektywności konstrukcyjnej nie są powszechnie stosowane ze względu na ich niską estetykę. Natomiast nowe tworzywa drzewne, znane pod ogólną nazwą "materiałów klejonych", w Stanach Zjednoczonych, MGLT, do których należą płyty i belki klejone PSL (Paralel Strand Lumber), LVL (Laminated Veneer Lumber), OSB (Oriented Strand Board) [297], są wykorzystywane jako eksponowane elementy konstrukcyjne. Poszukiwania nowych rozwiązań technicznych i materiałowych w naturalny sposób determinują powstawanie nowych form elementów nośnych lub całych konstrukcji. W ostatnich latach zwiększyło się wykorzystanie elementów LVL, w Europie znanych pod nazwą Kerto (rys. 1.1.), w nowatorskich obiektach architektonicznych, szczególnie w konstrukcjach rusztowych oraz siatkowych, np. Senpentine Galery w Londynie autorstwa Alvaro Siza (rys. 3.23).

Możliwość zwiększania efektywności konstrukcyjnej, czyli przenoszenia większych obciążeń i pokonywania większych rozpiętości, przy jednoczesnym zmniejszeniu przekroju poprzecznego elementu nośnego, tkwi w ukształtowaniu samego przekroju. Jednym z podstawowych sposobów podnoszenia wytrzymałości przekroju jest zastosowanie lameli z tarcicy o większej wytrzymałości w dolnym pasie dźwigarów lub zastosowanie współpracujących z dźwigarem prętów ciągnowych, stalowych o przekrojach nawet do 40 mm. Można stosować ciągną pojedyncze mocowane w osi dźwigarów lub pręty podwójne mocowane w liniach bocznych płaszczyzn dźwigara. Takie rozwiązania stosuje się dla belek prostych hybrydowych lub łukowych, gdy konstrukcja wymaga zastosowania ściąggu dla przejścia sił rozporowych. Pręty stalowe SFS wkręca się pionowo w przekrój dźwigarów w miejscach najbardziej narażonych na odkształcenia. Nowatorskim rozwiązaniem są także sprężone pręty drewniane, które powstają z połączenia elementów drewnianych w przekrój sześcioboczny spięty taśmą stalową po obwodzie, [97].

Innym sposobem ulepszania drewna jest jego chemiczna modyfikacja. Polega ona na wprowadzeniu do drewna środków chemicznych, ich sieciowaniu wewnątrz tkanki drewna i wiązaniu środków modyfikujących ze strukturą drewna. Procesy te prowadzi się metodami radiacji oraz sposobami termicznymi. W Polsce znany był lignomer uzyskany drogą termiczną. W Nowej Zelandii udało się metodą próżniowo-ciśnieniową wprowadzić polisacharyd do drewna uzyskując całkiem nowy kompozyt. Również w Polsce prowadzi się prace nad adaptacją tej metody przy krajowych gatunkach drewna, [97].



Rys. 5.16. Wzmocnienia miejsc osłabionych za pomocą prętów stalowych SFS, [340].



Rys. 5.17. Kształtowanie przekrojów belek nośnych. Pola przekroju poprzecznego sumy elementów nośnych wynosi ok. 10000 cm². Takie ukształtowanie dźwigarów pozwala na uzyskanie rozpiętości od 1 do 100 m przy jednoczesnym zastosowaniu cięgna stalowego, [116]

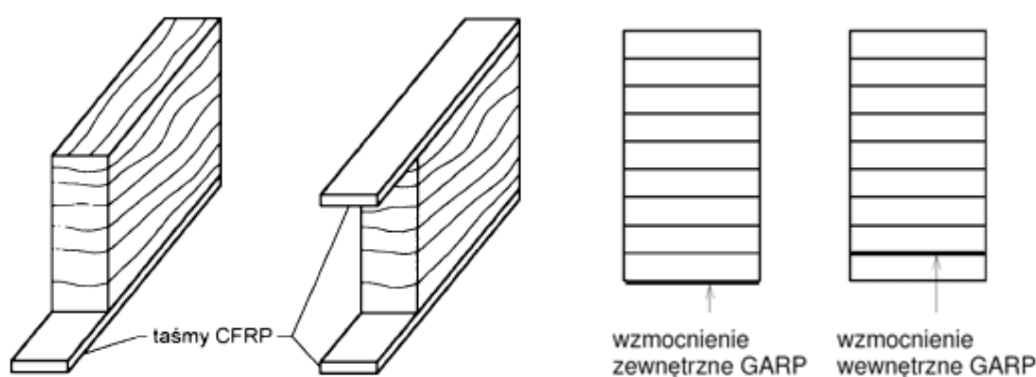
Najbardziej nowoczesnymi rozwiązaniami, które są obecnie polem działań naukowych, jest wzmocnianie elementów konstrukcji drewnianych przy użyciu nowoczesnych technologii poprzez wklejanie w przekroje elementów, wzdłuż dolnych warstw elementów drewnianych wkładek z innych materiałów: stalowych lub kompozytowych z włókien szklanych, węglowych i aramidowych, [157]. Belki wzmocniane włóknami mają znacznie większą nośność, co umożliwia redukcję przekroju poprzecznego i ogranicza zużycie drewna.

Materiały kompozytowe (Fibre Reinforced Plastics) są tworzywami sztucznymi, zbrojonymi różnego rodzaju włóknami (najczęściej szklanymi, węglowymi i aramidowymi). Najczęściej spotykane kompozyty to:

- zbrojone włóknami węglowymi (CFRP – Carbon Fibre Reinforced Plastic),

- zbrojone włóknami szklanymi (GFRP – Glass Fibre Reinforced Plastic),
- zbrojone włóknami aramidowymi (AFRP –Aramid Fibre Reinforced Plastic).

Element nośny kompozytu stanowią włókna o bardzo małej średnicy (zazwyczaj od 2 do 16 μm), natomiast osnowa (matryca) służy jako spoiwo łączące włókna. W kompozytach włóknistych jako osnowy stosuje się, przede wszystkim, żywice polimerowe i epoksydowe. Matryca zapewnia rozdział obciążenia zewnętrznego pomiędzy włókna, chroni je przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz niekorzystnym działaniem środowiska. Podstawowym powodem stosowania włókien jest to, że ich struktura krystaliczna jest znacznie doskonalsza, a po drugie – statystyczna liczba defektów sieci krystalicznej we włóknie o znikomo małej objętości jest znacznie mniejsza niż w dużej objętości tego samego materiału. Na przykład, wytrzymałość na rozciąganie stali konstrukcyjnych wynosi ok. 0,2-0,7 GPa, tymczasem wytrzymałość cienkich włókien stalowych wynosi ok. 4 GPa, [61].



Rys. 5.18. Sposób doklejenia taśm CFRP, [61]. Przekroje belek wzmocnionych taśmami GARP, [308].

Wzmacnianie konstrukcji drewnianych przy użyciu taśm węglowych CFRP jest zagadnieniem stosunkowo nowym. Po raz pierwszy zastosowano taśmy węglowe w konstrukcji drewnianej w 1991 roku do wzmocnienia zabytkowego drewnianego mostu w Sins w Szwajcarii. W Polsce pierwsze próby dotyczyły wzmocnienia najwyższej w Europie (110,7 m) drewnianej wieży w Gliwicach, [61]. CFRP to kompozyt jednokierunkowo zbrojony ciągłym włóknem węglowym. Ponieważ włókna szklane posiadają słabą odporność na środowiska alkaliczne oraz niższą wytrzymałość zmęczeniową, a włókna aramidowe mają znacznie niższy moduł sprężystości niż włókna węglowe, to właśnie materiały CFRP są zalecane do wzmacniania konstrukcji. Nieustannie rosnące zainteresowanie włóknami jest wynikiem ich dużej wytrzymałości na rozciąganie oraz

szywności, wielokrotnie większych od wartości odpowiednich charakterystyk dla materiału włókna, ale wyznaczonych na podstawie badań materiału w postaci masowej. Wklejenie taśm do wnętrza przekroju ogranicza również możliwość delaminacji połączenia klejowego „taśma-drewno”. Ponadto uzyskuje się bardziej jednorodny, korzystny stan naprężeń strefy rozciąganej. Ponadto ukrycie taśm wewnątrz przekroju zwiększa odporność badanych belek z drewna klejonego warstwowo podczas próby ogniowej o 44% w stosunku do belek wzmocnionych zbrojeniem zewnętrznym, [61].

Zagadnienie wzmocnienia konstrukcji drewnianych przy użyciu nowoczesnych technologii jest w Polsce i na świecie ciągle stosunkowo słabo rozpoznane. Dopiero w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania tą tematyką. Między innymi, w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej przeprowadzono badania belek wzmocnianych taśmami węglowymi CERP. Badania te wykazały, że wklejenie w przekrój belki taśm węglowych w znacznym stopniu ogranicza wpływ nierównomierności usłojenia i inkluzji na nośność belki oraz rzutuje na postać jej zniszczenia. Własności mechaniczne drewna w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia zostają „ujednolicone”. Z punktu widzenia teorii niezawodności model zniszczenia badanych połączeń powinien przybierać postać modelu szeregowego, tzn. o nośności przekroju po wzmocnieniu decyduwać powinno jego najslabsze ogniwo. Przekrój zespolony „drewno- CFRP” jest przekrojem znacznie doskonalszym niż przekrój litego drewna na skutek wprowadzenia taśmy węglowej „uciągającej” nierównomierną strukturę drewna. Stąd, najslabszego ogniwa w łańcuchu należy szukać tu w strefach przyskleinowych w drewnie, co potwierdzają badania. Istnieje jednak możliwość modyfikacji struktury powierzchni np. poprzez impregnację, co niewątpliwie powinno poprawić nośność połączenia. Przeprowadzone badania jednoznacznie wskazują na przydatność taśm węglowych do wzmocnienia konstrukcji drewnianych. Wartości ugięć belek i naprężeń w drewnie zostały poważnie zredukowane, zaś nośność belek wzrosła nawet ponad 70%.

Opatentowana technologia FIRP polega na wklejeniu pomiędzy świerkowe lamele cienkich włókien szklano - aramidowych, które zwiększają nośność elementów stosowanych do konstrukcji wielkogabarytowych i działają podobnie jak zbrojenie w przekrojach żelbetowych. Wytrzymałość zastosowanych w technologii FIRP włókien nawet 5-ciokrotnie przewyższa wytrzymałość stali. Do produkcji tego typu belek stosuje się najczęściej drewno świerkowe klejone klejami melaminowymi lub rezorcynowymi. Technologia FIRP została opracowana w USA, testowana podczas prób dla dźwiga-

rów zbrojonych włóknami o wytrzymałości nawet pięciokrotnie przewyższającymi stal. Wymiarowanie jest wykonywane zgodnie z uznawaną na świecie normą amerykańską US standard ICBO/Uniform Building Code 5100. Specjalne testy komponentów prowadzone na dźwigarach FRIP lamella wykonane przez Instytuty badawcze HTBLVA Villach w Austrii i WSTI w Stanach Zjednoczonych, potwierdziły wartości obliczeniowe oraz bezpieczeństwo konstrukcji. Również FMPA Stuttgart przeprowadził program testów i badań. Przy użyciu systemu FRIP lamella można uzyskać zmniejszenie przekroju drewna o 25 – 40%, [308].



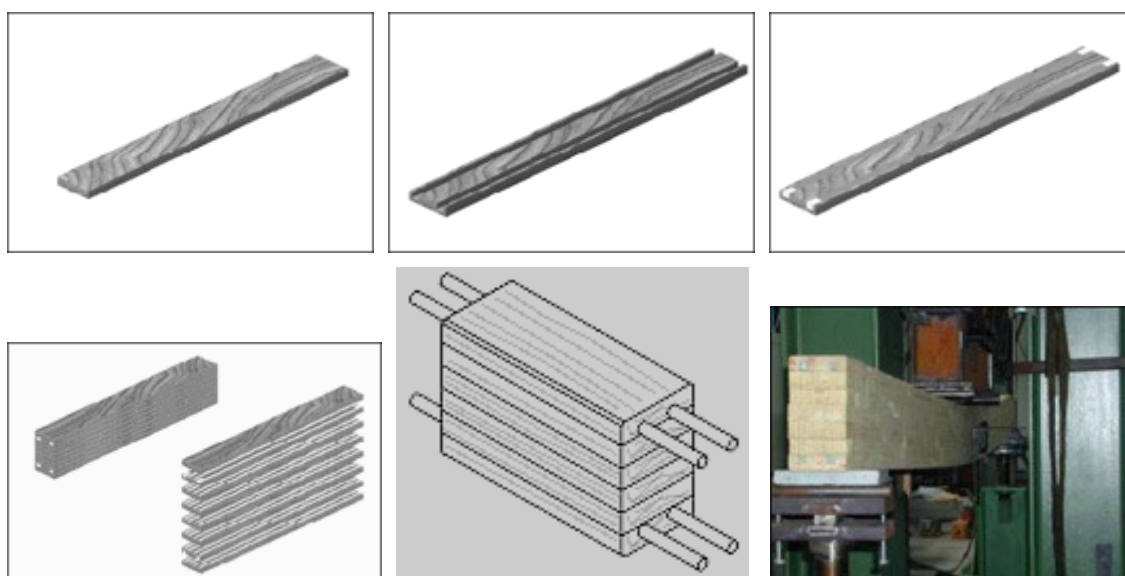
Rys. 5.19. Konstruowanie belek wzmocnionych FIRP lamella, [308].

W Polsce badania nad belkami przygotowanymi w warunkach przemysłowych przez firmę Buchacher Holzleimbau GmbH przeprowadziła Politechnika Śląska w Gliwicach. Uzyskane wówczas wyniki potwierdziły, że wzmocnianie elementów zginanych taśmami szklano- aramidowymi wpływa korzystnie na nośność i sztywność belek zginanych. Przy czym wzrost sztywności jest niewielki, istotny jest natomiast wzrost nośności, [308]. Przeprowadzone w roku 2006 badania wykonano na modelach belek o przekroju 140 x 320 mm oraz długości 6200 mm. Wykorzystano trzy typy belek:

- pięć belek niewzmocnionych, które wykonano z drewna świerkowego klasy GL28h (według PN-EN 1194),
- pięć belek wzmocnionych wewnątrz, wykonanych z drewna świerkowego klasy GL28h i wzmocnionych taśmą z włókien szklano- aramidowych wklejoną między przedostatnią a ostatnią lamelę,
- pięć belek wzmocnionych zewnątrz, wykonanych z drewna świerkowego klasy GL28h oraz wzmocniono taśmą z włókien szklano- aramidowych doklejoną do dolnej powierzchni belki.

W badaniach potwierdzono średni wzrost nośności belek wzmocnionych wewnętrznie o 54 proc. i o 68 proc. belek wzmocnionych zewnętrznie w stosunku do średniej nośności belek niewzmocnionych. Ponadto, po porównaniu minimalnych sił niszczących w poszczególnych seriach, stwierdzono wzrost nośności odpowiednio o 74 proc. i 94 proc. Zastosowanie wzmocnienia taśmami wpłynęło także nieznacznie na sztywność belek. Ugięcie zmalało o ok. 15 proc. Różnice w wynikach nośności między belkami z włóknami umieszczonymi wewnątrz - i na zewnątrz przekroju spowodowane są głównie niewielką wysokością przekroju badanych belek. Umieszczenie wkładek wzmacniających 4 cm wyżej lub niżej może mieć bowiem znaczenie przy małych wysokościach przekroju. Można założyć, iż w miarę wzrostu wysokości przekroju elementów wyniki te będą niemal identyczne, [308].

Technologia wzmacniania belek z drewna klejonego prętami stalowymi analogicznie do rozwiązań belek żelbetowych została opatentowana pod nazwą ARMALAM, (patent n°1260648 UNI). Pręty stalowe umieszcza się pomiędzy lamelami w strefach zewnętrznych wysokości przekroju z drewna klejonego. Jest to technologia powszechnie stosowana w Europie od kilku lat, co potwierdzają realizacje, [298].



Rys. 5.20. Konstruowanie belek wzmocnionych Armalam, [298].

5.3. Kształtowanie konstrukcji z drewna klejonego. Geometria i organizacja układu przestrzennego

Ars sine scientia nihil Est

(Praktyka [budownicza] bez wiedzy [geometrycznej] jest niczym)

Mignot, XV wiek, [204]

Dla kreowania konstrukcji z drewna klejonego charakterystyczne są, jak wspomniano, pokazanie układu konstrukcyjnego a także traktowanie geometrii jako mocnego środka wyrazu. Budowanie poszczególnych układów przestrzennych odbywa się intuicyjnie, poprzez kopiowanie zależności występujących w tworach naturalnych lub za pomocą konstrukcyjnego wymiarowania, analiz statycznych, zależności funkcjonalnych i wytycznych technologicznych. Reguły te, stosowane intuicyjnie lub analitycznie, opierają się na zastosowaniu stosunkowo prostych zależności geometrycznych i organizacyjnych, nawet, w pozornie wyglądających na bardzo skomplikowane, układach przestrzennych. Geometrię stosowanych wspólnie konstrukcji wiszących, odbieranych jako nowatorskie i innowacyjne, określają z reguły krzywizny tylko dwóch płaszczyzn. Wykorzystanie tych zasad może być traktowane zarówno jako język ułatwiający projektowanie, jak też, stać się punktem wyjścia do poszerzania architektonicznych możliwości. Pomimo ograniczenia ilości założeń konstrukcyjnych oraz geometrycznych możliwości formotwórczych (liniowość, przestrzenna struktura, powłoka dwupłaszczyznowa), które wykorzystuje się do tworzenia form przestrzennych, zasady projektowania konstrukcyjnego prowadzą do różnorodności rozwiązań – multiplikowania, zmian proporcji, etc. Różnorodne formy wykorzystują tu różne układy statyczne i łączą różne materiały konstrukcyjne w układy hybrydowe.

Estetyka konstrukcji bardzo często wynika zatem z konstrukcyjnego i ekonomicznego modelowania dźwigarów, ze względu na parametry geometryczne i statyczne. Atrakcyjność formy osiąga się poprzez czytelność zastosowanych zasad, takich jak: wyczuwalny przebieg odkształceń i sił, powtarzalność, wpisywanie architektury w układy bez mała modularne. Detale i wszystkie elementy, które są eksponowane, można kształtować różnorodnie przy założeniu spełnienia zasad zachowania statycznego. Formy obiektów określają przyjęte zasady geometryczne, sposoby łączenia elementów podstawowych i dopełniających. Układy konstrukcyjne przywołują wartości tak istotne dla jakości dzieła archi-

tektury, jak prawa mechaniki, czystość logiki konstrukcyjnej, perfekcja dopasowania i rytm elementów. Z pozoru mechaniczne powtarzanie prowadzi w dwie strony. Ku obiektom o charakterze niemal transcendentnym i ku budowlom z pozoru obojętnym a także do obiektów rzeźbiarskich, rozbudowanych w formie i strukturze, dominujących nad otoczeniem.

Drewno klejone umożliwia tworzenie form, które mają charakter unikatowy. Innowacyjne formy powstają z pomocą układów przestrzennych dwukrzywiznowych, takich jak siatki i konstrukcje wiszące, ale także innych systemów konstrukcyjnych - przestrzennych układów ramowych i kratownic. Jako innowacyjne postrzega się także konstrukcje stworzone z rytmicznych zestawień elementów prostych, wykorzystanych w nowych konfiguracjach geometrycznych. Budowle o charakterze typowo rzeźbiarskim a także formy celowo zniekształcone mogą powstawać również z pominięciem zasad wynikających z analiz statycznych. Niektóre z nich wykorzystują zależności geometryczne w zniekształconych, nietypowo przetworzonych lub nowatorskich układach, inne są tworzone w sposób intuicyjny, bez dbałości o ekonomiczną i statyczną optymalizację konstrukcji.

Tworząc konstrukcje o dużych rozpiętościach z drewna klejonego, trzeba pamiętać o działaniu na te konstrukcje niekorzystnych obciążeń. Schlaich [152] określił wymagania i rozwiązania dla lekkich konstrukcji, które można odnieść do projektowania konstrukcji z drewna klejonego warstwowo:

- 1) Szerokość przekroju dźwigara zginanego obciążeniem własnym zwiększa się nie tylko proporcjonalnie do rozpiętości, ale do jej kwadratu. Zwiększając rozpiętość zwiększamy ciężar konstrukcji, dlatego trzeba unikać niczym nieuzasadnionych rozpiętości. Zasada ta może być jednak ograniczona przez różnorodne zmiany kształtów.
- 2) Należy unikać elementów zginanych na korzyść prętów ściskanych lub rozciąganych osiowo. Przykładem są kratownice. Dzięki prętom rozciąganim i ściskanim cały przekrój może być równomiernie wykorzystany. W elementach zginanych w pełni wykorzystuje się jedynie wytrzymałość skrajnych włókien, a środkowe pasma są „martwym” obciążeniem. Z kolei ciągną są korzystniejsze niż pręty ściskane, które łatwo ulegają wyboczeniu.
- 3) Korzystne pręty rozciągane stają się jeszcze bardziej efektywne, gdy wytrzymałość materiału zwiększa się, a ciężar własny maleje. Drewno jest korzystniejsze niż stal, a włókna naturalne i sztuczne jeszcze bardziej korzystne.

- 4) Przestrzenne, lekkie konstrukcje o podwójnej krzywiznie otwierają nowy świat architektury, z mnogością nowych form. Konstrukcje te przekazują obciążenie albo przez powłoki ściskane, albo przez siatki rozciągane lub membrany. Pomimo cienkich ścianek powłok lub kopuł przestrzennych, ich geometryczny kształt stabilizuje je i uniemożliwia wyboczenie [152].

Zakres realizowanych rozpiętości dla konstrukcji z drewna klejonego jest szeroki, od kilkunastu do 180 metrów, co wiąże się z różnorodnością rozwiązań architektonicznych, geometrycznych, przestrzennych i konstrukcyjnych. Za technicznie trudną do wykonania z drewna klejonego można już przyjąć rozpiętość od ok. 50 m. Ekonomiczne i najbardziej optymalne technologicznie i ekonomicznie są konstrukcje z drewna klejonego o rozpiętościach do 100 m.

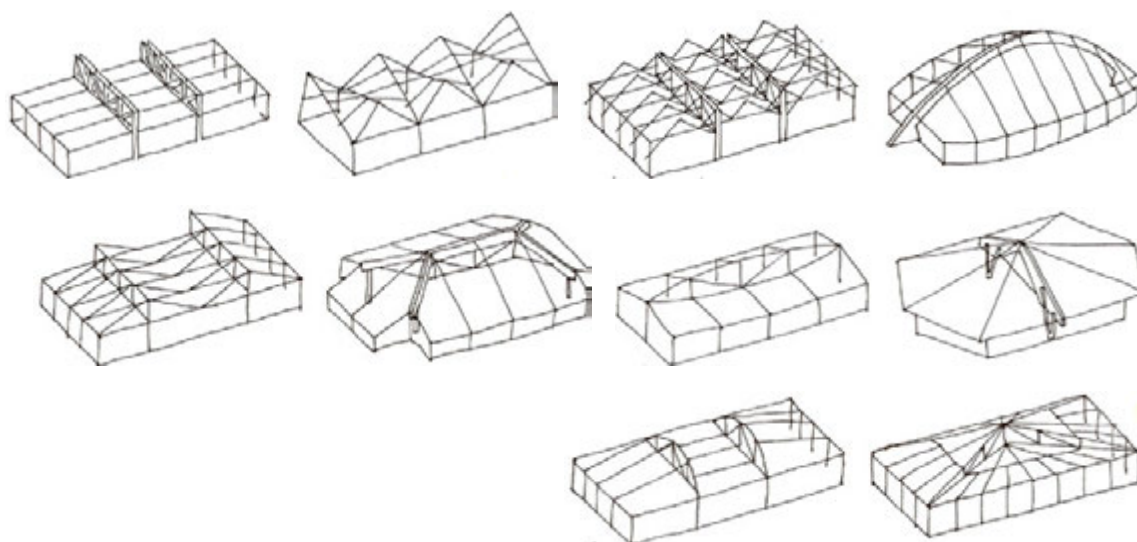
Podstawą prawidłowego projektowania z wykorzystaniem drewna klejonego jest znajomość jego cech fizycznych, parametrów wytrzymałościowych oraz możliwości zastosowań konstrukcyjnych. Właściwy wybór układu konstrukcyjnego oraz odpowiedni dobór przekrojów poszczególnych elementów zależy od wielu czynników. Wybór układu konstrukcyjnego zależy w dużym stopniu od funkcji, jaką ma pełnić obiekt, choćby poprzez realizowanie wytycznych takich jak, na przykład, minimalne wysokości użytkowe budynków hal sportowych dla poszczególnych dyscyplin sportowych. Hala do siatkówki, w której wymaga się wysokości min. 9 m w świetle, powinna być inaczej projektowana niż kryte lodowisko, w którym minimalizuje się wysokość ze względu na trudną do utrzymania i kontroli niską temperaturę lodu. Wybór układu konstrukcyjnego uzależniony jest także, co nie zawsze jest brane pod uwagę, od warunków przestrzennych występujących w miejscu budowy, z uwagi na konieczność zarezerwowania miejsca potrzebnego do operowania dźwigarami wielkogabarytowymi w trakcie budowy, oraz możliwości transportowych. Transport może być niemożliwy lub utrudniony w przypadku popełnienia nieświadomych błędów projektowych, z powodu przyjęcia zbyt dużego nachylenia rygla w konstrukcji ramowej, w której węzły narożne są zrealizowane za pomocą trwałych połączeń klejowych, lub w dźwigarach łukowych, w których zastosowano zbyt duży promień. Dźwigar ma wtedy zbyt dużą szerokość transportową i może zająć konieczność jego dzielenia, co jest kosztowne i problematyczne, a także zmienia jego pracę w istniejącym układzie statycznym. Na terenie Polski, firmy produkcyjne [335], [329], [328], [308] bardzo często korygują projekty konstrukcyjne w trakcie realizacji konstrukcji, z powodu

utrudnionych warunków drogowych, np. wybudowanych w ostatnich latach małych rond, które uniemożliwiają transport dźwigarów ponadgabarytowych do małych miejscowości. Ekonomiczna szerokość transportowa wynosi do 3, 5 m. Projektowanie elementów o większej szerokości transportowej wymaga konsultacji z firmą transportową i użycia specjalistycznego transportu wraz z pilotażem i usuwaniem przeszkód, takich jak np. znaki drogowe, wzmocnieniem poboczy, przycinaniem lub wycinaniem gałęzi i drzew, etc. Niemniej jednak, w niektórych przypadkach, taka praktyka i tak jest tańsza, niż zastosowanie dźwigarów łączonych. W przypadku tworzenia konstrukcji o rozpiętości powyżej 80 m, kwestia transportu na miejsce wbudowania, bardzo często wpływa na wybór układu konstrukcyjnego. Konstrukcja łukowa trójprzegubowa składać się będzie z dwóch dźwigarów po ok. 40 m i maksymalnej szerokości transportowej lub z dźwigarów łączonych na długości w sposób sztywny i wzmocnianych elementami ciągnowymi. Przy rozpiętości powyżej 100 m należałoby zastosować układy przestrzenne złożone z dźwigarów łukowych hybrydowych, drewniano – stalowych, scalanych częściowo w miejscu wbudowania czy konstrukcje rusztowe, siatkowe, konstrukcje wiszące lub struktury przestrzenne. Wszystkie te układy charakteryzują się tym, że układ nośny jest złożony z elementów o mniejszych gabarytach i niskim ciężarze, co powoduje, że ekonomiczne jest ich scalanie na placu budowy.

Użycie lekkich elementów z drewna klejonego w połączeniu z cienkimi kompozytami, ciągnami stalowymi i membranami stosowanymi na pokrycie dachu, pozwala na zmniejszenie obciążenia ciężaru własnego konstrukcji do kilkunastu kg/m^2 . Waga konstrukcji przekłada się na koszt realizacji. Lekkość konstrukcji to tańszy transport, posadowienie i wznoszenie. Systemy konstrukcji z drewna klejonego są ok. 17 razy lżejsze niż stalowe i 5 razy lżejsze niż żelbetowe, co wynika z porównania ciężarów tych materiałów ujętych w normach. Daleko posunięta prefabrykacja poszczególnych elementów konstrukcyjnych, które łączy się na budowie, w związku z tym krótki czas montażu, stosowanie lekkich łączników systemowych dodatkowo podnoszą ich walor ekonomiczny.

Przekrycia o mniejszych rozpiętościach, od 20 do 45 m, można realizować bardzo różnorodnie. Przy rozpiętości, którą można pokonać dźwigarem w jednym odcinku (do ok. 45 metrów), najbardziej popularne są płaskie ustroje belkowe. Najczęściej są to belki o przekroju prostokątnym, stałym lub zmiennym, trapezowe, bumerangowe, etc. Proste belki z drewna klejonego można wzmocniać ciągnami stalowymi lub łączyć w kratownice płaskie zespalane w węzłach na taśmy kolczaste Meniga, blachy stalowe, sworznie i śru-

by. Do płaskich układów belkowych można zaliczyć także dźwigary łukowe o łagodnych wyniesieniach i zmiennych promieniach oraz konstrukcje łukowe trójprzegubowe o pełnych przekrojach, które umieszcza się na słupach i łączy ściągami stalowymi. Przy zwiększaniu rozpiętości, zawęża się ilość rozwiązań. Jednorodna belka swobodnie podparta nie jest możliwa do zastosowania. Limit w rozpiętościach dla elementów pełnych wyznaczają możliwości produkcyjne i transportowe. Stąd, gdy wymiary przekroju pełnego w wyniku przeprowadzenia wymiarowania przekroczą 30 cm szerokości i 260 cm wysokości, jedynym rozwiązaniem jest zastosowanie systemów wzmacnianych cięgnami stalowymi lub kratownic. Przy rozpiętościach od 45 do ok. 80 m., wybór zawęża się do systemów złożonych, łukowych hybrydowych, drewniano – stalowych, układów kratownicowych, struktur przestrzennych, konstrukcji ramowych, kopuł żebrowych i siatkowych. Wszystkie te układy stosuje się także dla mniejszych rozpiętości. Przy rozpiętościach powyżej 80 m, jak wspomniano, najlepiej stosować konstrukcje łukowe, gdzie pełne belki dużych gabarytów są łączone w systemy przestrzenne i współpracują z elementami cięgnowymi oraz są pokryte lekkimi i mocnymi pokryciami dachowymi. Formami o największych możliwościach w zakresie zwiększania rozpiętości są powłoki dwukrzywiznowe, konstrukcje wiszące i kopuły drewniano – stalowe łączone z lekkimi pokryciami membranowymi.

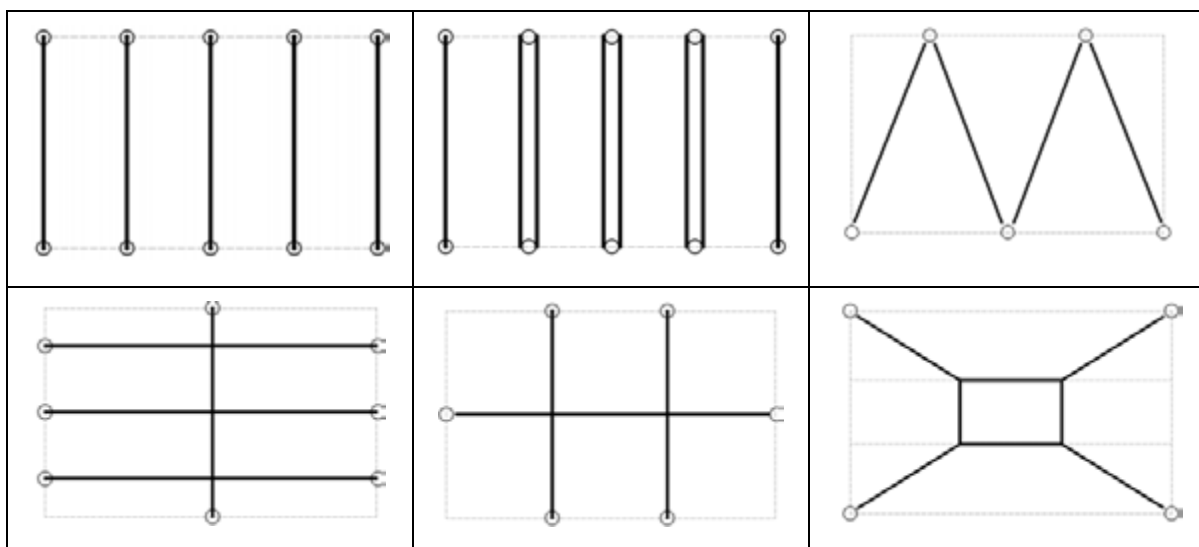


Rys. 5.21. Możliwości kształtowania formy za pomocą różnych systemów konstrukcyjnych w układach podłużnych - regularnych, na planie prostokątnym, [252].

Ustroje płaskie, jakimi są dźwigary z drewna klejonego są przystosowane do przenoszenia obciążeń działających w ich płaszczyźnie. W układach szkieletowych występują siły poziome, które mogą powodować ich odkształcenia (wyboczenie pasa górnego). Należy je redukować za pomocą stężeń wiatrowych i tężników lub płyt dachowych. Bez przeprowadzenia dokładnych obliczeń przyjmuje się, że odległości między poszczególnymi stężanymi polami nie mogą przekraczać 25,0 m. Siły powinny być przekazywane na sąsiadujące pola za pośrednictwem odpowiednich tężników czy też elementów konstrukcyjnych pokryć.

W zależności od uwarunkowań i przesłanek funkcjonalnych dźwigary nośne mogą występować w różnych konfiguracjach geometrycznych, w zakresie kształtowanie planu. W układach prostokątnych rzutów główne dźwigary prowadzi się najczęściej wzdłuż krótszych boków, jednak dla uzyskania efektu architektonicznego można stosować wiele innych schematów. Elementy proste, kształtowane w różne układy, dają wiele możliwości ekspresyjnych. Ciekawe efekty powstają przy zastosowaniu belek prostych w układach centrycznych, a także w układach nierównoległych, gdzie są one sytuowane pod różnymi, nieregularnymi kątami względem siebie.

Tabela 5.1. Geometria kształtowania planu różnorodnych systemów konstrukcyjnych w układach podłużnych - regularnych, na planie prostokątnym



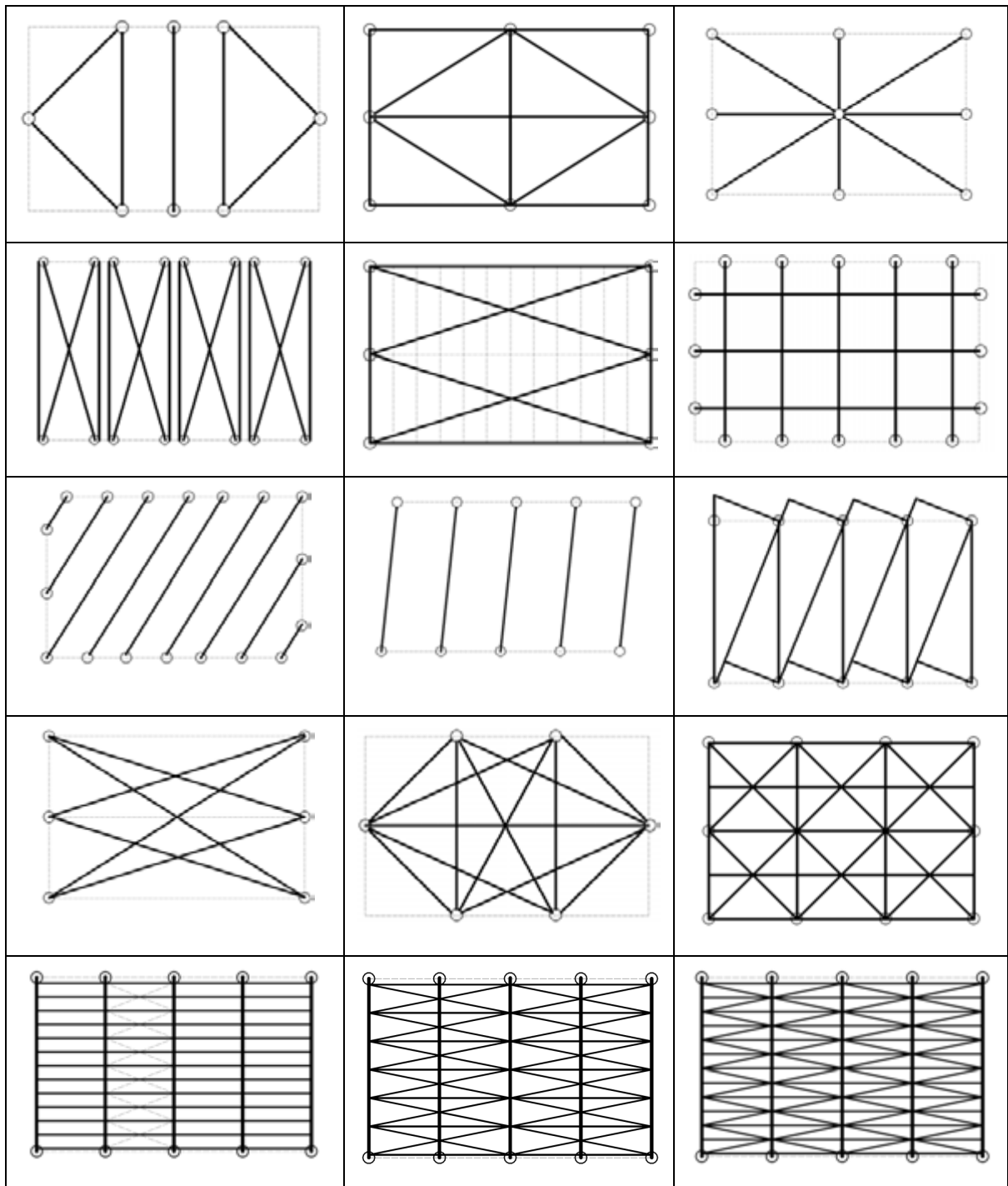


Tabela 5.2. Geometria kształtowania planu różnorodnych systemów konstrukcyjnych w układach nieregularnych

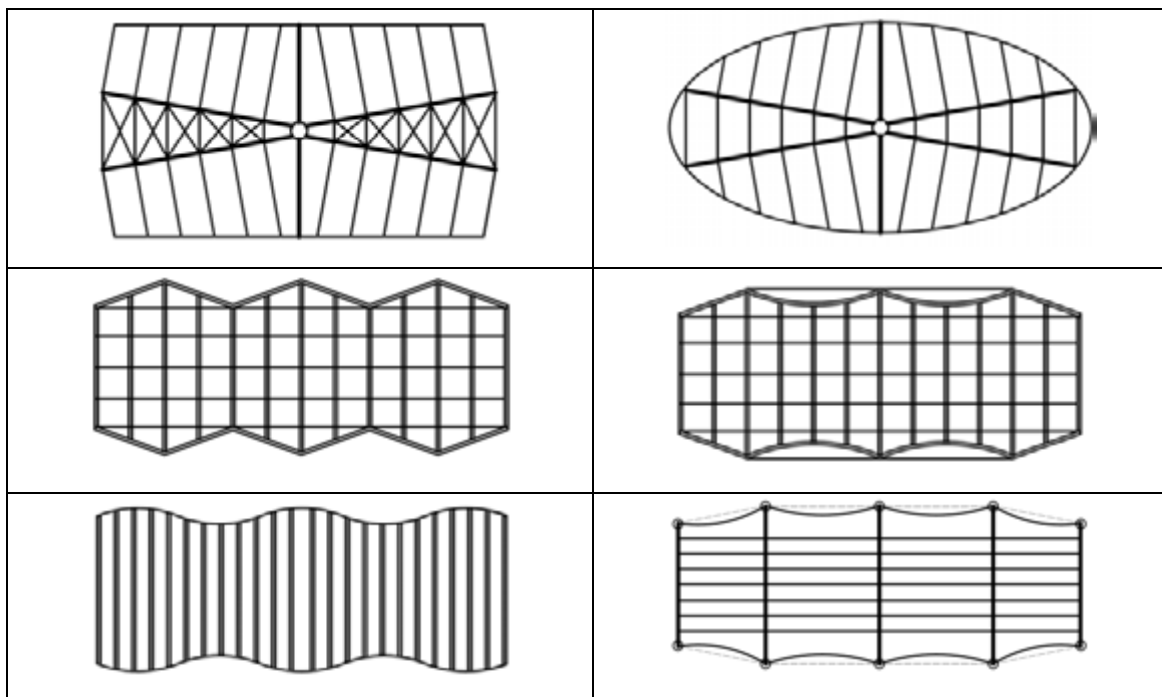
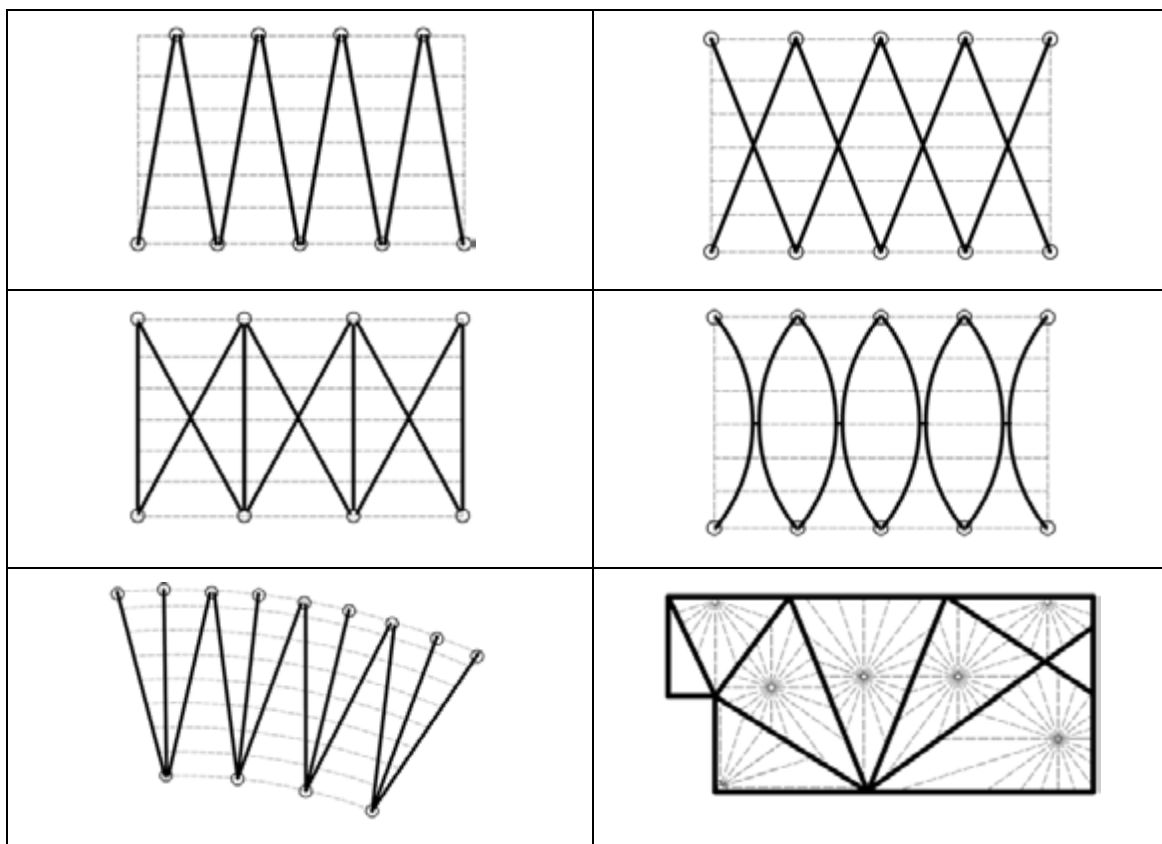
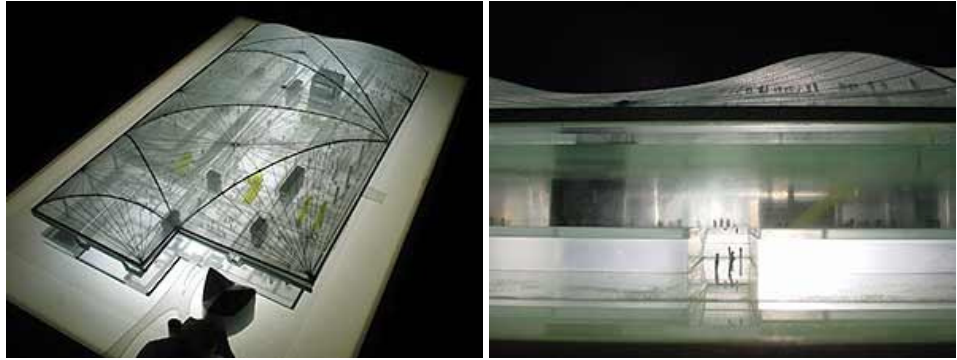
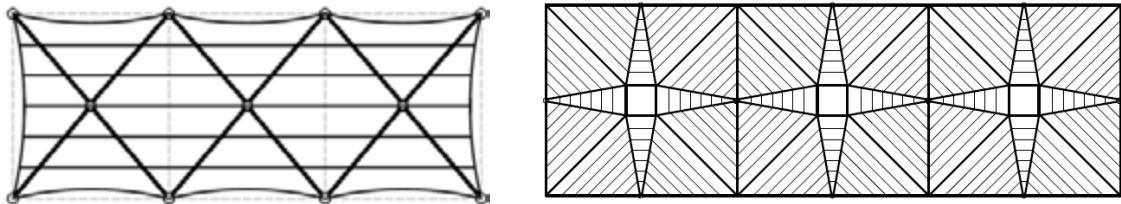


Tabela 5.3. Geometria kształtowania planu za pomocą dźwigarów diagonalnych





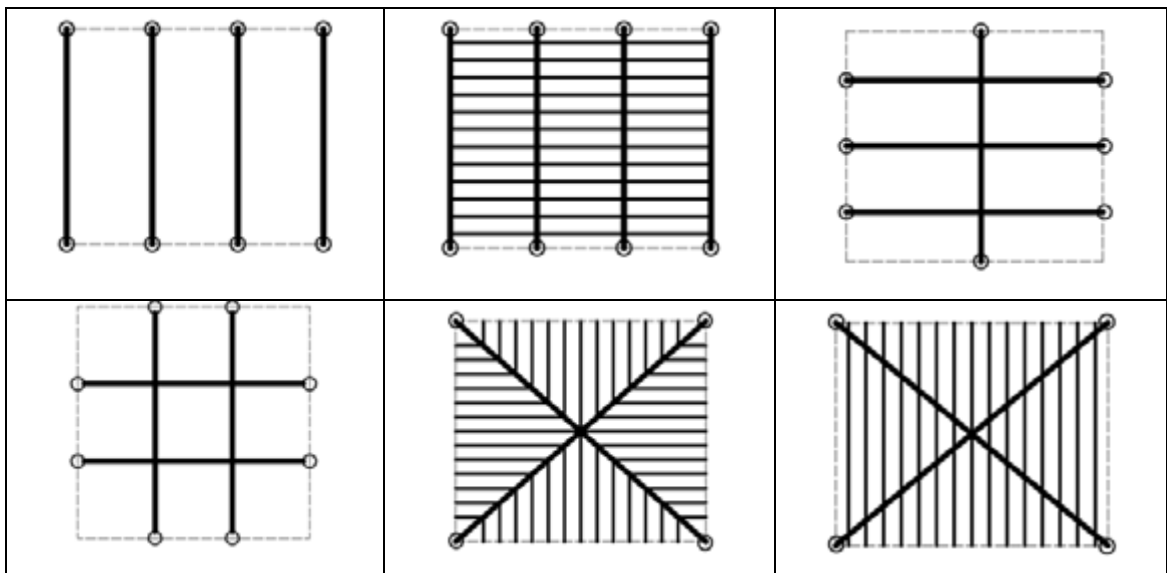
Rys. 5.22. Los Angeles County Museum of Art (LACMA), Architektura: Rem Koolhaas OMA, [302].



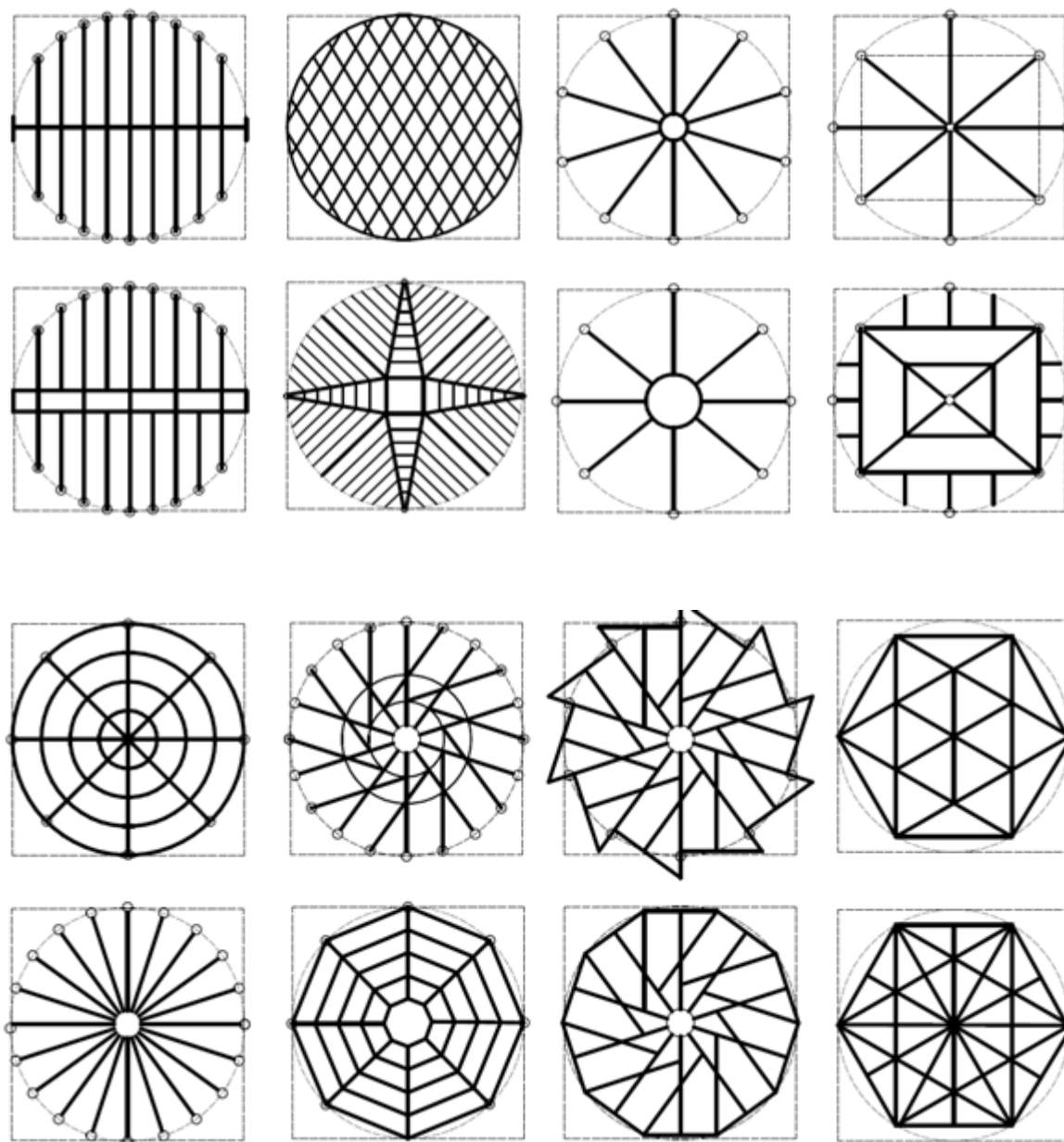
Rys. 5.23. Sklepienia krzyżowe z przekryciem błonowym o układzie podłużnym, [357].

Rys. 5.24. Konstrukcje powtarzalne o układzie podłużnym, [357].

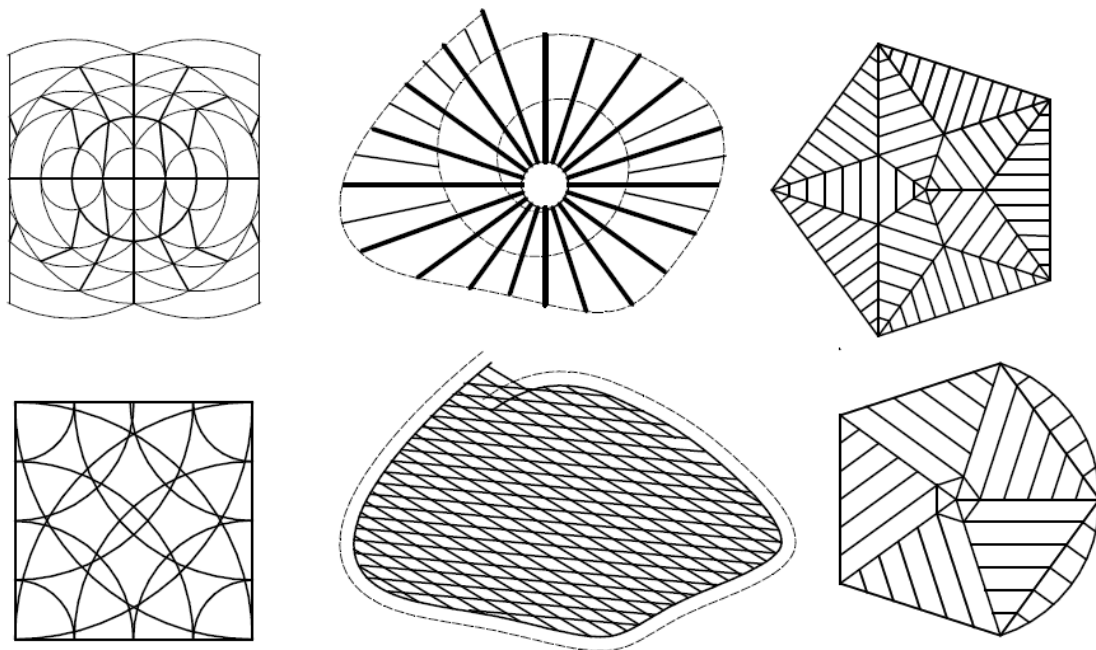
Tablica 5.4. Geometria kształtowania planu różnorodnych systemów konstrukcyjnych w układach regularnych, na planie kwadratu



Tablica 5.5. Geometria kształtowania planu różnorodnych systemów konstrukcyjnych w układach centrycznych - regularnych, na planie koła



Tablica 5.6. Możliwości kształtowania rzutów konstrukcji - przykłady bez przyporządkowania układom konstrukcyjnym



5.4. Klasyfikacja systemów konstrukcyjnych z drewna klejonego

Poniżej przedstawiono próby klasyfikacji rozwiązań konstrukcyjnych z zastosowaniem elementów z drewna klejonego dokonane przez kilku autorów. Ze względu na wspomnianą trudność w przypisaniu konkretnych obiektów do określonej grupy układów konstrukcyjnych, przedstawiono również własną klasyfikację w oderwaniu od istniejącej, natomiast w odniesieniu do technologii wytwarzania elementów konstrukcyjnych z drewna klejonego.

I. Istniejąca klasyfikacja systemów konstrukcyjnych z drewna klejonego

A. Ze względu na kształtowanie form (rodzaj brył), [143]:

- 1) Konstrukcje o prostych zależnościach geometrycznych:
 - a. typowe: halowe,
 - b. nietypowe: brył przewieszonych i podpartych punktowo.
- 2) Konstrukcje trzonowe: wspornikowe i wieszarowe.
- 3) Konstrukcje form „swobodnych”:
 - a. konstrukcje form strukturalnych,

- b. konstrukcje form naśladowujących,
- c. konstrukcje o formie rzeźbiarskiej.
- 4) Konstrukcje form zniekształconych.
- 5) Konstrukcje form wychylonych.

B. Ze względu na budowę konstrukcyjną elementów nośnych, [104]:

Konstrukcje przekryć:

- 1) Konstrukcje belkowe.
- 2) Konstrukcje rusztowe.
- 3) Konstrukcje mieszane.
- 4) Konstrukcje specjalne:
 - a. konstrukcje krążynowo-siatkowe,
 - b. konstrukcje łupinowe:
 - (1) łupiny cylindryczne,
 - (2) łupiny konoidalne,
 - (3) łupiny dwukrzywiznowe,
 - c. tarczownice pryzmatyczne.
- 5) Konstrukcje trójkątne trójprzegubowe.
- 6) Konstrukcje łukowe.
- 7) Konstrukcje kratowe.
- 8) Konstrukcje ramowe.
- 9) Kopyły drewniane.

C. Ze względu na budowę konstrukcyjną elementów nośnych, [129]:

Konstrukcje drewniane dużych rozpiętości:

- 1) Belki swobodnie podparte.
- 2) Ramy.
- 3) Łuki dwu- i trójprzegubowe.
- 4) Kratownice: proste i zakrzywione.
- 5) Ruszty.
- 6) Płaskie struktury.
- 7) Łupiny krótkie i długie.
- 8) Kopyły.

- 9) Konstrukcje dwukrzywiznowe w tym prostokreślne.
- 10) Jedno – i dwukrzywiznowe przekrycia wiszące.

D. Ze względu na budowę konstrukcyjną elementów nośnych, [178]:

Systemy konstrukcyjne:

- 1) Systemy aktywne masą – systemy o najprostszej geometrii uchodzące za najbardziej uniwersalne, najłatwiej przyswajające części innych systemów:
 - a. układy belkowe,
 - b. ruszty,
 - c. układy ramowe.
- 2) Pionowe systemy konstrukcyjne.
- 3) Systemy konstrukcyjne aktywne płaszczyznami – płaszczyzny jako zasadnicze części systemu nośnego budowli.
- 4) Systemy konstrukcyjne aktywne formą – geneza ich wywodzi się z konstrukcji liniowych przenoszących „czyste” rozciąganie i podpieranym ściskanymi słupami. Podstawową cechą tych systemów jest fakt, że ich nośność wynika z formy albo, że obrazują one formą i materią naturalną ścieżkę przebiegu sił. Mogą występować jako elementy innych struktur nośnych. Są uważane za odpowiednie dla konstruowania form architektury przyszłości.
 - a. siatki,
 - b. membrany,
 - c. kopuły kratowe,
 - d. konstrukcje namiotowe, żaglowe, łukowe.
- 5) Systemy konstrukcyjne aktywne wektorowo – pręty o proporcjonalnie małych przekrojach poprzecznych tworzą stosunkowo duże konstrukcje. Pracują tylko na obciążenia osiowe. Rozciągane i ściskane pręty tworzą sztywne pola trójkątne będące cechą charakterystyczną systemów aktywnych wektorowo. Zewnętrzne obciążenia przenoszone są przez ułożone w różnych kierunkach pręty połączone sztywnymi węzłami. W efekcie tworzy to strukturę. Do tej grupy należą takie konstrukcje jak: dźwigary, ramy, kratownice przestrzenne, konstrukcje wiszące i mosty. W węzłach najczęściej wykorzystuje się kąty 45 i 60 stopni. To ukształtowanie prętów pozwala na swobodę w kształtowaniu wolnej od podpór przestrzeni. Przyszłość tych struktur

to udoskonalanie węzłów i dalsza ich perfekcja w skali przekrojów elementarnych prętów.

6) Mobilne systemy konstrukcyjne.

E. Ze względu na pracę statyczną elementów nośnych, [352].

1) Prętowe:

- a. belki: proste i zakrzywione z drewna klejonego, o przekroju stałym lub zmiennym, wśród których, z uwagi na schemat statyczny – wyróżnia się: wolno podparte, jedno- lub obustronnie zamocowane, ciągłe przegubowe i inne,
- b. układy belkowe, takie jak ruszty,
- c. konstrukcje trójkątne trójprzegubowe,
- d. kratownice płaskie i przestrzenne,
- e. łuki trójprzegubowe lub dwuprzegubowe,
- f. ramy: płaskie i przestrzenne.

2) Powierzchniowe:

- a. powłoki pełne,
- b. powłoki siatkowe,
- c. kopuły żebrowe,
- d. kopuły powłokowe,
- e. przekrycia membranowe,
- f. przekrycia pneumatyczne,
- g. konstrukcje mobilne.

F. Klasyfikacja własna systemów konstrukcyjnych z drewna klejonego

[1] Układy z belek prostych

1.1. Układy płaskie z belek prostych

1.2. Układy płaskie z belek prostych hybrydowych: drewniano- stalowych, kratownice

1.3. Proste układy przestrzenne z belek prostych: ruszty i struktury przestrzenne

[2] Układy ramowe

[3] Układy z belek zakrzywionych

3.1. Układy płaskie z belek zakrzywionych

3.2. Układy płaskie z belek zakrzywionych hybrydowych: drewniano- stalowych

3.3. Układy zakrzywione kratownic przestrzennych

3.4. Kopyły

[4] Konstrukcje wiszące

[5] Systemy siatkowe

[6] Układy wspornikowe

W zakresie rozwiązań związanych z kształtowaniem planu wyróżniono następujące typy układów:

- 1) Układy proste geometrycznie o prostych rzutach: centryczne lub na planie podłużnym.
- 2) Układy proste geometrycznie o nieregularnych rzutach: centryczne lub na planie podłużnym.
- 3) Układy o prostych geometrycznie przekryciach i eksponowanych strukturach elewacji.
- 4) Układy o miękkich formach, prostych rzutach: centryczne lub na planie podłużnym.
- 5) Układy o unikatowych i niekonwencjonalnych rozwiązaniach bazujących na prostych zależnościach geometrycznych.
- 6) Układy jednego dominującego, dynamicznego elementu przestrzennego podkreślającego dystrybucję sił.
- 7) Układy kilku „mocnych” geometrycznie, dopełniających się, dynamicznych elementów przestrzennych podkreślających ekspresję sił.
- 8) Układy pozornie swobodne oparte o proste geometryczne zależności kilku przenikających się płaszczyzn.
- 9) Układy z wyeksponowaną, unikatową strukturą konstrukcyjną, bazującą na rozwiązaniach inspirowanych budową organiczną tworów natury.

Najbardziej rozpowszechnione przy konstruowaniu konstrukcji z drewna klejonego, nawet przy pozornie skomplikowanej bryle, są układy statyczne zwane układami płaskimi (obciążone zasadniczo w swojej płaszczyźnie). Jest to podejście przybliżone, ponieważ konstrukcje rzeczywiste nigdy nie są płaskie. Zawsze istnieje przestrzenna współpraca pomiędzy zasadniczymi elementami nośnymi. Przybliżenie to jest jednak wystarczająco dokładne, kiedy w rzeczywistym układzie prętów układ statyczny wraz z obciążeniami spełnia „warunki płaskości”, które można określić następująco: [1] W jednej i tej samej

płaszczyźnie znajdują się: osie podłużne wszystkich prętów, jedna z osi głównych każdego poprzecznego przekroju pręta, linia działania obciążeń, [2]. Węzły podporowe uniemożliwiają przemieszczenia (większe od dopuszczalnych) z tej płaszczyzny, np.: równoległe do siebie ramy, kratownice etc. lub pozornie równoległe – biegnące po łuku wymiarowane są każda w swojej płaszczyźnie. Jako płaskie traktuje się również konstrukcje usztywniające prostopadłe do w/w głównych układów konstrukcyjnych, przenoszące również odpowiednie składowe obciążeń, zapewniające stateczność dźwigarów głównych. Niektóre elementy, jak np.: słupy, pracują w dwóch płaszczyznach, co nie koliduje z płaskim stanem układu. Układy płaskie są to układy statycznie wyznaczalne lub statycznie niewyznaczalne, rozwiązywane w statyce klasycznej metodami znanymi np. metodą sił, metodą przemieszczeń, metodami mieszanymi lub innymi (przybliżone metody, badania modelowe, metoda elementów skończonych, metody asymptotyczne, etc.) Statycznie niewyznaczalne - to układy posiadające nadliczbowe węzły, przy czym ilość węzłów w danym układzie nie może być mniejsza jak dla układu statycznie wyznaczalnego, bowiem taki układ nie będzie stateczny. Układy przestrzenne to układy, które nie dają się „rozłożyć” na układy spełniające podane wyżej warunki płaskiego stanu. Układy konstrukcyjne przestrzenne, w których powierzchnia bezwładności wykształcona jest w postaci powłok, płyt, tarczownic lub innych, można wymiarować jako dźwigary powierzchniowe. Metoda modelowania statycznego do obliczeń konstrukcji została wynaleziona przez Prof. M. Tupolewa, przy zastosowaniu analizy układu tzw. struktury kryształu, tj., modelowanie układu dyskretnego za pomocą trójkątów lub figur piramidalnych. W analizie i obliczeniach konstrukcji przestrzennych wykorzystanie symetrii ma pierwszorzędne znaczenie dla znacznego uproszczenia obliczeń. Inną metodą obliczeń jest metoda elementów skończonych. Metoda elementów skończonych w analizie statycznej i analizie stateczności konstrukcji przestrzennych polega na ułożeniu matematycznego zapisu węzłów oraz sił w tzw. układach dyskretnych. Polega ona na generowaniu w tzw. zapisie macierzowym modelu ustroju wraz z węzłami i siłami oddziałującymi na ten ustrój. Metodę tą stosuje się w obliczeniach komputerowych dotyczących statyki, stateczności i dynamicznej analizy obliczeń obciążeń krytycznych, etc., [21]. Za fundamentalną pracę w obszarze metody elementów skończonych oraz konstrukcji przekładkowych można uznać pracę prof. Zbigniewa Brzoska, [24]. Badania konstrukcji przestrzennych za pomocą ośrodków siatkowych [45] polegają na ułożeniu geometrii dyskretnego, przestrzennego zbioru punktów i, po analizie obliczeniowej wpływu obciążenia zewnętrznego na naprę-

żenia wewnątrz tego układu, przekształceniu rachunkowym przestrzeni ciągłej do elementów nieciągłych.

Wszystkie skomplikowane struktury przestrzenne oblicza się aktualnie za pomocą programów komputerowych, które sprowadzają pracę do zapisania i obliczenia dużej ilości układów równań, najczęściej liniowych, z odpowiednią dużą ilością niewiadomych. Przy obliczeniach za pomocą programów komputerowych prostszych konstrukcji, układów prostych lub przestrzennych należy uzyskane wyniki analizować krytycznie, bowiem w programowaniu trudno jest uwzględnić wszystkie wpływy redystrybucji sił wewnętrznych w konstrukcjach statycznie niewyznaczalnych. Oznacza to, że elementy sztywniejsze, z reguły, przenoszą większą część obciążenia niż im przypisano, lub generują „pozytywne efekty” zachowania się całego układu konstrukcyjnego przy obciążeniach dynamicznych z zewnątrz (np. tzw. efekt aerodynamiczny odpowiedzi, tj. dostosowania się konstrukcji do obciążenia wiatrem). Stateczność konstrukcji to cecha konstrukcji dążącej do zachowania wstępnej formy równowagi w stanie zdeformowanym poza płaszczyznę działania obciążeń. Przy stale działających siłach stateczność nie jest zjawiskiem nieograniczonym. Kiedy ta cecha konstrukcji zostanie wyczerpana, układ konstrukcyjny traci stabilność i przy małym przyroście obciążenia może wystąpić awaria.

5.5. Układy formowane z belek prostych

Za pomocą prostych elementów z drewna klejonego można zrealizować następujące typy konstrukcji:

- 1) Układy płaskie z belek prostych.
- 2) Układy płaskie z belek prostych hybrydowych: drewniano- stalowych.
- 3) Kratownice.
- 4) Ruszty.
- 5) Struktury przestrzenne.

I. Układy płaskie z belek prostych, o rozpiętości do 40 m, [259]:

- 1) Belki proste.
- 2) Belki trapezowe dwuspadowe.
- 3) Belki trapezowe jednospadowe.
- 4) Belki wieloprzęsłowe.
- 5) Belki drugorzędne takie jak: płatwie, rygle, elementy stężeń kratownic, etc.

II. Układy płaskie z belek prostych hybrydowych drewniano- stalowych, kratownice, o rozpiętości do 80 m:

- 1) Belki proste, hybrydowe, drewniano – stalowe.
- 2) Kratownice z drewna klejonego.
- 3) Kratownice hybrydowe, drewniano – stalowe.

III. Proste układy przestrzenne z belek prostych o rozpiętości do 140 m:

- 1) Ruszty.
- 2) Struktury przestrzenne.

Elementy proste o przekroju prostokątnym są podstawowym elementem konstrukcyjnym właściwym dla wielu zastosowań, zarówno na dźwigary główne jak i elementy płatwiowe, belki stropowe, stężenia wiatrowe, rygle, elementy elewacji i inne. Mniejsze elementy proste mogą stanowić części kratownic, rusztów i siatek.

Proste układy geometryczne dają duże możliwości konstruowania układu nośnego do rozpiętości ok. 120 m, przy zachowaniu wysokiej ekonomii, optymalizacji projektowania, produkcji i montażu. Prostota konstruowania struktury nośnej nie ogranicza twórczego

projektowania form i stwarza możliwości dla nowatorskiej architektury, co pokazują przykłady zrealizowanych obiektów. Zdarza się, że jakość architektoniczna zostaje przesunięta na dalszy plan i nadrzędne stają się zapewnienie wymogów konstrukcyjnych, funkcjonalnych oraz dostosowanie bryły do funkcji technologicznych.

Elementy proste z drewna klejonego są najłatwiej i najszybciej dostępnym elementem konstrukcyjnym, produkowanym standartowo w wielu wymiarach, o szerokości przekroju 6-24 cm, wysokości przekroju 12- 60 cm i długości do kilkudziesięciu metrów. Belki standardowe nie są projektowane indywidualnie, natomiast stwarzają możliwości projektowania indywidualnych form. Układy belkowe wykorzystywane są też w pełnych, masywnych dźwigarach nośnych. Dźwigary wielkogabarytowe, produkowane według indywidualnych projektów, osiągają długości 50 m i wysokości do 260 cm. Charakterystyczne dla układów płaskich z belek prostych są:

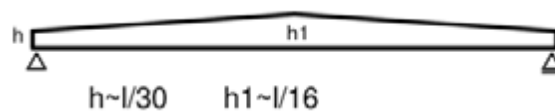
- 1) Proste układy geometryczne.
- 2) Uprozczone zasady wymiarowania przekrojów w celu przyjęcia gabarytów do koncepcji.
- 3) Otwarte plany.
- 4) Siatki modularne.
- 5) Rytm i powtórzenia w jednej lub dwóch płaszczyznach przestrzennych.
- 6) Proste bryły o technologicznej jednorodności.

5.5.1. Układy płaskie z belek prostych

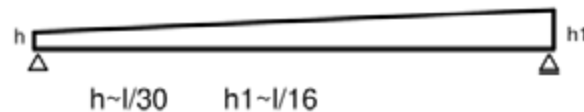
- 1) Belki proste.

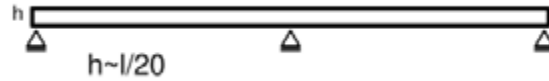


- 2) Belki trapezowe dwuspadowe.



- 3) Belki trapezowe jednospadowe.

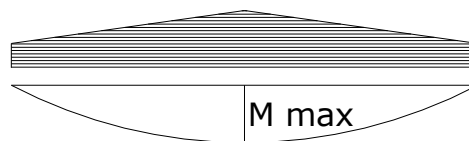




- 4) Belki wieloprzęsłowe.
- 5) Belki drugorzędne, takie jak: płatwie, rygle, słupy, elementy kratownic.

Układy belkowe są zdefiniowane przez powtarzalną geometrię, opartą na zasadzie przenoszenia obciążeń przez masę przekroju poprzecznego dźwigarów i przekazywania reakcji na skrajne podpory. Wymiary przekroju i rozpiętości belek ograniczone są przez możliwości produkcyjne, technologiczne oraz transportowe. Belki proste z drewna klejonego są ekonomiczne przy rozpiętościach do 30 m, natomiast belki proste w jednym odcinku można stosować dla rozpiętości do ok. 50 m. Zastosowanie dłuższych elementów jest ograniczone ze względu na długości prasy, w której skleja się lamele oraz możliwości transportowe, np. najdłuższe dźwigary przewożone przez Polskę zazwyczaj nie powinny przekraczać 45 m, a już przy długości od 30 m wymagana jest konsultacja trasy na miejsce budowy, o czym wspomniano wcześniej. Rodzaj obciążeń, jakim będzie poddana konstrukcja, także jest nie bez znaczenia. Wraz ze wzrostem rozpiętości wzrasta wysokość przekroju belki. Niezbędna do ich przeniesienia wysokość przekroju jest ograniczona przez względy produkcyjne. Wysokość przekroju możliwa obecnie do uzyskania ze względów technologicznych waha się od 180 cm do 260 cm.

Przy większych rozpiętościach stosuje się belki o przekroju zmiennym na długości, zwiększając ich wysokość najczęściej w przekroju środkowym, w miejscu największych naprężeń i największego momentu zginającego.



Rys. 5.25. Belka trapezowa dwuspadowa z drewna klejonego warstwowo.

Belka trapezowa powstaje poprzez ścięcie górnej płaszczyzny. Może być dwuspadowa, symetryczna z największą wysokością w środku rozpiętości lub jednospadowa, którą stosuje się w konstrukcjach wspornikowych. Belki trapezowe o prostoliniowym pasie dolnym stanowią ekonomiczne rozwiązanie ze względu na geometrię dopasowaną do przebiegu obwiedni momentów zginających oraz nachylenia dachu. Wierzchnia płaszczyzna belki nachylona jest najczęściej pod kątem 2-5°, co odpowiada minimalnemu nachyleniu

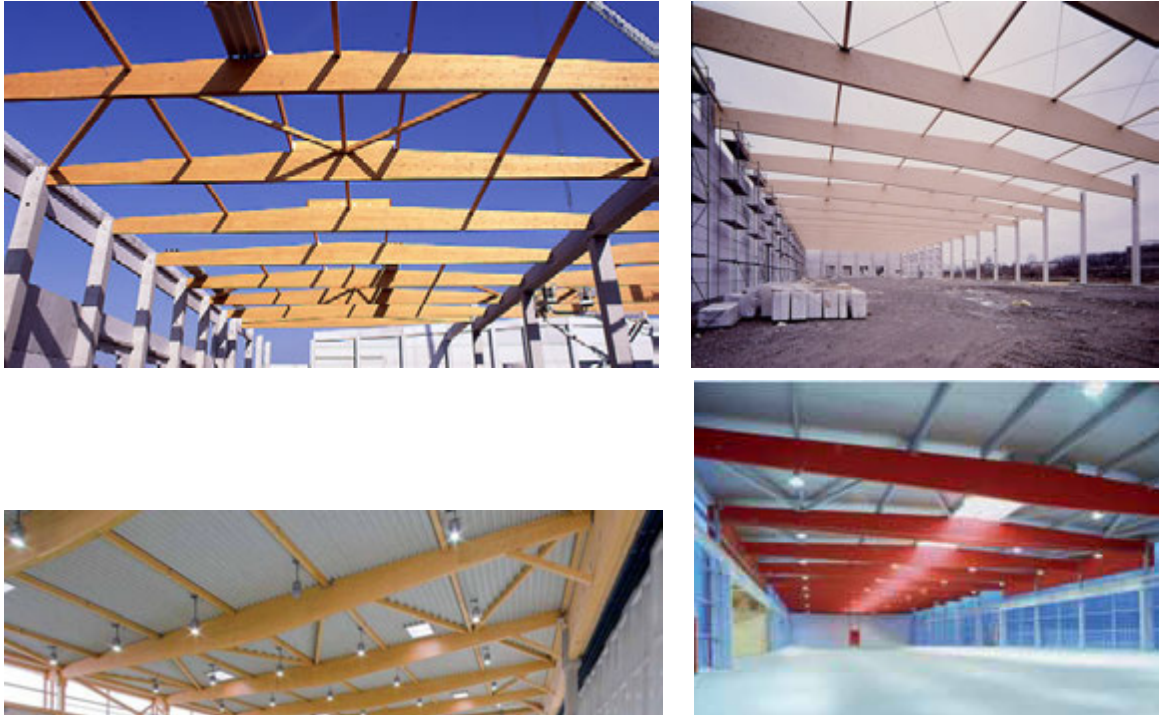
połaci dachu, zależnemu od przyjętego rodzaju przekrycia. Dzięki takiemu nachyleniu, w miejscu największego naprężenia, powstaje powierzchnia przekroju niezbędna do przejścia momentu zginającego. Pole poprzeczne na podporze jest najmniejsze, ponieważ moment jest tu mały, natomiast dużą rolę odgrywają siły ścinające.

Belkom prostym, w procesie produkcyjnym, można nadać łagodną krzywiznę niewielkiego łuku, odpowiadającego ugięciu, tzw. odwrotną lub wstępną strzałkę ugięcia. Wysokość krzywizny niweluje ugięcia, które powstaną po całkowitym dociążeniu konstrukcji.

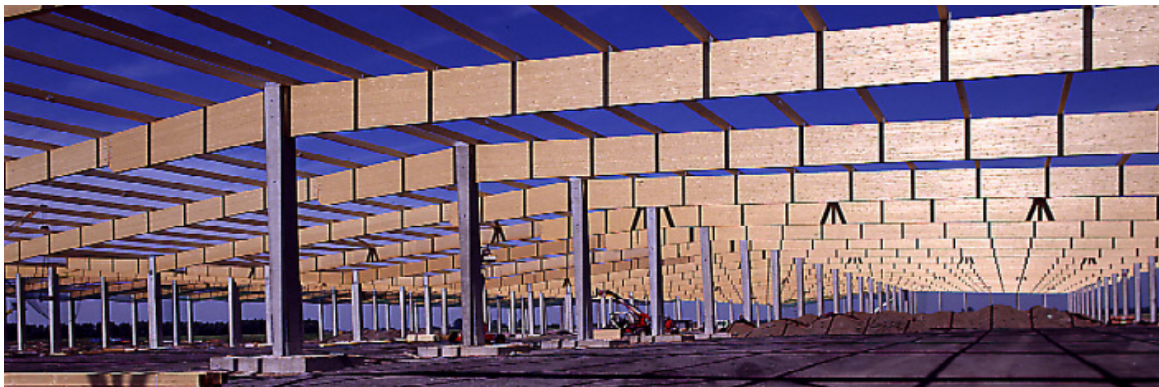
Proste dźwigary, swobodnie podparte, są stosowane dla rozpiętości od kilkunastu do ok. 50 m. Stąd, ze względu na duże wysokości przekrojów, niezbędne jest ich usztywnienie w płaszczyźnie poprzecznej, co można realizować na kilka sposobów. Stężenia wykonuje się za pomocą taśm lub prętów stalowych, specjalistycznych naciągów, belek z drewna klejonego, blach trapezowych lub płyt dachowych.

Belki wieloprzęsłowe oparte na kilku podporach, ze względu na lepszą pracę statyczną, pozwalają na lepsze wykorzystanie materiału niż w belkach podpartych jednoprzęsłowych. Z uwagi na korzystniejszy rozkład momentów gnących, zoptymalizowane zostają zginanie i rozkład naprężeń. Belki wieloprzęsłowe należą do preferowanych w budownictwie halowym, ze względów ekonomicznych. W celu przejścia dużych momentów podporowych można tu zastosować, zwiększając przekrój, dodatkowe elementy drewniane, doklejane do pasa dolnego. Przy dużych rozpiętościach, dla ułatwienia transportu i montażu, stosuje się w belkach ciągłych połączenia w przekrojach, gdzie wartości momentów zginających są zerowe. Słupy pośrednie i skrajne można wykonywać z różnych materiałów, np. słupy pośrednie żelbetowe (stalowe) sztywno zamocowane, zaś słupy skrajne zamocowane przegubowo z drewna klejonego. Zastosowanie wspornika lub wsporników z dwóch stron obiektu jest jeszcze bardziej ekonomiczne, gdyż zoptymalizowany zostaje rozkład momentów zginających, [335].

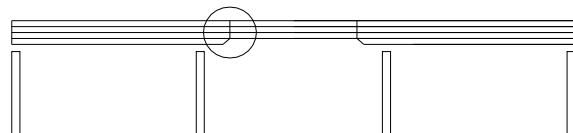
Na rys. 5.26 – 5.28 przedstawiono konstrukcje z drewna klejonego o prostych układach belkowych.



Rys. 5.26. Belka trapezowa dwuspadowa niesymetryczna zastosowana w hali produkcyjnej, [335].



Rys. 5.27. Hala produkcyjna z zastosowaniem belki wieloprzęsłowej, [335].



Rys. 5.28. Połączenie belki wieloprzęsłowej na tzw. złącze Gerbera, [335].

Tam, gdzie nie jest możliwe układanie pokrycia dachowego na samych dźwigarach, stosuje się, jako drugorzędną konstrukcję nośną, tzw. system płatwiowy. Pokrycie dachu,

w zależności od zastosowanego materiału, można tutaj wykonać bezpośrednio na dźwigarach bez dodatkowej konstrukcji nośnej jak i na płatwiach mocowanych do dźwigarów.

Systemy płatwiowe dzielą się na jednopolowe i wielopolowe. W tych drugich występują płatwie wieloprzęsłowe i przegubowe. Ze względu na rozkład momentów zginających, system płatwii ciągłych jest najbardziej ekonomiczny. Zwiększa on jedynie wysokość konstrukcji hali, gdyż płatwie ciągłe układane są na pasie górnym dźwigarów. Gdy stosuje się płatwie dwuprzęsłowe, podpora środkowa przenosi obciążenia o 25% większe niż podpory skrajne. Skłania to do wyboru systemu innego niż dwuprzęsłowego ze względu na równomiernie rozkładające się obciążenie konstrukcji. Dotyczy to również blach trapezowych, układanych wzdłuż osi podłużnej obiektu. Alternatywnie, można przy wyborze systemu dwupolowego uciec się do przesunięcia punktów połączeń płatwii o jedno pole względem sąsiadującego rzędu płatwii. Przy większych spadkach płatwie można układać albo zgodnie ze spadkiem, co generuje schemat dwuosiowego zginania (zginanie ukośne) albo pionowo, pomiędzy dźwigarami głównymi, jako płatwie jednopolowe.

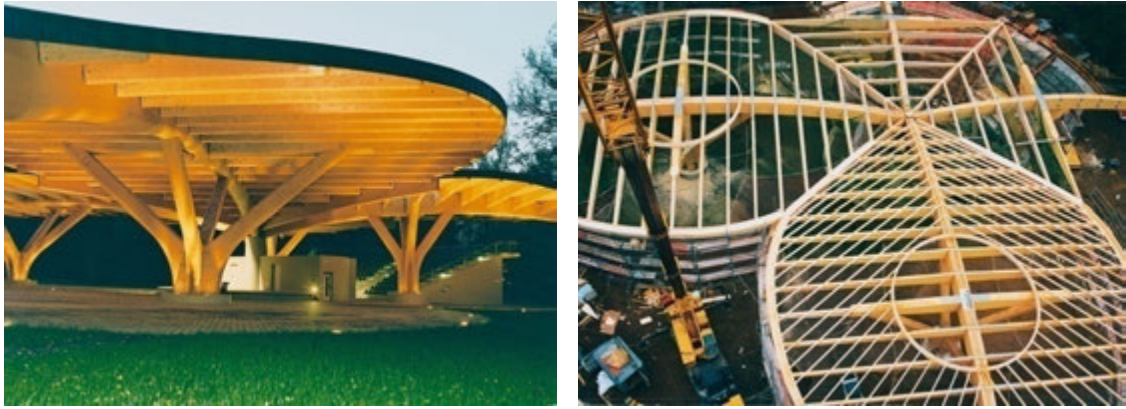
W takim przypadku, należy tak przyciąć krawędzie płatwii, aby kąt ścięcia odpowiadał nachyleniu połaci dachu, [335].

Konstrukcje z belek prostych o nieregularnych formach. Wybrane realizacje.

Na rys. 5.29 – 5.35 przedstawiono przykłady obiektów o nieregularnych formach utworzonych z układów belek prostolinijnych.



Rys. 5.29. Cloef-Atrium Besucher- und Tagungszentrum, Mettlach-Orscholz Saarland. Architektura: Wandel-Hoefler-Lorch Architekten GmbH. Konstrukcja: Geber + Müller, [227].



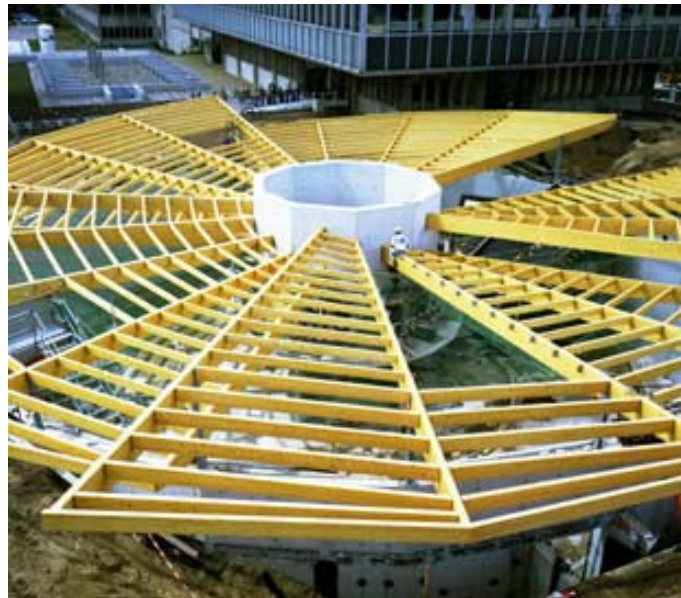
Rys. 5.30. Open air theater, Bad Lausik w Niemczech, [327].



Rys. 5.31. Belki proste w układach centralnych bardzo często wykorzystuje się w obiektach na planach koła o stosunkowo niewielkiej średnicy lub w obiektach gdzie można zastosować wewnętrzną podporę, [335].

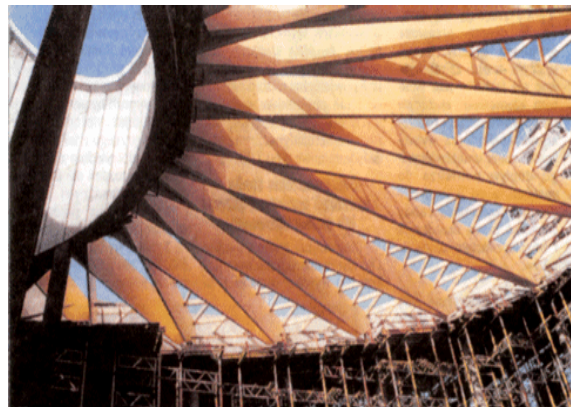


Rys. 5.32. Quellpavillon Bad Hersfeld, Architektura: Bode Petters Architekten BDA. Konstrukcja:Wetzel & von Seht Ingenieure im Bauwesen . Wymiary: 25 m x 80 m., [234].



Rys. 5.33. Sumo Stadium, Japan, [353].

Rys. 5.34. Uniwersytet Nijmegen, [335].

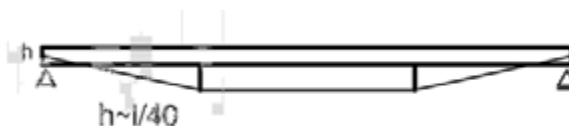


Rys. 5.35. Pergola na planie koła, [327], Sanktuarium Miłosierdzia Bożego w Łagiewnikach. Architektura: W. Cenckiewicz, [335].

Przekrycie Sanktuarium Miłosierdzia Bożego w Łagiewnikach jest nowatorskim rozwiązaniem architektonicznym i konstrukcyjnym wykorzystującym elementy proste o zmiennym przekroju jako elementy podstawowe nośne oraz, jako elementy drugorzędne - o mniejszych przekrojach, układane po różnych kątach w stosunku do dźwigarów głównych. Rozwiązanie jest unikalne również ze względów technologicznych. Przekrycie na planie elipsy o rozpiętości 36 m wymagało zastosowania nietypowej dotąd zasady wzajemnego przenikania się pod kątem ostrym podstawowych elementów nośnych o wymiarach 20 x 200 cm o długościach 20 do 38 m. Dodatkowym utrudnieniem było zróżnicowanie długości dźwigarów oraz kątów ich przenikania. Mimo że koszty konstrukcji stalowej początkowo wydawały się niższe, to ostatecznie, biorąc pod uwagę wydatki konieczne dla uzyskania efektów architektonicznych, bardziej nowatorska i optymalna okazała się konstrukcja z drewna klejonego, [87].

5.5.2. Układy płaskie z belek prostych, hybrydowych drewniano - stalowych, kratownice

- 1) Belki proste hybrydowe drewniano – stalowe.



- 2) Kratownice z drewna klejonego.
- 3) Kratownice hybrydowe drewniano – stalowe.

Najbardziej efektywnym rozwiązaniem, z powodów ekonomicznych, transportowych i wytrzymałościowych, jest stosowanie belek prostych o pełnych przekrojach, wzmocnionych cięgnami stalowymi a także elementami z drewna klejonego i stali, które łączy się w układy kratownicowe. Stosowanie cięgien i wzmocnień stalowych wynika z analizy obwiedni momentów gnących. Cięgna przejmują siły rozciągające, ale zastosowanie układów hybrydowych jest także korzystne ze względów wizualnych. Zbyt wysokie dźwigary pełne, jakie występują w typowych układach belkowych, zostają zastąpione dźwigarami o mniejszych rozmiarach. Zastosowane cięgna intensyfikują wizualne odczu-

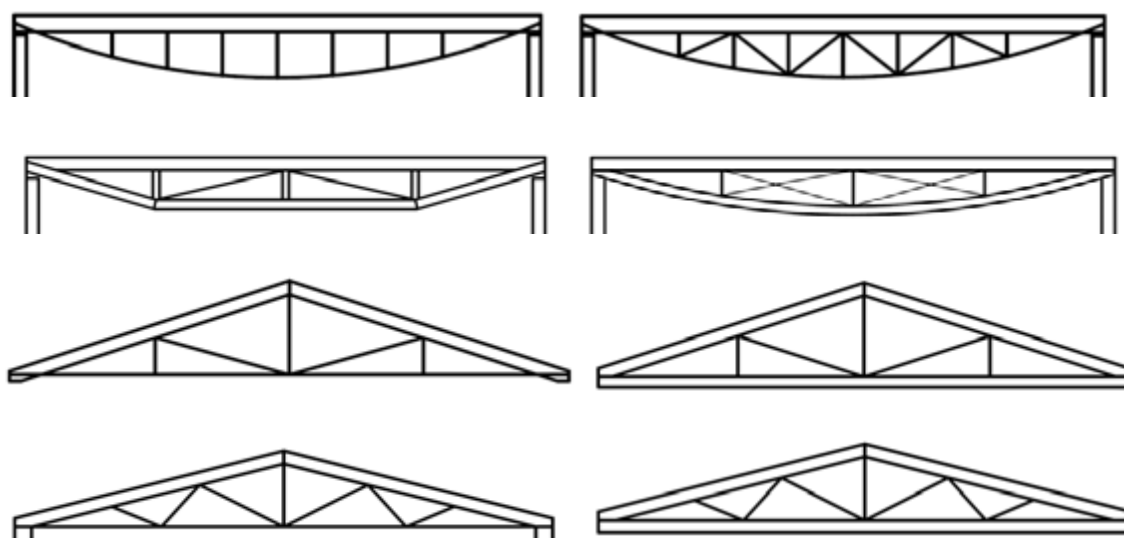
cie lekkości i obrazują przebieg odkształceń i sił (naprężeń). Przestrzeń stropodachu się zmniejsza, co jest korzystne dla prawidłowej wentylacji.

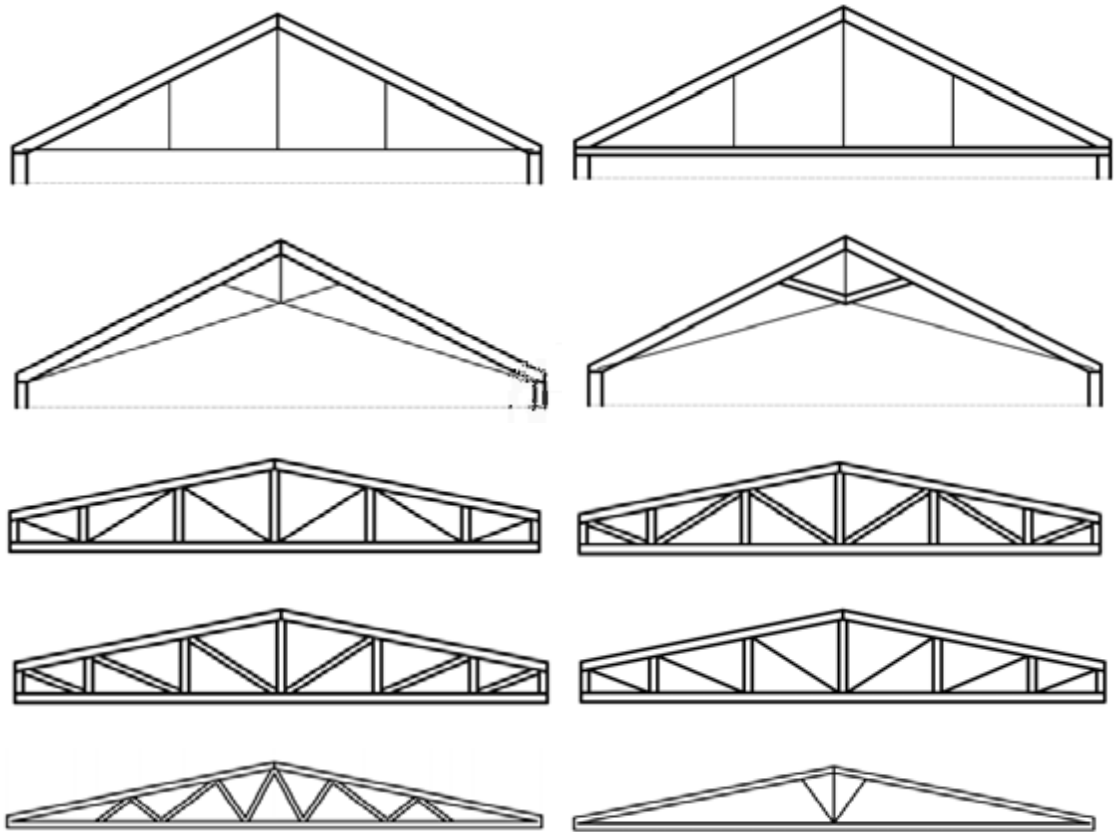
Połączenie dźwigarów prostych w układy hybrydowe, drewniano – stalowe jest najbardziej charakterystyczne dla współczesnej architektury i obiecujące dla przyszłych zastosowań, ponieważ nośność dźwigarów wzmacnianych cięgnami stalowymi zostaje podniesiona nawet o kilkadziesiąt procent.

Systemy kratownicowe wykonuje się z elementów z drewna klejonego zarówno jako systemy płaskie jak też przestrzenne. Pas górny jest wykonany zazwyczaj jako belka o pełnym przekroju, prosta lub łukowa. Pas dolny może być również realizowany za pomocą przekroju pełnego z drewna klejonego, ponieważ przejmuje ono zarówno ściskanie jak i rozciąganie, lub z prętów i cięgien stalowych.

Jak pokazują liczne przykłady, dźwigary hybrydowe mogą mieć różnorodne kształty. Podstawową zaletą tych układów jest zwiększenie rozpiętości. Wadą jest konieczność czasochłonnych w zastosowaniu i kosztownych łączników. Przekroje zawierające łączniki i same łączniki są też najbardziej narażonymi na awarie elementami konstrukcji i wymagają szczególnie starannego doboru, projektowania i wykonawstwa. „Perforacja” dźwigarów daje też specyficzne efekty architektoniczne. Rzadziej stosuje się kratownice wykonane jedynie z drewna klejonego. Są one bardziej masywne, stąd ciężkie w wizualnym odbiorze.

Tabela 5.7. Przykładowe schematy układów kratownicowych płaskich.





Na rys. 5.36 – 5.46 przedstawiono przykładowe rozwiązania architektoniczne z użyciem kratownic hybrydowych, (tabela 5.8 i 5.9)



Rys. 5.36. Hala sportowa w Erding Niemcy. Architektura: Claus Und Foster, [326].



Rys. 5.37. Sporthale Hausburgviertel Berlin. Architektura: Chestnutt_Niess Architekten. Konstrukcja: Eisenloffel, Sattler und Partner, [227].

Rys. 5.38. Kratownica hybrydowa, [338].



Rys. 5.39. Hala sportowa w Dusseldorfie, [335].

Rys. 5.40. Centrum sportowe w Annemasse we Francji, [338].



Rys. 5.41. The Scottish Parliament, Edinburgh. Architektura: EMBT/RMJM Ltd. Konstrukcja: ARUP
Realizacja: 2004, [355], [303].



Rys. 5.42. Belki proste w układach kratownic, [335].



Rys. 5.43. Kratownica hybrydowa konstrukcji kościoła w Łodzi, [332].



Rys. 5.44. Ujeżdżalnia koni w ST. Herold, Niemcy, [326].

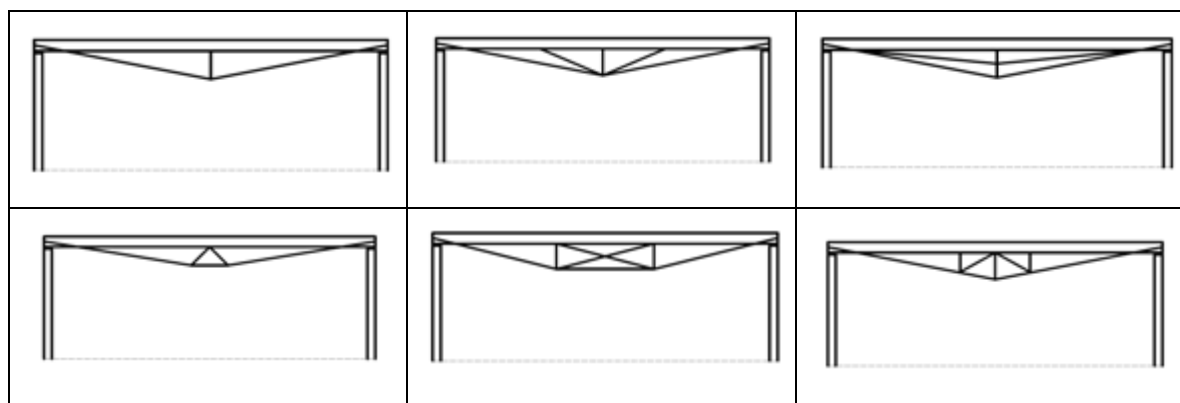


Rys. 5.45. Reitplatzüberdachung Windisch, Turnhalle Sisikon, Szwajcaria, Architektura: Meuli Architekten. Konstrukcja: Bois-Consult Natterer GmbH, [333].



Rys. 5.46. Centrum rządowe w Herne – Sodingen, Niemcy. Architektura: Jourda And Perraudin, [206].

Tabela 5.8. Dźwigary hybrydowe – przykłady rozwiązań



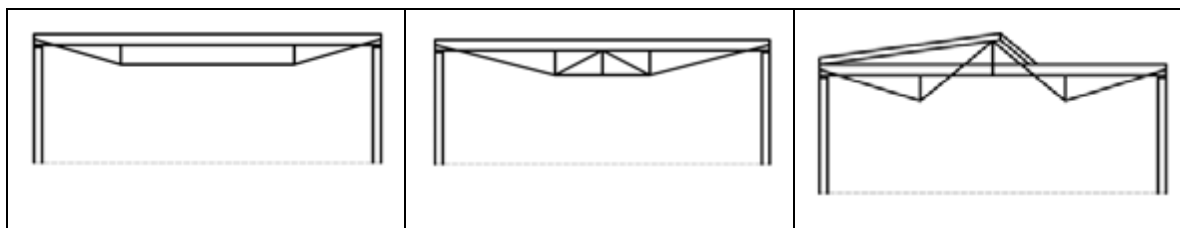
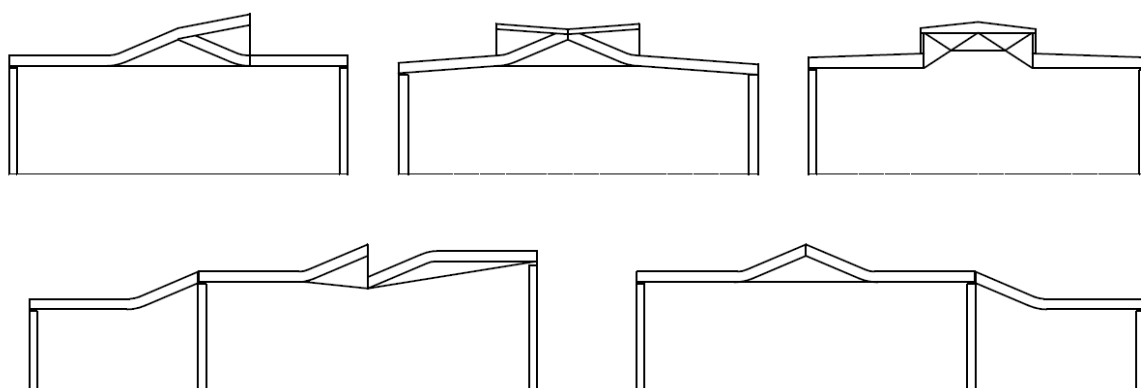
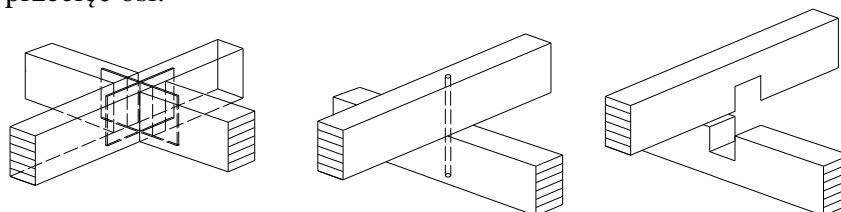


Tabela 5.9. Dźwigary hybrydowe – przykłady rozwiązań dźwigarów złożonych z wyniesieniem doświetlającym



5.5.3. Ruszty i struktury przestrzenne

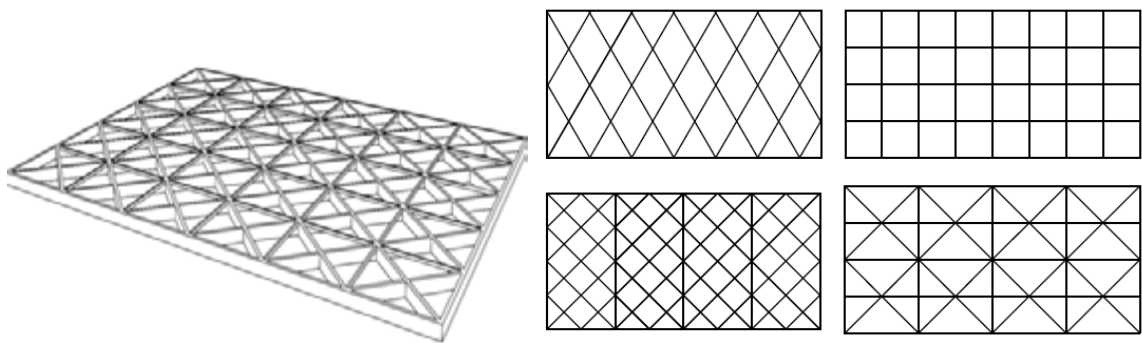
Ruszty to konstrukcje belkowe, w których belki biegną we wzajemnie prostopadłych kierunkach, [104]. Ruszt w planie może jednak tworzyć siatkę elementów przecinających się pod różnymi kątami, najczęściej 90° , 60° lub 45° . Systemy rusztów najlepiej stosować, gdy odległości pomiędzy podporami są takie same na wszystkich kierunkach i zbliżone co do wielkości do wymiarów pojedynczego pola. Tego typu układ pozwala na zmniejszenie wysokości elementów nośnych (obciążenia rozkładają się równomiernie we wszystkich kierunkach), z drugiej strony występują tu relatywnie drogie połączenia w miejscach przecięć osi.



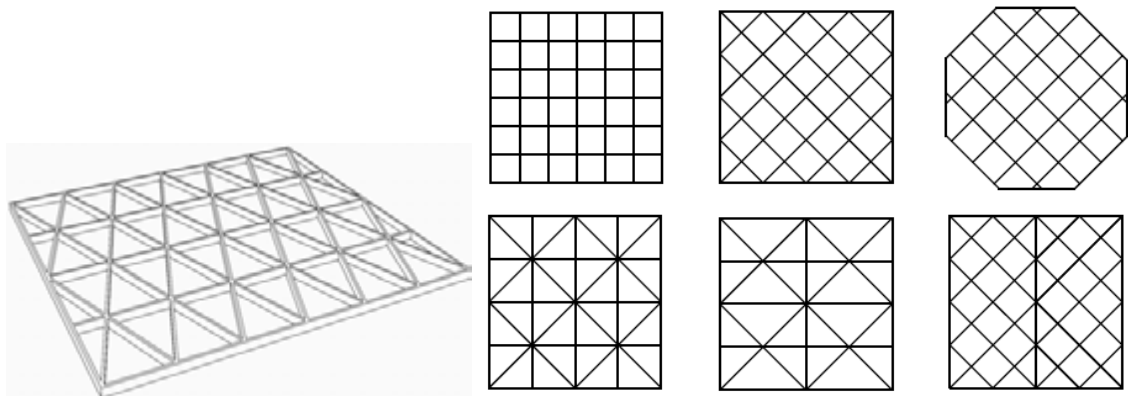
Rys. 5.47. Schemat sposobów łączenia belek rusztu: 1) na łączniki stalowe wbudowane w przekrój dźwigarów, 2) połączenie za pomocą śrub, 2) połączenie na wręby, [357].



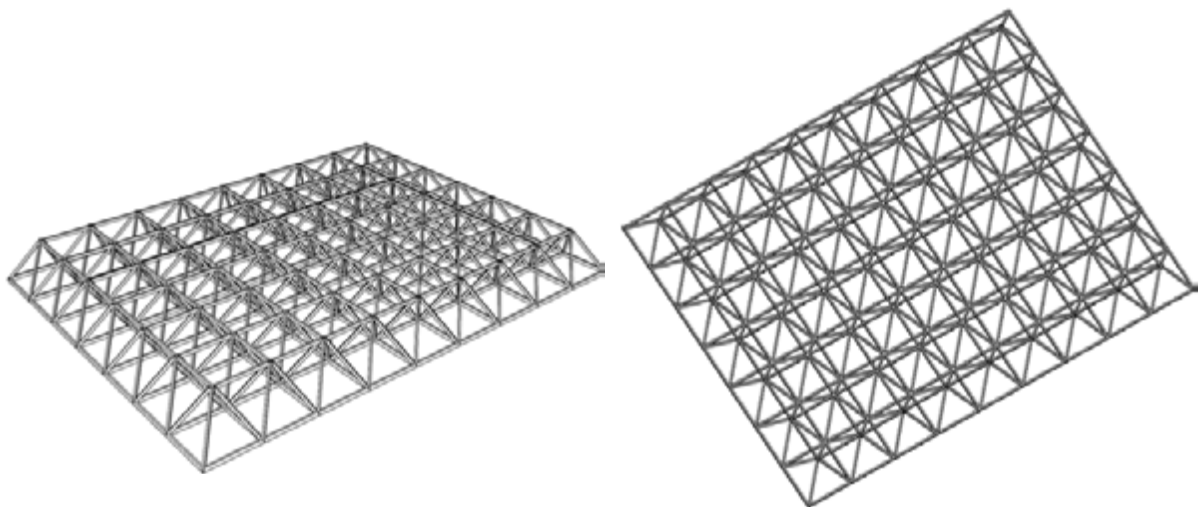
Rys. 5.48. Ruszty z dwugałęziowych dźwigarów z drewna klejonego łączonych na łączniki stalowe. Dodatkowy system płatwi również w układzie rusztu, [335].



Rys. 5.49. Geometria rusztów na planie prostokątnym, [357].



Rys. 5.50. Ruszt na planie kwadratowym, osie pod kątami 90° i 45° , [357].



Rys. 5.51. Schemat kształtowania struktur przestrzennych, [357].

Struktury przestrzenne z wykorzystaniem drewna klejonego są stosunkowo rzadko projektowane, pomimo tego, że elementy z drewna klejonego chętnie stosuje się w układach płaskich kratownic. Struktury przestrzenne są utworzone z równomiernie rozmieszczonych w przestrzeni prętów, połączonych ze sobą w węzłach w sposób przegubowy. Pręty i węzły tworzą układ wzajemnie dopełniających się brył, charakterystyczny dla danego typu struktury, [140]. Struktury wykonane z drewna charakteryzują się następującymi cechami: składają się z identycznych, krótkich elementów, co obniża koszt wyprodukowania, transportu i montażu, wykazują dużą elastyczność w kształtowaniu przestrzeni architektonicznej, szczególnie przy projektowaniu planu, a masa konstrukcji jest stosunkowo lekka w porównaniu do belek pełnych z drewna klejonego. Do wykonania struktur przestrzennych z drewna można wykorzystywać elementy z drewna klejonego o przekroju prostokątnym, okrągłym, a także lite drewno okrągłe, [103]. Największą trudnością w konstruowaniu struktur przestrzennych z drewna klejonego jest prawidłowe zaprojektowanie węzłów. Struktury prętowe, przestrzenne są rozpatrywane jako ustroje wielokrotnie statycznie niewyznaczalne i obliczane przez skomplikowane programy obliczeniowe. Istniejące realizacje prezentują struktury przestrzenne z drewna klejonego o rozpiętości zaledwie kilkudziesięciu metrów, podczas gdy stalowe konstrukcje struktur przestrzennych, przy odpowiednim ukształtowaniu, można stosować dla rozpiętości 100, 200 a nawet 300 m, [140].

Na rys. 5.52 – 5.63 przedstawiono przykłady architektury z wykorzystaniem rusztów i struktur przestrzennych.



Rys. 5.52. Konstrukcja rusztu o segmentach trójkątnych, [335].



Rys. 5.53. Centrum treningowe w Bourges. Realizacja: 2005. Architektura: Dominique Calvi, [314].



Rys. 5.54. Lloyd D. George United States Courthouse, Las Vegas, Architektura: Yazdani Studio Cannon Design. Realizacja: 2000, [356]



Rys. 5.55. Muzeum Abteiberg w Mönchengladbach. Architektura: Hans Hollein. Realizacja: 1982, [335].



Rys. 5.56. Budynek ratusza miejskiego w Yusuhara w Japonii. Architektura Kochi Kengo Kuma & associates . Duża rozpiętość przekrycia uzyskana przez zastosowanie rusztu przestrzennego Vierendeela, z belek z drewna klejonego. Przeniesienie nietypowej konstrukcji dachu na elewację, [268].



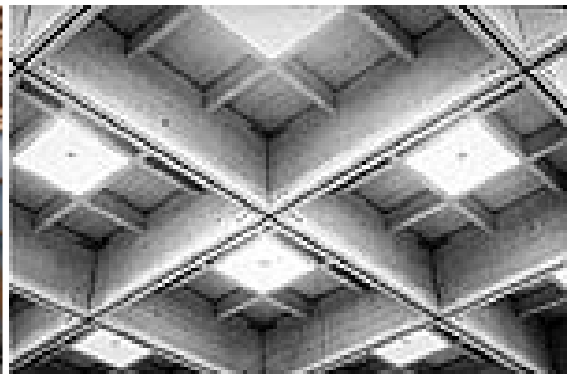
Rys. 5.57. Pawilon Japoński na Expo w Sewilli. Architektura: T. Ando. Konstrukcja: Takenaka, [344].



Rys. 5.58. Świątynia Komyo-ji w Saijo prefektura Ehime w Japonii. Architektura Tadao Ando. Nawiązanie do tradycyjnej techniki konstrukcyjnej daibutsu (lub tejiku). Konstrukcja ta wyróżnia się systemem wsporników, które przenoszą obciążenia z dachu na kolumny, [47].



Rys. 5.59. Viikki Church (Kościół), Helsinki, Finland, Architektura: JKMM Architects, [302].

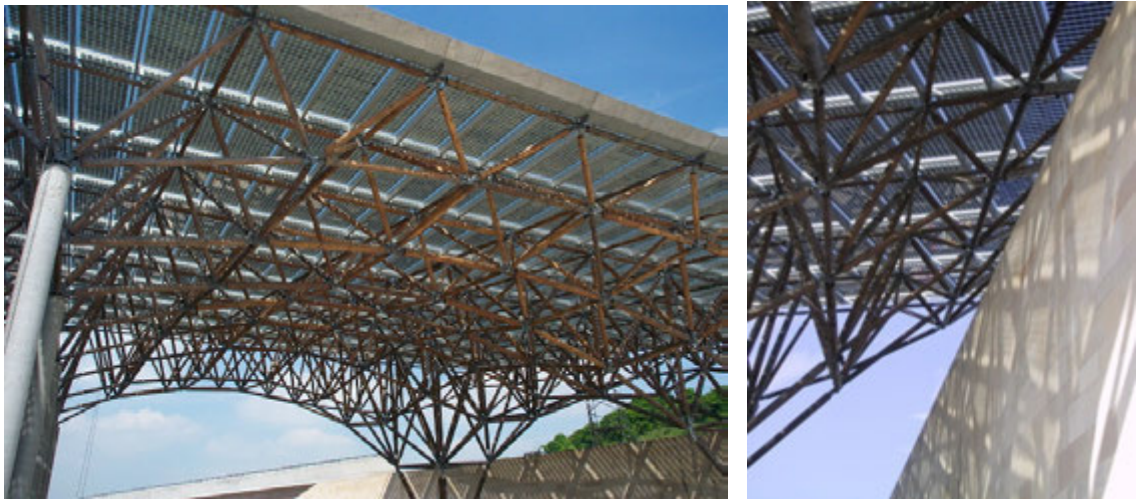


Rys. 5.60. Kolbermoor, Church (Kościół), [333]

Rys. 5.61. Hamburg HafenCity University, [335].



Rys. 5.62. The Cruise Center w Hamburgu. Architektura: Renner, Hainke, Wirth. Wymiary:23x67x9m, [341].



Rys. 5.63. The Earth Centre's Solar Canopy, Doncaster. Architektura: Atelier One, [304].

5.6. Układy ramowe z drewna klejonego

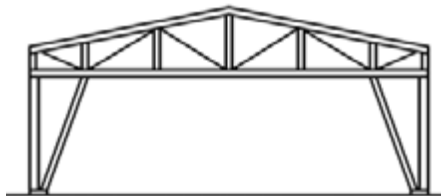
Układy ramowe stosuje się w budownictwie dużych rozpiętości z drewna klejonego od samego początku istnienia tej technologii. Są to ekonomiczne rozwiązania, odpowiednie dla pokonania rozpiętości kilkudziesięciu, nawet 60 m. Systemy ramowe są złożone z elementów tworzących płaskie ustroje o sztywnych węzłach. Ramy charakteryzują się wyjątkowo efektywnym rozkładem sił. Stwarza to realne możliwości obniżenia kosztów materiału, posadowienia, a w związku z tym całej budowy. Stosowanie tego rozwiązania jest ograniczone jedynie z powodu transportu na miejsce budowy (gabaryty) oraz ze względu na mniejszą wysokość ścian bocznych, co może ograniczać dostęp światła. Węzły narożne ram wykonywane są jako sztywne połączenia na złącza klinowe, mogą być zakrzywione, z zewnętrznymi ściągami, czy też złącza na pierścienie zębate rozmieszczone po obwodzie okręgu. Dwa ostatnie rozwiązania można realizować na placu budowy, dzięki czemu zostaje wyeliminowany problem transportu.

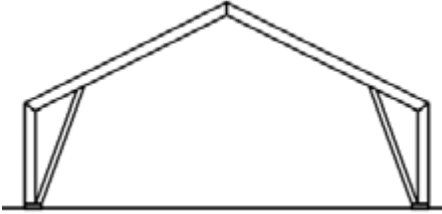
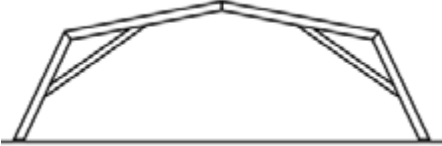
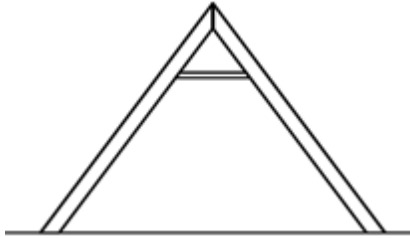
Kształty ram mogą być bardzo różnorodne, co przedstawiono na załączonych przykładach. Najczęściej są to ramy o pełnym przekroju rygla. Rzadziej spotyka się ramy kratowe. Charakterystyczną cechą ram jest jednorodność konstrukcyjna brył – najczęściej rysunek formy architektonicznej w całości jest zrealizowany jako konstrukcja drewniana. Zastosowanie słupów z drewna klejonego pozwala na ich wyeksponowanie od zewnątrz i od wewnątrz. Wymagany kąt nachylenia połaci dachu można uzyskać przez odpowied-

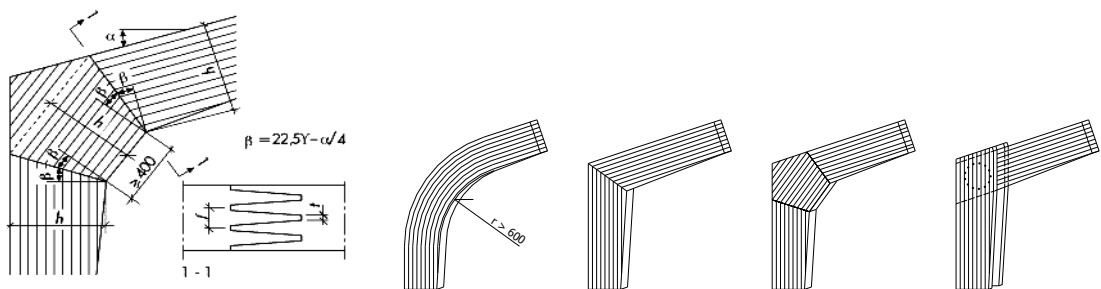
nie nachylenie rygla, z tym, że przy połączeniu sztywnym wykonywanym przy produkcji i transporcie na miejsce wbudowania łączna szerokość tzw. transportowa słupa i rygla nie może przekroczyć 4, 5 m, co zawęża zakres stosowania ram. Główną cechą statyczną ram o schemacie trójprzegubowym są znaczne momenty zginające w miejscu styku rygla ze słupem. Stąd potrzebne są tu specjalne złącza węzłowe. Sztywne połączenie rygla ze słupem znacznie zmniejsza moment zginający w ryglu i zwiększa sztywność poprzeczną i stateczność. Układy ramowe dają możliwość osiągania form o dużej rozpiętości bez konieczności stosowania ściąгов stalowych (najczęściej od 25 do 60 metrów). Tradycyjnie rami stosuje się w układach symetrycznych, ale interesujące efekty architektoniczne można uzyskać także poprzez kombinację układów ramowych z innymi elementami, prostymi lub łukowymi, w porządku centralnym, lub stosując jedną część symetrycznej rami, co pokazują poniższe przykłady. W układach ramowych można także stosować systemy ze wspornikami, na przykład w halach hipiki, gdzie zazwyczaj w przylegających do hal kubaturach stowarzyszonych projektuje się boksy dla koni.

Inną formą rami trójprzegubowej jest konstrukcja trójkątna. W tej formie konstrukcji konieczne jest zapewnienie przenoszenia sił poziomych przekazywanych na podpory. Gdy konstrukcja opiera się bezpośrednio na fundamencie można specjalnie ukształtować podpory, jednak gdy konstrukcja taka opiera się na ścianach, konieczne jest zastosowanie ściąгов stalowych przejmujących siły poziome. Wielkości przekrojów elementów konstrukcyjnych z drewna klejonego ulegają tu zmniejszeniu w stosunku do innych form konstrukcji. Wadą takich konstrukcji jest obniżona wysokość użytkowa obiektów a także, co nie jest bez znaczenia, trudności w montażu. Trzeba je montować za pomocą kilka dźwigów i specjalnie zaprojektowanych elementów montażowych usztywniających w trakcie montażu (ze względu na złącze kalenicowe), ponieważ konstrukcja w tym układzie statycznym pracuje dopiero po zmontowaniu.

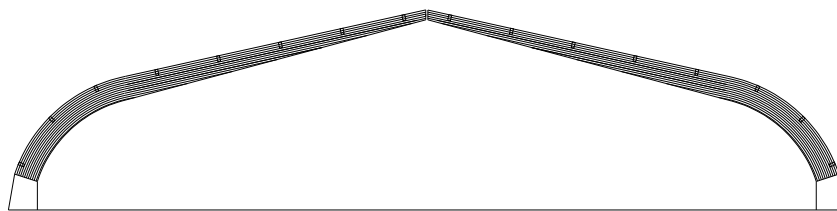
Tabela 5.7. Przykłady konstrukcji ramowych z drewna klejonego warstwowo.

	<p>Rama dwuprzegubowa. Rygiel w postaci kratownicy trapezowej. Rozpiętości: do 60 m</p>
---	---

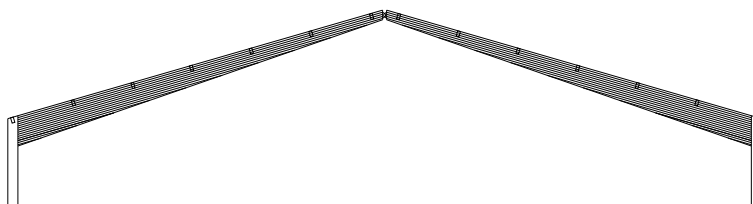
	<p>Rama trójprzegubowa ze stalowymi słupami ukośnymi. Rygle generują duży spadek dachu.</p> <p>Węzeł narożny na złącze klinowe lub wkładki stalowe wewnątrz przekroju.</p> <p>Rozpiętości: do 35 m</p>
	<p>Rama trójprzegubowa ze stalowymi słupami ukośnymi. Rygle generują mały spadek dachu, słupy „leżące”. Węzeł narożny na łącze klinowe lub wkładki stalowe wewnątrz przekroju.</p> <p>Rozpiętości: do 50 m</p>
	<p>Rama trójprzegubowa trójkątna. Rozwiązanie to jest bardzo ekonomiczne, szczególnie w obiektach magazynowych, gdy elementy posadowienia i węzły podporowe przejmują siły poziome. Znacząca wysokość obiektu przy stosunkowo niewielkich rozpiętościach.</p> <p>Rozpiętości: do 50 m</p>



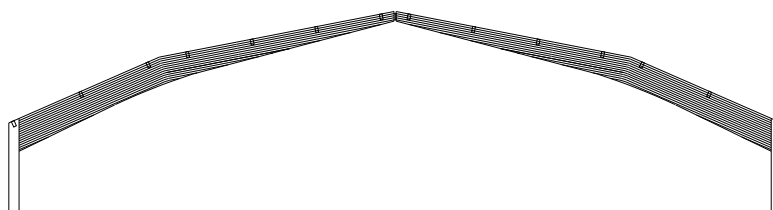
Rys. 5.64. Węzły narożne ram: Węzeł zakrzywiony, połączenie na złącza klinowe, pojedyncze. Połączenie na złącza klinowe, podwójne. Złącze na pierścieniu zębate i śruby dociągowe.



Rama trójprzegubowa na fundamentach żelbetowych, dźwigary typu „hokeyjowego”



Rama trójprzegubowa, dźwigary proste mocowane do słupów stalowych na połączenie sztywne.

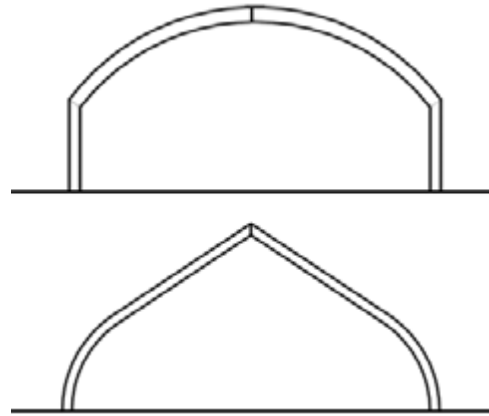


Rama trójprzegubowa, dźwigary proste łamane mocowane do słupów stalowych na połączenie sztywne.

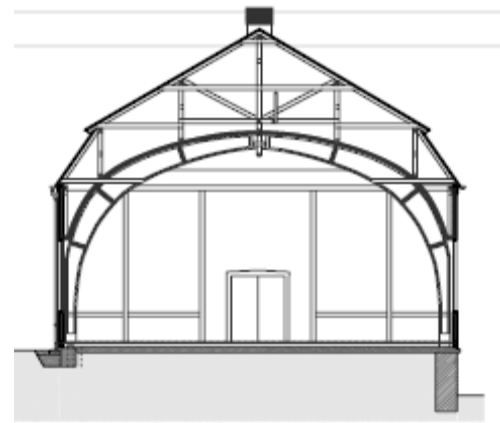
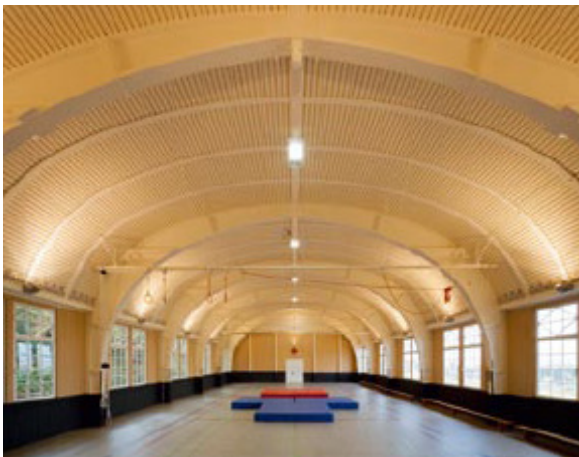
Rys. 5.65. Ramy trójprzegubowe dla przekrycia halowego o rozpiętości 36 -38 metrów.



Rys. 5.66. Węzeł sztywny zrealizowany poprzez wbudowane wkładki stalowe, [335].



Rys. 5.67. Rugby Church w Erritsø, Dania. Konstrukcja w kształcie parasola (lub drzewa) wykonana z ram z drewna klejonego o rozpiętości 32m i wysokości 13 m, [329].



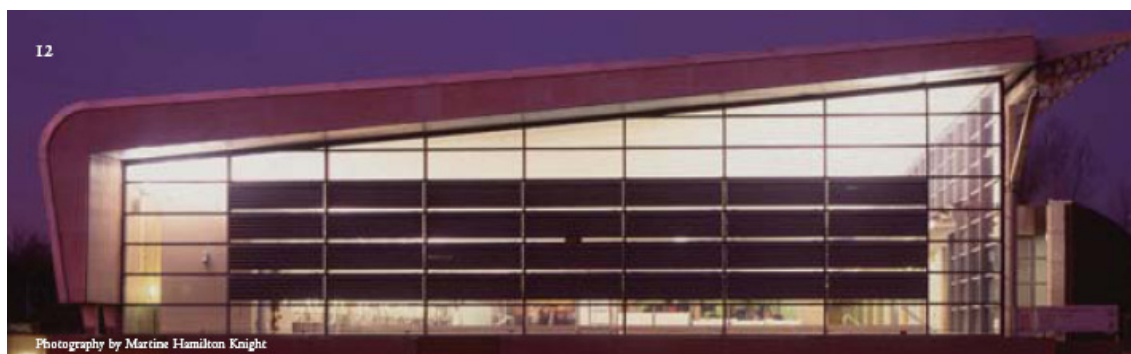
Rys. 5.68. Sanierung Turnhalle Hedtberg, Wupertal. Architektura: Wissmann Architekten. Konstrukcja: Ingenieurbüro Brüninghoff und Rampf, [234].



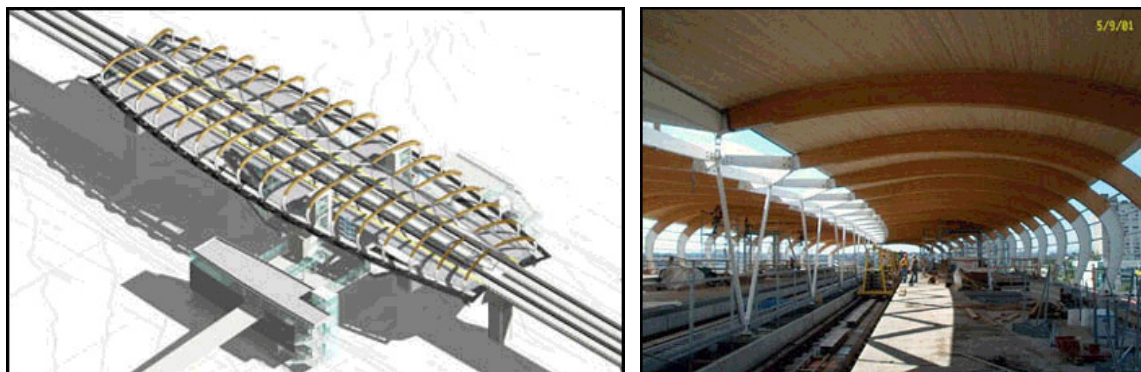
Rys. 5.69. Złącze podporowe na stopie stalowej wraz z prętem stalowym na stężenie ścian. Złącze kalenicowe, [335].



Rys. 5.70. Art Pavilion The Imagination, Zeewolde, Holandia. Architektura: René van Zuuk Architekten, [302].



Rys. 5.71. Darlaston Swimming Pool w Walsall, West Midlands, Wielka Brytania. Architektura: Hodder Associates. Konstrukcja: Ove Arup & Partners Consulting Engineers. Realizacja: 2002, [355].



Rys. 5.72. Brentwood Town Centre Station Vancouver, Architektura: B.C. Busby & Associates, [297].



Rys. 5.73. Drogheda Swimming Pool. Architektura: N. Mulligan & Associates. Konstrukcja: Arup, [305].



Rys. 5.74. Budynek Nuovo Gran Teatro Puccini w Torre del Lago we Włoszech. Architektura: Ufficio Tecnico di Progettazione CMSA - Ing. Giuliano Dalle Mura dello Studio Città Futura di Lucca, [324].

5.7. Układy formowane z belek zakrzywionych

Za pomocą zakrzywionych elementów z drewna klejonego można zrealizować następujące typy konstrukcji:

- 1) Układy płaskie z belek zakrzywionych.
- 2) Układy płaskie z belek zakrzywionych podwójnych (dwugałęziowych).
- 3) Układy płaskie z belek zakrzywionych hybrydowych, drewniano- stalowych.
- 4) Układy trójprzegubowe z belek zakrzywionych.
- 5) Przestrzenne kratownice zakrzywionych.
- 6) Kopyły.

I. Układy płaskie z belek zakrzywionych

- 1) Belki bumerangowe.

- 2) Belki, tzw. „brzuch ryby”.
- 3) Belki o zmiennym promieniu krzywizny.

II. Układy płaskie z belek zakrzywionych, hybrydowych, drewniano- stalowych.

III. Układy trójprzegubowe z belek zakrzywionych.

IV. Przestrzenne kratownice zakrzywionych o układach trójprzegubowych.

V. Kopuły.

- 1) Kopuły żebrowe.
- 2) Kopuły siatkowe (powłokowe).

Belka zakrzywiona (łukowa) o przekroju prostokątnym jest podstawowym elementem konstrukcyjnym właściwym dla wielu zastosowań. Łukowe belki stwarzają znaczną możliwość rozwiązań architektonicznych. Można je stosować w różnorodnych układach, zarówno na rzutach prostokątnych, jak też na planach centralnych, w układach sklepień i kopuł. Zakrzywienia przyjmuje się w zależności od funkcji oraz działających obciążeń. Stosowanie łuków, ze względu na korzystną pracę statyczną, pozwala na optymalne zaprojektowanie konstrukcji, zmniejszenie zużycia materiału i obniżenie kosztów obiektu. Podparcie elementu łukowego powinno być zapewnione przez konstrukcję, na której jest on oparty. Często potrzebny jest dobór odpowiedniego ściągu. Dzięki temu materiał w konstrukcjach łukowych jest lepiej wykorzystywany. Wysokość konstrukcyjna przekroju łuku może stanowić ok. 1/3 wysokości belki prostej tej samej rozpiętości, poddanej tym samym obciążeniom, [259].

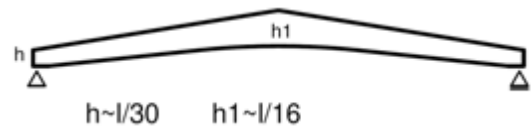
Układy łukowe wykorzystują duże gabaryty pełnych dźwigarów nośnych. Dźwigary wielkogabarytowe, produkowane według indywidualnych projektów, osiągają rozpiętości 50 m, a wysokości przekroju dochodzą do 260 cm. Charakterystyczne dla układów z belek łukowych są:

- 1) Proste układy geometryczne.
- 2) Zróżnicowanie w nadawaniu krzywizny od układów belkowych o małych promieniach do łuków trójprzegubowych o pełnym półkolistym wyniesieniu lub wysokim wyniesieniu parabolicznym.
- 3) Lekkość i smukłość elementów konstrukcyjnych.
- 4) Czytelna linia przebiegu ciśnień.
- 5) Rytmy i powtórzenia w jednej lub dwóch płaszczyznach przestrzennych.

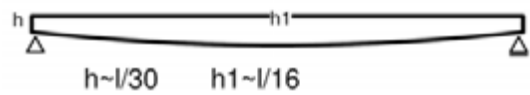
6) Proste bryły o technologicznej jednorodności.

5.7.1. Układy płaskie z belek zakrzywionych

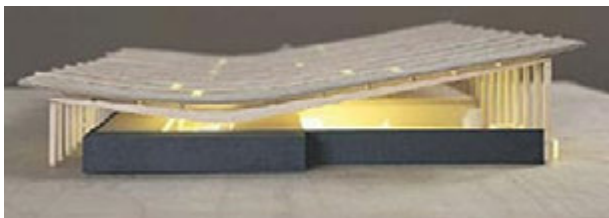
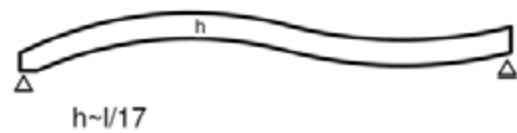
Belki bumerangowe



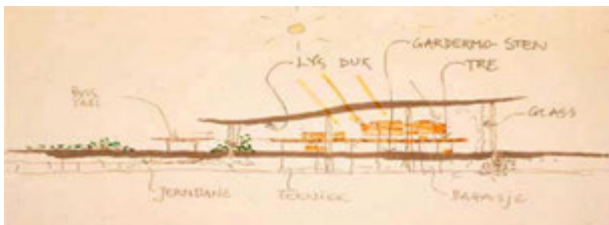
Belki, tzw. „brzuch ryby”



Belki o zmiennym promieniu



Rys. 5.75. Lotnisko w Aalborg, Dania, [329].





Rys. 5.76. Port Lotniczy Gardermoen w Oslo, Norwegia, Architektura:Aviaplan AS, Niels Torp, Rozpiętość: 112 m , długość: 165 m, powierzchnia dachu: 25.000 m², Realizacja:1993-1998, [347].



Rys. 5.77. Terminal lotniska w Cork, Irlandia . Rozpiętość dźwigarów: 45 m, [335].



Rys. 5.78. Centrum handlowe (Nordwestzentrum), Frankfurt nad Menem, Niemcy, [335].



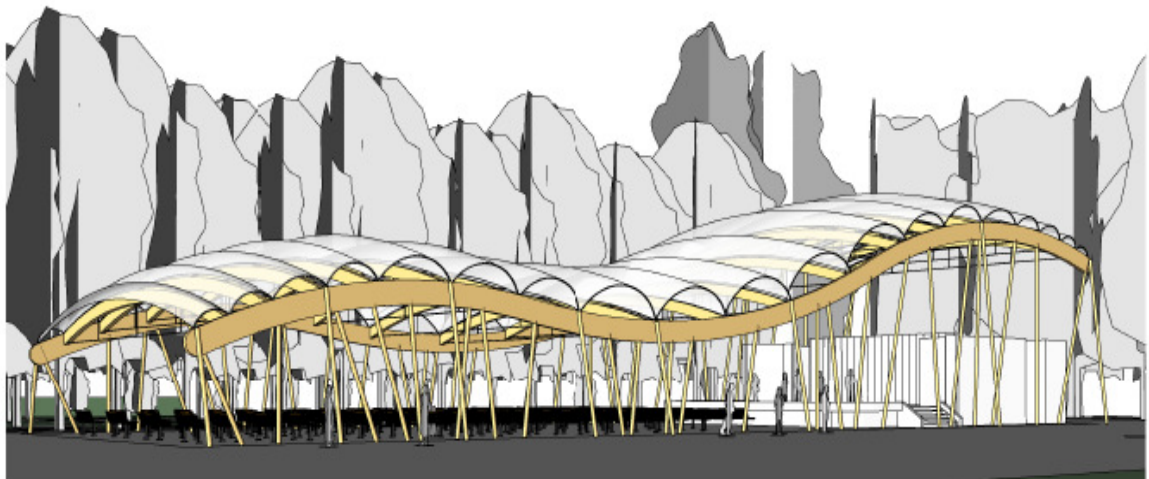
Rys. 5.79. Hallen- und Erlebnisbad "Prienavera" Markt Prien, Prien am Chiemsee. Architektura: Regierungsbaumeister Dipl.-Ing. Anton Zeller und Dipl.-Ing. Hans Romstätter, konstrukcja: Ing.-Büro-Gemeinschaft Haumann & Fuchs und Peter Zeller.[326].



Rys. 5.80. Kasyno w Bredzie, Holandia , [335].



Rys. 5.81. Lycée HQE de Bâtiment, Riom, [338].



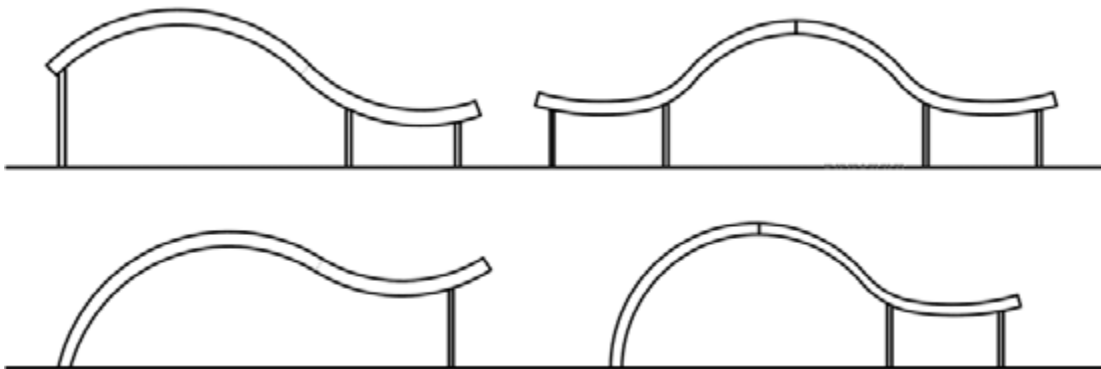
Rys. 5.82. Projekt zadaszenia widowni „muszli” koncertowej w Parku Tysiąclecia w Legnicy. Autorzy arch. arch. Mirosław Strzelecki, Alicja Maciejko, [357].



Rys. 5.83. Kryta pływalnia w Minden, Niemcy. Architektura Paul Nieberberghaus & Partner. Konstrukcja: Engels & Warmann, [335].

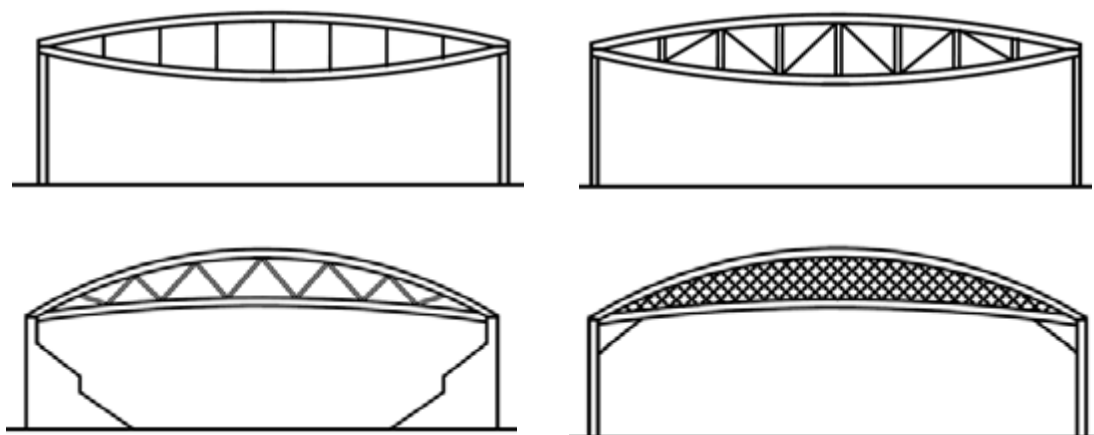
Obiektami, w których świadomie stosuje się belki łukowe, są terminale lotnicze. Konstrukcje z drewna klejonego zastosowano m. in. na lotniskach w Cork w Irlandii, w Amsterdamie, w Oslo w Norwegii, w Aalborg w Danii, TelAwiwie w Izraelu.

Budynek portu lotniczego w Oslo to największa budowla z drewna klejonego zaprojektowana w historii Norwegii. Dach, który sprawia wrażenie niezależnego systemu podzielonego na dwie części, wsparty jest na słupach o wysokości 18 m. Konstrukcja dachu składa się z podwójnego dźwigara głównego z drewna klejonego, o miękkiej krzywiznie. Elementy drugorzędne są zaprojektowane jako kratownice z drewna klejonego, które częściowo są widoczne poprzez panelowy, metalowy, perforowany sufit. Materiały użyte do budowy w jak największym stopniu miały być materiałami „naturalnymi”. Główne dźwigary wykonano starannie, w stopniu wykończenia niemal meblarskim.



Rys. 5.84. Dźwigary łukowe w różnych wariantach, [357].

Układy płaskie z belek łukowych podwójnych



Rys. 5.85. Dźwigary łukowe podwójne, [357].



Rys. 5.86. Bellerup Superarena, Kopenhaga. Konstrukcja uległa zawaleniu w 2004, [329].



Rys. 5.87. Rumanian exhibition hall, Hannover, Germany, [327].



Rys. 5.88. Przekrycie boiska do rugby; Fougerolle we Francji, [338].

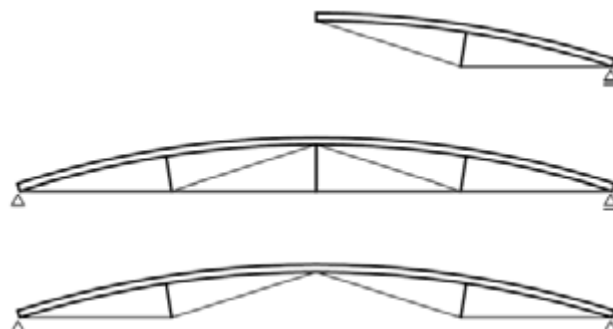


Rys. 5.89. Wynstones school Belfast, [304].

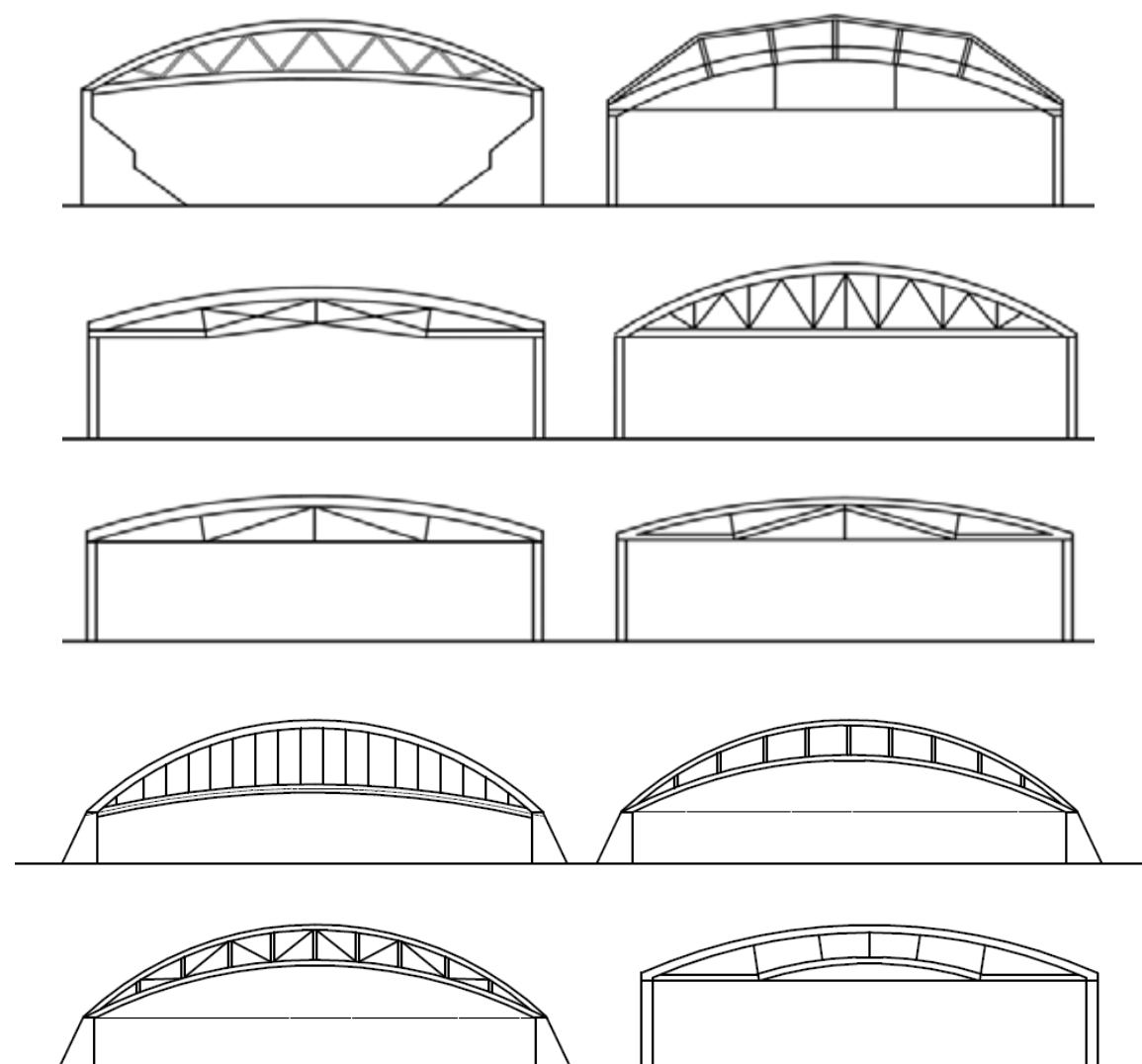
5.7.2. Układy płaskie z belek zakrzywionych hybrydowych, drewniano- stalowych, kratownice hybrydowe.

Systemy łukowo - ciągnowe należą do nierozporowych systemów ciągnowo - prętowych stosowanych w układach płaskich i przestrzennych. Połączono tu właściwości łuków z przenoszeniem sił poziomych przez ciągnia, przez co uzyskuje się zwiększenie nośności przekroju łuku, [161]. W celu zwiększenia nośności dźwigarów łukowych lub prostych z drewna klejonego stosuje się zewnętrzne ciągnia wzmacniające. Dźwigary są usztywnione w płaszczyźnie własnej dla przeciwdziałania nadmiernemu ugięciu. Słupki pionowe przekazują obciążenia na ciągnia. Ciągnia są zazwyczaj mocowane w węzłach podporowych. Odległość między punktami zakotwienia ściągów może wynosić najwyżej 15 szerokości przekroju belki. Dźwigary drewniano - stalowe są często stosowane, ze

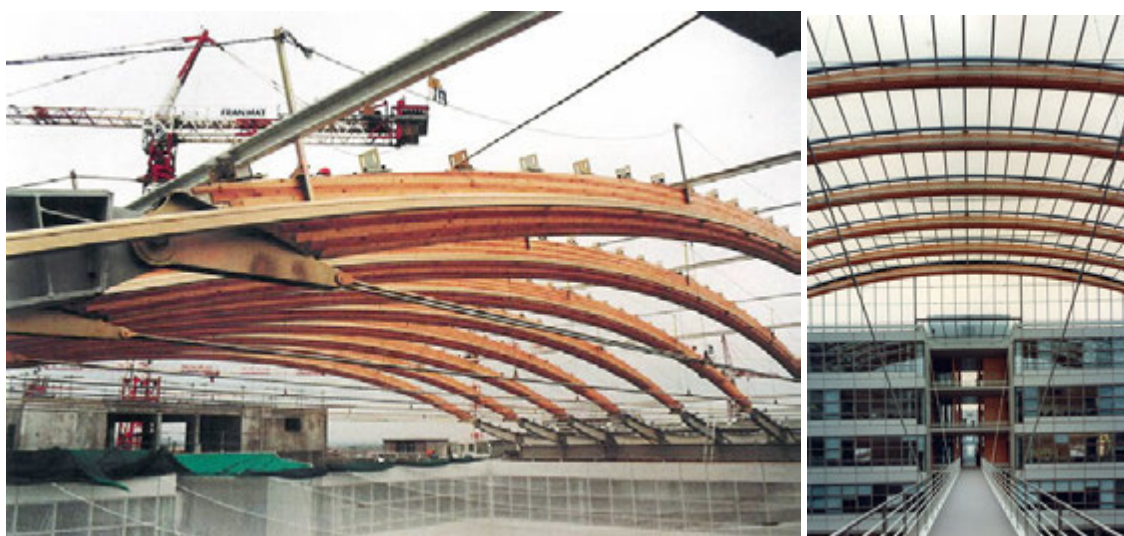
względu na możliwość pełnego wykorzystania przekroju elementów konstrukcji a także ze względów estetycznych.



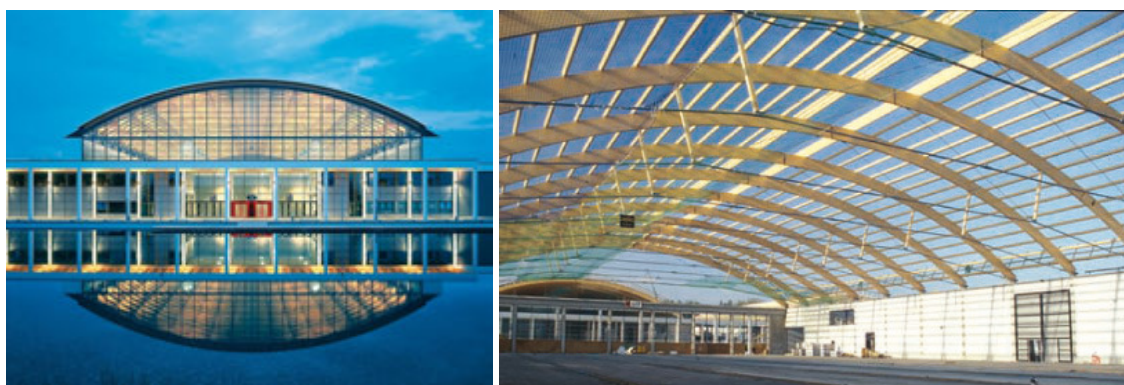
Rys. 5.90. Schematy dźwigarów zakrzywionych wzmacnianych ciągnem stalowym, [161].



Rys. 5.91. Przykłady konstruowania konstrukcji zakrzywionych, hybrydowych, [357].



Rys. 5.92. Renault Technocenter w La Ruche, Francja Przekrycie patia za pomocą łuków dużych rozpiętości pokrytych panelami szklanymi, [6].



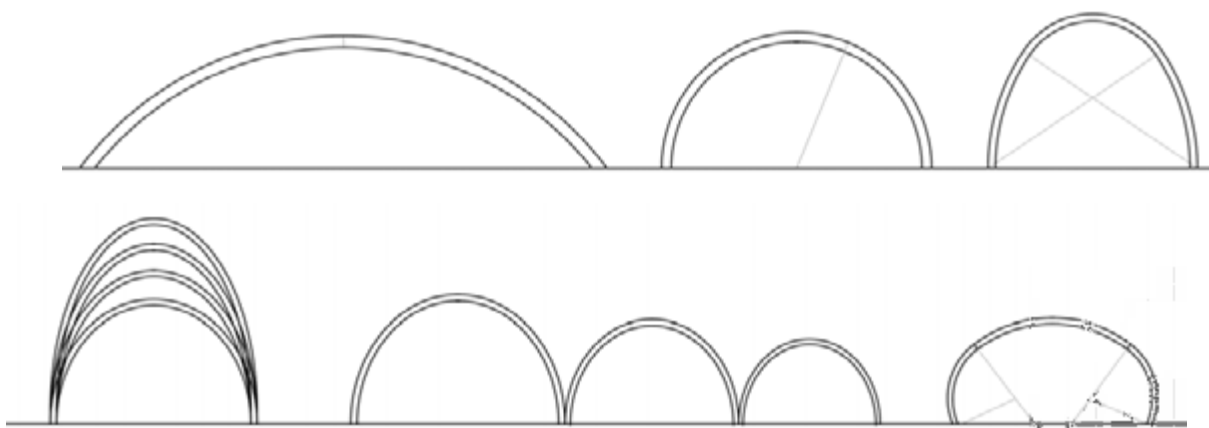
Rys. 5.93. Hala ekspozycyjna w Friedrichshafen, [327].

5.7.3. Układy trójprzegubowe z belek zakrzywionych

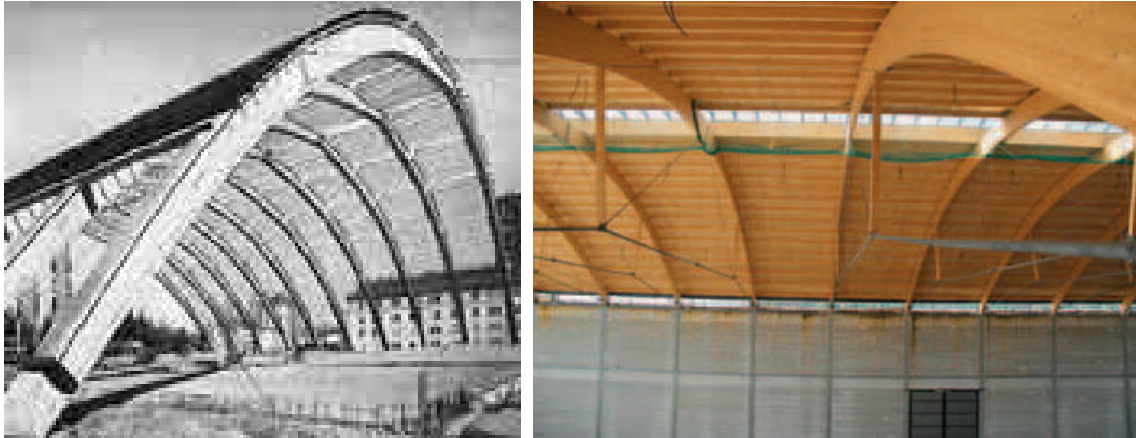
Układy łukowe trójprzegubowe z drewna klejonego osiągnęły ich maksymalną rozpiętość (ok. 100 m) w latach 60 – tych XX wieku. Taka rozpiętość była możliwa do uzyskania przy użyciu dwóch lub trzech połączeń montażowych poszczególnych części o gabarytach zależnych od możliwości transportowych. Przykładem jest hala w Joinville we Francji o rozpiętości 92 m wzniesiona w 1962 r. oraz Hala w Tours o rozpiętości 98 m, zbudowana w 1964 roku.



W rozpiętościach 80-100 m, łuki należy wykonywać z trzech lub czterech części, jednak z zachowaniem układów trój - lub dwuprzegubowych. Najczęściej spotykanymi realizacjami, w których można zastosować łukowe konstrukcje pełnych dźwigarów, są wielofunkcyjne hale sportowe. Konstrukcja nośna jest wtedy oparta bezpośrednio na fundamentach, a szerokość hali pozwala na zastosowanie układu trójprzegubowego. Ściąg jest umieszczany w warstwach posadzki. Łuki z drewna klejonego można także stosować w różnych układach przestrzennych, jak np. w winnicy w Bodegas Protos (rys. 5.105). Budynek posiada charakterystyczną konstrukcję złożoną z pięciu połączonych ze sobą łukowych części, z których kolejna jest cofnięta w stosunku do poprzedniej. Podział nawiązuje do mozaiki hiszpańskich pól i winnic. Większa część (20 000 m²) powierzchni użytkowej znajduje się pod ziemią ze względu na warunki termiczne, które osiąga się w tradycyjnej architekturze bez stosowania systemów chłodzenia. Urządzenia do produkcji wina umieszcza się na głębokości od 2 do nawet 30 metrów. W palmiarni "The Sheffield Winter Gardens" (rys. 5.101), połączono w nowatorski sposób kilkanaście łuków o różnych wyniesieniach. Konstrukcja składa się z 11 łuków parabolicznych o zróżnicowanych wysokościach, długość obiektu: 75m wysokość wewnętrzna: 20m, rozpiętość: 22m.



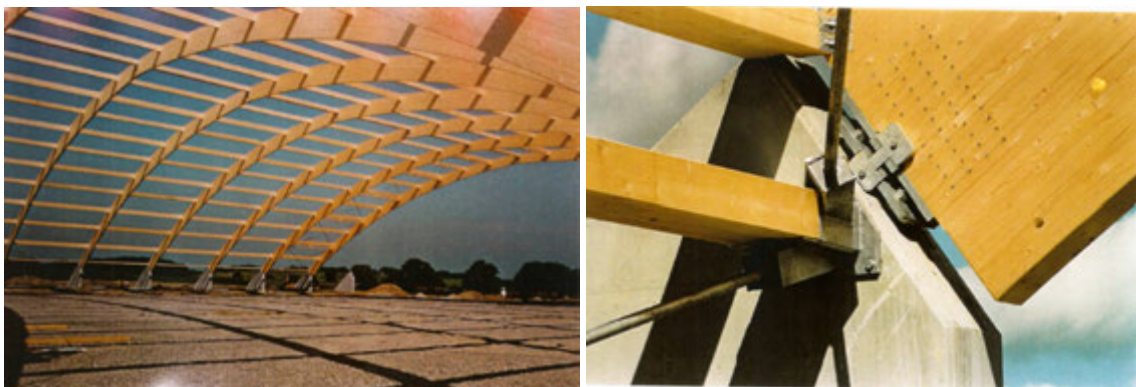
Rys. 5.94. Przykłady modelowania konstrukcji łukowych o różnych wyniesieniach, [357].



Rys. 5.95. Hala wystawowa w Klagenfurcie. Architektura: O. Loider. Konstrukcja: Ingenieur Wiewag AG. Realizacja: 1966. Rozpiętość: 96m, [335].



Rys. 5.96. Hala Lodowiska w Vancouver (Olimpiada w 2010), [297].



Rys. 5.97. Hala sportowa w Arhus w Danii. Rozpiętość ok. 80 m, [329].



Rys. 5.98. Hala Tenisowa w Tyrolu w Austrii. Architektura: Reitter Helmut , DI. Realizacja: 1996. Rozpiętość: 40m, [321].



Rys. 5.99. Hala sportowa w Aalborg w Danii. Rozpiętość: ok. 82 m, [329].



Rys. 5.100. Hala sportowa w Bydgoszczy. Architektura: Moduł, Zenon Nowacki. Konstrukcja dachu: Lilleheden A/S. Rozpiętość: 78 m. Realizacja: 2000, [329].

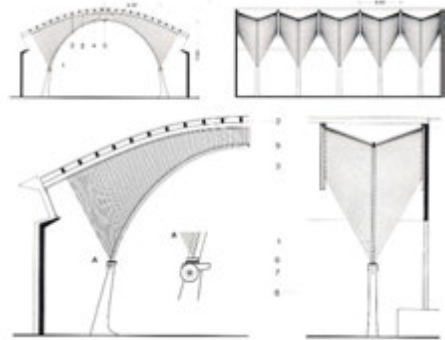




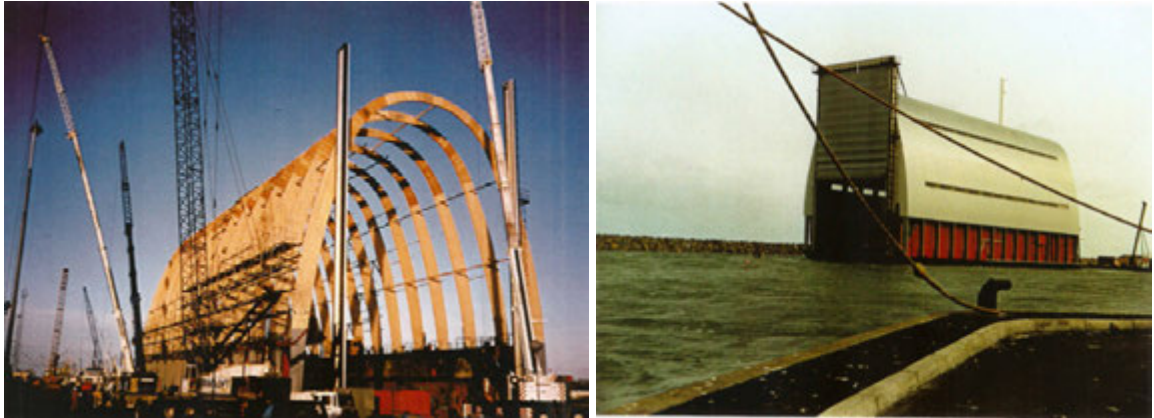
Rys. 5.101. The Sheffield Winter Gardens, Wielka Brytania. Architektura: Pringle Richards Sharratt Architects. Konstrukcja: Buro Happold, [354].



Rys. 5.102. Arkady pomiędzy dwoma halami wystawowymi Frankfurt nad Menem, Niemcy, [335].



Rys. 5.103. Wohlen Highschool. Architektura: Santiago Calatrava, [116].



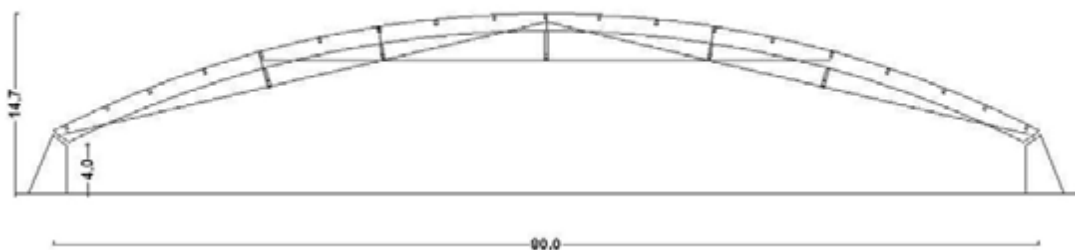
Rys. 5.104. Hala Floating Dock w Hirtshals w Danii, [329].



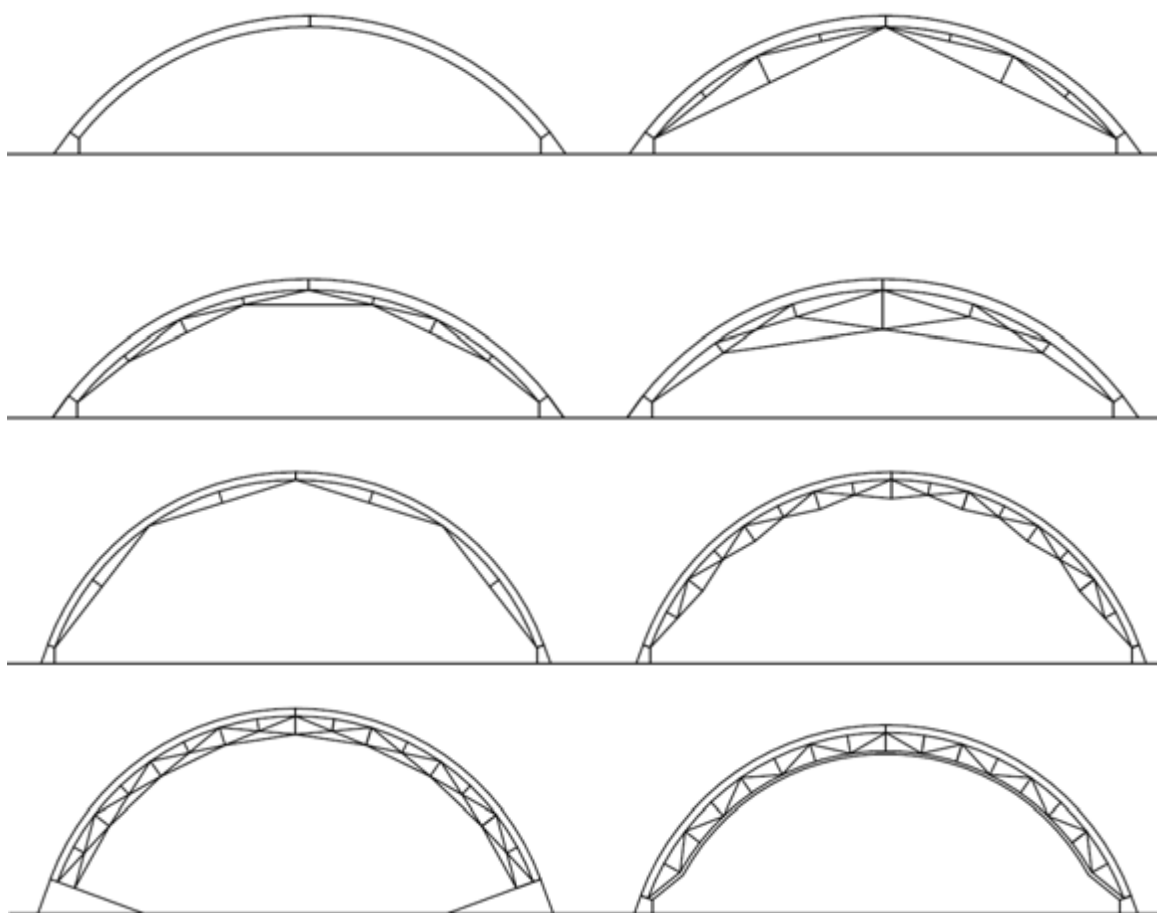
Rys. 5.105. Winnica Bodegas Protos,[300].

5.7.4. Przestrzenne kratownice zakrzywione, hybrydowe, drewniano stalowe o układach trójprzegubowych

Największe rozpiętości można uzyskać za pomocą układów łukowych kratownicowych wzmocnianych cięgnami stalowymi.



Rys. 5.106. Koncepcja przekrycia hali lodowiskowej w Tomaszowie Mazowieckim. Architektura: A. Maciejko - Grześkowiak. Konstrukcja: M. Delineszew, [357].



Rys. 5.107. Schematy kształtowania konstrukcji łukowych kratownic przestrzennych . Łuki trójprzegubowe i kopuły o rozpiętościach powyżej 100 m, [357].

Obiekty olimpijskie w Lillehammer (Igrzyska Olimpijskie w 1994 roku), (rys.5.109), stanowią symbol norweskiej architektury. "Łódź Wikingów" to skomplikowana konstrukcja kratowa wymagająca wiedzy, zaawansowanych metod projektowania oraz znajomości zagadnień produkcyjnych i technologicznych. Główna konstrukcja składa się z łuków o zmiennej rozpiętości od 96,4 m do 30 m usytuowanych w rozstawie 12 m. W trakcie realizacji była największą strukturą z drewna klejonego na świecie. Projektowanie odbywało się za pomocą modelowania komputerowego (MES) a także, sporządzanych ręcznie, modeli architektonicznych. Zaprojektowano dziesięć różnych dźwigarów kratowych, każdy o innej geometrii, stąd owalna geometria całości. Największe dźwigary mają 4 m wysokości przekroju. Podłużna kratownica główna biegnąca wzdłuż osi została wykonana z czterech części łączonych podczas montażu, [113].

Utopia Pawilon, (rys. 5.110), zaprojektowany przez Skidmore, Owings & Merrill London i Regino Cruz z Lizbony, jest położony na terenie Expo w Lizbonie (1996 r.). Obiekt jest owalny w planie, długości 200 m i szerokości 120 m. Przekrycie dwukrzywi-
znowe jest pokryte blachą cynkową. Wnętrze jest ciepłe w odbiorze, ekspresyjne, w prze-
ciwieństwie do formy zewnętrznej, która jest oszczędna, jednolita i zimna. Kratownica
składa się z 16 łuków kratownicowych o maksymalnej rozpiętości 120 m. Każdy łuk jest
inny ze względu na nieregularną formę. Konstrukcję uzupełniają płatwie i diagonalne
stężenia. Drewno klejone zostało wybrane do tej spektakularnej konstrukcji ze względu
na swoją lekkość a także odporność na miejscową wysoką wilgotność powietrza oraz
łatwość, z jaką można mu nadać łukowy kształt. Kształt nieregularnego owalu, dobrane
właściwie przekroje poprzeczne elementów spełniają wymaganą, godzinną odporność
ogniową.



Rys. 5.108. Joensuu Arena. Przekrycie boiska piłkarskiego. Architektura: Pro Ark Oy Marjatta Hara-
Pietila. Realizacja 2004, [337].





Rys. 5.109. Hala olimpijska w Lillehammer: łyżwiarstwo figurowe, hokej i łyżwiarstwo szybkie, [347].



Rys. 5.110. Pawilon Utopia w Lizbonie. Wielofunkcyjna arena to największy obiekt wolnostojący na terenie targów Expo 1996 w Lizbonie. Kluczowy element projektu urbanistycznego i strategii wykorzystania terenów po zakończeniu wystawy, [6].



Rys. 5.111. Kratownica przestrzenna. Hala pływacka w Adelajdzie w Australii, [318].

5.7.5. Kopyły żebrowe i siatkowe

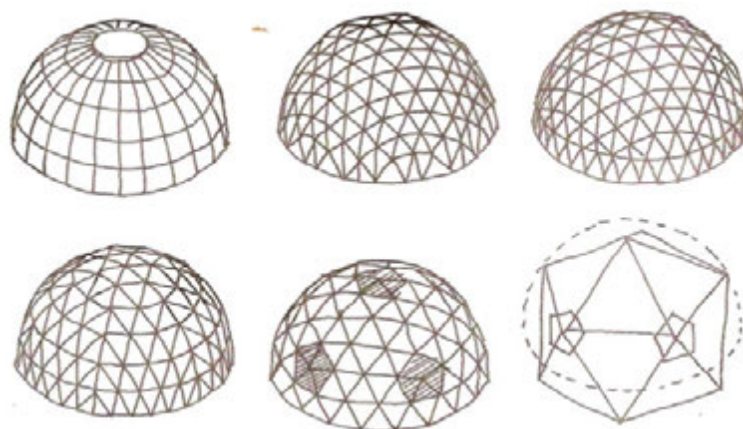
Forma kopyły jako wycinka kuli uważana jest za najdoskonalszą z brył. Współcześnie, formy kopyły nawiązują do form znanych z natury, takich jak jajo, muszla, skorupa, kielich kwiatu. Kopyły z drewna klejonego są konstruowane na różne sposoby, co zostało przedstawione na rysunkach poniżej. Najprostsze kopyły z drewna klejonego powstają z dźwigarów łukowych o przekroju prostokątnym, zwanych południkami, ułożonych radialnie, połączonych w zworniku i usztywnionych elementami równoleżnikowymi z drewna klejonego, przebiegającymi na różnych wysokościach łuków (stężeniami). Dźwigary przejmują naprężenia ściskające i przenoszą obciążenia na fundamenty. Taki sposób konstruowania sprawia, że kopyła jest niezmienna geometrycznie, a przekroje dźwigarów są mniejsze niż przekroje łuków sytuowanych na układach prostokątnych, poddanych tym samym obciążeniom. Kopyły z drewna klejonego powstają na planach centralnych, kół, kwadratów, wieloboków, a także na planach owalnych. Największa,

ekonomicznie uzasadniona, średnica kopuł z drewna klejonego (ok. 180 m) wydaje się być już osiągnięta. Największe kopuły z drewna klejonego powstały w Stanach Zjednoczonych i w Japonii, która ma olbrzymią tradycję budownictwa drewnianego. Poniżej przedstawiono przykłady najbardziej znaczących kopuł: Tacoma Dome, North Michigan University Stadium w Stanach Zjednoczonych oraz Odate Jukai Dome w Japonii. Ich średnice wynoszą od 110 do 180m. Odate Jukai Dome (rys. 5.113), o największej rozpiętości 180 m, mieści stadion piłkarski. Konstrukcja z drewna klejonego, pokryta membraną, to dwukrzywiznowa konstrukcja przestrzenna z łukowych elementów z drewna klejonego, z gatunku drewna zwanego Sugi, rosnącego lokalnie w prowincji Akita. Teflonowe, membranowe pokrycie przepuszcza naturalne światło w 8%. Kopuła Akita-Oodate ma jedyny w swoim rodzaju kształt przypominający kask kolarski. Dłuższa oś kopuły (w rzucie) mierzy 178m, zaś krótsza 157m. Wysokość kopuły sięga 52 metrów. Zanim wybrano gatunek Sugi z prowincji Akita do wykonania drewna klejonego, prowadzono liczne badania na wielu gatunkach drewna, mające na celu ocenę ich właściwości mechanicznych. Badania prowadzono w Instytucie Technologii Drewna w Akicie od 1994 r. do około 1996 r. Drewno klejone zostało poddane licznym, rygorystycznym testom i badaniom kontrolnym. System badań opracowała firma odpowiedzialna za całość projektu i budowę kopuły. Izumo Dome (rys. 5.115) mieści stadion piłkarski i mierzy 143 m średnicy i 48, 9 m wysokości. Konstrukcja główna składa się z 36 łuków o rozpiętości 90 m wzmocnionych przy podstawie konstrukcją kratową. Każdy łuk był obrabiany i łączony na placu budowy, następnie rozmieszczono je po okręgu i połączono w centralnym zworniku – pierścieniu stalowym.

Hala wystawowa w Sydney (rys. 5.117) to kopuła o średnicy 97 m i wysokości 42 m. Przy wyborze systemu konstrukcyjnego rozważano dwa rozwiązania materiałowe. Konstrukcję wykonano ostatecznie z drewna klejonego, chociaż konstrukcja stalowa początkowo wydawała się tańsza. Elementy z drewna klejonego o wymiarach przekroju 23x80x1000 cm zastosowano w elementach ściskanych, natomiast ciągnowe elementy stalowe w elementach rozciąganych.

Z naturalnego drewna cyprysów (przekrojów litych) w liczbie około sześciuset sztuk, wykonano konstrukcję przekrycia w kształcie kopuły w Asahichi, w Japonii (rys. 5.120). Kratownica daje wrażenie surowości. Ma wyrażać siłę i „ciepło” lasu. Konstrukcja w Gujo-Hachiman jest jedyną w świecie oddającą szczególny urok naturalnego drewna cyprysowego. W konstrukcji zastosowano drewno pozyskane z drzew cyprysów liczą-

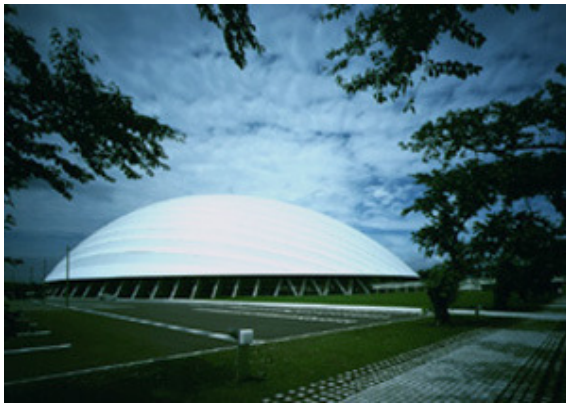
cych sobie od 300 do 350 lat. Przekroje były naturalnie sezonowane, obrabiane z milimetryczną precyzją, a w końcu użyte w konstrukcji przekrycia. Do wykonania pojedynczego, prostokątnego segmentu użyto trzech litych przekrojów, te zaś, po złożeniu 16-tu elementów, formują 30-metrową łukową kratownicę. Zastosowanie naturalnych cyprysowych przekrojów litych – w związku z ich ograniczoną długością – wymusiło konieczność zastosowania wielu złączy. Zaprojektowano złącza na trzpienie stalowe, co wymagało nie tylko precyzyjnego określenia rzędnych złączy, ale też bardzo precyzyjnego wykonania elementów. Wiązało się z tym również precyzyjne umieszczenie łączników stalowych w przekrojach.



Rys. 5.112. Schematy możliwości konstruowania kopuł z drewna klejonego, Kopuły geodezyjne skonstruowane w Niemczech i w Japonii 1985 r. Schemat konstruowania kopuł geodezyjnych , [93].

Największe kopuły drewniane świata:

ODATE JUKAI DOME – rozpiętość 178 m



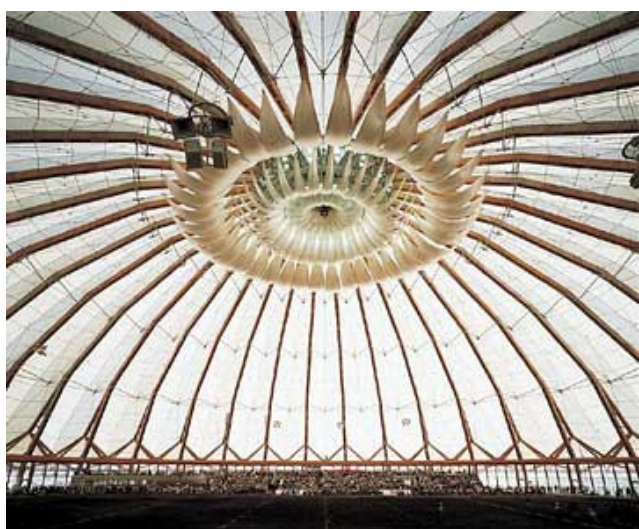
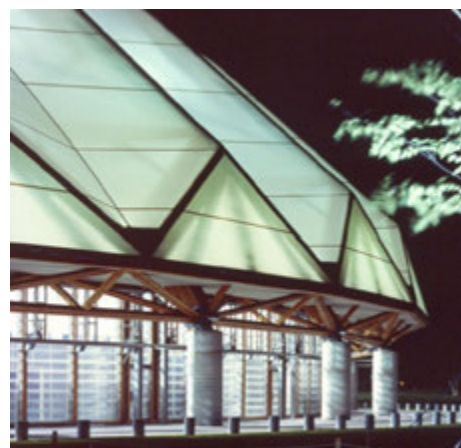
Rys. 5.113. Odate Jukai Dome Park, Dewa-Sanchi prefecture, Honshu, Japonia. Architektura: Toyo Ito & Associates. Konstrukcja: Takenaka Corporation. Rok budowy: 1992- 1997, [208].

TACOMA DOME – rozpiętość 162 m



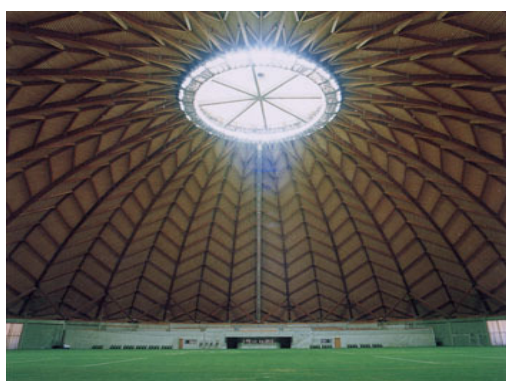
Rys. 5.114. Tacoma Dome w Tacoma, Washington USA. Architektura: McGranahan, Messenger Associates, Konstrukcja: Hine, Wessel & Associates. Kopia z drewna klejonego o średnicy 162m. Relizacja: 1982 -1983, [311].

IZUMO DOME – rozpiętość 143 m



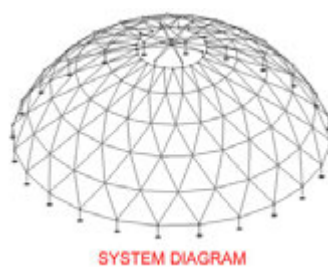
Rys. 5.115. Izumo Dome, Izumo, Shimane (Japan), Architektura: Kimio Saito Kajima Design, Konstrukcja: Masao Saito, Kajima Construction. Rok budowy: 1990 – 1992, [169].

YAMABIKO DOME – rozpiętość 110 m



Rys. 5.116. Yamabiko Dome (SHINSHU SKY PARK) Hala wielofunkcyjna Shinshu Sky Park, Nagano Prefecture, Yamabiko w Japonii. Architektura: Kume Sekkei, Kijami Design. Rok budowy: 1993. Została zbudowana z lokalnie występującego drewna modrzewiowego, średnica 110, wysokość: 40,5 m. Wnętrze dwupoziomowe, [344].

ROYAL AGRICULTURAL SHOWGROUND DOME – rozpiętość 97 m



Rys. 5.117. Exhibition Halls for the new Sydney Showground at Homebush Bay, [318].

MAGAZYN WĘGLA W WALSUM – rozpiętość 100 m



Rys. 5.118. Magazyn węgla w Walsum, Niemcy. Architektura: HIPP. Konstrukcja: Brueninghoff, Heiden, Średnica 100 m, wys. 27. Realizacja: 1987, [335].

HALA LODOWISKOWA W ERFURCIE



Rys. 5.119. Hala lodowiska w Erfurcie, architektura: Pohl-Deyle, konstrukcja Arup, Erfurth & Partner, [326].



Rys. 5.120. Asahichi, Hachiman-cho, Gujo-gun, Gifu Prefecture. Architektura, Tetsuro Kurokawa. Konstrukcja: Takenaka Corporation, Takagaki Gumi i Yamashita Construction. Realizacja 1999-2001, [208].



Rys. 5.121. Hala sportowa w Telfs. Architektura: Walch, Architekturbüro. Realizacja: 2000 rok. Rozpiętość: 56x76 m, [321].



Rys. 5.122. Basen "Het Diekman" Enschede, Holandia, [335].

Rys. 5.123. Basen kryty „Johannisberg”, [335].



Rys. 5.124. Forestry Tasmania Dome, [315].

5.8. Konstrukcje wiszące z drewna klejonego

Konstrukcje (przekrycia) wiszące to konstrukcje, które wykorzystują nośność przekrojów na rozciąganie. W przypadku czystych konstrukcji ciągnowych, ciągną przenosi, z reguły, jego siły rozciągające, w związku z czym powstaje możliwość maksymalnego wykorzystania przekroju. Najbardziej odpowiednim materiałem dla konstruowania konstrukcji wiszących jest stal w połączeniu z pokryciami membranowymi. Istnieje jednak wiele realizacji, w których stosuje się drewno jako elementy rozciągane w łukowych, wklęsłych płaszczyznach przekryć wiszących. Drewno klejone, które przenosi zarówno

siły rozciągające jak i ściskające, jest odpowiednie do konstruowania płaszczyzn dachów wiszących jak również podpór. Najczęściej są to maszty o przekroju okrągłym lub konstrukcje wieżowe, kratowe z drewna klejonego. Przekrycia wiszące z zastosowaniem drewna klejonego są mniej popularne niż inne systemy i wymagają specjalnego konstruowania dźwigarów łukowych. Najczęściej też są to przekrycia wykonane z elementów drewnianych i sklejki, połączone z cięgnami stalowymi, które mogą być wkomponowane w przekrój poprzeczny elementów drewnianych. Ciekawym zastosowaniem tej metody jest budynek administracyjny w Nagoya (rys. 5.129). Dach wiszący skonstruowano z elementów z drewna klejonego i prętów stalowych. Drewno zostało tu wykorzystane w nowatorski sposób. Łącznie ok. 1500 belek z drewna klejonego o wielkości przekroju 12x15 cm dł. 300 cm jest „nawleczonych” na stalowe pręty. Taki sposób konstruowania elementów nośnych pozwala na wyeliminowanie ciężkiego sprzętu, ponieważ konstrukcja może być montowana przy użyciu lekkiego sprzętu.

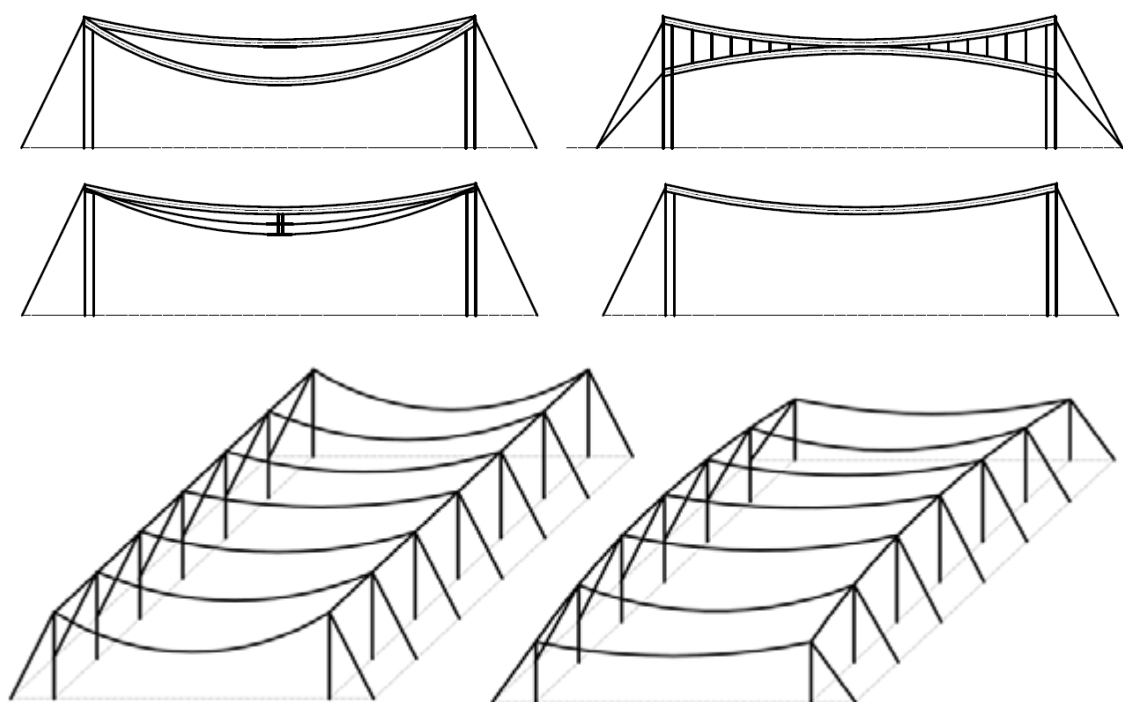
Płaszczyzny przekryć wiszących z drewna klejonego można wykonać zarówno jako jednokrzywiznowe konstrukcje łukowe lub dwukrzywiznowe. Wtedy stosuje się układy siatkowe, np. dach krytej pływalni Solebad Bad Duerheim w Niemczech (rys. 5.131.). Siatkowa struktura opiera się na efektownych podporach – „drzewach” z drewna klejonego.

Konstrukcje wiszące z drewna klejonego stosuje się już od lat 50 – tych XX wieku. Pierwszą konstrukcją wiszącą z elementami z drewna klejonego zbudowano w 1952 roku na wystawę przemysłu w Berlinie. Był to pawilon szwajcarski. W 1964 roku zbudowano olbrzymią konstrukcję wiszącą z drewna klejonego - halę na EXPO 1964 w Lozannie (rys. 5.126.). Do dziś konstrukcja imponuje nowatorskimi rozwiązaniami i formą architektoniczną. Elementy wiszące ze sklejki o grubości 12 mm i długości do 52 m ułożono na łuku z drewna klejonego o rozpiętości 87 m. Konstrukcję stabilizuje umieszczony na obwodzie stalowy pierścień [113].

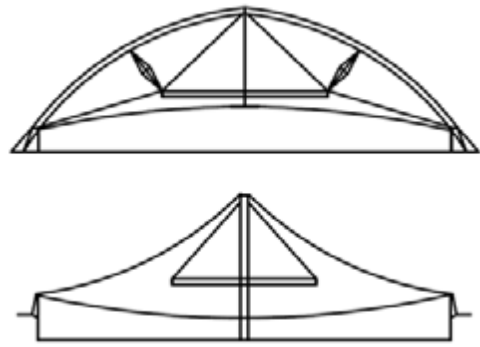
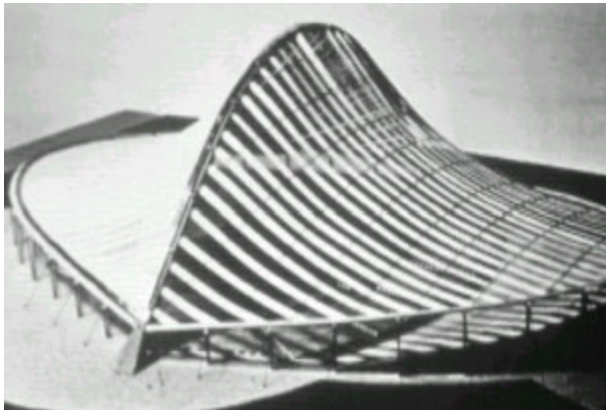
Największym na świecie, jednoprzęsłowym przekryciem wiszącym z drewna klejonego, o rozpiętości 80 metrów jest hala olimpijska łyżwiarstwa szybkiego w Nagano (rys. 5.132). Do produkcji konstrukcji użyto lokalnego materiału, modrzewia Shinshu. Wnętrze, ze względu na mobilną widownię, którą można komponować w różnych aranżacjach, może pomieścić 2400 miejsc. Poza owalnym torem wyścigowym w centralnej części planu obiektu znajduje się lodowisko przystosowane do zawodów łyżwiarских i hokejowych. Z powodu uwarunkowań funkcjonalnych, zdecydowano o małej wysokości

przestrzeni. Jedną z przyczyn jest fakt, że duża wysokość obiektu mogłaby spowolnić proces tworzenia płyty lodowiska, podczas gdy niższa wysokość dachu pomaga utrzymywać niższą temperaturę, zredukować energię potrzebną do oświetlenia i sprawnego działania systemu wentylacji i klimatyzacji, a także podnosi jakość akustyczną obiektu. Połączono tu 12 milimetrową płytę stalową z elementami z drewna klejonego, złożonymi z trzynastu warstw modrzewia hinshu. Każdy z rozciąganych elementów z drewna klejonego ma wymiary przekroju 12,5 x 30 cm i około 10 m długości. Do budowy wykorzystano 7000 elementów. Technologia i zamysł architektoniczny, który umożliwił realizację tej konstrukcji, pochodzą ze studiów nad konstrukcjami wiszących mostów. W rozstawie co trzy metry umieszczono stalowe filary o wysokości do 43 m.

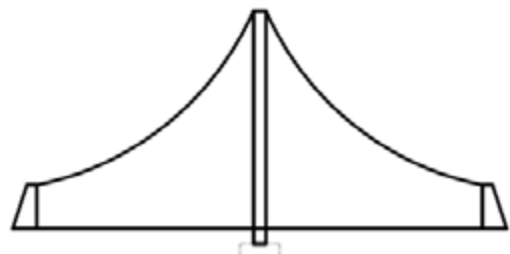
W porównaniu do innych materiałów konstrukcyjnych, drewno klejone jest bardzo rzadko wykorzystywane do konstruowania dachów wiszących, pomimo tego, że zastosowanie drewna jest korzystne, jeśli chodzi o wagę, wytrzymałość, ekonomię i prefabrykację elementów konstrukcyjnych. Z punktu widzenia konstruowania form architektonicznych o indywidualnych, innowacyjnych kształtach, konstrukcje wiszące z drewna – ze względu na możliwości „swobodnego” dwupłaszczyznowego gięcia powierzchni, nie są jeszcze w pełni wykorzystane.



Rys. 5.125. Przykłady przekryć wiszących z drewna klejonego; schemat dachu wiszącego jednoprzęsłowego, jednokrzywiznowego; schemat dachu wiszącego, jednoprzęsłowego, dwukrzywiznowego, [357].

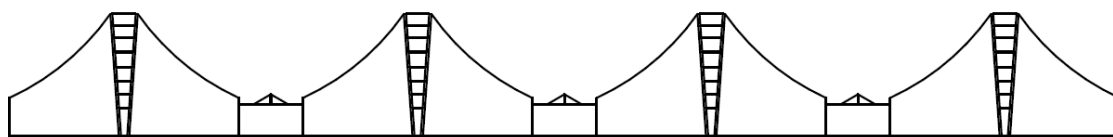


Rys. 5.126. Festival Hall EXPO 1964 Lausanne. Architektura: A. Lozeron, M. Moser, C.Chatelain, F. Martin, konstrukcja: R.Perreten, P. Millert, schemat konstrukcji przekrycia, [93], [357].

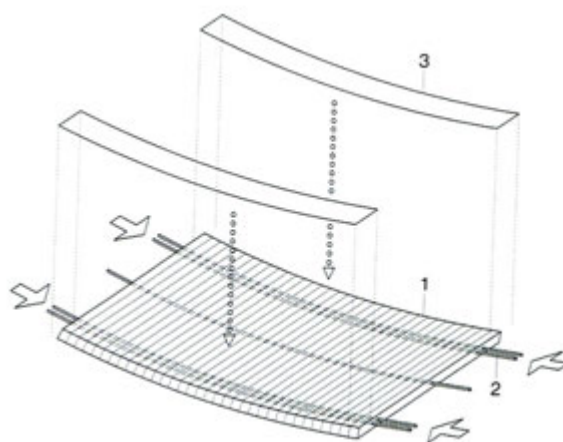
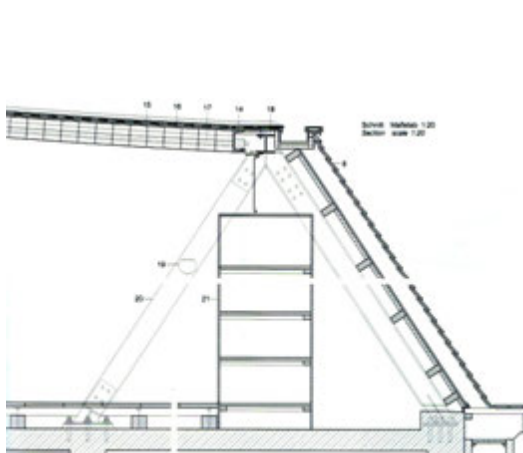


Rys. 5.127. Hala recyklingu w Wiedniu. Architektura: Lukas M. Lang. Konstrukcja: J. Natterer, 1982 r. Schemat konstrukcji przekrycia dachu , [354], [357].

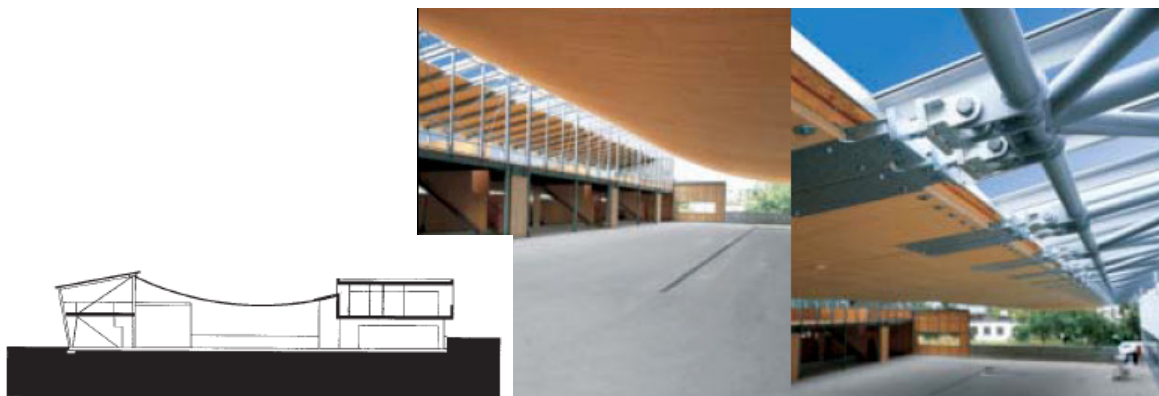




Rys. 5.128. Hala produkcyjna Wilkhahn w Bad Muender-Einbeckhausen. Architektura: Frei Otto, Warmbronn. Konstrukcja: Speich und Hinkes, schemat konstrukcji przekrycia. Realizacja 1987 r, [326], [357].



Rys. 5.129. Budynek administracyjny w Nagoya. Architektura: FT Architects, Tokyo, Schemat konstrukcji przekrycia, [223].



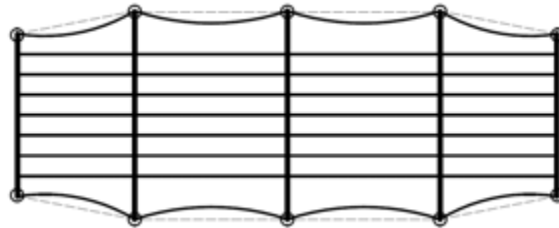
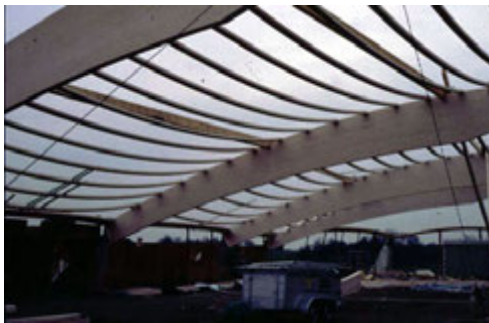
Rys. 5.130. Hala w Hohenems w Austrii. Architektura: Reinhard Drexel, [327].



Rys. 5.131. Siatkowa struktura dachu krytej pływalni Solebad Bad Duerheim, Niemcy. Architektura: Geier + Geier, [323].



Rys. 5.132. Hala olimpijska łyżwiarstwa szybkiego w Nagano, Japonia. Architektura: Kajima, [342].



Rys. 5.133. Autohaus Deffur, Brachelen. Architektua: Beyer. Konstrukcja: Tragwerkplaner Führer, [335].

Rys. 5.134. Schemat konstrukcji przekrycia, rozstaw dźwigarów 21 m, elementy wiszące z drewna klejonego o wysokości przekroju 10 cm, [357].

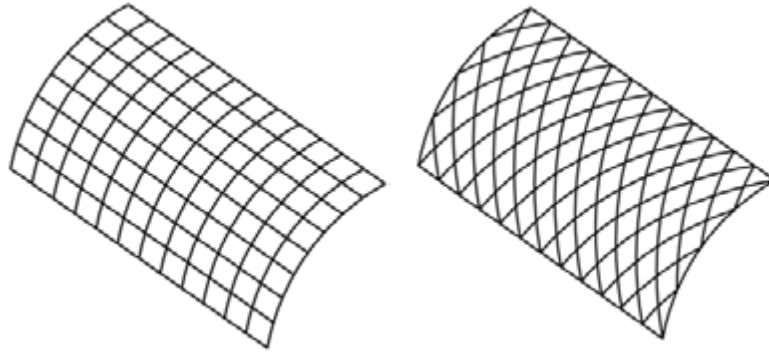
5.9. Systemy siatkowe z drewna klejonego

Systemy siatkowe są bardzo efektywnymi, nowatorskimi konstrukcjami odpowiednimi dla realizowania rozpiętości od kilkunastu do 40 metrów, jakkolwiek zrealizowano także większe konstrukcje z udziałem siatek. Są to np. hale wystawowe: w Karlsruhe - o rozpiętości 80 m i w Friedrichshafen, w Niemczech, o rozpiętości 60 m. Zasady tworzenia siatek są zbliżone do zasad konstruowania rusztów, z tym, że stosuje się je dla powierzchni zakrzywionych w jednej płaszczyźnie lub w dwóch płaszczyznach tworzących powłoki wklęsłe lub wypukłe zwane łupinami lub muszlami. Są to powłoki o geometrii paraboliczno – hiperbolicznej, powłoki brył swobodnych o geometrii tworzącej kształty regularnej bądź nieregularnej fali a także formy różnorodnych kopuł. Siatki stosuje się jako konstrukcje samonośne. Są one jednak konstrukcjami wiotkimi i potrzebują usztywnienia obwodowego, ściągów stalowych bądź dodatkowych usztywnień poprzecznych lub podłużnych. Często stanowią element wypełnienia przestrzeni między głównymi, łukowymi dźwigarami nośnymi. Można je projektować jako jednowarstwowe lub dwuwarstwowe. Na przykład w hali w Morges, dodatkowo zaprojektowano przęsła kratownic, które usztywniają konstrukcję i przejmują w dużej części obciążenia pokryciem dachu, śniegiem i wiatrem, co pozwala na minimalizację wymiarów przekroju elementów konstrukcji siatki. Systemy siatkowe stosuje się w układach jednoprzęsłowych. Realizowane są schematy dwuprzegubowe o małych wyniesieniach lub trójprzegubowe. Bardzo często stosuje się usztywnienie pełną belką łukową na obwodzie konstrukcji.

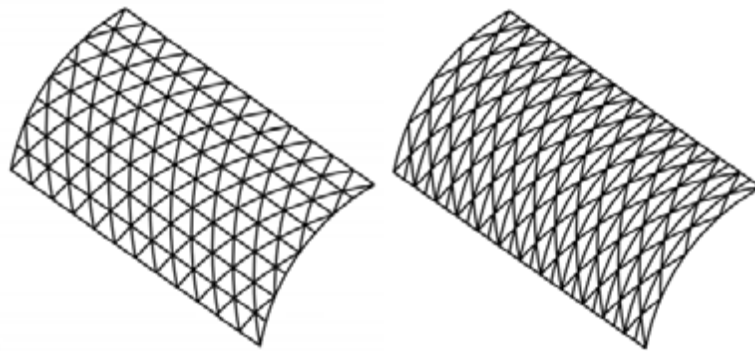
Siatki dzieli się w zależności od zakrzywienia na jednokrzywiznowe i dwukrzywiznowe a także ze względu na kształt pól międzyelementowych.

Rodzaje siatek ze względu na kształt pól:

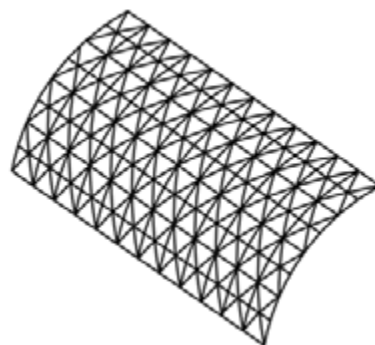
- 1) siatki o polach prostokątnych przebiegających wzdłuż tworzącej oraz w poprzek krzywizny,
- 2) siatki o polach rombów – powstają z prętów łączonych w dwóch wzajemnie się przecinających kierunkach, pod różnymi kątami,



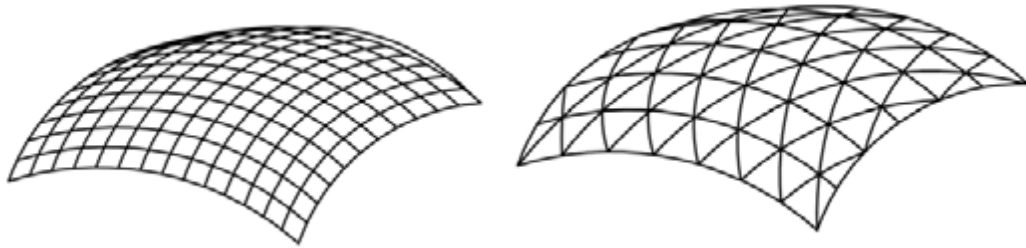
- 3) siatki o polach trójkątnych – powstają przez podział rombów elementami przebiegającymi wzdłuż tworzących,
- 4) siatki o polach trójkątnych – powstają przez podział rombów elementami przebiegającymi w poprzek krzywizny.



- 5) siatki o polach trójkątnych – powstają przez podział rombów elementami przebiegającymi w poprzek i wzdłuż krzywizny.



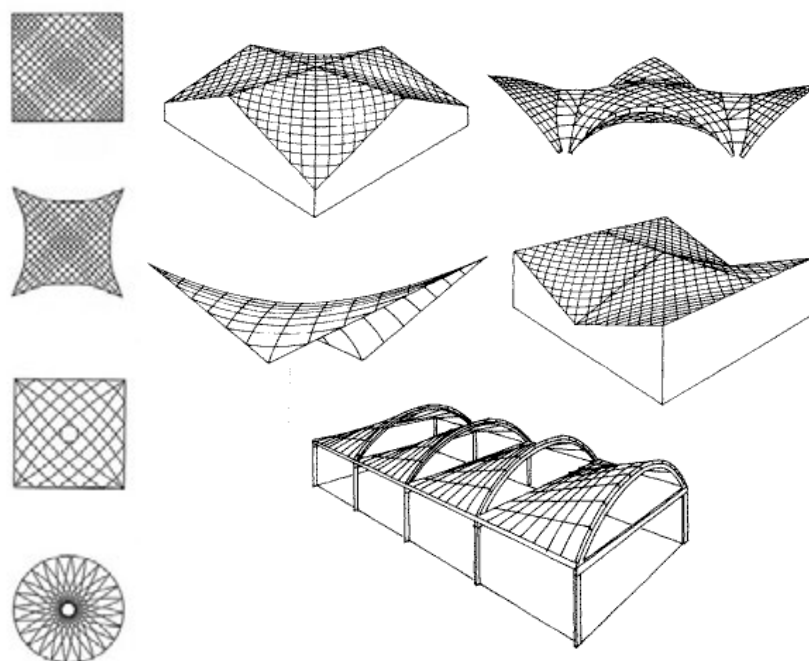
Analogicznie kształtuje się siatki dwukrzywiznowe



Największą zaletą systemów siatkowych jest to, że pozwalają na zastosowanie powtarzalnych elementów z drewna klejonego łączonych za pomocą stalowych łączników. Siatki są bardzo atrakcyjne architektonicznie, dlatego zazwyczaj eksponuje się je we wnętrzach a także, rzadziej, na zewnątrz. Pokrycie dachu stanowią wtedy materiały przezierne, takie jak szkło, tworzywa sztuczne. Uzyskuje się w ten sposób interesujące efekty związane z załamywaniem światła. Ciekawymi realizacjami eksponującymi strukturę siatki od zewnątrz są zbudowane w Wielkiej Brytanii: Portcullis House w Londynie Westminster oraz Herbert Arts Gallery. W budynkach tych zastosowano siatkę dwuwarstwową. Podstawową siatkę tworzą elementy z drewna klejonego, natomiast drugą warstwę zrealizowano w formie stężających prętów stalowych. Elementy z drewna klejonego o przekroju 10x 20 cm ściśle współpracują z elementami stalowymi tworząc układ hybrydowy. Połączenia w węzłach zrealizowano za pomocą stalowych przegubów w formie kul ze stali nierdzewnej. Węzły siatek są tu przegubowe. Najbardziej rozpowszechnione są siatki o węzłach na blachy wbudowane, gdzie elementy z drewna klejonego są połączone ze sobą czołowo pod ostrymi kątami, tworząc romby. Romby można dodatkowo podzielić elementami diagonalnymi, co tworzy siatkę o oczkach trójkątnych. Innym sposobem jest połączenie warstwowe (jeden element na drugim łączony na śruby, jak np. w hali wystawowej w Mannheim) lub siatka podwójna zrealizowana za pomocą dwóch elementów łukowych z prostopadłociennymi przewiązkami lub realizacja oczek prostokątnych, heksagonalnych lub sześciobocznych podziałach pola, wzmacniane cięgnami stalowymi lub usztywnione poszyciem, jak np. w Senpentine Galery w Londynie. Już w 1975 roku w na bazie konstrukcji siatki dwukrzywiznowej została wybudowana hala wielofunkcyjna w Mannheim o wymiarach: rozpiętość - 15 m, długość - 50 m, wysokość - 9 m. Była to wtedy bardzo śmiała i nietypowa konstrukcja kształtowanej swobodnie powłoki z użyciem elementów z drewna klejonego. Autorem konstrukcji był m. in. F. Otto. Pojedyncze elementy siatki mają tu wymiary 5x5x50 cm. Rozwinięciem koncep-

cji Frei Otto były wybudowane na targi Expo w Hanowerze w 2000 roku budynki wykorzystujące geometrię podwójnej krzywizny w odmienny sposób. Jednym z tych budynków jest Pawilon Japoński, drugim Expo Dach.

Pawilon Japoński to unikatowa struktura o wymiarach planu 72 x 34m, pokryta membraną z impregnowanego papieru z recyklingu, natomiast Expo Dach to nowatorska konstrukcja dwukrzywiznowej siatki pokrytej elementami sklejkki 'Kerto', oparta na wspornikach – „konarach” konstrukcji. Siatka składa się z 8 do 10 lameli przebiegających, co druga, przez belki poprzeczne, skręcanych lub klejonych do nich w równych odstępach. Rozstaw żeber wynosi od 0,36 m przy podporach do 1,5 m na krawędziach krzywizn. Konstrukcja jest stężana za pomocą płyt sklejkowych mocowanych pod kątem do osi żeber. Są to płyty układane dwuwarstwowo pod kątem prostym, o wymiarach przekroju 29x100mm. Wprowadzono je w odstępach 100 mm jedna od drugiej w celu uzyskania przepięrności przekrycia a także lepszej wentylacji elementów nośnych. Wierzchnia warstwa pokrycia została zrealizowana za pomocą syntetycznej membrany z umożliwieniem przepływu powietrza między membraną a drewnem elementów, w celu uniknięcia wpływu potencjalnie wykraplającej się wilgoci. Użycie chemicznych impregnatów nie było tu konieczne. Każda z czterech części przypadających na jedną podporę była montowana oddzielnie, następnie łączona w konstrukcję nośną i ostatecznie dźwigiem osadzana na wieżowych podporach.



Rys. 5.135. Formy siatek możliwych do skonstruowania z drewna klejonego wg J. Natterera, [333].

Przykłady zastosowania konstrukcji siatkowych z drewna klejonego.



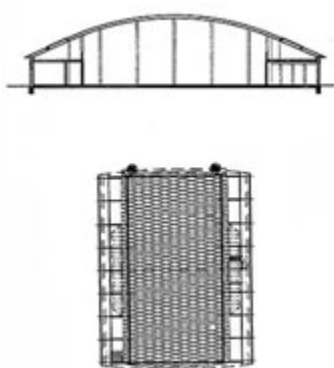
Rys. 5.136. Serpentine Galery w Londynie. Architektura: Alvaro Siza, Eduardo Sautta de Moura, [215].



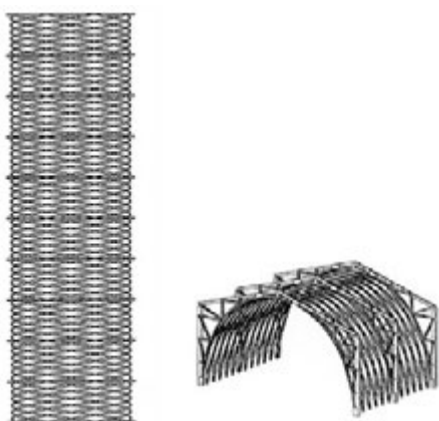
Rys. 5.137. Portcullis House w Londynie, Architektura: Hopkins. Konstrukcja: Arup, [266].



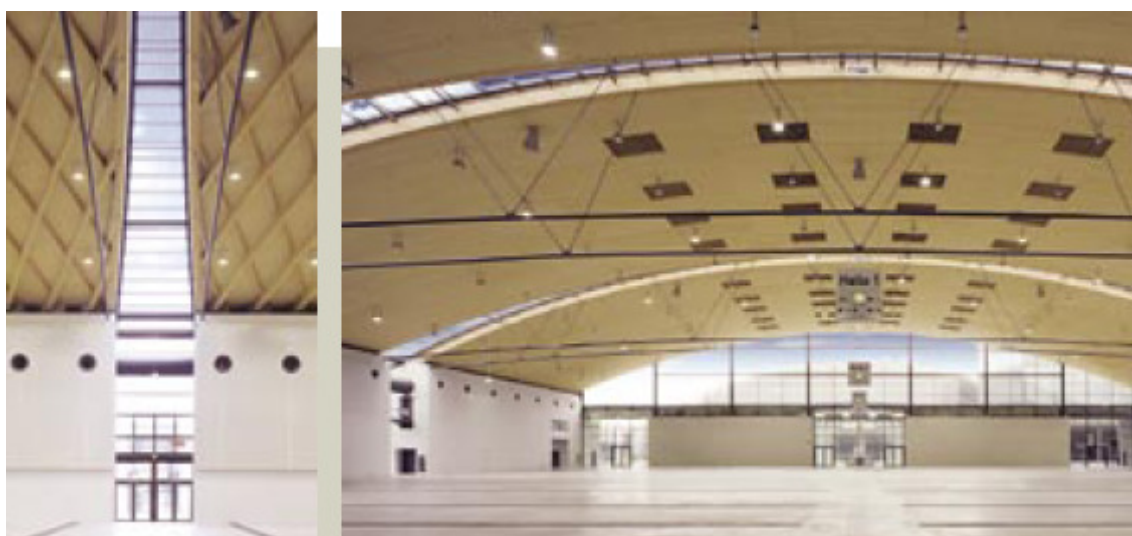
Rys. 5.138. Herbert Arts Gallery. Architektura: Pringle Richards Sharratt, London, [314].



Rys. 5.139. Hala sportowa w Berlinie. Realizacja: 1997 rozpiętość: 25 m, [333].

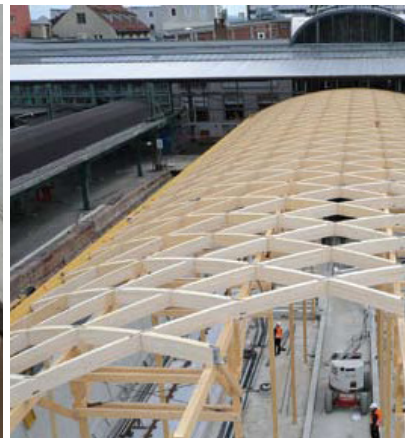
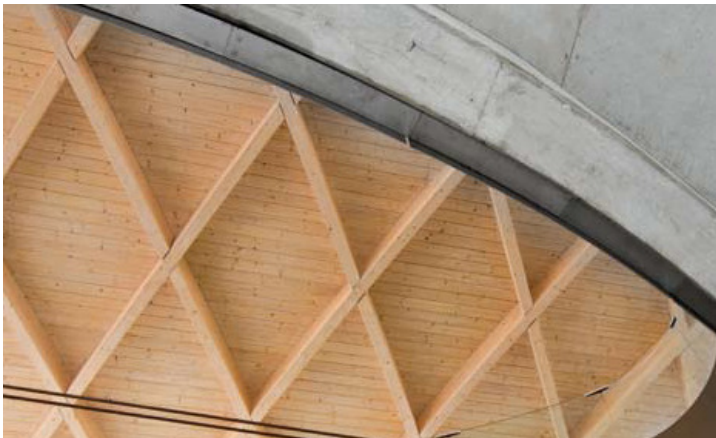
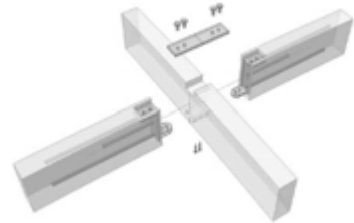


Rys. 5.140. Hala wystawowa w Morges. Rozpiętość 20 m, długość – 60 m, wysokość – 12 m, [333].





Rys. 5.141. Hala wystawowa w Karlsruhe. Architektura: Gerber Architekten. Konstrukcja: B+G Ingenieure Bollinger und Grohmann, [326].



Rys. 5.142. Zadaszenie dworca w Kassel. Architektura: Pahl + Weber-Pahl. Konstrukcja: OSD –office for structural design, [234].



Rys. 5.143. Flimwell Woodland Enterprise Centre, [304].

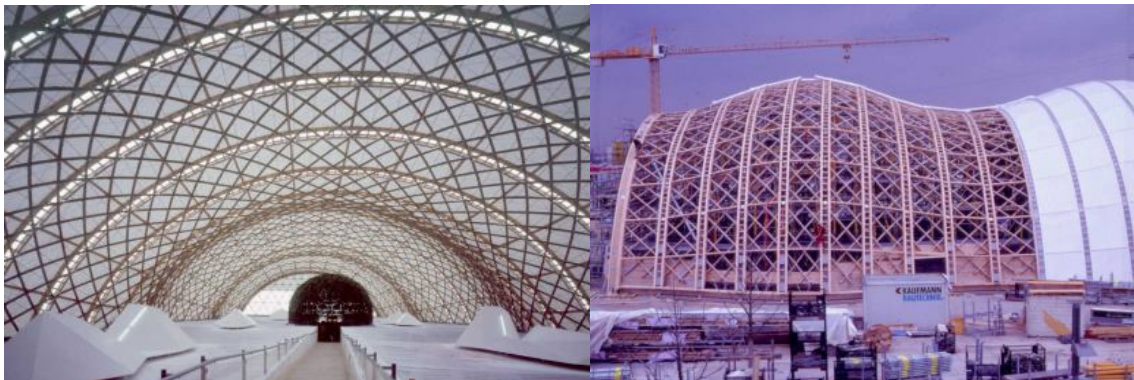
Przykłady zastosowania konstrukcji siatek dwukrzywiznowych



Rys. 5.144. Hala wielofunkcyjna w Mannheim. Architektura: Carlfried Mutschler + Partner, J. Langner, Mannheim. Konstrukcja: Frei Otto, Ted Happold, Ian Liddell, Ove Arup & Partners, [335].



Rys. 5.145. Pawilon w Savill Garden Architektura: Glen Howells Architects, Realizacja: 2005-2006, [304].



Rys. 5.146. Pawilon Japoński na światową wystawę Expo w Hanowerze 2000 r. Architektura: Shigeru Ban konsultacja: Frei Otto Konstrukcja: Buro Happold Consulting Engineers, Frei Otto, Warmbronn, Stefan Polonyi, Köln – konsultacje. Schemat konstrukcji rzutu, [313], [357].

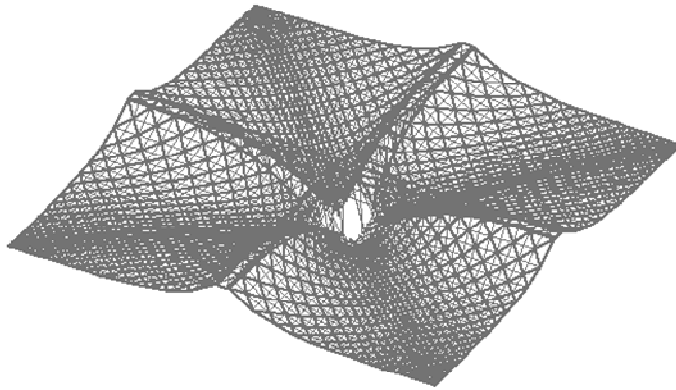


Rys. 5.147. Building Conservation Centre Wielka Brytania, [352].



Rys. 5.148. Seminar Pavillon Papiermacherzentrum Gernsbach. Architektura: AAI Knapp. Konstrukcja: IEZ Natterer GmbH. Realizacja: 2000, [333].





Rys. 5.149. Expo Dach na Expo 2000 w Hanowerze. Architektura: Thomas Herzog, [314].



Rys. 5.150. "Bulwa" wieży widokowej w Helsinkach w Finlandii. Architektura: HUT Wood Studio/Ville Hara, [326].



Rys. 5.151. Hanse Friedrichshafen. Architektura: von Gerkan, Marg und Partner. Konstrukcja: Schlaich, Bergermann und Partner. Rozpiętość: 60 m. Realizacja: 2002, [342].



Rys. 5.152. Kindergarten Triesen w Finlandii, Architektura: Effeft AG, Konstrukcja: Bois-Consult Natterer SA. Realizacja 1998. Rozpiętość 17 m, [333].



Rys. 5.153. Mehrzweckhalle Ober-Ramstadt. Architektura Schmidt, Ehrlicher, Braun, Darmstadt. Konstrukcja: IEZ Natterer GmbH. Realizacja: 1998. Wymiary: 20 x 25m, [333].



Rys. 5.154. Turnhalle Berlin-Kleinmachnow. Architektura Sasse & Fröde, Berlin. Konstrukcja IEZ Natterer GmbH. Realizacja: 1997. Rozpiętość 25m, [333].



Rys. 5.155. Polydome w Lozannie. Architektura Badic et Associates, Morges. Konstrukcja: Bois Consult Natterer SA, Realizacja: 1990. Rozpiętość: 27 m, [333].



Rys. 5.156. Konstrukcja kościoła z drewna klejonego. Gabon, Libreville Saint-Pierre, [95].



Rys. 5.157. Eden Projects new Education Resource Centre. Architektura: Grimshaw and Partners. Konstrukcja: SKM Antony Hunt Associates, [270].

5.10. Konstrukcje wspornikowe z drewna klejonego

Systemy belkowe proste wspornikowe, w różnorodnych wariantach pokazane poniżej, stosowane są zazwyczaj jako zadaszenia trybun stadionów. Problematiczną stroną takich rozwiązań jest ochrona elementów konstrukcyjnych przed bezpośrednim działaniem wpływów atmosferycznych poprzez stosowanie odpowiednich obróbek blacharskich czy powłok malarskich, impregnatów, podobnie jak w konstrukcjach mostów, co może wpływać na architekturę obiektów.



Rys. 5.158. Trybuny stadionu: Bregenz, Austria. Trybuny stadionu: Algieria. Przekrycie w Mezzocorona, Włochy, [6].



Rys. 5.159. Trybuny Stadionu w Erfurcie. Architektura: Orlich Zimmermann. Konstrukcja Oswald & Fessler, [326].



Rys. 5.160. Trybuny stadionu w Altusried, Architektura: Mohr, Altusried. Konstrukcja IEZ Natterer GmbH mit Ingenieurbüro Bertsche. Realizacja: 1999, [333].



Rys. 5.161. Stadion Sportowy w Berlinie, [6].



Rys. 5.162. Trybuny stadionu: Creteil, Francja, Sion, - Szwajcaria, [6].



Rys. 5.163. Nanterre Stadia, Ile-de-France. Architektura: Grino Architectes SA. Konstrukcja: RFR, [293].

6. Ekspresja materiału w obiektach o dużych rozpiętościach - wykorzystanie cech „naturalnego” drewna

6.1. Ekspresja materiału

„Muzycy wymagają od swoich instrumentów, by były doskonale skonstruowane. Rozróżniają instrumenty niezwykle od przeciętnych, choć ich formy bywają podobne”, [357].

Konstrukcje o dużych rozpiętościach z drewna klejonego posiadają specyficzne cechy związane z naturalnym pochodzeniem surowca. W uproszczeniu można przyjąć, że korzystają one z natury na dwa sposoby. Z jednej strony poprzez wykorzystanie naturalnego surowca i tworzenie architektury w nurcie proekologicznym, z drugiej strony, poprzez naśladowanie, w formach, kształtów występujących w przyrodzie. Drewno klejone może naśladować miękkie, organiczne kształty dzięki technologii klejenia elementów łukowych o różnych rozmiarach i krzywiznach. Naśladowanie kształtów natury i jednocześnie podkreślanie walorów ekologicznych znajdują odbicie w wielu współczesnych budowlach (rozdziały 3.11, 3.12). Z drewnem wiążą się też znaczenia symboliczne (rozdział 3.6.), i one również wpływają na jakość odbioru architektury.

Walory drewna, jego kształty, koloryt, kunszt obróbki i tajemnice modelowania były wykorzystywane od dawna do tworzenia przedmiotów „niezwykłych”. Takimi były, wykonywane z różnych gatunków drewna, instrumenty muzyczne, meble, łodzie, żaglowce, rzeźby. Przedmioty te wiązały się z „niezwykłymi” wartościami niematerialnymi, jak podróże w nieznane, przewyciężenie siły grawitacji, pokonanie wodnych przestrzeni. Instrumenty wydobywały dźwięki, pozwalały przedostać się do *nieziemskiej krainy Muzyki*. Rzeźby i meble z drewna, kunsztownie wykonane, wydobywały „duszę” drewna, przynosząc sławę swym twórcom. Przymioty drewna były obecne w mitach, wierzeniach i tradycjach. Od dawna z drewnem łączy się właściwość nadawania kształtu przenoszącego ludzkość w nowe wymiary. Samolot unosi w przestworza, drewniane koła i sanie pokonują przestrzeń, łodzie pomagają w odkrywaniu nowych lądów, instrumenty i rzeźby są powiązane z wysoką kulturą i sztuką, przenoszą w świat doznań duchowych. Obecnie, stosując tę samą właściwość modelunku, która „wydobywa duszę drewna”, można for-

mować przestrzeń dużej skali, konstruować obiekty i ich układy nośne. Powstają nowe, niezwykle formy. Wyodrębnia się nowa estetyka obiektów architektonicznych. Thomas Herzog mówi o „*budynkach instrumentach, na których będzie grał użytkownik*”, [79]. Herzog odnosi się tu do Hali 26 na terenach targów hanowerskich, jednak obiekt, który wprost realizuje postulat architektury instrumentu to sala koncertowa Sibeustalo w Lahti [290] w całości wykonana z drewna. Powstała ona jako kontynuacja narodowej tradycji fińskiej oraz w celu wykorzystania doskonałych właściwości drewna, w tym akustycznych.

Materiały są bardzo ważne dla odbioru architektury, a obszary ich stosowania zawsze stanowiły przedmiot badań i eksperymentów. Historia eksponowania rodzaju, jakości materiałów i dbałości o powierzchnię (ścian, detali, elementów konstrukcyjnych) jest tak długa, jak historia architektury. Materiały oddziałują swoim wyglądem, sposobem, w jaki są eksponowane, obrabiane i łączone; sposobem, w jaki reagują na światło, dźwięki, warunki klimatyczne i czas. Wpływ barw, światła, faktur i struktury materiałów na człowieka stanowi bogatą dziedzinę badań naukowych w różnych specjalnościach, zarówno w medycynie jak i w architekturze. Zdobienie, malowanie, lakierowanie, olejowanie i szlifowanie, wygładzanie, i perforowanie to techniki znane już od dawna. Sposób wydobycia i wyeksponowania charakteru zastosowanych materiałów decyduje o wyrazie i charakterze architektury obok samej jej formy. Powierzchnie elewacji to często kontrasty płaszczyzn materiałów i światłocienia. Zmieniające się faktury, przy zmianach perspektywy, powodują wrażenie ruchu, intensyfikują działanie materiałów. Zgodnie z postulatami twórców, architektura powinna być odbierana nie tylko wizualnie, ale także odczuwana [139]. Właściwości materiałów można wykorzystywać na wiele sposobów, by osiągać niepowtarzalne, różnorodne efekty. Budowa, kolory, wielkości, proporcje i moduły płaszczyznowe zastosowanych materiałów i ich faktury mają istotny wpływ na jakość architektury i mogą powodować różnorodne konsekwencje wrażeniowe.

Wybór materiału daje możliwości pokazania jego natury, charakteru i symboliki. Wybór materiału konstrukcyjnego to możliwość nadania architekturze zamierzonych cech estetycznych poprzez wykorzystanie efektów przestrzennych, jakie można dzięki danemu materiałowi zbudować. Materiały wnoszą znaczenia symboliczne. Są też odbiciem jakości trwania budowli w czasie. Kamienie mówią o odległym geologicznym pochodzeniu, są trwałe i stanowią naturalny symbol długowieczności. Cegły przywodzą na myśl ziemię, ogień i średniowieczne tradycje budownictwa. Drewno mówi o dwóch różnych for-

mach trwania - jego pierwsze życie to rosnące, żywe drzewo i drugie - dzieło wytworzone przez człowieka.

Faktura, zdobienie, detal, sposoby połączeń i skala zastosowania materiału wpływają na jakość dzieła i jego architektoniczny odbiór, lecz „nawet najszlachetniejsze materiały tracą charakter, gdy zastosuje się je bez talentu i zrozumienia” [139]. Stanisław Niemczyk ujął to w inny sposób: „Nie analizuję architektury pod kątem rozpoznawania, z czego powstaje. Uważam, że jej jakość czy ostateczny odbiór, nie są związane bezpośrednio z użytym materiałem, lecz ze sposobem wydobycia istoty tego materiału (...) Każdy materiał ma swoją duszę, naturę. Zgodnie z tą naturą da się z niego coś wydobyć, coś wyprofilować, złożyć w całość”, [357]. Materiał jest w sposób nierozzerwalny związany ze światłem, które na niego pada, dlatego ważne jest uwzględnienie światła w wydobyciu z materiału odpowiednich cech.

Drewno ma pozytywne oddziaływanie na użytkowników, na co mają wpływ takie czynniki jak wyrazistość, autentyczność – naturalne pochodzenie, ciepło związane z kolorytem i właściwościami fizycznymi. Drewno klejone stało się szczególnie atrakcyjne dla budownictwa sakralnego, gdzie ważna jest atmosfera skupienia i intymności. Nie bez znaczenia tu są faktura drewna oraz sposób, w jaki pochłania i oddaje światło. Przykładem zastosowania konstrukcji z drewna klejonego dla wydobycia odpowiedniego nastroju we wnętrzu jest Sanktuarium Miłosierdzia Bożego w Łagiewnikach. Drewno jest bezpieczne w użytkowaniu, nadaje budowlom naturalne, przyjazne człowiekowi ciepło, podczas gdy stal i beton wprowadzają dystans. Z drewna budowane są obiekty związane z rekreacją i turystyką - hotele i restauracje, domy letnie, schroniska górskie, natomiast stosowane w szpitalach, bibliotekach i innych obiektach użyteczności publicznej mogłyby wpłynąć korzystnie na sferę psychofizyczną człowieka, poprawić ich przystępność i przyczynić się do podnoszenia jakości życia poprzez zapewnienie komfortu psychicznego. Użytkownicy akceptują je intuicyjnie. Badania jego właściwości wskazują, że, nie bez powodu, obiekty, w których zastosowano konstrukcje z drewna klejonego są przyjazne człowiekowi, bo posiadają dobrą akustykę, mikroklimat i właściwości izolujące. Elementy konstrukcyjne nie muszą być ukrywane i obudowywane, przejmują zmiany wilgotnościowe i mają korzystne działanie psychofizyczne.

6.2. Eksperymenty z konstrukcją: statyka - rzeźba - formy organiczne

Wiek XX w historii architektury to okres zainteresowania systemami konstrukcyjnymi i nowe podejście do dynamicznego kreowania form architektonicznych, co potwierdzają bardzo liczne realizacje obiektów dużych rozpiętości (rozdziały 3.2, 3.3., 3.4., 3.5.). Architekci wykorzystują konstrukcję dla architektonicznych efektów. Budowa form jest paralelna do dystrybucji sił i odkształceń oraz służy wykorzystaniu możliwości materiałowych i technicznych. Dokonania architektów i inżynierów XX wieku, takich jak: Le Corbusier, Mies van der Rohe, Wright, Gropius, Saarinen, Utzon, Calatrava, Nervi, Fuller, Frei Otto, Aalto, Piano, Ando, Rogers, Tschumi, Foster, Samyn Ito, Isozaki, Grimshaw, Nowicki, Perrault, Nouvell i wielu innych, [67], [49], [65], [155], pokazują, że konstrukcja, wcześniej ukrywana pod ozdobną fasadą, w XX wieku stała się jednym z podstawowych środków architektonicznego wyrazu. Ben van Berkel pisze o dziełach Santiago Calatravy [14]: „nie odrzuca on technicznej biegłości na rzecz większej swobody wyboru, wykorzystuje natomiast wszystkie dostępne własności mechaniki i tworzy teatralny efekt, posługując się wariacjami, które rządzą siłami statycznym”, „działając bardziej jako koordynator niż matematyk, Calatrava jest „rzeźbiarzem sił”. Dążeniem Calatravy jest wyrażenie zależności sił rozciągających zarówno w kategoriach fizjologicznych, jak i wizualnych, słowem pełne wykorzystanie możliwości materiału”. U Calatravy dążenie do jasności i abstrakcji prowadzi do konfiguracji, które odarto ze wszystkiego, co peryferyjne, pozostawiając jedynie szkielet. Sam Calatrava, pisze: „Zgromadziłem przewodnie zasady w koncepcji moich budowli, zasady, które opierają się na wewnętrznej organizacji. Zawsze wykorzystuję je do maximum (...) zawsze staram się pracować w sposób, który jest jasny i uczciwy, a zamierzenia są przejrzyste i czytelne. Ale także czuję, że jako architekt mogę używać mojej profesji, by tworzyć wartości estetyczne w ten sam sposób, jak czynią to malarze czy rzeźbiarze”, [309]. Podobne zamiłowanie do konstrukcji, szczerości i doskonałości formy można zauważyć w wielu realizacjach innych znanych architektów. Pokazanie przebiegu sił, zdaniem Tadao Ando [47], w architekturze drewnianej ma znaczenie symboliczne. „Podstawę architektury drewnianej stanowi estetyka masywnych konstrukcji nośnych, a zasady działania każdego członu przenoszącego naprężenia na inny człon powinny być widoczne”. Wojciech Zabłocki, twórca wielu konstrukcji z drewna klejonego, pisze: „Prawa ciężenia oraz wynikłe z nich wewnętrzne siły, którym podlega każda konstrukcja obiektu architektonicznego, wpływają na systemy konstru-

owania i wykształcają swoistą estetykę celowej i pięknej konstrukcji. Estetyka ta podlega ciągłej ewolucji - w miarę postępu w dziedzinie wytwarzania materiałów budowlanych, opracowywania nowych systemów statycznych, a także coraz doskonalszych obliczeń. Muzami współczesnych konstruktorów są lekkość i siła”, [180]. Le Corbusier: „Nie możemy wyrzucać pieniędzy na budowę historycznych pamiątek. Musimy obmyć architekturę z dekoracji. Pomogą nam w tym inżynierowie, i to oni będą naszymi budowniczymi”, [49]. Wprowadzenie szkieletowej konstrukcji żelbetowej i stalowej, a także zastosowanie nowych materiałów budowlanych - lekkie betony, stal, konstrukcje z drewna klejonego, i, w latach 60 tych, lekkich systemów dwukrzywiznowych i cięgnowych, w radykalny sposób zmieniło sposób myślenia o formie architektonicznej. „Rozpoznanie związku pomiędzy formą konstrukcji a grą sił formotwórczych pozwala przyjąć graficzne parametry projektu architektury” [81]. Specyfika obiektów o dużych rozpiętościach w obiektach prestiżowych pozwala na zastosowanie układów konstrukcyjnych, które, poprzez swoją dużą skalę i zdolność do ujawniania „ekspresji sił”, tworzą atrakcyjne formy architektoniczne. „Budowle o dużych rozpiętościach łącznie z budowlami wysokimi, tworzą grupę specyficznych obiektów o, z reguły, dużym znaczeniu w rozwoju cywilizacyjnym poszczególnych społeczeństw”. (...) Pod względem estetycznym obiekty tej grupy charakteryzują się stosowaniem prostych i spójnych form architektonicznych z czytelnymi elementami symetrii w całości lub częściach takiego założenia”, [140].

Oprócz uwarunkowań technicznych w budownictwie dużych rozpiętości istnieją zależności symboliczne i prestiżowe, które powodują, że często odstępuje się od stosowania najbardziej ekonomicznych rozwiązań na rzecz architektury rozpoznawalnej i unikatowej, w której wykorzystuje się konstrukcję dla wyrazistego efektu. Są to bardzo często budowle o niespotykanych wcześniej układach, pomysłach lub nowatorskich systemach statycznych – obiekty „rzeźby i symbole” (rozdział 3.6.) oraz obiekty organiczne, naśladujące formy naturalne (rozdziały 3.9., 3.11.). Nawiazanie do świata przyrody i kopiowanie jej rozwiązań widoczne jest w wielu dziełach. Sposób konstruowania form ma obrazować i symbolizować siły drzemiące w przyrodzie. Nowatorskie rozwiązania i eksperymenty w największym zakresie dotyczą obudowy zewnętrznej i struktury konstrukcyjnej.

Silne związki z przyrodą, oprócz samego pochodzenia surowca, to unikalne cechy drewna klejonego pomocne w plastycznym kreowaniu form. Pochodzenie drewna, jego właściwości inspirują projektantów do naśladowania i kreowania kształtów występujących w naturze. Technologia przetwarzania i współczesne metody modelowania pozwala-

ją na ekonomiczne wykorzystanie możliwości materiałowych, by nadać projektowanym formom czystość geometryczną i zapewnić ich właściwą pracę statyczną. Sposób odbioru układów krzywoliniowych w perspektywie oraz fakt, że są pokryte materiałami plastycznymi (tkaniny, membrany), sprawiają, że układy te jawią się jako wielowarstwowe, przestrzenie niegeometryczne, o wysokiej ekspresji, co kojarzy się z nowoczesnością, nawet jeśli wyznaczają je proste zasady geometryczne. Atrakcyjność pozornie złożonych krzywoliniowych form (układów wiszących, siatkowych - dwukrzywiznowych) jest podsygnalowana tym, że, pod wpływem rozwoju możliwości technicznych, po raz pierwszy uzyskano miękkie formy obiektów dużych rozpiętości, naśladujące formy organiczne.

Tabela 6.1.Symbolika konstrukcji z drewna klejonego.

Symbolika lasu i drzew	Siła i długowieczność Wytrzymałość Wielość rytmów Miętkość i swoboda form Różnorodność i przypadkowa geometria form Piękna przestrzeń Ekspresja i koloryt Łatwopalność i nietrwałość Wzrost i zmienność
Symbolika pracy statycznej	Lekkość i koincydencja wzajemna elementów konstrukcyjnych Dynamika, ruch Czystość techniczna, czytelność form Geometria form (kreowania układów przestrzennych)
Symbolika technologii	Wyeliminowanie wad materiału Przystosowanie materiału do znaczącej funkcji konstrukcyjnej Tradycja

Wyraz architektury w bardzo dużym stopniu zależy od zastosowanego materiału konstrukcyjnego, który, jak w przypadku drewna, przywołuje dodatkowe znaczenia symboliczne. Wybór naturalnego materiału konstrukcyjnego, drewna klejonego, wskazuje na

poruszanie się w granicach określonego obszaru, który wynika z jego technologicznych możliwości i z naturalnych właściwości, odczuwalnych „intuicyjnie”. Drewno, w swej pierwotnej postaci drzewa, pnia i gałęzi, ma charakterystyczny kształt, który przywołuje symbolikę naturalności, długowieczności, siły i dużej wytrzymałości. Na wzór lasu, elementy nośne łączy się w przestrzenne układy, nadając różne funkcje statyczne przetworzonym pniom, konarom, gałęziom i liściom. Tylko natura tworzy drzewo. Ludzka kreatywność pozwala jednak na przeniesienie w obszar architektury symbolu drzewa w jego charakterze i sposobie działania. Logika lasu, jego skomplikowana i jednocześnie uporządkowana struktura, nastrój, trwanie, wytrzymałość, a także wieloznaczna symbolika jako „dachu” - schronienie przed deszczem, wiatrem i słońcem, oderwanie od przestrzeni ziemi, będzie zawsze stanowić inspirację dla nowych poszukiwań form architektonicznych zabarwionych konstrukturyzmem. Intuicyjnie, w konstrukcjach nośnych stosuje się konar jako belkę, pień jako słup, intuicyjnie wykorzystuje się plastyczność drewna i formuje obiekty w układy krzywoliniowe. Żywoćność i niepowtarzalność układów, kształtów, szczególnie w przestrzeni „leśnej”, odbierane jako niezorganizowane, są przeważnie nieopłacalne w kształtowaniu architektury. Formy bezpośrednio kopiowane z natury mogą się wydać przypadkowe. Stanowią jednak sygnatury a nawet dominanty przestrzenne.

Konstrukcje z drewna klejonego, na wzór drzewa, ale także z powodu uwarunkowań budowy fizycznej drewna i jego właściwości mechanicznych powstają z połączeń elementów nośnych konstrukcji prostych i łukowych (głównych i dopełniających). Elementy podstawowe to: element prosty o przekroju prostokątnym oraz element łukowy, zakrzywiony w jednej płaszczyźnie i o przekroju prostokątnym. Elementy o przekroju okrągłym wykorzystuje się jak pnie, jako podpory. Łączenie elementów składowych odbywa się za pomocą różnorodnych łączników, najczęściej stalowych. W przypadku drewna klejonego możliwe jest uzyskiwanie trwałych połączeń klejonych – klinowych, najczęściej spotykanych w układach ramowych, realizowanych za pomocą klejonych węzłów lub wbudowanych blach. Typowe dla konstrukcji drewnianych jest jednak przegubowe łączenie elementów. Układy plastyczne, miękkie, organiczne to najczęściej łuki, kopuły, siatki przestrzenne jedno - i dwukrzywiznowe, przekrycia wiszące. Warto podkreślić, iż drewno klejone w takich układach, pomimo że jako materiał, jest zdolne do przyjmowania zarówno ściskania jak i rozciągania, z reguły współpracuje z elementami stalowymi.

Pierwsze formy budowli (techniki budowlane), z racji silnego związania człowieka z przyrodą, naśladowały przyrodę w sposób oczywisty. Postęp w abstrakcyjnym i anali-

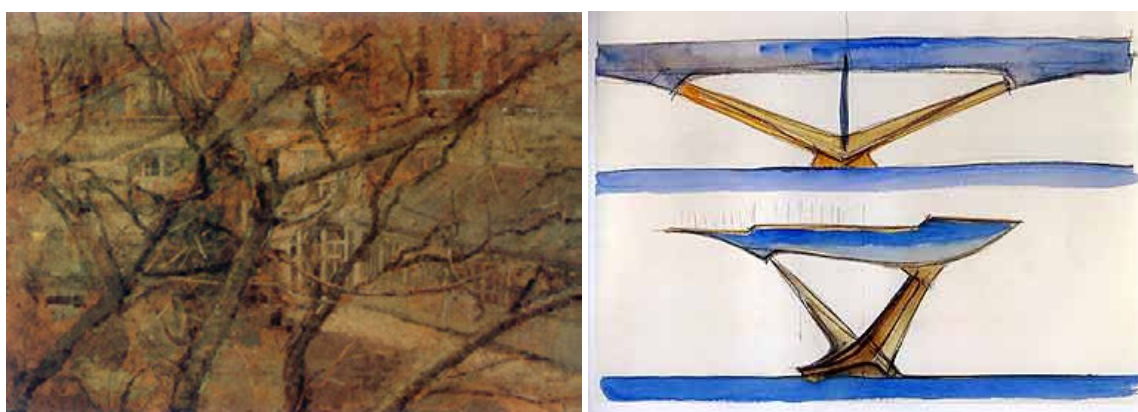
tycznym sposobie myślenia i jednoczesny rozwój cywilizacyjny doprowadziły do powstania pojęć związanych z estetyką, sztuką, pięknem, a człowiek, w coraz większym stopniu, odcinał się od „naturalnego” pochodzenia i „naturalnych” praw, porządkował „chaos” przyrody. W architekturze nadal jednak niezmiennie wykorzystuje się symbole przyrody jako elementy konstrukcyjne. Drzewo, pień, konary, liście, łodygi, las – jako strukturę powiązanych elementów - muszle, płatki kwiatów, pancerze skorupiaków, żółwi i pancerników, szkielety kręgowców - jako inspirację dla projektowania architektury i konstrukcji. Ludzkość wciąż uczy się od natury. W naturze występują „doskonałe” konstrukcje, takie jak skorupa jaja albo muszla, która dzięki swojej konstrukcji skutecznie chroni organizmy przed ogromnym ciśnieniem wody i innymi zagrożeniami. W naturze występują zwierzęta, których budowa przystosowuje je do osiągnięcia niezwykłych szybkości, owady o wytrzymałych pancerzach lub o niezwykłej lekkości. W naturze występują także substancje pozwalające na tworzenie układów o nieproporcjonalnie wysokiej wytrzymałości – nośności (pajęczyny). Wpływ natury na inżynierię i architekturę jest ogromny. Kości, szkielety, budowa niektórych organizmów pozwoliły zrozumieć właściwości i zależności mechaniczne, przyczyniły się do konstruowania zarówno samolotów, statków, jak i budynków. Kształty i konstrukcje zaobserwowane w naturze znajdują odbicie w systemach konstrukcyjnych. Są one, „materialnym objawieniem się praw natury”, [151]. Le Corbusier wykorzystał inspirację naturą do stworzenia przekrycia kaplicy w Ronchamp: „Skorupa kraba podniesiona na Long Island koło Nowego Yorku w 1946 roku leży na mojej desce kreślarskiej. Stała się ona dachem kaplicy”, [20]. Idea organicznej architektury używana jest w odniesieniu do architektury XX w, ale nie można jej jednoznacznie zdefiniować. Frank Lloyd Wright mówił o architekturze organicznej w odniesieniu do budowli z lat 50 - tych XX w. Z kolei Hugo mówił o architekturze organicznej w odniesieniu do ludzkich organów. Organy odpowiedzialne za funkcjonowanie ludzkiego organizmu porównał do części składowych budowli. Jego architektura była modelowana jak organizm, [42]. Projektowanie architektury wzorowanej na ludzkim lub zwierzęcym ciele najczęściej dotyczy szkieletu, który jest strukturą utrzymującą cały system biofizyczny. Związki architektury z układem kostnym wydają się nazbyt oczywiste. Szkielet naśladuje się w architekturze najczęściej w sposobie działania lub dosłownie, np. w Casa Batlo, w Barcelonie, Antonio Gaudiego, gdzie kręgosłup, niemal dosłownie skopiowany, służy jako element schodów. Kręgosłup stał się także tematem eksperymentu konstruktora Frei Otto. Zbudował on ruchomą formę kolumny z odrębnych elementów

spiętych stalową liną. Frei Otto wierzył, że w ten sposób można konstruować budynki wysokie, [42]. Szkieletową określa się najczęściej architekturę o konstrukcji belkowo – słupowej, choć w budowie organizmów nie występują kości łączone w układy graniaste. Tu szkielet konstrukcyjny kopiuje jedynie sposób działania systemu biologicznego – oddzielenia części nośnej od wypełnienia jako odrębnych tkanek. Naturalne konstrukcje zwierzęcych organizmów studiowali i wykorzystywali w swych pomysłach konstruktor-skich także Ligi Nervi, B. Fuller, I. Makowecz, a współcześnie S. Calatrava, R. Piano i inni. Z jednej strony naturę postrzega się jako źródło inspiracji dla konstruowania form architektonicznych i „godną naśladowania mistrzynię”, [155], z drugiej strony - neguje się jej nieomylność przedkładając zdobycze cywilizacji, które ją prześcignęły, lub takie, które, choć niezastąpione we współczesnym świecie, w naturze nie mają swojego odpowiednika lub choćby pierwowzoru. Jak twierdzi Sławińska: „wykorzystanie praw fizyki dla świadomie zamierzonych celów oraz ślepe, podległe tym samym prawom działanie ewolucji prowadzi nieraz do zbliżonych rezultatów”, [155]. Stąd, zarówno inspiracje przyrodnicze jak też analizy matematyczne i statyczne mogą prowadzić do powstania nowych systemów konstrukcyjnych. Przykładem jest paraboloida hiperboliczna, krzywa prostokreślna, nie mająca odpowiedników w przyrodzie, oraz konstrukcje tarczownicowe. Inspiracje naturą, w charakterystyczny dla człowieka sposób, nigdy nie są wolne od naczaczenia „kulturą”. Natura zostaje przetworzona przez czynnik logiczny porządkujący nieuporządkowaną naturę. Według architekta Renzo Piano, uważna obserwacja natury uczy nas wielu rzeczy, ale bezpośrednia imitacja powinna być powiązana z obserwacją zależności zasad, form, właściwości fizycznych i mechanicznych. Dach budynku może wyglądać jak muszla dla samej ekspresji i pięknego wyglądu, ale prawdziwa wartość dachu muszli polega dopiero na jego odpowiednim skonstruowaniu. „Naśladowanie natury powinno być aluzją, nie imitacją” [302]. Santiago Calatrava, z kolei, pisze: „W mojej pracy nad podatnością na zginanie konstrukcji motto brzmiało: Natura mater et magistra - naturą jest matką i nauczycielką. Można znaleźć wiele przykładów, kiedy można wręcz przenieść z natury prawdziwe zasady i metafory obserwując rośliny i zwierzęta. Dla mnie są dwie przewodnie zasady, które można znaleźć w naturze i które są najbardziej właściwe dla budownictwa. Jedną jest optymalne wykorzystanie materiału, drugą - zdolność organizmów do zmiany kształtu w procesach wzrostu i ruchu. Ruch, w szczególności, stanowi dla mnie prawdziwe źródło inspiracji. Zbudowałem struktury jak drzewa i często moje projekty mają formę szkieletową. Za tym kryje się powracająca zasada. Jakkolwiek

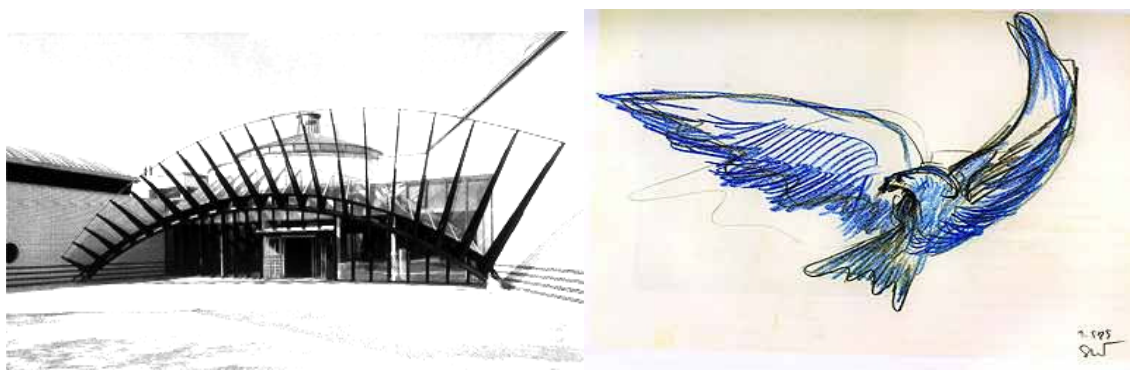
w przypadku drzew i kręgowców można powiedzieć, że forma została podyktowana uniwersalną zasadą, że podstawa jest grubsza niż korona, ale to także przywołuje coś pięknego, nazwanego rytmem, tym samym, który można odnaleźć w kompozycjach muzycznych”. ”Rzeźba odgrywa najważniejszą rolę w moich architektonicznych poszukiwaniach, w szczególności mam na myśli studiowanie natury i wydobywanie z niej sposobów nadawania właściwych form”, [309].



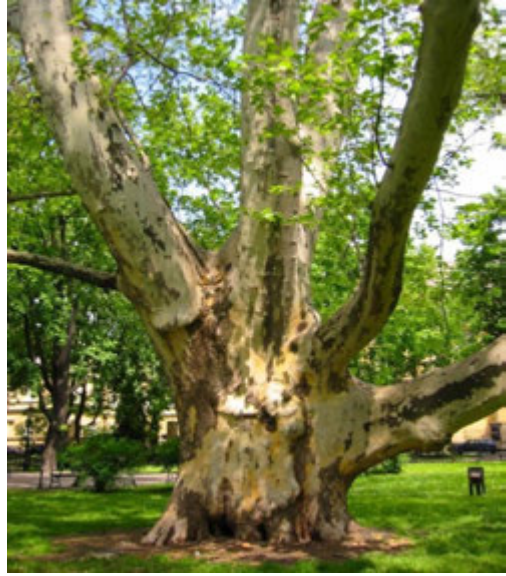
Rys. 6.1. Dzieła S. Calatrawy. L'Hemisfèric (Planetarium); Valencia, (akwarela z 1992), [302].



Rys. 6.2. Olga Boznańska, „Widok z okna pracowni w Krakowie”, 1900 r. ,Dzieła S. Calatrawy: Orléans Bridge, Francja (akwarela z 1996), [302].



Rys. 6.3. Dzieła S. Calatrawy: Wyraźne odwołania do świata przyrody. Bird (rysunek z 1987), [302].



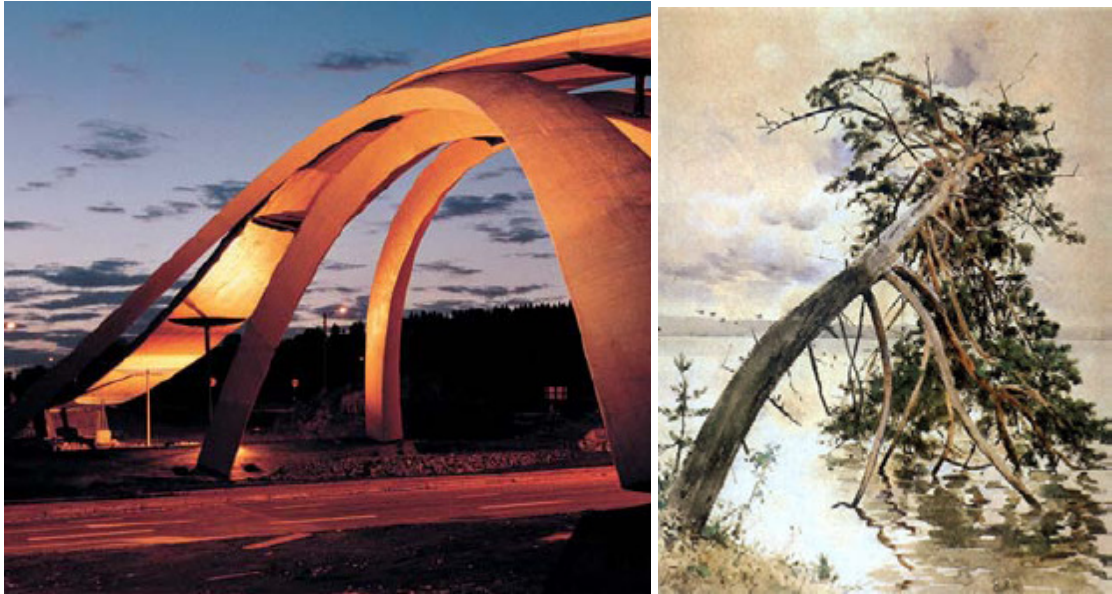
Rys. 6.4. Infobaari, Puupaviljonki Espoon asuntomessuille 2006, Espoo, Finlandia . Architektura: TKK Puustudio Realizacja: 2006, [337].



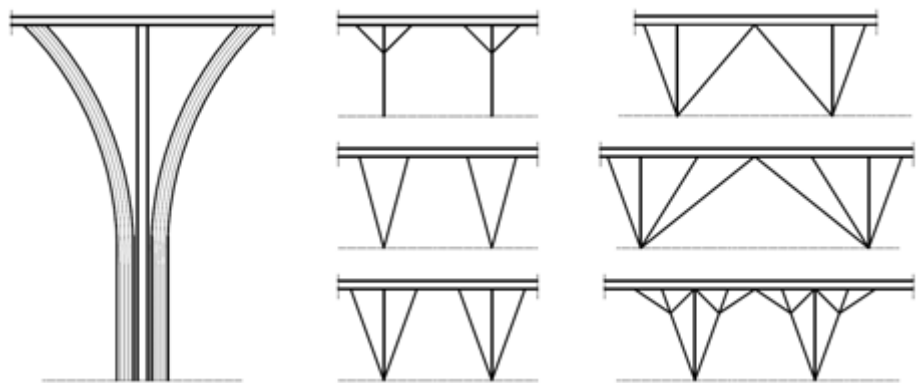
Rys. 6.5.. Kaplica Versöhnung, w Berlinie. Architektura: Dipl.-Ing. Rudolf Reitermann, Prof. Peter Sassenroth. Konstrukcja: Pichler Ingenieure Dipl.-Ing. Andreas Schulz, [326].



Rys. 6.6.. Siatkowa struktura dachu krytej pływalni Solebad Bad Duerheim, Niemcy , Architektura: Geier + Geier, [276]. Pajęczyna, [357].



Rys. 6.7. Kształtowanie przekroju dźwigara nośnego. Most Leonarda Da Vinci w Norwegii. Julian Fałat „Świtez”, 1888, [340].



Rys. 6.8. Drzewa w architekturze. Kształtowanie elementów podporowych w konstrukcji, [357].



Rys. 6.9. Kryta pływalnia w Chiemsee, architektura Zeller & Romstatter, Traunstein, Haumann-Fuchs, Transtein&Peter Zeller, [326].



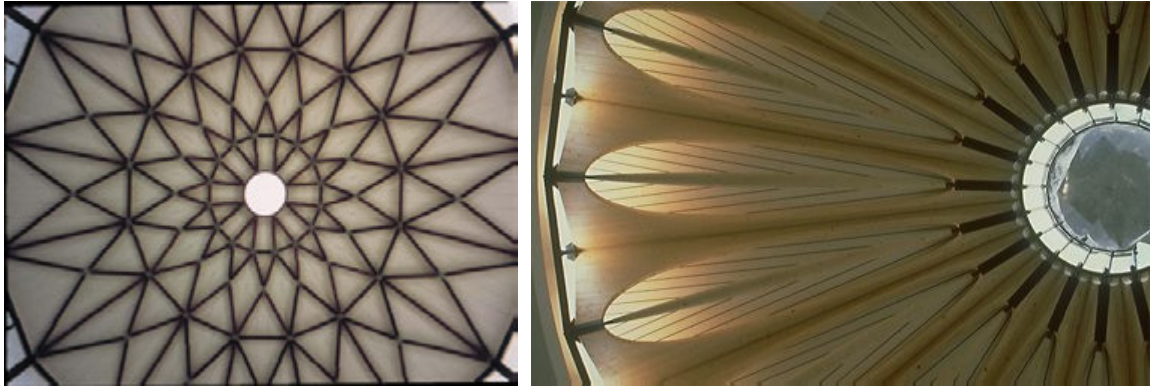
Rys. 6.10. Sala koncertowa Sibeliusstalo w Lahti, Finlandia. Architektura: Hannu Tikka and Kimmo Lintula, Realizacja 2000, [336], [337].



Rys. 6.11. Viñitila Viña Perez Cruz, 2000-2001, [337].



Rys. 6.12. Słoniarnia w ogrodzie zoologicznym w Kolonii. Architektura: Oxen + Römer Architekten, [335], [326].



Rys. 6.13. Gurdwara Southall Temple, Geometria kopuły, [258].



Rys. 6.14. Wystawa: Green architectre for the future , Louisiana Museum, [302].

Rys. 6.15. Pawilon Nadziei na Expo 2000 , w dosłowny sposób skopiowany kształt ryby. Architektura: Buchhalla und Partner, [313].

6.3. Ekologia konstrukcji z drewna klejonego

„W miarę jak ludzkość będzie wkraczać w nową fazę ewolucji polegającą na miniaturyzacji, architektura stanie się substancją „mineralną” tego procesu, ekologicznym nowym tworzywem ludzkiej kondycji” (Paolo Soleri, 1968), [204].

W końcu XX wieku obserwuje się ogólnoswiatową tendencję do tworzenia architektury z wykorzystaniem materiałów naturalnych i podkreśleniem właściwych im cech wytrzymałościowych przy jednoczesnym wykorzystaniu nowoczesnych technologii. Kilkadziesiąt lat temu fantastyczne wizje architektury XXI wieku wskazywały wielkowymia-

rowe struktury o dużych, kilkusetmetrowych rozpiętościach, zbudowane ze stali i innych, niezidentyfikowanych materiałów, i systemów konstrukcyjnych, które miały się pojawić. Takie nowe materiały oczywiście się pojawiły (kompozyty, włókna węglowe, membrany, systemy pneumatyczne, prętowo-ciężnowe, ciężnowe), jednak niespodziewanie architektura zwróciła się w stronę materiałów naturalnych, odkrywając na nowo ich możliwości, wynikające z przekształcenia naturalnych materiałów w nowoczesne technologie. Została zachowana kontynuacja budownictwa tradycyjnego bez rezygnacji ze stosowania najnowszych zdobyczy nauki i techniki (konstrukcje hybrydowe).

„Człowiek – Natura – Technika” to motto Światowej Wystawy EXPO 2000 w Hanowerze. Temat wystawy przełomu wieków i jej przesłanie były sygnałem dla całego świata o kurczących się zasobach naturalnych i energetycznych Ziemi. Stały się też impulsem dla wielu pytań o przyszłość architektury. Expo-Dach – symbol hanowerskich targów oraz liczne pawilony zbudowane z drewna klejonego pokazały ogólną tendencję do tworzenia obiektów z wykorzystaniem materiałów naturalnych i właściwych im cech, nie tylko wytrzymałościowych. Wykonany z „naturalnego” surowca rzeźbiarski dach wskazał na wielki potencjał inżynierski i architektoniczny konstrukcji z drewna klejonego. Na targach EXPO 2000 pojawiło się więcej obiektów z drewna, autorstwa najlepszych światowych architektów (m. in. pawilony – Szwajcarski, Norweski, Fiński, Węgierski, Litewski, ZERI Pawilon Bambusowy).

Z jednej strony wysiłek umysłu popycha ludzkość w stronę nowoczesnych technologii i materiałów wytworzonych sztucznie, z drugiej zaś człowiekowi towarzyszy świadomość, że jest elementem biosystemu, a droga, którą ucieka do idealizowanej sterylności, prowadzi do zniszczenia środowiska naturalnego. Ta świadomość powoduje, że coraz częściej „ludzkość” jest przywoływana do traktowania natury (przyrody) jako integralnej części swojego istnienia. Także w architekturze coraz wyraźniej widać, że technologia, sama w sobie, przestaje fascynować, a ważne stają się ekologia, „naturalność”, bezpieczeństwo. Architektura, w coraz większym stopniu, ma służyć dobremu samopoczuciu, zachować „ludzką skalę” w rozumieniu jej odbioru. Jednak w XXI wieku, nawoływanie doktrynalnych ekologów do powrotu na łono natury w jej najprostszej postaci skazane jest na niepowodzenie. Wpływ decyzji twórczych jest widoczny i odczuwalny w środowisku naturalnym, a wpływ idei proekologicznych odzwierciedla się w formach architektury. Wzajemne przenikanie się środowiska „naturalnego” i środowiska architektury, „sztucznie” tworzonego przez człowieka, nieustannie inspirują architektów. Powstają

obiekty, które pomimo prostych (nieorganicznych) form zacierają te granice, a także obiekty, które naśladują kształty, kolory i faktury występujące w przyrodzie. Natura pobudza wyobraźnię i jest inspiracją dla rozwiązań konstrukcyjnych, a jej ochrona i eksploataowanie stają się wartością godną wyeksponowania w obiektach architektonicznych. Potwierdzają tę tezę liczne przykłady - tworzenie obiektów z ziemi, słomy, trawy, drewna, bambusa i papieru, etc. Paper House (Shigeru Ban) a także pawilony ekspozycyjne wystaw światowych Expo charakteryzują się innowacyjnym podejściem do projektowania form architektonicznych. W wyniku wzrastającej świadomości ekologicznej, materiały, które wcześniej fascynowały inżynierów - beton i stal - zaczęto zastępować materiałami naturalnymi. Zmieniły się także kryteria wyborów materiałów konstrukcyjnych. Już w latach 30 tych XX wieku Alvar Alto postulował wprowadzenie materiałów naturalnych, cegły i drewna, i w związku z tym miękkich form, w kontraście do nadużywanych w architekturze form kubistycznych. Współcześnie, oprócz czynników technicznych, statycznych, estetycznych i ekonomicznych, które pozostają wciąż dominujące w projektowaniu obiektów dużych rozpiętości, dla prawidłowego projektowania architektonicznego ważny jest wpływ zastosowanej technologii konstrukcyjnej na środowisko.

Wg Wojciecha Bonenberga „forma architektoniczna, jej użyteczność i społeczny odbiór powinny być pretekstem do przekazu bardziej ogólnych idei społecznych, kreowania postaw, systemów wartości i zachowań odbiorców architektury – nie tylko w czasie bezpośrednio związanym z oddaniem obiektu do użytku, ale w całym okresie eksploatacji obiektu” [20]. Architekci i inżynierowie powinni tak tworzyć, by uwzględnić konsekwencje wpływu zastosowanych, określonych materiałów w trakcie całego okresu eksploatacji obiektu, zmniejszyć ryzyko ich negatywnego wpływu na środowisko naturalne w przyszłości, także po okresie użytkowania obiektu. Efekty wpływu na środowisko przez poszczególne materiały muszą być brane pod uwagę w aspekcie „całego życia obiektu” [147], [148]. Architektura jest powiązana ze środowiskiem naturalnym. Powstał ogólnoświatowy program jego ochrony: Architektura Środowiskowa (zrównoważona). Po konferencji w Rio de Janeiro, w 1992 r. opracowano i przyjęto wytyczne dla zrównoważonej gospodarki leśnej, a funkcję nadzorczą nad ich przestrzeganiem powierzono Konferencji Ministerialnej ds. Ochrony Lasów w Europie (MCPFE). Architektura zrównoważona dotyczy takich zagadnień jak: „lokalizacja inwestycji, program funkcjonalno-użytkowy, bezpieczeństwo użytkowania, oszczędność energii, oddziaływanie na środowisko, akceptacja proponowanych rozwiązań estetycznych i funkcjonalnych przez użytkowników”.

Projektowanie z drewna klejonego wpisuje się w założenia architektury środowiskowej. Zastosowanie drewna w architekturze w znikomy sposób wpływa na naturalne środowisko, zwłaszcza w porównaniu z jego substytutami. „Drewno i produkty drewnopochodne wykazują świetne parametry środowiskowe i przez cały okres ich życia parametry te są lepsze od tych uzyskiwanych przez alternatywne materiały. Drewno i materiały drewnopochodne mają ogromną rolę do spełnienia, gdy mowa jest o zrównoważonym budownictwie”, [211].

7. Efektywność wykorzystania materiału w tworzeniu konstrukcji dużych rozpiętości z drewna klejonego - problemy i możliwości

„W projektowaniu analizujemy to, co nam podpowiada intuicja, starajmy się jej pomóc.”

Wacław Zalewski, [184]

„Analizujemy coś, co istnieje, ale projektujemy coś, czego dotychczas nie było”

Theodor von Karman.

7.1. Projektowanie koncepcyjne konstrukcji z drewna klejonego

„Projektowanie koncepcyjne konstrukcji jest najbardziej istotną fazą w jej powstaniu. Ono określa jej jakość i zasługuje na uwagę i szacunek. Większość problemów występujących w końcowej analizie konstrukcji i wykonawstwie (...) jest konsekwencją niedbałego projektu koncepcyjnego. Ogólnym celem projektu koncepcyjnego jest holistyczna jakość budowli”, [152]. Tworzenie obiektów dużych rozpiętości wymaga interdyscyplinarnego współdziałania architekta i inżyniera. Problematyka rozprawy, która wpisuje się w styk dwóch dyscyplin naukowych – architektury i inżynierii, jest próbą wypełnienia luki pomiędzy naukowymi i technicznymi badaniami inżynieryjnymi a ich transferem do rozwiązań architektonicznych. „Przekonanie o potrzebie ścisłego integrowania układów konstrukcyjnych z projektowaniem architektonicznym jest już oczywiste. Natomiast znaczenia nabiera jakość stosowanych rozwiązań. Coraz częściej autorzy projektów nie akceptują prostych, powtarzalnych i monotonicznych układów nośnych. Pojęcie uniwersalnego, w swojej idei, rozwiązania, jakim jest konstrukcja szkieletowa, już nie wystarcza. Następuje odejście od klasycznych, rytmicznie ukształtowanych, struktur. Pojawiają się nie tylko nieregularne konfiguracje nieregularnych siatek konstrukcyjnych, ale też wzajemne przesunięte układy podpór czy nadmierne jednostronne przewieszenia. Rośnie świadomość architektów co do swobodnego projektowania układów funkcjonalnych w wyniku wykorzystania wielu różnych możliwości technicznych”[143]. K. Kucza Kuczyński stwierdza: „Uważam, że właśnie częste odchodzenie od wspólnej pracy przy tworzeniu idei czystej struktury konstrukcyjno – architektonicznej na rzecz wykonania tylko „zadania” stwarza coraz częstsze dziwolągi architektury i konstrukcji”, [143]. Giedion

w [49]: „Nadejście inżyniera konstruktora, dysponującego szybkimi w zastosowaniu, wytwarzanymi przemysłowo elementami budowlanymi, służącymi nadaniu formy, przerwało artystyczne puszenie się i odebrało architektowi uprzywilejowaną pozycję, dając podstawę dzisiejszemu budownictwu. Dziewiętnastowieczny inżynier nieświadomie wziął na siebie rolę opiekuna nowych elementów, których nieprzerwanie dostarczał architektom. Opracowywał formy, które były zarówno anonimowe jak i uniwersalne.” Historyczny podział, który formalnie wyodrębnił architekta i inżyniera, spowodował powstanie przepaści, zmniejszającej możliwości zarówno jednej jak i drugiej profesji. Mario Salvadori, który nauczał studentów zarówno budownictwa jak i architektury, wyodrębnia właściwe im, indywidualne cechy charakteru: „Ktoś, kto decyduje się na architektoniczną karierę, jest bardziej otwarty, twórczy, niezależny, nie chce być specjalistą, lecz wpływać na swoje otoczenie i rozwiązywać jego problemy. Inżynierowie próbują być specjalistami, akceptują dyktat nauki, rozwiązują praktyczne problemy. Architekci próbują tworzyć innowacyjne i unikatowe rozwiązania. Sztuka jest niemierzalna, nie może być jasno określona przez zasady, przyczyny, prawa. To powoduje, że wartości nabierają dla nich „odczucia”, intuicja, estetyka”, [151]. Jednak projektowanie obiektów dużych rozpiętości wymaga od architektów dużo większego zaangażowania w sprawy związane ze statyką i mechaniką budowli, technologią, a także pracy przy ograniczeniach związanych z dużo wyższymi wymogami technicznymi. Profesor Wacław Zalewski [184] wyróżnił metodę projektowania konstrukcji, która opiera się na założeniu, że przed współczesnym inżynierem-konstrukтором istnieją dwa kierunki rozwoju. Pierwszy z nich polega na ciągłym doskonaleniu warsztatu obliczania konstrukcji i dążeniu do wyspecjalizowania się w coraz węższej dziedzinie nauki inżynierskiej. Cechą tego kierunku jest prawie całkowite pomijanie etapu projektowania konstrukcji w fazie koncepcji. Codzienną praktyką konstruktorów jest obliczanie i wymiarowanie konstrukcji zaprojektowanych przez architektów. Fauzlor Kahn, twierdzi: „Znam wiele przypadków, kiedy architekt chciał otrzymać od inżyniera jego własną, oryginalną propozycję konstrukcji, a nie tylko wykonania obliczeń do już gotowej wersji projektu. Jednak bywało, że ten unikał wzięcia na siebie takiej „dodatkowej” odpowiedzialności, a raczej chętniej podjąłby się na przykład rozwiązania układu 200 równań”. Drugim kierunkiem jest koncentracja zainteresowań konstruktorów nad poszukiwaniem racjonalnych zasad kształtowania konstrukcji i rozwój intuicji konstrukcyjnej. Istnieją więc dwa nurty, które zwykle występują podczas procesu tworzenia. Jeden, wspomagany przez twórczą inwencję, to proces syntetyzowania danych, zaś drugi

opiera się na analitycznej ich weryfikacji. W ten sposób projektowanie, będące procesem interakcyjnym, jest na tyle efektywne, na ile kolejne, cykliczne zabiegi przynoszą pożądany efekt, [253]. Skuteczne podejście do projektowania konstrukcji zależy od zrozumienia praw mechaniki konstrukcji i tworzywa. Ich zrozumienie ewoluuje zazwyczaj w kierunku wyobraźniowego i jakościowego oceniania mechanizmów przenoszenia sił w konstrukcji. Przy odpowiednio dobrym aparacie oceniania stanów ilościowych projektant jest w stanie postawić trafną prognozę konstrukcyjną. Niezbędne, w przypadku formułowania ilościowych wniosków, mogą być sformułowania geometryczne. Według Zalewskiego, geometria, jako najbardziej wyobraźniowa część matematyki, może być wystarczającym wyposażeniem analitycznym projektanta. „Używanie (...) języka geometrii w modelowaniu zjawisk zachodzących w konstrukcji umożliwia nawiązanie wewnętrznego dialogu między obiektywną, naukową interpretacją tych zjawisk i wyobraźnią projektanta, przyczyniając się do rozwinięcia i kultywowania świadomości istnienia ścisłych związków pomiędzy kształtem a pracą konstrukcji” [253]. Kształtowanie konstrukcji dużych rozpiętości ma duży udział w działaniach twórczych, związanych z poszukiwaniem nowych form przestrzennych. „Każdy rezultat indywidualnego projektowania koncepcyjnego, który jest wynikiem konkretnych rozważań i okoliczności, ma charakter wynalazku. Wynalazek to znacznie więcej niż odkrycie. Naukowcy odkrywają, analizują i opisują rzeczy, które już istnieją w naturze. Inżynier jednak wynajduje, syntetyzuje i konstruuje coś nowego i dostosowanego do indywidualnego zadania, musi więc pracować jak naukowiec stwarzający nowe materiały lub nowe metody obliczeń i produkcji. To oznacza, że musi on myśleć zarówno indukcyjnie, jak i dedukcyjnie, pobudzająco i wnioskowo. W czasie projektowania konstruktor musi opierać się zarówno na wiedzy, jak i na intuicji”, [152].

Nowe formy powstają pod wpływem poszerzających się możliwości technologicznych, między innymi, zwiększenia efektywności konstrukcyjnej lub zastosowania nowych typów połączeń o zwiększonej nośności. To właśnie ograniczenia ekonomiczne powodują dalsze badania nad wytrzymałością materiałów i determinują powstawanie coraz bardziej wydajnych struktur. Nowe, lekkie materiały zastępują tradycyjne rozwiązania dlatego, że są bardziej opłacalne. Ciężar konstrukcji z drewna klejonego przypadający na metr kwadratowy rzutu jest wielokrotnie niższy niż ciężar kopuł ceglanych lub żelbetowych o podobnych rozpiętościach. Kopuła bazyliki Św. Piora w Rzymie to ok. 2200 kg/m², [151]. Współczesna konstrukcja z drewna klejonego to kilkadziesiąt kilogramów na metr kwadratowy rzutu. Przykładem poszukiwań nowych form pod wpływem przesła-

nek ekonomicznych i nowych możliwości technicznych jest wynalezienie nieznanych wcześniej systemów konstrukcyjnych opartych na powierzchniach paraboloido- hiperbolicznych i innych krzywiznach.

Konstrukcje z drewna klejonego można zaliczyć do tzw. konstrukcji lekkich. Według Schlaicha [152], „konstrukcje takie są definiowane jako konstrukcje, w których wskaźniki p/g (obciążenie użytkowe „p” jest „przenoszone” przez ciężar własny „g”) oraz „sztywność/g” są wysokie. Im mniejsze znaczenie ma ograniczenie odkształceń, tym większe są szanse konstrukcji lekkich, gdyż przekrycia o dużej rozpiętości pracują głównie na rozciąganie. Ekonomiczna korzyść konstrukcji rozciąganych o pojedynczej lub podwójnej krzywiznie jest jednak ograniczona przez kosztowne systemy zakotwień i tworzenie układów do przenoszenia sił poziomych. Wyjściem są konstrukcje „samorównoważące” się, ale wymagają one kołowego lub eliptycznego planu, co ogranicza ich kształty. Jest to typowy przykład subiektywnego, osobistego charakteru koncepcyjnego procesu projektowania. Absolutna wolność ma swoją cenę, a za zdyscyplinowanie jest nagroda”, [152].

7.2. Problemy i możliwości efektywnego wykorzystania drewna klejonego jako materiału konstrukcyjnego

Pomimo wielu zalet drewna klejonego, zastosowanie go w tak wielu obiektach o niezwykłych, innowacyjnych formach i uzyskanie nowatorskich układów konstrukcyjnych dużych rozpiętości, wiązało się z pokonaniem wielu technicznych problemów. W dużym stopniu występują one do dzisiaj. Są to, przede wszystkim, problemy z określeniem i przyjęciem odpowiednich klas wytrzymałościowych elementów konstrukcyjnych, projektowaniem elementów o odpowiedniej odporności ogniowej oraz prawidłową ochroną konstrukcji przed działaniem czynników zewnętrznych, przede wszystkim, wilgoci. Potencjał drewna wzrasta wraz z rozwojem technologii, która dąży do wykorzystania w jak najpełniejszy sposób jego zalet i eliminowania naturalnych wad związanych z nieregularnym usłojeniem, pęknięciami pod wpływem warunków wilgotnościowych, skrętem włókien. Zwiększanie odporności ogniowej czy odporność na korozję biologiczną uzyskuje się poprzez stosowanie zwiększonych przekrojów i impregnatów chemicznych. Duże gabaryty elementów konstrukcyjnych wymagają jednak specjalistycznych linii produkcyjnych, specjalistycznych maszyn do obróbki skomplikowanych obszarów połączeń,

które nie mogą zostać wykonane na placu budowy, oraz stosowania transportu elementów ponadgabarytowych.

Tabela 7.1. Najczęściej występujące problemy związane z praktyką projektową, realizacyjną oraz użytkowaniem i konserwacją konstrukcji z drewna klejonego.

Klasy wytrzymałościowe	<ol style="list-style-type: none"> 1) Zmienna jakość surowca, trudności w oszacowaniu jego parametrów wytrzymałościowych. Niejednorodność budowy pozyskiwanego surowca 2) Konieczność eliminowania w tarcicy naturalnych wad zarówno wizualnych, np. sinizny, jak też strukturalnych 3) Brak jednoznacznych ustaleń normowych, co do klas wytrzymałościowych i rozbieżności pomiędzy normami w różnych krajach
Ognioodporność	<ol style="list-style-type: none"> 1) Ogólne przekonanie o braku odporności ogniowej konstrukcji z drewna klejonego 2) Trudności w obliczaniu odporności ogniowej wynikające z nieprecyzyjnych wymagań i przepisów 3) Nieprecyzyjne wymagania w zakresie impregnacji preparatami przeciwogniowymi
Odporność na czynniki zewnętrzne	<ol style="list-style-type: none"> 1) Niska odporność na czynniki atmosferyczne 2) Konieczność impregnacji i stosowania innych zabezpieczeń przeciw czynnikom atmosferycznym 3) Konieczność suszenia surowca do odpowiedniej wilgotności (około 12%) w specjalistycznych suszarniach lub wieloletniego sezonowania 4) Konieczność utrzymania prawidłowej wilgotności w trakcie transportu, budowy i użytkowania
Awarie	<ol style="list-style-type: none"> 1) Nieprawidłowa konserwacja - jakość i trwałość materiału związana jest z prawidłową eksploatacją 2) Pękanie drewna podczas eksploatacji lub montażu pod wpływem zmieniających się różnorodnych czynników (zbyt szybkie wysuszenie, etc.)

	<p>3) Wymagana dbałość o stan techniczny obiektu czyli zapewnienie możliwości dokonywania napraw (wzmocnień) w okresie eksploatacji obiektu</p> <p>4) Złe wykonawstwo (szczególnie w przekrojach węzłowych)</p>
--	---

7.2.1. Klasy wytrzymałościowe konstrukcji z drewna klejonego

Obiekty o konstrukcji z drewna klejonego występują w prawie każdym regionie świata i wykorzystują lokalnie występujące gatunki drewna. Parametry wytrzymałościowe drewna zależą od warunków klimatycznych i środowiskowych występujących w miejscu wzrostu. Są przez to trudne do standaryzacji. Jednak normalizacja procesów produkcyjnych i projektowych a także powszechne stosowanie technik komputerowych do obliczania konstrukcji wymusiło próbę klasyfikacji ogólnej drewna jako materiału konstrukcyjnego. Unormowania właściwości wytrzymałościowych są niezbędne w celu określenia nośności konstrukcji. Dane dotyczące sztywności pomagają zaś w oznaczeniu podatności na deformacje. W Europie drewno klejone ujęto w klasy GL (od ang. słowa *glulam*).

Istniejąca klasyfikacja wciąż jest niejednoznaczna. Trwają ustalenia co do sposobu oceny przynależności tarcicy do danej klasy wytrzymałościowej. Obecnie odbywa się to metodami: wizualną lub mechaniczną (wg norm EN – 518 i EN – 519), w zależności od zakładu produkcyjnego. W przypadku konstrukcji z drewna klejonego realizowanych w ciągu ostatnich lat w Polsce, ze stosowaniem klas wytrzymałościowych wiązało się wiele nieporozumień. Wynikały one z nieumiejętnego doboru parametrów do obliczeń, często zawyżonych, np. stosowano klasę GL 40, która przez jakiś czas była ujęta w polskiej normie dotyczącej projektowania konstrukcji (PN-81/B-03150.00) [366], [367], [368], [369], a która, de facto, nie była możliwa do wyprodukowania. W wielu realizacjach wbudowywano elementy o obniżonych klasach niż to przyjęto w obliczeniach. Doprowadziło to do kilku awarii. W Polsce, do czasu zastąpienia polskich norm normami europejskimi, obowiązywała klasyfikacja KL. Najczęściej projektowano wykorzystując klasę KL 33 i KL 39, natomiast producenci zagraniczni dostarczali konstrukcję klasyfikowaną wg innych norm. W przypadku klas GL24 oraz GL28 sortowanie odbywa się

wizualnie, natomiast dla klas GL32 oraz GL36 - mechanicznie. Innym rodzajem klasyfikacji tarcicy do produkcji elementów z drewna klejonego jest podział na jakość ocenianą wizualnie oraz przemysłowo, w zależności od jej późniejszego przeznaczenia. Normy określają szczegółowo dopuszczalne ilości występującej sinizny, rozmiary pęknięć skurczowych, rodzaje i rozmiary sęków etc. Dopuszczalna ilość sinizny nie ma wpływu na nośność elementu, lecz jedynie na jego walory estetyczne. Tam, gdzie w konstrukcji estetyka nie odgrywa kluczowej roli, można zastosować drewno klejone o jakości przemysłowej, m.in. w elementach, które stanowią jedynie konstrukcję nośną, a przed oddaniem obiektu do użytkowania, będą obudowane lub pokrywane przez malowanie, [328], [335].

Tabela 7.2.

Przekrój złożony z tarcicy jednorodnej - oznaczenie „h” (ang. *Homogenous*):

Normy EN (europejskie)	GL24 h	GL28 h	GL32 h	GL36 h
Normy DIN (niemieckie)	BS 11 u	BS 14 u	BS 16 u	BS 18 u

Tabela 7.3.

Przekrój złożony z tarcicy niejednorodnej - oznaczenie „c” (ang. *Combined*):

Normy EN (europejskie)	GL24 c	GL28 c	GL32 c	GL36 c
Normy DIN (niemieckie)	BS 11 c	BS 14 c	BS 16 c	BS 18 c

Tabela 7.4. Dane, dotyczące wytrzymałości, sztywności i gęstości pozornej drewna klejonego (materiału homogenicznego i łączonego), od GL 24 do GL 36 według PN-EN 1194.

1	Klasa wytrzymałości		GL24h	GL24c	GL28h	GL28c	GL32h	GL32c	GL36h	GL36c
Charakterystyczne właściwości wytrzymałościowe w N/mm ² (MPa)										
2	Zginanie	$f_{m,k}$	24	24	28	28	32	32	36	36
3	Rozciąganie wzdłuż włókien	$f_{t,0,k}$	16,5	14	19,5	16,5	22,5	19,5	26	22,5
4	Rozciąganie w poprzek włókien	$f_{t,90,k}$	0,5							
5	Ściskanie wzdłuż włókien	$f_{c,0,k}$	24	21	26,5	24	29	26,5	31	29
6	Ściskanie w poprzek włókien	$f_{c,90,k}$	2,7	2,4	3,0	2,7	3,3	3,0	3,6	3,3
7	Ścinanie	f_v,k	3,5							
Charakterystyczne wartości sprężystości w N/mm ² , (MPa)										
8	Średni moduł sprężystości	$E_{0,mean}$	11600	11600	12600	12600	13700	13700	14700	14700

	wzdłuż włókien									
9	5% kwantyl modułu sprężystości wzdłuż włókien	$E_{0,05}$	9400	9400	10200	10,2	11100	11100	11900	11900
10	Średni moduł sprężystości w poprzek włókien	$E_{90,mean}$	390	320	420	390	460	420	490	460
11	Średni moduł odkształcenia postaciowego	G_{mean}	720	590	780	720	850	780	910	850
Gęstość w kg/m^3										
12	Gęstość	$\rho_{g,k}$	380	350	410	380	430	410	450	430

Analizując budowę przekrojów złożonych z ww. klas oraz tabelę ich wytrzymałości, można zauważyć, że główne parametry ważne dla układów belkowych, tj. wytrzymałość na zginanie, moduły sprężystości, są identyczne w obydwu rodzajach klas (c i h), a pozostałe parametry dla przekroju z tarcicy niejednorodnej są niższe maksymalnie o 15-20%. Racjonalne rozłożenie w przekroju belki drewna o wyższej i niższej klasie wytrzymałości sprzyja rozsądnemu wykorzystaniu dostępnej tarcicy, co przekłada się na czas produkcji oraz cenę wyrobu, pozostaje natomiast bez wpływu na walory estetyczne.

Najłatwiej dostępne klasy to GL24 oraz GL28. O ile klasa GL32 jest możliwa do uzyskania przy znikomym wzroście kosztów, o tyle uzyskanie odpowiedniej tarcicy do produkcji klasy GL36 jest trudne. Wymaga znacznych nakładów finansowych. Jedynie ok. 2% będącej w obrocie tarcicy spełnia wymagania wytrzymałościowe dla elementów klasy GL36. Powoduje to znaczne utrudnienie w jej produkcji oraz wzrost ceny gotowego wyrobu, [328], [335]. Wszystkie powyższe czynniki powodują najczęstsze stosowanie w konstrukcji klas GL24 - GL32. Na tym etapie bardzo istotny jest również odpowiedni dobór lameli zewnętrznych dla produkowanego elementu pod kątem wytrzymałościowym oraz odpowiedniej jakości wizualnej, [328], [358], [335].

W Europie, do produkcji drewna klejonego najczęściej stosuje się tarcice drzew iglastych: świerku (tzw. drewno białe, łac. *pinus abies*, *abies alba*, pol: *świerk pospolity*) i sosny, (tzw. drewno czerwone łac. *pinus sylvestris*, pol: *sosna pospolita*). Oba gatunki posiadają bardzo podobne podstawowe właściwości, łączą niski ciężar objętościowy z wysoką wytrzymałością. W związku z podobieństwami biologicznymi, które są niemal identyczne, oba gatunki są razem ujmowane w europejskich normach. Dotyczy to także innych gatunków mniej popularnych, np. daglezwia, choina górską, sosna korsykańska,

sosna czarna austriacka, modrzew, sosna nadmorska, sosna, świerk siutkajski, żywotnik olbrzymi. Modrzew wykorzystuje się w konstrukcjach zewnętrznych, wystawionych na działanie czynników atmosferycznych, w konstrukcjach mostów, pergolach i innych. W Japonii i Stanach Zjednoczonych a także w innych państwach używa się różnych gatunków drzew. Zakres ich stosowania także ujęty jest w odpowiednich uregulowaniach. Drewno pozyskiwane z lasów dla budownictwa bezwzględnie powinno być objęte kontrolowaną gospodarką, której dostawcy drewna powinni przestrzegać. Nie powinno ono pochodzić z lasów tropikalnych. W Stanach Zjednoczonych pozyskuje się także drewno twarde, które jest eksportowane do Europy i Japonii [266], [232], [233]. Drzewa odpowiednie do wycinki to, przede wszystkim, drzewa młode, młodsze niż 75 lat, o niedużym obwodzie odziomków. W pobliżu większych aglomeracji wprowadza się tzw. lokalne plantacje, z założeniem nie eksplorowania zasobów leśnych. W ten sposób zmniejszają się także koszty transportu materiału na place budowy. W Japonii lasy sadzone po II wojnie światowej są już wykorzystywane do budowy obiektów z drewna. Polityka Japonii promuje wykorzystanie materiałów z drewna i materiałów drewnopochodnych w budownictwie, co ma swój skutek w wybudowaniu wielu prestiżowych obiektów z zastosowaniem drewna. Rozwijane są także metody taniego użycia drewna jako drugoplanowego materiału do wnętrza. Państwa europejskie prowadzą zrównoważoną gospodarkę leśną, dzięki której w Europie (dane bez Rosji) obszar zalesiony powiększa się o 802 000 ha. W Polsce kwestie te regulowane są Ustawą o Lasach Państwowych. Średnio, co roku wycinane jest od 60% do 80% rocznego przyrostu, tak więc w lasach przybývá ok. 250 milionów m³ drewna. Ekspertki europejscy oszacowali, że każdy metr sześcienny drewna użyty zamiast innych materiałów zmniejsza średnio o 0,8 t ilość emitowanego do atmosfery CO₂, [212], [211].

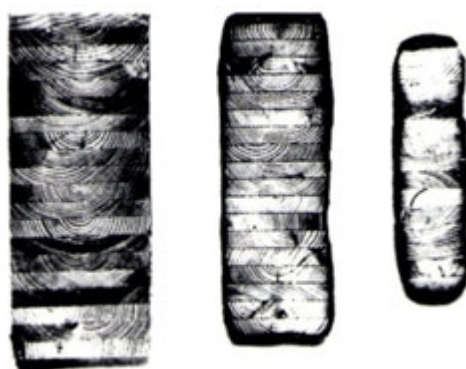


Rys.7. 1 Drzewa używane do produkcji drewna klejonego, rosnące na terenie Polski (modrzew europejski, świerk pospolity, jodła pospolita, sosna zwyczajna), [357].

7.2.2. Ognioodporność konstrukcji z drewna klejonego

Uprawniona jest teza, iż przy odpowiednim dobraniu przekroju nośnego można osiągnąć wysoką odporność ogniową konstrukcji z drewna klejonego. Nie oznacza to, że jest to materiał niepalny, ale spełnia on wymogi normowe w każdej klasie odporności ogniowej, bez konieczności dodatkowego zabezpieczania preparatami ogniochronnymi, co czyni go szczególnie przydatnym przy projektowaniu obiektów użyteczności publicznej, gdzie często wymagana jest 60 - cio, 90 - cio lub 120 – to minutowa odporność ogniowa. Elementy z drewna, niezależnie od przyjętego przekroju, można impregnować preparatami ogniochronnymi, jednak zabezpieczenie drewna impregnatem ogniochronnym nie wpływa w sposób istotny na odporność ogniową konstrukcji. Daje ten skutek, że w przypadku pożaru następuje jego późniejsze zapalenie, [179]. Palące się drewno nie wydziela toksycznych związków, w przeciwieństwie do innych materiałów. Kleje stosowane do klejenia drewna są również odporne na działanie ognia i nie wydzielają żadnych szkodliwych substancji w czasie pożaru.

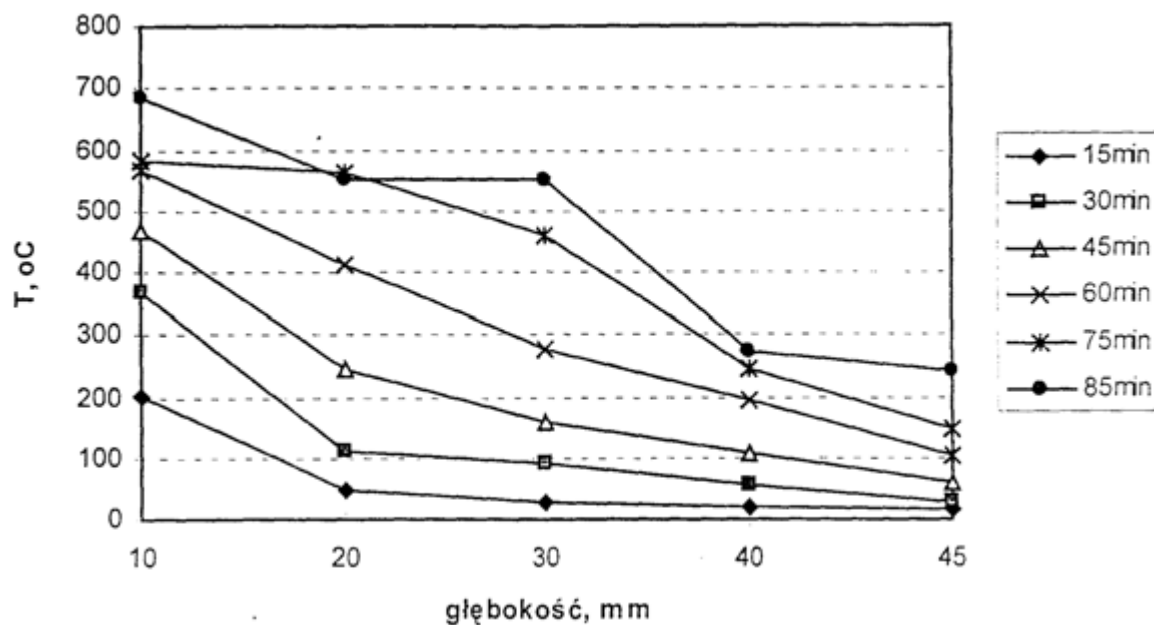
Drewno pali się przy zaistnieniu równocześnie następujących czynników: obecności węgla (drewno), tlenu (powietrze) i temperatury 250-270°C. Proces, jaki zachodzi, polega na wiązaniu węgla z tlenem, czemu towarzyszy raptowne wydzielanie ciepła oraz płomieni. Odporności ogniowej konstrukcji z drewna klejonego poświęcono wiele badań. Badania te polegały na spalaniu elementów z drewna klejonego w różnych odcinkach czasu, pomiarze temperatury w elemencie oraz pomiarze głębokości zwęglenia.



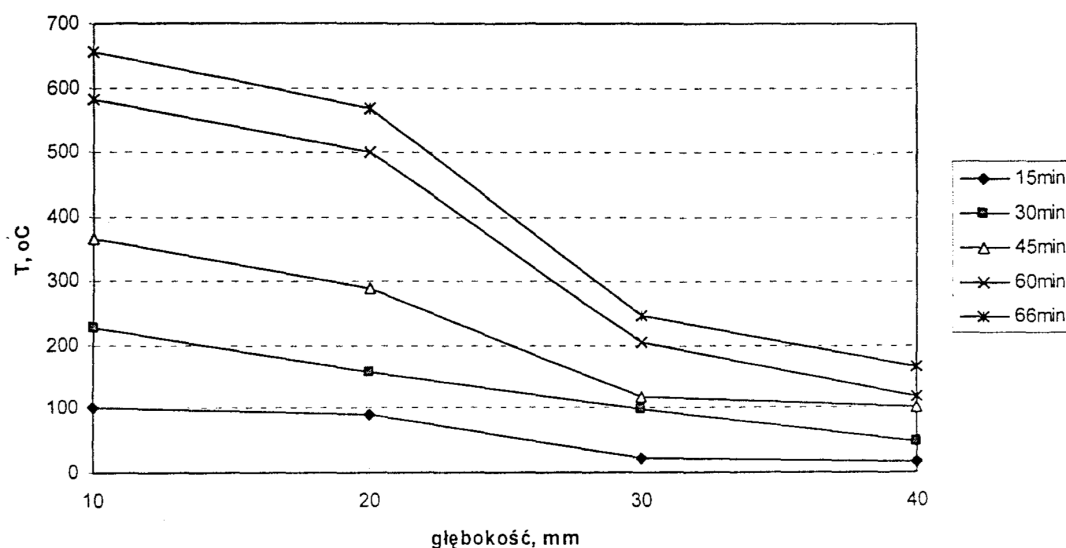
Rys.7.2. Próbka z drewna klejonego o wymiarach 16/40 cm przed próbą ogniową, po 30 i 60 min (w temperaturze odpowiednio 880°C i 1000 °C), [335].

Poniżej przedstawiono wykresy pola temperatur w belkach nagrzewanych, wg [380].

Belka 1 z drewna klejonego warstwowo o przekroju 20x80 cm, ścinana. Schemat przedstawia temperaturę na głębokości przekroju 10, 20, 30, 40, 45 mm po czasie 15, 30,45, 60, 75,85 minut.



Belka 2 z drewna klejonego warstwowo o przekroju 20x50 cm, zginana. Schemat przedstawia temperaturę na głębokości przekroju 10, 20, 30, 40 mm po czasie 15, 30,45, 60, 66 minut.



Prędkość spalania dla belki 1 (ścinanej) ustalona na podstawie analizy temperatury drewna wynosi max. 0,56 mm/min. Belka poddana badaniom w warunkach pożaru (ogrzewana z trzech stron) straciła nośność na ścinanie po 85 minutach a grubość zwęgliny wyniosła średnio 44 mm. Średnią prędkość spalania należy przyjąć jako 0,52 mm/min, [380].

Prędkość spalania dla belki 2 (zginanej), ustalona na podstawie analizy temperatury drewna wynosi max. 0,48 mm/min. Belka poddana badaniom w warunkach pożaru (ogrzewana z trzech stron) pod obciążeniem 2x55,5 kN po 66 minut nie osiągnęła stanu granicznego nośności. Po dociążeniu do poziomu 2x61 kN nastąpiło ścięcie belki. Nie nastąpiło zerwanie włókien, a grubość zwęgliny wyniosła średnio 30 mm. Średnią prędkość spalania należy przyjąć jako 0,45 mm/min. Określając odporność ogniową elementów z drewna klejonego przyjmuje się iż współczynnik redukcyjny wytrzymałości drewna klejonego (niezwęglonego rdzenia) w warunkach pożarowych wynosi: wytrzymałość na zginanie: 0,8; wytrzymałość na ściskanie: 0,75; wytrzymałość na ścinanie: 0,36, [380].

Uogólniając, dla drewna klejonego warstwowo należy przyjmować prędkość zwęglania: 0,6 mm/min., wytrzymałość na zginanie w warunkach pożarowych wynosi 50% wytrzymałości w warunkach normalnych, wytrzymałość na ściskanie w warunkach pożarowych wynosi 75% wytrzymałości w warunkach normalnych, wytrzymałość na ścinanie w warunkach pożarowych wynosi 80% wytrzymałości w warunkach normalnych. Elementy o wymiarze nie mniejszym niż 12 cm klasyfikuje się jako nie rozprzestrzeniające ognia. Elementy o przekroju poniżej 12 cm klasyfikuje się jako słabo rozprzestrzeniające ogień. Elementy o przekroju poniżej 12 cm, zabezpieczone środkiem ogniochronnym, zapewniającym trudno zapalność drewna, klasyfikuje się jako nie rozprzestrzeniające ognia, [380].

Podczas pożaru, o ile przekroje są właściwie dobrane i jeśli elementy nie znajdują się bezpośrednio w ogniu, płomień gaśnie niemal samoczynnie. Wokół nienaruszonego rdzenia elementu nośnego tworzy się zwęglona warstwa zmniejszająca dopływ tlenu i ciepła do rdzenia, co znacznie spowalnia dalsze spalanie. Zwęglona powłoka chroni przed zniszczeniem wewnętrzną strukturę elementu konstrukcyjnego, dzięki czemu może on zachować nośność i sztywność. Wiele innych materiałów osiąga stan plastyczności, gdy temperatura się podnosi do pewnego poziomu i konstrukcja ulega awarii na skutek utraty nośności przekrojów i stateczności. Szczególną uwagę należy zwrócić na projektowanie elementów połączeń, które już dla odporności ogniowej R30 minut powinny być umieszczone wewnątrz przekroju, w drewnie. Najlepszą formą geometryczną o najwyższej odporności ogniowej jest przekrój okrągły, [335].

Chociaż charakterystyki ogniowe drewna są dobre, bezpieczeństwo pożarowe jest ważną kwestią we wszystkich rodzajach drewnianych konstrukcji.

Do zagadnień niezawodności należy odporność ogniowa konstrukcji z drewna klejonego. W zależności od układu konstrukcyjnego planuje się na podstawie norm tzw. scenariusz pożaru. Konkretne unormowane obciążenie ogniowe wpływa równocześnie na elementy główne oraz usztywniające do wyczerpania się nośności.

Obliczanie odporności ogniowej konstrukcji stropodachu z drewna klejonego jak również słupów konstrukcyjnych, na których się wspiera konstrukcja, należy rozpocząć od prawidłowego przyjęcia założeń dotyczących pracy statycznej i działających odciążeń, rozmieszczenia i przekrojów poprzecznych głównych elementów konstrukcyjnych oraz stężeń, które są narażone na działanie ognia. Zastosowanie impregnatu nie ma tu, jak wspomniano, istotnego znaczenia. Podstawowe definicje związane z odpornością pożarową konstrukcji przyjmuje się na podstawie warunków technicznych (jak w [385]) i określa wymaganą odporność ogniową, np. R30, R60 (odpowiednio 30 i 60 minut). Biorąc pod uwagę, że spełnienie wymagań warunków technicznych wiąże się ze spełnieniem w projekcie szeregu przepisów dotyczących ochrony przeciwpożarowej (np. wyposażenie w urządzenia gaśnicze, instalacje, przegrody, drogi pożarowe itp.), analiza oszacowania odporności ogniowej na uproszczonym modelu pożaru wg [381] (p.1.5.2.5) daje gorsze wyniki niż przy powstawaniu prawdziwego pożaru. Oznacza to, że rzeczywista odporność ogniowa będzie wyższa niż ta, która wynika z przeprowadzonych obliczeń. Charakterystyczne fazy w przypadku wystąpienia pożaru to: I faza – rozwoju; II faza – intensywnego spalania; III faza – stygnięcia. Ze względu na to, że obiekty o konstrukcjach dużych rozpiętości z drewna klejonego posiadają duże wnętrza, może się okazać, że pożar nie przybierze charakteru przestrzennego i w I fazie może wystąpić jego liniowe rozprzestrzenienie, bez przejścia do fazy II. Jest to również korzystne dla konstrukcji.

Scenariusz pożarowy przyjmuje się zgodnie z wymaganiami norm [378], [381], [383], [385]. Dźwigary będą od początku pożaru poddane działaniu ognia z trzech stron i zwęglenie powierzchni będzie następowało aż do wyczerpania nośności dźwigarów. Czas w minutach od początku pożaru do chwili, kiedy nastąpi utrata ich nośności, będzie determinował stopień odporności ogniowej R. Obliczenie odporności ogniowej zakłada obliczenie wytrzymałości dźwigarów na zginanie przy obciążeniu konstrukcji masą dźwigarów, pokryciem dachu i śniegu, jeśli mamy do czynienia z częścią wspornikową oraz przyjęcie współczynników redukcji wytrzymałości konstrukcji, jak wcześniej podano. Z doświadczenia projektowego wynika, że stosując w/w normy przy odpowiednim „sce-

nariuszu pożaru” obliczona klasa odporności ogniowej przy wymaganej np. R30 wynosi nawet 100 minut [329], [335], [328].

7.2.3. Odporność konstrukcji z drewna klejonego na czynniki zewnętrzne

Do połowy lat czterdziestych XX wieku w produkcji dźwigarów klejonych wykorzystywano kleje, które - według współczesnych kryteriów - należałoby zaliczyć do nieodpornych na działanie czynników atmosferycznych. Z tych względów zastosowanie dźwigarów w budownictwie ograniczało się do obiektów zamkniętych. Opracowanie nowej generacji klejów na bazie żywic syntetycznych - wodoodpornych - zwiększyło możliwości zastosowań dźwigarów także do konstrukcji zewnętrznych, w tym konstrukcji mostów, [56]. Jednak pozostał problem samego drewna, które wykazuje małą odporność na działanie czynników atmosferycznych, gdy jest na nie bezpośrednio narażone, szczególnie w strefach węzłów i to jest najczęstszą przyczyną awarii i krótkiej trwałości konstrukcji. Wpływu oddziaływań klimatycznych nie można, jak się często uważa, zawęzić do przeciwdziałania jedynie uszkodzeniom mechanicznym - np. pęknięciom czy rozwarstwieniom. Określenie skali oddziaływań klimatu jest niezbędne na etapie tworzenia konstrukcji w celu uwzględnienia zwłaszcza wpływu wilgotności na wytrzymałość, deformacje i trwałość konstrukcji, [56].

Elementy konstrukcyjne zastosowane na zewnątrz bezwzględnie należy zabezpieczać odpowiednimi preparatami i konserwować co kilka lat, w zależności od intensywności działania wilgoci i innych czynników, mogących doprowadzić do uszkodzeń i awarii. Bardzo niekorzystne jest wyprowadzenie fragmentów dźwigarów nośnych na zewnątrz obiektu i pozostawienie ich bez ochrony. Przede wszystkim, należy zabezpieczać konstrukcję przed bezpośrednim wnikaniem wody w strukturę drewna poprzez stosowanie zadaszeń, okapów, kapinosów, obróbek blacharskich, etc. W szczególny sposób należy traktować rozwiązania strefy podporowej dźwigarów. W masywnych przekrojach poddanych wpływom atmosferycznym należy spodziewać się pojawienia drobnych pęknięć wzdłuż słoików drewna, co w przypadku np. odspojenia uszczelnienia z silikonu pomiędzy elementem stalowym „okucia” a drewnem, umożliwia penetrację wody do połączenia, szczególnie w trakcie opadów. Powstałe uszkodzenia części podporowej stanowią zagrożenie całej konstrukcji i w wielu przypadkach wymagają zmiany nowego sposobu podparcia z usunięciem uszkodzonego drewna, [4]. Zbyt wysoka, w szerokim zakresie

zmienna, wilgotność drewnianych elementów konstrukcyjnych wpływa negatywnie na trwałość i zachowanie całej konstrukcji w czasie jej eksploatacji. Zmiany wilgotności drewnianych elementów konstrukcyjnych prowadzą bezpośrednio do dodatkowych odkształceń konstrukcji, a pęcznienie i skurcz drewna do dodatkowych naprężeń, szczególnie w kierunku prostopadłym do włókien. Konsekwencją występowania naprężeń jest pojawianie się rys, pęknięć i rozwarstwień elementów konstrukcyjnych. Zmniejszają one nie tylko nośność konstrukcji, ale przez przerwanie ciągłości zabezpieczeń powierzchni wpływają na zwiększenie zmian wilgotności drewna. Cykliczne zmiany wilgotności przyspieszają proces pęcznienia konstrukcji wykonanych z drewna i materiałów drewnopochodnych, [56]. W wielu wypadkach niedocenianie wpływu klimatu otoczenia, brak umiejętności przewidywania zmian wilgotności drewna w fazie montażu konstrukcji, niekiedy elementarne błędy twórców, zwłaszcza dotyczące wentylacji obiektów, doprowadzają przez przyspieszoną destrukcję drewna do stanów awaryjnych części dźwigarów lub całej konstrukcji. Kształt i wymiary przekroju elementów konstrukcyjnych, rozpiętości konstrukcji, a w wielu rozwiązaniach, podatność na zmiany warunków klimatycznych uzasadnia bardziej szczegółową charakterystykę tej grupy konstrukcji drewnianych, [56]. Pokrycie dachu i wykończenie ścian należy wykonać niezwłocznie po zmontowaniu konstrukcji z drewna klejonego. W budynkach ogrzewanych, po zamontowaniu konstrukcji, wymagane jest stopniowe zwiększanie temperatury wewnątrz budynku, dzięki czemu wilgotność drewna konstrukcyjnego stopniowo przystosowuje się do wilgotności otoczenia.

Elementy nie impregnowane szarzeją pod wpływem promieniowania UV (działania światła) oraz mogą ulegać biodegradacji. Preparaty impregnacyjne są jedynie powierzchniowe, ponieważ nie wnikają głęboko (do 1-3 mm), pozostawiając wewnątrz przekroju bez ochrony. Powłoki powierzchniowe stanowią jedynie tymczasową ochronę. Przed powtórным naniesieniem impregnatu należy ustalić, jaki jest skład zastosowanego pierwotnie w zakładzie produkcyjnym środka impregnującego, tak aby skład nowo nakładanego impregnatu nie wywołał niepożądanych skutków chemicznych.

Drewno może ulec poważnym uszkodzeniom, jeśli istniejące warunki pozwalają na rozwój szkodników, co w skrajnych wypadkach wskutek biodegradacji struktury drewna prowadzi do stanów awaryjnych konstrukcji. Do głównych niszczyteli drewna zalicza się grzyby i owady. Mimo że organizmy te są niezbędne dla środowiska, w celu recyklingu drewna w przyrodzie, co pomaga w zachowaniu zdrowego cyklu przyrostów

w lasach, powodowana przez nie degradacja drewna stanowi poważne zagrożenie dla konstrukcji drewnianych. Ponieważ przyrost rozkładu powodowanego przez grzyby zależy głównie od wilgotności i poziomu tlenu, a grzyby potrzebują zawartości wilgoci minimum 25%, kontrola wilgotności może znacząco poprawić trwałość drewna, [335], [56].

Drewno pozyskiwane w stanie świeżym cechuje zróżnicowana wilgotność, najczęściej zbyt wysoka dla późniejszych zastosowań. Stąd konieczność suszenia drewna do stanu równowagi z parametrami powietrza w miejscach użytkowania wykonanych z niego wyrobów. Proces suszenia w warunkach produkcyjnych jest związany z dużym, proporcjonalnym do ilości usuwanej wody, zużyciem energii cieplnej, natomiast w wypadku gatunków trudno schnących - dodatkowo ze znaczącym zużyciem energii elektrycznej. Proces suszenia wiąże się z występowaniem wad suszenia, które obniżają jego jakość, niekiedy nawet dyskwalifikują surowiec. Zmiany wilgotności w procesie suszenia są istotnym, dobrze poznanym od strony teoretycznej, zagadnieniem technologii produkcji. Znacznie mniej uwagi, jak wynika z przeglądu literatury, poświęca się zagadnieniom zmian wilgotności drewna po zakończeniu procesu suszenia. Dotyczy to oddziaływań zmiennych parametrów powietrza otoczenia (klimatu) w trakcie obróbki drewna, magazynowania oraz użytkowania wyrobów z drewna [56].

Na drewniane elementy konstrukcyjne, w zależności od rodzaju obiektu oraz miejsca wbudowania i użytkowania elementów, może oddziaływać woda z opadów atmosferycznych, kondensacji na powierzchniach wewnętrznych obiektu, niekiedy z kondensacji na przekrojach elementów konstrukcyjnych lub para wodna znajdująca się w powietrzu otoczenia. W większości wypadków eliminuje się bezpośrednie oddziaływanie wody przez świadome kształtowanie rozwiązań konstrukcyjnych obiektów. Pozostaje jednak oddziaływanie drugiej fazy, czyli pary wodnej w powietrzu. Dotyczy to wszystkich konstrukcji drewnianych, w mniejszym stopniu w obiektach otwartych, w większym w zamkniętych, znajdujących się pod zadaszeniem. Charakterystyczną cechą oddziaływań zewnętrznych jest ich cykliczność przy zmiennej amplitudzie i długości fazy. Wyróżnia się oddziaływania zmienne w cyklu dobowym, zmienne okresowo - zależnie od pogody oraz zmienne w cyklu rocznym - kształtowane przez pory roku. Znacznie więcej czynników wpływa na amplitudę oddziaływań wewnętrznych, która dla przestrzeni zamkniętych zależy od charakterystyki cieplnej obiektu, zysków energetycznych pochodzących od promieniowania słonecznego, warunków klimatycznych (suchy, wilgotny), a także od rodzaju działalności prowadzonej w obiekcie [56].

7.2.4. Wpływ wilgotności na odkształcenia konstrukcji z drewna klejonego.

Zmiany wilgotności elementów konstrukcyjnych z drewna, będące funkcją położenia i czasu oraz braku możliwości pełnych odkształceń, na przykład w strefach połączeń, prowadzą do dodatkowych odkształceń i naprężeń, głównie w przekrojach poprzecznych elementów konstrukcyjnych. Występują dodatkowe oddziaływania naprężeń od obciążeń własnych i zewnętrznych, i zmian wilgotności, określane jako naprężenia mechaniczno-wilgotnościowe.

W przeprowadzonych badaniach opisanych w [56], dla klejonych warstwowo dźwigarów o dużych rozpiętościach i wysokości przekroju 1,50 m zarejestrowano, przy zmianie wilgotności o 4% (z 12% do 8%), zmniejszenie wysokości o 1 cm, natomiast przy spadku wilgotności o 7% - już o 2,5 cm. W warunkach ekspozycji zewnętrznej w ciągu roku, dla belek o szerokości 0,17 m odnotowano zmiany wysokości wynoszące od 1,1% do 2,7%. Uzyskane dane pozwoliły na wyznaczenie średniej, jednostkowej wartości skurczu na wysokości belek zależnej od zmian wilgotności. Wynosiła ona od 0,1% do 0,24% na każdy procent zmiany wilgotności. Wartości te porównywalne są z danymi charakteryzującymi skurcz w kierunku promieniowym i stycznym gatunków drewna wykorzystywanego w konstrukcji. Zmiany wysokości przekrojów drewnianych elementów klejonych warstwowo można przewidywać na podstawie zmian ich średniej wilgotności, uwzględniając jednostkowe wartości skurczu w kierunku poprzecznym do włókien. Przy większych zmianach wilgotności środowiska, w którym wbudowane są belki z drewna klejonego, wartości bezwzględne odkształceń belek o dużych wysokościach przekrojów mogą dochodzić do kilku centymetrów. Przyczyn pęknięć i rozwarstwień dźwigarów klejonych warstwowo upatrywano początkowo w błędach popełnianych w fazie produkcji elementów. Uważano, że wynika to z niedostatecznej wytrzymałości spoin klejowych oraz przekraczania dopuszczalnych naprężeń rozwarstwiających. Pęknięcia obserwowano nie tylko w spoinach, ale także w drewnie poszczególnych lameli. Upatrywano ich źródła w naprężeniach skurczowych, podobnie jak w procesach suszenia tarcicy. Naprężenia te mogły być skutkiem zbyt wysokiej wilgotności tarcicy wykorzystywanej do produkcji dźwigarów lub nadmiernego zróżnicowania wilgotności między sąsiednimi warstwami. W [56] przedstawiono wyniki badań dla belek o przekroju 0,15 m x 0,50 m sklejanym z tarcicy o zróżnicowanej od 9% do 22% wilgotności. Różnice wilgotności między sąsiednimi lamelami nie przekraczały 6%. Belki poddano próbie długotrwałego zginania w warunkach

stałego klimatu, odpowiadającego wilgotności bezwzględnej 7%. Po roku nie stwierdzono rozwarstwień w spoinach. Wyniki tych badań wskazują, że większy wpływ na powstawanie pęknięć w belkach ma szybkość zmian wilgotności niż jej różnice w czasie sklejania. Ważnym elementem wpływającym na pęknięcia w dźwigarach jest czynnik czasu. Niebezpieczne, według autorów badań, były skokowe zmiany wilgotności, [56].

Przyczyn uszkodzeń upatrują oni w zmianach wilgotności i różnicach skurczu na wysokości dźwigarów. Jedną z nich jest wysychanie dźwigarów, które chłoną wilgoć w czasie transportu i montażu.

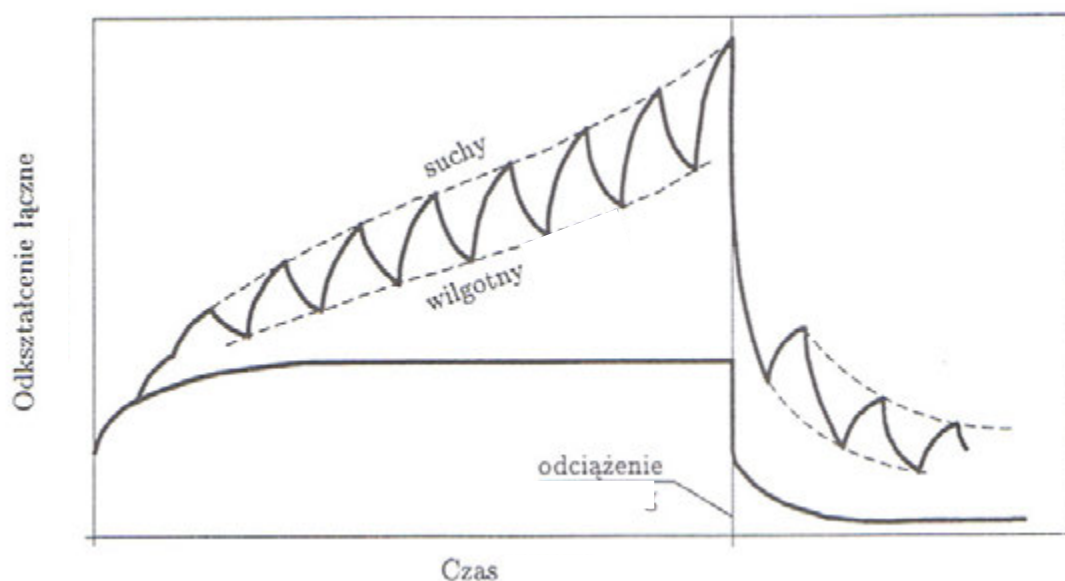
Badania uszkodzeń w drewnie klejonym warstwowo w warunkach obciążenia siłą zewnętrzną potwierdzają, że na powstawanie i rozwój pęknięć wpływa każdy z przedstawionych czynników:

- zróżnicowanie wilgotności poszczególnych warstw,
- anizotropia własności drewna,
- szybkość zmian wilgotności.

Pierwsze próby powiązania zmian parametrów otoczenia z powstawaniem i rozwojem pęknięć w dźwigarach opisuje Guzenda w [56]. Prowadzono badania belek o szerokości 0,18 m niezabezpieczonych powierzchniowo przed czynnikami atmosferycznymi, w warunkach użytkowania pod dachem. W pierwszym roku ekspozycji, latem, podczas suchej słonecznej pogody zarejestrowano pojawienie się rys na powierzchni dźwigarów. W drugim roku stwierdzono znaczny wzrost liczby rys i pęknięć na powierzchni belek. Częsty kontakt drewna z powietrzem otoczenia spowodował wzrost skali oddziaływań atmosferycznych; liczba pęknięć zwiększała się. Okazuje się, że zabezpieczenie powierzchni drewna powłokami ochronnymi nie zawsze prowadzi do zmniejszenia ryzyka pęknięć. W badaniach drewna sosny wykazano, że ze wzrostem grubości powłok ochronnych zwiększała się tendencja do tworzenia rys. Duże znaczenie dla twórców współczesnych konstrukcji miały wyniki zawarte w badaniach kilkunastu obiektów wzniesionych wcześniej w technologii drewna klejonego. Badania te pokazały, że warunki klimatyczne w otoczeniu konstrukcji pod dachem mają znacznie większy wpływ na tworzenie się rys i pęknięć niż dotychczas sądzono. W obiektach nieogrzewanych, o wyższej wilgotności bezwzględnej, zarejestrowano znacznie mniej pęknięć niż w obiektach ogrzewanych. Badania prowadzone na belkach o przekroju 0,15 m x 0,45 m, wykazały, że największe ryzyko pęknięć wyróżnia belki o małej wilgotności, które po wyprodukowaniu były narażone na wilgoć, a następnie znalazły się w warunkach szybkiego schnięcia. Analizy obni-

zenia nośności konstrukcji drewnianej, spowodowane naprężeniami od cyklicznych zmian wilgotności i temperatury, teoretycznie wykazuje dochodzenie pęknięć do osi analizowanych elementów konstrukcyjnych (belka zginana) po 19 latach, [56].

W warunkach długotrwałych obciążeń drewno zachowuje się jak ciało lepko-sprężyste. Odkształcenia w tym stanie można opisywać m. in. za pomocą funkcji pełzania, których przebiegi zależą od aktualnego stanu wilgotności i temperatury materiałów. Ponadto prognozowanie odkształceń związanych z pełzaniem w elementach konstrukcji drewnianych obciążonych i znajdujących się w warunkach zmiennego klimatu wymaga uwzględnienia zjawiska mechanosorpcji. Mechanizm pełzania drewna można przedstawić w dużym uproszczeniu jako sumę odkształceń lepko-sprężystych zależnych od wartości wilgotności oraz od dodatkowych odkształceń mechanosorpcyjnych, związanych ze zmianami wilgotności. Potwierdził się fakt (dla obciążonych belek klejonych warstwowo poddawanych zginaniu) wzrost ugięcia w czasie, przy równoczesnym zmniejszeniu szybkości pełzania. Przy stałym obciążeniu stwierdzono wzrost ugięcia belek w fazie wysychania i spadek ugięcia w fazie nawilżania.



Rys.7.3. Teoretyczna krzywa pełzania dla drewna poddanego zginaniu lub ścisaniu [56].

Wpływ obciążenia i wilgotności na proces pełzania jest większy dla elementów konstrukcyjnych wykonanych z drewna litego niż z drewna klejonego, [56].

7.3. Problematyka doboru i rozwój połączeń konstrukcyjnych w konstrukcjach z drewna klejonego warstwowo

Przekroje zawierające połączenia elementów konstrukcyjnych stanowią bardzo ważny obszar zarówno konstrukcyjny, jak też architektoniczny. Na sposób konstruowania i ekspozycji połączeń ma wpływ, przede wszystkim, ich rola w pracy statycznej konstrukcji oraz wartości obciążeń. Połączenia są kluczowe dla każdej konstrukcji. Ważne jest właściwe rozumienie ich pracy i prawidłowe stosowanie. Wskazane jest także zapewnienie dostępu do wszystkich łączników w celu dokonywania ich przeglądu i konserwacji.

W tradycyjnym budownictwie drewnianym łączniki były tak projektowane, by przenieść głównie naprężenia ściskające. Miały natomiast małe możliwości w przenoszeniu naprężeń od sił rozciągających. Współczesne łączniki (trzpieniowe - śruby, gwoździe, sworznie, elementy samo nawiercające, etc.) i różnego rodzaju połączenia zawierające wkładki stalowe równie dobrze przenoszą ściskanie jak i rozciąganie. Łączniki są ponadto istotnymi detalami architektonicznymi, które świadczą o charakterze budynku czy wnętrza. Oprócz funkcji technicznych, pełnią także funkcję estetyczną. W pewnym zakresie można je dowolnie kształtować w formie i eksponować. Umiejętnie dobranie łączników jest ważnym elementem tworzenia konstrukcji z drewna klejonego.

Rodzaj zastosowanego połączenia zależy od rodzaju obciążeń i w konsekwencji sił i naprężeń występujących w węźle, odporności ogniowej, wymaganej dla konstrukcji, a także względów estetycznych. Łączniki powinny być umieszczane w obszarach przecięć osi konstrukcyjnych elementów oraz możliwie niskich wartości sił wewnętrznych - momentów zginających, sił tnących, by uniknąć m. in. mimośrodów, a proces kształtowania konstrukcji prowadzić w sposób ekonomiczny. Generalnie rozróżnia się połączenia tzw. „warsztatowe” (produkcja) i montażowe (budowa). Aktualnie za najbardziej akceptowalne z architektonicznego, konstrukcyjnego i eksploatacyjnego punktu widzenia uważa się łączniki wprowadzane do wnętrza przekrojów elementów łączonych.

I. Rodzaje łączników dla konstrukcji z drewna klejonego:

- Standardowe, systemowe (np. Simpson, Koelner, etc.) łączniki stalowe - połączenia dla elementów, na które działają niskie siły, takich jak płatwie, rygle, stężenia drewniane, belki stropowe.

- Łączniki stalowe z blach stalowych: wewnętrzne wkładki lub okucia. Przydatne dla dużych wartości sił panujących w przekrojach węzłowych. Węzły, które przenoszą duże obciążenia, powinny być projektowane w sposób szczególny, ze względu na duże gabaryty belek.
- Łączniki klejowe na tzw. połączenia klinowe: wykonywane fabrycznie, generują znaczną nośność połączenia, niemal niewidoczne; najczęściej występują w sztywnych węzłach ram, w przypadkach, kiedy pozwalają na to względy transportowe.
- Łączniki specjalne, pręty SFS, SPAX – występują w połączeniu z wewnętrznymi wkładkami stalowymi i połączenia węzłowe siatek i struktur przestrzennych.

II. Systemowe łączniki stalowe.

Łączenie elementów o relatywnie niewielkich wymiarach przekroju poprzecznego, np. płatwii z dźwigarem, najczęściej odbywa się za pomocą łączników systemowych - różnego rodzaju wsporników i wieszaków. Rzadziej projektuje się tu łączniki wbudowane w dźwigar. Wsporniki łączy się za pomocą gwoździ karbowanych typu Anchor lub śrub i wkrętów, i odpowiednich kotew w przypadku, gdy elementy z drewna klejonego warstwowo są łączone z elementami innych materiałów np.: żelbetowymi. W przypadku wsporników okuciowych możliwe jest wiercenie otworów pilotażowych pod śrubą przez drewno i łącznik – w przypadku wsporników stalowych – konieczne jest zastosowanie łączników trzpieniowych, samowiercących typu SFS, SPAX. Szczelina w drewnie z zależności od wielkości może być przygotowana fabrycznie lub wycinana na montażu. Połączenie jest niewidoczne. Można zastosować także złącza pasowane typu Simpson, które mają tę zaletę, że są niewidoczne, ale w drewnie wycina się gniazda o gabarytach wspornika, co jest pracochłonne. Dodatkowym utrudnieniem jest tu wymagana bardzo duża precyzja wykonania. Połączenie na kątowniki dwustronnie lub wsporniki Knaga stosuje się dla płatwi wieloprzęsłowych, które leżą na dźwigarach. Do ich łączenia na długości stosuje się połączenie Gerbera. Kątowniki mają różne wielkości i perforacje. Występują kątowniki proste, wzmocnione, a także kątowniki z blachy perforowanej, [218].

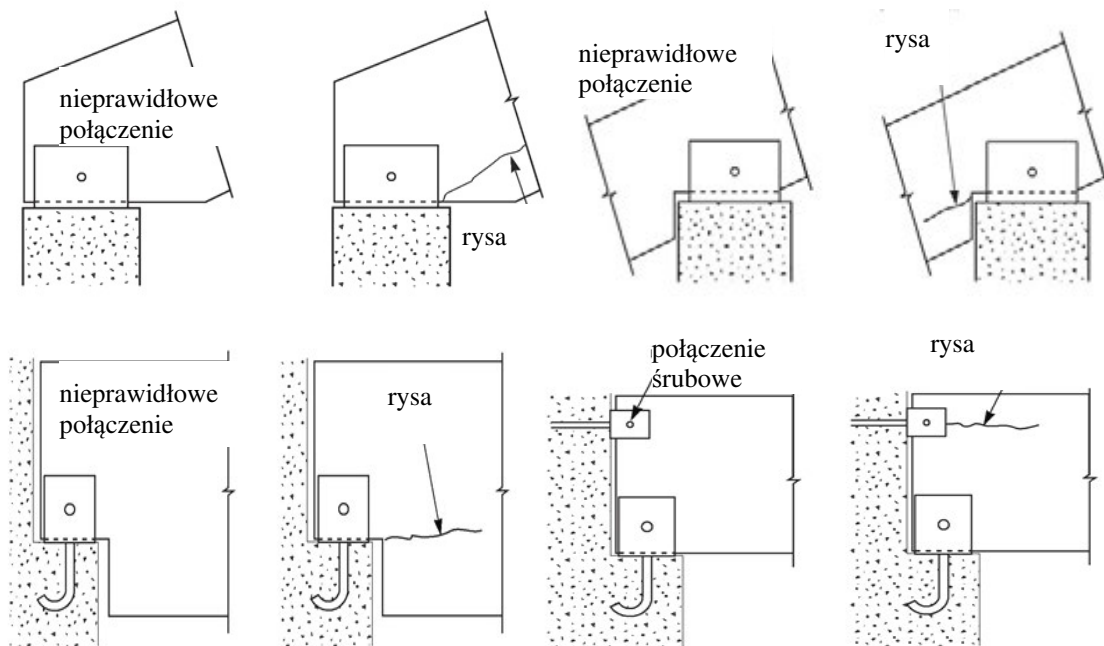
III. Połączenia - węzły podporowe i kalenicowe belkowych dźwigarów pełnościennych.

W układach dźwigarów belkowych z drewna klejonego wyróżniamy węzły podporowe, natomiast w układach trójprzegubowych wyróżniamy połączenia przegubowe podporowe i kalenicowe a także węzły przesuwne. Węzły te są najbardziej narażone na

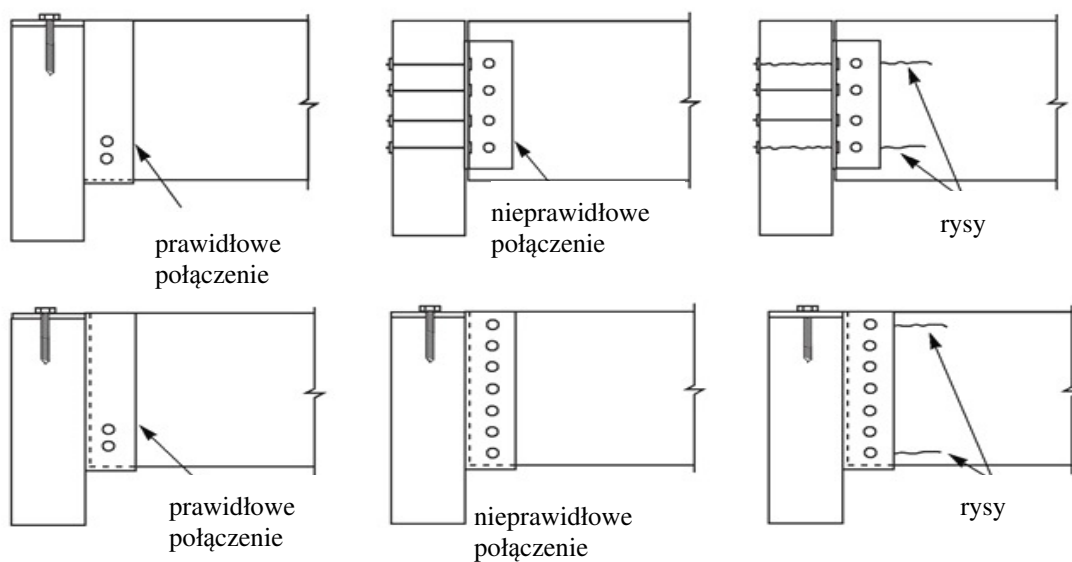
zniszczenia, ze względu na działające bardzo duże obciążenia na małą powierzchnię podparcia dźwigarów a także przez to, iż stykają się tu materiały o różnych właściwościach fizycznych. Nieprawidłowe zaprojektowanie stref podporowych a także łączników kalenicowych może doprowadzić do powstania rozwarstwień, zmiżdżenia drewna i rozerwania jego włókien, co przyczynia się do znacznego obniżenia nośności konstrukcji. W miejscach podparcia dźwigarów belkowych reakcje wywołują naprężenia na docisk w poprzek włókien. Wytrzymałość natomiast drewna w poprzek włókien jest bardzo mała [126]. Złożony stan naprężeń w strefach podparcia belek może doprowadzić do powstania rozwarstwień drewna i, co za tym idzie, zmniejszenia nośności stref podporowych. Nadmierne odkształcenia stref podporowych mogą doprowadzić do uszkodzeń połączeń, [126].

1) Połączenia przegubowe belek prostych opartych na słupach.

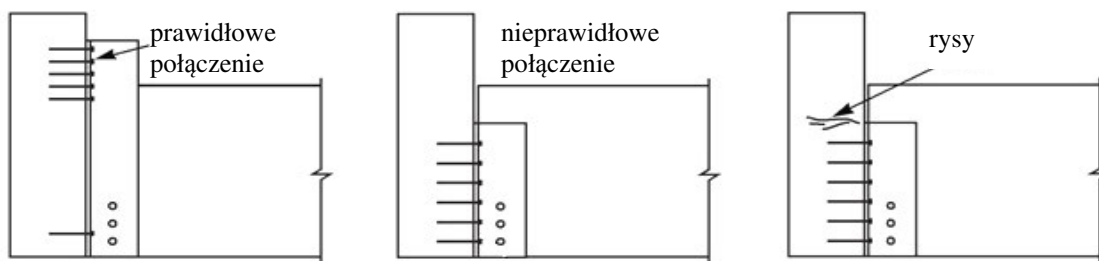
Najczęściej popełniane błędy polegają właśnie na nieprawidłowym podparciu powierzchni głównego dźwigara nośnego, co prowadzi do spękaniu konstrukcji i może prowadzić do awarii. Powierzchnia podparcia dźwigara powinna mieć styczność z podporą na całej powierzchni, jeśli nie, część nadwieszona poza podporę będzie miała tendencję do pękania, tak jak to pokazano na rys. 7.5. Gdy z jakichś powodów powierzchnia dolna dźwigara jest większa niż powierzchnia podpory, należy projektować nakładkę na górną powierzchnię słupa w formie podkładki stalowej, obejmującej całą dolną powierzchnię dźwigara. Mocowanie belek w sposób pokazany na rysunku 7.5. sprawia, że dolna część belki nie ma cech konstrukcyjnych i drewno w tym miejscu ulegnie rozwarstwieniu (zmiana sztywności przekroju na podporze). Przy mocowaniu górnej części dźwigara, jak pokazano na rys. 7.6, nie należy stosować śrub, a jedynie zabezpieczyć dźwigar przed wyboczeniem z płaszczyzny poprzez zastosowanie samych blach. Deformacja giętnej belki powoduje, że w miejscu osadzenia łącznika trzpieniowego wzdłuż włókna powstają spęknięcia. Prawidłowe zastosowanie belki z drewna klejonego przy osadzeniu jej w gniazdach w ścianie – belka ścięta, pokazano na rys. 7.8. Zaleca się tu zastosowanie podkładek ograniczających wpływ podparcia na wytrzymałość drewna na docisk w poprzek włókien.



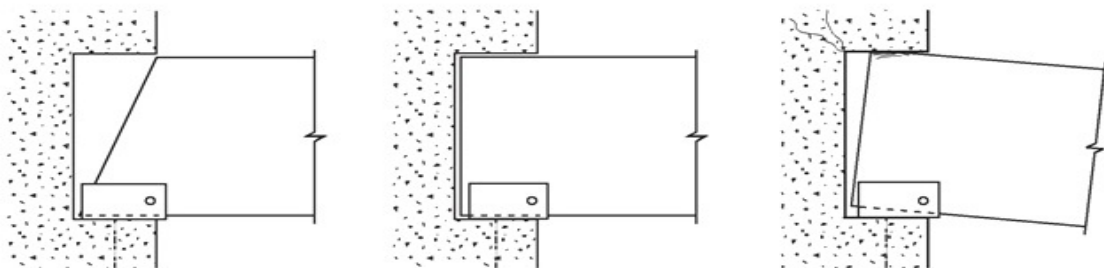
Rys.7.4. Schemat podparcia przegubowego belki z drewna klejonego słupie żelbetowym, [339].



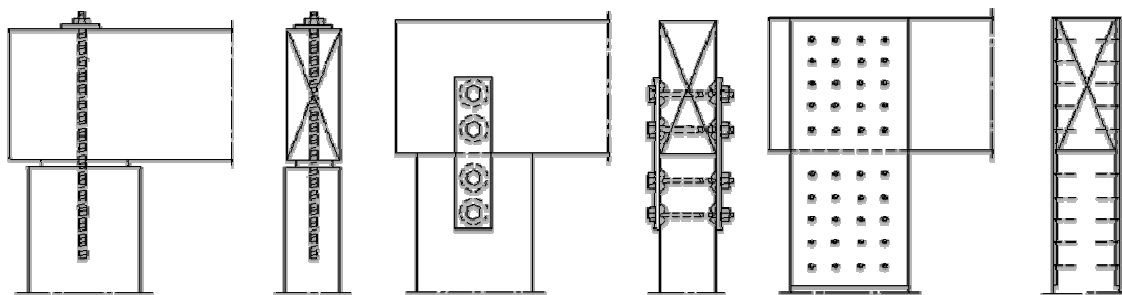
Rys.7.5. Schemat podparcia przegubowego belki z drewna klejonego na słupie drewnianym, [339].



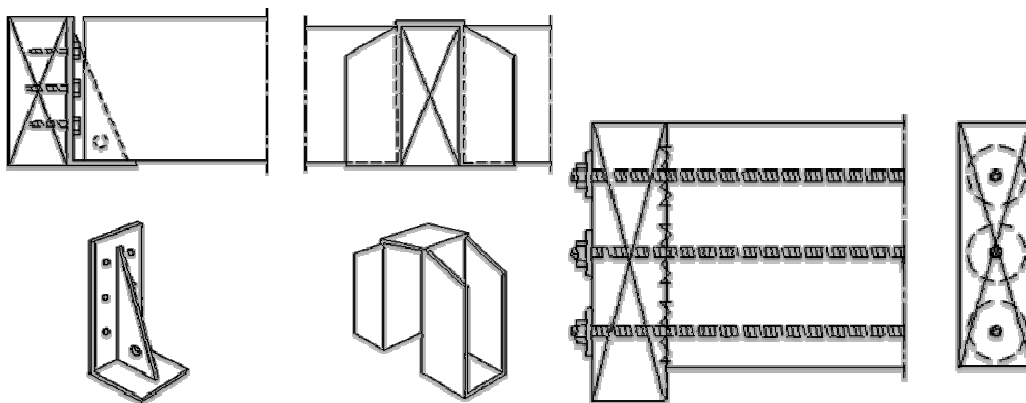
Rys.7.6. Idea prawidłowego zastosowania wieszaka przy połączeniu prostopadłym dwóch belek z drewna klejonego. Pokazane wieszaki można zastosować obustronnie, [339].



Rys.7.7. Idea prawidłowego oparcia belki z drewna klejonego przy oparciu w „gniazdach” w ścianie – belka ścięta tak by górna krawędź była poza ścianą. [339].



Rys.7.8. Schemat połączenia słupa z drewna klejonego i dźwigara z drewna klejonego, [329].



Rys.7.9. Schemat połączenia elementów z drewna klejonego za pomocą wieszaków stalowych, [329].



Rys.7.10. Połączenie słupa z dźwigarem za pomocą wbudowanej blachy stalowej łączonej za pomocą sworzni lub śrub. Czoła dźwigarów osłonięte blachą, [335].



Rys.7.11. Schemat poarcia belki z drewna klejonego na słupie żelbetowym [335]. Posadowienie belki z drewna klejonego na słupie żelbetowym bez blach stalowych za pomocą śrub. Głowice słupów formuje się do kształtu, który umożliwi osadzenie belki bez potrzeby stosowania blach. Trzeba pamiętać o tym, żeby powierzchnie żelbetu i drewna odizolować od siebie stosując podkładki z folii, gumy lub teflonu, przy konieczności uzyskania przesuwu [335].



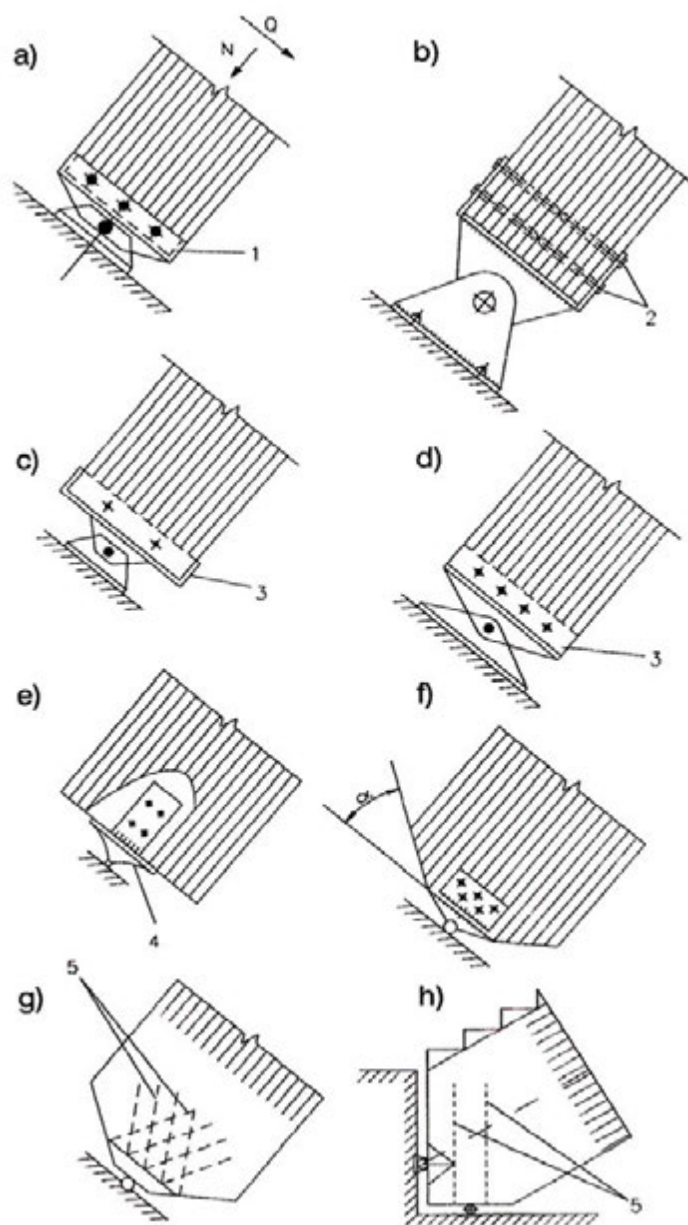
Rys.7.12. Połączenia belek na wieszak stalowy, za pomocą wbudowanych blach stalowych, [335].

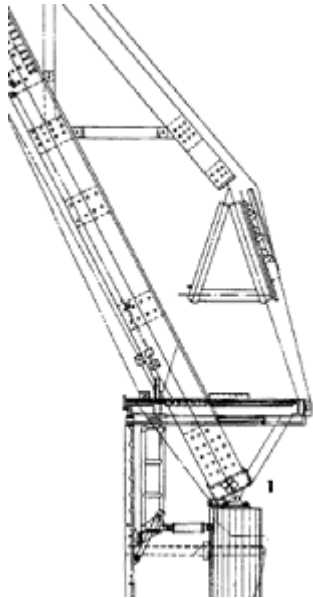
2) Połączenia przegubowe, podporowe w układach trójprzegubowych.

Najbardziej niekorzystne są tu rozwiązania, gdy podporowy przekrój łuku jest całkowicie osadzony w stalowy „but”, (rys. 7.14. a). Konstrukcja przegubów jest zbyt materiałochłonna, a drewno ze względu na brak przewietrzania, narażone jest na korozję biologiczną. Bardziej skuteczne są rozwiązania, w których przekrój podporowy łuku jest

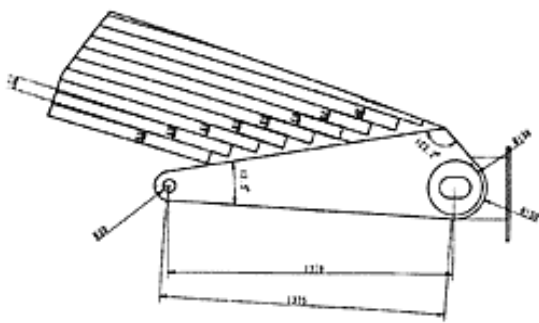
przewietrzany a siła poprzeczna przekazywana jest przez śruby na boczne blachy podpory przegubowej (rys. 7.14. b, c). W przypadku przekazywania siły poprzecznej przez śruby płaskowniki pionowe z otworami na śruby korzystniej jest rozmieszczać nie na zewnątrz (rys. 7.14. f), lecz wewnątrz przekroju, w wyfrezowanej szczelinie (rys. 7.14. d, e). Występująca w drewnie, pod krawędziami przegubów, niekorzystna koncentracja naprężeń może być zredukowana kilkoma sposobami. Można tu zastosować wiotki przegub o zmiennej sztywności (rys. 7.14. e.) lub poprzez podcięcie naroży czoł łuków (rys. 7.14. f.). Skutecznym rozwiązaniem zapobiegającym spękanom i rozwarstwieniom czołowych przekrojów podporowych łuków jest ich zbrojenie za pomocą wklejanych prętów ze stali żebrowanej lub kompozytów. Rozwiązanie to stosuje się w podparciach narażonych na ekspozycję zewnętrzną, [68].

Rys.7.13.Schematy węzłów podporowych konstrukcji łukowych z drewna klejonego. 1 – stalowy przegub skrzynkowy w postaci „buta”, 2 – śruby stężające, 3 – przegub z płaskownikiem umieszczonym w szczelinie czoła łuku, 4 – wiotki przegub o zmiennej sztywności, 5 – pręty zbrojenia, [68].

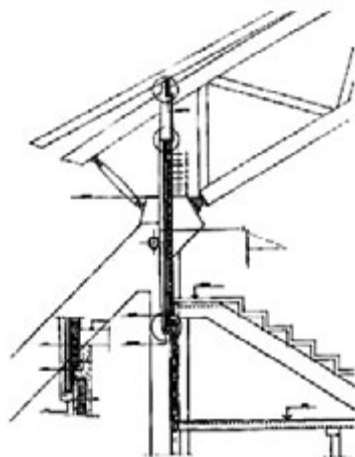




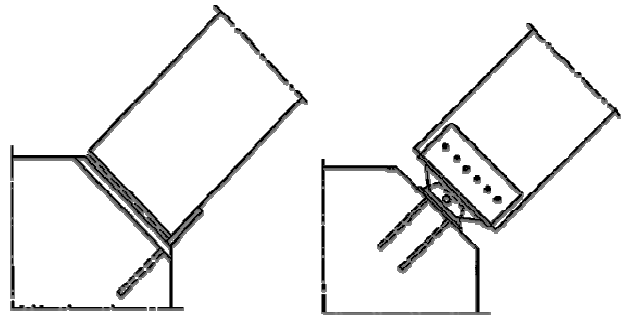
Rys.7.14. Detal podparcia. Izumo Dome, Izumo, [168].



Rys.7.15. Detal podparcia. Renault Technocenter w La Ruche, Francja, [6].



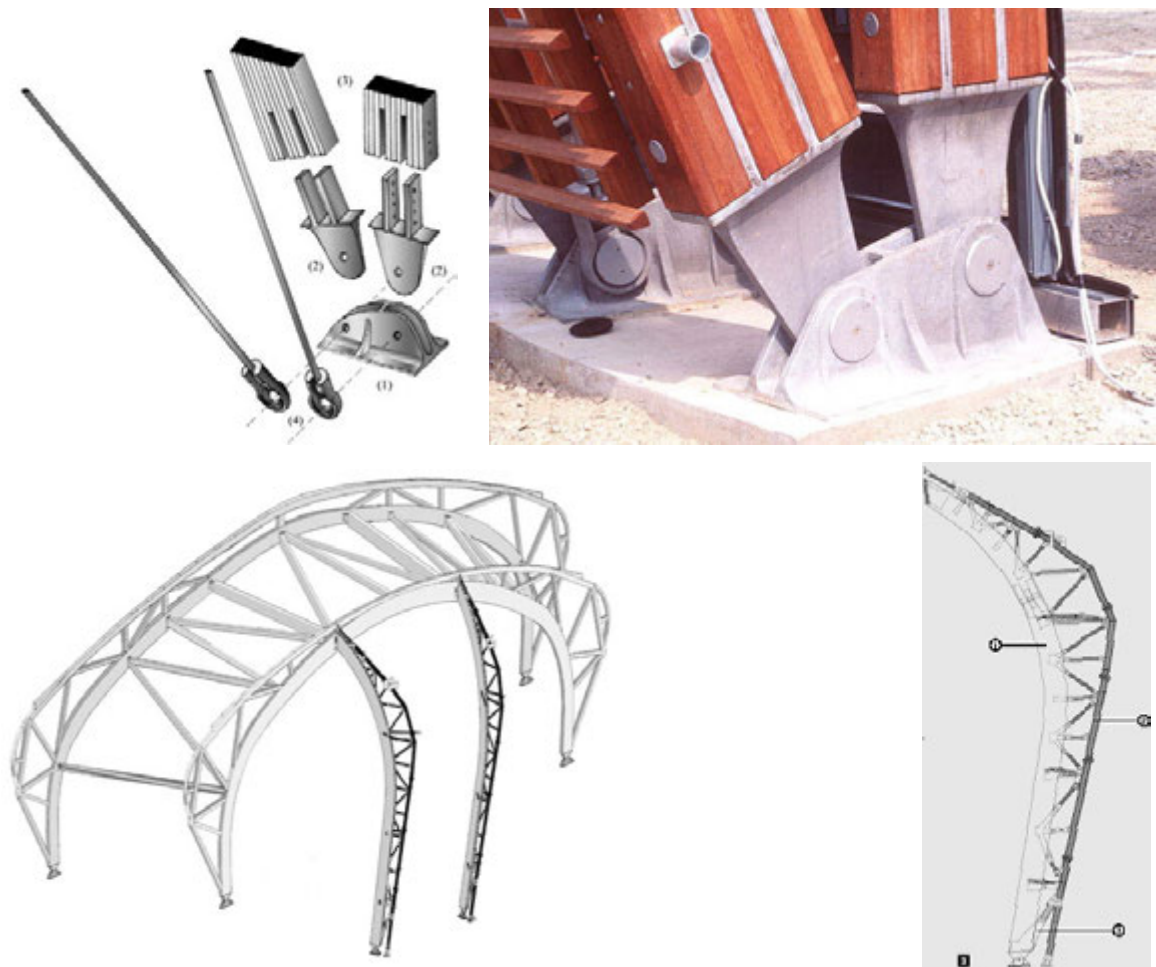
Rys.7.16. Detal podparcia. Hala olimpijska w Lillehammer, [347].



Rys.7.17. Podstawa łuku – połączenie przegubowe [335], [329].



Rys.7.18. Oparcie belki z drewna klejonego na słupie żelbetowym. Głowice słupów są płasko wykończone, elementy z drewna klejonego mocuje się za pomocą blach stalowych, które są wcześniej zakotwione w przekroju żelbetowym za pomocą wklejanych lub zabetonowanych kotew, [335].



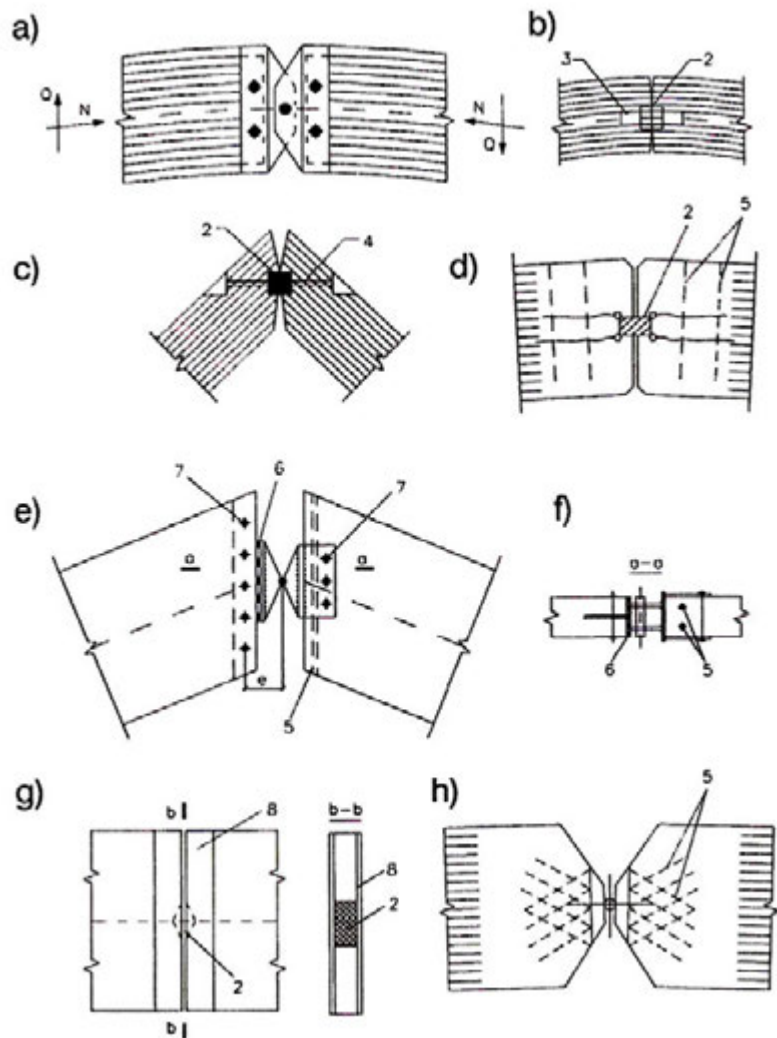
Rys.7.19. Detal podparcia w hali wielofunkcyjna na terenie Expo (pawilon atlantycki) w Lizbonie, [337].



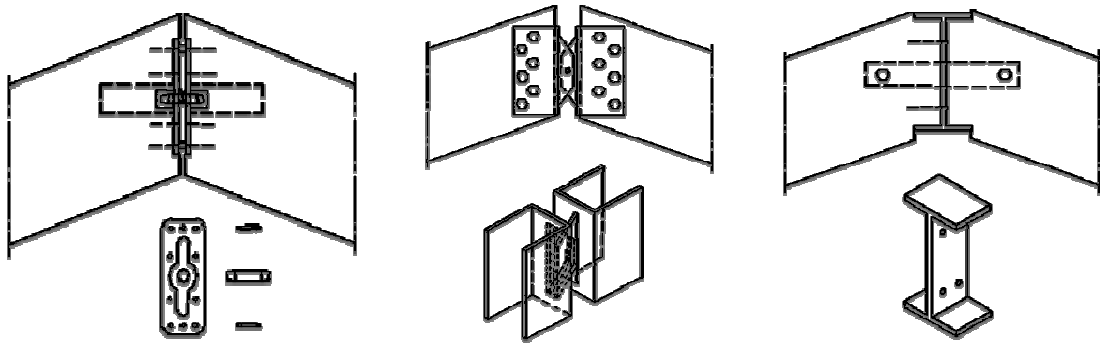
Rys.7.20. Poparcie belki z drewna klejonego na słupie stalowym. Słup stalowy daje możliwości spawania elementów stalowych, na których osadza się dźwigary bezpośrednio na montażu przed wykonaniem ostatecznego połączenia, [335].

3) Połączenia kalenicowe w układach trójprzegubowych

Przegubowe połączenia kalenicowe bardzo często ulegają uszkodzeniom z powodu stosowania niepoprawnych rozwiązań. Ich rozwiązanie konstrukcyjne zależy od relacji sił podłużnych i poprzecznych. Ze zwiększeniem stosunku wysokości łuku trójprzegubowego do jego rozpiętości siła podłużna w kalenicie maleje. Natomiast decydujący wpływ na nośność połączenia może mieć siła poprzeczna wywołana nierównomiernym obciążeniem łuku na rozpiętości lub oddziaływaniem obciążeniem pionowym (wiatrem). W tym przypadku przy niewłaściwym wykonaniu połączenia przegubowego może wystąpić rozwarstwienie drewna w strefie kalenicowej łuku, (rys. 7.19. b, c, d). Można temu zapobiec poprzez zbrojenie części czołowych łuków prętami wklejanymi (rys. 7.19 d, f, h) lub poprzez ich wzmocnienie nakładkami bocznymi (rys. 7.19 g), [68].



Rys.7.21. Schematy kalenicowych połączeń przegubowych dźwigarów łukowych z drewna klejonego. 1 – stalowy przegub skrzynkowy w postaci „buta”, 2 – klocek centrujący z drewna twardego, 3 – nakładki montażowe z płaskowników stalowych, 4 – śruby montażowe, 5 – pręty zbrojeniowe, 6 – warstwa ślizgowa teflonowa, 7 – śruby, 8 – nakładki ze sklejkі przyklejane do powierzchni bocznych łuków [68].

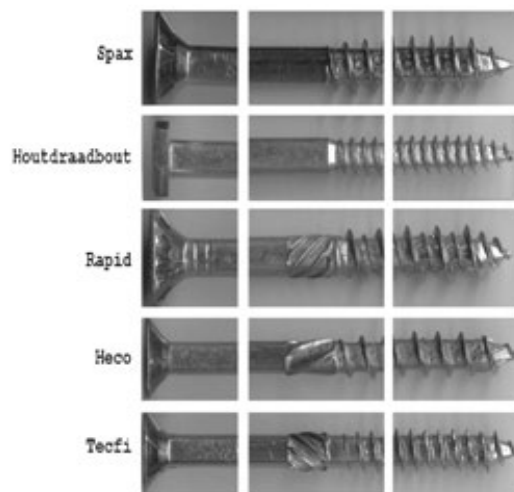


Rys.7.22. Schematy połączeń kalenicowych w układach trójprzegubowych, [329].

IV. Łączniki stalowe specjalne typu SFS, SPAX i połączenia węzłowe siatek i struktur przestrzennych.

Najnowszą generacją łączników stosowanych do drewna są pręty samo wierzące, np. typu SFS, SPAX. Pozwalają one na szybkie łączenie w jednej operacji różnych komponentów połączenia. Poniżej podano przykłady łączników SFS, SPAX.

1) Łączenie za pomocą wkrętów samowierzących do drewna SPAX, [370].



Rys.7. 23. Przykłady wkrętów wg [379]



Rys.7. 24. Wkręt samowierzący SPAX z główką talerzową, częściowo nagwintowane, [370].

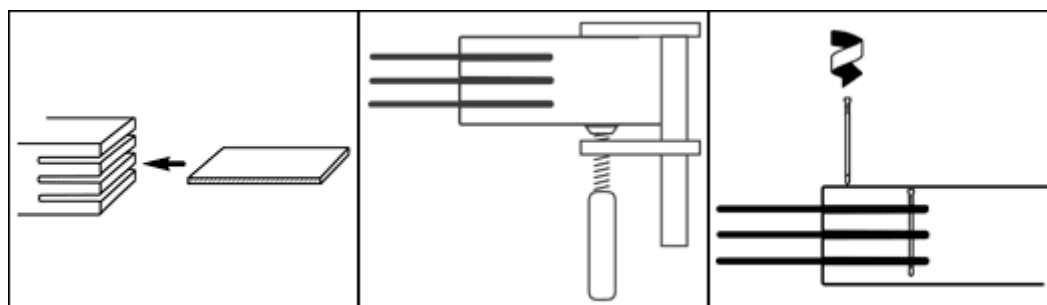


Rys.7. 25. Wkręt samowierzący SPAX z główką stożkową, całkowicie nagwintowane, [370].

- 2) Łączenie za pomocą wkrętów z ostrzem diamentowym, [340] – umożliwiające połączenie drewna z elementami metalowymi.

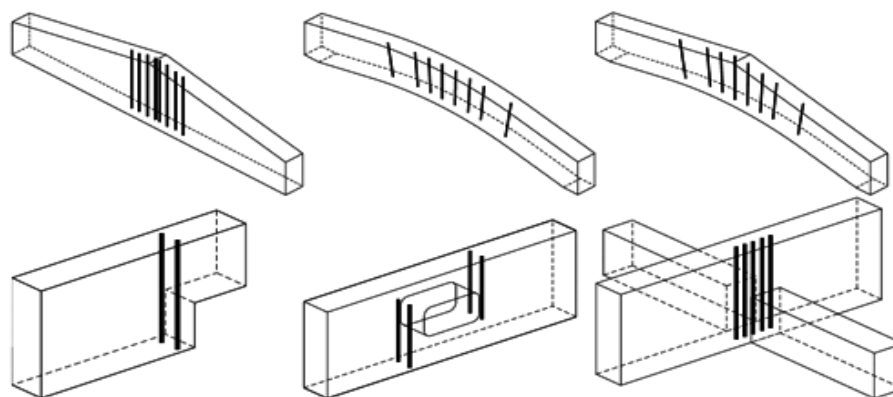


Rys.7. 26. Przykładowy łącznik z ostrzem diamentowym, [340].

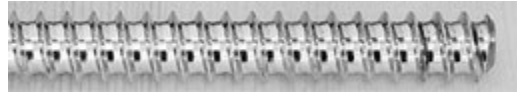


Rys.7. 27. Przykład wprowadzania blach stalowych w przekrój poprzeczny elementów drewnianych: 1). Osadzanie wkładek stalowych, 2). Regulacja 3). Wprowadzanie łącznika, [340].

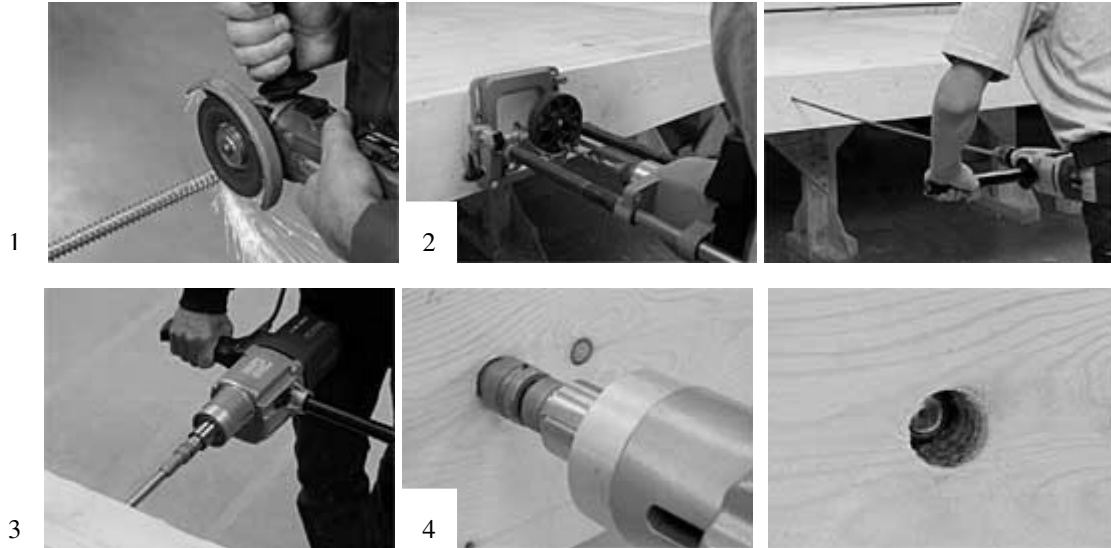
- 3) Łączenie za pomocą stalowych prętów samo wierzących, [340] umożliwiające wzmacnianie elementów drewnianych w miejscach osłabionych.



Rys.7. 28. Schemat możliwych połączeń elementów z drewna klejonego a także schemat wzmacniania elementów konstrukcyjnych z drewna w miejscach osłabionych, [340].



Rys.7. 29. Stalowy pręt samowiercący, [340].

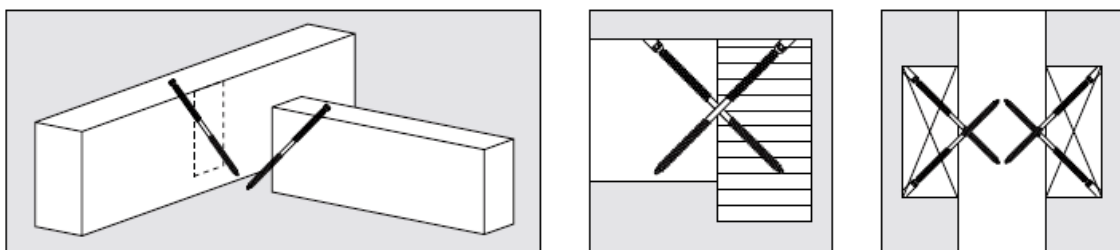


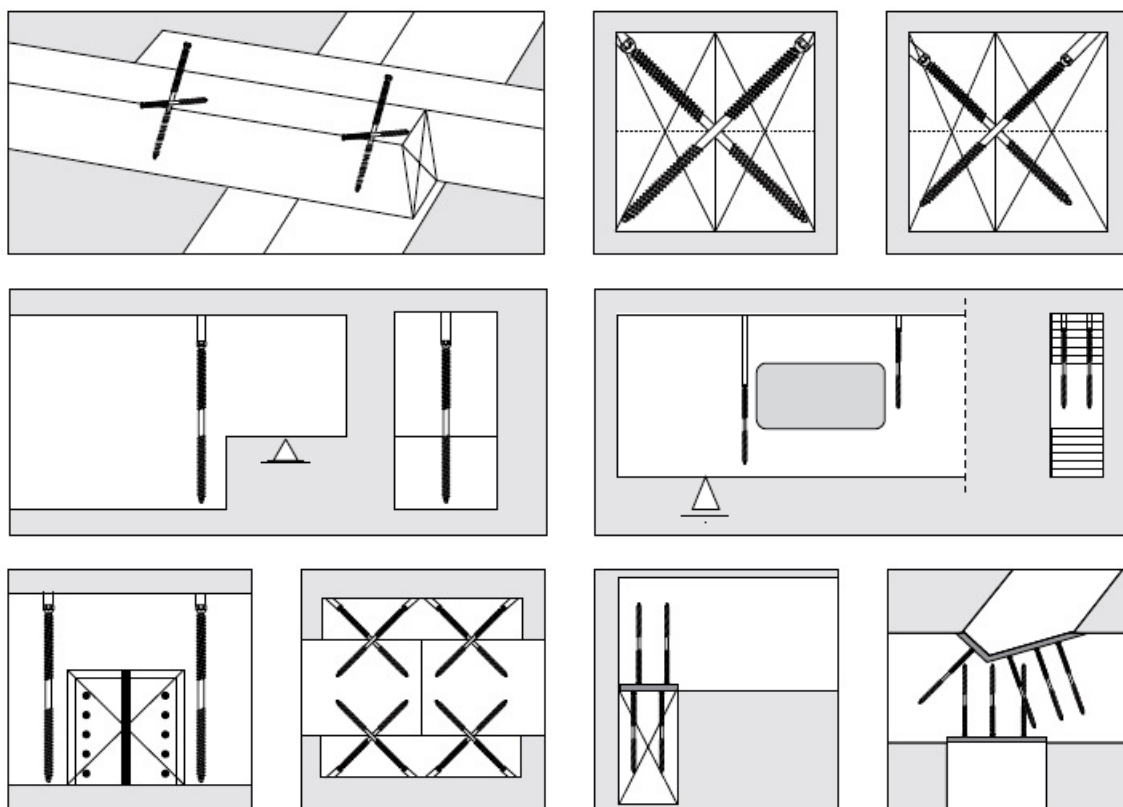
Rys.7.30. Operacja umieszczania prętów wzmacniających przekrój. 1. Cięcie, 2. Wiercenie pilotażowe, 3. Wiercenie, 4. Instalacja pręta gwintowanego [340].

- 4) Łączenie za pomocą samowiercących wkrętów łącznikowych [340], pozwalające na łączenie dwóch elementów z drewna.



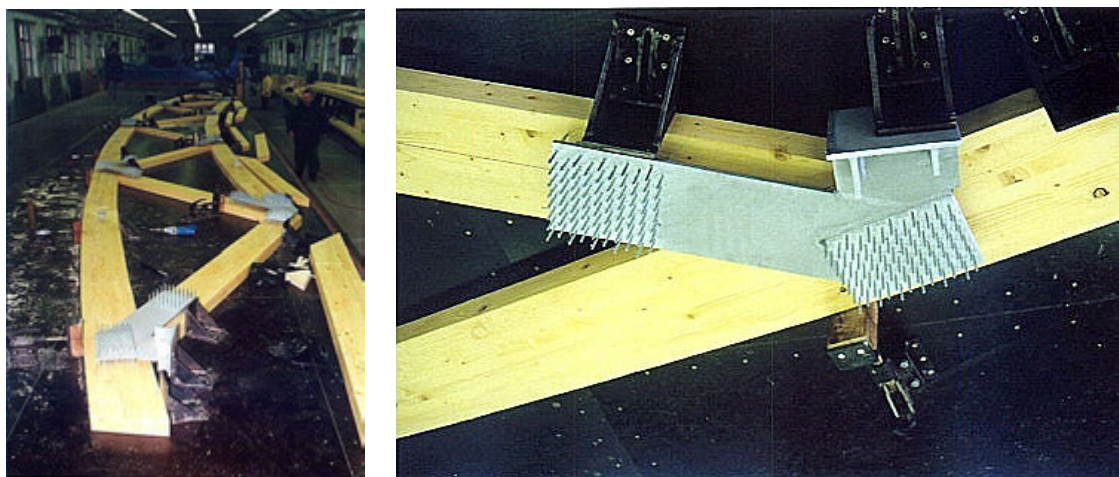
Rys.7. 31. Samonawiercący wkręt łącznikowy. Schemat połączenia wkrętami łącznikowymi, [340].



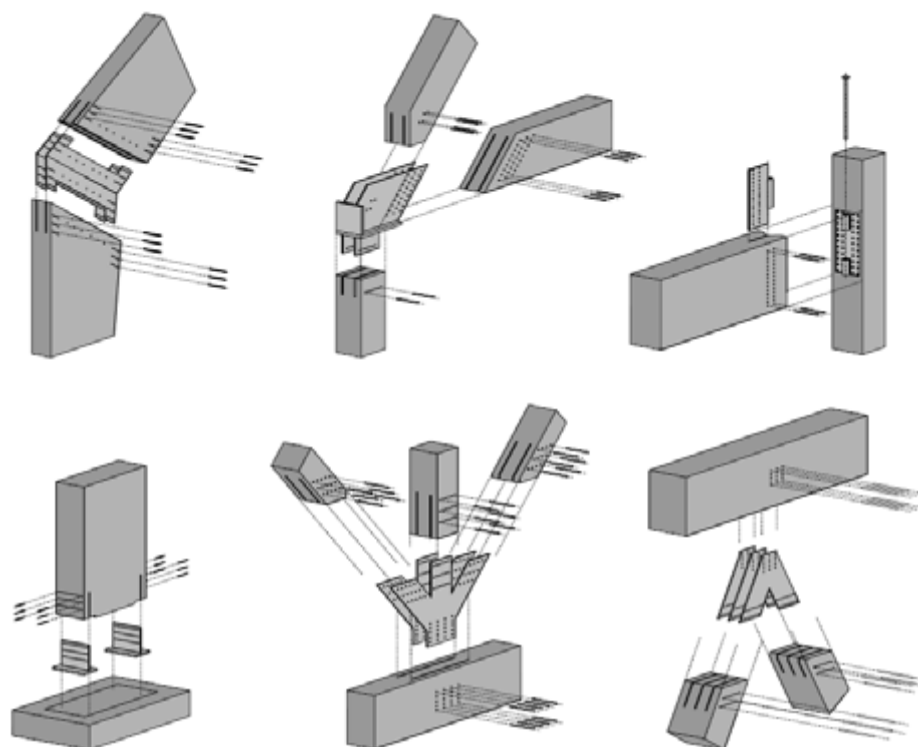


Rys.7.32. Sposoby zastosowania wkrętów łącznikowych, [340].

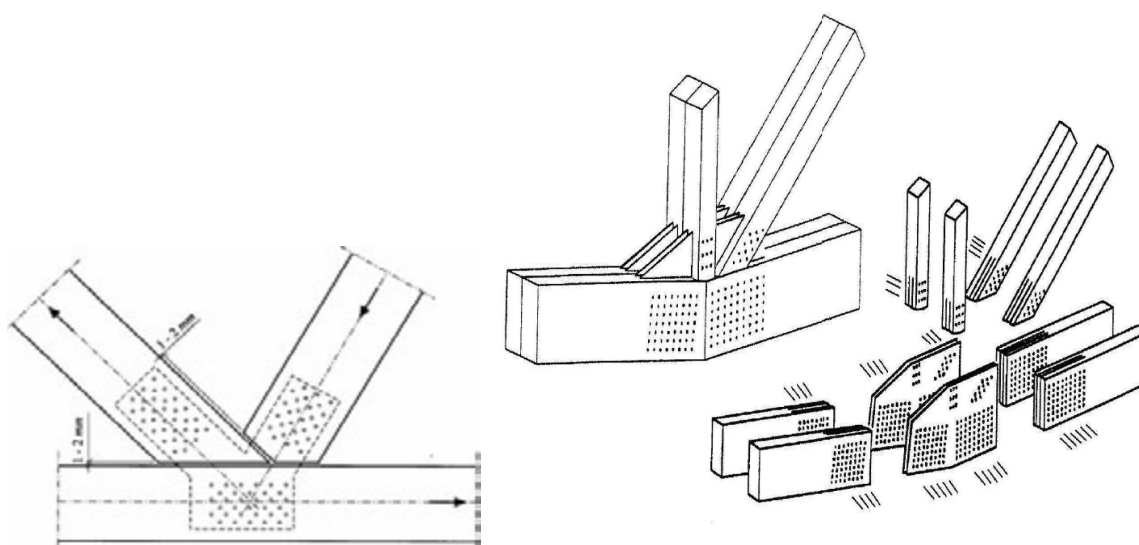
5) Łączenie prętów w kratownicach z drewna klejonego.



Rys.7.33. Montaż połączeń pomiędzy prętami kratownic płaskich z drewna klejonego przy użyciu płytek kolczastych, [331].



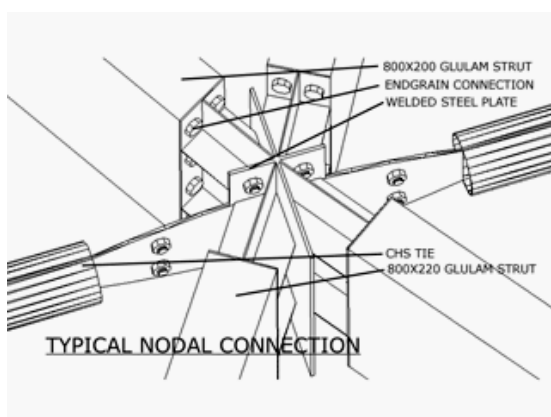
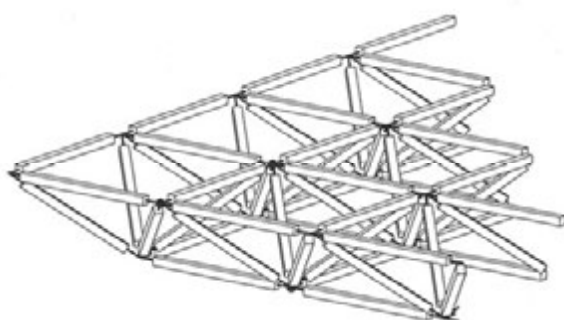
Rys.7. 34. Schemat realizacji połączeń w węzłach ram i kratownic z drewna klejonego za pomocą stalowych wkładek wbudowanych i prętów SFS, [331].



Rys.7. 35. Schemat realizacji połączeń w węzłach ram i kratownic z drewna klejonego za pomocą stalowych wkładek wbudowanych i prętów SFS, [379].

6) Łączniki węzłowe struktur przestrzennych z drewna klejonego warstwowo.

Systemy konstrukcji przestrzennych z drewna klejonego charakteryzują się tym, że pręty drewniane łączą się przegubowo w węzłach. Istnieje kilka rozwiązań połączeń węzłowych, np. okrągłe pręty drewniane połączone są w węźle przy pomocy stalowego płaskownika, wprowadzanego w przekrój pręta drewnianego, ściągniętego śrubą dociskową oraz usztywnionego obejmą stalową lub kompozytową. Znane jest także rozwiązanie, w którym pręty drewniane połączone są z kulistym węzłem stalowym poprzez profilowany pręt o półokrągłych nacięciach na powierzchni, w które, prostopadle do osi pręta, wprowadza się bolce blokujące możliwość przemieszczeń. Znany jest system konstrukcyjny Tanalith, w którym łączenie pręta drewnianego z węzłem stalowym odbywa się poprzez płaskownik wprowadzony w przekrój pręta i łączony sworzniami. Siły ściskające z pręta przekazywane są na węzeł poprzez płytę czołową. Łączenie z częścią centralną węzła następuje poprzez okrągłe trzpienie stalowe. Inne rozwiązania znajdują się w fazie rozwoju i opracowań. Badania w zakresie połączeń w strukturach przestrzennych są obiecującą perspektywą rozwoju budownictwa drewnianego, [105].





Rys.7.36. Łączniki systemowe struktur przestrzennych z drewna [331].

7.4. Badania konstrukcji w tunelach aerodynamicznych

Zastosowanie elementów konstrukcyjnych dużych rozpiętości z drewna klejonego do budowy obiektów wielkogabarytowych wymusza, w procesie tworzenia, stosowanie dodatkowych sposobów badania wpływu warunków i obciążeń zewnętrznych na statyczne zachowanie tych obiektów. Do najtrudniejszych w analizowaniu i rozwiązaniu należą zjawiska związane z wpływem obciążenia wiatrem i śniegiem. Jednym z efektywnych sposobów badania tych wpływów jest ich badanie na modelach obiektów w tunelu aerodynamicznym. Takie prace badawcze w Polsce przeprowadza się m.in. w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Instytut Mechaniki Budowli, Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, [330].

„W tunelu aerodynamicznym realizowane są następujące badania podstawowe:

- 1) Pomiary prędkości przepływu i jego turbulencji;
- 2) Pomiary ciśnienia wiatru w przepływie;
- 3) Pomiary ciśnienia wiatru na ścianach modeli;
- 4) Pomiary sił i momentów aerodynamicznych działających na cały model lub na sekcję modelu w przepływie płaskim;
- 5) Pomiary drgań modeli aeroelastycznych;
- 6) Wizualizacja opływu;
- 7) Badania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń”, [330].

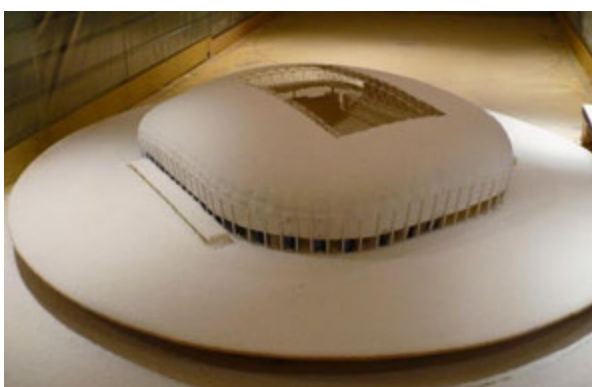
Pozwalają one na przeprowadzenie następujących analiz, dotyczących głównie następujących zagadnień:

- 1) „Symulacji pola prędkości wiatru dla typowych kategorii chropowatości terenu (np. kategorii terenu A, B i C wg normy);
- 2) Symulacji statycznego i dynamicznego działania wiatru na budowle i konstrukcje według teorii quasi-ustalonej z uwzględnieniem wzbudzenia wirowego i wyznaczeniem odpowiedzi statycznej i dynamicznej budowli wieżowych (kominy, wieże, wysokie budynki, maszty, chłodnie kominowe etc.), mostów wiszących i podwieszonych, lekkich kładek dla pieszych i innych budowli i konstrukcji smukłych, w sytuacjach w miarę typowych, lecz nie ujętych normami (programy własne);
- 3) Analizy numerycznej niestateczności aeroelastycznej typu dywergencji, galopowania, flatteru skrętnego i gięto - skrętnego, wzbudzenia wirowego w warunkach krytycznego odrywania się wirów, galopowania w śladzie aerodynamicznym itp., smukłych budowli i konstrukcji (programy i ujęcia obliczeniowe własne);
- 4) Symulacji numerycznej rozkładu ciśnień wiatru (ewentualnie sił i momentów aerodynamicznych) i pola prędkości przepływu i opływu powietrza wokół budowli i konstrukcji niepodatnych na dynamiczne działanie wiatru i o prostej geometrii, przy użyciu różnych programów komputerowych burzliwie dziś rozwijającej się numerycznej dynamiki płynów (CFD) lub numerycznej inżynierii wiatrowej (CWE) (programy komercyjne)”, [330].

Na przełomie 2007 i 2008 roku przeprowadzono w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej badania na oddziaływanie wiatru i śniegu konstrukcji przekrycia stadionu miejskiego w Poznaniu. Celem przeprowadzonych badań było określenie maksymalnie niekorzystnych rozkładów obciążenia śniegiem, wywołanych złożonymi warunkami działania wiatru i, na ich podstawie, przyjęcie schematów obciążenia, które zostały wykorzystane w trakcie tworzenia konstrukcji. Otrzymane wyniki z pomiarów, po przetworzeniu, pozwoliły na stworzenie dziewięciu schematów obciążenia gotowych do zastosowania w procesie projektowym. Uzyskano schemat obciążenia śniegiem ujmujący samo zjawisko opadu śniegu przez uwzględnienie częstości występowania wiatrów o określonych kierunkach w miejscu lokalizacji obiektu podczas zimy. Podobne badania przeprowadzono również na modelu zadaszona stadionu w Tarnowie. Na przykładach tych wyraźnie widać, że konstrukcje o dużych rozpiętościach, w tym również z drewna klejonego wymagają różnorodnych sposobów analizy oddziaływania warunków klimatycznych i obciążeniowych na te obiekty.



Rys.7.37. Model (1:200) stadionu w Poznaniu umieszczony w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego; przekrycie stadionu w Tarnowie w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego, Laboratorium Inżynierii Wiatrowej, [330].



Rys.7.38. Model (1:200) stadionu w Poznaniu umieszczony w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego pokazujący rozkład pokrywy śnieżnej (symulacja obciążenia śniegiem), [330].

W świecie, za ośrodek o szczególnych osiągnięciach na polu badań konstrukcji w tunelach aerodynamicznych powszechnie uważa się Otto – Graf Institut w Studgarcie (badania m. in. stadionu olimpijskiego w Monachium – Frei Otto, modeli odwróconych Sagrada Familia Antonia Gaudiego).

8. Wnioski i podsumowanie

Konstrukcje z drewna klejonego zaczęto określać jako „technologię przyszłości” już w latach 60 – tych XX wieku. W 1964 r. niemiecki naukowiec F. Kollman opublikował w czasopiśmie *Holzcentralblatt* artykuł „*Drewno jako materiał konstrukcyjny przyszłości*” [104]. Drewno miało się stać materiałem przyszłości ze względu na wykorzystywanie odnawialnych surowców naturalnych, łatwość ich utylizacji a także niezwykłą elastyczność w kreowaniu przestrzeni architektonicznych. Właśnie w drugiej połowie XX wieku technologia ta została masowo wprowadzona do realizacji w Europie, szczególnie w Niemczech, Francji, krajach skandynawskich, Stanach Zjednoczonych i Japonii, gdzie, wraz z największym zaangażowaniem w rozwój technologiczny, powstały najbardziej zaawansowane technicznie konstrukcje o dużych rozpiętościach, kopuły o średnicach ponad 100 m. Obiekty te przedstawiono w treści rozprawy. Są to unikatowe konstrukcje, stworzone z rozmachem i z rozumieniem właściwości materiałowych. Realizacje te, a także późniejsze zastosowania w obiektach architektonicznych i inżynierskich dużych rozpiętości pokazują, że odnawialny i ekonomiczny materiał – „miękkie” drewno o wciąż niewykorzystanym potencjale, przechodzi metamorfozę. Tworzone są technologie, które otwierają nowe możliwości. Elementy konstrukcyjne z drewna i materiałów drewnopochodnych znajdują się wciąż w fazie rozwoju. Największy potencjał dotyczy wykorzystania drewna wzmocnianego, łączonego w systemy hybrydowe z elementami stalowymi. Układy te, łączone w formy kratownic przestrzennych, mogą przekrywać rozpiętości do 200 m.

Przeprowadzone analizy istniejących rozwiązań współczesnych form architektury dużych rozpiętości z drewna klejonego (Rozdział 3) oraz możliwości rozwoju w zakresie układów konstrukcyjnych (Rozdział 5) wykazały, że drewno klejone jest atrakcyjnym i elastycznym dla różnych zastosowań materiałem. Wykorzystanie drewna w architekturze najnowszej i w przyszłości jest uzasadnione technicznie, ekonomicznie oraz odpowiednie dla realizowania dużych rozpiętości i połączonych z nimi indywidualnych form architektonicznych. Jak wynika z treści rozprawy, perspektywy dla nowych możliwości kształtowania form architektonicznych o dużych rozpiętościach z drewna klejonego opierają się, przede wszystkim, na aktualnych właściwościach nośnych wzmocnionego przekroju współpracującego z elementami stalowymi i kompozytowym w nowatorskich sys-

temach dwukrzywiznowych a także na wysokiej jakości dzieł architektury, w których zastosowano konstrukcję z drewna klejonego, w zakresie estetycznym, społecznym, ekonomicznym i ekologicznym. Wyeksponowanie drewna w konstrukcji umożliwia tworzonym formom architektonicznym uzyskanie efektów ekspresyjno – estetycznych, które daleko wykraczają poza charakter czysto techniczny i konstrukcyjny.

Dalszy rozwój konstrukcji z drewna klejonego o dużych rozpiętościach dla realizacji form architektury w XXI wieku związany jest z następującymi aspektami:

I. Perspektywy w zakresie zwiększania rozpiętości:

- 1) Na obecnym etapie modelowania, wykonawstwa, produkcji zaawansowanych nowoczesnych rozwiązań technologicznych ekonomiczne są rozpiętości do 100 m.
- 2) Osiągnięcie rozpiętości 160 – 180 m we współczesnych przekryciach zakrzywionych z drewna klejonego było dużym osiągnięciem technicznym i przełamało stereotyp stosowania drewna w obiektach o dużych rozpiętościach, jednak nie spowodowało – po kilkudziesięciu latach od zastosowania – stworzenia kolejnego obiektu o jeszcze większej rozpiętości.
- 3) Przy zastosowaniu wzmocnionych przekrojów elementów nośnych z drewna klejonego i materiałów kompozytowych oraz układów hybrydowych, możliwe do realizacji są rozpiętości od 100 do 200 m.

II. Perspektywy w zakresie powiększania możliwości technicznych materiału konstrukcyjnego:

- 1) Dalsze działania na materiale konstrukcyjnym w kierunku zwiększania nośności i zmniejszania gabarytów przekrojów elementów konstrukcyjnych - wzmocnianie przekrojów za pomocą elementów kompozytowych, wkładek i prętów stalowych oraz włókien węglowych, szklanych i aramidowych (materiały FRP, SRG, etc.).
- 2) Dalsze działania w celu wyeliminowania wad wpływających na bezpieczeństwo konstrukcji oraz w kierunku prawidłowej ochrony konstrukcji – zwiększanie ognioodporności, trwałości związanej z odpornością na czynniki zewnętrzne, przede wszystkim wilgoci oraz przeciwdziałania awariom – nowe rozwiązania w zakresie technik połączeniowych, podwyższenia nośności i stateczności przekrojów węzłowych.

- 3) Działania w celu wykorzystywania tańszego i gorszego jakościowo surowca poprzez nowe chemiczne metody ulepszania i zwiększania odporności drewna.
- 4) Ostatnie dokonania w dziedzinie modyfikacji genetycznej roślin nasuwają przypuszczenie, że będzie możliwe uzyskanie materiału do produkcji konstrukcji z drewna klejonego z surowca genetycznie pozbawionego dotychczasowych wad.

III. Perspektywy w kierunku zwiększenia efektywności układów konstrukcyjnych i zwiększenia efektywności połączeń:

- 1) Możliwości w ramach tradycyjnych, najczęściej stosowanych układach płaskich, belkowo - słupowych są w pełni wykorzystane.
- 2) Rozwój w kierunku zwiększenia wykorzystania konstrukcji hybrydowych, kompozytowych i złożonych z krótkich elementów w celu podnoszenia ekonomii budowy, transportu i produkcji, związany ze zmniejszoną ilością zużycia energii a także możliwością dostosowania elementów do warunków montażu.
- 3) Zwiększanie wykorzystania przekryć dwukrzywiznowych.
- 4) Postęp w technologii połączeń, od połączeń śrubowych, wkładek z blach stalowych stosowanych w węzłach podporowych do wewnętrznych wkładek stalowych po łączniki SFS i inne łączniki klejane.
- 5) Dalsze działania na węzłach w kierunku zwiększenia efektywności łączników – badania i wprowadzanie do realizacji nowych form połączeń o złożonej konstrukcji, szczególnie dla układów siatkowych i struktur przestrzennych.

IV. Perspektywy w zakresie rozwiązań architektonicznych:

- 1) Zwiększenie wymagań co do bezpieczeństwa konstrukcji, zmniejszenia zużycia energii i wykorzystywania surowców odnawialnych, trwałości obiektów i innych aspektów nie związanych bezpośrednio z budową form, ale mających duży wpływ na decyzje projektowe.
- 2) Dalsze poszukiwanie nowych form pod wpływem inspiracji statyką, rzeźbą, rytmem, „płynnym modelowaniem” oraz naturą.
- 3) Indywidualizacja obiektów.
- 4) Rozwój w kierunku projektowania proekologicznego wspierany przez organizacje rządowe.

Konstrukcje z drewna klejonego dużych rozpiętości, w wyniku przemysłowego przetworzenia naturalnego drewna w materiał konstrukcyjny, odpowiedni dla przekrycia dużych rozpiętości stały się rozwiązaniem, które spełnia wszystkie wymogi techniczne i konstrukcyjne w połączeniu z wysoką ekspresją i estetyką, stanowiącą wyjątkowy walor architektoniczny. Decydują o tym takie zalety jak 'naturalność', łatwość projektowania i ciekawe architektoniczne efekty, ale także wysoka precyzja wykonania, bezpieczeństwo użytkowania, łatwość montażu oraz duża wytrzymałość ogniowa, chemiczna, izolacyjność cieplna i akustyczna.

W XX wieku technologia materiałowa stworzyła nowe możliwości dla architektonicznego przekazu. Współczesna architektura, która w dużym stopniu ulega dyktatowi nowych technologii i nowych materiałów budowlanych, dąży tym samym do dużej lekkości, transparentności, ulotności czy wręcz dematerializacji. Najciekawsze formy architektury współczesnej sprawiają wrażenie przeciwstawiania się prawom grawitacji za sprawą dążenia do jak największej lekkości, co jest widoczne szczególnie poprzez stosowanie konstrukcji cięgnowych. Stal zastępowana jest przez aluminium i materiały kompozytowe, konstrukcje z monolitycznych przeistaczają się w pneumatyczne, etc. Pojawiają się przekrycia z cięgien, tkanin, papieru i przeziernych membran. Ściany, coraz cieńsze i większe tafle szklane, niekiedy stanowią tylko transparentną warstwę, przeciwdeszczową kurtynę, która ma na celu ekspozycję wewnętrznej struktury. Na tym tle, układy konstrukcyjne, coraz częściej struktury przestrzenne, są bardziej ekspresyjne, wyszukane i eksponowane. Ogromna liczba unikatowych projektów, o nowatorskich systemach konstrukcyjnych, które powstały w ostatnich latach, pokazuje, że poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych dla podniesienia atrakcyjności form architektonicznych są widoczną tendencją współczesnej architektury.

Nowe formy, które wynikają z twórczego i intuicyjnego zastosowania rozwiązań statycznych i są możliwe do zbudowania dzięki najnowszym zdobyczom techniki i nowym materiałom, są uznawane za piękne. Owa odczuwalna intuicyjnie „doskonałość”, o której się mówi w odniesieniu do dobrze zaprojektowanej konstrukcji, często wynika z analizy statycznej, dobrze wymiarowanych elementów nośnych, z zaprojektowania „szkieletu” w jak najlepszym układzie przy maksymalnym wykorzystaniu możliwości materiałowych. Tak zaprojektowana forma łączy się zazwyczaj z oszczędnościami materiałowymi i lekkością, czytelnie odzwierciedlającą układ sił i naprężeń. Powszechne wykorzystanie drewna związane jest z efektywnością konstrukcyjną, polegającą na lekkości, wytrzyma-

łości drewna i, jednocześnie, z niskim kosztem pozyskania surowca. Przy niemal całkowitej prefabrykacji elementów konstrukcyjnych możliwa jest indywidualizacja obiektów.

Jak dowodzi problematyka rozprawy, problem „konstruowania” architektury jest złożony. Oprócz czynników obiektywnych, związanych z konstrukcją – statyką i funkcją budynku, istnieją walory tworzone intuicyjnie, według prof. Zalewskiego, „*właściwe dla sztuki*”. Poszczególne elementy konstrukcyjne - pionowe, poziome, proste i krzywoliniowe, ich układ, zagęszczenie, wielkości, smukłości, wielopłaszczyznowość, przenikanie, stopień skomplikowania - w ostatecznym kształcie ujawniają działające siły, co jest uważane za „piękne”. Wrażliwość konstrukcyjna i znajomość technologii, stosowanie logiki wynikającej z uwarunkowań technologicznych, prostoty i tzw. „odpowiedniości” formy mają ogromny wpływ na estetyczną jakość architektury, szczególnie w obiektach dużych rozpiętości. Pokazanie uzasadnionej technicznie konstrukcji jest interesujące, bo „szkielet „staje się pretekstem do eksponowania dynamiki i dystrybucji sił. Następuje tu połączenie sztuki inżynierskiej z odczuwalną przynależnością tych konstrukcji do świata przyrody. Symbolika działania sił przyrody jest spotęgowana możliwością osiągnięcia niezwykłych efektów architektonicznych poprzez „komponowanie” konstrukcji nośnych, które wykracza poza mechanikę operując środkami podpatrzonymi i zbudowanymi przez naturę, powstałymi jako przetworzenie natury lub kreacja umysłu. Powstają niezwykle obiekty podpierane intuicją twórców, polegającą na przetwarzaniu doświadczenia znaków natury.

Poza elementami organizującymi konstrukcję w materialnej postaci, na jej odbiór nakładają się wartości dodatkowe. Zastosowanie drewna klejonego stwarza możliwości wpisania architektury dużych rozpiętości, wcześniej postrzeganej jako czysto inżynierskiej i technologicznej, w ideę budownictwa proekologicznego. Stosowanie drewna w budynkach dużych rozpiętości to także odpowiedź architektów na postępującą degradację środowiska i wyczerpywanie się zasobów naturalnych i energetycznych Ziemi. Pod koniec XX wieku w wyniku wzrastającej świadomości ekologicznej pojawiła się potrzeba wykorzystania materiałów naturalnych w budownictwie, m. in. do zastępowania „odhumanizowanych”, zbyt technologicznych obiektów ze szkła, stali i żelbetu. Świadomość ta w dużym stopniu przyczyniła się do renesansu konstrukcji z drewna. Koncepcje architektoniczne, które zwykle wyprzedzają budowlaną rzeczywistość, kładą nacisk na idee związane z recyklingiem i wykorzystaniem potencjału materiałów naturalnych w generowaniu nowych form. Z drugiej strony rośnie potrzeba kontaktu z przyrodą. Rośnie tym samym tendencja do tworzenia dzieł architektonicznych z wykorzystaniem materiałów natural-

nych i właściwych im cech wytrzymałościowych. Architektura proekologiczna jest uważana jako jedna z najbardziej wiodących tendencji. Ekologia nie dotyczy już tylko budynków eksperymentalnych lub wykorzystujących alternatywne źródła energii. Ważny jest także sposób wytwarzania i wznoszenia, utylizacja zastosowanych materiałów, stopień wpływu technologii na zmiany ekosystemów i kondycję człowieka. Jeszcze kilkadziesiąt lat temu wydawało się niemożliwe, aby architektura „high-tech” dotyczyła budynków z drewna, które wcześniej kojarzono z zabudowaniami wiejskimi, małymi obiektami sakralnymi i przemysłowymi, etc. Teraz drewno wykorzystuje się w różnorodnych formach, konstrukcje są zarówno lekkie i proste, jak i o wyszukanych kształtach i formach. W ostatnich latach buduje się też ze sklejki, gałęzi, bambusa i papieru. Nowoczesna technologia przetwarzania drewna inspirowane do nowych poszukiwań. Jest najbardziej współczesna, bo, oprócz wynoszenia technologii jako cechy nadrzędnej, pokazuje: technologia – tak, ale w zgodzie z naturą i potrzebami człowieka – dla architektury.

Budowle wykonane z drewna wykorzystują jego potencjał pod postacią plastyczności w budownictwie organicznym, dużej wytrzymałości i lekkości, piękna i szlachetności w budowlach symbolicznych i sakralnych, elegancji w budowlach prestiżowych, naturalności w budowlach proekologicznych, ciepła i dobrych parametrów psychofizycznych w budownictwie mieszkaniowym, szkołach, przedszkolach, etc. Jeśli któraś w tych cech jest nadrzędna lub decyduje o wyborze technologii, wszystkie inne będą ją dopełniały, czyniąc z architektury niepowtarzalne instrumenty. Wykorzystanie drewna w dużej skali – tworzenia form obiektów dużych rozpiętości – mieści się w tendencji współczesnej architektury do wykorzystania wysoko przetworzonej technologii w tworzeniu zindywidualizowanych innowacyjnych form obiektów użyteczności publicznej w połączeniu z dodatkowymi wartościami ekologicznymi.

Estetyka zależy od wielu innych cech drewna, także związanych z jego budową i symboliką. Modelowanie architektury z drewna klejonego, na wzór natury, pozwala na wydobycie z formy architektonicznej niespotykanej dotąd ekspresji i dynamiki, a także niezwykłego oddziaływania na użytkownika. Odwieczna potrzeba architektury do zaistnienia jako dzieło sztuki jest tu spełniona.

Literatura:

- [1] Affentranger, C.: *New wood architecture in Scandinavia*. Birkhäuser, Berlin, 1997.
- [2] Ahlgren, K., Bergkuist, P., Ericsson, B., Lipkin, Y.: *Architecture in Wood the Timber Prize 1996*. Architecture in Wood the Timber Prize 1996, Trainformation AB Stockholm 1996.
- [3] Ajdukiewicz A., Broł J.: *Awaria i rekonstrukcja dźwigarów z drewna klejonego w przekryciu pływalni*. XXIII Konferencja naukowo-techniczna Szczecin-Międzyzdroje, 23-26 maja.
- [4] Ajdukiewicz A., Broł J.: *Ekspertyza stanu technicznego dźwigarów głównych konstrukcji drewnianej przekrycia basenu miejskiego w Kozienicach*. Gliwice 2006.
- [5] Ajdukiewicz A.: *Konstrukcje drewniane wśród priorytetów działalności IABSE*. Inżynieria i Budownictwo nr 10/2001.
- [6] Ambs F.J.: *Holzbau heute*. DRW – Verlag.
- [7] Ardelea A.: *Wood roof of an industrial one-storey building in Bucharest, Romania*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [8] Baborska – Narożny M., Brzezicki M.: *Estetyka i technika w architekturze przemysłowej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [9] Bainbridge R.: *Fatigue performance of structural timber connections*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [10] Ballerini M.: *A new moment resisting connection for plane grid glulam structures*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [11] Bany B., Kuś S.: *Nowoczesne konstrukcje halowe z drewna*. COIB Warszawa, 1976.
- [12] Basista A.: *Opowieści budynków. Architektura czterech kultur*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Kraków 1995.
- [13] Benedetti C., Charleson A.W.: *Exposed structural timber design: A state-of-the-art summary and resource of contemporary international practice*. World Conference on Timber Engineering Whistler Resort British Columbia, Canada, July 31-August 2, 2000.
- [14] Berkel B., Bos C.: *Niepoprawni wizjonerzy*. Wydawnictwo Murator, Warszawa 2000.
- [15] Biegański P.: *Architektura - sztuka kształtowania przestrzeni*. Wydawnictwo Artystyczne i Filmowe, Warszawa 1974.
- [16] Biegański P.: *U źródeł architektury współczesnej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1972.
- [17] Biliszczyk J., Bień J., Maliszewicz P.: *Mosty z drewna klejonego*. Wydawnictwa komunikacji i łączności, Warszawa 1988.
- [18] Blake P.: *Mies van der Rohe - architektura i struktura*, Wydawnictwo Artystyczne i Filmowe, Warszawa 1991. (tłum. Joanna Puchalska).
- [19] Bonenberg W.: *Inspiracje środowiskowe a ryzyko w projektowaniu architektonicznym*, Sesja naukowa Intuicja i Architektura 24.10.2003, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.

- [20] Bonenberg W.: *Intuicja i architektura*. Sesja naukowa Intuicja i Architektura 24.10.2003, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
- [21] Borkowi W.: *Mechanika Budowli Cz. VI*, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej 1993.
- [22] Borusiewicz W.: *Konstrukcje budowlane dla architektów*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1973.
- [23] Brol J.: *Wzmacnianie elementów drewnianych taśmami lub matami z włókien węglowych*. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej s. Budownictwo, 2001.
- [24] Brzoska Z.: *Statyka i stateczność konstrukcji prętowych i cienkościennych*, PWR Warszawa 1965.
- [25] Bueren Ch.: *Funktion und Form: Gestaltungs - Vielfalt im Ingenieur – Holzbau*, Birkhauser - Verlag Basel, Basel, Boston, Stuttgart 1985.
- [26] Burkhalt M., Sumi, C.: *The Timber Buildings*, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich 1996.
- [27] Cerver F.A.: *The world of contemporary architecture*. Koenemann 2005.
- [28] Charleson, A. W. 1977. *Aesthetics of architectural structural detailing*. *Structural Engineering International*, Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Vol. 7 No. 4. 297-302.
- [29] Cook J.: *Seeking structure from nature*. Birkhauser, Boston 1996.
- [30] Crews K.: *Overview of developments and research in wooden structures in Australia and New Zealand*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [31] Cywiński Z.: *Estetyka mostów jako wyraz etyki w budownictwie*. IV Krajowa Konferencja „Estetyka Mostów” Popowo nad Bugiem 17-19 kwietnia 2002.
- [32] Cywiński Z.: *Estetyka wyzwaniem dla budownictwa XXI wieku*. Izba Projektowania Budowlanego. Wiadomości 6 (113) 2000.
- [33] Czajka R. *Współczesny dom drewniany*. Praca doktorska.
- [34] Czarnowski K, Hlebionek J: *Inżynierskie konstrukcja drewniane*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1978.
- [35] Czechowicz J.: *Konstrukcje drewniane klejone*. Arkady, Warszawa 1960.
- [36] Drapella –Hermansdorfer A. *Idea jedności w architekturze*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1998.
- [37] Duwadi S.: *Timber bridges for the 21st Century A summary of new developments*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [38] Dworschak G., Wenke A.: *Mischkonstruktionen in Holz, Stein, Glas und Stahl*. Verlag für Bauwesen, Berlin 1998.
- [39] Dziarnowski Z., Michniewicz W.: *Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych*. Arkady, Warszawa 1974.
- [40] Emy A. R.: *Description d'un nouveau system d'arcs*, Paris 1828.
- [41] Emy A. R.: *Traite de l'art de charpenperie*, Paris 1841.
- [42] Feuerstein G.: *Biomorfic Architecture*. Menschen- und Tiergestalten in der Architektur. Edition Axel Menges, Stuttgart/London 2002.

- [43] Firrone T.: *Proposal of laminated timber structure for seismic areas*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [44] Flaga K.: *Drewno i inne podstawowe tworzywa konstrukcyjne XX wieku*. Archiwolta, 3/1999.
- [45] Frąckiewicz H.: *Mechanika ośrodków siatkowych*, PAN Warszawa 1970.
- [46] Furtak K.: *Mosty Drewniane*. Podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2002.
- [47] Furuyama M.: *Tadao Ando 1941 Geometria ludzkiej przestrzeni*. Tashen/TMC Art 2008.
- [48] G.L.T.A. *Specifiers' guide to glued laminated structural timber*. GLULAM Association.
- [49] Giedion, S.: *Przestrzeń, czas i architektura*. Narodziny nowej tradycji. Warszawa 1968.
- [50] Gilly D.: *Handbuch der Landbaukunst, mit einem Anhang ueber Erfindungen*. Braunschweig, 1797.
- [51] Głąb J.: *O współczesnych zasadach kształtowania formy mostów*. IV Krajowa Konferencja „Estetyka Mostów” Popowo nad Bugiem 17-19 kwietnia 2002.
- [52] Goetz K. et al. 1989. *Timber design and construction source book: a comprehensive guide to methods and practices*. McGraw-Hill, New York.
- [53] Gołębiowski Z.: *Konstrukcje drewniane*. Wydanie VII. PWN, Warszawa 1978.
- [54] Gould M. H.: *The Belfast roof truss*, The Structural Engineer, vol 70, no 7, April 1992.
- [55] Gutdeutsch G.: *Building in wood: construction and details*. Birkhäuser, Berlin 1996.
- [56] Guzenda R.: *Prognozowanie i ocena zmian wilgotności w konstrukcjach drewnianych*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, 2004.
- [57] Happold, E.: *Timber Lattice Roof for the Mannheim Bundesgartenschau*. The Structural Engineer Vol. 53, No. 3, pp. 99-135.
- [58] Hempel S.: *Ekspresja architektoniczna konstrukcji*. Warszawa 1938.
- [59] Ingarden R.: *Studia z estetyki*, Warszawa 1970.
- [60] Ishii K.: *Membrane Designs and Structures in the World*, Shinkenchiku-sha Co. Ltd, Tokyo (Japan), 1999 ; str. 250-255.
- [61] Jasieńko J., Czepiżak D., Nowak T. *Wzmacnianie zginanych litych belek drewnianych taśmami Corp.*
- [62] Jasieńko J., Nowak T. *Wzmacnianie zginanych belek drewnianych obiektów zabytkowych przy użyciu taśm węglowych*. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin 17-18 maja 2002.
- [63] Jasieńko J., Pietruszek P., Nowak T.: *Taśmy CFRP we wzmacnianiu elementów konstrukcyjnych z drewna*. VI Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004, s. 309-322.
- [64] Jasieńko J., Pietruszek P.: *Koncepcja Łączników mechaniczno klejowych dla konstrukcji drewnianych*. Konferencja naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin –Świnoujście 27-28 września 1999.
- [65] Jaśkiewicz J.: *O metaforze*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Warszawa 1991.
- [66] Jeneks CH.: *Architektura późnego modernizmu*. Arkady 1989.

- [67] Jeneks CH.: *Ruch nowoczesny w architekturze*. Warszawa 1987.
- [68] Jeruzal J., Orłowicz R.: *Połączenia przegubowe konstrukcji łukowych z drewna klejonego warstwowo*. Przegląd Budowlany 4/2008
- [69] Jodidio P.: *Architektura dzisiaj*. Taschen/TCM Art, 2003
- [70] Jodidio P.: *Building a new millenium*. Taschen
- [71] Jodidio P.: *Nowe Formy*. Taschen, 1998.
- [72] Jodidio P.: *Santiago Calatrava 1951 Architekt, Inżynier, Artysta*. Tashen/TMT Art, 2008
- [73] Kairi M.: *Screw glued wooden structures in Sibelius Hall*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [74] Kangas J.: *Timber structures with connections based on in V-Form glued-in rods*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [75] Keil A.: *The Mont-Cenis Academy in Herne*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [76] Kelm T.: *Architektura Ziemi. Tradycja i współczesność*. Wydawnictwo Murator, Warszawa 1996.
- [77] Kiereś H, *Spór o sztukę*. Redakcja Wydawnictw Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego, Lublin 1996.
- [78] Kockelkorn A.: *Zenith in Limoges*. Bauwelt 22/2007 .
- [79] Kołakowski M.: *Architektura jak instrument*. Architektura i biznes 09.1997.
- [80] Kolendowicz T.: *Mechanika budowli dla architektów*. Arkady, Warszawa 1996.
- [81] Kołodziejczyk M.: *Konstrukcje naturalne*. Architektura i biznes 05.1995.
- [82] Kopkowicz F.: *Ciesielstwo Polskie*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1958.
- [83] Kordina K., Meyer-Ottens.: *Holz Brandschutz Handbuch*. 2 Auflage. Deutsche Gesellschaft fuer Holzforschung, Muenchen 1994.
- [84] Kotwica J.: *Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym*, Arkady 2009.
Kozaczko M.: *Intuicja, nauka, forma*. Sesja naukowa Intuicja i Architektura 24.10.2003. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
- [85] Kujawiński K., Pietraszek P.: *Inżynierskie konstrukcje drewniane. Materiały do ćwiczeń projektowych*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989.
- [86] Laatikainen L.: *Sibelius Hall wooden acoustic structures*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [87] Łagiewniki, Artykuł z gazety: Dziennik Polski 25.07.2001
- [88] Łagoda G.: *Estetyka w odniesieniu do obiektów mostowych na przestrzeni wieków*. IV Krajowa Konferencja „Estetyka Mostów” Popowo nad Bugiem 17-19 kwietnia 2002.
- [89] Leijten A.: *An innovative connection for timber engineering*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [90] Leijten Ad. J. M.: *Innovative Design with Pre-Stressed Timber Joints*.
- [91] Leśniakowska M.: *Definicje architektury*. Arche 7. Kultura. Twórczość. Krytyka. Grudzień 1994.

- [92] Leupold, J.: *Theatrum Pontificale oder Schauplatz der Bruecken und des Brueckenbaues*. Leipzig 1726.
- [93] Linkwitz K. *On some peculiarities of timber shells concerning formfinding, manufacturing, building physics*. Lightweight structures in civil engineering. Proceedings of the international symposium. Warsaw, Poland, 24-28 June , 2002.
- [94] Litewka A.: *Mechanika budowli w architekturze współczesnej*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [95] Majdowski A.: *Systemy konstrukcyjne powojennych kościołów w Polsce*
- [96] Makowska B.: *Detal i ornament w obiektach mostowych i ich wpływ na indywidualizację rozwiązań*. IV Krajowa Konferencja „Estetyka Mostów” Popowo nad Bugiem 17-19 kwietnia 2002.
- [97] Malczyk A.: *Sprężone pręty drewniane – badania i koncepcje zastosowań konstrukcyjnych*. Inżynieria i Budownictwo nr 11/2002.
- [98] Malkowski T.: *Modernizm zhumanizowany naturą*. Archivolta 2008/02 Organiczność w architekturze
- [99] Materiały Budowlane 12'2002
- [100] Medwadowski, S. J.. *Aesthetics of wood structures* Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures, 1985.
- [101] Mielczarek Z., Misztal B.: *Badanie dźwigarów kratowych z drewna, twardych płyt pilśniowych i stali*. Konferencja naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin –Świnoujście 27-28 września 1999.
- [102] Mielczarek Z., Orłowicz R.: *Uwagi do stosowania kompozytów włóknistych w konstrukcjach drewnianych*. VI Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004, s. 333-344.
- [103] Mielczarek Z., Wąsowicz K.: *Zastosowanie drewna okrągłego w konstrukcjach budowlanych*.
- [104] Mielczarek Z.: *Budownictwo drewniane*. Arkady, Warszawa 1994.
- [105] Mielczarek Z.: *Kształtowanie konstrukcji i architektury w budownictwie drewnianym*. Konferencja naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin –Świnoujście 27-28 września 1999.
- [106] Mielczarek Z.: *Nowoczesne konstrukcje s budownictwie ogólnym*. Arkady, Warszawa 2001.
- [107] Mielczarek Z.: *Strength analysis of truss structures made of medium-size timber*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [108] Migliacci A.: *Dynamic tests on a new large wooden vaulted roof in seismic area*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [109] Miłobędzki A.: *Materiał, technika i forma w architekturze drewnianej. Sztuka i technika*. Materiały Sesji Stowarzyszenia historyków Sztuki, Szczecin, listopad 1987., PWN 1991.
- [110] Miłobędzki A.: *Zarys dziejów architektury w Polsce*. Warszawa 1988.
- [111] Mirski, J.Z.: *Funkcje drewna w budowie kopuł*. Przegląd budowlany 11.2008.

- [112] Moenck W., Rug W.: *HOLZBAU Bemessung und Konstruktion unter Beachtung von Eurocode 5*, Verlag Bauwesen, Berlin 2000.
- [113] Mueller Ch.: *Holzleimbau. Laminated Timber Construction*. Birkhauser - Publishers for Architecture, 2000.
- [114] Murzewski J.: *Bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych*. Arkady, Warszawa 1989.
- [115] Murzewski J.: *Podstawy projektowania i niezawodność konstrukcji*. Podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1999.
- [116] Natterer J., Herzog T., Volz M.: *Holzbau Atlas Zwei. DETAIL*, Institut fuer internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG1999/1991
- [117] Natterer J., Herzog T., Volz M.: *Timber Construction Manual*. Birkhauser Verlag 2004.
- [118] Natterer, J., Burger, N., Müller, A.. 2002. *The roof structure „Expodach“ at the World Exhibition Hanover*. Proceedings of the Fifth International Conference on Space Structures. University of Surrey, United Kingdom. pp. 185-193
- [119] Natterer J.: *Light-Weight Structures in Timber: a Chance to Use Wood in Construction Field*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [120] Nervi P. L.: *Asthetics and Technology in Building. The Charles Eliot Norton Lectures, 1961-1962*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1965
- [121] Neuhaus H.: *Budownictwo drewniane*. Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów 2004.
- [122] Niezabitowski A.: *Architektura organiczna Hugona Häringa. Doktryna – oddziaływanie – analogie*, Zeszyt naukowy nr 1109, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1991, s. 17,18.
- [123] Norri, M.R., Paatero, K. *Timber Construction in Finland 1996*, Museum of Finish Arch and Writers, Helsinki.
- [124] Nożyński W., Wiejak A. Abram A.: *Problemy trwałości konstrukcji drewnianych z uwagi na korozję biologiczną*. V Konferencja naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin 17-18 maja 2002 r.
- [125] Öiger K.: *Investigation, design and erection of saddle-shaped wooden shell_roofs*. IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [126] Orłowicz R.: *Zwiększenie nośności stref przypodporowych belkowych dźwigarów drewnianych*. Przegląd budowlany 2/2008.
- [127] Palladio A., *Cztery księgi o architekturze*, tłum. M. Rzepińska, Warszawa 1955.
- [128] Paul Walter J.: *Extension of a school building by addition of a top in wooden structure*. IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [129] Pawłowski A.Z., Cała I.: *Przekrycia dużych rozpiętości z drewna klejonego*. Materiały budowlane 12/2002.
- [130] Pawłowski A.Z., Rokicki W.: *Niekonwencjonalna architektura wyzwaniem dla inżynierów*. Materiały Budowlane, 6/2005.
- [131] Pevsner N.: *Historia architektury europejskiej*. Warszawa 1976.

- [132] Pogodny P.: *Szansa na prawdziwą architekturę*. Budownictwo Polskie. Nowe Technologie.
- [133] Pogorzelski J.A.: *Odporność ogniowa drewnianych konstrukcji klejonych*. Arkady, Warszawa 1980.
- [134] Pogorzelski J.A.: *Odporność ogniowa drewnianych konstrukcji klejonych*. Inżynieria i Budownictwo, nr 6/1980.
- [135] Powell K.: *New London architecture*. Merrell, London 2003.
- [136] Praca zbiorowa. *Energooszczędne budownictwo drewniane*. Wydawnictwo Murator . Warszawa 1993.
- [137] Praca zbiorowa. *Joints In Timber Structures*. 12 – 14 September 2001 S. Aicher and H.-W. Reinhardt.
- [138] Pracht K.: *Budownictwo Drewniane: kształtowanie i konstruowanie*. Arkady, Warszawa 1991.
- [139] Rasmussen S.E.: *Odczuwanie Architektury*. Wydawnictwo Murator 1999.
- [140] Rębielak J.: *Struktury przestrzenne o dużych rozpiętościach*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1992.
- [141] Reichhart A.: *O koncepcyjnym projektowaniu konstrukcji*. Inżynieria i budownictwo, 9/1997.
- [142] Rhude A. J. *Structural glued laminated timber and the forest service. An article for History Line*, USDA-Forest Service 15 November 1998, Revised February 2000, Consulting Historian & Sentinel Structures, Inc.
- [143] Rokicki W. *Konstrukcja w aeurytmicznej architekturze*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [144] Ross P.: *Appraisal and repair timber structures*. Thomas Telford 2002.
- [145] Rug W.: *Innovations in Timber Engineering: The Hetzer Method*.
- [146] Ruszczyk G. *Drewno i Architektura. Dzieje budownictwa drewnianego w Polsce*. Wydawnictwo Arkady 2007.
- [147] Ryńska E.D.: *Architekt w procesie tworzenia harmonijnego środowiska*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004.
- [148] Ryńska E.D.: *Bioklimatyka a forma architektoniczna*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2001.
- [149] Saad F.: *Design concept for wooden shell roofs with large spans*. IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [150] Sakamoto, I.: *A research and development project on hybrid timber building structures*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [151] Salvadori M.: *Dlaczego budynki stoją*. Wydawnictwo Murator, Warszawa 2001.
- [152] Schlaich J.: *Koncepcyjne projektowanie lekkich konstrukcji*. Artykuł opracowany przez prof. S. Kusia na podstawie referatu wygłoszonego na XI międzynarodowej konferencji „konstrukcje metalowe”, ICMS 2006, Rzeszów 2006. Inżynieria i Budownictwo nr3/2007.

- [153] Siebert, G.: *Restoring historical Muffathalle in Munich*. IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [154] Siegel C.: „*Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*”
- [155] Sławińska J.: *Ekspresja sił w nowoczesnej architekturze*, Arkady, Warszawa 1997.
- [156] Smith S.: *Exploring Innovative Timber Technology from an Architectural Approach*.
- [157] Stachowicz A.: *Aktualne problemy projektowania konstrukcji drewnianych*.
- [158] Stachowicz A.: Kram D.: *Obliczanie odporności ogniowej belek z drewna klejonego dużej rozpiętości*. V Konferencja naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin 17-18 maja 2002.
- [159] Steiger L.: *Basics Timber Construction*. Birkhäuser 2007.
- [160] Stiasny G.: *Pogodzić się z naturą*. Architektura, 11/2000.
- [161] Stobiecki P.: *Systemy lukowo – ciągnowe w architekturze współczesnej*. Rozprawa doktorska., Wrocław 2006.
- [162] Succi, C.: *Innovative solutions for thin wooden frames*. IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [163] Szabó B.: *Behaviour of shear connectors in wood-based composite girders*. IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [164] Szparkowski Z.: *Zasady kształtowania przestrzeni i formy architektonicznej*. Wydawnictwo PW, 1993.
- [165] Tołłoczko Z., Tołłoczko T.: *W kręgu architektury konstruktywistycznej, neokonstruktywistycznej i dekonstruktywistycznej*. Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk Kraków.
- [166] Tołłoczko Z.: *Wybrane problemy współczesnej estetyki architektonicznej*.
- [167] Tomusiak A.: *Konstrukcje drewniane klejone warstwowo*. Materiały Budowlane 12/2002.
- [168] Tsubota H., S. Ban S., Saito M.: *The Izumo Dome, Largest Timber Structure in Japan* SEI Structural Engineering International, 05.1993.
- [169] Turkowski S.: Pogorelcev A.: *Złącza konstrukcji drewnianych na sworznie wklejane*. V Konferencja naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin 17-18 maja 2002.
- [170] Wagner T.: *Sacrum współczesność – kontekst*. Archivolta 2008/02 Organiczność w architekturze.
- [171] Waszczyszyn Z., Cicho Cz., Radwańska M.: *Metoda elementów skończonych w stateczności konstrukcji*.
- [172] Weinand Y.: *Innovative Timber Constructions*. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia.
- [173] Wiebeking C. F.: *Beytraegen zur Brueckenbaukunde*, Muenchen 1809.
- [174] Wilcox W., Botsai E. & Kubler H.: *Wood as a building material: a guide for designers and builders*. Wiley, New York 1991.
- [175] Williamson T.: *Innovative Spatial Structures*
- [176] Wines J.: *Zielona Architektura*. Pod redakcją P. Jodidia. Tashen/TMC Art. 2008.

- [177] Witruwiusz: *O architekturze ksiąg dziesięć*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1956.
- [178] Włodarczyk J.: *Technika jako czynnik inspirujący w architekturze*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki śląskiej Gliwice 2004, część 1. *Współczesne techniki budowlane w architekturze, zagadnienia wybrane* (autor Włodarczyk J.) część 2. *Przekrycia wiszące w architekturze* (autor Gerlic K.).
- [179] Wróblewski B.: *Analiza zachowania się dachów o konstrukcji drewnianej w pożarze*. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009
- [180] Zabłocki W.: *Architektura Architecture*
- [181] Žagar Z.: *Smart timber structures*, IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, 2001.
- [182] Zalewski W.: *Moc i lekkość – muzy projektanta konstrukcji*. Architektura –Murator, 11/2000.
- [183] Zalewski W.: *O nauczaniu projektowania konstrukcji. Wykład podczas wręczenia dyplomu doktora Honoris causa Politechniki Warszawskiej*. Inżynieria i Budownictwo 10/98.
- [184] Zalewski W.: *O wszczęciu nauczania projektowania konstrukcji*. Inżynieria i budownictwo 10-12/89.
- [185] Zalewski W.: *Wytrzymałościowe kształtowanie konstrukcji na minimum ciężaru*. Inżynieria i Budownictwo 9/95.
- [186] Żelazek K.: *Drewna wystarczy, trzeba tylko znowelizować przepisy*. Puls Biznesu 17/6/2005.
- [187] Żelazny H.: *Charakterystyka izolacyjności cieplnej ścian w technologii szkieletu drewnianego*. Konferencja naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin –Świnoujście 27-28 września 1999.
- [188] Żórawski J.: *O budowie formy architektonicznej*. Arkady, Warszawa 1962.

Broszury i czasopisma:

- [189] AITC 104-2003 *Typical construction details Adopted as Recommendations* April 27
- [190] Katalog ANDREWEX
- [191] AITC *Timber Construction Manual.*, Fifth edition , 2004.
- [192] AITC *Timber in Interniational Applications*.
- [193] American Hardwood Export Council. *Structural design in American hardwoods*.
- [194] Arc space, August 11, 2008, Gehry Partners, LLP *Hall Winery St. Helena Napa Valley*, California.
- [195] Arc space, August 18, 2008, Gehry Partners, LLP *Counceling Center Danish Cancer Society*, Aarhus, Denmark.
- [196] Arc space, February 26, 2008, Ville Hara, HUT Wood Studio Workshop, *Korkeasaari Lookout Tower*, Helsinki Zoo, Finland.
- [197] Arc space, Foster + Partners, *Beijing Capital International Airport*, Beijing, China
- [198] Arc space, January 26, 2009, Grimshaw Architects, Davis Brody Bond Aedas, *EMPAC Rensselaer Polytechnic Institute Troy, NY*.
- [199] Arc space, June 29, 2009, JKMM Architects, *Viikki Church, Helsinki*, Finland, February 16, 2009.

- [200] Arc space, November 1, 2004 *Foster + Partners, Elephant House Copenhagen Zoo*, Copenhagen, Denmark.
- [201] Arc space, November 10, 2008, Rem Koolhaas OMA LACMA, Los Angeles, California.
- [202] Arc space, November 5, 2007, Gehry Partners, LLP *Foundation Louis Vuitton* Paris, France.
- [203] Arc space, Santiago Calatrava, *La Rioja, Bodegas Ysios*, Laguardia, Álava, Spain.
- [204] Arche 11/12. Kultura. Twórczość. Krytyka. *Architekci XX wieku o architekturze*.
- [205] Architectural Review 03/1996.
- [206] Architectural Review 10/1999, str. 51-55.
- [207] Archiv pro Holz Austria 2006.
- [208] Australian Timber Design, Spring 1998.
- [209] Bauen mit Holz
- [210] Bauwelt 22/2007 A.Kockelkorn, Zenith in Limoges, fot. Christian Richters
- [211] Broszura *Buduje z drewna*, Fundacja promocji drewna Teraz drewno, 2006.
- [212] Broszura *Drewno a zmiany klimatyczne*. Fundacja promocji drewna Teraz drewno, 2006.
- [213] Broszura Finnforest Merk E-01 Canteen, Karlsruhe,
- [214] Broszura Finnforest Merk. Public Building P-02
- [215] Broszura Finnforest Merk. Public Building P-05
- [216] Broszura PAUL STEPHAN GmbH + Co. KG
- [217] Broszura Pilkington
- [218] Broszury Simpson Strong Tie
- [219] Denkschrift ueber Hetzer's neue Holzbauweisen. Vertasst im Auftrage des „Schutzverbandes fuer neue Holzbauweisen“ von K.A. Urban, Grossherzoglicher Baurat in Weimar, 1913.
- [220] DETAIL, serie 1999,3: *Solares Bauen/solar Architecture*. Institut fuer internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 1999.
- [221] DETAIL, serie 2000,1: *Bauen mit Holz/ Timber Construction*. DETAIL, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2000.
- [222] DETAIL, serie 2001,5. *Dachtragwerke/Roof Structures*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 08.2001.
- [223] DETAIL, serie 2004 7/8 *Roof structures*.
- [224] DETAIL, serie 2008,11. *Bauen mit Holz/ Timber Construction*. Institut fuer internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 08.2001.
- [225] Deutscher Holzbaupreis 2003.
- [226] Deutscher Holzbaupreis 2005.
- [227] Deutscher Holzbaupreis 2007.
- [228] Deutscher Holzbaupreis 2009.
- [229] Finnforest glulam individually designed wood solutions.
- [230] G.L.T.A. Technical Data Sheet No 1. *Glulam in Sports Halls*. GLULAM Association.
- [231] GLULAM, The newsletter of Glued Laminated Timber Asociacion No 1.
- [232] Handbook of Hardwoods, BRE, Centre for Timber Technology and Construction.
- [233] Hardwood References, AHEC
- [234] Holzbaupreis Hessen 2008.
- [235] Informationsdienst Holz, *Brandschutz im Hallenbau*.

- [236] Informationsdienst Holz, *Holzbau Handbuch, Dauerhafte Holzbauten bei chemisch-aggressiver Beanspruchung.*
- [237] Informationsdienst Holz, *Holzbau Handbuch, Holz im Außenbereich.*
- [238] Informationsdienst Holz, *Holzbau Handbuch, Industrie- und Gewerbebauten.*
- [239] Informationsdienst Holz, *Holzbau Handbuch, Konstruktion von Anschlüssen im Hallenbau.*
- [240] Informationsdienst Holz, *Holzbau Handbuch, Sport- und Freizeitbauten.*
- [241] Informationsdienst Holz, *Holzbau Handbuch, Verbands- und Abstützungen – Grundlagen, Regenachweise.*
- [242] Informationsdienst Holz, *Kultur, Freizeit, Religion: Museen, Ausstellungsbauten in Nordrhein-Westfalen Informations- und Besucherzentrum Tiergarten Schloss Raesfeld.*
- [243] Informationsdienst Holz, *Kultur, Freizeit, Religion: Sportstätten, Mehrzweckhallen in Bayern Hallen- und Erlebnisbad "Prienavera" Markt Prien.*
- [244] Informationsdienst Holz, *Kultur, Freizeit, Religion: Theater, Konzerthallen in Bayern Musikprobensaal Thannhausen.*
- [245] Informationsdienst Holz, *Kultur, Freizeit, Religion: Theater, Konzerthallen in Saarland Cloef-Atrium Besucher- und Tagungszentrum.*
- [246] Informationsdienst Holz, *Nachhaltiges Bauen mit Holz.*
- [247] Informationsdienst Holz, *Rohstoff der Zukunft nachhaltig verfügbar und umweltgerecht.*
- [248] Informationsdienst Holz, *Sakralbauten in Niedersachsen Eine-Welt-Kirche Schneeverdingen.*
- [249] Informationsdienst Holz, *Schulen in Bayern Fach- und Berufsoberschule Memmingen.*
- [250] Informationsdienst Holz, *Sonderbauten in Nordrhein-Westfalen Elefantentpark im Zoologischen Garten Köln.*
- [251] Informationsdienst Holz, *spezial, JULI 2006 Holzbau für kommunale Aufgaben.*
- [252] Informationsdienst Holz : *Entwürfe – Überlegungen bei Holzbauten.*
- [253] Inżynieria i Budownictwo nr 12/1997
- [254] Kaufmann, *Building with glulam.*
- [255] Kaufmann, *Für Kreative: Alles ist möglich.*
- [256] Kaufmann, *Präzise – sauber – fehlerfrei.*
- [257] Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Instytut Mechaniki Budowli Wydział Inżynierii Łądowej Politechniki Krakowskiej; www.windlab.pl/index.php
- [258] Large span timber structures. Designed and produced by Crammond Dickens Lerner on behalf of wood. for good. ltd.211 High Road London N2 8AN.
- [259] Limträ Guide 2007 Svenskt Limträ AB, Stockholm.
- [260] Moelven (UK) Limited , *Technical Handbook.* 1986
- [261] Nordic glulam handbook. Online version. www.svensktlimtra.se.
- [262] Nordlam The Glulam Specialists.
- [263] PVs plus Timber: The Earth Centre's Solar Canopy *Building for A Future.*
- [264] STEPHAN flexsysteme – Intelligent Bauen in High-Tech-Holz.
- [265] STEPHAN flexsysteme – Innovatives Bauen in Holz, Innovative timber construction.
- [266] Structural design in American hardwoods American Hardwood Export Council, 2005.
- [267] SVENSKT LIMTRÄ AB *Hur ser på limträ?*
- [268] The Plan nr 027 z 2008 r.str.080.
- [269] Timber in Internal Applications, Architectural Structures.

- [270] Timberbuild for the 21 st century, *Eden goes Timberbuild - The Core, the Eden Projects new Education Resource Centre*, 8th November 2005.
- [271] Timberbuild for the 21st century, *Hands-On learning revives a forgotten timber classic - Wynstones school Belfast Truss New Hall project*.
- [272] Timberbuild for the 21st century, *Joensuu's METLA Forest Research centre* By Oliver Lowenstein.
- [273] Timberbuild for the 21st century, *Petzinka Pink's parabolic timber hybrid. The North Rhine Westphalia state offices, Berlin* By Oliver Lowenstein, 2005.
- [274] Timberbuild for the 21st century, *The making of Flimwell's chestnut gridshell - Building for A Future* (vol 11, no 2).
- [275] Timberbuild for the 21st century, *The Savill Gardens Gridshell, Glen Howells Architects*, 6th august 2006.
- [276] Woodforgood, *Bad Dürrhein Swimming Pool, Germany*.
- [277] Woodforgood, *Bordeaux Law Courts, France*.
- [278] Woodforgood, *d'Coque National Sports & Cultural Centre, Kirchberg, Luxembourg*.
- [279] Woodforgood, *Erfurt Speed Skating Arena, Germany*.
- [280] Woodforgood, *Gardermoen Airport, Oslo*.
- [281] Woodforgood, *Gurdwara Southall Temple, London*.
- [282] Woodforgood, *Hamar Olympic Hall, Norway*.
- [283] Woodforgood, *Joensuu Multipurpose Arena, Karelia, Finland*.
- [284] Woodforgood, *Olympic Velodrome, Bordeaux, France*.
- [285] Woodforgood, *Padre Pio Pilgrimage Church, Italy*.
- [286] Woodforgood, *Prien Swimming Pool, Bavaria, Germany*.
- [287] Woodforgood, *Salzburg Arena, Austria*.
- [288] Woodforgood, *Savill Gardens, Windsor Great Park, Windsor*.
- [289] Woodforgood, *Serpentine Gallery Pavillion, London*.
- [290] Woodforgood, *Sibelius Hall, Lahti, Finland*.
- [291] Woodforgood, *Sydney Showground Olympic Exhibition Centre, Australia*.
- [292] Woodforgood, *Tacoma Dome, USA*.
- [293] Woodforgood: *Largespan-brochure*.
- [294] Wood Works: *Innovative Applications of Engineered Wood*.
- [295] WPA: *Timber Beams Instead of Steel Beams in Housing Construction (2008)*.

Strongy internetowe:

- [296] AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION (AITC)
- [297] APA - THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATIONS. USA
- [298] ARMALAM : www.armalam.it
- [299] ARCHIDOSE: www.archidose.org.09.2009
- [300] ARCHITEKTURA MURATOR: architektura.muratorplus.pl (2009)
- [301] ARCHITEKTURPHOTO: www.architekturphoto.de
- [302] ARCSpace: www.arcspace.com
- [303] ATCHITECTURE: www.architecture.com
- [304] ANNUAL: www.annual.org
- [305] AWARD FOR SPORTS STRUCTURES 2007: www.istructe.org/structuralawards/
- [306] BAUEN MIT HOLZ: www.bauenmitholz.de
- [307] BAUINFO24: www.bauinfo24.at/projekt/salzburgarena/uebersicht/

- [308] BUCHACHER: www.buchacher.pl
- [309] SANTIAGO CALATRAWA: www.calatrawa.com
- [310] CDN ARCHITECT: www.cdnarchitect.com
- [311] CPCS ENGINEERS: www.cpcsengeers.com, 2005 rok
- [312] ENVIRONNEMENT WALLONIE: www.environnement.wallonie.be
- [313] EXPO 2000: www.expo2000.de
- [314] FINNFOREST: www.finnforest.com
- [315] FORESTRY TASMANIA: www.forestrytas.com.au
- [316] GALINSKY: www.galinsky.com/buildings/komyoji/
- [317] GLUED LAMINATED TIMBER ASSOCIATION (GLTA) www.glulam.co.uk
- [318] GLUED LAMINATED TIMBER ASSOCIATION OF AUSTRALIA (GLTAA).
- [319] HOLZ: www.holz.de
- [320] HOLZBAU-KUNST: www.holzbau-kunst.at
- [321] HOLZINFORMATION: www.holzinformation.at
- [322] HOLZWERKE WIMMER GMBH: www.wimmer.com
- [323] IB – STEHLE: www.ib-stehle.de
- [324] INFO BUILD: www.infobuild.it
- [325] INFOHOLZ: www.infoholz.de
- [326] INFORMATIONSDIENST-HOLZ: www.informationsdienst-holz.de
- [327] KAUFMANNHOLZ: www.kaufmannholz.com
- [328] KONSBUD: www.konsbud.pl
- [329] LILLEHEDEN: www.lilleheden.pl
- [330] LABORATORIUM INŻYNIERII WIATROWEJ INSTYTUT MECHANIKI BUDOWLI
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŁĄDOWEJ POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ;
www.windlab.pl
- [331] MERK: www.merk.de
- [332] MOELVEN: www.moelven.co.uk
- [333] NATTERER J: www.nattererbcn.com
- [334] PILKINGTON: www.pilkington.com
- [335] POPPENSIEKER & DERIX Gmbh: www.poppensieker-derix.de
- [336] PUBLISCAN: www.publiscan.fi, 2005
- [337] PUUINFO: www.comma.fi/Puuinfo/
- [338] RESEAUX.UBIFRANCE www.reseaux.ubifrance.fr
- [339] ROSBORO: www.rosboro.com
- [340] SFS INTEC AG: www.sfsintec.biz
- [341] SOBEK WERNER: www.wernersobek.de
- [342] STRUCTURAE: www.structurae.de/en/structures
- [343] SVENSKT LIMTRÄ AB: www.svensktlimtra.se
- [344] TAKENAKA Co.: www.tekenaka.co.jp
- [345] THE BRITISH WOODWORKING FEDERATION: www.bwf.org.uk
- [346] THE BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE) www.bre.co.uk
- [347] THE NORDIC TIMBER COUNCIL: www.nordictimber.org
- [348] THE TIMBER TRADE FEDERATION: www.ttf.co.uk
- [349] TIMBERBUILD FOR THE 21ST CENTURY: www.annular.org.uk
- [350] TRADA Technology Ltd: www.trada.co.uk
- [351] UK Timber Frame Association Ltd www.timber-frame.org
- [352] WEALDDOWN: www.wealddown.co.uk

- [353] WESTERNSTRUCTURES: www.westernstructures.com
- [354] WHB WEHMEYER: www.whb-wehmeyer.com
- [355] WOOD FOR GOOD: www.woodforgood.com
- [356] WORLD ARCHITECTS: www.world-architects.com
- [357] Własne zdjęcia, twórczość i rysunki

Normy:

- [358] PN-EN 383:1998 Konstrukcje drewniane. Metody badań. Określanie wytrzymałości na docisk do podłoża dla łączników trzpieniowych.
- [359] PN-EN 386:2002 Drewno klejone warstwowo -- Wymagania eksploatacyjne i minimalne wymagania produkcyjne
- [360] PN-EN 387:2002 Drewno klejone warstwowo -- Duże złącza klinowe -- Wymagania jakościowe i minimalne wymagania produkcyjne
- [361] PN-EN 390:1999 Drewno klejone warstwowo -- Wymiary -- Dopuszczalne odchyłki
- [362] PN-EN 391:2002 Drewno klejone warstwowo -- Badanie spoin klejowych na rozwarstwianie
- [363] PN-EN 392:1999 Drewno klejone warstwowo -- Badanie spoin klejowych na ścinanie
- [364] PN-EN 408:2004 Konstrukcje drewniane -- Drewno konstrukcyjne i drewno klejone warstwowo -- Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie i właściwości mechanicznych w poprzek włókien
- [365] PN-EN 1194: 2000 Konstrukcje drewniane. Drewno klejone warstwowo. Klasy wytrzymałości i określenie wartości charakterystycznych.
- [366] PN-81/B-03150.00 Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Obliczenia statyczne i projektowanie. Postanowienia ogólne.
- [367] PN-81/B-03150.01 Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Obliczenia statyczne i projektowanie. Materiały.
- [368] PN-81/B-03150.02 Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [369] PN-81/B-03150.03 Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Obliczenia statyczne i projektowanie. Złącza.
- [370] Aprobata techniczna ITB AT – 15-7343/2007 Wkręty samoświecące SPAX do konstrukcji drewnianych.
- [371] PN-EN 14279+A1:2009 Drewno klejone warstwowo z fornirów (LVL) -- Definicje, klasyfikacja i wymagania
- [372] PN-EN 518:2000 - NORMA WYCOFANA ZASTĄPIONA PRZEZ PN-EN 14081-2:2006, Drewno konstrukcyjne -- Sortowanie -- Wymagania w odniesieniu do norm dotyczących sortowania wytrzymałościowego metodą wizualną
- [373] PN-EN 519:2000 - NORMA WYCOFANA ZASTĄPIONA PRZEZ PN-EN 14081-2:2006, Drewno konstrukcyjne -- Sortowanie -- Wymagania dla tarcicy sortowanej wytrzymałościowo metodą maszynową oraz dla maszyn sortujących
- [374] EN 1990:2002 Eurocode - Basis of structural design
- [375] EN 1990:2002/A1:2005 Eurocode - Basis of structural design
- [376] EN 1995-1-1:2004 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings

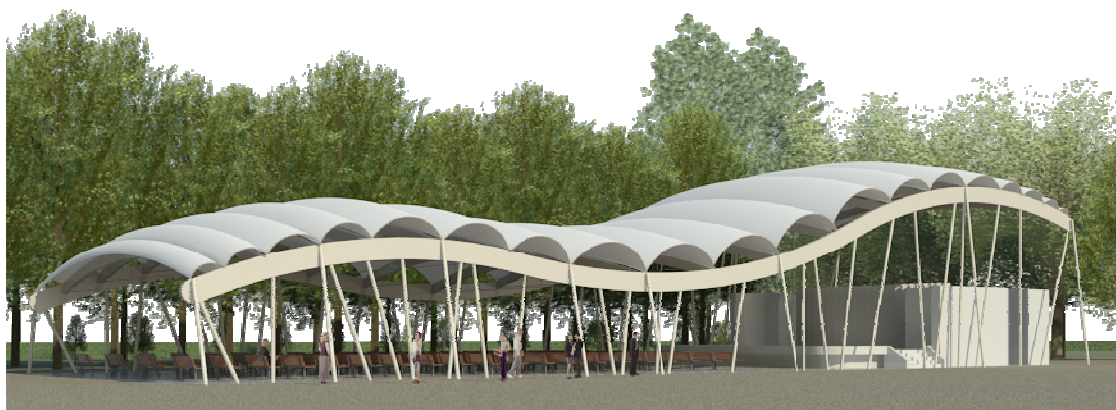
- [377] EN 1995-1-2:2004 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design
- [378] EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire
- [379] EUROCODES, Background and Applications EN1995-1-1: Section 8 - Connections
- [380] ITB NP 939/A/99 Zasady ustalania klasyfikacji ogniowej dla elementów z drewna klejonego warstwowo produkcji firmy Lilleheden, Dania.
- [381] PN-EN 1991-1-2 listopad 2002, Oddziaływanie na konstrukcje, Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru
- [382] Prof. Dr hab. Inż. Jerzy Pogorzelski oraz kolektyw. „Odporność ogniowa konstrukcji budowlanych”, Arkady. Warszawa 1988.
- [383] EN 13501-1:2002 (E), Załącznik A, podstawowe informacje dotyczące Decyzji Komisji z 8 lutego 2000 r., wprowadzającej postanowienia dyrektywy Rady 89/106/EWG dotyczące klasyfikacji w zakresie reakcji na ogień wyrobów budowlanych.
- [384] Instrukcja nr 221 Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie „Wytyczne oceny odporności ogniowej elementów konstrukcji budowlanych.
- [385] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz. U. Nr 75, poz. 690.

Załącznik

Własne projekty studialne i realizacje

A. Projekt przekrycia nad widownią muszli koncertowej w Legnicy. Projekt koncepcyjny.

Architektura arch. arch. Alicja Maciejko - Grzeškowiak, Mirosław Strzelecki.



Rys.7. 39. Projekt przekrycia nad widownią „muszli koncertowej” w Legnicy w Parku tysiąclecia. Architektura: Alicja Maciejko - Grzeškowiak, Mirosław Strzelecki. Projekt koncepcyjny.

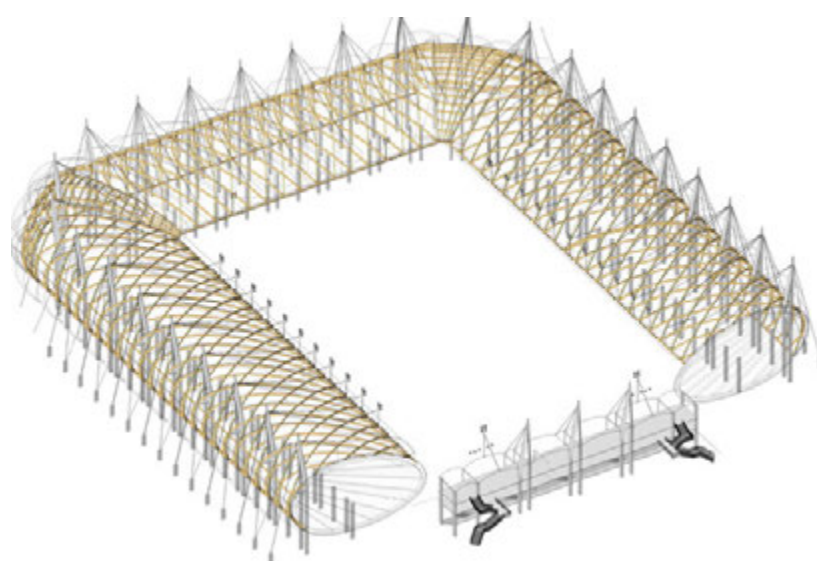
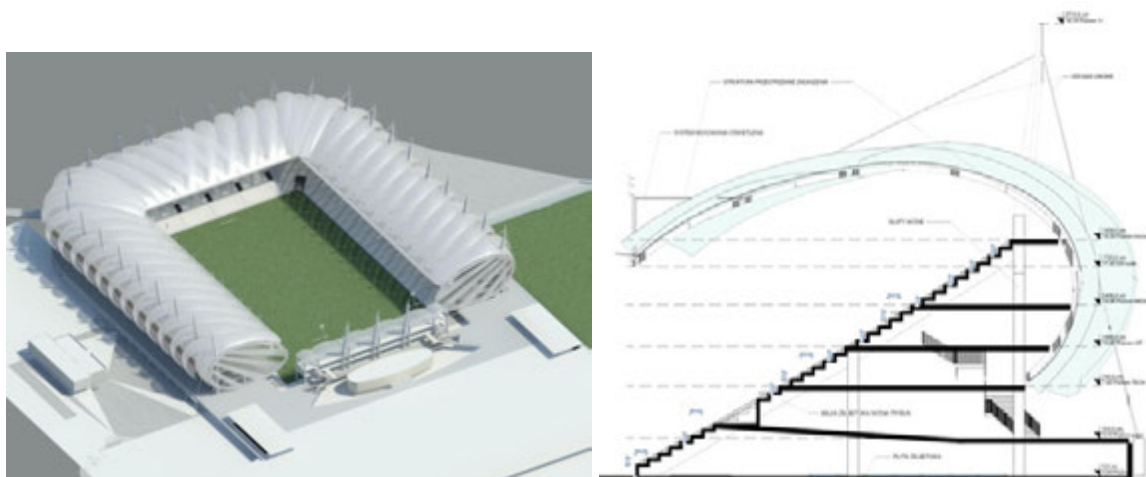
Koncepcja obejmuje adaptację istniejącej sceny oraz zadaszenia widowni Parku Miejskiego w Legnicy. Zabytkowy park miejski o bogatej historii wymaga szczególnego potraktowania i wyeksponowania nowoprojektowanej architektury. Zastosowano nowatorską, lekką strukturę konstrukcyjną o organicznym, ekologicznym charakterze. Mięka,

nie do końca zdefiniowana płynna forma zadaszania nawiązuje do świata przyrody, w której się znajduje oraz do płynnej struktury muzyki, której będzie służyć.

Zastosowana konstrukcja nadaje lekkości formie a także mieści się we współczesnym nurcie architektury, w której wysoką technologię łączy się z naturalnością i ekologią zastosowanych materiałów konstrukcyjnych. Ze względu na zły stan techniczny konstrukcji sceny w koncepcji zaproponowano zadaszanie sceny jak i widowni jedną strukturą przestrzenną z wyeksponowaniem funkcji sceny koncertowej poprzez znaczne podniesienie wysokości ponad sceną. Wysokość do dolnej krawędzi dźwigarów w najwyższym punkcie podniesiono do 9 m, co umożliwi swobodną instalację sprzętu oświetleniowego i nagłośnienia. Jako konstrukcje nośną zastosowano konstrukcje z drewna klejonego na drewniano - stalowych słupach o profilu okrągłym, ustawionych w różnych nachyleniach w stosunku do głównych dźwigarów. Główne dźwigary nośne łukowe o zmiennym promieniu i wysokości z drewna klejonego są połączone dźwigarami poprzecznymi łukowymi w konstrukcji drewnianej ze ściągami stalowymi. Całość jest pokryta membraną PTFE z włóknem szklanym na łukowej konstrukcji stalowej o przepuszczalności 20%. Ze względu na różne rozstawy dźwigarów poprzecznych łuki membran są różne. Zastosowane pokrycie wykazuje dużą żywotność ponad 40 lat. Poprzez charakterystyczny wyraz nowatorskiej architektury uporządkowana przestrzeń miejskiego parku zyska nowy charakterystyczny znak, a miasto swoistą ikonę, ważne miejsce dla publicznej przestrzeni - miejsce spotkań przy muzyce.

B. Przekrycie trybun stadionu miejskiego w Płocku. Projekt koncepcyjny. Architektura: arch. arch. Alicja Maciejko - Grześkowiak, Mirosław Strzelecki.

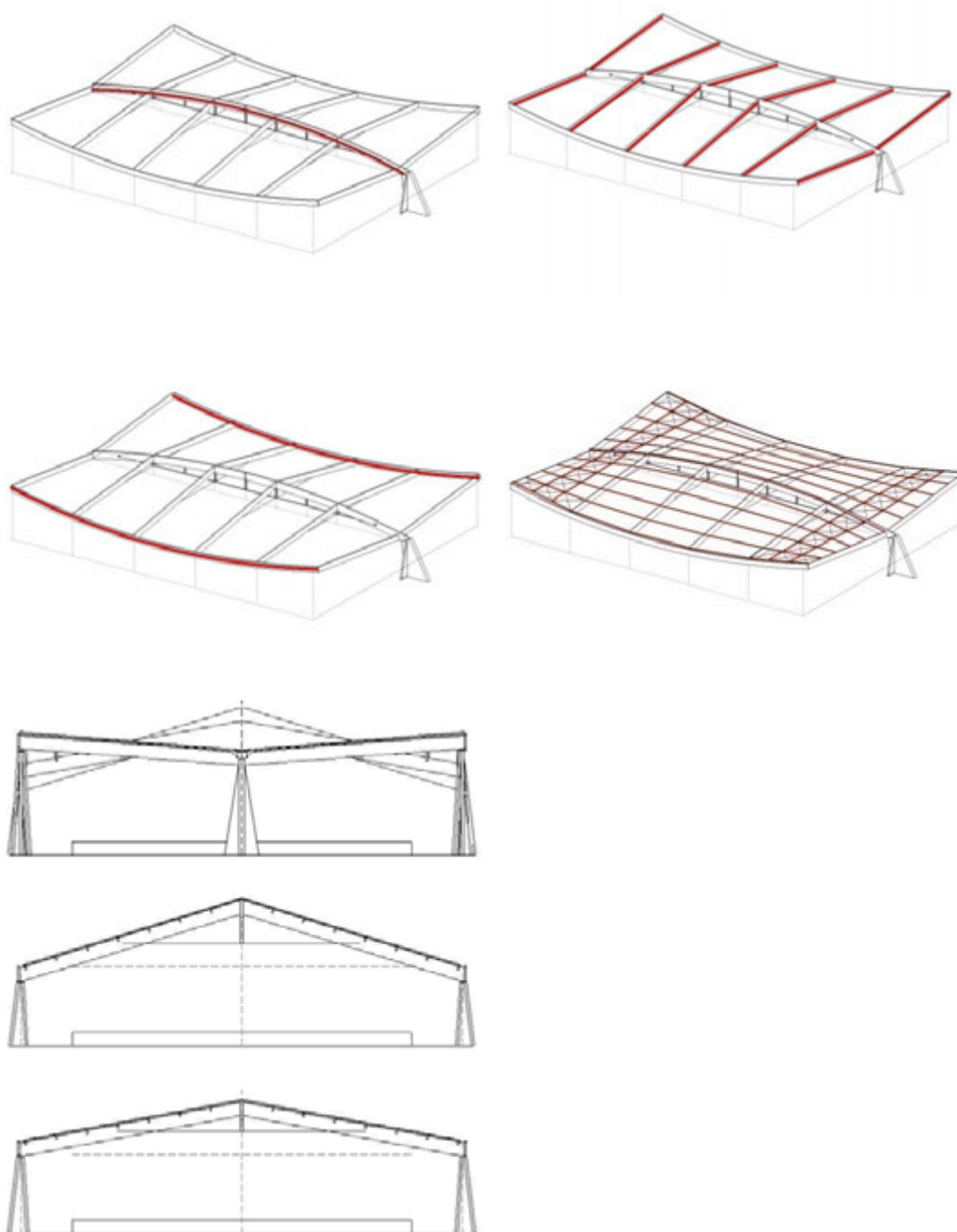




Rys.7. 40. Projekt stadionu miejskiego w Płocku. Architektura: A. Maciejko - Grześkowiak, M. Strzelecki. Projekt koncepcyjny.

Założeniem koncepcji było stworzenie wyróżniającej się formy architektonicznej, spełniającej zarazem wymagania stawiane przed współczesnymi przekryciami stadionów, tj. zadania stadionu bez podpór w świetle widowni, oraz uniknięcie zalegania śniegu a także możliwość doświetlania lub zacieniania widowni. Projekt stadionu zakładał przekrycie żelbetowej widowni dla 15000 widzów membranami PTFE z włóknem szklanym, zamocowanymi na zakrzywionej konstrukcji wiszącej z drewna klejonego, siatkowej, opartej na krzywiznie parabolicznej.

C. Konstrukcja wiaty lodowiska w Pszowie - Projekt konkursowy 2004 rok. Architektura: R. Dudzik, A. Maciejko - Grześkowiak, Konstrukcja: M. Delineszew.

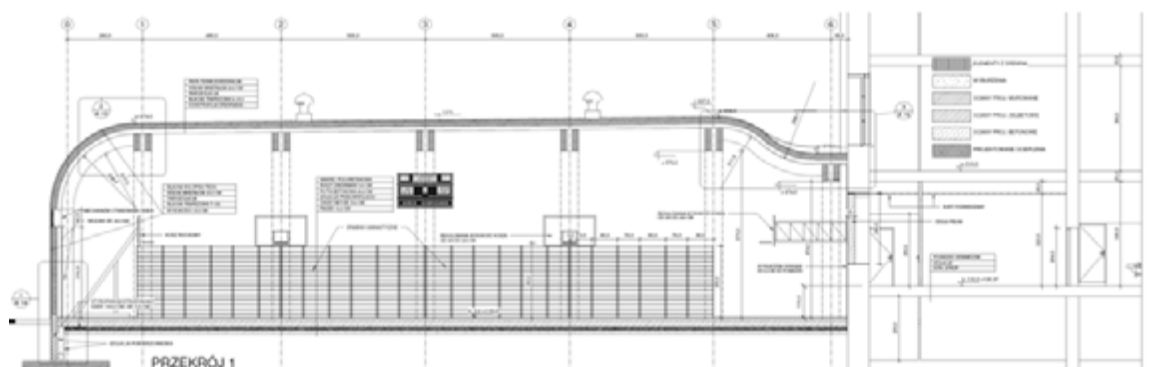


Rys.7. 41. Konstrukcja wiaty lodowiskowej w Pszowie– projekt konkursowy, architektura R.Dudzik, Alicja Maciejko – Grześkowiak, konstrukcja: Mikołaj Delineszew, Alicja Maciejko - Grześkowiak, wymiary w rzucie: 62x40 m.

Głównym elementem nośnym w płaszczyźnie podłużnej jest centralny (w osi wiaty) łukowy dźwigar z drewna klejonego o rozpiętości ok. 62 m, wyniesieniu 4 m i wysokości ok. 1,6m, złożony z dwóch elementów o schemacie trójprzegubowym ze ściągiem, który przejmie siłę poziomą. Dźwigar łukowy spełnia dominującą rolę w układzie statycznym

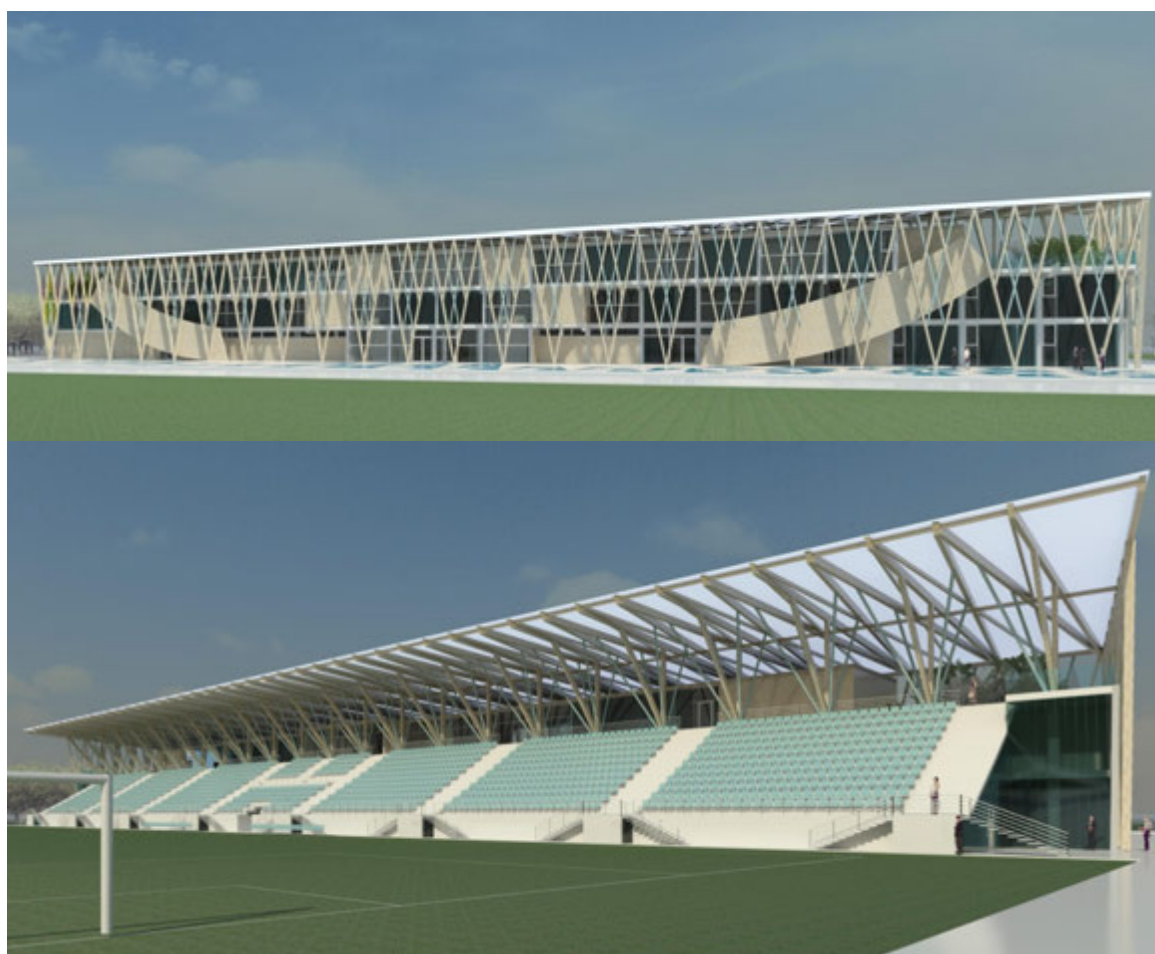
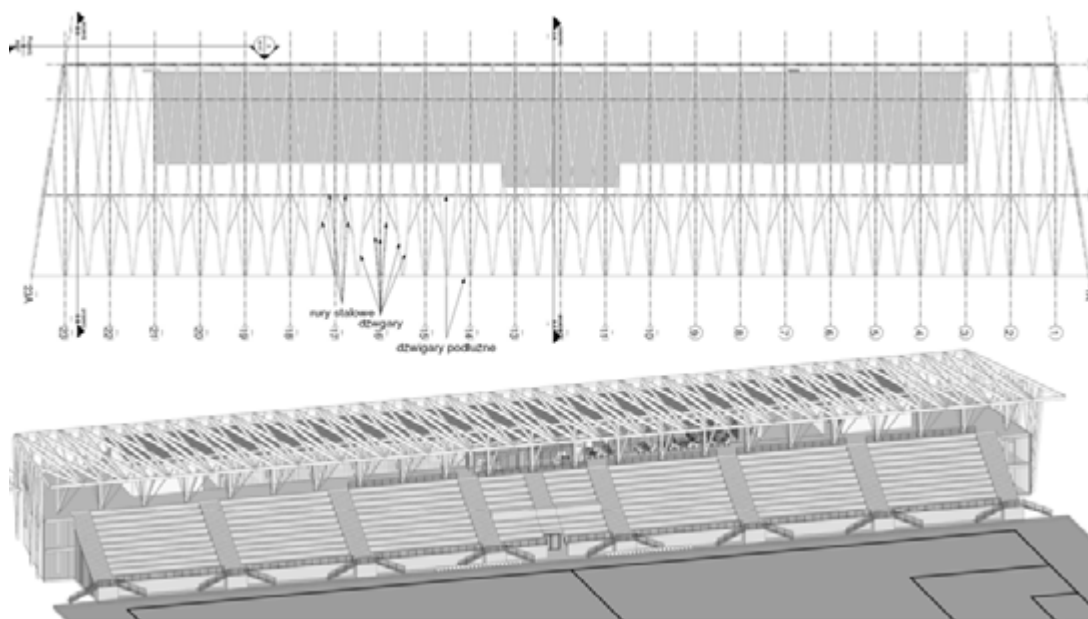
i kompozycyjnym konstrukcji. Z powodu zwiększonych obciążeń dźwigar posadowiono na żelbetowych pylonach w układzie przegubowym, za pomocą stalowego łącznika. Dźwigary poprzeczne, umieszczone w rozstawie 12,3 m wzdłuż wiaty zaprojektowano jako dźwigary proste o długości ok. 19,5 m, nachylone pod różnymi kątami do dźwigara łukowego. Elementy te są z jednej strony posadowione na słupach „drzewach” z drewna klejonego, z drugiej, sztywno przymocowane do dźwigara łukowego za pomocą stalowych łączników. Elementy te, z wyjątkiem dźwigarów skrajnych, również są wzmocnione ściągami. Wstępne obliczenia wykazały, że przekroje elementów zaprojektowano ekonomicznie, tzn. ich wysokości nie przekraczają 1,3 m. Słupy zaprojektowano jako wiązkę „pni” – trzech elementów okrągłych z drewna klejonego, rozstawionych w formie trójno-gu, osadzonych na niskich fundamentach. Narożne słupy będą dodatkowo oświetlane, co wzmocni efekt architektoniczny. Linie elewacji podłużnej tworzą łukowe belki z drewna klejonego o geometrii zbliżonej do dźwigara głównego, o tym samym promieniu, złożone z kilku części dla obniżenia kosztów transportu. Belki oprócz funkcji estetycznej i konstrukcyjnej pełnią rolę wiatrownic. Łączniki są ukryte w drewnie. Drugorzędnym systemem nośnym jest system płatwiowy, przymocowany do dźwigarów za pomocą łączników systemowych. Płatwie z drewna klejonego umieszczono pomiędzy dźwigarami w rozstawie umożliwiającym poprawne przymocowanie blachy trapezowej. W skrajnych polach zastosowano system stężeń w postaci dodatkowych tężników z drewna klejonego oraz prętów stalowych. Całość usztywnia blacha trapezowa, układana poprzecznie, stanowiąca oprócz warstwy pokrycia także element konstrukcyjny. Nadrzędnym celem projektowym było stworzenie optymalnego (ekonomicznego) układu statycznego, przy jednoczesnym założeniu zarówno atrakcyjności formy jak i dużych oszczędności materiałowych i montażowych w porównaniu z układem tradycyjnym. Zostało to spełnione poprzez przyjęcie układu mieszanego, dużego rozstawu osi słupów (minimalna liczba dźwigarów i podpór), systemowość rozwiązań, a także powtarzalność elementów i łączników. Atrakcyjna forma dachu nie wpływa na zwiększenie kosztów. Poprzez zastosowanie systemu mieszanego wyeliminowano długie dźwigary o rozpiętości ok. 40 m, które w układzie tradycyjnym biełyby poprzecznie w rozstawie ok. 6-8 m, co podrożyłoby znacznie koszty transportu, posadowienia i montażu.

D. Hala sportowa we Wrocławiu przy ul. Świstackiego Projekt zrealizowany. Architektura: arch. Mirosław Strzelecki. Konstrukcja: M. Delineszew, arch Alicja Maciejko - Grześkowiak.



Rys.7. 42. Hala sportowa we Wrocławiu. Architektura: M. Strzelecki. Konstrukcja: M. Delineszew, A. Maciejko - Grześkowiak. Realizacja 2008 r.

E. Centrum Sportu WAWER w Warszawie. Projekt budowlano wykonawczy. Architektura: arch. arch. Alicja Maciejko- Grześkowiak, Mirosław Strzelecki.

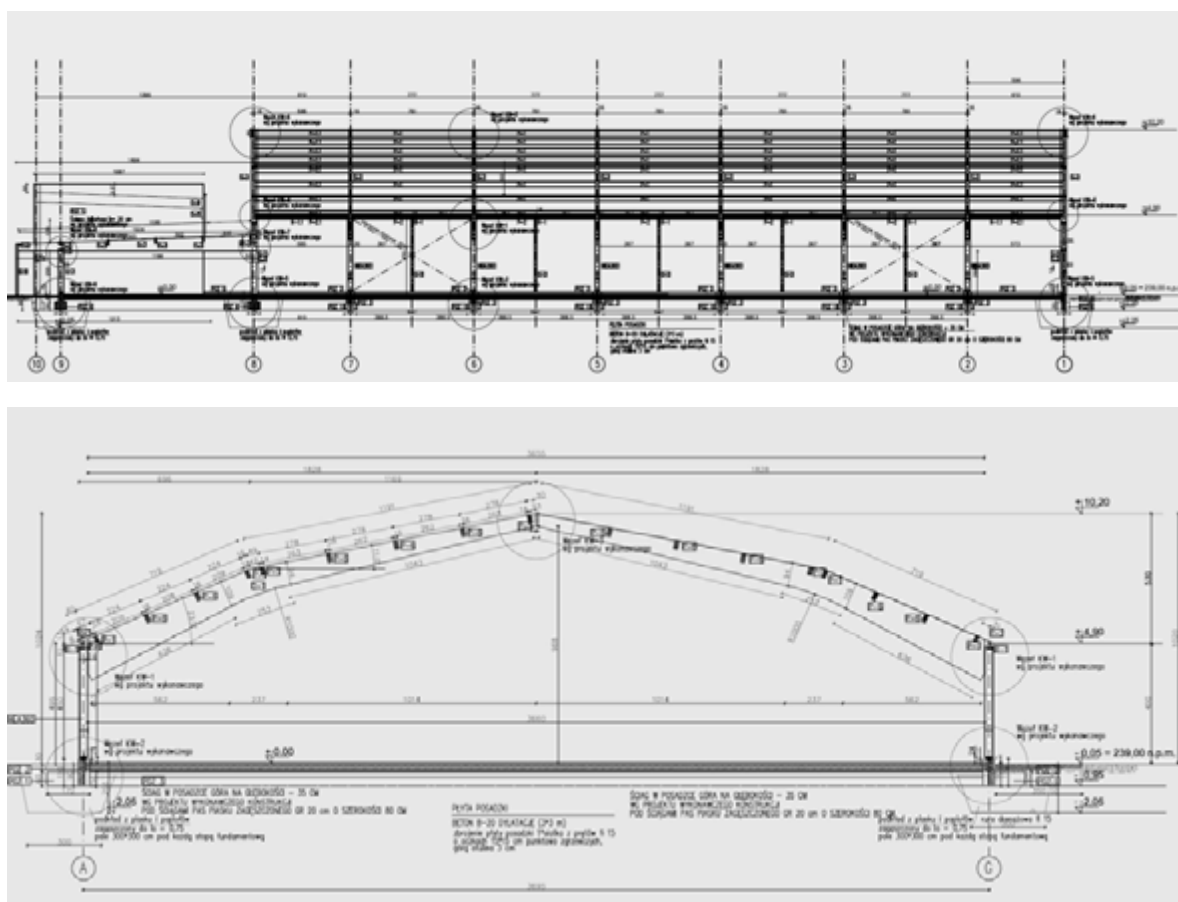


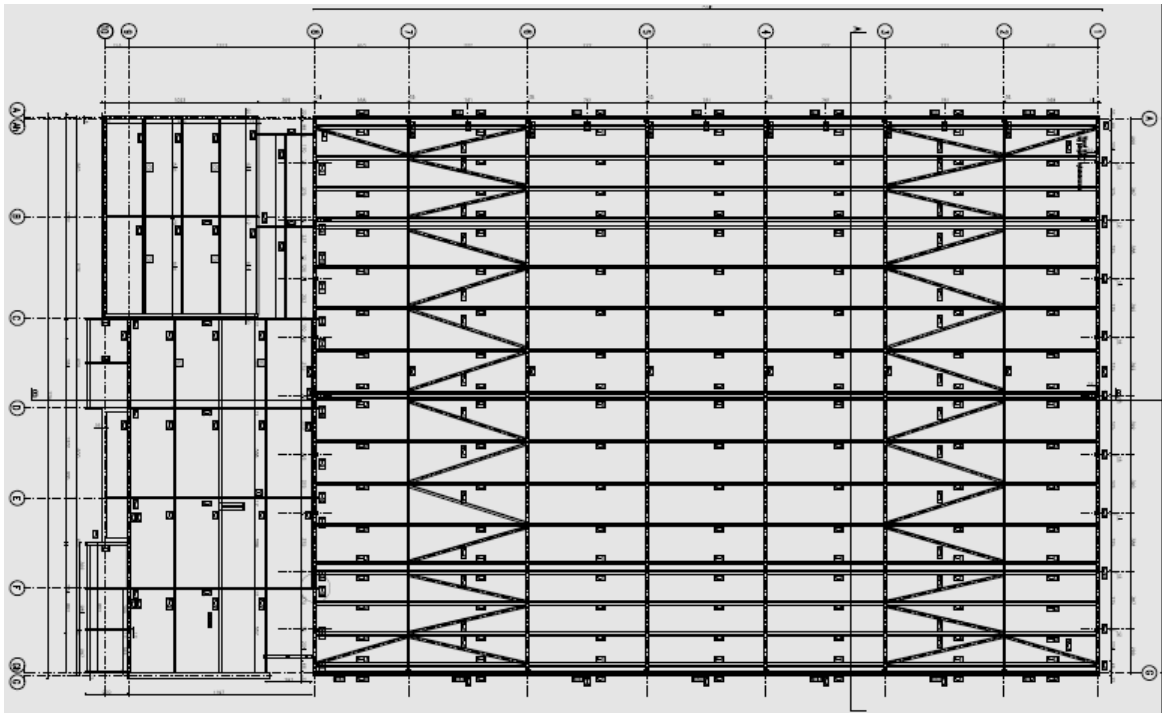
Rys.7. 43. Projekt Centrum Sportu Dzielnicy Wawer w Warszawie. Architektura: Alicja Maciejko - Grześkowiak, Mirosław Strzelecki. Projekt budowlano- wykonawczy.

Projekt centrum sportu w dzielnicy Wawer w Warszawie zakłada budowę obiektu kubaturowego o różnych funkcjach towarzyszących sportowi, jak blok medycyny sportowej, blok fitness, blok dla VIP i mediów, restaurację i bar. Integralną częścią budynku jest widownia dla 1800 widzów z zadaszeniem, służąca boisku do piłki nożnej. Dla budynku zaprojektowano dwa niezależne układy konstrukcyjne. Konstrukcję nośną części kubaturowej oraz widowni zaprojektowano z żelbetu, natomiast konstrukcję zadaszenia budynku oraz widowni z elementów z drewna klejonego. Podpory dachu od strony wejścia do budynku zaprojektowano w postaci słupów z drewna klejonego ze stężeniami stalowymi stanowiące układ kratownicy hybrydowej, drewniano stalowej. Od strony widowni konstrukcję dachu w postaci dźwigarów z drewna klejonego podpierają ukośne podpory z rur stalowych. Pokrycie dachu zaprojektowano z niepalnego poliwęglanu.

F. Hala tenisowa w Zabrze. Projekt budowlano wykonawczy 2008 rok. Architektura: arch. Alicja Maciejko - Grześkowiak. Konstrukcja M. Delineszew

Układ ramy trójprzegubowej o rozpiętości 36 m z łamanym rygłem i słupami stalowymi.

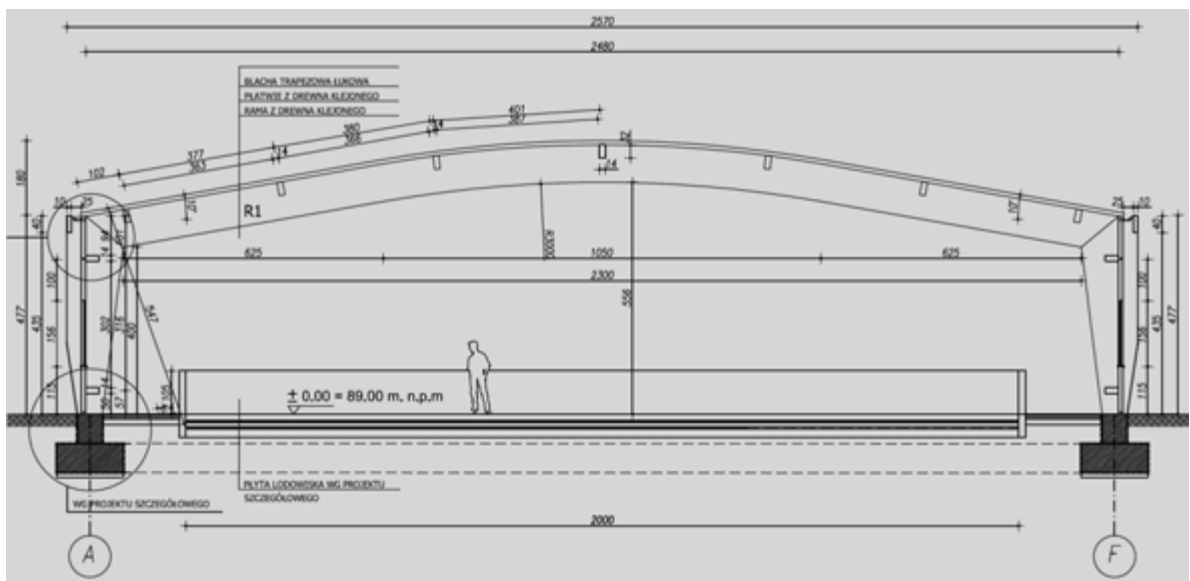


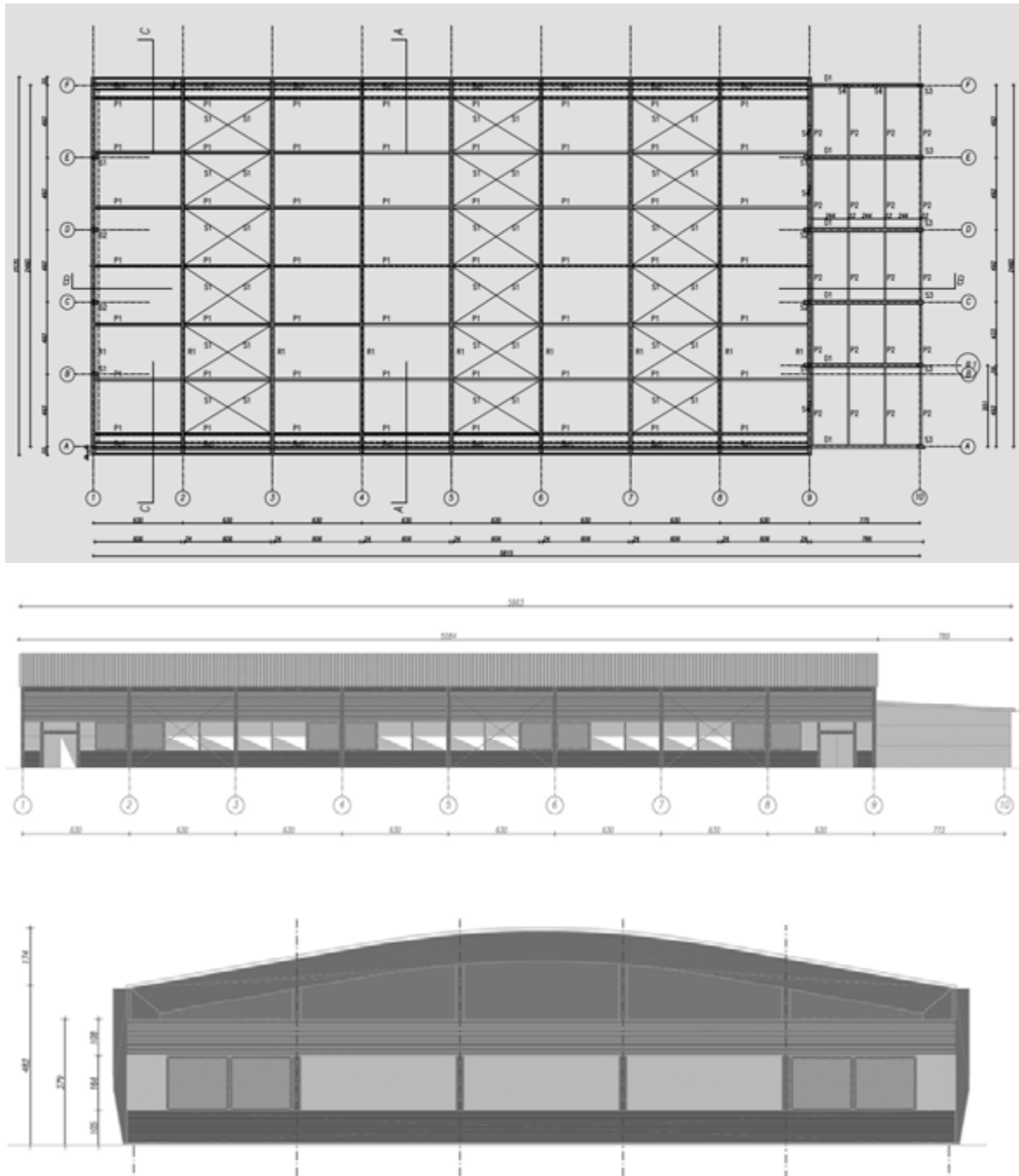


Rys.7. 44. Projekt hali tenisowej w Zabrze. Architektura: Alicja Maciejko. Konstrukcja M. Delineszew. Projekt budowlano wykonawczy.

G. Projekt hali lodowiska w Sochaczewie. Projekt budowlany. Architektura: arch. Alicja Maciejko - Grześkowiak. Konstrukcja M. Delineszew

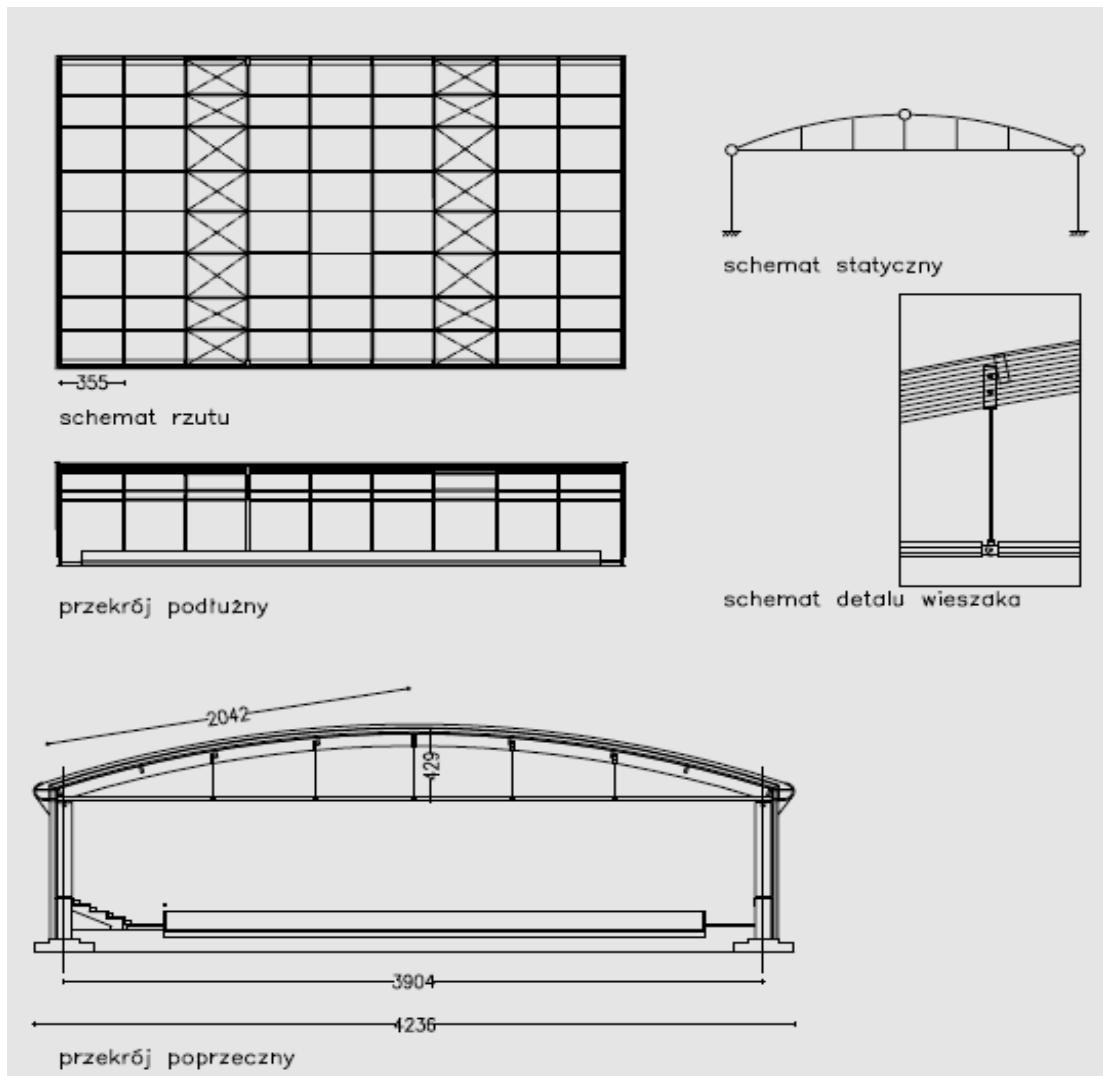
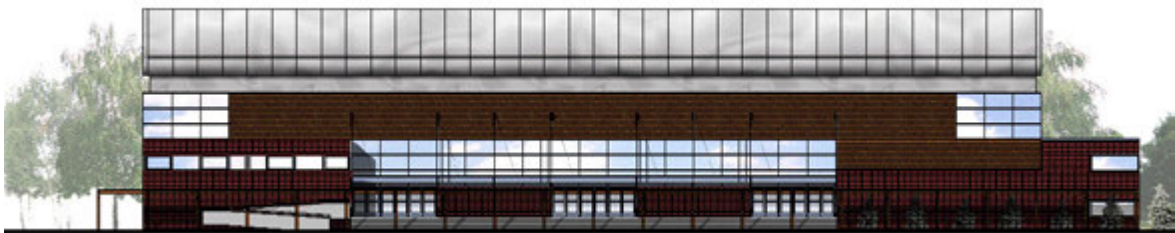
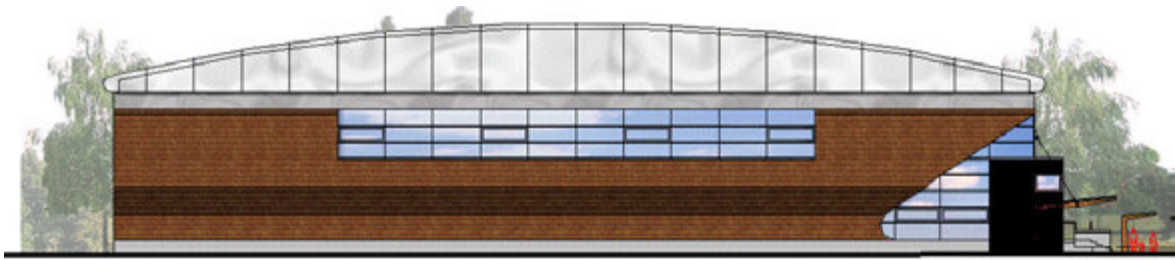
Układ ramy dwuprzegubowej o rozpiętości 25 m z łukowym ryglem i słupach z drewna klejonego.





Rys.7. 45. Projekt hali lodowiska w Sochaczewie. Architektura: Alicja Maciejko - Grześkowiak. Projekt budowlano wykonawczy.

H. Projekt hali lodowiska w Sanoku. Projekt konkursowy 2004 rok. Projekt konkursowy 2004 rok. Architektura: R. Dudzik, T. Wąsowicz, A. Maciejko - Grześkowiak, K. Sadowski. Konstrukcja: M. Delineszew



Rys.7. 46. Projekt hali lodowiska w Sanoku. Architektura: R. Dudzik, T. Wąsowicz, A. Maciejko - Grześkowiak, K. Sadowski. Konstrukcja: M. Delineszew. Projekt konkursowy.