

Q

Architecture
and town planning
Quarterly

Kwartalnik architektury
i urbanistyki



Mariusz Wrona, *Optymalne kształtowanie konstrukcji drewnianych w kontekście współczesnych tendencji w architekturze*, „Kwartalnik Architektury i Urbanistyki”, 2021, z. 1, s. 55-67

Mariusz Wrona, *Optimal shaping of wooden structures in the context of contemporary trends in architecture*, “Architecture and Town Planning Quarterly”, 2021, no. 1, pp. 55-75 [English version pp. 68-75]

DOI: 10.17388/WUT.2025.0009.ARCH

Optymalne kształtowanie konstrukcji drewnianych w kontekście współczesnych tendencji w architekturze

Streszczenie

Rozwój współczesnego budownictwa jest ukierunkowany na minimalizowanie zużycia energii. Optimalizacja procesów budowlanych to oczywiste działanie, które towarzyszy procesowi projektowania od samego początku. Jest to szczególnie istotne w dobie cyfryzacji narzędzi projektowania, a także wykorzystywania w architekturze krzywoliniowych modeli bionicznych. Umiejętność racjonalnego dostosowania materiału do potrzeb strukturalnych obiektu oraz dążenie do jego efektywnego wykorzystania to jeden z bardziej istotnych warunków zrównoważonej architektury. Rozwiązania techniczne w budownictwie zapewniające wykorzystanie odnawialnej energii, stają się coraz ważniejsze wobec potrzeby poszanowania zasobów naturalnych. W kontekście tych przemian warte uwagi jest wykorzystanie drewna naturalnego w konstrukcjach. W ostatnim czasie postępuje dynamiczny rozwój technologii obróbki drewna, a także narzędzi do modelowania i analizy konstrukcji drewnianych. Artykuł odnosi się do zagadnień związanych z optymalnym kształtowaniem form strukturalnych z drewna, ze szczególnym uwzględnieniem współpracy architektoniczno-konstrukcyjnej. Celem pracy jest przegląd obecnych tendencji wykorzystania drewna konstrukcyjnego oraz poznanych metod analizy statyczno-wytrzymałościowych dla tego materiału.

Słowa kluczowe

konstrukcje drewniane | interdyscyplinarne projektowanie | drewniane przekrycia strukturalne | prośrodowiskowy materiał budowlany

Mariusz Wrona, mgr inż.
Wydział Architektury
Politechnika Warszawska

Mariusz Wrona, MSc Eng.
Faculty of Architecture
Warsaw University of Technology

1. Wprowadzenie

We współczesnej architekturze obserwowany jest wzrost zainteresowania naturalnymi technologiami budowlanymi, zwłaszcza takimi, których ślad węglowy jest niewielki. Tendencje te, podyktowane potrzebą zmniejszenia karbonizacji w przemyśle budowlanym sprawiają, że drewno oraz technologie jego obróbki to obecnie jedno z bardziej interesujących zagadnień w rozwoju tego sektora. Dodatkowym atutem jest odnawialność surowca, która jednocześnie pociąga za sobą proces intensywnego pochłaniania dwutlenku węgla. W tym kontekście drewno dostarcza wyraźnie synergicznych rozwiązań dla współczesnego budownictwa, wpisując się w założenia gospodarki cyrkularnej. Z jednej strony, dzięki m.in. technologiom klejenia, drewno

jest wykorzystywane jako alternatywna konstrukcja nośna czy wypełnienie przegród (o dobrych właściwościach izolacyjnych), z drugiej strony aktywnie i pasywnie kumuluje zanieczyszczenia atmosfery. Uniwersalne właściwości drewna i możliwość jego dostosowania do pełnionej w elementach budowlanych funkcji umożliwiają jego dalszą eksplorację we współczesnym budownictwie.

Współczesne technologie obróbki drewna dostarczają nowych możliwości kształtowania racjonalnych elementów strukturalnych. Przykładami takich działań są: prefabrykacja elementów z drewna klejonego (CLT, LVL, HBE itp.), stanowiąca wyraźną alternatywę dla innych typów konstrukcji, oraz technologie związane zklejeniem i gięciem drewna. Dotykają one obszarów, które nie są jeszcze wystarczająco rozwinięte. Pierwszym z nich jest kształtowanie krzywoliniowej architektury, której nadrzędnym celem coraz częściej jest efektywność konstrukcyjna, przejawiająca się w redukcji zbędnej geometrii¹. Drugi dotyczy bezpośrednio narzędzi cyfrowego modelowania formy, opartych na interdyscyplinarnej współpracy. Oba elementy opierają się na korelacji architektoniczno-konstrukcyjnej i wymuszają rozwój specjalności, narzędzi, a wreszcie badań podstawowych w zakresie optymalnego kształtowania konstrukcji drewnianych.

Taki stan rzeczy sprawia, że szczególnie interesujące jest zastosowanie drewna konstrukcyjnego w obiektach, których geometria wykracza poza paradygmaty geometrii euklidesowej. To działanie wymaga zaawansowanych technologii obróbki, a także dużej świadomości materiału – jego struktury budowy i właściwości wytrzymałościowych². Poniższy przegląd zrealizowanych obiektów, technologii budowlanych oraz metod związanych z modelowaniem i analizą konstrukcji odnosi się do przykładów architektury bionicznej, której istotą jest poszukiwanie synergii pomiędzy estetyką formy i logiką rozwiązań strukturalnych.

2. Modelowanie konstrukcji drewnianych w odniesieniu do aktualnych norm

Drewno jest poznanym i powszechnie stosowanym materiałem w konstrukcjach budowlanych, który opisują liczne podręczniki oraz dokumenty normowe. Dla krajów europejskich wprowadzono Eurokody, które zawierają wytyczne do projektowania konstrukcji drewnianych. Wspólne zasady projektowe zostały określone w dokumencie: *Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków*³. W normie zostały opisane zasady projektowania konstrukcyjnego w zakresie stanów granicznych nośności oraz użyteczności. Przepisy zawarte w tym dokumencie

¹ E. Gawell, A. Nowak, W. Rokicki, *Searching for Bionics Structural Forms Optimization*, "IOP Conference Series: Materials Science and Engineering", 2019, nr 471, s. 1–10.

² E. Gawell, *Optimal design of wooden pavilion gridshell structures in the context of architectural and structural collaboration* w: *PROJECTIONS: Proceedings of the 26th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2021)*, red. A. Globa, J. van Ameijde, A. Fingrut, t. 1, Hong-Kong 2021, s. 473–482.

³ Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków. P.4 Stany graniczne nośności; P.5. Stany graniczne użyteczności; Skrypt jest dostępny na stronie <http://pobierz.intersoft.pl/konkurs/EUROKODY/EUROKODY-Projektowanie-konstrukcji-drewnianych.pdf> (dostęp 30.11.2021).

powinny być stosowane przez inżynierów prowadzących działalność projektową w krajach Unii Europejskiej. Dodatkowo Eurokody zawierają krajowe załączniki NA „National Appendix” stanowiące wytyczne uwzględniające np. specyfikę stosowanych materiałów lub stanowiące uzupełnienia reguł ogólnych m.in. poprzez wprowadzenie wartości liczbowych do występujących w normie symboli⁴. Eurokody dostarczają również informacji na temat stosowanego systemu klas wytrzymałości. Klasyfikację poszczególnych gatunków drewna używanego w budownictwie oraz sposób kwalifikowania poszczególnych gatunków do odpowiedniej klasy zawiera Eurokod PN-EN 338:2011. Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości⁵. Charakterystyki fizyczne i wytrzymałościowe drewna pochodzące z drzew iglastych takich jak: sosna, modrzew czy świerk oraz drzew liściastych – np. buk, dąb, jesion, klon, lipa, olcha, topola, można odnaleźć również w literaturze technicznej⁶.

Wraz z upowszechnianiem się konstrukcji drewnianych we współczesnym budownictwie następuje rozwój technologii materiałowych. Z jednej strony rośnie wachlarz gatunków drzew, które są wykorzystywane w kształtowaniu konstrukcji. Z drugiej zaś, metody wzmacniania drewna (np. klejenie, taśmy wzmacniające z włókna szklanego czy aramidowego itp.) dostarczają nowych możliwości projektowych. Rozwój ten nie tylko pobudza kreatywność projektantów do poszukiwania nietypowych rozwiązań przestrzennych, ale jednocześnie wymaga ciągłego aktualizowania norm, baz danych i katalogów do cyfrowych analiz wytrzymałościowych.

W projektowaniu konstrukcji drewnianych za podstawowe parametry bezpieczeństwa odpowiada wytrzymałość na ściskanie wzdłuż i w poprzek włókien, wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż i w poprzek włókien, wytrzymałość na zginanie czy wytrzymałość na ścinanie w kierunku wzdłuż i w poprzek włókien. Parametry wytrzymałościowe stosowane są podczas weryfikacji konstrukcji zgodnie z formułami zawartymi w Eurokodzie. W typowych konstrukcjach drewnianych o wyężeniu elementu drewnianego oprócz charakterystyk wytrzymałościowych decydują schematy statyczne ukształtowanej konstrukcji, układ i wartość oddziaływań normowych, warunki brzegowe (podporowe) i występujące w związkach konstytutywnych cechy fizyczne materiału (moduły sprężystości). Analiza statyczna prowadzi do uzyskania sił wewnętrznych oraz stanu naprężeń, a następnie, po uwzględnieniu parametrów wytrzymałościowych, do weryfikacji nośności. Stany graniczne konstrukcji kontroluje się poprzez porównanie uzyskanych naprężeń z parametrami wytrzymałościowymi. Do granicznych stanów nośności należy zaliczyć także kontrolę granicznej krzywizny, przy której następuje pojawienie się pierwszego pęknięcia. Ten rodzaj stanu granicznego jest istotny dla konstrukcji wstępnie wygiętych. Krzywizna graniczna może być wyznaczana analitycznie na

⁴ PN-EN 1995-1-1:2010/NA. Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1–1: Postanowienia ogólne - Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków.

⁵ PN-EN 338:2016-06. Drewno konstrukcyjne – Klasy wytrzymałości.

⁶ J. Kotwica, *Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym*, Warszawa 2011; autor w rozdziale 3 *Mechaniczne właściwości drewna i materiałów drewnopochodnych* podaje charakterystyki fizyczne i wytrzymałościowe materiałów.

podstawie wzoru na zginanie uzależniającego krzywiznę graniczną wygiętego elementu z podawaną w Eurokodzie wytrzymałością przy zginaniu $\sigma_{cr} = f_m^7$:

$$\sigma_{cr} = \frac{M \cdot z}{I}, \text{ gdzie } M = \kappa \cdot EI$$

Powyższe informacje stanowią podstawę do analizy form bionicznych budowanych z drewna. Bardzo często, zwłaszcza w przypadku nietypowych budowli, normowe bazy materiałowe uzupełniane są badaniami doświadczalnymi.

3. Wybrane metody modelowania konstrukcji drewnianych – analiza statyczna i modele obliczeniowe

Współczesne tendencje w architekturze nastawione są na interdyscyplinarność procesu projektowego. W ślad za tym podążają cyfrowe narzędzia współpracy wielobranżowej. W zależności od przyjętej metody kształtowania formy, planowane są procesy jej optymalizacji strukturalnej. Poniżej zostały przedstawione analityczne metody projektowania obiektów kształtowanych z drewna.

3.1. Analiza liniowa

Najczęściej stosowaną metodą analizy statycznej jest obecnie liniowa Metoda Elementów Skończonych *Finite Element Method, FEM*⁸. Modele obliczeniowe przygotowywane przez inżynierów statyków zakładają projektowaną przez architekta geometrię, która obecnie jest tworzona przy zastosowaniu coraz bardziej zaawansowanych narzędzi cyfrowych. Przy pomocy metody FEM można wykonywać analizy z pominięciem tzw. efektów drugiego i trzeciego rzędu, charakterystycznych dla analiz nieliniowych. W analizie liniowej zakłada się liniową zależność stanu naprężeń konstrukcji oraz stanu odkształceń. Popularna wśród inżynierów konstruktorów metoda FEM pozwala na określenie sił wewnętrznych panujących w konstrukcji, zautomatyzowaną kontrolę Stanów Granicznych Nośności *Limit State Analysis LSL* oraz Stanów Granicznych Użytkowalności *Serviceability Limit State SLS* zgodnie z regułami zawartymi w opracowaniu *PN- EN 1990:2004. Eurokod- Podstawy projektowania konstrukcji*⁹. Popularne na rynku Europejskim programy obliczeniowe wykorzystujące FEM mają bowiem wbudowane moduły do weryfikacji normowych formuł wytrzymałościowych. Do programów tych można zaliczyć *Autodesk Robot Structural Analysis* firmy *Autodesk*, *RFEM6* firmy *Dlubal Software* lub pakiet *SCIA Engineer* firmy *Nemetchek*. Automatyczny proces weryfikacji normowej poszczególnych elementów konstrukcyjnych sprowadza się do ustalenia kilku wyjściowych parametrów, takich jak długość pręta, model wybożeniowy i zwichrzeniowy pręta, wpływ sęków (imperfekcji) czy np. wilgotność drewna w warunkach eksploatacji.

⁷ E. Adiels et al., *Design, fabrication and assembly of a geodesic gridshell in a student workshop*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", red. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018, s. 2–3, 5.

⁸ A.M. Bauer et al., *Software Approaches for the Design and Simulation of Bending Active Systems*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", red. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018, s.1–2.

⁹ Terminy anglojęzyczne pochodzą z angielskiej wersji *Eurokod 5*.

Bardziej skomplikowanym procesem jest analiza węzłów, gdzie z reguły w konstrukcjach drewnianych występuje zniszczenie materiału. Popularne pakiety do projektowania konstrukcji mają stosunkowo małe możliwości analizy węzłów, ograniczające się do typowych węzłów powszechnie stosowanych w konstrukcjach drewnianych. Połączenia (węzły konstrukcyjne) modelowane są indywidualnie bardzo często w innych aplikacjach niż program, w którym przeprowadzono analizę całego ustroju konstrukcyjnego. Podczas analizy węzłów konstruktorzy także wykorzystują metodę FEM. Budowane w tym celu modele powłokowe lub bryłowe węzłów konstrukcyjnych dostarczają projektantowi informacji na temat stanu naprężeń panujących w poszczególnych elementach tworzących węzeł konstrukcyjny.

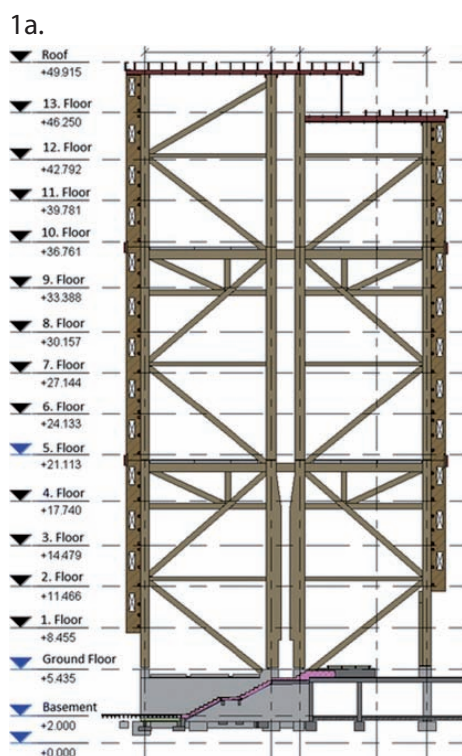
Pomimo ignorowania efektów drugiego czy trzeciego rzędu metoda FEM może być stosowana dla bardzo wyrafinowanych konstrukcji. Analizy FEM stosowane są dla konstrukcji, które ze względu na pomijalny wpływ deformacji na siły wewnętrzne nie wymagają analiz nieliniowych. Przykładem konstrukcji drewnianej analizowanej za pomocą FEM jest budynek Treet zrealizowany w Bergen (Norwegia) (il. 1). Budynek powstał w 2015 roku w wyniku współpracy biura architektonicznego Artec oraz firmy SWECO, przy wsparciu zespołu naukowo-badawczego z Norwegian University of Science and Technology (NTNU w Trondheim)¹⁰. Szkielet konstrukcji 14-kondygnacyjnego obiektu o wysokości konstrukcji 52.8 m stanowią prefabrykowane panele zrealizowane w technologii CLT. Analiza konstrukcji została przeprowadzona przy wykorzystaniu programu Robot Structural Analysis Professional 2013. Dzięki szczegółowemu modelowi oraz zoptymalizowanej logistyce montaż poszczególnych sprefabrykowanych modułów obiektu przebiegł niezwykle sprawnie oraz, co zasługuje na szczególne uznanie, bardzo dokładnie. Warto nadmienić, że maksymalna odchyłka zmontowanej konstrukcji dla tego wysokiego obiektu wyniosła jedynie 3 mm.

3.2. Analiza nieliniowa geometrycznie

Metody analizy FEM liniowej nie zawsze dają prawidłowy obraz zachowania konstrukcji. Podczas analiz konstrukcji – tak prętowych, jak i powłokowych – wymagane są często bardziej zaawansowane metody uwzględniające nieliniowość procesów zachodzących podczas pracy konstrukcji. Do pojawiających się nieliniowości dochodzi w sytuacji, gdy konstrukcja charakteryzuje się dużymi deformacjami, skutkującymi pojawieniem się efektów drugiego rzędu (*second-order effects*) lub trzeciego rzędu (*third-order effects*). Do metod wykorzystywanych w analizach nieliniowych zalicza się metodę *P-Delta* oraz metodę dużych przemieszczeń *Large Displacements Analysis*. Analiza *P-Delta* (*second-order effects*) uwzględnia zmianę sztywności elementu prętowego w zależności od sił podłużnych natomiast metoda *Large Displacements Analysis* uwzględnia efekty trzeciego rzędu tj. pojawienia się dodatkowych sił w zależności od deformacji konstrukcji¹¹. Metody nieliniowe będą

¹⁰ R. Abrahamsen, K. Malo, M. Bjertnæs, *Some structural design issues of the 14-storey timber framed building "Treet" in Norway*, "European Journal of Wood and Wood Products", Vol. 74, 01/05/2016, s. 407–423.

¹¹ Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021, <https://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2021/PLK/?guid=GUID-FB3C86D3-0E30-43A6-82D6-6C50F429FA0D> (dostęp 30.11.2021).



1. Budynek mieszkaniowy wielorodzinny „Tree” w Bergen (Norwegia), 2015, architekt: Artec. projektant konstrukcji: Sweco AB: a) schemat szkieletowej konstrukcji budynku; b) widok obiektu. Źródło: R. Abrahamsen, K.A. Malo, *Structural design and assembly of “tree” – a 14-storey timber residential building in Norway*, w: *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014)*, red. A. Salenikovich, Red Hook 2018

1. Multifamily residential building „Tree” in Bergen (Norway), 2015, architect: Artec Structural designer: Sweco AB: a) diagram of the skeleton structure of the building; b) view. Source: R. Abrahamsen, K.A. Malo, *Structural design and assembly of “tree” – a 14-storey timber residential building in Norway*, in: *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014)*, ed. A. Salenikovich, Red Hook 2018

miały zastosowanie zawsze tam, gdzie w konstrukcji występują znaczne deformacje, których nie można pominąć w analizie statycznej. Tego typu analizy będą konieczne w przypadku ustrojów konstrukcyjnych, w skład których wchodzi elementy membranowe, cięgnowe lub kablone. Elementy takie często uzupełniają konstrukcje drewniane i pracują w charakterze cięgien stężających lub sprężających.

3.3. Form Finding

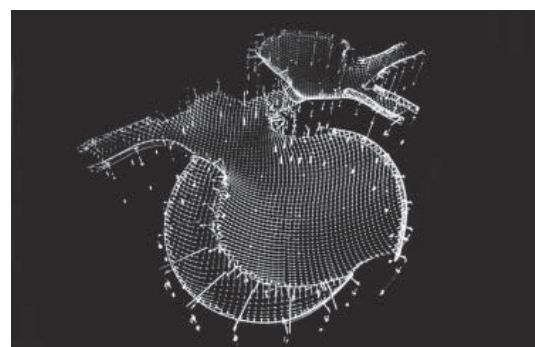
Metoda *Form Finding* kojarzona jest z nazwy od początku XX w. ale w praktyce znana i stosowana jest od dawna, chociażby przez Antoniego Gaudiego. Łańcuchowe modele, wspomagające sposób kształtowania niezwyklej budowli Gaudiego prezentują piękno logiki form strukturalnych. Niemniej jednak budowanie przestrzennych modeli fizycznych to trudne i pracochłonne zadanie. Przykładem wczesnego, analogowego zastosowania metody *form-finding* jest konstrukcja Multihalle, projektu Otto Frei, zrealizowana w 1975 w Mannheim w Niemczech (il. 2a, 2b, 2c). Obiekt został ukształtowany poprzez analogię do badań wytrzymałościowych opartych na modelu fizycznym wykonanym w skali 1:100. Analizę statyczną przeprowadzono w latach 70. XX wieku na podstawie metody pochodzącej z dziedziny *Form Finding*, opartej o *Nonlinear Force Density Method NFDM*. Ostateczna forma, jaką przybrał obiekt, została opracowana przez Klauza Linkwitza i jego współpracowników, którzy do optymalizacji kształtu wykorzystali analizę stereograficzną.

Wykonany przez projektantów model przekrycia posłużył nie tylko do analizy statycznej, ale był także przydatny do usunięcia osobliwości (wygładzenia)

2a.



2b.



2c.

z powierzchni powłoki zewnętrznej całej struktury.¹² Scharakteryzowane powyżej zadanie to przykład efektywnej konstrukcji, która inspirowała projektantów wykorzystujących *Form Finding* współcześnie z użyciem cyfrowych modeli obliczeniowych. Z jednej strony interesujący w tym przykładzie jest sam proces modelowania i kształtowania konstrukcji, z drugiej wykorzystanie wiotkich listew drewnianych do budowy nośnej powłoki. To rozwiązanie wpisuje się w aktualne i ważne trendy architektury zrównoważonej. Obiekt Multihalle osiągnął rozpiętość przeszłową powyżej 60 m przy niewielkim ciężarze przekrycia – około 14 kg/m^2 ¹³.

Przykładem nowszej realizacji wykorzystującej *Form Finding* jest obiekt Centre Pompidou zrealizowany w Metz we Francji w 2010 r. Autorami projektu architektonicznego są Shigeru Ban oraz Jean de Gastines (il. 3a, 3b, 3c). Projekt konstrukcji powstał w biurze Ove Arupa przy udziale Hermana Blumera. Na uwagę zasługują w tym przykładzie zastosowane dwukrzywiznowe elementy z drewna klejonego wykorzystane do ukształtowania przekrycia o powierzchni ok. $8\,500 \text{ m}^2$ z rozpiętościami konstrukcyjnymi do 40 m¹⁴. Do metod wspomagających cyfrowy

2. Multihalle Mannheim, Niemcy, 1974; projektanci: Otto Frei, Carlfried Mutschler, Winfried Langner:

a) widok ogólny struktury z łukiem przeszłowym; b) widok w zbliżeniu na wygięte listewki struktury nośnej; c – „WOOD – building the future”, Multihalle Mannheim, www.wooddays.eu; b – fot. Daniel Lukac, www.mannheim-multihalle.de

2. Multihalle Mannheim, Germany, 1974; designers: Otto Frei, Carlfried Mutschler, Winfried Langner:

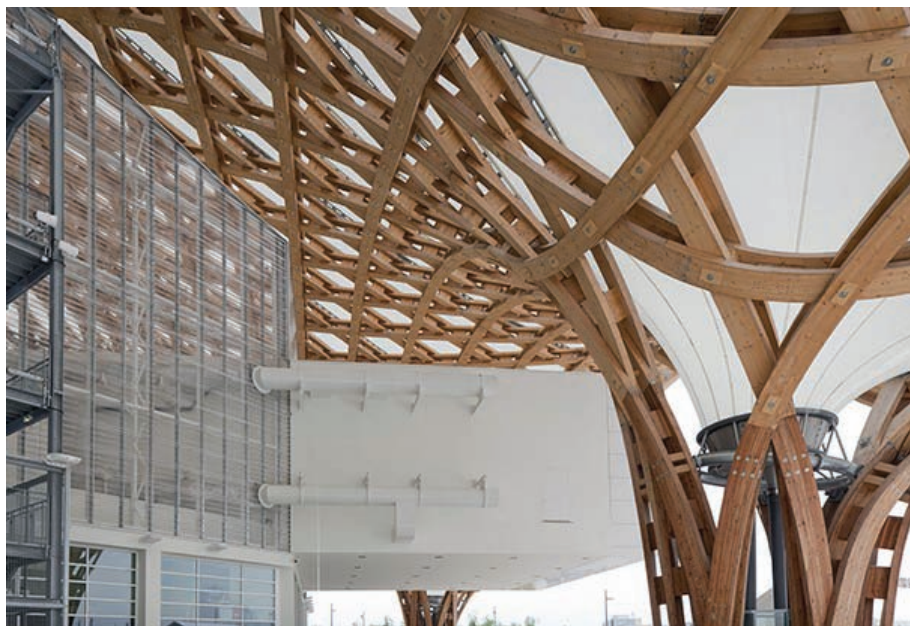
a) general view of the structure with a span arch; b) a close-up view of the curved lamellae of the support structure; c – mosquito net conceptual model. Source: a, c – „WOOD – building the future”, Multihalle Mannheim, www.wooddays.eu; b – photo by Daniel Lukac, www.mannheim-multihalle.de

¹² J.M. Songel, *Sustainability lessons from vernacular architecture in Frei Otto's work: tents and gridshells*, "The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences", Vol. XLIV-M-1-2020, s. 239.

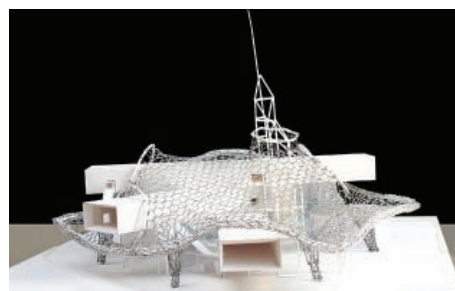
¹³ D. Wendland, *Model-based form finding processes: Free forms in structural and architectural design*, w: E. Torroja: *from the philosophy of structures to the art and science of building: international Seminar*, Politecnico di Torino, red. F. Levi, M.A. Chiorino, C.B. Cesari, Milano 2003.

¹⁴ T. Schwinn, *Tobias Schwinn in conversation with Holzbau Amann and Müllerblaustein*, w: *Advancing Wood Architecture. A computational approach*, red. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2016, s. 187–189.

3a.



3b.



3c.

3. Centre Pompidou- Metz, Francja 2010; Projektanci: Shigeru Ban i Jean de Gastines: a) widok na wygięte pręty struktury; b) inspiracja – chiński kapelusz tkany z bambusa; c) model fizyczny obiektu. Fot. Paul Raftery, źródło: W. Hunter, *Centre Pompidou-Metz by Shigeru Ban Architects & Jean de Gastines Architectes*, France, www.architectural-review.com
3. Center Pompidou-Metz, France 2010; Designers: Shigeru Ban and Jean de Gastines: a) view of the bent structural bars; b) inspiration – Chinese hat woven from bamboo; c) the physical model of the object. Photo Paul Raftery, source: W. Hunter, *Centre Pompidou-Metz by Shigeru Ban Architects & Jean de Gastines Architectes*, France, www.architectural-review.com

proces „wyłaniania się formy” (*Form Finding*) można zaliczyć wspomnianą wyżej metodę Geometric Stiffness (odmiany FDM – *Nonlinear Force Density method*) oraz metodę z rodziny *Dynamic Equilibrium*¹⁵ reprezentowaną przez metodę *Dynamicznej Relaksacji DR (Dynamic Relaxation)*¹⁶. Wspomagane komputerowo algorytmy stanowią nowoczesne narzędzie do poszukiwania formy, w której następuje równowaga sił dla odkształconego ustroju konstrukcyjnego. Dzięki tym analizom można ustalić wyjściową konfigurację elementów konstrukcyjnych (przed przyłożeniem oddziaływań występujących podczas eksploatacji obiektu), a także przeprowadzić analizę konstrukcji odkształconej po przyłożeniu obciążeń. Analizy z dziedziny *Form Finding* mają szczególne znaczenie w przypadku analiz elementów wiotkich, takich jak drewno konstrukcyjne. Wstępnie wygięte elementy konstrukcyjne listewek lub powłok z drewna klejonego przybierają kształty odpowiednie dla ich pracy. Przy niskim stosunkowo module Younga drewno jest materiałem podatnym na odkształcenia, a tym samym łatwo poddającym się wstępnym odkształceniom przy stosunkowo niskiej ilości energii niezbędnej do nadania pożądanej krzywizny.

Przykładem takiego działania (gdzie wykorzystano metodę Dynamicznej Relaksacji) jest The Downland Gridshell at the Weald and Downland Open Air Museum, projektu Edwarda Cullinana oraz inżynierów z Biuro Happold, zrealizowane w 2002 r. w Sussex w Wielkiej Brytanii. Struktura zbudowana z listewek wykonanych z drewna dębowego wyznacza trójkątne panele utworzone poprzez listewki biegnące w układzie diagonalnym w dwóch przeciwstawnych kierunkach oraz listewki biegnące w kierunku podłużnym. Podłużne listewki stanowią podkonstrukcję

¹⁵ D. Veenendaal, P. Block, *An overview and comparison of structural form finding methods for general networks*, “International Journal of Solids and Structures”, Vol. 49, 2012, Issue 26, s. 3741–3753.

¹⁶ D’Amico B et al., *Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure*, “Structures”, Vol. 3, 2015, s. 5.

dla powłoki zewnętrznej z tkaniny i jednocześnie stanowią stężenie konstrukcji tworząc trójkątne podziały siatki strukturalnej. Konstrukcja Downland Gridshell nie przykrywa tak imponujących rozpiętości jak Multihalle Manheim bowiem rozpiętość przeszłowa osiągnęła 15.2 m, jednak stanowi ciekawy przykład zastosowania drewna konstrukcyjnego jako lekkiej konstrukcji strukturalnej wstępnie sprężonej poprzez nadanie jej elementom odpowiednich krzywizn¹⁷.

4. Automatyzacja produkcji

Dla współczesnych konstrukcji drewnianych ważnym aspektem jest proces automatyzacji – zarówno modelowania architektonicznego konstrukcyjnego, jak i procesu samej produkcji. Stosowanie robotów przy wytwarzaniu (fabrykacji) metodą subtraktywną lub addytywną jest coraz bardziej powszechne¹⁸. Metody subtraktywne charakteryzują się tym, że podczas procesu wytwarzania odejmowany jest materiał, który nie uczestniczy w pracy konstrukcji lub uczestniczy w sposób nieefektywny. Redukcję zbędnego materiału mogą prowadzić odpowiednio zaprogramowane maszyny (obrabiarki), które wycinają zbędny materiał odrzucony przez projektanta w procesie optymalizacji konstrukcji. Metoda addytywna zyskała bardzo dużą popularność w dobie drukarek 3d, które dodają pożądany materiał powiększając jego przekrój lub dokładając całe elementy. W odniesieniu do konstrukcji drewnianych metoda addytywna polega także na dodawaniu całych segmentów konstrukcji w postaci przygotowanych wcześniej prefabrykatów.

Przykładem zastosowania zdigitalizowanej fabrykacji może być realizacja z 2016 r. The Sequential Roof, przekrywającego nowy budynek Institute of Technology in Architecture uczelni ETH w Zurichu. Wytworzenie konstrukcji przekrycia zostało poprzedzone analizami sparametryzowanej geometrii konstrukcji. Sparametryzowanie geometrii dachu było pomocne przy optymalizacji kształtu konstrukcji w celu uzyskania oszczędności materiałowych przy doborze przekroju listewek, uproszczenia i maksymalnego ujednoczenia wzorów węzłów (połączeń), a także w zakresie dostosowania kształtu dachu do konfiguracji zastosowanych systemów instalacji świetlnej i przeciwpożarowej. Całkowicie zautomatyzowane metody wytwarzania zostały wykorzystane do prefabrykacji wszystkich elementów konstrukcji składającej się z 168 dźwigarów o rozpiętości 14.70 m. Uzyskano w ten sposób przekrycie o powierzchni 2 308m² ¹⁹. Proces wytwarzania i montażu przedstawiają fotografie 4a, 4b, 4c.

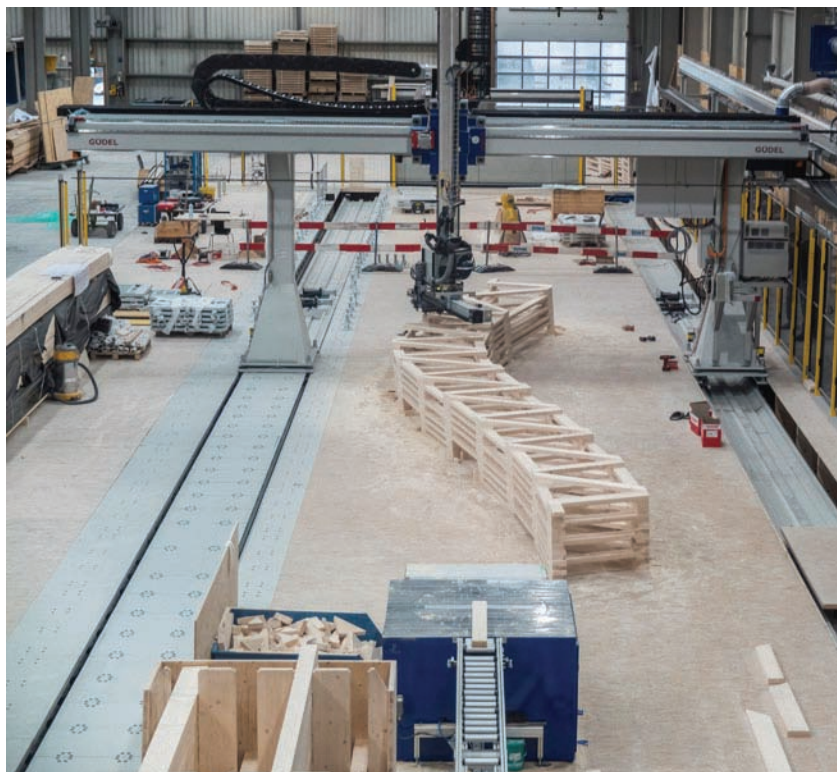
Interesujący przykład z dziedziny fabrykacji z wykorzystaniem drewna konstrukcyjnego stanowi również najnowsza realizacja Pawilonu livMatS w Ogrodzie Botanicznym we Fryburgu z 2021 r. zaprojektowana przez Achima Mensgesa (ICD, Uniwersytet w Stuttgarcie) oraz Jana Knippersa (ITKE, Uniwersytet w Stuttgarcie),

¹⁷ Downland Gridshell, <https://www.wealddown.co.uk/buildings/downland-gridshell/> (dostęp 30.11.2021).

¹⁸ E. Gawell, A. Stefańska, *Idea fabrykacji elementów strukturalnych w kształtowaniu współczesnych pawilonów*, „Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula”, 2018, nr 61(4), s. 82–92.

¹⁹ J. Willmann, F. Gramazio, M. Kohler, *New paradigms of the automatic: robotic timber construction in architecture*, w: *Advancing Wood Architecture*, red. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2017, s. 24–26.

4a.



4b.



4c.

4. The Sequential Roof of the Institute of Technology in Architecture, ETH Zurich, Projekt: Arch-Tec-Lab AG Realizacja: ERNE AG Holzbau, 2016; a, c) automatyczna produkcja elementów struktury; b) montaż konstrukcji. Fot. Gramazio Kohler, www.ita.arch.ethz.ch

4. The Sequential Roof of the Institute of Technology in Architecture, ETH Zurich, Design: Arch-Tec-Lab AG Realizacja: ERNE AG Holzbau, 2016; a, c) automated production of structure elements; b) assembly of the structure. Photo by Gramazio Kohler, www.ita.arch.ethz.ch

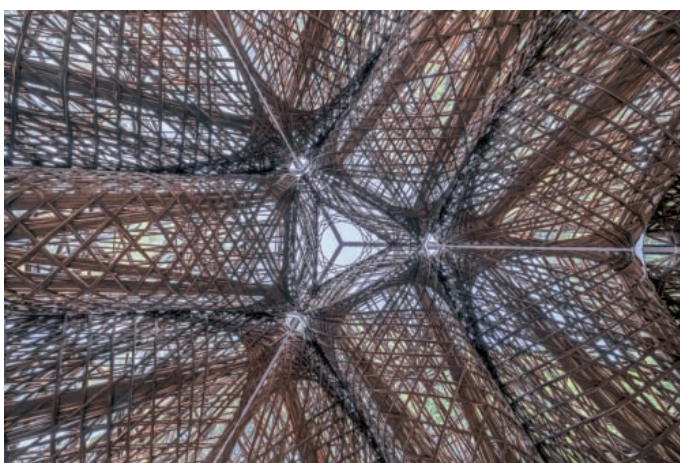
przy wsparciu Deutsche Bundesstiftung Umwelt, ExolonGroup²⁰. Struktura pawilonu była inspirowana budową kaktusa saguaro oraz opuncji figowej i wykorzystywała analogię do powłokowej budowy roślin, wzmocnionej przebiegającymi warstwowo włóknami. Jako budulec autorzy projektu wykorzystali włókna lniane, które w sposób zautomatyzowany były nawlekane na formy w postaci stalowych ramek. Po usunięciu form uzyskano powtarzalne moduły konstrukcyjne o charakterze membran uformowanych z prętów z włókien lnianych. Projekt konstrukcji wymagał badań podstawowych w zakresie wytrzymałości nietypowych materiałów. Przed realizacją badaniom poddano sprefabrykowane moduły konstrukcji. Pomimo tego, że obiekt jest stosunkowo niewielki (około 48 m² powierzchni), projektanci wykazali się bardzo dużą wiedzą z zakresu interdyscyplinarnego projektowania oraz wykorzystali zaawansowane techniki numeryczne. Proces realizacji obiektu był poprzedzony wnikliwymi studiami, w tym także badaniami doświadczalnymi użytego materiału pod kątem jego parametrów wytrzymałościowych. Kierunki układania włókien, gęstość włókien i ilość w poszczególnych warstwach były ściśle dostosowane do wyznaczonych numerycznie kierunków i wartości sił wewnętrznych. Projektowanie konstrukcyjne pawilonu zostało dostosowane do wymagań niemieckich norm projektowych, z uwzględnieniem klimatycznych oddziaływań normowych, i uwieńczone prefabrykacją modułów konstrukcyjnych całkowicie zrobotyzowaną i zrealizowaną sposobem addytywnej fabrykacji (il. 5 a, b, c, d).

²⁰ *livMatS Pavilion*, <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/livMatS-Pavilion/> (dostęp 30.11.2021).

5a.



5b.



5c.

5d.

4. Dyskusja

Projektowanie architektoniczne to coraz częściej złożony proces wyłaniania się formy w wyniku cyfrowej obróbki związanej z modelowaniem, analizą i produkcją. Jest to m.in. wynik dynamicznego rozwoju techniczno-technologicznego, a także digitalizacji narzędzi projektowych i badawczych. Dalszy postęp w tym zakresie będzie dostarczał jednocześnie nowych możliwości i wyzwań konstrukcyjno-budowlanych.

Wielobranżowy charakter powstawania obiektów budowlanych nie jest niczym nowym i zaskakującym. Jednakże z uwagi na możliwości realizacyjne, jakich dostarczają technologie formatywne, proces ten może przebiegać bez udziału ludzi (maszyny samosterujące). Fabrykacja elementów konstrukcyjnych lub całych obiektów umożliwia wytwarzanie nieregularnych i złożonych form, a jednocześnie wymusza wykonanie wnikliwych symulacji strukturalnych poprzedzających etap realizacji. Odpowiedzią na tak rozwijające się tendencje we współczesnej architekturze jest idea „from file to factory”, odnosząca się do płynnego łączenia procesu projektowania z produkcją. Cechą charakterystyczną form przestrzennych, które powstają w wyniku takiego działania, jest wykorzystanie cyfrowych strategii projektowania i wytwarzania opartych na koncepcjach obliczeniowych. To sprawia, że nauki inżynierskie stają się istotnym elementem kreatywnych poszukiwań projektowych. W odniesieniu do omawianej tematyki wykorzystania drewna konstrukcyjnego w architekturze należy dodatkowo uwzględnić kilka istotnych zagadnień. Jednym z nich jest naturalność

5. livMatS w Ogrodzie Botanicznym we Fryburgu. Niemcy. Realizacja 2021, Projekt: Achim Menges (ICD / Uniwersytet w Stuttgarcie), Jan Knippers (ITKE / Uniwersytet w Stuttgarcie); a – widok struktury przekrycia; b – proces produkcji segmentu konstrukcyjnego; c – widok konstrukcji od spodu, d – widok ogólny pawilonu. Fot. ICD/ITKE/IntCDC University of Stuttgart, www.icd.uni-stuttgart.de
5. livMatS at the Freiburg Botanical Garden, Germany. Commissioned 2021, Design: Achim Menges (ICD / University of Stuttgart), Jan Knippers (ITKE / University of Stuttgart); a – view of the cover structure; b – construction segment production process; c – bottom view of the structure, d – general view of the pavilion. Photo credit ICD/ITKE/IntCDC University of Stuttgart, www.icd.uni-stuttgart.de

materiału, która z jednej strony stanowi niezaprzeczalną zaletę, a z drugiej wyzwanie inżynierskie w zakresie analiz konstrukcyjnych. Problem stanowi fakt, że surowiec jest wrażliwy na czynniki wzrostu, struktura każdego elementu jest inna, a cyfrowe bazy danych do obliczeń (zawierające przybliżone parametry wytrzymałościowe) nie zawsze są kompletne. W tym kontekście, współpraca pomiędzy projektantami, technologami itp. musi być podtrzymywana, rozwijana i wspomagana na poziomie badań podstawowych i wdrożeniowych.

5. Podsumowanie

Doskonalenie narzędzi modelowania form strukturalnych z drewna to niezbędne działanie w kształtowaniu optymalnych rozwiązań we współczesnej architekturze. Z jednej strony, podążając nurtem idei prośrodowiskowych, projektanci coraz częściej inspirowani są technologiami budowlanymi nacechowanymi niskoemisyjnością procesów obróbki materiału.

Z drugiej jednak istotne jest minimalizowanie strat energii wbudowanej w obiekt, wynikającej także z procesu jego eksploatacji. To wymusza rozwój i doskonalenie poznanych narzędzi do optymalnego kształtowania konstrukcji i elementów budowlanych. W ślad za tym obserwowany jest postęp w sektorze wykonawczym. Digitalizacja, a także robotyzacja procesów realizacyjnych inspirowane do kształtowania nie tylko coraz bardziej frapujących form, ale również innowacyjnych technologii materiałowych, efektywnie wykorzystujących naturalne właściwości drewna.

Wyżej wymienione zmiany, dynamicznie zachodzące we współczesnym budownictwie sprawiają, że coraz większego znaczenia nabiera współpraca na styku różnych dyscyplin biorących udział w procesie powstawania architektury. Nie chodzi tu jedynie o proces projektowania, który wyjściowo łączy elementy nauk technicznych i humanistycznych. Na szczególną uwagę zasługuje także sfera nauki i poprzedzone rozwojem badań podstawowych wdrażanie innowacyjnych rozwiązań dla budownictwa.

Bibliografia

- Abrahamsen R., Malo K., Bjertnæs M., *Some structural design issues of the 14-storey timber framed building "Treet" in Norway*, "European Journal of Wood and Wood Products", Vol. 74, 01/05/2016
- Adiels E., Bencini N., Brandt-Olsen C., Fisher A., Näslund I., Kotani R., Poulsen E., Safari P., Williams C.J.K., *Design, fabrication and assembly of a geodesic gridshell in a student workshop*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", red. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018
- Bauer A. M., Längst P., La Magna R., Lienhard J., Piker D., Quinn G., Gengnagel C., Bletzinger K., *Exploring Software Approaches for the Design and Simulation of Bending Active Systems*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", red. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018
- D'Amico B., Kermani A., Zhang H., Pugnale A., Colabella S., Pone S., *Timber gridshells: for general networks*, "International Journal of Solids and Structures", 2012, Vol. 49, Issue 26
- D'Amico B., Kermani A., Zhang H., Pugnale A., Colabella S., Pone S., *Numerical simulation, design and construction of a full scale structure*, "Structures", 2015, Vol. 3
- Gawell E., Nowak A., Rokicki W., *Searching for Bionics Structural Forms Optimization*, "IOP Conference Series: Materials Science and Engineering", 2019, nr 471

- Gawell E., *Optimal design of wooden pavilion gridshell structures in the context of architectural and structural collaboration*, w: *PROJECTIONS: Proceedings of the 26th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2021)*, red. A. Globa, J. van Ameijde, A. Fingrut, t. 1, Hong-Kong 2021
- Gawell E., Stefańska A., *Idea fabrykacji elementów strukturalnych w kształtowaniu współczesnych pawilonów*, „Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula”, 2018, nr 61(4)
- Kotwica J., *Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym*, Warszawa 2011
- Lienhard J., *Bending Active Structures. Form – finding strategies using elastic deformation in static and kinematic systems and the structural potentials therein*, Stuttgart 2014
- Nabaei S.S., Baverel O., Weinand Y., *Form-Finding of Interlaced Space Structures*. w: *11th World Congress on Computational Mechanics*, red. E. Onate, J. Oliver, A. Huerta, Barcelona 2014
- Nabei S., Baverel O., Weinand Y., *A hybrid simulation workflow for timber fabric structures*, w: *Advancing Wood Architecture. A computational approach*, red. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2016
- Songel J. M., *Sustainability lessons from vernacular architecture in Frei Otto's work: tents and gridshells*, “The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences”, Vol. XLIV-M-1-2020
- Schwinn T., *Tobias Schwinn in conversation with Holzbau Amann and Müllerblaustein*, w: *Advancing Wood Architecture. A computational approach*, red. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2016
- Veenendaal D., Block P., *An overview and comparison of structural form finding methods*, “International Journal of Solids and Structures”, 2012, Vol. 49, Issue 26
- Wagner H., *Flat sheet metal girders with very thin metal web, Part I, General theories and assumption*, Washington 1931, s. 200–207
- Wendland D., *Model-based form finding processes: Free forms in structural and architectural design*, w: *E. Torroja: from the philosophy of structures to the art and science of building: international Seminar, Politecnico di Torino*, red. F. Levi, M.A. Chiorino, C.B. Cesari, Milano 2003
- Willmann J., Gramazio F., Kohler M., *New paradigms of the automatic: robotic timber construction in architecture*, w: *Advancing Wood Architecture*, red. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2017

Optimal shaping of wooden structures in the context of contemporary trends in architecture

Abstract

The development of modern construction is aimed at minimizing energy consumption. Optimizing construction processes is an obvious activity that accompanies the design process from the very beginning. This is particularly important in the era of digitization of design tools, as well as the use of curvilinear bionic models in architecture. The ability to rationally adjust the material to the structural needs of the building and strive for its effective use is one of the most important conditions for sustainable architecture. Technical solutions in construction ensuring the use of renewable energy are becoming more and more important in view of the need to respect natural resources. In the context of these changes, the use of natural wood in structures is worth paying attention to. Recently, there has been a dynamic development of wood processing technology, as well as tools for modeling and analyzing wooden structures. The article deals with issues related to the optimal shaping of structural forms of wood, with particular emphasis on architectural and construction cooperation. The aim of the work is to review the current trends in the use of construction timber and the known methods of statistic tensile strength analysis for this material.

Key words timber structures
 | interdisciplinary design
 | wooden gridshell
 | pro-environmental building
 material

1. Introduction

In modern architecture, there is a growing interest in natural construction technologies, especially those with a small carbon footprint. These trends, dictated by the need to reduce carbonization in the construction industry, make wood and its processing technologies one of the most interesting issues in the development of this sector. An additional advantage is the renewable nature of wood, which simultaneously entails the process of intensive absorption of carbon dioxide. In this context, wood provides clearly synergistic solutions for modern construction, in line with the assumptions of the circular economy. On one hand, thanks to, inter alia, gluing technologies, wood can be used as an alternative supporting structure or filling of partitions (with good insulating properties), on the other hand, it actively and passively accumulates atmospheric pollutants. The universal properties of wood and the possibility of its adaptation to the functions performed in construction elements enable its further exploration in modern construction technologies.

Modern woodworking technologies provide new opportunities for shaping rational structural elements. Examples of such activities are: prefabrication of glued timber elements (CLT, LVL, HBE, etc.), which is a clear alternative to other types of structures, and technologies related to gluing and bending wood. They affect areas that are not yet sufficiently developed. The first is shaping curvilinear architecture, the overarching goal of which is more and more often design efficiency, manifested in the reduction

of unnecessary geometry¹. The second relates directly to digital modeling tools based on interdisciplinary collaboration. Both elements are based on an architectural and construction correlation and require the development of specialties, tools and, finally, basic research in the field of optimal shaping of wooden structures.

This situation makes it particularly interesting to use construction timber in objects whose geometry goes beyond the paradigms of Euclidean geometry. This action requires advanced processing technologies, as well as high awareness of the material; its structure and strength properties². The following overview of completed facilities, construction technologies and methods related to modeling and structure analysis refer to examples of bionic architecture, the essence of which is the search for synergy between the aesthetics of form and the logic of structural solutions.

2. Modeling of wooden structures in relation to current standards

Wood is a well-known and commonly used material in building structures, described in numerous manuals and standard documents. Eurocodes (EC) have been introduced for European countries, which provide guidelines for the design of wooden structures. Common design principles are set out in the document: *Eurocode 5. Design of wooden structures. Part 1–1: General. Common rules and rules for buildings*³.

The standard describes the principles of structural design in terms of the ultimate and serviceability limit states. The regulations contained in this document should be applied by engineers conducting design activities in the European Union countries. In addition, the Eurocodes contain national annexes NA “National Appendix”, which constitute guidelines that take into account, for example, the specificity of the materials used or constitute supplements to general rules, among others, by assigning numerical values into symbols appearing in the standard⁴. Eurocodes also provide information on the applied strength class system. The classification of individual species of wood used in construction and the method of qualifying individual species to the appropriate class is included in the *Eurocode PN-EN 338: 2011. Construction wood. Strength classes*⁵. Physical and strength characteristics of wood from conifers such as pine, larch or spruce and deciduous trees – e.g. beech, oak, ash, maple, linden, alder, poplar, can also be found in technical literature⁶.

With the spread of wooden structures in modern construction, the development of material technologies is also taking place. On one hand, there is a growing range of tree species that are used in structural shaping. On the other hand, wood strengthening methods (e.g. gluing, fiberglass or aramid reinforcement tapes, etc.) provide new design possibilities. This development not only stimulates the creativity of designers to look for unusual spatial solutions, but at the same time requires the constant updating of standards, databases and catalogs for digital strength analyses.

In the design of wooden structures, the basic safety parameters include compressive strength along and across the grain, tensile

¹ E. Gawell, A. Nowak, W. Rokicki, *Searching for Bionics Structural Forms Optimization*, “IOP Conference Series: Materials Science and Engineering”, 2019, no. 471, p. 1–10.

² E. Gawell, *Optimal design of wooden pavilion gridshell structures in the context of architectural and structural collaboration* in: *PROJECTIONS: Proceedings of the 26th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2021)*, ed. A. Globa, J. van Ameijde, A. Fingrut, Vol. 1, Hong-Kong 2021, p. 473–482.

³ Eurocode 5. Design of wooden structures. Part 1–1: General. General rules and rules for buildings. P.4 Ultimate limit states; P.5. Serviceability limit states; The script is available on the website <http://pobierz.intersoft.pl/konkurs/EUROKODY/EUROKODY-Projektowanie-konstrukcji-drewnianych.pdf> (access 30.11.2021).

⁴ PN-EN 1995-1-1:2010/NA. Design of wooden structures. Part 1–1: General. Common rules and rules for buildings.

⁵ PN-EN 338: 2016-06. Construction timber – Strength classes.

⁶ J. Kotwica, *Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym*, Warszawa 2011; the author in chapter 3, *Mechaniczne właściwości drewna i materiałów drewnopochodnych*, gives the physical and strength characteristics of the materials.

strength along and across the grain, bending strength and shear strength along and across the grain. The strength parameters are used during the verification of the structure in accordance with the formulas contained in the Eurocode. In typical wooden structures, the effort of a wooden element is determined, apart from the strength characteristics, by the static diagrams of the shaped structure, the system and value of standard interactions, boundary (support) conditions and the physical properties of the material (modulus of elasticity) occurring in constitutive relationships.

Static analysis leads to obtaining internal forces and the state of stresses, and then, taking into account the strength parameters, to verify the weight-bearing capacity. The limit states of the structure are controlled by comparing the obtained stresses with the strength parameters. Ultimate limit states also include the control of the ultimate curvature at which the first crack appears. This type of limit state is relevant for pre-bent structures. The boundary curvature can be determined analytically on the basis of the bending formula which makes the boundary curvature of a bent element dependent on the bending strength given in the Eurocode $\sigma_{cr} = f_m$ ⁷:

$$\sigma_{cr} = \frac{M \cdot z}{I}, \text{ gdzie } M = \kappa \cdot EI$$

The above information is the basis for the analysis of bionic architectural forms built of wood. Very often, especially in the case of atypical structures, standard material databases are supplemented with experimental tests.

3. Selected methods of modeling wooden structures – static analysis and calculation models

Contemporary trends in architecture are focused on the interdisciplinarity of the design

process. This is followed by digital tools for cross-industry cooperation. Depending on the adopted method of shaping the form, the processes of its structural optimization are planned. Analytical methods of designing objects shaped from wood are discussed below.

3.1. Linear analysis

The most commonly used method of static analysis today is the *linear Finite Element Method, FEM*⁸. Computational models prepared by structural engineers assume geometry designed by an architect, which is now created using more and more advanced digital tools. Using the *FEM* method, analyzes can be performed without the so-called second and third order effects characteristic of nonlinear analyses. In a linear analysis, a linear relationship between the stress state of the structure and the state of deformation is assumed. The *FEM* method, popular among structural engineers, allows for the determination of internal forces in the structure, automated control of the *Limit State Analysis (LSL)* and *Serviceability Limit State (SLS)* in accordance with the rules contained in the *PN-EN 1990:2004. Eurocode – Fundamentals of structural design*⁹. The calculation software that uses *FEM* popular on the European market has built-in modules for the verification of standard strength formulas. These programs include *Autodesk Robot Structural Analysis* by Autodesk, *RFEM6* by Dlubal Software, or the *SCIA Engineer Suite* by Nemetchek. The automatic process of standard verification of individual structural elements comes down to the determination of several initial parameters, such as its length, the lateral and medial buckling model, the influence of knots (imperfections), and, e.g. moisture level under operating conditions.

A more complicated process is the analysis of nodes, where, as a rule, material failure

⁷ E. Adiels et al., *Design, fabrication and assembly of a geodesic gridshell in a student workshop*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", ed. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018, p. 2–3, 5.

⁸ A.M. Bauer et al., *Software Approaches for the Design and Simulation of Bending Active Systems*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", ed. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018, p. 1–2.

⁹ Terms derived from the English version of the Eurocode 5.

occurs in timber structures. Popular structural design packages have relatively little node analysis capability, limited to the typical nodes commonly used in timber structures. Joinery (structural nodes) is modeled individually, very often in applications other than the program in which the analysis of the entire structural system was performed. However, designers also use the *FEM* method when analyzing nodes. Shell or solid models of structural nodes constructed for this purpose provide the designer with information on the state of stresses present in individual elements making up a structural node.

Despite ignoring second- or third-order effects, the *FEM* method can be used for very sophisticated structures. *FEM* analyses are used for structures, which due to the negligible influence of deformation on internal forces, do not require nonlinear analyses. An example of a timber structure analyzed with the help of *FEM* is the Treet building in Bergen (Norway) (Fig. 1). The building was built in 2015 as a result of cooperation between the Artec architectural office and SWECO, with the support of a research team from the Norwegian University of Science and Technology (NTNU in Trondheim)¹⁰. The framework of the 14-storey building with a structure height of 52.8 m is made up of prefabricated panels made in the CLT technology. The structure analysis was carried out on Robot Structural Analysis Professional 2013. Thanks to the detailed model and optimized logistics, the assembly of individual prefabricated modules of the building was extremely efficient and, which deserves special recognition, also very accurate. It is worth mentioning that the maximum deviation of the assembled structure for this tall building was only 3 mm.

3.2. Geometric nonlinear analysis

Linear *FEM* analysis methods do not always give a correct picture of the behavior of the

structure. During the analysis of structures – both core and shell – more advanced methods are often required, taking into account the non-linearity of the processes occurring during the structure's operation. The non-linearities occur when the structure is characterized by large deformations, resulting in the appearance of *second-order effects* or *third-order effects*. The methods used in nonlinear analyses include the *P-Delta method* and the *Large Displacements Analysis* method. The *P-Delta* (second-order effects) analysis takes into account the change in the stiffness of the bar element depending on the longitudinal forces, while the *Large Displacements Analysis* method takes into account the third-order effects, i.e. the appearance of additional forces depending on the deformation of the structure¹¹. Nonlinear methods will be applicable wherever there are significant deformations in the structure that cannot be ignored in the static analysis. This type of analysis will be necessary in the case of structural systems which include membrane, tension or cable elements. Such elements often complement timber structures and function as bracing or prestressing tendons.

3.3. Form Finding

The *Form Finding* method has been known by this name since the beginning of the 20th century, but in practice it has been known and used for a long time before that, for example by Antoni Gaudi. The chain models supporting the way Gaudi's extraordinary buildings are shaped show the beauty of the logic of structural forms. Nevertheless, building spatial physical models is a difficult and laborious task. An example of an early analog application of the *Form Finding* method is the Multihalle construction, designed by Otto Frei, in Manheim, Germany in 1975 (Fig. 2a, 2b, 2c). The object was shaped by analogy to strength tests carried out on a physical model made on a 1:100 scale. The static analysis was

¹⁰ R. Abrahamsen, K. Malo, M. Bjertnæs, *Some structural design issues of the 14-storey timber framed building "Treet" in Norway*, "European Journal of Wood and Wood Products", Vol. 74, 01/05/2016, p. 407–423.

¹¹ Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021, <https://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2021/PLK/?guid=GUID-FB3C86D3-0E30-43A6-82D6-6C50F429FA0D> (access.30.11.2021).

carried out in the 1970s on the basis of one of the methods of *Form Finding*, based on the *Nonlinear Force Density Method NFD*. The final form of the object was designed by Klaus Linkwitz and his colleagues, who used stereographic analysis to optimize the shape.

The model of the covering made by the designers was used not only for static analysis, but was also useful for removing singularities (smoothing) from the surface of the outer shell of the entire structure¹². The roofing characterized above is an example of an effective structure that inspires designers who use *Form Finding* today with the use of digital computational models. On one hand, the very process of modeling and shaping the structure in this example is interesting, on the other hand, we have the admirable use of slender wooden slats to build a load-bearing shell. This solution is in line with the most current and important trends in sustainable architecture. The Multihalle has a roof span of over 60 m with a low covering weight – about 14 kg/m²¹³.

An example of a more recent project using *Form Finding* is the Center Pompidou facility built in Metz, France in 2010. The authors of the architectural design are Shigeru Ban and Jean de Gastines (Fig. 3a, 3b, 3c). The design of the structure was created in the Ove Arup office with the participation of Herman Blumer. Noteworthy in this example are the double-curved elements of glued laminated timber used to shape the roof covering with an area of approx. 8,500 m² with construction supports spanning up to 40 m¹⁴. The

methods supporting the digital process of *Form Finding* include the above-mentioned *Geometric Stiffness* method (of the *FDM* variety – the *Nonlinear Force Density* method) and a method from the *Dynamic Equilibrium*¹⁵ family, called the *Dynamic Relaxation (DR)*¹⁶ method. Computer-driven algorithms are a modern tool for searching for a form in which there is a balance of forces for a deformed structural system. Thanks to such analyses, it is possible to determine the initial configuration of structural elements (before applying the effects occurring during the operation of the object), as well as to perform an analysis of the deformed structure after applying loads. *Form Finding* analyses are of particular importance when studying flaccid elements like structural timber. Pre-bent structural elements of glued laminated timber slats or coatings take shapes suitable for their purpose. At a relatively low Young's modulus, wood is a deformable material and thus easily preforms with a relatively low amount of energy required to impart the desired curvature.

An example of such application (where the Dynamic Relaxation method was used) is The Downland Gridshell at the Weald and Downland Open Air Museum, designed by Edward Cullinan and engineers from Buro Happold, commissioned in 2002 in Sussex, Great Britain. The structure made of oak slats creates triangular panels formed by slats running diagonally in two opposite directions and slats running in the longitudinal direction. The longitudinal slats constitute a substructure for the outer fabric cover and at the same time constitute the structural concentration, creating triangular divisions of the structural mesh. The Downland Gridshell structure does

¹² J.M. Songel, *Sustainability lessons from vernacular architecture in Frei Otto's work: tents and gridshells*, "The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences", Vol. XLIV-M-1-2020, p. 239.

¹³ D. Wendland, *Model-based form finding processes: Free forms in structural and architectural design*, in: E. Torroja: *from the philosophy of structures to the art and science of building: international Seminar*, Politecnico di Torino, ed. F. Levi, M.A. Chiorino, C.B. Cesari, Milano 2003.

¹⁴ T. Schwinn, *Tobias Schwinn in conversation with Holzbau Amann and Müllerblaustein*, in: *Advancing Wood Architecture. A computational approach*, ed. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2016, p. 187–189.

¹⁵ D. Veenendaal, P. Block, *An overview and comparison of structural form finding methods for general networks*, "International Journal of Solids and Structures", Vol. 49, 2012, Issue 26, p. 3741–3753.

¹⁶ D'Amico B et al., *Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure*, "Structures", Vol. 3, 2015, p. 5.

not cover such impressive spans as the Multihalle in Mannheim, because here the beam span has reached 15.2 m, but it is an interesting example of the use of structural timber as a lightweight structural frame, pre-tensioned by giving the elements appropriate curves¹⁷.

4. Production automation

For modern wooden structures, an important aspect is the automation process – both for architectural and structural modeling and the production process itself. The use of robots in subtractive or additive manufacturing is becoming more and more common¹⁸. Subtractive methods are characterized by the fact that during the manufacturing process, material is subtracted that does not participate in the work of the structure or participates in an ineffective manner. Reduction of unnecessary material can be carried out by properly programmed machines (machine tools), which cut out redundant material rejected by the designer in the process of design optimization. The additive method has become very popular in the era of 3D printers, which add the desired material by enlarging its cross-section or adding entire elements. With regard to wooden structures, the additive method also consists in adding whole segments of the structure in the form of prefabricated elements prepared in advance.

An example of the use of digitized fabrication can be the 2016 implementation of The Sequential Roof, covering the new building of the Institute of Technology in Architecture of the ETH University in Zurich. The creation of the cover structure was preceded by analyses of the parameterized geometry of the structure. The parameterization of the roof geometry was helpful in optimizing the shape of the structure in order to obtain material savings in the selection of the

cross-section of the slats, simplify and maximize the uniformity of the patterns of nodes (joinery), as well as in terms of adjusting the shape of the roof to the configuration of the lighting and fire protection systems used. Fully automated production methods were used to prefabricate all elements of the structure consisting of 168 girders with a span of 14.70 m. In this way, an area of 2,308 m² was covered with one roof¹⁹. The manufacturing and assembly process is shown in Fig. 4a, 4b, and 4c.

An interesting example in the field of fabrication with the use of structural timber is also the latest construction of the Pavilion livMatS in the Botanical Garden in Freiburg in 2021, designed by Achim Menges (ICD, University of Stuttgart) and Jan Knippers (ITKE, University of Stuttgart), with the support of the Deutsche Bundesstiftung Umwelt, ExolonGroup²⁰. The structure of the pavilion was inspired by the structure of the saguaro cactus and the fig opuntia, by using an analogy to the shell structure of plants, reinforced with layered fibers. As a building material, the authors of the project used flax fibers, which were robotically woven onto steel frames. After removing from the frames, repeatable structural modules were obtained in the form of membranes formed from woven flax fiber rods. The design of the structure required basic research in the field of strength of unusual materials. Prior to implementation, the tests were performed on prefabricated modules of the structure. Despite the fact that the facility is relatively small (approximately 48 m²), the designers showed a great knowledge of interdisciplinary design and used advanced numerical techniques. The process of building the facility was preceded by thorough studies, including experimental tests of the material

¹⁷ Downland Gridshell, <https://www.wealddown.co.uk/buildings/downland-gridshell/> (access 30.11.2021).

¹⁸ E. Gawell, A. Stefańska, *Idea fabrykacji elementów strukturalnych w kształtowaniu współczesnych pawilonów*, „Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula”, 2018, no. 61(4), p. 82–92.

¹⁹ J. Willmann, F. Gramazio, M. Kohler, *New paradigms of the automatic: robotic timber construction in architecture*, in: *Advancing Wood Architecture*, ed. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2017, p. 24–26.

²⁰ livMatS Pavilion, <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/livMatS-Pavilion/> (access 30.11.2021).

used in terms of its strength parameters. The directions of fiber arrangement, fiber density and quantity in individual layers were strictly adjusted to the numerically determined directions and values of internal forces. The construction design of the pavilion was adapted to the requirements of German design standards, taking into account the climatic code interactions, and completed with fully robotized prefabrication of the construction modules, implementing the additive fabrication method (Fig. 5 a, b, c, d).

4. Discussion

Architectural design is more and more often a complex process of making forms emerge as a result of digital processing related to modeling, analysis and production. It is, among others, the result of dynamic technical and technological development, as well as the digitization of design and research tools. Further progress in this area will simultaneously provide new opportunities and challenges in construction and building.

The interdisciplinary nature of building structures is nothing new and surprising. However, due to the implementation possibilities provided by formative technologies, this process can take place without human participation (self-steering machines). The fabrication of structural elements or entire objects enables the production of irregular and complex forms, but at the same time requires the execution of in-depth structural simulations preceding the implementation stage. The answer to such developing trends in contemporary architecture is the idea of “from file to factory”, referring to the smooth connection of the design process with production. A characteristic feature of the spatial forms that result from such activities is the use of digital design and manufacturing strategies based on computational concepts. This makes engineering sciences an essential element of creative design searches. In relation to the discussed topic of the use of structural timber in architecture, several important issues should be additionally taken into

account. One of them is the nature of the material, which on one hand is an undeniable advantage, and on the other, an engineering challenge in the field of structural analysis. The problem is that the raw material is sensitive to growth factors, the structure of each element is different, and the digital databases for calculations (with approximate strength parameters) are not always complete. In this context, cooperation between designers, technologists, material scientists, etc. must be sustained, developed and supported at the level of basic research and implementation.

5. Summary

Improving the tools for modeling structural forms of wood is an indispensable activity in shaping optimal solutions in contemporary architecture. On one hand, following the trend of pro-environmental ideas, designers are more and more often inspired by construction technologies characterized by low-emission material processing processes. On the other hand, it is important to minimize the energy losses built into the facility, also resulting from the process of its operation. This forces the development and improvement of the known tools for the optimal shaping of structures and building elements. Following this, progress can be observed in the construction sector. Digitization as well as robotization of implementation processes inspire to shape not only increasingly interesting forms, but also drive innovative material technologies that effectively use the natural properties of wood.

The above-mentioned changes, dynamically taking place in modern construction, make cooperation at the meeting point of various disciplines involved in the process of creating architecture more and more important. It is not just about the design process that initially combines elements of engineering and humanities. Particular attention should also be paid to the sphere of science and the implementation of innovative solutions for construction, preceded by the development of basic research.

Bibliography

- Abrahamsen R., Malo K., Bjertnæs M., *Some structural design issues of the 14-storey timber framed building "Treet" in Norway*, "European Journal of Wood and Wood Products", Vol. 74, 01/05/2016
- Adiels E., Bencini N., Brandt-Olsen C., Fisher A., Näslund I., Kotani R., Poulsen E., Safari P., Williams C.J.K., *Design, fabrication and assembly of a geodesic gridshell in a student workshop*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", ed. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018
- Bauer A. M., Längst P., La Magna R., Lienhard J., Piker D., Quinn G., Gengnagel C., Bletzing K., *Exploring Software Approaches for the Design and Simulation of Bending Active Systems*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", ed. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018
- D'Amico B., Kermani A., Zhang H., Pugnale A., Colabella S., Pone S., *Timber gridshells: for general networks*, "International Journal of Solids and Structures", 2012, Vol. 49, Issue 26
- D'Amico B., Kermani A., Zhang H., Pugnale A., Colabella S., Pone S., *Numerical simulation, design and construction of a full scale structure*, "Structures", 2015, Vol. 3
- Gawell E., Nowak A., Rokicki W., *Searching for Bionics Structural Forms Optimization*, "IOP Conference Series: Materials Science and Engineering", 2019, no. 471
- Gawell E., *Optimal design of wooden pavilion gridshell structures in the context of architectural and structural collaboration*, in: *PROJECTIONS: Proceedings of the 26th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2021)*, ed. A. Globa, J. van Ameijde, A. Fingrut, Vol. 1, Hong-Kong 2021
- Gawell E., Stefańska A., *Idea fabrykacji elementów strukturalnych w kształtowaniu współczesnych pawilonów*, „Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula”, 2018, no. 61(4)
- Kotwica J., *Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym*, Warszawa 2011
- Lienhard J., *Bending Active Structures. Form – finding strategies using elastic deformation in static and kinematic systems and the structural potentials therein*, Stuttgart 2014
- Nabaei S.S., Baverel O., Weinand Y., *Form-Finding of Interlaced Space Structures*. in: *11th World Congress on Computational Mechanics*, ed. E. Onate, J. Oliver, A. Huerta, Barcelona 2014
- Nabei S., Baverel O., Weinand Y., *A hybrid simulation workflow for timber fabric structures*, in: *Advancing Wood Architecture. A computational approach*, ed. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2016
- Songel J. M., *Sustainability lessons from vernacular architecture in Frei Otto's work: tents and gridshells*, "The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences", Vol. XLIV-M-1-2020
- Schwinn T., *Tobias Schwinn in conversation with Holzbau Amann and Müllerblaustein*, in: *Advancing Wood Architecture. A computational approach*, ed. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2016
- Veenendaal D., Block P., *An overview and comparison of structural form finding methods*, "International Journal of Solids and Structures", 2012, Vol. 49, Issue 26
- Wagner H., *Flat sheet metal girders with very thin metal web, Part I, General theories and assumption*, Washington 1931, p. 200–207
- Wendland D., *Model-based form finding processes: Free forms in structural and architectural design*, in: *E. Torroja: from the philosophy of structures to the art and science of building: international Seminar, Politecnico di Torino*, ed. F. Levi, M.A. Chiorino, C.B. Cesari, Milano 2003
- Willmann J., Gramazio F., Kohler M., *New paradigms of the automatic: robotic timber construction in architecture*, in: *Advancing Wood Architecture*, ed. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2017