

dr inż. Ireneusz Cała¹⁾
ORCID: 0000-0002-5266-7128

Hybrid structural systems for timber high-rise buildings

Hybrydowe systemy konstrukcyjne budynków wysokich z drewna

DOI: 10.15199/33.2024.10.07

Abstract. The article attempts to present issues related to shaping the structure of high-rise buildings made of massive timber. The construction systems of skyscrapers are constantly undergoing modifications, mainly related to the growing technological possibilities and the development of new, innovative methods of constructing buildings. The article characterizes the basic types of hybrid structures, taking into account various combinations of construction materials. Based on the analyzed implementations, it was shown that hybrid structures use the most advantageous strength features of construction materials that meet a number of construction and technical requirements, including fire protection.

Keywords: glued laminated timber; tall building; construction system; hybrid structures.

Streszczenie. W artykule podjęto próbę przybliżenia zagadnień dotyczących kształtowania konstrukcji budynków wysokich z drewna klejonego. Systemy konstrukcyjne ulegają nieustannym modyfikacjom związanym przede wszystkim z coraz większymi możliwościami technologicznymi oraz z rozwojem nowych, innowacyjnych metod wznoszenia budynków. Scharakteryzowano główne rodzaje ustrojów hybrydowych, uwzględniając różne łączenie materiałów konstrukcyjnych. Na podstawie przeanalizowanych realizacji wykazano, iż w konstrukcjach hybrydowych wykorzystuje się najbardziej korzystne cechy wytrzymałościowe materiałów konstrukcyjnych, spełniających wiele wymagań konstrukcyjnych i technicznych, w tym przeciwpożarowych.

Słowa kluczowe: drewno klejone; budynek wysoki; system konstrukcyjny; konstrukcje hybrydowe.

Glued laminated timber structures, already became an alternative to tall reinforced concrete and steel buildings in the 20th century. Evolving technology and new technical solutions allow increasingly interesting spatial forms of buildings to be designed and greater heights to be reached. Of the techniques currently used to join timber fragments together to produce a component with uniform properties, the most important are: CLT – *Cross-Laminated Timber*, GLT – *Glued-Laminated Timber* (GLT), LVL – *Laminated Veneer Lumber*) and NLT – *Nail-Laminated Timber*) [1].

In the tallest buildings built to date, hybrid systems are often used, which combine the design features of elements made of different materials. Fully timber designs are becoming increasingly rare and account for around 20% of all buildings. Among the tallest, more than half are timber-concrete buildings, and the collaboration of timber, reinforced concrete and steel is increasingly common [2]. It can take place at the level of individual structural elements (steel beam with a floor slab made of CLT), or as a collaboration of assemblies of elements (reinforced concrete core and timber frame). In the second case, the case is more related to mixed timber-concrete (TCC – *timber-concrete construction*), timber-steel (STC – *steel-timber construction*) or timber-concrete-steel systems. TCC solutions have better sound insulation compared to timber, especially at higher frequencies of vibration caused by imposed loads. It is often necessary to use floating floors or suspended ceilings, which significantly increase the acoustic performance of the partitions [3]. Structural systems for high-

konstrukcje z drewna klejonego stosowane w budynkach wysokich stały się już w XX wieku alternatywą dla wysokich budynków żelbetowych i stalowych. Ewolucja technologii i nowe rozwiązania techniczne pozwalają na projektowanie coraz ciekawszych form przestrzennych budynków oraz osiąganie dużej wysokości. Spośród stosowanych obecnie technik zespalania drewnianych fragmentów, w celu uzyskania elementów o jednolitych właściwościach, najważniejsze to: drewno klejone krzyżowo (ang. CLT – *Cross-Laminated Timber*), drewno klejone liniowo (ang. GLT – *Glued-Laminated Timber*), drewno fornirowane warstwowo (ang. LVL – *Laminated Veneer Lumber*) oraz drewno łączone gwoździami (ang. NLT – *Nail-Laminated Timber*) [1].

W najwyższych, zrealizowanych dotychczas, budynkach stosowane są często systemy hybrydowe, które łączą cechy konstrukcyjne elementów z różnych materiałów. Projekty wykonane w całości z drewna są coraz rzadsze i stanowią ok. 20% wszystkich budynków. Wśród najwyższych ponad połowa, to budynki drewniano-betonowe, a coraz częściej występuje współpraca drewna, żelbetu i stali [2]. Może się odbywać na poziomie poszczególnych elementów konstrukcyjnych (stalowa belka współpracująca z płytą stropową z CLT) lub zespołów elementów (żelbetowy trzon i drewniany szkielet budynku). W drugim przypadku mówimy raczej o systemach mieszanych drewniano-betonowych (ang. TCC – *timber-concrete construction*), drewniano-stalowych (ang. STC – *steel-concrete construction*) lub drewniano-betonowo-stalowych. Rozwiązania TCC charakteryzują się lepszą izolacyjnością akustyczną w porównaniu z drewnianymi, szczególnie przy dużych częstotliwościach drgań spowodowanych obciążeniami użytkowymi. Często konieczne jest zastosowanie podłóg pływających lub sufitów podwieszonych, które znacznie zwiększają parametry aku-

¹⁾ Warsaw University of Technology, Faculty of Architecture; ireneusz.cala@pw.edu.pl

-rise buildings are constantly evolving, mainly due to increasing technological possibilities and the development of innovative construction methods. Due to the variety of material solutions, the basic hybrid systems are described below.

Purpose and working methods

The purpose of this study is to review the various technical solutions for multi-storey timber buildings by limiting itself to the structural aspects related to the possibility of using hybrid structures. The study considered the 20 tallest buildings currently built worldwide (based on the CTBUH [4]). Buildings that are currently under construction are not included. On this basis, six basic hybrid systems were characterised, which include combinations such as timber with concrete, timber with steel or timber with concrete and steel. The article focuses on the basic load-bearing elements, which include columns, beams, trusses and bracing walls, as well as floor slabs.

The work was primarily based on published articles and books on timber structures, conference papers and speeches, master's and doctoral theses, and used project websites and databases: Thinkwood (<https://www.thinkwood.com>); Woodworks (<https://www.woodworks.org>); Woodsolutions (<https://www.woodsolutions.com.au>); Naturallywood (<https://www.naturallywood.com>) i BSI (<https://bsiglobalmasstimberdatabase.com>).

Characteristics of hybrid building systems

The use of structural timber is limited to the above-ground storeys of buildings only. The underground storeys and foundations, and often the lowest storeys of the building, are constructed in reinforced concrete and, together with the underground part, form the so-called podium on which timber structures are erected. In many buildings, a reinforced concrete core is used to accommodate vertical communication as well as installation shafts and technical rooms. The use of a reinforced concrete core is dictated primarily by the need to ensure spatial rigidity and reduce deflection (due to horizontal wind forces), as well as the fire resistance of the element, which is the main vertical escape route in a high rise building, being easier to achieve in reinforced concrete.

Hybrid buildings can also include timber structures (Figure 1a) made of different types of timber, e.g. glued-laminated timber (GLT) and cross-laminated timber (CLT) or laminated veneer timber (LVL).

For buildings up to 100 m high, timber/reinforced concrete structures are the most commonly used, which include structures with a reinforced concrete core and timber frame or timber wall system (Figure 1b) and buildings with a reinforced concrete core and podium (Figure 1c). It is also possible to use composite reinforced concrete and timber slabs and reinforced concrete beams and a reinforced concrete core.

Possible structures include a timber/reinforced concrete/steel system using a reinforced concrete core and steel-timber structural frame (Figure 1d) and a reinforced concrete core, timber-

styczne przegród [3]. Systemy konstrukcyjne budynków wysokich ulegają nieustannym modyfikacjom związanym przede wszystkim z coraz większymi możliwościami technologicznymi oraz z rozwojem innowacyjnych metod wznoszenia budynków. Ze względu na różnorodność rozwiązań materiałowych scharakteryzowano podstawowe ustroje hybrydowe.

Cel i metody pracy

Celem pracy jest przegląd różnych rozwiązań technicznych wielokondygnacyjnych budynków drewnianych, ograniczając się jedynie do aspektów konstrukcyjnych związanych z możliwością użycia ustrojów hybrydowych. W badaniach wzięto pod uwagę 20 najwyższych obecnie budynków oddanych do użytkowania na świecie, na podstawie CTBUH [4]. Nie uwzględniono budynków, które są w realizacji. Na tej podstawie scharakteryzowano 6 podstawowych układów hybrydowych, które obejmują kombinacje takie, jak drewno z betonem, drewno ze stalą lub drewno z betonem i stalą. W artykule skupiono się na podstawowych elementach nośnych, do których zaliczają się słupy, belki, kratownice i ściany usztywniające oraz płyty stropowe.

W pracy bazowano przede wszystkim na opublikowanych artykułach i książkach o konstrukcjach drewnianych, artykułach i wystąpieniach konferencyjnych, pracach magisterskich i doktorskich oraz korzystano ze stron internetowych dotyczących projektów: Thinkwood (<https://www.thinkwood.com>); Woodworks (<https://www.woodworks.org>); Woodsolutions (<https://www.woodsolutions.com.au>); Naturallywood (<https://www.naturallywood.com>) i BSI (<https://bsiglobalmasstimberdatabase.com>).

Charakterystyka ustrojów hybrydowych budynków

Użycie drewna konstrukcyjnego ogranicza się wyłącznie do kondygnacji nadziemnych budynków. Kondygnacje podziemne oraz fundamenty, a często również najniższe kondygnacje budynku wykonywane są w konstrukcji żelbetowej i razem z częścią podziemną tworzą tzw. podium, na którym wznoszone są konstrukcje drewniane. W wielu budynkach stosowany jest żelbetowy trzon, mieszczący komunikację pionową oraz szachty instalacyjne i pomieszczenia techniczne. Zastosowanie żelbetowego trzonu podyktowane jest przede wszystkim koniecznością zapewnienia sztywności przestrzennej oraz zmniejszenia wychyleń (ze względu na siły poziome wiatru), jak również łatwiejszą do uzyskania odpornością ogniową tego elementu, który jest główną pionową drogą ewakuacyjną w budynku wysokim. Do budynków hybrydowych można zaliczyć także konstrukcje drewniane (rysunek 1a) wykonane z różnych rodzajów drewna, np. klejonego warstwowo (GLT), płyt klejonych krzyżowo (CLT) czy fornirowanych (LVL).

W budynkach o wysokości do 100 m najczęściej stosowane są ustroje drewniano-żelbetowe, wśród których wyróżnić należy konstrukcje z żelbetowym trzonem i drewnianym szkieletem lub drewnianym układem ścianowym (rysunek 1b) oraz budynki z żelbetowym trzonem i podium (rysunek 1c). Możliwe jest też zastosowanie zespolonych płyt żelbetowo-drewnianych i belek żelbetowych oraz żelbetowego trzonu. Możliwe są ustroje

-steel podium and timber frame above (Figure 1e). There are also superstructures where a reinforced concrete podium is combined with a reinforced concrete core and a timber-steel frame. The least frequent use is of timber/steel systems covering the entire height of the building (Figure 1f) and only in the podium section (Figure 1g). There are buildings constructed as timber-framed with walls and the only steel tendons that are responsible for the spatial rigidity of the building.

A full systematisation of structural systems is contained in papers [2, 3], the first of which covers 350 projects completed from 2000 to 2021.

Among the 20 currently tallest solid timber high rise buildings (CLT+GLT) in which hybrid structures were used (Table 1), timber/reinforced concrete buildings are the most common (14 structures). Timber

je drewniano-żelbetowo-stalowe, w których stosuje się żelbetowe trzony i stalowo-drewniany szkielet konstrukcyjny (rysunek 1d) oraz żelbetowy trzon, drewniano-stalowe podium i drewniany szkielet powyżej (rysunek 1e). Zdarzają się również nadbudowy, gdzie żelbetowe podium łączy się z żelbetowym trzonem i drewniano-stalowym szkieletem. Najczęściej stosowane są ustroje drewniano-stalowe obejmujące całą wysokość budynku (rysunek 1f) oraz tylko w części podium (rysunek 1g). Są

budynki zbudowane jako drewniane o konstrukcji ścianowej, a stalowe są tylko ciągną, które odpowiadają za sztywność przestrzenną obiektu. Pełną systematykę systemów konstrukcyjnych zawierają prace [2, 3], z których pierwsza obejmuje 350 realizacji z lat 2000 – 2021.

Wśród dwudziestu najwyższych obecnie budynków wysokich z drewna klejonego masywnego (CLT+GLT), w których użyto ustrojów hybrydowych (tabela 1), najczęściej wystę-

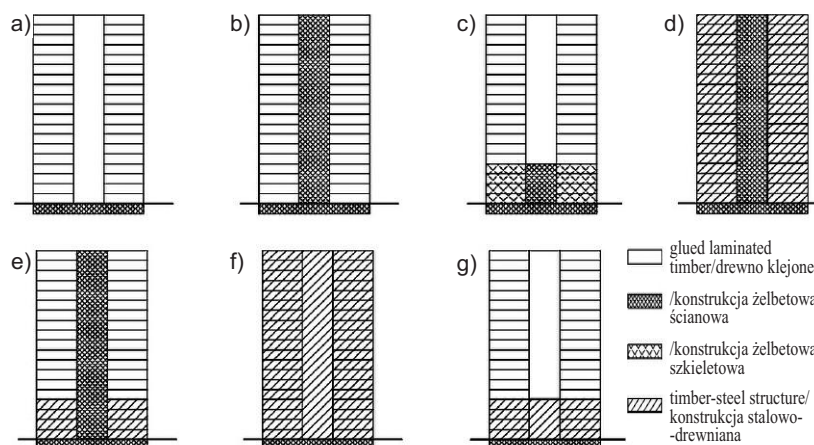


Fig. 1. Structural systems of wooden buildings up to 100.0 m high: a) glued laminated timber structure; b) i c) timber-concrete structure; d) i e) timber-concrete-steel structure; f) i g) timber-steel structure

Rys. 1. Ustroje konstrukcyjne budynków z drewna do 100,0 m wysokości: a) konstrukcja z drewna klejonego; b) i c) konstrukcje drewniano-żelbetowe; d) i e) konstrukcje drewniano-żelbetowo-stalowe; f) i g) ustroje drewniano-stalowe

Table 1. The tallest buildings made of massive timber – hybrid system

Tabela 1. Najwyższe budynki z drewna klejonego masywnego – system hybrydowy

Item/Lp.	Name of building/Nazwa budynku	City/Country/Miasto/państwo	Height/storesys[m/qty.]/Wysokość/kondygnacje [m/ilość]	Technology/Technologia
1.	Ascent Tower	Milwaukee/USA	86,6/25	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
2.	HoHo	Vienna/Austria/Wiedeń/Austria	84,0/24	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
3.	Haut	Amsterdam/Netherlands	73,0/22	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
4.	Sara Kulturhus	Skelleftea/Sweden/Szwecja	72,8/20	timber/steel/drewno/stal
5.	De Karel Doorman	Rotterdam/The Netherlands	70,5/22	timber/reinforced concrete/steel/drewno/żelbet/stal
6.	55 Soutbank	Melbourne/Australia	69,7/19	timber/reinforced concrete/steel/ drewno/żelbet/stal
7.	Roots Tower	Hamburg/Germany/Hamburg/Niemcy	65,0/19	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
8.	Wellington	Melbourne/Australia	65,0/15	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
9.	Abro	Risch-Rotkreuz/Switzerland/Szwajcaria	60,0/15	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
10.	Brock Commons	Vancouver/Canada/Vancouver/Kanada	57,9/18	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
11.	Eunoia Junior College	Bishan/Singapore/Bishan/Singapur	56,0/12	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
12.	Hyperion	Bordeaux/France/Bordeaux/Francja	55,0/16	timber/reinforced concrete/steel/drewno/żelbet/stal
13.	Rundeskogen Hus B	Sandnes /Norway/Sandnes/Norwegia	54,0/16	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
14.	Albizzia	Lyon/France/Lyon/Francja	53,0/17	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
15.	Geelong Civic Precinct	Greater Geelong/Australia	52,0/12	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
16.	Lighthouse Joensuu	Joensuu/Finland/Finlandia	48,0/14	timber/steel/drewno/stal
17.	2150 Keith Drive	Vancouver/Canada/Vancouver/Kanada	45,0/10	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet
18.	Tallwood I	Langford/Canada/Langford/Kanada	41,0/12	timber/steel/drewno/stal
19.	T3 Sterling Road Bldg. 5A	Toronto/Canada/Toronto/Kanada	39,8/8	timber/steel/drewno/stal
20.	INTRO – Residential Bldg.	Cleveland/USA	39,6/9	timber/reinforced concrete/drewno/żelbet

and steel buildings are the second most numerous (4 structures) and there are only 3 buildings using timber, reinforced concrete and steel. The three tallest buildings (Ascent Tower, Hoho and Haut) are of timber-reinforced concrete construction.

Examples of hybrid building implementation

Ascent Tower in Milwaukee designed by Korb & Associates Architects (construction: Thornton Thomassetti) was commissioned in 2021. The building consists of a 7-level parking podium and 18 residential floors, including a covered roof terrace. The podium and underground section was constructed in a reinforced concrete frame structure. The spatial stiffness and safe evacuation of the building during a fire are ensured by the load-bearing walls of two reinforced concrete cores running the full height of the building. The 5.2 x 7.6 m column grid used in the residential section was too dense for the car park storeys, necessitating the use of a prestressed transfer plate (Figure 2) to allow the columns to be rearranged.

The residential floors are constructed in timber frame construction with glue-laminated timber beams and columns (GLT) and cross-laminated timber (CLT) floor slabs. Five-layer 18 cm thick CLT panels were used, and in the areas with heavier loads (communication, social areas, roof) seven-layer 24 cm thick panels. The finishing layers use a gypsum concrete screed over acoustic matting. The screed provides additional fire protection for the ceiling.

As part of the design work, fire resistance tests were carried out on the main structural elements. The ceilings were tested at KLH Massivholz GmbH in Austria, the steel joints at the Framework team in collaboration with Oregon State and Portland Universities and the timber frame components (beams and columns) at the USDA Forest Products Laboratory (FPL) in Madison, Wisconsin. The designed layout of the floor layers provided a two-hour fire resistance for the steel connections (timber structure sheathing), while the main frame structure (GLT) provided a three-hour fire resistance, in accordance with ANSI/APA PRG 320 [5, 6].

A different type of timber-concrete hybrid structure was used by RLP Rüdiger Lainer + Partner designers in the **HoHo Vienna Tower building** (Figure 3). The building consists of three interconnected blocks with

pięć budynki drewniano-żelbetowe (14 obiektów). Drugie pod względem liczebności są budynki drewniano-stalowe (4 obiekty), a budynki, w których zastosowano drewno, żelbet i stal, są tylko 3. Trzy najwyższe budynki (Ascent Tower, Hoho i Haut) mają konstrukcję drewniano-żelbetową.

Przykłady realizacji budynków hybrydowych

Ascent Tower w Milwaukee zaprojektowany przez Korb & Associates Architects (konstrukcja: Thornton Thomassetti) został oddany do użytkowania w 2021 r. Budynek składa się z siedmiopiętrowego podium parkingowego i osiemnastu kondygnacji mieszkalnych, w tym zadaszonego tarasu na dachu. Podium i część podziemna wykonane zostały w konstrukcji żelbetowej, szkieletowej. Sztywność przestrzenną i bezpieczną ewakuację budynku w czasie pożaru zapewniają ściany nośne dwóch żelbetowych trzonów, biegnących na całej wysokości budynku. Zastosowana w części mieszkaniowej siatka słupów 5,2 x 7,6 m – była zbyt gęsta w przypadku kondygnacji parkingowych, co wymagało zastosowania sprężonej płyty transferowej (rysunek 2), aby umożliwić zmianę układu słupów.

Kondygnacje mieszkalne zbudowane są w konstrukcji szkieletowej z belkami i słupami z drewna klejonego warstwowo (GLT) oraz płytami stropowymi z drewna klejonego krzyżowo (CLT). Wykorzystano pięciowarstwowe płyty CLT o grubości 18 cm, oraz w obszarach o większym obciążeniu (komunikacja, pomieszczenia socjalne, dach) siedmiowarstwowe płyty o grubości 24 cm. W warstwach wykończeniowych zastosowano wylewkę z gipsobetonu na matach akustycznych. Wylewka stanowi dodatkowe zabezpieczenie przeciwpożarowe stropu.

W ramach prac projektowych przeprowadzono badania odporności ogniowej głównych elementów konstrukcyjnych. Stropy badano w austriackiej firmie KLH Massivholz GmbH, złącza stalowe w zespole Framework we współpracy z uniwersytetami stanu Oregon i Portland, a elementy ram drewnianych (belki i słupy) w Laboratorium Produktów Leśnych USDA (FPL) w Madison w stanie Wisconsin. Zaprojektowany układ warstw stropowych zapewniał dwugodzinną odporność ogniową połączeń stalowych (osłonięcie konstrukcją drewnianą), natomiast główna konstrukcja szkieletowa (GLT) trzygodzinną odporność ogniową, zgodnie z ANSI/APA PRG 320 [5, 6].

Odmiennej typ konstrukcji hybrydowej drewniano-betonowej zastosowali projektanci RLP Rüdiger Lainer + Partner w **budynku HoHo Vienna Tower** (rysunek 3). Budynek składa się z trzech połączonych ze sobą brył o różnej wysokości (9, 15 i 23

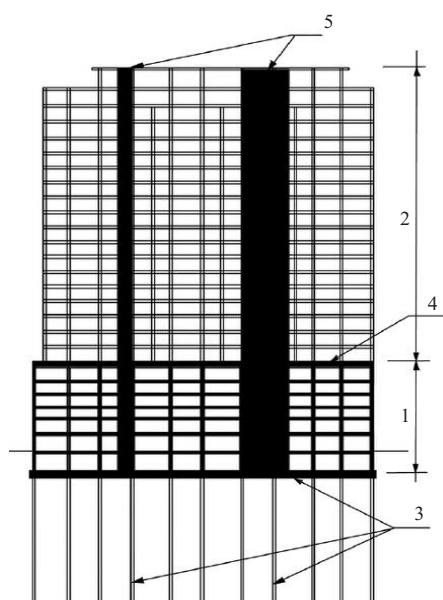


Fig. 2. Ascent Tower building in Milwaukee – hybrid structural system; 1 – reinforced concrete podium; 2 – timber frame structure; 3 – slab and foundation piles; 4 – compressed transfer plate; 5 – reinforced concrete communication cores

Fig. 1. Cata based on [5, 6]

Rys. 2. Budynek Ascent Tower w Milwaukee – hybrydowy system konstrukcyjny; 1 – podium żelbetowe; 2 – konstrukcja szkieletowa z drewna; 3 – płyta i pale fundamentowe; 4 – sprężona płyta transferowa; 5 – żelbetowe trzony komunikacyjne

Rys. 1. Cata na podstawie [5, 6]

different heights (9, 15 and 23 storeys). The core-frame structure consists of a reinforced concrete core and timber frame with perimeter reinforced concrete beams (Figure 3).

The building was constructed largely from prefabricated elements. The simple form of the lump allowed for the design of a modular structure and structural elements, apart from the monolithic core and the underground section.

The building uses prefabricated HVB floor slabs (CLT timber slab bonded to a reinforced concrete slab – Figure 4). The floor elements rest at the elevation line on precast reinforced concrete beams and on the inner core. Rigid floor plates are formed after concreting the cavities in the HVB floor elements [7, 8].

The jointing of the reinforced concrete beams and slabs is carried out by means of reinforcement – anchors that protrude from the beam and are connected to the slab reinforcement in the concrete overlay in the perimeter strip concreted on site. The interaction of the floor plates with the reinforced concrete core ensures the spatial rigidity of the building. The precast edge beams are also connected to the timber columns by rods glued into the timber and concreted into sleeves in the reinforced concrete beam.

The buildings presented earlier used a timber-framed structure working with a reinforced concrete core. In the **Haut building in Amsterdam**, Team V Architects used CLT timber wall construction. The ARUP construction office proposed the use of a reinforced concrete core, which provides spatial rigidity due to horizontal wind forces. The resulting hybrid structure is further reinforced with steel elements forming cantilevered balconies with a large overhang. The building has three reinforced concrete floors (two underground and the ground floor) providing a base for the timber structure. The ceilings in the building are a composite of 16 cm thick CLT timber panels and an 8 cm thick top layer of concrete (TCC). The main reason for choosing a TCC floor composite over a full CLT slab – are acoustic and static considerations. Heavier slabs incorporating concrete provide a better acoustic diaphragm and are much less susceptible

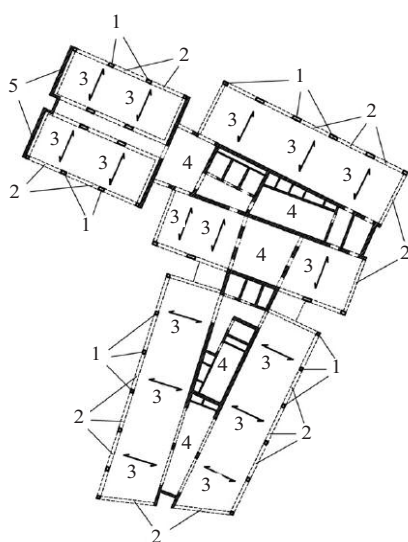


Fig. 3. Ho Ho Vienna Tower building – hybrid structural system – floor plan: 1 – timber pillars; 2 – reinforced concrete girder; 3 – composite timber-reinforced concrete slab – direction of work; 4 – reinforced concrete core; 5 – reinforced concrete walls [7, 8]

Fig. 1. Cala based on [7, 8]
 Rys. 3. Budynek HoHo Vienna Tower – hybrydowy system konstrukcyjny – rzut kondygnacji: 1 – słupy drewniane; 2 – żelbetowa belka obwodowa; 3 – płyty zespolone drewniano-żelbetowe – kierunek pracy; 4 – trzon żelbetowy; 5 – ściany żelbetowe [7, 8]

Rys. 1. Cala na podstawie [7, 8]

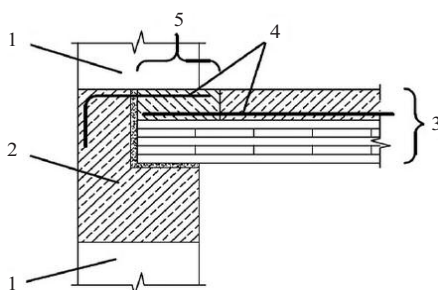


Fig. 4. HoHo Vienna Tower – principle of hybrid structures: 1 – wooden pillars; 2 – reinforced concrete girder; 3 – composite wood-reinforced concrete slab; 4 – composite reinforcement; 5 – over concrete (perimeter strip)

Fig. 1. Cala based on [7, 8]
 Rys. 4. HoHo Vienna Tower – zasada zespolenia konstrukcji: 1 – słupy drewniane; 2 – żelbetowa belka obwodowa; 3 – płyta zespolona drewniano-żelbetowa; 4 – zbrojenie zespalające; 5 – nadbeton (pas obwodowy)

Rys. 1. Cala na podstawie [7, 8]

kondygnacje). Trzonowo-szkieletowa konstrukcja składa się z żelbetowego trzonu i szkieletowej konstrukcji drewnianej z obwodowymi belkami żelbetowymi (rysunek 3).

Budynek został zbudowany w znacznym stopniu z elementów prefabrykowanych. Bryła o prostej formie pozwoliła na zmodułowanie struktury i elementów konstrukcyjnych, poza monolitycznym trzonem i częścią podziemną. W budynku zastosowano prefabrykowane płyty stropowe HVB (płyta z drewna CLT zespolona z płytą żelbetową – rysunek 4). Elementy stropowe opierają się w linii elewacji na prefabrykowanych belkach żelbetowych i na trzonie wewnętrznym. Szytne tarcze stropowe powstają po zabetonowaniu wnek w elementach stropowych HVB [7, 8].

Zespolenie żelbetowych belek i płyt odbywa się za pomocą zbrojenia – kotew wystających z belki, łączonych ze zbrojeniem płyt w nadbetonie w pasie obwodowym betonowanym na budowie. Współpraca tarcz stropowych z żelbetowym trzonem zapewnia sztywność przestrzenną budynku. Prefabrykowane belki krawędziowe łączone są również ze słupami drewnianymi za pomocą prętów wklejanych w drewno i zabetonowanych w tulejach w belce żelbetowej.

W prezentowanych wcześniej budynkach zastosowano konstrukcję szkieletową współpracującą z żelbetowym trzonem. W budynku **Haut w Amsterdamie** projektanci Team V Architects zastosowali konstrukcję ścianową z użyciem drewna CLT. Biuro konstrukcyjne ARUP zaproponowało zastosowanie trzonu żelbetowego, który zapewnia sztywność przestrzenną ze względu na siły poziome wiatru. Powstała struktura hybrydowa wzmocniona dodatkowo stalowymi elementami tworzącymi wspornikowe balkony o dużym wysięgu. Budynek ma trzy kondygnacje żelbetowe (dwie podziemne i parter) stanowiące cokoł konstrukcji drewnianej. Stropy w budynku są kompozytem płyt drewna CLT grubości 16 cm i wierzchniej warstwy betonu o grubości 8 cm (TCC). Powodem wyboru stropowego kompozytu TCC zamiast pełnej płyty CLT są względy akustyczne i statyczne.

Ciężkie płyty z udziałem betonu stanowią lepszą przepięgłą akustyczną niż płyty CLT i są znacznie mniej podatne na drgania wywołane ruchem kroków, ale również zapewniają większą stateczność na dynamiczne działanie wiatru. Wszędzie tam, gdzie krawędzie stropów nie są podparte ścianami nośnymi, zastosowane są podciągi z drewna klejonego (GLT) [9].

to vibration from footsteps, but also provide greater stability against dynamic wind effects. Wherever the edges of the ceilings are not supported by load-bearing walls, engineered timber beams (GLT) are used [9].

Balconies projecting beyond the outline of the main projection are fixed to the ceilings using steel brackets, with thermal breaks. In the wedge-shaped flats on the north side of the building, the ceilings are made of steel and concrete edge beams supported by two concrete columns [9].

An example of a much higher proportion of steel construction in a hybrid system is the **De Karel Doorman building in Rotterdam**. The specificity of the building lies in the fact that it is a 16-storey residential extension over the existing commercial building of the former Ter Meulen department store, which was built in the 1950s. The superstructure required the lightest structural system to minimise the impact on the existing historic buildings. Architects Bureau Van Tilburg Ibelings von Behr decided to use a hybrid system in which a reinforced concrete core works together with a steel frame structure and timber beam floors [10].

The original building was still extended by two storeys and the whole of the existing building has been restored and preserved. The superstructure consists of two towers (16 and 13 storeys), connected to each other in the middle section. To ensure the spatial rigidity of the towers and the existing section, two reinforced concrete cores were used in the rear of the existing building. The superstructure was based on the existing reinforced concrete columns and foundations, which were reinforced.

The steel structure of both towers consists of a steel frame with HEA sections and a timber beam floor (Figure 5). For transport and assembly reasons, 3-storey HE220B columns were used, connected to HE220A beams in the transverse direction (supporting single-span timber floors) and HE180A beams in the longitudinal direction. This steel structure is connected to two reinforced concrete cores at the rear of the building. The timber floor was made of Kerto S joists measuring 4 x 225 mm, spaced 600 mm and finished with 18 mm thick plywood. The top layer is a 55 mm thick anhydrite screed. The partition walls are made of 2 x 12.5 mm plasterboard with 90 mm mineral wool insulation [12].

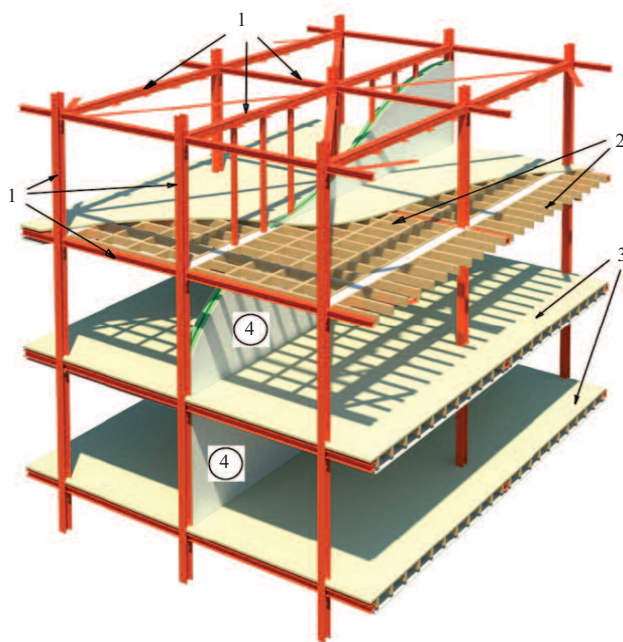


Fig. 5. De Karel Doorman building in Rotterdam – hybrid structural system – diagram: 1 – modular steel frames; 2 – timber ceiling beams; 3 – CLT ceiling slab; 4 – frame walls between apartments

Fig. 5. Budynek De Karel Doorman w Rotterdamie – hybrydowy system konstrukcyjny: 1 – rami stalowe modułowe; 2 – belki drewniane stropu; 3 – płyta stropowa CLT; 4 – szkieletowe ściany międzymieszkańowe)

Balkony, wystające poza obrys głównego rzutu, mocowane są do stropów za pomocą wsporników stalowych z przekładkami termicznymi. W mieszkaniach w kształcie klina, znajdujących się w północnej części budynku, stropy wykonane są ze stalowych i betonowych belek krawędziowych, wspartych na dwóch betonowych słupach [9].

Przykładem znacznie większego udziału konstrukcji stalowej w układzie hybrydowym jest budynek **De Karel Doorman w Rotterdamie**. Specyfika obiektu polega na tym, że jest to nadbudowa 16 kondygnacji mieszkalnych nad istniejącym budynkiem handlowym dawnego domu towarowego Ter Meulen, który powstał w latach pięćdziesiątych XX wieku. Nadbudowa wymagała zastosowania najłżejszego systemu konstrukcyjnego, żeby zminimalizować wpływ na istniejącą historyczną zabudowę. Architekci Bureau Van Tilburg Ibelings von Behr postanowili zastosować system hybrydowy, w którym żelbetowy trzon współpracuje ze stalową konstrukcją szkieletu i drewnianymi stropami belkowymi [10].

Pierwotny budynek był jeszcze rozbudowany o dwie kondygnacje i całość istniejącego obiektu została odrestaurowana i zachowana. Nadbudowę stanowią dwie wieże (16 i 13 kondygnacji), połączone ze sobą w części środkowej. Aby zapewnić sztywność przestrzenną wież i części istniejącej, zastosowano dwa rdzenie żelbetowe w tylnej części istniejącego obiektu. Nadbudowę oparto na istniejących słupach żelbetowych i fundamentach, które wzmocniono.

Konstrukcja stalowa obu wież składa się ze stalowego szkieletu ramowego z profili typu HEA oraz drewnianego stropu belkowego (rysunek 5). Ze względów transportowych i monta-

żowych zastosowano trzykondygnacyjne słupy HE220B, połączone z belkami HE220A w kierunku poprzecznym (podpierające jednoprzęsłowe stropy drewniane) i belkami HE180A w kierunku wzdłużnym. Ta stalowa konstrukcja jest połączona z dwoma żelbetowymi trzonami w tylnej części budynku. Drewniany strop został wykonany z legarów Kerto S o wymiarach 45 x 225 mm i rozstawie 600 mm, wykonanych sklejką o grubości 18 mm. Wierzchnią warstwę stanowi szlichta z anhydrytu o grubości 55 mm, a ściany działowe wykonane są z płyty gipsowo-kartonowej 2 x 12,5 mm z izolacją z wełny mineralnej o grubości 90 mm [12].

Niewielki ciężar elementów stropowych nie spełniał wymagań akustycznych i był podatny na drgania. W czasie budowy wprowadzono dodatkowe słupy w segmentach w liniach ścian działowych oraz zastosowano

The low weight of the floor elements, did not meet the acoustic requirements and was prone to vibration. During construction, additional columns were introduced in segments in the partition wall lines and a grid floor was used – adding a perpendicular beam system to the designed beam system. Between the two parts of the tower is a seven-storey middle section, sheltered by a glass wall with a public green recreation courtyard [13].

A different way for timber, reinforced concrete and steel structures to work together was proposed by architects Jean-Paul Viguier & Associés in the **Hyperion building in Bordeaux** (Figure 6). The structure of the 16-storey tower consists of a 3-storey podium (including basement) constructed in reinforced concrete and upper floors built as a steel and timber frame. A communicating core was also created in reinforced concrete construction to provide spatial rigidity to the building. The construction of the core and podium in reinforced concrete construction is conditioned by French fire regulations [14].

The skeleton of the building consists of steel and timber columns (steel I-sections bonded to timber columns), and engineered timber perimeter beams. The floor slabs are made as five-layer 20 cm thick CLT elements. The steel columns in the line of the external façade are additionally used to fix the construction of balconies with significant overhang. The columns have welded consoles (projecting beyond the outline of the timber column) for attaching the steel load-bearing beams of the balconies [15].

A completely different type of hybrid structure is the **timber/steel system**, without the contribution of reinforced concrete in the above-ground part of the building. The steel structure acts as bracing in the form of portal frames (Tallwood 1 in Canada) or tie-beams to prestress the timber wall structure (Lighthouse Joensuu in Finland).

Tallwood 1 (Figure 7) is a twelve-storey mass timber tower with mixed residential and commercial uses located in Langford, British Columbia, Canada. Designers Jack James Architecture and Aspect Structural Engineers used a concrete podium for the first service floor and two underground floors for parking. The remaining floors are built in a timber frameless system with GLT (columns) and CLT (ceilings and communicating core walls). The use of direct support

strop rusztowy, dokładając do projektowanego układu belek układ belek prostopadłych. Pomiędzy obiema częściami wieży znajduje się siedmiokondygnacyjna część środkowa, osłonięta szklaną ścianą z ogólnodostępnym zielonym dziedzińcem rekreacyjnym [13].

Inny sposób współpracy konstrukcji drewnianej, żelbetowej i stalowej zaproponowali architekci z Jean-Paul Viguier & Associés w **budynku Hyperion w Bordeaux** (rysunek 6). Konstrukcja szesnastopiętrowej wieży składa się z trzypiętrowego podium (wraz z podziemiem) wykonanego w konstrukcji żelbetowej oraz wyższych kondygnacji wybudowanych jako szkielet stalowo-drewniany. W konstrukcji żelbetowej powstał także trzon komunikacyjny, który zapewnia sztywność przestrzenną budynku. Wykonanie trzonu i podium w konstrukcji żelbetowej uwarunkowane jest francuskimi przepisami przeciwpożarowymi [14].

Szkielet budynku składa się ze słupów stalowo-drewnianych (dwuteowniki stalowe zespolone z drewnianymi słupami), oraz belek obwodowych z drewna klejonego. Płyty stropowe wykonane są jako pięciowarstwowe elementy z CLT o grubości 20 cm. Stalowe słupy w linii elewacji zewnętrznej służą dodatkowo do mocowania konstrukcji balkonów o znacznym wysięgu. Słupy mają dospawane (wystające poza obrys słupa drewnianego) konsoly do mocowania stalowych belek nośnych balkonów [15].

Zupełnie innym typem konstrukcji hybrydowych są **ustroje drewniano-stalowe**, bez udziału

żelbetu w nadziemnej części budynku. Konstrukcja stalowa pełni funkcje usztywniające w postaci ram portaltowych (Tallwood 1 w Kanadzie) lub ściągów sprężających konstrukcję ścianową drewnianą (Lighthouse Joensuu w Finlandii).

Tallwood 1 (rysunek 7) to dwunastopiętrowa wieża z drewna masywnego o mieszanym przeznaczeniu mieszkalno-handlowym, zlokalizowana w Langford w Kolumbii Brytyjskiej w Kanadzie. Projektanci Jack James Architecture i Aspect Structural Engineers zastosowali betonowe podium na pierwszej kondygnacji usługowej oraz dwie kondygnacje podziemne przeznaczone na parking. Pozostałe kondygnacje zbudowane są w systemie szkieletowym bezrygłowym z drewna GLT (słupy) oraz CLT (stropy i ściany trzonu komunikacyjnego). Zastosowanie bezpośredniego oparcia pięciowarstwowych płyt CLT o grubości 17,5 cm na drewnianych słupach wymagało gęstej siatki słupów, których rozstaw wyniósł 2,95 – 3,60 m [16].

Gęsta siatka słupów została ukryta w ścianach działowych. Zastosowano również belki z drewna klejonego warstwowo

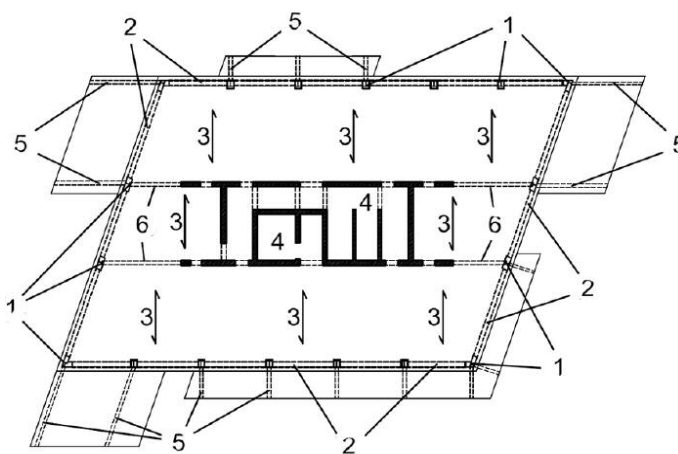


Fig. 6. Hyperion building in Bordeaux – floor plan: 1 – timber and steel columns; 2 – timber perimeter beams; 3 – CLT floor slabs; 4 – reinforced concrete core; 5 – steel balcony support beams; 6 – internal steel beams in the line of the core walls

Fig. 1. Cała based on [15]

Rys. 6. Budynek Hyperion w Bordeaux – rzut kondygnacji: 1 – słupy drewniano-stalowe; 2 – drewniane belki obwodowe; 3 – płyty stropowe CLT; 4 – trzon żelbetowy; 5 – stalowe belki nośne balkonów; 6 – stalowe belki wewnętrzne w linii ścian trzonu

Rys. 1. Cała na podstawie [15]

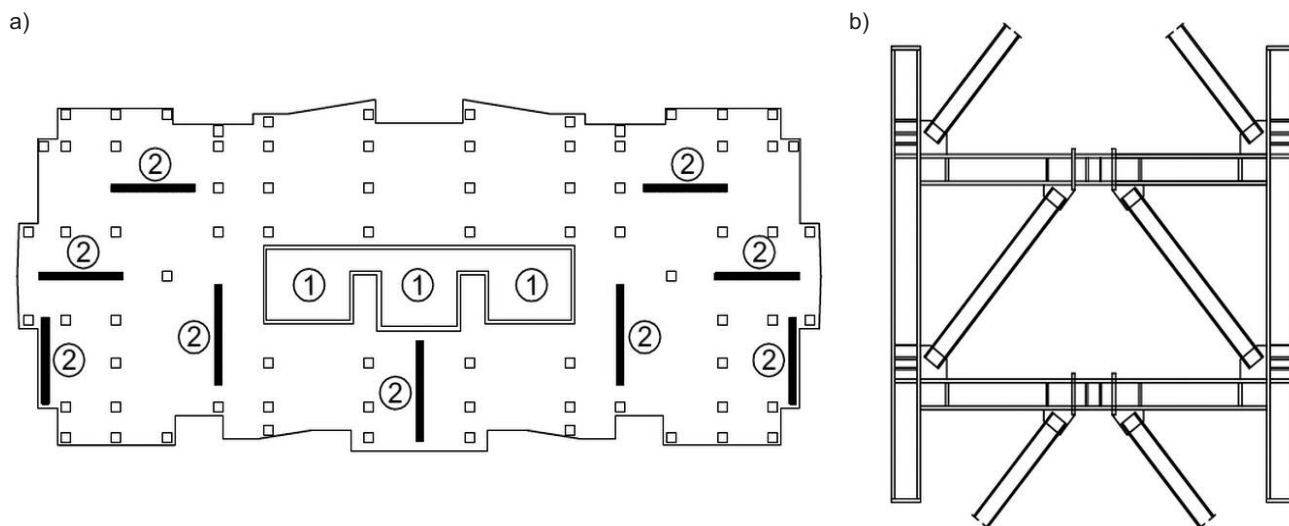


Fig. 7. Tallwood 1 building in Canada : a) floor plan: 1 – communication core; 2 – location of steel frames; b) steel frame structure – two-story repeating segment

Rys. 7. Budynek Tallwood 1 w Kanadzie: a) rzut kondygnacji: 1 – trzon komunikacyjny; 2 – usytuowanie ram stalowych; b) konstrukcja ramy stalowej – dwukondygnacyjny segment powtarzalny

Fig. 1. Cała based on [16, 17]

Rys. 1. Cała na podstawie [16, 17]

of 17.5 cm thick five-layer CLT panels on timber columns required a dense grid of columns spaced 2.95 – 3.60 m apart [16].

A dense grid of columns was concealed in the partition walls. GLT engineered timber beams were also used in the longer span areas and around the lift openings. The chessboards have CLT cross-glued board walls. In the balcony slabs, due to the exposed undersides, it is more difficult to achieve the 2-hour fire resistance therefore thicker seven-layer slabs (24.5 cm) were used. The point support of the slabs on the columns was designed with horizontal plates bolted to the timber column and a steel tube passing through the ceiling. The column of the upper storey is fixed in the tube by a steel pin welded to the bottom plate of the column [16, 17].

There are high seismic risks in Langford, British Columbia. For this reason, and taking into account horizontal wind forces, steel portal frames were used, located in both directions of the building plan to increase the building's rigidity. This arrangement also avoided excessive torsional displacement. The steel frames were partly prefabricated in multi-storey segments of half width. Each half of the frame was installed and then connected by connecting beams at each level [16]. In order to meet fire requirements, all load-bearing structural elements had to achieve a two-hour fire resistance rating. The case provides hourly resistance. In addition, the thickness of the elements was increased so that charring during a fire would protect the second hour of operation of the system. The steel frame structure was protected with intumescent paint and plasterboard cladding [18].

An example of the use of steel tendons is the **Lighthouse Joensuu building in Finland**, designed by the team of architects Arkkitehtitoimisto Arcadia OY and constructors Joensuun Juva OY. In the building, the structure of the

GLT w miejscach o większej rozpiętości i wokół otworów windowych. Szachty mają ściany z płyt klejonych krzyżowo CLT. W płytach balkonowych, ze względu na odsłonięte spody, trudniej jest uzyskać dwugodzinną odporność ogniową, dlatego też zastosowano grubsze płyty siedmiowarstwowe (24,5 cm). Punktowe oparcie płyt na słupach zaprojektowano za pomocą blach poziomych przykręcanych do słupa drewnianego oraz rury stalowej przechodzącej przez strop. Słup kondygnacji wyższej mocowany jest w rurze za pomocą stalowego sworznia przyspawanego do blachy dolnej słupa [16, 17].

W Langford w Kolumbii Brytyjskiej są duże zagrożenia sejsmiczne. Z tego powodu oraz uwzględniając siły poziome wiatru, zastosowano stalowe ramy portalowe, usytuowane w obu kierunkach na rzucie budynku, aby zwiększyć sztywność budynku. Taki układ pozwolił także uniknąć nadmiernych przemieszczeń skrętnych. Ramy stalowe zostały częściowo sprefabrykowane w wielokondygnacyjnych segmentach o połowie szerokości. Zainstalowano każdą połowę ramy, a następnie połączono ją za pomocą belek łączących na każdym poziomie [16]. W celu spełnienia wymagań przeciwpożarowych, wszystkie nośne elementy konstrukcyjne musiały uzyskać dwugodzinną odporność ogniową. Obudowa zapewnia odporność godzinową. Dodatkowo zwiększono grubości elementów, aby zwęglenie podczas pożaru zabezpieczyło drugą godzinę pracy ustroju. Konstrukcję stalowych ram zabezpieczono farbami pęczniającymi oraz obudową z płyt kartonowo-gipsowych [18].

Przykładem zastosowania cięgien stalowych jest **budynek Lighthouse Joensuu w Finlandii** zaprojektowany przez zespół architektów Arkkitehtitoimisto Arcadia OY i konstruktorów Joensuun Juva OY. W budynku konstrukcja części naziemnej, jako całkowicie drewniana, wzniesiona została nad żelbetowym podium. Pierwsza kondygnacja budynku jest żelbetowa z transferową płytą stropową, na której opiera się konstrukcja drewniana. Pozostała część ścian, w tym szyb win-

aboveground part as all-timber rose above a reinforced concrete podium.

The first storey of the building is reinforced concrete with a transfer floor slab supporting a timber structure. The rest of the walls, including the lift shaft and stairwell, were made of Stora Enso LVL-X elements (laminated veneer timber). Levels 2-4 are made of 162mm thick LVL-X, levels 5-11 are made of 144mm thick LVL-X and the topmost levels 12-14 are made of 126mm thick LVL-X. The ceilings on each level are of Stora Enso CLT spruce panels (cross-laminated timber). The walls and ceilings are connected by a Rothoblaas steel angle bracket [19].

By using a steel tendon system, the horizontal displacement of the building was limited to a value measured as $H/500$ (H = height of the building). Wind and seismic overturning moment calculations were used to determine the position and number of tendons for each wall. The bars are placed inside the wall element by drilling a hole in the element and using system joints. The size of the mounting hole weakens the wall elements to some extent and they therefore had to be reinforced. The location of the prestressed bracing walls was determined by calculations taking into account mainly deflections, but also torsion due to possible asymmetry of horizontal loads. The prestressing system of the building concerned only the walls and the interaction with the floor plates was provided by angled steel connectors. The prestressing system was fixed in a reinforced concrete transfer slab above the first floor [20]. In this way, the reinforced concrete bracing core was avoided.

Summary

The realisations analysed show the use of different structural systems in high-rise buildings, as well as the possibilities of using timber structures in different conditions. Despite the good technical properties of timber, it also has disadvantages that require a specialised approach. Hybrid technologies, combining different materials, can be used to optimise timber structural systems. Material hybridisation can increase the stiffness and stability of the structure especially due to horizontal wind forces. In addition, the combination of timber and concrete allows for high fire resistance, thermal inertia and durability. Steel construction is easy to prefabricate, flexible for seismic loads, and allows for extended structural floor spans. The prefabrication of timber building elements ensures speed of construction and reduced costs compared to traditional systems. Hybrid timber/steel structures are lightweight, so they can be used for superstructures (it is possible to design more storeys than with timber/steel structures, with the same weight). Combining different construction materials increases the architectural and structural possibilities in the design of timber high-rise buildings. The use of hybrid structures results in solutions with greater geometric flexibility and structural optimisation compared to buildings designed solely in timber construction. The growing interest in timber

dy i klatki schodowej, wykonane zostały z elementów Stora Enso LVL-X (drewno z forniru laminowanego). Poziomy 2-4 wykonano z LVL-X o grubości 162 mm, poziomy 5-11 z LVL-X o grubości 144 mm, a najwyższe poziomy 12-14 z LVL-X o grubości 126 mm. Stropy na każdym poziomie są z paneli świerkowych Stora Enso CLT (drewno klejone krzyżowo). Ściany i stropy połączono stalowym wspornikiem kątowym Rothoblaas [19].

Przez zastosowanie systemu cięgien stalowych ograniczono przemieszczenia poziome budynku do wartości mierzonej jako $H/500$ (H = wysokość budynku). W celu określenia położenia i liczby cięgien, w przypadku każdej ściany zastosowano obliczenia momentu wywracającego od działania wiatru i sił sejsmicznych. Pręty umieszczone są wewnątrz elementu ściennego przez wywiercenie otworu w elemencie i zastosowanie połączeń systemowych. Rozmiar otworu montażowego w pewnym stopniu osłabia elementy ścienne i dlatego musiały zostać wzmocnione. Usytuowanie sprężonych ścian usztywniających określono w obliczeniach uwzględniających głównie wychylenia, ale również skręcanie wynikające z możliwej asymetrii obciążeń poziomych. System sprężenia budynku dotyczył tylko ścian, a współpraca z tarczami stropowymi była zapewniona przez kątowe łączniki stalowe. System sprężający został zamocowany w żelbetowej płycie transferowej nad pierwszą kondygnacją [20]. W ten sposób udało się uniknąć żelbetowego trzonu usztywniającego.

Podsumowanie

Przeanalizowane realizacje pokazują zastosowanie różnych systemów konstrukcyjnych w budynkach wysokich, a także możliwości wykorzystania konstrukcji z drewna w różnych warunkach. Pomimo dobrych właściwości technicznych drewna, ma ono również wady wymagające specjalistycznego podejścia. Do optymalizacji systemów konstrukcji drewnianych można zastosować technologie hybrydowe, łączące różne materiały. Hybrydyzacja materiałowa może zwiększyć sztywność i stabilność konstrukcji szczególnie ze względu na siły poziome wiatru. Dodatkowo, połączenie drewna z betonem pozwala na uzyskanie dużej odporności ogniowej, bezwładności cieplnej i trwałości. Konstrukcja stalowa jest łatwa w prefabrykacji, elastyczna w przypadku obciążeń sejsmicznych oraz pozwala na powiększenie rozpiętości konstrukcyjnych stropów.

Prefabrykacja elementów budynków drewnianych zapewnia szybkość ich realizacji i redukcję kosztów w porównaniu z tradycyjnymi systemami. Konstrukcje hybrydowe drewniano-stalowe są lekkie, dlatego też można wykorzystywać większą liczbę kondygnacji niż w przypadku konstrukcji drewniano-stalowych przy tym samym ciężarze). Łączenie różnych materiałów konstrukcyjnych zwiększa możliwości architektoniczne i konstrukcyjne w kształtowaniu drewnianych budynków wysokościowych. Stosując konstrukcje hybrydowe, zyskuje się rozwiązania o większej elastyczności geometrycznej oraz bardziej optymalne konstrukcyjnie w porównaniu z budynkami

as a sustainably sourced, renewable material leads us to believe in the further technological development of hybrid systems involving it.

Received: 15.07.2024

Revised: 05.08.2024

Published: 22.10.2024

zaprojektowanymi wyłącznie w konstrukcji drewnianej. Coraz większe zainteresowanie drewnem, jako materiałem odnawialnym, który można pozyskiwać w sposób zrównoważony, pozwala uwierzyć w dalszy rozwój technologiczny systemów hybrydowych z jego udziałem.

Artykuł wpłynął do redakcji: 15.07.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 05.08.2024 r.

Opublikowano: 22.10.2024 r.

Literature

[1] Dmitruk M. Zastosowanie drewna klejonego w konstrukcji budynków wysokościowych, na przykładzie realizacji z krajów zachodnich. TEKA Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych Tom 16. 2020; 2: 76 – 87.

[2] Svatoš-Ražnjević H, Orozco L, Achim Menges A. Advanced Timber Construction Industry: A Review of 350 Multi-Storey Timber Projects from 2000–2021 – Buildings, 2022, № 4, p. 404. Publisher: MDPI AG; <https://doi.org/10.3390/buildings12040404>.

[3] Pastori S, Mazzucchelli ES, Wallhagen M. Hybrid timber-based structures: A state of the art review. Construction and Building Materials. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129505>.

[4] CTBUH – Tallest Mass Timber Buildings list – <https://www.ctbuh.org/mass-timber-buildings>.

[5] Tucker M. Persuading skeptics and navigating through building code variances. Case study: Ascent Timber Tower; <https://www.cdsmith.com/mass-timber-construction-study-proving-planning-the-ascent-building-project>.

[6] ANSI. ANSI/APA PRG 320: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. American National Standards Institute. New York (NY). 2018.

[7] Woschitz R. HoHo Viena – the technical solution. 21 Internationales Holzbau Forum IHF 2015. Garmisch-Partenkirchen, Germany 2 – 4 December 2015; <https://forum-holzwissen.com/document/secure/48a4768e-c24a-4b1a-81cb-27329725d70a>.

[8] Woschitz R. HoHo Wien – eine erste Zwischenbilanz. Internationales Holzbau Forum IHF 2017. Garmisch-Partenkirchen, Germany 2 – 4 December 2017.

[9] Verhaegh R, Vola M, Jorn de Jong. Haut – A 21-storey Tall Timber Residential Building. International Journal of High-Rise Buildings 2020; <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2020.9.3.213>.

[10] Foster RM, Reynolds TPS. Lightweighting with Timber: An Opportunity for More Sustainable Urban Densification. J. Arch. Eng. 2018; [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000301](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000301).

[11] Hermens M, Visscher M, Kraus J. Ultra light weight solutions for sustainable urban densification. In CTBUH 2014 Shanghai Conf. Proc., Council on Tall Buildings and Urban Habitat. 2014; Chicago, IL.

<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/1887-ultra-light-weight-solutions-for-sustainable-urban-densification.pdf>

[12] Cobelens RVM. Building light and comfortable concept development of a light-weight steel and timber building system regarding human induced vibration comfort. Master of Science degree at the Delft University of Technology. 2018; available at <http://repository.tudelft.nl/>.

[13] van Hoek S. Kareol Doorman, Rotterdam – Projekt – Architectuur NL. 2010; <https://www.architectuur.nl/project/de-kareel-doorman-rotterdam/>.

[14] B. a. – Hyperion – Tour bois Bordeaux. Eiffage Immobilier 2016; https://www.eiffage-immobilier-corporate.fr/files/live/sites/eiffage-immobilier-institutionnel-v2/files/documents/communiqués/2016/DP_EiffageImmobilier_TourBoisBordeaux.pdf.

[15] Leroy F. La Tour Hypérion précurseur de la construction bois a Bordeaux. BATIRAMA 2019; <https://www.batirama.com/article/28198-la-tour-hyperion-precurseur-de-la-construction-bois-a-bordeaux.html>.

[16] Higgins O, Danzig I, Fitzgerald B, Pelling J, Jahangiri M. Tallwood 1: Lessons learned on completion Canada's first 12 storey timber-steel hybrid building. World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), Oslo, Norway; <https://doi.org/10.52202/069179-0551>.

[17] Danzig I. Tallwood 1. Langford, BC, Canada: Eccentrically Braced Steel Frame Provides Lateral Support. – CTBUH Steel-Timber Hybrid Buildings Conference 2022; <https://www.ctbuh.org/resources/presentations/tallwood-1-langford-bc-canada-eccentrically-braced-steel-frame-provides-lateral-support.pdf>.

[18] Danzig I, Pelling J. Tallwood 1. New Frontiers of Tall Mass Timber. Structure Magazine (NCSEA). 2023; https://www.structuremag.org/?page_id=24049.

[19] Keskiälä M. Use of tension rods in wood construction – 14 storeys – with laminated veneer lumber as shear walls: Lighthouse Joensuu – 24 Internationales Holzbau-Forum IHF 2018; https://events.forum-holzbau.com/pdf/30_IHF2018_Keskiälä.pdf.

[20] Mehlig J, Wade E. Making the connection. Are post-tensioned CLT walls an economically sound option? Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten, Uppsala Universitet; ISRN UTH-INGUTB-EX-B-2021/001-SE; <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1570216/FULLTEXT01.pdf>.