

Prefabrykowane zespolone stropy o małej wysokości konstrukcyjnej typu slim floor

Prefabricated slim floors

Jan Bujnak^{1,*}

¹Peikko Group Ltd, Lahti, Finland

*corresponding author: J. Bujnak, e-mail: jan.bujnak@peikko.com

Streszczenie

Prefabrykowane stropy zespolone o małej wysokości typu [slim floor] stanowią dojrzałe, a zarazem stale rozwijane rozwiązanie stosowane w budownictwie wielokondygnacyjnym. Dzięki integracji stalowych belek zespolonych z betonem w grubości płyty systemy te zapewniają płaski spód stropu, zmniejszają wysokość konstrukcyjną oraz umożliwiają efektywną realizację procesów budowlanych opartych na prefabrykacji. W artykule przedstawiono przegląd prefabrykowanych stropów zespolonych o małej wysokości, koncentrując się na ich praktycznych zaletach i zachowaniu w konstrukcji. Omówiono współpracę zespolonych stali i betonu, rolę elementów prefabrykowanych, takich jak płyty kanałowe, oraz znaczenie postanowień Eurokodów. Wskazano, że systemy stropów zespolonych o małej wysokości stanowią nie tylko innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne, lecz także istotny czynnik rozwoju przemysłowego i adaptowalnego budownictwa.

Słowa kluczowe: prefabrykacja, beton, slim floor, stropy zespolone

Summary

Prefabricated slim floor systems represent a mature yet continuously evolving solution in multi-storey building construction. By integrating steel-concrete composite beams within the depth of the slab, these systems create a flat soffit, reduce structural depth, and enable efficient prefabrication-based construction processes. This paper provides an overview of prefabricated slim floors, focusing on their practical benefits and structural behavior. Attention is given to composite interaction between steel and concrete, the role of prefabricated elements such as hollow-core slabs, and the implications of Eurocode provisions. The paper highlights that slim floor systems are not only a structural innovation but also an important enabler of industrialized and adaptable construction.

Keywords: prefabrication, concrete, slim floors, composite floors

1. Wprowadzenie

Systemy stropów zespolonych o małej wysokości konstrukcyjnej [typu *slim floor*] definiuje się jako konstrukcje stropowe, w których stalowa belka zespolona z betonem, pełniąc funkcję elementu nośnego, jest zintegrowana z grubością płyty, dzięki czemu uzyskuje się płaski lub prawie płaski spód stropu. W przeciwieństwie do tradycyjnych belek podstropowych jedynie niewielka część przekroju belki – zazwyczaj dolna półka – wystaje poniżej płyty.

Zespolone systemy stropów o małej wysokości konstrukcyjnej stanowią efektywne rozwiązanie konstrukcyjne, łączące zmniejszoną wysokość konstrukcyjną stropu z wysoką efektywnością nośną oraz usprawnieniem procesu budowlanego. Dzięki umieszczeniu

1. Introduction

Slim floor systems are defined as floor structures in which the load-bearing steel concrete composite beam is integrated into the slab depth, resulting in a flat or nearly flat soffit. Unlike conventional downstand beams, only a limited portion of the beam – typically the bottom flange – is visible below the slab.

Composite slim floor systems represent a highly efficient structural solution that combines reduced construction depth with enhanced structural performance and improved construction efficiency. By integrating the steel beam within the slab depth, these systems enable a reduction in overall floor height, which can either decrease building height or allow for additional storeys within a given envelope. This directly contributes to improved economic efficiency and architectural flexibility.

stalowej belki w obrębie grubości płyty systemy te umożliwiają zmniejszenie całkowitej wysokości stropu, co może prowadzić do obniżenia wysokości budynku lub umożliwić zwiększenie liczby kondygnacji w ramach założonej bryły budynku. Przyczynia się to bezpośrednio do poprawy efektywności ekonomicznej i zwiększenia elastyczności rozwiązań architektonicznych.

Istotną zaletą zespolonych stropów o małej wysokości konstrukcyjnej typu slim floor jest możliwość uzyskania dużych rozpiętości przy stosunkowo niewielkiej wysokości konstrukcyjnej, co pozwala na uzyskanie bardziej płaskiego spodu stropu oraz ułatwia integrację instalacji. Eliminacja belek podstropowych umożliwia sprawne prowadzenie instalacji mechanicznych, elektrycznych i sanitarnych, ograniczając złożoność koordynacji międzybranżowej oraz poprawiając funkcjonalność dostępnej przestrzeni stropowej.

Systemy te korzystają ponadto z zalet prefabrykacji i uprzemysłowionych procesów budowlanych, które zapewniają lepszą kontrolę jakości, ograniczają zmienność właściwości elementów oraz skracają czas realizacji. Produkcja poza placem budowy umożliwia równoległe prowadzenie prac prefabrykacyjnych i robót budowlanych na miejscu, co przyspiesza realizację inwestycji i zmniejsza jej zależność od warunków atmosferycznych. Ograniczenie liczby elementów konstrukcyjnych i połączeń dodatkowo zwiększa szybkość oraz niezawodność montażu.

Z punktu widzenia konstrukcyjnego zespolona praca stali i betonu zapewnia efektywne wykorzystanie materiałów, przy czym każdy z nich jest wykorzystywany zgodnie ze swoimi właściwościami mechanicznymi. Prowadzi to do zwiększenia nośności, sztywności oraz zmniejszenia ciężaru własnego konstrukcji, co z kolei ogranicza wymagania stawiane słupom i fundamentom. Łącznie cechy te sprawiają, że zespolone stropy typu slim floor stanowią konkurencyjne rozwiązanie zarówno pod względem efektywności konstrukcyjnej, jak i ekonomiki całego przedsięwzięcia.

Prefabrykowane systemy slim floor rozwijane są od lat 70. XX wieku, głównie w Europie Północnej i Zachodniej. Jednym z pierwszych rozwiązań typu slim floor była belka HSQ. Jedno z wyjaśnień tej nazwy wywodzi się ze Szwecji – „Hedlunds Svetsade Q-balk” oraz „Robertsons Q-floor”. Spawana belka Q firmy Hedlunds [stalowa belka spawana o przekroju kapeluszowym] została zaprojektowana do współpracy z systemem Q-floor firmy Robertson, wykorzystującym stalowe poszycie. W późniejszym okresie belkę WSQ zaczęto stosować w połączeniu z płytami kanałowymi.

Jednym z obecnie dostępnych prefabrykowanych systemów slim floor jest DELTABEAM®, opracowany i wprowadzony do oferty przez fińską grupę Peikko na początku lat 90. XX wieku. DELTABEAM®



Rys. 1. Przykład konstrukcji stropu typu slim floor.

Fig. 1. Example of a slim floor construction.

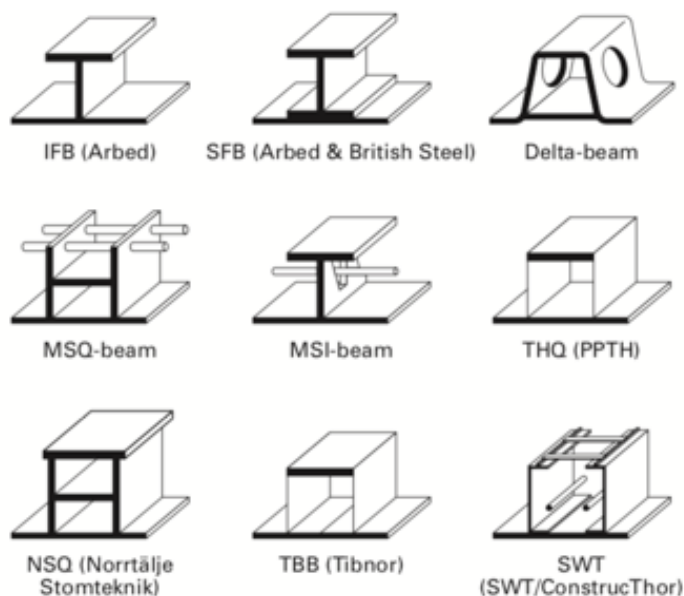
A key advantage of composite slim floors is their ability to achieve large spans with relatively small structural depth, resulting in flatter soffits and simplified integration of services. The elimination of downstand beams facilitates efficient routing of mechanical, electrical, and plumbing systems, reducing coordination complexity and improving usability of the floor space.

Furthermore, these systems benefit from prefabrication and industrialized construction processes, which improve quality control, reduce variability, and shorten construction time. Off-site manufacturing enables parallel execution of fabrication and site works, leading to faster project delivery and reduced dependency on weather conditions. The reduced number of structural components and connections further enhances construction speed and reliability.

From a structural perspective, the composite interaction between steel and concrete provides efficient material utilization, where each material is engaged according to its mechanical strengths. This leads to improved load-bearing capacity, increased stiffness, and reduced self-weight, which in turn lowers demands on columns and foundations. Together, these characteristics make composite slim floors a competitive solution in terms of both structural efficiency and overall project economy.

Prefabricated slim floor systems have been developed since 1970s, principally in Northern and Western Europe. One of the first slim floor solutions was HSQ beam. One explanation for the name comes from Sweden, “Hedlunds Svetsade Q-balk” and “Robertsons Q-floor”. Hedlunds welded Q-beam [top hat shaped welded steel beam] was planned to be used with Robertsons Q floor which was steel decking. Later WSQ beam was combined with hollow core panels.

One of the prefabricated slim floor systems currently available on the market is DELTABEAM® developed and commercialized by

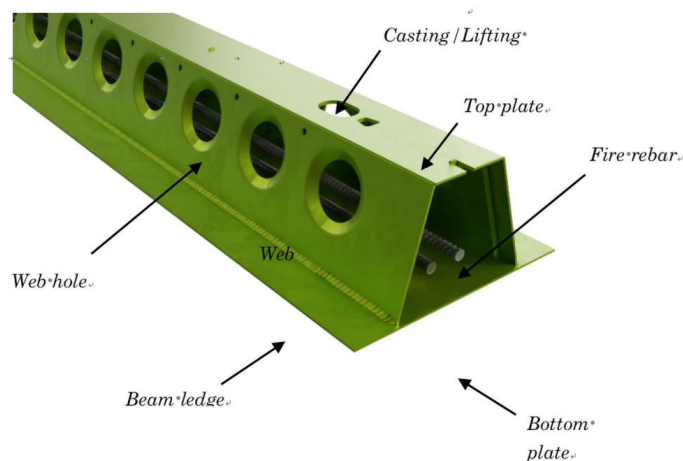


Rys. 2. Przykłady wczesnych systemów slim floor z lat 80. XX wieku.
Fig. 2. Examples of early slim floor systems from 1980s.

jest zespoloną belką stalową o zamkniętym, skrzynkowym przekroju, całkowicie zintegrowaną z grubością stropu.

Składa się ona z dolnej półki, dwóch pionowych środników bocznych oraz płyty górnej, tworzących zamknięty, pusty przekrój stalowy, który następnie wypełniany jest betonem układanym na budowie. W środnikach bocznych wykonano regularnie rozmieszczone, duże, okrągłe otwory umożliwiające przeprowadzenie prętów zbrojeniowych, zapewniając współpracę zespoloną belki z otaczającym ją betonem.

Dolna półka belki przenosi przede wszystkim siły rozciągające, natomiast betonowe wypełnienie oraz elementy górnej części przekroju uczestniczą w przenoszeniu sił ściskających i zapewniają



Rys. 3. Belka systemu DELTABEAM®.

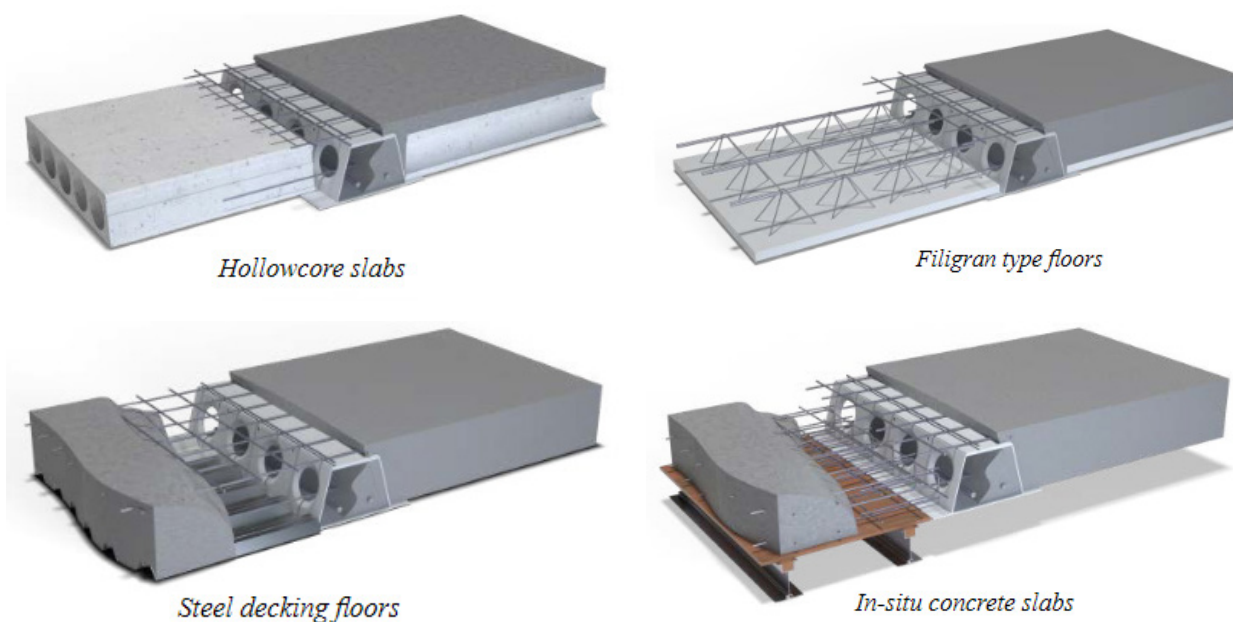
Fig. 3. DELTABEAM® system.

Peikko Group from Finland since early 1990s. DELTABEAM® is a composite steel beam with a closed, box-like geometry that is fully embedded within the floor slab.

It consists of a bottom flange, two vertical side webs, and a top plate, forming a hollow steel section that is later filled with in-situ concrete. The side webs include regularly spaced large round openings that allow reinforcement bars to pass through, enabling composite interaction between the beam and surrounding concrete.

The bottom flange primarily resists tensile forces, while the concrete infill and upper components contribute to compression and overall stiffness. Additional elements such as transverse reinforcement, slab bearings, and end connections ensure load transfer, continuity, and integration with the surrounding structural system.

DELTABEAM® is used as an integrated composite beam in a wide range of slim floor configurations. Its ledges provide temporary



Rys. 4. Rodzaje płyt stropowych stosowanych w systemie DELTABEAM®.
Fig. 4. Types of slabs used with DELTABEAM®.

odpowiednią sztywność całego układu. Dodatkowe elementy, takie jak zbrojenie poprzeczne, oparcia płyt stropowych oraz połączenia czołowe, zapewniają przekazywanie obciążeń, ciągłość konstrukcji oraz integrację belki z pozostałym układem konstrukcyjnym.

DELTABEAM® stosuje się jako zintegrowaną belkę zespoloną w szerokim zakresie konfiguracji stropów typu slim floor. Półki podporowe belki zapewniają tymczasowe oparcie prefabrykowanych lub częściowo prefabrykowanych elementów stropowych podczas montażu, natomiast betonowe wypełnienie belki, zbrojenie poprzeczne oraz beton płyty stropowej tworzą po stwardnieniu docelowy zespolony układ nośny.

Najczęściej DELTABEAM® stosuje się z prefabrykowanymi sprężonymi płytami kanałowymi, których końce opierają się bezpośrednio na półkach belki. Rozwiązanie z płytami kanałowymi umożliwia uzyskanie dużych rozpiętości przy niewielkim ciężarze własnym i szybkim montażu, dzięki czemu jest szczególnie przydatne w budynkach biurowych i mieszkalnych, szkołach, szpitalach oraz parkingach wielopoziomowych.

DELTABEAM® może być również stosowana z płytami typu Filigran i innymi płytami częściowo prefabrykowanymi. W takich rozwiązaniach prefabrykowany element pełni funkcję traconego szalunku i stanowi część docelowej płyty stropowej, natomiast dodatkowe zbrojenie oraz warstwa nadbetonu wykonywane są na budowie. Rozwiązanie to jest przydatne w przypadku złożonej geometrii, konieczności zapewnienia ciągłości zbrojenia, występowania otworów lub wymaganej pracy tarczowej stropu, gdy wymagany jest większy stopień integracji elementów wykonywanych na budowie niż w rozwiązaniu opartym na płytach kanałowych.

W przypadku stropów z blachą stalową belka podpira profilowaną blachę oraz mieszkankę betonową podczas wykonywania stropu, a po stwardnieniu betonu płyta i wypełniona betonem belka współpracują jako zespolony układ stropowy. Konfiguracja ta jest atrakcyjna w budynkach o konstrukcji stalowej oraz w projektach, w których istotne są mały ciężar stropu, szybki montaż blachy oraz elastyczne prowadzenie instalacji. Możliwe jest również stosowanie płyt stropowych wykonywanych w całości na budowie, szczególnie w budynkach o nieregularnym układzie funkcjonalnym, wymagających odpowiedniej pracy tarczowej stropu lub w przypadku lokalnie złożonych rozwiązań zbrojeniowych.

Dalszym kierunkiem rozwoju jest stosowanie DELTABEAM® w połączeniu ze stropami drewnianymi oraz hybrydowymi stropami drewniano-betonowymi. W takich systemach belka może tworzyć zwartą, główną linię nośną, podczas gdy elementy drewniane przyczyniają się do ograniczenia wbudowanego śladu węglowego oraz zmniejszenia ciężaru stropu.

DELTABEAM® opiera się zazwyczaj na wspornikach [belka jednoprzęsłowa] lub bezpośrednio na głowicach słupów [belka wieloprzęsłowa].

Proces montażu rozpoczyna się od przygotowania dokumentacji i organizacji prac dostosowanych do kon-

support for prefabricated or semi-prefabricated floor units during erection, while the concrete infill, transverse reinforcement and surrounding slab concrete create the final composite load-bearing system after hardening.

The most common application is with prestressed hollow-core slabs, where the slab ends are placed directly on the beam ledges. The hollow-core solution combines long spans, low self-weight and rapid installation, making it particularly suitable for offices, residential buildings, schools, hospitals and car parks.

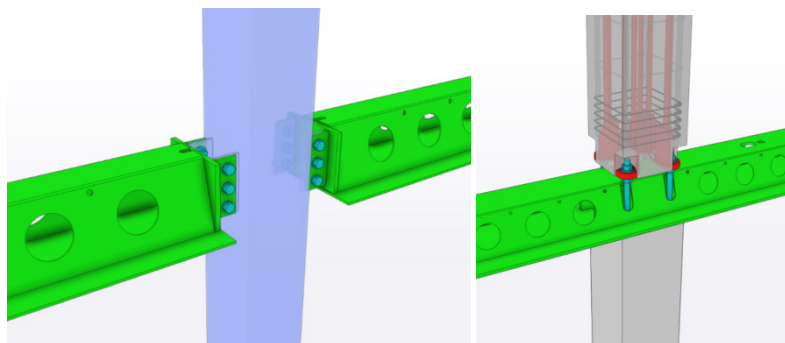
DELTABEAM® can also be combined with Filigran-type floors and other semi-prefabricated slabs. In these cases, the precast element acts as permanent formwork and part of the final slab, while additional reinforcement and concrete topping are completed on site. The solution is useful where complex geometry, continuity of reinforcement, openings or diaphragm action require more cast-in-situ integration than a purely hollow-core solution can provide.

For steel decking floors, the beam supports the profiled deck and wet concrete during construction, after which the hardened slab and filled beam act together as a composite floor system. This configuration is attractive in steel-framed buildings and projects where lightweight floor construction, fast deck placement and flexible service integration are important. In-situ concrete slabs may also be used, especially in buildings with irregular layouts, high diaphragm requirements or locally demanding reinforcement details.

A further development is the use of DELTABEAM® with timber and hybrid timber-concrete floors. In such systems, the beam can provide a compact primary load-bearing line while timber elements contribute to reduced embodied carbon and lighter floor construction.

DELTABEAM® is typically placed on corbels [single span beam] or on the top of columns [multiple span beam].

The installation process starts with project-specific planning, including beam layout, support details, lifting arrangements, temporary propping, floor-unit sequence and concreting stages. Each beam is manufactured with identification markings and delivered according to the project schedule. On site, the beams are stored on suitable supports to protect their surface treatment and to prevent unintended deformation before lifting.



Rys. 5. Połączenia DELTABEAM® ze słupami.

Fig. 5. Connections of DELTABEAM® to columns.

kretnego projektu, obejmujących układ belek, szczegóły oparcia, sposób podnoszenia, ewentualne zastosowanie podpór tymczasowych, kolejność montażu elementów stropowych oraz etapy betonowania. Każda belka jest produkowana z oznaczeniami identyfikacyjnymi i dostarczana zgodnie z harmonogramem realizacji. Na placu budowy belki są składowane na odpowiednio przygotowanych podporach, aby chronić ich zabezpieczenie powierzchniowe oraz zapobiegać niezamierzonym odkształceniom przed podnoszeniem.

Podczas montażu DELTABEAM® jest podnoszona za pomocą standardowych urządzeń dźwigowych stosowanych na budowie i ustawiana na słupach, ścianach, wspornikach lub innych belkach podporowych, zgodnie z rysunkami montażowymi. Połączenia są regulowane z uwzględnieniem określonych tolerancji wykonawczych oraz przewidzianych w projekcie elementów mocujących. W miejscach, w których wymaga tego technologia montażu, stosuje się podpory tymczasowe, w szczególności w celu ograniczenia obrotu i zapewnienia stateczności podczas niesymetrycznego obciążenia lub w przypadku montażu płyt kanałowych tylko po jednej stronie belki. Następnie elementy stropowe są montowane w zaplanowanej kolejności. Zasadniczo zaleca się prowadzenie zrównoważonego montażu po obu stronach belki, ponieważ ogranicza to oddziaływania skręcające występujące w fazie montażowej.

Po zamontowaniu elementów stropowych i zbrojenia DELTABEAM® wypełnia się betonem konstrukcyjnym przez otwory wlewcze. Beton powinien wypełnić wewnętrzną przestrzeń belki oraz odpowiednie strefy połączeń. Belkę należy zasadniczo wypełniać betonem w całości, w jednym ciągłym etapie, chyba że w dokumentacji technologicznej opracowanej dla danego projektu przewidziano inne rozwiązanie.

Faza montażowa kończy się dopiero po uzyskaniu przez beton wypełniający oraz ewentualny nadbeton wymaganej wytrzymałości. Do tego czasu składowanie materiałów na stropie oraz prowadzenie robót na wyższej kondygnacji powinno być ograniczone zgodnie z wytycznymi projektowymi. Po stwardnieniu betonu belka, beton wypełniający, zbrojenie oraz płyta stropowa współpracują jako zintegrowany układ zespolony, zapewniając docelową sztywność, nośność, odporność ogniową oraz mechaniczną konstrukcji stropu typu slim floor.



Rys. 6. Montaż systemu DELTABEAM®.

Fig. 6. Installation of DELTABEAM®.

During erection, DELTABEAM® is lifted with ordinary site lifting equipment and positioned on columns, walls, corbels or other supporting beams according to the assembly drawings. The connections are adjusted using the specified tolerances and fixing details. Temporary props are installed where required by the erection method statement, particularly to control rotation and stability during asymmetric loading or when hollow-core slabs are placed on only one side of the beam.

The floor units are then assembled in the planned sequence. Balanced installation on both sides of the beam is generally preferred because it reduces torsional effects during the temporary stage.

After the floor units and reinforcement are in place, DELTABEAM® is filled with structural concrete through the casting openings. The concrete must fill the internal beam cavity and the relevant connection zones. The beam should be cast in full in one continuous operation unless the project-specific method statement defines otherwise.

The erection stage ends only after the infill concrete and any topping concrete have reached the required strength. Until then, material storage on the floor and construction of the floor above should be restricted according to the project instructions. Once the concrete has hardened, the beam, infill concrete, reinforcement



Rys. 7. Betonowanie systemu DELTABEAM®.

Fig. 7. Concreting of DELTABEAM®.

2. Praca konstrukcyjna zespolonych stropów typu slim floor

W fazie montażowej DELTABEAM® jest projektowana jako stalowa belka pracująca w zakresie sprężystym, zgodnie z EN 1993-1-1, i podpierająca płyty stropowe, które zazwyczaj opierają się bezpośrednio na poszerzonej dolnej półce belki. W tej fazie DELTABEAM® jest przede wszystkim poddawana działaniu momentów zginających w płaszczyźnie podłużnej oraz oddziaływań skręcających. Ponadto dolna półka belki musi przenosić momenty zginające w kierunku poprzecznym, wynikające z reakcji od ciężaru własnego płyt stropowych oraz ewentualnych tymczasowych obciążeń montażowych. Powstający stan naprężenia w dolnej półce jest weryfikowany za pomocą dedykowanego oprogramowania obliczeniowego, zgodnie z krajowymi metodami projektowania lub warunkiem Hubera–Misesa, zgodnie z równaniem [1]:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \leq f_{yd} \quad [1]$$

gdzie:

σ_x – naprężenie normalne od zginania w kierunku podłużnym,

σ_y – naprężenie normalne od zginania w kierunku poprzecznym,

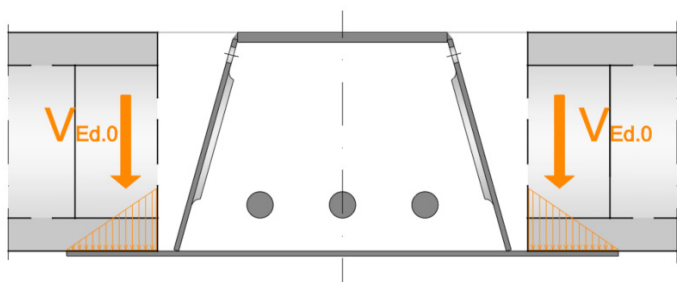
τ – naprężenie styczne od skręcania.

Nośność środników DELTABEAM® jest sprawdzana z uwzględnieniem mechanizmu Vierendeela rozwijającego się w strefie otworów wykonanych w środnikach.

Zachowanie konstrukcji jest w dużym stopniu zależne od warunków podparcia oraz kolejności montażu. Szczególne znaczenie ma stateczność obrotowa, zwłaszcza w przypadku niesymetrycznego obciążenia, dlatego często konieczne jest zastosowanie podpór tymczasowych, których zadaniem jest przede wszystkim zapobieganie obrotowi belki, a nie ograniczanie jej ugięć. W celu kompensacji odkształceń występujących w fazie montażowej zazwyczaj stosuje się wstępne podniesienie belki [ang. precamber].

W fazie końcowej uzyskiwana jest współpraca zespolona pomiędzy DELTABEAM® a betonem wypełniającym. Współpraca ta jest zapewniana przez podłużne połączenie na ścinanie, którego działanie umożliwiają otwory w środnikach po stwardnieniu betonu wypełniającego.

Przekazywanie obciążenia z płyty na belkę odbywa się za pośrednictwem mechanizmu ukośnego ściskanego krzyżulca, natomiast



Rys. 8. Praca konstrukcyjna DELTABEAM® w fazie montażowej.

Fig. 8. Structural behavior of DELTABEAM® during the erection phase.

and floor slab work together as an integrated composite system, providing the final stiffness, strength, fire resistance and robustness of the slim floor structure.

2. Load-bearing behavior of composite slim floors

During the erection stage, DELTABEAM® is designed to act as a steel beam exhibiting elastic behavior in accordance with EN 1993-1-1 while supporting the floor slabs, which typically bear directly on the extended bottom flange.

At this stage, DELTABEAM® is primarily subjected to longitudinal bending and torsional actions. In addition, the bottom flange must resist transverse bending effects arising from the reactions of the floor slab self-weight and any potential temporary construction loads. The resulting stress state in the bottom flange is verified using the dedicated design software in accordance either with nationally agreed design methods or on Mises condition according to Eq. [1]:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \leq f_{yd} \quad [1]$$

where

σ_x is the normal stress due to longitudinal bending,

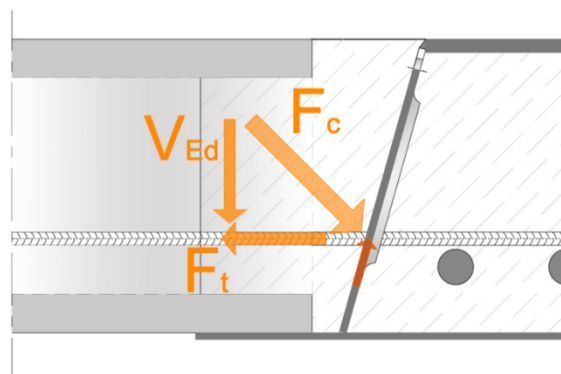
σ_y is the normal stress due to transverse bending,

τ is the torsional shear stress.

In addition to the verifications performed in accordance with EN 1993-1-1, the shear resistance of the DELTABEAM® webs is checked by considering the Vierendeel mechanism acting through the web openings.

The response is highly sensitive to support conditions and erection sequencing. Rotational stability is critical, particularly under asymmetric loading, and temporary propping is often required to prevent rotation rather than to reduce deflections. Precamber is typically introduced to compensate for erection-stage deformations.

The final phase is when composite action between the DELTABEAM® and the infill concrete is achieved. This effect is developed through a longitudinal shear connection, provided by the web holes, once the infill concrete has hardened.



Rys. 9. Praca konstrukcyjna DELTABEAM® w fazie użytkowej.

Fig. 9. Structural behavior of DELTABEAM® in service stage.

zbrojenie poprzeczne zapewnia ciągłość przenoszenia sił rozciągających. Podłużna współpraca stali i betonu jest zapewniona dzięki zazębieniu mechanicznemu, umożliwiającemu zespoloną pracę belki na zginanie.

Na zachowanie konstrukcji wpływają również oddziaływania zależne od czasu, w tym pełzanie, skurcz i zarysowanie betonu, które prowadzą do zmniejszenia efektywnej sztywności oraz zwiększenia ugięć długotrwałych. W konfiguracjach niesymetrycznych istotne mogą być również oddziaływania skręcające, co wymaga odpowiedniego ukształtowania detali konstrukcyjnych.

Klasyfikację przekroju poprzecznego w fazie użytkowej przeprowadza się zgodnie z EN 1993-1-1, pkt 5.5 i Tablicą 5.2. Grubość półek DELTABEAM® jest projektowana w taki sposób, aby belka zawsze spełniała wymagania klasy 2. W związku z tym nośność przekroju zespolonego na zginanie, oznaczona jako $M_{e,Pl,Rd}$, może być wyznaczana metodą sprężysto-plastyczną określoną w pkt 6.2.1.4 normy EN 1994-1-1. Przyjmuje się pełną współpracę pomiędzy stalą i betonem.

Wartość momentu $M_{e,Pl,Rd}$ wyznacza się iteracyjnie za pomocą oprogramowania Peikko Designer®, z uwzględnieniem ograniczenia odkształcenia granicznego betonu ściskanego [$\epsilon_{cu} = 0,35\%$]. Sprężysto-plastyczna nośność na zginanie $M_{e,Pl,Rd}$ jest zawsze mniejsza od plastycznej nośności na zginanie $M_{Pl,Rd}$, określonej zgodnie z pkt 6.2.1.2 normy EN 1994-1-1.

Nośność DELTABEAM® na ścinanie jest weryfikowana za pomocą modelu kratownicowego, analogicznego do modelu określonego w pkt 6.3 normy EN 1992-1-1, w którym krzyżulec ściskany tworzą beton wypełniający wewnętrzną przestrzeń DELTABEAM® oraz pionowe odcinki środników pomiędzy otworami wykonanymi w środnikach belki.

W warunkach oddziaływania pożaru podstawowy mechanizm przenoszenia obciążeń pozostaje podobny jak w fazie użytkowej, jednak zachodzi przy pogorszonych właściwościach mechanicznych materiałów. Zbrojenie wewnętrzne oraz beton odgrywają kluczową rolę w zachowaniu ciągłości dróg przepływu sił w miarę zmniejszania się wytrzymałości stali pod wpływem wysokiej temperatury. W zależności od lokalnych aprobat DELTABEAM® może osiągać klasę odporności ogniowej nawet R180, również bez stosowania ochrony ogniowej stalowych części belki eksponowanych na działanie ognia.

Wymaganą liczbę prętów zbrojenia przeciwpożarowego umieszcza się wewnątrz DELTABEAM® w zakładzie produkcyjnym. Odporność ogniowa jest zapewniana przez zbrojenie przeciwpożarowe oraz beton wypełniający. W warunkach pożaru pręty zbrojenia przeciwpożarowego oraz środniki belki pełnią funkcję zbrojenia rozciąganego i kompensują utratę nośności dolnej półki eksponowanej na działanie ognia.

Nośność DELTABEAM® na zginanie i ścinanie jest weryfikowana metodami analogicznymi do stosowanych w fazie użytkowej, z uwzględnieniem zmniejszenia wytrzymałości stali i betonu

Load transfer from the slab to the beam is governed by an inclined compressive strut mechanism, while transverse reinforcement provides tensile continuity. Longitudinal interaction between steel and concrete is achieved through mechanical interlock, enabling composite bending behavior.

The structural response is influenced by time-dependent effects, including creep, shrinkage, and cracking, which reduce effective stiffness and contribute to long-term deflections. Torsional effects may also become significant in asymmetric configurations, requiring careful structural detailing.

The classification of the cross-sectional area for the final stage is done according to EN 1993-1-1 part 5.5 and Table 5.2. The thickness of DELTABEAM® flanges is designed so that the beam always meets Class 2 requirements. Thus, the bending moment resistance of the composite section, denoted $M_{e,Pl,Rd}$, can always be determined according to the elastic-plastic method specified in paragraph 6.2.1.4 of the EN 1994-1-1. It is assumed that there is a complete interaction between steel and concrete.

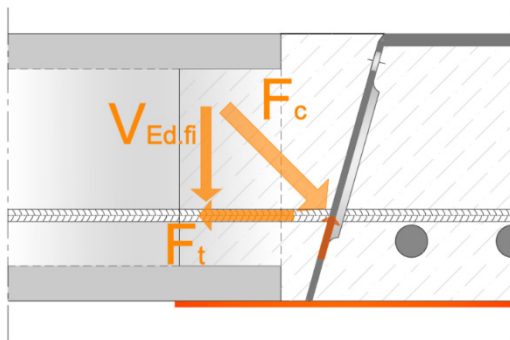
The moment $M_{e,Pl,Rd}$ is calculated by iteration with the Peikko Designer® software considering the limitation of the ultimate deformation of the concrete in compression [$\epsilon_{cu} = 0.35\%$]. The elastic-plastic moment $M_{e,Pl,Rd}$ is always lower than the plastic moment $M_{Pl,Rd}$ according to paragraph 6.2.1.2 of the EN 1994-1-1 standard.

The shear strength of the DELTABEAM® is verified by the strut-and-tie model analogous to part 6.3 of EN 1992-1-1, where the strut is developed by the infill concrete inside the DELTABEAM® and the vertical stands between the holes in the webs of DELTABEAM®.

Under fire exposure, the fundamental load-bearing mechanism remains similar to that of the permanent situation but operates with reduced material properties. Internal reinforcement and concrete play a key role in maintaining load paths as the strength of exposed steel decreases. DELTABEAM® can have a fire rating as high as R180, depending on local approvals even without fire protection of the steel parts exposed to fire.

The designed number of fire rebars is installed inside DELTABEAM® at the factory. Fire resistance is achieved by fire rebars and infill concrete. Fire rebars and the webs act as tensile reinforcement in the event of a fire and compensate the loss of strength if the bottom flange is exposed to fire.

The bending and shear resistance of DELTABEAM® are verified by methods analogous to those applied in permanent situation taking account of the strength reduction of steel and concrete due to exposure to fire. Temperature profiles of DELTABEAM® for different fire ratings have been determined by extensive laboratory tests. Extensive testing has also been performed to validate the load transfer model between DELTABEAM® and slabs exposed to fire with unprotected bottom flanges.



Rys. 10. Praca konstrukcyjna DELTABEAM® w warunkach pożaru.

Fig. 10. Structural behavior of DELTABEAM® under fire conditions.

wskutek oddziaływania ognia. Profile temperatury w przekroju DELTABEAM® dla różnych klas odporności ogniowej określono na podstawie szeroko zakrojonych badań laboratoryjnych. Przeprowadzono również obszerne badania mające na celu walidację modelu przekazywania obciążeń pomiędzy DELTABEAM® a płytami stropowymi w warunkach pożaru, przy niezabezpieczonych ogniochronnie dolnych półkach belek.

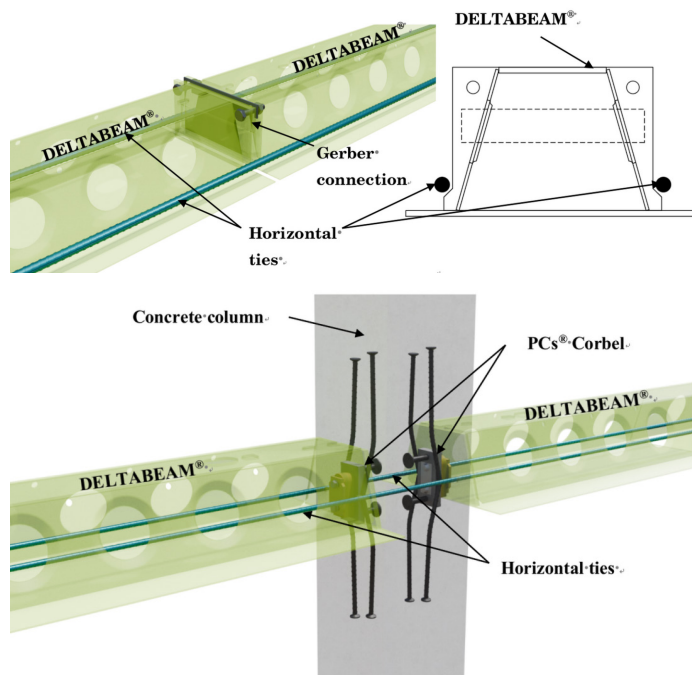
3. Sytuacje wyjątkowe

W sytuacjach wyjątkowych system wykorzystuje ciągłość konstrukcji oraz pracę ściągu w celu zapobieżenia nieproporcjonalnemu zniszczeniu konstrukcji. Zdolność do redystrybucji sił ma zatem zasadnicze znaczenie, co podkreśla rolę odpowiedniego kształtowania połączeń oraz zapewnienia ciągłości zbrojenia.

Budynki powinny być projektowane w taki sposób, aby były zdolne do przeniesienia skutków lokalnego uszkodzenia konstrukcji spowodowanego nieokreśloną przyczyną bez wystąpienia nieproporcjonalnego zawalenia. Zasady projektowania konstrukcji w sytuacji wyjątkowej określono w EN 1991-1-7 oraz w odpowiednim Załączniku Krajowym. Wymagany poziom odporności konstrukcji zależy od klasy konsekwencji określonej w EN 1990. W zależności od złożoności projektu może być zatem wymagane przeprowadzenie analizy całego modelu konstrukcji. Projektant konstrukcji powinien przekazać projektowe siły rozciągające inżynierowi odpowiedzialnemu za opracowanie rozwiązania dla danego projektu. Jeżeli takie informacje nie są dostępne, ciągły ściąg, wraz z jego połączeniami końcowymi, powinien być zdolny do przeniesienia projektowej siły rozciągającej określonej za pomocą równań A.1 lub A.2 zgodnie z EN 1991-1-7.

4. Przykłady realizacji

DELTABEAM® zastosowano dotychczas w ponad 15 000 realizacji na całym świecie,



Rys. 11. Poziome ściągi DELTABEAM® zapobiegające postępującemu zniszczeniu konstrukcji.

Fig. 11. Horizontal ties of DELTABEAM® against progressive collapse.

3. Accidental situations

In accidental situations, the system relies on continuity and tensile tie action to prevent disproportionate collapse. The ability to redistribute forces is therefore essential, emphasizing the importance of connection detailing and reinforcement continuity.

Buildings should be designed so that localized damage resulting from an unspecified cause does not lead to disproportionate collapse. Design approach is defined according to EN 1991-1-7 and



Rys. 12. Plac budowy kompleksu Business Garden Wrocław w 2015 r.

Fig. 12. Construction site of Business Garden Wrocław in 2015.

w tym w kilkudziesięciu projektach w Polsce. Jednym z najbardziej znaczących zastosowań DELTABEAM® w Polsce jest kompleks Business Garden Wrocław II, obejmujący sześć budynków o łącznej powierzchni użytkowej około 79 000 m². W ramach inwestycji zastosowano około 4,9 km zespolonych belek DELTABEAM® oraz ponad 800 połączeń na wspornikach.

5. Podsumowanie

Prefabrykowane systemy slim floor stanowią efektywne rozwiązanie konstrukcyjne, łączące zmniejszoną wysokość konstrukcyjną stropu, płaski spód stropu, możliwość uzyskania dużych rozpiętości oraz skrócenie czasu realizacji dzięki wysokiemu stopniowi prefabrykacji. DELTABEAM® jest belką zespoloną, którą można dostosować do różnych rodzajów stropów, w tym z płytami kanałowymi, płytami częściowo prefabrykowanymi, blachą stalową, płytami betonowymi wykonywanymi na budowie oraz rozwiązaniami hybrydowymi z wykorzystaniem elementów drewnianych. Jej praca konstrukcyjna opiera się na współdziałaniu stali, betonu wypełniającego, zbrojenia oraz elementów stropowych, przy czym odrębnego podejścia projektowego wymagają fazy montażowa i użytkowa oraz sytuacje pożarowe i wyjątkowe. Proces montażu, obejmujący właściwą kolejność prac, zapewnienie stateczności tymczasowej, betonowanie i pielęgnację betonu, ma zasadnicze znaczenie dla uzyskania zakładanej współpracy zespolonej oraz docelowej odporności konstrukcji. Podsumowując, prefabrykowane systemy slim floor stanowią sprawdzoną i elastyczną technologię budowlaną, wspierającą efektywne projektowanie obiektów oraz uprzemysłowienie procesu budowlanego.

its National Annex in the accidental situation. Required level of robustness depends on consequence class category defined in EN 1990. Therefore, global model analysis shall be required depending on the complexity of the project. The structural engineer of the project shall provide design tensile loads to the customer engineer. If such information is missing then continuous tie, including its end connections, should be capable of sustaining a design tensile load following equations A.1 or A.2 according to EN 1991-1-7.

4. Project references

DELTABEAM® has been so far applied in more than 15 000 projects across the world, including dozens of projects in Poland. One of the most prominent applications of DELTABEAM® in Poland is the Business Garden Wrocław II that includes six buildings with a total floor area of approximately 79,000 m², requiring approximately 4.9 km of DELTABEAM® composite beams and more than 800 corbel connections.

5. Conclusion

Prefabricated slim floor systems provide an efficient structural concept that combines reduced floor depth, flat soffits, long spans, and faster construction through a high degree of prefabrication. DELTABEAM® is a composite beam that can be adapted to different floor types, including hollow-core slabs, semi-prefabricated slabs, steel decking, in-situ concrete slabs, and hybrid timber-based solutions. Its performance relies on interaction between steel, concrete infill, reinforcement, and floor units, with separate design considerations for erection, permanent, fire, and accidental situations. The installation process, including correct sequencing, temporary stability, concreting, and curing, is essential for achieving the intended composite action and final structural robustness. Overall, prefabricated slim floors represent a proven and adaptable construction technology that supports efficient building design and industrialized construction.