

Tomasz KOŁAKOWSKI<sup>1</sup>  
Andrzej MARECKI<sup>2</sup>  
Wojciech LORENC<sup>3</sup>  
Ernest KUBICA<sup>4</sup>

## **VFT® – PREFABRYKOWANE DŹWIGARY ZESPOLONE Z AKTYWNYM DESKOWANIEM BETONOWYM**

### **1. VFT® - trwała, szybka i ekonomiczna technologia w budowie mostów**

System VFT® powstał w odpowiedzi na wymagania inwestorów publicznych oczekujących trwałych, tanich i szybkich w realizacji obiektów mostowych. Od lat 70-tych stosowano, wykonywane z betonu sprężonego, prefabrykaty belkowo-płytowe z szerokimi półkami, stanowiącymi jednocześnie deskowanie pomostu. Wadą tego rozwiązania był duży ciężar własny ograniczający jego stosowanie do rozpiętości ok. 30 m. Wraz z obniżką cen stali konstrukcyjnej okazało się, że zastąpienie prefabrykatów sprężonych stalowymi dźwigarami zespolonymi z półką żelbetową, daje korzyści eksploatacyjne i ekonomiczne. Dzięki obniżeniu ciężaru prefabrykatów możliwy stał się łatwy i bardzo szybki montaż przęsła o rozpiętościach do 70 m. Ogranicza się tym sposobem zamknięcia ruchu i umożliwia prowadzenie dalszych prac nad czynnymi ciągami komunikacyjnymi.

### **2. Idea systemu**

Istotą systemu VFT jest stosowanie prefabrykowanych dźwigarów zespolonych (rys. 1) z półką żelbetową o grubości 10 – 12 cm, która jednocześnie stanowi deskowanie pomostu aktywnie współpracujące przy przenoszeniu obciążeń stałych i użytkowych. Prefabrykaty ustawiane są obok siebie na uprzednio przygotowanych podporach i łączone ze sobą na czas montażu. Następnie wykonywane są na mokro płyta pomostu oraz poprzecznice podporowe. W ten sposób powstaje przęsło monolityczne mimo, że większa część procesu produkcyjnego odbywa się poza obiektem.

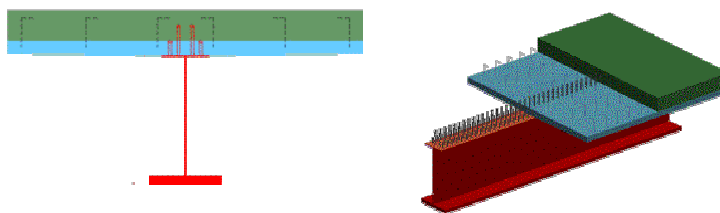
---

<sup>1</sup> mgr inż. EUROPROJEKT Gdańsk

<sup>2</sup> dr inż. Instytut Badawczy Dróg i Mostów – Warszawa

<sup>3</sup> mgr inż. Wydział BLiW Politechnika Wrocławska

<sup>4</sup> dr hab. inż. Wydział BLiW Politechnika Wrocławska, prof. PWr.



Rys. 1 Ideowy przekrój poprzeczny oraz schemat ustroju nośnego

### 3. Zakres stosowalności

Uwarunkowania techniczno-ekonomiczne określają zakres stosowania prefabrykatów VFT®. Stosuje się je do budowy obiektów mostowych jedno- lub wieloprzęsłowych z przęsłami w przedziale rozpiętości od 15 do 70 m. Głównym obszarem zastosowań systemu jest **budowa wiaduktów nad czynnymi trasami drogowymi i kolejowymi**. W stosunku do innych technologii osiągnięte są tu duże korzyści ekonomiczne wynikające z szybkości montażu i zredukowania oraz uproszczenia prac wykończeniowych. Koszt przekroczenia autostrady dwupasmowej jednym przęsłem jest niższy niż dwoma przęsłami z podporą pośrednią na pasie rozdzielającym. Nieistotny jest również kąt przecięcia z osią drogi, czy też linii kolejowej. Indywidualne projektowanie każdego prefabrykatu pozwala dostosować go do szczególnych wymagań konstrukcyjno – architektonicznych. Uzyskiwane bardzo niskie wysokości konstrukcyjne stwarzają wrażenie smukłości przęsła (rys. 2).



Rys. 2. Wiadukt ramowy VFT nad autostradą i transport dźwigarów prefabrykowanych

Prefabrykaty VFT® mogą stanowić elementy przęseł w następujących układach statycznych:

- w ramach jedno- lub wieloprzęsłowych, gdzie płyta pomostu będzie sztywno łączona z podporami, przez co eliminuje się łożyska i dylatacje ;
- w przęsłach swobodnie podpartych ;
- w przęsłach ciągłych, gdzie kolejne przęsła będą łączone monolitycznie w wylewanych poprzecznicach podporowych;
- w przęsłach budowanych metodą wspornikową, gdzie prefabrykaty VFT® stanowią będą zworniki ;
- w tunelach budowanych metodą odkrywkową, gdzie prefabrykaty służyć będą jako elementy stropów.

#### 4. Prefabrykacja dźwigarów

Prefabrykat VFT® to dźwigar stalowy z półką zabetonowaną w wytwórni lub na placu budowy, która jednocześnie stanowi deskowanie płyty pomostu. Częścią stalową dźwigara zespolonego jest spawany dwuteownik, w którym szerokość pasa górnego zapewnia umieszczenie łączników zespalających. W większości przypadków środnik nie ma dodatkowych usztywnień, mogą one jednak występować w dźwigarach o rozpiętości powyżej 40 m oraz w obiektach kolejowych (rys. 3). Betonowa półka prefabrykatu o grubości od 10 do 12 cm, połączona jest z dźwigarem stalowym w taki sposób, aby zostały przeniesione występujące siły rozwarstwiające. Zespolenie stanowią sworznie o dwóch różnych wysokościach; niższe zapewniają współpracę pomiędzy belką stalową a betonową płytą prefabrykowaną. Półka wykonana jest z betonów o wysokiej wytrzymałości, mrozoodporności oraz szczelności. W prefabrykacie umieszczone jest dolne zbrojenie konstrukcyjne z otuliną 40 – 50 mm. Zespolenie dźwigara z wylewaną na miejscu budowy płytą zapewniają, mocowane do pasa górnego, wyższe sworznie oraz strzemiona konstrukcyjne, wystające ponad beton prefabrykatu.



Rys. 3. Dźwigar stalowy w wytwórni i sworznie oraz zbrojenie półki prefabrykatu

Dzięki włączeniu do aktywnej współpracy przy przenoszeniu obciążeń półki żelbetowej uzyskuje się duże oszczędności w zużyciu stali konstrukcyjnej (nawet do 30%).

Część stalową zabezpiecza się antykorozyjnie w wytwórni, nakładając wszystkie przewidziane projektem powłoki. Prefabrykat dostarczany jest na plac budowy z wyposażeniem i pomostami roboczymi. Prefabrykaty mają szerokość dostosowaną do ograniczeń wynikających z warunków przewozu z wytwórni na miejsce budowy.

#### 5. Trwałość i zalety utrzymaniowe

W systemie VFT® trwałość zapewniona jest przez:

- rozwiązania konstrukcyjne,
- rozwiązania technologiczne i materiałowe.

Prefabrykaty charakteryzuje trwałość i odporność na destrukcyjne czynniki korozyjne. Elementy stalowe zabezpieczane są gwarantowanymi systemami malarskimi o trwałości 15-25 lat lub metalizacyjno-malarskimi o trwałości 20-30 lat. Ochrona spodniej powierzchni płyty żelbetowej i poprzecznic jest zapewniona przez zwiększenie otuliny i stosowanie betonu klasy B50, charakteryzującego się wysoką szczelnością i mrozoodpornością. Boczne powierzchnie płyty chronione są prefabrykowanymi elementami gzymsowymi z polimerobetonu lub z betonów specjalnych.

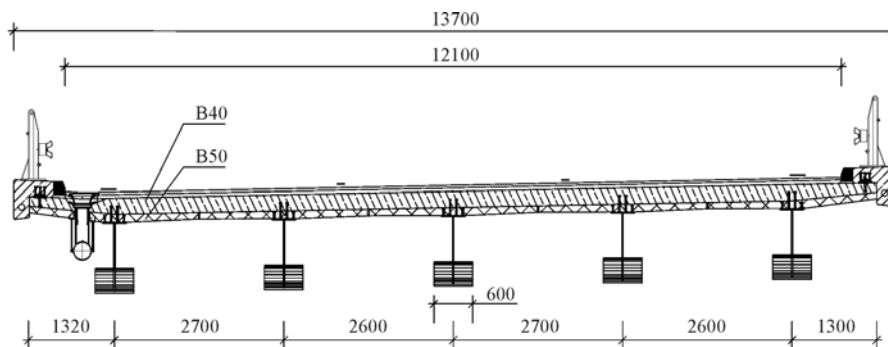
W rozwiązaniach konstrukcyjnych, sprzyjających trwałości konstrukcji, należy podkreślić to, że:

- w systemie VFT® tworzone są ustroje monolityczne charakteryzujące się dużą masą i znaczną sztywnością; redukuje to uszkodzenia typu zmęczeniowego,
- naprężenia ściskające, od obciążenia ciężarem własym mokrego betonu, zamykają skutecznie mikrorysy w betonowych płytach prefabrykatów, co w połączeniu z otuliną, zwiększoną do 40-50mm, daje znakomitą ochronę zbrojenia przed penetracją czynników korozyjnych,
- wykonanie płyty pomostu w dwóch warstwach powoduje obniżenie skurczu betonu, dzięki czemu rysy skurczowe nie są zagrożeniem dla konstrukcji,
- system wyklucza konieczność łączenia konstrukcji stalowej na budowie; roboty spawalnicze i malarskie w całości wykonywane są w wytwórni,
- powierzchnie dźwigarów VFT® pozbawione miejsc trudnodostępnych są łatwe w utrzymaniu i konserwacji.

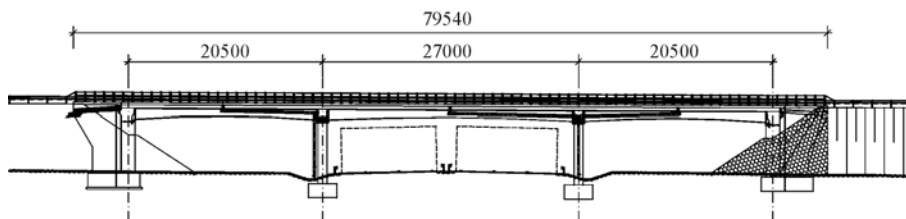
Należy podkreślić, że zwiększenie trwałości gwarantuje już samo przeniesienie procesu produkcji do wytwórni konstrukcji stalowych i zakładu prefabrykacji, gdzie bez dodatkowych nakładów inwestycyjnych, systemowo zapewniona jest jakość robót. Przykładowo wykonana w optymalnych warunkach i pod pełną kontrolą ochrona antykorozyjna stali przedłuża prawie trzykrotnie okres eksploatacji powłok.

## 6. Przykładowa analiza statyczno-wytrzymałościowa wybranego obiektu mostowego

Celem przybliżenia zagadnienia pod kątem projektowania, przedstawiono tok obliczeń i wybrane wyniki analizy statyczno-wytrzymałościowej dla przykładowego obiektu mostowego. Wybrano zaprojektowany wiadukt WD-3 będącej w fazie projektu drogi ekspresowej S-5 i S-10 na odcinku Bydgoszcz – Węzeł Stryszek (rys. 4 i 5).



Rys. 4. Przekrój poprzeczny obiektu



Rys. 5. Przekrój podłużny (widok z boku) obiektu

Schemat statyczny obiektu stanowi rama trójprzęsłowa o rozpiętościach przęseł 20.50 m – 26.70 m – 20.50 m. Jedno przęsło składa się z 5 dźwigarów o zmiennej wysokości w rozstawie 2,64 m, wysokość blachownicy w środku rozpiętości wynosi 750 mm. W konstrukcji zastosowano następujące materiały: stal konstrukcyjna 18G2A, stal zbrojeniowa BSt500, płyta prefabrykatu B50, płyta pomostu B40, podpory B33.

Obliczenia wykonano za pomocą programu SOFiSTiK [2], zgodnie z wtycznymi norm [3,4]. Obecnie trwają prace nad wtycznymi do projektowania dźwigarów VFT® [1]. Konstrukcję zamodelowano jako układ przestrzenny klasy  $e^1$ ,  $p^3$ . W obliczeniach wykorzystano dostępną w programie opcję pozwalającą na zmianę cech przekroju poprzecznego z zapamiętaniem istniejącego stanu naprężeń. Pozwala to na modelowanie krok po kroku kolejnych etapów wykonywania konstrukcji, gdy do współpracy włączają się kolejne elementy, takie jak beton i zbrojenie. Żelbetową płytę pomostową (wylewaną na mokro na budowie po ustawieniu prefabrykatów) oraz żelbetową płytę prefabrykatu dźwigara (wylewaną na mokro w zakładzie prefabrykacji i zespoloną z dźwigarem stalowym za pomocą sworzni), uwzględniono w modelowaniu sztywności belki tylko w tych przekrojach, gdzie jest ona ściskana i nie zarysowana. Posadowienie modelowano jako podparcie sprężyste o odpowiedniej charakterystyce.

### 6.1. Tok obliczeń

Obliczenia dźwigara przeprowadzono uwzględniając kolejne fazy pracy konstrukcji.

- Faza 1a – dźwigary stalowe zespolone w zakładzie prefabrykacji z wylewaną na mokro płytą żelbetową gr. 10-12cm ustawione zostają na podporach jako belki swobodnie podparte .

W etapie tym powstają naprężenia od następujących obciążeń:

1. ciężar własny dźwigara stalowego,
2. ciężar własny żelbetowej płyty prefabrykatu (płyta gr.10-12 cm),
3. skurcz i pęcznienie występujące w płycie prefabrykatu.

- Faza 1b – układ w kierunku podłużnym jest trójprzęsłową belką ciągłą o przekroju: dźwigar stalowy zespolony z płytą żelbetową prefabrykatu. Uciąglenie wykonuje się poprzez połączenie zbrojenia płyt prefabrykatu żelbetowego i poprzez specjalne ściągające pręty. Zabetonowane zostają poprzeczki.

W etapie tym powstają naprężenia od następującego obciążenia:

1. ciężar własny wylewanej na mokro (po montażu prefabrykatów) żelbetowej płyty pomostowej gr. 25 cm.

- Faza 2 – układ jest ramą o przekroju: w kierunku podłużnym – dźwigar stalowy zespolony za pomocą sworzni z żelbetową płytą prefabrykatu oraz zespolony za pomocą sworzni i prętów z żelbetową płytą pomostową, w kierunku poprzecznym – płyta pomostowa.

W etapie tym powstają naprężenia od następujących obciążeń:

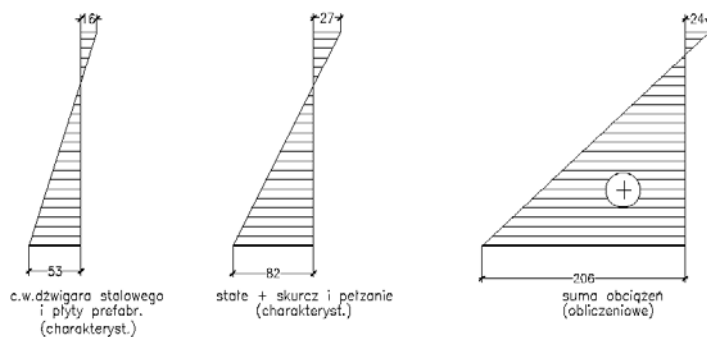
1. ciężar własny wyposażenia i nawierzchni mostu,
2. skurcz i pęcznienie płyty pomostowej,
3. obciążenia równomiernie rozłożonego  $q=4,00 \text{ kN/m}^2$  na jezdniach,
4. obciążenie od normatywnego pojazdu  $K=800 \text{ kN}$ -klasa A wg PN-85/S-10030,
5. różnicy temperatur,

6. parcie gruntu na ściany przyczółków (brane do kombinacji z przypadkiem oziębienia konstrukcji),
7. odpór gruntu na ściany przyczółków (brane do kombinacji z przypadkiem ogrzania konstrukcji).

Do superpozycji naprężeń wykorzystano kombinacje przypadków tworzone z odpowiednimi współczynnikami odpowiednio mniejszymi i większymi od jedności. Do programu SOFiSTiK wszystkie obciążenia zostały wprowadzone jako charakterystyczne. W fazie 1a skurcz i pełzanie uwzględniono stosując współczynniki odpowiednio:  $\varepsilon_s = 0,00023$ ,  $\varphi_p = 1,7$ , w fazie 2, odpowiednio:  $\varepsilon_s = 0,00016$ ,  $\varphi_p = 1,4$ . Różnicę temperatur przyjęto  $\pm 15^\circ\text{C}$ .

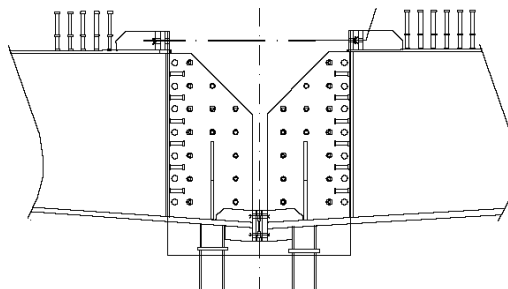
## 6.2. Wyniki obliczeń

Na profilach przedstawiono naprężenia normalne w dźwigarze stalowym, w środku rozpiętości dźwigara przedskrajnego przęsła środkowego. Dla sumy obciążeń obliczeniowych przedstawiono wyniki dla najbardziej niekorzystnej kombinacji, pod kątem naprężeń w pasie dolnym dźwigara stalowego. Dla kombinacji tej naprężenia we włóknach górnych płyty pomostu wynoszą 8,40 MPa (ściskanie).



Rys. 6. Naprężenia w dźwigarze stalowym

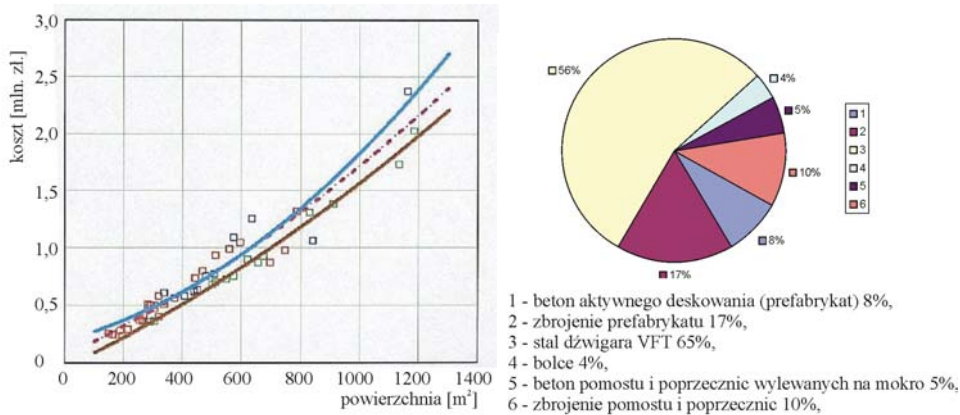
Ważnym elementem jest zapewnienie uciąglenia układu nad podporami po ustawieniu prefabrykatów na podporach. W tym celu, dla rozpatrywanego obiektu, zastosowano rozwiązanie w postaci dwóch ściągów w poziomie betonowej płyty prefabrykowanej, wykonanych z pręta  $\varnothing 32$  mm ze stali 18G2-b z końcami nagwintowanymi pod nakrętki M30 i sprężonych wstępnie siłą 8 kN każdy (rys. 7).



Rys. 7. Połączenie dźwigarów nad podporą

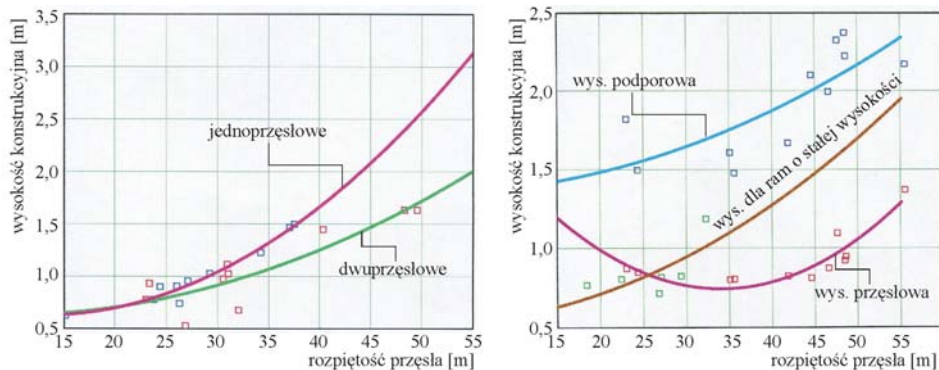
## 7. Statystyczna analiza ekonomiczna zrealizowanych obiektów

Na wykresach (rys. 8) przedstawiono koszt całkowity ustroju nośnego przęsła wykonanego w technologii VFT w funkcji powierzchni obiektu mostowego oraz udział procentowy poszczególnych składników konstrukcji w kosztach. Rozpatrywano układy typu: ruszt jednoprzęsłowy, rama i ustrój dwuprzęsłowy (odpowiednio krzywa górna, środkowa i dolna na wykresie). Pole powierzchni określono jako iloczyn światła między poręczami i rozpiętości teoretycznej przęsła. Koszty kalkulowano na podstawie krajowych cen bieżących. Celem ułatwienia korzystania ze wskaźników kalkulacja nie obejmuje elementów kosztowych, uwarunkowanych lokalizacyjnie, tj. posadowienie, wyposażenie, projekt itd.



Rys. 8. Koszt [zł] w zależności od powierzchni przęsła [m<sup>2</sup>] oraz średnia struktura kosztów ustroju nośnego przęsła VFT

Na wykresach (rys. 9) pokazano zależność pomiędzy rozpiętością a wysokością konstrukcyjną. Na wykresie lewym przedstawiono wyniki dla rusztów (jednoprzęsłowe – krzywa górna, dwuprzęsłowe – krzywa dolna), a na wykresie prawym przedstawiono wyniki dla ram; krzywa górna i środkowa przedstawiają odpowiednio wysokość podporową i przęsłową dla ram o zmiennej wysokości, a krzywa dolna odpowiada ramom o stałej wysokości konstrukcyjnej (położenie odnoszono do początku krzywych).



Rys. 9. Zależność pomiędzy rozpiętością [m] a wysokością konstrukcyjną [m]

## 8. Podsumowanie

W artykule przedstawiono opis systemu VFT®, podano obszar zastosowań i korzyści wynikające ze stosowania tej technologii. Przedstawiono tok obliczeń dla analizy statyczno – wytrzymałościowej na przykładzie projektowanego obiektu. Na dzień pisania tego artykułu w Polsce jest już zaprojektowanych do realizacji kilkanaście obiektów w systemie VFT®, z czego dwie realizacje już rozpoczęto. W Niemczech wykonano już kilkadziesiąt obiektów w tej technologii, w tym ramowy wiadukt kolejowy o rozpiętości 42 m wykonany wiosną 2004 r. w Berlinie.

## 9. Literatura

- [1] Warunki techniczne projektowania i wykonywania obiektów z dźwigarów VFT® [w trakcie tworzenia], IBDiM
- [2] SOFiSTiK Analysis Programs, SOFiSTiK AG, Oberschleissheim, 2001
- [3] ENV 1994-1-1:1992. Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1-1: Zasady ogólne i reguły dla budynków (wersja polska Prenormy Europejskiej opracowanej na podstawie Eurokodu 4), CEN 1992
- [4] ENV 1994-2:1997. Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 2: Mosty zespolone, CEN 1997

## **VFT® - PREFABRICATED COMPOSITE BEAMS WITH ACTIVE CONCRETE BOARDING**

### **Summary**

A VFT® system of composite slabs in bridge engineering has been presented in this article. It consists in application of prefabricated composite beams, with thin concrete slab (10 cm – 12 cm), double height of studs and proper stirrups. It makes possible to build slabs of span over 30 m, even up to 70 m, easily and quickly. Because of this, the main field of application of this system is building viaducts over transportation routes. In this article one can find detailed description of VFT® system, course of static analysis for such a structure and statistical analysis of executed objects focused on price per unit area.