

Rafał SIEŃKO<sup>1</sup>  
Łukasz BEDNARSKI<sup>2</sup>  
Tomasz HOWIACKI<sup>3</sup>  
Jakub KORYCIŃSKI<sup>4</sup>

## **POMIARY DEFORMACJI MOSTU PODWIESZONEGO Z WYKORZYSTANIEM ŚWIATŁOWODOWYCH CZUJNIKÓW GEOMETRYCZNIE CIĄGLYCH DFOS**

### **1. Wprowadzenie**

Współczesne budownictwo mostowe bardzo często charakteryzuje się stosowaniem nietypowych form geometrycznych, zaawansowanych rozwiązań konstrukcyjnych, ale także wprowadzaniem do eksploatacji elementów konstrukcyjnych wykonanych z nowoczesnych materiałów, m.in. kompozytów FRP [1, 2]. Stąd, coraz częściej wyposaża się takie obiekty w urządzenia do stałej kontroli ich pracy [3, 4] poprzez ciągły w czasie pomiar wybranych wielkości fizycznych, np. odkształceń, ugięć, przemieszczeń kątowych, temperatur i wielu innych. Przykładem może być Most Rędziański we Wrocławiu [5, 6], most przez rz. Wisłę w Puławach [7], Most Solidarności w Płocku [8], Most Sucharskiego w Gdańsku [9] i wiele innych obiektów mostowych [10].

Należy jednak także zwrócić uwagę na obiekty już istniejące i eksploatowane przez dziesiątki lat. Ich stan techniczny pozostawia często wiele do życzenia, a okresowe przeglądy bardzo często mogą okazać się niewystarczające do zapewnienia ich bezpiecznej eksploatacji. Przykładem może być chociażby katastrofa mostu w Genui (Włochy) z sierpnia 2018 r., w której zginęły 43 osoby.

Dlatego poszukuje się współcześnie coraz lepszych narzędzi do bieżącej kontroli obiektów mostowych, wśród których szczególnie duże nadzieje budzi technika światłowodowa [11, 12], umożliwiająca realizowanie pomiarów odkształceń i temperatury w sposób geometrycznie ciągły (*ang. distributed fibre optic sensors DFOS*) wzdłuż całej długości włókna pomiarowego [13]. Takie podejście pozwala efektywnie zastąpić setki tradycyjnych, punktowych czujników odkształceń za pomocą pojedynczego światłowodu telekomunikacyjnego [11], dostarczając zupełnie nowych możliwości w analizie i interpretacji pracy elementów konstrukcyjnych.

---

<sup>1</sup> dr inż. Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej

<sup>2</sup> dr inż. Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

<sup>3</sup> mgr inż., Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej

<sup>4</sup> mgr inż., INTERLAB Sp. z o.o.

Technika światłowodowa jest intensywnie rozwijana w wielu jednostkach badawczych na całym świecie, również w Polsce. We wrześniu firma SHM System z Krakowa zakończyła projekt badawczy w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, pt. „Opracowanie nowego czujnika światłowodowego umożliwiającego wyznaczanie profili pionowych i poziomych przemieszczeń badanych obiektów na odcinkach o długości do 120 km”, nr proj. POIR .01.01.01-00-0550/15. W ramach projektu stworzono nowy czujnik światłowodowy do pomiaru odkształceń, przemieszczeń i temperatury monitorowanego ośrodka. Opracowaną koncepcję pomiarową wdrożono m.in. w ramach pilotażowej instalacji na Moście im. Tadeusza Mazowieckiego przez rz. Wisłok w Rzeszowie.

W dalszej części artykułu przedstawiono pomiary odkształceń stalowego dźwigara blachownicowego, zlokalizowanego od strony północnej w przęśle rzeczny o długości 150 [m]. Do pomiarów wykorzystano światłowodowe czujniki DFOS, zainstalowane na wybranych wysokościach dźwigara. Uzyskano łączną długość pomiarową światłowodu równą 600 m, co w tym przypadku odpowiada zastosowaniu 6 000 tradycyjnych tensometrów (punktowych czujników odkształceń). Pomiary prowadzono przy pomocy dwóch rejestratorów optycznych, wykorzystujących rozpraszanie Rayleigha i Brillouina. Zaproponowano także algorytm, umożliwiający na podstawie ciągłych pomiarów odkształceń, wyznaczenie przemieszczeń (ugięć) monitorowanego przęsła.

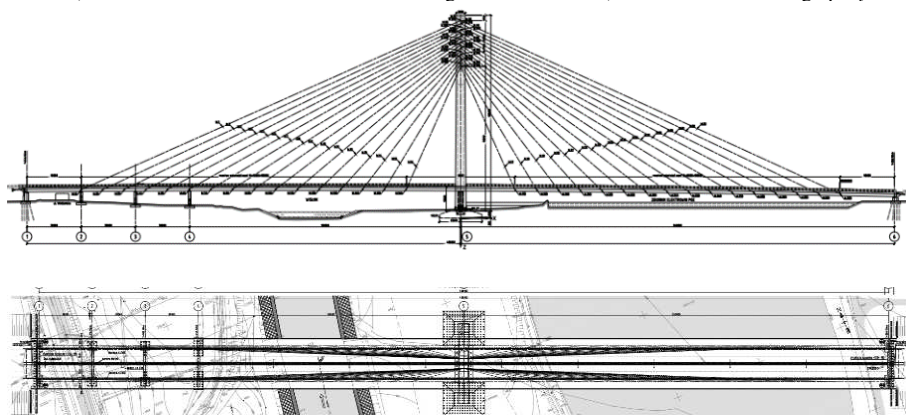
## 2. Opis monitorowanej konstrukcji

Most im. Tadeusza Mazowieckiego w Rzeszowie przez rz. Wisłok to jedna z największych tego typu konstrukcji w Polsce i druga co do wysokości pylonu (zaraz po moście Rędziańskim we Wrocławiu), oddana do użytkowania w 2015 r. Most został zaprojektowany jako podwieszany na 64 stalowych wantach, zakotwionych w jednym pylonie w kształcie litery A i wysokości 108 m. Łączna długość konstrukcji mostu wraz z wiaduktami wynosi 482 m, przy czym najdłuższe przęsło nad zbiornikiem elektrowni ma 240 m.

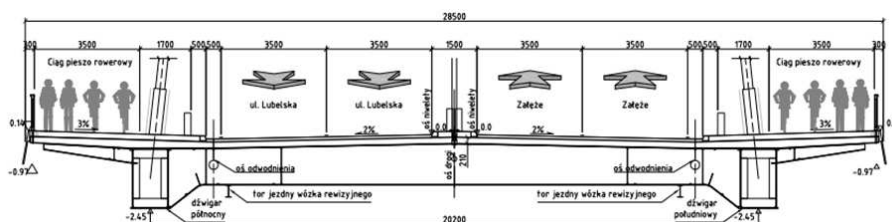
Analizowany dźwigar zaprojektowano jako blachownicowy o przekroju prostokątnym zamkniętym, usztywnianym wewnętrznymi żebrami. Nominalna wysokość dźwigara wynosi 2 000 [mm], a jego szerokość 1 200 [mm]. Istotny wpływ na stan odkształceń dźwigarów mają poprzecznice stalowe oraz żebra podchodnikowe, rozmieszczone na długości przęsła w rozstawie równym 4,0 [m]. Ponadto, w dalszych rozważaniach, istotną będzie lokalizacja want podwieszających dźwigar do pylonu.



Rysunek 1. a) Widok mostu im. Tadeusza Mazowieckiego w Rzeszowie; b) widok monitorowanego przęsła



Rysunek 2. Widok z boku oraz rzut z góry konstrukcji mostu im. Tadeusza Mazowieckiego w Rzeszowie

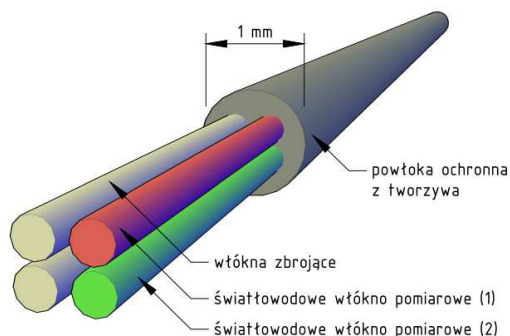


Rysunek 3. Przekrój poprzeczny przez płytę pomostu

### 3. Wybór, instalacja i nazewnictwo czujników światłowodowych

Do pomiarów odkształceń w sposób geometrycznie ciągły można wykorzystywać standardowe włókna telekomunikacyjne. Włókna te powleczone są powłokami ochronnymi, których celem jest ich mechaniczne zabezpieczenie przed uszkodzeniami. Niestety, powłoki te mogą też zaburzać proces przekazywania odkształceń z badanego elementu na włókno szklane. Dlatego też przy wyborze światłowodów do konkretnego zagadnienia pomiarowego należy zachować szczególną ostrożność, a najlepiej skonsultować się ze specjalistami w tym zakresie.

W przedmiotowym obiekcie, ze względu na skalę instalacji (przęsło mostu o długości 150 [m]) oraz jej warunki (montaż z wózka rewizyjnego), do opomiarowania dźwigara blachownicowego wybrano czujnik światłowodowy o specjalnie zaprojektowanej konstrukcji. W ściślej powłoce z tworzywa sztucznego o średnicy zewnętrznej równej w przybliżeniu 1 [mm] zatopiono dwa włókna pomiarowe oraz dwa włókna zbrojące. Takie rozwiązanie pozwoliło na uśrednianie danych z włókien światłowodowych w procesie post-processingu w celu zwiększenia dokładności uzyskiwanych wyników. Wizualizację zastosowanego światłowodu przedstawiono na rysunku 4.

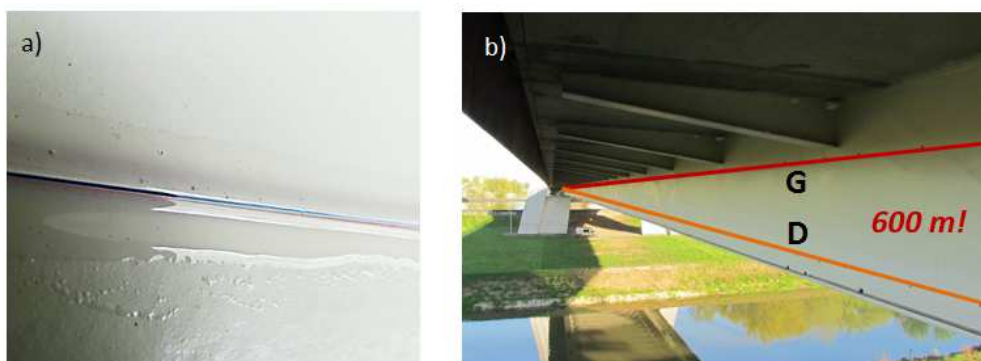


**Rysunek 4.** Wizualizacja zastosowanego światłowodowego czujnika pomiarowego (średnica zewn. ok. 1 [mm])

Instalacja światłowodowego czujnika pomiarowego odbywała się z wózka rewizyjnego w następujących etapach:

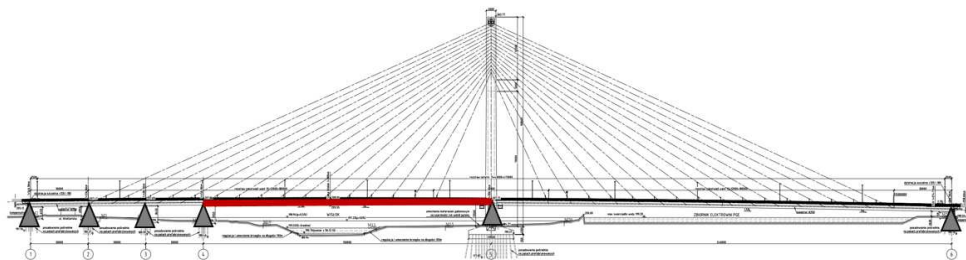
- oczyszczenie powierzchni dźwigara,
- odfuszczenie powierzchni dźwigara,
- wytyczenie i wstępne zamocowanie światłowodowego czujnika pomiarowego za pomocą specjalnie zaprojektowanego urządzenia trasującego,
- docelowe zamocowanie czujnika przy zastosowaniu dwuskładnikowego, epoksydowego kleju konstrukcyjnego.

Światłowodowy czujnik pomiarowy zainstalowano wzdłuż dwóch tras: dolnej **D** oraz górnej **G**. Włókna prowadzono w odległości ok. 15 [cm] powyżej półki dolnej, a w górnej części dźwigara – poniżej żeber podchodnikowych w celu zminimalizowania zakłóceń spowodowanych obecnością spoin. Szczegóły dotyczące rozmieszczenia czujników światłowodowych w obrębie dźwigara północnego przedstawiono na poniższych rysunkach.

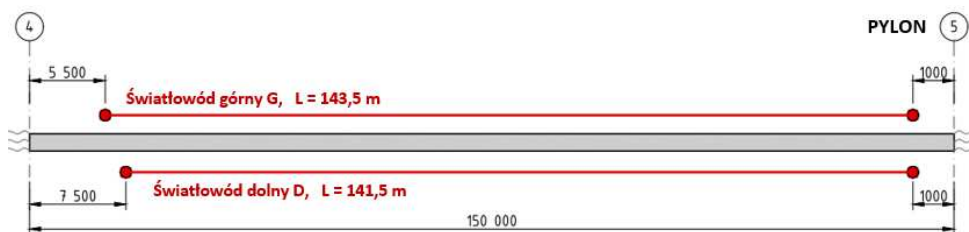


**Rysunek 5.** a) Widok czujnika światłowodowego zamocowanego na powierzchni dźwigara; b) wizualizacja tras pomiarowych

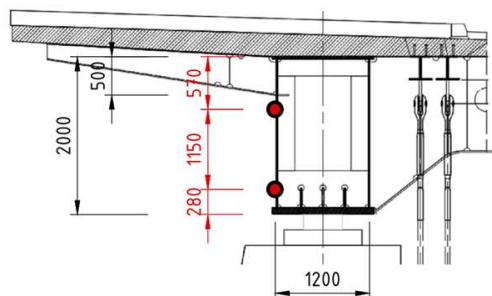
*Pomiary deformacji mostu podwieszonoego  
z wykorzystaniem światłowodowych czujników geometrycznie ciągłych DFOS*



**Rysunek 6.** Monitorowane przęsło mostu w widoku z boku



**Rysunek 7.** Lokalizacja czujników światłowodowych na długości monitorowanego przęsła



**Rysunek 8.** Rozmieszczenie czujników światłowodowych w przekroju dźwigara

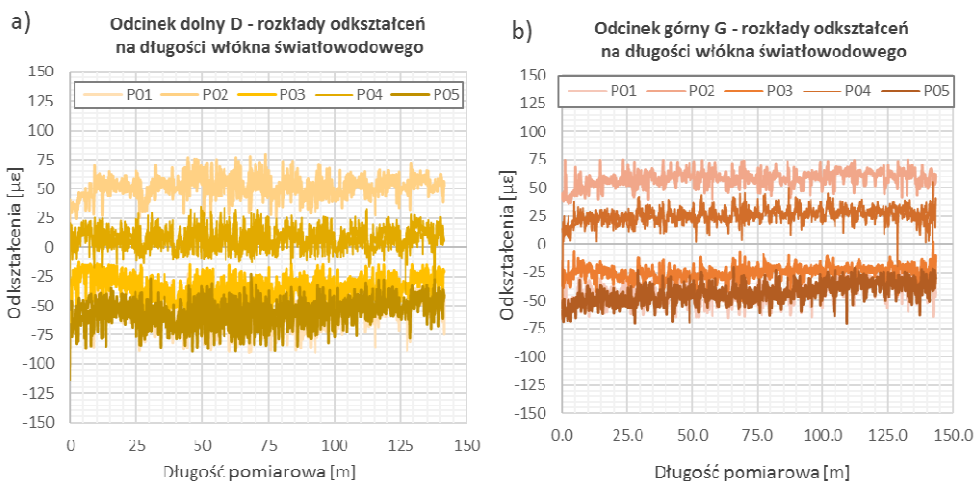
W czasie instalacji bardzo istotne było zachowanie stałego rozstawu pomiędzy światłowodem górnym i dolnym, ze względu na założenia teoretyczne opracowanego algorytmu służącego do wyznaczania wartości przemieszczeń na podstawie pomierzonych odkształceń. W tym celu zaprojektowano i wykonano specjalne urządzenie, za pomocą którego wytrasowano położenie czujników światłowodowych na powierzchni środnika dźwigara przyjmując jako odniesienie dolną krawędź półki dolnej.

#### **4. Pomiary odkształceń**

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wykresy zmian odkształceń zmierzonych na długości obydwu odcinków czujników światłowodowych w poszczególnych sesjach pomiarowych względem pomiaru zerowego, wykonanego po instalacji włókien. Zmierzone odkształcenia były wynikiem przede wszystkim nierównomiernego obciążenia temperaturą konstrukcji mostu.

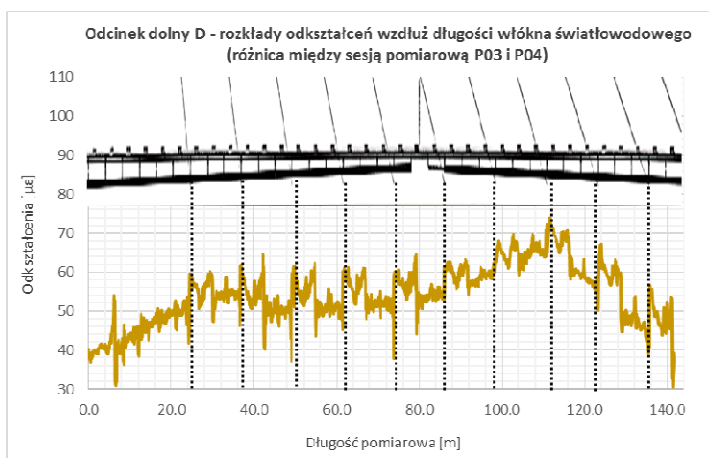
Analizując wykresy odkształceń w dziedzinie długości przęśla należy zwrócić uwagę na ich niejednorodny przebieg związany m.in. z:

- występowaniem spoin pionowych na długości dźwigara blachownicowego;
- lokalnym wpływem zakotwienia want do dźwigarów;
- lokalnym wpływem żeber podchodnikowych i poprzecznic.

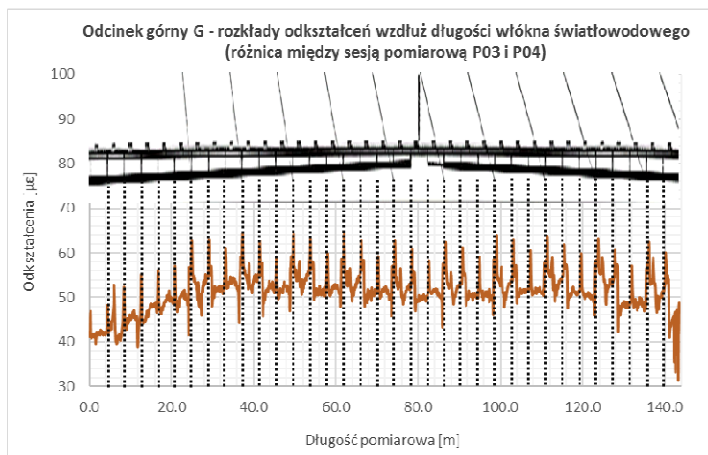


**Rysunek 9.** Zmierzone rozkłady odkształceń światłowodem czujnikiem pomiarowym: a) dolnym, b) górnym

Ponadto, przeprowadzono doświadczenie polegające na wykonaniu dwóch sesji pomiarowych tego samego dnia (15.06.2018), w odstępie czterech godzin. W tym czasie zanotowano wzrost temperatury otoczenia o ok. 2,6 [°C], która była podstawowym oddziaływaniem na konstrukcję mostu (poza krótkotrwałymi obciążeniami przejazdami samochodów). Wyraźnie uwidocznił się wpływ usztywnienia dźwigara żebrami i poprzecznicami oraz zakotwień want, co przedstawiono na poniższych rysunkach.



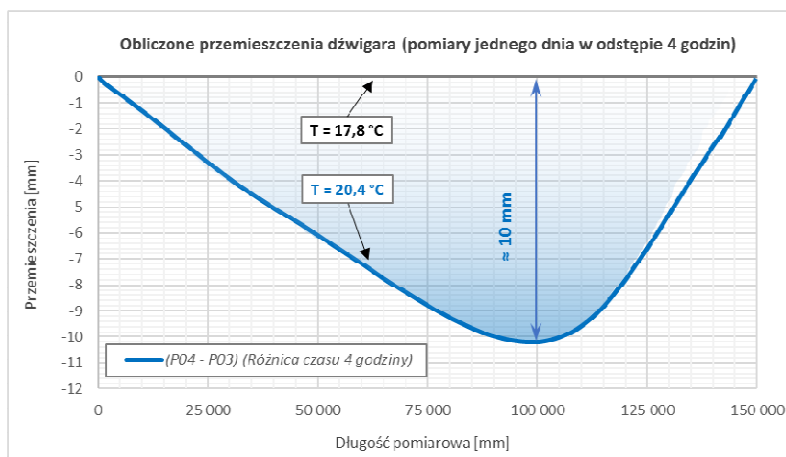
**Rysunek 10.** Przyrost odkształceń światłowodu dolnego pomiędzy dwoma kolejnymi sesjami pomiarowymi z dnia 15.06.2018 r. (widoczny wpływ zakotwień want na uzyskany rozkład odkształceń)



**Rysunek 11.** Przyrost odkształceń światłowodu górnego pomiędzy dwoma kolejnymi sesjami pomiarowymi z dnia 15.06.2018 r. (widoczny wpływ zeber i poprzecznic want na uzyskany rozkład odkształceń)

#### 4. Wyznaczanie przemieszczeń względnych

W celu wyznaczenia przemieszczeń względnych (ugięć) dźwigara zastosowano autorski algorytm, opierający się na zależnościach geometrycznych pomiędzy włóknami pomiarowymi rozmieszczonymi w przekroju elementu w znanym rozstawie. Zakłada się, że dźwigar pracuje w zakresie liniowo-sprężystym oraz że spełniona jest zasada płaskich przekrojów Bernulliego. Do poprawnej realizacji algorytmu konieczna jest znajomość funkcji odkształceń obu włókien na całej długości przęsła. Ponadto, wymagana jest znajomość kąta obrotu dźwigara na początku odcinka pomiarowego (przy pylonie) lub znajomość wartości przemieszczeń w przynajmniej dwóch dowolnych punktach na długości odcinka pomiarowego. Ze względu na podparcie dźwigara na pylonie (rzędna 0 [m] na rys. 12) oraz na filarze (rzędna 150 [m] na rys. 12), przyjęto założenie, że wartości przemieszczeń w tych punktach wynoszą 0 [m].



**Rysunek 12.** Obliczone przemieszczenia względne dźwigara pomiędzy kolejnymi sesjami pomiarowymi z dnia 15.06.2018 r.

## 5. Podsumowanie

Analizując wykres przemieszczeń względnych dźwigara należy zwrócić uwagę na fakt, jak istotny wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów ma zmiana temperatury otoczenia oraz promieniowanie słoneczne. Ugięcie przęsła rzędu 10 [mm] odnotowano zaledwie w czasie 4 godzin. Temperatura dźwiara w sąsiedztwie pylonu zmieniła się wówczas o niespełna 3 [°C], jednak była ona rejestrowana w miejscu zacienionym pod pomostem. Warstwy asfaltowe, a także wanty oraz górna część pylonu, wystawione były na bezpośrednie oddziaływanie promieni słonecznych, a tym samym wzrost ich temperatury był znacznie większy. Obciążenie termiczne poszczególnych elementów konstrukcji mostu nie było równomierne, co przełożyło się bezpośrednio na zmierzone odkształcenia dźwigara i wyznaczone na ich podstawie przemieszczenia względne. Obecnie trwają prace nad budową przestrzennego modelu konstrukcji mostu w środowisku metody elementów skończonych w celu dokładnego przeanalizowania wpływu nierównomiernej temperatury na deformację konstrukcji.

Warto zwrócić uwagę na olbrzymie możliwości światłowodowej techniki pomiarowej w kontekście analizowania lokalnych zjawisk, mających wpływ na pracę dźwigarów mostowych. W tym przypadku, na rozkład odkształceń środnika wzdłuż dolnego i górnego odcinka pomiarowego, istotny wpływ miały pionowe spoiny łączące kolejne jego elementy, miejsca zakotwienia want w dźwigarach, a także poprzecznice i żebra podchodnikowe. Żadna inna technika pomiarowa nie jest obecnie w stanie analizować tego typu lokalnych zjawisk w sposób tak kompleksowy lub jej stosowanie nie jest ekonomicznie i inżyniersko uzasadnione.

Przedstawiona w niniejszym artykule koncepcja pomiarowa oraz konkretne środki techniczne potrzebne do jej realizacji, niosą za sobą ogromne możliwości w kontekście oceny stanu technicznego obiektów mostowych i w istotnym stopniu mogą przyczynić się do rozwoju konstrukcji inteligentnych, które już na etapie prefabrykacji lub budowy wyposażane będą w światłowodowe włókna pomiarowe. Pierwszy tego typu most z kompozytów FRP powstał już w Polsce w miejscowości Nowa Wieś k. Rzeszowa [14].

## Literatura

- [1] SIWOWSKI T., RAJCHEL M., KALETA D., WŁASAK L. Pierwszy w Polsce most drogowy z kompozytów FRP. *Inżynieria i Budownictwo* 10/2016.
- [2] SIWOWSKI T., KULPA M., RAJCHEL M., KALETA D. Nowy most drogowy z kompozytów FRP. *Mosty* 3-4/2017.
- [3] XU Y. L., XIA Y., *Structural Health Monitoring of Long-Span Suspension Bridges*. Spon Press, London and New York, 2012.
- [4] WENTZEL H., *Health Monitoring of Bridges*. John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [5] BARCIK W., SIENKO R., BILISZCZUK J. System monitorowania konstrukcji Mostu Rędzińskiego we Wrocławiu. *Wrocławskie Dni Mostowe*, Wrocław 2011
- [6] BEDNARSKI Ł., SIENKO R., HOWIACKI T. Analysis of rheological phenomena in reinforced concrete cross-section of Rędziński bridge pylon based on in situ measurements. *Procedia Engineering*, 09.07.2015, 536-543.
- [7] BILISZCZUK J., BARCIK W., SIENKO R. System monitorowania mostu w Puławach, *Mosty* 4/2009, str. 12-17.
- [8] BILISZCZUK J., HILDEBRAND M., BARCIK W., HAWRYSZKÓW P. System obserwacji ciągłej mostu podwieszonoego przez Wisłę w Płocku. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 7-8/2006.



- [9] ŻÓŁTOWSKI K., MALINOWSKI M., HILDEBRAND M. Monitoring mostów podwieszonych. *Mosty*, nr 3/2009.
- [10] SIENKO R. Systemy monitorowania mostów – przykładowe realizacje. *Mosty*, 5/2013, str. 24-29.
- [11] GLIŠIĆ B., INAUDI D., *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*, Wiley, 2007.
- [12] KUSZNIER J., *Światłowody w zastosowaniach czujnikowych*, Politechnika Białostocka, Białystok 2016.
- [13] SAMIEC D.: Distributed fibre-optic temperature and strain measurement with extremely high spatial resolution. *Photonic International*, 2012.
- [14] SIWOWSKI T., SIENKO R., BEDNARSKI Ł., RAJCHEL M., HOWIACKI T. Światłowodowe pomiary odkształceń elementów mostów kompozytowych na przykładzie wybranych badań. *Wrocławskie Dni Mostowe*, Wrocław 2017.

## **SUSPENSION BRIDGE DEFERMENT MEASUREMENTS WITH DISTRIBUTED FIBER OPTIC SENSORS DFOS**

### **Summary**

Tadeusz Mazowiecki bridge in Rzeszów by the Wisłok River is one of the largest structures of this type in Poland and the second in terms of the pylon height (just after the Rędziński bridge in Wrocław), put into operation in 2015. The bridge was designed as a suspended by 64 steel cables anchored in one A-shaped pylon of 108m height. The total length of the structure with overpasses is 482m, with the longest span above the power plant container equal to 240m.

The article presents a pilot strain measurements of a steel girder located on the northern side within a 150m long river span. Distributed fiber optic sensors have been used for measurements, enabling the recording of specific physical quantities in a geometrically continuous way along their entire length. Optical fibers were installed at selected girder heights, achieving a total measuring length of 600m. In this case, this corresponds to the application of 6 000 traditional spot strain gauges. The measurements were carried out using two optical dataloggers based on Rayleigh and Brillouin scattering. An algorithm was also proposed, which allows for calculating displacements (deflections) of the span being monitored based on continuous strain measurements.