

# Most Uniwersytecki w Bydgoszczy: światłowodowe pomiary odkształceń DFOS stalowych zakotwień w trakcie ich naprawy

RAFAL SIEŃKO<sup>1</sup>, ŁUKASZ BEDNARSKI<sup>2</sup>, TOMASZ HOWIACKI<sup>1,3,\*</sup>, MAREK GOTOWSKI<sup>4</sup>, PAWEŁ PIETRASZAK<sup>4</sup>, DAMIAN WILUŚ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

<sup>2</sup>Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

<sup>3</sup>SHM System Sp. z o.o., Sp. kom., [www.shmsystem.pl](http://www.shmsystem.pl), [www.nerve-sensors.com](http://www.nerve-sensors.com)

<sup>4</sup>Kormost S.A., [www.kormost.pl](http://www.kormost.pl)

**Streszczenie:** Most Uniwersytecki w Bydgoszczy to jeden z najsłynniejszych obiektów mostowych w Polsce, m.in. z uwagi na nietypową geometrię oraz zastosowane rozwiązania konstrukcyjne. Pylon składa się z dwóch krzyżujących się części w kształcie dużych liter greckich: alfa (A) i omega (Ω). Stalowy pomost został podwieszony do pylonu z wykorzystaniem szesnastu wielosplotowych, stalowych lin. Most został oddany do użytkowania w 2014 r., jednak już po 7 latach eksploatacji doszło do jego awarii. W wyniku przeglądu stanu technicznego zidentyfikowano trwale (plastyczne) deformacje blach w obrębie zakotwień kabli (want) do stalowych dźwigarów. W artykule przedstawiono nowatorski sposób analizy odkształceń tych elementów z wykorzystaniem ciągłych geometrycznych pomiarów światłowodowych DFOS (*ang. distributed fibre optic sensing*). Pomiary przeprowadzono w trakcie prac remontowych, polegających m.in. odprężeniu want, spawaniu blach wzmacniających elementy podwieszające pomost i ponownym naciągu want. W wyniku pomiarów pozyskano unikatowe dane pozwalające na identyfikację najbardziej wyciężonych stref.

**Słowa kluczowe:** most, stal, zakotwienie, wanta, uplastycznienie, naprawa, pomiary DFOS, światłowód, odkształcenia, temperatury

## 1. Pomiary światłowodowe – wprowadzenie

Odpowiedzialne konstrukcje inżynierskie, a w szczególności nowatorskie obiekty mostowe, wyposażane są współcześnie w systemy umożliwiające pozyskanie wiedzy na temat ich stanu technicznego w czasie. Na podstawie obiektywnych danych pomiarowych dostarczonych przez monitoring podejmowane są często decyzje bezpośrednio związane z bezpieczeństwem eksploatacji konstrukcji (np. remont, wzmocnienie, ograniczenie ruchu, wyłączenie z użytkowania). W związku z powyższym zasadne jest poszukiwanie nowszych i lepszych narzędzi diagnostycznych (technik pomiarowych, czujników, rejestratorów), dostarczających bardziej

---

\*Autor do korespondencji: [th@shmsystem.pl](mailto:th@shmsystem.pl)

użytecznych informacji. Prace w tym zakresie trwają na całym świecie zarówno w jednostkach naukowych jak i komercyjnych.

Do najbardziej obiecujących technik należą światłowodowe pomiary geometrycznie ciągle DFOS (*ang. distributed fibre optic sensing*). W przeciwieństwie do konwencjonalnych pomiarów punktowych, umożliwiają one pozyskanie informacji (np. o odkształceniach, przemieszczeniach lub temperaturach) na całej długości liniowego czujnika zainstalowanego wzdłuż elementu konstrukcyjnego, np. belki, płyty, słupa, dźwigara, nawierzchni drogowej itd. Dzięki temu istnieje możliwość bezpośredniej detekcji wszystkich zdarzeń występujących na długości, w tym zarysowania betonu, pęknięcia czy też lokalnego uplastycznienia stali. To zupełny przełom w jakości uzyskiwanej informacji [1].

System pomiarowy zbudowany w oparciu o technikę DFOS składa się z dwóch podstawowych części: czujników oraz rejestratora. Podstawowym zadaniem czujników jest wierne przeniesienie odkształceń powstających w elemencie konstrukcyjnym na światłowodowe włókno pomiarowe (szklany rdzeń światłowodu). Powinny też charakteryzować się odpowiednią wytrzymałością, odkształcalnością i wysoką trwałością – raz zainstalowane na konstrukcji stanowić będą swoisty układ nerwowy informujący o wszystkich potencjalnych zagrożeniach. Są więc zatem podstawowym elementem decydującym o niezawodności całego systemu. Rejestrator, czyli urządzenie służące do zbierania danych z czujników celem ich dalszej obróbki i analizy, może zostać stosunkowo łatwo wymieniony w przypadku ewentualnej awarii.

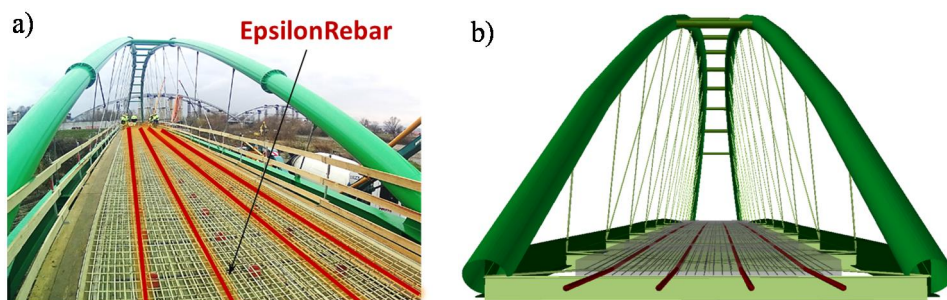
Na rynku dostępnych jest wiele rejestratorów optycznych wykorzystujących trzy podstawowe zjawiska fizyczne: rozpraszanie Rayleigha [2], Brillouina [3] i Ramana [4]. Każde z nich charakteryzuje się różnymi parametrami pomiarowymi, dobieieranymi indywidualnie w zależności od wymagań danego projektu. Przykładowo, rozpraszanie Rayleigha wykorzystuje się na stosunkowo krótkich odcinkach (do 100 m) w celu uzyskania ekstremalniej rozdzielczości przestrzennej (nawet 100 punktów pomiarowych na jeden metr czujnika). Z kolei rozpraszanie Brillouina umożliwia pomiary na bardzo długich odcinkach (rzędu dziesiątek kilometrów) z rozdzielczością rzędu 20 cm (5 punktów na metr).

W dalszej części niniejszego artykułu zaprezentowano system DFOS do pomiarów odkształceń uplastycznionych elementów stalowych zakotwień want w ramach Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy. Na konkretnym przykładzie omówiono zastosowane czujniki, sposób ich instalacji, ale przede wszystkim wyniki pomiarów wykonanych po awarii i zamknięciu mostu – w czasie jego naprawy i wzmocnienia. Przedstawiono także wybrane przykłady analogicznych systemów zainstalowanych na obiektach mostowych w Polsce. Z uwagi na unikatowe możliwości światłowodowej techniki pomiarowej DFOS, w ostatnich latach zaobserwowano istotny wzrost jej zastosowań na rzeczywistych konstrukcjach.

## 2. Przykłady zastosowań – obiekty mostowe w Polsce

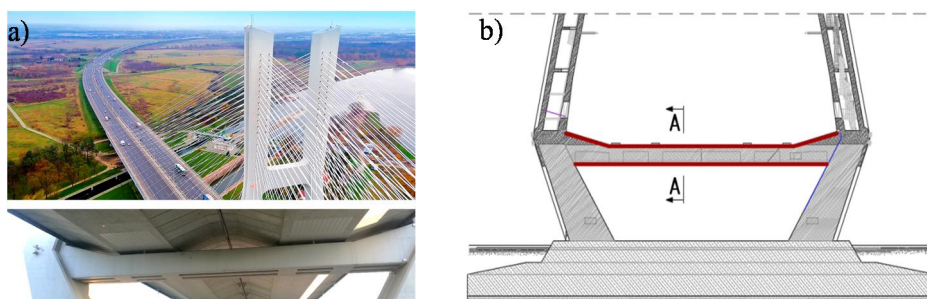
W niniejszym rozdziale w sposób skrótowy przedstawiono przegląd wybranych systemów pomiarowych, zbudowanych w oparciu o światłowodową technikę pomiarową DFOS, na obiektach mostowych w Polsce w ostatnich latach. Przegląd ten ma na celu zaprezentowanie wszechstronnych możliwości pomiarów DFOS, niezależnie od sposobu instalacji czujników (zatapianie wewnątrz nowych konstrukcji bądź instalacja powierzchniowa na istniejących konstrukcjach) oraz niezależnie od monitorowanego materiału. Pozytywne doświadczenia zebrano w odniesieniu do mostów kompozytowych, betonowych, stalowych czy zespolonych. Kompozytowe, monolityczne czujniki odkształceń EpsilonRebar [5] zainstalowano na całej długości pomostu (80 m) hybrydowej kładki pieszo-rowerowej w Nowym Sączu [6]. Na uwagę zasługuje fakt, że zbrojenie pomostu w całości wykonane zostało jako kompozytowe (rys 1a). Czujniki EpsilonRebar (rys. 1b) pełnią zatem w tym przypadku dwie

funkcje jednocześnie: stanowią zbrojenie uwzględniane w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych i dostarczają informacji na temat rozkładu odkształceń na całej długości kładki. Zainstalowano łącznie 12 czujników zlokalizowanych w różnych miejscach przekroju poprzecznego. W ramach jednej sesji pomiarowej uzyskiwana jest informacja aż z 96 000 punktów pomiarowych! W zależności od stosowanego rejestratora optycznego lub podejścia obliczeniowego, dostarczana jest informacja na temat odkształceń, naprężeń, przemieszczeń, zarysowań i temperatur.



Rys. 1. Kładka pieszo-rowerowa w Nowym Sączu: a) widok w czasie instalacji czujników, b) wizualizacja przestrzenna konstrukcji wyposażonej w inteligentne czujniki EpsilonRebar [6].

Czujniki EpsilonRebar zostały także zastosowane w ramach jednego z największych mostów betonowych w Polsce – Moście Rędzińskim we Wrocławiu (rys. 2a). Z uwagi na występujące zarysowania rygla pylonu, zdecydowano o ich kontroli za pomocą pomiarów geometrycznie ciągłych. Cztery czujniki zostały zainstalowane w przypowierzchniowych bruzdach wykonanych w pobliżu naroży rygla (rys. 2b). Unikatowe dane pomiarowe pozwoliły odzwierciedlić zmieniającą się morfologię rys nie tylko w długim terminie, ale także w trakcie krótkotrwałych pomiarów pod zmieniającym się losowo obciążeniem pojazdów (zamykanie i otwieranie się rys).



Rys. 2. Most Rędziński we Wrocławiu: a) widok ogólny ze zbliżeniem na rygiel pylonu; b) przekrój podłużny przez rygiel z zaznaczeniem lokalizacji inteligentnych czujników EpsilonRebar.

Do innych obiektów mostowych, których elementy betonowe zostały objęte pomiarami światłowodowymi DFOS, należą m.in. most zespolony w Dąbrowie Górniczej oraz dwa kratownicowe mosty kolejowe przez rz. Noteć w miejscowości Krzyż Wielkopolski (o długościach odpowiednio 60 i 90 m).

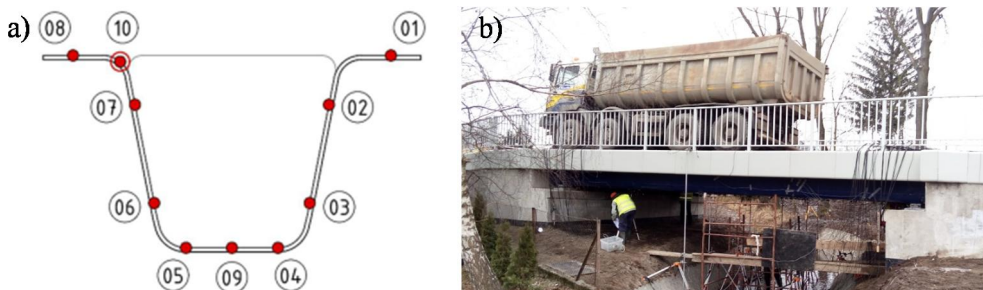
Warto także podkreślić, że kompozytowe, monolityczne czujniki DFOS [5] są w całości zbudowane w oparciu o polską myśl techniczną, znajdującą uznanie na arenie międzynarodowej. Pierwsze inteligentne mosty wyposażone w infrastrukturę światłowodową zrealizowano m.in.

nieopodal miejscowości Marysville w Stanach Zjednoczonych Ameryki (Kalifornia) oraz w miejscowości Sande w Niemczech (rys. 3a). W tym drugim przypadku czujniki kompozytowe wykorzystano zarówno do pomiarów odkształceń betonu, jak również prętów zbrojeniowych (rys. 3b).



Rys. 3. Most kolejowy w miejscowości Sande w Niemczech: a) widok ogólny; b) zbliżenie na czujniki światłowodowe do pomiarów odkształceń betonu i prętów zbrojeniowych.

Pomiary światłowodowe znalazły także zastosowanie w odniesieniu do mostów kompozytowych [7]. Pierwszy taki most w Polsce wykonany w całości z kompozytów (zarówno dźwigary jak i płyta pomostu) zlokalizowany jest w m. Nowa Wieś k. Rzeszowa. Światłowodowe włókna pomiarowe przyklejono w zakładzie prefabrykacji na powierzchni dźwigara, tworząc 10 odcinków pomiarowych (rys. 4a). Z uwagi na pomijalny koszt czujników, nie było zasadne ograniczanie ich liczby. Pomiary odkształceń prowadzono w czasie obciążenia próbnego (rys. 4b) [7], a na ich podstawie wyznaczone zostały także przemieszczenia pionowe (ugięcia). Referencyjne techniki pomiarowe potwierdziły bardzo wysoką dokładność pomiarów światłowodowych realizowanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

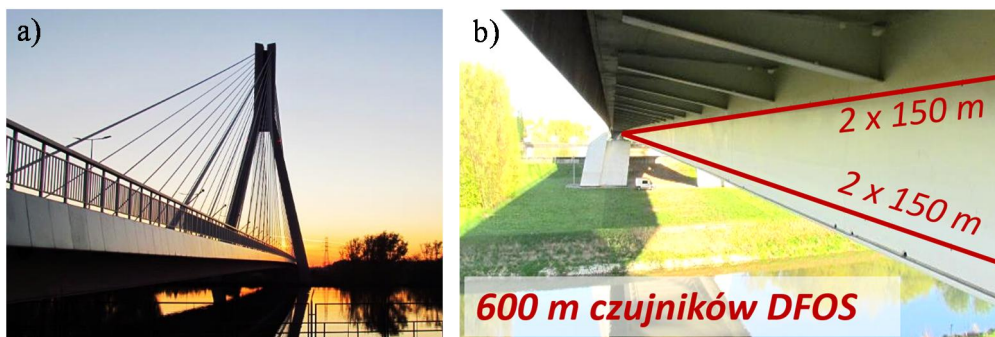


Rys. 4. Pierwszy w Polsce w pełni kompozytowy most w m. Nowa Wieś k. Rzeszowa: a) lokalizacja czujników światłowodowych w przekroju dźwigara; b) widok w czasie obciążenia próbnego [8].

Do monitorowanych techniką DFOS mostów kompozytowych zaliczyć należy także dwa obiekty zlokalizowane w Rzeszowie: Most Karpacki oraz Most Narutowicza. W obu przypadkach dobudowane zostały tam kompozytowe pomosty dla pieszych, w ramach których czujniki światłowodowe zintegrowano wewnątrz paneli już na etapie ich produkcji (infuzji). To jedne z pierwszych tego typu inteligentnych elementów na świecie.

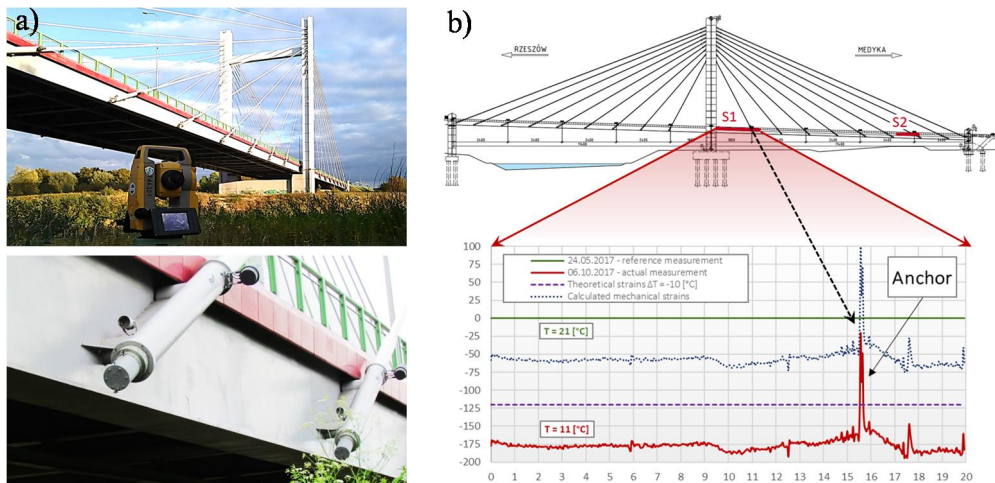
Pomiary DFOS z powodzeniem prowadzono również w odniesieniu do mostów stalowych. Na moście im. Tadeusza Mazowieckiego w Rzeszowie (rys. 5a) zainstalowano aż 600 metrów trasy światłowodowej. Czujniki poprowadzono zarówno w dolnej, jak i górnej części stalowego dźwigara (rys. 5b). Dzięki temu możliwe było wykrywanie i analizowanie bardzo

lokalnych efektów związanych m.in. z obecnością zakotwień want, wsporników podchodnikowych czy też spoin pionowych. Zjawiska takie są zazwyczaj bardzo trudne do teoretycznej analizy, nawet z wykorzystaniem zaawansowanych, przestrzennych modeli numerycznych. Na podstawie pomiarów wyznaczone zostały także przemieszczenia pionowe na całej długości przęsła rzecznego.



Rys. 5. Most im. Tadeusza Mazowieckiego w Rzeszowie: a) widok ogólny; b) zbliżenie na przęsło z zainstalowanymi czujnikami światłowodowymi o łącznej długości ponad 600 m [9].

Analogiczny projekt zrealizowano na moście „Brama Przemyska” w Przemyśle (rys. 6a). W tym przypadku szczególną uwagę zwrócono na lokalne deformacje stalowego dźwigara w pobliżu miejsc zakotwień want. Przykładowe wyniki rozkładu odkształceń na wybranym odcinku pomiarowym o długości 20 metrów przedstawiono na rys. 6b.

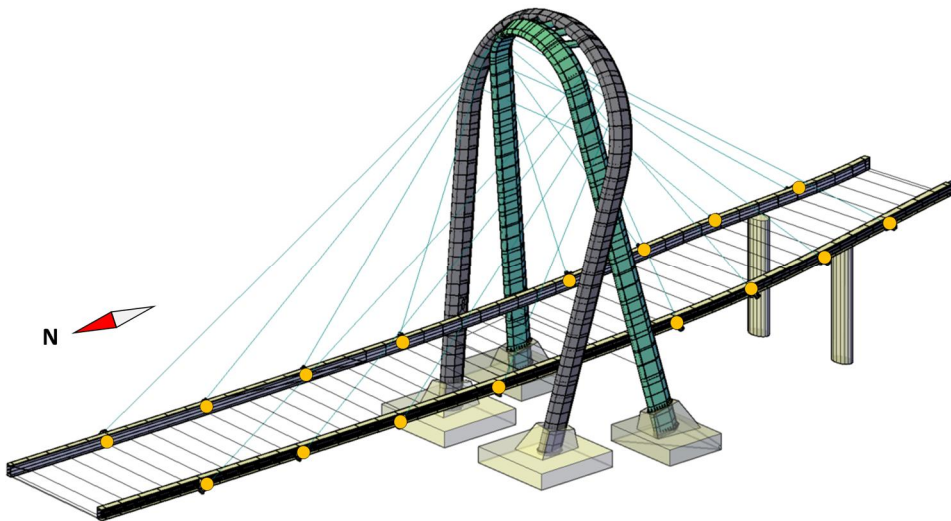


Rys. 6. Most „Brama Przemyska”: a) widok ogólny ze zbliżeniem na zakotwienie wanty w dźwigarze; b) przekrój podłużny z przykładowymi wynikami pomiarów wskazującymi na lokalne zaburzenia w rozkładzie odkształceń w obszarze zakotwienia.

Wyraźnie widoczna jest lokalizacja zakotwienia. Dzięki pomiarom geometrycznie ciągłym możliwe było wskazanie ekstremalnej wartości odkształcenia (naprężenia), wielokrotnie większej niż w niezaburzonym obszarze pomiędzy zakotwieniami.

### 3. Most Uniwersytecki w Bydgoszczy i pomiary światłowodowe DFOS

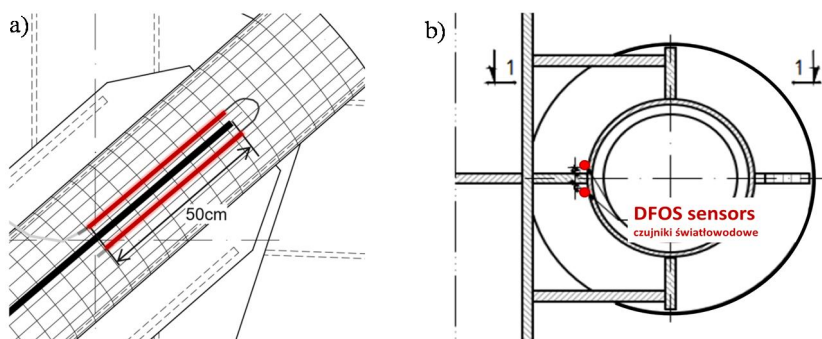
Most Uniwersytecki w Bydgoszczy to jeden z najsłynniejszych obiektów mostowych w Polsce, m.in. z uwagi na nietypową geometrię oraz zastosowane rozwiązania konstrukcyjne. Pylon składa się z dwóch krzyżujących się części w kształcie wielkich liter greckich: alfa ( $\alpha$ ) i omega ( $\Omega$ ). Stalowy pomost został podwieszony do pylonu z wykorzystaniem szesnastu wielosplotowych, stalowych lin. Most został oddany do użytkowania w 2014 r, jednak już po 7 latach eksploatacji doszło do jego awarii. W wyniku przeglądu stanu technicznego zidentyfikowano trwałe (plastyczne) deformacje blach w obrębie zakotwień kabli (want) do stalowych dźwigarów. Spowodowało to wyłączenie obiektu z eksploatacji [10], co odbiło się szerokim echem w środowisku naukowym i inżynierskim [11]. Ostatecznie zaprojektowano i wykonano wzmocnienie węzłów polegające w uproszczeniu na odprężeniu want, przyspawaniu do węzłów dodatkowych blach konstrukcyjnych oraz ponownym naciągu want [12]. Wzmocnienie zostało zrealizowane przez firmę Kormost S.A. [13].



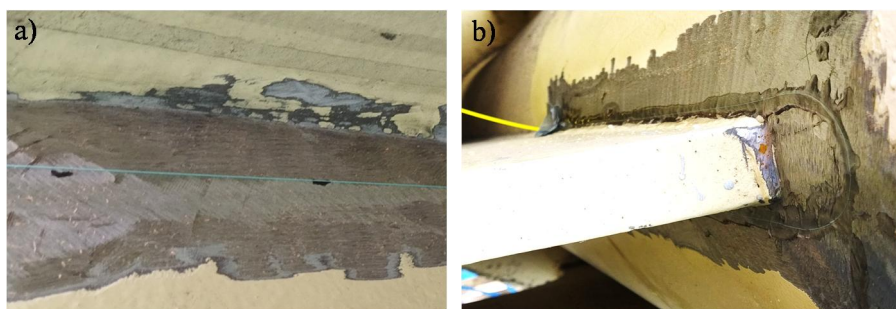
Rys. 7. Wizualizacja przestrzenna Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy z zaznaczeniem lokalizacji węzłów, na których zainstalowano światłowodowe trasy pomiarowe.

Przed odprężeniem want na wybranych blachach zakotwień zainstalowane zostały czujniki światłowodowe DFOS w postaci włókien o średnicy  $250\ \mu\text{m}$ . Szczegółowa lokalizacja trasy została określona na podstawie przestrzennych symulacji numerycznych. Składa się ona z dwóch odcinków o długości  $50\ \text{cm}$  każdy – rys. 8. Uwzględniając pętlę łączącą dwa odcinki, długość światłowodu na każdym zakotwieniu wynosi  $115\ \text{cm}$ . Łącznie na 16 zakotwieniach uzyskiwanych jest aż 3 680 punktów pomiarowych (przy rozdzielczości przestrzennej na poziomie  $5\ \text{mm}$ ).

Istotnym aspektem jest zapewnienie odpowiedniego sposobu instalacji, umożliwiającego poprawne przeniesienie odkształceń ze stali na światłowodowe włókno pomiarowe. W przedmiotowym projekcie czujniki były klejone bezpośrednio do oczyszczonej i odtłuszczonej powierzchni stali (rys. 9a i 9b), po uprzednim usunięciu powłok ochronnych (zostały one odtworzone po instalacji czujników). Do klejenia wykorzystano dwuskładnikową żywicę epoksydową o odpowiednio dobranej (i zweryfikowanej) odkształcalności, umożliwiającą wykorzystanie pełnego zakresu pomiarowego światłowodu, a tym samym poprawną rejestrację odkształceń nawet w zakresie plastycznym stali.

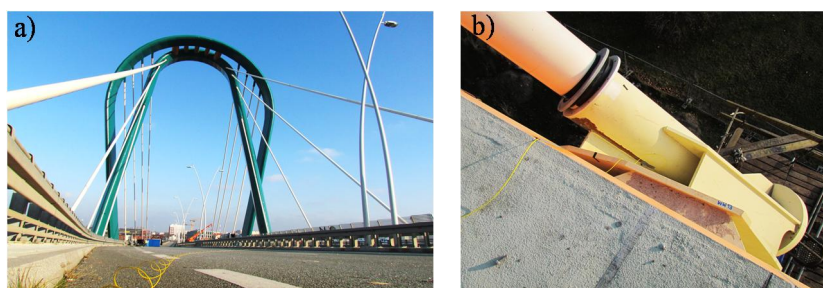


Rys. 8. Lokalizacja czujników światłowodowych w obrębie przykładowego zakotwienia: a) widok ogólny; b) przekrój poprzeczny.



Rys. 9. Instalacja czujników światłowodowych: a) zbliżenie na prosty odcinek przed klejeniem, b) zbliżenie na pętlę po aplikacji kleju konstrukcyjnego.

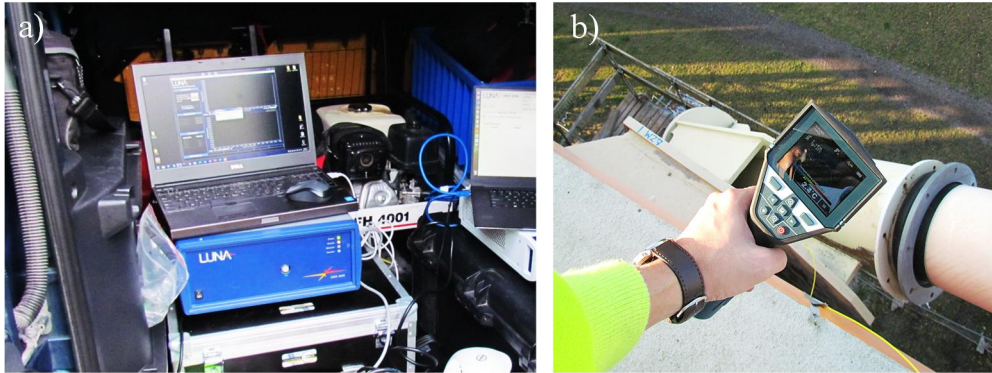
Pomiary światłowodowe wykonywano w ramach okresowych sesji. Pomiary zerowe (referencyjne, odniesienia) wykonano jeszcze przed odprężeniem want, natomiast kolejny pomiar już po ich odprężeniu (rys. 10). Uzyskane wyniki odkształceń (i wyznaczonych naprężeń) należy zatem traktować w sposób przyrostowy, a nie bezwzględny.



Rys. 10. Most Uniwersytecki w Bydgoszczy w czasie sesji pomiarowej po odprężeniu want: a) widok ogólny; b) zbliżenie na zakotwienie wanty nr 2114.

Pomiary wykonywano w ramach mobilnego stanowiska pomiarowego (rys. 11a) z wykorzystaniem odpowiedniej przedłużki doprowadzanej bezpośrednio do każdego zakotwienia. Dodatkowo wykonywano pomiary temperatury z wykorzystaniem pirometru (rys. 11b) z uwagi na konieczność uwzględnienia jej wpływu na wskazania czujników DFOS w ramach długoterminowego monitorowania. Dzięki temu możliwe było wykonanie szczegółowych

obliczeń kompensacyjnych i rozdzielenie efektów pochodzących wyłącznie od obciążeń mechanicznych (odprężenia want) od tych pochodzących od zmiany temperatury.



Rys. 11. a) Widok mobilnego stanowiska pomiarowego z rejestratorem optycznym; b) zbliżenie na zakotwienie wanty nr 2114.

Pomiary światłowodowe wykonywane były w ramach okresowych sesji, jednak warto podkreślić, że nowe, wzmacniające blachy zakotwień zostały wyposażone w czteroczujnikowe rozety zbudowane z czujników strunowych (*ang. vibrating wire sensors*), umożliwiających realizowanie pomiarów automatycznych (co 15 min). Pomiary odkształceń (naprężeń) prowadzone są teraz w odniesieniu do zdefiniowanych wartości alarmowych. Ponadto, system monitorowania wyposażono w dwukierunkowe akcelerometry, na podstawie których wyznaczane są aktualne siły w wantach. Zaawansowany i zautomatyzowany system monitorowania wspomagany przez okresowe pomiary światłowodowe został zrealizowany w 2021 r. przez firmę SHM System z Krakowa [14]. Ma on na celu pełną kontrolę stref zakotwień i ich ochronę przed nadmiernymi deformacjami. Sytuacja, w której konieczne było wyłączenie nowego obiektu z eksploatacji, jest niedopuszczalna z punktu widzenia obecnego stanu techniki w zakresie narzędzi diagnostycznych.

#### 4. Przykładowe wyniki pomiarów

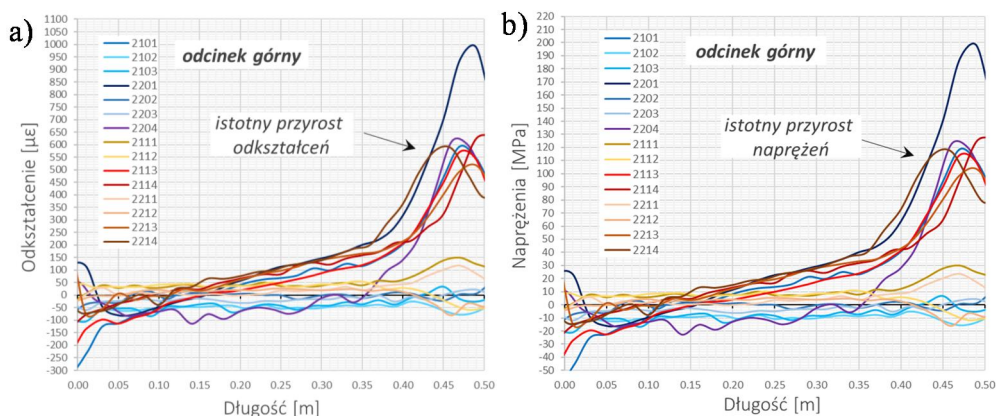
W niniejszym rozdziale skrótowo zaprezentowano wyniki pomiarów DFOS, jakie zarejestrowano na skutek odprężenia want przed spawaniem blach wzmacniających. W obliczeniach, uwzględniając temperaturę zmierzoną z wykorzystaniem pirometru, wyznaczono następujące wielkości fizyczne:

- odkształcenia rzeczywiste związane ze zmianą długości „L” – są sumą odkształceń wywołanych oddziaływaniem temperatury oraz odkształceń powstałych na skutek oddziaływań mechanicznych. Odkształcenia te w całości lub w części generują naprężenia. Innymi słowy, są to takie odkształcenia, które mogłyby zostać wyznaczone w punkcie pomiarowym na podstawie pomiaru zmiany długości bazy wykonanego przy pomocy zewnętrznego urządzenia, np. suwmiarki,
- odkształcenia generujące naprężenia „N” – to takie teoretyczne odkształcenia, które przy zastosowaniu prawa Hooke'a, odpowiadają wartościom naprężeń w punkcie pomiarowym. Mogą być spowodowane oddziaływaniami mechanicznymi i niemechanicznymi. Przykładowo, w elemencie belkowym całkowicie obustronnie utwierdzonym na skutek oddziaływania temperatury nie zmienia się jego długość, a zatem nie powstają żadne odkształcenia. Korzystając z pomiaru temperatury będziemy mogli wyznaczyć wartość odkształceń, które



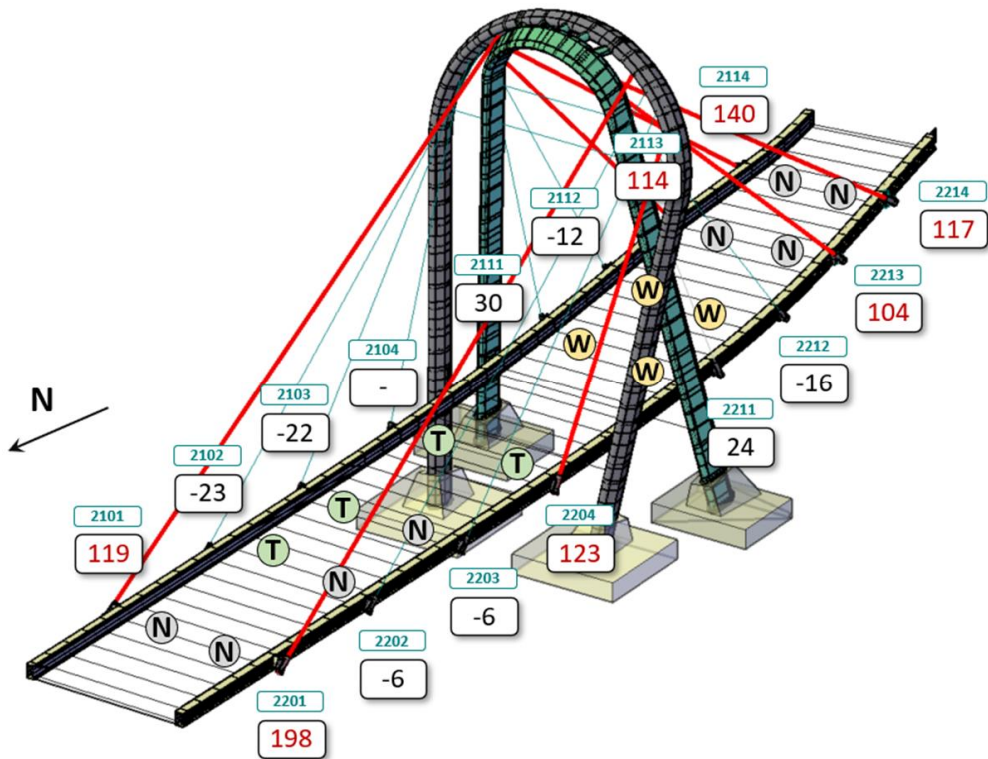
by wystąpiły, gdyby element miał swobodę zmian długości. Wartości te odpowiadać będą powstałym w elemencie naprężeniom,  
 – naprężenia – obliczane na podstawie odkształceń „N” zgodnie z liniowym prawem Hooke’a przy założonym module sprężystości stali.

Trasa pomiarowa na każdym zakotwieniu składała się z dwóch odcinków. W celu zachowania odpowiedniej czytelności, na powyższych rysunkach przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów wyłącznie dla odcinków górnych dla opomiarowanych zakotwień want. Przedstawiono odkształcenia typu „N” (rys. 12a) oraz odpowiadające im naprężenia (rys. 12b). Na części zakotwień (przede wszystkim zewnętrznych) zarejestrowano istotny przyrost odkształceń rozciągających, podczas gdy na pozostałych wartości oscylowały wokół zera. Możliwe było zatem zidentyfikowanie najbardziej wyężonych elementów oraz liczbowe oszacowanie ich deformacji po odprężeniu want.



Rys. 12. Przykładowe wyniki pomiarów na długości odcinków górnych po odprężeniu want a) zmierzone i skompensowane odkształcenia [ $\mu\epsilon$ ], b) wyznaczone naprężenia [MPa].

W wyniku pomiarów pozyskano unikatowe dane pozwalające na identyfikację najbardziej wyężonych stref w obrębie zakotwienia (analiza lokalna) jak i najbardziej wyężonych zakotwień w obrębie mostu (analiza globalna). W celu ułatwienia graficznej interpretacji wyników, maksymalne wartości naprężeń zarejestrowane w poszczególnych zakotwieniach przedstawiono na wizualizacji przestrzennej (rys. 13). Kolorem czerwonym zaznaczono wanty, przy których zakotwieniach zaobserwowano istotne deformacje.



Rys. 13. Wizualizacja przestrzenna wyników pomiarów w postaci maksymalnych wartości wyznaczonych naprężeń [MPa] w zakotwieniach po odprężeniu want.

## 5. Podsumowanie

W niniejszym artykule zaprezentowano przykład skutecznego zastosowania systemu kontroli stanu technicznego Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy. System ten zbudowano wykorzystując innowacyjną technikę pomiarów światłowodowych DFOS, umożliwiającą realizowanie pomiarów w sposób geometrycznie ciągły na całej długości trasy pomiarowej (nawet do 1000 punktów pomiarowych na jeden metr czujnika). Pomimo faktu, że w ramach przedmiotowego systemu wykonano trasy pomiarowe o długości zaledwie 115 cm, analizując 16 zakotwień uzyskano łączną liczbę punktów pomiarowych równą 3 680. Instalacja tak dużej liczby konwencjonalnych czujników punktowych nie jest ani technicznie możliwa, ani ekonomicznie uzasadniona.

Warto podkreślić, że standardowo w ramach obiektów inżynierskich wykonywane są trasy pomiarowe DFOS o długościach od kilku do kilkuset metrów. Jednak niezależnie od skali projektu, pomiary geometrycznie ciągłe umożliwiają identyfikację lokalnych zjawisk nieosiągalnych dla konwencjonalnych technik punktowych.

Niezwykłe możliwości techniki światłowodowej spowodowały w ostatnich latach znaczący wzrost jej zastosowań nie tylko w badaniach laboratoryjnych, ale przede wszystkim w ramach rzeczywistych konstrukcji inżynierskich [15, 16], w tym obiektów mostowych. W niniejszym artykule przedstawiono jedynie wybrane przykłady realizacji tego typu systemów w Polsce. Skuteczność techniki DFOS została potwierdzona w odniesieniu do

monitorowania różnych materiałów, takich jak kompozyty, beton (w szczególności pracujący w stanie zarysowanym) oraz stal. Bardzo szeroki zakres odkształceń czujników światłowodowych umożliwia ich bezpieczną eksploatację oraz poprawne pomiary nawet w przypadku wystąpienia ekstremalnie dużych odkształceń, spowodowanych np. zarysowaniem betonu lub uplastycznieniem stali.

Z uwagi na znikomy koszt czujników w odniesieniu do kosztów samej konstrukcji, a tym bardziej kosztów jej potencjalnej awarii, zaleca się ich instalację na wszystkich odpowiedzialnych obiektach inżynierskich (m.in. mosty, stadiony, hale sportowe, obiekty przemysłowe, gazociągi, drogowe nasypy ziemne i inne konstrukcje liniowe). Stworzony w ten sposób system, analogiczny do układu nerwowego człowieka, może informować o wszystkich potencjalnych zagrożeniach niezależnie od miejsca ich wystąpienia. Ponadto, stworzona w ten sposób światłowodowa infrastruktura pomiarowa zintegrowana z konstrukcją, będzie gotowa do wykorzystania w przyszłości niezależnie od kierunków rozwoju światłowodowych technik pomiarowych i rejestratorów optycznych.

## Literatura

1. Howiacki T.: Światłowodowy – przełom w pomiarach, *Builder*, wrzesień 2019, 78–80.
2. Palmieri L., Schenato L.: Distributed Optical Fiber Sensing Based on Rayleigh Scattering, *The Open Optics Journal*, 2013, 7, (Suppl-1, M7) 104–127.
3. Feng Ch., Kadum J. E., Schneider T.: The State-of-the-Art of Brillouin Distributed Fiber Sensing, *IntechOpen*, in: *Fiber Optic Sensing – Principle, Measurement and Applications* edited by Shien-Kuei Liaw, 2019.
4. Wang W., Chang J., Lv G., Wang Z., Liu Z., Luo S., Jiang S., Liu X., Liu X., Liu Y. Wavelength Dispersion Analysis on Fiber-Optic Raman Distributed Temperature Sensor System. *Photonic Sensors* (2013) Vol. 3, No. 3: 256–261.
5. [www.nerve-sensors.com](http://www.nerve-sensors.com)
6. Sieńko R., Bednarski Ł., Howiacki T.: Smart Composite Rebars Based on DFOS Technology as Nervous System of Hybrid Footbridge Deck: A Case Study, *European Workshop on Structural Health Monitoring, Special Collection of 2020 Papers, Volume 2*, Springer, 2021, 340 – 350.
7. Siwowski T., Sieńko R., Bednarski Ł., Rajchel M., Howiacki T.: Światłowodowe pomiary odkształceń elementów mostów kompozytowych na przykładzie wybranych badań, *Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe WDM2017*, Wrocław, 2017.
8. Siwowski T., Rajchel M., Howiacki T., Sieńko R., Bednarski Ł.: Distributed fibre optic sensors in FRP composite bridge monitoring: Validation through proof load tests, *Engineering Structures* Volume 246, 1 November 2021, 113057.
9. Sieńko R., Bednarski Ł., Howiacki T., Koryciński J.: Pomiary deformacji mostu podwieszonoego z wykorzystaniem światłowodowych czujników geometrycznie ciągłych DFOS, *Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe WDM2018*, Wrocław, 2018.
10. Żółtowski K., Binczyk M., Kalitowski P.: Most Uniwersytecki w Bydgoszczy. Podstawy decyzji o wyłączeniu obiektu z ruchu, *Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe WDM2021*, Wrocław, 2021.
11. Wilde K., Chrościelewski J., Miśkiewicz M., Pyrzowski Ł., Sobczyk B.: Most Uniwersytecki w Bydgoszczy – zaawansowane studium stref zakotwienia systemu podwieszenia w pomoście, *Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe WDM2021*, Wrocław, 2021.
12. Biliszczyk J., Kożuch M., Lorenc W., Onysyk J., Skrętkowicz Ł., Sułkowski M., Teichgraber M.: Projekt wzmocnienia węzłów zakotwienia w w Moście Uniwersyteckim w Bydgoszczy, *Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe WDM2021*, Wrocław, 2021.
13. [www.kormost.pl](http://www.kormost.pl)
14. [www.shmsystem.pl](http://www.shmsystem.pl)
15. Barrias A., Casas J. R., Villalba S.: A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications. *Sensors* 2016, 16, doi:10.3390/s16050748.

16. Bado M. F., Casas J. R.: A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring. *Sensors* 2021, 21, 1818.

**University Bridge in Bydgoszcz: distributed fibre optic measurements (DFOS) of steel anchorages during their renovation**

**Key words:** bridge, steel, anchorage, cable, yielding, renovation, DFOS measurement, optical fibre, strain, temperature