

dr inż. Wojciech Karwowski^{1*)}

ORCID: 0000-0002-8488-3407

dr inż. Rafał Sienko²⁾

ORCID: 0000-0002-2751-7558

dr inż. Łukasz Bednarski³⁾

ORCID: 0000-0002-5409-9921

dr inż. Tomasz Howiacki⁴⁾

ORCID: 0000-0002-6833-7203

Modern measurement technologies on the example of the Łazienkowski Bridge in Warsaw

Współczesne technologie pomiarowe na przykładzie Mostu Łazienkowskiego w Warszawie

DOI: 10.15199/33.2025.12.21

Abstract: The Łazienkowski Bridge in Warsaw commissioned in 1974. In January 2015, the structure suffered severe damage as a result of a fire that occurred during renovation works. The rehabilitation programme included dismantling and reconstructing the steel superstructure, as well as strengthening the prestressed approach viaducts. Ten vibrating wire strain gauges were installed on one of the viaducts. Integrated with the monitored elements, these sensors enabled the assessment of variations in selected parameters relevant to structural safety, such as stresses in reinforcement bars. The paper summarises the scope of the undertaken interventions and presents representative monitoring results. In 2025, further experimental research was launched on one of the steel spans, involving comparative testing of distributed fibre optic sensing (DFOS) for geometrically continuous displacement measurements and hydraulic profilometer measurements.

Keywords: measurements; diagnostics; vibrating wire gauges; fibre optic sensors; safety, bridges.

Streszczenie: Most Łazienkowski w Warszawie został oddany do użytkowania w 1974 r. W lutym 2015 r. uległ pożarowi, który wybuchł podczas prac remontowych i spowodował poważne zniszczenia konstrukcji. Zaplanowany remont objął konstrukcję stalową mostu, którą zdemontowano, a następnie odtworzono, oraz sprężone estakady dojazdowe, które zostały wzmocnione. Na jednej z estakad zainstalowano 10 strunowych czujników odkształceń. Czujniki zintegrowane z monitorowanymi elementami dostarczały wiedzy na temat zmiany wartości wybranych parametrów dotyczących bezpieczeństwa eksploatacji, np. naprężeń w prętach zbrojeniowych. W artykule podsumowano zakres zrealizowanych prac oraz omówiono przykładowe wyniki. W 2025 r. na jednym z przęseł konstrukcji stalowej rozpoczęto testy porównawcze światłowodowych geometrycznie ciągłych pomiarów przemieszczeń DFOS (ang. *distributed fibre optic sensing*) oraz pomiarów profilometrem hydraulicznym.

Słowa kluczowe: pomiary; diagnostyka; czujniki strunowe; czujniki światłowodowe; bezpieczeństwo; mosty.

The Łazienkowski Bridge as a part of the Łazienkowska Route, is one of the major crossings over the Vistula River in Warsaw. Build in 1974, connecting the city centre with districts on the right bank of the river and relieving other bridges in the capital. In February 2015, the bridge was damaged by a fire that occurred during renovation works and caused structural destruction. This event demonstrated the significant role of the crossing in daily city operations, since its closure severely disrupted transport and revealed the level of Warsaw's dependence on the route [1]. The central section of the bridge features a five-span continuous steel beam arrangement 76.5 + 90 + 90 + 90 + 76.5 with an orthotropic deck plate and two box girders. The approach viaducts on both sides of the central section were constructed as prestressed concrete box-type structures. After the fire of 14 February 2015, it was decided to dismantle the damaged steel

Most Łazienkowski, stanowiący fragment Trasy Łazienkowskiej, to jedna z kluczowych przepraw przez Wisłę w Warszawie. Został oddany do użytkowania w 1974 r., łącząc centrum miasta z dzielnicami po prawej stronie rzeki i odciążając inne mosty w stolicy. W lutym 2015 r. most uległ pożarowi, który wybuchł podczas prac remontowych i spowodował zniszczenia konstrukcji. Pokazało to, jak istotną rolę odgrywa przeprawa w codziennym funkcjonowaniu miasta, gdyż jej wyłączenie z ruchu znacznie utrudniło komunikację i ujawniło skalę uzależnienia Warszawy od tej trasy [1]. Most w części centralnej ma konstrukcję stalową o schemacie belki ciągłej pięcioprzęsłowej 76,5 + 90 + 90 + 90 + 76,5 ze stalową płytą ortotropową i dwoma dźwigarami skrzynkowymi. Wiadukty dojazdowe po obu stronach części środkowej wykonano jako sprężone, kablebetonowe. Po pożarze z 14 lutego 2015 r. zdecydowano o zdemontowaniu zniszczonej konstrukcji stalowej mostu i zamontowaniu nowej, na zachowanych filarach, a także o wzmocnieniu wiaduktów dojazdowych znajdujących się w złym stanie technicznym (fotografia 1).

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

³⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

⁴⁾ SHM System / Nerve-Sensors

^{*)} Correspondence address: wojciech.karwowski@pw.edu.pl

part and install a new structure on existing piers and to strengthen the approach viaducts, which were in poor technical condition (Photo 1).

Installation of sensors on reinforcement bars

In July 2015, as part of the repair programme, vibrating wire strain gauges [2] were installed on the prestressed concrete approach section on the city centre side of Warsaw to measure strains in 32 mm reinforcement bars located in tensile zones near the supports. A total of ten measurement points were installed, five on each support (Figure 1).

For correct gauges installation, the surface of the bars was ground, cleaned and degreased. The sensors were permanently integrated with the reinforcement using spot welding. The arrangement of the strain gauge installation is shown in Figure 2 and in Photo 2. The measuring point was secured with a stainless-steel half-pipe and insulation tape.

Principle of operation of vibrating wire sensors and interpretation of strain measurements

The sensors installed on the reinforcement bars measure the natural vibration frequency of the wire f (Hz) and temperature T ($^{\circ}\text{C}$). The measured temperature enables appropriate thermal compensation of the calculated strain values and supports structural analysis under thermal loading. All types of vibrating wire sensors use the same principle: if a steel wire is tensioned between two mounting points, any change in the distance between those points causes a change in the natural vibration frequency of the wire (Figure 3).

Vibrating wire sensors have been widely used in long-term structural monitoring [3] due to several advantages:

- long-term stability of readings without recalibration [4]
- versatility, allowing measurement of different physical quantities depending on the construction of the sensor and operating conditions



Photo 1. The Lazienkowski Bridge approach section during renovation
Fot. 1. Płyty estakad dojazdowych mostu Łazienkowskiego podczas remontu

Instalacja czujników na prętach zbrojeniowych

W lipcu 2015 r., w ramach prowadzonych prac naprawczych, zainstalowano czujniki strunowe [2] (ang. *vibrating wire gauges*) na kablobetonowej części dojazdowej od strony centrum Warszawy do pomiaru odkształceń prętów zbrojeniowych $\varnothing 32$ mm zlokalizowanych w nadpodporowych strefach rozciąganych nadbetonu. Założono łącznie 10 punktów pomiarowych: po pięć nad każdą z podpór (rysunek 1).

W celu poprawnej instalacji czujników, powierzchnia prętów została odpowiednio zeszlifowana, a następnie dokładnie oczyszczona i odtłuszczona. Czujniki trwale zintegrowano z prętami zbrojeniowymi metodą zgrzewania punktowego. Schemat montażu czujników odkształceń przedstawiono na rysunku 2 oraz na fotografii 2. Punkt pomiarowy zabezpieczono półrurką ze stali nierdzewnej oraz taśmą izolacyjną.

Zasada działania czujników strunowych oraz interpretacja pomiarów odkształceń

Zainstalowane na prętach zbrojeniowych czujniki odkształceń realizują pomiar częstotliwości drgań własnych struny f (Hz) oraz temperatury T ($^{\circ}\text{C}$). Zmierzone dodatkowo wartości temperatury umożliwiają wprowadzenie odpowiedniej korekcji termicznej do obliczanych wartości odkształceń (możliwość poprawnej, inżynierskiej interpretacji wyników), a także ułatwiają analizę pracy konstrukcji obciążonej temperaturą. We wszyst-

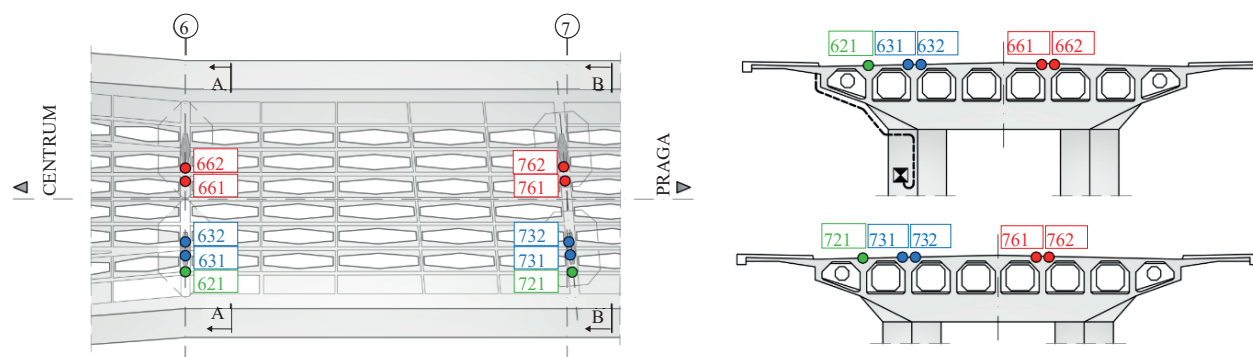


Fig. 1. Arrangement and numbering of the installed vibrating wire strain gauges

Rys. 1. Rozmieszczenie i numeracja zainstalowanych strunowych czujników odkształceń

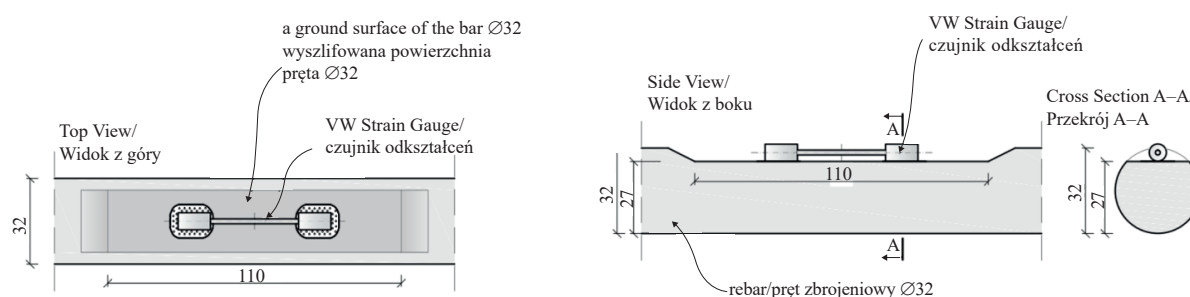


Fig. 2. Arrangement and numbering of the installed vibrating wire strain gauges

Rys. 2. Schemat montażu strunowych czujników odkształceń do prętów zbrojeniowych

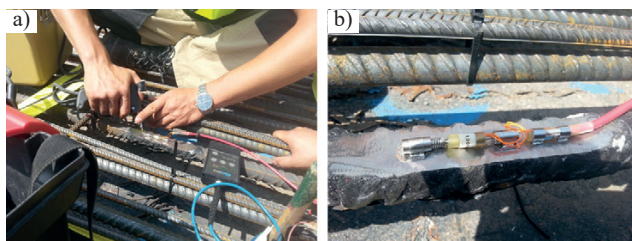


Photo 2. The installation of the sensors (a) and a close-up of the measurement point after installation – prior to mechanical protection (b)
Fot. 2. Montaż czujników (a) oraz zbliżenie na punkt pomiarowy po instalacji – przed zabezpieczeniem mechanicznym (b)

- high reliability and resistance to environmental conditions, including moisture ingress and corrosion
- high accuracy
- immunity of signal transmission due to its frequency-based nature

• capability for both static and dynamic measurements [5].

When a sensor is installed on a free (unrestrained) steel element (with the same coefficient of thermal expansion as the sensor, for example on a steel reinforcement bar), a temperature change causes identical deformation of both the bar and the wire, resulting in no measurable change of natural frequency. With the change in wire length and change in its tension force in the sensor, its mounting points will shift simultaneously. The strain measured in this way, without thermal compensation, will be zero, even though the structure has actually undergone deformation corresponding to the thermal expansion of steel. However, such deformations do not generate stresses in the structure [6]. In the opposite case, when a sensor is installed on a fully restrained steel element. A temperature change causes elongation or shortening of the wire and a change in tension without movement of the mounting points. The structural element does not undergo actual deformation but experiences stress according to Hooke's law due to restraint of free thermal strain. The vibration frequency changes measurably, and therefore the measured strain is non-zero, which allows the determination of stresses within the element.

For correct interpretation of structural behaviour, a two-stage thermal compensation is necessary. In the first stage, the sensor is compensated based on its thermal

kich typach czujników strunowych, niezależnie od ich budowy, wykorzystywana jest ta sama zależność. Jeżeli między dwoma punktami mocowania zostanie rozpięta struna stalowa (ciągną), to zmiana odległości między tymi punktami powodować będzie zmianę częstotliwości własnej drgań struny (rysunek 3).

Czujniki strunowe znalazły szerokie zastosowanie w długoterminowych systemach monitorowania konstrukcji [3] ze względu na swoje zalety, do których zalicza się:

- stabilność wskazań w długim czasie [4] bez konieczności ponownej kalibracji;
- uniwersalność (możliwość pomiaru różnych wielkości fizycznych w zależności od budowy czujnika oraz pracy w różnych warunkach zewnętrznych);
- dużą niezawodność i odporność na warunki środowiskowe, w tym na wnikanie wilgoci i korozję;
- dużą dokładność;
- niewrażliwość przesyłu sygnału pomiarowego ze względu na jego częstotliwościowy charakter;
- możliwość pomiarów zarówno statycznych, jak i dynamicznych [5].

W przypadku instalacji czujnika na swobodnym (nieskrępowanym) elemencie stalowym (tzn. o takim samym współczynniku rozszerzalności termicznej co czujnik, np. pręcie zbrojeniowym) zmiana temperatury spowoduje takie samo odkształcenie zarówno pręta, jak i struny stalowej w czujniku. Nie zmieni się mierzalnie jej częstotliwość drgań – wraz ze zmianą długości struny i zmianą jej siły naciągu w czujniku przesuną się jednocześnie jej punkty zamocowania. Zmierzone w ten sposób odkształcenie bez uwzględniania korekcji termicznej będzie wynosić zero, mimo że w rzeczywistości konstrukcja doznała odkształcenia o wartości wynikającej z rozszerzalności termicznej stali. Takie odkształcenia nie powodują jednak naprężeń w kon-

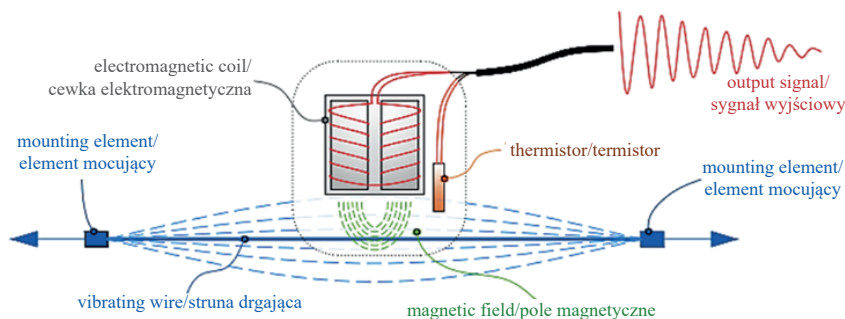


Fig. 3. Principle of operation of a vibrating wire strain gauge [3]

Rys. 3. Zasada działania strunowego czujnika odkształceń [3]

response (in practice, based on the coefficients and the equation provided by the manufacturer in the calibration sheet). As a result, values are determined that correspond to actual strains at the measurement point, i.e., such strains that could be measured using an external measuring device, e.g., a caliper (some of these strains may be free and will not generate stresses; this will depend, among other factors, on the structural scheme, boundary conditions and support stiffness). In the second stage, the thermal expansion coefficient of the analysed material must be considered, which provides theoretical strain values corresponding to stresses generated in the structure (according to the assumed physical law, which in engineering practice is most frequently Hooke's law). A graphical interpretation of the two-stage thermal compensation process, based on numerical simulations of a beam subjected to thermal loading, is presented below on Figure 4.

In the case of installing vibrating wire strain gauges on steel reinforcement bars that cooperate with concrete, it is additionally necessary to consider the restraint of the bars by concrete, which has a slightly lower coefficient of thermal expansion than steel (for concrete, $10 \cdot 10^{-6}$ 1/K is assumed, and for steel, $12 \cdot 10^{-6}$ 1/K). With increasing temperature, the elongation of reinforcement bars will be limited to the value corresponding to the elongation of concrete (assuming full bond between reinforcement bars and concrete), which will cause an increase of stresses in the bars. Ultimately, in order to determine stress values in reinforcement bars, in the second stage of compensation, it is recommended to adopt the thermal expansion coefficient of concrete. Such a computational procedure was adopted for the measurements carried out on the analysed structure. The measurements were performed automatically at 15-minute intervals during the period, among others, before reopening the structure to traffic [7], including the initial test loading (Figure 5). In reality, a temperature change causes a change in the span length and the stresses generated within it. This occurs because in engineering practice we rarely deal with elements that are perfectly free or perfectly fixed. It was found that strains caused by initial test loading were several times smaller than strains caused only by thermal changes, which is characteristic of massive concrete structures.

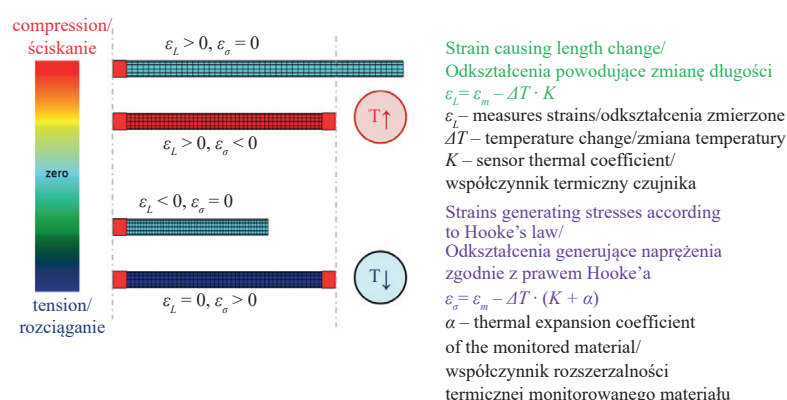


Fig. 4. Physical interpretation of two-stage thermal compensation on the example of a free cantilever and a fully restrained element [6]

Rys. 4. Fizyczna interpretacja dwustopniowej kompensacji termicznej na przykładzie wspornika swobodnego i elementu obustronnie skrzepowanego [6]

strukcji [6]. Odwrotna sytuacja będzie w przypadku instalacji czujnika na całkowicie skrzepowanym (utwierdzonym) elemencie stalowym. Wtedy zmiana temperatury spowoduje wydłużenie bądź skrócenie struny i zmianę jej napięcia bez przesunięcia punktów zamocowania. Element konstrukcji faktycznie nie dozna żadnych odkształceń – nastąpi w nim natomiast zmiana naprężeń, zgodnie z prawem Hooke'a, spowodowana skrzepowaniem swobodnych odkształceń termicznych. Zmieni się mierzalnie częstotliwość drgań własnych struny, a w konsekwencji zmierzone odkształcenie nie będzie zerowe, co pozwoli obliczyć naprężenia w elemencie.

W celu poprawnej interpretacji pracy konstrukcji konieczne jest przeprowadzenie dwustopniowej kompensacji termicznej. W pierwszym kroku kompensowany jest czujnik na podstawie znajomości jego odpowiedzi termicznej (w praktyce znajomości współczynników i równania dostarczonego przez producenta w karcie kalibracyjnej). W rezultacie wyznaczane są wartości odpowiadające faktycznym (rzeczywistym) odkształceniom w punkcie pomiarowym, tzn. takim, które mogłyby zostać zmierzone za pomocą zewnętrznego urządzenia pomiarowego, np. suwmiarki (część z nich może być swobodna i nie będzie generować naprężeń; będzie to zależęć m.in. od schematu statycznego, warunków brzegowych i sztywności podpór). W drugim kroku należy uwzględnić współczynnik rozszerzalności termicznej analizowanego materiału, otrzymując teoretyczne wartości odkształceń, które odpowiadają naprężeniom powstałym w konstrukcji (zgodnie z przyjętym prawem fizycznym, którym najczęściej w praktyce inżynierskiej jest prawo Hooke'a). Graficzną interpretację procesu dwukrokowej kompensacji termicznej, na przykładzie symulacji numerycznych belki obciążonej termicznie z różnymi warunkami brzegowymi, przedstawiono na rysunku 4.

W przypadku instalacji strunowych czujników odkształceń na stalowych prętach zbrojeniowych, które będą współpracować z betonem, należy dodatkowo uwzględnić fakt skrzepowania prętów przez beton o nieco mniejszym współczynniku rozszerzalności termicznej od stali (w przypadku betonu przyjmuje się $10 \cdot 10^{-6}$ 1/K, a stali $12 \cdot 10^{-6}$ 1/K). Przy wzroście temperatury wydłużenie prętów zbrojeniowych zostanie ograniczone do wartości odpowiadających wydłużeniu się betonu (założenie o pełnej przyczepności prętów zbrojeniowych do betonu), co spowoduje wzrost naprężeń w prętach. Ostatecznie, w celu określenia wartości naprężeń w prętach zbrojeniowych w drugim kroku kompensacji zaleca się przyjęcie współczynnika rozszerzalności termicznej betonu.

Taką procedurę obliczeniową przyjęto w ramach realizacji pomiarów na przedmiotowym obiekcie. Pomiary wykonywano automatycznie z częstotliwością 15 min w okresie m.in. przed oddaniem obiektu do ponownej eksploatacji [7], obejmującym także obciążenie próbne (rysunek 5). W rzeczywistości zmiana temperatury spowoduje zmianę długości przęsła i powstających w nim naprężeń. Dzieje się tak z uwagi na fakt, że w praktyce inżynierskiej stosunkowo rzadko mamy do czynienia z elementami idealnie

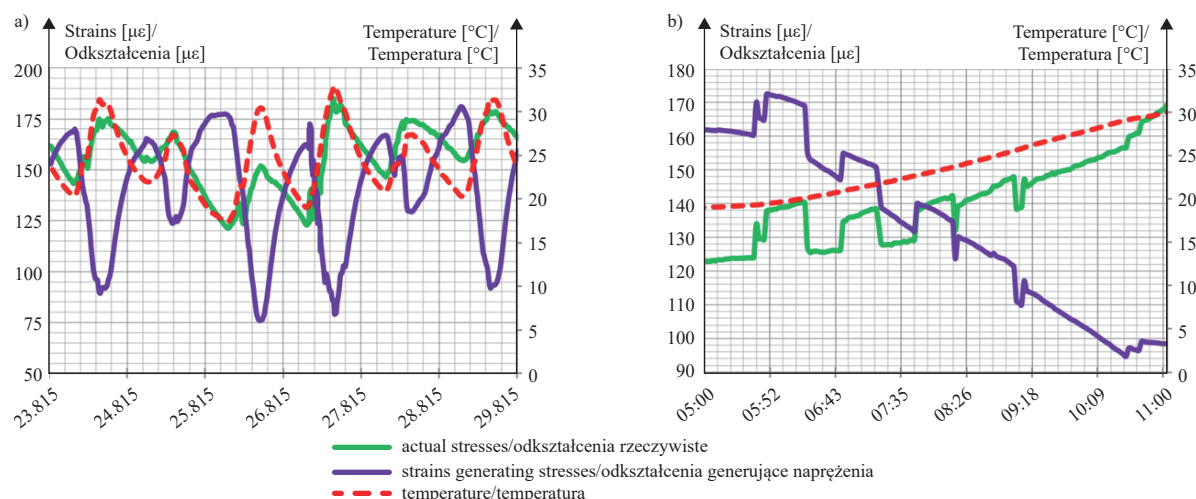


Fig. 5. Example strain measurement results on approach object of the Łazienkowski Bridge during the six days prior to its re-commissioning (a) and from the test loading period (b)

Rys. 5. Przykładowe wyniki pomiarów odkształceń estakad w czasie 6 dni przed ponownym oddaniem obiektu do eksploatacji (a) oraz podczas obciążenia próbnego (b)

Bridge diagnostics a decade later

The selected measurements discussed in the article and carried out using vibrating wire sensors were performed in 2015. At that time, it was a pioneering diagnostic approach, which is now much more common. Currently, an innovative technology used in various civil and geotechnical engineering applications is geometrically continuous fibre optic measurements DFOS (Distributed Fibre Optic Sensing). In contrast to all other point-based techniques (including vibrating wire measurements), the fundamental feature and at the same time the main advantage of DFOS technology is the capability to measure various physical quantities (strains, cracking, displacements, temperatures, vibrations) along the entire length of a linear sensor, i.e., over distances reaching even kilometers. At present, approximately twenty bridge structures in Poland are equipped with fibre optic sensors [8], particularly concrete and prestressed structures [9], but also composite [10] and steel structures. As a result, Poland is one of the global leaders in the development and implementation of DFOS measurements. In 2024, the Łazienkowski Bridge in Warsaw joined this group of instrumented engineering structures. A fibre optic displacement sensor [11] with a length of approximately 76 m was installed within the first span of the bridge (Figure 6). In addition, for system redundancy, a hydraulic profilometer [12] was installed in the span, which is the result of a research and development project (application number POIR.01.01.01-00-0759/16). The view of both sensors inside the bridge box is shown in Photo 3. Measurement data are currently collected periodically for comparative analyses from both systems.

Summary

Each of the presented measurement techniques (vibrating wire, fibre optic or hydraulic) has many advantages but also certain limitations. Current trends in the structural monitoring market indicate the need to integrate several independent measurement techniques into hybrid systems. The aim is to make synergistic

swobodnymi lub idealnie utwierdzonymi. Stwierdzono, że odkształcenia od obciążenia próbnego były kilkukrotnie mniejsze od odkształceń powodowanych wyłącznie przez zmiany termiczne, co jest charakterystyczne dla masywnych konstrukcji betonowych.

Diagnostyka mostu dekadę później

Omówione w artykule wybrane pomiary z wykorzystaniem czujników strunowych zrealizowano w 2015 r. W tamtym czasie stanowiło to pionierskie podejście diagnostyczne, które obecnie jest znacznie bardziej powszechne. Współcześnie innowacyjną technologią wykorzystywaną w różnego rodzaju zagadnieniach inżynierskich i geotechnicznych są geometrycznie ciągłe pomiary światłowodowe DFOS (ang. *Distributed Fibre Optic Sensing*). W odróżnieniu od wszystkich innych technik punktowych (w tym techniki strunowej), podstawową cechą i jednocześnie zaletą techniki DFOS jest możliwość realizowania pomiarów różnych wielkości fizycznych (odkształceń, zarysowań, przemieszczeń, temperatur, drgań) na całej długości czujnika liniowego, tzn. na odcinkach liczonych nawet w kilometrach! Obecnie w Polsce w czujniki światłowodowe wyposażonych jest ok. dwudziestu obiektów mostowych [8], szczególnie betonowe i sprężone [9], ale także kompozytowe [10] i stalowe. W efekcie Polska jest jednym ze światowych liderów w rozwoju i wdrażaniu pomiarów DFOS. W 2024 r. do tak opomiarowanych obiektów inżynierskich dołączył Most Łazienkowski w Warszawie. Światłowodowy czujnik przemieszczeń [11] o długości ok. 76 m został zainstalowany w obrębie pierwszego przęsła mostu (rysunek 6). Ponadto, w ramach redundancji systemu, zainstalowano w przśle hydroprofilometr [12], będący rezultatem projektu badawczo-rozwojowego (nr wniosku o dofinansowanie POIR.01.01.01-00-0759/16). Widok obu czujników wewnątrz skrzyni mostu przedstawiono na fotografii 3. Obecnie okresowo zbierane są dane do pomiarów porównawczych z obydwu systemów.

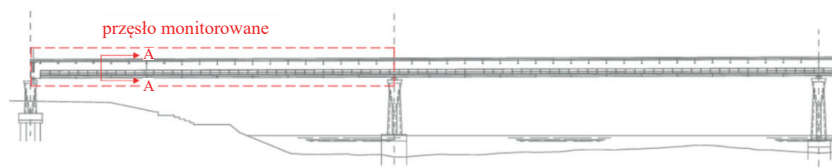


Fig. 6. View of the approach span equipped with a fibre optic sensor and a hydraulic profilometer

Rys. 6. Widok przęsła dojazdowego wyposażonego w czujnik światłowodowy i hydro-profilometr

use of the advantages of each technique while simultaneously minimising their limitations and optimising cost. For example, it is justified to reduce the number of expensive point sensors and supplement them with periodic fibre optic measurements along the entire span. In such a case, there is no need to purchase relatively expensive fibre optic interrogators. It should be remembered that each structure is unique, and contemporary diagnostic capabilities are very extensive. Therefore, each project should be approached with an individually designed measurement strategy. The example of the Łazienkowski Bridge shows that extending the functionality of a given monitoring system can be carried out gradually over a long period and in response to current operational challenges.

The publication was financed by a subsidy from the dean of the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology

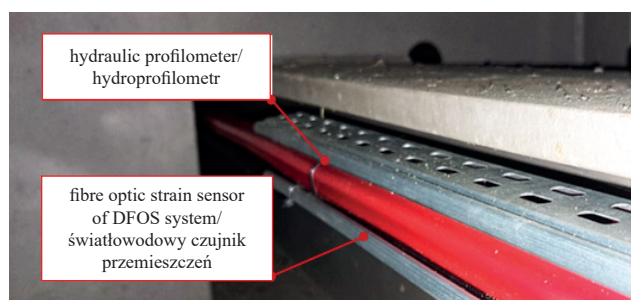


Photo 3. View of the distributed fibre optic 3DSensor and the hydroprofilometer installed within the span

Fot. 3. Światłowodowy czujnik przemieszczeń 3DSensor oraz hydroprofilometr zainstalowane w obrębie przęsła

że każda konstrukcja jest unikatowa, a współczesne możliwości diagnostyczne bardzo szerokie. Do każdego projektu należy zatem podchodzić z indywidualnie zaprojektowaną strategią pomiarową. Przykład Mostu Łazienkowskiego pokazuje, że rozszerzenie funkcjonalności danego systemu może odbywać się etapami w długim okresie i w odpowiedzi na bieżące wyzwania eksploatacyjne.

Publikacja została sfinansowana z subwencji dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

Received: 11.08.2025

Revised: 13.10.2025

Published: 23.12.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 11.08.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 13.10.2025 r.

Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Szarata A, Nosal Hoy K. „The impact of road infrastructure failures on traffic conditions and travel behaviour in urban areas – the case of the Łazienkowski Bridge in Warsaw”, MATEC Web Conf., t. 284, s. 01006, 2019, DOI: 10.1051/mateconf/201928401006.
- [2] Pádua AAH, Fareleira JMNA, Calado JCG, Wakeham WA. „Electromechanical model for vibrating-wire instruments”, Review of Scientific Instruments, t. 69, nr 6, s. 2392–2399, cze. 1998, DOI: 10.1063/1.1148965.
- [3] R. Sieńko, Ł. Bednarski, Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi, Inżynieria i Budownictwo 2013; 11: 615–619.
- [4] DiBiagio E. „A case study of vibrating-wire sensors that have vibrated continuously for 27 years”, Field Measurements in Geomechanics. Taylor & Francis, s. 445–458, sty. 2003. DOI: 10.1201/9781439833483.ch59.
- [5] Cieplak G, Bednarski Ł. „Measurements of Dynamic Deformations of Building Structures by Applying Wire Sensors”, Sensors, t. 19, nr 2, s. 255, sty. 2019, DOI: 10.3390/s19020255.
- [6] Bednarski Ł, Sieńko R, Howiacki T, Badura K. „Thermal compensation of monolithic distributed fibre optic sensors: From the lab to the field”, Measurement, t. 238, s. 115280, paź. 2024, DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115280.
- [7] Mossakowski P, Trochymiak W. „Nośność eksploatacyjna Warszawskich Czterdziestek po remoncie”, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, nr 24, s. 205–226, październik 2017, DOI: 10.21008/j.1897-4007.2017.24.15.
- [8] Howiacki T, Sieńko R, Bednarski Ł, Zuziak K. „Structural monitoring of concrete, steel, and composite bridges in Poland with distributed fibre optic sensors”, Structure and Infrastructure Engineering, t. 20, nr 7–8, s. 1213–1229, lip. 2023, DOI: 10.1080/15732479.2023.2230558.
- [9] Piątek B, Howiacki T, Kulpa M, Siwowski T. „Diagnostics of Post-Tensioned Bridge Girders Using Distributed Fiber Optic Sensors”, Procedia Structural Integrity, t. 64, s. 1581–1588, 2024, DOI: 10.1016/j.prostr.2024.09.412.
- [10] Kulpa M, Howiacki T, Rajchel M, Siwowski T, Bednarski Ł. „Experimental Verification of GFRP Bridge Deck Panels Using an Integrated Distributed Fiber Optic Sensing System”, J. Compos. Constr., t. 28, nr 5, paź. 2024, DOI: 10.1061/jccof2.cceng-4418.
- [11] Bednarski Ł, Sieńko R, Grygierek M, Howiacki T. „New Distributed Fibre Optic 3DSensor with Thermal Self-Compensation System: Design, Research and Field Proof Application Inside Geotechnical Structure”, Sensors, t. 21, nr 15, s. 5089, lip. 2021, DOI: 10.3390/s21155089.
- [12] Bednarski Ł, Sieńko R, Kanty P, Howiacki T. „New Hydraulic Sensor for Distributed and Automated Displacement Measurements with Temperature Compensation System”, Sensors, t. 21, nr 14, s. 4678, lip. 2021, DOI: 10.3390/s21144678.