

**dr inż. Bartosz Piątek¹, dr inż. Tomasz Howiacki², dr inż. Maciej Kulpa¹,
prof. dr hab. inż. Tomasz Siwowski¹**

¹ Politechnika Rzeszowska

² Politechnika Krakowska, SHM System

Diagnostyka uszkodzeń w konstrukcjach sprężonych za pomocą geometrycznie ciągłych pomiarów światłowodowych (DFOS)

Damage diagnostics in prestressed structures using distributed fiber optic sensing (DFOS)

Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki badań nad implementacją technologii geometrycznie ciągłych pomiarów światłowodowych (DFOS) w elementach kablobetonowych w skali zbliżonej do naturalnej (o rozpiętości 7,7 m). Głównym celem badań było zweryfikowanie możliwości wykorzystania czujników DFOS do identyfikacji uszkodzeń (np. w postaci rys oraz zasymulowanych pustek w kanałach kablowych) oraz monitorowania stanu odkształceń i przemieszczeń elementów z betonu sprężonego. Przetestowano różne rodzaje czujników światłowodowych oraz różne techniki ich montażu (wewnątrz przekroju przed betonowaniem, wklejane w bruzdę, przyklejane do powierzchni). Na podstawie przeprowadzonych badań dowiedziono, że odpowiednio dobrane czujniki światłowodowe mogą stanowić wartościowy element systemu diagnostyki obiektów budowlanych wykonanych w technologii betonu sprężonego.

Abstract

The paper presents the results of a study on the implementation of distributed fiber optic sensing (DFOS) technology in near full-scale post-tensioned concrete elements (with a span of 7.7 m). The main objective of the research was to verify the feasibility of using DFOS sensors to identify damage (e.g., in the form of cracks and simulated voids in cable ducts) and to monitor the state of deformation and displacement of prestressed concrete elements. Different types of fiber-optic sensors were tested, as well as different installation techniques (inside the section before concreting, in near-to-surface grooves, glued to the surface). On the basis of the study, it was proved that properly selected fiber-optic sensors can be a valuable component of the diagnostic system for building structures made in prestressed concrete technology.

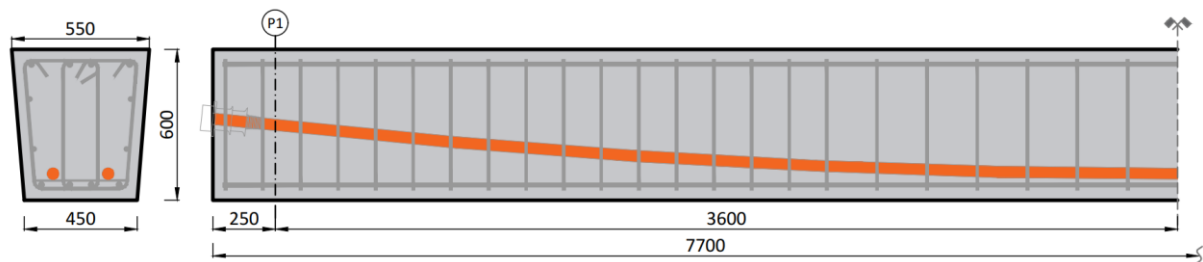
1. Wprowadzenie

Elementy konstrukcyjne z betonu sprężonego są dziś powszechnie wykorzystywane zarówno w budownictwie kubaturowym, jak i infrastrukturalnym. Konstrukcje kablobetonowe uchodzą za bardzo trwałe pod warunkiem ich prawidłowego wykonania i utrzymania. Niemniej jednak znane są przypadki uszkodzeń oraz awarii, które są spowodowane głównie korozją cięgien sprężających [1-5]. Problemy te najczęściej objawiają się dopiero, gdy dochodzi do poważnego uszkodzenia cięgna skutkującego zmianami w globalnej pracy konstrukcji [6]. Identyfikacja lokalnych uszkodzeń mostów sprężonych jest trudna do wykonania i bardzo pracochłonna obecnie stosowanymi metodami ze względu na zlokalizowanie cięgien sprężających wewnątrz przekroju betonowego [7]. Diagnostyka uszkodzeń na wczesnym etapie ich rozwoju pozwala zapobiegać dalszemu pogarszaniu się stanu technicznego do poziomu zagrażającemu bezpieczeństwu konstrukcji i szybko podejmować środki zaradcze, które najczęściej są na tym etapie mniej kosztowne [8-10]. Obiecującą i stale rozwijającą się techniką w zakresie diagnostyki i monitoringu konstrukcji betonowych są pomiary za pomocą ciągłych (rozłożonych na długości włókna) czujników światłowodowych DFOS (distributed fiber optic sensors) [11-19]. Referat stanowi kontynuację tematu poruszonego na poprzedniej konferencji Dni Betonu 2023. W poprzednim referacie przedstawiono najważniejsze wyniki badań elementów w małej skali [20]. W niniejszej publikacji zaprezentowano wyniki pomiarów w elementach kablobetonowych w skali zbliżonej do naturalnej ($L=7,7$ m). W ramach badań przeanalizowano dwie belki o przekroju trapezowym, z których jedna była belką referencyjną, bez uszkodzeń, a w drugiej zasymulowano uszkodzenia, głównie w postaci pustek w kanałach kablowych. Celem badań było sprawdzenie możliwości identyfikacji wprowadzonych uszkodzeń przy użyciu czujników DFOS. Przetestowano kilka rodzajów czujników światłowodowych, część z nich zamontowano przed betonowaniem i sprężaniem, na etapie wytwarzania zbrojenia, pozostałe do powierzchni betonu po wykonaniu elementów. Wyniki pomiarów światłowodowych porównano z konwencjonalnymi pomiarami za pomocą tensometrów elektrooporowych oraz z inwentaryzacją zarysowań. Dzięki wbudowaniu czujników już na etapie wytwarzania elementu sprężonego można uzyskać wiele cennych informacji na temat jego zachowania podczas betonowania, sprężania i dojrzewania betonu oraz dalej monitorować zmiany odkształceń i przemieszczeń pod obciążeniami zewnętrznymi [16-19]. Ponadto zastosowanie ciągłych geometrycznych pomiarów czujnikami DFOS umożliwia uzyskanie pełnego obrazu odkształceń, przemieszczeń czy rozkładu rys na długości elementu, co jest nieosiągalne przy użyciu typowych czujników punktowych [21-23].

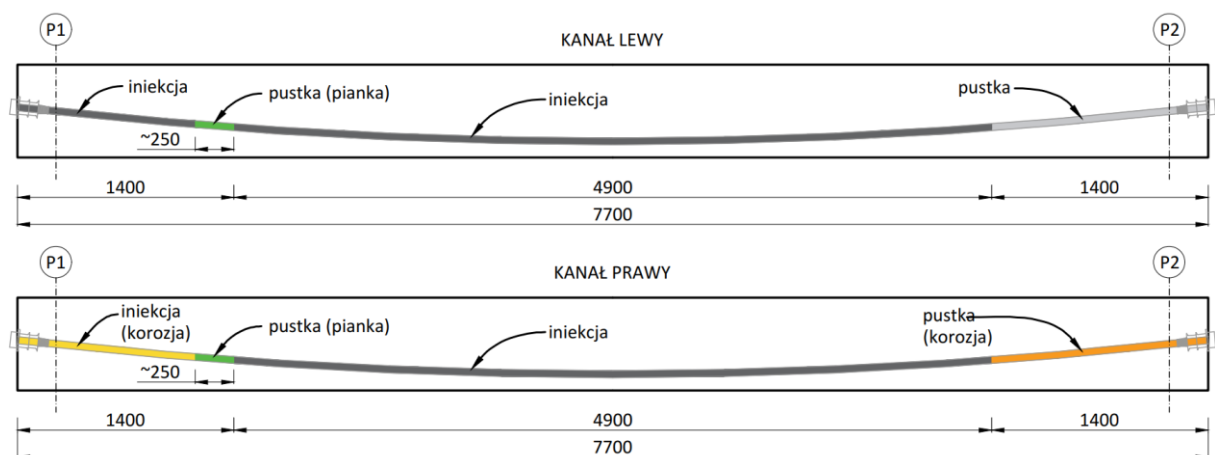
2. Program badań

2.1. Charakterystyka badanych elementów

Belki kablobetonowe miały przekrój trapezowy o wysokości 60 cm i szerokości od 45 do 55 cm (rys. 1). W belkach przewidziano po 2 kable. W każdym z nich umieszczono po 4 sploty sprężające o średnicy $\phi 15,7$ mm (stal Y1860S7). Po zabetonowaniu kable zostały sprężone siłą początkową równą 1500 kN. W belkach przewidziano zbrojenie miękkie ze stali B500SP w postaci prętów $\phi 16$ przy dolnej i górnej krawędzi oraz zbrojenie obwodowe z prętów $\phi 10$. Zastosowano również zbrojenie strzemiona czterocięte o średnicy $\phi 12$ mm. Belka K1 była belką referencyjną (bez uszkodzeń). W belce K2 pozostawiono pustki przy końcach kanałów kablowych, wewnątrz których również wywołano korozję (rys. 2).



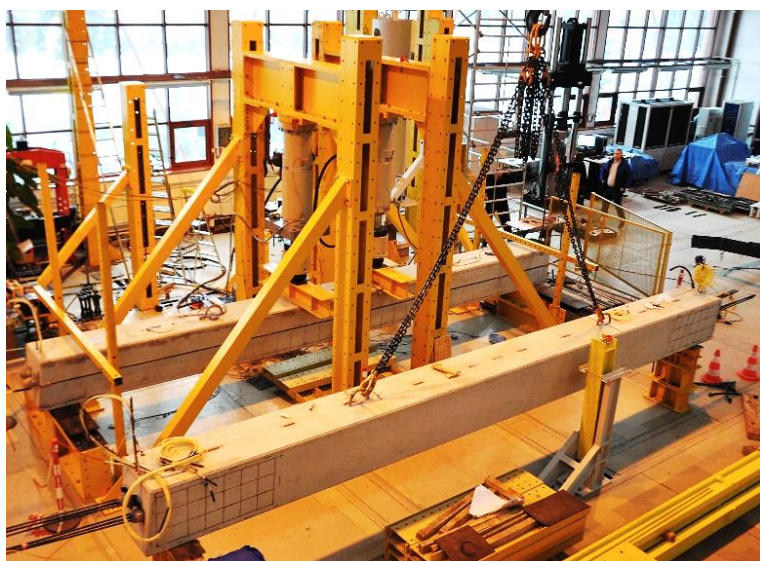
Rys. 1. Przekrój poprzeczny i podłużny belek.



Rys. 2. Lokalizacja uszkodzeń w belce K2.

2.2. Schemat obciążenia

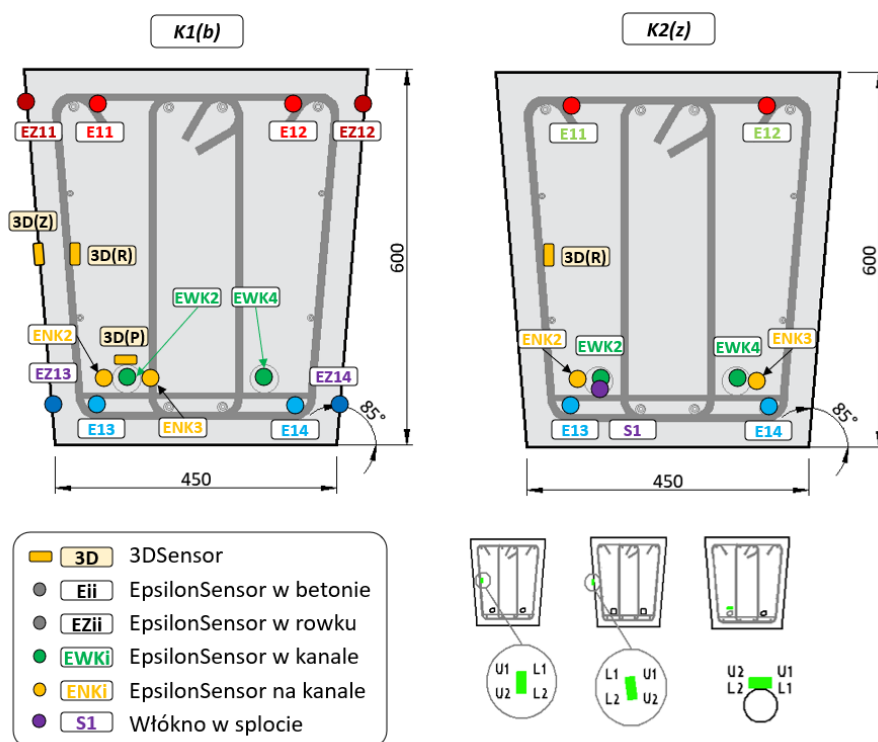
Belki obciążano w schemacie czteropunktowego zginania na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym wyposażonym w dwa siłowniki hydrauliczne o maksymalnej sile nacisku 2x630 kN. Rozpiętość teoretyczna belek w osiach podparcia wynosiła 7,2 m. Widok przykładowej belki na stanowisku przedstawiono na Fot. 1.



Fot. 1. Widok belek oraz stanowiska badawczego.

2.3. Charakterystyka i rozmieszczenie czujników pomiarowych

Podczas badań wykorzystano następujące czujniki światłowodowe DFOS: włókna światłowodowe w powłoce pierwotnej, kompozytowe czujniki monolityczne EpsilonRebar (ER) i EpsilonSensor (ES) oraz opracowane w ramach projektu czujniki światłowodowe zintegrowane ze splotem sprężającym. Na Rys. 3 zaprezentowano oznaczenia i numerację czujników światłowodowych w przekrojach poprzecznych poszczególnych belek, a na Fot. 2. Wybrane czujniki podczas instalacji. Dodatkowo prowadzono pomiary metodami referencyjnymi w celu porównania z techniką DFOS. Do pomiarów odkształceń wykorzystano tensometry elektrooporowe, a do pomiarów przemieszczeń czujniki indukcyjne. Pomiar sił odbywał się za pomocą siłomierzy zintegrowanych z układem obciążającym. Pomiary odkształceń z czujników światłowodowych realizowano przy użyciu reflektometru optycznego Luna OBR4600 z wykorzystaniem rozpraszania Rayleigha. Rozdzielczość geometryczna czujników wynosiła 10 mm, co oznacza ok. 770 pomiarów na długości belki dla każdego czujnika.



Rys. 3. Rozmieszczenie czujników światłowodowych w badanych belkach.

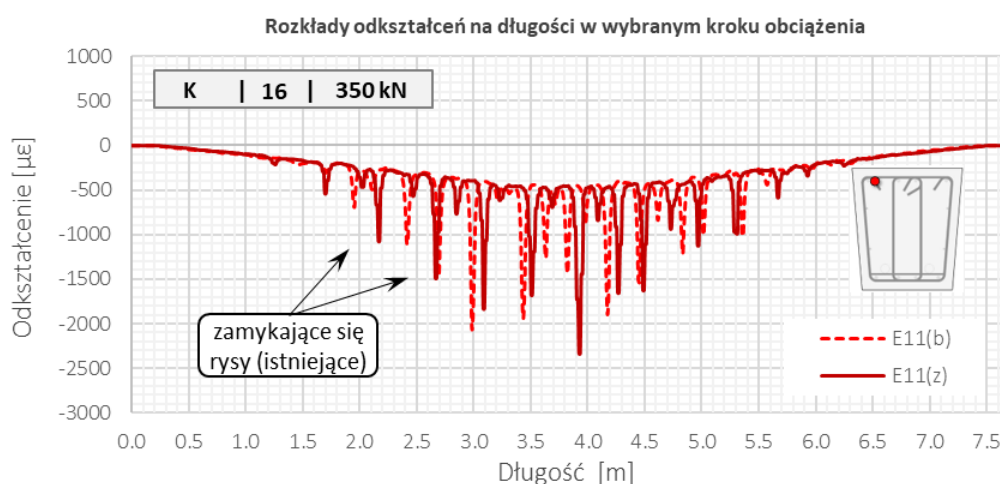


Fot. 2. Instalacja przykładowych czujników w belkach.

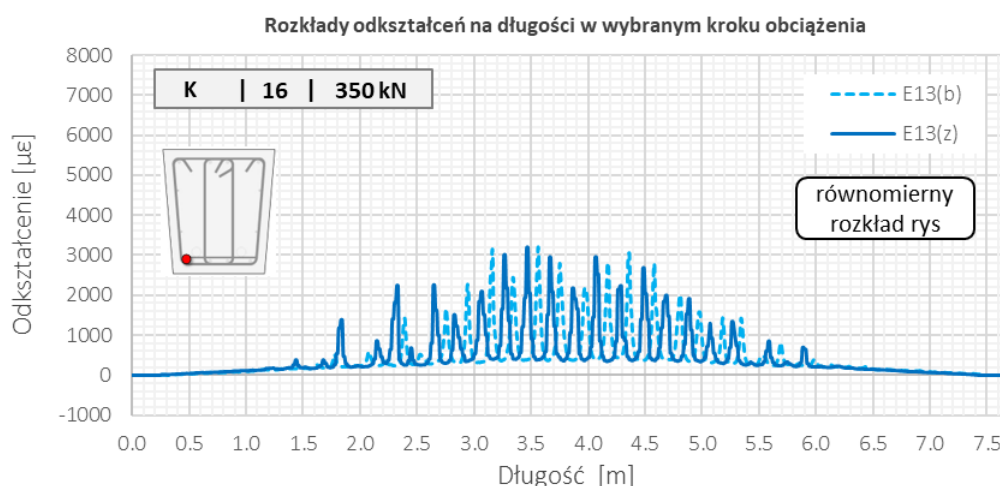
3. Wyniki badań i ich analiza

3.1. Identyfikacja lokalizacji rys

W tym punkcie porównano odczyty czujników zainstalowanych w dokładnie tych samych miejscach i w ten sam sposób, jednak na dwóch różnych belkach: jednej bez uszkodzeń (K1) i jednej z uszkodzeniami (K2). Aby ułatwić interpretację pomiarów, dane dla nieuszkodzonej belki oznaczono linią przerywaną, podczas gdy dane dla uszkodzonej belki oznaczono linią ciągłą. Wyniki przedstawiono dla czujników umieszczonych wewnątrz betonu. Przykładowe wyniki porównania dwóch belek pod obciążeniem 350 kN w górnej i dolnej strefie belki przedstawiono odpowiednio na Rys. 4 i Rys. 5.



Rys. 4. Rozkład odkształceń na długości belek zmierzony za pomocą czujnika ES11 zlokalizowanego w górnej części przekroju pod obciążeniem 350 kN.



Rys. 5. Rozkład odkształceń na długości belek zmierzony za pomocą czujnika ES14 zlokalizowanego w dolnej części przekroju pod obciążeniem 350 kN.

Na podstawie pomiarów DFOS możliwe było zidentyfikowanie istniejących rys w górnej części belek, zamykających się pod wpływem ściskania wywołanego zginaniem, a także nowych rys tworzących się w dolnej części belek w wyniku działania sił rozciągających wywołanych obciążeniem testowym. Rysy w górnej części belek powstały w wyniku odkształceń termiczno-skurczowych oraz pod wpływem procesu sprężania,

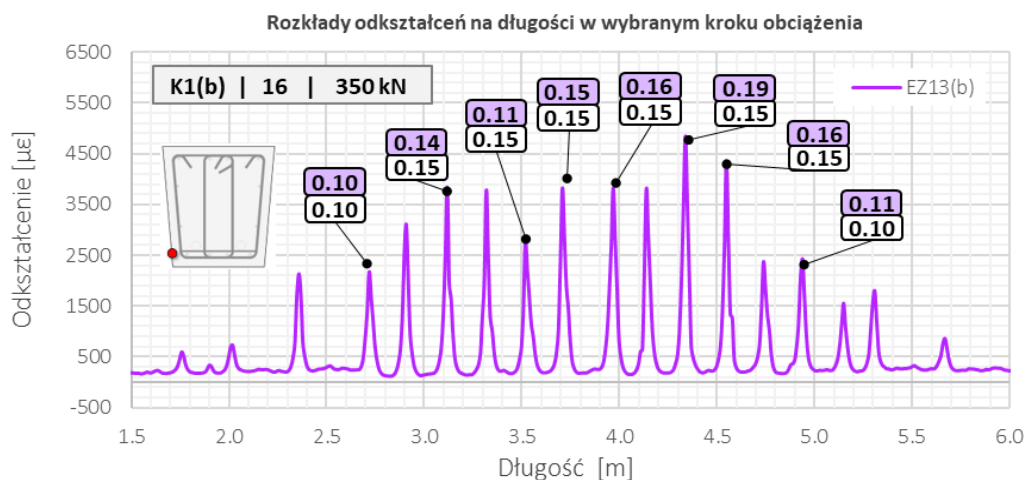
powodującego rozciąganie górnych włókien. Charakterystyczny i symetryczny rozkład rys wskazuje, że decydujący wpływ miały odkształcenia mechaniczne powstałe w wyniku sprężania. Pomimo wykonania zerowych pomiarów, gdy rysy istniały już w górnej części belki, zmiana odkształceń pod wpływem zginania pozwoliła na ich jednoznaczną identyfikację.

Identyfikacja nowych rys w dolnej części belek była możliwa, ponieważ zerowe odczyty zostały wykonane tuż przed testem, tj. po sprężeniu elementu. Z perspektywy pomiarowej czujnik był poddawany rozciąganiu od samego początku (analiza nie uwzględnia ściskania od sprężania). W następnym podrozdziale przedstawiono analizę mającą na celu oszacowanie szerokości rozwarcia rys. Ponieważ symulowane uszkodzenia w belce K2 nie były znaczące i znajdowały się tylko w pobliżu końcowych odcinków belek, nie miały one wpływu na globalny wynik analizy zarysowania.

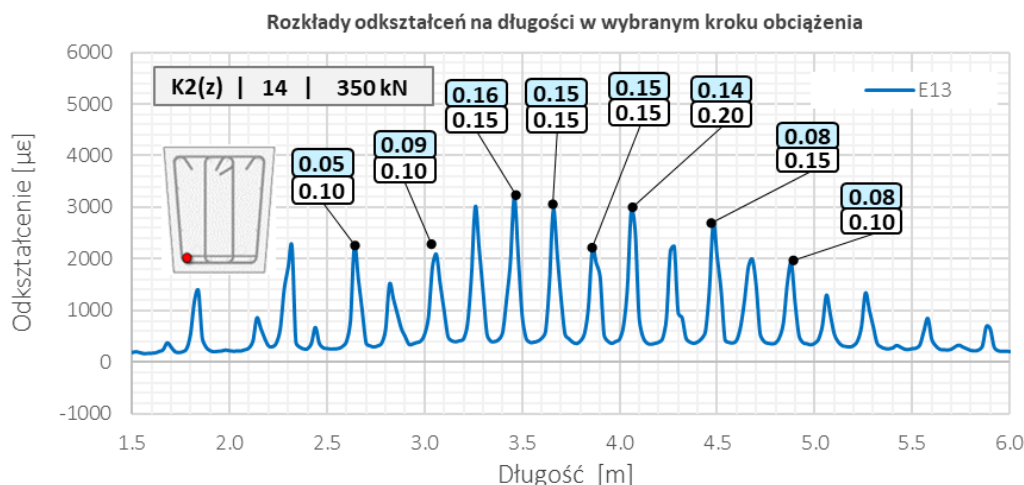
3.2. Obliczanie szerokości rozwarcia rys

Istnieje kilka sposobów oszacowania szerokości rys na podstawie zmierzonego profilu odkształcenia [12, 17]. Podstawowe podejście stosowane w tej analizie polega na całkowaniu (sumowaniu) odkształceń na długości efektywnej. W przypadku ustabilizowanego stanu zarysowania, długość tę można przyjąć między punktami środkowymi segmentów wyznaczonych między rysami. Należy jednak zauważyć, że podejście to opiera się na założeniu, że odkształcenia w betonie między rysami wynoszą zero, co nie zawsze musi być prawdą. W rzeczywistości na krawędzi rysy beton całkowicie się rozluźnia, ale w miarę oddalania się od niej naprężenia rozciągające mogą się kumulować (do wartości odpowiadającej wytrzymałości betonu na rozciąganie). Szerokości rys uzyskane przy użyciu powyższej metody będą zatem nieco zawyżone, ale wcześniejsze doświadczenia wskazują, że można bezpiecznie założyć dokładność nie gorszą niż 0,05 mm. Z punktu widzenia inżynierskiej oceny stanu konstrukcji taką dokładność można uznać za wystarczającą.

Graficzną interpretację przykładowych wyników pod obciążeniem 350 kN przedstawiono na Rys. 6 i 7, odpowiednio dla czujników wpustowych w belce K1 i K2. Szerokości wybranych rys podano bezpośrednio w milimetrach i przedstawiono w różowych i niebieskich polach, podczas gdy pomiary referencyjne są pokazane w białych polach.



Rys. 6. Porównanie zinwentaryzowanych szerokości rys [mm] na bocznej powierzchni z szerokościami obliczonymi na podstawie pomiarów DFOS w belce K1 przy obciążeniu 350 kN (czujnik zamocowany do zewnętrznej powierzchni betonu w bruździe)

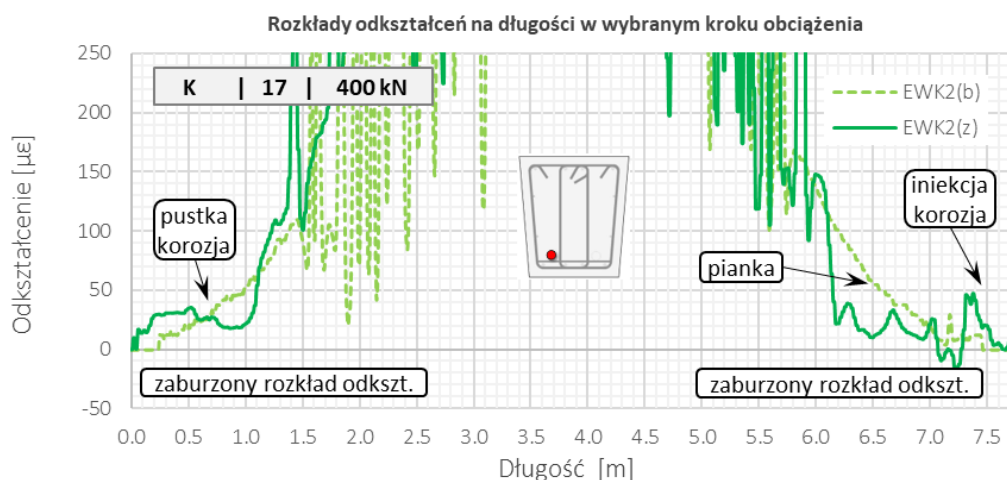


Rys. 7. Porównanie zinwentaryzowanych szerokości rys [mm] na bocznej powierzchni z szerokościami obliczonymi na podstawie pomiarów DFOS w belce K2 przy obciążeniu 350 kN (czujnik zamocowany wewnątrz przekroju betonowego przed betonowaniem)

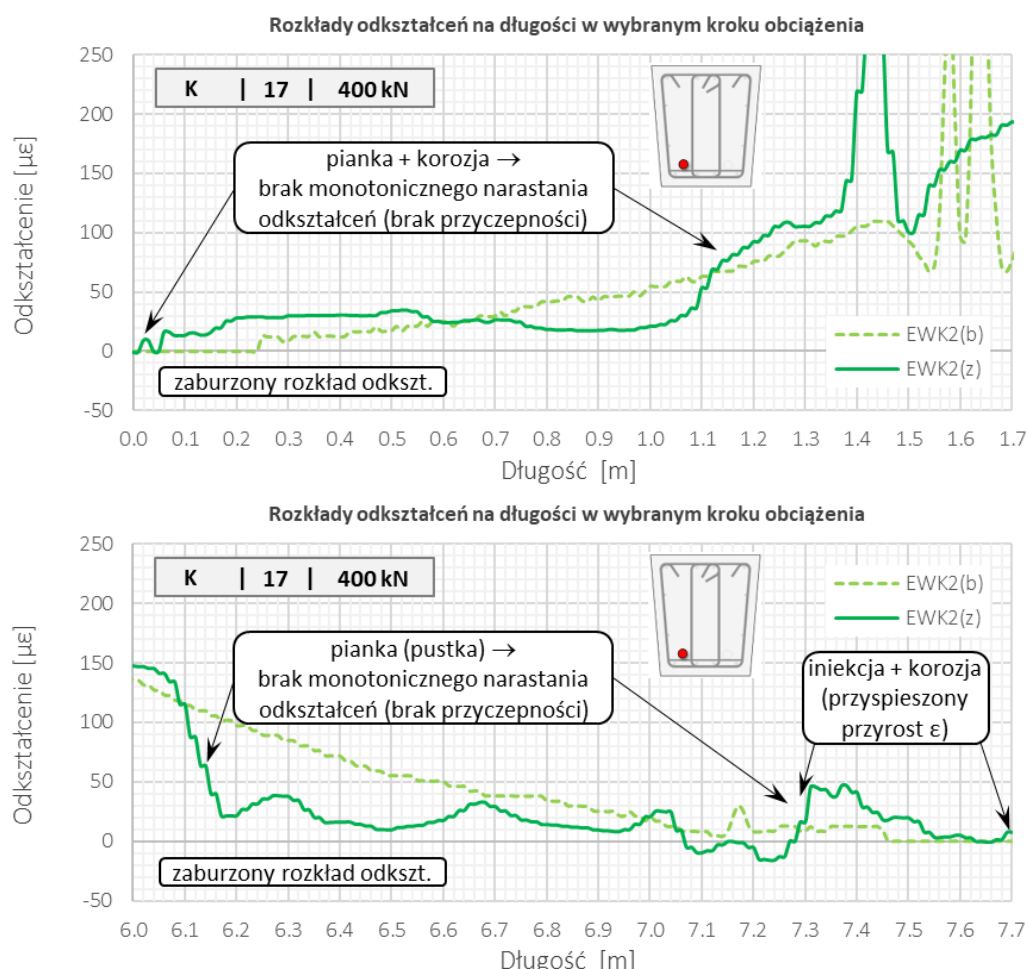
Odczyty referencyjne przeprowadzono na bocznej powierzchni dźwigara za pomocą plastikowego szczelinomierza płytkowego z dokładnością $\pm 0,05$ mm. Ze względu na różne lokalizacje pomiarów oraz nieprzewidywalny przebieg i szerokość pęknięć, porównanie w obrębie pojedynczego pęknięcia można uznać jedynie za przybliżone.

3.3. Identyfikacja uszkodzeń

Uszkodzenia były symulowane tylko w początkowej i końcowej strefie belki K2, które nie uległy zarysowaniu. W tych strefach można zauważyć znaczące różnice między dwiema belkami. Ze względu na utratę przyczepności czujnika EWK2 do betonu, nie występuje charakterystyczny, monolityczny wzrost odkształceń. Natomiast w miejscu iniekcji z symulowaną korozją (ostatnie 100-120 cm dźwigara) przyrost odkształceń jest przyspieszony w porównaniu do dźwigara nieuszkodzonego. Szczegóły analizy przedstawiono na Rys. 8 i 9.



Rys. 8. Porównanie odkształceń w końcowych strefach belek K1 i K2 przy obciążeniu 400 kN (czujnik zamocowany wewnątrz kanału kablowego)



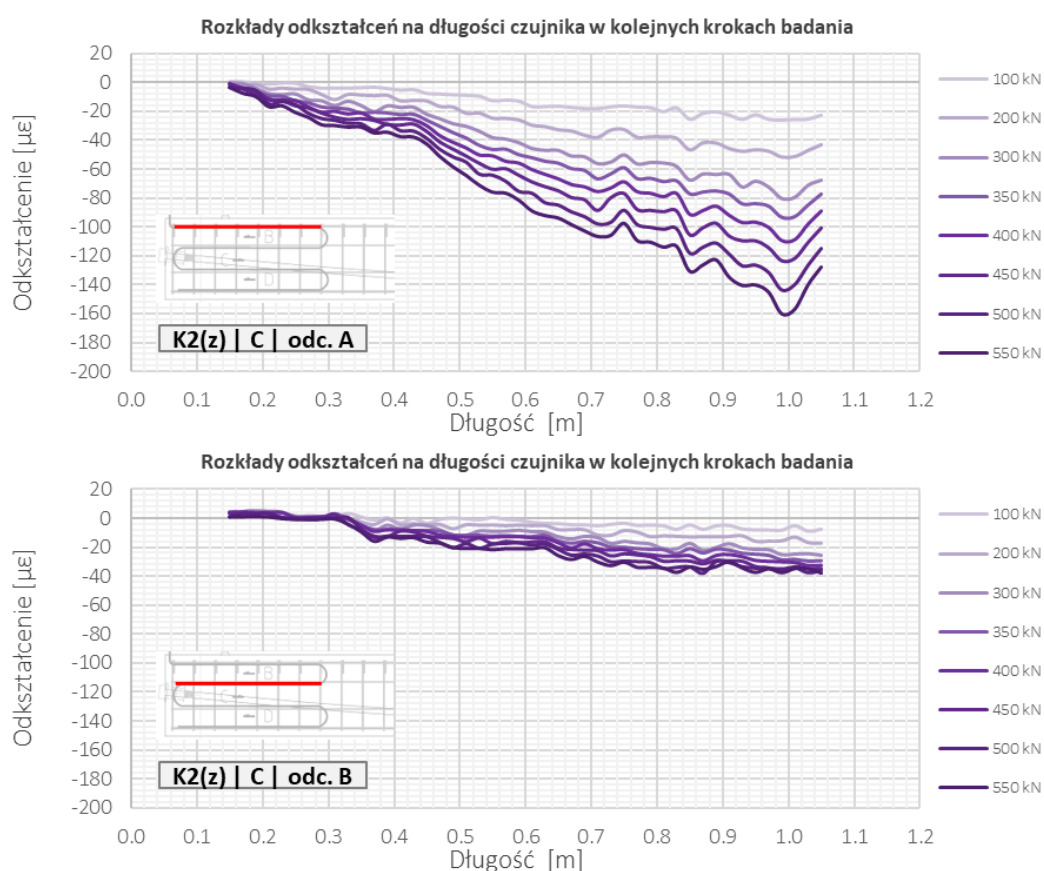
Rys. 9. Porównanie odkształceń w końcowych strefach belek K1 i K2 przy obciążeniu 400 kN (czujnik zamocowany wewnątrz kanału kablowego) – zbliżenie na końcowe odcinki belek

Analiza zjawisk lokalnych w początkowej i końcowej strefie dźwigara pozwoliła na zdiagnozowanie uszkodzeń. Istnieje również możliwość analizy globalnej pracy dźwigara, polegającej na obliczeniu statystyk (w tym wartości średnich) dla wybranych stopni obciążenia i porównaniu ich z wynikami dla nieuszkodzonego dźwigara przy tych samych siłach. Dla każdej pary czujników zarejestrowano wzrost średnich odkształceń. Najmniejsze wzrosty (rzędu kilku procent) zaobserwowano dla czujników w strefach ściskanych i rozciąganych, nie znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie symulowanego uszkodzenia. Z drugiej strony, największe przyrosty (rzędu kilkudziesięciu procent) wykazały czujniki EWK2 wewnątrz kanału i czujniki ES2 zainstalowane na kanale.

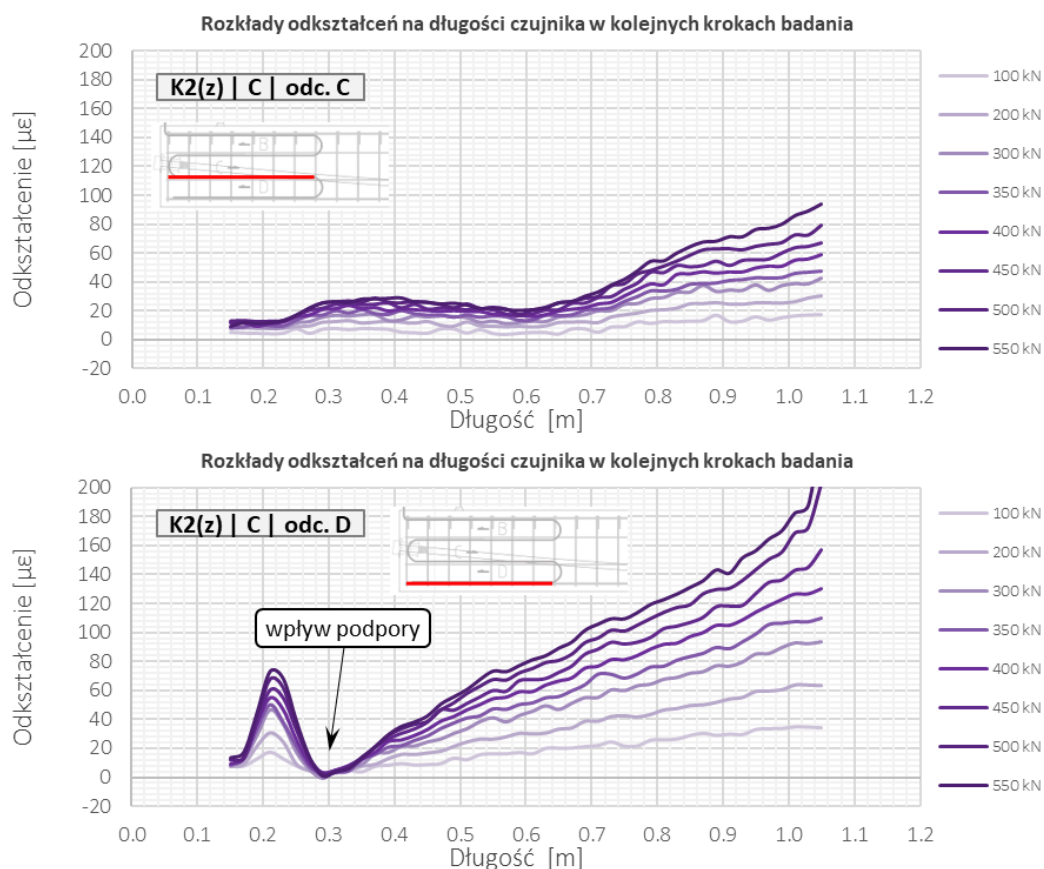
3.4. Analiza stref zakotwień

W niniejszym podrozdziale przedstawiono pomiary odkształceń w strefach zakotwień kabli sprężających, dzięki którym można było ocenić rzeczywistą wytrzymałość betonu na rozciąganie, co jest szczególnie istotne w konstrukcjach z betonu zbrojonego i sprężonego. Wiąże się to z porównaniem dwóch profili odkształceń: jednego tuż przed, a drugiego tuż po zarysowaniu. Dokładność tego podejścia zależy zatem od częstotliwości pomiarów w stosunku do szybkości obciążenia. W tym badaniu odczyty były dokonywane stopniowo

wraz ze wzrostem siły. Obecnie odczyty o wysokiej częstotliwości (od kilku do kilkudziesięciu Hz) są osiągalne przy użyciu odpowiedniego interrogatora opartego na DFOS. Rysunki 10 i 11 przedstawia poziome profile odkształceń w strefie zakotwienia belki PT2 w kolejnych etapach obciążenia. Wzdłuż odcinków A i B zarejestrowano odkształcenia ściskające (Rys. 10), natomiast wzdłuż odcinków C i D wystąpiły odkształcenia rozciągające (Rys. 11). Do 600 kN rozkłady odkształceń pozostają gładkie, bez charakterystycznych lokalnych pików wskazujących na zarysowanie. Jednak przy obciążeniu 650 kN w odległości ok. 0,9 m od powierzchni czołowej dźwigara wzdłuż sekcji D (najniższej) pojawia się pik (Rys. 11).



Rys. 10. Rozkłady odkształceń poziomych w strefie zakotwień belki K2 w kolejnych krokach obciążenia – odcinki pomiarowe A i B

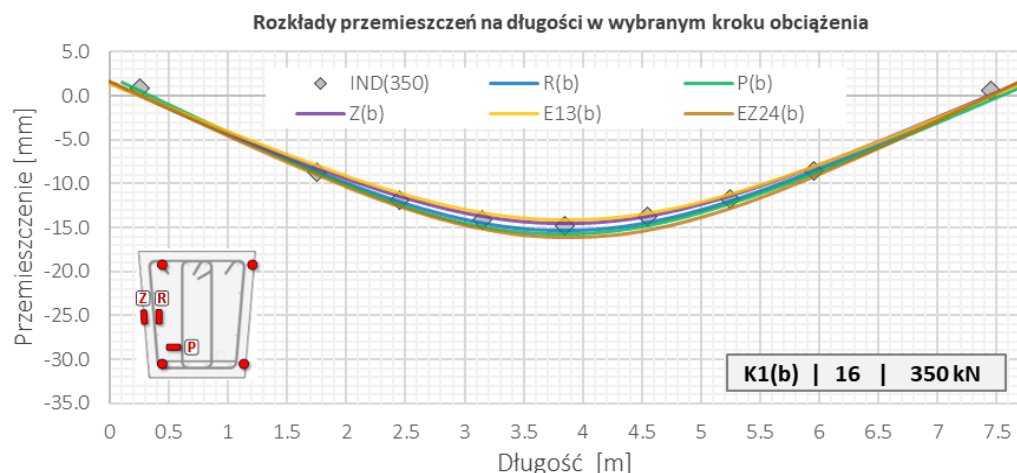


Rys. 11. Rozkłady odkształceń poziomych w strefie zakotwień belki K2 w kolejnych krokach obciążenia – odcinki pomiarowe C i D

Odształcenie przed zarysowaniem w tym punkcie wynosiło $156 \mu\epsilon$, co po uwzględnieniu wartości modułu sprężystości 44,2 GPa odpowiada wytrzymałości na rozciąganie 6,9 MPa. Należy zauważyć, że wartość ta nie jest typową właściwością materiałową samego betonu, ale charakterystyką całego elementu konstrukcyjnego, uwzględniającą obecność prętów zbrojeniowych i cięgien sprężających. Informacje te mogą być cenne dla projektantów w zarządzaniu konserwacją i eksploatacją tych dźwigarów oraz w optymalizacji podobnych elementów w przyszłości.

3.5. Ugięcia

W ramach badań sprawdzono również możliwość wykorzystania czujników DFOS do określania zmian przemieszczeń elementów sprężonych. Przeanalizowano zgodność wskazań czujników DFOS z pomiarami referencyjnymi, wykonywanymi w określonych lokalizacjach z wykorzystaniem punktowych czujników indukcyjnych. Przykładowe wykresy z belki kablobetonowej K1 przedstawione na Rys. 12, poza wskazaniem z 3DSensorów, uwzględniają także przemieszczenia obliczone i skalibrowane na podstawie odkształceń zmierzonych czujnikami monolitycznymi o zredukowanej sztywności (ES) zainstalowanymi w bruzdach przypowierzchniowych. W żadnym kroku obciążeniowym ani w żadnym czujniku różnice nie przekroczyły wartości 0,6 mm przy mierzonych wartościach bezwzględnych na poziomie kilkunastu milimetrów. Zgodność należy zatem uznać za bardzo dobrą.



Rys. 12. Porównanie przemieszczeń belki K1 zmierzonych za pomocą różnych czujników

4. Podsumowanie

Technika pomiarowa wykorzystująca rozproszone czujniki światłowodowe (DFOS) okazuje się być cennym narzędziem do oceny stanu technicznego konstrukcji sprężonych. Badania wykazały skuteczność tej techniki w monitorowaniu zachowania sprężonych elementów betonowych pod obciążeniem oraz w wykrywaniu uszkodzeń, takich jak zarysowania lub pustki w kanałach kablowych. Pomiar DFOS zapewniają kompleksowy obraz zmian odkształceń i przemieszczeń na całej długości elementu konstrukcyjnego, przy czym wszystkie czujniki wnoszą cenne informacje do oceny stanu odkształcenia konstrukcji. Pomimo ograniczonego zakresu uszkodzeń w belkach, ich identyfikacja była możliwa dzięki analizie odczytów z czujników DFOS.

Obecnie interogatory DFOS umożliwiają pomiary o wysokiej częstotliwości, a czujniki monolityczne wykrywają przede wszystkim subtelne zmiany odkształcenia spowodowane mikrozarysowaniami. Precyzja oszacowania szerokości rys jest nie niższa niż 0,05 mm, co jest wystarczające w ocenie stanu technicznego konstrukcji żelbetowej w praktyce inżynierskiej. Wytrzymałość na rozciąganie elementu konstrukcyjnego (betonu zbrojonego i sprężonego) można oszacować bezpośrednio, z dokładnością ograniczoną częstotliwością pomiaru w stosunku do szybkości obciążenia.

Starannie dobrane i zainstalowane czujniki mogą odgrywać kluczową rolę w systemie monitorowania konstrukcji sprężonych. Należy zauważyć, że wyniki uzyskane za pomocą pomiarów DFOS są porównywalne z wynikami uzyskanymi za pomocą uznanych metod konwencjonalnych. Jednak zdolność techniki DFOS do przechwytywania znacznie większego zakresu danych pomiarowych otwiera potencjał do opracowania technik automatycznego wykrywania uszkodzeń i systemów zdalnego powiadamiania dla zarządców infrastruktury i budynków. Trwające na całym świecie badania koncentrują się na ulepszeniu tej techniki i dostosowaniu jej do użytku w budownictwie, zwłaszcza w konstrukcjach sprężonych, przy jednoczesnym rozwijaniu metod interpretacji wyników, w tym zastosowaniu sztucznej inteligencji do algorytmów automatycznej identyfikacji uszkodzeń [24]. Czynniki te sugerują, że pomiary światłowodowe DFOS mogą stać się jedną z wiodących technik pomiarowych w budownictwie w najbliższej przyszłości.

5. Literatura

- [1] Jarominiak, A. (2019). Zagrożenia cięgien sprężających w mostach kablobetonowych. *Inżynieria i Budownictwo*, 75.
- [2] Jarominiak, A. (2019). Zagrożenia mostów kablobetonowych powodowane wadliwym iniektem. *Drogownictwo*, (9), 243-249.
- [3] Jarominiak, A. (2019). Problemy trwałości kabli mostów podwieszonych. *Inżynieria i Budownictwo*, 75.
- [4] NCHRP 14-28. Condition Assessment of Bridge Post-Tensioning and Stay Cable Systems Using NOE Methods. Final Report. 2016.
- [5] H.L. Yip, F.T.K. Au, S.T. Smith, Serviceability Performance of Prestressed Concrete Buildings Taking into Account Long-Term Behaviour and Construction Sequence, *Procedia Engineering*. 14 (2011) 1384–1391. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.174>.
- [6] Powers R.G., Sagi.ies A.A., Virmani Y.P.: Corrosion of Post-Tensioned Tendons in Florida Bridges. Florida Department of Transportation. Tallahassee, 2002.
- [7] Jarominiak, A. (2019). Nieniszczące metody kontroli stanu kabli mostów kablobetonowych i podwieszonych. *Drogownictwo*, (12).
- [8] D.M. Frangopol, D. Saydam, S. Kim, Maintenance, management, life-cycle design and performance of structures and infrastructures: a brief review, *Structure and Infrastructure Engineering*. 8 (2012) 1–25. <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.628962>.
- [9] W. Derkowski, P. Skupien. Safety of precast prestressed concrete structures after design life period. In: *Proceedings of the 2018 fib Congress, Melbourne, Australia (2018)*, 2080–2090.
- [10] W. Derkowski, R. Walczak, Problem of condition assessment of precast, posttensioned concrete crane beams in an extended period of use. In: *Proceedings of the fib Symposium, Krakow, Poland (2019)*, 1507–1514.
- [11] Alj, I.; Quiertant, M.; Khadour, A.; Grando, Q.; Benzarti, K. Environmental Durability of an Optical Fiber Cable Intended for Distributed Strain Measurements in Concrete Structures. *Sensors* 2022, 22, 141. <https://doi.org/10.3390/s22010141>.
- [12] Buda-Ożóg, L.; Zięba, J.; Sieńkowska, K.; Nykiel, D.; Zuziak, K.; Sieńko, R.; Bednarski, Ł. Distributed fibre optic sensing: Reinforcement yielding strains and crack detection in concrete slab during column failure simulation. *Measurement* 2022, 195, 111192. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111192>.
- [13] Sieńko, R.; Bendarski, Ł.; Howiacki, T. Distributed fibre optic sensing for safety monitoring of concrete, steel and composite bridges. In *Bridge Safety, Maintenance, Management, Life-Cycle, Resilience and Sustainability*, 1st ed.; Casas, J.R., Frangopol, D.M., Turmo, J., Eds.; CRC Press: London, UK, 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003322641>.
- [14] Barrias, A.; Casas, J.R.; Villalba, S. Embedded Distributed Optical Fiber Sensors in Reinforced Concrete Structures—A Case Study. *Sensors* 2018, 18, 980. <https://doi.org/10.3390/s18040980>.
- [15] Alj, I.; Quiertant, M.; Khadour, A.; Grando, Q.; Terrade, B.; Renaud, J.-C.; Benzarti, K. Experimental and Numerical Investigation on the Strain Response of Distributed Optical Fiber Sensors Bonded to Concrete: Influence of the Adhesive Stiffness on Crack Monitoring Performance. *Sensors* 2020, 20, 5144. <https://doi.org/10.3390/s20185144>.
- [16] Ł. Bednarski, R. Sieńko, T. Howiacki, Analysis of post-tensioned girders structural behaviour using continuous temperature and strain monitoring, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 92 (2017) 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/92/1/012003>.

- [17] Bado, M.S.; Casas, J.R.; Kaklauskas, G. Distributed Sensing (DOFS) in Reinforced Concrete members for reinforcement strain monitoring, crack detection and bond-slip calculation. *Eng. Struct.* 2021, 226, 111385. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111385>.
- [18] Bednarski, Ł.; Sieńko, R.; Howiacki, T.; Zuziak, K. The Smart Nervous System for Cracked Concrete Structures: Theory, Design, Research, and Field Proof of Monolithic DFOS-Based Sensors. *Sensors* 2022, 22, 8713. <https://doi.org/10.3390/s22228713>.
- [19] Sieńko, R.; Bednarski, Ł.; Howiacki, T. About Distributed Internal and Surface Strain Measurements Within Prestressed Concrete Truck Scale Platforms. In *Proceedings of the 3rd World Multidisciplinary Civil Engineering—Architecture—Urban Planning Symposium WMCAUS, Prague, Czech Republic, 18–22 June 2018*.
- [20] Piątek, B.; Howiacki, T.; Kulpa, M.; Siwowski, T.; Sieńko, R.; Bednarski, Ł. Zastosowanie pomiarów światłowodowych DFOS do identyfikacji uszkodzeń w konstrukcjach sprężonych. *Materiały z konferencji Dni Betonu 2023*.
- [21] Rodríguez, G.; Casas, J.R.; Villalba, S. Cracking assessment in concrete structures by distributed optical fiber. *Smart Mater. Struct.* 2015, 24, 035005. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/3/035005>.
- [22] Liu, T.; Huang, H.; Yang, Y. Crack Detection of Reinforced Concrete Member Using Rayleigh-Based Distributed Optic Fiber Strain Sensing System. *Adv. Civ. Eng.* 2020, 2020, 8312487. <https://doi.org/10.1155/2020/8312487>.
- [23] Fischer, O.; Thoma, S.; Crepaz, S. Distributed fiber optic sensing for crack detection in concrete structures. *Civ. Eng. Des.* 2019, 1, 97–105. <https://doi.org/10.1002/cend.201900008>.
- [24] Liu, Y.; Bao, Y. Intelligent monitoring of spatially-distributed cracks using distributed fiber optic sensors assisted by deep learning. *Measurement*. 2023, 220, 113418.