



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Zastosowanie nowych technik pomiarowych na przykładzie badań doświadczalnych żelbetowego stropu słupowo-płytkowego

dr hab. inż. Lidia Buda-Ożóg
dr inż. Joanna Zięba

Warszawa, 01-12-2022

BADANIA DOŚWIADCZALNE - OPIS

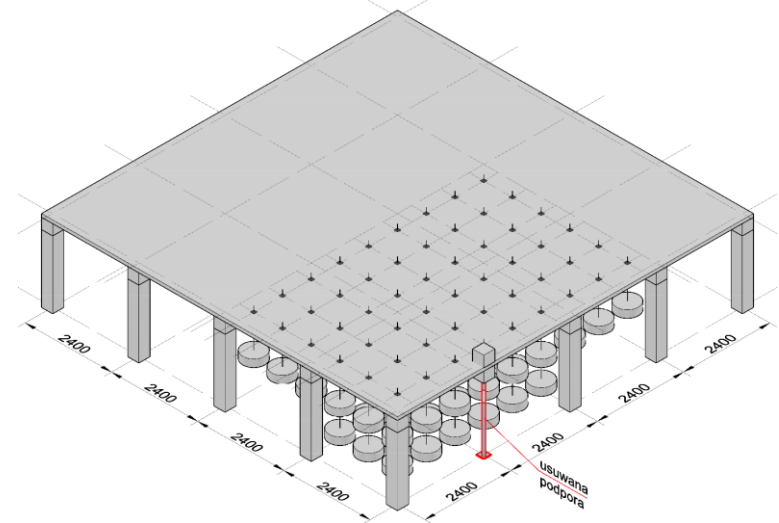
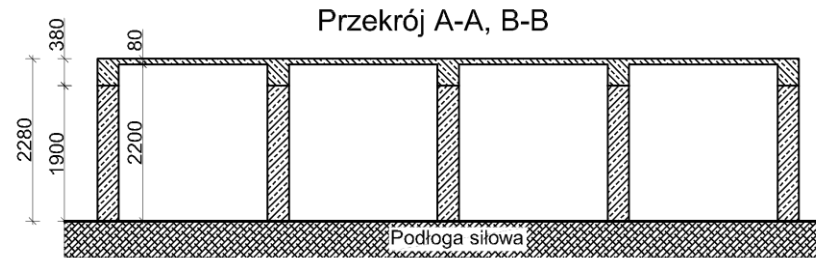
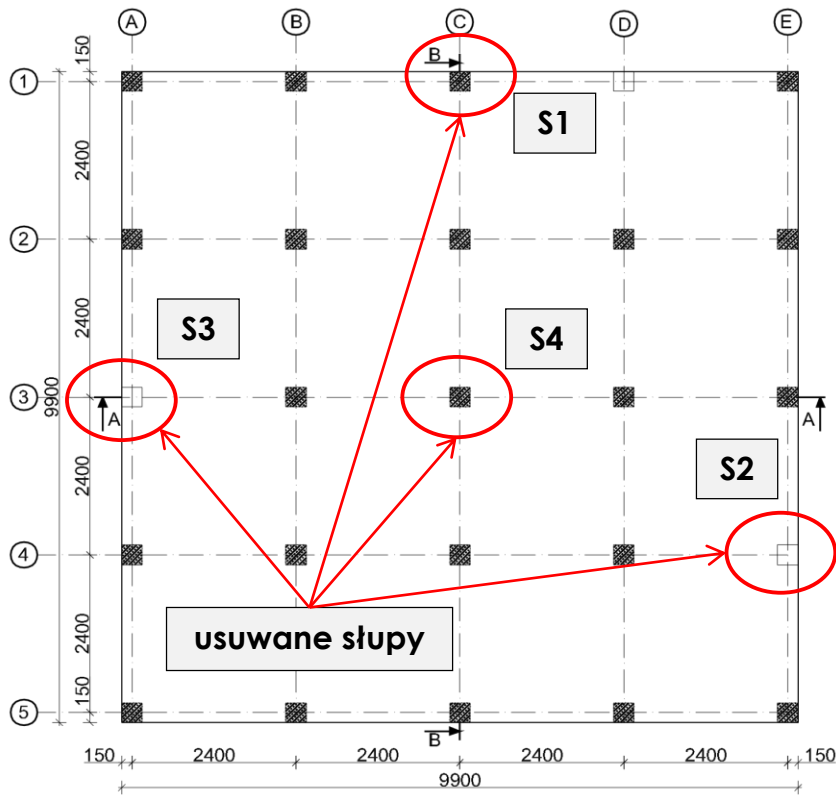
Strop płytowo – słupowy:

- model w skali 1:3;
- siatka podpór 2,4 x 2,4 m;
- 25 podpór wysokości 2,2 m (1,9 m część prefabrykowana oraz 0,3 m część monolityczna);
- wymiar słupów 0,3 x 0,3 m, grubość stropu 0,08 m;
- całkowity wymiar stropu 9,9 x 9,9 m.



Fot. 1 Widok analizowanego stropu płytowo-słupowego: a) model w trakcie badań; b) widok zbrojenie dolnego w trakcie realizacji elementu badawczego.

BADANIA DOŚWIADCZALNE - OPIS



Rys. 1 Uproszczony widok modelu przyjętego do badań

Cel badań: Celem badań była ocena skuteczności zbrojenia stalą B600B w sytuacji katastrofy postępującej w przedmiotowym stropie oraz obserwacja sposobu zniszczenia fragmentów stropu, w zależności od stopnia i rozmieszczenia zbrojenia.

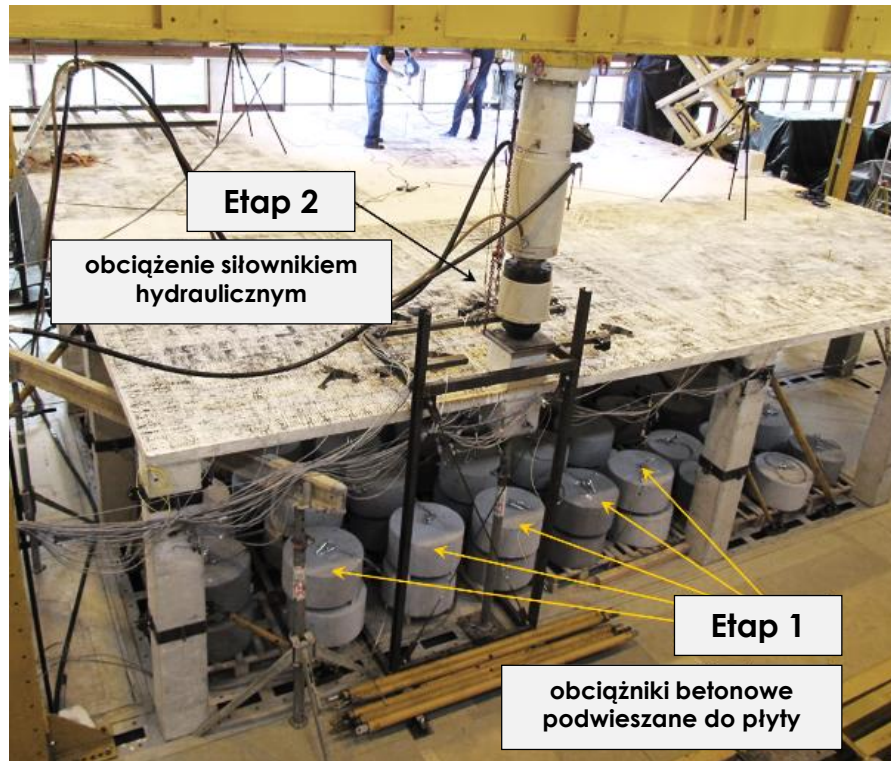
3 etapy badań: usunięcie słupa krawędziowego odpowiednio S1, S2, S3 oraz dodatkowo S4.

BADANIA DOŚWIADCZALNE - OPIS

Dwa etapy badań doświadczalnych:

Etap 1 - symulacja obciążeń grawitacyjnych obciążnikami betonowymi;

Etap 2 - symulacja warunków ekstremalnych wynikających z usunięcia słupa (podpory) i obciążenia mechanicznego siłownikiem hydraulicznym.



Fot. 2 Widok mechanizmów obciążania badanego układu płytowo – słupowego

ZASTOSOWANE TECHNIKI POMIAROWE

Stal zbrojeniowa – pomiar odkształceń:

- tensometry elektrooporowe
- **czyste włókna światłowodowe**

Powierzchnia betonowa płyty – pomiar odkształceń i przemieszczeń:

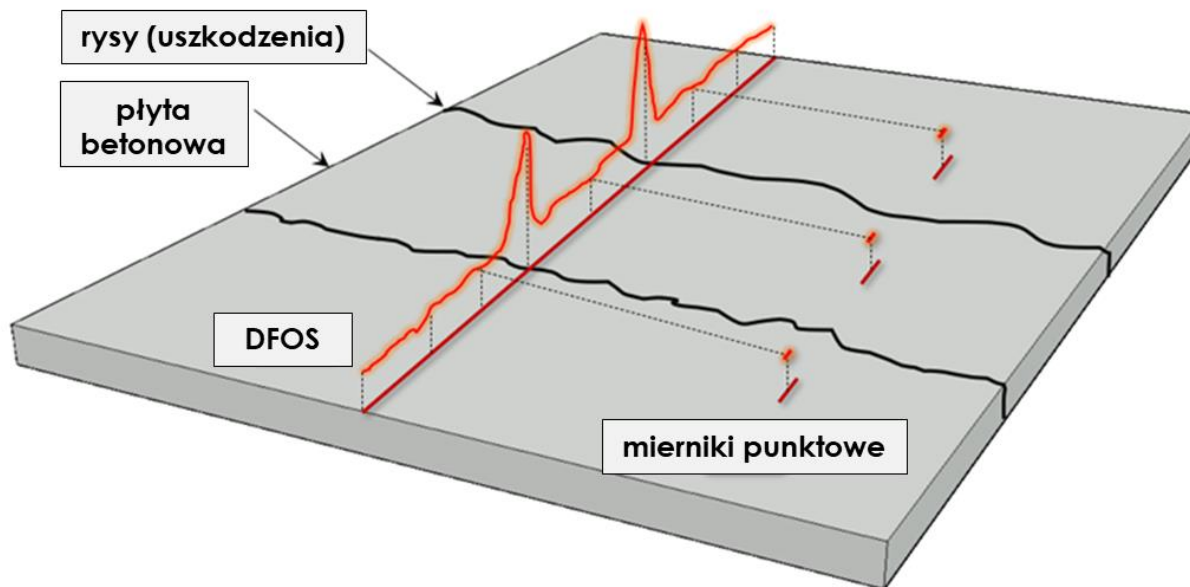
- tensometry elektrooporowe
- indukcyjnościowe czujniki różnicowe (czujniki linkowe) oraz wiropiętrowe czujniki indukcyjne
- systemu optycznej korelacji obrazu ARAMIS
- **czyste włókna światłowodowe oraz czujniki światłowodowe EpsilonSensor**



Fot. 3 Techniki pomiarowe: a) widok konstrukcji wsporczej wraz indukcyjnymi czujnikami przemieszczeń, b) widok tensometru elektrooporowego na zbrojeniu (przed betonowaniem)

NARZĘDZIA POMIAROWE DFOS - WPROWADZENIE

Światłowodowa technika pomiarów rozproszonych DFOS (ang. distributed fibre optic sensing) umożliwia realizowania pomiarów wybranych wielkości fizycznych z rozdzielczością przestrzenną tak niską, w porównaniu z całkowitą długością pomiarową, że z inżynierskiego punktu widzenia mogą być one traktowane jako geometrycznie ciągłe.



Rys. 2 Schemat pokazujący różnice pomiędzy czujnikami DFOS a konwencjonalnymi miernikami punktowymi w możliwościach wykrywania uszkodzeń [1], [2]

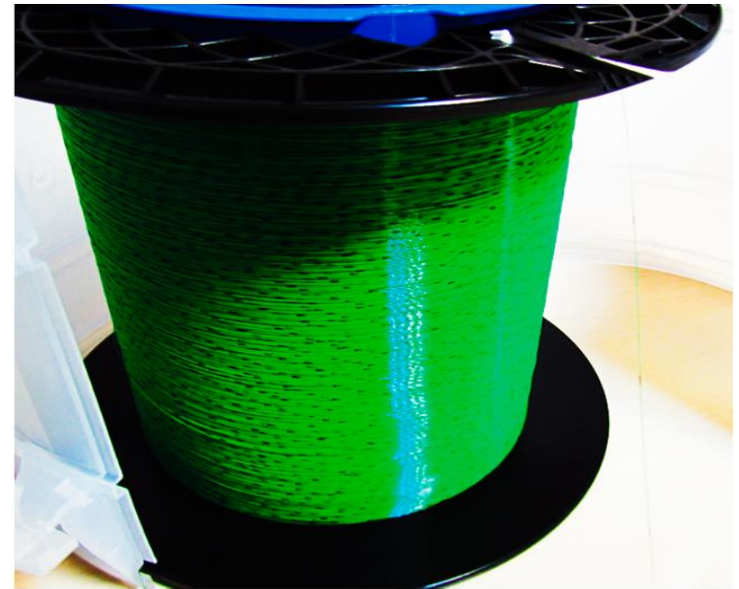
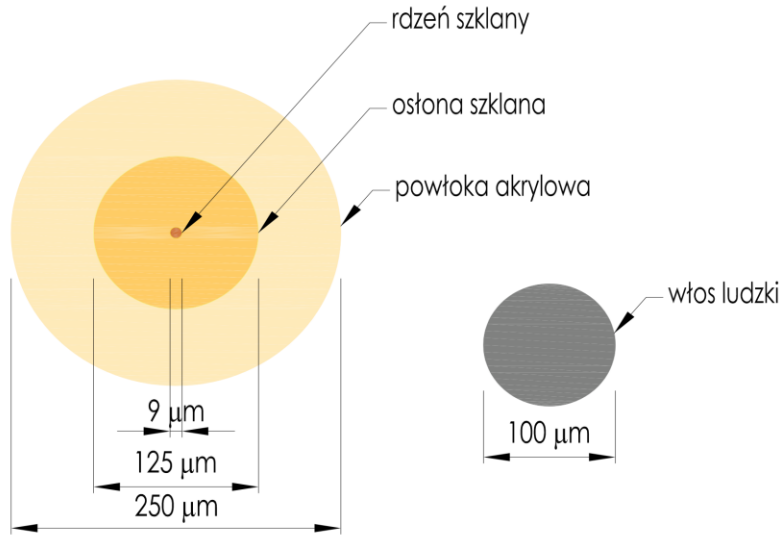
Realizowanie pomiarów wewnątrz elementu w sposób geometrycznie ciągły ma szczególne zastosowanie do konstrukcji wykonanych z betonu.

W pomiarach konstrukcji betonowych, zazwyczaj stosowana jest rozdzielczość przestrzenna równa 10 mm, co oznacza 100 wirtualnych czujników (tensometrów) na jeden metr światłowodu.

NARZĘDZIA POMIAROWE DFOS - WPROWADZENIE

Narzędzia pomiarowych DFOS:

- **Czyste włókno światłowodowe.** Wykorzystywane najczęściej w warunkach laboratoryjnych z uwagi na możliwość uszkodzenia.



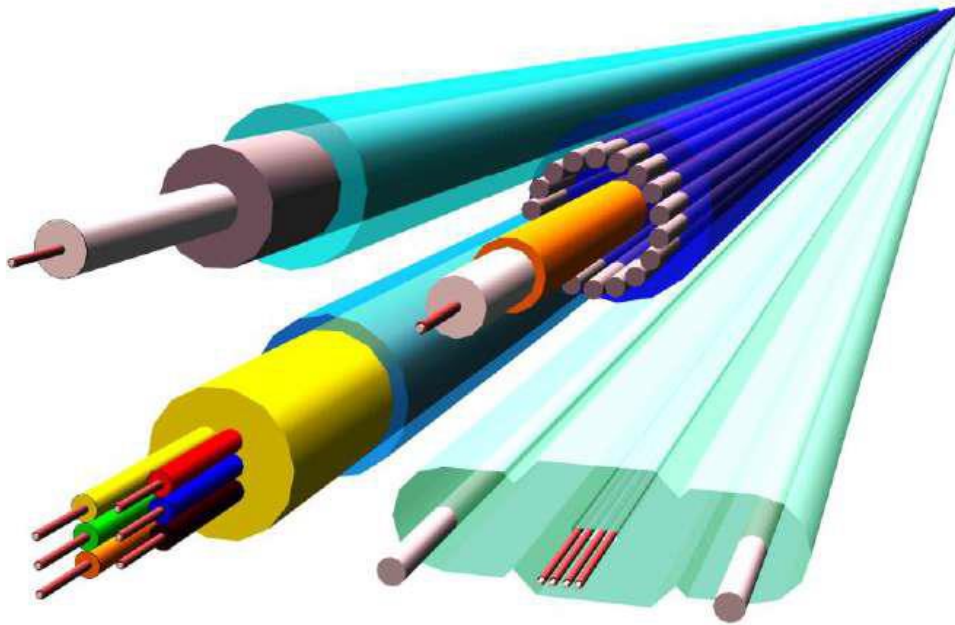
Rys. 3 Czyste włókna światłowodowe: a) przekrój standardowego światłowodu telekomunikacyjnego SM9/125 w powłoce pierwotnej [3], b) widok zwiniętego włókna (zielona powłoka akrylowa)

Zalety: włókno o znikomym wymiarach i sztywności (umieszczane np. na żebrze podłużnym pręta zbrojeniowego), w zależności od powłoki możliwości pomiaru odkształceń większym niż $\pm 5\%$ (powłoka akrylowa)

NARZĘDZIA POMIAROWE DFOS - WPROWADZENIE

Narzędzia pomiarowych DFOS:

- **Kable warstwowe (sensoryczne)** - konstrukcja jest wielowarstwowa, złożona głównie z tworzywa sztucznego i/lub stali, zwykle uzupełniona o dodatkowe materiały buforujące lub elementy wzmacniające. Są one dedykowane przede wszystkim do pomiarów zewnętrznych na dużych odległościach.



Rys. 4 Przykładowa budowa różnych typów warstwowych i plastycznych kabli sensorycznych [2]

Wady: lokalne zaburzenia spowodowane zjawiskami poślizgu między warstwami lub plastycznością zastosowanych materiałów mogą być uśredniane, ale nie pozwalają na szczegółową analizę lokalnych zdarzeń zachodzących w badanej konstrukcji (np. pęknięć w elementach betonowych). Kable sensoryczne mierzą odkształcenia do 1% .

NARZĘDZIA POMIAROWE DFOS - WPROWADZENIE

- **Czujniki światłowodowe** - ich głównym zadaniem jest jednoznaczne przeniesienie lokalnych zmian odkształcenia z konstrukcji na szklany rdzeń włókna na całej długości.



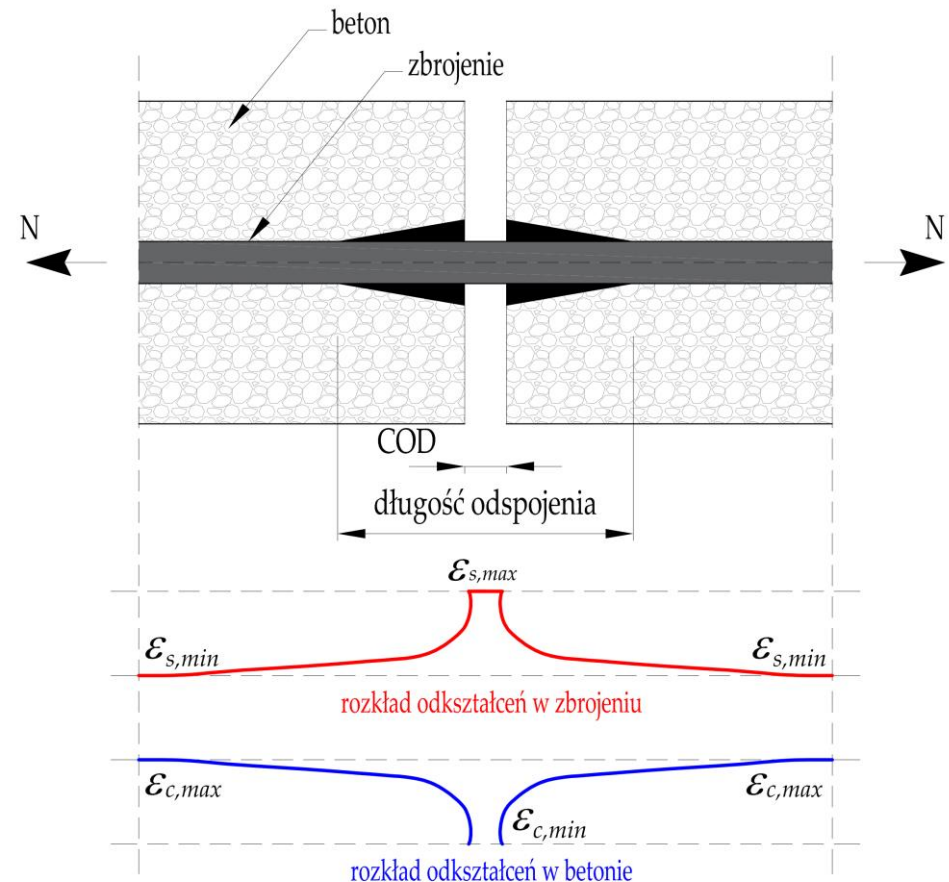
Fot 4 Czujniki światłowodowe [2]: a) światłowodowy czujnik EpsilonRebar o wysokim module sprężystości, b) czujnik EpsilonSensor o niskim module sprężystości

Zalety: Większa wytrzymałość niż czyste włókna światłowodowe, pomiar odkształceń w zakresie 4%, chropowata powierzchnia zewnętrzna (uźebrowanie, oploty, ziarna piasku z epoksydem itp.), która umożliwia bardzo dobrą współpracę z monitorowanym materiałem (beton) co pozwala na precyzyjne rozdzielenie zdarzeń występujących w bardzo bliskiej odległości.

NARZĘDZIA POMIAROWE DFOS - WPROWADZENIE

Idea obliczania szerokości rysy na podstawie pomiarów światłowodowych DFOS

- przeniesienie odkształceń konstrukcji (betonu) na włókno na czujniki światłowodowe;
- w obszarze rysy powstaje strefa odspojenia czujnika od betonu - l_{eff} ,
- powstanie rysy powoduje lokalny wzrost odkształceń rozłożony na długości efektywnej oraz odprężenie się betonu w bliskim sąsiedztwie rysy.



Rys. 5 Rozkłady odkształceń w pręcie zbrojonym i w betonie w obszarze rysy (model uproszczony) [5]

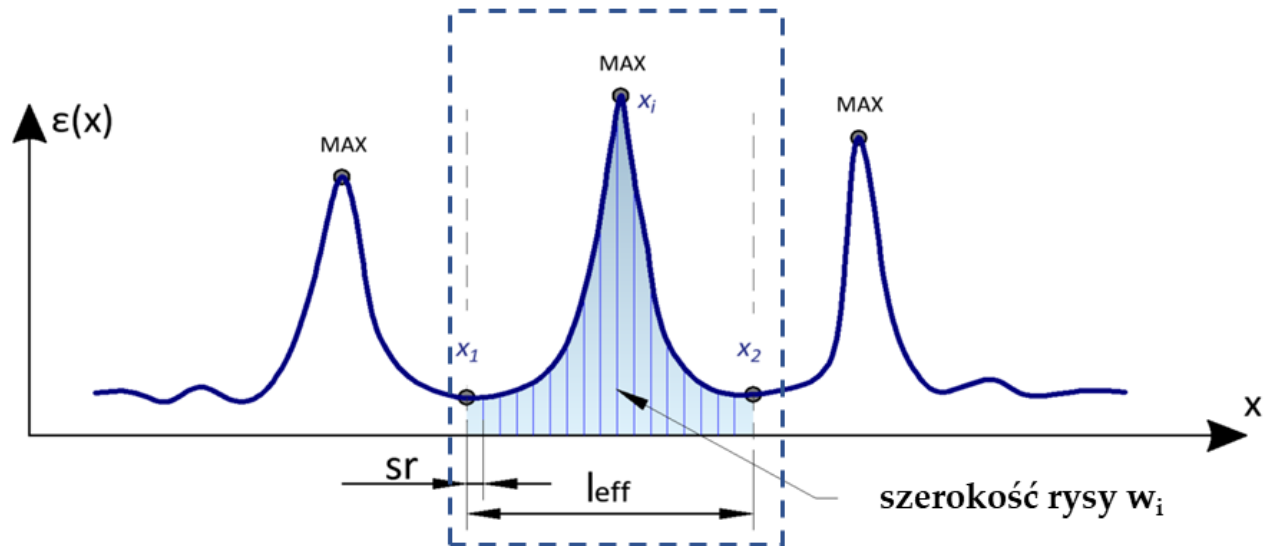
NARZĘDZIA POMIAROWE DFOS - WPROWADZENIE

Obliczenie szerokości rysy sprowadza się do zsumowania zmierzonych odkształceń na długości efektywnej [4].

$$w = \sum_{-0.5 l_{eff}}^{+0.5 l_{eff}} \varepsilon_i \cdot rp$$

gdzie:

w – obliczona szerokość rysy [mm], ε_i – zmierzone odkształcenie w punkcie [$\mu\varepsilon$],
 rp – rozdzielczość przestrzenna [np. 10 mm].



Rys. 6 Obliczanie szerokości rysy na podstawie pomiarów odkształceń DFOS w przeprowadzonych badaniach

WŁÓKNA ŚWIATŁOWODOWE - MONTAŻ

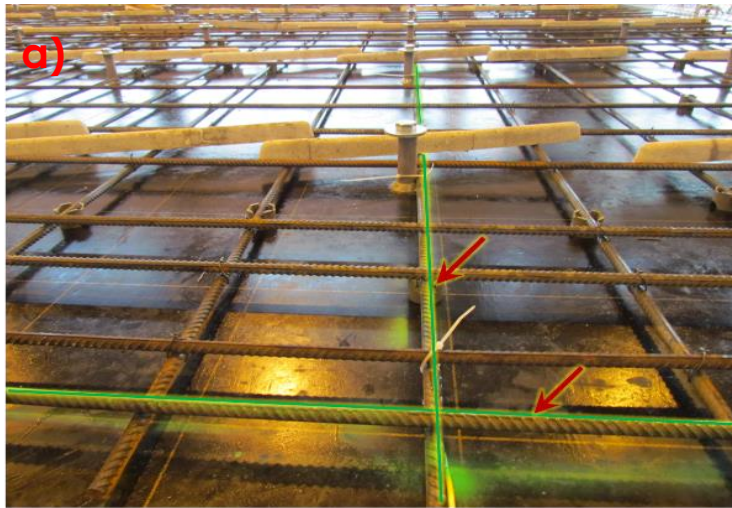
Włókna światłowodowe SM9/125:

- zastosowane na stali zbrojeniowej oraz na powierzchni betonu;
- łącznie około **93 m** zastosowanego włókna (71,5 m na stali zbrojeniowej i 21,5 m na powierzchni betonu);
- zamocowanie na zbrojeniu za pomocą kleju epoksydowego po uprzednim dokładnym oczyszczeniu papierem ściernym i odtłuszczeniu acetonem technicznym;
- dostarczane na miejsce instalacji z wstępnie sklejonymi pigtailami;
- bezpiecznie wyprowadzone z płyty (szalunku) za pomocą ochronnych rur polimerowych.

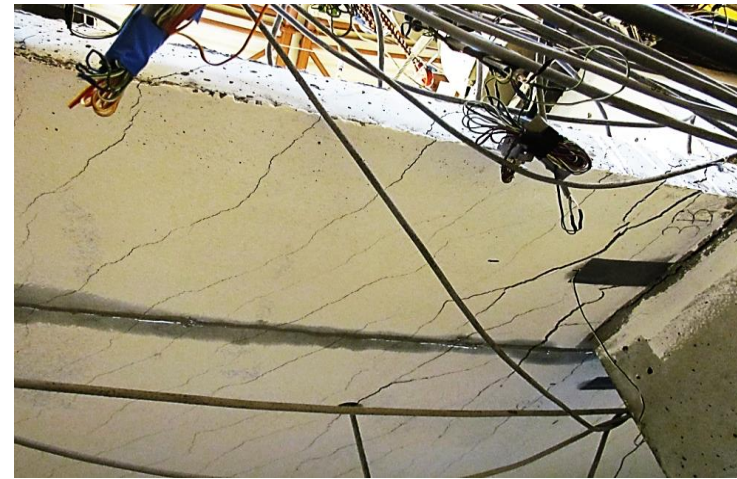
Fot. 5 Montaż DFOS [1]: a) widok włókien światłowodowych przyklejonych do prętów zbrojeniowych wzdłuż ich podłużnego żebra b) widok wstępnie splecionych pigtaili przed zamontowaniem prętów w konstrukcji.



WŁÓKNA ŚWIATŁOWODOWE - MONTAŻ



Fot. 6 Włókna światłowodowe: a) widok włókna pomiarowego w siatce zbrojenia dolnego płyty, b) widok pigtaila w rurze ochronnej



Fot. 7 Włókna światłowodowe przyklejone do dolnej powierzchni płyty [1]

CZUJNIKI EpsilonSensor - MONTAŻ

Czujniki światłowodowe EpsilonSensor:

- zastosowane w grubości płyty, pod powierzchnią betonu;
- zamocowane w przęśle do zbrojenia dolnego i nad podporą do zbrojenia górnego;
- łącznie około 17,5 m zastosowanego czujnika;
- łączenie czujników do zbrojenia za pomocą zaciskowych opasek kablowych.

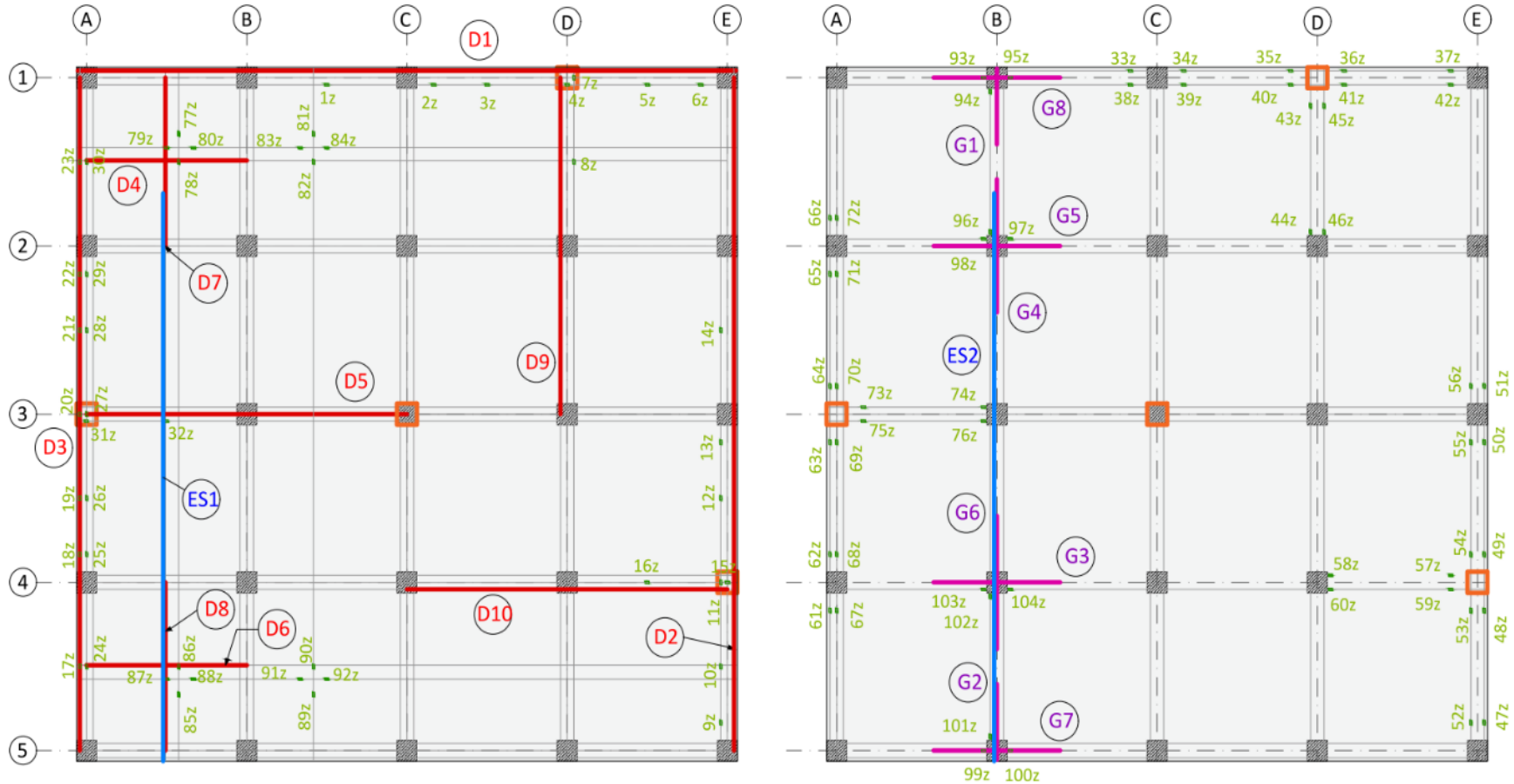


Fot. 8 Widok czujników EpsilonSensor w obszarze dolnego zbrojenia płyty [1].

NARZĘDZIA POMIAROWE DFOS - LOKALIZACJA

Narzędzia pomiarowe DFOS na prętach zbrojeniowych oraz pod powierzchnią betonu:

- zbrojenie dolne – D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10 oraz ES1;
- zbrojenie górne – G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8 oraz ES2.

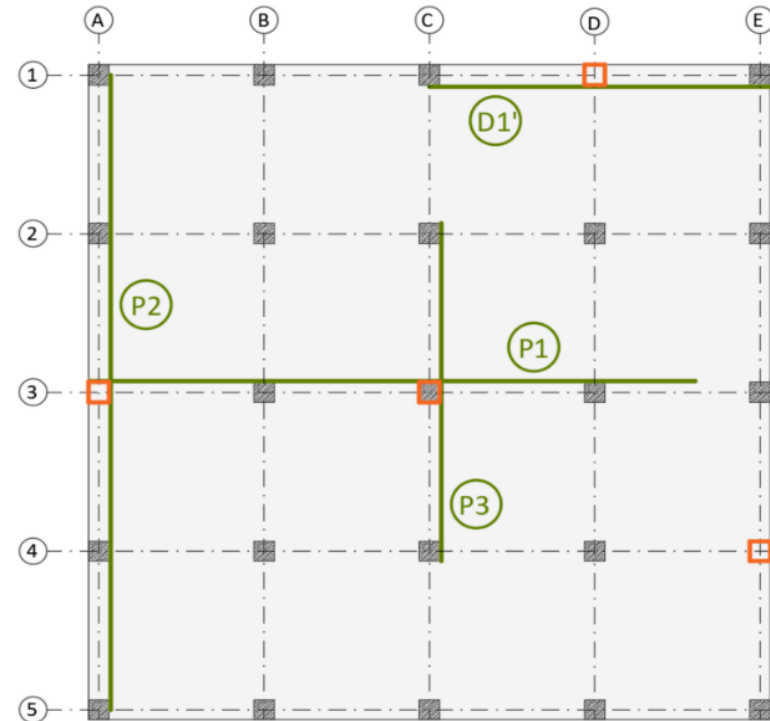


Rys. 7 Rozmieszczenie włókien na prętach zbrojenia dolnego i górnego oraz czujników EpsilonSensor w grubości płyty

NARZĘDZIA POMIAROWE DFOS - LOKALIZACJA

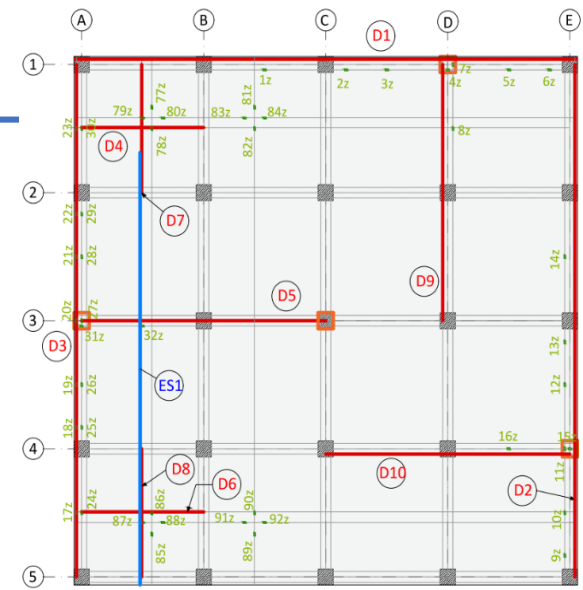
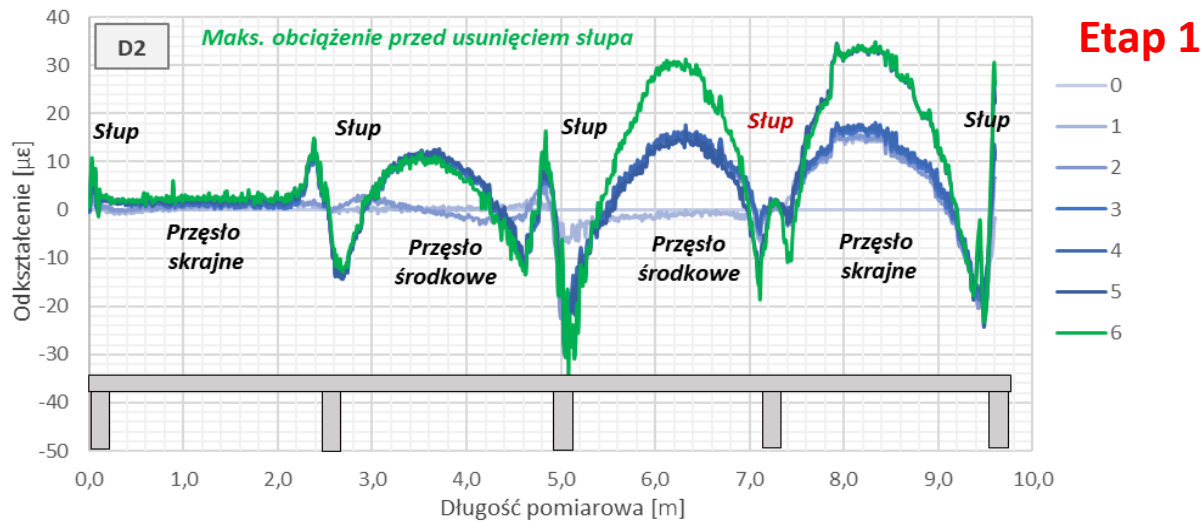
Włókna światłowodowe na powierzchni betonu:

- umieszczone na powierzchni dolnej płyty;
- oznaczone jako: D1', P1, P2 oraz P3;
- przyklejone do oczyszczonej powierzchni za pomocą tego samego dwuskładnikowego epoksydu, jak w przypadku prętów zbrojeniowych;
- ich głównym celem była rejestracja odkształceń betonu wynikających ze zmiany schematu statycznego po usunięciu słupa oraz wykrycie wszystkich rys powierzchniowych.

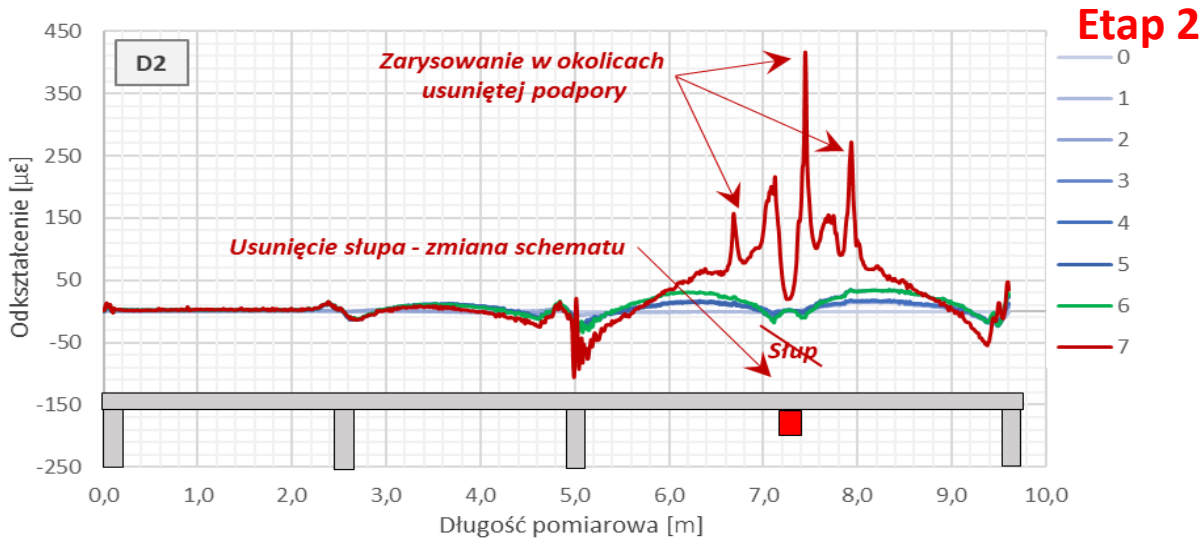


Rys. 8 Włókna światłowodowe na powierzchni betonu: widok rzeczywisty i schemat rozmieszczenia [1]

WYNIKI BADAŃ – WŁÓKNO D2

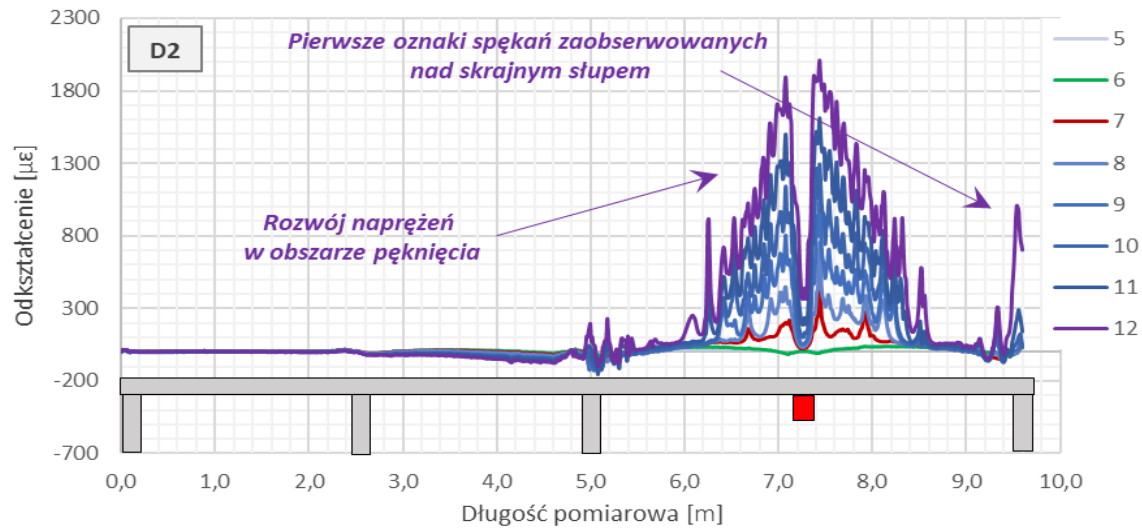


Rys. 9 Słup S2: rozkłady odkształceń w włóknie D2 przed usunięciem słupa

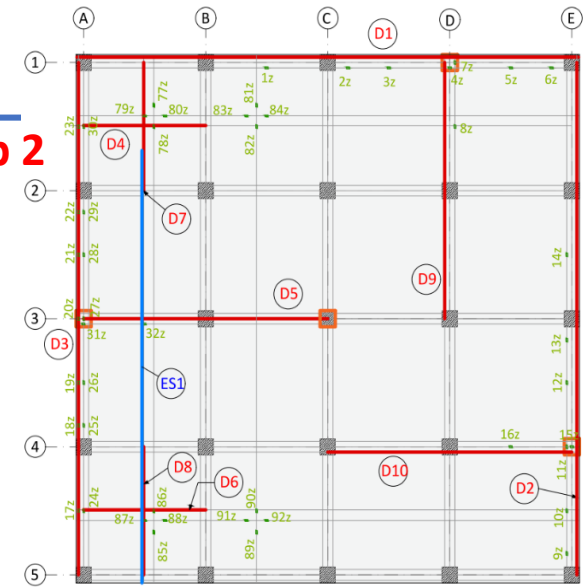


Rys. 10 Słup S2: rozkłady odkształceń w włóknie D2 po zmianie schematu statycznego

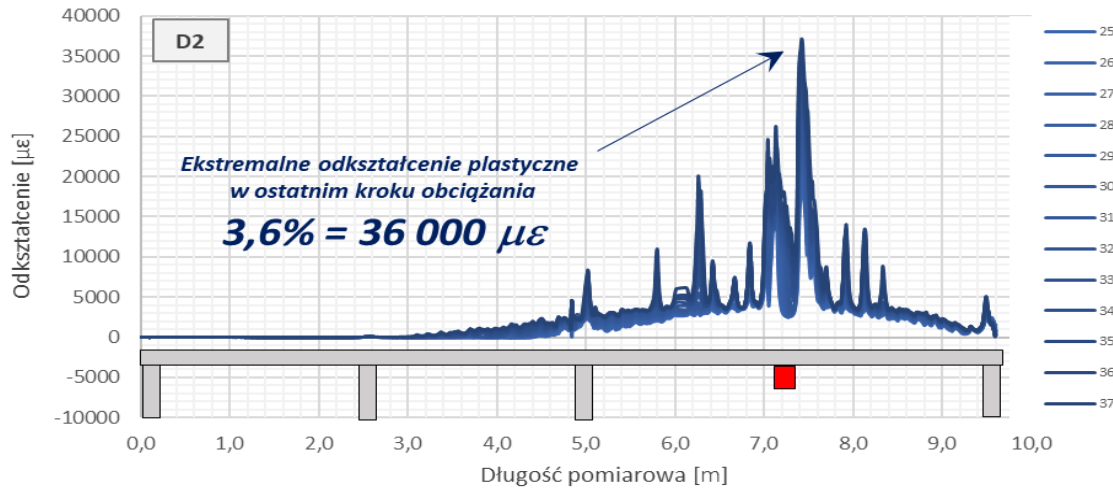
WYNIKI BADAŃ – WŁÓKNO D2



Etap 2

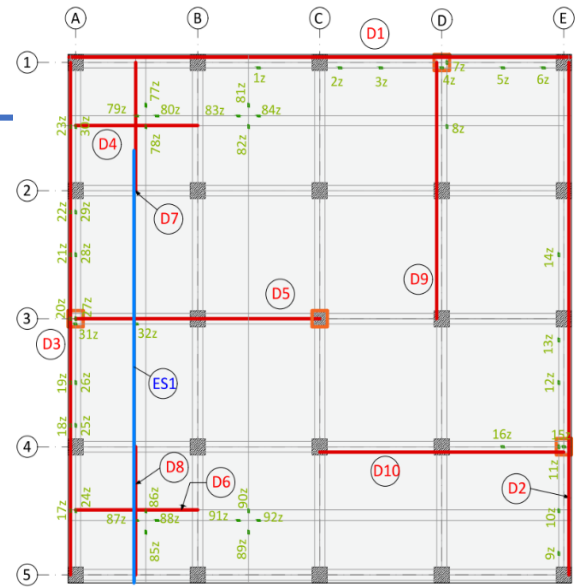
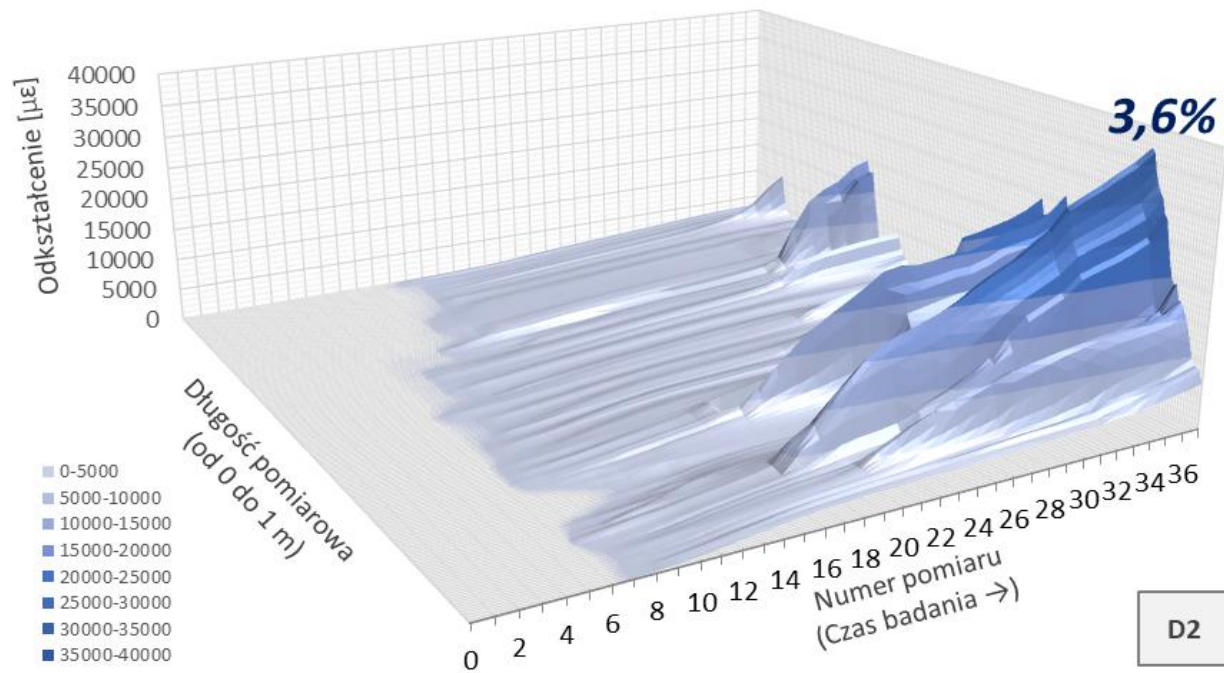


Rys. 11 Słup S2: rozkłady odkształceń w włóknie D2 podczas zwiększania obciążenia (z pierwszymi uszkodzeniami widocznymi przy słupie skrajnym)



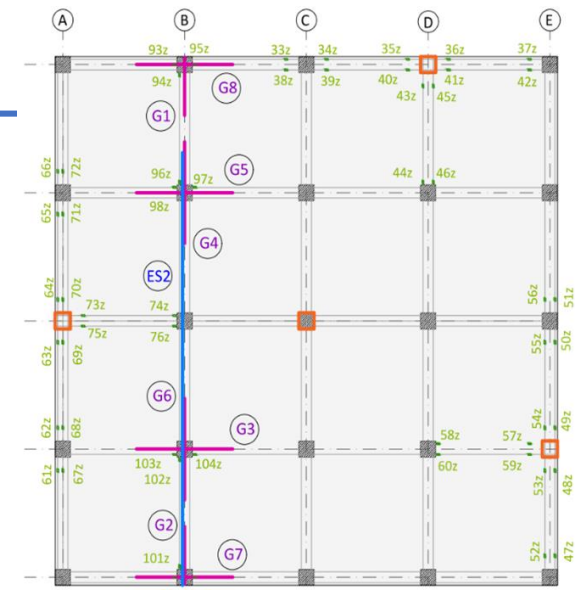
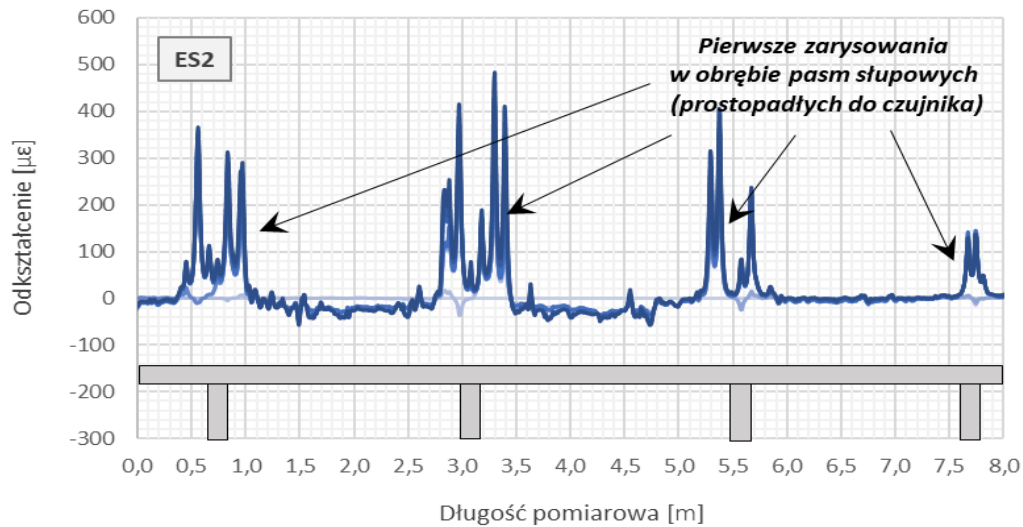
Rys. 12 Słup S2: rozkłady odkształceń w włóknie D2 w ostatnim kroku obciążenia

WYNIKI BADAŃ – WŁÓKNO D2

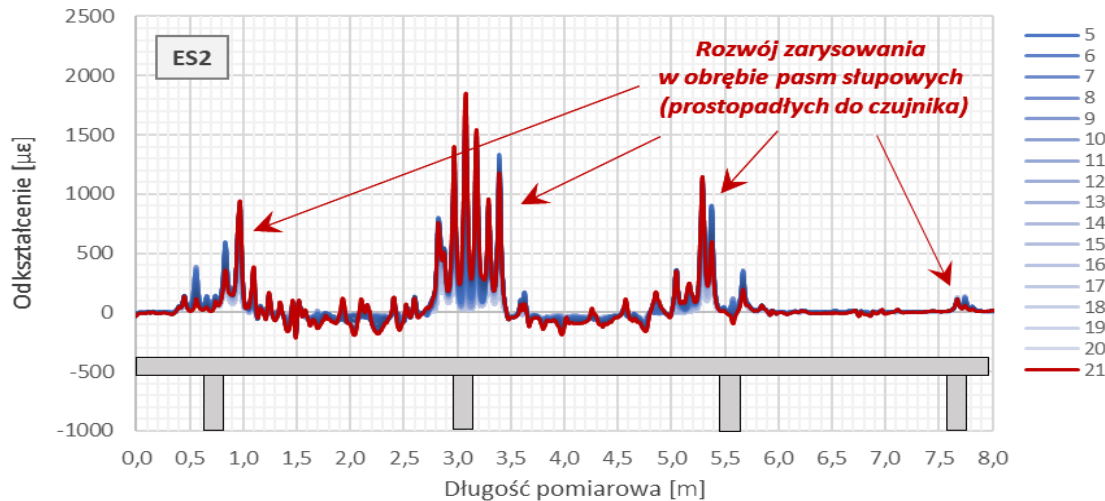


Rys. 13 Słup S2: wizualizacja przestrzenna odkształceń plastycznych w włóknie D2 w obszarze środkowej części przęsa podczas wszystkich kroków obciążenia (z wartością ekstremalną 3,6%)

WYNIKI BADAŃ – CZUJNIK ES2

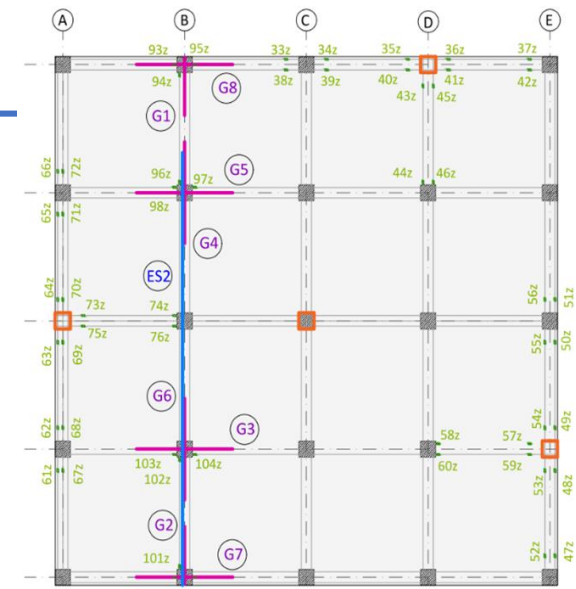
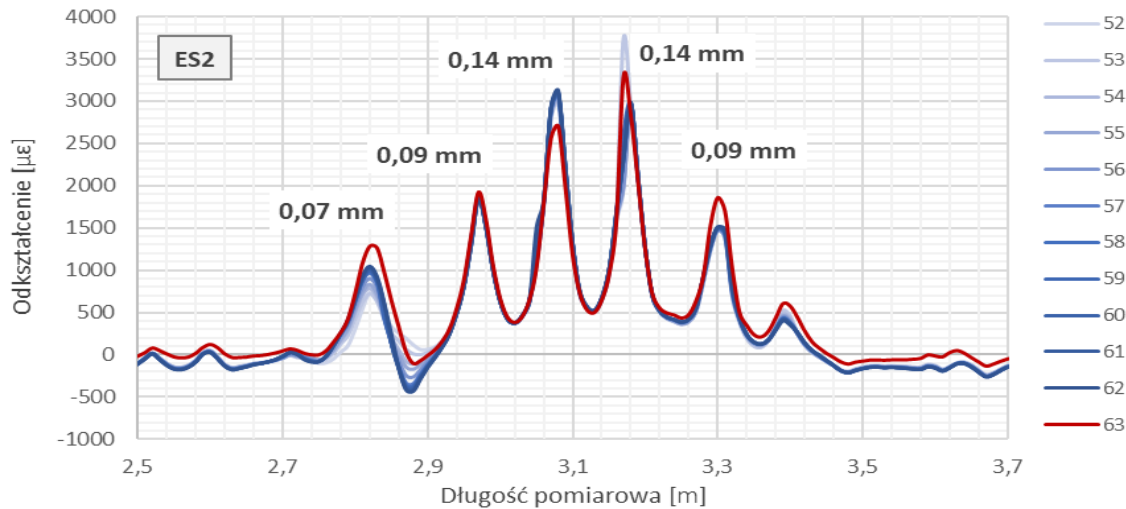


Rys. 14 Słup S3: rozkłady odkształceń zmierzone przez górny czujnik EpsilonSensor ES2 (z widocznymi pierwszymi pęknięciami)

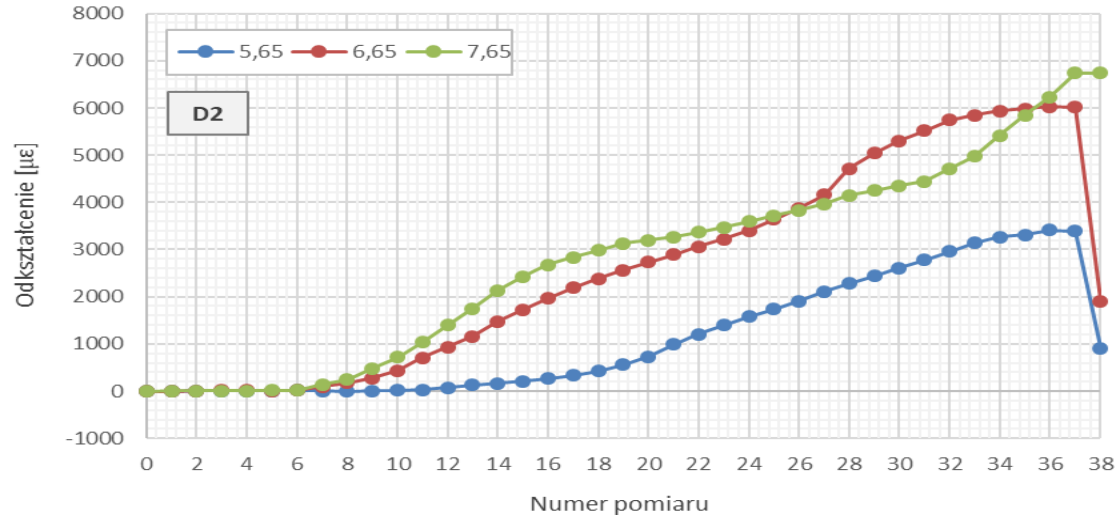


Rys. 15 Słup S3: rozkłady odkształceń zmierzone przez górny czujnik ES2 (z rozwojem pęknięć)

WYNIKI BADAŃ – CZUJNIK ES2

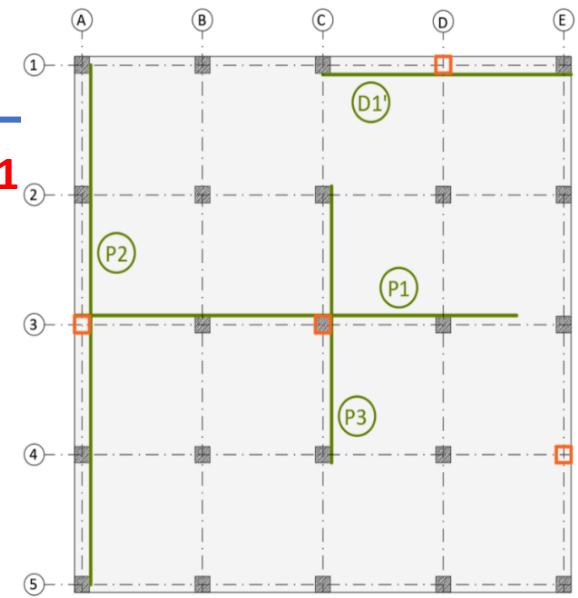
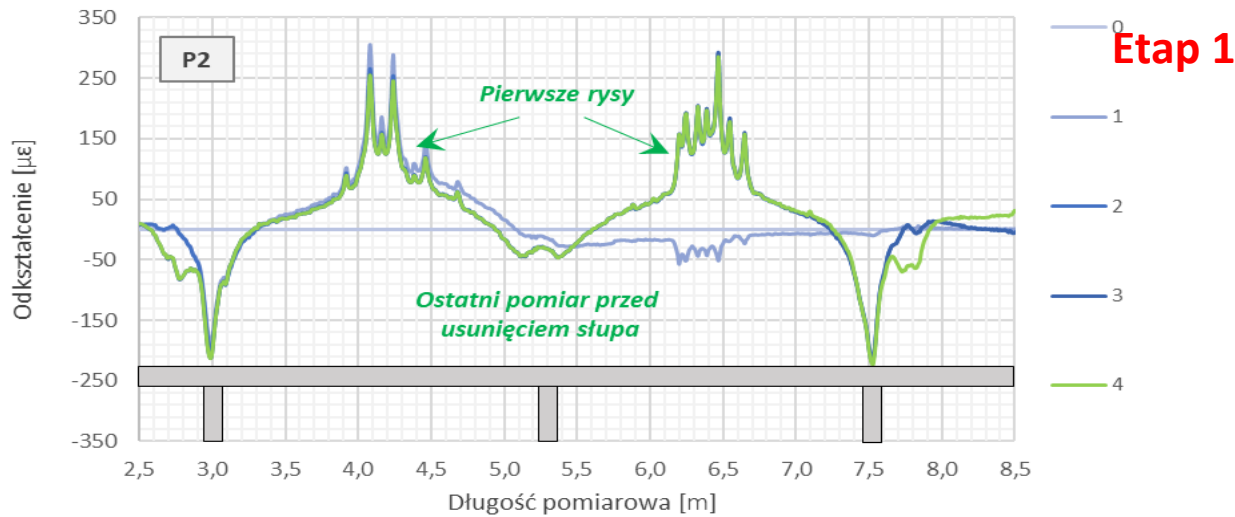


Rys. 16 Słup S3: rozkłady odkształceń mierzone przez górny czujnik EpsilonSensor ES2 na ostatnim etapie obciążenia (z obliczeniem szerokości rys)

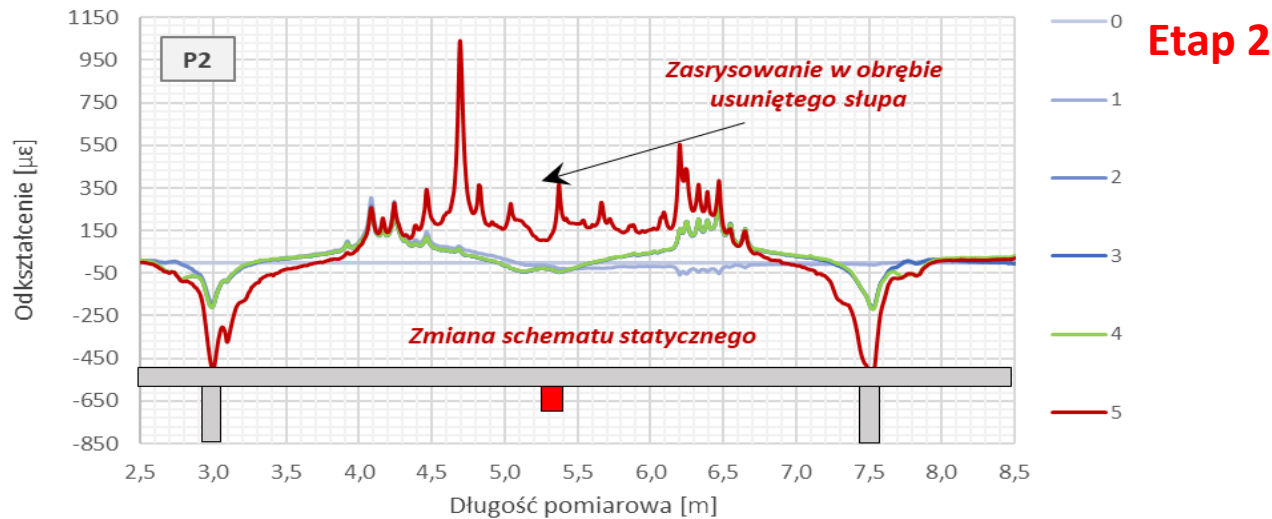


Rys. 17 Słup S3: Zmiany odkształceń w wybranych punktach na długości w czasie badania

WYNIKI BADAŃ – WŁÓKNO P2

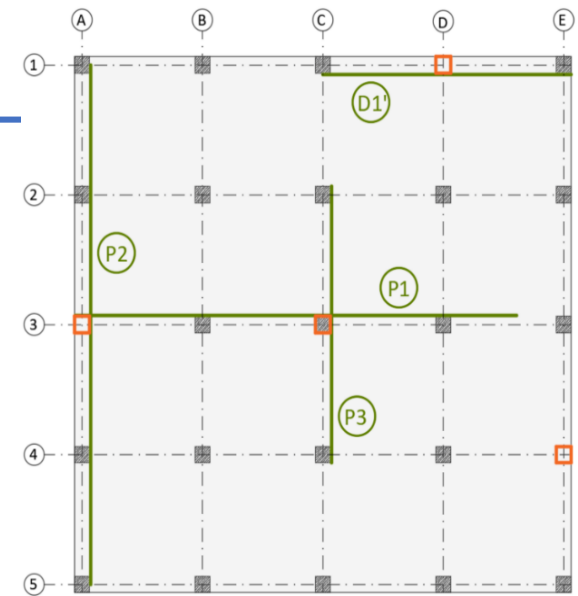
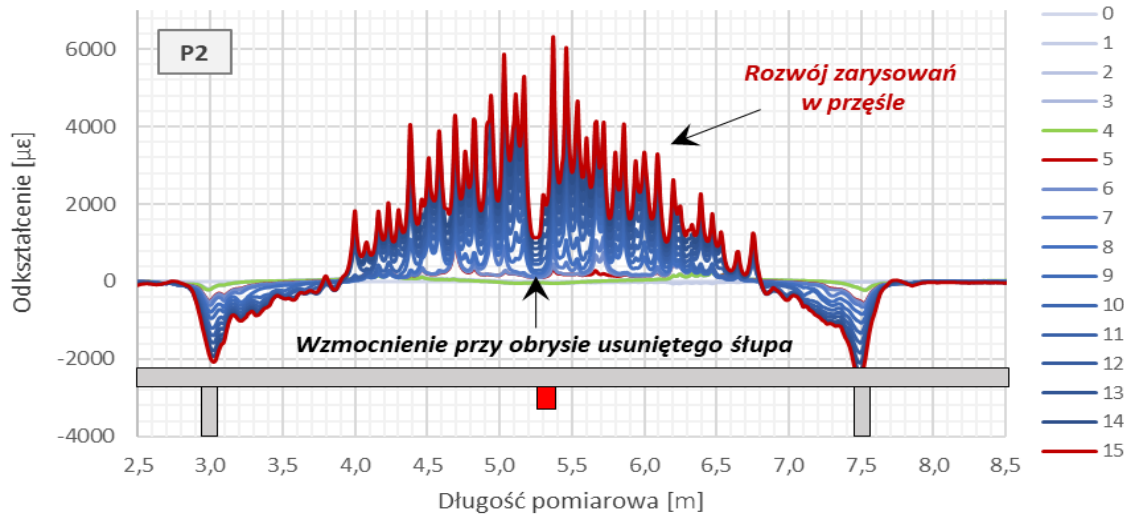


Rys. 18 Słup S3: Rozkłady odkształceń dla włókna P2 przed usunięciem słupa

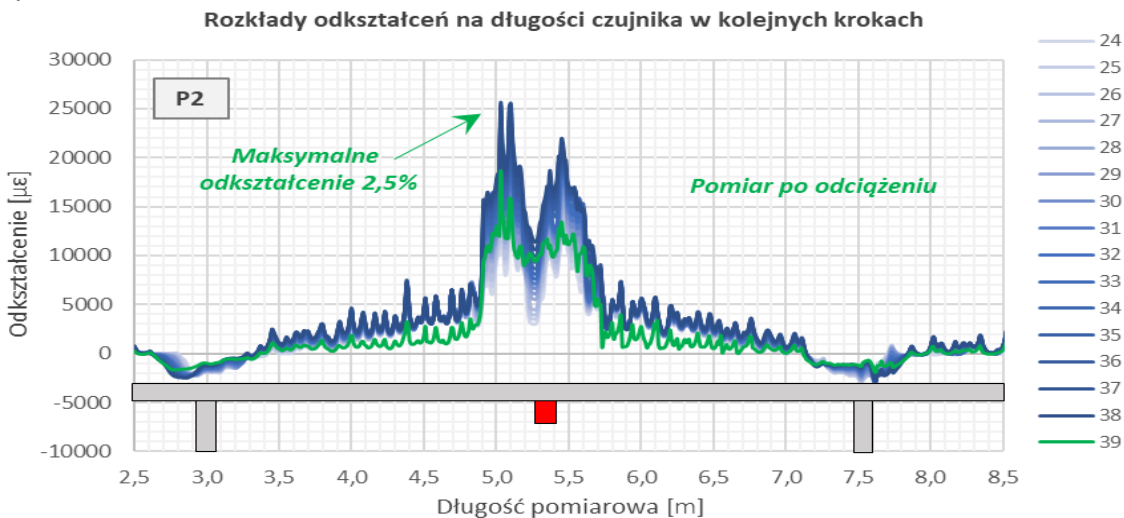


Rys. 19 Słup S3: Rozkłady odkształceń dla włókna P2 po zmianie schematu statycznego

WYNIKI BADAŃ – WŁÓKNO P2



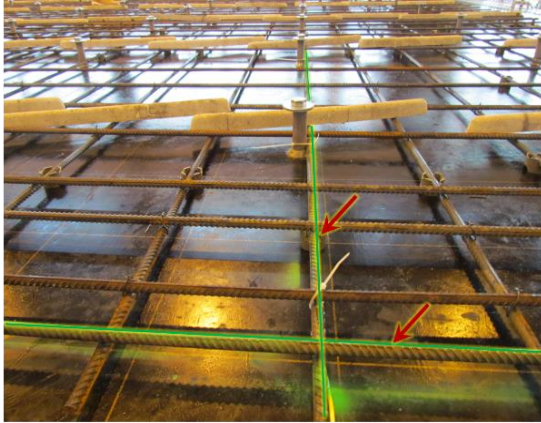
Rys. 20 Słup S3: Rozkłady odkształceń dla włókna P2 podczas zwiększania obciążenia (z widocznym rozwojem rys)



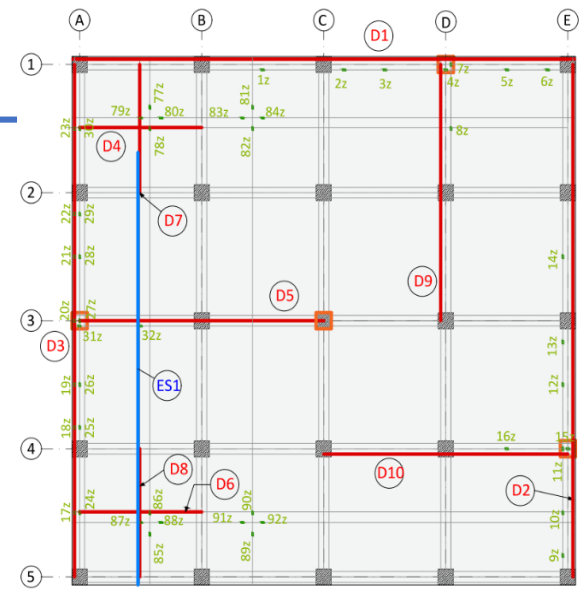
Etap 2

Rys. 21 Słup S3: Rozkłady odkształceń dla włókna P2 w ostatnim etapie obciążenia i po odciążeniu

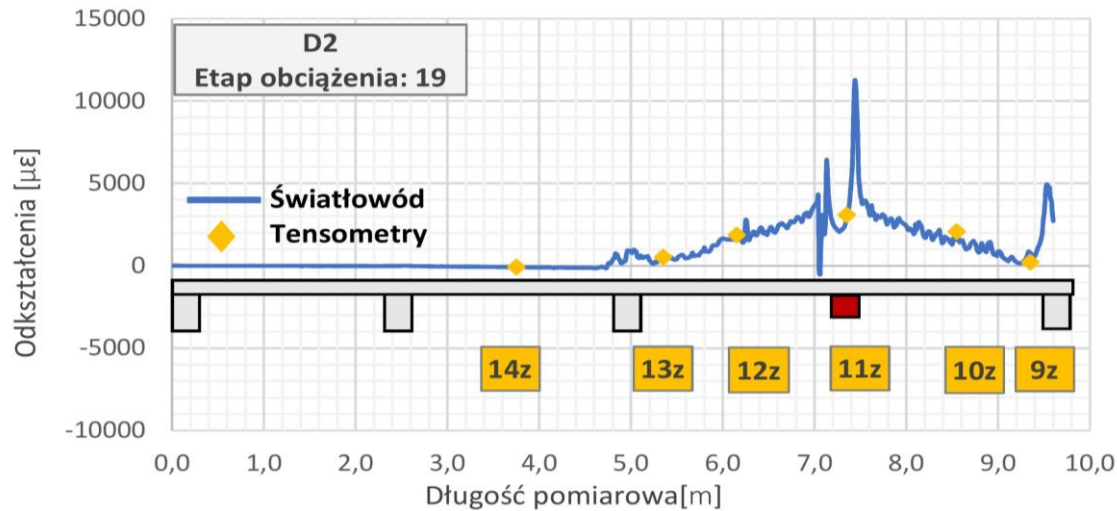
DFOS vs. TENSOMETRY



VS.

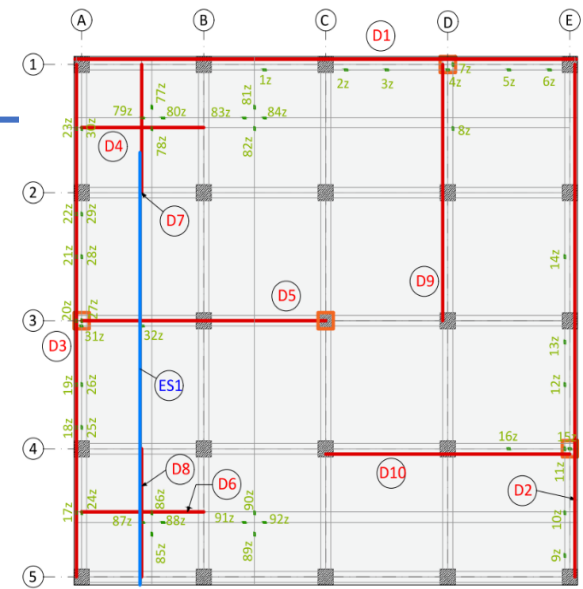
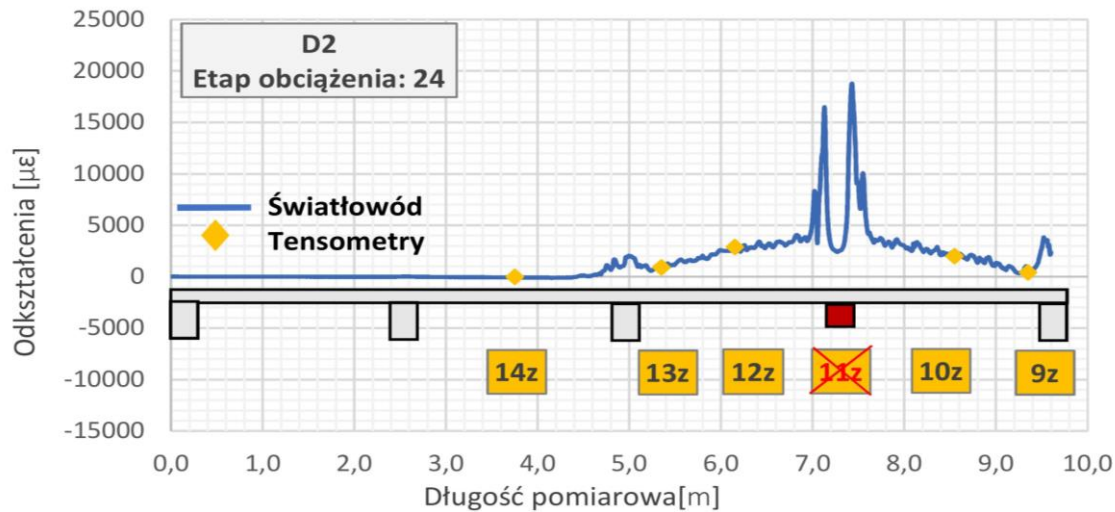


Fot. 9 Widok włókien światłowodowych i tensometrów na prętach zbrojeniowych

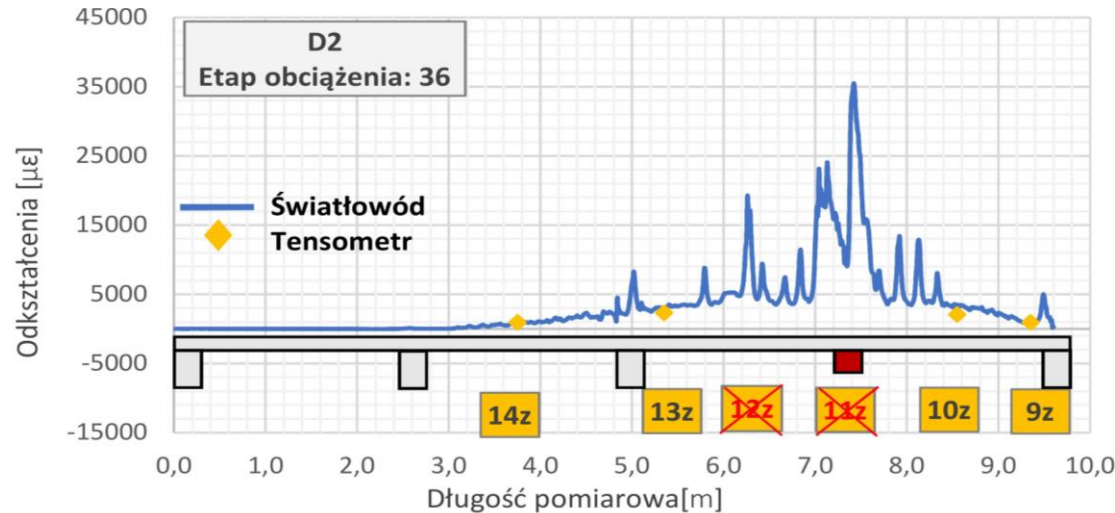


Rys. 22 Słup S2: Rozkłady odkształceń w włóknie D2 w kroku obciążenia 24 vs. tensometry

DFOS vs. TENSOMETRY



Rys. 23 Słup S2: Rozkłady odkształceń w włóknie D2 w kroku obciążenia 24 vs. tensometry

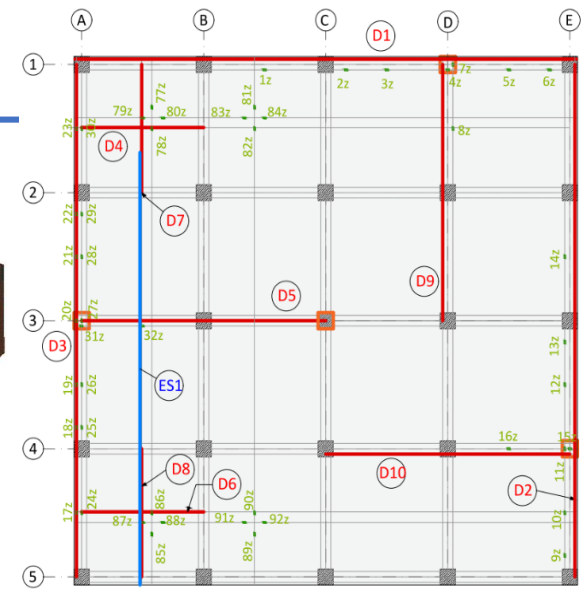
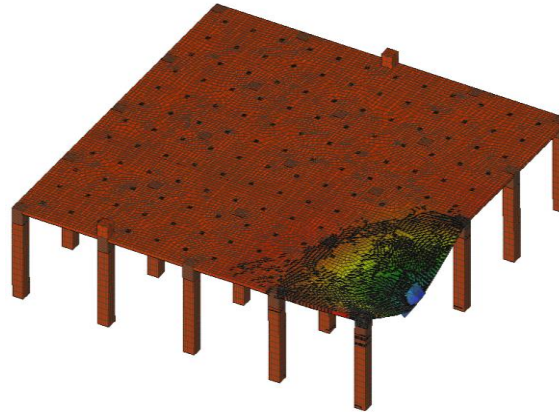


Rys. 24 Słup S2: Rozkłady odkształceń w włóknie D2 w kroku obciążenia 36 vs. tensometry

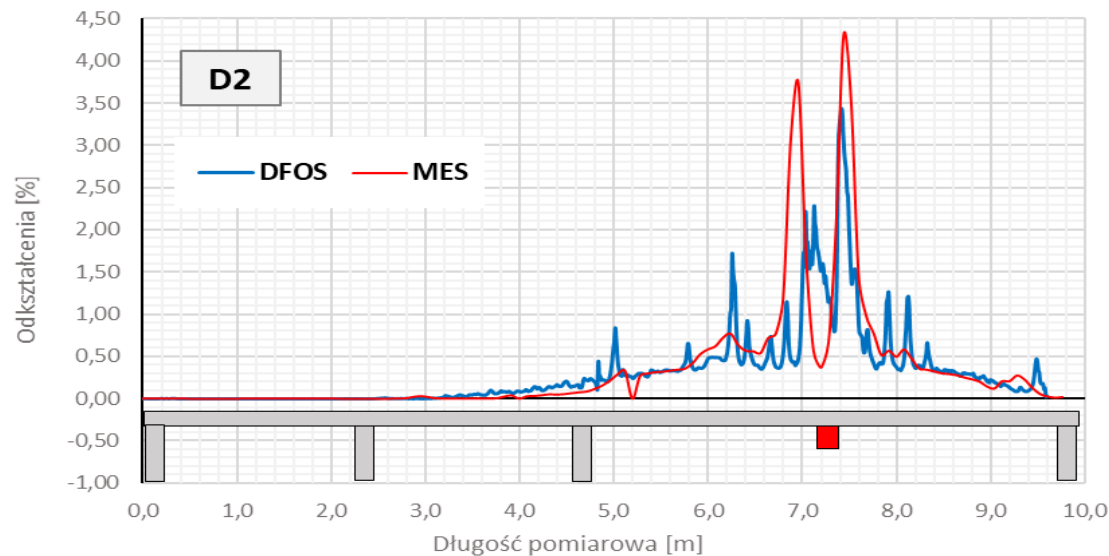
DFOS vs. MES



vs.



Fot. 10 Widok włókien światłowodowych i modelu MES płyty

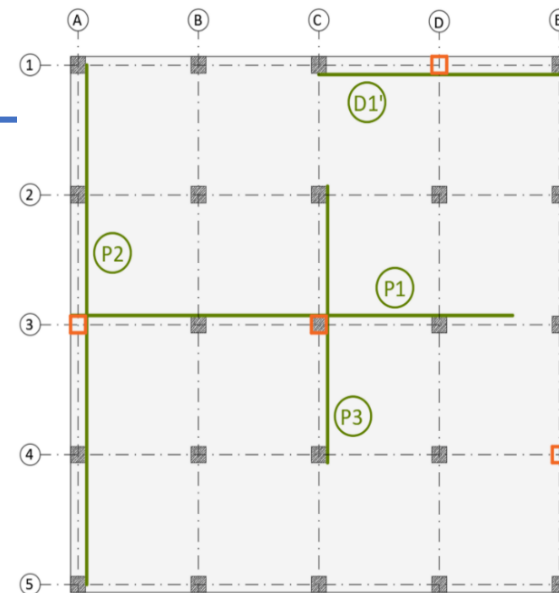
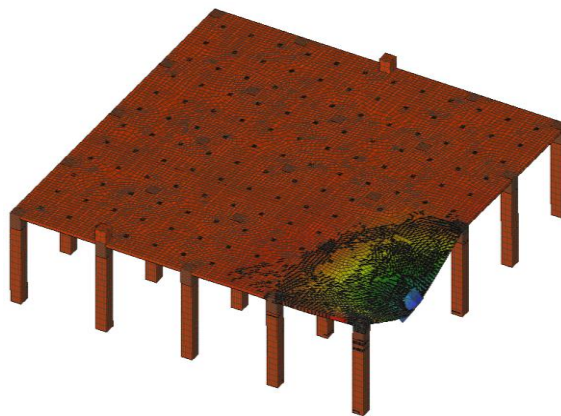


Rys. 25 Słup S2: DFOS vs. MES w ostatnim kroku obciążenia (dla maksymalnej siły)

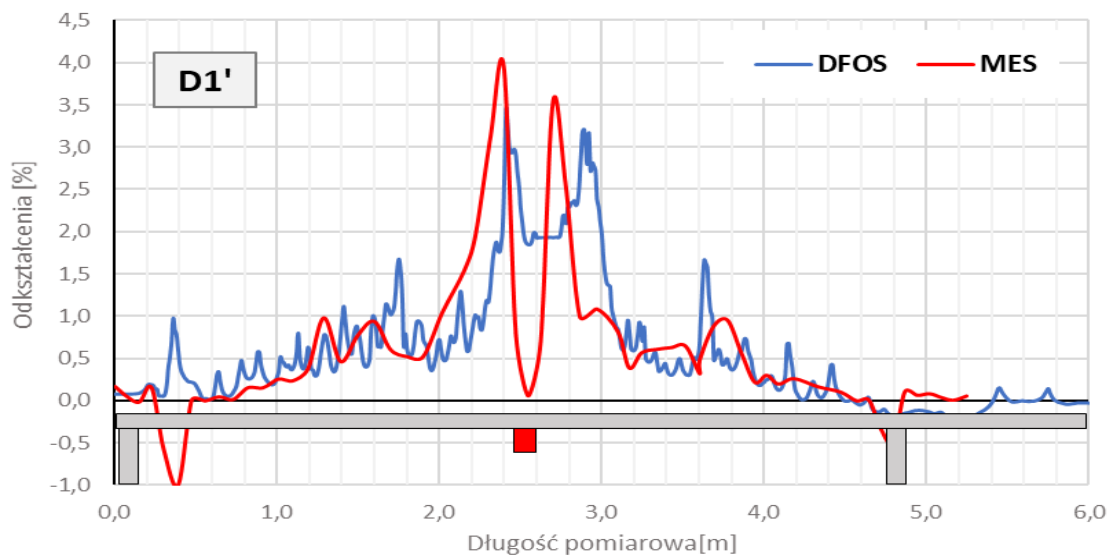
DFOS vs. MES



vs.



Fot. 11 Widok włókien światłowodowych modelu MES płyty

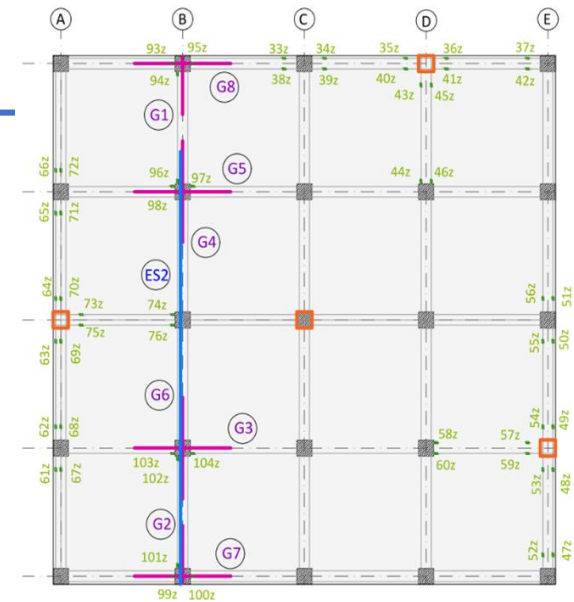


Rys. 26 Słup S1: DFOS vs. MES w ostatnim kroku obciążenia (dla maksymalnej siły)

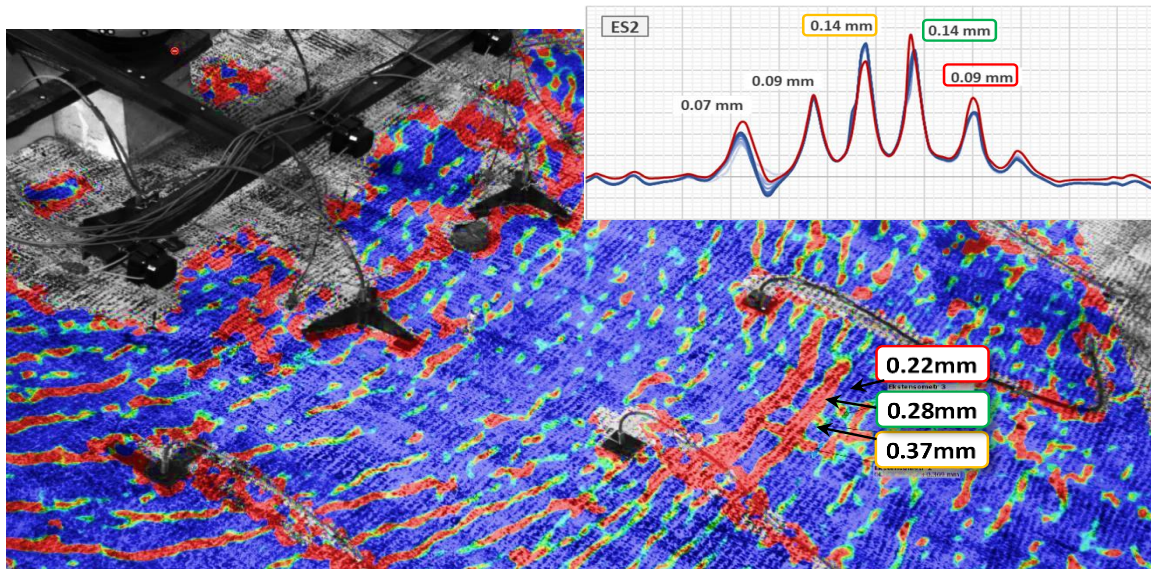
DFOS vs. ARAMIS



vs.



Fot. 12 Widok stanowiska do pomiaru DFOS i kamer systemu Aramis



Rys. 26 Słup S3: DFOS ES2 vs. ARAMIS w ostatnim kroku obciążenia (dla maksymalnej siły) - zarysowanie

LITERATURA

1. Buda-Ożóg L., Zięba J., Sieńkowska K., Nykiel D.; **Distributed fibre optic sensing: Reinforcement yielding strains and crack detection in concrete slab during column failure simulation**, Measurement 195 (2022) 111192, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111192>;
2. Howiacki T., **Analysis of cracks in concrete structures with the use of distributed optical fibre measurements**, PhD dissertation, Technical Sciences, Civil Engineering Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology, 2022;
3. Nawrot U. A Novel: **High-Accuracy Strain Measurement System for Robust Vibration-Based Damage Identification**. Vrije Universiteit Brussel, Faculty of Engineering Sciences, Department of Applied Physics and Photonics, June 2019.
4. Li W., Bao X. **High spatial resolution distributed fiber optic technique for strain and temperature measurements in concrete structures**. International Workshop on Smart Materials & Structures, SHM and NDT for the Energy Industry. Calgary, Alberta, Canada, October 7-10, 2013
5. Tang Y., Wang Z., Song M. **Self-sensing and strengthening effects of reinforced concrete structures with near-surfaced mounted smart basalt fibre-reinforced polymer bars**. Advances in Mechanical Engineering, Vol. 8(1), 2016, 1-19.

SPRZĘT DOSTĘPNY NA WBIŚiA

LUNA OBR (Optical Backscatter Reflectometer)

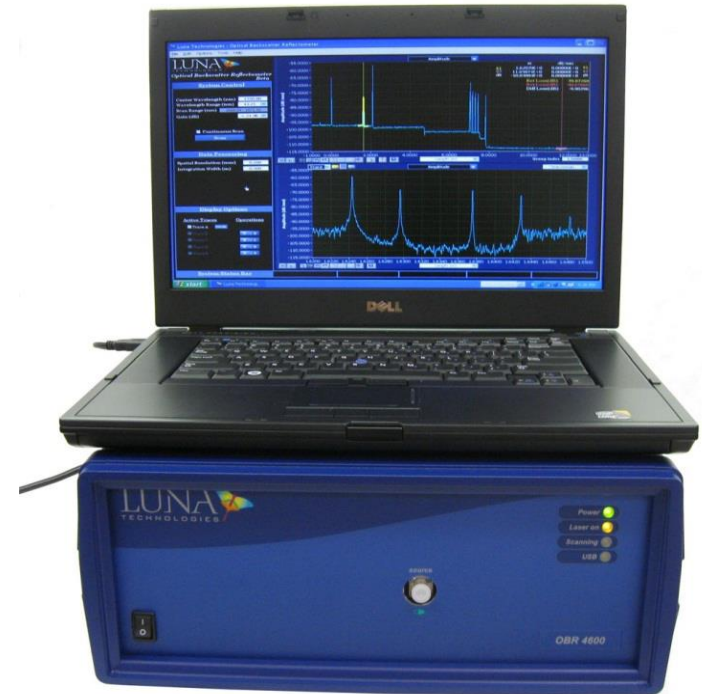
- Do pomiarów statycznych.
- Pomiar do 30 m z rozdzielczością próbkowania 10 μm .
- Pomiar do 70 m z rozdzielczością próbkowania 20 μm .

LUNA ODiSI (Optical Distributed Sensor Interrogators)

- Do pomiarów dynamicznych.
- Długość pomiarowa do 100 m.
- Szybkość pomiaru do 250 Hz

Spawarka do światłowodów

Łamarka do światłowodów



ZESTAW POMIAROWY

Narzędzie pomiarowe

- Czyste włókno światłowodowe
- Kable warstwowe
- Czujniki światłowodowe

Element tracony.

Pigtail

- Specyfikacja zależna od zastosowanego narzędzia pomiarowego

Najdroższa część zestawu. Po skończonych badaniach odcina się go od narzędzia pomiarowego. Można wykorzystać go ponownie.

Klej epoksydowy dwuskładnikowy wraz z pistoletem do kleju

Akcesoria do instalacji (osłonki spawów, chusteczki bezpyłowe).