

Prof. dr hab. inż. Tomasz SIWOWSKI  
Politechnika Rzeszowska  
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury  
Katedra Dróg i Mostów  
35-959 Rzeszów, ul. Poznańska 2  
e-mail: [siwowski@prz.edu.pl](mailto:siwowski@prz.edu.pl)

Rzeszów, 15.09.2021 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej  
**mgr inż. Michała Staśkiewicza**  
pt. „Skuteczność zastosowania kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi  
do wzmacniania belkowych konstrukcji z betonu sprężonego”

### 1. Przedmiot i podstawa formalna recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. „**Skuteczność zastosowania kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi do wzmacniania belkowych konstrukcji z betonu sprężonego**”, przygotowana przez mgr inż. Michała Staśkiewicza na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Renaty Kotyni.

Recenzję wykonałam na podstawie następujących dokumentów:

- [1] Zlecenia Pani Prodziekan ds. Rozwoju Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej prof. dr hab. inż. Renaty Kotyni z dnia 07.07.2021 r.
- [2] Umowy o dzieło nr D/15/2021/W6 z dnia 16.07.2021 r. zawartej pomiędzy recenzentem a Politechniką Łódzką.
- [3] Rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Staśkiewicza pt. „*Skuteczność zastosowania kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi do wzmacniania belkowych konstrukcji z betonu sprężonego*”, Politechnika Łódzka, Łódź, 2021 r.
- [4] Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1669).
- [5] Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595, z późniejszymi zmianami).
- [6] Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. 2018 r. poz. 1818).
- [7] Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2018 r. poz. 261).

Zgodnie z treścią ustaw [4] i [5] celem niniejszej recenzji jest ocena spełnienia przez rozprawę doktorską warunków określonych w art.13 ust.1 ustawy [5], a w szczególności:

- a) czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego;
- b) czy rozprawa wykazała ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie „*inżynieria lądowa i transport*” wg [6];
- c) czy rozprawa wykazała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

Zgodnie z rozporządzeniem [7] niniejsza recenzja zawiera szczegółowo uzasadnioną ocenę spełniania przez rozprawę doktorską ww. warunków.

## 2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Staśkiewicza jest ocena skuteczności zastosowania kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi (CFRP - ang. *carbon fibre reinforced polymer*) do wzmacniania belkowych konstrukcji z betonu sprężonego. Zasadnicza rozprawa (tom I) liczy łącznie 344 strony, podzielone na 9 rozdziałów, zestawienie piśmiennictwa, spis ważniejszych symboli oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Tekst rozprawy zawiera 301 rysunków, 53 tabele, a spis cytowanego piśmiennictwa obejmuje 231 pozycji. Wśród cytowanych publikacji jest tylko 1 praca, której współautorem jest Doktorant. Rozprawa obejmuje także oddzielny zbiór załączników (tom II), który obejmuje łącznie 194 strony, co daje objętość całej rozprawy w liczbie 495 stron (!!!).

Zasadniczą rozprawę (tom I) można podzielić na 3 główne części: przeglądową, doświadczalną oraz analityczną. Pierwsza z nich (rozdziały 1 i 2) zawiera obszerny opis stanu wiedzy w zakresie wzmacniania elementów betonowych materiałami kompozytowymi oraz badań doświadczalnych nad tym zagadnieniem. Druga część rozprawy (rozdziały 3, 4, 5, 6 i 8) zawiera opis, wyniki, analizy i wnioski z badań doświadczalnych, przeprowadzonych w laboratorium oraz *in-situ*, tj. na istniejącym obiekcie mostowym. Trzecia część pracy (rozdział 7) zawiera różnego rodzaju analizy nośności dźwigara sprężonego na zginanie i ścinanie, wraz z porównaniem z wartościami wyznaczonymi doświadczalnie. Całość rozprawy jest zakończona krótkim podsumowaniem, wnioskami końcowymi i propozycją kierunków dalszych badań (rozdział 9). Tom II rozprawy zawiera następujące załączniki: bazę wyników badań doświadczalnych (Z1), rysunki archiwalne mostu (Z2), rysunki dźwigarów badanych w laboratorium (Z3), wyniki badań materiałowych (Z4), wyniki badań przyczepności (Z5), wyniki badań dźwigarów w laboratorium (Z6) oraz różnego typu obliczenia i analizy (Z7).

## 3. Ogólna ocena merytoryczna rozprawy

### 3.1. Zasadność podjęcia tematu

Trzy ostatnie dekady przyniosły burzliwy rozwój wielu gałęzi przemysłu, w których wykorzystując inżynierię materiałową, stworzono nowe materiały o pożądanych przez konstruktorów cechach. Wśród tych materiałów najbardziej przydatne w budownictwie okazały się polimery zbrojone włóknami szklanymi oraz węglowymi. Doskonałe własności wytrzymałościowe, praktycznie "nieskończona" trwałość oraz łatwość w użyciu czynią je idealnym materiałem do zastosowań w konstrukcjach budowlanych. Najwcześniej, w początkach lat 90-tych ubiegłego wieku, do powszechnego użytku w budownictwie weszły taśmy i maty kompozytowe CFRP do wzmacniania konstrukcji budowlanych. Jednakże wyniki badań naukowych wykazały, że efektywność wzmocnienia za pomocą taśm i mat kompozytowych jest ograniczona z powodu przedwczesnego odspajania materiału od podłoża, bez pełnego wykorzystania wytrzymałości kompozytu (jedynie 30-35%). Jednocześnie wykazano, że efektywność wzmocnienia może zostać znacznie zwiększona przez wstępne naprężenie taśm przed ich przyklejeniem do podłoża i zakotwienie taśm w tym stanie w konstrukcji. Oprócz niewątpliwych zalet takiej technologii wzmacniania, istnieje także kilka ograniczeń związanych ze stosowaniem naprężonych taśm do wzmacniania konstrukcji betonowych. Gdy siła naciągająca jest zbyt duża, następuje zniszczenie wzmocnienia przez odspojenie końców taśmy od powierzchni betonu i/lub przez delaminację.

W ciągu ostatnich 15 lat powstało na świecie kilkanaście różnych systemów czynnego wzmocnienia konstrukcji za pomocą naprzężonych taśm CFRP. Systemy różnią się sposobem naprężania taśmy oraz przekazywania siły naciągającej taśmę na konstrukcję. Aby zapobiec odspojeniu i/lub delaminacji taśm stosuje się specjalne zakotwienia mechaniczne na ich końcach. Stalowe bloki kotwiące muszą zapewniać skuteczną stabilizację naprężonej i przyklejonej taśmy (bez strat siły naprężającej) oraz jej zakotwienie bez zniszczenia włókien kompozytu przez nadmierny docisk. Dużą wadą tych systemów kotwiących jest wrażliwość na korozję stalowych elementów zakotwień, dlatego wykonywane są próby ich eliminacji z systemów wzmocniających. Pierwszym na świecie systemem bezkotwowym był system opracowany przez Laboratorium EMPA w Zurychu (2003). Polegał on na stopniowym (gradientowym) zmniejszaniu siły naciągu taśmy na jej długości, dzięki czemu naprężenia styczne na styku taśmy i podłoża stopniowo maleją aż do zera na końcach taśmy. Taki system eliminuje niebezpieczeństwo odspojenia taśmy, a tym samym nie wymaga stosowania kotew. W celu przyspieszenia wiązania kleju, nagrzewa się odcinek taśmy za pomocą przestawnego urządzenia grzewczego, co pozwala skrócić czas wiązania kleju z 3 dni do ok. 2 godzin.

Przedmiotem rozprawy jest pionierskie zastosowanie innowacyjnej metody gradientowej z wykorzystaniem zmodyfikowanego systemu EMPA do wzmocnienia betonowych konstrukcji sprężonych. W pracach badawczych, zrealizowanych w ramach Polsko - Szwajcarskiego Projektu Badawczego TULCOEMPA, system ten użyto po raz pierwszy w laboratorium do wzmocnienia dźwigarów kablobetonowych, a następnie do pionierskiego wzmocnienia istniejącego mostu za pomocą metody gradientowej (pierwsza światowa realizacja). **Na tym tle zasadność podjęcia tematu w ramach rozprawy doktorskiej wydaje się bezdyskusyjna.** Doktorant był czynnym uczestnikiem tych prac badawczych, a w ramach rozprawy opisał przeprowadzone badania, wykonał szereg analiz obliczeniowych i ocenił efektywność zastosowania systemu do wzmocnienia konstrukcji belkowych z betonu sprężonego, wykazując skuteczność jego zastosowania.

### 3.2. Cele, teza i zakres rozprawy

Doktorant wyznaczył sobie jeden nadrzędny cel rozprawy, którym było „*wykonanie pionierskiej aplikacji wzmocnienia konstrukcji mostu przy użyciu naprzężonych kompozytów CFRP z zastosowaniem innowacyjnej metody wzmocnienia, tzw. metody gradientowej na konstrukcji mostu będącego w czynnej eksploatacji*”. Cel ten Doktorant zamierzał osiągnąć poprzez realizację celów „drugorzędnych”, które *de facto* pokrywały się z realizacją prac badawczych, przedstawionych w trzech głównych częściach rozprawy: przeglądowej, doświadczalnej oraz analitycznej.

Tak postawione cele rozprawy są **istotne i ważne** z punktu widzenia wdrożenia do polskiego budownictwa nowej, innowacyjnej i efektywnej technologii wzmocnienia konstrukcji belkowych z betonu sprężonego, a w szczególności jej upowszechnienia przez wykazanie jej efektywności oraz przez opracowanie / weryfikację adekwatnych metod projektowania wzmocnienia. W wyniku przeprowadzonych prac przeglądowych, doświadczalnych oraz analitycznych Doktorant uzyskał efekty, pozwalające na realizację wszystkich celów rozprawy. Zarówno cel nadrzędny, jak również cele „drugorzędne” **zostały w rozprawie zrealizowane**, a stopień ich realizacji można uznać za **wysoce satysfakcjonujący**.

Doktorant sformułował zasadniczą tezę rozprawy, która jest bezpośrednim odniesieniem do jej celu nadrzędnego. Teza brzmi: „***Wzmocnienie konstrukcji sprężonych przy użyciu***

*naprężonych kompozytów CFRP aplikowanych innowacyjną, bezkrotkową metodą gradientową jest możliwe oraz efektywne w zastosowaniu do istniejących obiektów mostowych*". Teza ta (moim zdaniem niepotrzebnie) została podzielona na trzy „komponenty”, odniesione do doświadczalnej efektywności wzmocnienia (teza I), normowych zaleceń projektowych (teza II) oraz możliwości wykonania praktycznej aplikacji na istniejącej konstrukcji mostowej (teza III). Tezy I i III są powtórzeniem tezy zasadniczej, a teza II odnosi się bezpośrednio do tezy III.

Biorąc pod uwagę pionierski charakter wdrożenia nowego systemu, sformułowania zawarte w treści tezy zasadniczej nie były wcale oczywiste: Doktorant jako pierwszy badał doświadczalnie efektywność zastosowania zmodyfikowanego systemu EMPA, a pionierska, praktyczna aplikacja metody na istniejącym obiekcie mostowym była obarczona wieloma niepewnościami. Pomimo tych niepewności teza zasadnicza rozprawy, a tym samym tezy I i III, **zostały udowodnione w sposób pełny i bezdyskusyjny**. Doktorant wykazał doświadczalnie efektywność wzmocnienia dźwigara sprężonego metodą gradientową, zarówno w sposób ilościowy (w %) jak i jakościowy (przez opis stanów granicznych). Jednocześnie, biorąc udział i szczegółowo opisując pionierską aplikację wzmocnienia na istniejącym obiekcie mostowym Doktorant wykazał, że wzmocnienie mostu metodą gradientową jest technicznie możliwe i wykonalne. W szczegółowym opisie technologii wzmocnienia Doktorant wykazał także, że musi być ono indywidualnie dostosowane do geometrii i stanu technicznego wzmocnianego obiektu. Prawdziwa okazała się także teza II: badania doświadczalne **potwierdziły zachowawczy charakter obliczeń normowych**, zarówno w przypadku nośności na zginanie jak i na ścinanie, chociaż Doktorant nie sprecyzował dokładnie o jakie zalecenia normowe chodzi (PN czy EN, dźwigar wzmocniony czy niewzmocniony).

Dla realizacji celów i udowodnienia tez rozprawy Doktorant wykonał odpowiedni zakres prac naukowych. Po przedstawieniu przeglądu *state-of-the-art* w zakresie technologii wzmocniania kompozytami CFRP, ich zastosowań oraz badań doświadczalnych (rozdziały 1 i 2), Doktorant opisał realizację programu badawczego w laboratorium EMPA w Szwajcarii oraz przeanalizował wyniki tych badań (rozdziały 3, 4, 5 i 6). Kolejno Doktorant wykonał analizy normowe i numeryczne nośności dźwigarów sprężonych na zginanie i ścinanie i porównał ich wyniki z wynikami własnych doświadczeń (rozdział 7). Rozdział 8 rozprawy zawiera opis projektu i realizacji wzmocnienia istniejącego mostu drogowego metodą gradientową oraz wyniki badań mostu pod próbnym obciążeniem. Ostatni rozdział rozprawy zawiera jej podsumowanie, wnioski końcowe i kierunki dalszych badań. Zrealizowany **zakres rozprawy jest zasadniczo właściwy, spójny i adekwatny** do realizacji celów i udowodnienia tez rozprawy.

Omawiając zakres rozprawy chciałbym zwrócić uwagę na **niespotykaną jej obszerność** (rozprawa wraz z załącznikami zawiera blisko 500 stron). Wprawdzie nie ma w tym względzie formalnych ograniczeń, a autor rozprawy (Doktorant) ma prawo zaprezentować „ogólną wiedzę teoretyczną” w sposób praktycznie dowolny, to jednak chciałbym zauważyć, że wiele aspektów podjętych w rozprawie mogłoby bez szkody dla jej wartości merytorycznej **zostać pominięta**. Do tych części rozprawy zaliczam:

- przegląd badań (p.2.1) i analizę efektów wzmocnienia (p.2.4.2) elementów żelbetowych; rozprawa dotyczy dźwigarów sprężonych;
- opis badania przyczepnościowych (p.5.2); rozdział nadający się na osobną pracę naukową, który mógł być zastąpiony w rozprawie krótką informacją o przyjętym sposobie reprofiliacji oraz wyborze kleju, z krótkim uzasadnieniem;
- obliczenia strat siły sprężającej (p.7.1); niewykorzystane i niekonieczne w zasadniczej treści rozprawy;

- analizy nośności wykonane wg wycofanej polskiej normy PN-91/S-10042 (p.7.2.1, 7.5.1, 8.2.1, 8.2.3); zdecydowanie nadliczbowe i bez wartości praktycznej, w szczególności w porównaniu z analizami wg PN-EN 1992-1-1(Eurokodu) oraz MES;
- próbne obciążenie mostu przed wzmocnieniem (p.8.4.2); nieznaną cel badania, wyniki badań niewykorzystane, badanie niepotrzebne do realizacji celów i udowodnienia tezy rozprawy;
- załączniki Z1 (skrótowa baza danych jest przedstawiona w rozdziale 2) oraz Z7 (obliczenia wystarczająco przedstawione w rozdziale 7).

Rozprawa doktorska powinna mieć zazwyczaj charakter szczegółowej analizy wybranego problemu, a nie syntezy wiedzy w danym obszarze (taką rolę ma monografia habilitacyjna). W tym aspekcie trzeba zwrócić także uwagę na pewną rozbieżność pomiędzy celami i tezami rozprawy, a jej tytułem i zakresem. Cele i tezy dotyczą metody gradientowej wzmocnienia na zginanie, natomiast tytuł i zakres jest szerszy; pierwszy dotyczy ogólnie wzmocnienia kompozytami CFRP bez ograniczeń, drugi oprócz nośności na zginanie obejmuje także nośność na ścinanie.

### 3.3. Przegląd stanu wiedzy i piśmiennictwo

Przegląd stanu wiedzy zawarty w rozdziałach 1 i 2, zawiera szeroki przegląd informacji niezbędnych do właściwego przygotowania własnych prac badawczych, w tym m.in. podstawy teoretyczne projektowania wzmocnienia, opis innych systemów wzmocnienia, przegląd badań doświadczalnych oraz wybranych aplikacji, wyłącznie mostowych. Jednakże pomijając zbędne moim zdaniem części przeglądu, dotyczące elementów żelbetowych, zarówno przegląd badań jak i aplikacji **zawiera zaskakująco małą liczbę przykładów**, odpowiednio 4 badania i 3 aplikacje. Ponadto w tej pierwszej grupie ostatnie z prezentowanych badań jest z roku 2013. Czy zatem nie ma innych, nowszych prac naukowych w tej dziedzinie oraz aplikacji na mostach sprężonych?

Wykorzystane przez Doktoranta piśmiennictwo zawiera łącznie 231 pozycji, z czego większość stanowią artykuły w czasopiśmie naukowych i materiałach konferencyjnych. W spisie piśmiennictwa wymieniono także 30 norm międzynarodowych oraz 10 kart technicznych systemów i produktów, wykorzystanych w badaniach. Doktorant rzetelnie zebrał wiedzę z większości zagranicznych i krajowych ośrodków badawczych, prowadzących badania naukowe w zakresie wzmocnienia konstrukcji betonowych materiałami kompozytowymi. Zdecydowana większość publikacji pochodzi z XXI w., a najnowsze mają datę z 2018 r. To **dobrze i efektywne wykorzystanie piśmiennictwa** bez wątpienia miało wpływ na wysoką wartość merytoryczną rozprawy. Może jednak dziwić brak w tym spisie publikacji własnych Doktoranta: w rozprawie zacytowano tylko jedną z nich (poz.[117]), chociaż np. w *Google Scholar* bez problemu można znaleźć ok. 10 kolejnych współautorskich publikacji Doktoranta, wszystkie w zakresie tematyki rozprawy.

### 3.4. Część doświadczalna rozprawy

Część doświadczalna to najważniejszy element rozprawy, potwierdzający empirycznie tytułową skuteczność zastosowania kompozytów CFRP do wzmocnienia belkowych konstrukcji z betonu sprężonego. Badania doświadczalne były realizowane zarówno w laboratoriach (EMPA, PŁ) jak również *in-situ*, tj. na istniejącym obiekcie mostowym. W laboratoriach pod kierunkiem i przy czynnym udziale Doktoranta zostały zrealizowane badania materiałowe, badania przyczepnościowe oraz najważniejsze – statyczne badania

wytrzymałościowe dwóch pełnowymiarowych dźwigarów sprężonych. Pierwsze z nich pozwoliły na wyznaczenie parametrów materiałowych: betonu, stali zbrojeniowej, kompozytu CFRP oraz kleju, zastosowanych następnie w obliczeniach i analizach nośności. Parametry stali sprężającej przyjęto na podstawie danych producenta, co później miało konsekwencje w weryfikacji procedur obliczeniowych. Badania przyczepnościowe pozwoliły na prawidłowy wybór zaprawy wyrównawczej oraz kleju. Natomiast badania wytrzymałościowe przeprowadzono na dwóch dźwigarach sprężonych, wykonanych w laboratorium EMPA wg projektu typowych belek prefabrykowanych WBS-18 z 1965 r. Wybór rodzaju dźwigarów był podyktowany faktem, że analogiczne dźwigary zastosowano do budowy istniejącego mostu drogowego, będącego również przedmiotem badań. Jeden z wykonanych dźwigarów wzmocniono za pomocą zmodyfikowanego systemu EMPA i była to pierwsza światowa aplikacja metody gradientowej do wzmocnienia belki mostowej.

Badania doświadczalne dźwigarów na zginanie miały charakter porównawczy i przeprowadzono je w schemacie 6-punktowego zginania do zniszczenia w celu wyznaczenia nośności granicznej. Następnie jeden z dźwigarów wykorzystano do wyznaczenia nośności granicznej na ścinanie (jednakże bez wzmocnienia), lokalizując cztery siły obciążające w pobliżu jednej z podpór. Porównanie zmierzonych przemieszczeń, odkształceń, zarysowań i postaci zniszczenia dla dźwigara niewzmocnionego i wzmocnionego pozwoliło na ilościową i jakościową ocenę efektywności wzmocnienia na zginanie taśmami CFRP przy zastosowaniu metody gradientowej. Uzyskano 12% i 21% wzmocnienie dźwigara, biorąc pod uwagę odpowiednio moment rysujący i moment niszczący dźwigar. Niestety podobnego bezpośredniego porównania nie wykonano dla nośności na ścinanie, stąd nie można było bezpośrednio wnioskować o skuteczności wzmocnienia na ścinanie za pomocą systemu oplotów z mat CFRP. Co więcej, z badań wynika, że wzmocnienie dźwigara na ścinanie nie było w ogóle potrzebne.

Druga część badań doświadczalnych miała na celu potwierdzenie skuteczności wzmocnienia istniejącego mostu drogowego, wykonanego z dźwigarów WBS-18. W zakresie przebudowy mostu było wzmocnienie istniejących dźwigarów taśmami CFRP naprężonymi metodą gradientową oraz systemem oplotów z mat CFRP. W projektowaniu realizacji tych prac wykorzystano doświadczenia uzyskane podczas badań laboratoryjnych. Doktorant szczegółowo opisał wykonanie wzmocnienia dźwigarów *in-situ*, udowadniając tym samym jedną z tez pracy o możliwości wykonania takiego wzmocnienia na obiekcie istniejącym. Wyniki badań wzmocnionego mostu pod próbnym obciążeniem potwierdziły jego odpowiednią sztywność i nośność, aczkolwiek wykazane różnice pomiędzy wartościami pomierzonymi i teoretycznymi (tabela 8.18) oraz nietypowy kształt rozkładu poprzecznego obciążenia (rys.8.54) mogą wskazywać na błędy obliczeniowe i/lub pomiarowe. Nie można jednak tego zweryfikować, gdyż Doktorant nie zamieścił w rozprawie obliczeń do programu badań mostu po wzmocnieniu.

### 3.5. Część analityczna rozprawy

Głównym celem części analitycznej rozprawy (rozdział 7) była weryfikacja kilku procedur obliczeniowych (projektowych), służących do wyznaczenia nośności na zginanie i ścinanie dźwigara sprężonego, przez porównanie z wynikami badań doświadczalnych. Weryfikacja została przeprowadzona zarówno dla dźwigara niewzmocnionego, jak również wzmocnionego i dotyczyła nośności na zginanie i ścinanie. Doktorant weryfikował w każdym przypadku (zginanie, ścinanie) cztery procedury: wg PN-91/S-10042 (wycofana polska norma), wg PN-EN 1992-1-1:2008 (aktualna norma europejska), wg własnych propozycji teoretycznych oraz

na podstawie obliczeń MES. W dwóch pierwszych (normowych) procedurach udział zbrojenia kompozytowego w nośności dźwigara wzmocnionego został uwzględniony zgodnie z zalecaniem *fib bulletin 90* dla dwóch przypadków zniszczenia wzmocnienia: odspojenie taśm i zerwanie taśm.

Pomijając zastosowanie pierwszej z nich jako niepraktycznej (patrz p.3.2 recenzji), **weryfikacja pozwoliła na wskazanie stopnia zgodności wyników każdej z trzech pozostałych procedur z wynikami badań doświadczalnych.** W przypadku zginania najlepszą zgodność osiągnięto w przypadku analizy MES oraz dokładnej analizy teoretycznej stanu odkształceń przekroju, natomiast stosunkowo dużą rozbieżność wykazano dla procedury wg Eurokodu 2 (ok. 15% dla dźwigara wzmocnionego). W przypadku nośności na ścinanie również najlepsze wyniki dała MES oraz analiza wg modelu A. Mari, a porównanie wyników badań z Eurokodem 2 wykazało duże zaniżenie nośności na ścinanie w procedurze normowej. Jako główny powód dużych różnic w przypadku Eurokodu 2 Doktorant podał zbyt niską charakterystyczną granicę plastyczności stali sprężającej o wartości 1440 MPa, przyjętą zgodnie z kartą techniczną producenta i Eurokodem 2. Dlatego w pozostałych analizach (teoretycznych, MES) Doktorant przyjął tę wartość na poziomie 1730 MPa, nie wyjaśniając jednak dlaczego.

### 3.6. Projekt wzmocnienia mostu (p.8.2)

Osobnego komentarza wymagają przeprowadzone przez Doktoranta obliczenia do projektu wzmocnienia mostu, gdyż w oparciu o ich wyniki podjęto decyzję o sposobie i zakresie wzmocnienia (na zginanie i ścinanie) dźwigarów sprężonych WBS-18. Wydawałoby się oczywiste, że po rzetelnej weryfikacji czterech różnych procedur obliczeniowych, Doktorant wykorzysta najlepszą z nich (tj. najbardziej zgodną z wynikami badań) do projektowania wzmocnienia. Tak się jednak nie stało – projektant wykorzystał procedury normowe (polską i europejską) pomimo wykazanych przez siebie ich wad i ograniczeń. Błędne było założenie Doktoranta o obowiązkowości stosowania tych norm. Pierwsza z nich (norma polska) była już wówczas normą wycofaną, natomiast obie (polska i europejska) służą do projektowania nowych obiektów mostowych, a nie do oceny nośności i projektowania wzmocnień obiektów istniejących. Zakładając jednak, że stosowanie wycofanych norm polskich w projektowaniu przebudowy mostu narzucił jego administrator (co było do niedawna częstą praktyką), to pomimo tego **Doktorant przyjął w obliczeniach kilka nieuzasadnionych lub niewłaściwych założeń**, skutkujących nieprawidłowymi wnioskami zestawionymi w Tabeli 8.13. Te najważniejsze uwagi wskazałem w p.5.9 recenzji. Korygując te założenia, z dużym prawdopodobieństwem można wykazać, że istniejące dźwigary mostu nie wymagałyby wzmocnienia ani na zginanie ani na ścinanie.

Chciałbym jednak podkreślić, że ww. **aspekty projektowe nie wpływają w żadnym stopniu na wartość naukową rozprawy** oraz na realizację jej celów i udowodnienie postawionych tez. Projektowanie mostów wg norm nie jest pracą naukową, a Doktorant (nie będący absolwentem specjalności mostowej) nie musiał w rozprawie wykazywać się znajomością wszystkich niuansów zawodu projektanta. Efektywność i skuteczność wzmocnienia wystarczająco została wykazana przez Doktoranta w badaniach laboratoryjnych i uzupełniających je analizach, a aplikując system na istniejącym obiekcie Doktorant potwierdził praktyczną wykonalność innowacyjnej technologii.

### 3.7. Podsumowanie i wnioski końcowe rozprawy

Podsumowanie zawiera krótkie streszczenie wykonanych prac przeglądowych, doświadczalnych i analitycznych. Doktorant uwypuklił w nim opracowaną i sprawdzoną praktycznie technologię wzmocnienia, co umożliwi efektywne upowszechnienie metody gradientowej. We wnioskach odniósł się do tytułowej skuteczności wzmocnienia dźwigarów sprężonych metodą gradientową, oceniając ją jako bardzo wysoką. W kolejnych wnioskach podkreślił nieadekwatność procedur projektowania wzmocnień wg obu polskich norm (PN i PN-EN), wskazując jednocześnie metodę A. Mari jako wartą wykorzystania w tym celu. We wnioskach zabrakło moim zdaniem oceny zastosowania MES do projektowania wzmocnień oraz wniosków z badań mostu po wzmocnieniu.

Wskazane przez Doktoranta kierunki dalszych badań koncentrują się na trzech dość szczegółowych aspektach związanych z aplikacją metody gradientowej (temperatura, przygotowanie podłoża) oraz analizą obliczeniową wzmocnienia kompozytowego na ścinanie. Nie jestem przekonany, że są to najważniejsze problemy do rozwiązania w celu upowszechnienia obu metod wmacniania, będących przedmiotem pracy. Wg mnie kluczowym zagadnieniem jest dostępność technologii w Polsce (produkcja urządzeń, doświadczenie firm) oraz analiza ekonomiczna (także w cyklu życia – LCCA), porównująca koszty stosowania metody gradientowej z kosztami stosowania innych dostępnych na polskim rynku technologii wmacniania konstrukcji betonowych materiałami kompozytowymi.

## **4. Oryginalne osiągnięcia Doktoranta**

### 4.1. Najważniejsze uzyskane wyniki

Do najważniejszych wyników uzyskanych przez Doktoranta w efekcie realizacji rozprawy doktorskiej zaliczam:

- a) ilościową i jakościową ocenę efektywności wmacniania dźwigarów sprężonych za pomocą innowacyjnej i nowatorskiej metody gradientowej;
- b) ocenę zachowania się dźwigarów sprężonych (deformacja, zarysowanie, wyteżenie, postać zniszczenia) wzmocnionych metodą gradientową w pełnym zakresie obciążenia statycznego;
- c) opracowanie i sprawdzenie nowej technologii wmacniania (metody gradientowej) w warunkach laboratoryjnych;
- d) pionierskie zastosowanie (wdrozenie) nowej technologii wmacniania (metody gradientowej) w warunkach rzeczywistych na istniejącym obiekcie mostowym;
- e) weryfikację normowych, teoretycznych i numerycznych procedur do oceny nośności na zginanie i ścinanie dźwigarów sprężonych wzmocnionych kompozytami CFRP.

### 4.2. Oryginalne osiągnięcia naukowe

Niewątpliwie najbardziej oryginalnym elementem rozprawy jest jej główny przedmiot, czyli innowacyjna i nowatorska gradientowa metoda wmacniania na zginanie konstrukcji betonowych. Wprawdzie Doktorant nie jest twórcą metody, lecz pionierskie badania naukowe prowadzone pod jego kierunkiem pozwoliły na sprawdzenie możliwości wdrożenia tej technologii, najpierw w laboratorium, a następnie na istniejącym obiekcie mostowym oraz na ilościową i jakościową ocenę efektywności nowej technologii. Pozytywne rezultaty obu tych działań pozwalają na upowszechnienie metody.



Cechy oryginalności posiadają niektóre zaproponowane przez Doktoranta procedury obliczeniowe, zweryfikowane na podstawie wyników badań doświadczalnych. W szczególności dużą oryginalnością charakteryzuje się analiza numeryczna, pozwalająca na symulację zachowania się betonowych dźwigarów sprężonych, wzmocnionych kompozytami CFRP. Model ten, walidowany w oparciu o wyniki badań doświadczalnych, pozwala na projektowanie wzmocnień dźwigarów sprężonych w różnych układach konstrukcyjnych i obciążeniowych. Niewątpliwie jego dalsze wykorzystanie może przyczynić się do upowszechnienia stosowania tej technologii wzmocnienia.

Negatywną ocenę możliwości stosowania konwencjonalnych norm projektowych (PN, PN-EN, *fib*) do projektowania wzmocnień dźwigarów sprężonych zarówno na zginanie jak również na ścinanie można również traktować jako oryginalny wkład Doktoranta do stanu wiedzy projektowej w tym zakresie. Jest to tym bardziej istotne, że normy są pierwszym i oczywistym wyborem przy projektowaniu wzmocnień budowlanych. Upowszechnienie wiedzy uzyskanej przez Doktoranta z badań i analiz własnych może zapobiec wielu błędnym i/lub nieefektywnym projektom i wdrożeniom technologii wzmocnienia kompozytami CFRP.

Poszukując bardziej skutecznych procedur analitycznych niż normowe, Doktorant zaproponował dwie analizy teoretyczne (zginanie, ścinanie), oparte na pracach innych naukowców, które po zweryfikowaniu na podstawie wyników badań doświadczalnych okazały się bardzo dokładnie szacować nośność graniczną wzmocnionych dźwigarów. Oparcie się na tych procedurach jest zdaniem Doktoranta dobrym kierunkiem poszukiwań właściwych procedur projektowych, a ich weryfikacja jest oryginalnym wkładem Doktoranta w obszarze projektowania budowlanego.

W końcu pionierskie, pierwsze na świecie zastosowanie szwajcarskiej technologii na polskim moście drogowym, które wymagało nie tylko odpowiednich prac projektowych, ale szeregu niestandardowych prac budowlanych i zabiegów organizacyjnych, w których czynnie uczestniczył Doktorant, potwierdza także oryginalność podejścia do problemu naukowego, którego rozwiązania podjął się Doktorant.

Wymienione powyżej oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta, zawarte i opisane w recenzowanej rozprawie, stanowią moim zdaniem **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, będącego przedmiotem rozprawy.

## 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Kilka uwag krytycznych podałem w p. 3 oceniając ogólnie zawartość rozprawy. Poniżej przedstawiłem uwagi bardziej szczegółowe.

5.1 Realizatorzy projektu TULCOEMPA, wśród nich Doktorant, ponieśli dużo wysiłku, czasu i kosztów na odtworzenie w laboratorium EMPA w Szwajcarii typowego polskiego prefabrykatu mostowego z lat 60-tych XX w. Z góry było wiadomo, że nie będzie to możliwe; poza geometrią przekroju oraz układem zbrojenia, wszystko pozostałe jest inne: materiały, technologia wykonania, konstrukcja płyty pomostu, stopień jej zespolenia itp. Z drugiej strony wyników badań dźwigarów w laboratorium EMPA Doktorant praktycznie nie wykorzystał w projekcie wzmocnienia mostu w Szczercowskiej Wsi. Jaki był zatem cel i uzasadnienie tego wysiłku?

5.2 W programie badań dźwigarów (etapy obciążenia) brak jest poziomów korespondujących z projektowanym obciążeniem charakterystycznym i obliczeniowym dźwigarów. Wyniki

- badania dla tych poziomów obciążenia mogłyby być wprost odniesione do projektu wzmocnienia mostu. Takiego odniesienia brakuje także w analizie wyników badań dźwigarów.
- 5.3 Dlaczego Doktorant nie zaplanował i nie przeprowadził badań nośności na ścinanie dźwigara wzmocnionego oplotami z mat CFRP, rezygnując w ten sposób z doświadczalnej oceny efektywności i skuteczności tej technologii wzmocnienia.
  - 5.4 Uplastycznienie zbrojenia podczas badań dźwigarów szacowano pośrednio, oceniając sztywność na wykresie P- $\delta$ . Dlaczego nie zastosowano tensometrów na zbrojeniu, co pozwoliłoby na bezpośredni pomiar odkształceń stali? Jak wyznaczono obciążenie przy uplastycznieniu stali sprężającej (tabela 6.1)?
  - 5.5 Skoro w badaniach uzyskano zniszczenie wzmocnienia przez zerwanie taśm, to analiza zniszczenia wzmocnienia wskutek odspojenia (r.7) jest zbędna w porównaniu z wynikami badań (tabela 7.2, rys.7.9). Podobnie jak analiza w p.7.3, na podstawie której wyznaczono wartość odkształceń skutkujących odspojeniem.
  - 5.6 Na jakiej podstawie Doktorant przyjął w analizach nośności na zginanie (p.7.2.3; p.7.4.1) i ścinanie (p.7.6; p.7.7) charakterystyczną wytrzymałość stali sprężającej na poziomie 1730 MPa, wbrew danym dostarczonym przez producenta kabli (1440 MPa)? Jest to kluczowy parametr materiałowy przy ocenie zgodności procedury obliczeniowej (projektowej) z wynikami badań doświadczalnych w przypadku dźwigarów sprężonych i właściwe przyjęcie tej wartości rzutuje na wyniki i wnioski z analiz porównawczych.
  - 5.7 Porównanie wyników obliczeń nośności na ścinanie wg norm z wynikami badań (rys.7.51) nie uzasadnia, wbrew temu co twierdzi Doktorant, potrzeby wzmacniania dźwigara na ścinanie. Powody podaje sam Doktorant: w badaniach nie wyznaczono rzeczywistej nośności dźwigara na ścinanie (s.236). Ponadto decyzję o wzmocnieniu podejmuje się na podstawie porównania nośności projektowej (normowej) do efektów obciążenia projektowego (w tym przypadku siły poprzecznej), a nie do wyników badań.
  - 5.8 Które z czterech przeanalizowanych procedur obliczania nośności na zginanie i ścinanie wzmocnionego dźwigara sprężonego rekomendowałby Doktorant projektantom, biorąc pod uwagę wyniki swoich badań?
  - 5.9 W projekcie wzmocnienia mostu (p.8.2) Doktorant przyjął w obliczeniach kilka nieuzasadnionych lub niewłaściwych założeń, skutkujących nieprawidłowymi wnioskami; te najważniejsze wskazałem poniżej:
    - a) bezpodstawne i zawyżone straty sprężania na poziomie 33% (por. p. 7.1, gdzie Doktorant wyliczył je na poziomie ponad dwukrotnie niższym, tj. 14,9%);
    - b) charakterystyki materiałowe dla istniejących (55-letnich!) dźwigarów przyjęto wg współczesnych norm projektowych (tabele 8.1 i 8.2), a nie wg badań materiałowych, których częściowe wyniki podano w ekspertyzie stanu technicznego mostu (por. p. 3.2.1);
    - c) w obliczeniach nośności na zginanie dźwigara wzmocnionego przyjęto model zniszczenia *ICB* (s.261, s.268), wbrew uzyskanym wynikom badań, gdzie uzyskano zniszczenie przez zerwanie taśmy;
    - d) tabela 8.3 – niewłaściwe wartości obliczeniowej nośności na zginanie wg PN-91/S; wartości te powinny być dwukrotnie większe;
    - e) tabela 8.8 – niewłaściwie przyjęto jednakowe współczynniki bezpieczeństwa  $\gamma_f$  dla obu norm; wg PN-91/S dla obciążeń stałych (wyposażenia) wartość  $\gamma_f = 1,50$ ;
    - f) tabela 8.10 - niewłaściwie przyjęto współczynnik bezpieczeństwa  $\gamma_f$  dla obciążenia STANAG wynosi on  $\gamma_f = 1,35$  (wg rozporządzenia MTiGM); ponadto w wartości tego obciążenia ujęto już nadwyżkę dynamiczną, więc nie stosuje się współczynnika dynamicznego;

- g) tabela 8.11 - niewłaściwie przyjęto współczynnik bezpieczeństwa  $\gamma_f$  dla obciążeń ruchomych; wg PN-EN 1991 dla obciążeń ruchomych LM-1 wynosi on  $\gamma_f = 1,35$ ;
  - h) tabela 8.11 – przyjęto nieuzasadnione wartości współczynników dostosowawczych  $\alpha_{Qi}$  oraz  $\alpha_{Qj}$ ; wobec braku polskiego Załącznika Krajowego do PN-EN 1991 należało dostosować wartości tych współczynników klasy B wg PN-85/S-10030 (równoważność efektów obciążenia);
  - i) tabela 8.11 – jak w p.f) powyżej;
  - j) tabele 8.13 i 8.14 – wymagają powtórnego przeliczenia wartości z uwzględnieniem uwag jak wyżej.
- 5.10 W przyjętej technologii przebudowy mostu dźwigary powinno się wzmocnić przed wykonaniem płyty pomostu i wyposażenia; wówczas efektywność wzmocnienia i wykorzystania materiałów kompozytowych byłoby wyższe.
- 5.11 Jaki był cel wykonywanie próbnego obciążenia istniejącego mostu przed przebudową? Wyników tych badań nie wykorzystano w realizacji programu badawczego.
- 5.12 W tabeli 8.18 podano wartości pomierzoną i obliczoną (teoretyczną) ugięcia. Wartość dopuszczalna to  $L/800 = 22,5$  mm.
- 5.13 Różnica pomiędzy wartością pomierzoną a obliczoną (teoretyczną) ugięcia, wynosząca ponad 60% nie może być tłumaczona jedynie wpływem wyposażenia mostu na jego sztywność. To raczej wskazuje na błędny model konstrukcji przęsła, wykorzystany w projekcie badań.

## 6. Ocena strony formalnej i redakcji rozprawy

Układ rozprawy jest zasadniczo poprawny i logicznie wynika z jej celów i zakresu prac naukowych. Uważam jednak, że ułożenie w jednym rozdziale rozbitych informacji o projekcie TULCOEMPA (p.1.2 i 3.1), stanie wiedzy (p.1.5 i 1.6 oraz r. 2) oraz opisu, badań mostu i projektu wzmocnienia (p.3.2, 3.3 i r.8) wpłynęłaby korzystnie na czytelność całości rozprawy. Także część badawcza (r.3-6) powinna mieć standardowy podział: materiały, metody, wyniki badań, dyskusja wyników, co poprawiłoby układ rozprawy. Prawidłowo Doktorant wyróżnił z niej część technologiczną (p.4), jednak błędnie nazwaną „realizacją programu badawczego”.

Poza uwagami dotyczącymi układu, redakcja rozprawy jest poprawna i właściwa. Język rozprawy jest zrozumiały i poprawny technicznie. Poniżej przedstawiłem kilka najważniejszych uwag natury redakcyjnej, jakie zauważałem oceniając tekst rozprawy:

- a) wykresy w p. 5.3 pokazujące wyniki badań powinny mieć na osi rzędnych całkowite obciążenie, a nie wartość tylko jednej siły; tym bardziej, że w opisie badań Doktorant używa oznaczeń ( $4 \times P$ ) dla opisu obciążeń badawczych;
- b) s.165, p.6.7, pierwsza fraza: powinno być „zerwania”, a nie „odspojenia”;
- c) rozdział 7; w wielu miejscach użyto zwrotu „nośność graniczna przekroju żebra”; powinno być chyba „..... przekroju dźwigara”;
- d) brak w spisie piśmiennictwa projektu archiwalnego mostu oraz projektu ogólnej przebudowy mostu, wykonanego przez Mostopol z Opola.

## 7. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Staśkiewicza stanowi bez wątpienia **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, jakim była ilościowa i jakościowa ocena efektywności i skuteczności zastosowania kompozytów CFRP do wzmocniania belkowych konstrukcji z betonu sprężonego, z wykorzystaniem innowacyjnej metody gradientowej. W wyniku

przeprowadzonych prac naukowych Doktorant wykazał, że metoda gradientowa pozwala na znaczące wzmacnianie dźwigarów sprężonych, zarówno w warunkach laboratoryjnych jak również w aplikacjach *in-situ*, tj. na istniejącym obiekcie mostowym. Sporządzona przez Doktoranta ocena nowej technologii na podstawie wykonanych prac aplikacyjnych jest wiarygodna i może mieć znaczenie praktyczne. Z uwagi na szeroki zakres przeprowadzonych badań i dużą liczbę sprawdzonych procedur obliczeniowych, rozprawa bez wątpienia stanowi istotny wkład do zasobu wiedzy, na którym opierają się prace normalizacyjne w przedmiotowym obszarze. Jednocześnie ze względu na rosnące zapotrzebowanie na technologie wzmacniania istniejących konstrukcji betonowych, zwłaszcza w przypadku obiektów mostowych poddanych specyficznym warunkom eksploatacji, wyniki pracy naukowej Doktoranta są cennym wkładem w rozwój tej gałęzi budownictwa.

Przygotowanie rozprawy doktorskiej wymagało od Doktoranta zdobycia szerokiej wiedzy teoretycznej i praktycznej w zakresie materiałów kompozytowych, technologii wzmacniania konstrukcji, badań doświadczalnych, zarówno materiałowych jak również wytrzymałościowych, nowoczesnych metod pomiarowych, obliczeń normowych oraz zasad projektowania konstrukcji betonowych. Doktorant wykazał się także dobrym przygotowaniem do organizacji i prowadzenia badań naukowych w zakresie konstrukcji budowlanych oraz umiejętnościami krytycznej analizy ich wyników w odniesieniu do procedur normowych i analiz teoretycznych. Zawartość i treść rozprawy w sposób zadowalający pokazują **ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej „inżynieria lądowa i transport”** oraz zdobytą przez niego **umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. Tak więc recenzowana praca naukowa spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r.* (Dz.U. Nr 65, poz. 595).

Reasumując mogę jednoznacznie stwierdzić, że pomimo sformułowanych przeze mnie uwag krytycznych do merytorycznej zawartości rozprawy oraz do sposobu jej redakcji, oczywiste walory poznawcze rozprawy, oryginalne rozwiązanie postawionego problemu metodami doświadczalnymi, analitycznymi i numerycznymi, a także wykazana w pracy ogólna wiedza teoretyczna i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta, upoważniają mnie do postawienia wniosku o **przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Staśkiewicza oraz o dopuszczenie jej do publicznej obrony**.

Jednocześnie biorąc pod uwagę nowatorski charakter i innowacyjność przedmiotu rozprawy, wysoką jakość i duży zakres wykonanych prac naukowo – badawczych oraz doprowadzenie do skutecznego wdrożenia wyników tych prac, składam **wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Staśkiewicza**.



Tomasz Siwowski,  
Rzeszów, 15.09.2021 r.