

Prof. dr hab. inż. Renata Kotynia  
[renata.kotynia@p.lodz.pl](mailto:renata.kotynia@p.lodz.pl)  
Politechnika Łódzka  
Katedra Budownictwa Betonowego  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź  
Tel. 48501282893

Łódź, dn. 2 sierpnia 2023

---

## Recenzja rozprawy doktorskiej

**mgr inż. AGNIESZKI WIATER**

**pt. „ STANY GRANICZNE PŁYT POMOSTOWYCH**

**Z BETONU LEKKIEGO ZE ZBROJENIEM NIEMETALICZNYM”**

### 1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę formalną recenzji stanowi Uchwała Nr 3/05/2023 Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 17 maja 2023 r.

### 2. Przedmiot recenzji i charakterystyka rozprawy

Przedmiotem recenzji jest praca doktorska mgr inż. Agnieszki Wiater pt. „Stany graniczne płyt pomostowych z betonu lekkiego ze zbrojeniem niemetalicznym”. Praca powstała pod kierunkiem promotorów z Katedry Dróg i Mostów, Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury: prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego i dr inż. Ewy Michałak. Praca dotyczy doświadczalnej weryfikacji wybranych stanów granicznych nośności i użyteczności płyt pomostowych z betonu lekkiego ze zbrojeniem niemetalicznym (LWC/FRP) oraz sprawdzenia i modyfikacji procedur dotyczących stanów granicznych i użyteczności.

Zakres rozprawy obejmuje dziewięć rozdziałów zawierających: przegląd stanu wiedzy, program i wyniki badań eksperymentalnych a także weryfikację procedur projektowych i podsumowanie. Praca jest dosyć minimalistyczna, gdyż obejmuje zaledwie 160 stron podstawowej treści i zaledwie 28 stron załącznika. To zdecydowanie zbyt mało aby precyzyjnie określić zakres i wyniki pracy.

**Rozdział 1 - Wstęp** (6 stron) - opisuje problem badawczy i przedstawia tezę i cel pracy opisujący przegląd wybranych procedur projektowych (SGN/SGU) dla zginanych elementów betonowych, zbrojonych prętami kompozytowymi FRP w tym: ocenę doświadczalną wybranych stanów granicznych płyty pomostu typu LWC/FRP w rzeczywistym układzie projektowym; weryfikację i modyfikację wybranych procedur projektowych (SGN, SGU) na podstawie wyników badań w kontekście zastosowania betonu lekkiego; analizę parametryczną wpływu stopnia i konfiguracji

zbrojenia głównego na mechanizm zniszczenia płyt LWC/FRP. Jasno został sprecyzowany cel pracy opisany poprzez realizację celów szczegółowych obejmujących:

- przegląd wybranych procedur projektowych SGN oraz SGU dla zginanych elementów betonowych, zbrojonych prętami kompozytowymi FRP;
- doświadczalną ocenę wybranych stanów granicznych płyty pomostu typu LWC/FRP w rzeczywistym układzie projektowym;
- weryfikację i modyfikację wybranych procedur projektowych (SGN, SGU) na podstawie wyników badań w kontekście zastosowanych betonów;
- analizę parametryczną mechanizmu zniszczenia płyt LWC/FRP.

Rozprawa dotyczy badań doświadczalnych, które podzielono na dwie serie belek z betonu normalnego i lekkiego, a ponadto badanych pod obciążeniem statycznym i zmęczeniowym.

Cel pracy opisany w rozdziale 1 został jasno sprecyzowany poprzez realizację celów szczegółowych obejmujących:

- przegląd wybranych procedur projektowych SGN oraz SGU dla zginanych elementów betonowych, zbrojonych prętami kompozytowymi FRP;
- doświadczalną ocenę wybranych stanów granicznych płyty pomostu typu LWC/FRP w rzeczywistym układzie projektowym;
- weryfikację i modyfikację wybranych procedur projektowych (SGN, SGU) na podstawie wyników badań w kontekście zastosowanych betonów;
- analizę parametryczną mechanizmu zniszczenia płyt LWC/FRP.

**Rozdział 2 - Przegląd stanu wiedzy – State of the art** (22 strony) - przedstawia przegląd wiedzy prezentujący przykłady zastosowań betonu lekkiego oraz zbrojenia niemetalicznego w budownictwie mostowym wraz z wynikami zrealizowanych dotychczas badań płyt i belek z betonu lekkiego ze zbrojeniem niemetalicznym. Głównym elementem przeglądu wiedzy jest analiza istniejących procedur projektowych elementów betonowych ze zbrojeniem niemetalicznym. Polskie realizacje dotyczące zastosowania betonów lekkich z kruszywem Pollytag miały miejsce na Podkarpaciu, był wykorzystany do wymiany i wzmocnienia istniejących płyt pomostowych oraz kap chodnikowych mostów m.in. przy budowie Mostu Zamkowego w Rzeszowie w 2002 roku. Oprócz realizacji na Podkarpaciu beton lekki z kruszywem Pollytag zastosowano na mostach: nad Kanałem Praskim w Warszawie, na Odrze Wschodniej i Zachodniej w Szczecinie oraz mości przez Wisłę w Toruniu.

**Rozdział 3 - Stany graniczne elementów betonowych ze zbrojeniem niemetalicznym w świetle badań i procedur normowych** (25 stron) - przedstawia przegląd dostępnych norm z prezentacją metod obliczeniowych w zakresie sprawdzania stanów granicznych nośności i użyteczności elementów betonowych ze zbrojeniem niemetalicznym. Celem przeglądu jest prezentacja norm ze wskazaniem głównych różnic oraz ocena możliwości ich wykorzystania w projektowaniu elementów płytowych typu LWC/FRP.

**Rozdział 4 - Program badań własnych** (15 stron) - prezentuje program badań własnych obejmujący: badania materiałowe betonu lekkiego, badania zbrojenia niemetalicznego, badania modeli płyt pomostowych typu LWC/FRP pod obciążeniem statycznym i zmęczeniowym. Wyniki tych badań pozwoliły na przeprowadzenie analizy parametrycznej wybranych stanów granicznych płyt pomostowych i ustalenie wpływu rodzaju betonu oraz stopnia i konfiguracji zbrojenia głównego na wybrane stany graniczne.

**Rozdział 5 - Wyniki badań własnych i ich analiza** (37 stron) - przedstawia wyniki badań materiałowych:

- betonu zwykłego i lekkiego, zbrojenia płyt oraz statyczne i zmęczeniowe badania elementów płytowych z betonu lekkiego i zwykłego ze szczególnym uwzględnieniem nośności na ścinanie i nośności zmęczeniowej płyt LWC/FRP. Rozprawa jest zakończona podsumowaniem oraz głównymi wnioskami, związanymi z udowodnieniem tezy rozprawy i stopniem realizacji jej celów. Na zakończenie podano kierunki dalszych badań elementów LWC/FRP.

**Rozdział 6 - Weryfikacja procedur projektowych według ACI 440.1R-15 na podstawie badań własnych** (9 stron) - przedstawia analizę porównawczą procedur projektowych wg wytycznych amerykańskich ACI 440.1R-15.

**Rozdział 7 - Weryfikacja nośności na ścinanie płyt na podstawie wybranych procedur i badań własnych** (9 stron) - prezentuje weryfikację nośności na ścinanie płyt na podstawie wybranych procedur i badań własnych. Szczegółowa analiza nośności na ścinanie obejmuje 9 procedur obliczeniowych: japońskich JSCE; brytyjskich IStructE; trzech kanadyjskich: CAN/CSA S806-02, CAN/CSA S806-12 oraz ISIS; włoskiej CNR DT 203-2006; amerykańskich: ACI 440.1R-15 i AASHTO oraz nowej edycji Eurokodu 2: prEN 1992-1-1.

**Rozdział 8 - Ocena zmęczenia płyt na podstawie wybranych procedur i badań własnych** (2 strony) - uzupełnia pracę o weryfikację oddziaływań zmęczeniowych płyt jedynie w świetle dwóch norm amerykańskich: ACI 440.1R-15 i AASHTO, dla których przyjęto, że naprężenie w zbrojeniu kompozytowym od odpowiedniej kombinacji obciążeń wywołuje naprężenia w zbrojeniu poniżej 20÷25% wytrzymałości kompozytu na rozciąganie.

**Rozdział 9 - Podsumowanie i wnioski końcowe rozprawy** (7 stron) - prezentuje podsumowanie i wnioski końcowe rozprawy wraz z prezentacją kierunków dalszych badań.

Za rozdziałem 9 jest Piśmiennictwo obejmujące 142 pozycje, a po nim Załączniki:

**Załącznik nr 1** - Baza danych parametrów materiałowo – konstrukcyjnych elementów z betonu lekkiego ze zbrojeniem niemetalicznym wybranych do analizy procedur wyznaczania nośności na ścinanie (4 strony).

**Załącznik nr 2** - Baza danych żywotności zmęczeniowej płyt betonowych ze zbrojeniem niemetalicznym (2 strony)

**Załącznik nr 3** - Wyniki badań zmęczeniowych w zakresie morfologii i rozwartości rys (3 strony)

**Załącznik nr 4** - Wyniki badań zmęczeniowych w zakresie ugięć (2 strony)

**Załącznik nr 5** - Wyniki obliczeń nośności na ścinanie według wybranych procedur (4 strony)  
Na końcu pracy jest Streszczenie w języku polskim i angielskim.

### 3. Merytoryczna ocena rozprawy

#### Uwagi zasadnicze:

**Rozdział 1:** Praca jest dosyć uboga w treści, ponieważ nie obejmuje dokładnego przeglądu stanu wiedzy w zakresie badań płyt zbrojonych przy użyciu zbrojenia z włókien szklanych (GFRP). Jednakże cele pracy są sformułowane poprawnie.

**Rozdział 2:** Opis badań przedstawionych przez Doktorantkę w rozdziale 2 jest mało konkretny i w zasadzie nie precyzuje jasno wniosków z badań. Należałoby go rozbudować o wyniki szczegółowe z wyraźnym określeniem wpływu różnic parametrów zmiennych na efekty zmian betonu (LC/NC), schematów statycznych i różnice w sposobach zniszczenia.

**Rozdział 3:** W tabelicy 3 brakuje właściwych oznaczeń opisów symboli, a opisane w pracy procedury obliczeniowe, wykazują brak doprecyzowania warunków dla norm i spisów literaturowych:

- Tabela 3.2, Lp. 6 - ISIS (2001, 2007) [52]:

Dla  $d > 300\text{mm}$ :  $V_c = \left(\frac{260}{1000-d}\right) \lambda \sqrt{f_c} b d \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} \geq 0,1 \lambda \sqrt{f_c} b d \sqrt{\frac{E_f}{E_s}}$  - powinno być:  $c = \left(\frac{260}{1000+d}\right) \lambda \sqrt{f_c} b d$

- Tabela 3.2, Lp. 13, Nehedi i in.(2007) [85]:

$V_c = 2,1 \left(\frac{f_c \rho_f d}{a} \cdot \frac{E_f}{E_s}\right)^{0,3} \cdot b d$  powinno być:  $V_c = 2,1 \left(\frac{f_c \rho_f d}{a} \cdot \frac{E_f}{E_s}\right)^{0,23} \cdot b d$

oraz  $a/d > 2,5$  powinno być:  $a/d < 2,5$

- Tabela 3.2, Lp. 14, CSA S6-06 [21]: brakuje  $s_{ze} > 0,85 s_z$

- Tabela 3.2. brakuje wytycznych Eurokod 2 CEN/TC 250/SC2017 oraz załącznika JA do normy Eurokod 2 CEN/TC 250/S.C. 2021.

- Tabela 3.3. Lp. 4, CAN/CSA S806-12 [24]:

$0,11 \sqrt{f_c} b_w d_v \leq V_{Rd,c} \leq 0,22 \sqrt{f_c} b_w d_v$  powinno być:  $0,11 \sqrt{f_c} b_w d_v \leq V_{Rd,c} \leq \mathbf{0,20} \sqrt{f_c} b_w d_v$

#### Rozdział 4:

4.1. Brakuje precyzyjnych rysunków do zestawienia tabelicy 4.3. Należałoby je zamieścić albo w załączniku, albo w tekście pracy.

4.2. Badania statyczne i zmęczeniowe płyt Doktorantka wykonała w dwóch różnych schematach statycznych: statyczne - w schemacie czteropunktowego zginania (7 płyt), a zmęczeniowe - w schemacie trójpunktowego zginania (9 płyt), co nie w pełni oddaje zasadność tych badań, a ponadto stanowi istotną różnicę w zachowaniu się płyt pod takim obciążeniem.

4.3. Czemu w płytach z betonu lekkiego nie zastosowano jednolitego zbrojenia z tym, które użyto w płytach z betonu zwykłego? Takie nieścisłości mogą silnie wpływać na różnice w wynikach badań elementów.

4.4. Z uwagi na niezgodność parametrów zmiennych dla betonów NC i LC związaną ze zmianą parametru jakim jest grubość otuliny dolnego i górnego zbrojenia, powstała duża wątpliwość dotycząca porównania wyników badań. Dlatego nie wiadomo, co bardziej wpływa na zmianę zachowania się płyt pod obciążeniem: zmiana otuliny, rodzaj betonu czy rodzaj zbrojenia.

4.5. Jaka jest przyczyna braku użycia zbrojenia górnego w płycie LC-D2a-G0, skoro takie zbrojenie użyto w pozostałych płytach?

## **Rozdział 5:**

5.1. Brakuje dokładnego opisu badań próbek betonu na ściskanie (tj. liczba próbek na ściskanie, liczba próbek na rozciąganie i moduł sprężystości).

5.2. Dla jakiej liczby próbek wykonano badania wytrzymałościowe opisane w tabeli 5.1?

5.3. Dla jakiej liczby próbek wykonano badania wytrzymałościowe prętów kompozytowych dostarczonych przez firmę *ALBA Kompozit* zestawione w tabeli 5.2?

5.4. Jest duża nieścisłość w wynikach badań zmęczeniowych i statycznych ponieważ w badaniach zmęczeniowych użyto zbrojenie firmy *ComRebars*, a ponadto zastosowano inne średnice. To może istotnie wpłynąć na uzyskane wyniki badań. Należałoby chyba użyć jednakowego zbrojenia, aby uzyskać jednolite wyniki badań.

5.5. Rysunki 5.3 i 5.4 prezentujące obciążenia odpowiednio 50 kN i 100 kN, powinny być znacznie bardziej czytelne, ponieważ z obrazu rys bardzo słabo widać postęp zarysowania. Ponadto zamieszczenie jednego rysunku na stronie znacznie bardziej poprawiłoby czytelność poziomów zarysowania i rozwartości rys. Należałoby każdą z belek zamieścić w załączniku z podziałem sposobu zarysowania dla odrębnych poziomów obciążeń.

5.6. Rysunek 5.5 powinien zostać podzielony na dwa odrębne rysunki opisujące krzywe przemieszczeń płyt LC i NC.

5.7. Jeśli chodzi o opis wyników badań zmęczeniowych to jest naprawdę dobry. Precyzyjnie opisuje morfologię rys i ich rozwój. Podobnie jest z opisem ugięć i „żywności” zmęczeniowej oraz postaciami zniszczenia, które zostały bardzo precyzyjnie opisane i przedstawiają szereg zdjęć. Podobnie Rozdział 5.4 zasługuje na pochwałę i powinien być raczej przedstawiony we wstępie badań, a nie na końcu pracy. To znacząco pomogłoby w doprecyzowaniu zagadnień związanych z analizowanymi czynnikami zmiennymi.

5.8. Bardzo ciekawe są analizy wpływów najważniejszych czynników zmiennych: rodzaju betonu, (zwykły vs. lekki), stopnia zbrojenia płyt, konfiguracji zbrojenia (taki sam lub zbliżony stopień zbrojenia uzyskany w wyniku zastosowania innej średnicy i rozstawu prętów) oraz wpływu obecności i stopnia zbrojenia górnego.

5.9. Wpływ każdego czynnika zmiennego określano na podstawie porównania wybranych stanów granicznych poszczególnych płyt, obejmujących: zarysowanie, ilość i rozstaw rys, maksymalną ich rozwartość oraz sumaryczną rozwartość rys. Podobnie warta uwagi jest analiza

ugięć w zakresie obejmującym: sztywność początkową, sztywność po zarysowaniu i redukcję sztywności.

5.10. Podsumowanie stanowi bardzo ciekawe ujęcie stanu wiedzy w zakresie poczynionych badań. Obciążenie rysujące płyt z betonu lekkiego wynosiło średnio 72% obciążenia rysującego dla płyt z betonu zwykłego, podczas gdy wzrost stopnia zbrojenia o 40% w płycie z betonu lekkiego spowodował wzrost obciążania rysującego o 43%. Na uwagę zasługuje również fakt, dużej różnicy w sztywności płyt z betonu lekkiego w porównaniu z płytami z betonu zwykłego, co skutkowało 10-krotnie większymi ugięciami przed zarysowaniem i o 37% niższą sztywnością początkową niż w przypadku płyt z betonu zwykłego. Doktorantka uzasadniła, że początkowa sztywność płyt ze zbrojeniem w postaci prętów o większej średnicy i większym rozstawie prętów wykazywała około 26% mniejsze ugięcie przed zarysowaniem, w porównaniu z siatką z prętów o mniejszej średnicy w mniejszym rozstawie mniejszą szerokością rozwartości rys, niezależnie od rodzaju betonu.

5.11. Płyty z betonu zwykłego zniszczyły się na zginanie, a płyty z betonu lekkiego zniszczyły się na ścinanie z uwagi na różnice niższej wytrzymałości betonu na rozciąganie i dwukrotnie mniejszego rozmiaru kruszywa grubego w porównaniu z betonem zwykłym.

5.12. Badaniom zmęczeniowym poddano łącznie 9 pełnowymiarowych swobodnie podpartych płyt betonowych o wymiarach 3000 x 1000 x 180 mm. Trzy z nich obciążono statycznie w schemacie trójpunktowego zginania, a pozostałe 6 płyt poddano obciążeniu zmęczeniowemu. Głównymi czynnikami zmiennymi były rodzaj betonu, stopień zbrojenia oraz poziom obciążenia zmęczeniowego. Dwie płyty wykonano z betonu zwykłego, a siedem z betonu lekkiego. Z analizy wyników badań zmęczeniowych wyraźnie widać, że:

- zastosowanie betonu lekkiego spowodowało redukcję „żywności” zmęczeniowej o 72% w porównaniu z płytami z betonu zwykłego,
- w płytach z betonu lekkiego zwiększenie poziomu maksymalnego obciążenia zmęczeniowego z 20% na 30% nośności skutkowało dodatkową redukcją „żywności” zmęczeniowej o 50%,
- zwiększenie stopnia zbrojenia głównego płyt z betonu lekkiego o 60% skutkowało zwiększeniem „żywności” zmęczeniowej płyt do 2 mln, a więc co najmniej 5÷10 krotnie wydłużyło „żywność” płyt,
- płyty z betonu lekkiego po 2 mln cykli obciążenia zmęczeniowego wykazywały podobne zachowanie w zakresie zarysowania i sztywności, jak płyty takiego obciążenia.

**Rozdział 6:** W rozdziale Doktorantka przedstawiła weryfikację procedur projektowych według ACI 440.1R -15 na podstawie badań własnych. Ponadto bardzo precyzyjnie opisała wnioski wskazując na:

- wyniki badań i obliczeń zamieszczone w tab. 6.2. określają, że nośność na zginanie była średnio o 12% wyższa niż wartości wyznaczone doświadczalnie, co wskazuje na dobrą zgodność procedur projektowych z badaniami. Natomiast obliczona nośność na ścinanie płyt była średnio o 70% i 63% niższa niż wartości z badań doświadczalnych w przypadku odpowiednio betonu zwykłego i lekkiego.
- według wytycznych ACI 440.1R -15 wartość momentu rysującego średnio o 31% i 40% o wyższe odpowiednio dla płyt z betonu zwykłego i lekkiego.

- obliczenia ugięć wg ACI 440.1R -15 zaniżają wartości przy niskim poziomie obciążenia średnio o 62% i o 52%, odpowiednio dla płyt z betonu zwykłego i lekkiego, a przy obliczone ugięcia są średnio o 20% mniejsze od uzyskanych w badaniach zarówno dla płyt z betonu zwykłego, jak i lekkiego.

- analiza „zmęczenia” przedstawiona wg ACI 440.1R -15 w postaci ograniczenia naprężeń w zbrojeniu do poziomu 20% wytrzymałości na rozciąganie prętów zbrojeniowych jest dobrym kryterium oceny płyty pomostowych LWC/GFRP.

**Rozdział 7:** Prezentuje imponujące wyniki zestawienia badań obejmujące 50 elementów z betonu lekkiego, zbrojonych prętami FRP. Wyniki obejmują 9 elementów płytowych oraz 41 elementów belek. Z uwagi na brak osobnych procedur dla wyznaczania nośności na ścinanie płyt i belek Autorka uzupełniła bazę danych o dostępne dane w literaturze dla belek z betonu lekkiego zbrojonych prętami FRP, obejmującą: płyty o wymiarach: (b x h x l) 183 x 23,5 x 2440 cm oraz 100 x 18 x 2400 cm (badania własne) oraz belek: 15 x 20 x 200 cm, 20 x 25 x 220 cm, 15 x 25 x 220 cm, 20 x 40 x 260 cm, 10 x 20 x 140 cm oraz 63 x 23,5 x 2440 cm.

W analizie wyróżniła trzy rodzaje betonu lekkiego:

- beton lekki piaskowy o wytrzymałości na ściskanie 21÷75 MPa,
- beton lekki typu „*all lightweight*” o wytrzymałości na ściskanie 18÷27 MPa
- fibrobeton lekki z włóknami szklanymi, polipropylenowymi i stalowymi o wytrzymałości na ściskanie 32÷41 MPa.

Ponadto, w analizie Doktorantka precyzyjnie wyróżniła trzy rodzaje zbrojenia kompozytowego: szklane GFRP o module sprężystości 40÷66 GPa, bazaltowe BFRP o module 63÷65 GPa oraz węglowe CFRP o module sprężystości 146÷148 GPa. A na podstawie wykonanej analizy określiła, że trzy procedury o największej zgodności wyników doświadczalnych z procedurami obliczeniowymi to: IStructE, ISIS oraz CAN/CSA S806-02. Na czwartej pozycji występuje norma CAN/CSA S806-12, która w bardzo małym stopniu daje mniejsza zgodność niż poprzednie normy. Podczas gdy najmniejsze odchylenie standardowe wykazała norma CNR DT 203-2006.

**Rozdział 8:** Opisane w rozdziale 8 wyniki jasno potwierdzają, że normy: ACI 440.1R-15 i AASHTO wykazując dobrą zgodność stosowanego kryterium z wynikami badań na poziomie 20-25%, wytrzymałości na rozciąganie zbrojenia kompozytowego, co oznacza, że kryterium to jest spełnione dla wszystkich płyt poza LD-D1-30%, podczas gdy połowa z badanych płyt nie osiągnęła zakładanej „żywności” zmęczeniowej. Doktoranta określa również opis zachowania się konstrukcji pod obciążeniem zmęczeniowym jako zależność S-N będąca podstawowym narzędziem szacowania „żywności” zmęczeniowej konstrukcji betonowych w wielu normach. Modele „żywności: zmęczeniowej pokazane na rys. 8.1 dotyczyły płyt zbrojonych prętami kompozytowymi wykonanymi z betonu zwykłego, a nie lekkiego, dlatego Doktorantka zaproponowała model zmęczeniowy S-N dla elementów z betonu lekkiego, wyprowadzony na podstawie wyników badań własnych z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów:  $S=0,6477-0,031 \ln N$ , a następnie przedstawiła graficzną postać tego modelu na rys. 8.2.

**Rozdział 9:** W tym rozdziale Doktorantka podsumowała główne cele obejmujące: ocenę wybranych stanów granicznych w kontekście weryfikacji wybranych procedur oraz ich projektowania. Badania doświadczalne przeprowadzone przez Doktorantkę jednoznacznie wykazały, że stanami granicznymi warunkującymi możliwość zastosowania płyt LWC/FRP w pomostach mostów drogowych są nośność na ścinanie i „żywość” zmęczeniowa.

Jednakże na podstawie rozdziałów 7 i 8 Doktorantka określiła najbardziej aktualne trendy projektowania płyt pomostowych do których należą:

- nośność na zginanie (SGN) wyznaczana na podstawie prostokątnego rozkładu naprężeń w strefie ściskanej betonu, według ACI 440.1R-15;
- nośność na ścinanie (SGN) wyznaczana bez współczynników redukcyjnych z uwagi na zastosowanie betonu lekkiego, określona na podstawie normy IStructE;
- ocena zmęczenia płyt (SGN) wg ACI 440.1R-15 jest wystarczająco dokładna, jednak z uwagi na szczególne znaczenie tego stanu granicznego w przypadku obiektów mostowych konieczne jest bardziej szczegółowe podejście do zagadnienia zmęczenia płyt pomostowych, krzywa S-N;
- ocena zarysowania płyt (SGU) jest najlepsza według normy ACI 440.1R-15;
- sprawdzenie dopuszczalnego ugięcia płyt pod obciążeniem (SGU) jest najbardziej zbliżone wg wytycznych ACI 440.1R-15.

Opisane we wniosku końcowym plany dalszych badań obejmują konieczność modyfikacji wybranych procedur projektowych dla uzyskania odpowiedniej nośności, trwałości i poziomu bezpieczeństwa tych elementów w zastosowaniu do obiektów mostowych.

Płyty pomostowe LWC/FRP stanowią uzasadnione i perspektywiczne rozwiązanie konstrukcyjne dla obiektów mostowych, a główną zaletą tego podejścia jest skuteczne połączenie powszechnie znanych cech kompozytów FRP takich jak trwałość, wytrzymałość, niski ciężar własny, z zaletami betonów lekkich.

#### **4. Opinia o dorobku naukowym i praktycznym Doktorantki**

Realizacja celów szczegółowych rozprawy, a przez to osiągnięcie jej celu głównego, była poddawana stałej recenzji naukowej przez publikację wyników badań w renomowanych, krajowych i zagranicznych czasopismach naukowych.

Do najważniejszych publikacji powstałych na podstawie wyników prac badawczych prowadzonych przez Doktorantkę należą:

1. Wiater A., Rajchel M., Siwowski T.: Badania płyt pomostu z betonu lekkiego zbrojonych prętami kompozytowymi GRFP, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury / Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, XXXII, 62 (4/15), 469-492, 2015.
2. Wiater A., Rajchel M., Siwowski T.: Analiza obliczeniowa płyt pomostowych z betonu lekkiego zbrojonego prętami GFRP w świetle badań doświadczalnych, Inżynieria i Budownictwo, 9, 500-504, 2016.
3. Wiater A., Siwowski T.: Nośność na ścinanie zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi FRP w świetle wybranych procedur obliczeniowych, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury / Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, XXXIV, 64 (2/II/17), 267-297, 2017.

4. Wiater A.: Research on the lightweight concrete bridge deck slabs reinforced with GFRP composite bars, *Architecture Civil Engineering Environment*, 10, 4, 115-120, 2017.
5. Wiater A., Siwowski T.: Lightweight concrete bridge deck slabs reinforced with GFRP composite bars, *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 16, 4, 279-293, 2017.
6. Wiater A., Siwowski T.: Serviceability and ultimate behaviour of GFRP reinforced lightweight concrete slabs: Experimental test versus code prediction, *Compos. Struct.* 112020, 239, 1-13, 2020.
7. Wiater A., Siwowski T.: Nośność na ścinanie płyt pomostowych z betonu lekkiego zbrojonych prętami kompozytowymi GFRP w świetle badań doświadczalnych, *Materiały Budowlane*, 573, 5, 34-37, 2020.
8. Wiater A., Siwowski T.: Comparison of tensile properties of glass fibre reinforced polymer rebars by testing according to various standards. *Materials*, 13, 4110, 2020.
9. Ziaja D., Jurek M., Wiater A.: Elastic Wave Application for Damage Detection in Concrete Slab with GFRP Reinforcement, *Materials*, 15(23), 8523, 2022.

Podczas badań i analiz przeprowadzonych w rozprawie Doktorantka zaplanowała poszerzenie stanu wiedzy o nowe kierunki badań płyt pomostowych LWC/FRP obejmujące:

- ocenę przyczepności zbrojenia FRP do betonu lekkiego wraz z wyznaczeniem współczynnika przyczepności do betonu (parametr niezbędny do projektowania elementów betonowych z założeniem efektywnego wykorzystania materiałów),
- ocenę odporności na uderzenie płyt (podczas badań zaobserwowano m.in. mniejszą odporność na uderzenia płyt z betonu lekkiego),
- ocenę płyt LWC/GFRP w kontekście trwałości konstrukcji wraz z ewentualną modyfikacją składu mieszanki betonowej (w rozprawie był analizowany jedynie aspekt wytrzymałościowy betonu lekkiego),
- stworzenie jednolitych i zwartych procedur projektowych dla elementów LWC/FRP, zgodnych z filozofią projektowania przyjętą w nowej edycji norm europejskich (Eurokodów),
- zwiększenie efektywności wykorzystania prętów FRP w konstrukcjach betonowych (NWC/LWC) poprzez sprężenie kompozytów,
- opracowanie skutecznych i efektywnych metody badań nieniszczących NDT (Non-Destructive Testing) i monitoringu SHM (Structural Health Monitoring) dla betonowych konstrukcji ze zbrojeniem niemetalicznym,
- prace naukowe i badania nad rozwojem prętów hybrydowych (zbudowanych z różnych włókien) poprawiających parametry prętów GFRP,
- popularyzację zalet płyt typu LWC/FRP oraz procedur ich projektowania w środowisku projektantów mostowych.

Doktorantka zrealizowała szereg badań przez czynny udział w kilku realizowanych w KDiM PRz grantach, związanych z zastosowaniem materiałów kompozytowych FRP w obiektach mostowych:

- OptiDeck - Inteligentny system pomostowy z kompozytów polimerowych do budowy i modernizacji drogowych obiektów mostowych, wyposażony w czujniki światłowodowe do monitoringu konstrukcji i kontroli obciążenia (projekt finansowany przez Narodowe Centrum

Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER IX, numer grantu 0070/L-9/2017, beneficjent: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza),

– Innowacyjne prefabrykaty łukowe o podwyższonej trwałości dla budownictwa komunikacyjnego (projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjny Rozwój, numer grantu POIR.02.03.02-22-0006/18, beneficjent: Optem Sp. z o.o.),

– Alternatywa utylizacji turbin wiatrowych starszej generacji. Wykorzystanie kompozytowych śmigieł do budowy mostowych obiektów inżynierskich (projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjny Rozwój, numer grantu POIR.02.03.02-08-0004/19, beneficjent: Przedsiębiorstwo Wielobranżowe ANMET Andrzej Adamcio),

– System wzmacniania podłoża prętami kompozytowymi GFRP wraz z monitoringiem światłowodowym (projekt finansowany przez Podkarpacie Centrum Innowacji, numer grantu PCI N2\_56, beneficjent: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza).

– Innowacyjna siatka z prętów kompozytowych GFRP do zbrojenia betonowych płyt pomostowych drogowych obiektów mostowych (projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjny Rozwój, nr POIR.02.03.02-04-0049/20, beneficjent: Trokotex Polymer Group Sp. z o.o.),

– System monitorowania i diagnostyki konstrukcji sprężonych za pomocą wbudowanych czujników światłowodowych (DFOS) (projekt finansowany przez Podkarpacie Centrum Innowacji, nr N3\_056, beneficjent: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza),

– Hybrydowy dźwigar z recyklowanych łopat turbin wiatrowych i betonu niekonwencjonalnego do budowy i modernizacji obiektów mostowych wyposażony w czujniki światłowodowe do monitoringu konstrukcji (projekt finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER XIII, nr 0031/L-13/2022, beneficjent: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza),

– EduRes - Technology education in the digital era supported by the significant use of research results (projekt współfinansowany w ramach programu Erasmus+, numer grantu 2020-1-PL01-KA203-082219, instytucja koordynująca: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza).

## 5. Uwagi edytorskie

1. Należy zamienić w całym tekście frazę: „*żywołność* zmęczeniowa” na „*nośność* zmęczeniowa”
2. Należy wszystkie symbole i oznaczenia zamieścić w jednym zestawieniu: *Symbole* zaraz po Spisie treści pracy lub przed Piśmiennictwem.
3. Str. 7: „których *nienaprawienie* spowoduje skrócenie okresu bezpiecznej eksploatacji” , powinno być „których *brak naprawy* spowoduje skrócenie okresu bezpiecznej eksploatacji”.
4. Str. 10: „*Krytycznymi stanami granicznymi* warunkującymi możliwość zastosowania płyt LWC/FRP w pomostach mostów drogowych są *nośność* na ścinanie i *żywołność* zmęczeniowa”. Należy zmienić na „*Oceną stanów granicznych warunkujących* możliwość

zastosowania płyt LWC/FRP w pomostach mostów drogowych są nośność na ścinanie i *nośność zmęczeniowa*”.

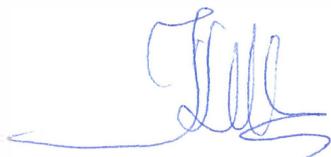
5. Str. 11: Należy usunąć frazy: „nie pozwala na ocenę ~~– sprawdzanie~~ wszystkich stanów granicznych z satysfakcjonującą dokładnością, wymaganą w projektowaniu obiektów mostowych. Istnieje jednak możliwość – w oparciu o wyniki badań doświadczalnych – modyfikacji ~~– uzupełnienia~~ istniejących procedur dla uzyskania satysfakcjonującej zgodności obliczeń z wynikami badań doświadczalnych”.
6. Str. 12: „Przegląd wiedzy był podstawą do opracowania programu badań własnych (rozdział 4). Program obejmował badania materiałowe betonu lekkiego i *prętów* niemetalicznych”.
7. Str. 12: „taką *weryfikacje*” zamienić na „taką *weryfikację*”.
8. Str. 12: „nośności na *ściananie*” zamienić na „nośności na *ścinanie*”
9. Usunąć ze wszystkich stron *i/lub* i zostawić tylko słowo *lub*
10. Str. 27: W pracach [34], [35] oraz [36] ~~oraz~~ ich autorzy...
11. Str. 91: Rys. 5.9. Postacie zniszczenia płyt z betonu lekkiego: ~~ścisnienie~~ *ściananie* ukośne (shear cracking) i ~~zmiążdżenie~~ *zmiążdżenie* betonu.

Jest jeszcze w pracy szereg innych błędów językowych, ale nie będę ich dalej opisywać.

## 6. Podsumowanie recenzji

W recenzowanej pracy doktorskiej Pani mgr inż. Anna Wiater wykazała się dobrą znajomością stanu wiedzy w dziedzinie płyt pomostowych oraz zastosowanych procedur obliczeniowych. Zaprezentowała dosyć bogatą analizę wyników badań oraz obliczeń. Jednak praca powinna bezwzględnie zawierać szczegółowy Załącznik z dokumentacją zdjęciową wszystkich belek, odrębnie z podziałem na kategorie belek i tabelaryczne zestawienie wyników badań (ugięć, odkształceń, zarysowania płyt) oraz szczegółowe analizy obliczeniowe zawarte w tekście pracy.

Biorąc powyższe podsumowanie pod uwagę uważam, że rozprawa doktorska spełnia wszystkie warunki merytoryczne i formalne stawiane dysertacjom doktorskim przez środowisko naukowe oraz przepisy ustawowe określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 – oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 22.09.2011 w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich. Wszystkie cele oraz teza prac zostały osiągnięte i udowodnione. Pracę oceniam bardzo pozytywnie i z pełnym przekonaniem stawiam wniosek o dopuszczenie Doktorantki do publicznej obrony pracy doktorskiej.



dołz', 2.08.2023