

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

Rzeszów, 19.12.2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr inż. Konrada Szczepańskiego
pt. „*Redystrybucja momentów zginających*
w dwuprzęsłowych belkach i płytach ciągłych ze zbrojeniem typu FRP”

1. PRZEDMIOT I PODSTAWA FORMALNA RECENZJI

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Konrada Szczepańskiego pt. „*Redystrybucja momentów zginających w dwuprzęsłowych belkach i płytach ciągłych ze zbrojeniem typu FRP*”, przygotowana na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Renata Kotynia.

Recenzję wykonałem na podstawie następujących dokumentów:

- [1] Pismo Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej dr. hab. inż. Artura Wirowskiego, prof. uczelni z dnia 13.10.2025 r.
- [2] Rozprawa doktorska mgr inż. Konrada Szczepańskiego pt. „*Redystrybucja momentów zginających w dwuprzęsłowych belkach i płytach ciągłych ze zbrojeniem typu FRP*”, Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Łódź, 2025 r.
- [3] Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668, tekst ujednolicony z 2025 r.).
- [4] Recenzje w postępowaniach o awans naukowy. Poradnik. Rada Doskonałości Naukowej, Warszawa, 2022 r.

Zgodnie z art.187 ust.1 i 2 ustawy [3] oraz poradnikiem RDN [4] niniejsza recenzja zawiera w szczególności następujące oceny:

- a) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje **ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata** w dyscyplinie „*inżynieria lądowa, geodezja i transport*”;
- b) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje **umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** przez Kandydata;
- c) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**.

W uzupełnieniu ocen wg wymagań ustawowych [3] w recenzji przedstawiłem także szerszą ocenę merytoryczną rozprawy oraz oceniłem możliwość praktycznego zastosowania jej wyników.

2. CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA ROZPRAWY

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Kandydata [2] jest zagadnienie redystrybucji momentów zginających w dwuprzęsłowych belkach i płytach ciągłych, zbrojonych prętami

kompozytowymi FRP. Redystrybucja w statycznie niewyznaczalnych konstrukcjach żelbetowych to zjawisko fizyczne, polegające na zmianie rozkładu sił wewnętrznych w elemencie, w którym dochodzi do uplastycznienia zbrojenia stalowego, co umożliwia efektywniejsze wykorzystanie materiału i niweluje nadmierne naprężenia w jednym miejscu, przenosząc je do innych, mniej obciążonych stref konstrukcji. Zjawisko redystrybucji ma kluczowe znaczenie w projektowaniu, pozwalające na bardziej realistyczną analizę nośności granicznej, w porównaniu do uproszczonych modeli sprężystych, w których zakłada się liniowy rozkład sił wewnętrznych. Jednakże w przypadku elementów betonowych, zbrojonych prętami kompozytowymi FRP, nie dochodzi do uplastycznienia zbrojenia, więc analogiczna redystrybucja jest praktycznie niemożliwa. Kandydat w rozprawie postanowił sprawdzić, czy w elementach betonowych zbrojonych prętami FRP redystrybucja może wystąpić, i w przypadku potwierdzenia tego zjawiska, wyodrębnić parametry decydujące o stopniu (poziomie) redystrybucji.

Podstawowa treść rozprawy liczy 215 stron, podzielonych na 7 rozdziałów. Rozprawa zawiera także streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz stosowanych oznaczeń, spis rysunków i tabel oraz spis piśmiennictwa. Zgodnie z art.187 ust.3 ustawy [3] rozprawa ma charakter **monografii naukowej**, obejmującej:

- a) wstęp, zawierający wprowadzenie, cel i tezę rozprawy (rozdział 1);
- b) obszerny przegląd stanu wiedzy (rozdział 2 i 3);
- c) program eksperymentalnych badań własnych (rozdział 4);
- d) wyniki badań własnych (rozdział 5);
- e) parametryczne badania numeryczne (rozdział 6);
- f) wnioski końcowe i kierunki dalszych badań (rozdział 7).

Integralną częścią rozprawy jest ponad 400-stronicowy Załącznik z wynikami poszczególnych pomiarów z badań doświadczalnych. Abstrahując od potrzeby jego zamieszczania w rozprawie, na pewno nie powinien być on załączony do rozprawy w formie papierowego wydruku.

Główną i oryginalną część rozprawy Kandydata stanowi eksperymentalna i numeryczna ocena zdolności betonowych belek/płyt zbrojonych prętami FRP do redystrybucji momentów zginających. Kandydat wykazał, że taka redystrybucja jest możliwa, i to w stopniu znaczącym. Kolejnym ważnym aspektem rozprawy jest określenie najważniejszych czynników wpływających na zdolność belek/płyt do redystrybucji momentów zginających. Kandydat wykazał, że w odróżnieniu od elementów zbrojonych stalą, w elementach ze zbrojeniem kompozytowym o zdolności do redystrybucji decydują plastyczne właściwości betonu, morfologia zarysowania oraz sztywność elementu. Główne cele pracy Kandydat zrealizował przez analizę dotychczasowego stanu wiedzy oraz przegląd zaleceń normowych w zakresie przedmiotu rozprawy, własne badania doświadczalne oraz numeryczną analizę parametryczną, bazującą na parametrach zidentyfikowanych w badaniach. Realizacja głównych celów pracy naukowej pozwoliła Kandydatowi w sposób wystarczający udowodnić tezę rozprawy.

3. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

3.1. Geneza i zasadność podjęcia tematu

Redystrybucja sił wewnętrznych w konstrukcjach żelbetowych to zjawisko polegające na zmianie rozkładu sił wewnętrznych w układach statycznie niewyznaczalnych (bełkach/płytach ciągłych lub ramach). Dochodzi do niej w wyniku powstawania odkształceń plastycznych stali zbrojeniowej lub zarysowań betonu w miejscach najbardziej wyciężonych. Gdy dany przekrój

osiąga swoją nośność, "przekazuje" nadmiar obciążenia do mniej obciążonych, sztywniejszych części konstrukcji. Zjawisko to jest wykorzystywane w projektowaniu konstrukcji, gdyż pozwala na optymalizację ilości zbrojenia. Praktyczne znaczenie redystrybucji polega na zmniejszeniu zagęszczenia prętów w węzłach (nad podporami) i lepszym wykorzystaniu rezerw nośności materiału. Konstrukcje zdolne do redystrybucji są także bardziej odporne na błędy projektowe lub nieprzewidziane obciążenia lokalne. W współczesnym projektowaniu wg Eurokodu 2, dopuszcza się redystrybucję momentów w analizie liniowo-sprężystej, o ile zachowane są limity stopnia redystrybucji (zależne od klasy ciągliwości stali i położenia osi obojętnej).

Uzasadnienie podjęcia tematu przedstawił Kandydat dość lakonicznie we wprowadzeniu (p.1.1). Nie ulega wątpliwości, że problematyka optymalnego projektowania konstrukcji betonowych ze zbrojeniem kompozytowym (niemetalicznym) wpisuje się w obecne trendy w inżynierii lądowej i jest jedną z najbardziej aktualnych. Ze względu na swoje doskonałe własności mechaniczne i fizyczne (m.in. odporność na korozję) pręty kompozytowe coraz częściej i szerzej zastępują konwencjonalne pręty stalowe do zbrojenia konstrukcji betonowych. Pręty kompozytowe mają jednak podstawową wadę: brak plastyczności. Kompozyt FRP pracuje sprężysto aż do zniszczenia, co praktycznie uniemożliwia redystrybucję sił przy zniszczeniu. Dlatego sprawdzenie, czy w konstrukcjach betonowych zbrojonych prętami FRP dochodzi do redystrybucji, w jakim stopniu i od czego ona zależy, wydaje się uzasadnione.

Kandydat jednak uważa, że *„zagadnienie redystrybucji w belkach zbrojonych prętami GFRP zostało już opisane w publikacjach, gdzie wyraźnie udowodniono, że mimo zdecydowanie mniejszej odkształcalności prętów typu FRP w stosunku do stali oraz ich liniowo-sprężystej charakterystyki naprężenie-odkształcenie, redystrybucja momentów rzeczywiście występuje, a przy tym może mieć kluczowe znaczenie dla nośności elementów”*. Na tym tle badania naukowe będące przedmiotem rozprawy doktorskiej Kandydata, chociaż dobrze wpisują się zarówno w trendy naukowe jak i potrzeby rynkowe współczesnej inżynierii lądowej, wydają się **słabo uzasadnione w rozprawie**.

Motywuując podjęcie własnych badań, Kandydat wskazał na konieczność wyjaśnienia „wielu nieścisłości” dotyczących: *„przyczepności zbrojenia do betonu, stopnia zbrojenia, modułu sprężystości zbrojenia, wpływu skrupowania poprzecznego oraz wpływu wymiarów elementu na stopień redystrybucji”*. Wyjaśnienie niektórych z tych „nieścisłości”, nazwanych dalej parametrami wpływającymi na zdolność elementów do redystrybucji, za pomocą badań eksperymentalnych i numerycznej analizy parametrycznej jest jednym z głównych celów rozprawy. Pomimo słabego uzasadnienia oraz ograniczonej motywacji podjęcie przez Kandydata badań nad redystrybucją sił wewnętrznych w elementach zbrojonych prętami FRP **uwzględniłem za ważne i uzasadnione**.

3.2. Cele oraz teza rozprawy

W rozprawie doktorskiej Kandydat powinien rozwiązać problem naukowy, realizując postawiony cel (cele) i/lub udowadniając sformułowaną tezę (tezy) metodami naukowymi. W recenzowanej rozprawie Kandydat nie sprecyzował problemu naukowego, lecz **sformułował jedną tezę i postawił trzy cele badawcze**. Dowód tezy oraz stopień realizacji celów rozprawy zostały omówione przez Kandydata we wnioskach końcowych rozprawy.

W świetle cytowanego powyżej stwierdzenia Kandydata (p.3.1), pierwsza część **tezy rozprawy** jest bezprzedmiotowa. Kandydat już przecież wie, że „*plyty/belki zbrojone prętami FRP są zdolne do redystrybucji momentów zginających*”, więc nie ma tu nic do udowodnienia. Natomiast druga część tezy, mówiąca o możliwości „*wyodrębnienia parametrów jednoznacznie decydujących o stopniu redystrybucji*” jest jak najbardziej uzasadniona i niezbędna do rozwiązania problemu naukowego, jakim jest redystrybucja sił wewnętrznych w elementach zbrojonych FRP.

Sformułowane przez Kandydata trzy **cele rozprawy**: weryfikacja zdolności przedmiotowych elementów do redystrybucji, określenie parametrów wpływających na tą zdolność oraz wykonanie numerycznej analizy parametrycznej, w celu określenia stopnia wpływu poszczególnych parametrów, są powtórzeniem obu części tezy. Jednakże słowo „weryfikacja” użyte do sformułowania pierwszego celu prawidłowo oddaje charakter problemu naukowego, którego rozwiązania podjął się Kandydat. Dwa pozostałe cele dotyczą w praktyce tego samego – identyfikacji parametrów i wielkości wpływu. Brakuje natomiast celu związanego z uzupełnieniem i/lub weryfikacją zapisów normowych, którym Kandydat poświęcił przecież obszerny rozdział w rozprawie.

W świetle przedstawionej wyżej genezy i zasadności podjęcia tematu, sformułowane przez Kandydata teza i cele rozprawy, pomimo pewnych zastrzeżeń, mają **uzasadnienie naukowe**, a także są **istotne i ważne** z punktu widzenia praktycznego wdrożenia prętów FRP w budownictwie. Opisują one także pośrednio problem naukowy (nie sprecyzowany w rozprawie), który Kandydat zamierzał rozwiązać metodami naukowymi.

3.3. Przegląd stanu wiedzy

Przegląd stanu wiedzy w przedmiocie rozprawy jest bardzo obszerny, bo zawiera aż 88 stron (ponad 40% rozprawy) i jest zawarty w rozdziałach 2 (badania) i 3 (normy). Jak zwykle w rozprawach doktorskich, powstałych pod opieką prof. Renaty Kotyni, przegląd jest zrobiony **profesjonalnie, bardzo szeroko i rzetelnie**, obejmując zdecydowaną większość opublikowanych prac naukowych w przedmiocie rozprawy. Nie należą jednak do niego elementy zbrojone stalą, więc zamieszczenie w rozprawie przeglądu badań nad redystrybucją w elementach żelbetowych (p.2.1) jest moim zdaniem nieuzasadnione. Właściwy przegląd obejmuje 21 prac naukowych z lat 1997 – 2023, stanowiących bazę danych łącznie 119 elementów zginanych, zbrojonych prętami FRP. Efektem przeglądu jest identyfikacja i analiza najważniejszych parametrów, wpływających na tzw. stopień redystrybucji β . Są to: stosunek stopnia zbrojenia elementu nad podporą i w przęśle ρ_{sp}/ρ_{su} , wytrzymałość betonu na ściskanie f_{ck} oraz stopień zbrojenia poprzecznego (skrępowania) ρ_v . Podsumowaniem przeglądu jest jakościowa i ilościowa (dość ograniczona) ocena wpływu ww. czynników na redystrybucję. Brakuje jednak wniosków dotyczących wskazania (wraz z uzasadnieniem) parametrów zmiennych do badań własnych.

Nie do końca zrozumiałe jest dla recenzenta umieszczenie w rozprawie omówienia 5 norm projektowych, albowiem **prawie żadna z nich nie uwzględnia redystrybucji** w projektowaniu elementów zginanych, zbrojonych FRP, z wyjątkiem lakonicznych zaleceń w nowej edycji Eurokodu 2. Wystarczyło stwierdzenie tego faktu w genezie problemu badawczego. Z przeglądu bowiem nic nie wynika dla przedmiotu rozprawy, a ponadto Kandydat nie podjął np. próby uzupełnienia Eurokodu 2 o własną propozycję, powstałą na podstawie badań własnych. A przecież w taki właśnie sposób powinna być skwantyfikowana jego praca badawcza, aby miała praktyczny sens.

Przegląd stanu wiedzy związanego z redystrybucją momentów w elementach zginanych zbrojonych prętami FRP uzasadnia jednak **prawidłowy wybór problemu naukowego** przez Kandydata. Zagadnienie redystrybucji budzi bowiem od 25 lat duże zainteresowanie badaczy, a wyniki dotychczasowych badań są dalekie od ilościowego wyjaśnienia problemu. Nie zostały one bowiem dotychczas skwantyfikowane w postaci praktycznych wymagań normowych. Na tym tle badania naukowe Kandydata dobrze wpisują się zarówno w trendy naukowe jak i potrzeby rynkowe współczesnej inżynierii lądowej w obszarze budownictwa. Podjęcie się przez Kandydata badań nad zagadnieniem redystrybucji **uwazam za ważne i uzasadnione**.

3.4. Program badań i metody badawcze

Badania doświadczalne zostały wykonane na 4 płytach betonowych o wymiarach 180 x 800 x 5200 mm, wykonanych z betonu C25/30. Dwie płyty miały zbrojenie z prętów kompozytowych GFRP o średnicy 10 mm i różnym stopniu zbrojenia w przekrojach podporowym i przęsłowym, pozostałe dwie belki były zbrojone konwencjonalnie prętami stalowymi, również o różnym stopniu zbrojenia w obu przekrojach. Parametrem zmiennym w badaniach był jedynie stosunek stopni zbrojenia obu przekrojów ρ_{sp}/ρ_{su} . Podstawowe badania doświadczalne płyt zostały poprzedzone konwencjonalnymi badaniami materiałowymi betonu, prętów kompozytowych i stalowych wg adekwatnych procedur normowych.

Płyty były badane w układzie dwuprzęsłowym, ciągłym, pod obciążeniem statycznym w schemacie pięciopunktowego zginania. Podczas badań mierzono odkształcenia i zarysowanie betonu, odkształcenia prętów zbrojeniowych oraz przemieszczenia płyt. Zidentyfikowano i opisano również postać zniszczenia poszczególnych płyt. Do badań Kandydat wykorzystał rozbudowany układ pomiarowy, obejmujący konwencjonalne tensometry i czujniki indukcyjne LVDT, a także cyfrową korelację obrazu DIC i czujniki światłowodowe DFOS. Tak bogaty i nowoczesny układ pomiarowy pozwolił Kandydatowi na zebranie bardzo obszernej bazy wyników badań (patrz Załącznik). Jednakże wykorzystanie większości z nich do rozwiązania problemu badawczego rozprawy jakim jest redystrybucja momentów, jest ograniczone (por. wzór (2.1), s.65).

Zrealizowany program badawczy **budzi jednak pewne wątpliwości**, które Kandydat powinien wyjaśnić podczas publicznej obrony rozprawy:

- a) jaki był cel badania płyt zbrojonych prętami stalowymi, nie będących przedmiotem rozprawy? jakie praktyczne wnioski wyciągnął Kandydat z porównania redystrybucji w płytach z różnym zbrojeniem (FRP vs. stal)?
- b) badane elementy, nazywane przez Kandydata płytami, nie spełniają normowej definicji płyty wg PN-EN 1992-1-1 (*płyta jest elementem, dla którego wysokość (grubość) przekroju jest co najmniej pięciokrotnie mniejsza niż minimalny wymiar w rzucie*); w badaniach Kandydata $l_{min}/h = 800/180 \approx 4,4$; czy wskazana powyżej niekonsekwencja w doborze wymiarów elementu miała wpływ na wnioski dotyczące redystrybucji?
- c) jedynym parametrem zmiennym w badaniach Kandydata był stosunek stopni zbrojenia ρ_{sp}/ρ_{su} ; dlaczego i na jakiej podstawie Kandydat przyjął w badaniach dwie wielkości tego stosunku: 0,81 oraz 1,48;
- d) Kandydat zaprojektował elementy „*aby stworzyć warunki sprzyjające redystrybucji momentów*” (s.104); w praktyce elementy zginane projektuje się na nośność przekrojów, a redystrybucja jest zjawiskiem towarzyszącym wyczerpaniu nośności jednego przekrojów; czy zatem wyniki tak zaprojektowanych badań mają sens praktyczny?
- e) czy wnioskowanie o redystrybucji na podstawie wyników badań zaledwie dwóch elementów jest wiarygodne i uzasadnione?

3.5. Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza

Omówienie wyników badań doświadczalnych zawiera rozdział 4 rozprawy. Zawarto w nim szczegółową analizę odkształceń i zarysowania betonu, odkształceń prętów kompozytowych, przemieszczeń płyt oraz mechanizmów ich zniszczenia. Uzyskane przez Kandydata wyniki badań doświadczalnych i ich analiza mają dużą wartość poznawczą i stanowią wkład do istniejącego stanu wiedzy w zakresie nośności na zginanie płyt betonowych zbrojonych prętami FRP, jednakże **nie są bezpośrednio związane** z problemem naukowym rozprawy. Zagadnienie redystrybucji sił wewnętrznych, będące głównym przedmiotem rozprawy zostało omówione w p.5.2 (w zakresie M) oraz 5.3 (w zakresie V) rozprawy, a jedynym parametrem niezbędnym do jego analizy była nośność graniczna płyt, wyznaczona bezpośrednio, bez konieczności wykonywania złożonych pomiarów jw.

Kandydat określił stopień redystrybucji β momentów zginających i sił poprzecznych (w %) i wykazał, że zależy on od stosunku ρ_{sp}/ρ_{su} . Jednakże ilościowe efekty badań (β_M, β_V) Kandydat uzyskał jedynie dla dwóch wartości parametru ρ_{sp}/ρ_{su} , co stawia pod znakiem zaufania wiarygodność statystyczną uzyskanego wyniku. Tym bardziej, że Kandydat nie porównał go chociażby z wynikami innych badaczy, które tak szeroko cytował i analizował w rozdziale 2. Rozdział 4, będący bez wątpienia najważniejszą częścią rozprawy, nie zawiera podsumowania wyników badań doświadczalnych, a częściowe wnioski z badań są podane dopiero w podsumowaniu rozprawy.

Badania doświadczalne przeprowadzone przez Kandydata nie pozwoliły na wyznaczenie wiarygodnego stopnia redystrybucji β jak również wpływu parametru ρ_{sp}/ρ_{su} (ani jakiegokolwiek innego) na ten stopień. Dlatego nakład pracy na przygotowanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych wydaje się nieadekwatny do uzyskanego rezultatu. Tą krytyczną opinię częściowo weryfikuje wykorzystanie wyników badań do walidacji modelu numerycznego, co oceniono w p.3.6.

3.6. Analiza numeryczna i badania parametryczne

Analiza numeryczna i badania parametryczne coraz częściej zastępują kosztowne i czasochłonne badania doświadczalne, prowadzone w celu rozwiązywania różnych problemów naukowych w inżynierii lądowej. Dlatego podjęcie przez Kandydata w rozprawie badań numerycznych wpisuje się w obecny trend, którego aktualność i znaczenie potwierdza także przegląd piśmiennictwa z ostatnich 25 lat (rozdział 2). Podstawowym warunkiem poprawności i wiarygodności analiz numerycznych jest **walidacja modeli obliczeniowych** (najczęściej wykonywanych za pomocą MES), wykorzystanych do badań parametrycznych. Walidacja odbywa się przez stwierdzenie odpowiedniej zgodności wyników badań doświadczalnych i analogicznych badań, symulowanych numerycznie.

Do badań parametrycznych Kandydat wykonał model numeryczny elementów badawczych (tj. płyt zbrojonych prętami FRP) i za pomocą symulacji MES odtworzył eksperyment, opisany w rozdziale 4. Model geometrii i materiałów płyt oraz obciążenia został odtworzony przy pomocy oprogramowania ATENA zgodnie z ogólnymi zasadami analiz numerycznych. Wątpliwości może budzić jedynie model przyczepności prętów GFRP do betonu (rys.6.4), którego Kandydat nie opisał, a który różni się od publikowanych wyników badań przyczepności prętów GFRP¹.

¹ Saad, S., & Polak, M. A. (2025). Bond Behavior of Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars Embedded in Concrete: A Review. *Materials*, 18(14), 3367. <https://doi.org/10.3390/ma18143367>

Badanie zgodności (walidację) własnego modelu numerycznego Kandydat ograniczył jedynie do porównania ugięć i odkształceń prętów FRP (p.6.2). Tymczasem do analizy zagadnienia redystrybucji niezbędna jest zgodność dwóch innych parametrów: wartości siły niszczonej (nośność graniczna) oraz postaci zniszczenia. Stopnia zgodności modelu MES z eksperymentem w tym zakresie Kandydat w rozprawie nie podał. Brak ww. informacji stawia pod znakiem zapytania **wiarygodność autorskiego modelu numerycznego**, a tym samym wyniki badań parametrycznych, przeprowadzonych za pomocą tego modelu. Tą wątpliwość potwierdza także m.in. **brak zgodności stopnia redystrybucji β** uzyskanego z badań doświadczalnych (tabela 5.2) oraz numerycznych (rys. 6.12) dla tych samych stosunków ρ_{sp}/ρ_{su} (0,81 i 1,48), tj. odpowiednio 7,58/24,39 oraz ok.-5,00/12,00.

Badania parametryczne Kandydat wykonał dla trzech parametrów płyt betonowych: stosunku ρ_{sp}/ρ_{su} , wytrzymałości betonu na ściskanie (f_{ck}) i rodzaju prętów (GFRP vs. CFRP). Ponadto, adaptując model numeryczny płyt, kandydat przeprowadził **podobną analizę dla belek** w zakresie wpływu stosunku ρ_{sp}/ρ_{su} oraz wytrzymałości betonu na ściskanie (f_{ck}). Zdaniem recenzenta, zmiana geometrii (płyta/belka) oraz rodzaju prętów (GFRP/CFRP wraz z ich modelami materiałowymi i przyczepności) wymaga powtórnej walidacji nowego modelu. Bez walidacji doświadczalnej nowego modelu belki zbrojonej prętami CFRP wyniki badań parametrycznych są obciążone zbyt dużym błędem i są mało wiarygodne.

Abstrahując jednak od pełnej poprawności wykorzystanych modeli numerycznych i końcowej wiarygodności uzyskanych wniosków, przeprowadzone przez Kandydata numeryczne badania parametryczne wykazały w wystarczającym stopniu jego ogólną wiedzę teoretyczną, umiejętność samodzielnego prowadzenia badań z wykorzystaniem MES oraz zadowalającą oryginalność rozwiązania problemu naukowego.

3.7. Podsumowanie rozprawy

Podsumowanie rozprawy zawiera **zestawienie głównych wniosków**, sformułowanych przez Kandydata na podstawie własnych prac badawczych, oraz sugerowane przez Kandydata kierunki dalszych badań. W podsumowaniu Kandydat odniósł się bezpośrednio do tezy i celów rozprawy, a poszczególne wnioski końcowe (jest ich w sumie 21) zawierają informacje potwierdzające udowodnienie tezy i realizację celów.

Kandydat **udowodnił tezę** o zdolności do redystrybucji płyt i belek ciągłych, zbrojonych prętami FRP. Tezę potwierdziły już wyniki przeglądu piśmiennictwa. W przypadku płyt zbrojonych prętami GFRP Kandydat udowodnił tezę w sposób przekonujący na podstawie własnych badań doświadczalnych. W przypadku belek i zbrojenia CFRP dowód uzyskany na podstawie numerycznych badań parametrycznych nie jest już tak przekonujący, lecz zadowalający.

Stopień realizacji celów rozprawy jest dobry. Kandydat w satysfakcjonujący sposób zweryfikował zdolność płyt i belek zbrojonych prętami FRP do redystrybucji oraz zidentyfikował najważniejsze parametry, od których ta zdolność zależy. Wykonał to za pomocą badań doświadczalnych i numerycznej analizy parametrycznej. Ze względu na zastosowane narzędzia badawcze, jakość i wiarygodność wyników uzyskanych z obu badań jest jednak różna, ze zdecydowaną przewagą badań eksperymentalnych (choć w ograniczonym zakresie).

Wnioski końcowe z rozprawy mają **charakter wyłącznie jakościowy**, co znacząco ogranicza ich praktyczne wykorzystanie. Najważniejszym wnioskiem z rozprawy jest stwierdzenie o dominującym znaczeniu właściwości plastycznych betonu i jego zarysowania (tj. sztywności elementu) na redystrybucję momentów w płytach/belkach zbrojonych prętami FRP. Wniosek ten wydaje się słuszny, chociaż wynika on tylko pośrednio z badań Kandydata. Ważnym wnioskiem jest podkreślenie dynamicznego charakteru redystrybucji, wpływającego znacząco na jej stopień. Pozostałe wnioski są zbyt szczegółowe lub oczywiste, a niektóre nie dotyczą problemu rozprawy (np. nośność na ścinanie, zbrojenie stalowe). Kandydat nie sprecyzował żadnego wniosku, dotyczącego uzupełnienia i/lub modyfikacji zapisów normowych (np. w nowym Eurokodzie 2), uwzględniających redystrybucję.

Mając świadomość ograniczeń własnych wniosków, Kandydat **sprecyzował kierunki dalszych badań** w przedmiocie rozprawy. Dotyczą one głównie wpływu najważniejszych parametrów zidentyfikowanych w rozprawie: właściwości betonu, charakteru obciążenia, lecz także rodzaju zbrojenia FRP oraz geometrii elementu i układu zbrojenia. Kierunki te wydają się słuszne w świetle wniosków z rozprawy. Dziwić jednak może brak propozycji skwantyfikowania wyników badań (cudzych i własnych) w postaci zapisów normowych. Bez tego **praktyczne znaczenie** przeprowadzonych oraz dalszych badań w przedmiocie rozprawy będzie niewielkie.

4. UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

Poniżej przedstawiłem zbiorczo **uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz wątpliwości i pytania**, które sformułowałem po analizie rozprawy i jej ocenie merytorycznej, przedstawionej w p.3 (kolejność zgodna z tekstem rozprawy).

- 4.1. Program badawczy przedstawiony w rozdziale 4 rozprawy budzi pewne wątpliwości, które sprecyzowałem w p.3.4 opinii. Wątpliwości te wymagają wyjaśnienia.
- 4.2. W jaki sposób był obliczony moment niszczący w stanie sprężystym ($M_{u,cal}$) do wyznaczenia stopnia redystrybucji β ? Oba wzory (2.1) oraz (5.1) podają niejasne i sprzeczne informacje w tej kwestii.
- 4.3. W celu uwiarygodnienia przyjętego w analizie numerycznej modelu przyczepności prętów GFRP należy go porównać z wynikami innych badań, np. z pracy: *Saad, S., & Polak, M. A. (2025). Bond Behavior of Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars Embedded in Concrete: A Review. Materials, 18(14), 3367. <https://doi.org/10.3390/ma18143367>*. proszę o przedstawienie takiego porównania.
- 4.4. Do analizy zagadnienia redystrybucji niezbędna jest zgodność eksperymentu oraz symulacji numerycznej w dwóch kluczowych parametrach: wartość siły niszczącej (nośność graniczna) oraz postać zniszczenia. Jak w tym zakresie wyglądało porównanie „eksperyment vs. MES”?
- 4.5. Zdaniem recenzenta zmiana geometrii (płyta vs. belka) oraz rodzaju prętów (GFRP vs. CFRP) wymaga powtórnej walidacji modeli. Bez walidacji doświadczalnej tych nowych modeli wyniki badań parametrycznych przeprowadzonych za ich pomocą są obarczone zbyt dużym błędem i mało wiarygodne.

4.6. Czy i w jakim stopniu różni się zjawisko redystrybucji w elementach płytowych od elementów belkowych? Od czego głównie – z wyjątkiem geometrii przekroju - zależą te różnice?

4.7. Zdziwienie może budzić wniosek dotyczący porównania wyników badań eksperymentalnych i numerycznych (s.196, wniosek trzeci od końca), poddający w wątpliwość jakość walidacji modelu MES. Czyżby zatem Kandydat także kwestionował wiarygodność wyników własnych badań numerycznych, przedstawionych w rozdziale 6?

4.8. Czy 121 (łącznie z badaniami Kandydata) zbadanych elementów betonowych zbrojonych prętami FRP nie wystarcza do ilościowej oceny zjawiska redystrybucji, umożliwiającej uzupełnienie zapisów normowych i ujęcie tego ważnego zjawiska w projektowaniu?

5. OCENA STRONY FORMALNEJ I REDAKCJI ROZPRAWY

Układ rozprawy jest zasadniczo poprawny zarówno od strony formalnej, jak również merytorycznej. Redakcja tekstu rozprawy jest właściwa, na dobrym poziomie, bez większych błędów formalnych i edytorskich. Język rozprawy jest poprawny technicznie, spójny i zrozumiały.

Poniżej przedstawiłem kilka najważniejszych uwag natury redakcyjnej, jakie zauważałem oceniając tekst rozprawy:

- a) s.14, 3g - stwierdzenie „brak zdolności korozyjnych” jest niewłaściwe;
- b) s.64, rys.2.24 – brak opisu poszczególnych części rysunku (a-f);
- c) s.72, 4g – powinno być „Na rys. 2.27 – 2.36”;
- d) r.4.1, s.106-107 – wielokrotne nieprawidłowe użycia słowa „belki” zamiast „płyty”;
- e) r.5.1, s.117 – błąd w tytule rozdziału;
- f) p.6.3.1, s.173 – niepotrzebne i nieprawidłowo opisane wzory (6.1) i (6.2);
- g) bibliografia – kilka powtórzeń (np. [40] i [45], [56] i [57]), brak jednolitej i akceptowalnej w pracach naukowych (np. APA, MLA, ISO 690) formy prezentacji piśmiennictwa;
- h) Załącznik – ponad 400-stronicowy załącznik z wynikami poszczególnych pomiarów jest zbędny, a na pewno nie powinien być załączony do rozprawy w formie papierowego wydruku.

6. OCENA SPEŁNIENIA PRZEZ ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ WARUNKÓW OKREŚLONYCH W ART.187 UST.1 I 2 USTAWY [3]

6.1. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydata w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”

Analiza treści rozprawy pozwala ocenić ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w przedmiotowej dyscyplinie jako **wystarczającą i satysfakcjonującą** w świetle wymagań ustawowych. W szczególności Kandydat wykazał się dobrą wiedzą ogólną w zakresie konstrukcji betonowych, metod ich projektowania, badań doświadczalnych oraz analiz numerycznych MES, a także wiedzą ekspercką w zakresie zastosowania niemetalicznego zbrojenia betonu, będącego stosunkowo nowym i innowacyjnym materiałem budowlanym. Zastosowanie zbrojenia niemetalicznego w konstrukcjach betonowych jest głównym obszarem wiedzy eksperckiej Kandydata w przedmiotowej dyscyplinie. Kandydat nie tylko zna cechy, zalety i wady nowego materiału oraz obszary jego zastosowań w inżynierii lądowej, lecz także procedury obliczeniowe (normowe i MES) umożliwiające jego praktyczne stosowanie w

konstrukcjach betonowych. Kandydat potrafił prawidłowo sprecyzować ważny problem badawczy, lecz także wskazać kierunki dalszych badań, których wykonanie przyczyniłoby się do rozwoju inżynierii lądowej.

Na podstawie powyższej oceny stwierdzam, że rozprawa **wyказała ogólną wiedzę teoretyczną** Kandydata w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”, przez co spełnia ona warunek określony w art.13 ust.1 ustawy [3].

6.2. Ocena umiejętności **samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** przez Kandydata

Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oznacza, że Kandydat potrafi samodzielnie zaplanować, przeprowadzić i zakończyć proces badawczy zgodnie z przyjętymi standardami naukowymi. Obejmuje to zarówno aspekty merytoryczne, jak i organizacyjne. Kandydat skutecznie realizując i finalizując rozprawę doktorską w sposób wystarczający i przekonujący **potwierdził nabycie stosownych kompetencji** do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej zgodnie z oceną w tabeli poniżej.

Lp.	Kompetencje Kandydata	Ocena (opisowa i punktowa w skali 0 – 5 pkt.)
1	Identyfikacja problemu badawczego	Redystrybucja to kluczowe zjawisko w projektowaniu, pozwalające na realistyczną analizę nośności w porównaniu do uproszczonych modeli sprężystych. Kandydat w rozprawie postanowił sprawdzić, czy w elementach betonowych zbrojonych prętami FRP redystrybucja jest możliwa, i wyodrębnić parametry decydujące o jej stopniu. Ocena: 5,0.
2	Przegląd piśmiennictwa	Przegląd stanu wiedzy jest bardzo obszerny, profesjonalny, bardzo rzetelny, obejmujący zdecydowaną większość opublikowanych prac naukowych w przedmiocie rozprawy. Poza tematyką rozprawy jest przegląd badań elementów zbrojonych stalą, a także – w tak szerokim wydaniu – norm projektowych. Ocena: 4,5.
3	Sformułowanie hipotez lub celów badawczych	Kandydat jasno określił, co chce zbadać i dlaczego. Jednakże sformułowanie tezy oraz celów, powtarzających tezę, nie jest prawidłowe, w szczególności w świetle stwierżeń użytych przez Kandydata we wprowadzeniu. Ocena: 3,5.
4	Zaplanowanie metodologii badawczej	Zrealizowany program badań doświadczalnych budzi duże wątpliwości. Natomiast prawidłowo Kandydat zaplanował numeryczne badania parametryczne. Zastosowane metody pomiarowe oraz narzędzia informatyczne były odpowiednie do badań wybranymi metodami. Ocena: 3,5.
5	Przeprowadzenie badań własnych	Nakład pracy na przygotowanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych wydaje się nieadekwatny do uzyskanego wyniku badań. Z kolei badania numeryczne wpisują się w aktualny trend w inżynierii lądowej, lecz konieczna jest poprawna walidacja modelu MES, czego w rozprawie zabrakło. Ocena: 3,0.
6	Analiza wyników i jakość wyciągniętych wniosków	Badania doświadczalne nie pozwoliły na wyznaczenie wiarygodnego stopnia redystrybucji β jak również wpływu wybranych parametrów. Z kolei zastrzeżenia do walidacji modelu MES stawiają pod znakiem zapytania wiarygodność wyników badań parametrycznych. Kandydat samodzielnie zinterpretował wyniki badań własnych i wyciągnął wnioski. Nie odniósł się jednak w tym zakresie do istniejącej wiedzy. Ocena: 3,0.
7	Przedstawienie wyników w formie naukowej	Kandydat napisał rozprawę (monografię) w sposób przejrzysty, zgodny z zasadami cytowania i etyki naukowej. Ocena: 5,0.
8	Krytyczna ocena własnej pracy	Kandydat nie przedstawił ograniczeń swojej metodologii badawczej i możliwych błędów z niej wynikających. Wskazał poprawnie kierunki dalszych badań, chociaż ze znaczącym pominięciem. Ocena: 3,5.
	ROZPRAWA	Ocena: 31 / 40 pkt. (ok. 77,5 %)

Poza oceną aspektów merytorycznych rozprawy **wymóg samodzielności w kontekście akademickim** oznacza także, że Kandydat nie jest tylko wykonawcą cudzych pomysłów, ma własny wkład intelektualny w rozwój dyscypliny oraz potrafił działać niezależnie od swojego promotora lub zespołu badawczego.

Rozprawa powstała pod kierunkiem doświadczonej Promotorki: prof. dr hab. inż. Renaty Kotyni, która jest inicjatorem, liderem i głównym kierownikiem prac naukowych KBB PŁ w zakresie zastosowania zbrojenia niemetalicznego w konstrukcjach betonowych. Trudno zatem mówić o pełnej samodzielności prowadzenia badań naukowych przez Kandydata. Bez wątplenia problem badawczy, plan badań doświadczalnych oraz wnioski końcowe powstały przy dużym zaangażowaniu Promotorki. Ponadto Kandydat, będąc doktorantem jednostki naukowej, w której realizowano badania doświadczalne, musiał bez wątplenia korzystać ze wsparcia chociażby personelu laboratorium badawczego PŁ. Jednakże oba ww. fakty nie negują znacznej samodzielności w prowadzeniu przez Kandydata badań naukowych, zwłaszcza w zakresie przeglądu stanu wiedzy, przygotowania i realizacji badań doświadczalnych, obróbki ich wyników i analizy wniosków z badań, a także w realizacji numerycznych badań parametrycznych. Kandydat skutecznie realizując i finalizując rozprawę doktorską potwierdził nabycie stosownych kompetencji do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Przedstawiona powyżej ocena kompetencji nabytych przez Kandydata potwierdza **umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej**, przez co **spełniony jest warunek określony w art.187 ust.1 ustawy [3]**.

6.3. Ocena oryginalnego rozwiązania problemu naukowego.

Oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego przez Kandydata jest **jakościowa weryfikacja zjawiska redystrybucji sił wewnętrznych** w betonowych płytach i belkach ciągłych, zbrojonych prętami FRP wraz z **identyfikacją głównych parametrów** wpływających na stopień tej redystrybucji.

W szczególności do oryginalnych osiągnięć Kandydata zaliczam:

- a) wykazanie dominującego znaczenia właściwości betonu i jego zarysowania (tj. sztywności elementu) na redystrybucję sił wewnętrznych w badanych elementach betonowych,
- b) ograniczoną, ilościową i jakościową ocenę wpływu stosunku stopni zbrojenia ρ_{sp}/ρ_{su} oraz wytrzymałości betonu na ściskanie f_{ck} na stopień redystrybucji sił wewnętrznych w badanych elementach betonowych,
- c) wykorzystanie złożonego modelu numerycznego do badania zjawiska redystrybucji,
- d) szczegółową analizę mechanizmów zniszczenia przez zginanie płyt betonowych zbrojonych prętami FRP,
- e) profesjonalny przegląd stanu wiedzy w zakresie przedmiotu badań oraz stworzenie bazy danych do przyszłych analiz (wyniki badań 119 elementów).

Zarówno podjęty przez Kandydata problem badawczy, jak również opracowany przez niego indywidualny program własnych badań doświadczalnych oraz badań numerycznych cechują się wystarczającym stopniem oryginalności, w szczególności w warunkach krajowych. Dlatego stwierdzam, że rozprawa Kandydata stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, przez co **spełnia ona warunek określony w art.13 ust.1 ustawy [3]**.

7. OCENA MOŻLIWOŚCI PRAKTYCZNEGO ZASTOSOWANIA WYNIKÓW ROZPRAWY

Badania naukowe realizowane w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport” mają najczęściej charakter badań przemysłowych, służących do sprawdzenia i oceny czy dany materiał, konstrukcja lub technologia są przydatny na rynku, oraz w jakim stopniu i jakie można wprowadzić innowacje i ulepszenia z ich udziałem. Taki charakter mają także badania opisane w rozprawie. Wyniki badań Kandydata **nie mogą jednak być bezpośrednio wykorzystane**, gdyż nie zostały (nie mogły być?) skwantyfikowane w postaci zaleceń normowych. A tylko w ten sposób korzystne dla pewnego rodzaju konstrukcji zjawisko redystrybucji sił wewnętrznych mogłoby być praktycznie wykorzystane i dać określone korzyści m.in. w gospodarce. Kandydat nie wykorzystał tej okazji, chociaż zapewne miał początkowo taki zamiar (por. rozdz.3).

8. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa doktorska mgr inż. Konrada Szczepańskiego stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, jakim jest jakościowa weryfikacja zjawiska redystrybucji sił wewnętrznych (M,V) w betonowych płytach i belkach ciągłych, zbrojonych prętami FRP wraz z identyfikacją głównych parametrów wpływających na stopień tej redystrybucji. Kandydat rozwiązał problem naukowy metodami doświadczalnymi i numerycznymi, wykorzystując opracowany przez siebie program badań oraz narzędzia informatyczne, w szczególności oparte na MES.

Kandydat wykazał i wykorzystał w rozprawie **ogólną wiedzę teoretyczną** w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”, w szczególności w obszarze projektowania, badań doświadczalnych i analiz numerycznych MES. Podczas realizacji rozprawy Kandydat nabył także odpowiednie kompetencje badawcze, które potwierdzają **umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej**. Jednocześnie ze względu na rosnące zapotrzebowanie budownictwa na zbrojenie niemetaliczne, wyniki pracy naukowej Kandydata **mogą mieć znaczenie praktyczne**, chociaż do tego niezbędne będzie stosowne analityczne skwantyfikowane wyników badań Kandydata.

Reasumując mogę jednoznacznie stwierdzić, że pewne walory poznawcze rozprawy, wystarczająco oryginalne rozwiązanie postawionego problemu metodami naukowymi, a także wykazana w pracy ogólna wiedza teoretyczna i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata, upoważniają mnie do stwierdzenia, że rozprawa doktorska pt. „Redystrybucja momentów zginających w dwuprzęsłowych belkach i płytach ciągłych ze zbrojeniem typu FRP”, **spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w ustawie [3] oraz do postawienia wniosku o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Konrada Szczepańskiego oraz o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**



Tomasz Siwowski
Rzeszów, 19.12.2025 r.