

Przeł.  
Inżynier

Warszawa, dn. 30.11.2023r.

**Dr hab. inż. Wojciech TROCHYMIAK** / dr hab. inż. Marcin Staniek, prof. PŚ  
Zakład Geotechniki, Mostów i Budowli Podziemnych, Instytut Dróg i Mostów  
Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska  
Al. Armii Ludowej 16  
00-637 Warszawa

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba KRZĄKAŁY

pt. „Wyznaczanie modułu sprężystości betonu w procesie budowy sprężonych konstrukcji mostowych”

Promotorem pracy doktorskiej jest **prof. dr hab. inż. Marek SALAMAK**, a promotorem pomocniczym **dr inż. Piotr Łaziński** z Katedry Mechaniki i Mostów Politechniki Śląskiej.

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ z dnia 10 października 2023 roku wynikające z uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej z dnia 21 września 2023 roku powołującej mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej p. mgr inż. Jakuba Krząkały, w postępowaniu prowadzonym wg przepisów Ustawy z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

### 2. Ocena rozprawy

#### 2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa została przedstawiona w jednym tomie na 205 stronach formatu A4. Składa się z 7. rozdziałów (112 stron plus 6. początkowych stron bez numerów !) stanowiących zasadniczą część pracy, poprzedzonych spisem treści (strony 3-5 bez numeracji !) i wykazem oznaczeń, definicji i skrótów (strony 1-2). Końcowa część pracy zawiera bibliografię (12 stron, w tym literatura naukowa – 149 pozycji, normatywy i dokumenty prawne – 38 pozycji), dokumentacja projektowa i bazy danych – 14 pozycji, źródła internetowe - 11 pozycji), załączniki – 3 pozycje nazwane A, B i C (zał. A - szczegółowe wyniki badań laboratoryjnych – zawiera 16. rozdziałów oznaczonych jako A1 do A16, zał. B - metoda bezpośrednia badania modułu sprężystości betonu – zawiera 3 rozdziały oznaczone jako B1 do B3, zał. C - procedura wyznaczania odkształcalności betonu – zawiera 2 rozdziały oznaczone jako C1 i C2).

Rozdziały 2 i 3 zawierają przegląd literatury i część opisową dotyczącą charakterystyki analizowanych konstrukcji mostowych. Rozdziały 4. i 5. zawierają opisy wykonanych analiz obliczeniowych i przeprowadzonych badań, a rozdział 6. dotyczy dyskusji nad wynikami badań. Rozdziały 2, 4, 5, 6 zakończone są podsumowaniem, natomiast syntetyczne podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych prac przedstawiono w rozdziale 7. Streszczenie polskie i angielskie (po jednej stronie) zamieszczono na końcu pracy.

Praca zawiera 94 rysunki, 57 tablic i 37 wzorów zamieszczonych w rozdziałach 2÷6, natomiast załączniki zawierają 83 rysunki, 49 tablic i jeden wzór numerowane oddzielnie wewnątrz każdego załącznika.

W rozdziale 1. (Wstęp) zawierający Wprowadzenie, Przedmiot, zasadniczą tezę i cele rozprawy oraz Strukturę i zakres rozprawy uzasadniono celowość podjętej tematyki badań. Podano sposób i zakres realizacji celów.

Przedmiot rozprawy określono w sposób przytoczony poniżej.

*Analizy prowadzące do wyjaśnienia często ujawniających się na budowach rozbieżności między wynikami obliczeń numerycznych, a odpowiedzią na obciążenie statyczne rzeczywistej konstrukcji obiektów mostowych z betonu sprężonego.*

Zasadnicza teza pracy została sformułowana w następujący sposób:

*Rozbieżności między wynikami obliczeń numerycznych metodą MES betonowych przęseł mostów sprężonych i odpowiedzią na obciążenie rzeczywistej konstrukcji są zwykle efektem niedoskonałości modelu obliczeniowego. Wynika to głównie z różnic pomiędzy cechami betonu, jakie definiują normatywy (np. stosowanie obecne normy z pakietu Eurokodów (przywołanie norm PN-EN 1992-2:2010 EC2 i PN-S-10040:1991), a właściwościami faktycznie wbudowanego materiału. Aby uzyskać prawidłowy model obliczeniowy należy więc uwzględnić cechy wbudowanego już betonu, które wiarygodnie można określić jedynie w badaniach laboratoryjnych, ale z odwzorowaniem warunków dojrzewania betonu w konstrukcji.*

Doktorant sformułował również pozostałe cele pracy, które obejmują:

- *krytyczny przegląd dotychczasowych sposobów określania wartości modułu sprężystości,*
- *wykazanie znaczenia właściwości betonu w procesie projektowania i budowy obiektu mostowego,*
- *przeprowadzenie porównawczych badań laboratoryjnych betonu na próbkach pielęgnowanych w sposób zgodny z zapisami odpowiedniej normy oraz przy odwzorowaniu rzeczywistych warunków dojrzewania betonu w konstrukcji,*
- *zapropozowanie procedury wyznaczania i wykorzystania odkształcalności betonu w etapach projektowania i budowy obiektu mostowego,*
- *przeprowadzenie badań pod próbnym obciążeniem statycznym obiektów mostowych mające na celu weryfikację wyników badań laboratoryjnych oraz walidację zaproponowanej procedury.*

Rozdział 2. (Odkształcalność betonu) dotyczy odkształcalności betonu oraz opisującej jej wielkości, czyli modułu sprężystości. Pierwszą część rozdziału stanowi przegląd literatury w zakresie czynników wpływających na odkształcalność betonu oraz sposobów szacowania wartości modułu sprężystości betonu. Zwrócono uwagę na dużą różnorodność odkształcalności betonu oraz mnogość czynników na nią wpływających. W podsumowaniu tej części pracy stwierdzono, że **brak jest wiarygodnej i dokładnej metody określenia modułu sprężystości betonu na etapie projektowania i budowy obiektu mostowego.**

W drugiej części tego rozdziału przedstawiono wyniki badań pod próbnym obciążeniem oraz doświadczenia przedstawicieli wykonawców, które wskazują skutki ujawnianych na budowach niejednoznaczności przy wyznaczaniu modułu sprężystości betonu i szacowaniu, na tej podstawie, odkształceń sprężonych ustrojów nośnych.

Stwierdzono także, że beton charakteryzuje się zróżnicowaną odkształcalnością, która zależy od wielu czynników, w tym od: gabarytów konstrukcji, warunków podczas betonowania, rodzaju kruszywa i wielu innych. Zaproponowano, że **jedynym wiarygodnym sposobem uzyskania wartości modułu sprężystości są badania laboratoryjne i uwzględnienie technologii betonowania.**

W rozdziale 3. (*Obiekty mostowe poddane analizie*) zawarto charakterystykę obiektów mostowych wykonanych w technologii betonu sprężonego, które stanowiły przedmiot zasadniczych badań i analiz w rozprawie.

W rozdziale 4. (*Moduł sprężystości w analizach statyczno-wytrzymałościowych*) przedstawiono wyniki analiz numerycznych wskazujących na różnice w pracy różnego typu konstrukcji sprężonych podczas kolejnych etapów budowy w zależności od przyjętych właściwości betonu. Obliczenia wykonywano przy założeniu normowych wartości właściwości betonu oraz wartości, jakie uzyskano w badaniach laboratoryjnych. W końcowej części rozdziału podkreślono, że **moduł sprężystości ma znaczący wpływ na przemieszczenia konstrukcji** i przytoczono wyniki analiz, w których maksymalne ugięcia przęseł, w niektórych przypadkach, były dwukrotnie większe niż minimalne.

W rozdziale 5. (*Badania laboratoryjne i in situ*), stanowiącym zasadniczą część pracy, szczegółowo opisano przyjęte metodyki oraz wyniki wszystkich zrealizowanych w rozprawie prac badawczych. W pierwszej części rozdziału przedstawiono stosowany w trakcie badań system odwzorowania warunków dojrzewania betonu w konstrukcji. Następne części rozdziału zawierają kolejno: opis metodyki badań laboratoryjnych betonu i wyniki 16. serii badań, opis wyników analiz numerycznych, w szczególności obliczonych ugięć konstrukcji nośnych z uwzględnieniem zaktualizowanych programów sprężania, wyniki inwentaryzacji geodezyjnej ustrojów nośnych oraz wyników badań obiektów mostowych pod próbnym obciążeniem statycznym. Uzupełnieniem tego rozdziału są załączniki A i B.

W rozdziale 6. (*Dyskusja wyników badań*) zamieszczono dyskusję wyników badań przedstawionych w rozdziale 5. Zweryfikowano wyniki badań laboratoryjnych poprzez ich zestawienie z wynikami pomiarów ugięć konstrukcji w czasie budowy oraz pod próbnym obciążeniem statycznym. Stwierdzono, że **miarodajną reprezentacją betonu wbudowanego w ustrój nośny są próbki pielęgnowane w warunkach odwzorowanych co umożliwiło uzyskać bardzo wysoką zgodność ugięć obliczonych z ugięciami ustroju nośnego zmierzonymi na placu budowy**. Na podstawie otrzymanych wyników badań laboratoryjnych, wykonanych analiz numerycznych, inwentaryzacji geodezyjnej i pomiarów na placu budowy oraz przeprowadzonej dyskusji **zaproponowano procedurę wyznaczania odkształcalności betonu podczas projektowania i budowy obiektów mostowych**. Uzupełnieniem tego rozdziału jest załącznik C.

W rozdziale 7. (*Zakończenie*) zawierającym syntetyczne podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych prac ponownie przytoczono istotne treści z poprzednich rozdziałów, w szczególności dotyczących inspiracji do podjęcia opisanych w dysertacji prac i sposobu ich realizacji. Przytoczono, między innymi, spostrzeżenie, że *jedynym wiarygodnym sposobem wyznaczenia modułu sprężystości betonu są badania laboratoryjne uwzględniające technologię betonowania, gdyż warunki dojrzewania betonu mają istotny wpływ na jego właściwości*. Na zakończenie podsumowania wyszczególniono 7. najważniejszych osiągnięć rozprawy. Wnioski zawierają 9. akapitów z czego 7. według recenzenta stanowią wnioski ogólne i szczegółowe a pozostałe są propozycją i stwierdzeniem.

Za główny wniosek z przeprowadzonych prac uznano **potwierdzenie możliwości osiągnięcia wysokiej zgodności rzeczywistych ugięć sprężonego ustroju nośnego z wynikami**

teoretycznymi, jakie uzyskuje się na podstawie analiz numerycznych, z dodatkowymi zastrzeżeniami kiedy to jest możliwe do uzyskania.

W końcowej części tego rozdziału wymieniono w tekście główny kierunek dalszych prac (pytanie- jaki wpływ na procesy reologiczne w betonie mają rzeczywiste warunki dojrzewania betonu w konstrukcji) oraz wyszczególniono 6. kierunków dalszych prac.

W załączniku A (*Szczegółowe wyniki badań laboratoryjnych*) zawarto szczegółowe sprawozdania z przeprowadzonych badań laboratoryjnych wraz z wyjaśnieniem powodów odrzucenia niektórych wyników badań. Załącznik A zawiera krótkie wprowadzenie i 16. rozdziałów oznaczonych A1 ÷ A16.

W załączniku B (*Metoda bezpośrednia badania modułu sprężystości betonu*) zawarto propozycję uzupełnienia normy PN-EN 12390-13, dotyczącej wyznaczania modułu sprężystości betonu, o zaproponowaną procedurę metody bezpośredniej. Załącznik B zawiera 3 rozdziały oznaczone jako B.1 (*Wprowadzenie*), B.2 (*Metoda bezpośrednia – wyznaczanie początkowego siecznego modułu sprężystości*) oraz B.3 (*Początkowy sieczny moduł sprężystości (Metoda bezpośrednia)*).

W załączniku C (*Procedura wyznaczania odkształcalności betonu*) zawarto proponowaną procedurę wyznaczania w dwóch wersjach. Załącznik C.1 (*Procedura wyznaczania odkształcalności betonu w kontraktach typu projekt – budowa*) oraz załącznik C.2 (*Procedura wyznaczania odkształcalności betonu w kontraktach typu projektuj i buduj*).

## 2.2. Aktualność tematu

Podjęty temat badań jest zasadny, ważny i aktualny. Tematyka dysertacji mgr inż. Jakuba Krząkały jest istotna w kontekście realizowanego programu budowy infrastruktury drogowej jak również ambitnych planów rozbudowy, modernizacji i rewitalizacji transportu szynowego. W szczególności dotyczy to drogowych i kolejowych obiektów mostowych z betonu sprężonego lub hybrydowych obiektów mostowych, w których główne elementy nośne wykonano z betonu sprężonego.

Autor wskazał na dotychczasową praktykę wykonywania badań obiektów mostowych pod próbnym obciążeniem statycznym, w których występowały różnice w obliczonych i pomierzonych parametrach (najczęściej pionowych przemieszczeń przęseł) dochodzących nawet do 30%.

Interpretacja występujących różnic na ogół była błędna. Według Doktoranta, w większości przypadków, różnica wynikała z błędnych obliczeń wynikających z niewłaściwych danych wyjściowych przyjmowanych do obliczeń, w szczególności wartości modułu sprężystości betonu.

Doktorant zaproponował nowe podejście do wykonywania badań właściwości betonów wbudowywanych w konstrukcje obiektów mostowych, w szczególności modułu sprężystości betonu, przy odwzorowaniu rzeczywistych warunków dojrzewania betonu w konstrukcji oraz jego składu, w tym rodzaju kruszywa. Wyznaczone parametry betonu, według zaproponowanej w pracy metody, umożliwiły, podczas analiz numerycznych, dokładniejsze wyznaczenie wybranych parametrów obiektu mostowego.

Doktorant wykazał, że konfrontacja przemieszczeń przęseł, pomierzonych podczas badań terenowych pod próbnym obciążeniem, z obliczonymi przemieszczeniami uwzględniającymi właściwości betonu, wyznaczone według proponowanej przez Doktoranta procedury, miała bardzo dobrą zgodność.

### 2.3. Ocena zakresu pracy

Przyjęty zakres pracy jest bardzo obszerny i zasługuje na pozytywną ocenę. Doktorant w pierwszej kolejności dokonał obszernego przeglądu dostępnej wiedzy, dotyczącej aspektów materiałowych i technologicznych odkształcalności betonu, które w mostowych konstrukcjach sprężonych wpływają na odkształcalność betonu. Doktorant przytoczył, skomentował i krytycznie ustosunkował się do metod szacowania wartości modułu sprężystości betonu w przywołanych pracach, w szczególności w kontekście stosowania różnych kruszyw do betonu i zmian w przemyśle cementowym w aspekcie ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>.

Na uznanie i pozytywną ocenę zasługuje także zebranie i przeanalizowanie doświadczenia wykonawców, dotyczących nadmiernych przemieszczeń przęseł obiektów z betonu sprężonego, zaobserwowanych podczas budowy i badań pod próbnym obciążeniem, wielu obiektów, które unaocznily nieprecyzyjne szacowanie modułu sprężystości betonu i były przyczyną uzyskiwania nieprecyzyjnych wyników analiz numerycznych ale jednocześnie były inspiracją dla Doktoranta poszukiwania przyczyny tego stanu rzeczy.

Na uwagę zasługuje zestawienie wielu wyników badań odbiorczych obiektów mostowych z ich wnikliwą analizą. Archiwalne wyniki badań pod próbnymi obciążeniami, udostępnione Doktorantowi przez Zespół Badań Terenowych Politechniki Śląskiej, obejmowały 104. obiekty o różnych rozpiętościach teoretycznych przęseł (od 20,5m do 130,0m), różnych klasach betonu (C35/45, C40/50, C45/55, C50/60), różnym kruszywem (granit, amfibolit, dolomit, wapień, bazalt, porfir) ze wskazaniem z jakiej kopalni zostało wydobyte. Na szczególną uwagę zasługuje zestawienie wskaźników  $u_s/u_t$  (ugięcia sprężyste pomierzone podczas badań / ugięcia teoretyczne wyznaczone na podstawie analiz numerycznych) i wnioski wynikające z analizy tych wskaźników.

Doktorant słusznie doszedł do wniosku, że odpowiednim sposobem uzyskania wiarygodnej wartości modułu sprężystości betonu są badania laboratoryjne, w których uwzględnione są rzeczywiste warunki dojrzewania betonu w konstrukcji.

Doktorant syntetycznie scharakteryzował 7. analizowanych obiektów mostowych o typowych schematach statycznych (belka wolnopodparta, belka ciągła, łuk z jazdą dołem), różnych ustrojach nośnych (płytkowo-belkowych, skrzynkowych, łukowych z pomostem płytkowo-belkowym), budowanych w różny sposób (deskowania stacjonarne, deskowania stacjonarne z odmianą budowy przęsła po przęśle, nasuwanie podłużne, betonowanie nawisowe) i z betonu różnych klas (C35/40, C40/50, C50/60).

Wyniki analiz numerycznych, poprzedzone krótkim opisem sposobu modelowania ustrojów nośnych, uwzględniające różne wartości modułów sprężystości betonu i ciężaru własnego betonu (rozpatrywano normowe wartości właściwości betonu i wartości jakie uzyskiwano w badaniach laboratoryjnych) są istotnym, autorskim elementem dysertacji. Na szczególną uwagę zasługuje podsumowanie wykonanych analiz dotyczących modułu sprężystości betonu „Moduł sprężystości ma znaczący wpływ na przemieszczenia konstrukcji. Maksymalne ugięcia przęseł w niektórych przypadkach były dwukrotnie większe niż minimalne”.

Na duże wyróżnienie zasługują badania laboratoryjne oraz badania terenowe budowanych obiektów mostowych z uwzględnieniem składów mieszanek betonowych, stosowanych technologii budowy oraz przyjętej metodyki badań laboratoryjnych wraz z wdrożonym systemem odwzorowania warunków dojrzewania betonu w konstrukcji.

Godną podziwu jest wykonanie badań laboratoryjnych prawie 400. próbek walcowych, wykonanych w 16. seriach z 5. różnych mieszanek betonowych, z których połowa była pielęgnowana w warunkach normowych, a reszta w warunkach zbliżonych do warunków

panujących w ustroju nośnym na placu budowy. Wyniki badań laboratoryjnych posłużyły, jako parametry wyjściowe do analiz numerycznych, których wyniki zostały zweryfikowane poprzez zestawienie ich z wynikami pomiarów ugięć ustrojów nośnych w czasie budowy oraz badań pod próbnym obciążeniem.

Zaplanowane i wykonane badania terenowe, które obejmowały badania obiektów pod próbnym obciążeniem statycznym oraz inwentaryzację geodezyjną obiektów w trakcie procesu budowy, a zwłaszcza podczas sprężania (naprężania i kotwienia cięgien sprężających), wymagały dużego zaangażowania organizacyjnego, sprzętowego i odpowiednio przygotowanego personelu pomocniczego. W rozumieniu recenzenta Doktorant był głównym autorem planu badań i głównym analitykiem wyników badań co również należy docenić.

Godna uznania jest także analiza wpływu modułu sprężystości na wyniki obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, którą Doktorant wykonał w oparciu o dwa źródła: stosowane przez projektantów normy i własne wyniki badań laboratoryjnych betonów, w których stosowano różne rodzaje kruszywa występujące w Polsce. Sednem tych analiz było potwierdzenie istotnego wpływu wartości modułu sprężystości na odkształcenia konstrukcji nośnych, w szczególności pionowych przemieszczeń przęseł, co jest powszechnie znane, ale określenie wartości modułu sprężystości betonu, z uwzględnieniem składu betonu z różnym kruszywem, w polskim mostownictwie jest, jak na razie, na początku badań !!

Propozycje procedur wyznaczania odkształcalności betonu: propozycja metody bezpośredniej (propozycja uzupełnienia odpowiedniej normy PN-EN) oraz dwie wersje procedury wyznaczania odkształcalności betonu w zależności od typu kontraktu w pełni zasługują na uznanie.

#### 2.4. Cel naukowy

Cel naukowy rozprawy sformułowany w rozdziale 1. dotyczył:

a) udowodnienia wielowątkowej tezy przytoczonej w punkcie 2.1. recenzji, której istota brzmi (fragment tezy): *Aby uzyskać prawidłowy model obliczeniowy należy więc uwzględnić cechy wbudowanego już betonu, które wiarygodnie można określić jedynie w badaniach laboratoryjnych, ale z odwzorowaniem warunków dojrzewania betonu w konstrukcji.*

b) zrealizowania pięciu wyszczególnionych w punkcie 2.1. recenzji celów pracy.

Aby zrealizować cele naukowe Doktorant wykonał:

- szczegółowy przegląd kilkuset pozycji bibliograficznych z zakresu, który dotyczy pracy,
- krytyczną ocenę metod szacowania wartości modułu sprężystości betonu opisanych w publikacjach naukowych i normach,
- analizę ponad 100. wyników próbnych obciążeń obiektów mostowych,
- analizę doświadczeń wykonawców obiektów mostowych dotyczących nadmiernych przemieszczeń przęseł wynikających najprawdopodobniej z nieodpowiedniego oszacowania modułu sprężystości betonu na etapie projektowania,
- badania prawie 400. próbek walcowych wykonanych z 5. różnych mieszanek betonowych, pielęgnowanych w warunkach normowych i w warunkach zbliżonych do warunków panujących w ustroju nośnym na placu budowy,
- scharakteryzował 7. wybranych obiektów mostowych stanowiących przedmiot badań i analiz,
- analizy numeryczne 5. wybranych obiektów mostowych, budowanych według różnych technologii, z uwzględnieniem normowych i wyznaczonych laboratoryjnie parametrów betonu,

- badania terenowe (inwentaryzacja geodezyjna, pomiary pod próbnym obciążeniem z uwzględnieniem potwierdzonego stanu sprężenia konstrukcji), 4. wybranych obiektów mostowych,

oraz zaproponował:

- metodykę badań laboratoryjnych wraz z systemem odwzorowania warunków dojrzewania betonu w konstrukcji,
- propozycję dodatkowych zapisów do normy PN-EN 12390-13 dotyczących siecznego modułu sprężystości nazwaną metodą bezpośrednią badania modułu sprężystości betonu (Zał. B.2, B.3),
- procedury wyznaczania odkształcalności betonu w kontraktach typu *projekt-budowa* (załącznik C.1, rys. C1.1) oraz *projektuj i buduj* (zał. C.2, rys. C2.1),
- trafnie podał kierunki dalszych prac.

Należy stwierdzić, że na podstawie wykonanych analiz i badań oraz uzyskanych wyników Doktorant udowodnił postawioną tezę jak również zrealizował zamierzone cele pracy.

Za najważniejsze osiągnięcia rozprawy Doktorant (str. 110 rozprawy) uznał:

- a) wdrożenie systemu odwzorowania warunków dojrzewania betonu do programu badań właściwości mechanicznych betonu,
- b) opracowanie bardziej wiarygodnej metody wyznaczania modułu sprężystości betonu, dzięki czemu możliwe stało się osiągnięcie lepszej zgodności wyznaczanych ugięć teoretycznych i rzeczywistych dźwigarów ustrojów nośnych,
- c) propozycję badania modułu sprężystości betonu metodą bezpośrednią wraz z jej walidacją w badaniach laboratoryjnych i terenowych,
- d) utworzenie procedury wyznaczania modułu sprężystości betonu i wykorzystania go w procesie projektowania i budowy obiektu mostowego,
- e) wykazanie ryzyka zawyżania niektórych właściwości betonu przy stosowaniu pielęgnacji próbek w warunkach normowych,
- f) wykazanie we wczesnym etapie wysokich wartości wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości betonu, w którym wykorzystany był cement hutniczy CEM III i który dojrzewał w warunkach rzeczywistych,
- g) wykazanie zmienności stosunku modułu początkowego i modułu ustabilizowanego w zależności od zastosowanego w betonie kruszywa.

Recenzent zgadza się z Doktorantem, że wymienione w akapicie wyżej, w punktach a)-g) osiągnięcia są najważniejszymi osiągnięciami rozprawy, ale uzupełniłby wykaz o punkt

- h) przegląd bibliografii dotyczącej odkształcalności betonu, w szczególności zestawienie badań z przyporządkowaniem poszczególnych kruszyw wydobywanych na terenach Polski, w tym tabela 1 (str. 12) zawierająca podział kruszyw ze względu na uzyskiwany moduł sprężystości betonu.

Za najważniejsze osiągnięcia rozprawy w kontekście praktycznym recenzent uważa wskazanie „drogi” umożliwiającej:

- na etapie projektowania,

- dokładniejsze uwzględnianie parametrów wyjściowych właściwości betonu, przyjmowanych do obliczeń, uwzględniających specyfikę polskich kruszyw istotnych w określaniu gęstości i modułu sztywności betonu,

- na etapie budowy,

- dokładniejszą weryfikację właściwości wbudowanego w konstrukcje mostowe betonu z uwzględnieniem jego składu, sposobu pielęgnacji, rodzaju kruszywa i warunków dojrzewania,
- dokładniejsze prognozowanie (obliczanie) deformacji (przemieszczeń przęseł) obiektów mostowych z uwzględnieniem laboratoryjnie wyznaczonych właściwości betonu wbudowanego,
- dokładniejsze wnioskowanie wyników pomiarów wykonanych pod obciążeniem próbnym w konfrontacji z wynikami teoretycznymi.

## 2.5. Układ pracy, opracowanie redakcyjne

Układ pracy zasługuje na ocenę pozytywną. Na uwagę zasługują także starannie, czytelnie i estetycznie wykonane rysunki oraz zestawienia tabelaryczne. Edycja pracy jest na wysokim poziomie edytorskim. Nieliczne, drobne uchybienia edytorskie i spostrzeżenia zamieszczono w następnym rozdziale recenzji.

## 3. Ważniejsze uwagi

### Uwagi ogólne

W spisie piśmiennictwa dotyczącego książek, czasopism i referatów (149 pozycji, większość pozycji anglojęzycznych) wymieniono 4 pozycje, w tym 2. anglojęzyczne, w których autorem lub współautorem jest Doktorant.

Wykaz stosowanych oznaczeń (str. 1) zawiera około 30 pozycji i nie zawiera wszystkich, stosowanych na dalszych stronach pracy, oznaczeń. Niektóre oznaczone wymienione na str. 1. są wyjaśniane ponownie w tekście pracy. Jakie kryteria przyjął Doktorant sporządzając wykaz oznaczeń na str. 1 ?

W pracy zamieszczono łącznie, uwzględniając tekst pracy i załączniki, 177 rysunki i 106 tablic. Większość podpisów pod rysunkami i tytuły tabel nie zawierają źródeł (bibliografii). Należy przypuszczać, że większość rysunków zamieszczonych w pracy zostało wykonane przez Doktoranta.

Praca przesłana do recenzji została wydrukowana w kolorze. W przypadku druku czarno-białego ciemnoniebieskie wypełnienia niektórych komórek tabel będą mało lub wręcz nieczytelne.

W przypadku tabel o kilkunastu czy kilkudziesięciu wierszach, jak na przykład tabela nr 25 na str. 50. i 51., wskazane byłoby dodać kolumnę z liczbą porządkową w celu szybkiego zliczenia wszystkich wierszy w tabeli.

### Uwagi krytyczne

Rozprawa jest skonstruowana zgodnie z zasadami sztuki, aczkolwiek nie jest łatwe w przyjętej konwencji klarowne „wyłuskanie” z rozprawy elementów czysto autorskich, własnych, w szczególności dotyczących badań laboratoryjnych czy badań terenowych, w których bierze udział kilka lub kilkanaście osób.

W rozdziale 3. dotyczącym charakterystyki analizowanych obiektów mostowych przytoczono bardzo syntetycznie informacje (tabele, schematy, fotografie) dotyczące siedmiu obiektów o różnych ustrojach, technologiach budowy, klasach wbudowanego betonu i informacji czy wykonano badania laboratoryjne. Recenzent dostrzega brak szczegółowych informacji dotyczących etapów budowy (schematów pośrednich, harmonogramów budowy obiektów budowanych w wielu etapach, w szczególności oznaczonych jako MG-1, WS-36 czy M2.

W rozdziale 4. dotyczącym modułu sprężystości betonu w analizach statyczno-wytrzymałościowych przedstawiono wyniki analiz numerycznych przy różnych wartościach modułu sprężystości i ciężaru własnego betonu.

Recenzent czuje niedosyt syntetycznym przytoczeniem wykonanych analiz, w szczególności dotyczących modelowania (przytoczono wizualizacje modeli). Dodanie kilku przykładów ze szczegółowymi wynikami, np. w postaci kopii ekranów, potwierdziłoby i zobrazowało szeroki zakres wykonanych przez Doktoranta analiz.

W rozdziale 5. dotyczącym badań laboratoryjnych i in situ opisano bardzo syntetycznie system odwzorowania warunków dojrzewania betonu w konstrukcji, metodykę badań laboratoryjnych z komentarzem otrzymanych wyników. Przytoczono także wyniki inwentaryzacji geodezyjnej obiektów oraz wyniki badań pod próbnym obciążeniem. Dużo wątków, komentarzy, wyników stąd zapewne syntetyczny opis.

Recenzent byłby zainteresowany przynajmniej jednym przykładem różnic wynikających z obliczeń przemieszczeń sprężonego przęsła pod obciążeniem próbnym, bez i z uwzględnieniem dokładnego rozmieszczenia zbrojenia (zwykłego i sprężającego) w przekroju poprzecznym, według dotychczasowej praktyki projektowej (właściwości betonu przyjmowane na podstawie odpowiednich norm) oraz z uwzględnieniem proponowanej metody wyznaczania odkształcalności betonu przez Doktoranta.

W rozdziale 6. zawierającym dyskusję wyników badań, opisanych w rozdziale 5., oraz komentarz dotyczący celu, potrzeby i sposobu opracowania procedury wyznaczania odkształcalności betonu, zawarto kilka wątków. Recenzent byłby zadowolony wątkiem gromadzenia wyników badań laboratoryjnych w sposób umożliwiający utworzenie bazy danych, w szczególności w powiązaniu z metodyką BIM.

W rozdziale 7. dotyczącym wniosków Doktorant ponownie, w syntetycznej formie, przytoczył jeszcze raz najważniejsze wnioski z wcześniejszych rozdziałów. Recenzent byłby zadowolony bardziej szczegółowym skomentowaniem końcowej informacji, że jeden z wykonawców wymienionych z nazwy „był bardzo zadowolony z korzyści ... (str. 111, ostatni akapit).

**Mimo uwag krytycznych, całość opracowania oceniam wysoko.**

#### **Uwagi szczegółowe – korektorskie i stylistyczne**

Analizując pracę, pomimo jej dużej poprawności merytorycznej i edytorskiej, dostrzegłem kilka uchybień oraz nieściśłości, których wybrane przykłady przedstawiam poniżej (konwencja zapisu: nr strony; nr wiersza(y) od góry; jest; powinno być:

- 2; 4; 80MPa(do klasy; 80MPa (do klasy;
- 2; 7; procesów zachodzących w nim zachodzących; procesów w nim zachodzących;
- 3; 8; przęsł(rysunek 1).; przęsł (rysunek 1).;
- 7; 27; termiczne został tutaj; termiczne zostały tutaj;
- 11; 20; Łaziński i in; Łaziński i in.;
- 12; 10; Fanourakis; Fanourakis [34];
- 12; 11; oraz Sun [34,133]; oraz Sun i Fanourakis [133];
- 68; 4; na rysunkach 43, 44 i 45; na rysunkach 59, 60 i 61;
- 68; 5; (rysunek 46); (rysunek 62);
- 117; 7; znaczą co; znacząco;
- 197; 5; w żaden sposób opisana systemie; w żaden sposób opisana w systemie;

Uwagi krytyczne i wątpliwości recenzenta dotyczące pracy, w szczególności usterki stylistyczne, interpunkcyjne i literowe nie wpływają w sposób istotny na wartość merytoryczną rozprawy i pozytywnej jej oceny, ale należałoby ich w przyszłości unikać.

#### 4. Ocena końcowa

Autor wykazał się bardzo dobrym przygotowaniem do prowadzenia samodzielnych prac badawczych, zarówno o charakterze koncepcyjnym, analitycznym jak i praktycznym dotyczącym badań laboratoryjnych, znajomości oraz obsługi różnych programów komputerowych i arkuszy kalkulacyjnych.

Autor umiejętnie skorzystał z możliwości przeszukiwania bazy danych z archiwalnymi wynikami badań obiektów mostowych (próbnych obciążeń) udostępnionych przez Zakład Badań Terenowych Politechniki Śląskiej w celu pozyskania niezbędnych informacji do realizacji celów pracy oraz z doświadczeń wykonawców z którymi współpracował.

Doktorant Pan mgr inż. Jakub Krząkała opracował z sukcesem postawione w celu pracy zagadnienia. Posługując się odpowiednią metodyką prawidłowo zrealizował bardzo obszerny program badawczy w zakresie teoretycznym jak i praktycznym.

Sformułowane w recenzji uwagi krytyczne nie obniżają w sposób istotny wartości pracy. Mając powyższe na uwadze stwierdzam, że cele postawione na początku pracy zostały osiągnięte, wyrażam więc przekonanie, że rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Krząkały pt. „Wyznaczanie modułu sprężystości betonu w procesie budowy sprężonych konstrukcji mostowych” **spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim** zgodnie z Ustawą z dn. 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” stanowiąc oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

W związku z tym **stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakubą Krząkałą do publicznej obrony.**

.....  
Dr hab. inż. Wojciech Trochymiak