

Prof. dr hab. inż. Jacek Gołaszewski  
Politechnika Śląska  
Wydział Budownictwa  
Katedra Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli  
Ul. Akademicka 5  
44-100 Gliwice

11.04.2024

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Henryka Kowalczyka  
pt.: Ocena parametrów struktury porów powietrznych w betonie z  
wykorzystaniem analizy obrazu 2D**

## 1. Wprowadzenie

Opinia została opracowana zgodnie z uchwałą nr 6/2024 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach z dnia 6 marca 2024, na podstawie umowy nr UM/2024/03/0079 z dnia 18 marca 2024 r.

Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska mgr inż. Henryka Kowalczyka pt.: „Ocena parametrów struktury porów powietrznych w betonie z wykorzystaniem analizy obrazu 2D”. Jej promotorem jest prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk, specjalista w zakresie technologii betonu, a zwłaszcza problematyki jego mrozoodporności. Promotorem pomocniczym pracy jest dr inż. Agnieszka Molendowska.

## 2. Charakterystyka rozprawy

Jednym z najważniejszych problemów współczesnej technologii betonu jest kształtowanie jego trwałości w warunkach szkodliwego oddziaływania środowiska, w tym szczególnie w warunkach agresywnego oddziaływania cyklicznego zamrażania/odmrażania. Podstawowym sposobem uzyskania mrozoodpornego betonu jest kontrolowana modyfikacja jego struktury poprzez wprowadzenie do niej porów powietrznych w odpowiedniej ilości i o odpowiednim kształcie, rozmiarze i rozmieszczeniu. Napowietrzenie betonu uzyskuje się stosując domieszkę napowietrzającą jako składnik mieszanki betonowej. Wymagania dotyczące całkowitej zawartości powietrza oraz zawartości mikroporów i ich rozmieszczenia, zawarte są w normie PN-EN 206 „Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność” oraz w innych bardziej szczegółowych dokumentach np. Ogólnych Specyfikacjach Technicznych (OST) opracowanych przez GDDKiA. Prawidłowo napowietrzony beton powinien charakteryzować się następującymi parametrami: całkowitą zawartością powietrza  $A$  co najmniej 4% (ale nie większą niż 7%), zawartością mikroporów  $A_{300}$  (o średnicy  $< 0,300$  mm) co najmniej 1,5% i wskaźnikiem rozmieszczenia porów  $L$  mniejszym niż 0,200 lub 0,250 mm. Sposób pomiaru charakterystyki porów powietrznych w napowietrzonym betonie tzw. metodą trawersową określa norma PN-EN 480–11 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań.

Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie. Wiarygodny pomiar charakterystyki porów powietrznych w betonie jest więc kluczowy dla oceny jego odporności na działanie mrozu. Warto zauważyć, że parametry charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie które powinny zapewniać uzyskanie mrozoodpornej struktury ustalone zostały na podstawie modelu Powersa, ale kwestia ich znaczenia i wielkości jest nadal przedmiotem intensywnej dyskusji. Charakterystyka porów powietrznych nie określa bowiem wprost odporności mrozowej betonu, a wyniki licznych prac badawczych wiążących parametry porów powietrznych z mrozoodpornością betonu pozostają bardzo niejednoznaczne. Bardzo ważną, aczkolwiek nie zawsze dostrzeganą kwestią pozostaje również kwestia metodyki wyznaczania parametrów charakteryzujących strukturę porów. Powszechnie stosowana metoda trawersowa jest pracochłonna, a przy tym problematyczna ze względu na samą zasadę pomiaru (wzdłuż linii trawersowych na powierzchni zglądu) oraz powtarzalność i odtwarzalność pomiarów. Jest ona wrażliwa na sposób przygotowania próbek, parametry pomiaru i uzależniona od subiektywnej oceny operatora i jego doświadczenia. Wg Doktoranta część tych niedogodności można zniwelować stosując metodę analizy całej powierzchni zglądu oraz automatyzację analizy obrazu. Rozprawa w ogólności dotyczy weryfikacji i optymalizacji metodyki pomiaru parametrów struktury porów powietrznych w betonie, w szczególności zajmując się metodą powierzchniową 2D z automatyczną analizą obrazu. Przedmiot ocenianej rozprawy doktorskiej jest aktualny i ważny z punktu widzenia współczesnej technologii betonu. Uważam podjęcie tego tematu za zasadne ze względów poznawczych a zwłaszcza ze względów praktycznych.

Tytuł rozprawy można uznać jako adekwatny do jej treści. Rozprawa ma generalnie charakter doświadczalny, a jej układ jest w zasadzie typowy dla prac o takim charakterze. Składa się ona z dwóch części. Pierwsza z nich zawiera krytyczny przegląd literatury w zakresie istoty, metod i zasad określania charakterystyki struktury porów powietrznych (metody 1D, 2D, 3D), procedur i technik stosowanych przy wyznaczaniu parametrów struktury porów, tworzenia cyfrowych modeli betonu oraz wykorzystania sztucznej inteligencji w badaniach betonu. Druga część zawiera badania i analizy własne w zakresie zastosowania metody 2D do pomiaru parametrów struktury porów powietrznych, w tym porównania jej zgodności z metodą 1D. Rozprawa jest zakończona podsumowaniem i wnioskami oraz kierunkami dalszych badań. Uzupełnia ją wykaz cytowanej literatury oraz załącznik, w którym przedstawiono wybrane wyniki badań i analiz. W pracy nie zamieszczono streszczeń w języku polskim i angielskim. Rozprawa liczy 143 strony, w tym 128 stron tekstu podstawowego.

Część I pracy pt. „Wprowadzenie” dotyczy analizy literatury w zakresie objętym tematyką pracy i składa się z 5 rozdziałów. We wstępie (rozdział 1, 3 strony) Doktorant przedstawił podstawowe informacje o znaczeniu napowietrzenia dla kształtowania mrozoodporności oraz scharakteryzował układ pracy. Nie przedstawił natomiast genezy podjęcia tematu pracy, jej znaczenia oraz jej celu. W rozdziale 2 (17 stron), zatytułowanym „Metodyka badań pośrednich mrozoodporności” Doktorant najpierw ogólnie przedstawił charakterystykę mechanizmów zniszczenia mrozowego betonu. Następnie omówił koncepcję zniszczenia mrozowego wg Powersa i zaczynu chronionego wokół porów powietrznych wg Philleo. W obu przypadkach założono, że zasadnicze znaczenie dla mrozoodporności ma odległość między porami wyrażana odpowiednio przez wskaźnik rozmieszczenia porów  $L$  lub grubość warstwy chronionej  $F$  ( $S$ ). Następnie Doktorant bardzo szczegółowo omówił metodę trawersową (1D)

określania charakterystyk porów powietrznych wg PN EN 480-11. Metoda ta obejmuje wyznaczenie wskaźnika rozmieszczenia porów L oraz innych parametrów struktury porów powietrznych: całkowitej zawartości powietrza A, powierzchni właściwej porów powietrznych  $\alpha$  oraz zawartości mikroporów o średnicy mniejszej niż 300  $\mu\text{m}$   $A_{300}$ . Zwraca uwagę, że Doktorant skoncentrował się na dyskusji znaczenia i konieczności wyznaczania wskaźnika L, ale w zasadzie pominął pozostałe charakterystyk porów powietrznych. Proszę aby tą kwestię uwzględnić w prezentacji pracy podczas obrony. Na marginesie i na przyszłość: ciekawą byłaby dyskusja przyjętych wymagań względem charakterystyki porów powietrznych do oceny mrozoodporności, zwłaszcza w kontekście pojawiających się dość powszechnie wyników badań wskazujących na nieadekwatność normowego wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych L. Omawiając metodę trawersową Doktorant dużo uwagi poświęcił kwestiom technicznym, związanym z przygotowaniem powierzchni próbek do pomiaru, a zwłaszcza defektom powierzchni zglądu, które istotnie mogą wpływać na wielkość parametrów porów powietrznych i w konsekwencji ocenę mrozoodporności betonu. Rozdział 2 kończy analiza dotychczasowych badań w zakresie wiarygodności pomiaru charakterystyki porów powietrznych metodą trawersową (jego powtarzalności i odtwarzalności) oraz możliwości automatyzacji pomiaru. W rozdziale 3 (11 stron) zatytułowanym „Metoda powierzchniowa 2D” Doktorant przedstawia rozważania na temat przygotowania próbek i określania charakterystyk porów powietrznych (głównie zawartości mikroporów o średnicy mniejszej niż 300  $\mu\text{m}$   $A_{300}$ ) w metodzie 2D. Rozdział ten pozostawia pewien niedosyt. Po pierwsze, Doktorant nie wyjaśnił przekonująco potencjalnych korzyści wynikających z zastosowania metody powierzchniowej. Po drugie, brakuje w nim analizy dotychczasowych badań metodą 2D (np. takiego jak dla badań metodą 3D, obszernie przedstawionych w rozdziale 4). Po trzecie, kwestie związane z oceną kształtu porów i rzeczywistej średnicy porów wydają się w równym stopniu dotyczyć metod 1D i 2D. Po czwarte, rozważania w tym rozdziale w dużym stopniu odnoszą się do kwestii technicznych związanych z przygotowaniem powierzchni próbek do badań i rozdzielczością skanowania powierzchni próbek. Na ile ta problematyka ta zdaniem Doktoranta jest szczególna dla metody 2D, nie dotycząc przy tym przygotowania powierzchni próbek do metody 1D? W rozdziale 4 (12 stron), zatytułowanym „Tomografia komputerowa” przedstawiono ogólnie możliwości i uwarunkowania badania struktury całej, trójwymiarowej próbki betonowej. Omówiono w nim ogólnie istotę działania tomografów komputerowych oraz przedstawiono liczne przykłady zastosowania tomografii komputerowej do badania struktury betonu (i nie tylko). Rozdział 4 jest dość luźno związany z tematyką pracy a jednak jego objętość jest podobna do rozdziału 3, o zasadniczym znaczeniu dla podjętych badań. Przy tym brakuje w nim krytycznej oceny możliwości współczesnej techniki 3D do oceny struktury porów powietrznych; będę prosił o rozwinięcie tej problematyki w dyskusji podczas obrony. Części literaturowej brakuje podsumowania w którym, w kontekście stanu wiedzy i techniki, Doktorant przedstawiłby wnioski wykazujące konieczność dopracowania metodyki metody powierzchniowej i określiłby najważniejsze kierunki badań. Stanowiłoby to jednoznaczny podstawę do sformułowania celów i zakresu pracy. Ogólnie jednak oceniam analizę stanu wiedzy pozytywnie, jako przeprowadzoną w oparciu o odpowiednio dobrane publikacje krajowe i zagraniczne oraz wystarczającą do wskazania i uzasadnienia konieczności dalszych badań w zakresie metodyki badania struktury porów powietrznych w betonie metodą powierzchniową. Doktorant wykazał się dobrym opanowaniem zagadnień związanych z tematyką pracy i wystarczającą umiejętnością krytycznej analizy źródeł literaturowych.

Część II pracy pt. „Badania własne” stanowi główną część rozprawy, dotyczy badań własnych Doktoranta i składa się z 5 rozdziałów. W rozdziale 6 (1 strona), zatytułowanym „Cel i zakres pracy” Doktorant przedstawił zakres badań własnych, jednak w rozdziale tym brakuje wyraźnie określonego celu pracy (ew. tez i hipotez). Cele badań własnych przedstawione wprawdzie zostały w części badawczej (rozdziały 7 – 9), ale w sposób rozproszony i rozmyty, co utrudnia odczytanie intencji Doktoranta. Badania własne przeprowadzono w kolejnych etapach, wykorzystując ustalenia z poprzedniego w następnych. Podzielono je na trzy etapy, które przedstawiono w: (1) rozdziale 7 (23 strony) pt. „Etap I – badanie struktury porów powietrznych w betonach nawierzchniowych”, (2) rozdziale 8 (13 stron) pt. „Etap II - badanie struktury porów powietrznych w zaprawach cementowych oraz (3) rozdziale 9 (34 strony) pt. „Etap III – Analiza cyfrowych obrazów powierzchni betonu”. Tytuły poszczególnych rozdziałów uważam za problematyczne – należało je odnieść do podstawowego celu badań w danym etapie, a nie rodzaju badanych próbek. Celami badań w etapie I było: (1) określenie procedury przygotowania próbek i badania charakterystyki struktury porów powietrznych metodą powierzchniową 2D, (2) porównanie charakterystyk porów powietrznych określonych metodą powierzchniową 2D i metodą trawersową 1D wg normy PN EN 480-11 oraz (3) opracowanie uproszczonej metody obliczania zawartości mikroporów o średnicy mniejszej niż 300  $\mu\text{m}$   $A_{300}$ . Badania wykonano wykorzystując próbki betonowe pobrane w trakcie budowy dróg szybkiego ruchu i autostrad i zbadane w Katedrze Technologii i Organizacji Budownictwa Politechniki Świętokrzyskiej. Z bardzo dużego zbioru betonów, na podstawie badań wstępnych do badań zasadniczych wyselekcjonowano 5 betonów, tak aby charakteryzowały się one różnorodnymi parametrami struktury porów. Choć badania wstępne nie są związane wprost z celami pracy, to spory niedosyt pozostawia brak szerszej analizy uzyskanych w trakcie nich danych. Biorąc pod uwagę dużą i kompleksową bazę danych są to informacje o dużej wartości poznawczej i praktycznej. Celem badań w etapie II było przede wszystkim weryfikacja na ile rozkład porów mierzony metodami 1D i 2D odzwierciedla rzeczywisty rozkład porów w objętości próbki kompozytu cementowego (zaprawy cementowej). W tym celu do zaprawy wprowadzono mikrosfery o znanym rozkładzie wielkości (choć napotkano tutaj duże problemy) i określono parametry porów w tej zaprawie metodami 1D i 2D oraz dodatkowo metodą 3D. Celami badań w etapie III było: (1) porównanie charakterystyk rozkładu porów uzyskanych metodami 1D i 2D, (2) określenie wpływu kształtu porów na charakterystykę rozkładu porów oraz (3) liczby i wielkości okien pomiarowych i rozdzielczości skanowania na wiarygodność pomiaru charakterystyki porów powietrznych. Kończący zasadniczą część pracy rozdział 10 (3 strony) zatytułowany „Podsumowanie” zawiera podsumowanie rozprawy, wnioski oraz kierunki dalszych badań. Wnioski z pracy przedstawiono w sposób rozmyty, w formie relacji z przeprowadzonych kolejno etapów badań, pozostawiając duże pole do interpretacji.

Przyjęty tok postępowania w badaniach należy uznać za logiczny, metodyczny i umożliwiający osiągnięcie założonych celów pracy. Nie został on jednak przedstawiony w sposób czytelny, co w efekcie początkowo utrudnia śledzenie toku postępowania Doktoranta. Zastosowane metody badań nie budzą zastrzeżeń, w niektórych przypadkach zaproponowano własne, pomysłowe rozwiązania. Opis przeprowadzonych badań i ich dyskusja wskazują na duże doświadczenie Doktoranta w zakresie praktyki laboratoryjnej. Część wyników badań i ich dyskusji zamieszczono w publikacjach do których odwołano się w tekście pracy. Ze względu na ich znaczenie uważam, że należało je dołączyć do pracy jako załączniki (choć oczywiście można znaleźć te artykuły w bazach danych). Założone przez Doktoranta cele badań należy uznać za

osiągnięte, a dyskusja uzyskanych wyników badań pokazuje umiejętność krytycznej analizy wyników badań własnych i wykorzystania dostępnych danych literaturowych.

Literatura obejmuje 111 pozycji, głównie angielskojęzycznych i opublikowanych po 2000 roku. Oceniam cytowaną literaturę za wystarczającą do przeprowadzenia analizy stanu wiedzy i dyskusji wyników badań własnych w zakresie adekwatnym do tematyki rozprawy. Literaturę przedstawiono w kolejności cytowań, co nieco utrudnia jej analizę oraz niezbyt starannie (różne style cytowania, drobne błędy).

Praca jest napisana na ogół poprawnym językiem, choć Doktorant nie ustrzegł się określeń nieprecyzyjnych (np. często używa określenia „oszacować”), a także drobnych błędów językowych, stylistycznych i redakcyjnych (np. rozdział 1 Wstęp jest numerowany jako 1.1). Tablice i rysunki są generalnie czytelne i łatwe do interpretacji.

### **3. Ocena rozprawy i uwagi krytyczne**

Praca oceniam jako wykonaną na dobrym poziomie naukowym. Cele badawcze pracy zostały osiągnięte, a jako ważne osiągnięcia rozprawy uważam:

- Zaplanowanie i przeprowadzenie systematycznych badań umożliwiających określenie, optymalizację i weryfikację procedury wyznaczania parametrów struktury porów powietrznych metodą 2D.
- Opracowanie uproszczonej metody obliczania ilości mikroporów  $A_{300}$  stosując pomiary długości cięciw pęcherzyków powietrza.
- Określenie możliwości i dokładności pomiaru wybranych parametrów struktury porów powietrznych (rozkład wielkości porów) metodą trawersową, 2D i 3D z wykorzystaniem zapraw cementowych zawierających mikrosfery o znanym rozkładzie wielkości.
- Wykorzystanie modeli cyfrowych powierzchni betonu do zoptymalizowania parametrów analizy obrazu 1D i 2D w zakresie kształtu porów oraz optymalnej liczby i wielkości okien pomiarowych i ich rozdzielczości.
- Określenie wpływu zmian parametrów analizy obrazu na dokładność pomiaru parametrów struktury porów powietrznych betonów o różnej zawartości powietrza (z wykorzystaniem modeli cyfrowych).
- Porównanie wielkości parametrów struktury porów powietrznych określonych metodą trawersową i metodą 2D i wykazanie korzyści ze stosowania metody 2D do analizy struktury porów w betonie przy jednocześnie potwierdzeniu przydatności metody trawersowej w zastosowaniach inżynierskich.
- Analiza przydatności różnych metod pomiaru do ustalenia rozkładu wielkości mikrosfer.
- Opracowanie szeregu ważnych zaleceń technicznych i praktycznych w zakresie przygotowania próbek, identyfikacji porów i defektów powierzchni próbek.

Analiza rozprawy nasuwa jednak następujące ważniejsze uwagi dyskusyjne, spostrzeżenia i wątpliwości:

- Jak stwierdzono powyżej, w pracy brakuje wyraźnego sformułowania wniosków z części literaturowej, celów pracy i badań własnych, przedstawienia planu badań własnych oraz ogólnych wniosków z badań własnych. Podczas obrony w prezentacji pracy proszę o przedstawienie tych kwestii.
- Proszę o przedstawienie jakie zalety i ew. wady ma metoda 2D w stosunku do metody normowej, zwłaszcza w zakresie aplikacyjnym.
- Czy Doktorant jest przekonany, że rozkład logarytmiczno - normalny jest właściwy do opisu rozkładu wielkości porów powietrznych mając na względzie wyraźne różnice pomiędzy ww. modelem a rzeczywistym rozkładem, np. rys. 92, 93?
- Czy stosowanie mikrosfer może być postrzegane jako alternatywa dla napowietrzenia uzyskanego poprzez stosowanie domieszek? Czy w swoich badaniach Doktorant stwierdził obecność mikrosfer uszkodzonych w procesie mieszania?
- Na str. 68 Doktorant wprowadza do oceny zgodności określenia parametrów porów powietrznych metodami 1D i 2D współczynnik  $v_k$  stwierdzając, że im jego wielkość mniejsza tym zgodność większa. Dla jakiej wielkości współczynnika  $v_k$  zgodność pomiarów można uznać za istotną i dlaczego?

#### 4. Wniosek końcowy

Rozprawa dotyczy oryginalnego rozwiązania naukowego, a uzyskane w niej rezultaty są ważne z naukowego i praktycznego punktu widzenia. Doktorant mgr inż. Henryk Kowalczyk rozpoznał potrzebny mu obszar wiedzy, sformułował cele pracy oraz zrealizował je w zakładanym stopniu, wykazując przy tym umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Krytyczne uwagi formalne i merytoryczne nie pomniejszają własnych i oryginalnych osiągnięć Doktoranta, a pracę oceniam jako wartościowe osiągnięcie w zakresie poznawczym i praktycznym. Biorąc pod uwagę osiągnięcia rozprawy, wyszczególnione w pkt. 3 niniejszej recenzji, stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. Nr 204 poz. 1200) i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Henryka Kowalczyka do publicznej obrony.



Recenzję zgodną z wymogami

DYREKTOR NAUKOWY DISCYPLINY  
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk