

Politechnika Warszawska
Warsaw University of Technology
<http://repo.pw.edu.pl>

Rodzaj dyplomu / Diploma type	Rozprawa doktorska / PhD thesis
Autor / Author	Ruszczak Małgorzata
Tytuł / Title	Oznaczanie grubości warstw nawierzchni drogowych metodą georadarową (GPR) /
Rok powstania / Year of creation	2020
Promotor / Supervisor	Garbacz Andrzej, Lejzerowicz Anna
Jednostka dyplomująca / Certifying unit	Wydział Inżynierii Lądowej / Faculty of Civil Engineering
Adres publikacji w Repozytorium URL / Publication address in Repository	http://repo.pw.edu.pl/info/phd/WUTc512dca769cf438b939e2af8d2c2910d/
Data opublikowania w Repozytorium / Deposited in Repository on	2021-05-13



Kielce, dnia 11.01.2021

Recenzent:

Dr hab. inż. Grzegorz ŚWIT, prof. uczelni
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Wytrzymałości Materiałów i Analiz Konstrukcji Budowlanych
Al. Tysiąclecia Państwa Poleskiego 7
25-314 Kielce

Przyjęto
10/02/2021
DZIEKAN
Wydziału Inżynierii Lądowej
prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

W PŁYNEC
18.01.2021
32 2021

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**pt. „Oznaczanie grubości warstw nawierzchni drogowych metodą georadarową” autorstwa
mgr inż. Małgorzaty Ruszczak**

1. PODSTAWA FORMALNA OPRACOWANIA RECENZJI

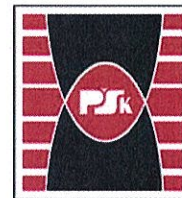
Podstawą formalną opracowania recenzji stanowi:

- Pismo zlecające nr WTBD.521.DR.5.2020 z dnia 18 listopada 2020 sygnowane przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej Pana dr hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni.

2. PODSTAWA PRAWNA OPRACOWANIA RECENZJI

Podstawą prawną opracowania recenzji zgodnie z przesłanym pismem nr WTBD.521.DR.5.2020 z dnia 18 listopada 2020 sygnowane przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej są:

- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, Nr 65, poz. 595 z późn. zm. tj. Dz.U. 2016 poz. 882 i 1311 oraz Dz.U. 2017 poz. 859)
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2014, poz. 1383)
- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. o przepisach wprowadzających ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1669 z późn. zm.)



— Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2020, poz. 85)

3. PRZEDMIOT I OPIS OGÓLNY ROZPRAWY

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Małgorzaty Ruszczak zatytułowana „*Oznaczanie grubości warstw nawierzchni drogowych metodą georadarową*”. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz a promotorem pomocniczym dr Anna Lejzerowicz.

Rozprawa została przedłożona w formie zwartego dwustronnie zadrukowanego skryptu i liczy 292 stron. Składa się ona z 13 rozdziałów, bibliografii oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Bibliografia stanowi łącznie 224 pozycji, w tym 4 normy, rozporządzenia i instrukcje i 17 przypisów do stron internetowych.

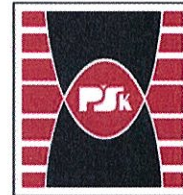
Układ pracy jest czytelny i logiczny, charakterystyczny dla prac naukowych i badawczych, a sposób jej wydania w formie książkowej, moim zdaniem, jest bardzo interesujący, trafny i zasługujący na podkreślenie.

4. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

4.1. Przedmiot, cel i zakres rozprawy

Zgodnie z informacją podaną przez Autorkę (str.22), celem pracy było udzielenie odpowiedzi na następujące pytania badawcze:

1. Czy stałe dielektryczne oznaczone na podstawie amplitud fal odbitych od powierzchni i stałe dielektryczne oznaczone na podstawie odwiertu różnią się statystycznie istotnie?
2. Czy obecność niejednorodności w nawierzchniach drogowych w statystycznie istotny sposób wpływa na wartość oznaczonej grubości warstwy?
3. Czy stan przypowierzchniowy nawierzchni wynikający z warunków atmosferycznych w statystycznie istotny sposób wpływa na wartość oznaczonej grubości warstwy?



4. Czy zaawansowana analiza sygnału daje możliwość uzyskania dodatkowych informacji, które mogłyby wpłynąć na zwiększenie dokładności oznaczeń grubości warstwy metodą georadarową?

Celem rozwiązania problemu naukowego Autorka opracował zakres prac niezbędny do osiągnięcia zamierzonego efektu, który obejmował:

1. Krytyczny przegląd literatury w zakresie:

- a) nawierzchni drogowych – podatnych, półsztywnych i sztywnych,
- b) uszkodzeń nawierzchni drogowych,
- c) wybranych metod nieniszczącej diagnostyki nawierzchni drogowych:

✓ metody mechaniczne:

- metody sklerometryczne,
- ugięciomierze FWD i HWD,
- metody sejsmiczne,

✓ metody elektromagnetyczne i magnetyczne:

- tomografia podczerwona,
- metoda georadarowa,
- metoda prądów wirowych,
- metoda radiologiczna (radiometryczna, radiograficzna),

✓ metody elektrochemiczne:

- mapowanie zmian potencjału,
- DiaCorr,

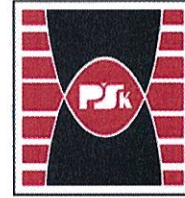
✓ metody akustyczne:

- metoda Impact Echo (IE),
- metoda ultradźwiękowa (UD),
- metoda Emisji Akustycznej (EA),

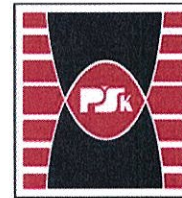
✓ spektroskopia laserowa LIBS,

d) oceny stanu powierzchni drogi:

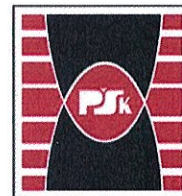
- ocena wizualna,
- badanie równości podłużnej nawierzchni,
- badanie równości poprzecznej nawierzchni,
- badanie szorstkości nawierzchni,



- e) porównanie metod nieniszczącej diagnostyki nawierzchni drogowych,
- f) metody georadarowej ze szczególnym uwzględnieniem:
- ✓ podstaw teoretycznych dotyczących:
 - zasad działania georadaru,
 - propagacji fal elektromagnetycznych i pojęć:
 - prędkości propagacji fal elektromagnetycznych,
 - odbicia fal elektromagnetycznych na granicy dwóch ośrodków,
 - tłumienia fal elektromagnetycznych,
 - częstotliwości fal elektromagnetycznych,
 - właściwości elektrycznych i magnetycznych badanego ośrodka,
 - ✓ typów anten georadarowych stosowanych w diagnostyce nawierzchni z uwzględnieniem:
 - częstotliwości anten georadarowych,
 - anteny niskoczęstotliwościowe,
 - anteny średniczęstotliwościowe,
 - anteny wysokoczęstotliwościowe,
 - sposobu emitowania i odbierania sygnału przez anteny georadaru,
 - sprzężenia anteny georadarowej z podłożem,
 - kierunku polaryzacji anteny georadarowej,
 - budowy anten georadarowych,
 - liczny i rodzaju anten stosowanych w systemach georadarowych,
 - typów systemów zastosowanych w badaniach Autorki
 - ✓ pomiarów radarowych dróg metodą profilowania refleksyjnego z omówieniem:
 - profilowania równoległego,
 - siatki profili wzajemnie prostopadłych,
 - profilowania wielokanałowego,
 - prędkości wykonywania pomiarów radarowych,
 - ✓ pomiarów georadarowych prędkości fali EM,
 - ✓ pomiarów georadarowych metodą prześwietlania,
 - ✓ wizualizacji graficznych danych GPR z pomiarów nawierzchni drogowych:
 - A-scan,
 - B-scan,



-
- C-scan,
 - ✓ filtracja danych GPR,
- g) oznaczania grubości warstw nawierzchni drogowych metodą georadarową bazującą na:
- oznaczeniu stałej dielektrycznej na podstawie amplitud fal EM odbitych na granicy ośrodków,
 - oznaczeniu stałej dielektrycznej na podstawie grubości pobranej próbki referencyjnej,
 - oznaczeniu stałej dielektrycznej na podstawie przyjętych założeń materiałowych warstw nawierzchni i ich stałych dielektrycznych podanych w literaturze,
 - oznaczeniu stałej dielektrycznej za pomocą miernika przenikalności elektrycznej - perkometru,
 - oznaczeniu stałej dielektrycznej na podstawie profilowania prędkości za pomocą georadaru,
- h) dokładności oznaczania grubości warstw metodą GPR,
- i) czynników wpływających na dokładność oznaczeń grubości metodą GPR
- j) zastosowania zaawansowanych analiz sygnału w celu zwiększenia dokładności oznaczeń grubości warstw metodą GPR, tj:
- ✓ analizy z wykorzystaniem algorytmu szybkiego przekształcenia Fouriera FFT,
 - ✓ analizy z wykorzystaniem transformaty falkowej,
2. Przeprowadzenie badań własnych na 15 modelowych płytach betonowych, 5 modelowych płytach asfaltowych i testowym odcinku drogi o dł. 552m i stałej grubości warstw asfaltowych.
 3. Przeprowadzenie walidacji otrzymanych wyników badań na odcinku drogi o dł. 3500m i zmiennej grubości warstw asfaltowych.
 4. Opracowanie oryginalnego algorytmu oznaczania grubości warstw metodą GPR
 5. Zbudowanie na podstawie badań własnych bazy wiedzy prowadzącej do nowatorskich sposobów przygotowania, analizy i oceny stanu technicznego oraz parametrów nawierzchni drogowych metodą GRP .



7. Podsumowanie, wyciągnięcie wniosków naukowych i praktycznych oraz podanie kierunków dalszych badań.

Zaprezentowany powyżej zakres pracy pozwolił Autorce na opracowanie ocenianej obecnie rozprawy.

Rozprawę rozpoczynają streszczenia w języku polskim i angielskim oraz słownik ważniejszych symboli.

Rozdział 1 stanowi krótkie wprowadzenie w tematykę z podaniem genezy podjęcia tematu oraz celu zakresu pracy jaki obejmuje niniejsza rozprawa.

W rozdziale 2 podano krótkie wprowadzenie do tematyki nawierzchni drogowych.

Rozdział 3 obejmuje przegląd literatury dotyczący wybranych metod nieniszczących stosowanych w diagnostyce nawierzchni drogowych. Zawarto w nim między innymi informacje o badaniach nieniszczących nawierzchnie drogowe z podziałem na metody: mechaniczne, elektromagnetyczne i magnetyczne, elektromechaniczne, akustyczne oraz spektroskopię laserową LIBS. Ponadto w rozdziale tym podano sposoby oceny stanu technicznego powierzchni drogi oraz porównanie metod NDT stosowanych do diagnostyki nawierzchni drogowych z podaniem zalet i wad tych metod.

W rozdziale 4 Autorka przedstawiła obszerny opis zjawisk dotyczący fizycznych, chemicznych i mechanicznych podstaw teoretycznych badań z wykorzystaniem metody georadarowej. Ponadto w rozdziale tym zawarto informacje o podstawowych antenach stosowanych w badaniach GRP, ich zaletach, wadach i możliwościach pomiarowych. Omówiono w nim także zasady i sposoby filtracji oraz obróbki i interpretacji otrzymanych w trakcie badań radargramów.

Rozdział 5 poświęcony jest krytycznemu przeglądowi literatury związanej z tematyką rozprawy doktorskiej a dotyczą oznaczania grubości warstw nawierzchni drogowych metodą georadarową. Rozdział ten stanowi istotny część pracy i głównie poświęcony jest zasadą oznaczania grubości warstw nawierzchni z uwzględnieniem trzech etapów: identyfikacji na B-scanach ekstremów amplitud (refleksówhoryzontalnych), obliczania prędkości propagacji fali przez ośrodek oraz właściwe obliczanie grubości warstw ośrodka na podstawie prędkości propagacji. Te trzy etapy są bardzo istotne dla błędu pomiarowego towarzyszącemu pomiarom georadarowym. Jak wspomniano w tym rozdziale w różnych normach, zaleceniach parametry istotne dla dokładności pomiarów GPR przyjmuje się z bardzo dużym przybliżeniem, co skutkować może istotnymi błędami w pomiarach i uznaniu metody GRP za mało przydatną



w badaniach oznaczania grubości warstw nawierzchni drogowych. Autorka zawarła w tym rozdziale także istotne informacje dotyczące czynników wpływających na dokładność oznaczeń grubości metodą GRP.

W rozdziale 6 zostały zaprezentowane zasady i informacje dotyczące zastosowania zaawansowanych analiz sygnału (szybkiej transformaty Fouriera, analizy widmowej gęstości mocy oraz analizy falkowej) do identyfikacji użytego do budowy badanego elementu konstrukcyjnego materiału, lokalizacji zawilgoceń, obecności uszkodzeń typu: delaminacji, niedogęszczeń, zanieczyszczeń ośrodka gliną, braku szczepności międzywarstwowej, zanieczyszczeń chlorkami, obecności korozji czy też określenie stopnia hydratacji cementu. Znajomość tych wad może być przydatna w celu zwiększenia poprawności oznaczeń grubości warstw nawierzchni drogowych.

Rozdział 7 prezentuje informacje dotyczące planu badań.

W rozdziale 8 zamieszczono wyniki zrealizowanych badań własnych oraz analizę uzyskanych rezultatów dla 14 modelowych płyt betonowych ze sztucznie wprowadzonymi nieciągłościami wykonanych na poligonie badawczym Politechniki Warszawskiej. Rozdział zakończono dyskusją wyników i wnioskami wynikającymi z badań.

W rozdziale 9 zamieszczono wyniki zrealizowanych badań własnych oraz analizę uzyskanych rezultatów dla 5 trójwarstwowych modelowych płyt z różnych mieszanek mineralno-asfaltowych zróżnicowanych warstwą ścierną wykonanych na poligonie badawczym TPA. Rozdział zakończono dyskusją wyników i wnioskami wynikającymi z badań.

Rozdział 10 zawiera wyniki zrealizowanych badań własnych oraz analizę uzyskanych rezultatów dla badania GPR drogi asfaltowej o stałej grubości na poligonie badawczym TPA. Rozdział zakończono dyskusją wyników i wnioskami wynikającymi z badań.

W rozdziale 11 zamieszczono wyniki zrealizowanych badań własnych oraz analizę uzyskanych rezultatów dla drogi asfaltowej o zmiennej grubości. Analizie poddano badania wykonane w różnych warunkach pogodowych oraz porównano z wykonanymi na odcinku pomiarowym odwiertami, co w istotny sposób wpływa na wartość uzyskanych rezultatów badań. Rozdział zakończono dyskusją wyników i wnioskami wynikającymi z badań.

W rozdziale 12 przedstawiono oryginalny, własnoręcznie zaprojektowany i wykonany algorytm do oznaczania grubości warstw metodą GPR.

Rozdział 13 stanowi podsumowanie oraz wnioski i uwagi końcowe z przeprowadzonych badań, poszerzone o kierunki dalszych możliwych badań związanych



z wykorzystaniem metody GPR do oceny grubości warstw nawierzchni drogowych. Podano także kierunki dalszych badań.

Rozprawę kończy wykaz literatury.

Po zapoznaniu się z rozprawą stwierdzam, że przyjęty układ i sposób uporządkowania treści jest logiczny i czytelny, typowy dla prac o charakterze badawczym. Rozprawa napisana jest poprawną polszczyzną, a jej strona graficzna nie budzi zastrzeżeń. Dobór pozycji bibliograficznych jest trafny i wystarczający.

Podsumowując ten fragment recenzji uważam, że podjęty przez Autorkę temat rozprawy zasługuje na pozytywną ocenę bo jest aktualny, tak z poznawczego, jak i inżynierskiego punktu. Podobnie rzecz ma się ze sformułowanym w rozprawie celem. Jest on zasadny i oryginalny.

4.2. Ocena wartości naukowej rozprawy

Ocenę wartości naukowej rozprawy rozpoczynam od stwierdzenia, że zrealizowane badania eksperymentalne zostały zaprogramowane właściwie z punktu założonego celu. Metodyka zrealizowanych badań nie budzi zastrzeżeń. Badania zostały odpowiednio opisane i udokumentowane. Uzyskane rezultaty Autorka przedstawiła w sposób jasny i czytelny w formie graficznej w postaci bardzo licznych wykresów i zestawień tabelarycznych. Zaprojektowane i przebadane rozwiązania zostały także zaimplementowane do praktycznych zastosowań. Przeprowadzona została poprawna analiza i interpretacja uzyskanych rezultatów i na tej podstawie wyciągnięte zostały właściwe wnioski.

Po analizie rozprawy uważam, że głównymi osiągnięciami naukowych Autorki wynikającymi z jej badań i analiz są wymienione niżej następujące dokonania:

- wykazanie na bazie badań i analiz, że oznaczanie stałych dielektrycznych na podstawie amplitud fal odbitych od powierzchni jest korzystniejsze przy oznaczaniu grubości warstw nawierzchni drogowych, ponieważ pozwala na badanie dużych powierzchni w sposób szybki i nieniszczący,
- opracowanie nowoczesnej metodyki analizy sygnału GPR z wykorzystaniem:



-
- transformaty Fouriera do wykrywania pustek powietrznych, i niedogęszczenia, zanieczyszczenia chlorkami oraz innych wad wynikających z warunków atmosferycznych,
 - analizy falkowej do stwierdzenia występowania soli odladzającej w warstwie przypowierzchniowej nawierzchni,
 - zaproponowanie na podstawie własnych badań i analiz algorytmu oznaczania grubości warstw nawierzchni,
 - zaproponowanie, kryterium rozkładu widma w zależności od niejednorodności, jako narzędzia lokalizacji zbrojenia, pustek, niedogęszczeń, delaminacji oraz obecności chlorków,
 - stwierdzenie, że widmo częstotliwości fali zmienia swój kształt w zależności od stanu powierzchni wynikającego z warunków atmosferycznych,
 - możliwość wykorzystania otrzymanych rezultatów badań i analiz w praktyce inżynierskiej co pozwoli na potwierdzenie grubości warstw zgodnie z projektem a w konsekwencji zwiększyć trwałość nawierzchni drogowych,
 - wykazanie na podstawie badań i analiz, że metoda georadarowa może być samodzielnym narzędziem do oceny grubości warstw nawierzchni drogowych, zarówno jako badanie odbiorowe, jak również służące procesom optymalizacyjnym zabiegów remontowych,
 - możliwość wykorzystania otrzymanych rezultatów badań i analiz jako podstawę do formułowania i modyfikowania przepisów odnośnie do warunków technicznych wykonania i odbioru robót budowlanych przy wykonywaniu nowych i remontowanych nawierzchni drogowych.

5. UWAGI KRYTYCZNE

Na wstępie chciałbym podkreślić, że przedstawione w niniejszym punkcie uwagi krytyczne odnośnie recenzowanej rozprawy nie obniżają jej wartości merytorycznej i jej jednoznacznie pozytywnej oceny. Zostały one podane w charakterze dyskusji i pewnego rodzaju uporządkowania przedstawionych treści z nadzieją, że mogą być przydatne i zostaną wykorzystane w trakcie opracowywania publikacji naukowych kierowanych do czasopism z tej tematyki.



Podczas czytania rozprawy nasunęły mi się, w kolejności, następujące uwagi krytyczne i dyskusyjne:

- a) str. 19 – w wersie 26 powinno raczej być *skutki społeczne*..... a nie *obciążenie społeczne*
- b) str. 51 – w oznaczeniach jonów sodu i chloru pojawiają się nieścisłości – na rysunku 4.6 oznaczenia jonów są prawidłowe Na^+ a Cl^- natomiast w wersie 6 są oznaczone błędnie (Na^- a Cl^+) – oczywiście może zaistnieć taka sytuacja ale nie w tych warunkach środowiskowych
- c) str. 64 – we wersie 26 powinno raczej być ...z *antenami tubowymi sprzężonymi pośrednio w podłożem*.....chyba że Autorka chciała przekazać inną informację

6. WNIOSEK KOŃCOWY

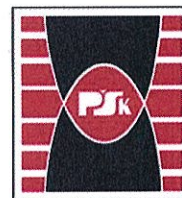
Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Małgorzaty Ruszczak rozwiązuje oryginalne zadanie naukowe dotyczące oznaczania grubości warstw nawierzchni drogowych metodą georadarową (GPR).

Uważam, że przedstawiony w rozprawie cel został osiągnięty, a sformułowane tezy udowodnione.

Autorka rozprawy wykazała się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, umiejętnościami programowania i prowadzenia badań doświadczalnych. Zrealizowała obszerny zakres tych badań, otrzymała oryginalne wyniki, przeanalizowała je, krytycznie oceniła i sformułowała poprawne wnioski. Świadczy to o Jej bardzo dobrym przygotowaniu i predyspozycjach do samodzielnego prowadzenia prac naukowo — badawczych.

Uwagi krytyczne zawarte w punkcie 5 recenzji nie obniżają wartości merytorycznej i ogólnej pozytywnej oceny rozprawy. Mają one charakter dyskusyjny, ale też i porządkowy.

W mojej opinii rozprawa wnosi w przedmiotowym temacie istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa i transport i ma znaczenie naukowe i praktyczne.



7. SENTENCJA RECENZJI

Biorąc pod uwagę sformułowania zawarte we wniosku końcowym, moim zdaniem recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Małgorzaty Ruszczak zatytułowana „*Oznaczanie grubości warstw nawierzchni drogowych metodą georadarową (GPR)*” spełnia wymogi odnośnie do prac doktorskich zawarte w:

- Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, Nr 65, poz. 595 z późn. zm. tj. Dz.U. 2016 poz. 882 i 1311 oraz Dz.U. 2017 poz. 859)
- Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2014, poz. 1383)
- Ustawie z dnia 3 lipca 2018 r. o przepisach wprowadzających ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1669 z późn. zm.)
- Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2020, poz. 85)

i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

W mojej opinii oceniana rozprawa wnosi w przedmiotowym temacie istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport i ma znaczenie naukowe i praktyczne, dlatego też wnioskuje o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Ruszczak.

Guzon Int
11-01-2021