

Dr hab. inż. Paweł Mieczkowski
Katedra Dróg i Mostów
Wydział Budownictwa i Architektury
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Tel. (91) 449 40 36
e-mail: pawel.mieczkowski@zut.edu.pl

Szczecin, 31 lipiec 2019 r.

OPINIA

na temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Rokitowskiego
pt. „Badania i analizy właściwości mechanicznych niezwiązanych warstw nawierzchni
drogowych z uwzględnieniem ich wilgotności”

wykonanej pod kierunkiem:

prof. dr hab. inż. Joanny Bzówki – promotora
oraz **dr inż. Marcina Grygierka** – promotora pomocniczego

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną do wykonania recenzji rozprawy doktorskiej jest pismo Pani Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Joanny Bzówki z dnia 08.07.2019 r. (RB-0/4020/18/19), realizujące uchwałę Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej z dnia 03.07.2019 r.

2. Ocena rozprawy

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska ma charakter pracy badawczej. Została przedstawiona w formie papierowej na 230 stronach formatu A4. Dołączono do niej część załącznikową liczącą 70 stron, w której zawarto wyniki badań wykonanych w terenie na odcinku drogi wojewódzkiej nr 780 (w miejscowości Chelmek, woj. małopolskie) oraz laboratoryjnych w cylindrze pomiarowym i aparacie do bezpośredniego ścinania. Część zasadnicza pracy liczy 216 stron i składa się z wykazu wybranych oznaczeń i symboli, pięciu rozdziałów głównych oraz bibliografii i wykazu norm i aktów prawnych (10 stron). W końcowej części zamieszczono streszczenie w j. polskim i angielskim. Nie załączono spisu tablic i rysunków. Spis literatury obejmuje 151 pozycji, z czego 137 to monografie, artykuły, materiały konferencyjne i dokumenty techniczne, 22 pozycje odnoszą się do norm przedmiotowych (krajowych i europejskich oraz jednej niemieckiej).

Wpłynęło dnia 6.08.2019¹

Opiniowana rozprawa dotyczy wpływu zawilgocenia na właściwości mechaniczne niezwiązanych warstw nawierzchni drogowych. Doktorant w oparciu o przegląd literatury przygotował program badań laboratoryjnych składający się z czterech etapów. Sposób jego realizacji, wyniki z uzyskanych oznaczeń, ich analiza oraz wnioski zostały przedstawione w poszczególnych rozdziałach pracy.

Mogę stwierdzić, że tytuł rozprawy, podjęta tematyka badawcza jest aktualna i interesująca pod względem naukowym, zatem jej wybór i przedstawienie w rozprawie doktorskiej uznaję za merytorycznie uzasadnione.

Rozdział 1 – Wstęp

Rozdział składa się z trzech podrozdziałów głównych.

W pierwszym (*Wprowadzenie*) przedstawiono bardzo ogólne informacje na temat infrastruktury drogowej, oddziaływań destrukcyjnie wpływających na trwałość nawierzchni drogowych z uwypukleniem wpływu zmian w zawilgoceniu warstw niezwiązanych (w tym podłoża gruntowego) na ich parametry mechaniczne.

W drugim podrozdziale sformułowano w sumie sześć tez pracy związanych z tematyką pracy.

Cel i zakres pracy zawarto w trzecim podrozdziale. Głównym celem pracy była ocena wpływu zmian wilgotności warstw niezwiązanych nawierzchni drogowej na ich właściwości mechaniczne (spójność, kąt tarcia wewnętrznego, moduły odkształcenia) oraz trwałość zmęczeniową konstrukcji. W rozdziale w sposób skrótowy przedstawiono zakres, z których do najważniejszych Autor zaliczył przegląd literatury oraz badania (terenowe i laboratoryjne) zakończone analizą wyników i wnioskami.

Rozdział 2 – Przegląd aktualnego stanu wiedzy

Rozdział składa się z trzech podrozdziałów głównych.

Dwa pierwsze dotyczą ogólnych zagadnień związanych z budową nawierzchni podatnej i półsztywnej oraz pracą warstw niezwiązanych i podłoża gruntowego w układzie warstwowym. W podsumowaniu tej części Autor stwierdził, że do opisu materiałów niezwiązanych powinno wykorzystywać się modele sprężysto-idealnie plastyczne w stosunku do stosowanego powszechnie modelu liniowo-sprężystego. Trzeci podrozdział obejmuje zagadnienia związane z wpływem zmiany zawilgocenia na pracę nawierzchni. Omówiono główne przyczyny zawilgocenia warstw konstrukcji oraz zwrócono uwagę na zmiany w intensywności opadów w Polsce. Przeanalizowano wyniki uzyskane z doświadczeń zagranicznych i krajowych dotyczących poruszanego w pracy problemu. Zwrócono uwagę, że w literaturze zagranicznej zagadnienia związane z wilgotnością warstw niezwiązanych w konstrukcji drogowej i ich wpływem na parametry mechaniczne tych warstw są dość często poruszane i analizowane w oparciu o badania laboratoryjne jak i w skali technicznej. W literaturze krajowej ograniczają się raczej do zagadnień związanych z problemami na etapie wykonawstwa czy też projektowania nawierzchni. Autor, na podstawie przeglądu stanu wiedzy oraz doświadczeń własnych z przeprowadzonych badań, podjął się przeprowadzenia szerszych analiz nad wpływem zawilgocenia na parametry mechaniczne warstw niezwiązanych nawierzchni drogowych, w oparciu o badania terenowe, laboratoryjne oraz analizy numeryczne.

Rozdział 3 – Badania własne

Rozdział składa się z dwóch podrozdziałów głównych.

W pierwszym podrozdziale omówiono zakres badań terenowych. Obserwacji poddano odcinek drogi wojewódzkiej nr 780 o długości 400 m, zlokalizowany w miejscowości Chełmek. Przedstawiono podstawowe informacje odnośnie konstrukcji nawierzchni, warunków gruntowo-wodnych, przeprowadzonych w latach 2015-2018 remontów oraz stanu nawierzchni. Dokładnym badaniom

poddano odcinek o długości 190 m (pas prawy), na którym w roku 2015 przeprowadzono remont (oznaczony jako remont B). Należy zaznaczyć, że konstrukcja na pasie prawym w śladzie prawym i śladzie lewym była zróżnicowana. Szczegółowe badania dotyczyły zmian w parametrach nawierzchni w prawym śladzie koła. Właściwe badania obejmowały wykonanie oznaczeń na drodze (moduły okształcenia płytą statyczną VSS i dynamiczną LFWD, poziom zwierciadła wody gruntowej, równość poprzeczna, ugięcia belką Benkelmana oraz ugięciomierzem FWD) oraz w laboratorium (wilgotność naturalna, uziarnienie, wilgotność optymalna, maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, wskaźnik CBR i IPI oraz spójność i kąt tarcia wewnętrznego). Badania laboratoryjne wykonano na jednej próbce kruszywa dolomitowego pobranej z warstwy podbudowy pomocniczej oraz dwóch próbkach piasku pylastego ze żwirem (grsiSa), pobranych z podłoża. Autor przeprowadził dość szczegółowe analizy i wyciągnął wnioski, kończące ten podrozdział.

Drugi podrozdział dotyczył badań laboratoryjnych, które zgodnie z programem zostały skłasyfikowane w czterech grupach. Do pierwszej grupy zaliczono wykonanie próbnych obciążeń układu warstwowego o zróżnicowanej wilgotności płytą statyczną VSS w cylindrze pomiarowym (badania wstępne i docelowe), w drugiej próby obciążeniowe wykonywano w skrzyni testowej, trzecia część obejmowała wykonanie badań materiałowych, czwarta – dotyczyła analiz numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Pewne zastrzeżenia odnośnie tej części badawczej dotyczą głównie metodyki wykonania badania Proctora (oznaczenia wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstość objętościowej szkieletu gruntowego), kąta tarcia wewnętrznego i spójności w aparacie bezpośredniego ścinania oraz zakresu obciążeniowego w badaniu płytą statyczną VSS. Szczegółowe pytania zawarto w pkt. 3 recenzji.

Rozdział 4 – Analiza wyników

Autor w tej części rozprawy podjął się analizy wyników uzyskanych z różnych etapów badań, co jest niezmiernie trudnym zadaniem, m.in. ze względu na jego skalę oraz przyjęte założenia. W analizie posługuje się tzw. wilgotnością odniesienia w_{odn} , przy której uzyskiwano maksymalne wartości modułów okształcenia w badaniach docelowych w cylindrze oraz skrzyni pomiarowej. Warto tu zauważyć, że w przypadku warstwy podbudowy pomocniczej w obu etapach badań korzystano z kruszywa dolomitowego o zróżnicowanych parametrach. Również dobór krzywych opisujących zmianę wartości poszczególnych parametrów (spójności, kąta tarcia wewnętrznego) w zależności od przyrostu wilgotności (w stosunku do w_{odn}) w niektórych przypadkach może budzić wątpliwości.

Ważnym elementem tego rozdziału były obliczenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni przeznaczonych na ruch KR2 i KR4 dla różnych wariantów modelowania warstw niezwiązanych i ich porównanie do stosowanego powszechnie modelu sprężystego. Autor, na podstawie uzyskanych wyników badań modułów okształcenia, kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności, wyznaczył redukcję trwałości zmęczeniowej konstrukcji w stanie nasycenia wodą warstw niezwiązanych w stosunku do konstrukcji, w której warstwy niezwiązane miały wilgotność ok. 6.2-6.3%.

Rozdział 5 – Wnioski końcowe

Przedstawione wnioski odnoszą się do uzyskanych wyników badań cech mechanicznych materiałów niezwiązanych o różnym stopniu zawilgocenia oraz odwzorowujących te zmiany analiz numerycznych.

Autor w sposób syntetyczny przedstawił najważniejsze osiągnięcia z poszczególnych etapów pracy świadczące o negatywnym oddziaływaniu wody na warstwy niezwiązane w konstrukcji nawierzchni drogowej. Mając świadomość, że zakres zrealizowany w ramach pracy doktorskiej nie wyczerpuje tematyki wskazał na kierunki dalszych badań, obejmujące trzy sfery: badania terenowe odcinków o

stałym i okresowym zawilgoceniu, badania laboratoryjne materiałów o zróżnicowanym pochodzeniu i składzie ziarnowym oraz numeryczne, odwzorowujące zmiany w parametrach materiału na skutek zmian w ich wilgotności.

2.2. Aktualność tematu

Rozprawa doktorska mgr inż. Przemysław Rokitowski dotyczy dość istotnego problemu zakresu technologii drogowej, a dokładnie wpływu zawilgocenia podłoża i warstw niezwiązanych na trwałość konstrukcji nawierzchni. Uzyskane wyniki z badań pozwalają szacować wielkości zmian parametrów mechanicznych warstw niezwiązanych, co może być niezwykle przydatne przy projektowaniu i wykonawstwie nawierzchni usytuowanych na terenach z wysokim poziomem wód gruntowych. W przypadku już wykonanych nawierzchni w tego rodzaju obszarach (bądź niewłaściwie zrealizowanych) umożliwiają określenie przedziału czasowego do wystąpienia zniszczeń i zaplanowania ewentualnych napraw.

Problematyka zawilgocenia podłoża i warstw niezwiązanych i wpływ tego zjawiska na parametry mechaniczne warstw nawierzchni drogowych w literaturze zagranicznej nie jest rzadkością. Analizowane są zagadnienia ze zrealizowanych dróg, ze specjalnie przygotowanych odcinków testowych jak również z badań materiałowych wykonywanych w określonych warunkach w laboratorium. Polskie doświadczenia w tym zakresie prezentowane w literaturze, szczególnie z ostatnich lat, odnoszą się najczęściej do etapu projektowania (właściwych rozwiązań w zakresie dolnych warstw konstrukcji i podłoża gruntowego) czy niewłaściwego wykonawstwa zrealizowanych już inwestycji drogowych. Brak jest danych z zakresu parametrów materiałów niezwiązanych o zróżnicowanej wilgotności. Mogłoby to się przysłużyć do projektowania konstrukcji nawierzchni na obszarach o stałym bądź czasowym wysokim poziomie wód gruntowych dróg, których niweleta z różnych względów nie może być wyniesiona na bezpieczną wysokość ponad teren.

Znaczna większość inżynierów drogownictwa jest świadoma tego, że woda jest jednym z głównych czynników odpowiadających za uszkodzenia nawierzchni. Jednak w praktyce inżynierskiej zarządcy dróg w dalszym ciągu nie przywiązują do tego zbyt dużej wagi. W efekcie, w wyniku niewłaściwego wykonania lub nieodpowiednio dobranych zabiegów utrzymaniowych, prowadzi to do częstych remontów (nierzadko na tych samych odcinkach dróg o największym obciążeniu), a koszty z tym związane ograniczają możliwości inwestycyjne czy też utrzymaniowe na pozostałej sieci drogowej. Upowszechnienie problematyki zawilgocenia podłoża i warstw niezwiązanych nawierzchni jest zatem właściwym kierunkiem działań, nie tylko o charakterze teoretycznym (edukacyjnym), ale również praktycznym.

Przeprowadzone przez Autora analizy numeryczne, bazujące na modelu Coulomba-Mohra oraz uzyskanych z badań parametrach materiałowych (kąt tarcia wewnętrznego, spójność, moduł odkształcenia) ośrodków o zróżnicowanym zawilgoceniu, pozwalają szacować trwałość zmęczeniową konstrukcji. Uwzględnienie tego warunku (zawilgocenia) pozwoli urealnić teoretyczną wartość trwałości i dostosować ją do warunków rzeczywistych. Pozwoli to inwestorowi w uzgodnieniu z projektantem na podejmowanie ewentualnych (świadomych) zmian w rozwiązaniach konstrukcyjnych, dostosowujących je do przewidywanego okresu użytkowania czy też związanych z nimi nakładów finansowych.

Podsumowując, przedstawiona do oceny praca dotyczy aktualnego problemu związanego z wpływem zawilgocenia podłoża i warstw niezwiązanych konstrukcji nawierzchni na jej parametry mechaniczne oraz trwałość. Uwzględnienie tego zjawiska może przyczynić się do właściwego

podejścia na etapie projektowania nawierzchni oraz utrzymania drogi, co będzie się przekładało na urealnienie „kosztów życia” nawierzchni drogowej.

2.3. Ocena programu i zakresu badań

Zakres badań wykorzystanych w pracy doktorskiej był bardzo obszerny. Został on podzielony na trzy podstawowe etapy. Pierwszy etap, przedstawiony w rozdz. 3.1.3, dotyczył badań terenowych na DW 780, na odcinku drogi liczącym 190 m (od km 330+300 do km 33+490). W zakresie badań było sprawdzenie grubości i rodzaju warstw konstrukcji drogowej oraz poziomu zwierciadła wody gruntowej, analiza właściwości materiałów z podłoża gruntowego i warstwy podbudowy pomocniczej z mieszanki niezwiązanej, badania ugięć sprężystych (belka Benkelmana, FWD), modułów odkształcenia (płyta VSS i LFWD) oraz równości poprzecznej. Celem pełniejszych analiz dane te uzupełniono o wielkość opadów atmosferycznych oraz ocenę wizualną stanu nawierzchni i jego zmian w czasie. Drugi etap (badania laboratoryjne) składał się z dwóch części (rozdz. 3.2.2). Pierwsza obejmowała wykonanie oznaczeń parametrów materiałowych w cylindrze pomiarowym (badania wstępne i docelowe), natomiast druga była przeprowadzona w specjalnie dostosowanej skrzyni testowej. W obu przypadkach określano wartości odkształceń pionowych podłoża pod wpływem przykładowych obciążeń, a w przypadku badań w skrzyni dodatkowo odkształceń poziomych (w środku warstwy podbudowy pomocniczej i na jej spodzie) z wykorzystaniem czujników światłowodowych. Zmiennym parametrem w obu badaniach była wilgotność materiałów niezwiązanych (piasku średniego, kruszywa dolomitowego) oraz rodzaj (uziarnienie) kruszywa dolomitowego. Badania wymagały określenia właściwości materiałów wykorzystanych w badaniach (uziarnienie, kąt tarcia wewnętrznego, spójność, wilgotność optymalna oraz maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego). Uzyskane wyniki z badań poddano analizie numerycznej z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES).

Poszczególne etapy badań zostały właściwie zaplanowane, ale ich ilość i zakres mogła nastroczać pewnego rodzaju problemy. Z tego względu nasuwają się uwagi (zapytania) odnośnie przyjętych założeń materiałowych czy też metodyki badań:

- na etapie badań laboratoryjnych (w cylindrze i skrzyni testowej) stosowano różne materiały. W cylindrze na etapie wstępnym do warstwy podłoża zastosowano piasek średni (z kopalni w Kotlarni) i kruszywo dolomitowe (kopalnia Żąbkowice) o uziarnieniu 0/31.5 mm. W badaniach zasadniczych uległo zmianie pochodzenie kruszywa dolomitowego (materiał pobrany z warstwy podbudowy pomocniczej z drogi) oraz jego uziarnienie (odsiano frakcję powyżej 22.4 mm i częściowo frakcję poniżej 0.063 mm). W skrzyni testowej ponownie zmianie uległo kruszywo dolomitowe (brak informacji o pochodzeniu). Czy wprowadzone zmiany w zakresie rodzaju materiału pozwalają na bezpośrednie analizowanie różnic w parametrach w zależności od metodyki badania. Jak odnieść uzyskane wyniki z badań laboratoryjnych do wyników z drogi?
- wykorzystanie małego cylindra do oznaczenia wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego kruszywa dolomitowego, zarówno o uziarnieniu 0/31.5 mm jak i 0/22.4 mm. W obu przypadkach jest to niezgodne z zapisami normy. Z doświadczenia oraz przeglądu literatury można wnioskować, że ma to wpływ na uzyskiwane wyniki z badań obu tych parametrów. Problematyczne jest również podejście do zagęszczenia – przy każdorazowej zmianie wilgotności zagęszczana powinna być nowa próbka materiału;

- do oznaczenia kąta tarcia wewnętrznego i spójności kruszywa dolomitowego zastosowano typowe skrzynki o wymiarach 10×10 cm lub 14×14 cm, wykorzystywane do badań gruntów (o znacznie mniejszym uziarnieniu). Zgodnie z danymi literaturowymi do tego rodzaju kruszywa powinno stosować się skrzynki wielkowymiarowe, zarówno w zakresie wymiarów bocznych jak i pionowego. Tego rodzaju zapisy znajdują się również w normie przedmiotowej;
- w badaniach z płytą dociskową na każdym z etapów stosowano różne ciśnienia końcowe (450 kPa na drodze, 200 kPa w cylindrze, 350 kPa w skrzyni) oraz ciśnienia, dla których wyznaczano moduły odkształcenia (250-350 kPa na drodze, 100-200 kPa w cylindrze, 250-350 kPa w skrzyni). Ponadto, w standardowej procedurze oceniane podłoże jest przeciążane o 100 kPa, w stosunku do ciśnienia p_2 , przy którym odczytuje się wartość odkształcenia. Ma to wpływ zarówno na wartość modułu E_2 jak i wartość wskaźnika odkształcenia.

Trzeci etap, ściśle powiązany z dwoma pierwszymi, dotyczył analizy numerycznej z wykorzystaniem MES, opartej na wynikach przeprowadzonych badań i oznaczeń. Jego zwieńczeniem było wyznaczenie trwałości zmęczeniowych konstrukcji nawierzchni o zróżnicowanych wilgotnościach warstw niezwiązanych i podłoża gruntowego.

Niezależnie od przedstawionych powyżej uwag (zapytań) uważam, że przyjęty program badań można uznać za właściwy, a pewne niedociągnięcia za dopuszczalne.

2.4. Tezy i cel naukowy

W rozprawie sformułowano sześć tez (rozdz. 1.2).

Trzy pierwsze odnoszą się do wpływu zawilgocenia warstw niezwiązanych i podłoża na ich parametry mechaniczne oraz identyfikację jakościową zachodzących zmian w badaniach laboratoryjnych.

W dwóch kolejnych tezach stwierdzono, że istnieje możliwość wykorzystania modelu konstytutywnego sprężysto-idealnie plastycznego z warunkiem Coulomba-Mohra (w oparciu o parametry materiałowe o różnym stopniu zawilgocenia) do identyfikacji parametrów podłoża i warstw niezwiązanych oraz trwałości konstrukcji nawierzchni drogowej.

Ostatnia z tez odnosi się bezpośrednio do trwałości nawierzchni, a dokładnie jej redukcji na skutek nadmiernego zawilgocenia podłoża gruntowego i warstw niezwiązanych.

2.5. Struktura rozprawy, język i redakcja pracy

Strukturę pracy można uznać za właściwą. Występują pewne zróżnicowania w objętości poszczególnych rozdziałów, przy czym jest to związane z charakterem pracy oraz obszarem tematycznym poszczególnych rozdziałów.

Rozprawa jest napisana poprawnie, język techniczny odpowiada tematyce i poruszonym zagadnieniom. W pracy pojawiają się pojedyncze błędy o charakterze redakcyjnym i stylistycznym oraz literówki, np.:

- na wykresach uziarnienia najmniejszy wymiar sita powinien być opisany jako „0”, jest „≤0.05”;
- brak oznaczeń krzywych na rys. 17 (str. 27).
- na rys. 72 oraz na str. 77-78 błędnie opisany wskaźnik IPI jako IBI,
- błędnie opisano na rys. 122 podbudowę pomocniczą jako podbudowę zasadniczą
- wartości wilgotności przedstawione w tab. 24 różnią się w stosunku do podanych w opisie pod rys. 147 i rys. 148;
- rys. 160 (str. 158) błędnie oznaczony jako rys. 2.

Autor rozprawy nie ustrzegł się również skrótów myślowych, których w języku technicznym powinno się unikać, przy czym jest to incydentalne, np.:

- „konstrukcja nawierzchni może *doznać* nawet 50% redukcji nośności...” – doznania odnoszą się raczej do ludzi, ich odczuć.

Ewentualne uwagi można mieć również do numeracji tabel i rysunków. Przyjmuje się, że ich numer powinien się składać z dwóch elementów, tj. numeru rozdziału (głównego) oraz numeru kolejnego rysunku czy tabeli w rozdziale. Ułatwia to orientację i szybszą jego lokalizację w tekście pracy.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne, pytania do pracy

W trakcie omawiania poszczególnych rozdziałów zwrócono uwagę na pewne niedociągnięcia czy też błędy, na które doktorant powinien udzielić odpowiedzi. Poniżej przedstawiono dodatkowe uwagi (pytania) do pracy, które uszczegóławiają pewne kwestie i wymagają wyjaśnienia, a w niektórych przypadkach uzasadnienia względem przyjętych kierunków działań przez doktoranta:

1. Na str. 14 jest napisane, że w latach 2010-2017 zmieniła się w poszczególnych rejonach Polski sumaryczna ilość opadów. Na potwierdzenie przedstawiono dwa rysunki (rys. 3-4). Czy to stwierdzenie wysnuto na podstawie wyłącznie tych dwóch map opadów sumarycznych, czy też doktorant dysponuje bardziej szczegółowymi danymi odnośnie wielkości opadów atmosferycznych dla poszczególnych okresów i rejonów Polski.
2. Autor posługuje się stwierdzeniem „pełne nasycenie” (np. str. 17), którego nie zdefiniował w pracy. Czy można to rozumieć jako całkowite wypełnienie wodą wolnej przestrzeni w strukturze zagęszczonego materiału mineralnego?
3. Na str. 30 odnosząc się do rys. 23 napisano, że „w przypadku konstrukcji z podbudową z kruszywa łamanego na wykresie widać wyraźne załamanie w momencie zmiany warunków wodnych ...” – wartości na rys. 23 świadczą, że to podbudowa z kruszywa naturalnego jest podatna na zawilgocenie. Również wartości na rys. 24 nie odzwierciedlają wyników na rys. 23.
4. Na str. 63 omówiono główne założenia odnośnie „remontu B” na pasie prawym, wykonanego w 2015 r. Przyjęta konstrukcja nie jest, jak twierdzi Autor, typowym rozwiązaniem przedstawionym w KTKN PiP z 2014 r.
5. Krzywe graniczne dla podbudowy pomocniczej przedstawione na rys. 69 są niezgodne WT-42:2010 (dotyczy górnego zakresu dla sita 0.063 mm, dla sita 0.05 mm – brak wymagań).
6. Autor przy większości opisów badań powoływał się na obowiązujące normy przedmiotowe, co w przypadku badań naukowych nie jest wymogiem. Twierdził, że badania wykonywał zgodnie z zapisami przedstawionymi w tych normach. Można się jednak dopatrzeć w wielu przypadkach odstępstw od zapisów norm. W tekście brak informacji na temat rodzaju odstępstwa czy też przyczyny. Poniżej przykłady, do których należy się odnieść:
 - dla materiałów z podłoża gruntowego oraz podbudowy pomocniczej wykonywano oznaczenie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz wilgotności optymalnej. Autor przy opisie badania powołał się na normę PN-EN 13286-2:2010. Do badania wykorzystano mały cylinder (forma A) oraz lekki ubijak. Zgodnie z normą dla kruszyw o uziarnieniu powyżej 16 mm należy stosować formę B, przy założeniu, że nadziarna pow. 16 mm nie jest więcej w materiale niż 25%. Z analizy sitowej wynika, że w przypadku obu materiałów (we wszystkich przypadkach dla kruszywa dolomitowego oraz dla gruntu podłoża pobranego z drogi) frakcji pow. 16 mm jest więcej niż 25%. Jak zatem odnieść się do uzyskanych wyników z przeprowadzonych oznaczeń?
 - na str. 74-75 (oraz str. 124 i str. 142) jest napisane, że masa próbek do oznaczenia wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego wyniosła ok. 3000 g.

- Przygotowanie próbek do badań według normy polskiej (PN-88/B-04481) i europejskiej (PN-EN 13286-2) znacznie się różni. Norma polska pozwala na pięciokrotne zagęszczanie (ubijanie) tej samej partii gruntu, a zwiększenie wilgotności uzyskuje się poprzez dolewanie wody do wcześniej ubijanego gruntu. Norma europejska nakazuje przygotowanie co najmniej pięciu prób gruntu o różnej wilgotności, każda z nich jest zagęszczana tylko raz. Tym samym wykonując badanie zgodnie z PN-EN 13286-2 masa próbek powinna być znacznie większa. Ponadto, w przypadku piasku średniego (badania wstępne w cylindrze pomiarowym) wykonano w sumie 7 serii pomiarowych przy zróżnicowanej wilgotności. W tym przypadku również masa próbki wynosi 3000 g, a próbka była poddana zagęszczeniu 7-krotnie;
- w zakresie badań terenowych było wykonanie oznaczenia modułów odkształcenia przy użyciu płyty VSS. W opisie wskazano, że badanie wykonywano zgodnie z obowiązującymi normami BN-64/8931-02 i PN-S-02205:1998. Jednym z etapów badania jest przyrost obciążenia oraz odciążenia. W pracy wyniósł on odpowiednio 50 kPa i 25 kPa. Zgodnie z normą wartości te powinny być dwukrotnie wyższe (50 i 100 kPa);
 - w rozdz. 3.1.4.6 przedstawiono warunki prowadzenia pomiarów ugięć metodą belki Benkelmana. Z zapisów wynika, że pomiary prowadzono zgodnie z BN-78/8931-06 (wariant I). Numer normy jest błędny w zakresie roku wydania – powinno być BN-70/8931-06. Ponadto w zapisach normy (pkt. 1.2) jest mowa o tym, że metody pomiaru nie stosuje się lub stosuje z ograniczeniami w przypadku, gdy temperatura warstwy ścieralnej z udziałem asfaltu przekracza 20°C. Średnia temperatura warstw asfaltowych (na głębokości 9 cm) w trakcie pomiarów prowadzonych w dniach 30.08.2016 r. oraz 19.07.2017 r. wskazuje, że temperatura warstwy ścieralnej przekraczała 20°C. W tekście brak odniesienia do ww. zapisu normy;
 - zgodnie z normą BN-64/8931-2 wskaźnik odkształcenia dla warstwy podbudowy powinno obliczać się na podstawie różnicy odkształceń odpowiadających ciśnieniu 0.25 i 0.35 MPa, przy czym końcowe ciśnienie powinno wynosić dla tej warstwy 0.45 MPa. W taki sposób zostało to wykonane na odcinku doświadczalnym. Dlaczego w skrzyni testowej ciśnienie końcowe wynosiło tylko 0.35 MPa, a odkształcenie mu odpowiadające posłużyło do obliczenia wskaźnika odkształcenia. Brak dodatkowego przeciążenia (rzędu 100 kPa) wpływa na wartość E_2 , a tym samym i na wartość wskaźnika odkształcenia.
7. Na str. 75 napisano, że masa netto próbki gruntu podłoża PG-1 wynosiła 3005 g, natomiast próbki PG-2 – 3000 g. W tab. 7-8 widnieją zgoła inne masy próbek, większe od tych, które podano jako wyjściowe.
 8. W tab. 6 (str. 75) oraz na rys. 71 (str. 76) przedstawiono wyniki oznaczenia maksymalnej gęstości objętościowej i wilgotności optymalnej dla kruszywa dolomitowego przeznaczonego do warstwy podbudowy pomocniczej. Na jakiej podstawie zakończono proces badania po czterech próbach zagęszczania przy zróżnicowanej wilgotności (przy pięciu wymaganych normą PN-EN 13286-2)? Wyniki badań wskazują, że wzrastała zarówno masa próbki, jej gęstość objętościowa oraz gęstość objętościowa szkieletu gruntowego. Na jakiej podstawie przyjęto wartość maksymalnej gęstości objętościowej i wilgotności optymalnej z trzeciej próby zagęszczania? Z praktyki wykonawczej oraz badań laboratoryjnych można się spodziewać, że gęstość objętościowa szkieletu gruntowego mieszanek niezwiązanych do warstw podbudowy (pomocniczej, zasadniczej) wynosi ok. 1,9-2.2 g/cm³ – podobną wartość Autor opracowania uzyskał na etapie sprawdzenia materiałów do badań w skrzyni pomiarowej. Uzyskana z badania gęstość (1.738 g/cm³) jest bardzo niska, co powinno wzbudzić pewne wątpliwości odnośnie uzyskanego wyniku. Również w przypadku wilgotności optymalnej równej 12.28% można mieć pewne zastrzeżenia. Nawet przez analogię do wyniku wilgotności optymalnej uzyskanej dla gruntu z

- podłoża – drobniejszy materiał o bardziej rozwiniętej powierzchni właściwiej wykazuje znacznie niższą wilgotność optymalną (na poziomie ok. 8.8%).
9. W zakresie badań dla warstwy podbudowy pomocniczej przewidziano wykonanie oznaczenia wskaźnika nośności CBR, natomiast dla podłoża gruntowego wskaźnika IPI. Wskaźnik IPI jest swego rodzaju uproszczoną formę pełnego badania CBR (wykonywanego bezpośrednio po zagęszczeniu próbki przy wilgotności optymalnej bez obciążników). Praktyczne znaczenie tego oznaczenia wynika z oszacowania możliwości poruszania się ruchu technologicznego po podłożu gruntowym. W przypadku poruszanej w rozprawie problematyki (wpływu zawilgocenia na parametry wytrzymałościowe materiałów niezwiązanych) racjonalnym byłoby określenie wpływu wody (po 4 dobach nasycania) na nośność gruntu podłoża.
10. Wartości z oznaczenia wskaźników CBR i IPI przedstawiono na wykresie siła-penetracja (rys. 72, str. 77). Poniżej w tekście podano wyniki. Czy obliczając wartości CBR i IPI uwzględniano styczną do krzywej siła-penetracja, co ma wpływ na odczytywane z wykresu wartości siły odpowiadającej skorygowanemu odkształceniu (2.5 i 5.0 mm)?
11. Na str. 78 zaliczono podłoża do grupy nośności G2 na podstawie wartości IPI, równej 6.55%. Zgodnie z KTKNPIP grupę nośności ocenia się na podstawie wskaźnika CBR (po czterech dobach nasycania wodą).
12. Na str. 78 (oraz str. 142) podano wymiary poziome skrzynek pomiarowych wykorzystywanych w badaniu ścinania bezpośredniego. Brak wymiaru pionowego, który w przypadku materiałów gruboziarnistych ma bardzo duże znaczenie na uzyskiwane wartości z badań. Jest to jedno z wymagań opisanych w PKN-CEN ISO/TS 17892-10:2009.
13. W badaniach materiałowych dla gruntu podłoża i podbudowy pomocniczej określano kąt tarcia wewnętrznego i spójność w aparacie do bezpośredniego ścinania. Uzyskane wartości kąta tarcia wewnętrznego każdorazowo dla gruntu podłoża (piasek pylasty ze żwirem grsiSa, piasek średni MSa) były wyższe niż dla kruszywa dolomitowego (niezależnie od jego uziarnienia i zawartości frakcji pyłowo-iłowej). Z zasady można było się spodziewać (szczególnie przy zbliżonej zawartości frakcji pyłowo-iłowej) wyższych wartości kąta tarcia dla materiału kruszonego (kruszywo z podbudowy pomocniczej), ze względu na większy opór ziaren przy wzajemnym obrocie (co jest wynikiem większego oporu wzajemnego klinowania ziaren). W tekście brak jednoznacznego odniesienia się do uzyskanych wyników badań w tym zakresie. Czy uwzględniono zapis normy PKN-CEN ISO/TS 17892-10:2009 odnośnie wysokości skrzynki w stosunku do wymiaru największego ziarna agregatu mineralnego? Czy, powołując się na zapisy w monografii „Gruntoznawstwo inżynierskie” autorstwa S. Pisarczyka, zastosowane skrzynki były dostosowane do badanego kruszywa gruboziarnistego?
14. Na str. 116-117 we wnioskach z badań terenowych (pkt. 3) jest napisane, że „wysoki poziom zwierciadła wody gruntowej uniemożliwiał nawierzchni pracę w optymalnych warunkach gruntowo-wodnych, a w związku z tym uniemożliwiał przenoszenie zakładanych obciążeń od ruchu na podłoża gruntowe”. Woda w podłożu nie stanowi przegrody uniemożliwiającej przekazanie obciążeń na podłoża, natomiast wpływa na nośność tej warstwy, a tym samym poziom ugięć, co może skutkować przyspieszoną degradacją nawierzchni.
15. Na str. 117 we wnioskach z badań terenowych (pkt. 4) oraz obliczeń wstecznych Autor oszacował wartości modułów sztywności sprężystej warstwy podbudowy pomocniczej. Ten parametr jest zależny m.in. od wskaźnika zagęszczenia materiału. Wyniki badania VSS wskazują, że warstwa ta mogła być niedogęszczona, co tym samym mogło wpłynąć na zaniżenie wartości modułów z badań płytą dynamiczną FWD.
16. W rozdz. 3.2.3.1 omówiono zakres badań wstępnych w cylindrze pomiarowym. Co było podstawą przyjęcia grubości poszczególnych warstw (w-wa piasku średniego – 31.2 cm, w-wa podbudowy pomocniczej – 8.3 cm). Ponadto, dla mieszanek kruszywa o ciągłym uziarnieniu

przyjmuje się zasadę, że grubość warstwy powinna uwzględniać warunek 3-krotności wymiaru największego ziarna (jest to związane z odpowiednim ułożeniem ziaren kruszywa w warstwie, jego klinowaniem i możliwością zagęszczenia, nie powodujących uszkodzeń ziaren).

17. Na str. 121 przedstawiono poszczególne etapy zagęszczania materiałów mineralnych. Jednostką określającą włożoną pracę zagęszczenia jest obok ilości uderzeń różnych ubijaków również jednostkowa energia zagęszczania wyrażona w MJ/m^3 . Dla której z warstw odnoszą się podane wartości (uwzględniając zróżnicowaną objętość zagęszczanych materiałów)?
18. Czy w przypadku pomiarów w cylindrze w układzie dwuwarstwowym dochodziło do mieszania piasku drobnego z kruszywem dolomitowym? W odniesieniu do badań zasadniczych – w jaki sposób odzyskiwano poszczególne materiały do ponownego badania, szczególnie w odniesieniu do frakcji drobnych?
19. Na str. 121 opisano sposób przygotowania próbki do badań wstępnych w cylindrze pomiarowym. W przypadku układu jednowarstwowego masa dociążenia (modelująca obciążenie naziemem) w postaci klocków betonowych wynosiła 79 kg, w układzie dwuwarstwowym – 35 kg. Różnica w obciążeniu klockami betonowymi układu jedno- i dwuwarstwowego wyniosła 44 kg. Masa ta powinna odpowiadać masie kruszywa dolomitowego. Przy uwzględnieniu średnicy cylindra i wysokości warstwy oraz gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (rys. 146) masa kruszywa dolomitowego powinna wynosić 28.47 kg (z uwzględnieniem otworu o średnicy 10,5 cm) bądź 29.73 kg (bez otworu). Dlaczego zatem dociążenie naziemem jest różne w obu przypadkach?
20. Badania wstępne i docelowe w cylindrze pomiarowym miały służyć do wyznaczenia wartości modułów odkształcenia na powierzchni układu jedno- lub dwuwarstwowego. Czy płyta o średnicy 10 cm jest efektywnym narzędziem do oceny parametrów całego pakietu warstw o grubości 39.5 cm? W badaniach terenowych przyjmuje się, że efektywna głębokość oddziaływania płyty VSS wynosi ok. 1.5 jej średnicy.
21. We wstępnych badaniach laboratoryjnych w cylindrze pomiarowym na str. 120 podano wartości wilgotności dla piasku średniego oraz kruszywa dolomitowego. Co było podstawą przyjęcia takich wartości wilgotności (czy ma to związek z wilgotnością optymalną piasku średniego, omówioną na str. 125)?
22. Na rys. 128 (str. 124) przedstawiono krzywą uziarnienia kruszywa dolomitowego 0/31.5 mm, pisząc jednocześnie, że spełnia ona wymagania odnośnie uziarnienia dla podbudowy pomocniczej zgodnie z WT-4:2010. Zgodnie z wymaganiami technicznymi WT-4 uziarnienie kruszywa powinno się określać po 5-cio krotnym zagęszczaniu w aparacie Proctora.
23. W części wstępnej opisu badań docelowych w cylindrze pomiarowym jest napisane, że badania prowadzono na 1 próbce piasku średniego i 1 próbce kruszywa dolomitowego 0/22.4 mm, które każdorazowo zagęszczano (przy każdej zmianie wilgotności). Z tych materiałów korzystano w trakcie badań we wrześniu 2018 r. oraz w styczniu 2019 r. Analiza sitowa kruszywa dolomitowego przed badaniami oraz po I (18 oznaczeń) i II serii pomiarowej (30 oznaczeń) wskazuje, że uziarnienie materiału praktycznie nie zmienia się: niewielkie zmiany rzędu 0.01-0.4% w zakresie grubych frakcji – w wyniku rozkruszenia, a zakresie drobnych frakcji (<0.063 mm) ich udział nawet nieznacznie zmniejsza się. Jak wytłumaczyć można taką stałość materiału w zakresie jego uziarnienia, szczególnie w odniesieniu do zapisów normy PN-EN 13286-2:2010, w której mówi się, że każde kolejne zagęszczanie (przy wyższej wilgotności) powinno być wykonywane na nowej próbce ze względu na zmiany w uziarnieniu? O ile w przypadku gruntów drobnoziarnistych zmiany w uziarnieniu mogą być niewielkie, o tyle materiałach gruboziarnistych te zmiany mogą być znaczące (dla przykładu wyniki badań z Politechniki Śląskiej – Iwona DUDKO-PAWŁOWSKA: Problemy metodyczne oznaczania parametrów zagęszczalności gruntów niespoistych metodą Proctora wg PN-88/B-04481 oraz PN-EN 13286-2).

24. Na str. 142 omówiono warunki wykonania oznaczenia kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności w aparacie do bezpośredniego ścinania dla kruszywa dolomitowego o uziarnieniu 0/22.4 mm. Na etapie wstępnych badań dla kruszywa dolomitowego zastosowano skrzynkę o wymiarach 14×14 cm, a dla piasku średniego skrzynkę o wymiarach 10×10 cm. Dlaczego na etapie badań docelowych dla kruszywa dolomitowego zastosowano skrzynkę o mniejszych wymiarach, tj. 10×10 cm?
25. W tab. 25 (str. 145) przedstawiono warunki wilgotnościowe dla warstwy piasku średniego i kruszywa dolomitowego w poszczególnych wariantach oraz seriach pomiarowych. Z czego wynikała konieczność wykonywania dwóch serii pomiarowych badań docelowych w cylindrze pomiarowym (wrzesień 2018, styczeń 2019), które różniły się praktycznie wilgotnościami?
26. Próbkę w badaniach w cylindrze pomiarowym zagęszczano przy zróżnicowanej wilgotności poszczególnych warstw przy wkladzie tej samej pracy zagęszczenia. Powinno to skutkować zróżnicowanym zagęszczeniem, a tym samym i nośnością. Czy zatem uzyskane wyniki uwzględniają wpływ wyłącznie wilgotności poszczególnych materiałów, czy też kumulacji dwóch parametrów, tj. wilgotności i zagęszczenia? Drugi z parametrów nie był uwzględniany w tezach pracy czy też jej celach.
27. Na rys. 166 (str. 170) w rzucie poziomym brak umiejscowienia czujników wilgotności. Ponadto, czy trzy czujniki wilgotności pozwoliły w sposób wiarygodny określić wilgotność materiałów w obszarze przykładanych obciążeń w odniesieniu do sposobu nawadniania, szczególnie przy pomiarach przy wilgotności ok. 6%?
28. Na str. 168 przedstawiono proces wbudowywania materiałów (piasku średniego i kruszywa dolomitowego 0/31.5 mm) w skrzyni testowej. W obu przypadkach stwierdzono, że warstwy zagęszczano przy użyciu zagęszczarki płytowej, nie podając wilgotności, przy której prowadzono proces oraz uzyskanych parametrów zagęszczenia.
29. Na str. 168-169 opisano sposób przygotowania materiałów w skrzyni testowej. Na str. 168 jest napisane, że „na powierzchni piasku średniego rozłożono geowłókninę separacyjną o niewielkiej gęstości w celu rozdzielania warstwy piasku średniego od warstwy kruszywa dolomitowego”. W dalszej części, na str. 169 jest napisane, że skrzynia została podzielona na dwie sekcje: A i B. W sekcji A zastosowano geosyntetyk na granicy materiałów ziarnistych, sekcja B składała się wyłącznie z materiałów ziarnistych i ona była obiektem badań. Niezrozumiałym jest zatem, czy na granicy obu materiałów jest materiał separacyjny, czy go nie ma. Autor nie powinien zamieszczać informacji o badaniach, które nie dotyczą rozprawy – to może utrudniać jej zrozumienie (zapisy odnośnie sekcji A).
30. Na jakiej podstawie stwierdzono, że wilgotność nasycenia dla piasku średniego wyniosła 29.2%, a dla kruszywa dolomitowego 18.1%.
31. Wartości modułów odkształcenia uzyskane w badaniach w skrzyni testowej są znacznie niższe od spodziewanych dla przyjętego układu warstwowego. Czym Autor może to uzasadnić?
32. Autor w rozdz. 4 „Analiza wyników” stwierdził na podstawie przeprowadzonych badań (m.in. w skrzyni testowej), że wzrost wilgotności powoduje redukcję sztywności warstw niezwiązanych, a konsekwencją w przypadku nawierzchni drogowych są deformacje trwałe. Jednym z czynników wpływających na obserwowane zmiany jest „rozgęszczenie” warstwy. Czy zatem wyniki uzyskane z badań laboratoryjnych (skrzynia pomiarowa) można przenieść bezpośrednio na warunki drogowe. Czy Autor uwzględnił w analizach dociążenie konstrukcji warstwami asfaltowymi i ich ewentualny wpływ na zmiany parametrów (modułu sztywności sprężystej) warstwy niezwiązanych, szczególnie w odniesieniu do przeprowadzonych obliczeń trwałości zmęczeniowej nawierzchni z warstwami niezwiązanymi w stanie nasycenia?
33. Na str. 199 Autor definiuje pojęcie wilgotności odniesienia w_{odn} , tj. wilgotności, przy której uzyskano maksymalne wartości modułów dla poszczególnych materiałów. Następnie

przedstawia na rys. 195-197 procentowo zmianę wartości parametrów (spójności, kąta tarcia, modułu odkształcenia) w zależności od zmiany wilgotności w stosunku do w_{odn} . Przyjęte krzywe budzą wątpliwości. Dla przykładu na rys. 195 krzywa dla piasku sugeruje, że maksymalną wartość kohezji osiągnie on przy wilgotności 13.5%, a dla kruszywa dolomitowego taką wartością będzie 9.5%. Zastanawia też uwzględnianie wartości uzyskanych z badań w skrzyni i cylindrze na jednym wykresie, szczególnie w odniesieniu do warunków badania oraz uzyskiwanych wyników, np. kąta tarcia wewnętrznego czy modułów odkształcenia.

34. Na str. 210 błędnie przyjęto parametry modelu: jest $V_b=6.0\%$, powinno być $V_b=11.0\%$; jest $V_a=11.0\%$, powinno być $V_b=6.0\%$.

35. W rozdz. 4 (oraz w jednym z wniosków) przedstawiono wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni o różnym stopniu zawilgocenia warstw niezwiązanych. Stwierdzono, że w przypadku nawierzchni z warstwami niezwiązanymi w stanie nasycenia wodą może dojść do redukcji trwałości zmęczeniowej rzędu 40% (zależnie od przyjętego modelu) dla kategorii ruchu KR4, natomiast w przypadku ruchu lekkiego (KR2) – nawet 60%. Nawierzchnie tego rodzaju projektuje się na 20 lat, czyli do zniszczenia powinno dojść po około połowie okresu użytkowania. Jak zatem interpretować przyczyny zniszczeń powstałych na analizowanym odcinku po około dwóch latach użytkowania (remont B – konstrukcja C), czy też innych przykładach znanych z literatury?

4. Ocena końcowa

Opiniowana praca porusza ważne zagadnienia z zakresu budownictwa drogowego, tj. wpływu zawilgocenia na parametry mechaniczne warstw niezwiązanych w konstrukcji, a tym samym i trwałość nawierzchni drogowej. Uwzględniając uwagi krytyczne należy stwierdzić, że Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej zaplanował i przeprowadził badania bazując na wiedzy z zakresu budownictwa, realizując tym samym postawione w celu pracy zadania. Poruszane zagadnienia i problemy wymagały dużego zaangażowania, zarówno w zakresie badań wykonywanych w terenie jak i laboratorium. Na szczególną pochwałę zasługuje opracowana i wdrożona oryginalna procedura badań układów dwuwarstwowych w skrzyni laboratoryjnej, pozwalająca na identyfikację deformacji pionowych i odkształceń poziomych pod wpływem przykładanych obciążeń. Mogę stwierdzić, że praca wnosi znaczny wkład w rozwój technologii nawierzchni drogowych w zakresie oceny wpływu zawilgocenia podłoża i warstw niezwiązanych na nośność i trwałość nawierzchni drogowych.

W związku z powyższym uważam, że praca doktorska Pana mgr inż. Przemysława Rokitowskiego spełnia wszystkie wymagania przewidziane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 r. (Dz. U. nr 65 poz. 595 z późn. zmianami) oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19.01.2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 19.01.2018, poz. 261) i wnoszę o dopuszczenie Kandydata do jej publicznej obrony.