



PIOTR JASKUŁA

Politechnika Gdańska
piotr.jaskula@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-1563-2778



ŁUKASZ MEJŁUN

Politechnika Gdańska
lukasz.mejlun@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0001-6456-7645



CEZARY SZYDŁOWSKI

Politechnika Gdańska
cezary.szydowski@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-6141-9839



MARCIN STIENSS

Politechnika Gdańska
marcin.stienss@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0003-1811-1086

Wpływ zastosowania zbrojenia warstw asfaltowych geosyntetykami na nośność remontowanej nawierzchni drogowej – cz. 1

Siatki zbrojące w remontach nawierzchni

Geosyntetyki w budowie dróg są stosowane od lat 80 XX wieku [12]. Jednym z rodzajów geosyntetyków są materiały przeznaczone do zbrojenia konstrukcji nawierzchni, wbudowywane na połączeniu warstw asfaltowych. Warstwy zbrojące z geosyntetyków są przedmiotem badań na świecie od lat 70 XX wieku. Jednym z rodzajów geosyntetyków stosowanych do zbrojenia nawierzchni asfaltowych są siatki, które mogą być wykonywane z różnego typu materiałów, np. poliestru, polietylenu, polipropylenu, czy z włókien bazaltowych, szklanych i węglowych, a także ich kombinacji.

Podstawowym zadaniem siatki zastosowanej do zbrojenia warstw asfaltowych jest ich wzmocnienie poprzez przejście sił rozciągających, powodowanych ruchem pojazdów po nawierzchni. Przekłada się to na zwiększenie wytrzymałości nawierzchni na zginanie, wzrost jej trwałości zmęczeniowej, a przez to wydłużenie okresu pomiędzy kolejnymi remontami [1, 2, 10, 19]. Ponadto zastosowanie siatek może ograniczać powstawanie deformacji trwałych (kolein) [3, 22], czy dawać możliwość redukcji grubości pakietu warstw asfaltowych [2, 13]. Stosowanie siatek lub kompozytów zbrojących może minimalizować rozwój i propagację spękań zmęczeniowych, odbitych i termicznych [10, 22], a nawet stanowić barierę przeciwwilgociową w nawierzchni [6, 22].

Istotną kwestią w aplikacji siatek zbrojących jest zapewnienie odpowiedniej szczepności międzywarstwowej w płaszczyźnie aplikacji siatki [15, 20]. Stosowanie kompozytów wykonanych z połączenia siatki i włókniny wymaga dodatkowego przesączenia zwiększoną

ilością odpowiedniej emulsji asfaltowej [7]. Obecne rozwiązania technologiczne umożliwiają wykorzystanie siatek bezpośrednio na frezowanej powierzchni (bez konieczności stosowania warstw wyrównujących) oraz recykling i frezowanie nawierzchni zbrojonych takimi siatkami [14].

Mimo wielu zalet stosowania geosyntetyków w warstwach asfaltowych, dynamicznego rozwoju technologii produkcji, zwiększającego się asortymentu oraz powszechnego ich stosowania w remontach dróg, nie ma obecnie standardowych procedur umożliwiających zarówno projektowanie konstrukcji nawierzchni z warstwami asfaltowymi wzmocnionymi geosyntetykami, jak i metod oceny wpływu ich zastosowania w remontowanych nawierzchniach. Wykorzystanie geosyntetycznego zbrojenia warstw asfaltowych powinno być wspierane badaniami w pełnej skali na odcinkach doświadczalnych poddanych rzeczywistym obciążeniom od ruchu pojazdów.

Z tego powodu Katedra Inżynierii Transportowej Politechniki Gdańskiej razem z firmą S&P Polska (producentem geosiatek) przy udziale Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad oddział Gdańsk i firmy Przedsiębiorstwo Budowy Dróg S.A. Starogard Gdański (wykonawca prac budowlanych) rozpoczęła realizację programu badawczego pt. *Badania nawierzchni zbrojonych siatkami przesączonymi asfaltem. Prace badawcze w terenie i w laboratorium, w tym badania zmęczeniowe układów warstwowych z siatkami*. Niniejszy artykuł stanowi pierwszą publikację z dwuczęściowej serii, prezentującą efekty rozpoczętego i trwającego programu badawczego.

Cel i zakres programu badawczego

Głównym celem programu badawczego jest poszukiwanie trwałego i skutecznego rozwiązania wzmocnienia nawierzchni lub remontu nawierzchni, jakim jest zbrojenie nawierzchni drogowych w warstwach asfaltowych poprzez zastosowanie siatek z włókien szklanych, szklano-węglowych i węglowych wstępnie przesączonych asfaltem.

Program badawczy zakresem obejmuje prace terenowe i laboratoryjne. Wśród prac terenowych znajdują się między innymi: prace związane z zaplanowaniem i wykonaniem odcinków testowych na eksploatowanej drodze, ocena stanu nawierzchni w długiej perspektywie czasowej, badania nośności aparatem FWD i równości podłużnej IRI. W ramach prac laboratoryjnych program badawczy obejmuje badania szczepności międzywarstwowej i badania zmęczeniowe warstw asfaltowych. Program realizowany jest w długim (5-letnim)

okresie. Szczegółowy opis harmonogramu prac został przytoczony w dalszej części artykułu.

Plan badawczy

Odcinek badawczy

Do programu badawczego wytypowano odcinek o długości łącznej 1,7 km zlokalizowany na drodze krajowej nr 55, od km 16+900 do km 18+600, przechodzący przez miejscowość Tragamin (między m. Nowy Dwór Gdański i Malbork) w województwie pomorskim – rysunek 1. Odcinek ten został wskazany przez zarządcę drogi (GDDKiA o. Gdańsk) jako wymagający bieżącej naprawy, gdzie zaplanowano wymianę warstw asfaltowych w zakresie warstwy ścieralnej i wiążącej wraz ze wzmocnieniem warstw asfaltowych siatką.

Omawiany odcinek drogi krajowej nr 55 jest dwukierunkową drogą o klasie technicznej G i przekroju 1 × 2. Według generalnego pomiaru ruchu z roku 2020/2021 [4] droga obciążona jest średniorocznym ruchem dobowym wynoszącym 6 685 pojazdów na dobę. Struktura rodzajowa ruchu ciężkiego kształtuje się następująco: samochody ciężarowe ogółem (473 poj./dobę), autobusy 10 poj./dobę, co klasyfikuje ruch do kategorii KR4 (w połowie kategorii ruchu).

Harmonogram prac badawczych

Prace badawcze podzielono na dwa zasadnicze etapy różniące się czasem trwania i zakresem.

Etap 1 (krótkoterminowy), którego dotyczy niniejszy artykuł, swoim zakresem obejmował: (1) inwentaryzację wstępną stanu nawierzchni odcinka drogi (odwierty badawcze, ocena wizualna stanu nawierzchni) wykonaną przed remontem; (2) wykonanie badań ugięć urządzeniem FWD i oceny nośności nawierzchni przed remontem; (3) wytypowanie na analizowanym 1,7 km odcinku 4 sekcji badawczych położonych na tym samym pasie o zbliżonych długościach (ok. 180 m), jednorodnych co do stanu nawierzchni i nośności, na których zastosowano docelowo różne metody wzmocnienia nawierzchni; (4) wykonanie badań równości podłużnej; (5) przeprowadzenie remontu nawierzchni na całym 1,7 km odcinku drogi z zastosowaniem 4 różnych rozwiązań

technologicznych na wytypowanych sekcjach testowych; (6) wykonanie badań ugięć FWD i oceny nośności nawierzchni po remoncie; (7) wykonanie badań równości podłużnej; (8) laboratoryjna weryfikacja szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych na próbkach odwierconych z wyremontowanej nawierzchni.

Etap 2 (długoterminowy), którego dotyczyła będzie kolejna część artykułu, obejmuje coroczne wykonanie na przestrzeni 5 kolejnych lat na sekcjach badawczych w podobnym okresie roku: (1) badania ugięć FWD i oceny zmian nośności nawierzchni, (2) badania i oceny zmian równości podłużnej, (3) oceny wizualnej stanu nawierzchni.

Remont nawierzchni został przeprowadzony na obu pasach ruchu odcinka drogi krajowej nr 55 o długości 1,7 km. Program badawczy, jak i niniejszy artykuł zaś skupiają się na ocenie różnych rozwiązań technologicznych wzmocnienia nawierzchni, która realizowana jest na wstępnie wytypowanym jednorodnym fragmencie o długości 720 m jednego z pasów ruchu wyremontowanego odcinka.

Stan wyjściowy nawierzchni (przed remontem)

Ocena stanu nawierzchni odcinka badawczego

Ocena stanu nawierzchni odcinka badawczego miała na celu wytypowanie fragmentu jednego z pasów ruchu, na którym można byłoby zlokalizować sekcje testowe. Założeniem było, aby sekcje testowe miały zbliżoną długość (ok. 180 m), były zlokalizowane na tym samym pasie ruchu i charakteryzowały się zbliżonym wyjściowym stanem nawierzchni przed remontem. Ocenę stanu nawierzchni odcinka badawczego przed remontem przeprowadzono na podstawie: (1) wizji lokalnej (inwentaryzacji uszkodzeń) i oceny stanu nawierzchni, (2) badania i oceny nośności nawierzchni urządzeniem FWD, (3) badania równości nawierzchni (wskaźnik *IRI*) profilografem laserowym RSP.

Wizja lokalna przeprowadzona 30 lipca 2019 roku pozwoliła stwierdzić, że nawierzchnia odcinka drogi krajowej nr 55 charakteryzowała się dużą zmiennością stanu – od dobrego do bardzo złego. Na odcinku od km 16+900 do km 17+600 z różną intensywnością na obu pasach ruchu występowały:



Rys. 1. Lokalizacja odcinka badawczego na drodze krajowej nr 55 [8]



Rys. 2. Przykłady uszkodzeń nawierzchni drogi krajowej nr 55 od km 16+900 do km 17+600

spękania nawierzchni różnego rodzaju (podłużne, poprzeczne i siatkowe), łaty w różnym stanie i zapadnięcia nawierzchni. Od km 17+600 do km 18+600, a więc na fragmencie obejmującym przejście przez m. Tragamin, nawierzchnia charakteryzowała się bardzo złym i bardzo zmiennym stanem nawierzchni. Przykładowe uszkodzenia nawierzchni na analizowanym odcinku pokazano na rysunku 2.

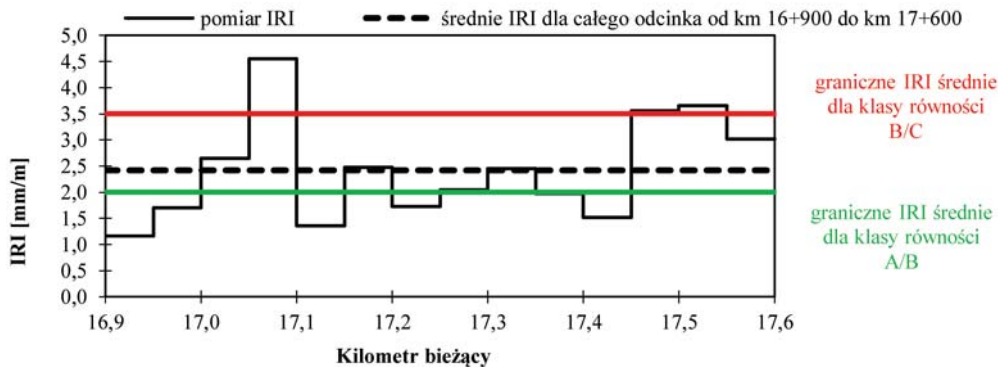
W celu oceny nośności nawierzchni i identyfikacji odcinków jednorodnych od km 16+900 do km 18+600 drogi krajowej nr 55 w dniu 17 września 2019 r. pracownicy laboratorium GDDKiA oddział Gdańsk przeprowadzili badania ugięć nawierzchni urządzeniem FWD. Badania wykonano w kroku pomiarowym co 20 m przy obciążeniu $F = 50 \text{ kN}$ i nacisku $q = 701 \text{ kPa}$. Temperatura średnia warstw asfaltowych została wyznaczona poprzez nawiercenie nawierzchni i pomiar w połowie grubości pakietu warstw asfaltowych (zgodnie z instrukcją z Katalogu Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych) i wynosiła $+22,0^\circ\text{C}$ (strona prawa) i $+24,0^\circ\text{C}$ (strona lewa). Temperatura ta posłużyła do ustandaryzowania do $+20^\circ\text{C}$ wartości ugięć nawierzchni zarejestrowanych w badaniu FWD i wyznaczenia następujących parametrów nośności charakteryzujących odcinki jednorodne:

- **ugięć miarodajnych U_{miar}** (na podstawie standaryzowanych ugięć zmierzonych w osi obciążenia);
- **modułów powierzchniowych miarodajnych $E_{pow,miar}$** (na podstawie modułów powierzchniowych wyznaczonych z wykorzystaniem wzoru Boussinega przy założeniu jednowarstwowej półprzestrzeni sprężystej i wykorzystaniu standaryzowanych ugięć w osi obciążenia);
- **ugięć reprezentujących nośność podłoża U_{podt}** (na podstawie standaryzowanych ugięć zarejestrowanych przez geofon w odległości 1800 mm od osi obciążenia);
- **wskaźników miarodajnych kształtu czaszy ugięcia $SCI300_{miar}$** (na podstawie różnicy standaryzowanych ugięć nawierzchni zarejestrowanych w osi obciążenia i w odległości 300 mm);
- **średnich pomienieni krzywizny czaszy ugięcia $R_{\text{śred}}$** (standaryzowanych ugięć nawierzchni zarejestrowanych w osi obciążenia i w odległości 300 mm).

W oparciu o uzyskane wyniki wyodrębniono dwa odcinki jednorodne na pasie prawym i cztery odcinki jednorodne na pasie lewym, co pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Wyodrębnione odcinki miarodajne oraz charakteryzujące je parametry nośności z badania FWD

Pas ruchu	Kilometraż odcinków jednorodnych	Długość [m] odcinków jednorodnych	U_{miar} [1e-3 m]	$E_{pow,miar}$ [MPa]	U_{podt} [1e-3 m]	$SCI300_{miar}$ [1e-3 m]	$R_{\text{śred}}$ [m]
Prawy	16+900 – 18+100	1 200	515	580	56	132	498
	18+100 – 18+600	500	689	449	61	193	375
Lewy	16+900 – 17+080	180	701	419	57	242	239
	17+080 – 17+760	680	584	637	51	161	489
	17+760 – 18+260	500	642	529	62	184	390
	18+260 – 18+600	340	768	398	57	296	256



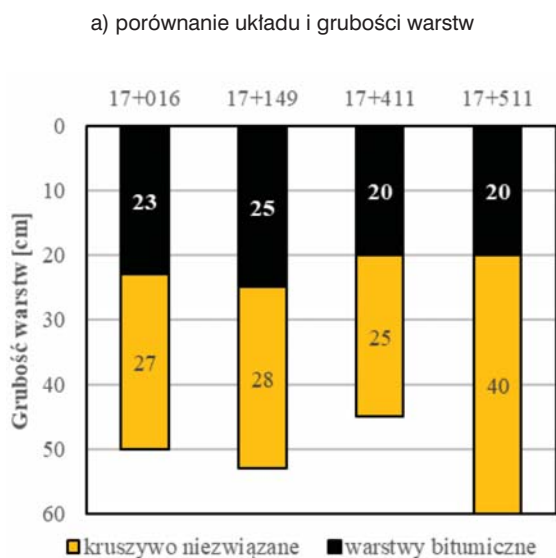
Rys. 3. Wskaźnik równości IRI na odcinku od km 16+900 do km 17+600 drogi krajowej nr 55 na prawym pasie ruchu przed remontem

Badanie FWD i ocena odcinków jednorodnych pokazały, że: (1) zarówno na lewym, jak i prawym pasie ruchu na całej długości odcinka badawczego nośność podłoża nawierzchni była na zbliżonym poziomie; (2) stan nośności na prawym pasie był zauważalnie bardziej jednorodny w porównaniu do pasa lewego. Na podstawie analizy wyników nośności, w połączeniu z inwentaryzacją występowania uszkodzeń nawierzchni oraz długościami wyznaczonych odcinków jednorodnych

była lepsza niż średnia (zaliczona do klasy A). Wyniki pomiaru równości pokazano na rysunku 3.

Inwentaryzacja konstrukcji nawierzchni na odcinku testowym

Inwentaryzację konstrukcji nawierzchni przeprowadzono wykonując na prawym pasie ruchu na fragmencie od km 16+900 do km 17+600 cztery odwierty w nawierzchni. Inwentaryzacja ta miała na celu sprawdzenie grubości, rodzaju materiałów poszczególnych warstw i stanu warstw istniejącej nawierzchni (przed remontem). Grubość warstw bitumicznych zawiera się w przedziale od 20 do 25 cm. W niektórych odwiertach stwierdzono ślady lepiszcza smołowego. We wszystkich punktach stwierdzono występowanie podbudowy z kruszywa niezwiązanego o grubości od 25 cm do 40 cm. Porównanie grubości poszczególnych warstw pokazano na rysunku 4.



b) przykładowy odwiert z km 17+149 (pas P)



Rys. 4. Porównanie układu i grubości warstw na odcinku od km 16+900 do km 17+600 na prawym pasie ruchu przed remontem drogi krajowej nr 55

Wybór sekcji badawczych

Na podstawie wielokryterialnej oceny stanu nawierzchni (uszkodzenia powierzchniowe, nośność, równość) drogi krajowej nr 55 stwierdzono, że:



Rys. 5. Lokalizacja odcinka doświadczalnego (kolor niebieski, linia pogrubiona) na drodze DK55 w pobliżu miejscowości Tragamin [8]

(1) strona lewa jezdni charakteryzowała się istotnie większą zmiennością nośności drogi niż strona prawa jezdni (różnice parametrów nośności charakteryzujących odcinki jednorodnie wynosiły dla pasa prawego od 29% do 46%, a dla pasa lewego od 76% do 144%); (2) ze względu na bardzo zły i zmienny stan powierzchniowy nawierzchni (uszkodzenia stwierdzone podczas inwentaryzacji) począwszy od km 17+600 postanowiono wyłączyć ten fragment drogi z ewentualnego zlokalizowania na nim odcinka doświadczalnego (sekcji badawczych); (3) od km 16+900 do km 17+600 bardziej jednorodny stan nawierzchni stwierdzono na pasie prawym jezdni niż na pasie lewym; (4) lokalizacja 4 następujących po sobie na jednym pasie ruchu, blisko 200-metrowych sekcji o zbliżonej nośności jest możliwa jedynie na prawym pasie na pierwszym odcinku jednorodnym, czyli od km 16+900 do km 18+100. Z uwagi na powyższe ostatecznie na odcinek testowy wytypowano fragment nawierzchni drogi krajowej nr 55 poza terenem zabudowanym, na wlocie do miejscowości Tragamin o łącznej długości 710 m, od km 16+900 do km 17+610 na pasie prawym w kierunku Malborka (szerokość pasa ruchu od 3,0 m do 3,5 m). Na rysunku 5 linią niebieską wskazano wytypowany odcinek testowy, dedykowany do dalszych obserwacji.

W obrębie wytypowanego odcinka testowego wskazano 4 jednorodne sekcje (od 1 do 4) o zbliżonej długości. Wśród sekcji przyjęto, że jedna z nich będzie sekcją referencyjną (bez zastosowania żadnej siatki), a na trzech pozostałych zostaną zastosowane siatki: szklana, węglowa i szklano-węglowa. Jednorodnym sekcjom przyporządkowano następujące roz-

wiązania technologiczne: **Sekcja 1** od km 16+900 do km 17+080 o długości 180 m – ułożenie siatki szklanej; **Sekcja 2** od km 17+080 do km 17+250 o długości 170 m – odcinek referencyjny (bez siatki); **Sekcja 3** od km 17+250 do km 17+430 o długości 180 m – ułożenie siatki węglowej; **Sekcja 4** od km 17+430 do km 17+610 o długości 180 m – ułożenie siatki szklano-węglowej. Rozmieszczenie sekcji testowych przedstawiono na rysunku 6. Na rysunku 9 (w dalszej części tekstu) przedstawiono wartości parametrów charakteryzujących nośność nawierzchni

na poszczególnych sekcjach, określone na podstawie badań FWD zrealizowanych przed wykonaniem remontu nawierzchni (linie oznaczone kolorem czarnym).

Remont nawierzchni

Charakterystyka wykorzystanych siatek

W remoncie nawierzchni drogi krajowej nr 55 na sekcjach testowych 1, 3 i 4 wykorzystano siatki firmy S&P Polska w następującym układzie: (1) w km 16+900-17+080 (sekcja 1) – siatka szklana S&P Glasphalt® G; (2) w km 17+250-17+430 (sekcja 3) – siatka węglowa S&P Carbophalt® G 200/200; (3) w km 17+430-17+610 (sekcja 4) – siatka szklano-węglowa S&P Carbophalt® G. Zastosowane w remoncie nawierzchni siatki posiadają krzyżujące się ze sobą włókna bez stałych węzłów (możliwy jest swobodny przesuw wiązek włókien), tworząc oczka o wymiarach 20 × 20 mm (w osiach włókien). Siatki są wstępnie przesączone asfaltem (co ma polepszać przyczepność siatek) z jednostronną posypką z piasku kwarcowego. Według producenta [14], siatki mają redukować naprężenia rozciągające w warstwach asfaltowych, powodując zwiększenie żywotności nawierzchni, przeciwdziałać powstawaniu trwałych deformacji nawierzchni bitumicznych, minimalizować powstawanie rys zmęczeniowych i termicznych, zapobiegać pęknięciom odbitym w nawierzchni oraz propagacji rys z dolnych warstw nawierzchni do warstwy ścieralnej. Siatki mogą być rozkładane nawet bez zastosowania w remontowanej nawierzchni warstwy wyrównaw-

Rys. 6. Układ sekcji testowych na prawym pasie ruchu drogi krajowej nr 55

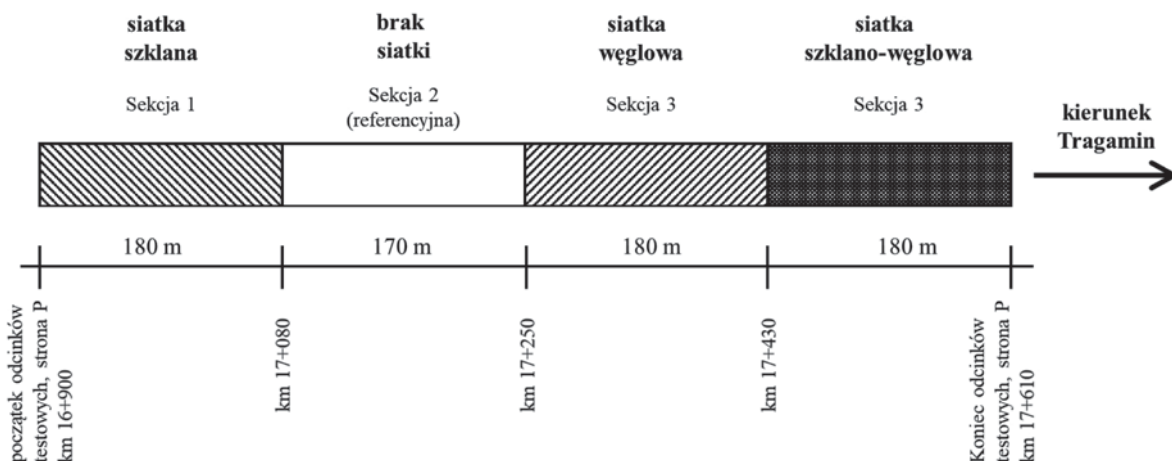
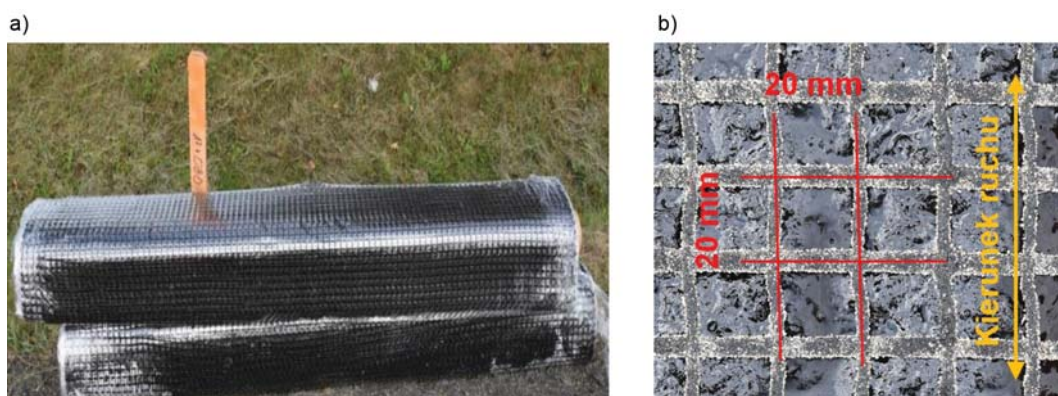


Tabela 2. Charakterystyka siatek wykorzystanych w remoncie drogi krajowej nr 55 na sekcjach testowych 1, 3 i 4 wg producenta [16, 17, 18]

Sekcja i kilometr	Sekcja 1 km 16+900 – 17+080	Sekcja 3 km 17+250 – 17+430	Sekcja 4 km 17+430 – 17+610
Nazwa siatki	S&P Glasphalt® G	S&P Carbophalt® G 200/200	S&P Carbophalt® G
Rodzaj siatki	szklana	węglowa	szklano-węglowa*
Włókna wzdluzne (rodzaj i nośność)	szklane, 120 kN/m (≤ 3% wydłużenia)	węglowe, 200 kN/m (≤ 1,5% wydłużenia)	szklane, 120 kN/m (≤ 3% wydłużenia)
Włókna poprzeczne (rodzaj i nośność)			węglowe, 200 kN/m (≤ 1,5% wydłużenia)
Minimalna grubość warstwy ścieralnej	4 cm	2 cm	2 cm

* w przypadku siatki szklano-węglowej: pasma podłużne szklane, pasma poprzeczne węglowe



Rys. 7. Siatki S&P wykorzystane w remoncie nawierzchni drogi krajowej nr 55 na odcinku testowym

czej (bezpośrednio na frezowanej powierzchni). Producent deklaruje również możliwość frezowania nawierzchni wraz z ułożonymi siatkami oraz poddawanie ich procesowi recyklingu. Szczegółową charakterystykę poszczególnych siatek wykorzystanych w pracy badawczej i remoncie nawierzchni drogi krajowej nr 55 za danymi producenta [14] podano w tabeli 2. Widok siatek zilustrowano na rysunku 7.

Technologia remontu nawierzchni drogi

Zgodnie z projektem remont nawierzchni polegał na: (1) sfrezowaniu na głębokość 4,5 cm istniejących warstw bitumicznych; (2) wykonaniu skropienia sfrezowanej i oczyszczonej powierzchni emulsją asfaltową C60B3 ZM w ilości 0,6 l/m²; (3) odczekaniu do rozpadu emulsji asfaltowej;

Tabela 3. Grubości warstw asfaltowych przed i po wykonaniu remontu

Warstwa (y)	Sekcja 1	Sekcja 2	Sekcja 3	Sekcja 4
Przed remontem (zmierzona)				
Warstwy bitumiczne łącznie	23 cm	25 cm	20 cm	20 cm
Po remoncie (oszacowana)				
Warstwa ścieralna	4 cm			
Warstwa wiążąca (wyrównawcza), min. 5 cm	5,3 cm	5,3 cm	5,0 cm	5,0 cm
Stare warstwy bitumiczne	18,8 cm	20,8 cm	15,8 cm	15,8 cm
Warstwy bitumiczne łącznie	28 cm	30 cm	25 cm	25 cm

równością, która nie budziła wątpliwości co do zapewnienia odpowiedniej jakości połączenia międzywarstwowego. Potwierdziły to poremontowe wyniki laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej, które przedstawiono w dalszej części artykułu.

Grubości warstw bitumicznych przed i po remoncie zestawiono w tabeli 3, a różne etapy remontu nawierzchni przedstawiono na rysunku 8.

Stan nawierzchni po remoncie

Ocena wpływu remontu na zmianę stanu nawierzchni

Po remoncie nawierzchni, w celu oceny jego wpływu (przy różnych rozwiązaniach technologicznych) na nośność remontowanej drogi, na odcinkach testowych w dniu 18 września 2019 r. wykonano powtórne badanie FWD przy obciążeniu $F = 50$ kN i nacisku $q = 701$ kPa. Temperatura warstw asfaltowych wynosiła wówczas +14,7°C. Dla każdej sekcji, podobnie jak w badaniach przed remontem (patrz p. 3.1), określono miarodajne wartości ugięć, modułów powierzchniowych, wskaźników kształtu czaszy ugięcia i średnie wartości promieni czaszy ugięcia nawierzchni. Poremontowe badanie nośności FWD pokazało, że przeprowadzone wzmocnienie przyniosło poprawę nośności nawierzchni na wszystkich sekcjach, tj. zmniejszenie ugięć nawierzchni

(4) mechanicznym rozłożeniu siatek (z rolki o szerokości 1,95 m) na sekcjach 1, 3 i 4; (5) ułożeniu warstwy wyrównawczej z betonu asfaltowego AC 16W 35/50 o grubości min. 5 cm; (6) ułożeniu warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego AC 11S 50/70 o grubości 4 cm.

Prace remontowe były wykonane w sposób ciągły, jednocześnie na wszystkich sekcjach testowych i podzielone na dwa dni: frezowanie, oczyszczenie, skropienie, rozłożenie siatek, ułożenie warstwy wiążącej – dzień 1. oraz ułożenie warstwy ścieralnej – dzień 2. Podczas obu dni realizacji prac remontowych warunki atmosferyczne były zbliżone.

Frezowanie przeprowadzono na zadaną grubość (bez linek) urządzeniem wyposażonym w standardowy bęben frezujący. Sfrezowana powierzchnia charakteryzowała się zbliżoną

a) oczyszczanie powierzchni po frezowaniu



b) skropienie emulsją asfaltową



c) mechaniczne rozkładanie siatki z rolki



d) wbudowywanie mas asfaltowych na siatce



e) rozkładanie warstw asfaltowych



f) wałowanie warstw asfaltowych



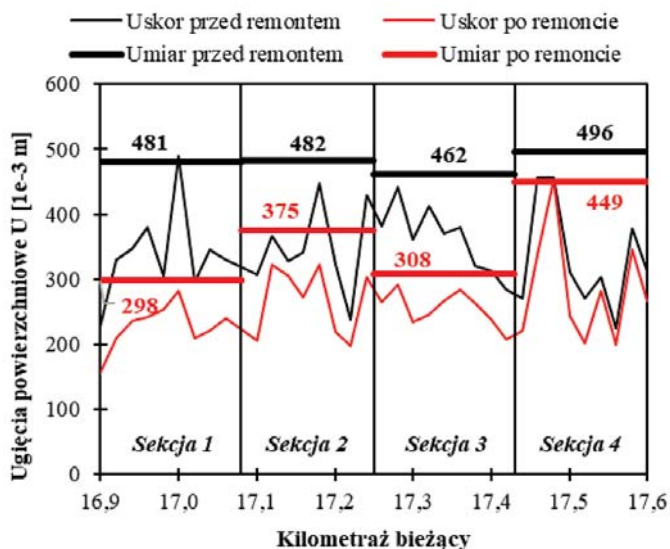
Rys. 8. Wybrane etapy remontu nawierzchni drogi krajowej nr 55 na odcinku testowym

(średnio o 26%), zwiększenie modułów powierzchniowych (średnio o 36%), a także poprawę kształtu czaszy ugięcia nawierzchni (jej spłaszczenie – średnie zmniejszenie wskaźnika SCI300 o 53% i zwiększenie promienia czaszy ugięć o 111%). W aspekcie nośności nawierzchni, wykonany remont bardziej zróżnicował między sobą poszczególne sekcje badawcze, niż miało to miejsce przed remontem, kiedy

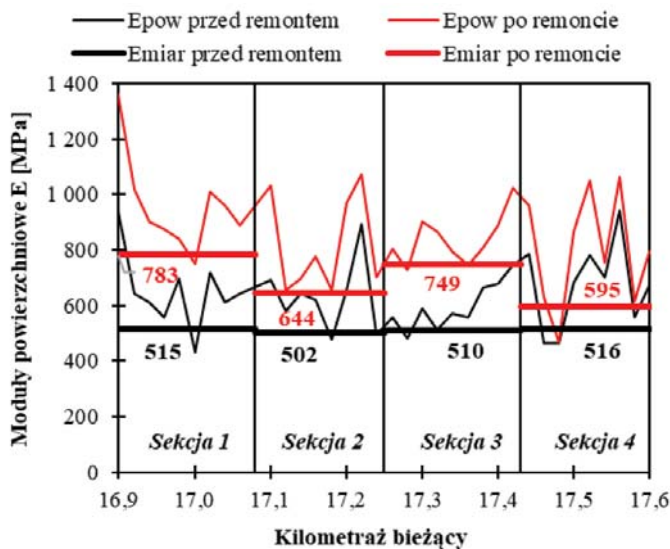
wszystkie charakteryzowały się bardzo zbliżoną nośnością. Porównanie parametrów nośności poszczególnych sekcji testowych pokazano na rysunku 9.

W celu porównania i oceny korzyści wynikających z zastosowania siatek zbrojących różnego rodzaju w remoncie nawierzchni w porównaniu z korzyścią wynikającą z przeprowadzenia remontu bez żadnego wzmocnienia, względne

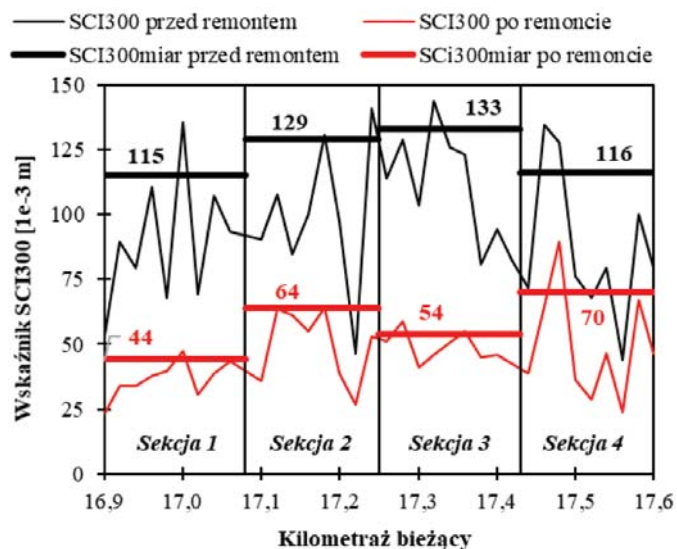
a) ugięcia powierzchniowe U



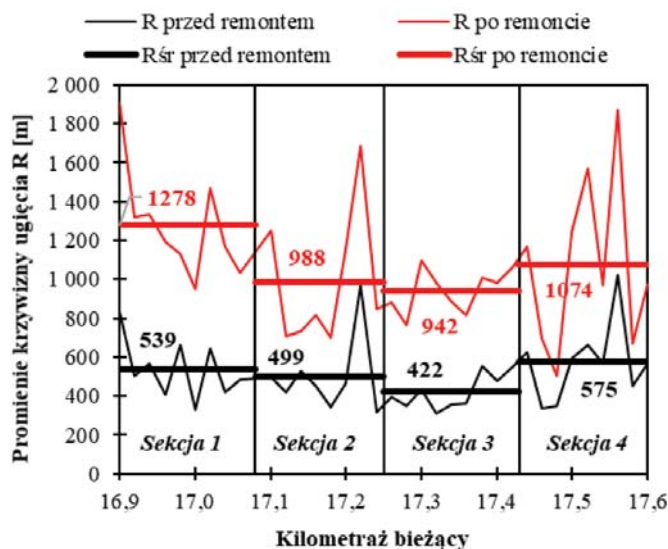
b) moduły powierzchniowe E



c) wskaźniki kształtu czaszy ugięcia SCI300



d) promienie krzywizny ugięcia R



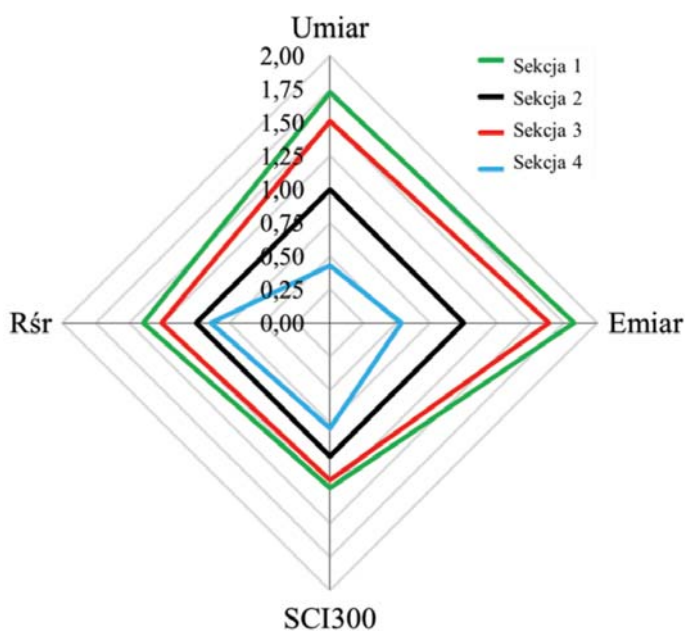
Rys. 9. Parametry nośności nawierzchni z badania FWD sekcji badawczych po ich remoncie. Oznaczenia sekcji: 1 – siatka szklana, 2 – brak siatki, 3 – siatka węglowa, 4 – siatka szklano-węglowa

różnice parametrów nośności przed remontem i po remoncie zostały standaryzowane względem sekcji 2 (referencyjnej, bez żadnej siatki). Wartości standaryzowanych parametrów nośności pokazano na rysunku 10. Wartości większe/mniejsze od 1,0 oznaczają odpowiednio większą/mniejszą korzyść odniesioną w wyniku zastosowania danego rodzaju siatki w remoncie nawierzchni w porównaniu z korzyścią wynikającą z wykonania remontu bez zastosowania żadnego wzmocnienia (wartość = 1,0).

Zastosowanie siatki szklanej na sekcji 1 przyniosło najlepsze efekty remontu nawierzchni. W zależności od parametru nośności, uzyskano dodatkową korzyść rzędu 24-83% w porównaniu z korzyścią wynikającą z samej wymiany warstw bitumicznych bez żadnego wzmocnienia (sekcja 2). Dobre efekty uzyskano również w przypadku zastosowania siatki węglowej na sekcji 3 – dodatkowa korzyść z przeprowadzo-

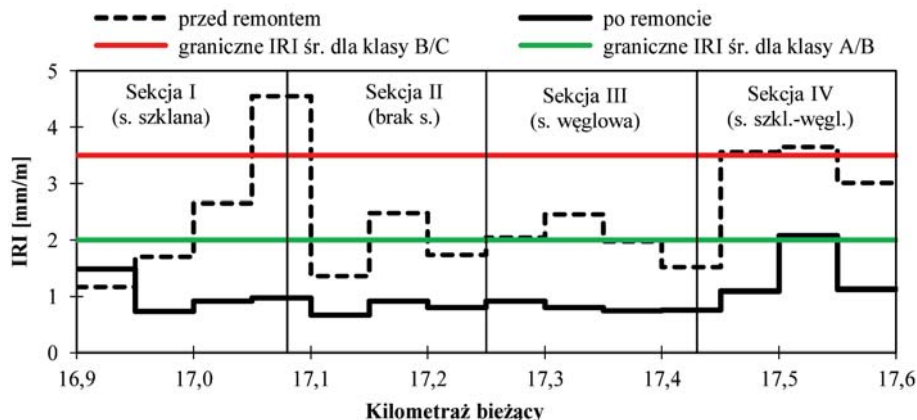
nego remontu wyniosła 18-64% w zależności od parametru nośności. Najlepsze efekty odnotowano na sekcji nr 4, gdzie zastosowana została siatka szklano-węglowa. W tym przypadku korzyść z przeprowadzonego remontu była mniejsza o 11-57% niż ta odniesiona na referencyjnej sekcji 2, na której nie zastosowano żadnej siatki. Należy wyraźnie jednak podkreślić, że nie oznacza to nieprzydatności tego rodzaju zbrojenia w remontach nawierzchni. Sekcja 4 z aplikacją siatki szklano-węglowej wymaga szczególnej obserwacji w dłuższej perspektywie czasowej (w kolejnych latach eksploatacji wyremontowanej nawierzchni).

Podobnie jak w przypadku powtórnego badania nośności FWD po wykonaniu remontu, wykonano na długości sekcji testowych także powtórne badanie równości podłużnej (wskaźnika I/R). Średnia równość podłużna dla wszystkich sekcji testowych rozpatrywanych łącznie z 2,4 mm/m przed



Rys. 10. Zestawienie względnych różnic parametrów nośności przed remontem i po remoncie standardyzowanych do referencyjnej sekcji 2 bez siatki (wartość = 1)

remontem, uległa zmniejszeniu do 1,0 mm/m po remoncie, co klasyfikuje nawierzchnię sekcji testowych do klasy A równości. Porównanie wyników badania wskaźnika IRI przed remontem i po remoncie pokazano na rysunku 11.



Rys. 11. Wskaźnik równości IRI na odcinku od km 16+900 do km 17+600 drogi krajowej nr 55 na prawym pasie ruchu przed remontem i po remoncie

Ocena laboratoryjna szczepności międzywarstwowej nowych warstw asfaltowych

Poremontową ocenę wizualną stanu powierzchniowego drogi, analizę jej nośności oraz równości podłużnej w programie badawczym wsparto laboratoryjną oceną szczepności międzywarstwowej wykonanej zgodnie z instrukcją [5].

Badanie szczepności międzywarstwowej przeprowadzono w schemacie ścinania bezpośredniego wolnego od momentów zginających w temperaturze +20°C z prędkością przesuwu tłoka równą 50 mm/min. W badaniach wykorzystano

12 rdzeni o średnicy 150 mm odwierconych z wyremontowanej nawierzchni (po 3 rdzenie z każdej sekcji testowej). Na podstawie mierzonej siły ścinającej i przemieszczenia ścinania wyznaczono i poddano analizom następujące parametry:

- **wytrzymałość na ścinanie τ_{max} [MPa]** jako maksymalne naprężenie ścinające wyznaczone na podstawie siły niszczącej F_{max} [kN] oraz średnicy próbki D [m] – według zależności (1) postaci:

$$\tau_{max} = \frac{4 \times F_{max}}{\pi \times D^2} \quad (1)$$

- **przemieszczenie skorygowane przy ścięciu δ_{max} [mm]**;
- **sztwyżność ścinania k [MPa/mm]** jako iloraz naprężenia τ_{max} [MPa] i przemieszczenia δ_{max} [mm] przy ścięciu – według zależności (2) postaci:

$$k = \frac{\tau_{max}}{\delta_{max}} \quad (2)$$

- **maksymalną sztywność ścinania k_{max} [MPa/mm]** jako maksymalną sztywność w trakcie całego badania ścinania, rozumianą jako wartość maksymalnego nachylenia stycznej do wykresu funkcji $\tau(\delta)$ – według zależności (3) postaci:

$$k_{max} = \max\left(\frac{\Delta\tau}{\Delta\delta}\right) \quad (3)$$

- **energię ścinającą (niszczącą) W [kJ/m²]** jako energię potrzebną do ścięcia próbki, w momencie, w którym siła F_{max} powoduje przemieszczenie przy ścięciu δ_{max} ; energia ta równa jest polu pod wykresem funkcji $\tau(\delta)$ do punktu ścięcia, czyli do F_{max} i δ_{max} – według zależności (4) postaci:

$$W = \int_{t=0}^{t=t_0} \tau(t) \delta(t) dt \quad (4)$$

$$| t_0 : F(t) = F_{max} ; \delta(t) = \delta_{max}$$

- **całkowitą energię w badaniu ścinania W_c [kJ/m²]** jako energię ścinania liczoną w całym badaniu do momentu, w którym po ścięciu próbki naprężenie τ osiąga wartość równą 10% wytrzymałości na ścinanie τ_{max} – według zależności (5) postaci:

$$W_c = \int_{t=0}^{t=t_0} \tau(t) \delta(t) dt \quad (5)$$

$$| t_0 : \tau(t) = 10\% \times \tau_{max}$$

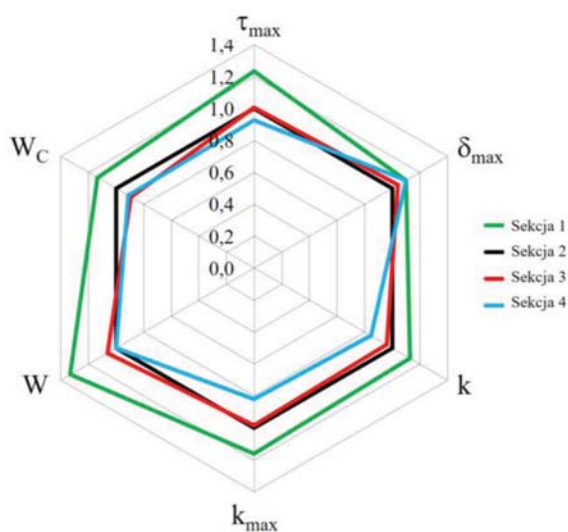
Wyniki badania szczepności zostały pokazane w tabeli 4.

Ponieważ obecnie nie ma kryteriów szczepności międzywarstwowej dotyczącej przypadków z zastosowaniem geosyntetyków, szczepność tę oceniono w sposób ilościowy, a nie jakościowy. Na rysunku 12 zestawiono parametry ścinania standardyzowane do wyników otrzymanych na sekcji 2, bez siatki (tj. parametry standardyzowane dla sekcji nr 2 równe 1,0).

Tabela 4. Wyniki średnie badania szczepności międzywarstwowej próbek odwierconych z wyremontowanej nawierzchni drogi krajowej nr 55

Parametr	Sekcja 1			Sekcja 2			Sekcja 3			Sekcja 4		
	AV	SD	CoV	AV	SD	CoV	AV	SD	CoV	AV	SD	CoV
τ_{max} [MPa]	1,69	0,12	0,072	1,37	0,06	0,040	1,38	0,02	0,015	1,27	0,10	0,075
δ_{max} [mm]	2,12	0,21	0,100	1,93	0,03	0,017	2,01	0,20	0,101	2,12	0,25	0,118
k [kN/mm]	0,80	0,10	0,122	0,71	0,03	0,044	0,68	0,07	0,102	0,60	0,08	0,140
k_{max} [MPa/mm]	2,30	0,10	0,045	1,98	0,07	0,035	1,95	0,10	0,052	1,62	0,11	0,067
W [kJ/m ²]	2,17	0,40	0,187	1,63	0,15	0,094	1,73	0,15	0,088	1,63	0,32	0,197
W_C [kJ/m ²]	4,73	1,02	0,216	4,17	0,31	0,073	3,73	0,25	0,067	3,80	0,36	0,095

AV – wartość średnia, SD – odchylenie standardowe, CoV – współczynnik zmienności



Rys. 12. Zestawienie parametrów ścinania standardyzowane do referencyjnej sekcji 2 (bez siatki)

Parametry uzyskane w badaniu szczepności poddano statystycznej analizie równości ich wartości średnich w porównaniu wzajemnym dla każdej sekcji testowej (na zasadzie porównania „każdy z każdym”). Do tego celu zastosowano statystyczny test t-Studenta przy założonym poziomie ufności $P = 95\%$, wartości krytycznej statystyki testowej równej $t_{kryt} = 2,7764$ i liczby stopni swobody $k = 4$ dla liczebności próby $n = 3$. Statystyczna analiza istotności różnic średnich wartości parametrów ścinania pokazała, że:

- na żadnej z sekcji testowej nie występowały problemy ze szczepnością międzywarstwową, którą oceniono jako dobrą;
- pod względem wytrzymałości na ścinanie oraz maksymalnej sztywności ścinania zauważalnie i istotnie najlepiej sprawdziło się zastosowanie siatki szklanej, a najgorzej zastosowanie siatki szklano-węglowej;
- pod względem przemieszczenia przy ścinaniu, sztywności ścinania, energii ścinania i energii całkowitej w badaniu ścinania zastosowanie każdej z siatek w nawierzchni nie wpłynęło negatywnie i pozytywnie w porównaniu z przypadkiem braku zastosowania jakiegokolwiek siatki.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono efekty pierwszego etapu prac w ramach realizacji długoterminowego programu badawczego, dotyczącego poszukiwania trwałego rozwiązania wzmocnienia remontowanej nawierzchni poprzez zastosowanie siatek wykonanych z włókien szklanych, szklano-węglowych i węglowych wstępnie przesączonych asfaltem jako zbrojenia w warstwach asfaltowych.

Na ponad 700-metrowym odcinku testowym drogi krajowej nr 55 w trakcie remontu nawierzchni zlokalizowano 3 sekcje testowe z aplikacją 3 rodzajów siatek zbrojących i 1 sekcję referencyjną bez siatki. Na wszystkich sekcjach testowych remont nawierzchni przyniósł zamierzony skutek, tj. usunięcie powierzchniowych uszkodzeń, poprawę równości nawierzchni i zwiększenie jej nośności. Na wszystkich sekcjach testowych stwierdzono również dobrą szczepność międzywarstwową. Największe korzyści wynikające z przeprowadzonego remontu uzyskano na sekcjach testowych, gdzie zaaplikowano siatkę szklaną i siatkę węglową. Sekcja z zastosowaniem siatki szklano-węglowej wymaga szczególnej obserwacji w dłuższej perspektywie czasowej (kolejnych latach eksploatacji nawierzchni). Zaplanowane długoterminowe obserwacje mogą wyeksponować jeszcze bardziej pozytywny efekt działania zastosowanych siatek. Należy podkreślić, że pomimo wyboru sekcji testowych na podstawie inwentaryzacji konstrukcji nawierzchni oraz weryfikacji nośności przed remontem, istniejąca konstrukcja drogi charakteryzuje się pewną zmiennością, co może mieć wpływ na otrzymane wyniki.

Kolejny etap prac badawczych w ramach realizowanego programu dotyczy długoterminowej (realizowanej przez 5 kolejnych lat od momentu remontu, tj. do roku 2023), corocznej kontroli i analizy zachowania się odcinka testowego pod względem stanu powierzchniowego, nośności i równości. Efekty uzyskane w etapie II zostaną przedstawione w kolejnej publikacji.

Bibliografia

- [1] Al-Qadi, I. L., Dennis, A. M., Stoffels, S. M., Elseifi, M. A., Chehab, G. R., Stark, T., *Synthesis on Use of Geosynthetics in Pavements*

- and Development of a Roadmap to Geosynthetically-Modified Pavements, FHWA-HRT, 2008
- [2] Brown, S.F.; Brunton, J.M.; Hughes, D.A.B.; Brodrick, B.V. *Polymer grid reinforcement of asphalt*. J. Asph. Technol. 1985, 54, 18–41
- [3] Brown, S. F., Thom, N. H., Sanders, P. J., *A study of grid reinforced asphalt to combat reflection cracking*, J. Asph. Technol. 2002, 70, 543-571
- [4] GDDKiA, Generalny pomiar ruchu 2020/2021, strona: <https://www.gov.pl/web/gddkia/generalny-pomiar-ruchu-20202021>, dostęp [10.09.2022]
- [5] GDDKiA, *Instrukcja laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej i wymagania*, 2014, (<https://www.gddkia.gov.pl/pl/1118/dokumenty-techniczne>)
- [6] Gołos M., *Poprawa trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych dzięki zastosowaniu zbrojenia wieloosiowym kompozytem strukturalnym*, Magazyn Autostrady 3/2022
- [7] Gołos M., Kornacka K., *Zastosowanie kompozytów do zbrojenia warstw asfaltowych ze szczególnym uwzględnieniem poprawy trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych*, Magazyn Autostrady 11-12/2018
- [8] Google Maps, strona: <https://www.google.com/maps>, dostęp [07.04.2020]
- [9] Graziani, A., Ferrotti, G., Canestrari, F., *Structural response of grid-reinforced bituminous pavements*, Materials and Structures, vol. 47 8, 2014
- [10] Jaskuła, P., Ryś, D., Stienss, M., Szydłowski, C., Gołos, M., Kawalec, J., *Laboratory fatigue assessment of large geocomposite-reinforced double-layered asphalt concrete beams*, Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Volume 3 – Hoff, Mork & Saba (eds), 2022
- [11] Kałuża M., Kotasiński M., Bzówka J., *Wpływ wzmocnienia nawierzchni siatką z włókna szklanego na wybrane wskaźniki krzywej ugięć nawierzchni*, Drogownictwo 5/2022
- [12] Koerner R.M., *Designing with geosynthetics*, 6th edition, 2012 ISBN: 978-1-4628-8289-2
- [13] Mounes S., Karim M., Mahrez A., Khodaii A., *An overview on the use of geosynthetics in pavement structures*, Scientific Research and Essays Vol. 6(11), pp. 2234-2241, 4 June, 2011
- [14] S&P Polska, strona: <https://www.sp-reinforcement.pl/pl-PL>, [dostęp 29.10.2022]
- [15] S&P Polska Sp.z.o.o., *Zbrojenie nawierzchni asfaltowych siatkami i geokompozytami z włókien polimerowych*, Malbork, październik 2006
- [16] S&P Polska, broszura dot. siatki szklanej S&P Glasphalt G, strona: <https://www.sp-reinforcement.pl/pl-PL/produkty/sp-glasphaltr-g>, [dostęp 29.10.2022]
- [17] S&P Polska, broszura dot. siatki węglowej S&P Carbophalt G 200/200, strona: <https://www.sp-reinforcement.pl/pl-PL/produkty/sp-carbophaltr-g-200200>, [dostęp 29.10.2022]
- [18] S&P Polska, broszura dot. siatki szklano-węglowej S&P Carbophalt G, strona: <https://www.sp-reinforcement.pl/pl-PL/produkty/sp-carbophaltr-g>, [dostęp 29.10.2022]
- [19] Ragni D., Montillo T., Marradi A., Canestrari F., *Fast Falling Weight Accelerated Pavement Testing and Laboratory Analysis of Asphalt Pavements Reinforced with Geocomposites*, Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE) (pp. 417-430), January 2020
- [20] Zieliński P., *Investigations of fatigue of asphalt layers with geosynthetics*, Archives of Civil Engineering, Vol. 59, 2/2013
- [21] Zieliński P., Grzybowska W., *Badania połączenia międzywarstwowego w nawierzchni asfaltowej*, Drogi, 7-8 2009
- [22] Zofka A., Maliszewski M., Maliszewska D., *Glass and carbon geogrid reinforcement of asphalt mixtures*, Road Materials and Pavement Design, 2016, DOI: 10.1080/14680629.2016.1266775