



BARTŁOMIEJ GRZESIK

Politechnika Śląska
bartomiej.grzesik@polsl.pl
ORCID: 0000-0003-2586-887X



KAMIL ŻOŁNOWSKI

Drogomex Sp. z o.o.
kamil.zolnowski@dromex.pl



WOJCIECH SOROCIAK

Politechnika Śląska
Eurovia Polska S.A.
wojciech.sorociak@polsl.pl
ORCID: 0000-0003-3638-2082

Badania laboratoryjne wybranych właściwości zbrojonych układów warstwowych z mieszanek mineralno-asfaltowych

Pierwsze zastosowanie geosyntetyków na świecie miało miejsce w Stanach Zjednoczonych w latach 20. XX wieku. Początkowo materiały te były wykorzystywane do zabezpieczeń przed erozją. Produkowano je w postaci tkanin i włóknin (GSSB). Następnie w latach 70. geotekstyla stosowano jako wzmocnienie ścian oporowych oraz zbrojenie gruntów. Z biegiem czasu zaczęto używać terminu geosyntetyki, z uwagi na wprowadzenie do tej grupy innych wyrobów. Stosowanie geosyntetyków w nawierzchniach drogowych miało swoje początki w latach 70. W Polsce po raz pierwszy zastosowano geowłókninę zagraniczną, miało to miejsce w 1973 r. Pierwsze zastosowanie w drogownictwie produktu polskiego pochodzenia miało miejsce dwa lata później. Przy budowie drogi nad Zalewem Zegrzyńskim zastosowano geowłókninę o symbolu WD-EB. Materiały geosyntetyczne są w budownictwie drogowym dość nowym rozwiązaniem. Przyjęły

- geokompozyty, czyli materiały powstałe poprzez połączenie geosyntetyku z innym materiałem w procesie wiązania, sklejanie, zszywania, zgrzewania lub tkania.

Z uwagi na funkcje, geosyntetyki znalazły szerokie zastosowanie w budownictwie drogowym. Początkowo wyroby te stosowano jako materiał separujący i izolujący poszczególne warstwy gruntu, w celu zapobiegania ich mieszania. Geosyntetyki mają zastosowanie również jako warstwy drenujące, czyli odprowadzające wodę gruntową znajdującą się w obrębie geosyntetyku oraz filtrujące, czyli umożliwiające przepływ wody lub innych płynów z jednoczesnym zapobieganiem przedostania się cząstek gruntu. Ponadto pełnią funkcję przeciwozyjną, tj. zabezpieczają przed przemieszczaniem się gruntu, np. przed osunięciem się skarp wykopów lub nasypów. W późniejszym czasie materiał ten zaczął być wykorzystywany m.in. w konstrukcjach drogowych, jako wzmocnienie (zbrojenie) nawierzchni, mające na celu przeniesienie większych obciążeń z górnych warstw konstrukcji. W nawierzchniach asfaltowych stosuje się je w celu przeciwdziałania spękanom odbitym, zapobieganiu powstawania kolein, rozproszeniu naprężeń występujących pomiędzy warstwami konstrukcyjnymi nawierzchni oraz zwiększeniu jej żywotności i trwałości. [1], [3], [5], [6], [7], [11], [15], [16], [21], [23]. Do zbrojenia warstw asfaltowych wykorzystuje się obecnie geosyntetyki takie jak: siatki polimerowe, z polipropylenu, z włókien węglowych, szklanych i bazaltowych [12].

Metodyka badań

Przedmiot badań stanowiły zbrojone geosyntetykami układy warstwowe z mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych i wbudowywanych na gorąco. Celem badań było określenie wpływu zastosowanego zbrojenia w postaci geosyntetyków na odporność na deformacje trwałe oraz szczepność międzywarstwową pakietu składającego się z warstwy wiążącej i ścieralnej. Badania przeprowadzono w Pracowni Drogowej Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Badanie odporności na deformacje trwałe wykonano w małym koleinomierzu (metoda B) zgodnie z normą PN-EN 12697-22:2020-07 [18] na próbkach płytowych o rozmiarze 300 × 300 mm przygotowanych w zagęszczarce walcowej zgodnie z normą PN-EN 12697-33:2019-03 [19]. W przypadku każdej z próbek wyznaczono wartości nachylenia wykresu koleinowania WTS_{AIR} (zgodnie ze wzorem 1) oraz proporcjonalną

się one bardzo szybko z uwagi na szeroki zakres ich zastosowania [13], [14].

Zgodnie z normą PN-EN ISO 10318-1:2015-12 [17] wyroby geosyntetyczne można podzielić na cztery zasadnicze grupy:

- geotekstyla (w tym geotkaniny, geowłókniny i geodzianiny) są to materiały płaskie, przepuszczalne polimerowe wyroby tekstylne;
- geotekstylne wyroby pokrewne (tj. geosiatki, georuszty, geosyntetyki komórkowe, geotaśmy, geomaty, geosyntetyki dystansujące);
- bariery geosyntetyczne (polimerowe, iltowe oraz bitumiczne) charakteryzujące się małą przepuszczalnością, dzięki czemu stosowane są jako warstwa uniemożliwiająca lub zmniejszająca swobodny przepływ płynów lub gazów pod konstrukcję;

głębokość koleiny PRD_{AIR} (wyrażoną w procentach) jako iloraz wartości końcowej głębokości koleiny oraz wysokości próbki. Na podstawie otrzymanych wartości dla poszczególnych próbek wyznaczono wartości średnie dla każdego badanego zestawu.

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (1)$$

gdzie:

WTS_{AIR} – nachylenie wykresu koleinowania [mm/1 000 cykli obciążenia],

d₅₀₀₀, d₁₀₀₀₀ – głębokość koleiny po 5 000 i 10 000 cykli obciążenia [mm].

Badanie szczepności międzywarstwowej przeprowadzono według instrukcji GDDKiA [20] przy użyciu maszyny wytrzymałościowej o zakresie siły do 50 kN, umożliwiającej utrzymanie stałej prędkości podczas obciążenia równej 50 mm/min z automatycznym rejestrem wyników i przemieszczeniem ścicia od 0 do 8 mm, wyposażonej w aparat Leutnera. Proces ścinania prowadzono do osiągnięcia maksymalnej siły ścinającej, ścicia próbki lub do osiągnięcia maksymalnego przemieszczenia ścinania. Podczas ścinania aparat rejestruje siłę ścinającą F_{max} w zakresie od 0 do 50 kN oraz przemieszczenie ścicia S w zakresie od 0 do 8 mm, na podstawie których oblicza się maksymalne naprężenie ścinające τ_{max} zgodnie ze wzorem (2):

$$\tau_{max} = \frac{4 * F_{max}}{\pi * D^2} * 1000 \quad (2)$$

gdzie:

τ_{max} – maksymalne naprężenie ścinające [MPa],

F_{max} – maksymalna siła ścinająca [kN],

D – średnica rdzenia określona przed badaniem ścinania [mm].

Zastosowane materiały i sposób przygotowania próbek

Charakterystyka mieszanek mineralno-asfaltowych

Do przeprowadzenia przedmiotowych badań użyto mieszanek mineralno-asfaltowych pobranych z bieżącej produkcji w Wytwórni Mas Bitumicznych zlokalizowanej w Polkowicach. Mieszanki pobierano w miesiącach październik–listopad 2021 r. Ze względów organizacyjnych wykorzystano mieszanki na ruch ciężki (dla kategorii ruchu KR 3-7) do warstwy wiążącej z betonu asfaltowego o uziarnieniu do 16 mm (AC16W) i do warstwy ścieralnej z mieszanki mastyksowo-grysowej o uziarnieniu do 11 mm (SMA11). Mieszanki produkowane były z kruszywa bazaltowego z wypełniaczem wapiennym. Jako lepiszcze zastosowano asfalt modyfikowany polimerami PMB 25/55-60 dla mieszanki do warstwy wiążącej oraz PMB 45/80-55 dla mieszanki SMA. Szczegółowy skład mieszanek przedstawiono w tabelach 1 i 2, natomiast ich wybrane właściwości w tabeli 3.

Tabela 1. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej dla warstwy wiążącej AC16W

Lp.	Składnik mieszanki	Udział [%] (wag.)	
		MM	MMA
Kruszywo			
1.	Wypełniacz, wapień	7,0	6,7
2.	Piasek łamany bazaltowy 0/2	27,0	25,8
3.	Grys bazaltowy 2/5	15,0	14,3
4.	Grys bazaltowy 4/8	15,0	14,3
5.	Grys bazaltowy 8/11	10,0	9,6
6.	Grys bazaltowy 11/16	26,0	24,9
Lepiszczce			
7.	PMB 25/55-60	–	4,4
Dodatki			
8.	Amdor 10, środek adhezyjny	–	0,3% (wag. asfaltu)

Tabela 2. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej dla warstwy ścieralnej SMA11

Lp.	Składnik mieszanki	Udział [%] (wag.)	
		MM	MMA
Kruszywo			
1.	Wypełniacz, wapień	10,0	9,3
2.	Piasek łamany bazaltowy 0/2	12,0	11,2
3.	Grys bazaltowy 2/5	14,0	13,1
4.	Grys bazaltowy 4/8	16,0	14,9
5.	Grys bazaltowy 8/11	48,0	44,8
Lepiszczce			
6.	PMB 45/80-55	–	6,2
Dodatki			
7.	Amdor 10, środek adhezyjny	–	0,3% (wag. asfaltu)
8.	Dora, stabilizator	–	0,4% (wag. MM)

Tabela 3. Właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych AC16W i SMA11

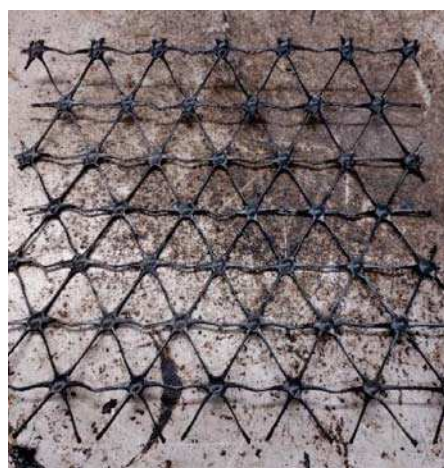
Właściwość mieszanki	Jedn.	Wartość	
		AC16W	SMA11
Minimalna zawartość lepiszcza	%	4,6	6,6
Współczynnik korekcyjny α do zawartości lepiszcza	–	0,886	0,895
Minimalna zawartość lepiszcza uwzględniająca α	%	4,1	5,9
Zadozowana ilość lepiszcza	%	4,4	6,2
Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego	%	4,2	6,0
Wolna przestrzeń w mm – VMA	%	16,2	17,6
Gęstość mma – ρ_{mv}	Mg/m ³	2,724	2,551
Gęstość objętościowa mma – ρ_{bssd}	Mg/m ³	2,585	2,490
Wolna przestrzeń w mma – V_m	%	5,1	2,4
Wypełnienie wolnej przestrzeni lepiszczem – VFB	%	68,7	86,3
Odporność na działanie wody – ITSR	%	93,7	99,0
Średni maksymalny przyrost koleiny – WTS _{AIR}	mm/1000	0,05	0,04
Średnia maksymalna proporcjonalna głębokość koleiny – PRD _{AIR}	%	3,8	4,8

Charakterystyka geosyntetyków

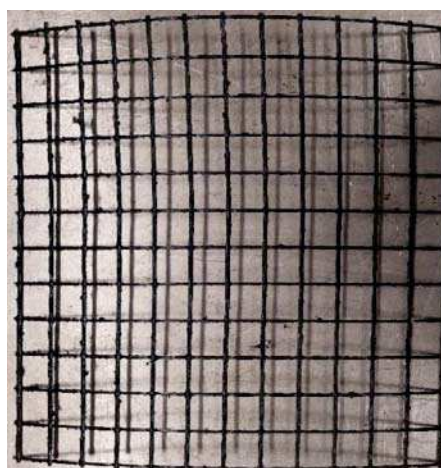
Jako zbrojenie pakietów warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowano trzy rodzaje geosyntetyków. Siatki docięto do wymiarów odpowiadających formie do zagęszczenia. Umieszczono je między warstwami asfaltowymi podczas przygotowania próbek. Z uwagi na brak zgody producentów na posługiwanie się nazwami handlowymi zastosowanych wyrobów użyto oznaczeń: siatka nr 1, siatka nr 2 i siatka nr 3.

Siatka nr 1 (fot. 1) to georuszt wykonany z polipropylenu wytłaczanego i rozciąganego w taki sposób, że struktura georusztu zorientowana jest w trzech kierunkach, tworząc oczka w kształcie trójkątów. W tej postaci georuszt przeznaczony jest do stabilizacji warstw kruszyw z mieszanek niezwiązanych, poprzez zazębianie ziaren kruszywa pomiędzy oczka siatki. Należy nadmienić, że w toku rozwoju, omawiany georuszt stał się głównym komponentem geokompozytu (w połączeniu z geotkaniną), który znalazł zastosowanie w zbrojeniu mieszanek mineralno-asfaltowych. W tej formie był przedmiotem badań, m.in. [8]. Georuszt pełni rolę zbrojącą, geotkanina natomiast zwiększa powierzchnię połączenia z warstwą szepną z emulsji asfaltowej, co zapobiega przemieszczeniom kompozytu podczas rozkładania na niej mieszanki mineralno-asfaltowej [4]. Do celów eksperymentu, za wystarczające uznano wykorzystanie wyłącznie georusztu, ponieważ z uwagi na niewielki rozmiar oraz sposób przygotowania próbek nie zachodziło ryzyko przemieszczenia lub odkształcenia sztywnej, również z uwagi na wymiar, wkładki zbrojenia. Charakterystyczne właściwości siatki nr 1 przedstawiono w tabeli 1.

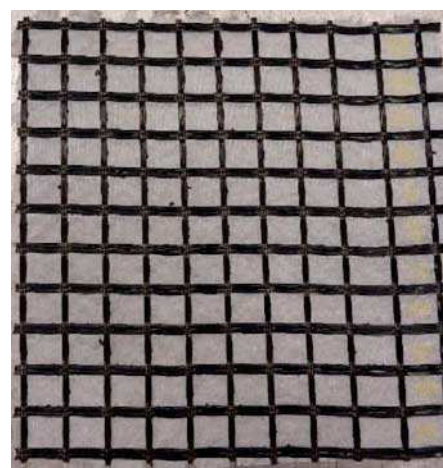
Siatka nr 2 (fot. 2) jest wykonana z włókien o węzłach ze zmodyfikowaną powłoką polimerową. Siatka charakteryzuje się wysoką sztywnością, niską rozciągliwością oraz stabilnością termiczną i chemiczną. Włókna szklane są nasączone zmodyfikowanym polimerem elastomerowym, który stwarza



Fot. 1. Siatka nr 1 (K. Żołnowski)



Fot. 2. Siatka nr 2 (K. Żołnowski)



Fot. 3. Siatka nr 3 (K. Żołnowski)

Tabela 4. Charakterystyczne właściwości siatki nr 1

Właściwość produktu	Jedn.	Wartość deklarowana / tolerancja
Szywność radialna przy odkształceniu 0,5%	kN/m	480 / -90
Szywność radialna przy odkształceniu 2%	kN/m	360 / -90
Współczynnik izotropii sztywności	-	0,80 / -0,15
Wytrzymałość węzła	%	100 / -10
Rozmiar trójkąta	mm	80 / ±4
Waga produktu	kg/m ²	0,270

Tabela 5. Charakterystyczne właściwości siatek nr 2 i nr 3

Właściwość produktu	Jedn.	Wartość deklarowana / tolerancja	
		Siatka nr 2	Siatka nr 3
Wytrzymałość na rozciąganie	kN/m	55x55 / -5	115x115 / -15
Wydłużenie przy rozciąganiu	%	2,5 / ±0,5	2,5 / ±0,5
Szywność	N/mm	2 200x2 200 / ±200	4 600x4 600 / ±600
Moduł Younga E	MPa	73 000 / *	73 000 / *
Waga produktu	kg/m ²	0,205 / *	0,439 / *

*) brak danych odnośnie tolerancji deklarowanej wartości

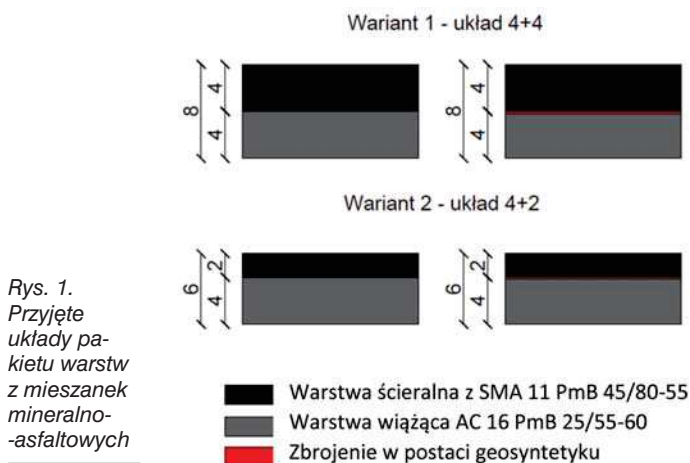
warunki do optymalnego połączenia warstw, Dolna część siatki pokryta jest dodatkowo aktywowanym klejem ułatwiającym układanie i zapewniającym stabilizację siatki na nawierzchni. Materiał ten przeznaczony jest do wzmocnienia nawierzchni asfaltowych.

Siatka nr 3 (fot. 3) to materiał kompozytowy, składający się z siatki zbrojeniowej z włókna szklanego, pokrytej polimerem elastomerowym, połączonej z geowłókniną, stanowiącą barierę przeciw wilgoci. Siatka charakteryzuje się wysoką sztywnością, niską rozciągliwością oraz stabilnością termiczną i chemiczną. Materiał ten przeznaczony jest do wzmocnienia nawierzchni asfaltowych oraz do stosowania jako pośrednia warstwa izolacyjna.

Charakterystyczne właściwości siatki nr 2 i nr 3 przedstawiono w tabeli 5.

Charakterystyka układów warstwowych

Przyjęto dwuwarstwowe układy o zmiennej grubości wykonane w dwóch wariantach. Dolną warstwę stanowiła warstwa wiążąca z AC16W, natomiast warstwę wierzchnią warstwa ścieralna SMA11. W pierwszym wariantcie, zarówno dolną, jak i górną warstwę wykonano o grubości 4 cm, (oznaczone „4+4”) w drugim wariantcie warstwę ścieralną pocieniono o 2 cm, zachowując warstwę dolną o grubości 4 cm (oznaczone „4+2”). Wariant „4+4” odpowiada popularnemu zakresowi remontu nawierzchni w Polsce, wariant „4+2” uwzględnia natomiast popularny błąd wykonawczy polegający na zaniżeniu grubości warstwy ścieralnej. Przeprowadzenie badań dla wariantu „4+2” miało na celu ustalenie, czy zbrojenie w tym przypadku może kompensować deficyt grubości pakietu mineralno-asfaltowego. W obu układach pomiędzy warstwami zastosowano trzy różne rodzaje geosiatek, szczegółowo scharakteryzowane w pkt. 3.2. Dodatkowo wykonano po dwie próbki z każdego rodzaju układu bez umieszczania geosyntetyku pomiędzy warstwami z mieszanek mineralno-asfaltowych. Przyjęte układy przedstawiono na rysunku 1.



nym osiągnięciu wskaźnika jej zagęszczenia na poziomie 100% po zakończeniu procesu zagęszczania. Po ułożeniu i zagęszczeniu w formie mieszanki AC16W natychmiast przystępowano do ułożenia i zagęszczenia na niej mieszanki SMA11. Górne warstwy próbki z SMA11 wykonano metodą „gorące na gorące”, stosując analogiczną procedurę zagęszczania. Podczas wykonywania próbek ze zbrojeniem w postaci geosyntetyków, ułożenie mieszanki SMA poprzedzało umieszczenie na świeżo zagęszczonej warstwie wiążącej geosiatki dociętej do wymiarów formy. Nie stosowano emulsji asfaltowej do połączenia międzywarstwowego. Rezygnacja z warstwy szepnej z emulsji asfaltowej podyktowana była wysoką temperaturą świeżo zagęszczonej warstwy wiążącej (powyżej 120°C), co z kolei wynikało z przyjętej procedury wykonywania próbek. Założono, iż właściwe połączenie warstw zostanie osiągnięte dzięki utrzymaniu wysokiej temperatury warstwy wiążącej, podobnie jak ma to miejsce w technologii kompaktasfaltu [10]. Należy mieć na uwadze, że przyjęty tok postępowania jest uproszczony i odbiega od realiów wykonywania nawierzchni, jednak pozwalał znacznie skrócić proces wykonywania próbek. Rolę warstwy szepnej uznano za pomijalną, szczególnie że przy jej udziale w pakietach zbrojonych nie należy spodziewać się osiągnięcia poziomu szepności warstw względnie wyższego, niż w przypadku homogenicznego pakietu z mieszanek mineralno-asfaltowych, zawierającego warstwę szepną [9]. Po wykonaniu całego pakietu, próbkę pozostawiano w stalowej formie do momentu osiągnięcia temperatury pokojowej, a następnie rozformowywano. Cała procedura przygotowania próbek, od momentu umieszczenia mieszanki w suszarce do pełnego ostygnięcia próbki, zajmowała średnio około 6 godzin. Z uwagi na dłuższy czas stygnięcia próbki, możliwe było wykonanie jednej do dwóch próbek dziennie. Dla każdego z przyjętych układów warstwowych wykonano po osiem próbek, tj. po dwie próbki z zastosowaniem każdego z trzech geosyntetyków i po dwie próbki bez zbrojenia. Łącznie wykonano szesnaście próbek płytowych.

Przygotowanie próbek laboratoryjnych

Przygotowanie próbek poprzedzało rozgrzanie w suszarce laboratoryjnej porcji ok. 10 kg gotowych mieszanek na aluminiowych tackach, tj. w postaci, w jakiej przekazano je z WMB. Mieszanki mineralno-asfaltowe rozgrzewano do temperatury 160°C, która odpowiada temperaturze zagęszczania (zakres temperatury zagęszczania mieszanki dla warstwy wiążącej wynosi 140÷180°C, dla warstwy ścieralnej 135÷175°C). Temperaturę mieszanki znajdującej się w suszarce kontrolowano za pomocą termometru cyfrowego. Po osiągnięciu wymaganej temperatury mieszanki wyjmowano z suszarki i układano w stalowej formie o wymiarach 300 × 300 mm w ilości określonej na podstawie danych z tabeli 3, pozwalającej na uzyskanie zamierzonej wysokości warstwy przy jednoczes-



Fot. 4. Wycinanie rdzenia ϕ 150 mm z próbki płytowej (K. Żołnowski)



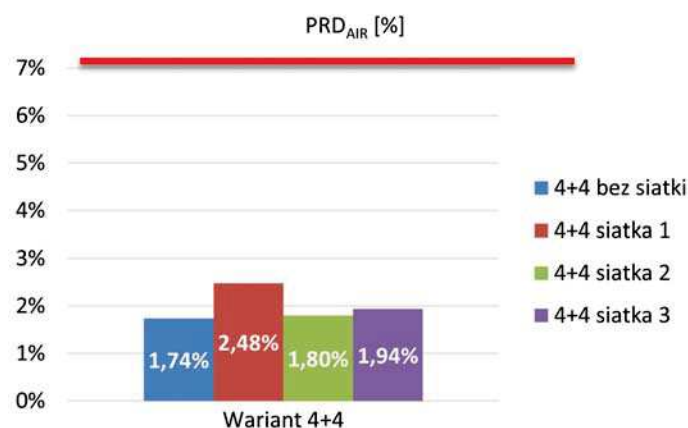
Fot. 5. Rdzeń pozyskany z próbki płytowej o układzie „4+4” z siatką nr 1 (K. Żołnowski)

Pierwszym etapem badań było oznaczenie odporności na deformacje trwałe w małym aparacie metodą B w powietrzu. Następnie z przebadanych próbek płytowych za pomocą wiertnicy wyposażonej w koronkę wiertniczą (fot. 4) wycięto rdzenie o średnicy 150 mm przeznaczone do badania szczepności międzywarstwowej metodą Leutnera. Płytową próbkę umieszczano na twardym podłożu, a następnie, po ustabilizowaniu z wykorzystaniem wagi wiertnicy, pozyskiwano z niej rdzeń (fot. 5). Z każdej próbki płytowej pozyskano jeden rdzeń, łącznie uzyskując szesnaście cylindrycznych próbek.

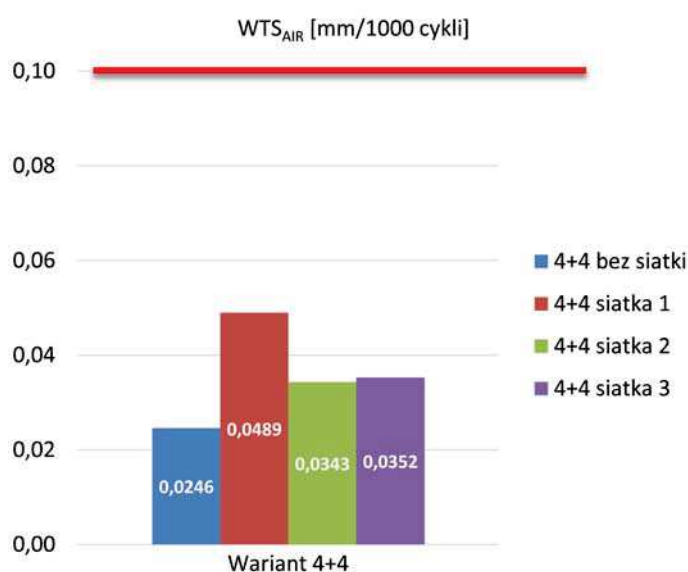
Wyniki badań

Odporność na koleinowanie

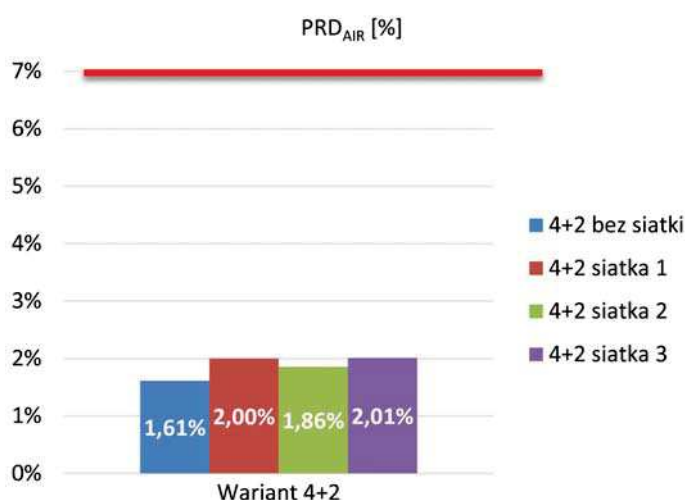
Na rysunkach 2–5 zaprezentowano wyniki oznaczenia odporności na deformacje trwałe (koleinowania) z podziałem na dwie grupy układów „4+4” (rys. 2 i rys. 3) oraz „4+2” (rys. 4 i rys. 5). Linia czerwona na wykresach zaznaczono



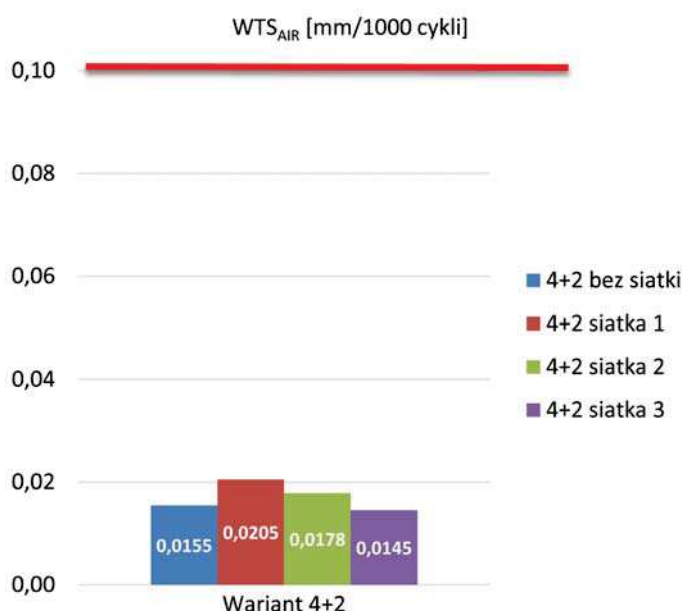
Rys. 2. Proporcjonalna głębokość koleiny PRD_{AIR} dla wariantu „4+4”



Rys. 3. Nachylenie wykresu koleinowania WTS_{AIR} dla wariantu „4+4”



Rys. 4. Proporcjonalna głębokość koleiny PRD_{AIR} dla wariantu „4+2”



Rys. 5. Nachylenie wykresu koleinowania WTS_{AIR} dla wariantu „4+2”

wartości graniczne wartości parametrów PRD_{AIR} (deklarowana nie więcej niż 7,0%) i WTS_{AIR} (≤ 0,10 mm/1000 cykli) dla mieszanki SMA dla kategorii ruchu KR5-7, zgodnie z wymaganiami Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad określonymi w WT-2 2014 [22].

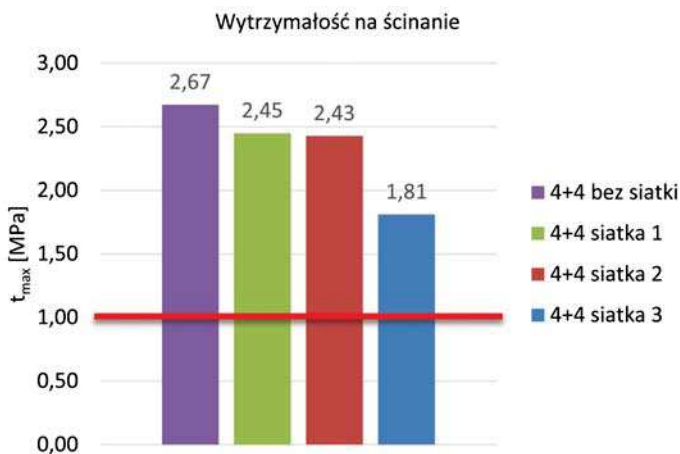
W pierwszej kolejności należy zauważyć, iż wszystkie przebadane próbki spełniają wymagania określone w WT-2 2014 [22] w zakresie odporności na deformacje trwałe. Mieszanki mineralno-asfaltowe przeznaczone do badań wyprodukowane zostały przy użyciu asfaltów modyfikowanych polimerami, które zwiększają odporność na koleinowanie [2].

Obecność geosiatek zarówno w pierwszej, jak i drugiej grupie układów warstwowych negatywnie wpłynęła na wartości parametrów charakteryzujące odporność na deformacje trwałe. Największą odpornością wykazały się próbki bez geosiatki. W układach „4+4” dla próbek niezbrojonych wartość parametru PRD_{AIR} była mniejsza o 3%, a WTS_{AIR}

mniejsza o 39,4% względem wartości uzyskanych dla próbek z siatką nr 2 (z włókien szklanych), wykazujących się największą odpornością na koleinowanie spośród próbek zbrojonych. Analizując wariant „4+2” zauważyć można, że o ile w przypadku parametru określającego proporcjonalną głębokość koleiny najlepszy efekt wykazuje również próbka bez siatki (podobnie jak w przypadku pierwszej grupy układów), o tyle rozpatrując nachylenie wykresu koleinowania należy zwrócić uwagę, że najkorzystniejszy wynik spośród próbek zbrojonych uzyskują próbki z siatką nr 3 (w postaci geokompozytu). Pod względem odporności na koleinowanie, najlepsze rezultaty ze wszystkich zbrojonych próbek uzyskały próbki zbrojone siatką nr 2 (z włókien szklanych), najgorszymi wynikami natomiast charakteryzowały się próbki z wykorzystaniem siatki nr 1 (georusztu). Porównując odporność na koleinowanie układów „4+4” i „4+2” (zarówno próbek zbrojonych, jak i niezbrojonych) można zauważyć, że o ile proporcjonalne głębokości koleiny PRD_{AIR} są dla obu układów bardzo zbliżone, o tyle wartości nachylenia wykresów koleinowania WTS_{AIR} są zauważalnie niższe w przypadku układów „4+2”. Fakt ten jest powiązany z mniejszą bezwzględną wartością maksymalnej głębokości koleiny uzyskiwanej dla pakietów „4+2”, a zatem obserwuje się jej wolniejszy przyrost, a w efekcie mniejsze nachylenie wykresu koleinowania dla cieńszego pakietu. Jest to efekt skali.

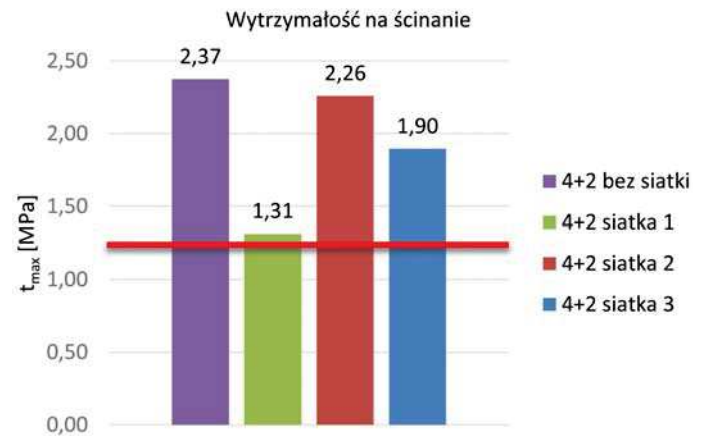
Szczepność międzywarstwowa

W badaniu szczepności międzywarstwowej uzyskano wartości siły ścinającej w granicach od 15,3 do 50,0 kN oraz przemieszczenia w granicach 2,2 do 7,4 mm. Obliczone wartości średnie maksymalnych naprężeń ścinających τ_{max} każdego zestawu próbek wariantu „4+4” i „4+2” przedstawiono odpowiednio na rysunku 6 i rysunku 7. W celu przejrzystej analizy, otrzymane wyniki przedstawiono z zapisem do dwóch miejsc znaczących po przecinku. Na rysunkach 6 i 7 dodatkowo oznaczono czerwoną linią kryterium szczepności międzywarstwowej określone według Instrukcji [20], które dla połączenia warstw ścieralnej z wiążącą powinno wynosić nie mniej niż 1,0 MPa (wariant „4+4”), a dla połączenia cienkiej warstwy ścieralnej z warstwą wiążącą nie



Rys. 6. Wytrzymałość na ścinanie w próbek wariantu „4+4”

mniej niż 1,3 MPa. Wszystkie z przebadanych w aparacie ścinania próbek wyraźnie spełniły określone kryterium szczepności międzywarstwowej z wyjątkiem próbek układu warstwowego „” zbrojonych siatką nr 1, których wynik nieznacznie różnił się od wartości granicznej określonej w Instrukcji [20]. W tym kontekście można uznać, że przyjęta procedura przygotowania próbek pozwoliła na uzyskanie prawidłowej szczepności warstw bez stosowania emulsji asfaltowej.



Rys. 7. Wytrzymałość na ścinanie w próbek wariantu „4+2”

Przykład ściętej próbki przedstawiono na fotografii 6.



Fot. 6. Ścięta próbka wariantu „4+2” z siatką nr 2

Największą wytrzymałością na ścinanie charakteryzowały się próbki bez zbrojenia. Obecność siatek w próbkach wpływa na pogorszenie wyników szczepności międzywarstwowej, choć spełniają one nadal kryteria zawarte w pkt. 5. Instrukcji [20]. Największą wytrzymałością spośród próbek zbrojonych geosyntetykami wykazały się próbki z siatką nr 2 (z włókien szklanych), zarówno w przypadku układów „4+4”, jak i układów „4+2”. Słabe połączenie warstw pró-

bek wariantu „4+2” zawierających siatkę nr 1 wydaje się dyskwalifikować stosunkowo gruby georuszt z roli zbrojenia układów zawierających cienkie warstwy mineralno-asfaltowe (np. w technologii cienkich warstw ścieralnych). Wszystkie próbki w obrębie układu „4+4” cechowała nieznacznie większa wytrzymałość na ścinanie, niż próbek układu „4+2”. Prawdopodobnie jest to spowodowane zastosowaniem niernormalnie cienkiej warstwy (2 cm) z mieszanki SMA 11, która podczas zagęszczania szybciej niż warstwa o grubości 4 cm traciła temperaturę, co wpłynęło niekorzystnie na siłę związania z warstwą wiążącą. Niewielka liczba zadanych próbek nie upoważnia do wyciągania innych, jednoznacznych wniosków.

Wnioski

Obecność zbrojenia w postaci geosyntetyków w przebadanych układach wpływa niekorzystnie na ich odporność na deformacje trwałe oraz szczepność międzywarstwową. W przypadkach obu wariantów „4+4” oraz „4+2” próbki bez siatek charakteryzowały się lepszymi parametrami, niż próbki zbrojone.

Zarówno w przypadku odporności na deformacje trwałe, jak i szczepności międzywarstwowej, najlepsze spośród układów zbrojonych rezultaty uzyskały próbki z siatką nr 2 wykonaną z włókien szklanych. Powodem dobrej szczepności warstwy wiążącej i ścieralnej, jak również wysokiej odporności na koleinowanie pakietów zarówno w układzie „4+4”, jak i „4+2” był fakt, iż siatka ta charakteryzuje się wysoką wytrzymałością na rozciąganie i sztywnymi węzłami. Ponadto włókna szklane są nasączone zmodyfikowanym polimerem elastomerowym, który mógł przyczynić się do lepszego związania warstwy wiążącej z warstwą ścieralną. Nie ulega zatem wątpliwości, iż materiał ten spośród wszystkich zastosowanych najlepiej spełni rolę wzmocnienia nawierzchni asfaltowych, nie pogarszając przy tym znacząco odporności na deformacje trwałe oraz wytrzymałości na ścinanie.

W odróżnieniu od siatek nr 1 i nr 2, struktura siatki nr 3 – geokompozytu stanowi pełną barierę między warstwami mineralno-asfaltowymi i w niej należy upatrywać przyczyny przede wszystkim relatywnie mniejszej wytrzymałości na ścinanie próbek nią zbrojonych. W wypadku siatki nr 3, podobnie jak w przypadku wszelkich geokompozytów zawierających geowłókninę, za nieodzowne należy uznać użycie emulsji asfaltowej do zminimalizowania efektu bariery na styku warstw mineralno-asfaltowych. Z kolei w przeciwieństwie do siatek nr 2 i nr 3, siatka nr 1 (georuszt) została wykonana z polipropylenu. Jak pokazały wyniki badań, materiał ten nie współpracuje z mieszankami mineralno-asfaltowymi tak dobrze, jak włókno szklane dodatkowo nasączone polimerem elastomerowym. Przy stosowaniu samodzielnych siatek z polipropylenu w charakterze zbrojenia, nie należy spodziewać się znaczącej poprawy po zaaplikowaniu emulsji asfaltowej jako warstwy szczepnej. Lepszym wyborem pozostaje stosowanie tego typu georusztów do wzmocniania mineralnych warstw niezwiązanych.

Należy podkreślić, że badania prowadzone były przy wykorzystaniu bardzo odpornych na deformacje miesza-

nek mineralno-asfaltowych zawierających asfalty modyfikowane. W tych warunkach ujawnienie korzystnego wpływu z zastosowania warstwy pośredniej w postaci geosyntetyku okazało się niemożliwe. Uwzględnić trzeba także, że zbrojenie w obrębie pakietu mineralno-asfaltowego ma poprawiać trwałość wynikającą z kryterium spękań i jest dedykowane wzmocnieniom i remontom nawierzchni. Niemniej, warty przeprowadzenia jest program analogicznych badań dla próbek wykonanych z mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych na ruch lekki, skomponowanych z materiałów o gorszych właściwościach, bądź też celowo, aczkolwiek w sposób kontrolowany, niedogęszczonych. Mieszanki te, wykazując mniejszą odporność na deformacje trwałe i szczepność międzywarstwową, mogą stanowić lepsze tło do wykazania pozytywnego działania wzmocnienia w postaci pośredniej warstwy z geosyntetyku.

Bibliografia

- [1] Alenowicz J.: *Zastosowania geosyntetyków w nawierzchniach drogowych*. „Inżynieria Morska i Geotechnika”, nr 2, 2010 r.
- [2] Błazejowski K., Styk S.: *Technologia warstw asfaltowych*. WKŁ, Warszawa, 2011 r.
- [3] Bugajski M., Grabowski W.: *Geosyntetyki w budownictwie drogowym*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1999 r.
- [4] Gólos M.: *Zastosowanie siatek i kompozytów do zbrojenia warstw asfaltowych. Wpływ na wzrost trwałości zmęczeniowej*. VII Międzynarodowa konferencja Śląskie Forum Drogownictwa Katowice, 2019 r.
- [5] Górszczyk J., Zieliński P.: *Modelowanie konstrukcji nawierzchni asfaltowej zbrojonej geosyntetyczną warstwą pośrednią przy zastosowaniu MES*. IX Międzynarodowa Konferencja pt. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce, maj 2003 r.
- [6] Gradkowski K.: *Geosyntetyki w budowie dróg – zasady stosowania geosyntetyków o n-tym kierunku wzmocnienia*. „Inżynier Budownictwa”, nr 7/8, 2007 r.
- [7] Grzybowska E.: *Uwarunkowania stosowania geosyntetyków w nawierzchniach asfaltowych*. „Magazyn Autostrady”, nr 7, 2009 r.
- [8] Jaskuła P., Ryś D., Stienss M., Szydłowski C., Gólos M., Kawalec J.: *Fatigue performance of double-layered asphalt concrete beams reinforced with new type of geocomposites*. Materials, 2021, 14, 2190. <https://doi.org/10.3390/ma14092190>.
- [9] Judycki J., Jaskuła P.: *Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej*. Raport z pierwszego etapu badań. Politechnika Gdańska, 2005 r.
- [10] Judycki J., Jaskuła P., Fronc T., Sierosławski T.: *Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej*. Raport z drugiego etapu badań. Politechnika Gdańska, 2006 r.
- [11] Kazimierowicz-Frankowska K.: *Wzmacnianie konstrukcji dróg geosyntetykami*. WKŁ, Warszawa, 2014 r.
- [12] Kukielka J.: *Nawierzchnie asfaltowe dróg samorządowych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2013 r.
- [13] Rolla S.: *Geotekstyli w budownictwie drogowym*. WKiŁ, Warszawa, 1988 r.
- [14] Szruba M.: *Geosyntetyki cz.1. Charakterystyka i funkcje według PN-EN ISO 10318:2007*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie”, nr 7, 2014 r.
- [15] Zornberg J., Gupta R.: *Geosynthetics in pavements: North American contributions*. In: 9th International Conference on Geosynthetics – Geosynthetics: advanced solutions for a challenging world, ICG, 2010 r.

(c.d. bibliografii do artykułu na stronie 302)

Dynamiczne sterowanie logistyką i wbudowaniem mieszanki mineralno-asfaltowej jest wykorzystywane przy podejmowaniu decyzji w dostosowaniu procesów, jak i nowym sposobie planowania wykonania robót, i sprawdziło się w praktyce.

Rozpatrując opisaną sytuację na budowie można stwierdzić, że dzienny plan wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej został zrealizowany w zaplanowanym czasie. Miało to jednak miejsce przy częstych przestojach rozkładarki, tzn. przy przerwanej ciągłości układania warstwy, a tym samym nie było to w zgodności z założeniami szczegółowego planowania oraz z optymalizacją prac.

Podany przykład powinien wykazać istotną zależność dostaw mieszanki i planowania wbudowywania od osób zatrudnionych na danej budowie. Sytuacja, w której w jednym tylko miejscu zaplanowany proces nie zostaje dotrzymany, prowadzi w sposób nieunikniony do zakłócenia przebiegu robót na całej budowie. Dyskusje poprzedzające roboty mają na celu uwrażliwienie osób zaangażowanych w realizację danej budowy, a celem ich powinno być ściśle przestrzeganie wymagań dotyczących przebiegu robót. W związku z takimi okolicznościami zalecane jest organizowanie specjalistycznych szkoleń. Korzystając z rozwiązań programowych, poszczególne fazy budowy w trakcie realizacji stają się bardziej przejrzyste. Rozpatrując zagadnienie z perspektywy czasu, można dokonać oceny wykonanego zadania – przez personel obsługujący wytwórnię mieszanki mineralno-asfaltowej, ekipę wbudowującą, jak również firmę transportową i tym samym uwrażliwić osoby zaangażowane w kontekście tych czynności pod kątem przyszłych budów, względnie stworzyć motywację do optymalizacji własnych działań.

Dynamiczne sterowanie dostawami, jak również wbudowaniem mieszanki mineralno-asfaltowej, jest wykorzystywane jako pomoc w podejmowaniu decyzji w zakresie adaptacji procesów oraz nowego sposobu planowania i sprawdziło się w tym zakresie. Należy podkreślić, że nie może to jednak zastąpić czynnika ludzkiego w odpowiednich stanowiskach na budowie, tak aby zapewnić nieprzerwane układanie nawierzchni asfaltowej.

Literatura

- [1] Ministerstwo Transportu Badenii Wirtembergii – Instrukcja „Qualitäts-Straßenbau Baden-Württemberg 4,0 – QSBW”, Version 1,0, Stuttgart 10/2018; Instrukcja „Jakość w budownictwie drogowym Badenii-Wirtembergii 4,0-QSBW” Wersja 1,0
- [2] Dodatkowe warunki umowne i wytyczne wykonania nawierzchni asfaltowych, ZTV Asphalt-StB 07/13, FGSV 2014 r.
- [3] Ministerstwo Transportu Badenii Wirtembergii – Instrukcja „Qualitäts-Straßenbau Baden-Württemberg 4,0 – QSBW”, Version 2,0, Stuttgart 11/2020, Instrukcja „Jakość w budownictwie drogowym Badenii-Wirtembergii 4,0 – QSBW”, Wersja 2,0
- [4] FGSV, H VAE, Przewodnik wykonania nawierzchni asfaltowych – Wskazania dotyczące zapewnienia odpowiedniej równości nawierzchni, Wydanie 2019, Kolonia 2019 r.
- [5] Utterrod, R. Powierzchniowo kontrolowane zagęszczenie przy wbudowywaniu warstw asfaltowych, Straße und Autobahn, nr 11/2020
- [6] BPO Asphalt, Volz Consulting GmbH, Mühlacker
- [7] Federalne Ministerstwo Transportu; Okólnik Budownictwo Drogowe nr 223/13, Sposoby poprawy jakości przy wykonywaniu nawierzchni asfaltowych, Bonn 10/2013
- [8] FGSV, TP D–StB 12 Przepisy techniczne określania grubości warstw asfaltowych, Kolonia 2013 r.
- [9] FGSV, Instrukcja robocza stosowania urządzeń radiometrycznych do pomiarów gęstości warstw asfaltowych, Kolonia, Wydanie 2001 r.
- [10] Ministerstwo Transportu Badenii – Wirtembergii „Uzupełnienia dot. technicznych warunków umownych w budownictwie drogowym”, ETV – StB-BW, Część 3 – Wydanie 2018 r., Stuttgart 10/2018

Skróty występujące w tekście:

GNSS – Globale Navigationsysteme – globalny system nawigacyjny
WLAN – Wireless Local Area Network – sieć bezprzewodowa stworzona z komputerów

EDGD Mobilfunkstandards – Standardy komunikacji mobilnej

Opracowano na podstawie artykułu Dipl.-Ing. Sven Gohl pt. „Digitalisierung im Asphaltbau – Praxiserfahrung aus Baden-Württemberg” zamieszczonego w czasopiśmie niemieckim Asphalt nr 1/2021

Opracowali:

Marek Danowski, Wiktor Murawski

Uwaga: na rysunkach 4 i 5 przedstawione jest w formie wykresu porównanie danych projektowanych i rzeczywistych. Niemieckie określenia stosowane w wersji oryginalnej to „Ist” i „Soll” co należałoby tłumaczyć jako „jest” i „powinien”. Bardziej prawidłowe tłumaczenie na język polski to: „stan planowany” i „stan rzeczywisty”.

(c.d. bibliografii ze strony 294)

- [16] Zornberg, J.: *Functions and Applications of Geosynthetics in Roadways*. Procedia Engineering, 189, 2017 r., <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.048>
- [17] PN-EN ISO 10318-1:2015-12. Geosyntetyki. Terminy i definicje, PKN
- [18] PN-EN 12697-22:2020-07 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 22: Koleinowanie, PKN
- [19] PN-EN 12697-33:2019-03 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 33: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem walującym, PKN
- [20] Instrukcja laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych wg metody Leutnera i wymagania techniczne szczepności. GDDKiA, Warszawa, 2014 r.
- [21] Katalog Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. GDDKiA, Warszawa, 2014 r.
- [22] WT-2 2014. Część I. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania Techniczne. GDDKiA, Warszawa, 2014 r.
- [23] Zalecenia stosowania geowłóknin w warstwach asfaltowych nawierzchni drogowych Informacje, instrukcje. Zeszyt nr 66. IBDiM, Warszawa, 2004 r.