



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA

MODELOWANIE TEORETYCZNE WPŁYWU SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA ZACHOWANIE SIĘ NAWIERZCHNI ASFALTOWYCH

**RAPORT Z TRZECIEGO ETAPU
(KOŃCOWY)**

Opracowano na zlecenie:

**Generalna Dyrekcja Dróg
Krajowych i Autostrad
00 - 874 Warszawa, ul. Wronia 53**

Opracowali:

prof. dr hab. inż. Józef Judycki – autor kierujący

dr inż. Piotr Jaskuła

Kierownik Katedry Inżynierii Drogowej - prof. dr hab. inż. Józef Judycki

Gdańsk, listopad 2013

MODELOWANIE TEORETYCZNE WPLYWU SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA ZACHOWANIE SIĘ NAWIERZCHNI ASFALTOWYCH

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	3
1.1. PODSTAWA OPRACOWANIA.....	3
1.2. CEL I ZAKRES PRACY.....	3
1.3. ZAKRES CAŁEJ KILKUETAPOWEJ PRACY BADAWCZEJ PRACY	4
1.3.1. Zakres III etapu pracy stanowiącego niniejsze opracowanie	5
2. WYNIKI ANALIZ OBLICZENIOWYCH SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ – NAPRĘŻENIA ŚCINAJĄCE.....	7
2.1. MODEL NAWIERZCHNI DO ANALIZ OBLICZENIOWYCH ZA POMOCĄ BISAR I ABAQUS	7
2.2. OBLICZONE NAPRĘŻENIA ŚCINAJĄCE	9
3. SZCZEPNOŚĆ MIĘDZYWARSTWOWA WARSTW ASFALTOWYCH W POLSCE.....	13
3.1. WPROWADZENIE	13
3.2. PRZEGLĄD WYMAGAŃ SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ	13
3.3. SZCZEPNOŚĆ MIĘDZYWARSTWOWA W NOWOBUDOWANYCH (2012-2013) NAWIERZCHNIACH W POLSCE	15
3.3.1. Wprowadzenie	15
3.3.2. Wyniki i analiza szczepności międzywarstwowej – zestawienie ogólne	15
3.3.3. Analiza szczepności międzywarstwowej z uwzględnieniem klasy drogi.....	20
3.3.4. Analiza wpływu wybranych parametrów mieszanek mineralno-asfaltowych na szczepność międzywarstwową	23
3.4. ROZKŁADY SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ	36
4. KRYTERIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WARSTW ASFALTOWYCH.....	39
4.1. OSTATECZNIE PRZYJĘTE KRYTERIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WARSTW ASFALTOWYCH	46
5. OPRACOWANIE INSTRUKCJI DO BADANIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WARSTW ASFALTOWYCH	47
5.1. WPROWADZENIE	47
5.2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA WYNIK BADANIA SZCZEPNOŚCI W APARACIE LEUTNERA	48
5.2.1. Wpływ przerwy pomiędzy szczękami ścinającymi w aparacie Leutnera.....	48
5.3. INSTRUKCJA LABORATORYJNEGO BADANIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WG METODY LEUTNERA PRÓBEK ODWIERCONYCH Z NAWIERZCHNI	49
6. OGÓLNE ZASADY TECHNOLOGICZNE ZMIERZAJĄCE DO ZAPEWNIENIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WARSTW ASFALTOWYCH.....	50
6.1. WARSTWA SZCZEPNA	50
6.2. WARSTWY MINERALNO-ASFALTOWE.....	52
6.3. WARUNKI ŚRODOWISKOWE I EKSPLOATACYJNE	53
6.4. OBSERWACJE I NADZÓR TECHNICZNY	53
LITERATURA.....	54
ZAŁĄCZNIK 1. INSTRUKCJA LABORATORYJNEGO BADANIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WG METODY LEUTNERA PRÓBEK ODWIERCONYCH Z NAWIERZCHNI I WYMAGANIA TECHNICZNE SZCZEPNOŚCI.....	55

MODELOWANIE TEORETYCZNE WPŁYWU SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA ZACHOWANIE SIĘ NAWIERZCHNI ASFALTOWYCH

1. WSTĘP

1.1. Podstawa opracowania

Opracowanie niniejsze wykonano na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie (GDDKiA w Warszawie) w ramach umowy nr 3097/2011 z dnia 18.11.2011 r., wg harmonogramu dla etapu III.

1.2. Cel i zakres pracy

W pracy został rozpoznany rzeczywisty mechanizm pracy połączenia między warstwami asfaltowymi, został określony model teoretyczny, który uwzględnia rzeczywistą pracę połączenia lub osłabienia, czy braku połączenia warstw asfaltowych na stan naprężeń i odkształceń konstrukcji nawierzchni. Został także uwzględniony fakt braku szczepności przy pobieraniu próbek podczas odwiertu, ale występowaniu tarcia, minimalnego sklejenia i zazębienia warstw.

Zweryfikowany stan naprężeń i odkształceń został wykorzystany w mechanistycznych metodach analizy konstrukcji nawierzchni. Podano wyniki analiz teoretycznych, dotyczących szczepności opartych o teorię wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej i metody elementów skończonych.

Przedstawiono analizę szczepności międzywarstwowej nowobudowanych warstw asfaltowych w Polsce, a w szczególności:

- ogólnych rozkładów uzyskanych wyników,
- wpływu klasy technicznej dróg,
- wpływu wskaźnika zagęszczenia,
- wpływu zawartości asfaltu,
- wpływu temperatury powietrza.

Podano ogólne zasady technologiczne zmierzające do zapewnienia szczepności międzywarstwowej.

Istotnym elementem pracy jest opracowanie instrukcji laboratoryjnych badań szczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera próbek odwierconych z nawierzchni oraz sformułowano wymagania techniczne w tym zakresie.

1.3. Zakres całej kilkusetapowej pracy badawczej pracy

Praca została podzielona na trzy etapy, a w zakres każdego etapu wchodzi:

Etap I (prace wstępne) – zrealizowano w 2011 r.

Rozdział 1: „Wpływ braku szczepności na pracę konstrukcji nawierzchni”, w którym wskazano na zmiany stanu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w konstrukcji nawierzchni przy braku szczepności międzywarstwowej. Brak szczepności pomiędzy warstwami asfaltowymi zmniejsza efektywną sztywność pakietu warstw asfaltowych, zwiększając ugięcia nawierzchni, a te zwiększają odkształcenia rozciągające na spodzie warstw. Większe odkształcenia na spodzie warstw asfaltowych wpływają na obniżenie trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni.

Rozdział 2: „Przegląd dostępnych metod modelowania układu warstw konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem modelowania szczepności międzywarstwowej”, który zawiera zestawienie prób modelowania szczepności międzywarstwowej w pakiecie warstw asfaltowych, z wykorzystaniem metod opartych na analizie mechanistycznej konstrukcji nawierzchni z wykorzystaniem teorii wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej oraz metody elementów skończonych (MES). Zastosowanie MES umożliwia uwzględnienie w analizach obliczeniowych złożonego zjawiska szczepności międzywarstwowej, to jest zazębienia (tarcia), jak i sklejenia warstw poprzez lepiszczce asfaltowe (stanu lepko-sprężystego asfaltu).

Etap II (zrealizowano w 2012 roku)

Rozdział 1 – to wstęp.

Rozdział 2: „Wykorzystanie oprogramowania Abaqus do modelowania konstrukcji nawierzchni drogowej”. W rozdziale omówiono możliwości programu Abaqus. Scharakteryzowano elementy skończone, metody uniknięcia blokady. Omówiono możliwości uwzględnienia nieliniowości oddziaływania między częściami modelu. Opisano wbudowane w Abaqusie możliwości symulacji szczepności międzywarstwowej.

Rozdział 3: „Modelowanie szczepności międzywarstwowej w programie Abaqus z wykorzystaniem parametrów mierzonych w laboratorium”. W pierwszej części rozdziału wykonano symulację numeryczną badania Leutnera z zastosowaniem płaskiego i przestrzennego stanu naprężeń i odkształceń. Bardzo dobra zgodność uzyskanych wyników z rezultatami osiąganymi w Laboratorium pozwoliła na tworzenie dalszych modeli pełnej konstrukcji nawierzchni, gdzie symulowano szczepność międzywarstwową. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i oceny uzyskanych rezultatów wskazano model szczepności międzywarstwowej, który dobrze symuluje zachowanie się nawierzchni. Wskazany model wykorzystano w dalszych analizach obliczeniowych.

Rozdział 4: „Kalibracja modelu obliczeniowego z parametrami mierzonymi w terenie”.

Wyniki ugięć, a nawet czasz ugięć nawierzchni odcinka doświadczalnego, rzeczywistej nawierzchni, pomierzone urządzeniem FWD porównywano z ugięciami (czaszami ugięć) uzyskanymi z obliczeń mechanistycznych modelu konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego przy zastosowaniu metody elementów skończonych MES w programie Abaqus. Porównywanie wyników ugięć ma szczególne znaczenie przy konstrukcjach nawierzchni z osłabioną lub brakiem szczepności międzywarstwowej, co można lepiej symulować i kontrolować w metodzie MES niż przy zastosowaniu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Na odcinku doświadczalnym stworzono sekcje konstrukcji nawierzchni, gdzie kontrolowano szczepność międzywarstwową na poziomie warstwy wiążącej i podbudowy. Uzyskane zgodności z porównania czasz ugięć pozwolą weryfikować i wybrać właściwy model nawierzchni w metodzie MES, a przy jego pomocy precyzyjniej prognozować zachowanie się konstrukcji nawierzchni z osłabioną szczepnością międzywarstwową warstw asfaltowych.

Etap III (realizowano w 2013 roku)

1. Opracowanie wytycznych pozwalających na prowadzenie badań szczepności międzywarstwowej aparatem Leutnera.
2. Opracowanie minimalnych wymagań szczepności międzywarstwowej do stosowania na budowach oraz zaleceń mających na celu zwiększenie szczepności międzywarstwowej podczas budowy.
3. Wypracowanie schematu postępowania przy stwierdzonym braku szczepności międzywarstwowej podczas obioru robót.

1.3.1. Zakres III etapu pracy stanowiącego niniejsze opracowanie

Niniejsze opracowanie składa się z sześciu rozdziałów. Zawiera ono sprawozdanie z prac badawczych wykonanych w okresie od stycznia do końca listopada 2013 roku. Zakres poszczególnych rozdziałów odpowiada treści harmonogramu zawartemu w programie badawczym – integralnej części umowy.

Rozdział 1 – to wstęp.

Rozdział 2 – „Wyniki analiz obliczeniowych szczepności międzywarstwowych”

W rozdziale tym przedstawiono wyniki naprężeń stycznych (ścinających) z analiz obliczeniowych konstrukcji nawierzchni z różnymi modelami szczepności międzywarstwowej, wykorzystywanych w programach BISAR i ABAQUS. Wyniki obliczonych naprężeń ścinających posłużyły do przyjęcia kryteriów szczepności międzywarstwowej.

Rozdział 3 – „Szczepność międzywarstwowa warstw asfaltowych w Polsce”

W rozdziale tym przeprowadzono analizę wyników badań szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych w Polsce. Analizowano dane z monitoringu

właściwości fizyko-mechanicznych warstw asfaltowych prowadzonego w latach 2012 (styczeń-grudzień) i 2013 (styczeń-sierpień) przez Laboratoria Drogowe oddziałów GDDKiA w ramach własnych badań kontrolnych podczas prowadzonych inwestycji. Analizie poddano 7043 wyników szczepności międzywarstwowej badanych na próbkach 150 mm, odwierconych z nawierzchni budowanych dróg autostradowych (A), ekspresowych (S) i głównych krajowych (DK) oraz towarzyszących dróg wojewódzkich (DW) i powiatowych (DP) na różnych etapach budowy. Próbkę do badań szczepności międzywarstwowej pochodziły z 74 odcinków nowobudowanych lub remontowanych dróg.

Rozdział 4 - „Kryteria szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych”

W rozdziale przedstawiono analizę przyjęcia nowych kryteriów szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych opartą o analizę trzyczynnikową. Analizowano wpływ następujących czynników:

- teoretyczne rozkłady naprężeń ścinających w konstrukcji nawierzchni,
- rozkłady rzeczywistych wyników szczepności międzywarstwowej,
- aktualne kryteria szczepności międzywarstwowej w innych krajach na świecie.

Rozdział 5 – „Opracowanie instrukcji do badania szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych”

W ramach prac badawczych realizowanych przez Politechnikę Gdańską, prowadzonych na zlecenie GDDKiA na podstawie polskiej, brytyjskiej i głównie niemieckiej instrukcji oraz doświadczeń z wykonywania tego typu badań już prawie 10 lat temu opracowano nową „Instrukcję laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera próbek odwierconych z nawierzchni”.

Rozdział 6 – „Warunki techniczne zapewniające wymaganą szczepność międzywarstwową warstw asfaltowych”

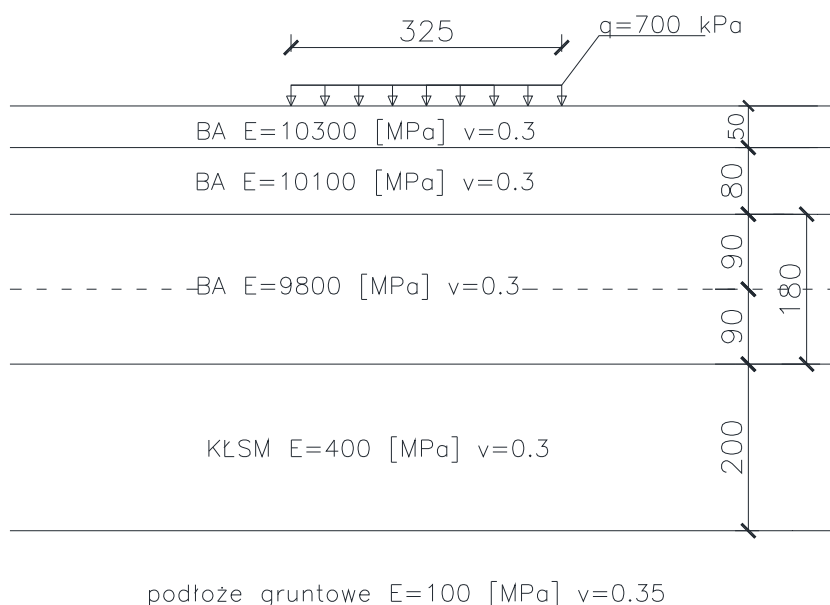
W rozdziale tym przedstawiono zasady właściwego dobierania i wykonania warstwy szczepnej w zakresie warstwy szczepnej, właściwości stykających się mieszanek mineralno-asfaltowych oraz warunków środowiskowych i eksploatacyjnych. Autorzy uważają, że identyfikacja i zrozumienie czynników wpływających na właściwe zaprojektowanie i poprawne wykonanie warstwy szczepnej, a za tym uzyskanie dobrej szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych jest podstawowym elementem sukcesu w zakresie połączeń międzywarstwowych.

2. WYNIKI ANALIZ OBLICZENIOWYCH SZCZEPNOŚCI MIEDZYWARSTWOWEJ – NAPRĘŻENIA ŚCINAJĄCE

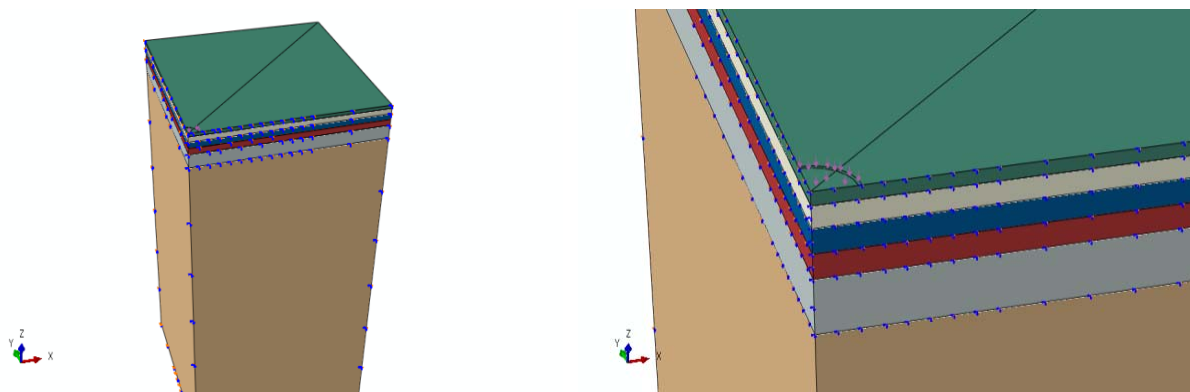
W rozdziale tym przedstawiono wyniki naprężeń stycznych (ścinających) z analiz obliczeniowych konstrukcji nawierzchni z różnymi modelami szczepności międzywarstwowej, wykorzystywanych w programach BISAR i ABAQUS. Wyniki obliczonych naprężeń stycznych posłużyły w dalszej części opracowania do ostatecznego przyjęcia kryteriów szczepności międzywarstwowej.

2.1. Model nawierzchni do analiz obliczeniowych za pomocą BISAR i ABAQUS

Tak jak w poprzednim roku [4] do analiz obliczeniowych przyjęto model układu nawierzchni, którego przekrój przedstawia rys.2.1. W trójwymiarowym modelu MES wykorzystano podwójną symetrię zadania. Przyjęty schemat obliczeniowy przedstawia rys. 2.2. Moduły sztywności poszczególnych warstw przedstawione na rysunku 2.1 odpowiadają temperaturze $+10^{\circ}\text{C}$. Moduły sztywności i współczynniki Poissona warstw asfaltowych odpowiadające temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ przedstawiono w tablicy 2.1.



Rys. 2.1. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni KR6 (grubości warstw podano w [mm])



Rys. 2.2. Model MES konstrukcji nawierzchni KR6

Tablica 2.1. Zestawienie modułów sztywności i współczynników Poissona warstw konstrukcji nawierzchni.

Lp.	Warstwa konstrukcji	Moduł sztywności [MPa]	Współczynnik Poissona	Moduł sztywności [MPa]	Współczynnik Poissona
		+10°C		+20°C	
1	Warstwa ścieralna	10300	0,3	3000	0,4
2	Warstwa wiążąca	10100	0,3	3500	0,4
3	Górna warstwa podbudowy asfaltowej	9800	0,3	3500	0,4
4	Dolna warstwa podbudowy asfaltowej	9800	0,3	3500	0,4
5	Warstwa podbudowy z kruszywa łamanego	400	0,3	400	0,3
6	Podłoże gruntowe	100	0,35	100	0,35

W obliczeniach modelowano pełną szczepność międzywarstwową pomiędzy warstwami asfaltowymi, jak i brak oraz ograniczoną szczepność pomiędzy warstwami wiążąca-podbudowa (oznaczona w opracowaniu W2 jako wariant 2) i pomiędzy warstwami podbudowa górna-podbudowa dolna (oznaczona w opracowaniu W8 jako wariant 8). Oznaczenia przyjęto zgodnie z raportami z poprzednich lat [3, 4].

Szczegóły parametrów opisujących modele samej szczepności międzywarstwowej wykorzystane w programach BISAR i ABAQUS, gdzie wykorzystano następujące rodzaje powiązania:

- pełna szczepność (BISAR, ABAQUS),
- pełen poślizg (BISAR, ABAQUS),
- kontakt z zastosowaniem tarcia pomiędzy powierzchniami (ABAQUS),
- kontakt kohezyjny (ABAQUS),
- Kontakt z zastosowaniem tarcia wraz z kontaktem kohezyjnym (ABAQUS), opisano szczegółowo w opracowaniu [4].

2.2. Obliczone naprężenia ścinające

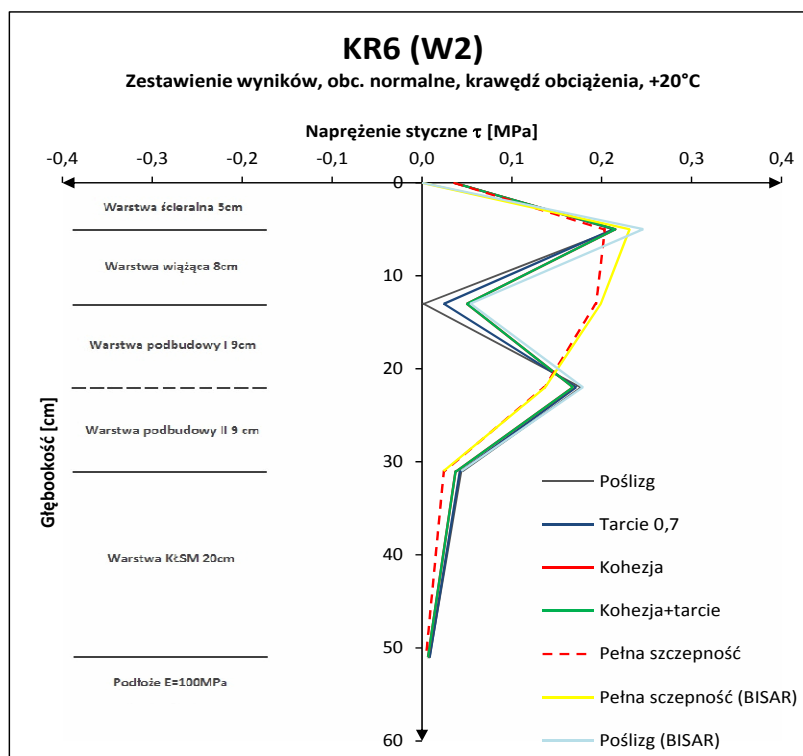
W tablicach 2.2, 2.3, 2.4 i 2.5 zestawiono obliczone naprężenia styczne na granicy warstw asfaltowych za pomocą modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej (BISAR) i modelu MES (Abaqus). Modele obliczeniowe oraz sposoby modelowania szczepności, jej braku i ograniczonej szczepności opisano w opracowaniu [4]. W tablicach zestawiono rozkłady naprężeń stycznych analizowanych konstrukcji KR6 w wariantach pełnej szczepności i ograniczonej szczepności pomiędzy warstwą wiążącą-podbudowa (wariant 2) i pomiędzy warstwą podbudowa-podbudowa (wariant 8).

Tablica 2.2. Zestawienie naprężeń stycznych w osi krawędzi obciążenia ($q=700$ kPa, $a=0,162$ m) na różnych głębokościach, konstrukcja KR6W2, $+20^{\circ}\text{C}$, **brak lub ograniczona szczepność w warstwie wiążąca-podbudowa**

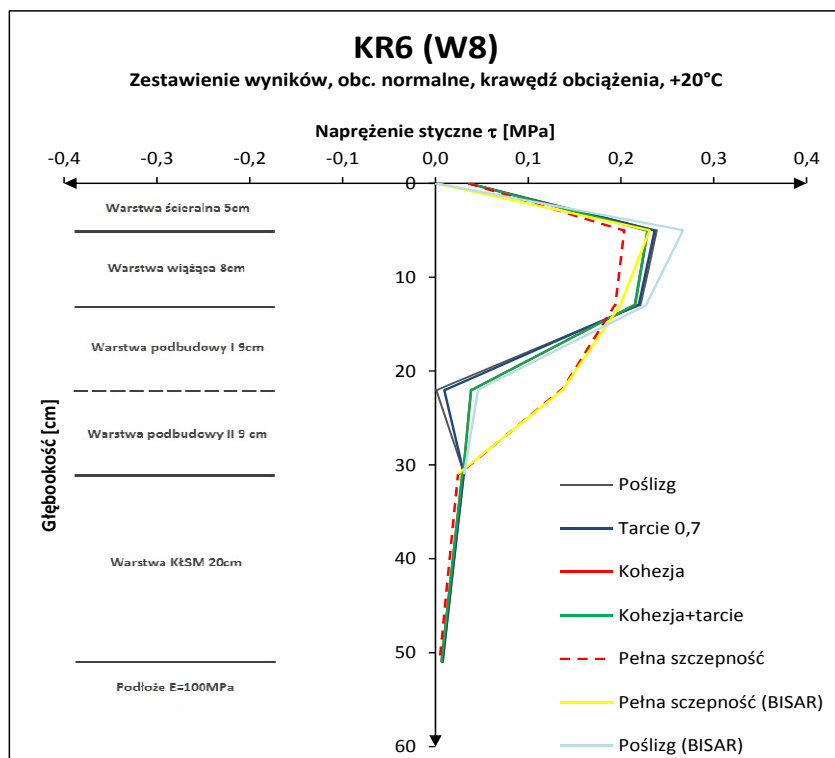
Głębokość [m] Lokalizacja	Naprężenia ścinające (τ) [MPa], w osi krawędzi obciążenia ($q=700$ kPa, $a=0,162$ m)						
	BISAR		ABAQUS				
	Pełna szczepność	Poślizg (brak szczepności)	Pełna szczepność	Poślizg (brak szczepności)	Tarcie, $\mu=0,7$ (ograniczona szczepność)	Kohezja (ograniczona szczepność)	Kohezja+tarcie (ograniczona szczepność)
0,00	0,000	0,000	0,035	0,035	0,036	0,035	0,036
0,05 (ś-w)	0,231	0,246	0,202	0,215	0,126	0,215	0,215
0,13 (w-p)	0,199	0,054	0,194	0,002	0,025	0,05	0,05
0,22 (pg-pg)	0,137	0,179	0,137	0,177	0,172	0,168	0,168
0,31 (spód mma)	0,024	0,044	0,045	0,045	0,043	0,039	0,039
$\tau_{w-p}/\tau_{ś-w}$	0,86	0,22	0,96	0,01	0,20	0,23	0,23
$\tau_{p-p}/\tau_{ś-w}$	0,59	0,73	0,68	0,82	1,37	0,78	0,78

Tablica 2.3. Zestawienie naprężeń stycznych w osi krawędzi obciążenia ($q=700$ kPa, $a=0,162$ m) na różnych głębokościach, konstrukcja KR6W8, $+20^{\circ}\text{C}$, **brak lub ograniczona szczepność w warstwie podbudowa-podbudowa**

Głębokość [m] Lokalizacja	Naprężenia ścinające (τ) [MPa], w osi krawędzi obciążenia ($q=700$ kPa, $a=0,162$ m)						
	BISAR		ABAQUS				
	Pełna szczepność	Poślizg (brak szczepności)	Pełna szczepność	Poślizg (brak szczepności)	Tarcie, $\mu=0,7$ (ograniczona szczepność)	Kohezja (ograniczona szczepność)	Kohezja+tarcie (ograniczona szczepność)
0,00	0,000	0,000	0,035	0,036	0,036	0,035	0,035
0,05 (ś-w)	0,231	0,267	0,202	0,237	0,234	0,227	0,227
0,13 (w-p)	0,199	0,227	0,194	0,210	0,219	0,215	0,215
0,22 (pg-pg)	0,137	0,046	0,137	0,002	0,014	0,039	0,039
0,31 (spód mma)	0,024	0,031	0,045	0,031	0,040	0,029	0,029
$\tau_{w-p}/\tau_{ś-w}$	0,86	0,85	0,96	0,89	0,94	0,95	0,95
$\tau_{p-p}/\tau_{ś-w}$	0,59	0,17	0,68	0,01	0,06	0,17	0,17



Rys. 2.1. Naprężeń stycznych w konstrukcji nawierzchni KR6 w temperaturze +20°C przy uwzględnieniu braku lub ograniczenia szczepności międzywarstwowej w połączeniu warstw wiążąca-podbudowa.



Rys. 2.2. Naprężeń stycznych w konstrukcji nawierzchni KR6 w temperaturze +20°C przy uwzględnieniu braku lub ograniczenia szczepności międzywarstwowej w połączeniu warstw podbudowa-podbudowa.

Tablica 2.4. Zestawienie naprężeń stycznych w osi krawędzi obciążenia ($q=700$ kPa, $a=0,162$ m) na różnych głębokościach, konstrukcja KR6W2, $+10^{\circ}\text{C}$, **brak lub ograniczona szczepność w warstwie wiążąca-podbudowa**

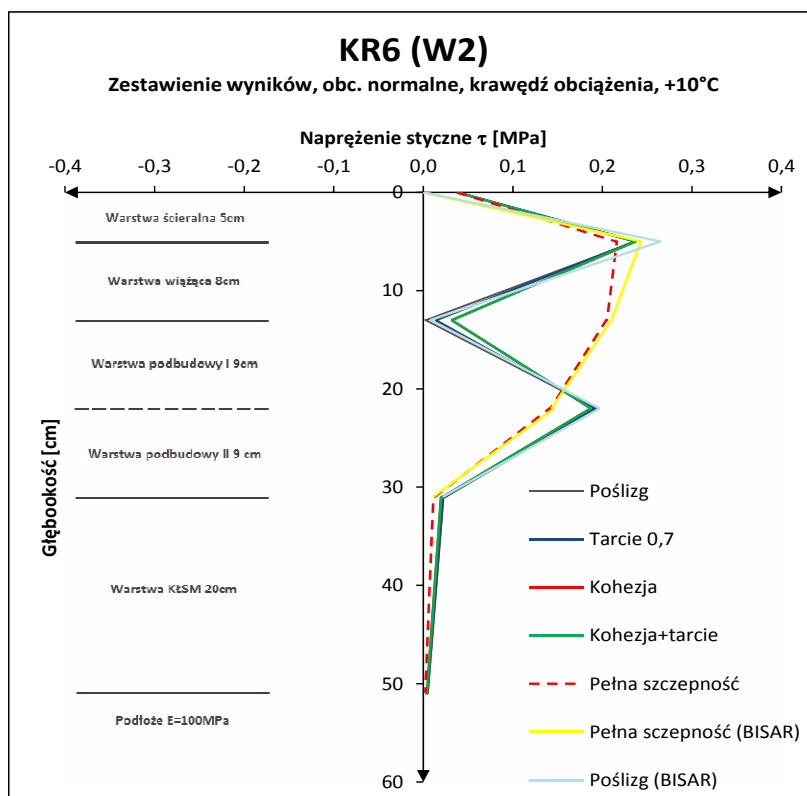
Głębokość [m] Lokalizacja	Naprężenia ścinające (τ) [MPa], w osi krawędzi obciążenia ($q=700$ kPa, $a=0,162$ m)						
	BISAR		ABAQUS				
	Pełna szczepność	Poślizg (brak szczepności)	Pełna szczepność	Poślizg (brak szczepności)	Tarcie, $\mu=0,7$ (ograniczona szczepność)	Kohezja (ograniczona szczepność)	Kohezja+tarcie (ograniczona szczepność)
0,00	0,000	0,000	0,037	0,038	0,038	0,038	0,038
0,05 (ś-w)	0,243	0,265	0,215	0,238	0,236	0,237	0,237
0,13 (w-p)	0,210	0,008	0,205	0,003	0,014	0,032	0,032
0,22 (pg-pg)	0,143	0,197	0,142	0,194	0,191	0,187	0,187
0,31 (spód mma)	0,011	0,022	0,013	0,025	0,024	0,022	0,022
Wskaźnik naprężeń stycznych							
$\tau_{w-p}/\tau_{ś-w}$	0,86	0,03	0,95	0,01	0,06	0,14	0,14
$\tau_{p-p}/\tau_{ś-w}$	0,59	0,74	0,66	0,82	0,81	0,79	0,79

Tablica 2.5. Zestawienie naprężeń stycznych w osi krawędzi obciążenia ($q=700$ kPa, $a=0,162$ m) na różnych głębokościach, konstrukcja KR6W8, $+10^{\circ}\text{C}$, **brak lub ograniczona szczepność w warstwie podbudowa-podbudowa**

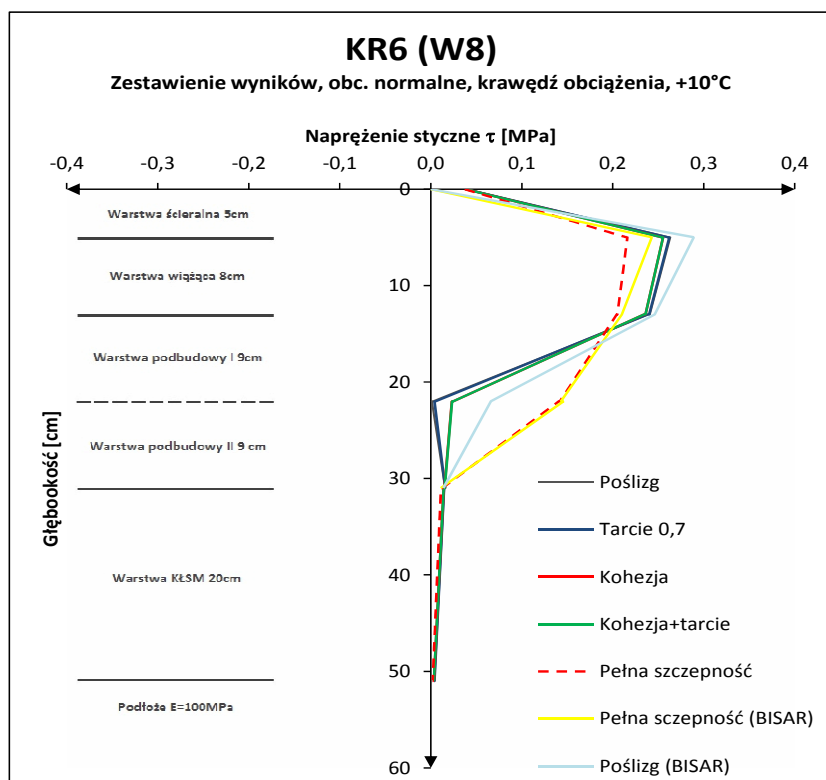
Głębokość [m] Lokalizacja	Naprężenia ścinające (τ) [MPa], w osi krawędzi obciążenia ($q=700$ kPa, $a=0,162$ m)						
	BISAR		ABAQUS				
	Pełna szczepność	Poślizg (brak szczepności)	Pełna szczepność	Poślizg (brak szczepności)	Tarcie, $\mu=0,7$ (ograniczona szczepność)	Kohezja (ograniczona szczepność)	Kohezja+tarcie (ograniczona szczepność)
0,00	0,000	0,000	0,037	0,038	0,038	0,038	0,038
0,05 (ś-w)	0,243	0,289	0,215	0,262	0,261	0,254	0,254
0,13 (w-p)	0,210	0,246	0,205	0,241	0,240	0,236	0,236
0,22 (pg-pg)	0,143	0,066	0,142	0,003	0,005	0,025	0,025
0,31 (spód mma)	0,011	0,014	0,013	0,016	0,016	0,015	0,015
Wskaźnik naprężeń stycznych							
$\tau_{w-p}/\tau_{ś-w}$	0,86	0,85	0,95	0,92	0,92	0,93	0,93
$\tau_{p-p}/\tau_{ś-w}$	0,59	0,23	0,66	0,01	0,02	0,10	0,10

Na podstawie wykonanych zestawień obliczonych naprężeń stycznych można stwierdzić, że:

- Maksymalne naprężenia styczne występują w najwyżej zlokalizowanym połączeniu, czyli w połączeniu warstw ścieralna-wiążąca.
- W przypadku analiz z pełną szczepnością międzywarstwową naprężenia styczne maleją wraz ze wzrostem zagłębienia lokalizacji połączenia międzywarstwowego.
- Obliczenia wykonane dla temperatury warstw asfaltowych $+10$ i $+20^{\circ}\text{C}$ wskazują na niewielki wpływ zmiany modułów sztywności warstw asfaltowych na wielkość naprężeń stycznych.
- Brak szczepności w połączeniu najniżej zlokalizowanym, czyli warstw podbudowa-podbudowa istotnie zmienia rozkład naprężeń w konstrukcji nawierzchni. Naprężenia styczne w połączeniu warstw ścieralna-wiążąca wzrasta o prawie 40% w stosunku do naprężeń przy pełnej szczepności.
- Maksymalna wartość naprężeń jaka występuje w analizowanych konstrukcjach w temperaturze $+10$ i $+20^{\circ}\text{C}$ niezależnie od konfiguracji modelowanej szczepności nie przekracza wartości 0,29 MPa.



Rys. 2.3. Naprężeń stycznych w konstrukcji nawierzchni KR6 w temperaturze +10°C przy uwzględnieniu braku lub ograniczenia szczepności międzywarstwowej w połączeniu warstw wiążąca-podbudowa



Rys. 2.4. Naprężeń stycznych w konstrukcji nawierzchni KR6 w temperaturze +10°C przy uwzględnieniu braku lub ograniczenia szczepności międzywarstwowej w połączeniu warstw podbudowa-podbudowa

3. SZCZEPNOŚĆ MIĘDZYWARSTWOWA WARSTW ASFALTOWYCH W POLSCE

3.1. Wprowadzenie

W Polsce w projektowaniu konstrukcji nawierzchni zakłada się, a podczas wykonawstwa konstrukcji nawierzchni oczekuje i wymaga się pełnego połączenia poszczególnych warstw, a w szczególności warstw asfaltowych. Zwyczajową praktyką dla osiągnięcia pełnego połączenia jest wykonanie skropienia międzywarstwowego, warstwy szczepnej z emulsji asfaltowej pomiędzy kolejnymi warstwami konstrukcji nawierzchni. Polskie specyfikacje techniczne od początku ich istnienia podają ilościowe zakresy skropienia międzywarstwowego w zależności od rodzaju stykających się warstw. Zalecane wartości skropienia wynikają z doświadczenia, obserwacji dobrego zachowania się nawierzchni, a nie są wynikiem analiz mechanicznych właściwości szczepności międzywarstwowej. W okresie ostatnich 10 lat istotnie zmieniły się przepisy techniczne dotyczące projektowania i produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych oraz materiałów stosowanych w technologiach asfaltowych. Pojawiły się problemy z uzyskaniem szczepności międzywarstwowej pomiędzy poszczególnymi warstwami asfaltowymi, a w specyfikacjach technicznych poza ilością skropienia brakuje kryteriów oceny samego połączenia międzywarstwowego. Podczas realizacji dużych kontraktów drogowych pojawiła się potrzeba wprowadzenia wymagań szczepności międzywarstwowej, których w Polsce brakuje.

Istnieją różne kryteria szczepności międzywarstwowej publikowane przez europejskie i światowe ośrodki naukowe, włącznie z kryterium IBDiM (patrz tab. 3.1). Jedynie Szwajcaria od 2008 r. ustanowiła minimalne wymaganie szczepności międzywarstwowej i wprowadziła je do norm szwajcarskich.

W 2011 r. po konsultacjach z Katedrą Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej, która realizowała prace badawcze nt. szczepności w latach 2005-2006, Departament Technologii GDDKiA podał kryteria szczepności międzywarstwowej i zalecił do stosowania na drogach krajowych do czasu zakończenia obecnej pracy badawczej. Rekomendowane tymczasowe kryteria szczepności międzywarstwowej, które dla połączeń warstw ścieralna-wiążąca, wiążąca-podbudowa, podbudowa-podbudowa wynoszą odpowiednio 1,0 MPa, 0,7 MPa i 0,7 MPa.

3.2. Przegląd wymagań szczepności międzywarstwowej

W tablicy 3.1 zestawiono wymagania szczepności międzywarstwowej stosowane na świecie. Można zaobserwować, że nie ma jednego wspólnego kryterium, ale jest obserwowalny trend wyższego wymagania dla połączenia warstw ścieralna-wiążąca w stosunku do połączenia warstw niżej leżących. Jest to zgodne z występującymi

poziomami naprężeniami stycznymi, w konstrukcji nawierzchni obciążonej kołem pojazdu ciężkiego. Wyższe naprężenia styczne występują na styku warstwy ścieralnej-wiążącej a niższe na styku warstw wiążącej-podbudowy i podbudowy górnej-podbudowy dolnej. Jednocześnie można zaobserwować, że w trakcie prowadzonych badań nad szczepnością ustabilizowało się kryterium szczepności blisko wartości 0,8-1 MPa dla warstw ścieralna-wiążąca i 0,5-0,8 MPa dla warstw niżej leżących tj. wiążąca-podbudowa, podbudowa górna-podbudowa dolna. Podane w tablicy 3.1 wymagania oparte o metodę Leutnera, dotyczą próbek o średnicy 150 mm, w temperaturze +20°C.

Tablica 3.1. Kryteria szczepności międzywarstwowej obowiązujące w różnych krajach jako normowe lub propozycje ośrodków badawczych, temperatura +20°C

Kraj	Siła	Naprężenie	Metoda	Autor, Rok
Austria		W-P 0,8 MPa	Pull-off	Fenz, 1987
Niemcy	Ś-W 14 kN W-P 10 kN P-P 13 kN	0,8 MPa 0,6 MPa 0,7 MPa	Leutner	Codjia, 1994
Austria		e.zw. 1,0 MPa e.m. 1,5 MPa	Pull-off	Krzemien&Tschengg, 1995
Austria	Ś-W 14 kN W-P 10 kN Ś-W 21 kN W-P 21 kN W-P 18 kN	0,8 MPa (e.zw.) 0,6 MPa (e.zw.) 1,2 MPa (e.m.) 1,2 MPa (e.m.) drogi podrzędne 1,0 MPa (e.m.)	Leutner	RVS11.065, blat 4, 1998
Szwajcaria	Ś-W 23 kN	1,3 MPa	Leutner	Partl, 1999
Niemcy	Ś-W 25 kN W-P 20 kN P-P 16 kN	1,4 MPa 1,1 MPa 0,9 MPa	Leutner	Stockert, 2002
Polska	23 kN	1,3 MPa	Leutner	Zawadzki, 2002
Niemcy	Ś-W 16 kN W-P 13 kN	0,9 MPa 0,7 MPa	Leutner	Bald, 2006
USA (wybrane stany)	18 kN 9 kN	Dobre >1,0 MPa Złe <0,5 MPa	Leutner ^{*)}	West, 2005
Szwajcaria	Ś-W 15 kN W-P 12 kN	0,85 MPa 0,68 MPa	Leutner ^{*)}	SN640430B, 2008
UK	Ś-W 18 kN W-P 9 kN	1,0 MPa 0,5 MPa	Leutner ^{*)}	Sutanto, 2009
Polska	Ś-W 18 kN W-P 13 kN CWŚ-W 16 kN	1,0 MPa 0,7 MPa 1,3 MPa	Leutner	PG,2011 (tymczasowe) GDDKiA, 2011 (tymczasowe) Katalog, 2012

Oznaczenia w tablicy 3.1:

Ś-W – pomiędzy warstwami ścieralną i wiążącą; W-P – pomiędzy warstwami wiążącą i podbudową;

P-P – pomiędzy warstwami podbudową i podbudową; e.zw. – emulsja zwykła; e.m. – emulsja modyfikowana;

*) – w tym przypadku aparat Leutnera posiada przerwę 5 mm pomiędzy szczękami ścinającymi w płaszczyźnie ścicia (patrz pkt.3.3); **kolor szary** oznacza właściwość (parametr) oryginalny podany przez autora kryterium

3.3. Szczepność międzywarstwowa w nowobudowanych (2012-2013) nawierzchniach w Polsce

3.3.1. Wprowadzenie

Analizę wyników badań szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych przeprowadzono na podstawie danych z monitoringu właściwości fizyko-mechanicznych warstw asfaltowych prowadzonego w latach 2012 (styczeń-grudzień) i 2013 (styczeń-sierpień) przez Laboratoria Drogowe oddziałów GDDKiA w ramach własnych badań kontrolnych podczas prowadzonych inwestycji. W tym opracowaniu analizie poddano 7043 wyników szczepności międzywarstwowej badanych na próbkach 150 mm, odwierconych z nawierzchni budowanych dróg autostradowych (A), ekspresowych (S) i głównych krajowych (DK) oraz towarzyszących dróg wojewódzkich (DW) i powiatowych (DP) na różnych etapach budowy. Próbkę do badań szczepności międzywarstwowej pochodziły z 74 odcinków nowobudowanych lub remontowanych dróg. Można powiedzieć, że w większości przypadków były to nawierzchnie nie oddane do ruchu.

W przypadku 512 prób z 7043 wyników szczepności dysponowano jednocześnie wynikami parametrów fizycznych badanych mieszanek mineralno-asfaltowych tj. wielkości uziarnienia, zawartości asfaltu, zawartości wolnych przestrzeni oraz wskaźnika zagęszczenia. Wykorzystano to w analizach poszukiwania korelacji pomiędzy szczepnością międzywarstwową i parametrami fizycznymi stykających się warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych.

Badania szczepności międzywarstwowej wykonywano w Laboratoriach Drogowych poszczególnych oddziałów GDDKiA w temperaturze +20°C, przy wykorzystaniu prasy Marshalla i aparatu Leutnera. Prędkość przemieszczania się tłoka prasy podczas ścinania wynosiła 50 mm/min. Podczas badania rejestrowano przemieszczenie ścinania oraz maksymalną siłę ścinającą i średnicę próbek na podstawie, której obliczano wytrzymałość na ścinanie połączeń międzywarstwowych.

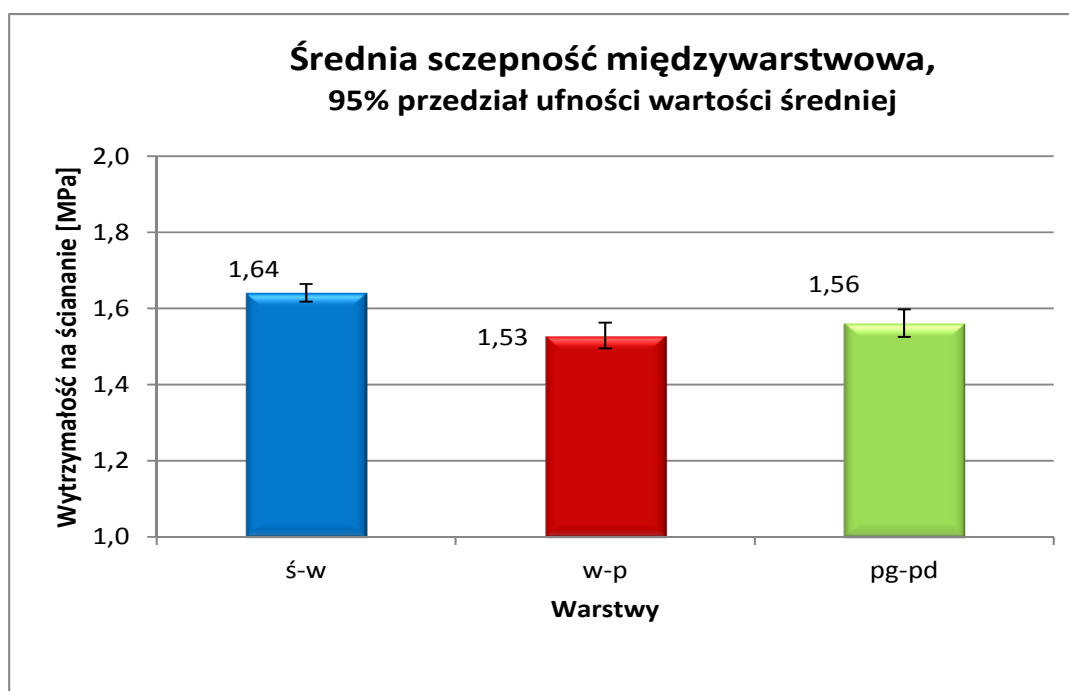
W analizach wyników szczepności międzywarstwowej przywoływane jest tymczasowe kryterium szczepności międzywarstwowej, które dla połączeń warstw ścieralna-wiążąca, wiążąca-podbudowa, podbudowa-podbudowa wynosi odpowiednio 1,0 MPa, 0,7 MPa i 0,7 MPa (patrz tab.3.1).

3.3.2. Wyniki i analiza szczepności międzywarstwowej – zestawienie ogólne

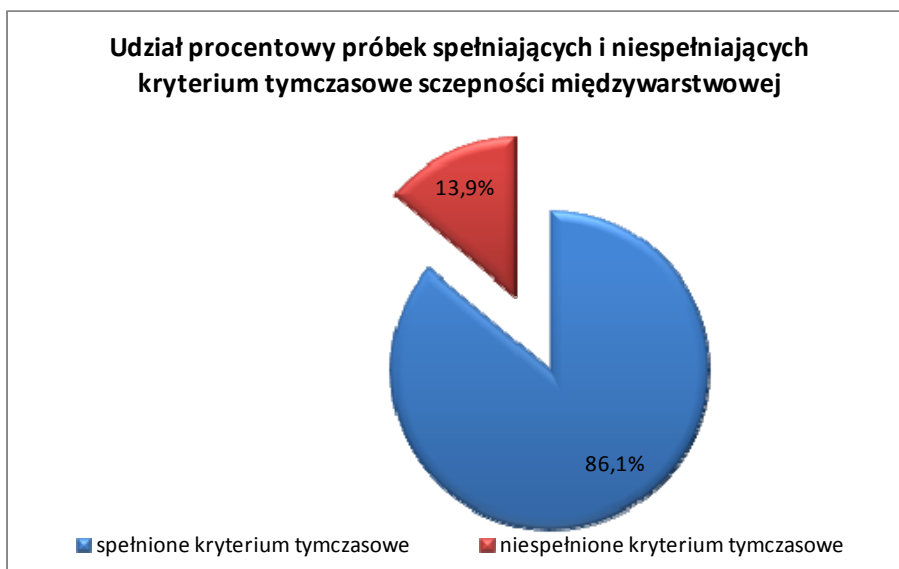
Zestawienie wszystkich wyników szczepności międzywarstwowej z podziałem na poszczególne połączenia warstw przedstawiono w tablicy 3.2.

Tablica 3.2. Zestawienie analizy wyników szczepności międzywarstwowej z badania Leutnera, w temperaturze +20°C

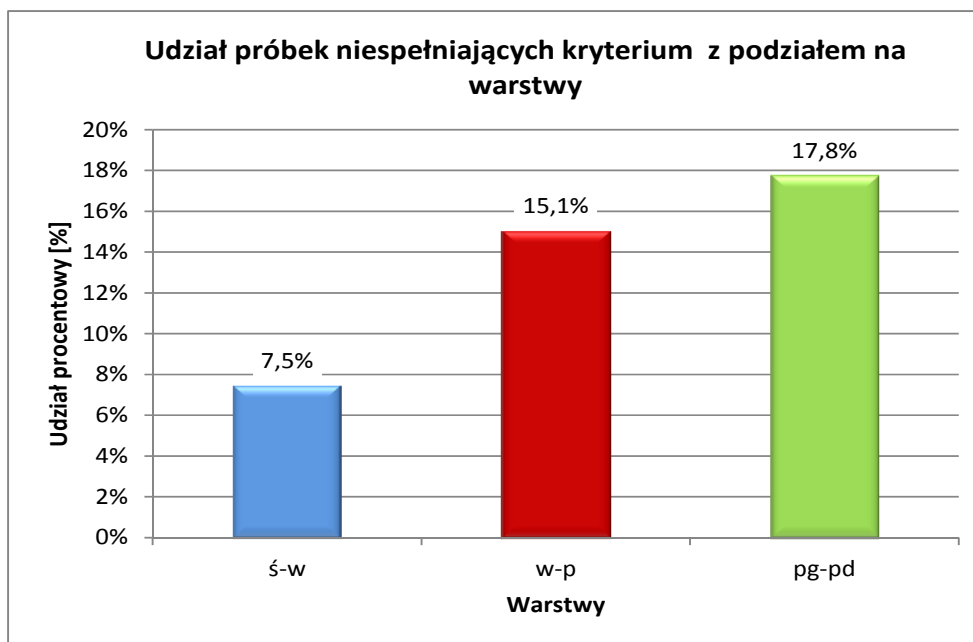
Lp.	Parametr statystyczny	Wyniki dla poszczególnych warstw połączeń międzywarstwowych		
		ścieralna-wiążąca (ś-w)	wiążąca-podbudowa (w-p)	podbudowa górna-podbudowa dolna (pg-pd)
1.	Liczba próbek	1966	2386	2490
2.	Średnia wytrzymałość na ścinanie [MPa]	1,64	1,53	1,56
3.	Błąd standardowy [MPa]	0,01	0,02	0,02
4.	Odchylenie standardowe [MPa]	0,52	0,82	0,91
5.	Wskaźnik zmienności	31%	54%	58%
6.	Percentyl 75 [MPa]	1,3	1,0	0,8
7.	Percentyl 80 [MPa]	1,2	0,8	0,7
8.	Percentyl 85 [MPa]	1,1	0,6	0,5
9.	Percentyl 90 [MPa]	1,0	0,4	0,3
10.	Percentyl 95 [MPa]	0,8	0,0	0,0
11.	Mediana [MPa]	1,7	1,5	1,6
12.	Wartość min. >0 [MPa]	0,2	0,1	0,1
13.	Wartość max. [MPa]	4,2	5,2	7,9
14.	Liczba próbek, gdzie stwierdzono brak szczepności (rozpad warstw podczas odwiertu)	21	173	165
15.	Liczba próbek, gdzie stwierdzono wartości mniejsze od kryterium tymczasowego	147	360	443



Rys. 3.1. Średnie wartości szczepności międzywarstwowej z podziałem na warstwy oraz 95% przedział ufności wartości średniej



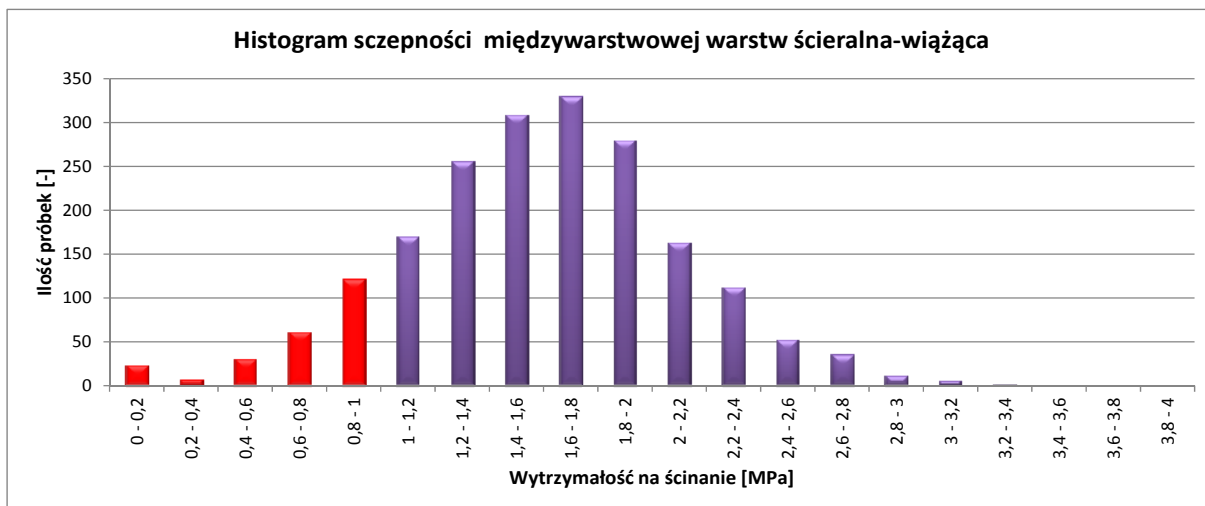
Rys. 3.2. Udział procentowy próbek spełniających i niespełniających kryterium tymczasowe szczepności międzywarstwowej



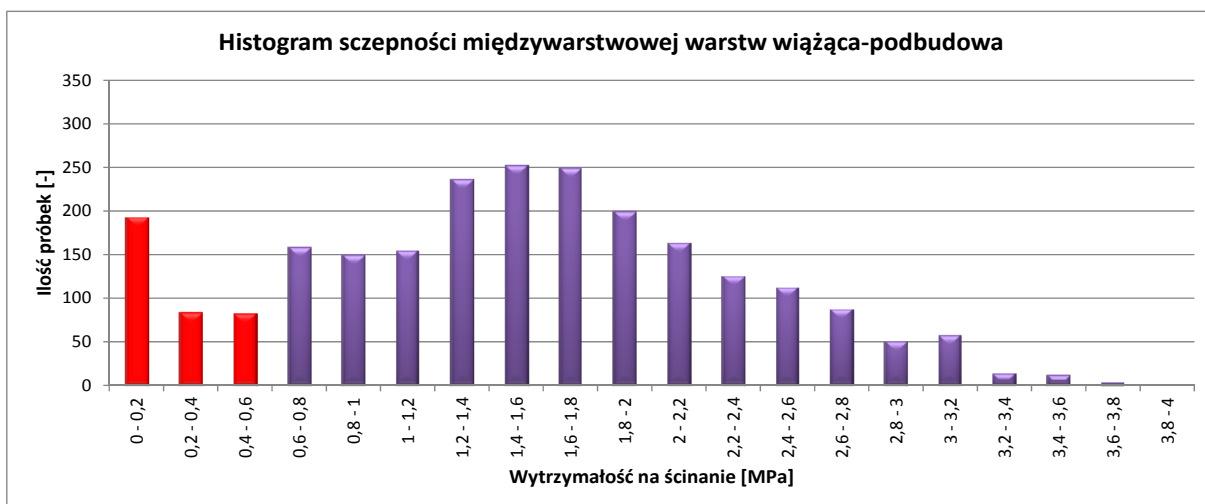
Rys. 3.3. Udział procentowy próbek spełniających i niespełniających kryterium tymczasowe szczepności międzywarstwowej z podziałem na warstwy

Zestawienie wyników monitoringu szczepności międzywarstwowej pokazuje, że mimo problemów z połączeniem międzywarstwowym podczas realizacji inwestycji można osiągnąć satysfakcjonujące wyniki, co widać po wysokich średnich wartościach wytrzymałości na ścinanie dla poszczególnych połączeń warstw: ścieralna-wiążąca - 1,6 MPa, wiążąca-podbudowa - 1,5 MPa i podbudowa górna-podbudowa dolna - 1,6 MPa. Można zaobserwować, że wskaźnik zmienności wyników szczepności jest mniejszy dla warstw ścieralna-wiążąca i wynosi 31% podczas, gdy dla warstw wiążąca-podbudowa i podbudowa górna-podbudowa dolna wynosi odpowiednio 54% i 58%. Wpływa to na ilość prób, które nie spełniają tymczasowego kryterium

szczepności dla warstw ś-w 147 prób z 1966, w-p 360 prób z 2386 i pg-pd 443 prób z 2490. W sumie nie spełniło kryterium 13,9% wszystkich badanych próbek. Najmniej próbek nie spełniło kryterium połączenie warstw ścieralna-wiążąca 7,5%, najwięcej nie spełnionych kryterium połączenia warstw podbudowa górna-podbudowa dolna 17,8%. W połączeniu wiążąca-podbudowa odnotowano 15,1% próbek nie spełniających kryterium. Spostrzeżenia te można zaobserwować na przedstawionych histogramach wartości szczepności międzywarstwowej.

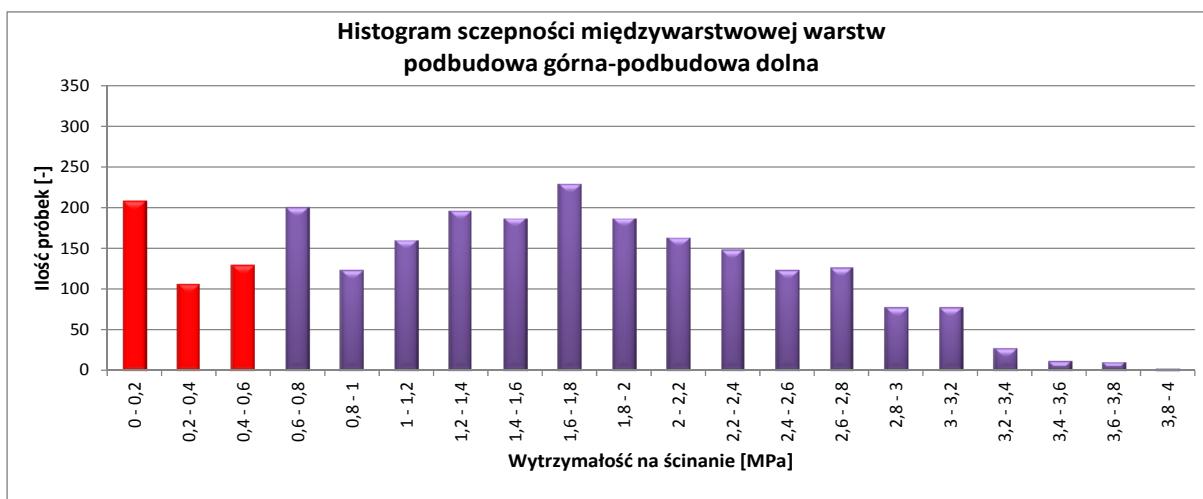


Rys. 3.4. Histogram szczepności międzywarstwowej warstw ścieralna-wiążąca



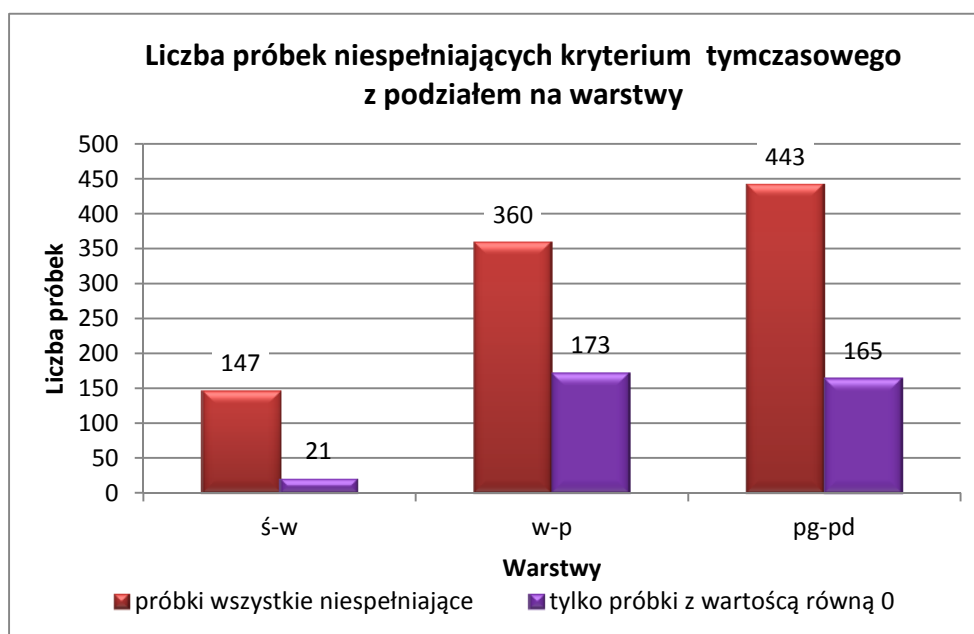
Rys. 3.5. Histogram szczepności międzywarstwowej warstw wiążąca-podbudowa

Można zaobserwować na rys. 3.4, że sporadycznym problemem jest całkowity brak szczepności warstw ścieralna-wiążąca lub jej zaniżona wartość. Natomiast istotną ilość prób z brakiem lub zaniżoną szczepnością międzywarstwową widać w połączeniach warstw wiążąca-podbudowa (rys.3.5), jak i w połączeniu warstw podbudowa górna-podbudowa dolna (rys. 3.6). Można też zaobserwować dużą zmienność wyników wytrzymałości na ścinanie w przypadku niżej leżących w konstrukcji warstw wiążąca-podbudowa i podbudowa górna-podbudowa dolna, odpowiednio 54% i 58% w porównaniu do warstw wyżej leżących tj. ścieralna-wiążąca, gdzie wskaźnik zmienności równy jest 31%.



Rys. 3.6. Histogram szczepności międzywarstwowej warstw podbudowa górna-podbudowa dolna

Na rys. 3.7 przedstawiono proporcje liczby próbek nie spełniających kryteriów, czyli dla warstw ś-w wytrzymałości na ścinanie mniejsze od 1 MPa, a w przypadku warstw w-p i p-p mniejsze od 0,7 MPa oraz liczby próbek, w których stwierdzono brak szczepności międzywarstwowej – wytrzymałość na ścinanie równa 0 MPa. Wartość 0 oznacza, że próbki po lub w czasie pobierania rozpadły się. Widać, że problem całkowitego braku szczepności, gdzie wytrzymałość na ścinanie jest zerowa, jest marginalny w połączeniu warstwa ścieralna-wiążąca, czego nie można już powiedzieć o połączeniach warstw wiążąca-podbudowa i podbudowa górna-podbudowa dolna.



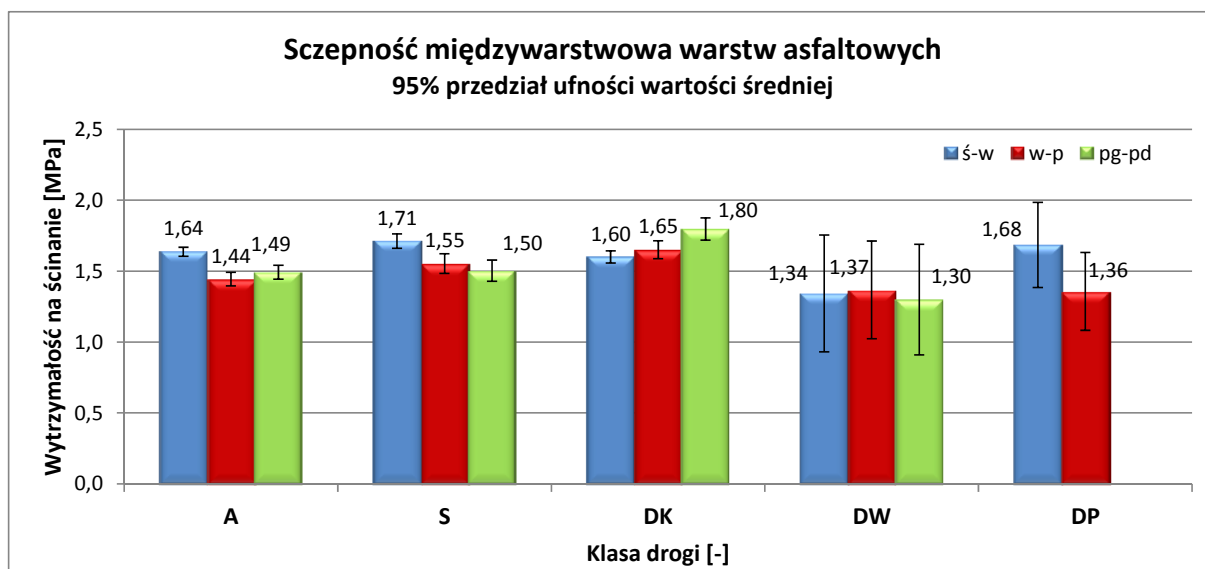
Rys. 3.7. Liczba próbek niespełniających kryterium tymczasowego z podziałem na warstwy

Przyczyny braku i zaniżonej szczepności międzywarstwowej w badanych próbkach zostaną przeanalizowane w dalszym punkcie 3.3.

3.3.3. Analiza szczepności międzywarstwowej z uwzględnieniem klasy drogi

Zestawienie wyników szczepności międzywarstwowej z podziałem na poszczególne połączenia warstw oraz z podziałem na klasy techniczne dróg przedstawiono w tablicach 3.3, 3.4 i 3.5.

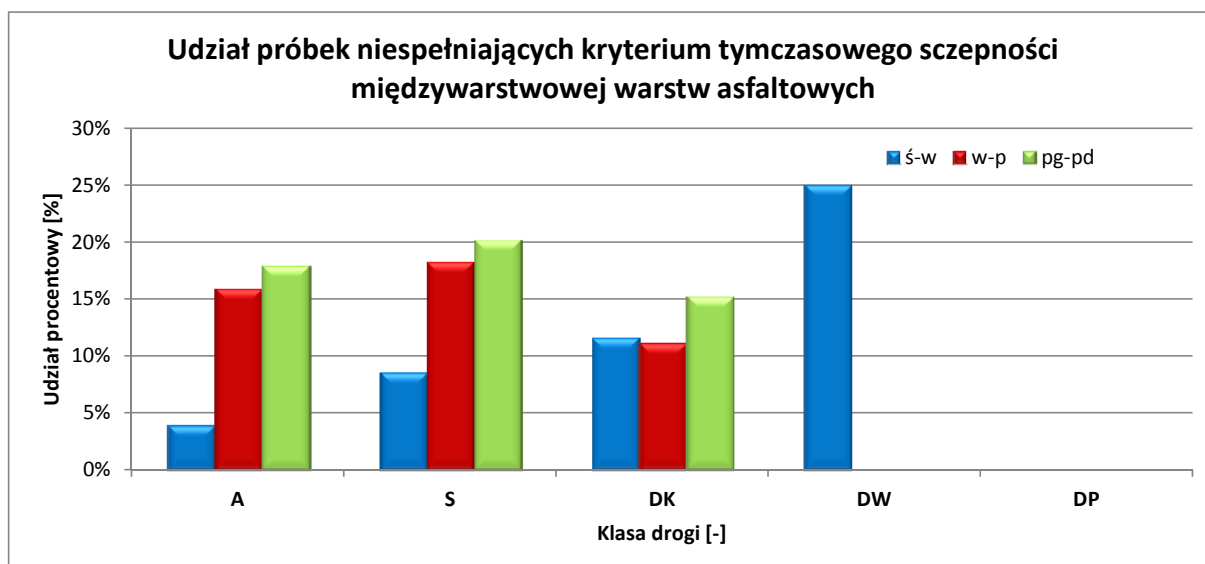
Analiza wyników szczepności międzywarstwowej, uwzględniając podział administracyjny dróg i z nim związane klasy dróg pozwala stwierdzić (patrz rys.3.8), że wyższe wyniki szczepności uzyskano na drogach krajowych (A, S i DK) w zestawieniu z drogami wojewódzkimi i powiatowymi (DW i DP). Przypomnieć należy, że drogi DW i DP wchodziły w zakres inwestycji realizowanych na sieci dróg krajowych (A, S i DK) i dla nich nie ma tak dużej próby.



Rys. 3.8. Zestawienie średnich wyników szczepności międzywarstwowej poszczególnych połączeń międzywarstwowych z podziałem na klasy drogi

Z rys. 3.9 można zauważyć trend zwiększenia się udziału próbek niespełniających tymczasowe kryterium szczepności warstw ścieralna-wiążąca wraz ze zmianą na niższą klasę techniczną drogi. Jednak wynik udziału próbek niespełniających kryterium na drogach DW jest obarczony błędem małej próby (patrz tab. 3.3). W tym przypadku dysponowano wynikami z 8 próbek, z czego 2 próbki nie spełniały kryterium, co dało wynik udziału próbek niespełniających kryterium równy 25%.

Dodać można, że co jest interesujące, na autostradach (A) i drogach ekspresowych (S) zanotowano więcej procentowo przypadków zaniżonej szczepności niż na drogach krajowych (DK) (patrz rys. 3.9).



Rys. 3.9. Udział próbek nie spełniających kryterium tymczasowego szczepności międzywarstwowej poszczególnych połączeń międzywarstwowych z podziałem na klasy drogi

Tablica 3.3. Zestawienie analizy wyników szczepności międzywarstwowej warstw ścieralna-wiążąca z badania Leutnera, w temperaturze +20°C z uwzględnieniem poszczególnych klas technicznych dróg

Lp.	Parametr statystyczny	Wyniki połączeń międzywarstwowych warstw ścieralna-wiążąca dla poszczególnych klas technicznych dróg				
		A	S	DK	DW	DP
1.	Liczba próbek	840	432	672	8	13
2.	Średnia wytrzymałość na ścinanie [MPa]	1,64	1,71	1,60	1,34	1,68
3.	Błąd standardowy [MPa]	0,02	0,03	0,02	0,21	0,15
4.	Odchylenie standardowe [MPa]	0,47	0,52	0,56	0,58	0,54
5.	Wskaźnik zmienności	29%	31%	35%	43%	32%
6.	Percentyl 75 [MPa]	1,3	1,4	1,3	1,1	1,2
7.	Percentyl 80 [MPa]	1,2	1,3	1,2	0,9	1,2
8.	Percentyl 85 [MPa]	1,2	1,2	1,1	0,6	1,2
9.	Percentyl 90 [MPa]	1,1	1,0	0,9	0,5	1,1
10.	Percentyl 95 [MPa]	1,0	0,8	0,7	0,4	1,1
11.	Mediana [MPa]	1,6	1,8	1,6	1,5	1,6
12.	Wartość min. >0 [MPa]	0,5	0,5	0,2	0,4	1,0
13.	Wartość max. [MPa]	3,3	4,2	3,2	2,0	2,6
14.	Liczba próbek, gdzie stwierdzono brak szczepności (rozpad warstw podczas odwiertu)	5	4	12	0	0
15.	Liczba próbek, gdzie stwierdzono wartości mniejsze od kryterium tymczasowego	33	37	78	2	0

Tablica 3.4. Zestawienie analizy wyników szczepności międzywarstwowej warstw wiążąca-podbudowa z badania Leutnera, w temperaturze +20°C z uwzględnieniem poszczególnych klas technicznych dróg

Lp.	Parametr statystyczny	Wyniki połączeń międzywarstwowych warstw wiążąca-podbudowa dla poszczególnych klas technicznych dróg				
		A	S	DK	DW	DP
1.	Liczba próbek	1093	640	628	11	14
2.	Średnia wytrzymałość na ścinanie [MPa]	1,44	1,55	1,65	1,37	1,36
3.	Błąd standardowy [MPa]	0,02	0,03	0,03	0,17	0,14
4.	Odchylenie standardowe [MPa]	0,80	0,88	0,80	0,57	0,51
5.	Wskaźnik zmienności	55%	57%	49%	42%	38%
6.	Percentyl 75 [MPa]	0,9	0,9	1,1	1,1	1,1
7.	Percentyl 80 [MPa]	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0
8.	Percentyl 85 [MPa]	0,6	0,5	0,8	0,9	0,8
9.	Percentyl 90 [MPa]	0,3	0,1	0,6	2,4	0,7
10.	Percentyl 95 [MPa]	0,0	0,0	0,2	0,7	0,7
11.	Mediana [MPa]	1,5	1,7	1,6	1,2	1,2
12.	Wartość min. >0 [MPa]	0,1	0,1	0,2	0,7	0,7
13.	Wartość max. [MPa]	5,2	3,7	3,6	2,4	2,4
14.	Liczba próbek, gdzie stwierdzono brak szczepności (rozpad warstw)	82	63	30	0	0
15.	Liczba próbek, gdzie stwierdzono wartości mniejsze od kryterium tymczasowego	174	117	70	0	0

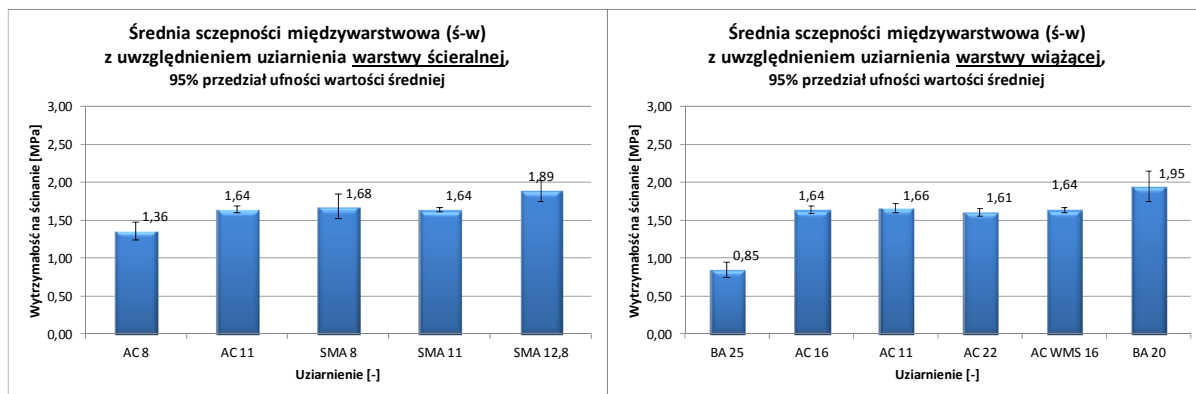
Tablica 3.5. Zestawienie analizy wyników szczepności międzywarstwowej warstw podbudowa górna-podbudowa dolna z badania Leutnera, w temperaturze +20°C z uwzględnieniem poszczególnych klas technicznych dróg

Lp.	Parametr statystyczny	Wyniki połączeń międzywarstwowych warstw podbudowa górna-podbudowa dolna dla poszczególnych klas technicznych dróg			
		A	S	DK	DW
1.	Liczba próbek	1372	559	551	8
2.	Średnia wytrzymałość na ścinanie [MPa]	1,49	1,50	1,80	1,30
3.	Błąd standardowy [MPa]	0,02	0,04	0,04	0,19
4.	Odchylenie standardowe [MPa]	0,90	0,88	0,92	0,55
5.	Wskaźnik zmienności	60%	59%	51%	42%
6.	Percentyl 75 [MPa]	0,8	0,8	1,1	0,9
7.	Percentyl 80 [MPa]	0,7	0,6	0,9	0,82
8.	Percentyl 85 [MPa]	0,5	0,5	0,6	0,7
9.	Percentyl 90 [MPa]	0,3	0,3	0,5	0,7
10.	Percentyl 95 [MPa]	0,0	0,0	0,3	0,7
11.	Mediana [MPa]	1,5	1,5	1,8	1,2
12.	Wartość min. >0 [MPa]	0,1	0,1	0,2	0,7
13.	Wartość max. [MPa]	7,9	3,8	3,8	2,2
14.	Liczba próbek, gdzie stwierdzono brak szczepności (rozpad warstw)	98	44	23	0
15.	Liczba próbek, gdzie stwierdzono wartości mniejsze od kryterium tymcz.	246	113	84	0

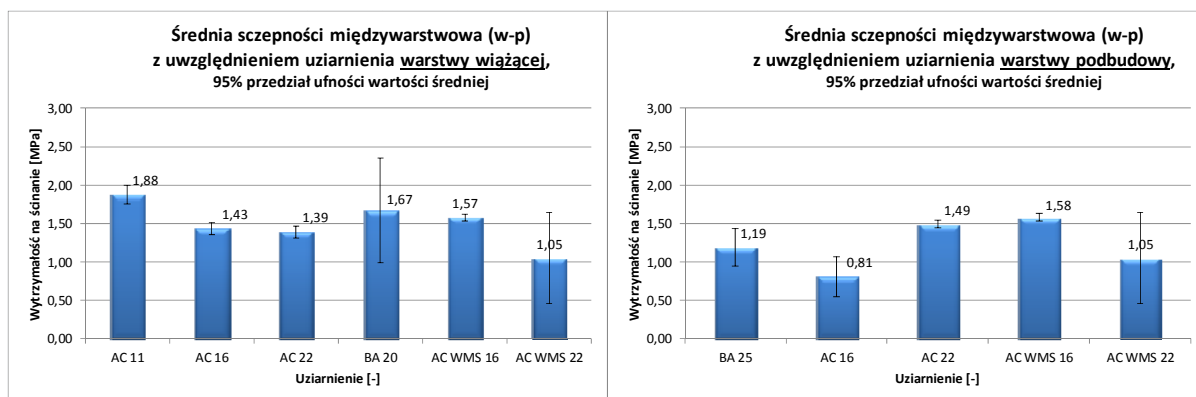
3.3.4. Analiza wpływu wybranych parametrów mieszank mineralno-asfaltowych na szczepność międzywarstwową

3.3.4.1. Wpływ uziarnienia mieszank mineralno-asfaltowych

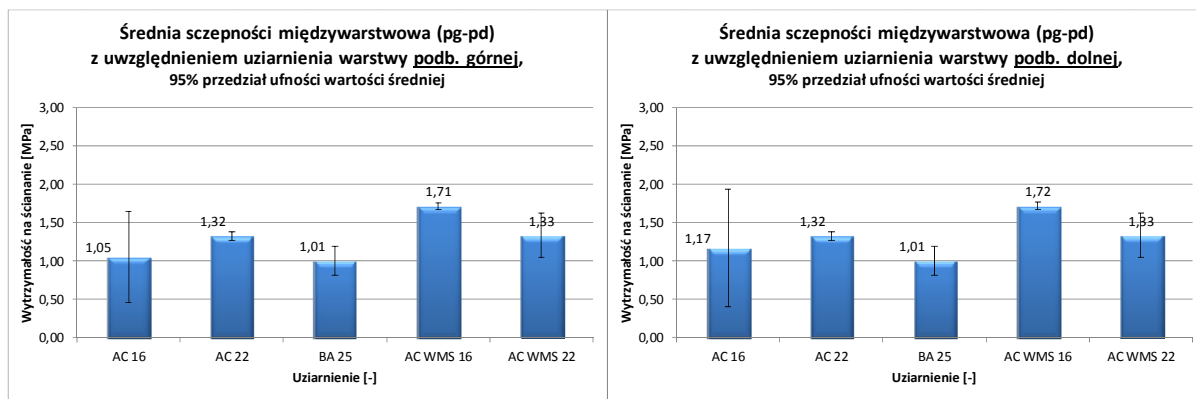
Na rysunkach 3.10, 3.11 i 3.12 przedstawiono średnie wytrzymałości na ścinanie połączeń międzywarstwowych z uwzględnieniem uziarnienia poszczególnych warstw.



Rys. 3.10. Zestawienie średnich wytrzymałości na ścinanie warstw ścieralna-wiążąca z uwzględnieniem uziarnienia warstwy ścieralnej i wiążącej

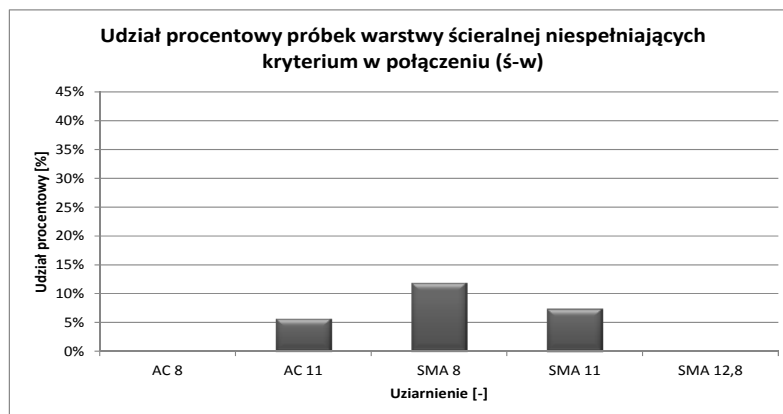


Rys. 3.11. Zestawienie średnich wytrzymałości na ścinanie warstw wiążąca-podbudowa z uwzględnieniem uziarnienia warstwy wiążącej i podbudowy

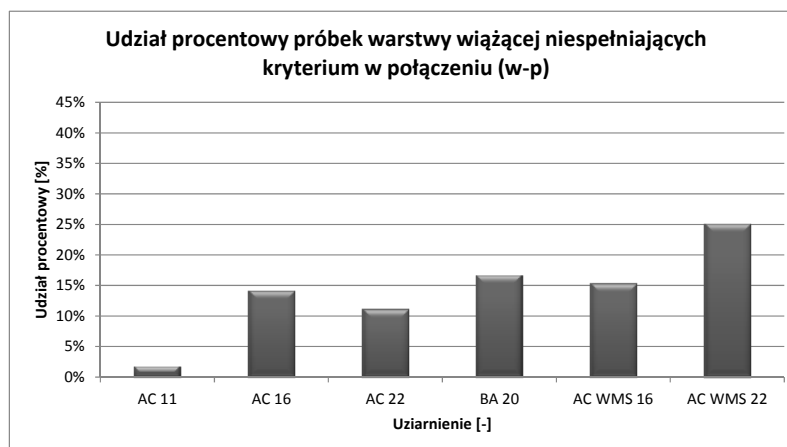


Rys. 3.12. Zestawienie średnich wytrzymałości na ścinanie warstw podbudowa górna-podbudowa dolna z uwzględnieniem uziarnienia warstwy podbudowy

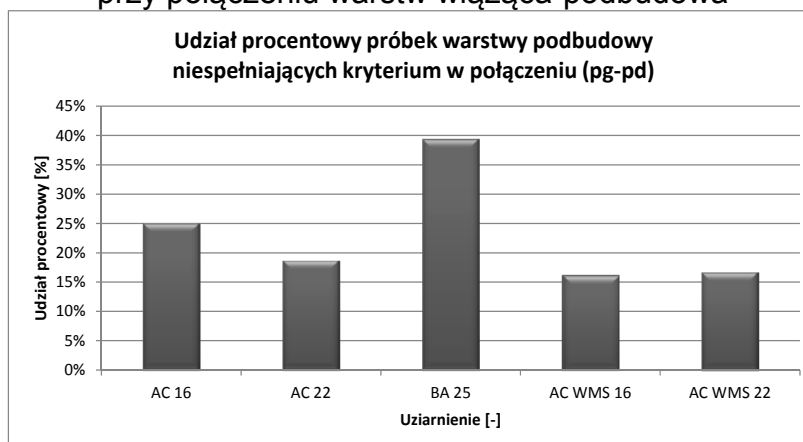
Na rys.3.13, 3.14 i 3.15 zestawiono udziały procentowe warstw górnych, w połączeniach międzywarstwowych ś-w, w-p i pg-pd, niespełniające kryteria szczepności. Przedstawiono rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych w warstwie górnej połączenia, dla których jest największy udział procentowy nie spełnionego kryterium szczepności. Z rys. 3.13 wynika, że połączenie ś-w z warstwą ścieralną z SMA8 w około 12% prób nie spełnia kryterium, ale już połączenie z SMA 12,8 nie ma takich przypadków.



Rys. 3.13. Udział próbek warstwy ścieralnej niespełniających kryterium tymczasowego przy połączeniu warstw ścieralna-wiążąca



Rys. 3.14. Udział próbek warstwy wiążącej niespełniających kryterium tymczasowego przy połączeniu warstw wiążąca-podbudowa



Rys. 3.15. Udział próbek warstwy podbudowy niespełniających kryterium tymczasowego przy połączeniu warstw podbudowa-podbudowa

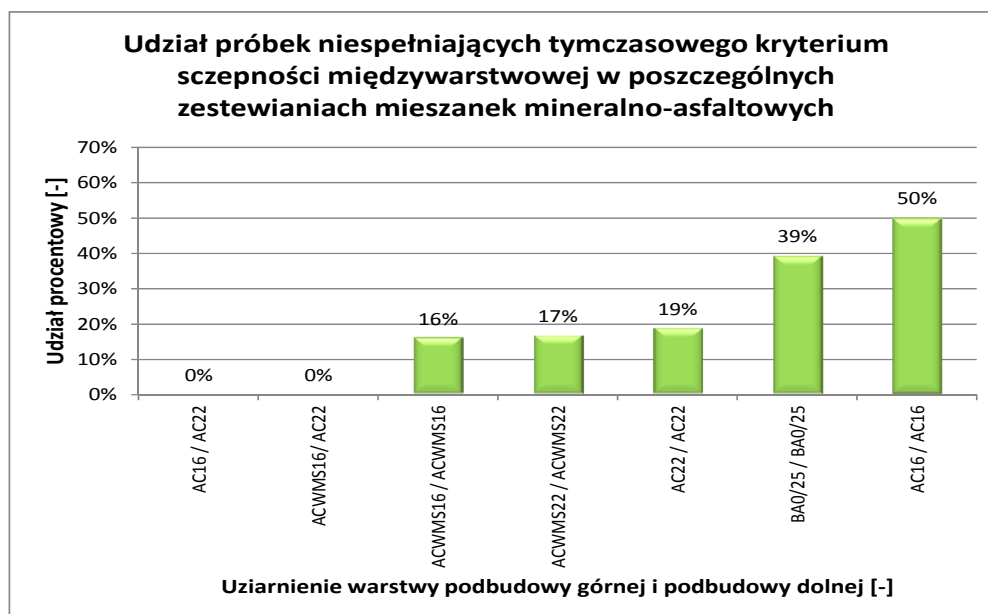
Z rysunków tych można zaobserwować pewną prawidłowość występowania zaniżonych szczepności lub całkowitego braku tzn. w połączeniu warstw ścieralna-wiążąca lepiej wypadają grubiej uziarnione warstwy ścieralne, natomiast w połączeniu warstw niżej leżących mieszanki gruboziarniste wypadają gorzej. W połączeniu warstw ścieralna-wiążąca z najczęściej stosowanych warstw SMA słabiej wypada warstwa drobniejsza, czyli SMA 8 w zestawieniu z SMA 11 i SMA 12,8. W połączeniu warstw wiążąca-podbudowa najslabiej wypada warstwa wiążąca AC WMS 22 i BA20, natomiast w połączeniu warstw podbudowy BA25.

Na rys. 3.16, 3.17 i 3.18 przedstawiono udział procentowy pary uziarnienia warstw stykających w połączeniu międzywarstwowym niespełniających kryterium szczepności międzywarstwowej. Na osi X podano pary mieszanek mineralno-asfaltowych stykających się w połączeniu międzywarstwowym. Można zauważyć wyraźną tendencję braku szczepności międzywarstwowej w przypadku takiego samego uziarnienia mieszanek stykających się w połączeniu warstw wiążąca-podbudowa (rys. 3.16) i podbudowa –górna-podbudowa dolna (rys. 3.17). **Różnica w uziarnieniu warstw stykających się tzn. drobniejszej warstwy górnej, a grubszej warstwy dolnej powoduje zmniejszenie udziału próbek niespełniających kryterium szczepności.** Wynika to z lepszego klinowania się gorącej drobniejszej mieszanki w grubszej zimnej warstwie dolnej.

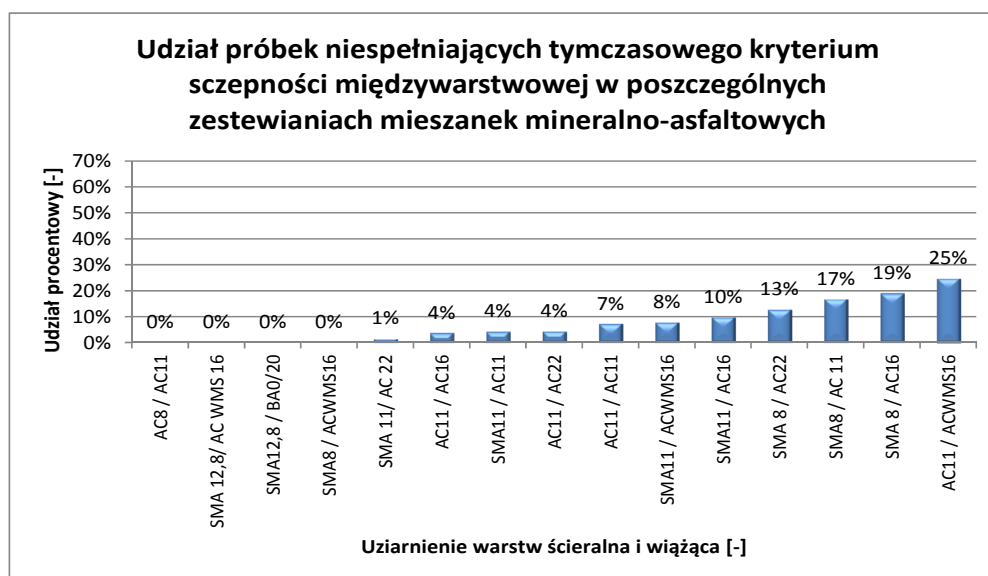
W połączeniu warstw ścieralna-wiążąca nie ma już takiego trendu, jak w przypadku warstw niżej leżących (wiążąca-podbudowa, podbudowa-podbudowa), gdyż zawsze występuje w tym przypadku różnica w uziarnieniu warstwy ścieralnej i wiążącej. **Zaobserwować można za to prawidłowość lepszych szczepności w przypadku grubiej uziarnionych warstw ścieralnych, takich jak SMA12,8, SMA11 w stosunku do SMA8.**



Rys. 3.16. Udział próbek niespełniających kryterium tymczasowego w poszczególnych zestawieniach mieszanek mineralno-asfaltowych przy połączeniu warstw wiążąca-podbudowa



Rys. 3.17. Udział próbek niespełniających kryterium tymczasowego w poszczególnych zestawieniach mieszanek mineralno-asfaltowych przy połączeniu warstw podbudowa górna-podbudowa dolna

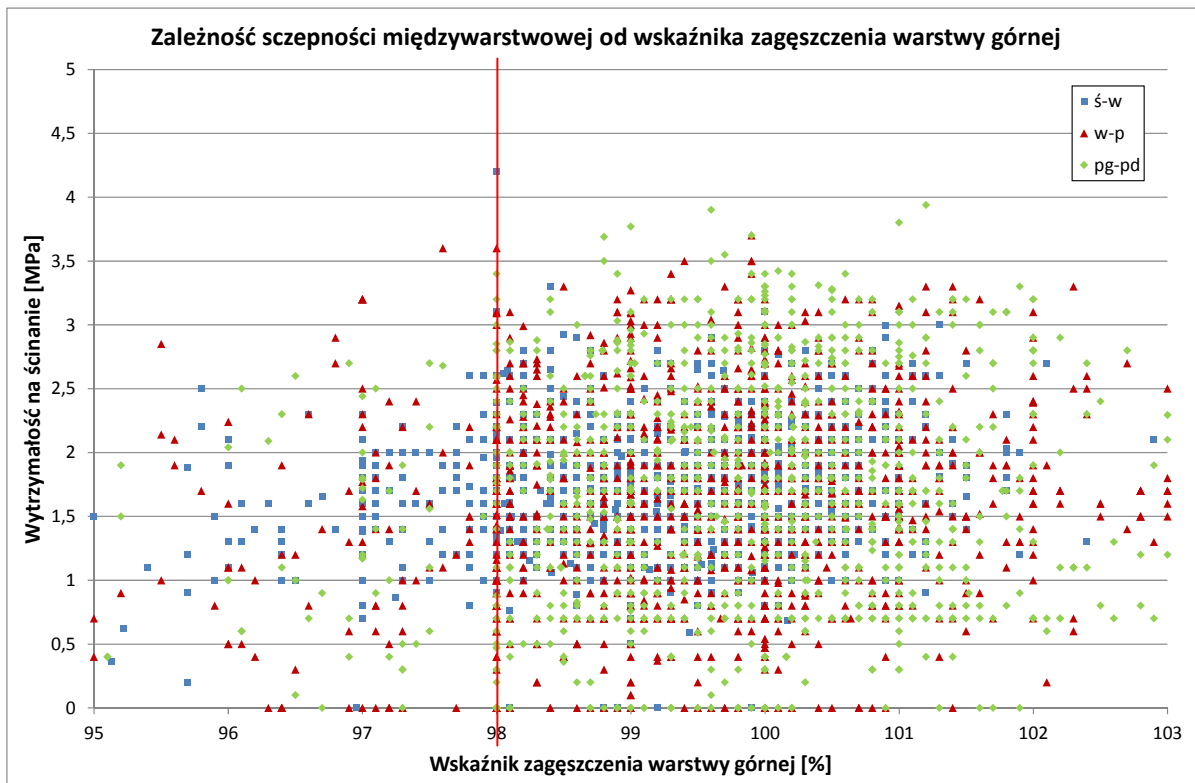


Rys. 3.18. Udział próbek niespełniających kryterium tymczasowego w poszczególnych zestawieniach mieszanek mineralno-asfaltowych przy połączeniu warstw ścieralna-wiążąca

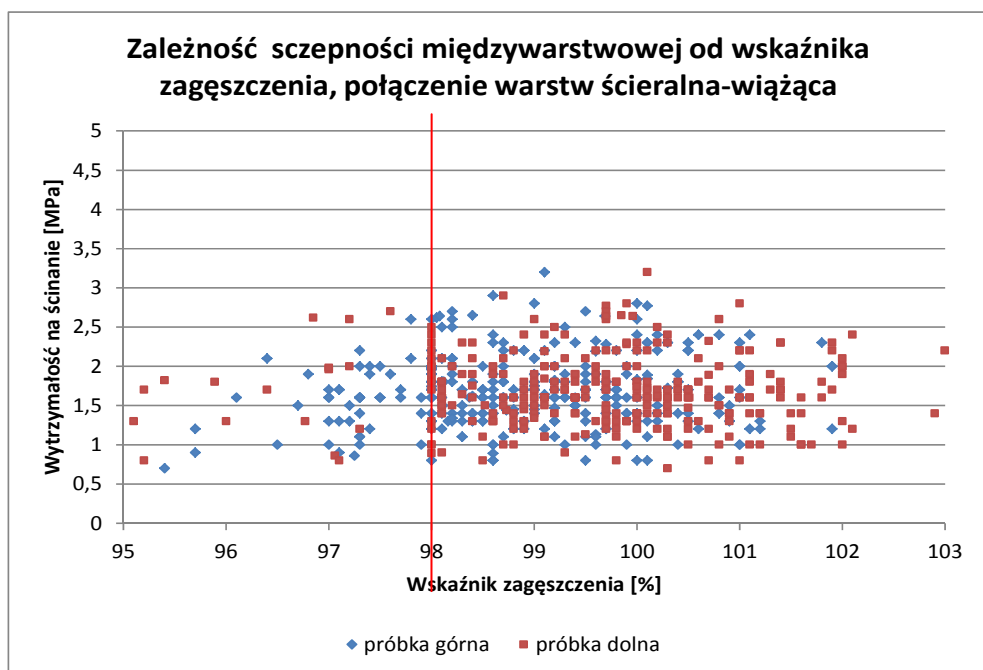
Podsumowując można stwierdzić, że jest wpływ uziarnienia mieszanek mineralno-asfaltowych na szczepność międzywarstwową. **W przypadku połączeń warstw niżej leżących tj. wiążąca-podbudowa, podbudowa-podbudowa należy bezwzględnie dążyć do różnicowania uziarnienia warstw stykających się oraz ograniczania stosowania warstw z kruszywem najgrubszym.** Natomiast w przypadku połączeń warstw ścieralna-wiążąca problem braku szczepności jest marginalny, lecz zaobserwowano, że grubiej uziarnione SMA wykazuje mniejszy udział w braku połączenia międzywarstwowego.

3.3.4.2. Wpływ wskaźnika zagęszczenia warstw asfaltowych

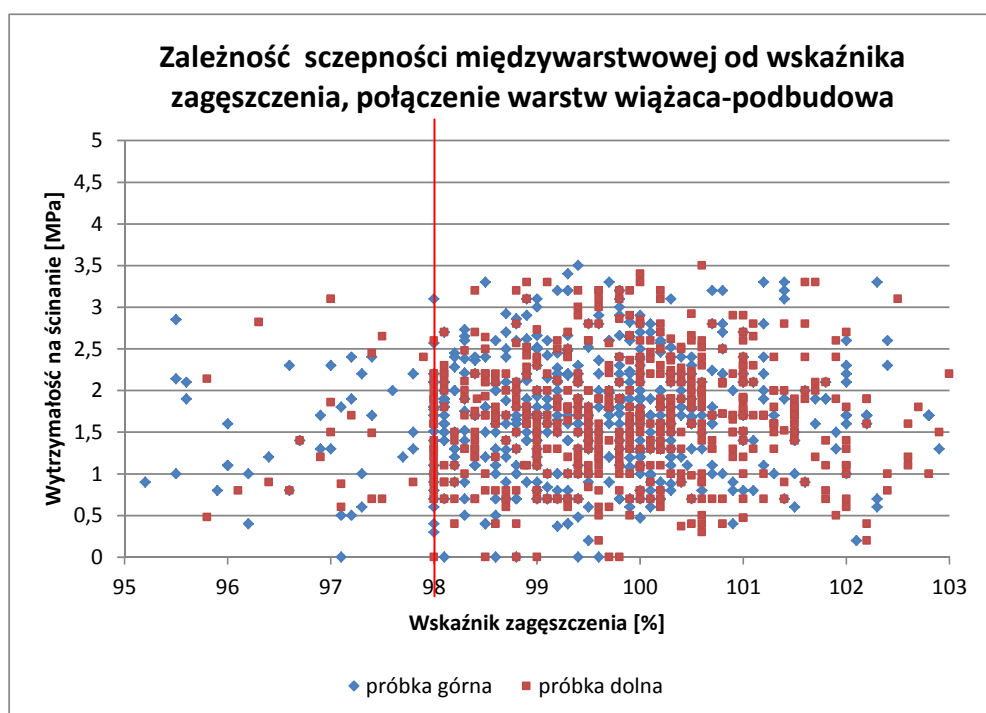
Na rysunku 3.19 zestawiono wytrzymałość na ścinanie w zależności od wskaźnika zagęszczenia górnej warstwy dla wszystkich połączeń międzywarstwowych razem. Natomiast na rysunkach 3.20, 3.21 i 3.22 pokazano wpływ wskaźnika zagęszczenia górnej i dolnej warstwy oddzielnie dla każdego połączenia międzywarstwowego. Z rysunków tych nie widać żadnej zależności pomiędzy tymi wielkościami. Wysokie wartości szczepności międzywarstwowej połączenia osiągają zarówno przy niskim, jak i wysokim wskaźniku zagęszczenia poszczególnych warstw. Na rys. 3.19, 3.20, 3.21 i 3.22 podano linię wskaźnika zagęszczenia 98%, jako wymóg zagęszczenia warstw asfaltowych.



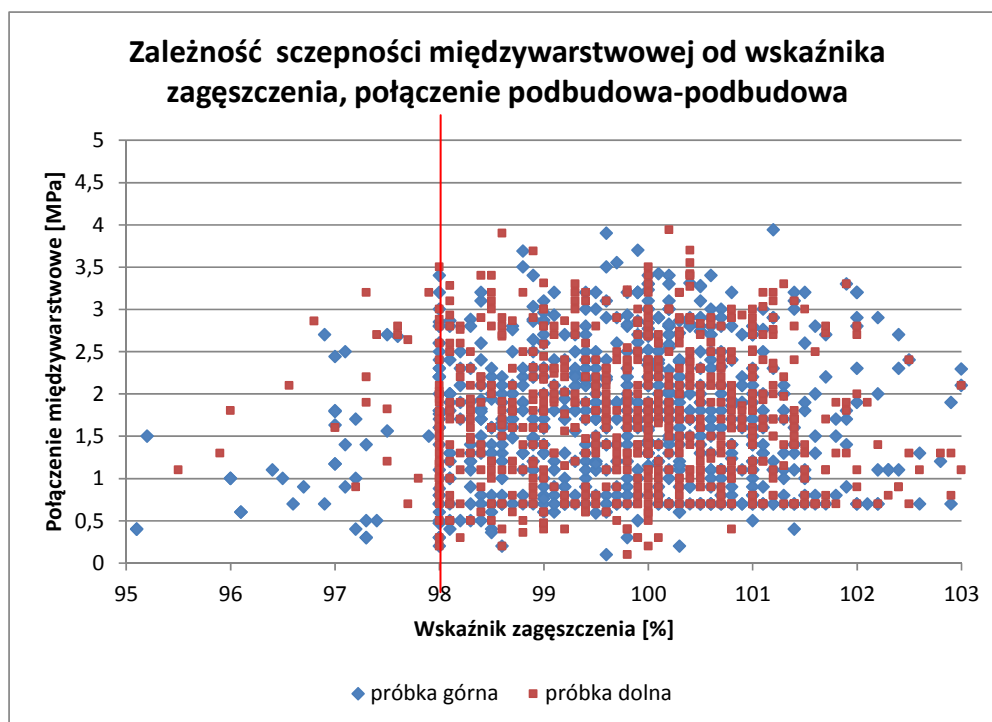
Rys. 3.19. Zestawienie szczepności międzywarstwowej wszystkich połączeń w zależności od wskaźnika zagęszczenia górnej warstwy



Rys. 3.20. Zestawienie szczepności międzywarstwowej połączenia ścieralna-wiążąca w zależności od wskaźnika zagęszczenia stykających się warstw



Rys. 3.21. Zestawienie szczepności międzywarstwowej połączenia wiążąca-podbudowa w zależności od wskaźnika zagęszczenia stykających się warstw



Rys. 3.22. Zestawienie szczepności międzywarstwowej połączenia podbudowa-podbudowa w zależności od wskaźnika zagęszczenia stykających się warstw

Z rysunków od 3.19 do 3.20 można zaobserwować dużą zmienność wyników wytrzymałości na ścinanie, jak i wskaźnika zagęszczenia poszczególnych warstw. Dlatego, też na rysunkach 3.23, 3.24 i 3.25 zestawiono jeszcze raz zależności miarodajnych wytrzymałości na ścinanie od wskaźnika zagęszczenia górnej warstwy w połączeniu międzywarstwowym. Miarodajne wytrzymałości ścinanie w zależności od przyjętego poziomu istotności $P=68\%$ lub $P=95\%$ obliczano dla każdego odpowiadającego przedziału wskaźnika zagęszczenia wg równania (3.1).

$$\tau_m = \tau_{sr} - \alpha * \sigma \quad (3.1)$$

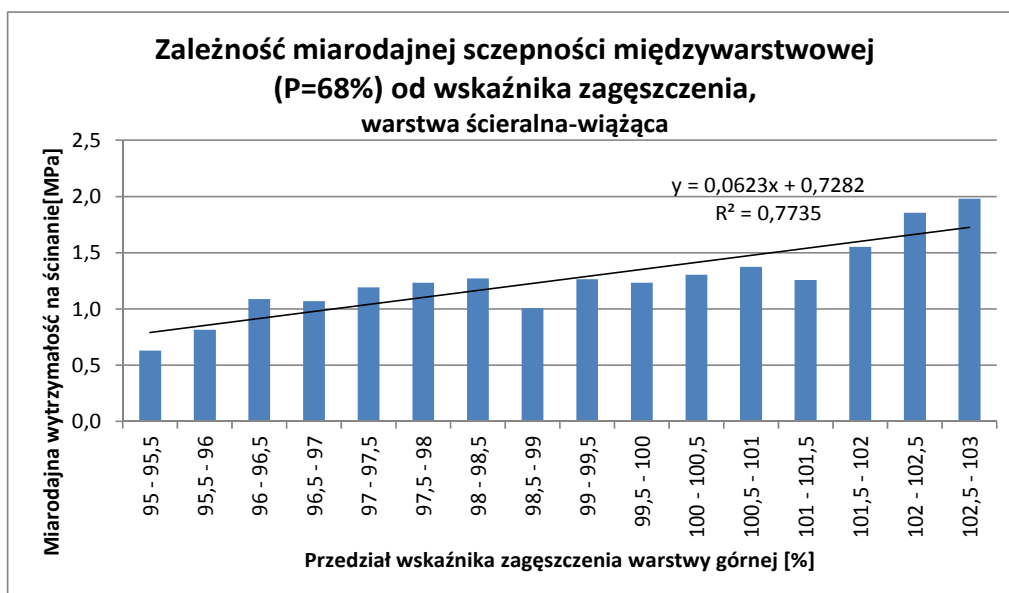
gdzie:

τ_m – wytrzymałość na ścinanie miarodajna [MPa],

τ – wytrzymałość na ścinanie [MPa],

σ – odchylenie standardowe wytrzymałości na ścinanie [MPa],

α – współczynnik zależny od poziomu istotności P , $\alpha=1$ przy $P=68\%$, $\alpha=2$ przy $P=95\%$



Rys. 3.23. Zestawienie miarodajnej szczepności międzywarstwowej połączenia ścieralna-wiążąca w zależności od wskaźnika górnej warstwy

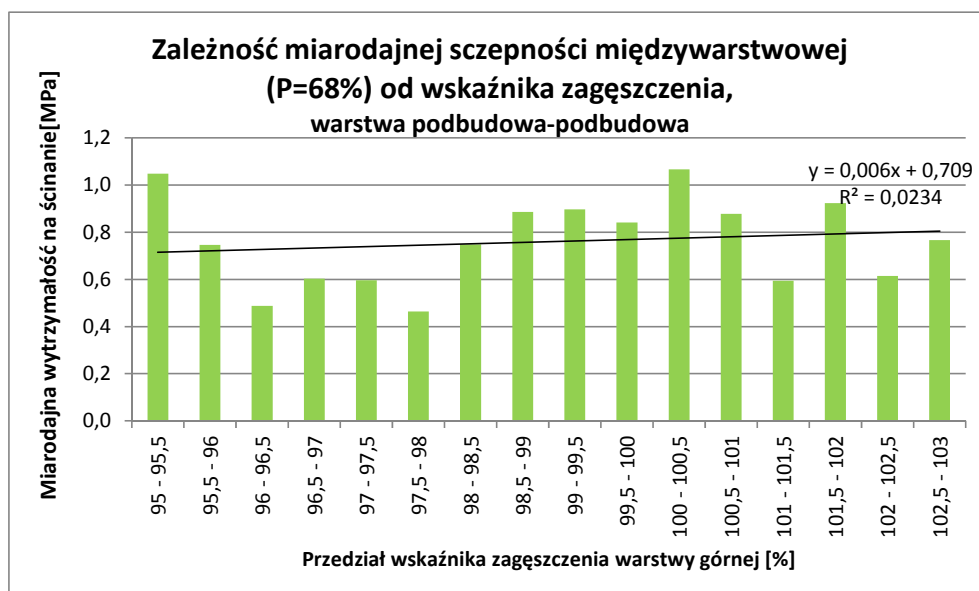


Rys. 3.24. Zestawienie miarodajnej szczepności międzywarstwowej połączenia wiążąca-podbudowa w zależności od wskaźnika górnej warstwy

Jak można zaobserwować z rys. 3.23, 3.24 i 3.25 istnieje dość mocna zależność pomiędzy miarodajną szczepnością międzywarstwową a wskaźnikiem zagęszczenia górnej warstwy z połączenia warstw ścieralna-wiążąca i połączenia wiążąca-podbudowa. Można wnioskować, że lepsze zagęszczenie warstwy ścieralnej skutkuje lepszym klinowaniem się mieszanki warstwy ścieralnej w warstwie wiążącej. Podobnie skutkuje lepsze zagęszczenie warstwy wiążącej.

Nie można jednak stwierdzić takiej zależności w połączeniu warstw podbudowy. W tablicy 3.6 zestawiono współczynniki korelacji liniowej szczepności i wskaźnika zagęszczenia dla poszczególnych połączeń międzywarstwowych i poziomu istotności P. Najprawdopodobniej powodem braku korelacji w połączeniu warstw podbudowy

jest wysoką zmiennością (>60%) wyników wytrzymałości na ścinanie w poszczególnych przedziałach wskaźnika zagęszczenia. Natomiast wysoka zmienność szczepności powodowana jest dużym udziałem próbek z brakiem szczepności lub ograniczoną szczepnością międzywarstwową w połączeniu podbudów (patrz 3.17) na co istotnie wpływa brak zazębienia się warstw podbudowy. **Brak zazębienia jest efektem zaniżonej ilości asfaltu w warstwach podbudowy oraz nieróżnicowania uziarnienia w stykających się warstwach. Grube warstwy podbudowy wbudowywane są w dwóch przejściach technologicznych z tego samego materiału.**



Rys. 3.25. Zestawienie miarodajnej szczepności międzywarstwowej połączenia podbudowa-podbudowa w zależności od wskaźnika górnej warstwy

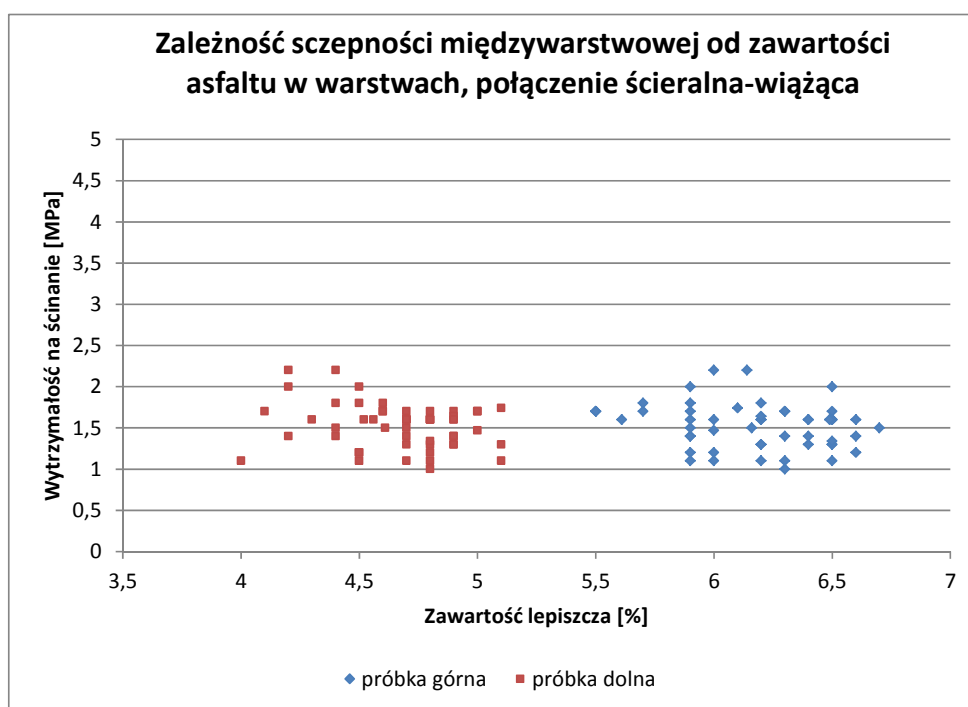
Tablica 3.6. Zestawienie współczynników korelacji liniowej szczepności międzywarstwowej i wskaźnika zagęszczenia górnej warstwy

Lp.	Połączenie międzywarstwowe	Współczynnik korelacji liniowej R^2	
		P=68%	P=95%
1	Ścieralna-wiążąca	0,77	0,64
2	Wiążąca-podbudowa	0,61	0,60
3	Podbudowa górna-podbudowa dolna	0,02	0,01

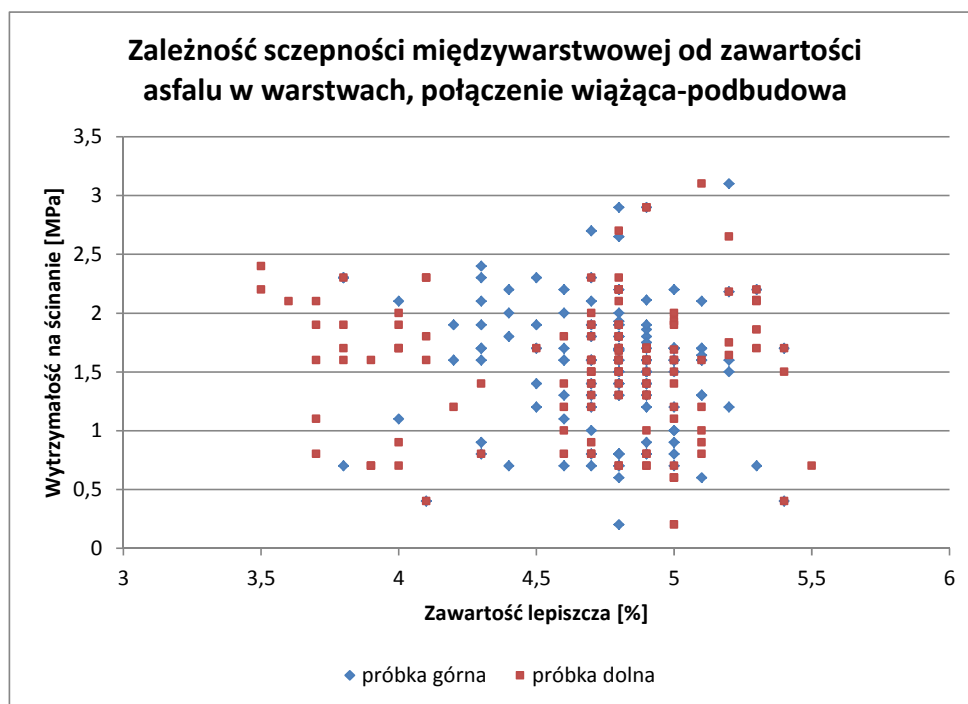
3.3.4.3. Wpływ zawartości asfaltu

Na rysunkach 3.26, 3.27 i 3.28 przedstawiono zestawienie szczepności międzywarstwowej poszczególnych połączeń warstw w zależności od zawartości asfaltu w warstwach stykających się. W przedstawionych wynikach nie można zaobserwować zależności tych właściwości. Delikatny trend wpływu zawartości asfaltu w warstwach stykających się na szczepność międzywarstwową rysuje się w połączeniu warstw podbudowy. Przy zawartości asfaltu poniżej 4% wag. widać zmniejszoną wytrzymałość na ścinanie.

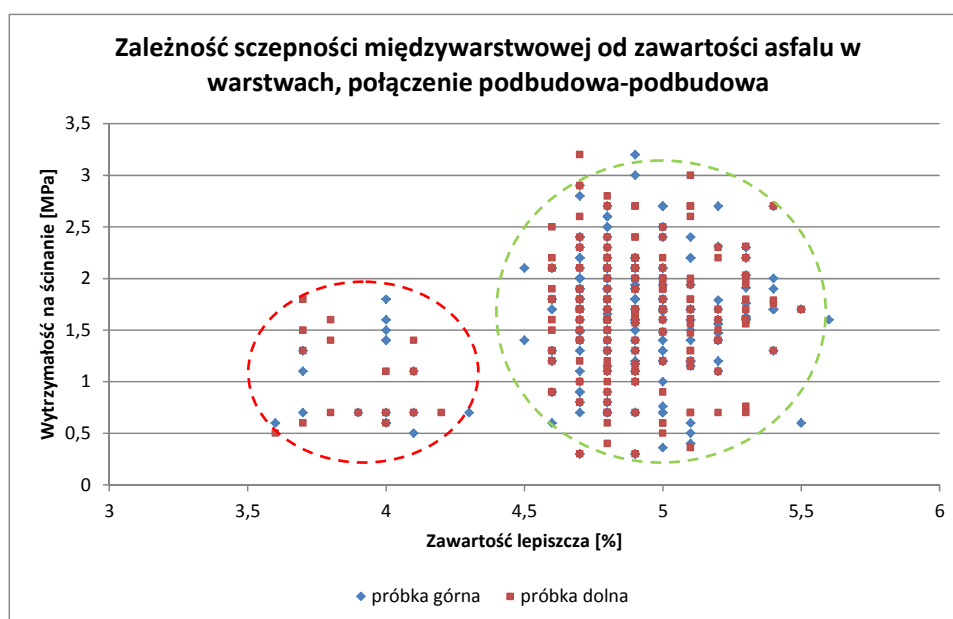
W analizie tej zależności dysponowano najmniejszą liczbą danych; w połączeniu warstw: ścieralna-wiążąca - 54 wyniki, wiążąca-podbudowa - 139 wyników, podbudowa-podbudowa - 208 wyników. O ile dysponowano dużą ilością wyników szczepności to brakowało w bazie danych z monitoringu wyników zawartości asfaltu dla tych próbek.



Rys. 3.26. Zestawienie szczepności międzywarstwowej połączenia ścieralna-wiążąca w zależności od zawartości asfaltu w warstwach stykających się



Rys. 3.27. Zestawienie szczepności międzywarstwowej połączenia wiążąca-podbudowa w zależności od zawartości asfaltu w warstwach stykających się

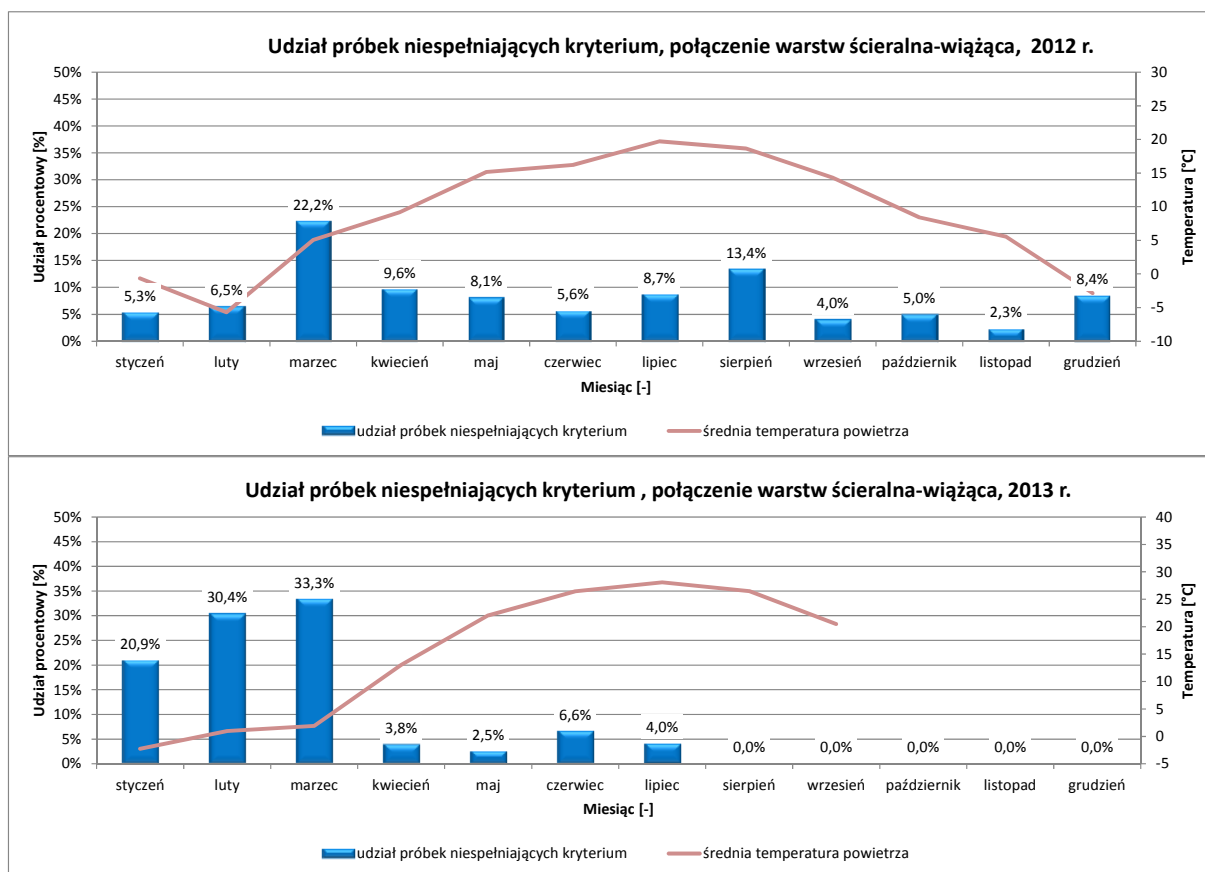


Rys. 3.28. Zestawienie szczepności międzywarstwowej połączenia warstw podbudowy w zależności od zawartości asfaltu w warstwach stykających się

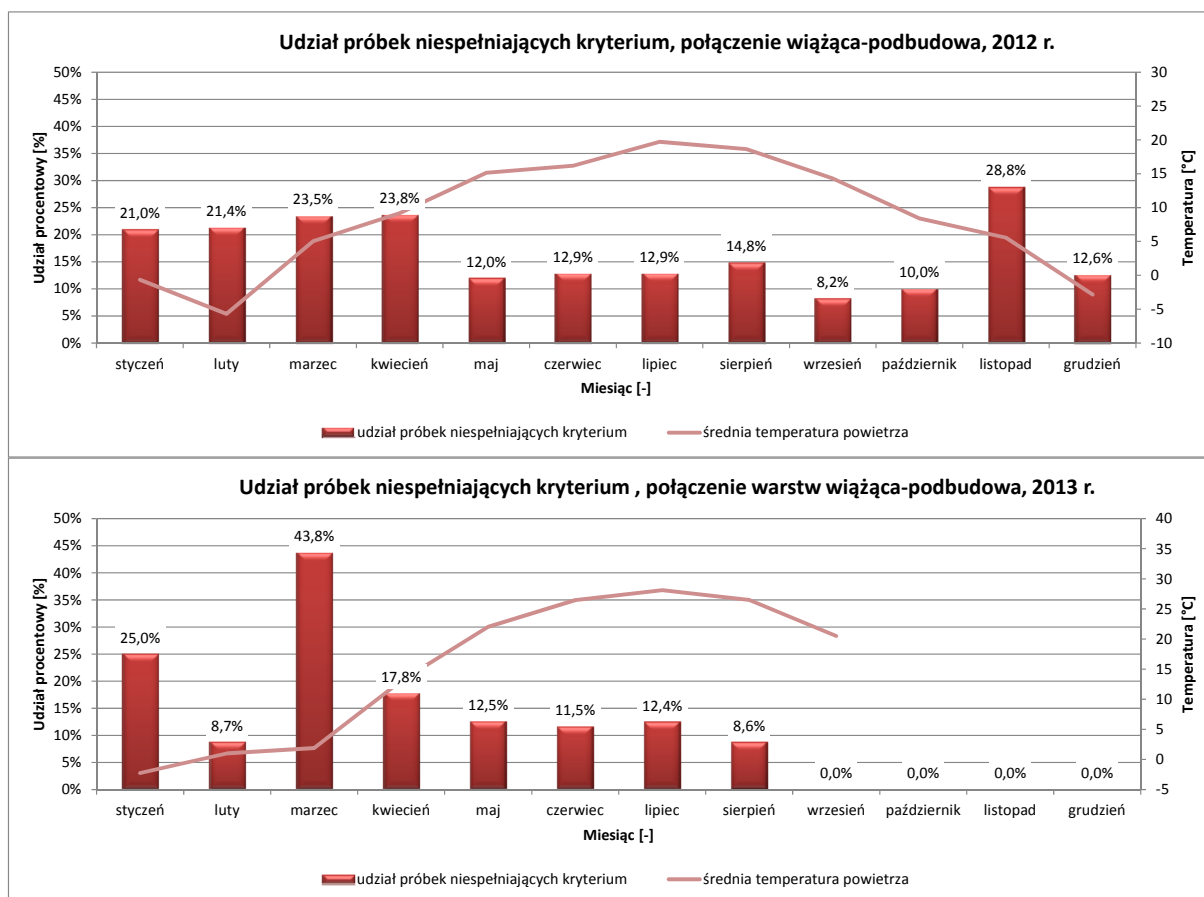
3.3.4.4. Wpływ temperatury powietrza na szczepność międzywarstwową

Wpływ temperatury powietrza na szczepność międzywarstwową warstw asfaltowych oceniano na podstawie zestawienia udziału próbek niespełniających tymczasowych kryteriów szczepności od średniej temperatury powietrza w miesiącu. Na rys. 3.29, 3.30 i 3.31 zestawiono udziały próbek niespełniających tymczasowe kryteria szczepności w latach 2012 i 2013 oddzielnie dla poszczególnych połączeń warstw ścieralna-wiążąca, wiążąca-podbudowa i podbudowa-podbudowa.

Jak można zaobserwować nie ma wyraźnego wpływu szczepności połączenia warstw ścieralna-wiążąca od średniej temperatury powietrza w 2012 r., ale jest już widoczny ten wpływ w roku 2013 r. Jedynym rozsądnym wytłumaczeniem takiego obrazu może być to, że w roku 2012 w miesiącach zimowych grudzień, styczeń i luty średnie temperatury powietrza były poniżej zera, co spowodowało, że podłoże pod układaną warstwę ścieralną mogło być suche. Natomiast już tak nie musiało być w styczniu, lutym i marcu roku 2013, gdyż temperatury były powyżej zera i mogła występować podwyższona wilgotność i wilgoć podłoża pod warstwę ścieralną. Powodowało to zwiększony udział próbek z obniżoną lub zerową szczepnością międzywarstwową.



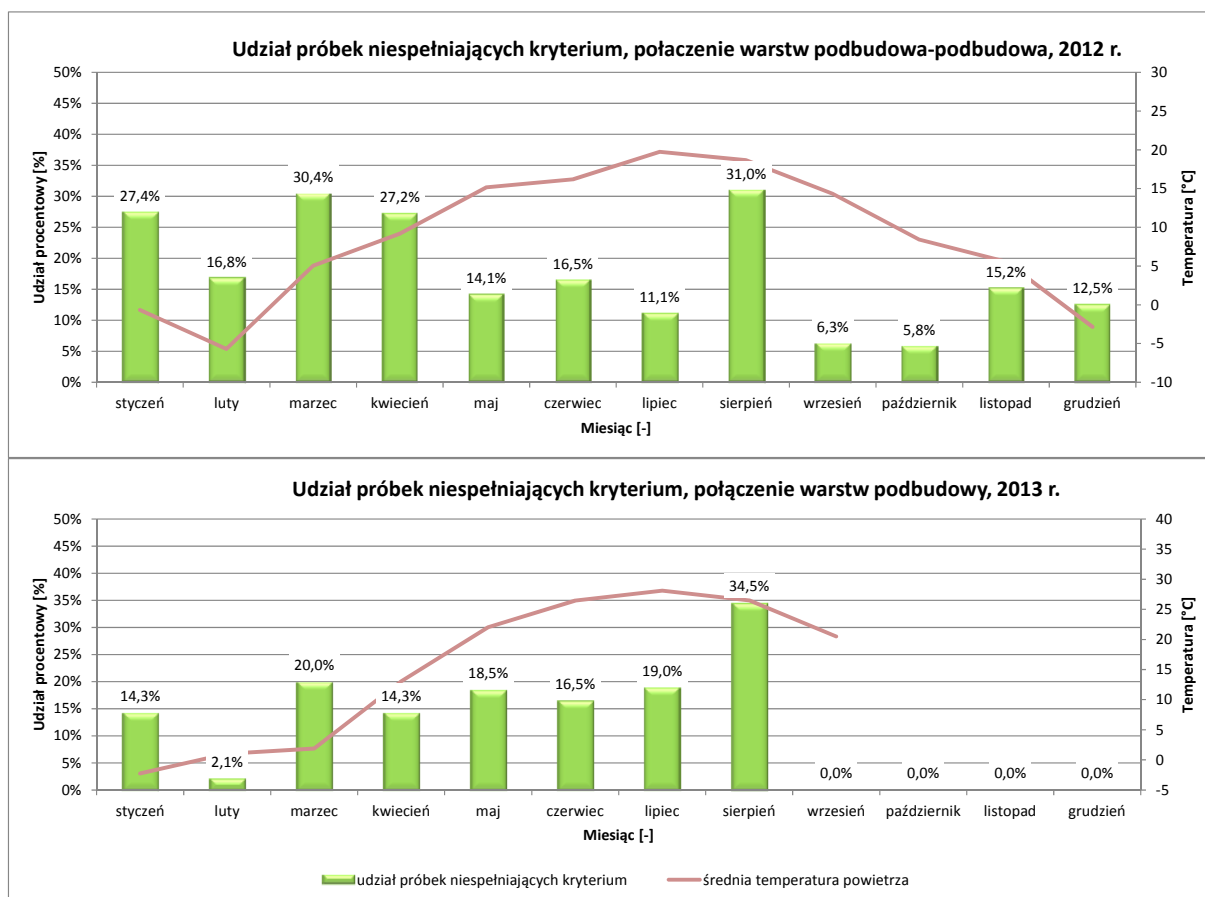
Rys. 3.29. Udział próbek niespełniających kryterium szczepności międzywarstwowej połączenia warstw ścieralna-wiążąca



Rys. 3.30. Udział próbek niespełniających kryterium szczepności międzywarstwowej połączenia warstw wiążąca-podbudowa

W przypadku oceny wpływu średniej temperatury powietrza na połączenie warstw wiążąca-podbudowa można stwierdzić, że istnieje pewna zależność (patrz rys. 3.30). Obniżone temperatury późno jesienne, zimowe i wiosenne powodowały zwiększony udział próbek z obniżoną lub zerową szczepnością międzywarstwową.

To samo można zaobserwować w przypadku oceny połączenia warstw podbudowa-podbudowa (rys. 3.31). Istnieje wpływ obniżonych temperatur powietrza na udział próbek niespełniających tymczasowe kryterium, czyli stwierdzono zwiększoną ilość szczepności zerowej i obniżonej. Jedynie miesiąc sierpień zarówno w roku 2012 i 2013 odbiega od trendu i mimo wysokich temperatur zaobserwowano wysoki udział próbek niespełniających tymczasowe kryterium szczepności międzywarstwowej. Nie wiadomo czym jest to spowodowane. Należałoby jeszcze przeanalizować ilość opadów w miesiącu sierpniowym, co mogłoby mieć wpływ na obniżenie szczepności.

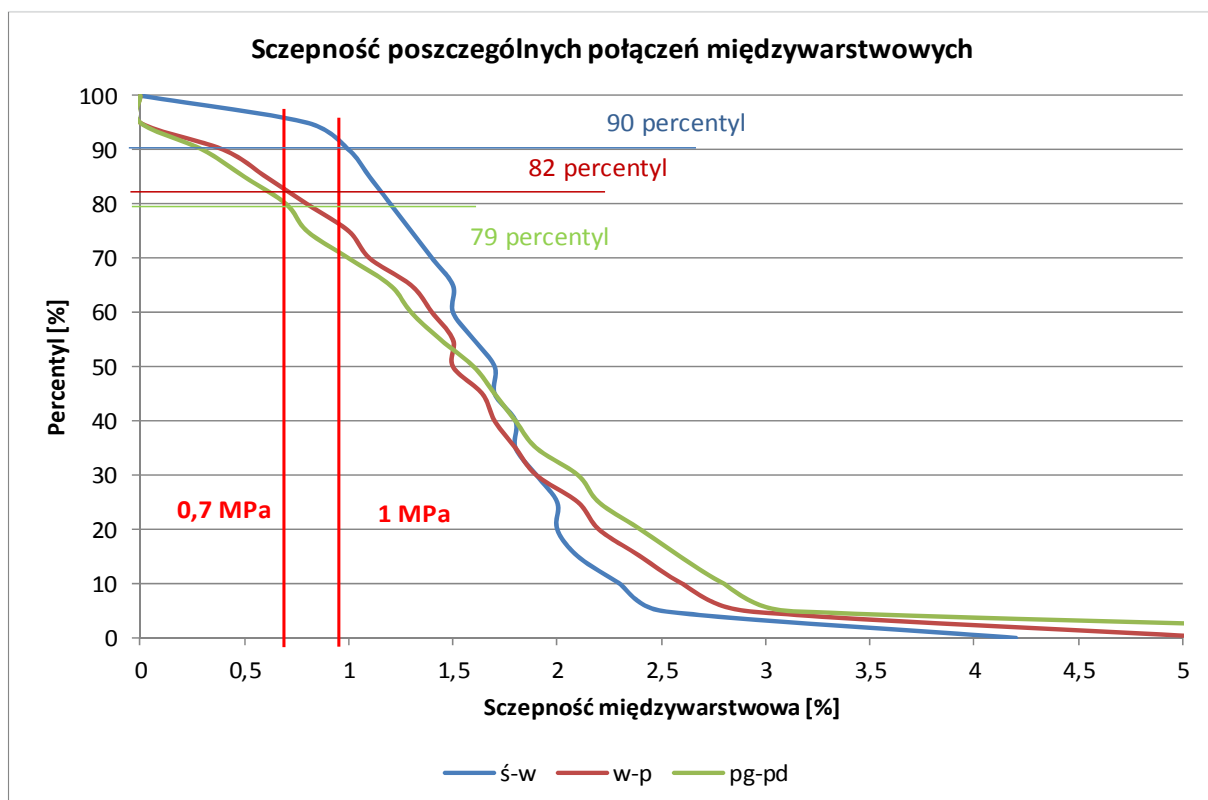


Rys. 3.31. Udział próbek niespełniających kryterium szczepności międzywarstwowej połączenia warstw podbudowa-podbudowa

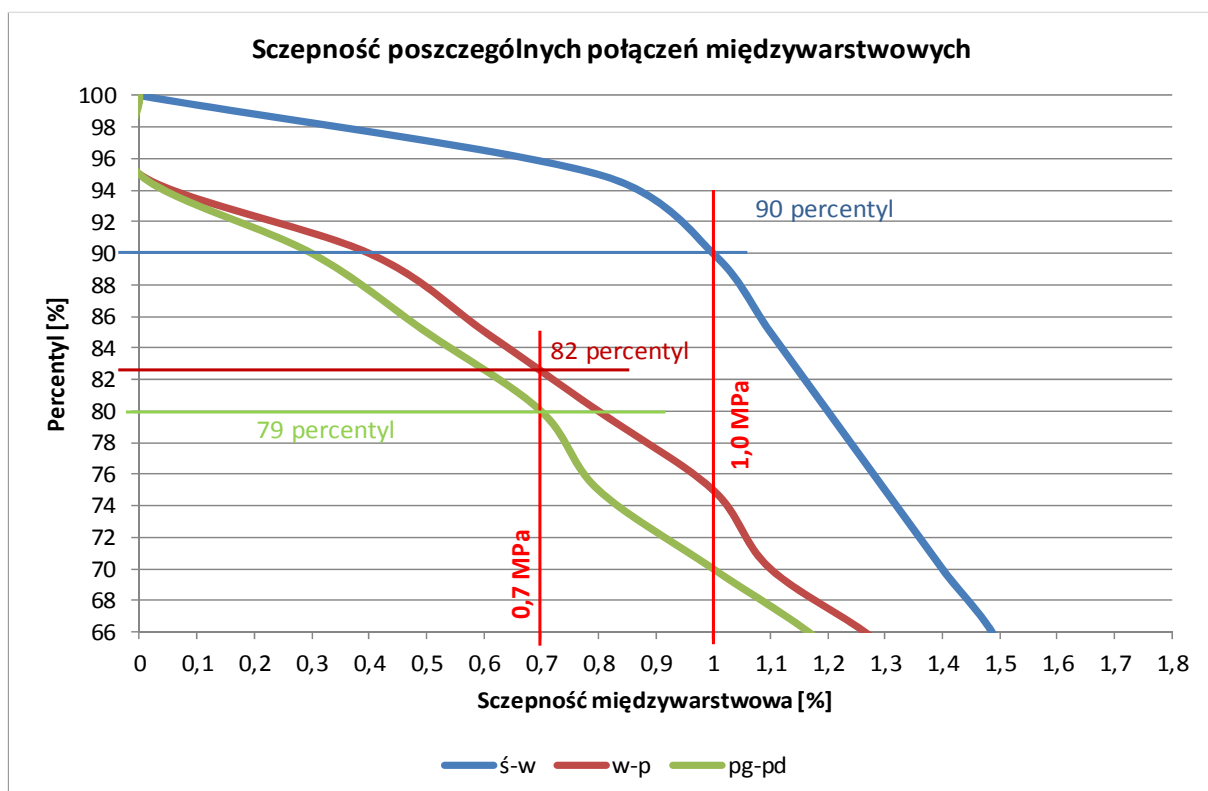
3.4. Rozkłady szczepności międzywarstwowej

Z analizy wyników wykonanych badań szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych za pomocą metody Leutnera wynika, że jest możliwość uzyskania całkiem wysokich wartości szczepności międzywarstwowych warstw asfaltowych.

W związku z tym, że tymczasowe kryteria szczepności są na akceptowalnym poziomie, które prawie z trzykrotnym zapasem przewyższają maksymalne naprężenia styczne występujące w typowych nawierzchniach (patrz pkt.2) oraz są porównywalne z kryteriami innych krajów (patrz tab. 3.1) można próbować utrzymać już dwa lata wykorzystywane kryteria w Polsce lub w niewielkim stopniu je skorygować.



Rys. 3.32. Rozkład sumaryczny wyników szczepności międzywarstwowej z uwzględnieniem poszczególnych warstw



Rys. 3.33. Rozkład sumaryczny wyników szczepności międzywarstwowej z uwzględnieniem poszczególnych warstw (przybliżenie)

Analiza możliwości utrzymania tymczasowych kryteriów szczepności międzywarstwowych pokazuje, że jest to możliwe. Utrzymanie wartości granicznych wytrzymałości na ścinanie 1 MPa dla warstw ścieralna-wiążąca i 0,7 MPa dla warstw wiążąca-podbudowa i podbudowa-podbudowa pokazuje (patrz rys.3.32), że kryterium spełnia:

- 90% prób w przypadku połączenia warstw ścieralna-wiążąca,
 - 82% prób w przypadku połączenia warstw wiążąca-podbudowa,
 - 79% prób w przypadku połączenia warstw podbudowa-podbudowa,
- podczas kontroli szczepności międzywarstwowej na realizowanych budowach w latach 2012-2013 w ramach inwestycji GDDKiA.

Oceniając rozkłady z innego punktu widzenia można powiedzieć, że w 18-21% przypadkach w latach 2012-2013 nie spełnione zostały kryteria szczepności międzywarstwowej w połączeniu warstw wiążąca-podbudowa i podbudowa-podbudowa. Natomiast z jeszcze innego punktu widzenia można stwierdzić, że na co 5-tej budowie odnotowano braki szczepności międzywarstwowej warstw niżej leżących od warstwy ścieralnej.

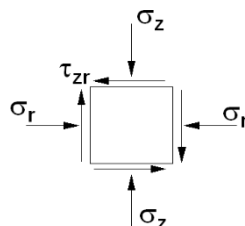
4. KRYTERIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WARSTW ASFALTOWYCH

Przyjęcie nowych kryteriów szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych oparto o analizę trzyczynnikową. Analizowano wpływ następujących czynników:

- teoretyczne rozkłady naprężeń ścinających w konstrukcji nawierzchni,
- aktualne kryteria szczepności międzywarstwowej w innych krajach na świecie,
- rozkłady rzeczywistych wyników szczepności międzywarstwowej.

Rozkłady naprężeń ścinających w nawierzchni

Największe naprężenia styczne w wielowarstwowej konstrukcji nawierzchni pojawiają się dokładnie w osi krawędzi obciążenia kołowego o promieniu r , czyli dla $r=a$. Naprężenia styczne w osi obciążenia, dla $r=0$ są równe zero. Modelowy rozkład naprężeń stycznych w półprzestrzeni sprężystej przedstawiono na rys. 4.1, przy założeniu, że współczynnik Poissona jest równy 0,3. Punkt położenia maksymalnych wartości, jak i sama maksymalna wartość są funkcją współczynnika Poissona, według wzoru:

$$\tau_{zr} = \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_r)$$


$$\tau_{max} = \frac{q}{2} \left[\frac{1-2\nu}{2} + \frac{2}{9}(1+\nu)\sqrt{2(1+\nu)} \right]$$

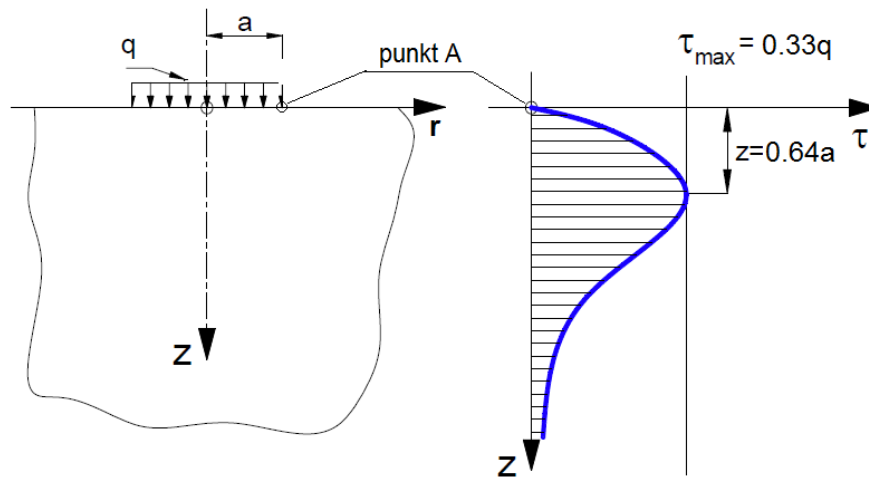
dla $\nu = 0.3 \quad \tau_{max} = 0.33q$

$$z = a \sqrt{\frac{2(1+\nu)}{7-2\nu}}$$

$$\text{dla } D = 0.3 \text{ m} \quad \tau_{max} \quad \text{przy} \quad z = 0.638a$$

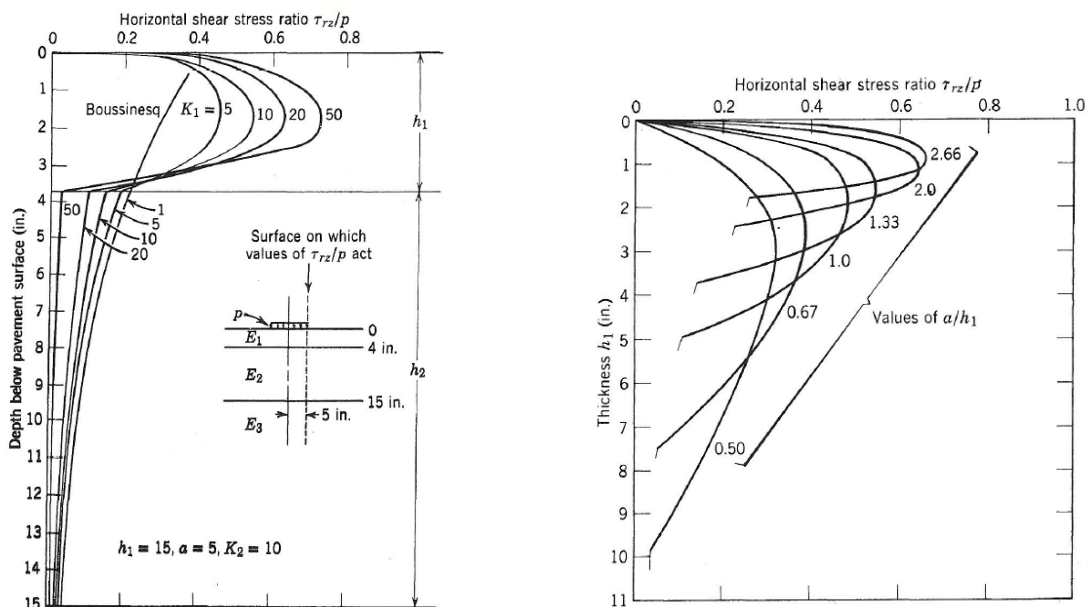
gdzie:

- z – głębokość [m], na której występuje największe naprężenie styczne,
- a – promień obciążenia [m], D – średnica obciążenia [m],
- q – nacisk, ciśnienie kontaktowe od obciążenia kołowego [MPa],
- τ_{zr} – naprężenia styczne [MPa], τ_{max} – maksymalne naprężenie styczne [MPa],
- σ_z – naprężenie pionowe w kierunku osi z [MPa],
- σ_r – naprężenie poziome w kierunku osi r [MPa],
- ν – współczynnik Poissona.



Rys. 4.1. Modelowy rozkład naprężeń stycznych w półprzestrzeni sprężystej, dla współczynnika Poissona $\nu=0,3$ przy $r = a$

Rozkład naprężeń stycznych w półprzestrzeni wielowarstwowej przypomina ten występujący w półprzestrzeni sprężystej jednorodnej, ale wykazuje pewne różnice. Różnice te zależą od modułów warstw i proporcji pomiędzy tymi modułami warstw, a także od założeń dotyczących szczepności międzywarstwowej. Na rysunku 4.2 przedstawiono rozkłady naprężeń stycznych (proporcji naprężeń stycznych do nacisku) na krawędzi obciążenia w zależności od proporcji między modułami poszczególnych warstw (pomiędzy pakietem warstw asfaltowych, podbudowy i podłoża gruntowego) w funkcji głębokości od powierzchni.

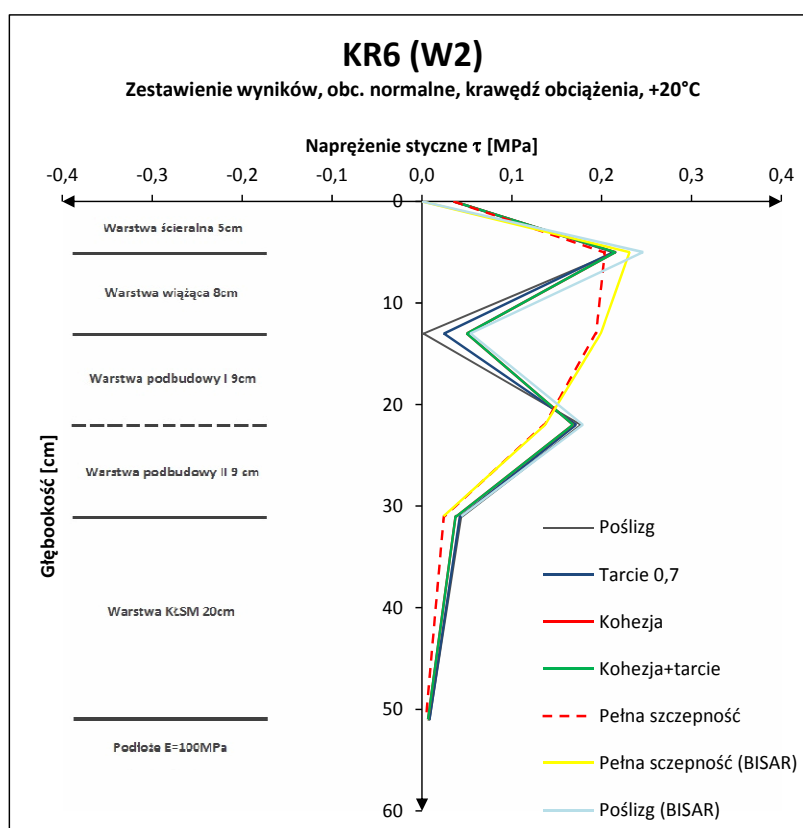


Oznaczenia: τ_{rz} – naprężenie styczne poziome, p – nacisk, ciśnienie kontaktowe, a – promień obciążenia, h_1 – grubość warstw asfaltowych, h_2 – grubość podbudowy nieasfaltowej, K_1 i K_2 – wskaźniki sprężystości, gdzie $K_1 = E_1/E_2$, $K_2 = E_2/E_3$

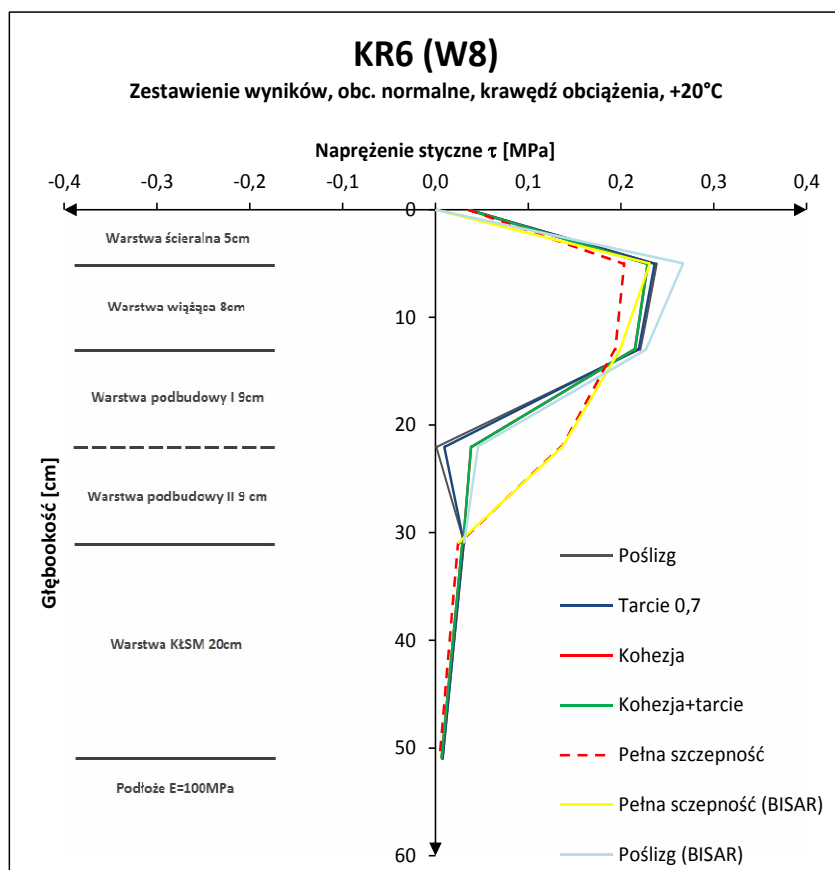
Rys. 4.2. Typowe rozkłady naprężeń stycznych w układzie trzywarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Na rysunku po prawej: $a=5$ cali, $K_1=K_2=20$ [8]

Na podstawie zestawień z rozdziału 2, obliczonych naprężeń stycznych występujących na krawędzi obciążenia na granicy warstw asfaltowych za pomocą modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej (BISAR) i modelu MES (Abaqus) sporządzono wykresy naprężeń stycznych w konstrukcji nawierzchni i przedstawiono na rysunkach 4.2 i 4.3. W analizach obliczeniowych wykorzystano model konstrukcji nawierzchni KR6 w temperaturze +20°C (temperaturze odpowiadającej podawane kryteria szczepności) przy uwzględnieniu braku lub ograniczenia szczepności międzywarstwowej w połączeniu warstw wiążąca-podbudowa (wariant W2) lub podbudowa-podbudowa (wariant W8) oddzielnie.

Rys. 4.2 i 4.3 zostały opracowane na podstawie wyliczonych wartości naprężeń stycznych tylko w punktach charakterystycznych, czyli w miejscach połączenia warstw i powierzchni nawierzchni. Z tego też powodu linie naprężeń nie są „wygładzone”, lecz łączą liniami prostymi podane punkty. Nie jest to przebieg rzeczywisty takich linii.



Rys. 4.2. Naprężeń stycznych w konstrukcji nawierzchni KR6 w temperaturze +20°C przy uwzględnieniu braku lub ograniczenia szczepności międzywarstwowej w połączeniu warstw wiążąca-podbudowa.



Rys. 4.3. Naprężeń stycznych w konstrukcji nawierzchni KR6 w temperaturze +20°C przy uwzględnieniu braku lub ograniczenia szczepności międzywarstwowej w połączeniu warstw podbudowa-podbudowa

Z rysunków 4.2 i 4.3 można zauważyć, że maksymalne naprężenia styczne na poziomie połączenia warstw ścieralna-wiążąca niezależnie od modelowanej konfiguracji dochodzą do 0,27 MPa, natomiast na poziomie połączenia wiążąca-podbudowa dochodzą do 0,23 MPa, a na poziomie połączenia podbudowa-podbudowa 0,18 MPa. Zestawienie maksymalnych naprężeń występujących w analizowanych konfiguracjach obliczeniowych przedstawiono w tabelicy 4.1.

Tablica 4.1. Zestawienie maksymalnych naprężeń stycznych na poziomie połączeń międzywarstwowych obliczonych przy pomocy BISAR, ABAQUS dla konstrukcji KR6, temperatura +20°C

Lp.	Połączenie międzywarstwowe	Maksymalne naprężenie styczne, +20°C [MPa]					
		Pełna szczepność	Brak szczepności (poślizg)		Ograniczona szczepność		Max.
			W2	W8	W2	W8	
1	Ścieralna-wiążąca	0,243	0,246	0,267	0,215	0,234	0,267
2	Wiążąca-podbudowa	0,210	0,054	0,227	0,050	0,219	0,227
3	Podbudowa-podbudowa	0,143	0,179	0,046	0,172	0,040	0,179

W2 – wariant 2, czyli brak lub ograniczona szczepność warstw wiążąca-podbudowa,

W8 – wariant 8, czyli brak lub ograniczona szczepność warstw podbudowa-podbudowa

Tak jak teoria przewiduje największe naprężenia styczne obliczono w połączeniu warstw ścieralna-wiążąca, a w połączeniach niżej położonych naprężenia są już niższe. Taki rozkład naprężeń występuje w konfiguracji kiedy występuje pełna

szczepność międzywarstwowa na wszystkich połączeniach oraz przy braku i ograniczonej szczepności w najniższym zlokalizowanym połączeniu – warstw podbudowa-podbudowa. W tym ostatnim przypadku, braku połączenia (pełen poślizg) warstw podbudowa-podbudowa można zaobserwować nawet niewielki wzrost naprężeń stycznych w połączeniu warstw ścieralna-wiążąca z 0,25 MPa przy pełnej szczepności do 0,27 przy braku połączenia warstw podbudowy.

Odmienne rozkłady naprężeń stycznych jest w przypadku braku lub ograniczenia szczepności w połączeniu środkowym, czyli warstw wiążąca-podbudowa (rys. 4.2). W tym przypadku z maksymalnej wartości naprężenia stycznego występującego w połączeniu warstw ścieralna-wiąząc naprężenie zbliża się do zera w połączeniu warstw wiążąca-podbudowa, a następnie zwiększa się w połączeniu warstw podbudowa-podbudowa.

Obliczone wartości naprężeń stycznych w analizowanych modelach konstrukcji nawierzchni KR6 osiągają maksymalną wartość równą 0,27 MPa. W przypadku pełnej szczepności międzywarstwowej w konstrukcji nawierzchni to jest w przypadku zakładanym w projektowaniu i oczekiwanym podczas wykonawstwa nawierzchni obliczone naprężenia styczne w poszczególnych połączeniach są trzykrotnie mniejsze od rozpatrywanych dopuszczalnych naprężeń tzw. kryteriów szczepności międzywarstwowej.

Rozpatrując przypadek pełnej szczepności w konstrukcji nawierzchni KR6, proporcje naprężeń występujących na poszczególnych połączeniach w odniesieniu do maksymalnych wartości, czyli naprężeń występujących w połączeniu warstw ścieralna-wiążąca przyjmują wartości:

- wiążąca-podbudowa występuje proporcja - $0,210 \text{ MPa} / 0,243 \text{ MPa} = 86\%$,
- podbudowa-podbudowa występuje proporcja - $0,143 \text{ MPa} / 0,243 \text{ MPa} = 59\%$.

Kryteria szczepności międzywarstwowej na świecie

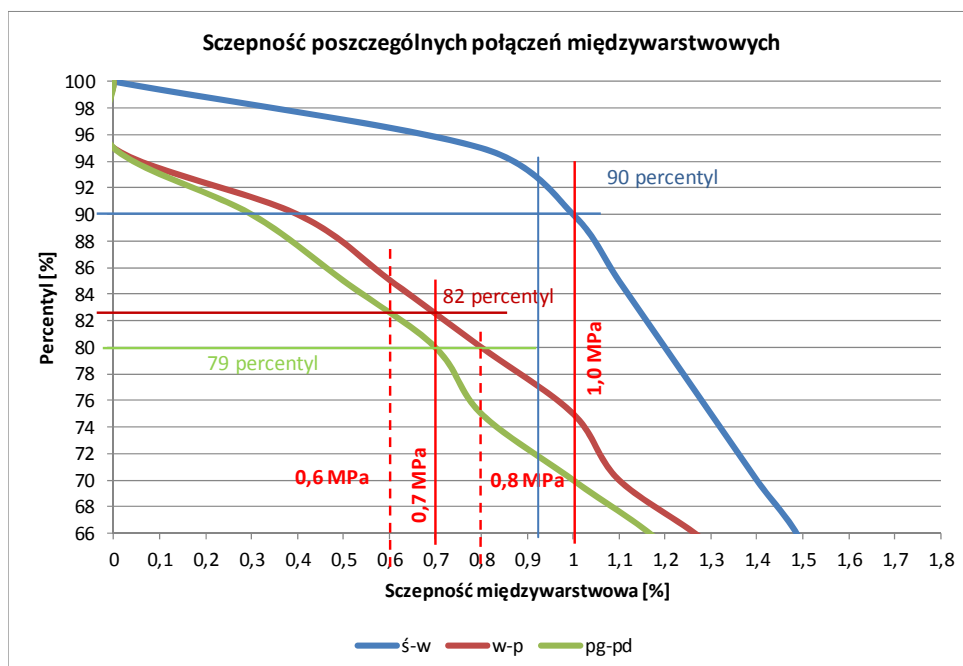
Najnowsze kryteria szczepności międzywarstwowej na świecie to jest wytrzymałości na ścinanie badanej w laboratorium wg metody Leutnera (patrz tab. 3.1 z rozdziału 3), uwzględniając ostatnią dekadę, wskazują na wartości 0,85-1 MPa, średnio 0,93 MPa przy połączeniu warstw ścieralna-wiążąca i 0,5-0,7 MPa, średnio 0,6 MPa przy połączeniu warstw wiążąca-podbudowa. W przedstawionych zakresach mieszczą się wymagania niemieckie, amerykańskie, szwajcarskie, brytyjskie i tymczasowe polskie.

W przywołanych wymaganiach nie podano oddzielne kryteriów dla połączenia warstw podbudowy, wykonywanej dwuwarstwowo, gdyż takie nie istnieją.

W wymaganiach szczepności międzywarstwowej można zaobserwować trend obniżenia wymagań szczepności dla połączeń warstw niżej leżących tj. w-p w stosunku do wymagań dla połączenia warstw ścieralna-wiążąca. Jeżeli przyjąć wymaganie szczepności warstw ścieralna-wiążąca za 100% to wymaganie połączenia warstw wiążąca-podbudowa stanowi 70% wartości wymagania dla połączenia warstw ścieralna-wiążąca.

Rozkłady wyników badań szczepności międzywarstwowej

Na rys. 4.3 przedstawiono sumaryczny rozkład wyników szczepności międzywarstwowej z uwzględnieniem poszczególnych połączeń na podstawie 7043 odwiertów z nowo wykonanych nawierzchni w Polsce w latach 2012-2013.



Rys. 4.3. Rozkład sumaryczny wyników szczepności międzywarstwowej z uwzględnieniem połączeń poszczególnych warstw (skala przybliżona)

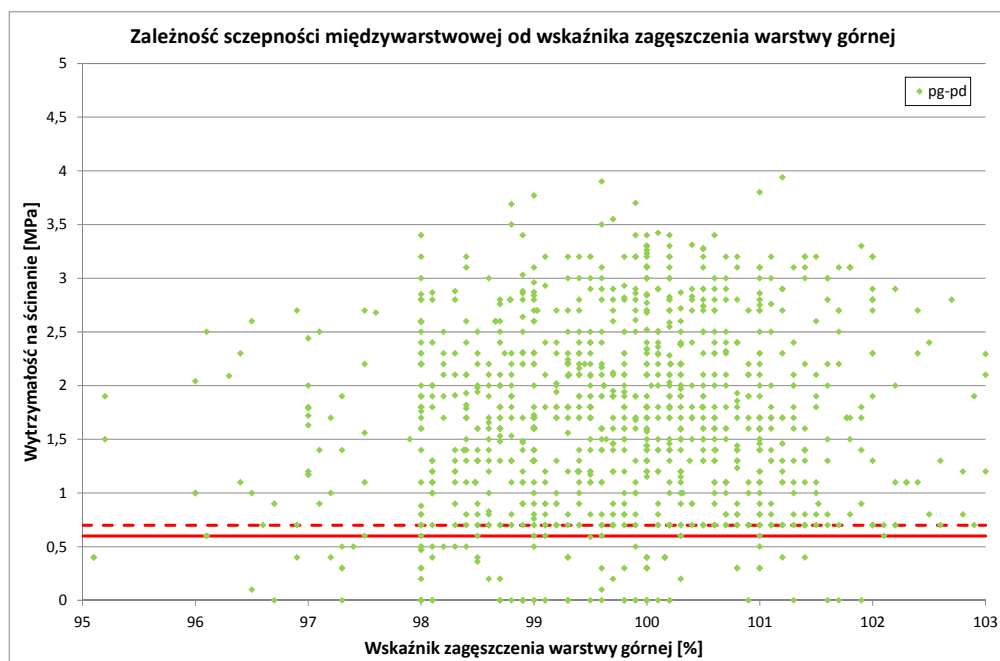
Jak widać z rys. 4.3 spełnienie kryteriów szczepności międzywarstwowych najczęściej występujących tj. średnio 0,92 MPa dla warstw ścieralna-wiążąca i średnio 0,6 MPa dla warstw wiążąca-podbudowa jest zachowane odpowiednio dla 92% i 85% próbek. Natomiast trzymając się wartości średniej 0,6 MPa w przypadku oceny połączenia warstw podbudowy, kryterium zachowuje 82,5% próbek.

Przyjmując dla niżej leżących połączeń międzywarstwowych za minimalny - 82% percentyl oraz fakt wprowadzonych kontroli szczepności, które wpłyną na zmniejszenie ilości próbek z wartością zerową szczepności, a to zwiększy percentyl próbek spełniających kryterium można odczytać wartość graniczną szczepności dla połączenia:

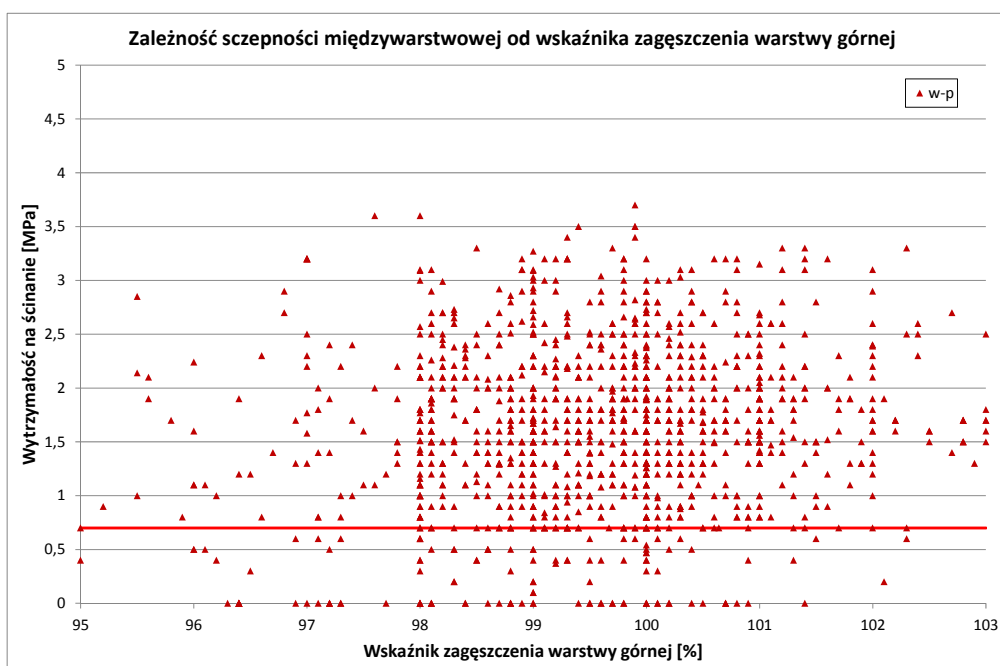
- podbudowa-podbudowa równą 0,6 MPa,
- wiążąca-podbudowa równą 0,7 MPa.

W przypadku utrzymania kryterium 1,0 MPa dla połączenia warstw ścieralna-wiążąca odpowiada to 90% próbek spełniających wymaganie, co wskazuje na bardzo dobry wynik.

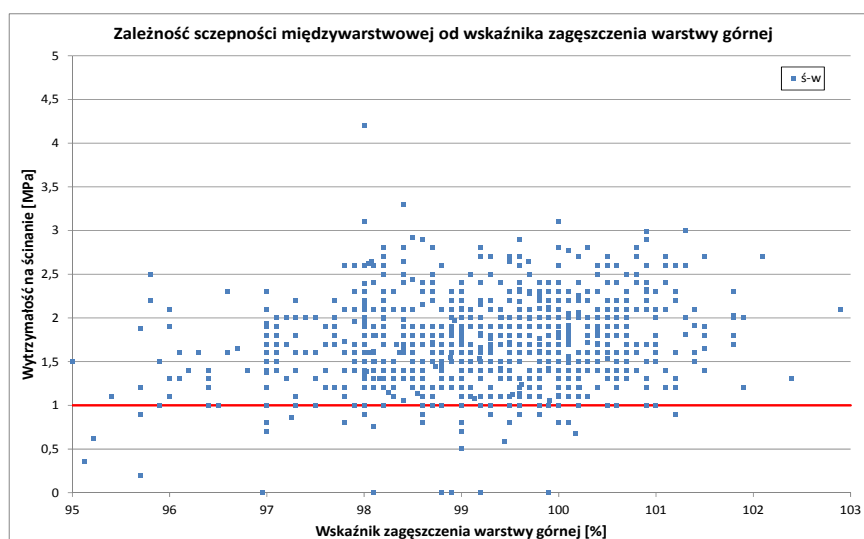
Obraz układu wyników wytrzymałości na ścinanie w funkcji wskaźnika zagęszczenia dla poszczególnych połączeń oddzielnie wraz z zaznaczonym kryterium szczepności przedstawiono na rys. 4.4, 4.5 i 4.6.



Rys. 4.4. Zestawienie wyników wytrzymałości na ścinanie w funkcji wskaźnika zagęszczenia warstwy wyżej leżącej oraz kryterium szczepności, połączenie podbudowa-podbudowa



Rys. 4.5. Zestawienie wyników wytrzymałości na ścinanie w funkcji wskaźnika zagęszczenia warstwy wyżej leżącej oraz kryterium szczepności, połączenie wiążąca-podbudowa



Rys. 4.6. Zestawienie wyników wytrzymałości na ścinanie w funkcji wskaźnika zagęszczenia warstwy wyżej leżącej oraz kryterium szczepności, połączenie ścieralna-wiążąca

4.1. Ostatecznie przyjęte kryteria szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych

W tablicy 4.2 zestawiono wskazania z analizy doboru kryteriów według analiz obliczeniowych, wyników badań z terenu i istniejących kryteriów na świecie.

Ostatecznie przyjęte kryteria szczepności międzywarstwowej badanej w laboratorium według metody Leutnera w temperaturze +20°C przedstawiono w tablicy 4.3

Tablica 4.2. Zestawienie wykonanych analiz doboru kryterium szczepności międzywarstwowej, temperatura +20°C

Właściwość	Połączenie międzywarstwowe	Wynik analiz obliczeniowych [MPa]		Wyniki badań szczepności wg Leutnera z terenu, P= 82% [MPa]	Kryteria na świecie [MPa]
		Pełna szczepność	Brak lub ograniczona szczepność		
Napężenie ścinające	ś-w	0,24	0,27	1,15	0,85-1,0
	w-p	0,21	0,23	0,70	0,5-0,7
	p-p	0,14	0,18	0,60	-
Proporcje naprężeń ścinających w odniesieniu do połączenia ś-w	ś-w / ś-w	1,00	1,00	1,00	1
	w-p / ś-w	0,88	0,85	0,61	0,6-0,7
	p-p / ś-w	0,58	0,67	0,52	-

Tablica 4.3. Ostateczne przyjęcie kryterium szczepności międzywarstwowej dla poszczególnych połączeń międzywarstwowych badanych wg metody Leutnera w temperaturze +20°C

Połączenie międzywarstwowe	Kryterium szczepności międzywarstwowej
Ścieralna-wiążąca	1,0 MPa
Wiążąca-podbudowa	0,7 MPa
Podbudowa-podbudowa	0,6 MPa

5. OPRACOWANIE INSTRUKCJI DO BADANIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WARSTW ASFALTOWYCH

5.1. Wprowadzenie

Istnieje wiele metod badania szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych, które zostały opisane we wcześniejszych pracach badawczych Politechniki Gdańskiej [3]. Najbardziej powszechną i jednocześnie mało skomplikowaną jest metoda ścinania bezpośredniego wg metody Leutnera opracowana w Niemczech pod koniec lat 70 ubiegłego stulecia. Metoda Leutnera badania szczepności międzywarstwowej polega na przyłożeniu siły ścinającej do próbki cylindrycznej odwierconej z nawierzchni lub wykonanej w laboratorium, zawierającej minimum dwie warstwy, w płaszczyźnie połączenia tych warstw. Miarą szczepności międzywarstwowej jest maksymalna siła ścinająca lub też obliczona wytrzymałość na ścinanie i przemieszczenie ścinające.

W tablicy 5.1 przedstawiono zestawienie warunków badania według różnych instrukcji ze świata, wykorzystujących metodę Leutnera do badania szczepności międzywarstwowej.

Tablica 5.1. Zestawienie warunków badania szczepności międzywarstwowej wg różnych instrukcji i standardów, wykorzystujących metodę Leutnera

Lp.	Właściwość	Warunki badania wg różnych instrukcji i standardów						
		Niemcy '99, ALP A-StB Teil 4.	Austria '98, RVS 11.065	Szwajcaria '00, SN671961	USA '04, FDOT	UK '08, MCDHW N954	Polska '04, Zeszyt 66, IBDiM	Polska '13 propozycja PG, 2013
1.	Aparat do ścinania	Leutner	austriacki	LPDS lub Leutner	FDOT	zmodyfikowany Leutner	zmodyfikowany Leutner	Leutner
2.	Średnica próbki [mm]	150 ±2	100 ±2	150 ±2	150 ±2	150 ±2	98-103	150 ±2
3.	Prędkość przesuwu tłoka [mm/min]	50 ±3	50 ±3	50 ±3	50,8	50 ±2	50	50 ±3
4.	Temperatura badania	20°C	20°C	20°C	25°C	20°C	20°C	20°C
5.	Przerwa pomiędzy szczękami ścinającymi [mm]	0	0	max. 2 mm lub 0	4,8	5	1,5	0-2
6.	Minimalna grubość warstwy górnej (odcinanej)	25	25	25	b.d.	30	30	30
7.	Minimalna grubość warstwy dolnej	70	b.d.	b.d.	b.d.	60	50	70

Najważniejszą zaletą metody Leutnera jest ogólna dostępność pras wytrzymałościowych w Polsce; większość laboratoriów drogowych dysponuje taką prasą oraz niski koszt aparatu do ścinania, w którym mocowana jest próbka do badań. Wiele laboratoriów dysponuje już aparatami do ścinania wg metody Leutnera i wykonuje te badania podczas realizacji kontraktów drogowych.

Jednocześnie metoda Leutnera w niedalekiej przyszłości stanie się metodą znormalizowaną w Unii Europejskiej, także w Polsce. Obecnie prowadzone są prace konsultacyjne projektu normy prEN12697-48 Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 48: Interlayer Bonding, wersja z października 2013.

W takiej sytuacji zamierzenie wprowadzenia do ogólnopolskiego stosowania kompletnej instrukcji do wykonywania badań szczepności międzywarstwowej wydaje się być słuszną. Do chwili wprowadzenia i wydania polskiej normy PN EN, dotyczącej szczepności międzywarstwowej instrukcja usystematyzuje i ujednolici badanie oraz wynikowy raport z tego badania.

W ramach prac badawczych realizowanych przez Politechnikę Gdańską, prowadzonych na zlecenie GDDKiA na podstawie polskiej, brytyjskiej i głównie niemieckiej instrukcji oraz doświadczeń z wykonywania tego typu badań już prawie 10 lat temu opracowano nową „Instrukcję laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera próbek odwierconych z nawierzchni”.

5.2. Czynniki wpływające na wynik badania szczepności w aparacie Leutnera

Na wynik badania szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych w badaniu ścinania bezpośredniego w aparacie Leutnera wpływa wiele czynników związanych z warunkami badania. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- temperatura badania,
- prędkość ścinania,
- szerokość przerwy pomiędzy szczękami ścinającymi.

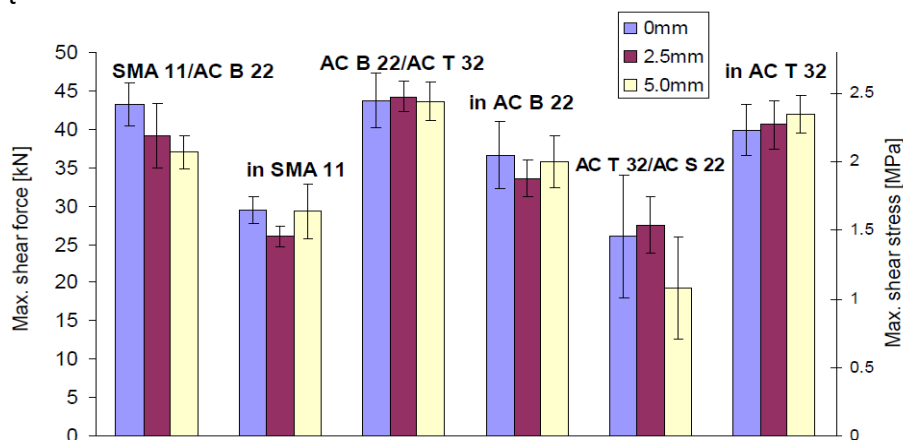
O ile wpływ prędkości ścinania, która jest wprost proporcjonalna do siły ścinającej i temperatury badania, która jest odwrotnie proporcjonalna do siły ścinającej jest raczej znany i nie budzący wątpliwości, to wpływ szerokości przerwy pomiędzy szczękami ścinającymi nie jest już tak oczywisty i zostanie przybliżony w kolejnym podpunkcie.

5.2.1. Wpływ przerwy pomiędzy szczękami ścinającymi w aparacie Leutnera

Aparat Leutnera opracowany w Niemczech w latach 70-tych modyfikowano lub konstruowano w różnych krajach, trzymając się idei bezpośredniego ścinania. Modyfikacje aparatu Leutnera polegały między innymi na zmienianiu przerwy

między szczękami ścinającymi w płaszczyźnie ścinania. Bezpośrednim powodem tych zmian była trudność ustawienia próbki tak, aby płaszczyzna połączenia warstw była idealnie w płaszczyźnie ścinania. Odwiercone próbki czasem posiadają warstwy różnej grubości na długości średnicy lub płaszczyzna połączenia nie jest prostopadła do pobocznic próbki oraz zazębienie połączenia jest duże.

Zmienny wymiar przerwy pomiędzy szczękami ścinającymi aparatu Leutnera w niektórych przypadkach wpływa na wielkość pomierzonej siły ścinającej, czyli na szczepność międzywarstwową [6]. W szczególności ma to znaczenie w chwili dobrego zazębienia stykających się warstw, jak to przedstawiono na rys. 5.1. Unika się ścinania pojedynczych ziaren kruszywa. Kiedy przerwa jest zwiększona do 5 mm to szczepność międzywarstwową może spaść nawet o 20%, a w innych przypadkach nie zmieniać się.



Rys. 5.1. Zmiany szczepności międzywarstwowej w zależności od rodzaju warstw stykających się oraz wielkości przerwy pomiędzy szczękami ścinającymi aparatu Leutnera (Max. shear force – max. siła ścinająca, Max. shear stress – max. naprężenie ścinające) [6]

W Polsce najczęściej stosuje się aparaty, w których przerwa pomiędzy szczękami ścinającymi wynosi 0 mm. Często stosowana instrukcja IBDiM z 2004 r. do badania szczepności warstw asfaltowych z geosyntetykiem wskazuje na przerwę równą 1,5 mm. Dlatego mając na uwadze uniwersalność aparatów Leutnera wykorzystywanych w Polsce zalecamy do stosowania aparaty Leutnera z przerwą nie większą niż 2 mm. Proponowana do 2 mm przerwa pomiędzy szczękami nie wpłynie istotnie na zmiany wyników szczepności w stosunku do wyników uzyskanych z aparatów bez przerwy. Prace nad standaryzacją badań szczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera (prEN12697-48) wskazują na wprowadzenie i akceptację przerwy w zakresie od 0 do 2,5 mm [5].

5.3. Instrukcja laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera próbek odwierconych z nawierzchni

Opracowaną nową instrukcję do badania szczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera próbek odwierconych z nawierzchni przedstawiono w załączniku 1.

6. OGÓLNE ZASADY TECHNOLOGICZNE ZMIERZAJĄCE DO ZAPEWNIENIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WARSTW ASFALTOWYCH

Identyfikacja i zrozumienie czynników wpływających na właściwe zaprojektowanie i poprawne wykonanie warstwy szczepnej, a za tym uzyskanie dobrej szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych jest podstawowym elementem sukcesu w zakresie połączeń międzywarstwowych.

Siła połączenia międzywarstwowego warstw asfaltowych zależy od wielu czynników materiałowych i środowiskowych, w tym między innymi od:

- warstwy szczepnej,
 - o rodzaju, typu emulsji asfaltowej,
 - o ilości skropienia,
 - o czasu od momentu skropienia do wbudowania następnej warstwy,
 - o temperatury emulsji,
 - o ilości pozostałego asfaltu w warstwie szczepnej (wywożenie na kołach),
- charakterystyki warstw stykających się,
 - o rodzaju mieszanki i uziarnienia,
 - o makrotekstury mieszanki mineralno-asfaltowej warstwy dolnej,
 - o zagęszczenia mieszanki mineralno-asfaltowej,
 - o zawartości asfaltu w mieszankach mineralno-asfaltowych,
- warunków środowiskowych i eksploatacyjnych,
 - o czystości powierzchni warstwy dolnej podczas wbudowania,
 - o temperatury i wilgotności powietrza,
 - o miejsca pobrania próbek z nawierzchni eksploatowanych.

Stosowanie się do podstawowych zasad podanych w dalszej części w czasie projektowania i podczas wykonawstwa konstrukcji nawierzchni związanych z warstwą szczepną minimalizuje niepowodzenie, czyli brak lub ograniczone połączenie międzywarstwowe w konstrukcji nawierzchni. Pojawienie się problemów ze szczepnością międzywarstwową podczas realizacji kontraktu powinno wymusić wzmoczoną kontrolę i zweryfikowanie poszczególnych czynników wpływających na siłę połączenia.

Wyniki badań kontrolnych szczepności międzywarstwowej na polskich budowach realizowanych w latach 2012-2013 zleczanych przez GDDKiA pokazały, że można uzyskać bardzo zadawalające wyniki szczepności międzywarstwowej (patrz rozdział 3). W tym celu należy bezwzględnie przestrzegać zasad niżej opisanych.

6.1. Warstwa szczepna

Warstwa szczepna jest wymagany elementem w procesie technologicznym w budowywania kolejnych warstw konstrukcji nawierzchni (przede wszystkim warstw asfaltowych) dzięki, której podwyższa się skuteczność dobrego połączenia międzywarstwowego. Obecnie w Polsce warstwę szczepną wykonuje się bezpośrednio przed wbudowaniem nowej warstwy konstrukcji nawierzchni poprzez skropienie już wbudowanej warstwy emulsją asfaltową. Czasem skropienie

międzywarstwowe nie jest wymagane. Dotyczy to przede wszystkim technologii kompakt asfaltu oraz asfaltu lanego.

Niektóre emulsje asfaltowe stosowane do skropień mogą obniżać szczepność międzywarstwową w stosunku do braku zastosowanego skropienia. Dzieje się tak wówczas, gdy zastosowana emulsja jest wyprodukowana z miękkiego asfaltu oraz dolna mieszanka mineralno-asfaltowa nie jest eksploatowana przez ruch samochodowy. Zachowana otoczka asfaltowa na ziarnach kruszywa dolnej mieszanki, gdzie zastosowany asfalt jest istotnie twardszy od asfaltu z emulsji.

W technologiach asfaltowych należy stosować specjalnie dedykowane emulsje do skropień międzywarstwowych. Przede wszystkim należy wykorzystywać emulsje szybko rozpadowe, ale można stosować emulsje średnio- i wolno rozpadowe. W skropieniu podbudów z kruszywa niezwiązanego pod warstwy asfaltowe nadają się tylko emulsje asfaltowe średnio- i wolno rozpadowe.

Zastosowanie emulsji asfaltowych do skropień międzywarstwowych wyprodukowanych z twardszych asfaltów podwyższa szczepność. Nie należy stosować do skropień emulsji asfaltowych wyprodukowanych na bazie asfaltu o penetracji większej niż 100 j.p. Należy dążyć do wykorzystywania emulsji z asfaltem o klasę mniejszym od asfaltu w warstwie dolnej stykających się mieszanek mineralno-asfaltowych.

Zastosowanie emulsji asfaltowych modyfikowanych podwyższa szczepność międzywarstwową. Bezwzględnie należy stosować tego typu emulsji podczas wbudowywania cienkich warstw ścieralnych, asfaltów drenażowych oraz innych mieszanek, w których wykorzystano jako lepiszcze asfalt modyfikowany.

Decydujące znaczenie na siłę połączenia ma odpowiednio dobrana ilość skropienia, która zalecana jest w zakresach ilościowych w zależności od rodzaju warstw stykających się. Najlepsze efekty uzyskuje się dobierając niższe ilości skropienia dla nowych, nieeksploatowanych warstw nawierzchni, natomiast wyższe ilości skropienia dla starych i frezowanych oraz niedokładnie oczyszczonych. Należy pamiętać, że zwiększona ilość skropienia z emulsji asfaltowej zwykle obniża szczepność międzywarstwową.

Dokładne oczyszczenie asfaltowej warstwy skrapianej, włączając w proces czyszczenia sprężone powietrze zmniejsza ilość potrzebnego skropienia w stosunku do czyszczenia nawierzchni tylko szczotką.

Praktyka pokazuje, że wydłużenie czasu od rozpadu emulsji do wbudowania następnej warstwy podwyższa szczepność międzywarstwową nawet przy zastosowaniu emulsji szybko rozpadowych. Pozostawienie skropienia z emulsji szybko rozpadowej na min. 2 godziny istotnie poprawia szczepność międzywarstwową.

W momencie stwierdzenia przyklejania się asfaltu ze skropienia emulsją asfaltową do kół samochodów, dowożących mieszankę mineralno-asfaltową do rozkładarki należy skontrolować emulsję asfaltową. Najczęstszą przyczyną takiego zjawiska jest zastosowanie zbyt miękkiego asfaltu w emulsji asfaltowej. Należy zmienić emulsję asfaltową na emulsję z twardszym asfaltem lub zastosować technikę antyadhezyjną. Warstwę szczepną skropić mleczkiem wapiennym, które zapobiega przyklejaniu się asfaltu do kół. Obecnie na rynku dostępne są specjalne produkty do tego celu, produkowane na skalę przemysłową w sposób ciągły.

6.2. Warstwy mineralno-asfaltowe

Wbudowanie odpowiednio uziarnionych, kolejnych warstw mineralno-asfaltowych w konstrukcję nawierzchni może eliminować problemy ze szczepnością międzywarstwową jeżeli będzie zachowana zasada gradacji uziarnienia. Stykające się mieszanki mineralno-asfaltowe powinny być o różnym uziarnieniu w zakresie wymiaru maksymalnego ziarna. Najlepsze efekty, najwyższych sił połączenia międzywarstwowego uzyskuje się przy zastosowaniu grubiej uziarnionej mieszanki w dolnej warstwie, a drobniej uziarnionej w górnej warstwie. W zimnej grubiej uziarnionej mieszance dobrze klinuje się gorąca drobniejsza mieszanka.

W przypadku połączeń warstw niżej leżących należy bezwzględnie dążyć do różnicowania uziarnienia warstw stykających się oraz ograniczania stosowania warstw z kruszywem najgrubszym.

Minimalizacja zawartości asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej zwiększa potencjał do słabszej siły powiązania międzywarstwowego. Jest to szczególnie istotne w gruboziarnistych mieszankach do warstw podbudowy, gdzie brakuje tzw. smaru do dobrego zaklinowania się stykających się mieszanek oraz zwiększa podatność na segregację takiej mieszanki i zakłóca połączenie międzywarstwowe.

Właściwe zagęszczenie stykających się warstw asfaltowych wpływa na korzyść w ocenie szczepności międzywarstwowej. W szczególności zagęszczenie, a raczej właściwa energia zagęszczenia górnej warstwy wpływa na poprawę szczepności. Uzyskuje się wtedy efekt zwiększonego zazębienia stykających się warstw. Wibracja podczas zagęszczania i przestrzeganie reżimów temperaturowych górnej warstwy wpływa na skuteczność połączenia w szczególności warstw wiążących i podbudów asfaltowych. Podczas realizacji dużych kontraktów bardzo wspomagające jest stosowanie podajników pośrednich mieszanek mineralno-asfaltowych do kosza układarki, które zapewniają ujednolicenie temperatury wbudowanej mieszanki i eliminują segregację.

6.3. Warunki środowiskowe i eksploatacyjne

Jednym z zadań skropienia międzywarstwowego jest wiązanie drobnych zanieczyszczeń, kurzu i pyłów z powierzchni skrapianej warstwy. Jednak czystość warstwy skrapianej wpływa na polepszenie szczepności międzywarstwowej. Najlepsze efekty uzyskuje się stosując szczotkę i sprężone powietrze do oczyszczenia powierzchni. W sytuacjach szczególnych to jest obfitego zabrudzenia warstwy asfaltowej gruntem niezbędne jest płukanie wodą, a następnie osuszenie powierzchni sprężonym powietrzem. Najlepiej jeżeli istnieje możliwość pozostawienia warstwy na jakiś czas, żeby woda mogła odparować.

Układanie warstw asfaltowych podczas opadów deszczu lub na mokrej warstwie szczepnej istotnie obniża siłę połączenia stykających się warstw asfaltowych. Godziny poranne w okresach jesiennych ze względu na obniżoną temperaturę powietrza nie są odpowiednie do rozpoczynania robót asfaltowych, gdyż często zdarza się skrapianie lub resublimacja pary wodnej zawartej w powietrzu.

Obserwacje wskazują, że szczepność międzywarstwowa odwierconych próbek przyrasta nawet o 20% w czasie eksploatacji nawierzchni. Wyższe szczepności obserwuje się dla próbek pobranych ze śladów kół niż z pomiędzy kół lub miejsc nie obciążonych ruchem. Jednocześnie zaobserwowano, że zjawisko przyrostu szczepności międzywarstwowej nawierzchni eksploatowanej ma miejsce tylko w przypadku już istniejącej szczepności początkowej.

6.4. Obserwacje i nadzór techniczny

Ostatnim elementem wpływającym na siłę połączenia międzywarstwowego warstw asfaltowych jest czynnik ludzki wciąż obecny podczas realizacji inwestycji drogowej. Niezbędna jest ciągła obserwacja i nadzór techniczny procesu technologicznego, by odpowiednio wcześniej reagować na zaistniałe nieprawidłowości i nie dopuszczać do sytuacji łamania dobrych zasad sztuki inżynierskich, a ewentualne problemy rozwiązywać na bieżąco. Tylko w sytuacjach ewidentnego zaniedbania może być wymagane frezowanie warstw asfaltowych niewłaściwie połączonych.

Literatura

- [1] Al-Qadi I.L., Hasiba K.I., Cortina A.S., Ozer H., Leng Z., Best practices for implementation of tack coat: Part 1, Laboratory Study, Illinois Center for Transportation, 2012, p. 37
- [2] Al-Qadi I.L., Hasiba K.I., Cortina A.S., Ozer H., Leng Z., Best practices for implementation of tack coat: Part 2, Field Study, Illinois Center for Transportation, 2012, p. 83
- [3] Judycki J., Jaskuła P. i inni, Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej, Niepublikowany raport z I i II etapu badań na zlecenie GDDKiA, Gdańsk 2005 i 2006.
- [4] Judycki J., Jaskuła P. i inni, Modelowanie teoretyczne wpływu szczepności międzywarstwowej na zachowanie się nawierzchni asfaltowych, Niepublikowany raport z I i II etapu badań na zlecenie GDDKiA, Gdańsk 2011 i 2012.
- [5] Raab C., Partl M. N., Halim O.A., Developing a Framework for Standardization of Interlayer Bond of Asphalt Pavements, 2012, prezentacja
- [6] Raab C., Partl N. M., Influence of the gap width between the shearing rings on interlayer shear bond testing, ENVIROAD 2009, Warsaw, p.8
- [7] Romanoschi S.A. and Metcalf J.B., Effects of Interface Condition and Horizontal Wheel Loads on the Life of Flexible Pavement Structures, Transportation Research Record 1778 123, 2001, Paper No. 01-2079, p. 123-131
- [8] Yoder E. J., Witczak M. W., Principles of Pavement Design, Second Edition, John Wiley&Sons, 1975

Załącznik 1.

**Instrukcja laboratoryjnego badania szczepności
międzywarstwowej wg metody Leutnera próbek odwierconych z
nawierzchni i wymagania techniczne szczepności**

**INSTRUKCJA LABORATORYJNEGO BADANIA
SCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ
WG METODY LEUTNERA
PRÓBEK ODWIERCONYCH Z NAWIERZCHNI
I
WYMAGANIA TECHNICZNE SCZEPNOŚCI**

Wersja z dnia 30.11.2013

Gdańsk, 2013

Opracowano w:
Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11
tel.: 58 3471347, fax: 58 3471097
sekretariat.kid@wilis.pg.gda.pl

Opracował:
dr inż. Piotr Jaskuła

Opracowano na zlecenie:
Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad
00-874 Warszawa, ul. Wronia 53

INSTRUKCJA LABORATORYJNEGO BADANIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WG METODY LEUTNERA PRÓBEK ODWIERCONYCH Z NAWIERZCHNI I WYMAGANIA TECHNICZNE SZCZEPNOŚCI

SPIS TREŚCI

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	4
2. OKREŚLENIA	4
2.1. BADANIE BEZPOŚREDNIEGO ŚCINANIA	4
2.2. SIŁA ŚCINAJĄCA	4
2.3. PRZEMIESZCZENIE ŚCINANIA	5
2.4. PŁASZCZYZNA ŚCINANIA	5
2.5. MAKSYMALNE NAPRĘŻENIE ŚCINAJĄCE	5
3. POBIERANIE PRÓBEK	5
3.1. ZASADY POBIERANIA PRÓBEK	5
3.2. WIERTNICA	5
3.3 KORONKA WIERTNICZA	5
3.5. WYJMOWANIE I ZNAKOWANIE RDZENIA ODWIERTU	7
3.6. TRANSPORT I SKŁADOWANIE RDZENI WIERTNICZYCH	7
3.7. ILOŚĆ PRÓBEK	7
4. WYKONANIE BADANIA	7
4.1. SPRZĘT	7
4.2. PRÓBKI	9
4.3. WŁAŚCIWOŚCI ZEWNĘTRZNE	9
4.4. PODSTAWOWE WYMAGANIA W ODNIESIENIU DO PRÓBEK	9
4.5. PRZEPROWADZANIE BADANIA	9
4.6. INTERPRETACJA WYNIKÓW	10
4.7. PRZESTAWIENIE WYNIKÓW I RAPORTU Z BADANIA	11
5. KRYTERIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ	12
6. LITERATURA	12

INSTRUKCJA LABORATORYJNEGO BADANIA SCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ WG METODY LEUTNERA PRÓBEK ODWIERCONYCH Z NAWIERZCHNI

I

WYMAGA TECHNICZNE SCZEPNOŚCI

1. Wiadomości ogólne

Do oceny szczepności międzywarstwowej (powiązania warstw) warstw asfaltowych służy badanie bezpośredniego ścinania, przeprowadzane w aparacie ścinającym na próbkach cylindrycznych o średnicy 150 mm w temperaturze +20°C. W badaniu wykorzystuje się próbki odwiercone z nawierzchni lub przygotowane w laboratorium w przypadku badań poznawczych. Podstawą badania jest bezpośrednie ścięcie stykających się warstw ze stałym, wynoszącym 50 mm/min przyrostem przemieszczenia w płaszczyźnie połączenia międzywarstwowego i określenie maksymalnego naprężenia ścinającego. Podczas badania monitorowana jest siła ścinająca w zależności od przemieszczenia ścinania. Sposób pobrania próbki z nawierzchni nie powinien wpływać na powiązanie pomiędzy poszczególnymi warstwami.

Maksymalna siła ścinająca oznacza stan ścięcia, przy którym powiązanie pomiędzy obydwooma warstwami ulega zniszczeniu. Grubość ścinanej warstwy (warstwy górnej, odcinanej) ze względu na warunki techniczne musi wynosić, co najmniej 30 mm. Maksymalna siła ścinająca i przemieszczenie ścinania są uzależnione od parametrów wpływających na zazębienie warstw (tj. tekstura powierzchni, głębokość zagłębień, wymiar maksymalnego ziarna, zawartość wolnych przestrzeni, wskaźnik zagęszczenia, stan powierzchni warstwy dolnej), oraz sklejenia warstw (tj. adhezja, kohezja, objętość mastyksu, rodzaj i ilość skropienia, stan powierzchni warstwy dolnej). W oparciu o współzależność przy ocenie stopnia powiązania warstw, muszą być uwzględnione zarówno siła ścinająca, jak i przemieszczenie ścinania.

2. Określenia

2.1. Badanie bezpośredniego ścinania

Podczas badania bezpośredniego ścinania ważny jest bezpośredni, wolny od momentów zginających przebieg ścinania w płaszczyźnie ścinania (granica warstw), na rdzeniach wiertniczych o średnicy 150 mm, przy zachowaniu warunków badania podanych w niniejszej instrukcji badania.

2.2. Siła ścinająca

Siła ścinająca $F_{\max}$ jest to maksymalna siła, którą określa się w badaniu bezpośredniego ścinania, występująca w płaszczyźnie ścinania (granica sąsiednich warstw).

2.3. Przemieszczenie ścinania

Przemieszczenie ścinania S jest to korygowane przesunięcie szczęk ścinających mierzone w kierunku obciążenia przy osiągnięciu siły ścinającej $F_{\max}$. Korekta przemieszczenia wymagana jest niekiedy ze względu na początkowe dopasowanie się szczęk ścinających.

2.4. Płaszczyzna ścinania

Płaszczyzna ścinania jest to płaszczyzna oddzielająca warstwy, w której przeprowadzane jest bezpośrednie ścinanie. Powinna ona być tożsama z powierzchnią graniczną pomiędzy dwiema sąsiednimi warstwami próbki walcowej odwierconej z nawierzchni lub zagęszczonej w formie.

2.5. Maksymalne naprężenie ścinające

Maksymalne naprężenie ścinające jest to maksymalna wartość naprężenia ścinającego, wyznaczonego jako iloraz maksymalnej siły ścinającej $F_{\max}$ i pola przekroju A próbki wyznaczonego przed badaniem ścinania.

3. Pobieranie próbek

3.1. Zasady pobierania próbek

Rdzenie wiertnicze do badań szczepności międzywarstwowej należy pobrać w ramach badań kontrolnych, możliwie przed oddaniem nowej drogi do ruchu.

Odwiert powinien być tak przeprowadzony, aby rdzeń uzyskany był bez uszkodzeń, z gładką poboczną bez rowków na powierzchni, prostopadle do górnej powierzchni drogi.

W celu identyfikacji położenia i pozycji na rdzeniu wiertniczym należy przed przystąpieniem do odwiertu nanieść niezbędne oznakowania (np. strzałki w kierunku ruchu).

3.2. Wiertnica

Wiertnica do wykonania odwiertu musi posiadać stabilny, odporny na skręcanie mechanizm do precyzyjnego opuszczania i przesuwania koronki wiertniczej. Ciężar własny wiertnicy musi być na tyle duży, aby podczas wykonywania odwiertu mógł służyć jako opór, a tym samym wykluczać wibracje, przemieszczenia lub przesunięcia.

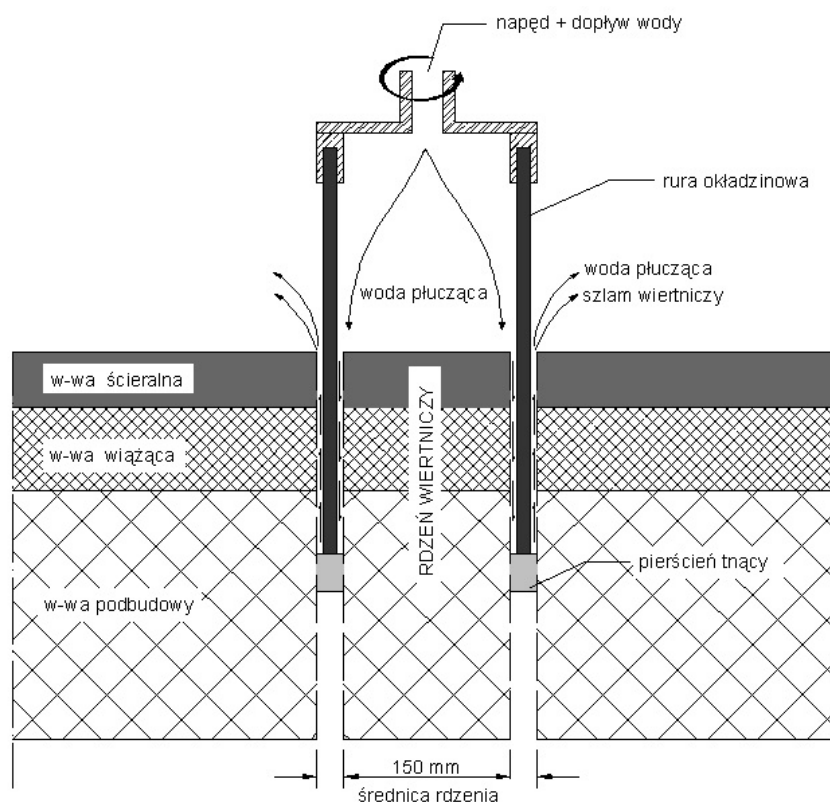
Podczas wykonywania odwiertu należy odpowiednio dobrać i ustalić liczbę obrotów silnika, ilość dodawanej wody oraz prędkość przesuwu wiertła w głąb tak, aby było zapewnione prawidłowe cięcie rdzenia.

3.3 Koronka wiertnicza

Koronka wiertnicza (o średnicy wewnętrznej 150 mm) składa się z pierścienia tnącego ze specjalnego stopu stali i piasku diamentowego oraz kanałów (przerw) do prowadzenia wody płuczającej, jak również z rury okładzinowej, której długość musi być dobrana odpowiednio do głębokości przewidywanego odwiertu.

3.4. Wiadomości podstawowe o przebiegu procesu odwiertu

Rys. 1 przedstawia ideowy szkic przebiegu odwiertu w nawierzchni.



Rys. 1: Ideowy szkic dla opisu przebiegu odwiertu

Średnica rdzenia odwiertu odpowiada wewnętrznej średnicy pierścienia tnącego, o wewnętrznej średnicy 150 mm. Na skutek zużycia pierścienia tnącego powiększa się automatycznie wewnętrzna średnica pierścienia tnącego i odpowiednio do stopnia zużycia uzyskuje się większe średnice rdzenia wiertniczego. Równocześnie zmniejsza się przy tym tzw. wcięcie. Od określonego stanu zużycia wcięcie staje się tak małe, że utrudniony jest odpływ wody płuczącej, a tym samym proces odwiertu musi być przerwany, ponieważ swobodne płukanie rdzenia odwiertu oraz transport szlamu wiertniczego jest utrudniony, co może prowadzić do uszkodzenia rdzenia.

W przypadku, gdy ziarna lub elementy rdzenia ulegną trwałemu zaklinowaniu wewnątrz koronki wiertniczej należy je wyjąć po zdemontowaniu koronki. Rdzenie te nie mogą być już wykorzystywane do badania szczepności międzywarstwowej. Zaobserwowano, że wielokrotne delikatne uderzenia lub pukania w wysoko uniesioną koronkę rdzeniową, w niektórych przypadkach oszczędza demontaż koronki rdzeniowej. Jednak zbyt silne uderzenia (np. przy użyciu stalowego młotka) prowadzą do miejscowego zmniejszenia wewnętrznej średnicy rury wiertniczej tak, że możliwe staje się zaklinowanie rdzenia w koronce.

Koronkę wiertniczą należy wymienić, gdy występują następujące efekty:

- klinowanie się materiału: odłamane części lub pojedyncze ziarna kruszywa rdzenia pomiędzy rurą a poboczną rdzenia odwiertu. Występuje wzrost tarcia, a rdzeń poddany jest bardzo dużym, niepożądanym momentom skręcającym;
- nierówne powierzchnie płaszcza rdzenia odwiertu;
- problemy przy wyjmowaniu rdzenia z nawierzchni przy pomocy kleszczy chwytnych na skutek zbyt wąskiego wcięcia pomiędzy rdzeniem a nawierzchnią.

3.5. Wyjmowanie i znakowanie rdzenia odwiertu

Po zakończeniu czynności wiertniczych należy wyjąć rdzeń przy pomocy kleszczy chwytnych. Szczęki kleszczy muszą obejmować rdzeń możliwie głęboko, przylegając w pełni ze wszystkich stron, ale tak, aby nie uszkodzić rdzenia. Delikatne wyżłobienia w szczękach kleszczy, podnoszą ich przyczepność przy obejmowaniu rdzeni odwiertów.

Odłamywanie rdzenia nie odwierconego na całej głębokości (przy użyciu śrubokręta lub podobnego narzędzia) jest niewskazane, gdyż może osłabiać połączenia międzywarstwowe.

W przypadku, gdy podczas wyjmowania rdzenia brak jest powiązania, to znaczy poszczególne warstwy muszą być wyjmowane oddzielnie, należy fakt ten zaznaczyć w protokole pobrania próbek z podaniem poszczególnych warstw oraz ich kolejności i położenia.

Wszystkie rdzenie, a przy braku powiązania warstw również poszczególne warstwy należy jednoznacznie oznakować.

3.6. Transport i składowanie rdzeni wiertniczych

Po wyjęciu z nawierzchni rdzenie powinny być chronione przed wysoką temperaturą i przetransportowane niezwłocznie do laboratorium w sposób zapobiegający ich deformacji.

Podczas transportu należy unikać dodatkowych uszkodzeń, zgnieceń, odłamów.

Rdzenie należy transportować w pozycji leżącej, zabezpieczone przed przewracaniem i uderzeniami lub w pozycji stojącej, górną powierzchnią skierowaną ku dołowi, na płaskiej powierzchni.

Do chwili badania rdzenie należy przechowywać w zamkniętych pomieszczeniach, w temperaturze pokojowej, w pozycji leżącej bez wzajemnego dotykania się.

3.7. Ilość próbek

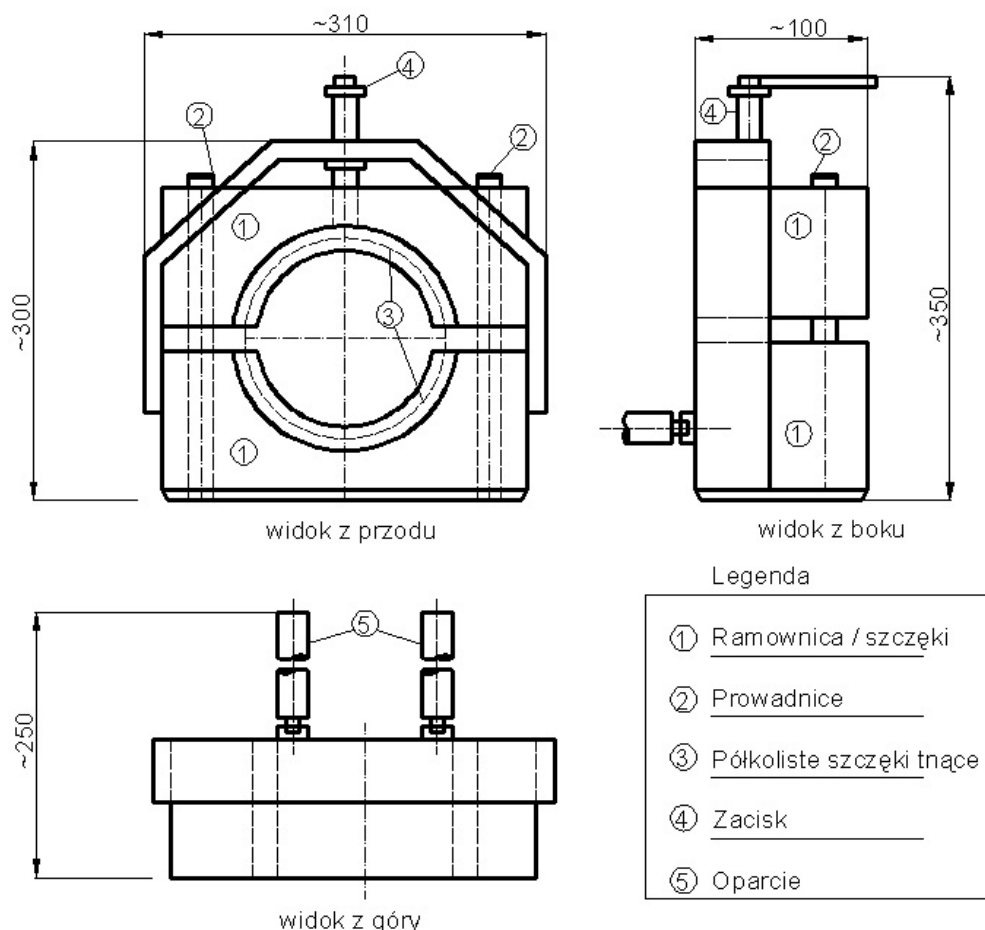
Z każdego miejsca odwiertu należy pobrać dwa rdzenie.

4. Wykonanie badania

4.1. Sprzęt

- suwmiarka o zakresie pomiaru i odczytu, minimum 160 mm,
- pisak do znakowania (kreda olejowa, pisak olejowy itp.),
- aparat ścinający z nasadkami szczękowymi o średnicy 148/150 mm oraz 150/152 mm (patrz rys 2),

- maszyna wytrzymałościowa, umożliwiająca utrzymanie stałej prędkości przesuwu tłoka podczas obciążenia równej $50 \text{ mm/min} \pm 3 \text{ mm/min}$ z automatycznym rejestrem wyników; siła w zakresie od 0 do 50 kN i przemieszczenie ścięcia od 0 do 8 mm,
- komora klimatyczna z nawiewem powietrza,
- termometr,
- aparat Leutnera (rys. 2).



Rys. 2: Aparat ścinający wg. metody Leutnera (wymiarów w mm)

Aparat ścinający wg Leutnera, przedstawiono z podstawowymi wymiarami na rys. 2. Dwuczęściowa masywna ramownica (1) wykonana jest z aluminium. Obie części to idealnie równoległe, prowadzone w liniowych kulowych łożyskach na dwóch utwardzonych precyzyjnych prowadnicach (2), półkoliste szczęki tnące (3), które działają w płaszczyźnie ścinania rdzenia. W szczękach wbudowane są stalowe, utwardzone wstawki szczęk tnących, które są wymienne dla rdzeni o średnicy od 148 mm do 152 mm. Przeznaczony do badania rdzeni ryglowany jest zaciskiem (4), przez szczękę zaciskową z wpuszczonym filcowym paskiem. Z drugiej strony aparatu ścinającego umieszczony jest oparcie (5) dla długich rdzeni. To dodatkowe oparcie poprzez dwa pręty nakładkowe z mimośrodem można dopasować do różnych średnic rdzeni.

Dopuszcza się przerwę pomiędzy szczękami ścinającymi w płaszczyźnie ścinania wynoszącą od 0 do 2 mm.

4.2. Próbk

4.2.1. Kształt próbek

Jako próbki służą rdzenie o średnicy $150 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, odwiercane z nawierzchni lub próbki przygotowane w laboratorium. Próbki przygotowywane w laboratorium zagęszcza się wg PN EN12697-31 lub PN EN12697-33.

4.2.2. Ilość próbek

Minimum dwa rdzenie z jednego miejsca pobrania lub dwa rdzenie/próbki walcowe tak samo zagęszczone w laboratorium.

4.3. Właściwości zewnętrzne

Poszczególne warstwy rdzenia powinny być jednorodne i nieuszkodzone (uszkodzenia rozumie się przez: rozpad, ubytki mastyksu, niedostateczne zagęszczenie, spękanie, ubytki ziaren i zanieczyszczenia). Należy dokonać oceny wizualnej badanych próbek.

Powierzchnia boczna próbek musi być wolna od nierówności, rowków i śladów po zatrzymaniu koronki wiertniczej podczas pobierania. Płaszczyzna ścięcia musi być prostopadła do powierzchni bocznej próbek. Należy zmierzyć średnicę próbki i grubości poszczególnych warstw.

4.4. Podstawowe wymagania w odniesieniu do próbek

4.4.1. Grubość warstw

Aparat ścinający wg Leutnera wymaga minimalnej grubości warstw od 30 mm dla warstwy odcinanej (górnej warstwy). Natomiast warstwy leżące poniżej muszą łącznie wykazywać długość minimum 70 mm, przez co możliwe jest stabilne (pewne) umocowanie rdzenia w aparacie ścinającym.

Dokładne oznakowanie granic warstw oraz ustalenie ich grubości należy przeprowadzić przed rozpoczęciem badania ścinania i termostatowania.

4.4.2. Ortogonalność granicy warstwy w stosunku do powierzchni pobocznic próbki

Badanie ścinania bezpośredniego powinno być przeprowadzone na granicy warstw, która przebiega ortogonalnie w stosunku do powierzchni pobocznic próbki. Przy granicach warstw skośnych do 5 mm należy występujący skos uwzględnić przy wkładaniu rdzenia do urządzenia ścinającego. Rdzenie, w których granice warstw posiadają skos przekraczający 5 mm należy odrzucić.

4.5. Przeprowadzanie badania

4.5.1. Przygotowanie próbek

Po wykonaniu czynności wstępnych podanych w punktach 4.2 do 4.4 należy doprowadzić próbki do temperatury badania tj. $+20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ przez minimum 12 godzin (komora klimatyczna z nawiewem powietrza, celem osuszenia próbek po odwiercie). Podczas termostatowania rdzenie należy przechowywać w pozycji leżącej tak, żeby rdzenie nie stykały się.

4.5.2 Przygotowanie aparatu ścinającego

Aparat ścinający wraz ze szczękami tnącymi oraz rdzeniem o ustalonej zgodnie z rozdziałem 4.3 średnicą należy ustawić pod prasą wytrzymałościową. Aby uniknąć częstej wymiany szczęk tnących celowym jest, aby już podczas przygotowywania rdzeni dokonać segregacji na grupy o tych samych średnicach.

4.5.3. Badanie ścinania

Czas od wyjęcia próbek z komory klimatycznej do zakończenia badania nie może przekraczać 10 minut.

Poprzez wizualną kontrolę należy stwierdzić czy szczęki tnące zostały dobrane prawidłowo, a rdzeń przylega całym obwodem do szczęk ścinających.

Poprzez obracanie rdzenia w kierunku radialnym, względnie przez przesuw w kierunku osiowym należy możliwie optymalnie dopasować płaszczyznę ścinania do granicy warstwy.

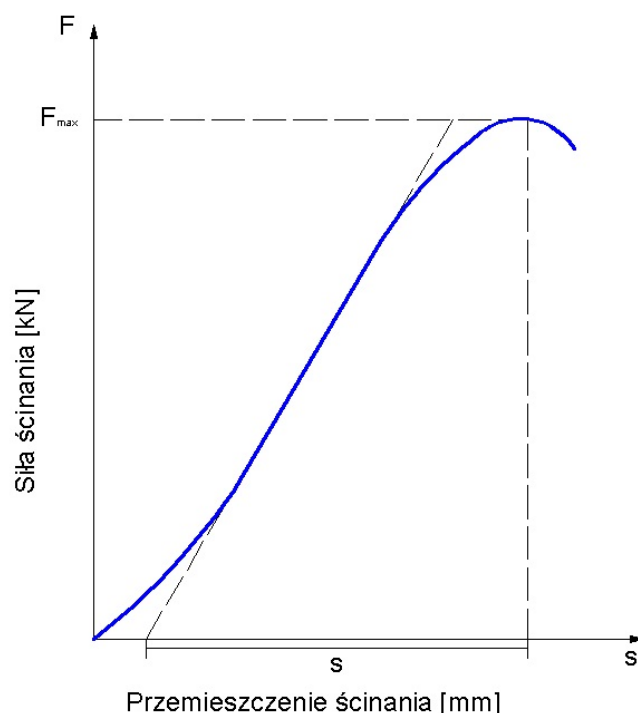
Poprzez silne dokręcenie śruby na zacisku rdzeń zostaje zablokowany do badania bezpośredniego ścinania.

Proces ścinania następuje z prędkością przesuwu tłoka równą 50 mm/min $\pm$ 3 mm/min aż do osiągnięcia maksymalnej siły, momentu ścięcia rdzenia, względnie do osiągnięcia podyktowanej konstrukcyjnymi względami maksymalnego przemieszczenia ścinania równego 8 mm. Podczas badania należy wykreślić zależność siła–przemieszczenie.

Dalsze kontrolowanie temperatury rdzenia podczas przebiegu badania ścinania (przy pokojowej temperaturze) nie jest potrzebne, jeżeli okres czasu od wyjęcia z komory termostatycznej do zakończenia procesu ścinania nie przekracza 10 minut. Jeżeli na jednym rdzeniu badaniu ścinania mają być poddane liczne warstwy wówczas należy wykonywać badanie odpowiednio (w kolejności) do układu warstw, rozpoczynając od warstwy najwyższej. Łączny czas trwania badania – maksymalnie 10 minut, nie powinien być przekroczony.

4.6. Interpretacja wyników

Podstawą do interpretacji wyników jest wykres siła–przemieszczenie powstały podczas badania (patrz podstawowy szkic na rys. 3). Maksimum siły ścinającej przedstawia stan zniszczenia. Dla ustalenia przemieszczenia ścinania, jak to pokazano na rys. 3 należy poprowadzić styczną do liniowej części krzywej wykresu siła–przemieszczenie. Punkt przecięcia stycznej i osi przemieszczenia jest punktem zero dla pomiaru przemieszczenia; koniec przemieszczenia ścinania S jest określony przez maksymalną siłę $F_{\max}$.



Rys. 3: Podstawowy wykres przebiegu siły ścinającej w zależności od przemieszczenia ścinania przy badaniu ścinania bezpośredniego

4.7. Przetworzenie wyników i raportu z badania

Jako wynik badania należy dla każdego przeprowadzonego pomiaru podać maksymalną siłę ścinającą $F_{\max}$, przemieszczenie ścinania S oraz wyliczone maksymalne naprężenie ścinające $\tau_{\max}$.

Maksymalne naprężenie ścinające należy obliczyć zgodnie ze wzorem:

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

gdzie: $\tau_{\max}$ – maksymalne naprężenie ścinające [MPa], $F_{\max}$ – maksymalna siła ścinająca [kN], D – średnica rdzenia określona przed badaniem ścinania [mm].

Wynikiem końcowym jest wartość średnia maksymalnego naprężenia ścinającego obliczonego z dwóch oznaczeń wykonanych na próbkach pobranych z jednego miejsca lub wykonanych w jednakowych warunkach laboratoryjnych.

Raport z badania powinien zawierać:

- odwołanie do metody badania oraz warunków badania,
- opis materiałów z dwóch warstw,
- rodzaj i ilość skropienia międzywarstwowego (jeżeli jest znane),
- dla każdego badanego rdzenia zapis:
 - średnicy i grubości warstw z dokładnością do 1 mm,
 - maksymalną siłę ścinającą z dokładnością do 0,1 kN,
 - przemieszczenie ścinania z dokładnością do 0,1 mm,
 - maksymalne naprężenie ścinające z dokładnością do 0,1 MPa,

- jakiegokolwiek spękanie lub inne uszkodzenie rdzenia,
- temperaturę badania z dokładnością do 0,5°C,
- wszystkie odstępstwa od przedstawionej metody powinny zostać zanotowane w raporcie z badań.

5. Kryteria szczepności międzywarstwowej

Kryteria szczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera w warstwach asfaltowych przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Kryteria szczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera w temperaturze +20°C

Połączenie warstw	Kryterium szczepności międzywarstwowej
Ścieralna-wiążąca	1,0 MPa
Wiążąca-podbudowa	0,7 MPa
Podbudowa-podbudowa	0,6 MPa

6. Literatura

- [1] ALP A-StB, Teil 4, Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrsweisen, Ausgabe 1999
- [2] MCDHW, 954, Method for Laboratory Determination of Interface Properties using the Modified Leutner Shear Test, UK 08/2008
- [3] Zeszyt 66 IBDiM, Załącznik do: Zalecenia stosowania geowłóknin w warstwach asfaltowych nawierzchni drogowych, IBDiM Warszawa 2004
- [4] prEN 12697-48, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 48: Interlayer Bonding, October 2013
- [5] PN-EN 12697-31 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 31: Próbki przygotowane w prasie żyratorowej
- [6] PN-EN 12697-33 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 33: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem wałującym
- [7] Judycki J., Jaskuła P. i inni, Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej, Niepublikowany raport z I i II etapu badań na zlecenie GDDKiA, Gdańsk 2005 i 2006.
(http://gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-zrealizow_3435/documents/gddkia-jaskua-etapi.pdf, http://gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-zrealizow_3435/documents/gddkia-jaskula-etapii.pdf)
- [8] Judycki J., Jaskuła P. i inni, Modelowanie teoretyczne wpływu szczepności międzywarstwowej na zachowanie się nawierzchni asfaltowych, Niepublikowany raport z I i II etapu badań na zlecenie GDDKiA, Gdańsk 2011 i 2012.
(https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-w-trakcie_3434/Szczepnosc-Etap1_2011.pdf, https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-w-trakcie_3434/Szczepnosc-Etap2_2012.pdf)