



POLITECHNIKA GDAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Zakład Budowy Dróg

ul. G. Narutowicza 11
80-952 GDAŃSK

Tel: (0-58) 347 13 47
Fax: (0-58) 347 10 97

**BADANIA I OCENA WPŁYWU SCZEPNOŚCI
MIĘDZYWARSTWOWEJ NA TRWAŁOŚĆ
KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ**

RAPORT Z DRUGIEGO ETAPU BADAŃ

Opracowano na zlecenie:
Generalna Dyrekcja Dróg
Krajowych i Autostrad
ul. Żelazna 59
00-848 WARSZAWA
Umowa Nr WILiŚ/110/002/2005

Opracowali:

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

Dr inż. Piotr Jaskuła

Mgr inż. Tadeusz Fronc
Mgr inż. Tomasz Sierosławski

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

Gdańsk, październik 2006

BADANIA I OCENA WPŁYWU SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ – II ETAP

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	5
1. WSTĘP	7
1.1. PODSTAWA OPRACOWANIA.....	7
1.2. CEL I ZAKRES	7
1.3. OPIS PROBLEMU.....	7
2. PRZEGLĄD LITERATURY.....	9
2.1. ZESTAWIENIE METOD BADAWCZYCH.....	9
2.2. ZESTAWIENIE WYMAGAŃ DOTYCZĄCYCH SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ	11
2.3. WYKONANIE WARSTW SZCZEPNYCH	12
2.4. PROCEDURY KONTROLNE WYKONANIA WARSTW SZCZEPNYCH	14
2.4. MODELE OBLICZENIOWE SYMULUJĄCE SZCZEPNOŚĆ MIĘDZYWARSTWOWĄ.....	17
2.3.1 <i>Model belki wolno podpartej wielokrotnej i złożonej.....</i>	<i>17</i>
2.3.2. <i>Model sprężystej półprzestrzeni warstwowej</i>	<i>21</i>
2.3.2.1. <i>Program komputerowy BISAR-3</i>	<i>24</i>
2.3.2.2. <i>Szczepność międzywarstwowa w programie PADAL.....</i>	<i>25</i>
2.3.2.3. <i>Szczepność międzywarstwowa w programie WESLEA.....</i>	<i>26</i>
2.3.3. <i>Modelowanie przy pomocy MES (metody elementów skończonych).....</i>	<i>27</i>
2.3.3.1. <i>Szczepność międzywarstwowa w programie ABAQUS.....</i>	<i>27</i>
2.3.3.2. <i>Szczepność międzywarstwowa w programie ANSYS.....</i>	<i>28</i>
3. BADANIA LABORATORYJNE WYKONANE W POLITECHNICIE GDAŃSKIEJ	29
3.1. MATERIAŁ WYJŚCIOWY.....	29
3.2. METODYKA BADAWCZA	29
3.3. WYNIKI BADAŃ.....	30
3.4. OCENA WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH	33
4. ODCINEK DOŚWIADCZALNY	34
4.1. WSTĘP	34
4.2. LOKALIZACJA.....	35
4.3. MATERIAŁY I PRACE PRZYGOTOWAWCZE	35
4.4. WARSTWA SZCZEPNA	38
4.5. BADANIA SZCZEPNOŚCI PRÓBEK WYCIĘTYCH Z ODCINKA DOŚWIADCZALNEGO	45
4.5.1. <i>Ocena wyników badań szczepności próbek z odcinka doświadczalnego</i>	<i>53</i>
4.6. BADANIE FWD	53
4.7. WYNIKI BADAŃ FWD.....	54
4.8. OBLICZENIA ODWROTNE.....	55
4.9. OCENA MODUŁÓW WARSTW ASFALTOWYCH Z OBLICZEŃ ODWROTNYCH	58
5. ANALIZY OBLICZENIOWE SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ	61
5.1. WPROWADZENIE	61
5.2. DANE WYJŚCIOWE	61
5.2.1. <i>Obciążenie.....</i>	<i>61</i>
5.2.2. <i>Stałe materiałowe</i>	<i>61</i>
5.2.3. <i>Model obliczeniowy nawierzchni</i>	<i>62</i>
5.2.4. <i>Kryteria trwałości nawierzchni</i>	<i>63</i>
5.2.5. <i>Program komputerowy</i>	<i>64</i>

5.2.6. Kalibracja metody obliczeń	66
5.2.6.1. Kalibracja metody obliczeń przy pomocy odkształcenia poziomego	67
5.2.6.2. Kalibracja metody obliczeń przy pomocy różnicy odkształceń	71
5.2.6.3. Kalibracja metody obliczeń przy pomocy względnego przesunięcia	72
5.3. WPŁYW MIEJSCA BRAKU ZWIĄZANIA NA TRWAŁOŚĆ NAWIERZCHNI	75
5.3.1. Przegląd publikacji	75
5.3.2. Warianty obliczeniowe	77
5.3.3. Stan naprężeń i odkształceń w nawierzchni KR6	79
5.3.4. Analiza wpływu miejsca braku szczepności na trwałość nawierzchni KR6	81
5.3.5. Analizy wpływu miejsca braku szczepności w nawierzchni dla ruchu KR3	88
5.3.6. Porównanie pracy konstrukcji nawierzchni KR3 i KR6	88
5.4. MODELOWANIE WARSTWY SZCZEPNEJ	89
5.4.1. Wprowadzenie	89
5.4.2. Modele obliczeniowe	90
5.4.2. Wpływ warstwy szczepnej na trwałość podatnej konstrukcji nawierzchni	91
5.4.3. Porównanie pracy konstrukcji nawierzchni z symulacją utraty szczepności i nawierzchni z warstwą szczepną	95
5.5. WPŁYW GRUBOŚCI WARSTWY ŚCIERALNEJ NA NAPRĘŻENIA ROZCIĄGAJĄCE PRZY RÓŻNYCH STOPNIACH POŁĄCZENIA WARSTW	96
5.5.1. Modele obliczeniowe	96
5.5.2. Grubość warstwy ścieralnej a trwałość nawierzchni, przy różnych wariantach wystąpienia braku szczepności	96
5.5.3. Grubość warstwy ścieralnej a różne kryteria trwałości nawierzchni	99
5.6. WPŁYW ZWIĄZANIA MIĘDZYWARSTWOWEGO NA UGIĘCIA NAWIERZCHNI	103
6. WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH PRAC W ROKU 2005 I 2006	105
7. ZALECENIA DO WPROWADZENIA W POLSCE	107
7.1. INSTRUKCJE KONTROLI WARSTWY SZCZEPNEJ	107
7.2. ZALECENIA DO PROJEKTOWANIA KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI METODAMI MECHANISTYCZNYMI	107
LITERATURA	108
ZAŁĄCZNIK 1. INSTRUKCJA BADANIA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ PRÓBEK POBRANYCH Z BUDOWY	110
ZAŁĄCZNIK 2. KONTROLA APLIKACJI WARSTWY SZCZEPNEJ NA BUDOWIE	118
ZAŁĄCZNIK 3 STAN NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ ORAZ ANALIZA WPŁYWU MIEJSCA BRAKU SZCZEPNOŚCI W NAWIERZCHNI DLA RUCHU KR3	121
ZAŁĄCZNIK 4 UGIĘCIA W NAWIERZCHNI DLA RUCHU KR6 I KR3	133

Streszczenie

Niniejszy raport z badań, dotyczący zagadnień związanych ze szczepnością międzywarstwową w konstrukcji nawierzchni drogowej, stanowi kontynuację badań i analiz rozpoczętych w 2005 r. (I etap) i nie zawiera powtórek z I etapu. Raport ten stanowi II etap wykonanych prac zamówionych przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie, zgodnie z umową Nr WILiŚ/110/002/2005.

Szczepność lub związanie między warstwami asfaltowymi ma podstawowe znaczenie dla trwałości nawierzchni drogowej. Dzięki szczepności zespół warstw konstrukcji może przenosić naprężenia ścinające i odrywające. Jeżeli między warstwami konstrukcji wystąpi poślizg to jej nośność gwałtownie spadnie i szybko może ulec uszkodzeniu.

Na podstawie studiów literatury dokonano zestawienia metod badania i oceny szczepności międzywarstwowej. Omówiono metodę kontroli ilości sprysku międzywarstwowego na budowie oraz przedstawiono metody modelowania szczepności międzywarstwowej w obliczeniach nawierzchni.

W części badawczej opisano ciąg dalszy badań laboratoryjnych, rozpoczętych już w I etapie. Przedstawiono wyniki badań terenowych z odcinka doświadczalnego wykonanego dla potrzeb niniejszych badań w 2006 r., gdzie regulowano szczepność międzywarstwową w konstrukcji drogi dla potrzeb opracowania.

Przedstawiono także dalsze analizy obliczeniowe wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni, wykorzystując metody mechanistyczno-empiryczne dla modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej.

W wykonanych badaniach szczepności międzywarstwowej wykorzystano metodę Leutnera. Przebadano próbki:

- przygotowane w laboratorium, zagęszczane małym walcem drogowym, z warstwą szczepną nanoszoną natryskowo, a następnie odwiercane oraz,
- próbki odwiercone z odcinka doświadczalnego nawierzchni drogowej.

Analizy obliczeniowe dotyczyły wpływu szczepności na trwałość konstrukcji zależnie od:

- miejsca w konstrukcji nawierzchni,
- siły szczepienia,
- rodzaju konstrukcji.

Pracę zakończono wnioskami z I i II etapu badań oraz zaleceniami dotyczącymi szczepności międzywarstwowej dla warunków polskich.

BADANIA I OCENA WPŁYWU SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ – II etap

1. Wstęp

1.1. Podstawa opracowania

Opracowanie wykonano na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie (GDDKiA w Warszawie) w ramach umowy nr WIL/F/110./002/2005, wg harmonogramu dla etapu II.

1.2. Cel i zakres

Celem pracy jest zbadanie szczepności międzywarstwowej na próbkach laboratoryjnych i pobranych z terenu, analiza wpływu wybranych czynników zmniejszających szczepność oraz analiza wpływu szczepności na trwałość nawierzchni drogowej. Studia literatury i badania laboratoryjne zmierzają do uściślenia instrukcji i wymagań dotyczących szczepności międzywarstwowej przy zastosowaniu metody Leutnera oraz do określenia zaleceń w zakresie projektowania konstrukcji nawierzchni.

W zakres pracy wchodzi:

I Etap (zakres na rok 2005)

- Studia literatury,
- Badania laboratoryjne z zastosowaniem aparatu Leutner'a,
- Badania terenowe.
- Analizy obliczeniowe oparte o model konstrukcji nawierzchni z pełną, ograniczoną szczepnością i z brakiem szczepności.

II Etap (zakres na rok 2006)

- Dodatkowe badania laboratoryjne,
- Dodatkowe badania terenowe: odcinek doświadczalny,
- Analizy i wnioski z badań laboratoryjnych i terenowych,
- Analizy obliczeniowe oparte o model konstrukcji nawierzchni z pełną, ograniczoną szczepnością i z brakiem szczepności,
- Określenie wpływu szczepności międzywarstwowej na stan nawierzchni,
- Instrukcja badania i wymagania względem szczepności międzywarstwowej.

1.3. Opis problemu

Wzrastające natężenie ruchu, większe obciążenia osi, zwiększone ciśnienie w oponie, prowadzą do większych obciążeń konstrukcji nawierzchni drogowej. Dla uniknięcia powstawania kolein i spękań w nawierzchniach asfaltowych, niezbędne jest powiązanie wszystkich warstw konstrukcji nawierzchni. Niewystarczające

powiązanie międzywarstwowe (szczepność) powoduje zwiększone ugięcia nawierzchni, te zaś generują zwiększone odkształcenia i naprężenia rozciągające na spodzie poszczególnych warstw. Przy nałożeniu się niekorzystnych warunków obciążenia i stanu konstrukcji mogą wystąpić przedwczesne deformacje (np. koleiny), wybrzuszenia, boczne przesunięcia lub też strukturalne uszkodzenia w postaci spękań, wyłomów lub odprysków. Tak więc, trwałość zmęczeniowa wielowarstwowej konstrukcji nawierzchni drogowej zależy od szczepności między różnorodnymi warstwami konstrukcji.

W większości metod do projektowania podatnych nawierzchni drogowych zakłada się pełną szczepność międzywarstwową. Osiągnięcie projektowanych ugięć, nośności i trwałości zmęczeniowej jest istotnie zależne od właściwego przeniesienia naprężeń ścinających pomiędzy różnymi warstwami konstrukcji, poprzez zagwarantowanie właściwej szczepności międzywarstwowej.

W ostatnich latach po wprowadzeniu w Polsce sztywnych mieszanek, ubogich w asfalt, obserwuje się zmniejszenie szczepności międzywarstwowej, która osłabia nowobudowane i remontowane konstrukcje nawierzchni. Zmniejszenie szczepności lub jej brak może też wywołać niewłaściwe wbudowanie geosyntetyku pomiędzy warstwy asfaltowe.

W Polsce brak jest też normatywnej metody i kryteriów oceny szczepności międzywarstwowej, co utrudnia odbiory nowobudowanych i remontowanych nawierzchni. Jednocześnie nie jest jednoznacznie wiadomo, jak uwzględnić zmienną szczepność w projektowaniu strukturalnym konstrukcji nawierzchni.

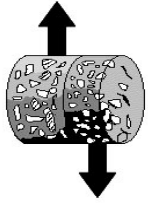
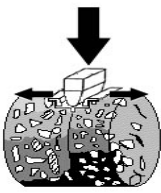


Biorąc pod uwagę zagrożenie obniżenia trwałości zmęczeniowej (żywoności) nawierzchni asfaltowych poprzez zakłócenia szczepności międzywarstwowej (celowe ograniczenie szczepności), ostatnio występującej na polskich drogach wydaje się być zasadne dokładne przybliżenie czynników decydujących o pełnej szczepności, metod badania szczepności, jak i sposobów zwiększania szczepności. W Zakładzie Budowy Dróg Politechniki Gdańskiej badania szczepności międzywarstwowej prowadzone są od roku 2000.

2. Przegląd literatury

2.1. Zestawienie metod badawczych

W etapie I pracy [1] dokładnie omówiono wszystkie metody badań szczepności międzywarstwowej, przedstawione w dostępnej literaturze przedmiotu. W tablicy 2.1 podsumowano przegląd metod badawczych warstw szczepnych oraz kontroli szczepności międzywarstwowej w zależności od schematu badawczego.

Tablica 2.1. Zestawienie metod badawczych w zależności od schematu badania

Lp.	Model metody badawczej	Metoda badania szczepności
1	Ścinanie proste	 Aparat Leutnera, aparat LPDS, modyfikacje prasy Marshalla, aparat skrzynkowy, aparat ASTRA
2	Rozłupywanie	 Klinowy test rozłupywania
3	Odrywanie	 Test odrywania - "pull-off"
4	Skręcanie	 Badanie scinania przez skręcanie

W tablicach 2.2 i 2.3 zestawiono kraje pochodzenia metod badawczych i kraje stosujące te metody oraz przypisano metodom badawczym odpowiednie sposoby zagęszczania próbek do badań.

Tablica 2.2. Pochodzenie metod badawczych i zestawienie krajów stosujących daną metodę

Lp.	Metoda badania szczepności	Kraj pochodzenia metody	Kraje stosujące
1	Aparat Leutner'a	Niemcy	Niemcy, Austria, Polska, Wielka Brytania, USA
2	Aparat LPDS	Szwajcaria	Szwajcaria
3	Aparat ASTRA	Włochy	Włochy
4	Aparat skrzynkowy	USA	USA, Wielka Brytania
5	Klinowy test rozłupywania	Austria	Austria
6	Test odrywania	Austria, Niemcy	Austria, Niemcy, USA, Szwajcaria
7	Ścinanie przez skręcanie	Wielka Brytania	Wielka Brytania
8	Metoda FWD	Wielka Brytania	Wielka Brytania
9	Młotek impulsowy	Wielka Brytania	Wielka Brytania

Tablica 2.3. Sposoby zagęszczenia próbek dla poszczególnych metod badawczych

Lp.	Sposób zagęszczenia próbek	Metoda badania szczepności
1	Ubijak Marshall'a	Aparat Leutnera i modyfikacje prasy Marshalla działające w podobny sposób.
2	Walec ręczny (laboratorium)	Aparat Leutnera, aparat ASTRA, aparat skrzynkowy, klinowy test rozłupywania, młotek impulsowy.
3	Zagęszczanie żyratorowe	Aparat Leutnera, aparat LPDS, modyfikacje prasy Marshalla.
4	Walec wibracyjny (pobieranie próbek z powierzchni)	Aparat Leutnera, aparat LPDS, modyfikacje prasy Marshalla, test odrywania, ścinanie przez skręcanie.
5	Walec wibracyjny (nieinwazyjnie)	Metoda FWD, młotek impulsowy.

Wydaje się, iż najwierniej oddającymi prace powierzchni są metody opierające się na zasadzie bezpośredniego ścinania prostego. Z zaprezentowanych powyżej metod tego typu najbardziej popularna jest metoda Leutnera (szczególnie, gdy weźmiemy pod uwagę aparaty powielające jej sposób działania np. LPDS i modyfikacje prasy Marshalla). Metoda Leutnera stosowana jest również w warunkach polskich.

Tabela 2.4. Wady i zalety metody Leutnera.

ŚCINANIE PROSTE WEDŁUG LEUTNER'A	
Wady	Zalety
-brak obciążenia normalnego, przez co nie odwzorowuje w pełni warunków rzeczywistych	-prostota testu
	-prostota wykonania próbek
	-szybkość wykonania testu
	-możliwość połączenia z powszechną prasą Marshalla
	-z racji czasu powstania metoda najszerszej opisana i poparta wiarygodnymi wynikami
	-unormowana w materiałach niemieckojęzycznych (Szwajcaria)

Dzięki temu, iż metoda Leutnera jest jedną z pierwszych, jaką opracowano w celu badania szczepności międzywarstwowej, jest ona najszerzej opisana w dostępnej literaturze. Jednocześnie istnieje dużo wyników badań warstw szczepnych przeprowadzonych tą metodą. Popularność metody wynika z jej prostoty i skuteczności. Może być stosowana w każdym z laboratoriów dzięki możliwości obciążania przy pomocy powszechnej prasy Marshalla.

Cześć pozostałych metod znajduje się jeszcze w fazie testów (tak jak aparat ASTRA, młotek dynamiczny) i stanowią autorskie pomysły badaczy z poszczególnych krajów, które nie poddane zostały pełnej weryfikacji i unormowaniu. Aparat Leutnera i aparat LPDS są częścią norm krajów, z których pochodzą.

Przy doborze sposobu wykonania próbek sugeruje się korzystanie z próbek pobieranych z nawierzchni jeżeli tylko jest to możliwe. W przypadku wykonywania próbek w laboratorium zaleca się jak najwierniejsze odwzorowanie warunków panujących na budowie. Badania laboratoryjne prowadzone na Politechnice Gdańskiej (patrz pkt. 3.2 raportu z 2005 [1]) potwierdzają niską skuteczność zagęszczania walcem ręcznym statycznym - nie zachodzi wtedy zjawisko klinowania się ziaren łączonych warstw.

Metody badań nieniszczące, takie jak FWD, młotek impulsowy są systemami bardzo rozwojowymi i w przypadku ostatecznego potwierdzenia skuteczności ich działania mogą stanowić doskonałe uzupełnienie badań przeprowadzanych w sposób klasyczny - niszczący.

2.2. Zestawienie wymagań dotyczących szczepności międzywarstwowej

W tabelicy 2.5 zestawiono wymagania szczepności międzywarstwowej stosowane na świecie.

Tablica 2.5. Zestawienie wymagań szczepności międzywarstwowej (w porządku chronologicznym)

Lp.	Miejsce stosowania	Kryterium			Metoda	Autor, Rok
		Siła ścinająca	Droga ścięcia	Naprężenie		
1.	Austria			Ś-W 3,0 MPa W-P 2,0 MPa W-P 0,8 MPa	Leutner Leutner Pull-off	Fenz, 1987
2.	Niemcy	Ś-W 14 kN W-P 10 kN P-P 13 kN		Ś-W 0,8 MPa W-P 0,6 MPa P-P 0,7 MPa	Leutner	Codja, 1994
3.	Austria		nie dotyczy	e.zw. 1,0 MPa e.m. 1,5 MPa	Pull-off	Krzemien&Tschengg 1995
4.	Szwajcaria	Ś-W 23 kN	brak	1,3 MPa	Leutner	Raab&Partl 1999
5.	Niemcy	Ś-W 25 kN W-P 20 kN P-P 16 kN	Ś-W 2,0-4 mm W-P 1,5-3 mm P-P 1,0-3 mm	1,4 MPa 1,1 MPa 0,9 MPa	Leutner	Stockert, 2002
6.	Polska	23 kN	brak	1,3 MPa	Leutner	Zawadzki, 2002

Oznaczenia w tabelicy 2.5:

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

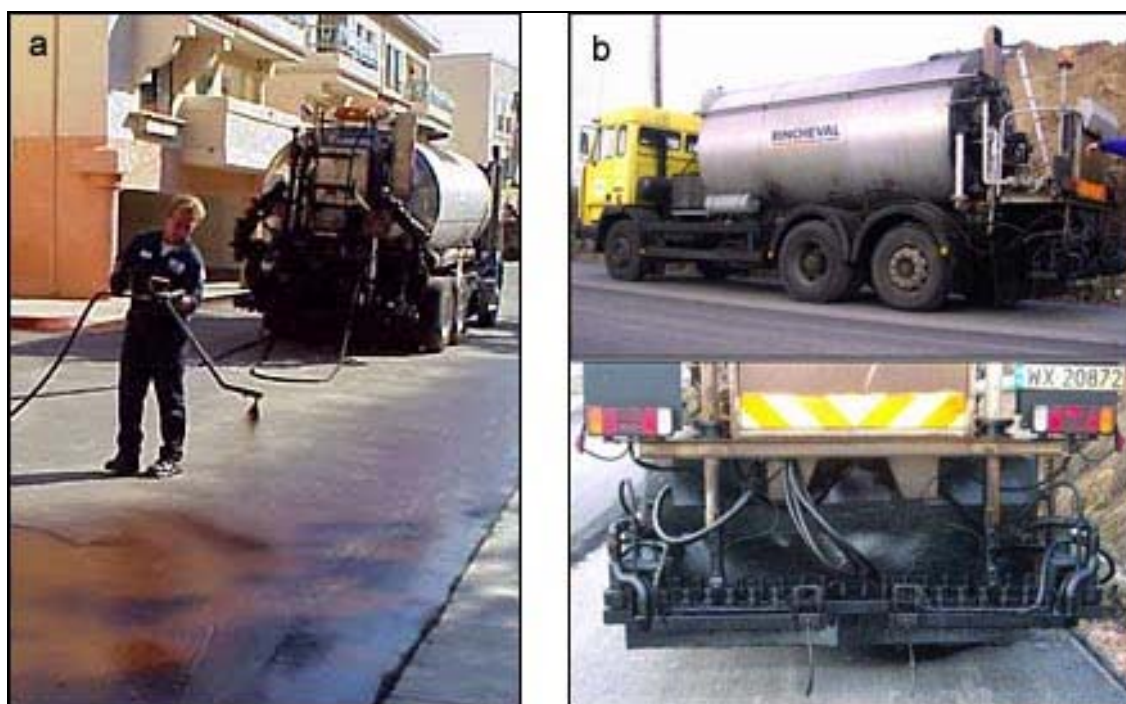
P-P – pomiędzy warstwami podbudową i podbudową, e.zw. – emulsja zwykła, e.m. – emulsja modyfikowana

kolor szary oznacza właściwość oryginalnie podaną przez autora kryterium

2.3. Wykonanie warstw szepnych

Osiągnięcie założonej wielkości i jednorodności wykonanego sprysku może przysporzyć wielu problemów. Bardzo dokładnie zagadnienie opisane jest w instrukcjach niemieckich [5] oraz amerykańskich zaleceniach technicznych LTAP [3]. W celu zachowania większej dokładności, najkorzystniejsza jest pełna automatyzacja procesu spryskiwania - użycie skraparki z wyrzutnią opryskową (patrz rys. 2.1.b). Dzięki temu możliwa jest kontrola elektroniczna wielkości natryskiwania warstwy szepnej bezpośrednio z kabiny kierowcy. Ręcznie działające urządzenia opryskowe (patrz rys. 2.1.a) należy stosować tylko w wyjątkowych przypadkach np. miejscach trudno dostępnych. Należy chronić za pomocą osłon wszelkie elementy przyległe (krawężniki, ścieki odpływowe itp.).

Szczególną uwagę trzeba poświęcić dbałości o równomierność nakładania cienkiej warstwy szczególnie na obrzeżach. Lepiszcze musi posiadać doskonałe właściwości rozpylające (płynność), jak również dobrą przyczepność. Należy unikać koncentracji lepiszcza (kałuż). Sprawdzenie warstw odbywa się wizualnie. Niezależnie od zjawiska poślizgu nadmierna aplikacja może znacznie spowolnić czas wiązania. Należy przewidzieć odpowiedni czas na częściowe wyschnięcie nałożonej warstewki zanim zacznie się wbudowywać następną warstwę nawierzchni. Kontrola czasu rozpadu to kolejny istotny element. Wbudowywanie na nie rozpadniętej emulsji może wytworzyć płaszczyznę poślizgu oraz migrację nie rozpadniętej emulsji do warstwy wierzchniej, powodując jej przebitumowanie.



Rysunek 2.1. Wykonanie sprysku: a) ręczne-metoda nie polecana (nierównomierność), b) Cysterna zapewniająca automatyzację procesu spryskiwania.

Według polskiej normy PN-S-96025:2000 okres oczekiwania na odparowanie wody lub upłynniacza powinien wynosić:

- 8h w przypadku zastosowania powyżej 1,0 kg/m² emulsji lub asfaltu upłynnionego.
- 2h w przypadku zastosowania od 0,5 do 1,0 kg/m² emulsji lub asfaltu upłynnionego.
- 0,5h w przypadku zastosowania od 0,2 do 0,5 kg/m² emulsji lub asfaltu upłynnionego.



Rysunek 2.2. Wykonywanie warstwy szepnej, proces automatyczny.

Emulsja asfaltowa, ulegając rozpadowi zmienia barwę z brązowej na czarną. Wytrzymałość warstwy szepnej wzrasta wraz ze wzrostem czasu rozpadu emulsji (np. 24h czas rozpadu daje mocniejsze szepienie niż 1h) i chociaż ograniczenia czasu i natężenia ruchu nie pozwalają na długie oczekiwanie rozpadu to należy dążyć do maksymalizacji tego czasu.



Rysunek 2.3. Sprysk szwu technologicznego

Odpowiednią jakością musi cechować się sprzęt rozpylający. Zagwarantować on musi deklarowaną wartość i jednorodność sprysku. Urządzenie musi mieć możliwość zapewnienia odpowiedniej temperatury, ciśnienia wylotu, ułożenia listwy spryskowej. Producent powinien określić najlepszą temperaturę dla danego rodzaju emulsji. Wymagana temperatura musi być utrzymywana dla drożności dysz i cystern. Zarówno ciśnienie, jak i prędkość pojazdu muszą być odpowiednio dobrane zależnie od wartości aplikacji, typu emulsji, i typu dysz. Wyjście dysz musi mieć odpowiedni rozmiar, jeżeli będzie za małe lub nastawi się za duże ciśnienie uzyskamy efekt mgiełki.

Ważny jest nie tylko dobór dysz, ale także kąt ich nachylenia w stosunku do listwy z dyszami. Powinien wynosić 15-30 stopni i dla wszystkich dysz być taki sam, aby maksymalizować zachodzenie na siebie i minimalizować kolidowanie strumieni. Wysokość położenia listwy determinuje między innymi szybkość pojazdu oraz ciśnienie. Wysokość również będzie zmienna w trakcie dnia zależnie od szybkości opróżniania cysterny i poziomu emulsji w zbiorniku.



Rysunek 2.4. Właściwie wykonana, równomiernie rozpylona warstwa szepna

2.4. Procedury kontrolne wykonania warstw szepnych

Jak wspomniano uzyskanie odpowiedniej, założonej wartości sprysku może nastęrczyć wielu trudności. Powszechnie sugerowaną praktyką jest używanie cystern z automatyczną wyrzutnią spryskową umożliwiającą elektroniczną kontrolę wielkości nakładania bezpośrednio z kabiny kierowcy.

Badania [2] dowodzą, iż istnieje potrzeba sprawdzania rzeczywistej wielkości przeprowadzonego sprysku. Okazuje się, że pomiar, wykonany przy użyciu prostej techniki, może w sposób jednoznaczny zweryfikować czy osiągnięto wartość zadeklarowaną przez urządzenie nastawcze. Dokładny opis procedury pomiaru tej wielkości w warunkach polowych przedstawiony jest w amerykańskiej normie ASTM D 2995 [4]. Umożliwia ona oszacowanie rzeczywistej wielkości sprysku zarówno w

kierunku poprzecznym wbudowywanej nawierzchni, jak i w kierunku podłużnym (wyznaczonym przez poruszającą się cysternę).

Norma ASTM D 2995¹ zakłada użycie: wagi z dokładnością do 0,1 g; podkładek z geowłókniny o wymiarach 304,8 na 304,8 mm; mocnej taśmy klejącej; papieru pakowego.

Wykonanie kontroli w kierunku poprzecznym.

W tym celu potrzeba wykonać tyle podkładek z geowłókniny aby ułożone w rzędzie obok siebie zajęły całą szerokość jezdni przeznaczanej do sprysku. Płaty geosyntetyku przyklejamy do powierzchni warstwy przy pomocy odpowiednio złożonej taśmy klejącej tak, aby wierzchnia warstwa była bezwzględnie czysta. Przed umiejscowieniem podkładek należy zważyć każdą z nich osobno z dokładnością do 0,1 g. Odcinki geowłókniny, na których spodziewany jest przejazd kół cysterny powinny zostać zakryte arkuszami papieru pakowego w celach ochronnych. Papier powinien przywrzeć do kół cysterny w trakcie przejazdu umożliwiając sprysk geowłókniny także w tym miejscu. Po wykonaniu sprysku należy usunąć podkładki, zważyć każdą z nich (dokładność jak wyżej) i zanotować pozycje jaką miały na odcinku testowym.



Rysunek 2.5. Kontrola wielkości sprysku: a) i b) ułożenie podkładek z geowłókniny, c) sprysk, d) "czyste" miejsce po zdjęciu podkładek

Wykonanie kontroli na kierunku podłużnym:

Od przypadku powyższego różni się sposobem ułożenia podkładek. Przyklejane są one wzdłuż powierzchni przeznaczanej do sprysku na odcinku około 100 m, rozmieszczenie jak pokazano na rysunku 2.6. Ich położenie musi być takie, aby nie

¹ Norma ASTM D2995 podaje dwie metody pomiaru ilości sprysku. Jednak zdaniem autorów jedna z nich (tutaj omówiona) jest bardziej praktyczna.

pokrywało się z miejscem przejazdu kół cysterny. Po wykonaniu sprysku każda podkładka musi być zważona, a jej położenie zanotowane.

W celu obliczenia ilości sprysku należy od masy spryskanych podkładek odjąć masę podkładek suchych - otrzymamy wielkość „A” w gramach i podzielić przez pole powierzchni podkładki z geowłókniny „F”:

$$\text{sprysk [kg/m}^2\text{]} = A/F$$

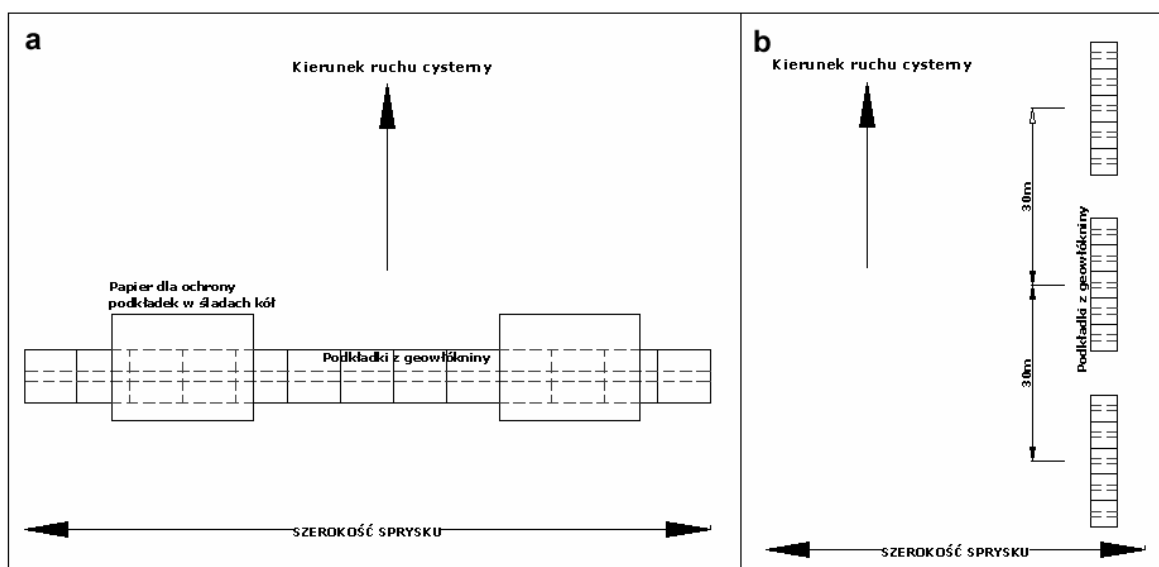
Gdzie:

A – masa netto, różnica podkładek spryskanych i suchych [kg],

F – pole powierzchni podkładek z geowłókniny [m²],

Kontrola wykonywana według procedur ASTM pozwala na stwierdzenie sprawności urządzeń rozpylających. Dzięki prostocie i szybkości takiego badania odpowiednie środki zaradcze mogą być podjęte natychmiast gwarantując właściwe wykonanie warstwy szepnej na pozostałych odcinkach. Skuteczność metody nie zależy od typu urządzenia spryskowego czy też rodzaju aplikowanego lepiszcza. Koszt wykonania takiej kontroli jest znikomo mały.

W Polsce brakuje odpowiednich procedur kontrolnych dlatego zasadnym wydaje się wdrożenie podobnej instrukcji w naszym kraju. Norma amerykańska jest na tyle precyzyjna i prosta, że przedstawione w niej procedury nadają się do natychmiastowego stosowania. Jedyne różnice mogą wynikać z konieczności zmiany systemu miar na układ metryczny.



Rysunek 2.6. Procedura kontroli wielkości sprysku w kierunkach:
a) poprzecznym, b) podłużnym.

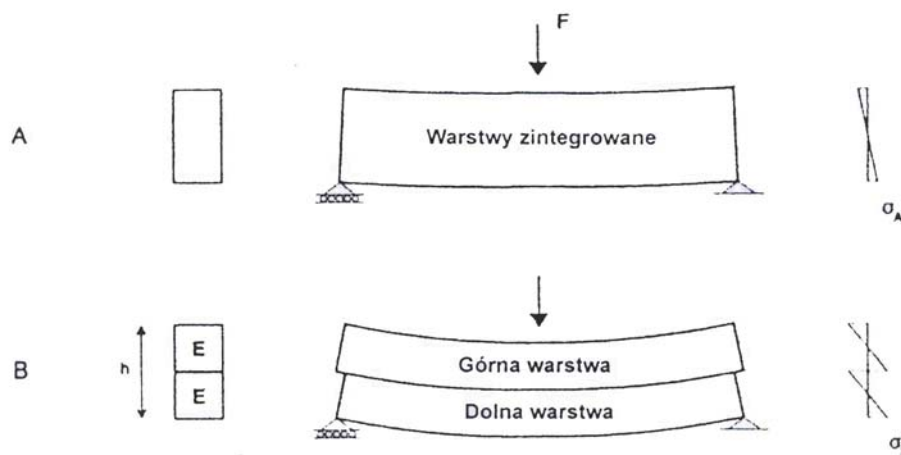
2.4. Modele obliczeniowe symulujące szczepność międzywarstwową

Istnieje wiele modeli, w których można opisać zróżnicowany stopień współpracy międzywarstwowej, jednak żaden z nich nie odzwierciedla rzeczywistej sytuacji jaka występuje na styku warstw nawierzchni. Należy wyróżnić tu trzy bardzo charakterystyczne modele ukazujące w odmienny sposób złożony charakter współpracy poszczególnych elementów nawierzchni:

- model belki z warstwami zintegrowanymi lub nie,
- model nawierzchni symulowanej metodą elementów skończonych oraz
- model sprężystej półprzestrzeni warstwowej, wykorzystywanej w metodzie mechanistycznej projektowania nawierzchni.

Niestety symulowanie szczepności międzywarstwowej ogranicza się do zastosowania bardzo ograniczonej liczby parametrów z liczego zestawu występującego rzeczywiście w konstrukcji drogi. Dodatkowo problemem stojącym przed modelowaniem zjawiska szczepności międzywarstwowej jest niedoskonały model samej konstrukcji nawierzchni nie ukazujący złożonego charakteru podstawowego budulca – betonu asfaltowego. Asphalt pełniący funkcję lepiszcza jest ciałem reologicznym (jego właściwości mechaniczne są zależne od temperatury i czasu obciążenia), a dodatkowo samo kruszywo jest materiałem pracującym w stanie quasi sprężystym.

2.3.1 Model belki wolno podpartej wielokrotnie i złożonej



Rysunek 2.7. Najprostszy model ukazujący wagę powiązania warstw [8].

Model niniejszy ze względu na wielki stopień uproszczenia ma wyłącznie znaczenie ilustracyjne i raczej nie może być wykorzystany w praktyce, w budownictwie drogowym. Ma jednak znaczenie dydaktyczne, ponieważ w sposób bardzo prosty pokazuje wpływ szczepności na wytrzymałość najprostszej konstrukcji inżynierskiej – to znaczy belki wolnopodpartej. Analiza tego prostego modelu pokazuje wyraźnie jak ważna jest szczepność międzywarstwowa.

Rysunek 2.7 ukazuje różnice w pracy pomiędzy belką wielokrotną a złożoną (posiadającą wszystkie warstwy sczeplone). Widoczne jest charakterystyczne przesunięcie warstw w belce o warstwach niepołączonych. Niestety przy analizie powyższego problemu zakłada się, że tarcie pomiędzy warstwami jest pomijalnie małe, co praktycznie nie istnieje w rzeczywistych konstrukcjach nawierzchni. Według [17] by belki pracowały jako monolit ich połączenie powinno być zdolne do przeniesienia naprężeń stycznych, które występują w płaszczyźnie zetknięcia. Do opisu stanu naprężeń i odkształceń w omawianym modelu wykorzystana zostanie zależność:

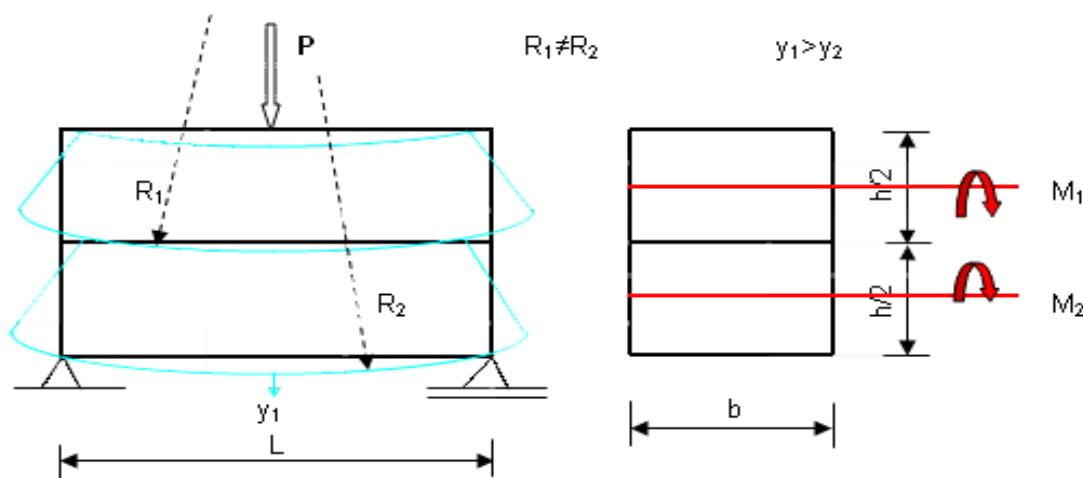
$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

gdzie:

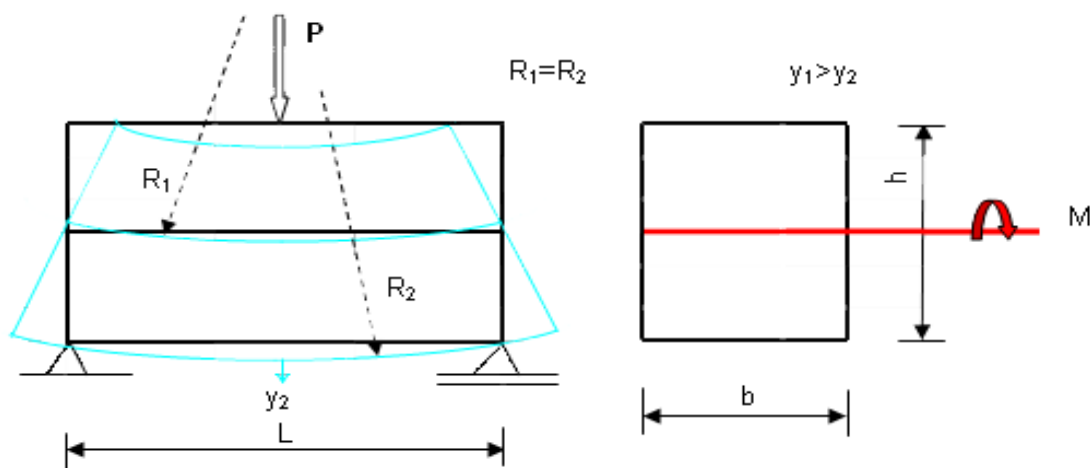
- ρ – promień ugięcia belki [m],
- M – moment zginający [kNm],
- E – moduł Younga [kN/m²],
- I - moment bezwładności przekroju [m⁴].

Powyższa zależność znana jest jako równanie Eulera. W przypadku braku związania następuje rozdział momentu zginającego:

$$M = M_1 + M_2 + \dots \quad (2)$$



Rysunek 2.8.. Uproszczony schemat pracy belki wielokrotnej



Rysunek 2.9. Uproszczony schemat belki złożonej

Na rysunkach 2.8 i 2.9 przedstawiono ekstremalne sytuacje ugięć belki wolnopodpartej, obciążonej siłą skupioną w środku rozpiętości, w warunkach pełnego związania i pełnego poślizgu.

Ugięcie (y) w środku rozpiętości belki pod obciążeniem siłą skupioną (P) opisane jest wzorem:

$$y = \frac{PL^3}{48EI} \quad (3)$$

gdzie:

- L- długość belki,
- P- obciążenie siłą skupioną.

Ze wzoru (3) wynika, że w sytuacji przedstawionej na rys. 2.8 ugięcie będzie czterokrotnie większe niż na modelu z rys. 2.9. Jak podaje [17] naprężenia rozciągające w skrajnych włóknach wynoszą odpowiednio dla sytuacji przedstawionej na rys. 2.9:

$$\sigma_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{PL}{bh^2} \quad (4)$$

natomiast w sytuacji z rys. 2.8:

$$\sigma_2 = 3 \cdot \frac{PL}{bh^2} \quad (5)$$

Z powyższych wzorów wynika, że maksymalne naprężenie rozciągające generowane w belce zespolonej jest równe połowie wartości naprężenia występującego w belce wielokrotnej.

W dalszej części jako kryterium stopnia zespolenia międzywarstwowego zastosowane będzie poziome odkształcenie rozciągające na spodzie belki, co zostało zaczerpnięte z powyższego modelowania i opierające się na równaniu :

$$\varepsilon = \frac{M}{EI} y \quad (6)$$

Równanie (6) można wyprowadzić korzystając z prawa Hooke'a i wzoru na naprężenia zginające :

$$\sigma = \frac{M}{I} y \quad (7)$$

gdzie:

y- to odległość od osi obojętnej do punktu, w którym obliczamy naprężenia.

W przypadku belki swobodnie podpartej, jak podaje wzór (6) odkształcenie poziome na spodzie warstw jest tym większe im mniejsza jest sztywność pakietu warstw. Gdy belki nie współpracują ugięcie wzrasta czterokrotnie, co związane jest z wartością momentu bezwładności, który dla belki zespolonej wynosi:

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (8)$$

natomiast przy braku połączenia:

$$I_x = \frac{b\left(\frac{h}{2}\right)^3}{12} = \frac{bh^3}{48} \quad (9)$$

Przy braku połączenia belek moment bezwładności maleje czterokrotnie, co wpływa, zgodnie ze wzorem (3) na czterokrotny wzrost ugięcia. Dlatego przy braku szczepności ugięcie to wynosi:

$$y_1 = \frac{PL^3}{Eb^3} \quad (10)$$

natomiast przy pełnym związaniu:

$$y_2 = \frac{PL^3}{4Eb^3} \quad (11)$$

Jak podaje wzór (1) wraz ze wzrostem sztywności układu belkowego rośnie promień ugięcia, a to pociąga za sobą wzrost nośności. Brak związania warstw w systemie swobodnie podpartej belki implikuje następujące konsekwencje:

- Ugięcie w środku belki wzrasta czterokrotnie,
- Następuje zmiana rozkładu naprężeń,
- Naprężenia rozciągające wzrastają dwukrotnie.

Najistotniejszym wnioskiem jest fakt, że w wyniku braku związania maleje wartość sumarycznego wskaźnika wytrzymałości przekroju poprzecznego belki, co powoduje zgodnie ze wzorem (6) wzrost ugięcia i odkształceń poziomych na spodzie belek.

2.3.2. Model sprężystej półprzestrzeni warstwowej

Zgodnie z [14] wyróżnić można trzy zasadnicze grupy modeli opisujących właściwości mechaniczne i kinetyczne jezdni drogowych:

- Wykorzystujące teorię sprężystości,
- Wykorzystujące teorię pełzania i konsolidacji,
- Dynamiczne.

Bardzo rozpowszechnionym modelem konstrukcji nawierzchni jest model sprężystej półprzestrzeni warstwowej, obciążonej ciężarem równomiernie rozłożonym na kołowej powierzchni. Pierwotnie zajmowano się układem warstwowym, dla którego pierwsze rozwiązanie i dodatkowo numeryczne wyznaczenie ugięć podał Burminster. Obliczeniem naprężeń zajmowali się m.in. Scrivner i Fox. Do obliczenia naprężeń i odkształceń w poszczególnych warstwach modelu potrzebne są następujące dane: grubość warstwy h , moduł sprężystości warstwy E , współczynnik Poissona ν .

Autorzy [14] wskazują, że rozpatrując przypadek osiowej symetrii, równania różniczkowe równowagi wewnętrznej, we współrzędnych walcowych, bez uwzględniania sił masowych mają postać:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau}{r} = 0$$

gdzie:

$$\tau = \tau_{rz} = \tau_{zr} - \text{naprężenie styczne,}$$
$$\sigma_r, \sigma_z, \sigma_t - \text{naprężenia normalne.}$$

Powyższe naprężenia można wyrazić przy pomocy składowej przemieszczenia:

$$\sigma_r = 2G \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\nu \theta}{1 - 2\nu} \right)$$
$$\sigma_t = 2G \left(\frac{u}{r} + \frac{\nu \theta}{1 - 2\nu} \right) \quad (13)$$
$$\sigma_z = 2G \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\nu \theta}{1 - 2\nu} \right)$$
$$\tau = G \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right)$$

gdzie:

u, w – przemieszczenia wzdłuż osi r i z ,

$$\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru) + \frac{\partial w}{\partial z} - \text{dylatacja,} \quad (14)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} - \text{moduł Kirchhoffa.}$$

Szydło [14] po podstawieniu wzorów (13) i (14) do wzoru (12) otrzymał następujące zależności:

$$\nabla^2 \theta = 0 \quad (15)$$

$$\nabla^2 S - \frac{S}{r^2} = 0 \quad (16)$$

gdzie:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$S = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}$$

Aby uzyskać przemieszczenia u i w należy rozwiązać równania (15) i (16).

Autorzy [14] proponują wykorzystanie obliczeń przeprowadzonych przez Sapiana według, których ogólne rozwiązania równań (15) i (16) mają postać:

$$w = \int_0^\infty \left\{ \frac{-z}{2(1-2\nu)} [A(\lambda)ch\lambda z + B(\lambda)sh\lambda z] + C(\lambda)ch\lambda z + D(\lambda)sh\lambda z \right\} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (17)$$

$$u = \int_0^\infty \left\{ \frac{3-4\nu}{2(1-2\nu)} \frac{1}{\lambda} [A(\lambda)ch\lambda z + B(\lambda)sh\lambda z] + \frac{z}{2(1-\nu)} [A(\lambda)sh\lambda z + B(\lambda)ch\lambda z] - [C(\lambda)sh\lambda z + D(\lambda)ch\lambda z] \right\} J_1(\lambda r) d\lambda$$

Po podstawieniu równania (19) do (15) autorzy [14] otrzymali wzory na naprężenia:

$$\sigma_z = G \int_0^\infty \left\{ -[A(\lambda)ch\lambda z + B(\lambda)sh\lambda z] - \frac{\lambda z}{1-2\nu} [A(\lambda)sh\lambda z + B(\lambda)ch\lambda z] + 2\lambda [C(\lambda)sh\lambda z + D(\lambda)ch\lambda z] \right\} J_1(\lambda r) d\lambda \quad (18)$$

$$\tau = G \int_0^\infty \left\{ \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} [A(\lambda)sh\lambda z + B(\lambda)ch\lambda z] + \frac{\lambda z}{1-2\nu} [A(\lambda)ch\lambda z + B(\lambda)sh\lambda z] - 2\lambda [C(\lambda)ch\lambda z + D(\lambda)sh\lambda z] \right\} J_1(\lambda r) d\lambda$$

$$\sigma_r = 2G \int_0^\infty \left\{ \frac{3-4\nu}{2(1-2\nu)} \frac{1}{\lambda} [A(\lambda)ch\lambda z + B(\lambda)sh\lambda z] + \frac{z}{2(1-2\nu)} [A(\lambda)sh\lambda z + B(\lambda)ch\lambda z] - [C(\lambda)sh\lambda z + D(\lambda)ch\lambda z] \cdot \left[-\frac{1}{r} J_1(\lambda r) + \lambda J_0(\lambda r) \right] + \frac{\nu}{1-2\nu} [A(\lambda)ch\lambda z + B(\lambda)sh\lambda z] \cdot J_0(\lambda r) \right\} d\lambda$$

gdzie:

$J_0(\lambda r), J_1(\lambda r)$ - funkcje Bessela pierwszego i drugiego rodzaju, rzędu 0 i 1,
 $A(\lambda), B(\lambda), C(\lambda), D(\lambda)$ - funkcje parametru λ , wyznaczone w zależności od warunków brzegowych.

Do pełnego rozwiązania zagadnienia potrzebne jest określenie nieznanymi funkcji A_i, B_i, C_i, D_i ze wzorów (17). Jedną z metod jest wykorzystanie warunków brzegowych. Każda warstwa daje cztery niewiadome wielkości A_i, B_i, C_i, D_i , a półprzestrzeń tylko dwie, ponieważ przy $z \rightarrow \infty$ naprężenia i przemieszczenia muszą zmierzać do zera. Zetknięcie każdej warstwy daje cztery równania równowagi.

W [14] wyróżniono następujące kombinacje stopnia powiązania:

1. Pełne powiązanie międzywarstwowe, z następującymi warunkami brzegowymi:

$$\begin{aligned} \sigma_{zi} &= \sigma_{zi+1} \\ \tau_{rzi} &= \tau_{rzi+1} \\ w_i &= w_{i+1} \\ u_i &= u_{i+1} \end{aligned} \quad (19)$$

2. Powierzchnie stykających się warstw są „gładkie”, tzn. nie są przenoszone naprężenia styczne:

$$\begin{aligned} \sigma_{zi} &= \sigma_{zi+1} \\ w_i &= w_{i+1} \\ \tau_{rzi} &= \tau_{rzi+1} = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

3. Częściowe powiązanie warstw :

$$\begin{aligned} \sigma_{zi} &= \sigma_{zi+1} \\ w_i &= w_{i+1} \\ \tau_{rzi} &= \tau_{rzi+1} \\ \tau_{rzi+1} &= cu_{i+1} \end{aligned} \quad (21)$$

gdzie c – tzw. moduł przyczepności (szczepności, ścinania) [N/m³].

Kolejne dwa równania równowagi określa się z warunków obciążenia zewnętrznego górnej powierzchni układu.

Dla obciążenia pionowego równomiernie rozłożonego na powierzchni kołowej (promień a) po rozłożeniu tego obciążenia w całkę Fouriera –Bessela i przy braku tarcia pomiędzy pojazdem a nawierzchnią, warunki brzegowe przedstawiają się w następujący sposób:

$$\sigma_{zn} = q(r) = qa \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) J_1(\lambda a) d\lambda \quad \text{dla } z=0$$

$$\tau_{rzn} = 0 \quad (22)$$

W przypadku, gdy na układ działa sztywny stempel, warunki brzegowe są następujące:

$$\text{Dla } z=0 \text{ i } r \leq a \quad W_n = const \text{ oraz dla } r > a \quad \sigma_{zn} = 0 \quad (23)$$

Powyższe zależności służą do matematycznego opisanie problemu. Do obliczeń numerycznych, wykonanych na podstawie tych zależności, wykorzystany został program BISAR-3.0, w którym jako opis nawierzchni służy model warstwowej półprzestrzeni sprężystej.

2.3.2.1. Program komputerowy BISAR-3

BISAR 3. jest programem opartym na teorii wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej służącym do mechanistycznego projektowania nawierzchni. Program wylicza naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia obciążonej konstrukcji nawierzchni. Można w nim uwzględnić wpływ związania międzywarstwowego. BISAR jest powszechnie używany, a wyniki wykonanych w nim obliczeń przytaczane są w wielu publikacjach m.in. [7, 13, 16].

Glet [16] wskazuje, że do obliczeń związanych ze szczepnością międzywarstwową należy uwzględniać: układ i grubość warstw konstrukcji nawierzchni, związanie warstw (zazębienie i sklejanie), skład mieszanki mineralno-asfaltowej w warstwie (zawartość lepiszcza, zawartość mieszanki mineralnej, wolnych przestrzeni). Niestety część wspomnianych czynników posiada trudny lub niemożliwy do symulowania wpływ na pracę konstrukcji nawierzchni, zwłaszcza, gdy jest ona modelowana jako ośrodek sprężysty. Poza tym trudno wskazać, do którego momentu zasadniczą wytrzymałość spoina na granicy warstw zawdzięcza wzajemnemu zazębieniu się warstw, a kiedy jej sklejeniu lepiszczem, lub kiedy warstwy oddziałują na siebie tylko czystym tarcie.

W [13] Judycki przedstawił analizę obliczeń wpływu powiązania międzywarstwowego na wzmocnienie nawierzchni. Przyjęto w analizie typową dla danego odcinka konstrukcję nawierzchni, uwzględniono szkodę zmęczeniową w pracującej już wcześniej podbudowie. Stałe materiałowe zostały dobrane na podstawie badań wykonanych na pobranych próbkach nawierzchni. Dokładny opis i charakterystyka warstw nawierzchni znajduje się w publikacji [13].

Program BISAR wykorzystywany jest do mechanistycznego projektowania konstrukcji, według którego zakłada się, że maksymalne odkształcenia rozciągające

występują na spodzie warstw bitumicznych. Zakłada się, że z tego miejsca następuje dalsza propagacja spękań zmęczeniowych ku górze.

Zagadnieniem teoretycznym szczepności międzywarstwowej zajmowali się w dużym stopniu Brytyjczycy. Kruntcheva, Thom [7] uwzględniali związanie międzywarstwowe w programie BISAR 3.0.

Program BISAR dla uwzględnienia powiązania warstw przewiduje współczynnik „*shear strength compliance*”(AK). Współczynnik ten wyraża się jako stosunek względnego poziomego przesunięcia warstw do naprężenia ścinającego na granicy warstw [m³/MN].

Wartość AK odpowiada odwrotności **modułu sztywności ścinania** K_s na granicy warstwy, która znalazła zastosowanie w prawie Goodmana:

$$\tau = K_s \cdot (\Delta U) \quad (24)$$

W powyższym wzorze brak powiązania odpowiada wartości modułu sztywności ścinania na granicy warstw 10³ [MN/m³], natomiast pełne związanie występuje, gdy powyższa wartość jest większa od 10⁵ [MN/m³]. Prawo to opisuje zachowanie się ośrodka międzywarstwowego i wykorzystywane jest w wielu programach służących do analizy ośrodków wielowarstwowych.

Do opisu stopnia połączenia między warstwami nawierzchni, może posłużyć współczynnik tarcia, który dla symulowania całkowitego „braku szczepności” (wartość graniczna) wynosi f=0, natomiast dla „całkowitego powiązania” współczynnik tarcia wynosi f=1. W rzeczywistości prawie nigdy nie występuje całkowity brak szczepności, dlatego według Kruntcheva [7] należy przyjmować współczynnik tarcia między warstwami równy f=0,7, jako wartość minimalną.

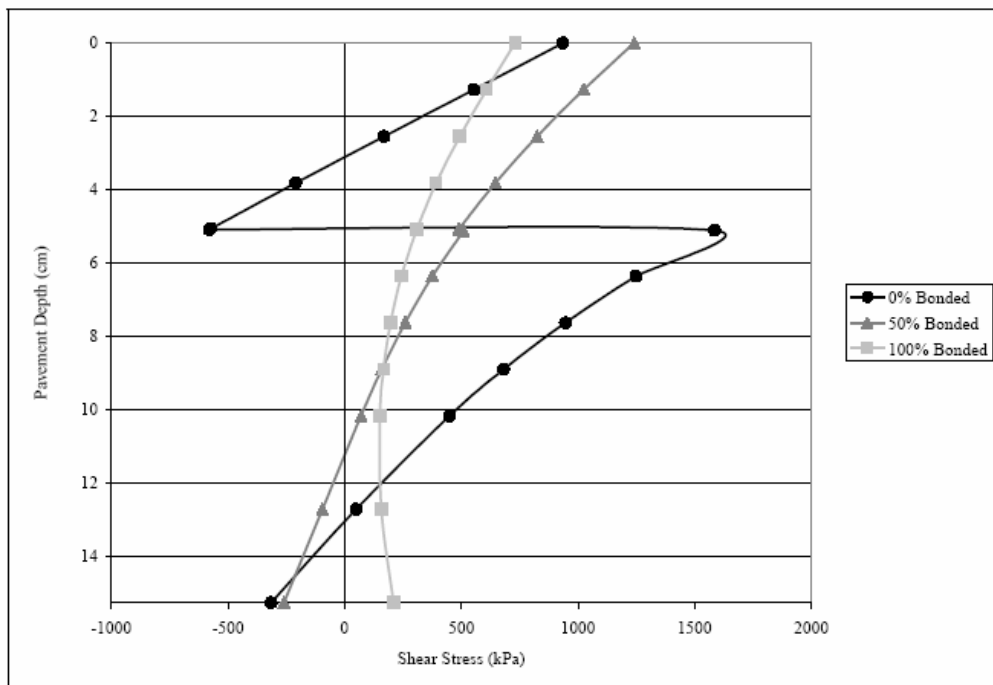
2.3.2.2. Szczepność międzywarstwowa w programie PADAL

Hakim i inni [12] do obliczeń wrażliwości konstrukcji nawierzchni na szczepność międzywarstwową zastosowali program PADAL do „odwrotnych obliczeń” modułów ośrodków trójwarstwowych, zakładając pełne związanie między warstwami konstrukcji nawierzchni. Autor założył dodatkowo, że od głębokości 100 mm od powierzchni nawierzchni moduł sztywności ścinania z(określony wyżej we wzorze Goldmana) zmienia się stopniowo od wartości 10³[MN/m³] do wartości 10⁹[MN/m³]. Wykonane obliczenia odwrotne powinny wskazać błędne wartości modułów sztywności, spowodowane brakiem powiązania warstw, przy obliczaniu nawierzchni posiadającej pełną szczepność we wszystkich płaszczyznach styku. Następnie poprzez porównanie modułów sztywności i wykorzystanie modułów sztywności przy ścinaniu, przy wykorzystaniu prawa Goodmana, zostanie wyznaczony stopień powiązania warstw. Wspomniany program PADAL wykorzystuje jako podstawowe dane czasy ugięć, wykonane za pomocą urządzenia FWD.

2.3.2.3. Szczepność międzywarstwowa w programie WESLEA

W publikacji [8] autorzy Buchanan i Woods do symulowania różnego stopnia powiązania międzywarstwowego dla nawierzchni podatnych użyli programu „WESLEA”, także wykorzystujący teorie wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Wykazał on znaczny wzrost naprężeń w konstrukcji podatnej o niezwiązanych warstwach.

Analizę oparto na modelu nawierzchni składającego się z warstw: 5,08 cm nakładki z betonu asfaltowego, położonego na 15,24 cm warstwie z betonu asfaltowego, pod którym zaprojektowano niezwiązaną podbudowę z kruszywa. Przyjęto, że moduł sztywności warstwy z BA i warstwy z kruszywa posiadać będą odpowiednio moduły o wartościach $E = 3,45$ [GPa] i 276 [MPa]. Dla warstw asfaltowych współczynnik Poissona przyjęto $0,35$, natomiast dla kruszywa $0,4$.



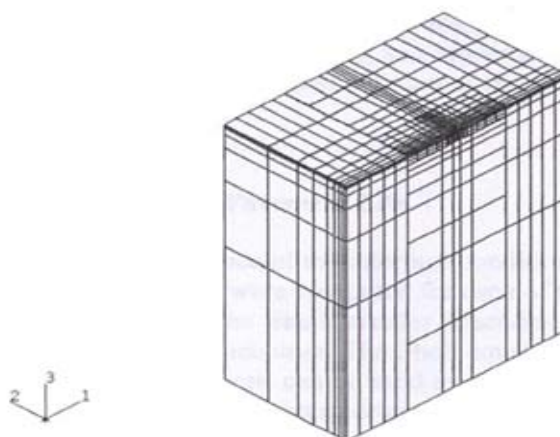
Rysunek 2.10. Rozkład naprężeń ścinających w nawierzchni przy różnych stopniach powiązania międzywarstwowego [8].

Dodatkowo założono, że warstwy asfaltowe są w pełni związane z podbudową z kruszywa. Rysunek 2.10 przedstawia rozkład naprężeń występujący przy różnych stopniach powiązania warstw. W wyniku braku związania warstwy asfaltowe reagują niezależnie na przyłożone obciążenie implikując powstanie naprężeń o dużych wartościach i odmiennych znakach na styku warstw. Jak podkreślają autorzy w górnych warstwach nawierzchni pojawiają się naprężenia rozciągające, przyczyniające się do obniżenia trwałości danej warstwy.

2.3.3. Modelowanie przy pomocy MES (metody elementów skończonych).

2.3.3.1. Szczepność międzywarstwowa w programie ABAQUS

Bardzo interesującym i dającym wiele możliwości sposobem modelowania szczepności międzywarstwowej jest metoda elementów skończonych. Romanoschi i Metcalf [15] wskazują, że do modelowania tą metodą nawierzchni zastosowali program ABAQUS (1995), w którym można wprowadzić potrzebne do analizy szczepności międzywarstwowej różne stany współpracy pomiędzy warstwami. Przeprowadzili oni obliczenia szczepności na modelach ukazanych na rys.2.11 w czterech wariantach współpracy międzywarstwowej.



Rysunek 2.11. Przykład modelowania konstrukcji nawierzchni przy pomocy MES [15]

Warianty te posiadają następujące opcje:

1. Pierwsza opcja zakłada pełne związanie warstw konstrukcji nawierzchni. W tym przypadku każdy węzeł niższej powierzchni powiązany jest do najbliższego węzła wyżej leżącej powierzchni.
2. W drugiej opcji zakłada się zwykłe tarcie, co występuje w przypadku, gdy utracone zostanie połączenie między warstwami. Wartość współczynnika tarcia między powierzchniami równa $f=0.7$ została określona na podstawie testu bezpośredniego ścinania (metoda Leutnera). Przytoczona wartość współczynnika tarcia w miarę pracy nawierzchni będzie ulegała spadkowi, poprzez ścieranie się powierzchni kontaktowej, ale jak podaje Błażejowski [9] nie ma w literaturze przypadku opisującego, co się dzieje z współczynnikiem tarcia, gdy warstwy nawierzchni pracują niezależnie.
3. Trzecia opcja przewiduje istnienie skropienia międzywarstwowego emulsją asfaltową. W przypadku, gdy naprężenia styczne są mniejsze od dopuszczalnej wartości S_{\max} , to wtedy względne poziome przemieszczenie będzie proporcjonalne do naprężeń stycznych. Przy opisywaniu tej warstwy założono, że wytrzymałość na ścinanie S_{\max} i moduł sztywności ścinania K (z prawa Goldmana) nie zależą od naprężenia normalnego.

Autorzy Romanoschi i Metcalf [15] podają, że powyższe przyjęte do obliczeń parametry zostały określone na podstawie testu bezpośredniego ścinania

przeprowadzonego w temperaturze 25°C. Parametry te wynoszą odpowiednio: $S_{\max} = 1,415$ [MPa], $K=0,885$ [MPa/mm], $f=0,7$.

4. Czwarty wariant symuluje pracę nawierzchni bez skropienia emulsją asfaltową poprzez użycie funkcji „user defined”. W tym przypadku wytrzymałość na ścinanie na granicy warstw S_{\max} i moduł sztywności ścinania K , zależą od wartości naprężenia normalnego σ . W celu określenia powyższych współczynników w 25°C autorzy [15] posłużyli się następującymi zależnościami:

$$K(\text{MPa/mm}) = 0,361 + 0,2307 \cdot \sigma(\text{MPa}) \quad (25)$$

$$S_{\max}(\text{MPa}) = 0,843 + 7,66 \cdot \sigma(\text{MPa}) \quad (26)$$

Gdy $\tau = S_{\max}$ to na granicy warstw będzie występowało tylko tarcie, z współczynnikiem tarcia równym $f=0,7$. Przy obliczaniu nawierzchni tą metoda założono dodatkowo, że warstwa z betonu asfaltowego jest całkowicie powiązana do podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie.

Przy wykorzystaniu wielu wariantów szczepności obliczenia wykonano dla nawierzchni podatnej i półsztywnej. W tej drugiej na granicy warstw asfaltowych i podbudowy z gruntu stabilizowanego cementem modelowano tylko dwa stany współpracy: pełne związanie warstw lub stan w którym na granicy warstw występuje tylko tarcie z współczynnikiem tarcia równym $f=0,5$.

2.3.3.2. Szczepność międzywarstwowa w programie ANSYS

Warstwowy model nawierzchni może być analizowany przy zastosowaniu metody elementów skończonych programem ANSYS 6.1, jak zostało to przedstawione przez Górszczyka i Zielińskiego w artykule [10]. Jako model fizyczny nawierzchni przyjęto wielowarstwowy ośrodek sprężysty, gdzie geosyntetyk jako zbrojenie modelowany jest poprzez materialną powierzchnię osobliwą pracującą tylko na rozciąganie. W modelu tym przyjęto, że pomiędzy warstwą osobliwą a warstwą znajdującą się nad nią istnieje pełne związanie, natomiast pod tym ośrodkiem osobliwym występuje tarcie Coulomba. Dla pozostałych warstw, gdzie nie ma geosyntetyku przyjęto pełną szczepność. W punkcie 3 w artykule [10] autorzy pokazują dyskretyzację rozważanego powyżej układu (ośrodek osobliwy). Jest to kolejny przykład ukazujący jak popularnym sposobem symulowania braku szczepności jest zastosowanie prostego współczynnika tarcia.

3. Badania laboratoryjne wykonane w Politechnice Gdańskiej

3.1. Materiał wyjściowy

Mieszanki mineralno-asfaltowe wykorzystane do badań dowieziono z wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych (WMMA) jednej z trójmiejskich firm drogowych.

W badaniach wykorzystano:

- beton asfaltowy BA 0/25 do warstwy wiążącej z asfaltem zwykłym (KR3-6),
- beton asfaltowy BA 0/12,8 do warstwy ścieralnej z asfaltem zwykłym (KR3-6).

Do warstwy szepnej, jako sprysk międzywarstwowy wykorzystano:

- kationową emulsję asfaltową zwykłą szybkorozpadową K1-65 POLDIM Tarnów,
- kationową emulsję asfaltową zwykłą szybkorozpadową K1-60W Lotos Jasło:
 - 2 ilości sprysku.

Dla porównania na jednej powierzchni nie zastosowano warstwy szepnej:

- brak sprysku międzywarstwowego.

W sumie dla każdego rodzaju sprysku (4) przygotowano powierzchnie $\sim 1,17 \text{ m}^2$, w sposób dokładnie opisany w punkcie 3.2.2 raportu z 2005 roku [1].

3.2. Metodyka badawcza

W badaniach szczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera zastosowano metodykę badawczą i procedurę przygotowania próbek opisaną dokładnie w raporcie z 2005 roku, pkt. 3.2. [1].

Tablica 3.1. Rodzaje zastosowanego sprysku międzywarstwowego pomiędzy warstwę wiążącą z betonu asfaltowego 0/25 i warstwę ścieralną z betonu asfaltowego 0/12,5.

Lp.	Rodzaj sprysku	Ilość [kg/m ²]	Ciśnienie w aparacie [bar]	Temperatura emulsji [°C]
1.	Emulsja zwykła K1-65 POLDIM Tarnów	0,4	2,2	40
2.	Emulsja zwykła K1-65 Lotos Jasło	0,35	2,2	40
3.	Emulsja zwykła K1-65 Lotos Jasło	0,7	2,2	40
4.	Brak sprysku międzywarstwowego	-	-	-

Uwaga:

Okazało się, że nie istnieje możliwość kontroli ilości sprysku emulsji bez wstępnych badań. Można było decydować tylko o ilości sprysku w następujący sposób: pojedynczy, podwójny sprysk, a następnie wyznaczać dokładną ilość przez pomiar wagowy. Wpływ na to miała budowa lancy, a właściwie zaworu, w którym brak było stopniowego otwarcia.

Próbki do badania przygotowano zgodnie z opisem w raporcie z 2005 r. [1]. Mieszanke mineralną do warstwy wiążącej i ścieralnej zagęszczano przez wałowanie walcem drogowym w formach prostokątnych, wykonując odpowiednie spryski międzywarstwowe. W roku 2006 mieszanka była wałowana przy zastosowaniu walca z wibracją, dla uzyskania lepszego zaziębnia się ziaren kruszywa na granicy warstw.

Próbki zagęszczano 8 przejściami walca z włączoną wibracją do osiągnięcia wskaźnika zagęszczenia w przedziale 99-101%.

3.3. Wyniki badań

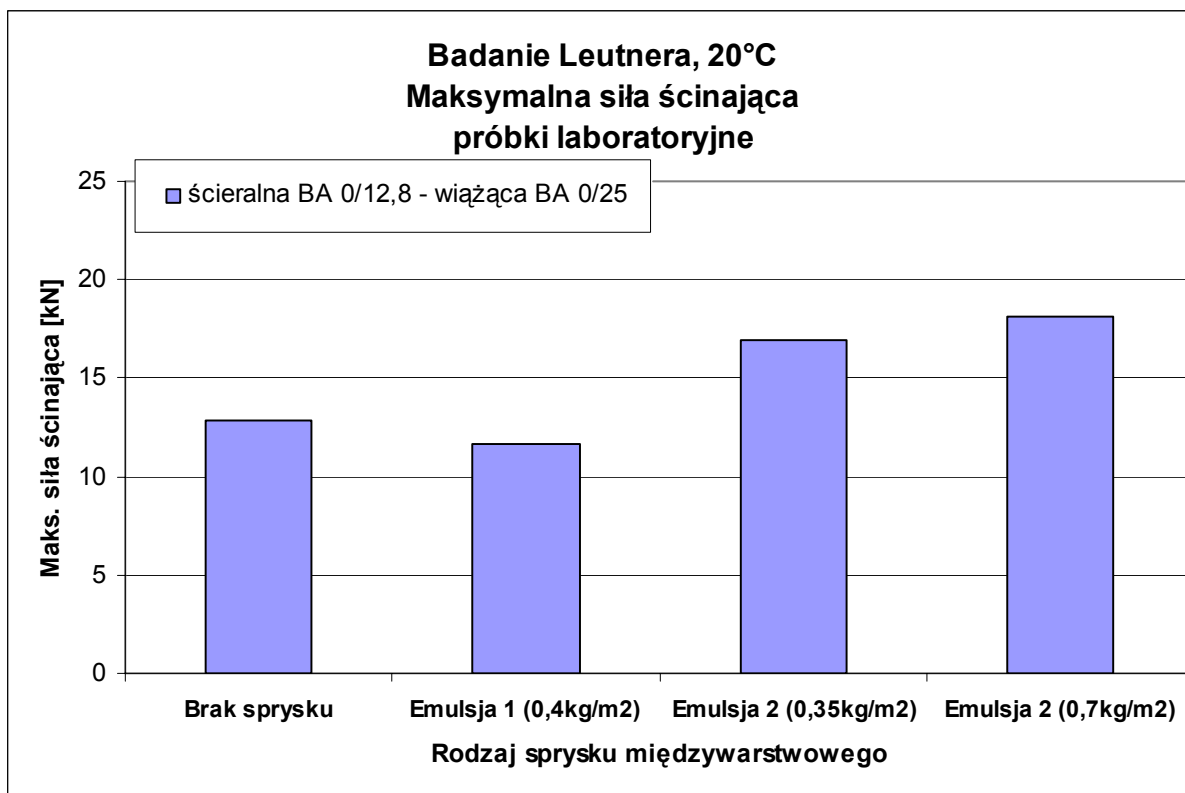
Wyniki badań ścinania międzywarstwowego warstwy wiążącej z BA 0/25 i warstwy ścieralnej z BA 0/12,8 wg metody Leutnera w temperaturze 20°C przedstawiono w tablicy 3.2 i na rysunkach od 3.16 do 3.19.

Tablica 3.2. Wyniki badań szczepności wg Leutnera z próbek laboratoryjnych pomiędzy warstwą ścieralną a wiążącą. Temperatura badania 20°C

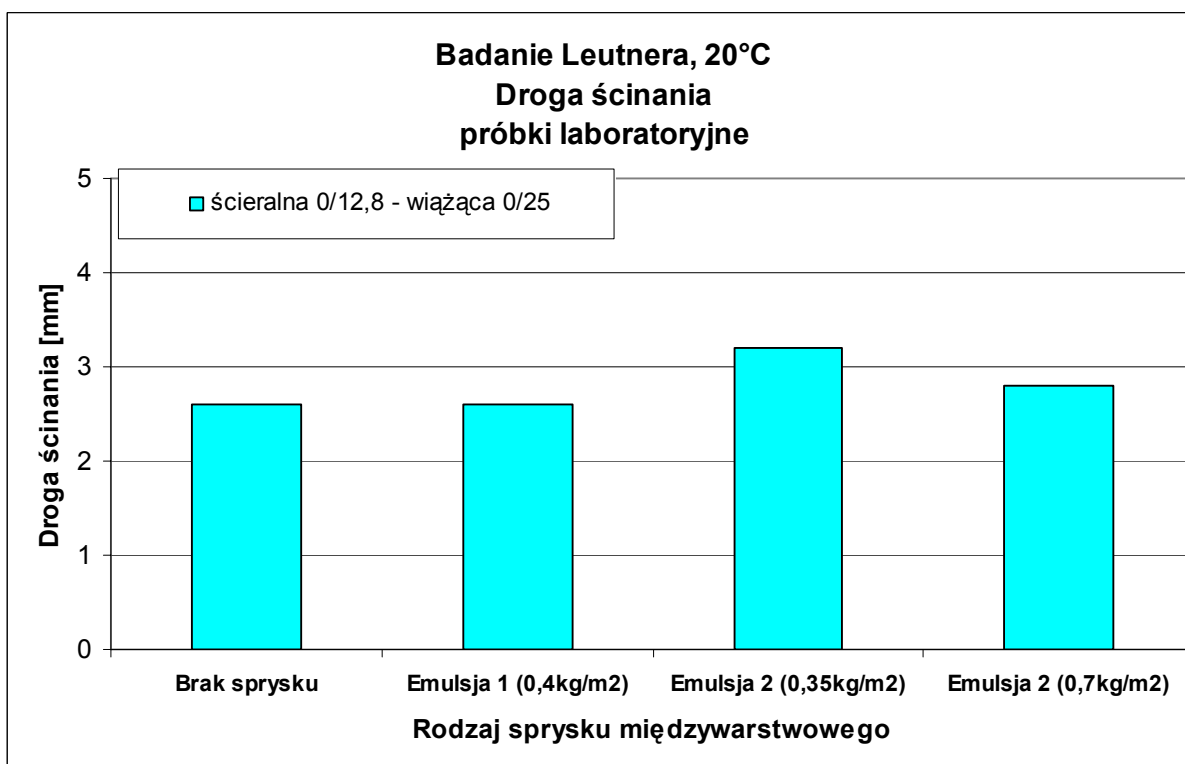
Nr próbki	Rodzaj sprysku	Średnica [mm]	Siła ścinająca [kN]	Średnia siła ścinająca [kN]	Droga ścicia [mm]	Średnia droga ścinająca [mm]	Napężenie ścinające [MPa]	Średnie napężenie ścinające [MPa]	Sztywność ścicia [kN/mm]	Średnia sztywność ścicia [kN/mm]
1/1	Brak sprysku	150,5	19,4	12,8	3,5	2,6	1,09	0,7	5,54	4,9
1/2		149,5	6,6		1,5		0,38		4,40	
1/3		149,7	10,8		2,5		0,61		4,32	
1/4		150,0	12,1		2,3		0,68		5,38	
1/5		150,5	14,9		3,0		0,84		4,97	
2/2	Emulsja 1 (0,4 kg/m ²)	150,6	14,0	11,7	2,5	2,6	0,79	0,7	5,60	4,5
2/3		149,5	9,7		2,3		0,55		4,31	
2/4		150,5	14,5		3,3		0,82		4,46	
2/5		150,5	8,7		2,5		0,49		3,48	
3/1	Emulsja 2 (0,35 kg/m ²)	150,0	15,2	16,9	2,8	3,2	0,86	1,0	5,53	5,3
3/2		149,7	19,3		3,5		1,10		5,51	
3/3		149,5	15,6		3,3		0,89		4,80	
3/4		150,5	17,4		3,3		0,98		5,35	
4/1	Emulsja 2 (0,7 kg/m ²)	150,5	18,1	18,1	3,0	2,8	1,02	1,0	6,03	6,6
4/2		149,5	17,3		2,5		0,99		6,92	
4/3		150,5	19,6		2,8		1,10		7,13	
4/4		150,0	17,3		2,8		0,98		6,29	

Uwaga:

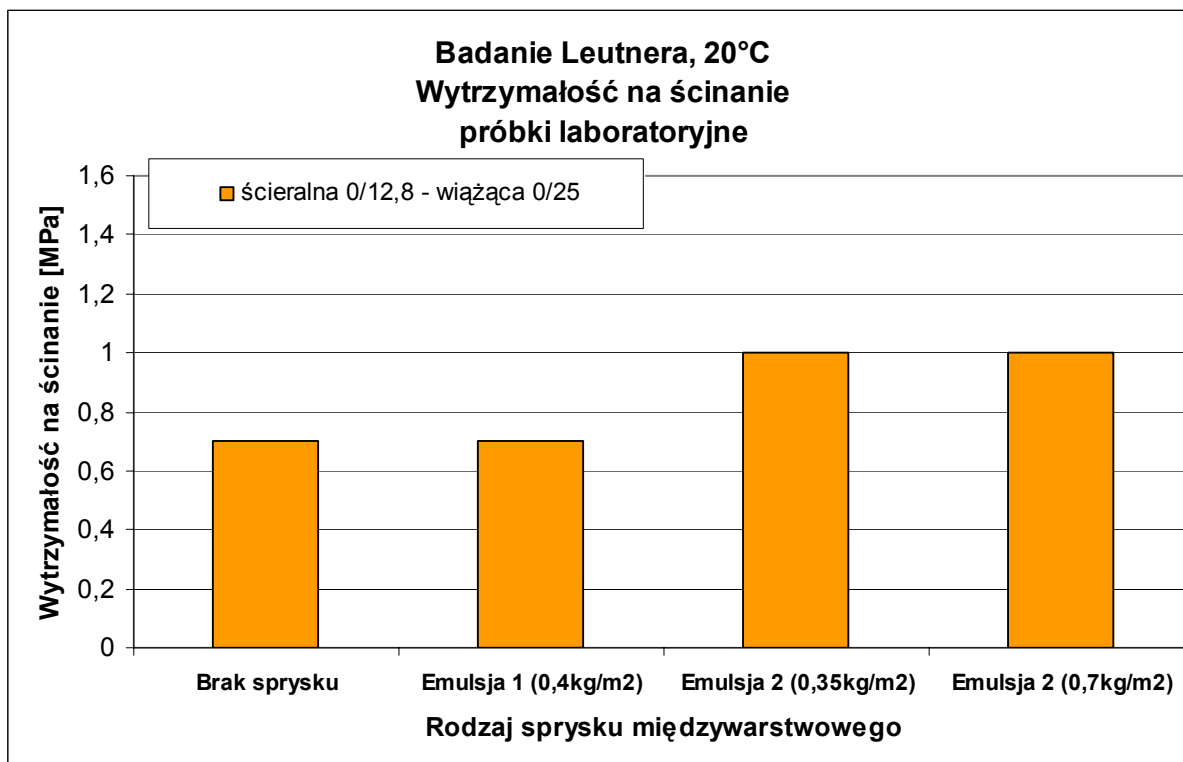
Emulsja 1 – emulsja szybko rozpadowa K1-65 zwykła produkowana przez firmę POLDIM,
Emulsja 2 - emulsja szybko rozpadowa K1-60W zwykła produkowana przez firmę Lotos Jasło,
ilość sprysku dotyczy pozostałego asfaltu.



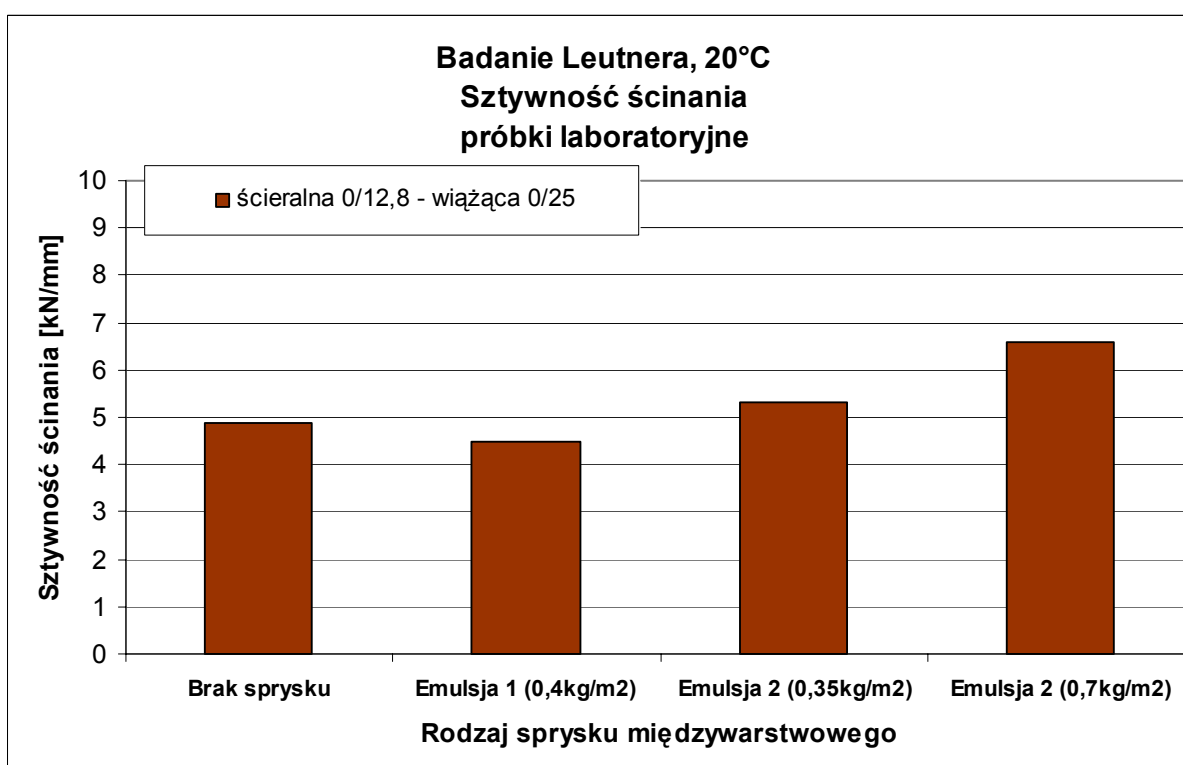
Rysunek 3.1. Maksymalna siła ścinająca (ścieralna BA 0/12,8 – wiążąca BA 0/25)



Rysunek 3.2. Droga ścicia (ścieralna BA 0/12,8 – wiążąca BA 0/25)



Rysunek 3.3. Wytrzymałość na ścinanie (ścieralna BA 0/12,8 – wiążąca BA 0/25)



Rysunek 3.4. Sztywność ścinania (ścieralna BA 0/12,8 – wiążąca BA 0/25)

3.4. Ocena wyników badań laboratoryjnych

Ocena wyników badań szczepności międzywarstwowej z roku 2005 [1], próbki przygotowane w laboratorium

Uzyskano zaskakująco niskie siły ścinania dla wszystkich kombinacji sprysku międzywarstwowego. Wyniki mieszczą się w zakresie od 4,8 do 6,3 kN (patrz pkt. 3.3, strona 39 raportu z 2005 r. [1]), podczas, gdy oczekiwano wyników do 30 kN. Jak się okazało bezpośrednią przyczyną niskiej szczepności międzywarstwowej było nie efektywne zagęszczenie poszczególnych warstw – wiążącej i ściernistej. Otrzymane wyniki nie mogą stanowić wiarygodnej podstawy do wnioskowania na temat skuteczności poszczególnych sprysków. Jednak można zauważyć wyraźną tendencję wyższych sił ścinających dla sprysku przy użyciu emulsji modyfikowanej 5,8-6,3 kN w odniesieniu do sprysku z emulsji zwykłej 4,6 kN. Wzrost siły ścinania na korzyść emulsji modyfikowanej wynosi odpowiednio 26% i 37%.

Cieżko jest wnioskować na temat wpływu zabrudzenia i ilości sprysku, gdyż nie ma wyraźnej różnicy na tym poziomie uzyskanych sił ścinania.

Ocena wyników badań szczepności międzywarstwowej z roku 2006, próbki przygotowane w laboratorium

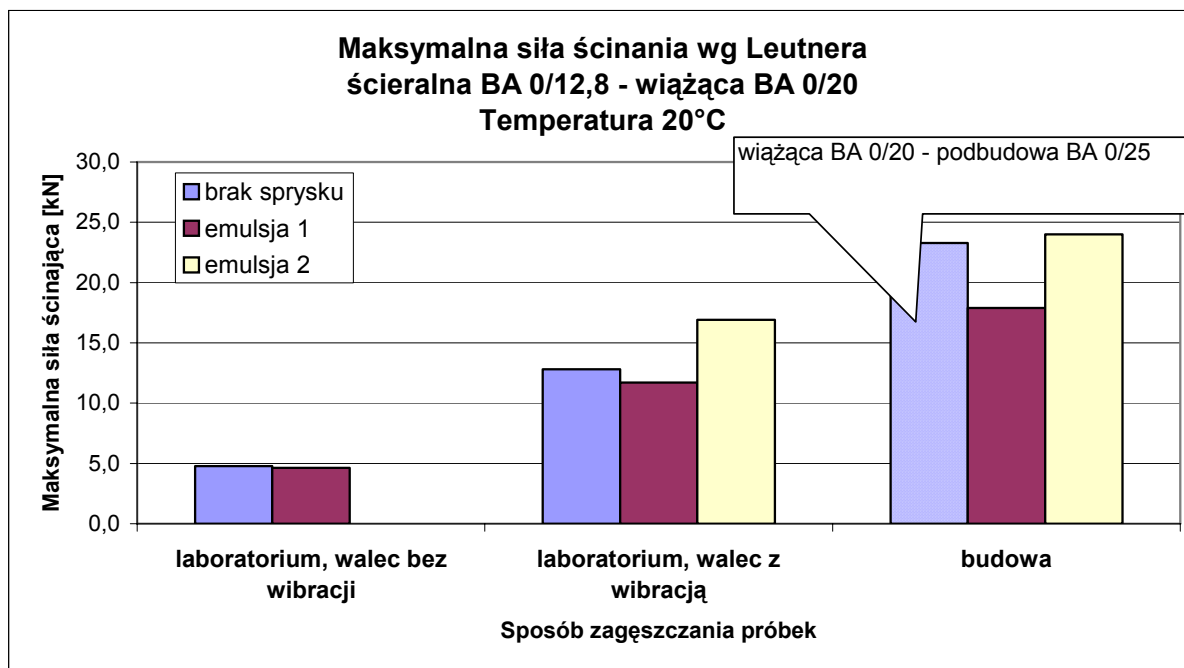
Zaobserwowano niepomijalny wpływ rodzaju emulsji. Większe ścieranie, siłę ścinania 16,9 i 18,1 kN uzyskano dla emulsji 2, wyprodukowanej na bazie twardszego asfaltu 70/100 w porównaniu do siły 11,7 kN uzyskanej dla emulsji 1, wyprodukowanej na bazie asfaltu 160/220. Wzrost siły ścinania na korzyść emulsji 2 wynosi odpowiednio 44% i 55% w stosunku do emulsji 1, co jest istotne.

Jednocześnie odnotowano niewielką skuteczność sprysku międzywarstwowego (patrz rys. 3.1) przy zastosowaniu sprysku z emulsji 1 (siła ścinania 11,7 kN) w stosunku do braku sprysku (siła ścinania 12,8 kN). Odnotowano wręcz 9% spadek skuteczności sprysku przy zastosowaniu emulsji 1.

Ocena zestawionych wyników badań z roku 2005 i 2006

Uzyskane wyniki z przeprowadzonych badań ścinania międzywarstwowego wg metody Leutnera w roku 2005 [1] oraz w roku 2006 zwracają uwagę przede wszystkim na wpływ skuteczności zagęszczania warstw asfaltowych.

Rysunek 3.4 przedstawia wyniki uzyskane w badaniach z 2005 r. [1] (laboratorium, walec bez wibracji) i wyniki z 2006 r. (laboratorium, walec z wibracją), (budowa) pokazujące zależności siły ścinania od sposobu zagęszczenia. Jak widać decydujące znaczenie na siłę ścinania ma sposób zagęszczenia próbek, co bezpośrednio wpływa na efekt ząbkowania się stykających się warstw [1]. Warstwy asfaltowe zagęszczane walcem bez wibracji osiągają wartości siły ścinającej na poziomie 5 kN, natomiast warstwy zagęszczane walcem z wibracją osiągają siły rzędu 13 kN. Podczas, gdy warstwy zagęszczane w warunkach rzeczywistych, na budowie osiągają wartości siły ścinania na poziomie 20 kN.



Wyniki badań z 2005 r. oznaczono - „laboratorium, walec bez wibracji”.

Rysunek 3.5. Zestawienie maksymalnej siły ścinającej w zależności od sposobu zagęszczenia próbek

Jednocześnie widoczne jest nieznaczne pogorszenie siły ścinania przy użyciu emulsji 1 w stosunku do braku sprysku w każdym przypadku zagęszczenia. Brak sprysku na warstwie wiążącej utrzymanej w czystości i niepozabawionej otoczki twardego asfaltu 30/50 na kruszywie, pochodzącego z samej mieszanki charakteryzują się wyższą siłą ścinania w stosunku do siły, uzyskanej dla sprysku z emulsji 1 wyprodukowanej na bazie asfaltu 160/220. Oznacza to, że nie każdy sprysk międzywarstwowy (rodzaj tego sprysku) jest wystarczająco skuteczny, a czasem nawet pogarszający szczepność międzywarstwową.

4. Odcinek doświadczalny

4.1. Wstęp

Wykonano odcinek doświadczalny, gdzie w warunkach rzeczywistych przeprowadzono pomiary szczepności międzywarstwowej i jej wpływu na zachowanie się konstrukcji nawierzchni.

Na podstawie studiów literatury [1] i przeprowadzonych analiz obliczeniowych w punkcie 5, stwierdzono, że największy niekorzystny wpływ na trwałość konstrukcji nawierzchni ma utrata szczepności pomiędzy warstwą podbudowy a wiążącą. Dlatego, też dla zmniejszenia zakresu prac na odcinku doświadczalnym symulacje szczepności międzywarstwowej ograniczono tylko tego miejsca, pomiędzy warstwą podbudowy a wiążącą.

Dodatkowo wykonano badania wpływu dwóch rodzajów emulsji asfaltowej na szczepność międzywarstwową pomiędzy warstwami wiążącą i ścieralną.

Dla symulacji różnej szczepności międzywarstwowej w terenie, a właściwie dla wyznaczenia wpływu różnej szczepności na zachowanie się konstrukcji przygotowano kilka rodzajów warstw szepnych. Wykonano warstwy, które stosowane są standardowo przez największą firmę drogową w województwie pomorskim, zachowując panujące w firmie reżimy wykonawcze oraz stosując różne ilości sprysku międzywarstwowego. Przygotowano też sekcję, gdzie na dwóch z nich nie wykonano standardowego sprysku międzywarstwowego, a na innych zakłócono (celowo ograniczono) szczepność międzywarstwową.

Dla uzyskania efektu całkowitego braku szczepności międzywarstwowej wykonano warstwę, która gwarantowała poślizg międzywarstwowy. Osiągnięto to dzięki wprowadzeniu niezwiązanej, niezagęszczonej cienkiej warstwy:

- z pyłów mineralnych, pochodzących z systemu odpylania wytwórni mieszanek bitumicznych (WMB) oraz
- alternatywnie z zaczynu gliniastego.

4.2. Lokalizacja

Odcinek doświadczalny zlokalizowano w ciągu drogi lokalnej w Pszczółkach, łączącej kopalnię odkrywkową kruszyw naturalnych z drogą gminną, krzyżującą się z drogą krajową DK 1.

W chwili rozpoczęcia prac ziemnych na autostradzie A1 firma eksploatująca i dowożąca złoże na autostradę została zmuszona do ulepszenia lokalnej drogi, by bezawaryjnie i sprawnie mogły się poruszać najcięższe pojazdy wożące materiał mineralny oraz pojazdy mieszkańców okolicy. Dzięki firmie drogowej Skanska S.A. - wykonawcy robót na drodze lokalnej powstała możliwość stworzenia poletka doświadczalnego, gdzie możnaby badać różnego rodzaju warstwy szepne.

Długość remontowanej drogi lokalnej wynosiła 1350 m, natomiast długość odcinka doświadczalnego do badań szczepności pomiędzy warstwą podbudowy a wiążącą wynosiła 140 m. Szerokość jezdni wynosiła 7 m.

4.3. Materiały i prace przygotowawcze

Remont gruntowej drogi lokalnej polegał na przygotowaniu podłoża przez wyprofilowanie i wbudowanie warstwy wyrównawczej z destruktu betonowego i ceglanego o grubości od 0 do 35 cm. Na tak przygotowane podłoże wbudowano 3 warstwy z betonu asfaltowego:

- 12 cm warstwy podbudowy BA 0/25,
- 8 cm warstwy wiążącej BA 0/20,
- 6 cm warstwy ścieralnej BA 0/16.

Do sprysku międzywarstwowego, jako warstwy szepnej zastosowano emulsję zwykłą szybkorozpadową K1-65 produkcji POLDIM Tarnów.

Lokalnie pomiędzy warstwę ścieralną a wiążącą zastosowano emulsję zwykłą szybkozspadową K1-60W produkcji Lotos Jasło.

Przed wykonaniem warstw szepnych podłoże (warstwę asfaltową niżej leżącą) odpowiednio przygotowano, co jest standardową procedurą wykonawcy robót:

1. oczyszczenie i zerwanie przyklejonych do podłoża cząstek gruntu i innych zanieczyszczeń przy zastosowaniu mechanicznej szczotki stalowej (patrz rys. 4.1),
2. oczyszczenie podłoża ze wszystkich luźnych części przez dmuchanie sprężonym powietrzem (patrz rys. 4.2 i 4.3),
3. ograniczenie ruchu na tak przygotowanym podłożu.



Rysunek 4.1. Oczyszczenie podłoża (warstwy niżej leżącej) mechaniczną szczotką pod sprysk międzywarstwowy



Rysunek 4.2. Oczyszczenie podłoża (warstwy niżej leżąca) sprężonym powietrzem pod sprysk międzywarstwowy



Rysunek 4.3. Oczyszczenie podłoża (warstwy niżej leżąca) sprężonym powietrzem pod sprysk międzywarstwowy



Rysunek 4.4. Widok przygotowanego podłoża (warstwy niższej leżącej) pod sprysk międzywarstwowy

4.4. Warstwa szepna

W dniu 8 kwietnia 2006 r. na odcinku doświadczalnym wykonano warstwy szepne pomiędzy warstwą podbudowy a wiążącą z betonu asfaltowego. Wykonano następujące warstwy szepne:

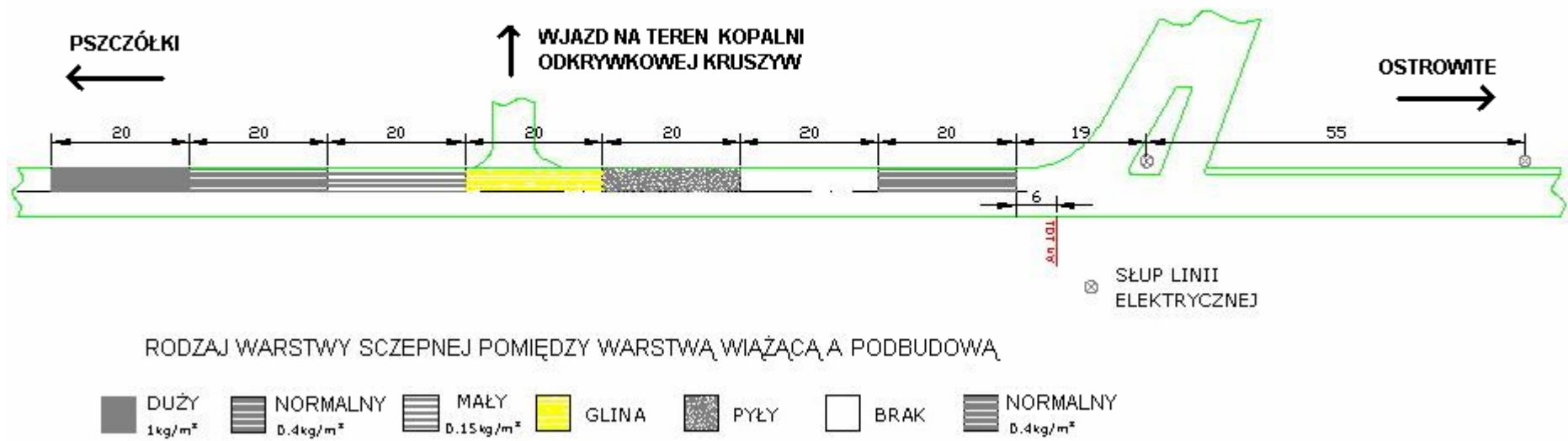
1. sprysk z emulsji zwykłej szybkorozpadowej K1, w ilości standardowej 0,4 kg/m²,
2. brak sprysku z emulsji,
3. zamiast sprysku z emulsji posypka suchymi pyłami z instalacji odpylania wytwórni mieszanek bitumicznych (WMB), w ilości około 1,4 kg/m² (grubość od 3 do 5 mm),
4. zamiast sprysku z emulsji naniesiono półpłynny zaczyn gliniasty (zawiesina gliny w wodzie), w ilości około 0,7 kg/m² (grubość około 3 mm),
5. sprysk z emulsji zwykłej szybkorozpadowej K1, powtórnie w ilości standardowej 0,4 kg/m²,
6. sprysk z emulsji zwykłej szybkorozpadowej K1, w ilości zmniejszonej 0,15 kg/m²,
7. sprysk z emulsji zwykłej szybkorozpadowej K1, w ilości zawyżonej 0,9 kg/m²,

Do wykonania sprysku międzywarstwowego zastosowano automatyczną skrapiarkę z możliwością dokładnej regulacji ilości sprysku międzywarstwowego (patrz rys. 4.6 i 4.7). Sprysk z emulsji wykonywano bezpośrednio przed wjazdem rozściełacza mieszanek mineralno-asfaltowych z warstwą wiążącą. Emulsja asfaltowa nie zdążyła ulec całkowitemu rozpadowi.

Pyły i zaczyn gliniasty został rozprowadzony ręcznie na warstwie podbudowy przy pomocy pacek gumowych, także bezpośrednio przed wbudowaniem warstwy wiążącej.

Rozmieszczenie poszczególnych sekcji o różnych warstwach szepnych pomiędzy warstwą wiążącą a ścieralną przedstawiono na rysunku 4.5.

ODCINEK PRÓBNY PSZCZÓŁKI



Rysunek 4.5. Szkic podziału odcinka doświadczalnego na sekcje z różnym rodzajem warstwy szepnej pomiędzy warstwą podbudowy a wiążącą.



Rysunek 4.6. Widok automatycznej spryskiwarki emulsji asfaltowej do sprysku międzywarstwowego



Rysunek 4.7. Widok spryskiwarki podczas wykonywania sprysku międzywarstwowego



Rysunek 4.8. Widok przygotowanego podłoża warstwy podbudowy pod warstwę szepną z pyłów z odpylania WMB



Rysunek 4.9. Widok warstwy szepnej z pyłów z odpylania WMB



Rysunek 4.10. Widok przygotowanego zaczynu gliniastego do warstwy szepnej



Rysunek 4.11. Wykonywanie warstwy szepnej z zaczynu gliniastego



Rysunek 4.12. Gotowa warstwa szepna z zaczynu gliniastego



Rysunek 4.13. Sprysk z emulsji asfaltowej. Granica różnej ilości sprysku międzywarstwowego.



Rysunek 4.14. Sprysk z emulsji asfaltowej. Granica różnej ilości sprysku międzywarstwowego.



Rysunek 4.15. Wbudowywanie warstwy wiążącej z betonu asfaltowego na przygotowane warstwy szpewnej

4.5. Badania szczepności próbek wyciętych z odcinka doświadczalnego

W nawierzchni odcinka doświadczalnego wykonano odwierty próbek po okresie prawie dwóch miesięcy po oddaniu nawierzchni do eksploatacji (08.06.2006 r.).

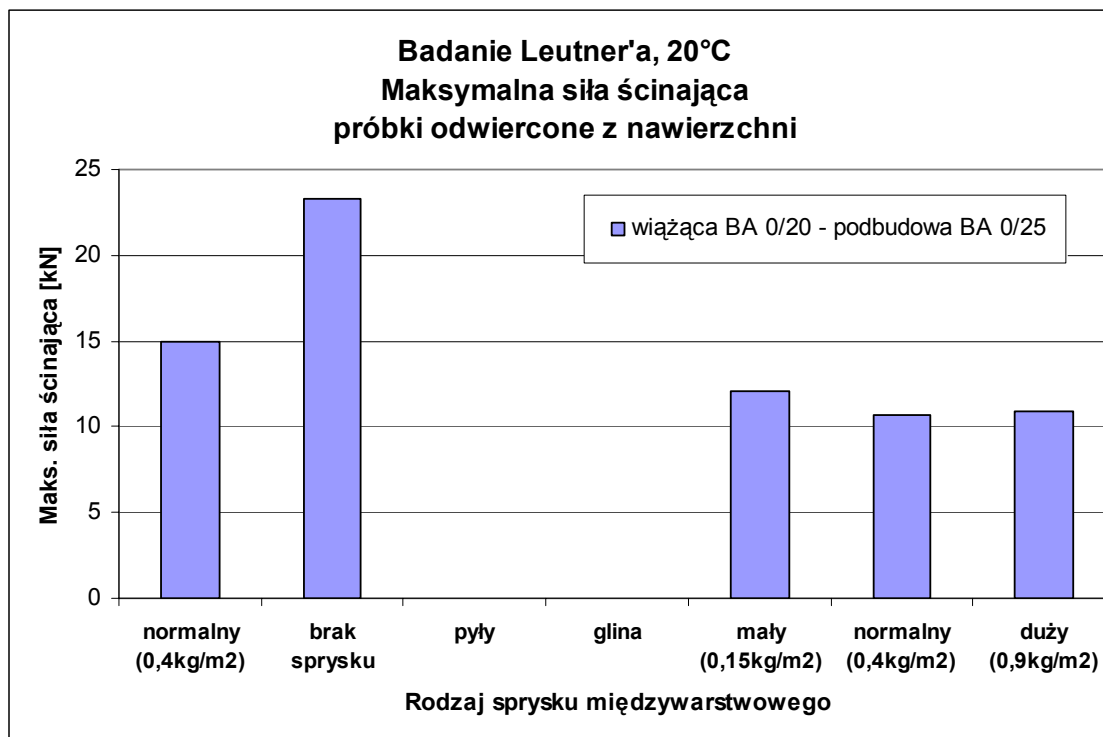
Celem odwiertów było wyznaczenie grubości warstw, co jest konieczne do dalszych analiz (między innymi analizy badań FWD) oraz określenie szczepności międzywarstwowej wg metody Leutnera pomiędzy warstwą podbudowy i wiążącą. Z każdej z siedmiu sekcji odwiercono po 2 próbki $\phi 150$. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 4.1 i 4.2.

Dodatkowo z dwóch innych miejsc, poza sekcjami odwiercono po 3 próbki, gdzie wykonano różny sprysk (dwa rodzaje emulsji), lecz między warstwami wiążącą i ścieralną. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 4.3.

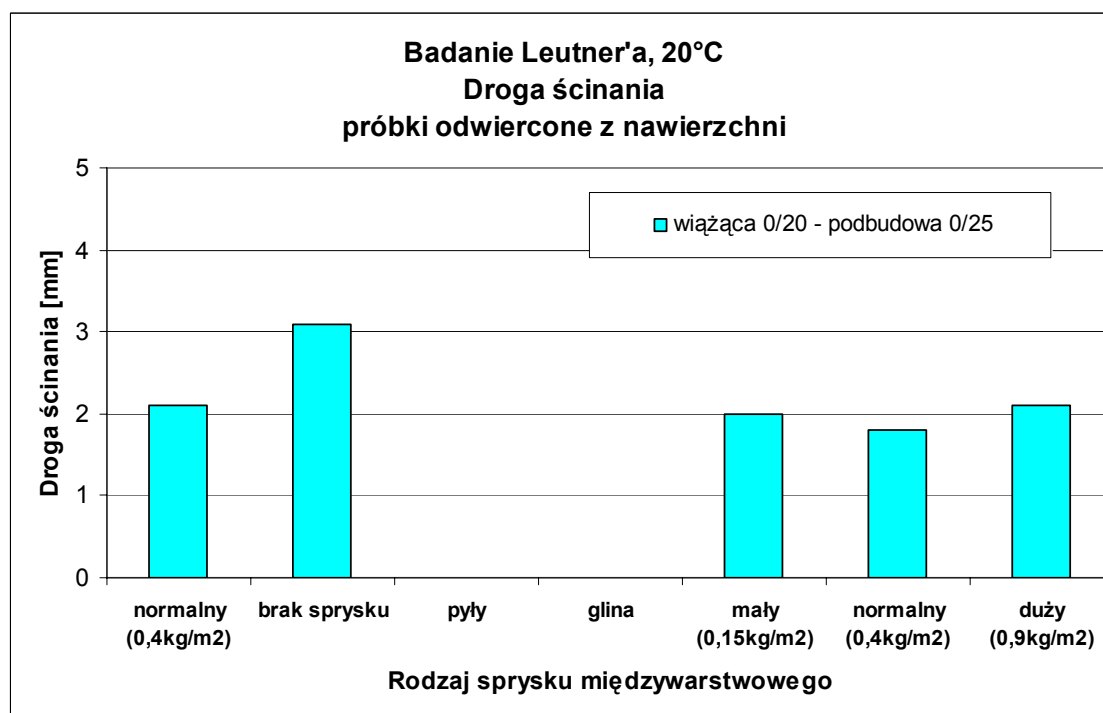
Tablica 4.1. Wyniki badań szczepności wg Leutnera z próbek odwierconych z nawierzchni odcinka doświadczalnego pomiędzy warstwą wiążącą a podbudową.
Temperatura badania 20°C

Wiążąca - podbudowa

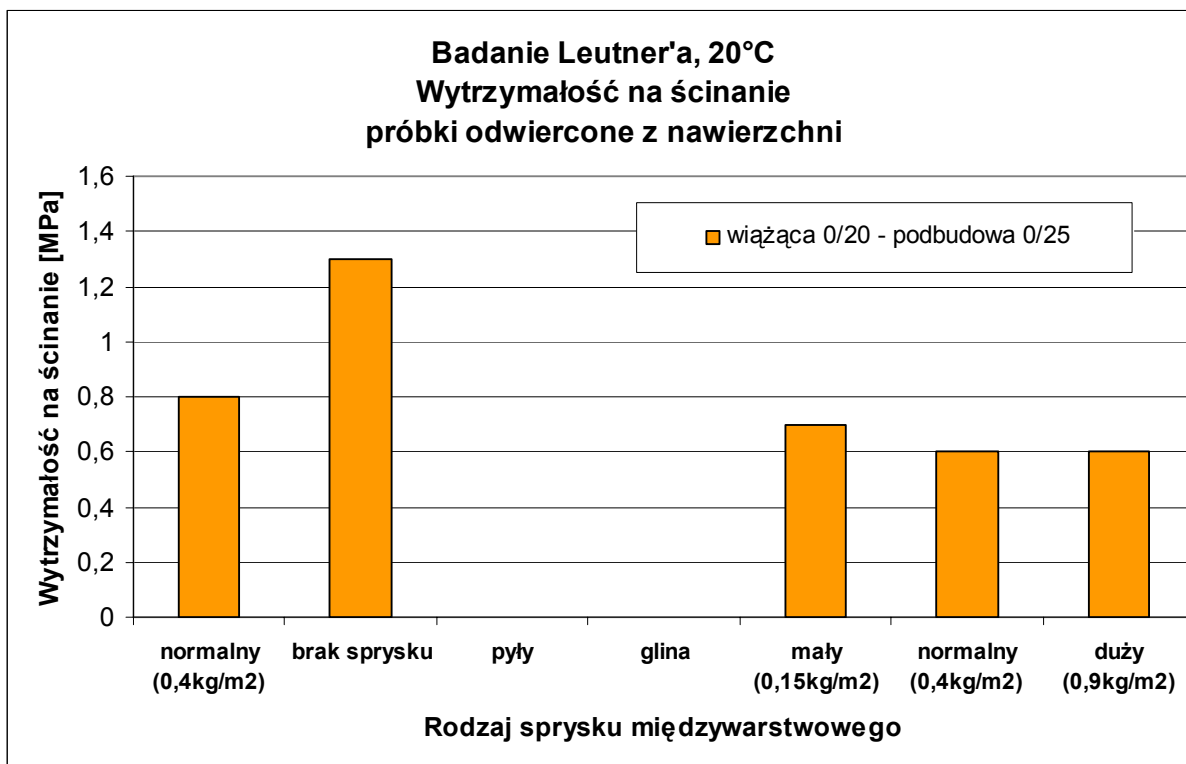
Nr próbki	Rodzaj sprysku	Średnica [mm]	Siła ścinająca [kN]	Średnia siła ścinająca [kN]	Droga ściecia [mm]	Średnia droga ścinająca [mm]	Naprężenie ścinające [MPa]	Średnie naprężenie ścinające [MPa]	Sztywność ścinania [kN/mm]	Średnia sztywność ścinania [kN/mm]
1/1	normalny (0,4 kg/m ²)	150	12,6	15,0	2,0	2,1	0,71	0,8	6,3	7,0
1/2		150	17,4		2,3		0,98		7,7	
2/1	brak	150	21,8	23,3	2,8	3,1	1,23	1,3	7,9	7,5
2/2		150	24,8		3,5		1,40		7,1	
3	pyły	150	0	brak szczepności już podczas odwiertu						
4	glina	150	0							
5/1	mały (0,15 kg/m ²)	150	13,1	12,1	2,0	2,0	0,74	0,7	6,6	6,0
5/2		150	11		2,0		0,62		5,5	
6/1	normalny (0,4 kg/m ²)	150	11,1	10,7	1,9	1,8	0,63	0,6	5,9	5,9
6/2		150	10,2		1,8		0,58		5,8	
7/1	duży (0,9 kg/m ²)	150	9,2	10,9	1,5	2,1	0,52	0,6	6,1	5,5
7/2		150	11,4		1,8		0,65		6,5	
7/3		150	12,1		3,0		0,68		4,0	



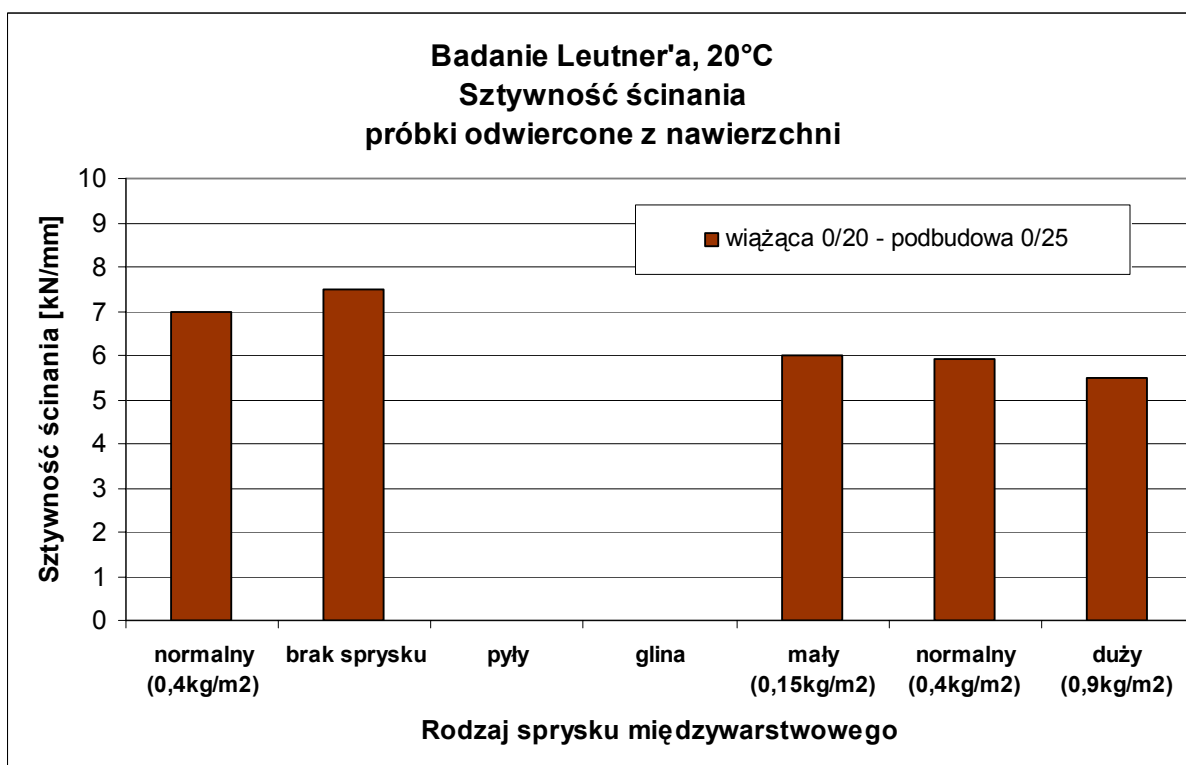
Rysunek 4.16. Maksymalna siła ścinająca z badania Leutnera



Rysunek 4.17. Droga ścinania z badania Leutnera



Rysunek 4.18. Wytrzymałość na ścinanie z badania Leutnera



Rysunek 4.19. Sztywność ścinania z badania Leutnera

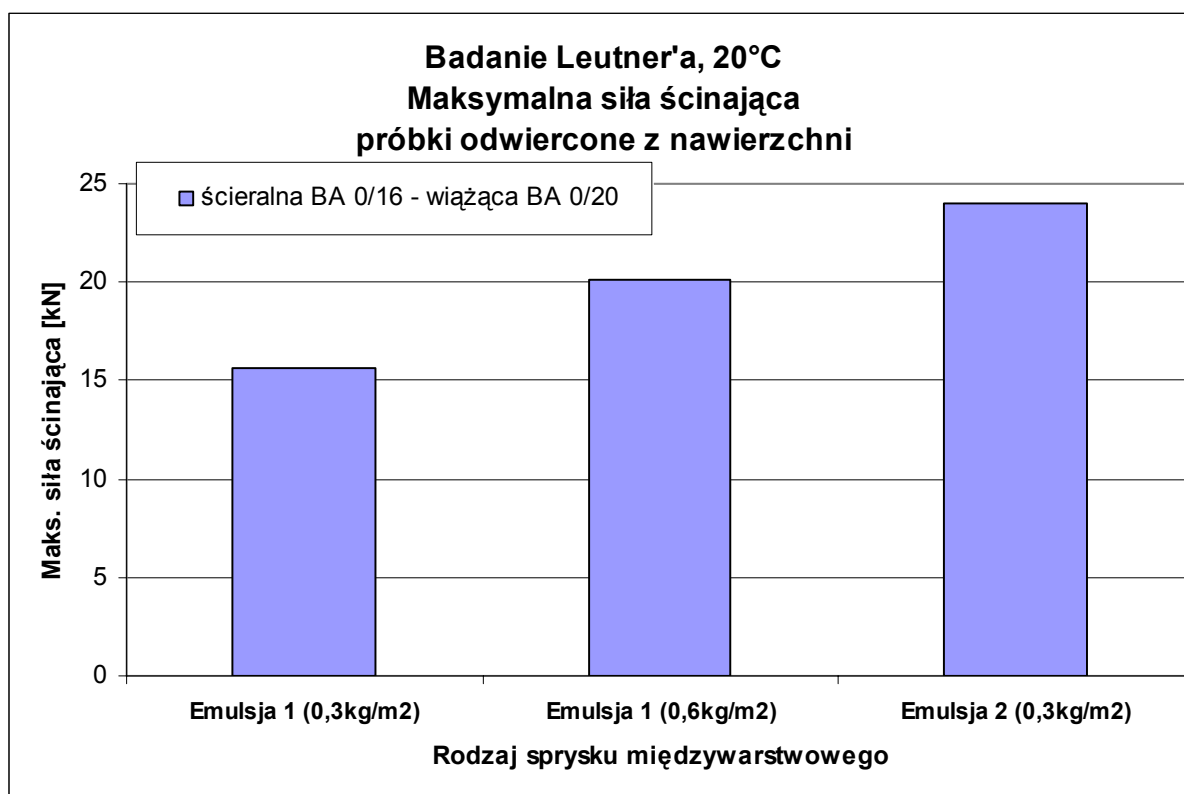
Tablica 4.2. Wyniki badań szczepności wg Leutnera z próbek odwierconych z nawierzchni odcinka doświadczalnego pomiędzy warstwą ścierną a wiążącą.
Temperatura badania 20°C

Ścieralna - wiążąca

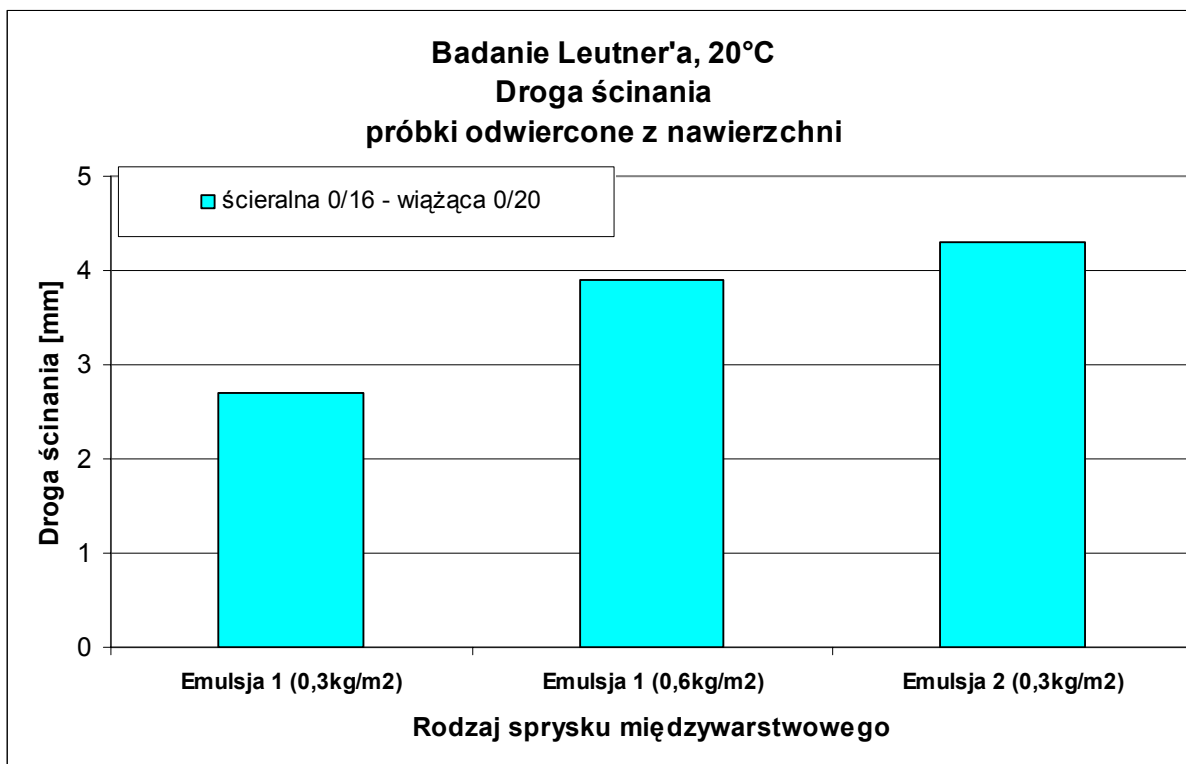
Nr próbki	Rodzaj sprysku	Średnica [mm]	Siła ścinająca [kN]	Srednia siła ścinająca [kN]	Droga ścicia [mm]	Srednia droga ścinająca [mm]	Napężenie ścinające [MPa]	Srednie napężenie ścinające [MPa]	Sztynność ścicia [kN/mm]	Srednia sztywność ścicia [kN/mm]
1/1	Emulsja 1 (0,3 kg/m ²)	150	16,4	17,2	2,8	2,8	0,93	1,0	5,96	6,2
1/2		150	17,9		2,8		1,01		6,51	
2/1		150	14,8	15,2	3,0	2,9	0,84	0,9	4,93	5,3
2/2		150	15,6		2,8		0,88		5,67	
3		-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	150	13,4	13,4	2,3	2,3	0,76	0,8	5,96	6,0	
5/1	Emulsja 1 (0,6 kg/m ²)	150	19,8	19,6	4,0	4,1	1,12	1,1	4,95	4,7
5/2		150	19,3		4,3		1,09		4,54	
6/1		150	20,0	20,6	3,3	3,6	1,13	1,2	6,15	5,7
6/2		150	21,2		4,0		1,20		5,30	
7/1	Emulsja 2 (0,3 kg/m ²)	150	18,9	23,4	3,3	4,0	1,07	1,3	5,82	5,8
7/2		150	26,3		4,5		1,49		5,84	
7/3		150	25,0		4,3		1,41		5,88	
8/1		150	21,4	24,5	4,8	4,7	1,21	1,4	4,51	5,3
8/2		150	26,8		5,0		1,52		5,36	
8/3	150	25,4	4,3		1,44		5,98			

Uwaga:

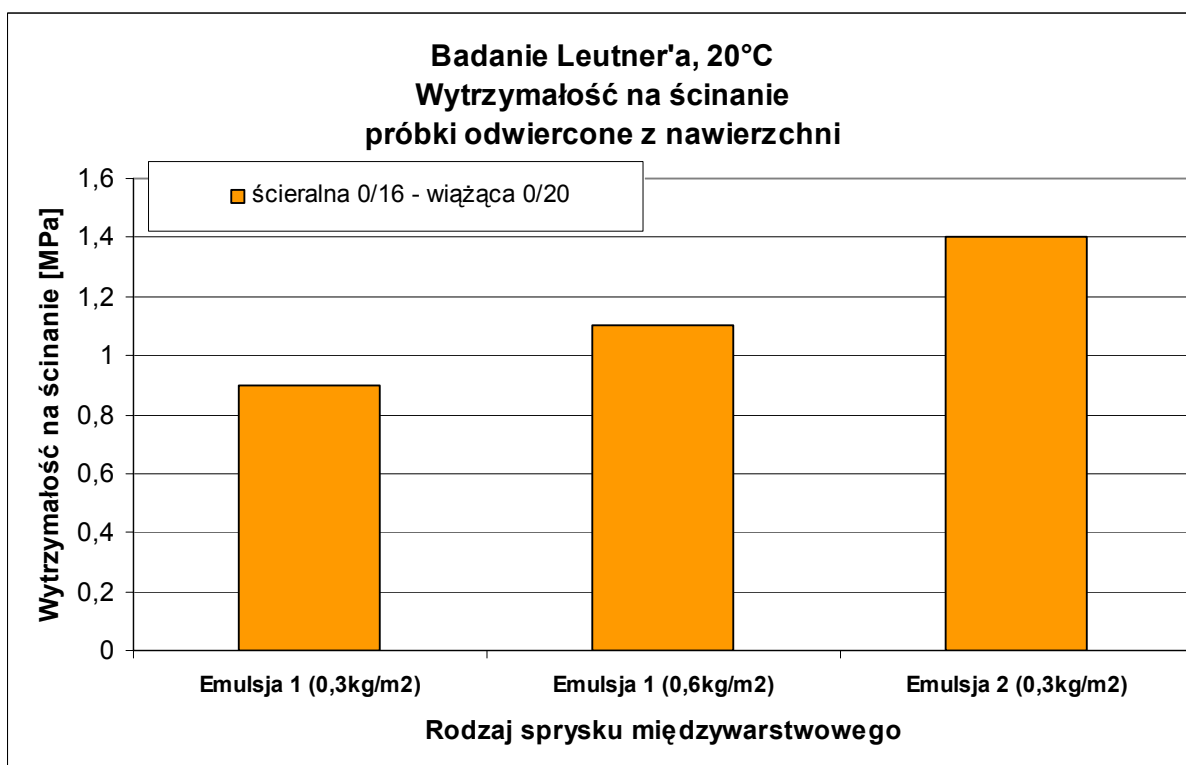
Emulsja 1 – emulsja szybkozspadowa K1-65 zwykła produkowana przez firmę POLDIM,
Emulsja 2 - emulsja szybkozspadowa K1-60W zwykła produkowana przez firmę Lotos Jasło,
Ilość sprysku dotyczy pozostałego asfaltu.



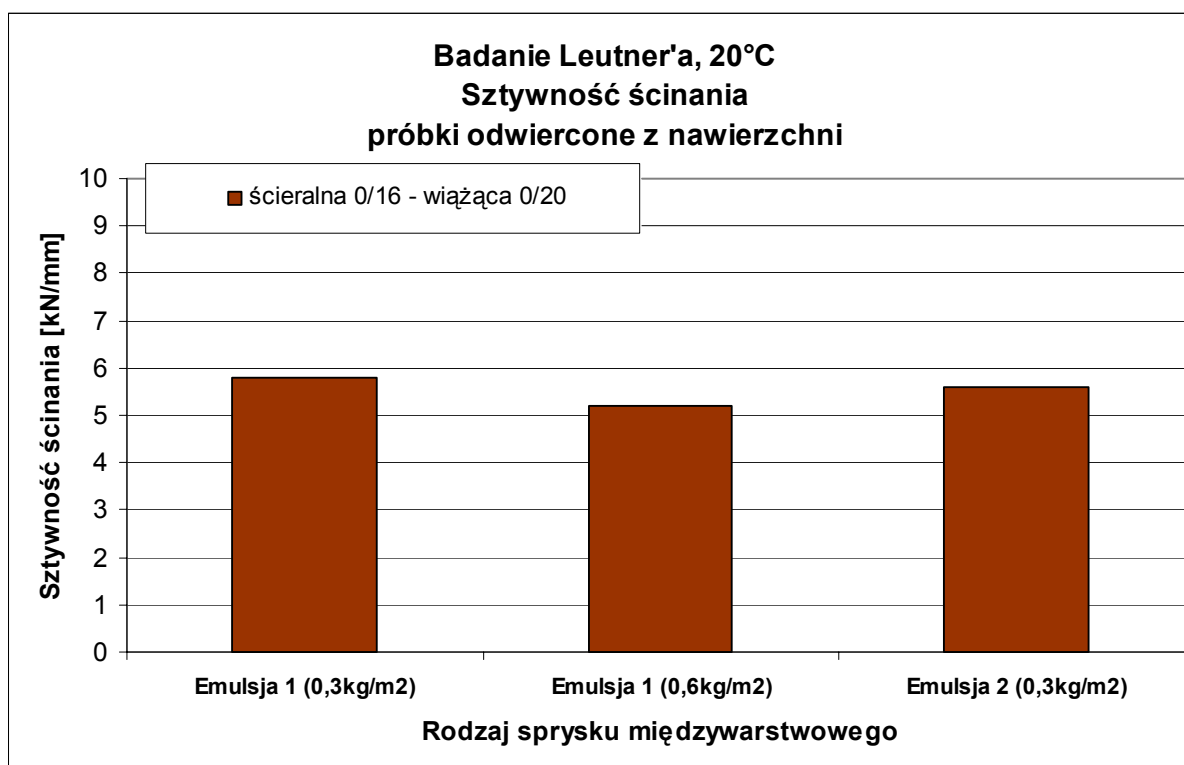
Rysunek 4.20. Maksymalna siła ścinająca z badania Leutnera



Rysunek 4.21. Droga ścinania z badania Leutnera



Rysunek 4.22. Wytrzymałość na ścinanie z badania Leutnera

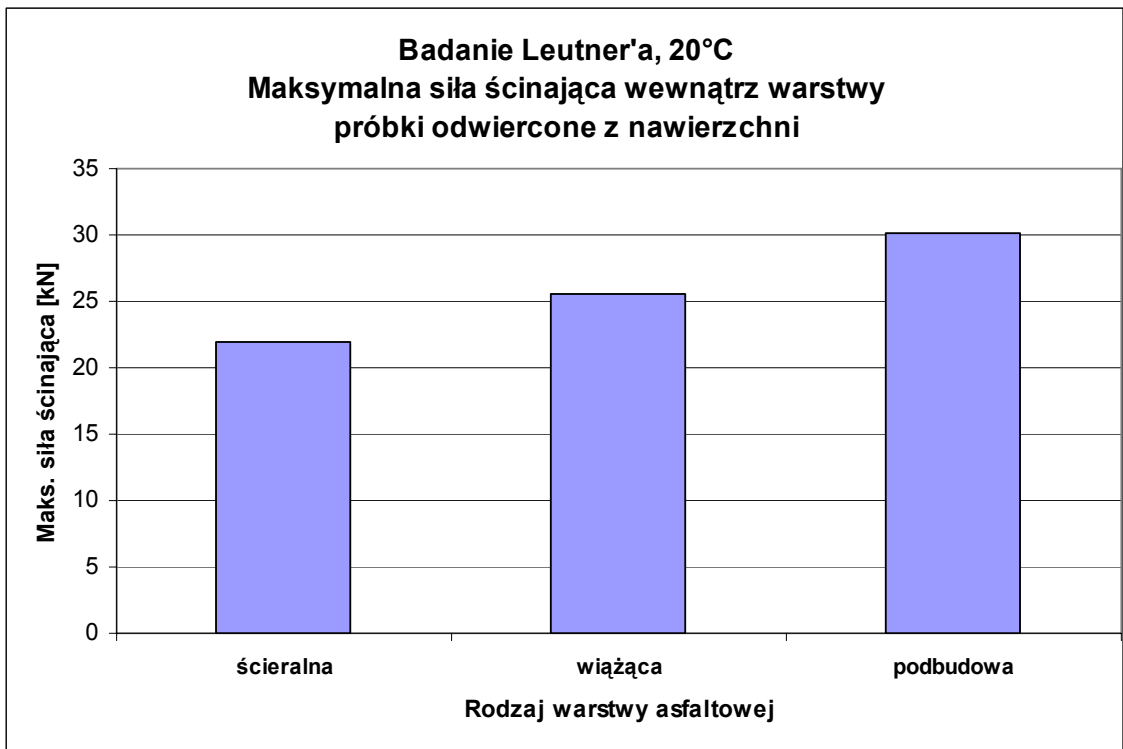


Rysunek 4.23. Sztywność ścinania z badania Leutnera

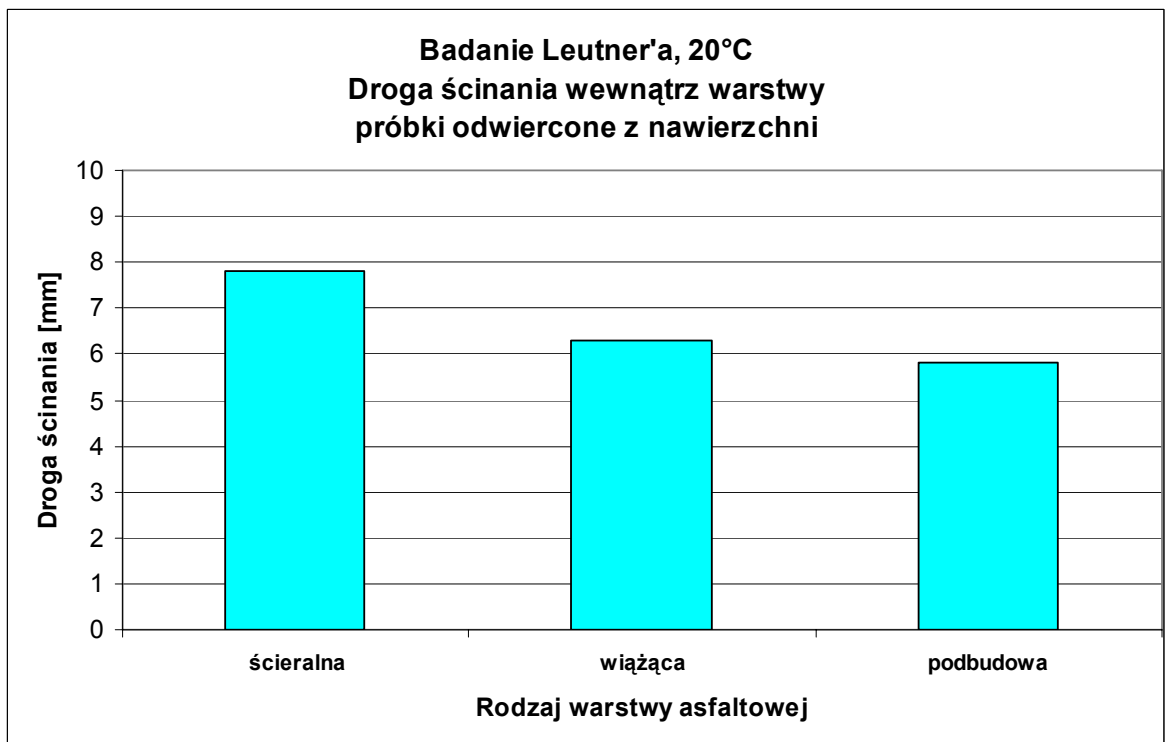
Tablica 4.3. Wyniki badań ścinania wg Leutnera z próbek odwierconych z nawierzchni odcinka doświadczalnego wewnątrz warstw: ścieralnej, wiążącej i podbudowy. Temperatura badania 20°C

Wewnątrz warstw

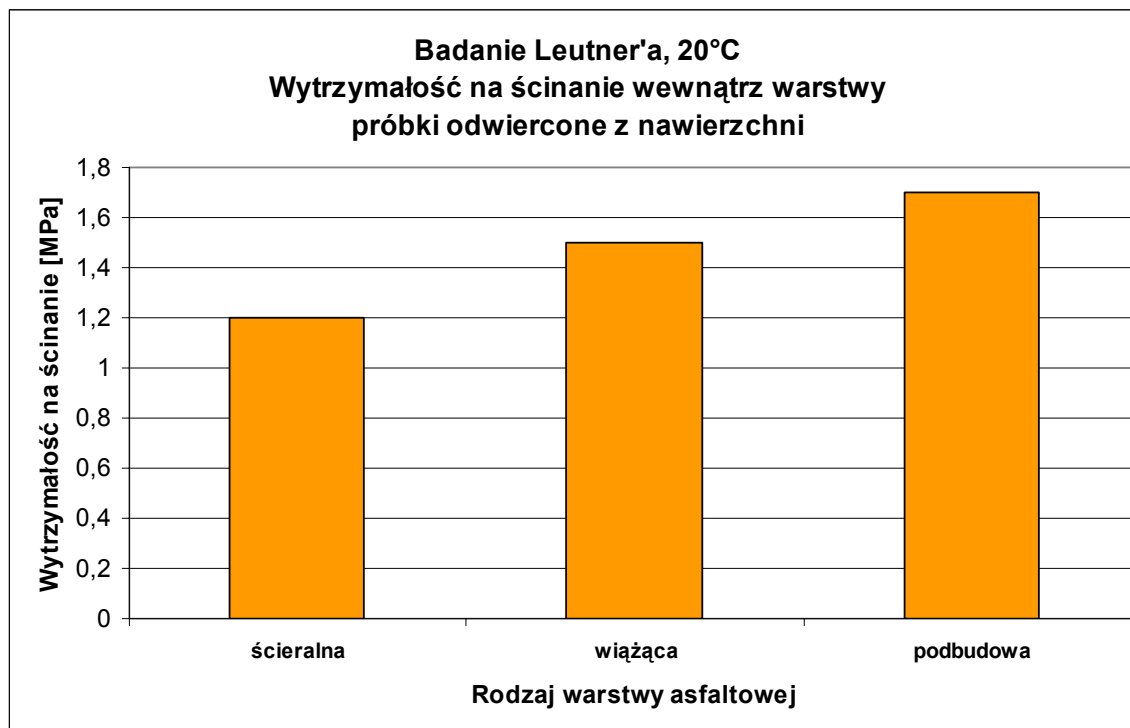
Nr próbki	Rodzaj sprysku	Średnica [mm]	Siła ścinająca [kN]	Średnia siła ścinająca [kN]	Droga ścicia [mm]	Średnia droga ścinająca [mm]	Napężenie ścinające [MPa]	Średnie napężenie ścinające [MPa]	Sztywność ścicia [kN/mm]	Średnia sztywność ścicia [kN/mm]
ścieralna	wewnątrz warstwy	150	22,4	22,0	8,8	7,8	1,27	1,2	2,6	2,9
ścieralna		150	22,4		7,3		1,27		3,1	
ścieralna		150	21,2		7,3		1,20		2,9	
wiążąca	wewnątrz warstwy	150	24,2	25,6	6,0	6,3	1,37	1,5	4,0	4,1
wiążąca		150	26		6,5		1,47		4,0	
wiążąca		150	26,7		6,3		1,51		4,3	
podbudowa	wewnątrz warstwy	150	30,2	30,2	5,8	5,8	1,71	1,7	5,3	5,3



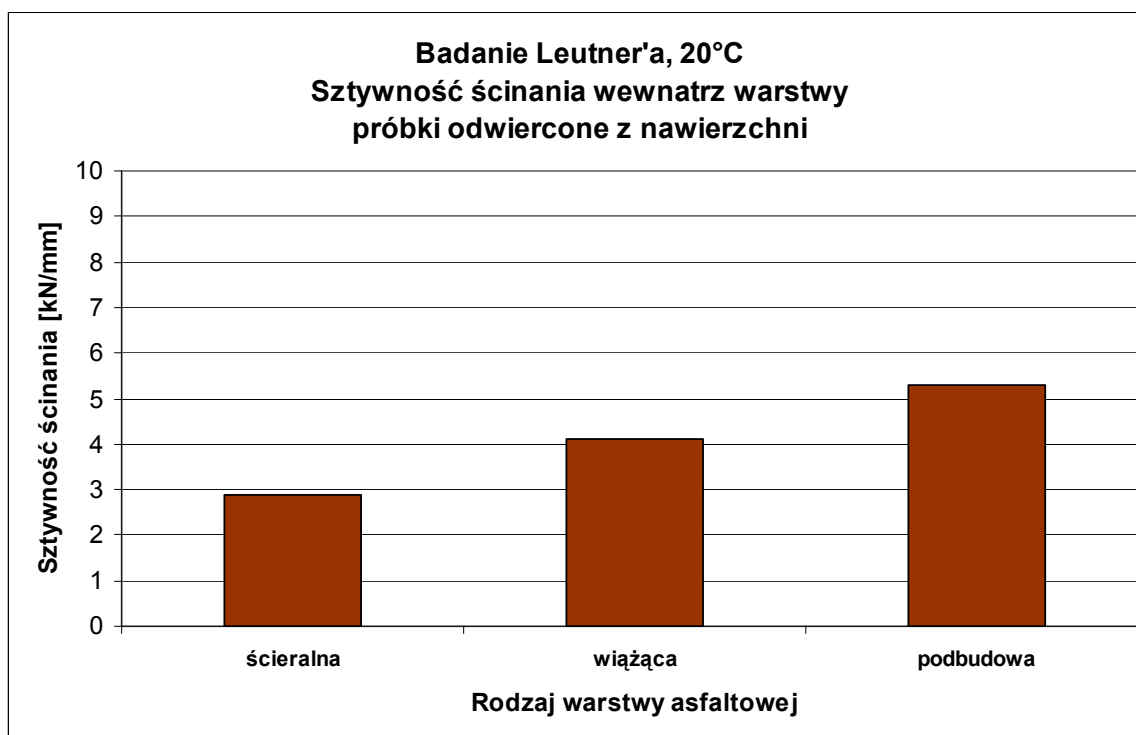
Rysunek 4.24. Maksymalna siła ścinająca z badania Leutnera



Rysunek 4.25. Droga ścinania z badania Leutnera



Rysunek 4.26. Wytrzymałość na ścinanie z badania Leutnera



Rysunek 4.27. Sztywność ścinania z badania Leutnera

4.5.1. Ocena wyników badań szczepności próbek z odcinka doświadczalnego

Zamierzony efekt zakłócenia (celowego zmniejszenia) szczepności międzywarstwowej pomiędzy warstwami wiążącą a podbudową został osiągnięty. Na sekcji III, gdzie zamiast sprysku zastosowano posypkę z pyłów mineralnych oraz na sekcji IV, gdzie zamiast sprysku zastosowano zaczyn gliniasty zaobserwowano całkowity brak szczepności międzywarstwowej. Podczas odwiertów rdzeni nie udało się wydobyć całych próbek (połączonych warstw) z tych sekcji.

Na pozostałych sekcjach, gdzie nie było sprysku (sekcja II) i był zróżnicowany sprysk (sekcje I, V, VI i VII) odnotowano różną siłę ściskania międzywarstwowego (rys. 4.16). Dla odwierconych próbek z odcinka doświadczalnego największą siłą ściskania (23,3 kN) połączenia warstwy wiążącej i podbudowy zmierzono dla sekcji II, gdzie nie zastosowano sprysku międzywarstwowego. Na sekcji I i VI, gdzie zastosowano sprysk z emulsji w standardowej ilości 0,4 kg/m² zbadano siłę ścinającą i wynosi ona odpowiednio 15,5 i 10,7 kN. Na pozostałych sekcjach V i VII, gdzie spryskano zmniejszoną ilością i zwiększoną ilością w stosunku do sprysku standardowego uzyskano odpowiednio wyniki 12,1 i 10,9 kN.

Zaskakującym rezultatem było osiągnięcie największej szczepności międzywarstwowej dla sekcji z brakiem sprysku międzywarstwowego w stosunku do sekcji ze spryskiem z emulsji o różnych ilościach. Można to wytłumaczyć tylko tym, iż zaistniało dobre zaklinowanie się warstw podbudowy i wiążącej oraz sklejenie się, gdzie lepszemu był twardy asfalt 30/50 pochodzący z samych mieszanek. Połączenie to nie zostało osłabione miękkim asfaltem 160/220, pochodzącym z zastosowanej emulsji asfaltowej. Natomiast w przypadku sekcji, gdzie zastosowanych spryski z emulsji osiągnięto niższe siły sklejenia ze względu na wprowadzony poślizg przez za miękki asfalt z emulsji.

Słabsze połączenie warstw ze spryskiem z emulsji potwierdziło wnioski z badań Szczepaniaka [22] - tylko emulsje produkowane na bazie twardych asfaltów gwarantują wysoką szczepność międzywarstwową.

Powyższe stwierdzenie zostało także potwierdzone w badaniach szczepności warstw wiążącej i ścieralnej na odcinku doświadczalnym (rys. 4.20), gdzie zastosowano do sprysku międzywarstwowego dwie różne emulsje, produkowane na bazie asfaltu 70/100 i 160/220. Sprysk z emulsją 1 (asfalt 160/220) osiągnął siłę ściskania 15,2 kN, podczas, gdy sprysk z emulsji 2 (asfalt 70/100) osiągnął siłę ściskania 24 kN. Sprawia to, że szczepność uzyskana ze sprysku z emulsji 2 (twardszy asfalt) jest o 58% mocniejsza od sprysku z emulsji 1 (miększy asfalt).

4.6. Badanie FWD

W dniu 01.06.2006 r. wykonano badania nośności ugięciomierzem dynamicznym FWD na odcinku doświadczalnym. Pomiarów wykonano w odległości 1 m od krawędzi jezdni, co 2 m. Na każdej sekcji o długości 20 m wykonano po 10 pomiarów. Pomiarów wykonano w godzinach od 10.40 do 11.40. Temperatura powietrza wynosiła 17°C, a temperatura nawierzchni wynosiła 14°C.

Nawierzchnię obciążano płytą o średnicy 30 cm, wywołując nacisk 800 kPa. Ugięcia rejestrowało 9 geofonów rozmieszczonych w następujących odległościach od środka płyty obciążającej:

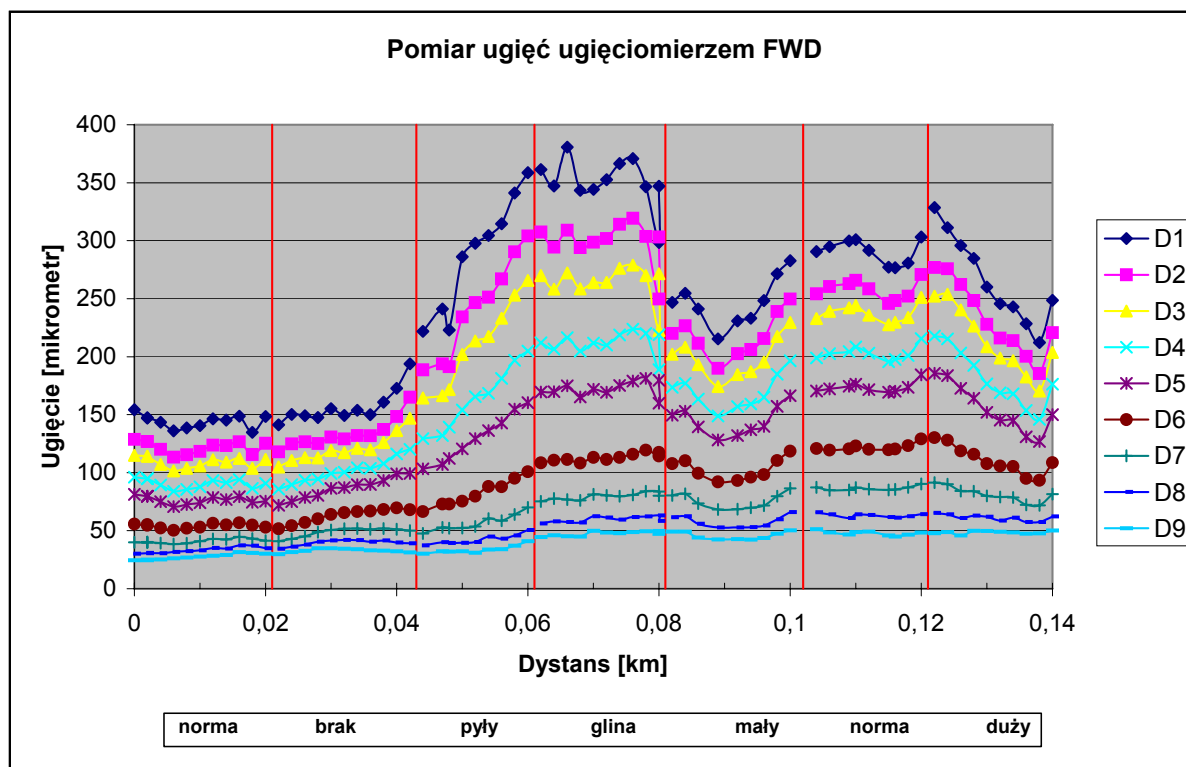
D1 – 0 mm, D2 – 210 mm, D3 – 300 mm, D4 – 455 mm, D5 – 600 mm, D6 – 900 mm, D7 – 1200 mm, D8 – 1500 mm, D9 – 1800 mm.



Rysunek 4.28. Widok ugięciomierza dynamicznego FWD

4.7. Wyniki badań FWD

Wyniki pomiaru ugięć przedstawiono na rysunku 4.29.



Rysunek 4.29. Wyniki ugięć z wszystkich geofonów

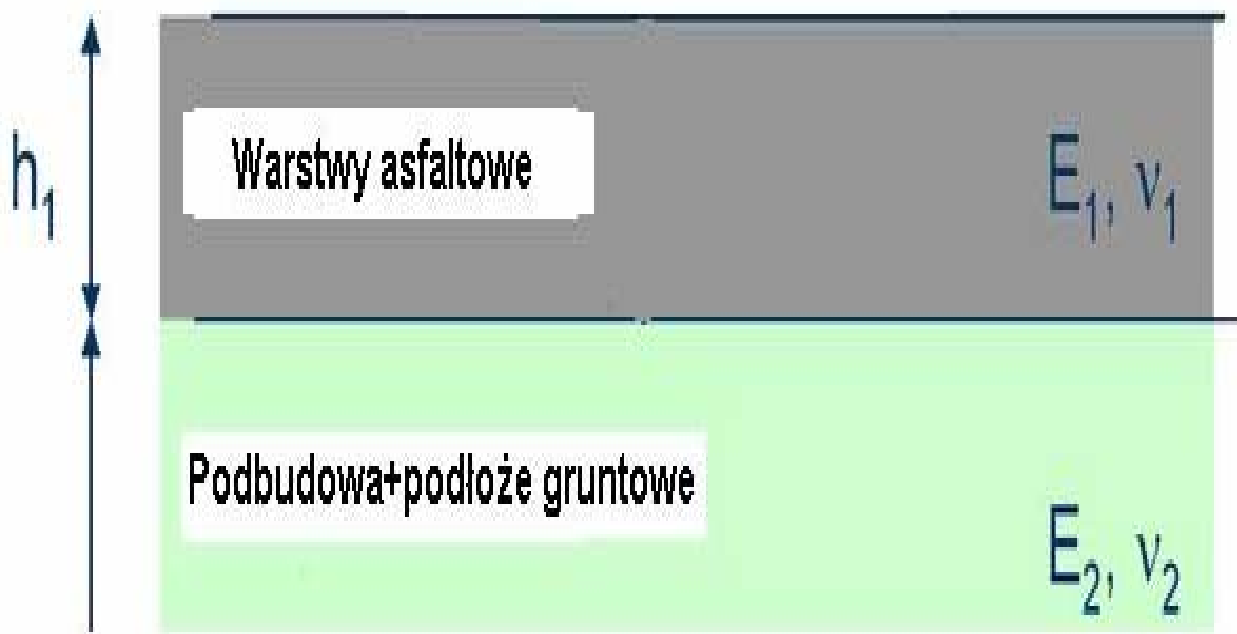
Ugięcia nawierzchni mierzone bezpośrednio pod płytą, na wykresie 4.29 oznaczone krzywą D1, pokazują gwałtowny wzrost ugięć po przejściu na sekcje III i IV. Na tych sekcjach pomiędzy warstwą podbudowy a wiążącą wbudowano zamiast sprysku międzywarstwowego z emulsji asfaltowej odpowiednio warstwę z pyłów i z zaczynu gliniastego.

Jednocześnie można zaobserwować wzrost ugięć od sekcji IV, mierzonych przez ostatni geofon D9, odpowiadający za stan podłoża gruntowego. Oznacza to, że podłoże pod warstwami asfaltowymi ze względu na różną grubość warstwy profilowej z gruzu betonowego i ceglanego (patrz pkt. 4.3) nie jest jednorodne i charakteryzuje się zmienną nośnością na długości odcinka doświadczalnego.

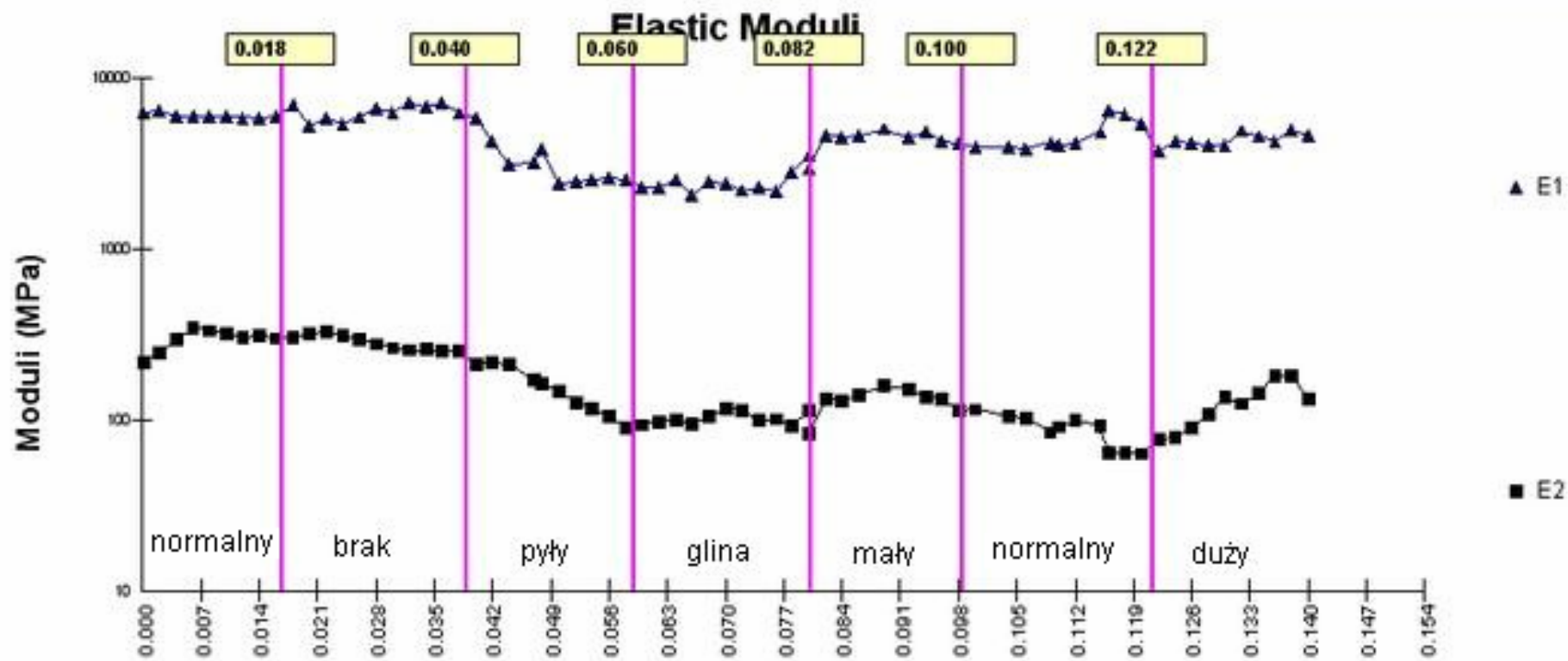
4.8. Obliczenia odwrotne

Moduły sprężystości, dla istniejących warstw asfaltowych, podbudowy i podłoża gruntowego, określone metodą obliczeń odwrotnych przy pomocy programu ELMOD 5 na podstawie analizy wyników ugięć sprężystych zmierzonych urządzeniem FWD oraz grubości poszczególnych warstw istniejącej konstrukcji nawierzchni (patrz pkt. 4.31) przedstawiono w tabelicy 4.3. W obliczeniach przyjęto 2-warstwową półprzestrzeń sprężystą, jako model konstrukcji nawierzchni (patrz rys. 4.30).

W obliczeniach założono pełną szepność międzywarstwową pomiędzy warstwami podbudowy i asfaltowymi, jak i w samym pakiecie warstw asfaltowych.



Rysunek 4.30. Model nawierzchni przyjęty do obliczeń odwrotnych



Rysunek 4.31. Moduły sprężystości (sztywności) warstw asfaltowych i podbudowy razem z podłożem gruntowym z obliczeń odwrotnych

Tablica 4.4. Zestawienie grubości warstw asfaltowych pomierzonych z odwiertów

Sekcja	Grubość warstw asfaltowych [mm]			
	Ścieralna	Wiążąca	Podbudowa	Sumaryczna
I	70	60	85	215
II	65	55	90	210
III	65	55	90	210
IV	65	60	80	205
V	60	60	80	200
VI	60	60	85	205
VII	65	60	80	205

Wyniki obliczeń odwrotnych wskazują na niejednorodność podłoża. Jest to wpływ zmiennej grubości warstwy profilowej z gruzu betonowego i ceglanego, czego nie dało się uniknąć na tym odcinku.

Otrzymano także różną sztywność pakietu warstw asfaltowych na długości krótkiego odcinka doświadczalnego. Ale to już jest wynikiem odmiennego założenia w obliczeniach odwrotnych, innego niż w rzeczywistości miało miejsce. W obliczeniach odwrotnych założono pełną szczepność międzywarstwową w pakiecie warstw asfaltowych. Dlatego też warstwy asfaltowe wprowadzono jako jedną warstwę. Podczas, gdy w rzeczywistości były one wbudowywane w trzech warstwach i z różnym spryskiem międzywarstwowym. Na sekcji III i IV celowo zakłócono (celowo zmniejszono) szczepność międzywarstwową, a właściwie osiągnięto całkowity brak szczepności przez wprowadzenie luźnej warstwy z pyłów mineralnych, czy z zaczynu gliniastego.

Dla każdej z sekcji (różna warstwa szczepna) przeprowadzono analizę modułów, mając do dyspozycji następujące obliczone wartości (patrz rys. 4.31):

- moduł E1 – moduł sprężystości warstw asfaltowych,
- moduł E2 – moduł sprężystości dla podbudowy i podłoża gruntowego razem.

W czasie wykonywania badań urządzeniem FWD temperatura warstw asfaltowych wynosiła od 14°C. Moduły obliczeniowe dla każdej sekcji wyznaczono przy założeniu 85% kwantyla, co zaleca COST 336². Oznacza to, że od wyliczonych modułów tylko 15% jest mniejszych. W tablicy 4.5 przedstawiono wyniki analizy modułów dla 85% i 50% kwantyla.

² COST 336 – Falling Weight Deflectometer, European Commission, Directorate General Transport, CROW 2000

Tablica 4.5. Wyniki obliczeń odwrotnych modułów sprężystości dla przyjętego modelu konstrukcji w temperaturze 14°C

Sekcje	Kwantyl	Moduły sprężystości 14°C [MPa]	
		Warstwy asfaltowe, E1	Podbudowa+Podłoże, E2
Sekcja I, normalny sprysk	85%	8566	259
	50%	8892	310
Sekcja II, brak sprysku	85%	8178	250
	50%	9514	261
Sekcja III, pyły	85%	3756	91
	50%	4091	120
Sekcja IV, zaczyn gliniasty	85%	3661	90
	50%	3841	99
Sekcja V, mały sprysk	85%	7710	115
	50%	8283	138
Sekcja VI, normalny sprysk	85%	6967	85
	50%	7244	91
Sekcja VII, duży sprysk	85%	7184	79
	50%	7745	126

4.9. Ocena modułów warstw asfaltowych z obliczeń odwrotnych

Z literatury wiadomo jest, że obliczony moduł sprężystości podłoża (w naszym przypadku moduł dla podbudowy i podłoża gruntowego razem) jest obarczony najmniejszym błędem. Można, zatem przyjąć, że moduł odpowiada stanowi rzeczywistemu i właściwie charakteryzuje stan warstw pod warstwami asfaltowymi. Natomiast wyznaczone moduły sztywności warstw asfaltowych są obarczone dużym błędem, gdyż między innymi nie uwzględniają szczepności międzywarstwowej wewnątrz pakietu warstw asfaltowych. Wykonane badania szczepności międzywarstwowej dla próbek wyciętych z odcinka doświadczalnego pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że na poszczególnych sekcjach była różna szczepność lub jej nie było. Dokładne wyniki szczepności międzywarstwowej przedstawiono w tablicy 4.1 i 4.2.

Badania ugięciomierzem FWD, a właściwie obliczenia odwrotne modułów sztywności/sprężystości warstw konstrukcji dla poszczególnych sekcji wykazały duży wpływ szczepności międzywarstwowej na ocenę nawierzchni. W tablicy 4.6 zestawiono moduły sztywności warstw asfaltowych.

Tablica 4.6. Zestawienie modułów sztywności warstw asfaltowych w zależności od rodzaju warstwy szepnej

Nr sekcji, rodzaj warstwy szepnej	Moduł sztywności warstw asfaltowych [MPa]
Sekcja I, normalny sprysk	8566
Sekcja II, brak sprysku	8178
Sekcja III, pyły	3756
Sekcja IV, zaczyn gliniasty	3661
Sekcja V, mały sprysk	7710
Sekcja VI, normalny sprysk	6967
Sekcja VII, duży sprysk	7184

Jak widać moduły sztywności warstw asfaltowych są zmienne na długości odcinka doświadczalnego. Różnice dochodzą do 100%. Na sekcji II i I, gdzie zachowano pełną i prawie pełną szepność międzywarstwami podbudowy i wiążącej moduły wynoszą ponad 8000 MPa. Natomiast dla sekcji III i IV, gdzie bezwzględnie jest brak szepności pomiędzy warstwą podbudowy a wiążącą moduły są mniejsze od 4000 MPa.

Nie uwzględnienie szepności międzywarstwowej w obliczeniach odwrotnych, a następnie wyliczanie trwałości zmęczeniowej ocenianej konstrukcji nawierzchni może prowadzić do błędnych wniosków. Poniżej w tabeli przedstawiono wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych dla konstrukcji odcinka doświadczalnego na sekcji III przy różnych scenariuszach analiz, dotyczących szepności międzywarstwowej i wyników modułów sztywności warstw asfaltowych z obliczeń odwrotnych. Rozważono trzy przypadki:

Przypadek A

Projektant z badań FWD na odcinku z pełną szepnością uzyskał moduły warstw asfaltowych $E=8500$ MPa. Przyjął ten moduł do obliczeń odkształceń ε w programie BISAR. Następnie zastosował prawo zmęczeniowe Instytutu Asfaltowego - $N_f = a \times \varepsilon^{-b} \times E^{-c}$. Przyjął wartości za:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 116 \text{ [}\mu\text{strain]}, \\ E &= 8500 \text{ MPa} \end{aligned}$$

i otrzymał $N_f = 1,38$ mln osi 115 kN.

Przypadek B

Projektant z badań FWD na odcinku z brakiem szepności uzyskał moduły warstw asfaltowych $E=3500$ MPa. Przyjął ten moduł do obliczeń odkształceń ε w programie BISAR, przy założeniu pełnej szepności, gdyż projektant nie wie, że na tym odcinku rzeczywiście jest brak szepności. Następnie zastosował prawo zmęczeniowe Instytutu Asfaltowego - $N_f = a \times \varepsilon^{-b} \times E^{-c}$. Przyjął wartości za:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 226 \text{ [}\mu\text{strain]}, \\ E &= 3500 \text{ MPa} \end{aligned}$$

i otrzymał $N_f = 0,323$ mln osi 115 kN.

Przypadek C

Projektant z badań FWD na odcinku z pełną szczepnością uzyskał moduły warstw asfaltowych $E=8500$ MPa. Przyjął ten moduł do obliczeń odkształceń ε w programie BISAR, przy założeniu braku szczepności, gdyż projektant wie, że na tym odcinku rzeczywiście jest brak szczepności. Następnie zastosował prawo zmęczeniowe Instytutu Asfaltowego - $N_f = a \times \varepsilon^{-b} \times E^{-c}$. Przyjął wartości za:

$$\varepsilon = 142 \text{ } [\mu\text{strain}], \\ E = 8500 \text{ MPa}$$

i otrzymał $N_f = 0,703$ mln osi 115 kN.

Tablica 4.7. Wyniki analiz trwałości zmęczeniowej przy różnych modułach sztywności warstw asfaltowych i różnej szczepności międzywarstwowej dla sekcji III

Cecha	Szczepność pomiędzy warstwą podbudowy a wiążącą		Brak szczepności pomiędzy warstwą podbudowy a wiążącą
Moduł sztywności warstw asfaltowych [MPa]	8500	3500	8500
Grubość warstw asfaltowych [cm]	12+9		12+9
Moduł sprężystości podłoża [MPa]	90		90
Odkształcenie rozciągające na spodzie warstwy podbudowy [μstrain]	116	226	142
Trwałość warstw asfaltowych [mln osi 115 kN]	1,38	0,323	0,703

Uwaga:

1. Warstwa podbudowy asfaltowej o grubości 9 cm, zawartość asfaltu 4,2%, zawartość wolnych przestrzeni 7,5%.
2. Pomiędzy warstwą ścieralną a wiążącą jest zawsze szczepność międzywarstwowa.

Okazuje się, że w przypadku sekcji III:

- nieuwzględnienie całkowitego braku szczepności międzywarstwowej w obliczeniach odwrotnych, wpływa na błędne przyjęcie modułów sztywności oraz,
- nieuwzględnienie braku szczepności w obliczeniach trwałości zmęczeniowej konstrukcji,

powoduje niedowymiarowanie konstrukcji nawierzchni o 118% ($0,703/0,323$).

5. Analizy obliczeniowe szczepności międzywarstwowej

5.1. Wprowadzenie

W dalszej części zaprezentowane zostaną obliczenia wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość nawierzchni KR3 (lekka konstrukcja nawierzchni) i KR6 (ciężka konstrukcja nawierzchni). Na początku przedstawiona zostanie kalibracja metody obliczeń do programu BISAR 3. Analizy obliczeniowe będą dotyczyły:

- wpływu miejsca braku szczepności na trwałość nawierzchni,
- porównanie wpływu braku związania dla nawierzchni typu ciężkiego i lekkiego,
- wpływu szczepności międzywarstwowej na ugięcia nawierzchni,
- wpływ grubości warstwy ścieralnej na trwałość nawierzchni przy różnych stopniach związania międzywarstwowego,
- obliczenia dotyczące symulacji warstwy szczepnej oraz
- wpływ szczepności na ugięcia konstrukcji nawierzchni.

5.2. Dane wyjściowe

5.2.1. Obciążenie

Jako obciążenie ruchem zastosowano standardową oś pojedynczą 115 kN. Obliczenia wykonane zostały przy obciążeniu kołem pojedynczym 57,5 kN. Schemat obliczeniowy oraz parametry charakteryzujące poszczególne warstwy nawierzchni typu lekkiego i ciężkiego przedstawione zostały na rysunkach 5.1 i 5.2.

5.2.2. Stałe materiałowe

Stałe materiałowe przyjęto na podstawie „Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych”. Konstrukcję nawierzchni analizowano dla temperatury ekwiwalentnej równej 10°C. Podstawowe informacje zamieszczone zostały w tablicy 5.1.

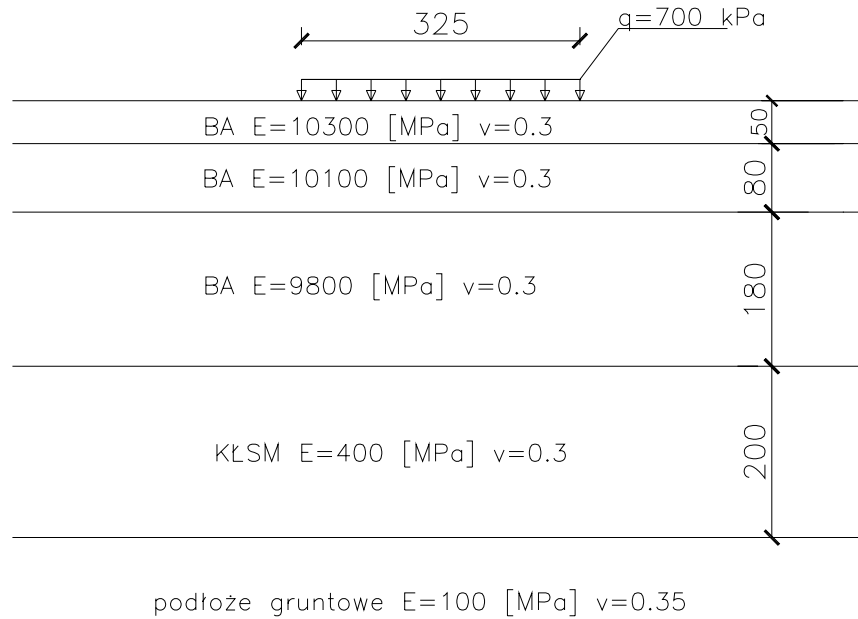
Tablica 5.1. Charakterystyka podstawowych parametrów nawierzchni wg [21].

	BA 0/12,8 (ścieralna)	BA 0/20 (wiążąca)	BA 0/25 (podbudowa)
Rodzaj asfaltu	D50	D50	D50
Pen 25°C przed RTFOT [0,1 mm]	60	60	60
Pen po RTFOT [0,1 mm]	50	50	50
PI	-0,8	-0,8	-0,8
Moduł lepisczza (10°C; 0,02 s) wg BANDS [MPa]	147	147	147
Zawartość wolnych przestrzeni w mma [%]	3,0	6,0	8,0
Zawartość wagowa asfaltu do obliczeń w mma [%]	5,7	4,6	4,0
Zawartość objętościowa asfaltu do obliczeń w mma	12,5	11,5	10,0
Moduły MMA (10°C, 0,02 s) wg BANDS [MPa]	10300	10100	9600
Współczynnik Poissona	0,3	0,3	0,3

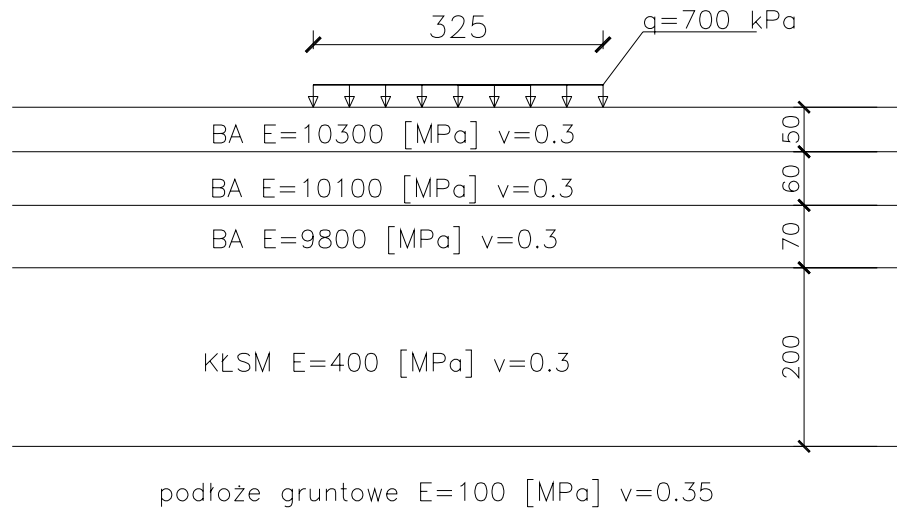
Uwaga: Zastosowano powyższe dane techniczne zgodnie z „Katalogiem typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych” oprócz zawartości objętościowej asfaltu w warstwie ścieralnej, które zmieniono ze względu na obecne praktyki z 14,2% (jak w „Katalogu...”) na 12,5%.

5.2.3. Model obliczeniowy nawierzchni

Jako model obliczeniowy przyjęto konstrukcję nawierzchni podatnej dla kategorii ruchu KR6 oraz KR3 z "Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych" dla podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie, dla temperatury ekwiwalentnej równej 10°C.



Rysunek 5.1. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni KR6(wymiary [mm])



Rysunek 5.2. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni KR3 (wymiary [mm])

Uwaga: Zmieniono wartość modułu sprężystości podłoża gruntowego z 120 MPa na 100 MPa, w nawierzchni typu ciężkiego.

3.2.4. Kryteria trwałości nawierzchni.

Trwałość nawierzchni została obliczona na podstawie dwóch kryteriów:

1. Trwałość zmęczeniowa warstw asfaltowych wg Instytutu Asfaltowego została określona z następującej zależności:

$$N_{asf} = 18,4 \cdot C \cdot (6,167 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon_a^{-3,291} \cdot E^{-0,854}) \quad (27)$$

gdzie:

$$C = 10^M \quad (28)$$

$$M = 4,84 \cdot \left(\left(\frac{V_{asf}}{V_{asf} + V_v} \right) - 0,69 \right) \quad (29)$$

V_{asf} – objętościowa zawartość asfaltu, [%]

V_v – zawartość wolnych przestrzeni, [%]

E – moduł sztywności warstwy asfaltowej, w której liczone jest odkształcenie ε_a .

ε_a – odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych.

Odkształcenie rozciągające przyjmowano nie tylko na spodzie warstw asfaltowych, ale również na spodzie warstwy ścierniczej i wiążącej, w celu sprawdzenia, które z nich ulegną wcześniejszemu spękaniu.

2. Trwałość ze względu na deformacje trwałe nawierzchni wg Instytutu Asfaltowego

$$N_{asf} = \left(\frac{k}{\varepsilon_z} \right)^{\left(\frac{1}{m} \right)} \quad (30)$$

gdzie:

$$k = 1,05 \cdot 10^{-2}$$

$$m = 0,223$$

ε_z – odkształcenie ściskające w podłożu.

Odkształcenie ściskające w podłożu gruntowym zostało w każdym przypadku obliczone dla górnej powierzchni tego podłoża.

5.2.5. Program komputerowy

Do obliczeń zastosowano program BISAR 3, opracowany przez firmę Shell, w którym naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia obliczane są w wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Program ten modeluje poziome warstwy nawierzchni ułożone na półprzestrzeni sprężystej. Założono w nim, że każda warstwa jest jednorodna i izotropowa. Zastosowane materiały pracują w stanie sprężystym, w którym zależność naprężenie - odkształcenie jest funkcją liniową. Obciążenie przykłada się na górze pakietu warstw, na powierzchni kołowej. Wszystkie warstwy opisane są modułami Younga i współczynnikami Poissona, oraz grubościami. Dodatkowo program wymaga wpisania numeru warstwy, współczynnika ALK lub AK, liczby i wielkości obciążeń, współrzędnych położenia obciążenia. Istnieje możliwość wprowadzenia obciążenia poziomego na górze warstw. Elementem wykorzystywanym w niniejszej pracy jest możliwość wprowadzenia różnych warunków połączenia warstw nawierzchni. Odpowiedzialny za to jest współczynnik „AK” (*standard shear spring compliance*), charakteryzujący nieskończenie cienką

warstwę wewnętrzną, której wytrzymałość definiowana jest jako stosunek względnego poziomego przesunięcia warstw do naprężeń, działających na ich granicy, co zostało przedstawione w instrukcji programu.

$$AK = \frac{\text{względne poziome przesunięcie warstw}}{\text{naprężenia na granicy warstw}} \quad (31)$$

Matematycznie zależność ta została zapisana za pomocą parametru „ α ” i posiada następująca postać:

$$\alpha = \frac{AK}{AK + \frac{1+\nu}{E} \cdot a} \quad (32)$$

gdzie:

a – promień obciążenia, [m]

E – moduł sprężystości warstwy wyżej leżącej, [Pa]

ν - współczynnik Poissona danej warstwy, [-]

α - współczynnik tarcia, o zakresie $0 \leq \alpha \leq 1$

Wartość $\alpha = 0$ odpowiada całkowitej szczepności, $\alpha = 1$ odpowiada pełnemu poślizgowi.

Dodatkowo, program posiada możliwość wyboru innego współczynnika, a mianowicie „*reduced shear spring compliance*” ALK. Jest on wyrażony poprzez zależność :

$$ALK = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot a \quad (33)$$

Fizyczne znaczenie powyższego współczynnika wyrażono z uwzględnieniem modułu sprężystości i współczynnika AK zgodnie z:

$$AK = ALK \cdot \frac{1+\nu}{E} \quad (34)$$

By wprowadzić do programu odpowiednią wartość współczynnika tarcia α korzysta się z wymienionych wyżej współczynników AK lub ALK. Niestety procentowe wyrażenie szczepności międzywarstwowej przy pomocy powyższych modułów (AK i ALK) nie jest jednoznaczne ponieważ, jak podaje instrukcja [18] pojęcia te nie są liniowo zależne od stopnia powiązania warstw. Jednocześnie jak wynika z obliczeń Stöckert [19], zależność ta nie jest liniowa w stosunku do odkształceń poziomych w dolnych warstwach asfaltowych, a przez to do trwałości zmęczeniowej.

W tabelicy 5.2 przedstawiono zależność między współczynnikami ALK i AK. Kalibrację metody i obliczenia wpływu szczepności na trwałość nawierzchni wykonano przy użyciu parametru ALK. Zgodnie z wzorem (34) obliczenia współczynnika AK, gdy posiadane są wartości współczynnika ALK należy wykonać dla każdej warstwy osobno. Jest to związane z różnicami modułów sztywności i współczynników Poissona poszczególnych warstw. Wspomniane parametry przyjmuje się dla warstwy

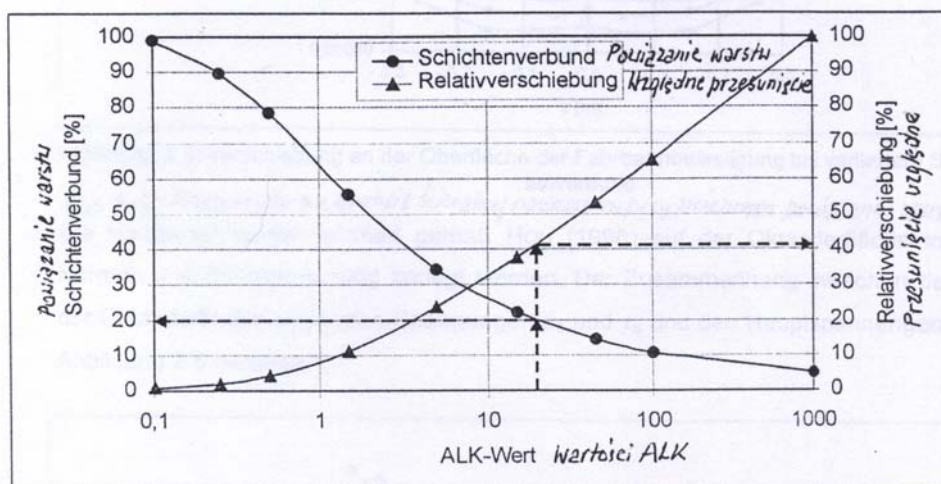
leżącej nad płaszczyzną styku, w której obliczany jest współczynnik AK (patrz wzór 32).

Tablica 5.2. Zależność współczynnika AK [m³/N] od ALK [m] dla poszczególnych warstw

Warstwa nawierzchni	ALK=0	ALK=0,09	ALK=0,6	ALK=2	ALK=8	ALK=200
Ścieralna	AK= 0	AK=1,14E-11	AK=7,57E-11	AK=2,52E-10	AK=1,01E-09	AK=2,52E-08
Wiążąca	AK= 0	AK=1,16E-11	AK=7,72E-11	AK=2,57E-10	AK=1,03E-09	AK=2,57E-08
Podbudowa asfaltowa	AK= 0	AK=1,22E-11	AK=8,13E-11	AK=2,71E-10	AK=1,08E-09	AK=2,71E-08

5.2.6. Kalibracja metody obliczeń

Zgodnie z instrukcją dostarczoną do programu BISAR, wartość ALK, (która została wykorzystywana do poniższych obliczeń) mieści się w zakresie od 0 [m] do 1E+10 [m]. Pojawia się tutaj problem wskazania wartości przy której, dla tak szerokiego zakresu stopień szczepności międzywarstwowej wynosi przykładowo 50%. Kalibracja tej metody obliczeń okazała się być niezbędną ponieważ znaczny wzrost stopnia związania międzywarstwowego ma miejsce tylko w bardzo niewielkim zakresie współczynnika ALK. Jako parametr kluczowy dla kalibracji przyjęto odkształcenie poziome (rozciągające) na spodzie „pakietu” warstw asfaltowych, mające bezpośredni wpływ na trwałość nawierzchni.

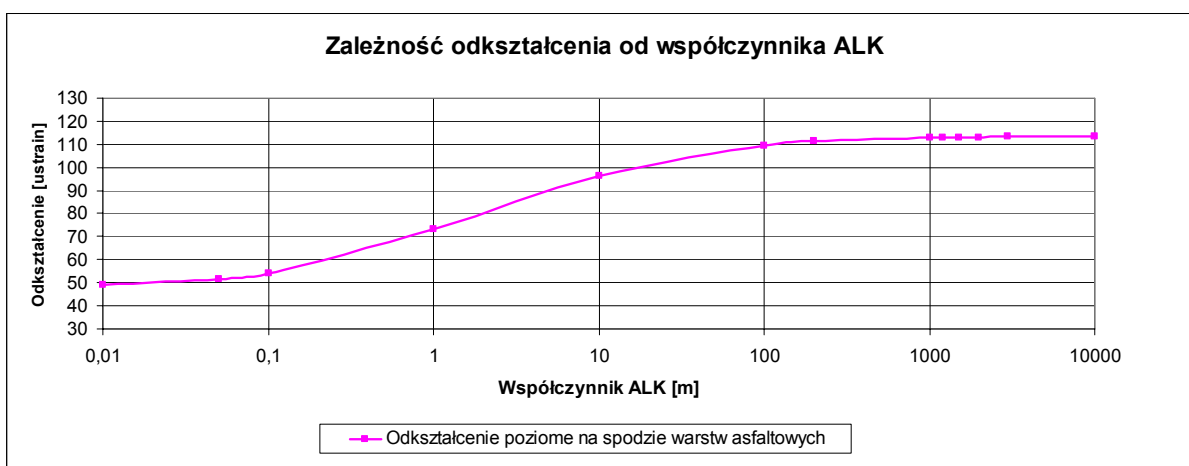


Wykres 5.3. Związek pomiędzy powiązaniem warstw, względnym przesunięciem a wartością ALK wg [19]

Rysunek 5.3 [19] przedstawia dwie zależności, pierwsza pokazuje jak zmienia się powiązanie warstw w zależności od współczynnika ALK, druga natomiast ukazuje funkcję względnego przesunięcia od współczynnika ALK. Linia przedstawiająca powiązanie warstw nie jest zależnością liniową i przy wartości ALK=1000 nie osiąga zera. Funkcja wskazująca powiązanie warstw jest liniowa od wartości ALK równemu

w przybliżeniu 2. Zgodnie z tym wykresem zależność względnego przesunięcia nie jest najodpowiedniejszym kryterium kalibracji metody obliczeń, gdyż przy wyższych wartościach współczynnika ALK (>100) jego przyrost nie ulega zmianie.

Na rysunku 5.4 przedstawiono wartość odkształcenia poziomego na spodzie warstw asfaltowych dla wartości współczynnika ALK w przedziale od ALK=0 do ALK=10000 [m]. Według obliczeń wykonanych przy pomocy programu BISAR – 3 szeroki zakres wartości współczynnika ALK nie jest w pełni istotny dla potrzeb szacowania szczepności międzywarstwowej. Wynika to z faktu, że po przekroczeniu granicy ALK= 200 [m] odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych ulegają niewielkiemu wzrostowi, jak to jest pokazane na rysunku 5.4.

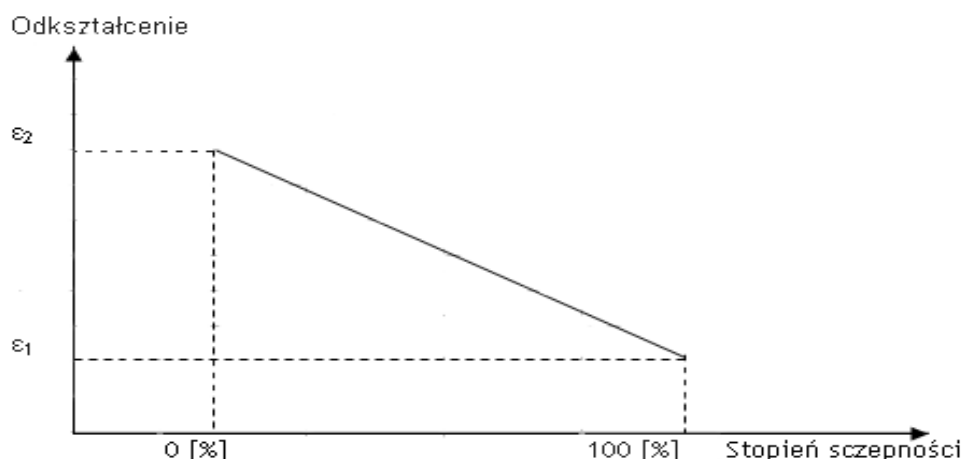


Rysunek 5.4. Zależność odkształcenia rozciągającego od współczynnika ALK, otrzymana z obliczeń w programie BISAR-3

Wobec powyższego przyjęto, że przy wartości ALK= 200 [m] nastąpi całkowity brak szczepności, a odkształcenie poziome osiągnie maksymalną wartość.

5.2.6.1. Kalibracja metody obliczeń przy pomocy odkształcenia poziomego

W celu wykonania kalibracji metody obliczeń przyjęto założenie, że odkształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych zależne jest liniowo od stopnia zespolenia warstw asfaltowych. Kalibracje przeprowadzono dla podatnej konstrukcji nawierzchni KR6. Ponadto przyjęto, że na styku wszystkich wyżej leżących warstw tzn. ścieralnej i wiążącej oraz wiążącej i podbudowy występuje jednakowe, stopniowe obniżenie szczepności. Rysunki 5.4 i 5.6 są interpretacją graficzną danych zamieszczonych w tabelicy 5.3.



Rysunek 5.5. Zależność odkształcenia poziomego na spodzie warstw asfaltowych od stopnia szczepności [odkształcenie μstrain].

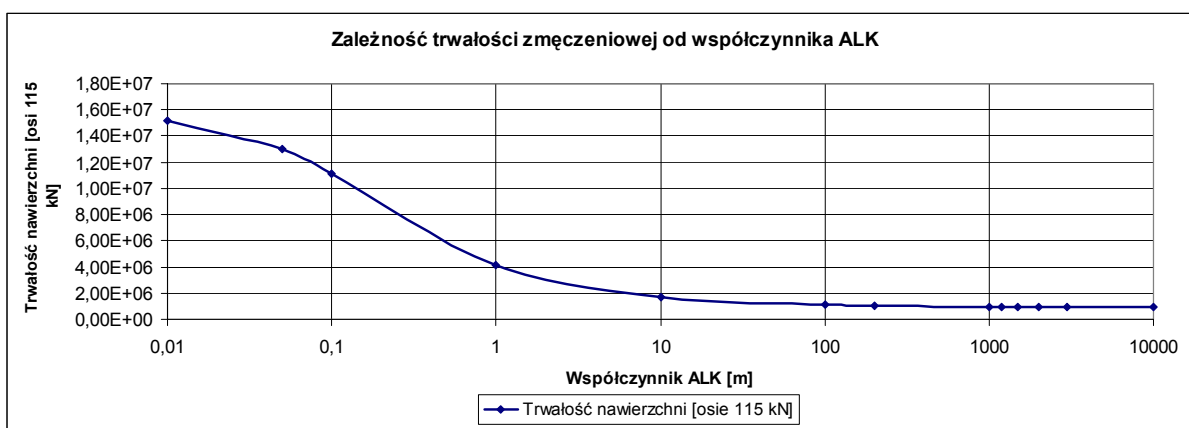
Założenie przedstawione na rysunku 5.5 zostało zaczerpnięte z modelu wolno podpartej belki zespolonej i wielokrotnej. Przyjęto, że przy pełnym związaniu międzywarstwowym i zadanym obciążeniu odkształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych będzie posiadało stałą wartość równą ε_1 . Po „całkowitej” utracie szczepności warstw asfaltowych odkształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych osiągnie wartość ε_2 .

Tablica 5.3. Zależność między współczynnikiem ALK [m] a odkształceniem poziomym ε_{xx} na spodzie warstw asfaltowych

L.p.	Współczynnik ALK [m]	Odkształcenie ε_{xx} [μstrain]	Trwałość nawierzchni [osi 115 kN]
1.	0	48,55	15851569,07
2.	0,01	49,19	15182888,56
3.	0,05	51,54	13021282,47
4.	0,075	52,84	11996385,77
5.	0,1	54,03	11148574,73
6.	0,75	69,96	4763435,98
7.	1	73,05	4131872,22
8.	5	90,20	2064126,51
9.	10	96,52	1651754,31
10.	20	101,80	1386191,05
11.	50	107,00	1176573,37
12.	100	109,60	1087187,61
13.	150	110,60	1055171,14
14.	200	111,20	1036549,80
15.	300	111,80	1018354,65
16.	1000	112,80	988944,18
17.	1200	112,90	986064,37
18.	1500	113,00	983195,47
19.	2000	113,10	980337,45
20.	3000	113,20	977490,26
21.	10000	113,30	974653,83

Dane w powyższej tabeli otrzymano w wyniku obliczeń, których wyniki zamieszczono w pliku Z1.PDF na załączonej płycie CD. Trwałość nawierzchni wyznaczono ze

względu na kryterium zmęczeniowe warstw asfaltowych wg Instytutu Asfaltowego. Na rysunku 5.6 zastosowano skalę logarymiczną z powodu niewielkiego zakresu zmian trwałości nawierzchni w stosunku do współczynnika ALK.

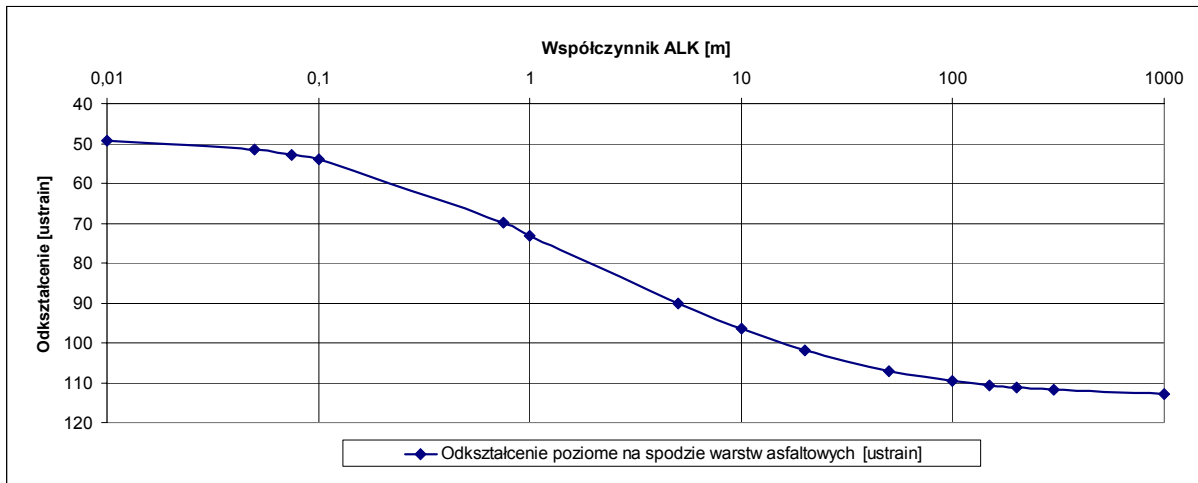


Rysunek 5.6. Zależność trwałości nawierzchni od współczynnika ALK otrzymane z obliczeń

Z rysunków 5.4 i 5.6 wynika, że bezcelowym jest posługiwanie się współczynnikiem ALK większym od 200 [m], gdyż odkształcenie, jak i trwałość nawierzchni ulegają znikomym zmianom. Powyższy wykres ukazuje, że największa utrata trwałości zmęczeniowej nawierzchni występuje w przedziale wartości współczynnika ALK od 0 do 10 [m].

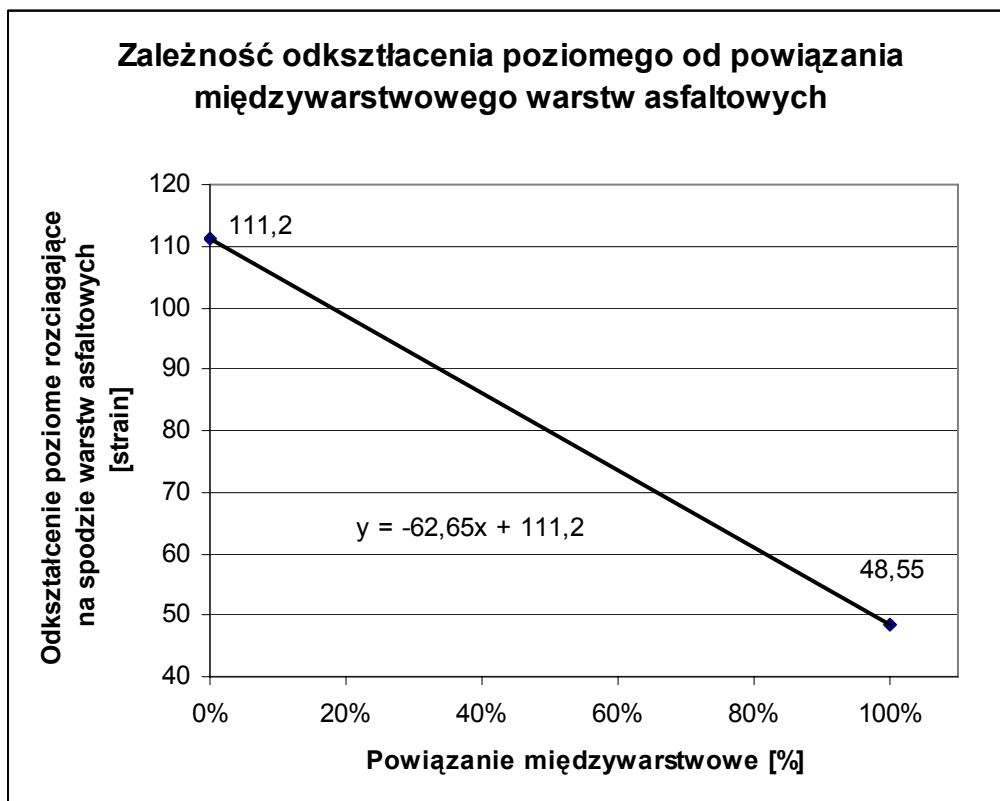
Na podstawie tablicy 5.3 zostały obliczone współczynniki ALK do uzyskania odpowiedniego stopnia szczepności międzywarstwowej. Przyjęto, że dla ALK=0 [m] występuje pełna szczepność, natomiast dla ALK=200 [m] całkowity brak szczepności.

Rysunek 5.7 został wykorzystany do ostatecznego określenia poszczególnych stopni powiązania warstw dla odpowiednich wartości współczynnika ALK. Przyjęto, że dla wartości odkształcenia poziomego wynoszącej 48,55 [μ strain] występuje pełne związanie warstw (100% szczepności), natomiast dla wartości 111,20 [μ strain] całkowity brak szczepności (0% szczepności). Zakres wartości odkształcenia poziomego wynosi 62,65 [μ strain]. Następnie z rysunku 5.7a wyznaczono dla 100, 90, 70, 50, 30 i 0% powiązania międzywarstwowego odpowiadające im odkształcenia. A dla otrzymanych odkształceń z rysunku 5.7 wyznaczono odpowiadające współczynniki ALK.



Rysunek 5.7. Zależność odkształcenia od współczynnika ALK dla wartości w skali od 0 [m] od 1000 [m]

Na górnym wykresie zawężono poziomą skalę współczynnika ALK, by lepiej ukazać jego wpływ na odkształcenie poziome.



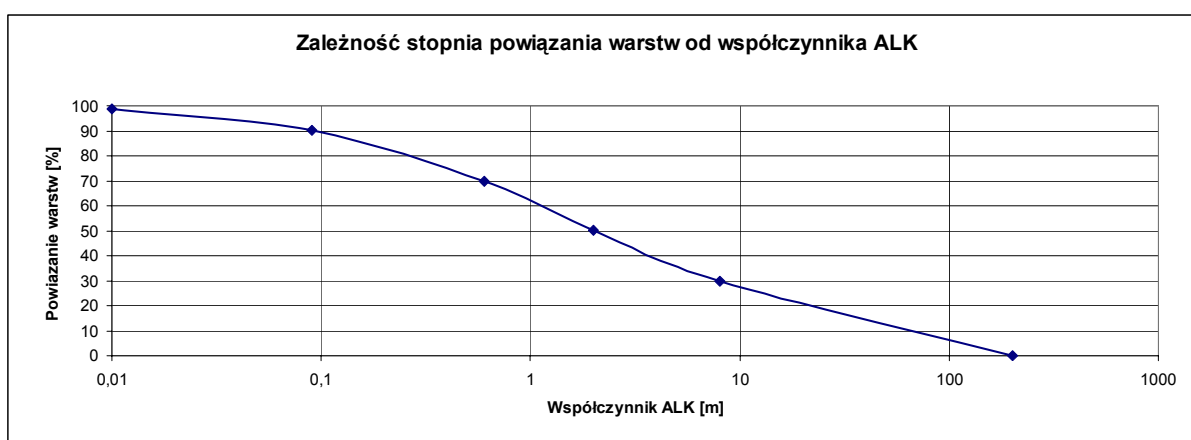
Rysunek 5.7a. Zależność zakresu odkształcenia od procentowego powiązania warstwowego

Po przeprowadzeniu procedury określania poziomego odkształcenia dla odpowiednich poziomów stopnia powiązania warstw, a docelowo wyznaczenia charakterystycznych wartości współczynnika ALK uzyskano:

- dla pełnej szczepności ALK = 0 [m];

- dla 90% szczepności międzywarstwowej ALK = 0,09 [m];
- dla 70 % szczepności międzywarstwowej ALK = 0,6 [m];
- dla 50 % szczepności międzywarstwowej ALK=2,0 [m];
- dla 30% szczepności międzywarstwowej ALK = 8 [m];
- dla 0% szczepności, przy pełnym poślizgu ALK= 200 [m].

Wynikiem kalibracji jest rysunek 5.8, przedstawiający zależność stopnia powiązania warstw od współczynnika ALK. Jest to zależność nieliniowa, charakteryzująca się początkowo niewielkim spadkiem. Wynika z niej, że wraz ze wzrostem współczynnika ALK maleje szczepność międzywarstwowa. Jak wcześniej wspomniano przy wartości ALK=200 przyjęto, że występuje całkowity brak powiązania warstw. Ciekawą rzeczą jest to, że różnica między 100% szczepnością a 90% w przypadku współczynnika ALK wynosi 0,09 [m], natomiast między całkowitym brakiem szczepności a 30% szczepności wspomniana różnica wynosi 192 [m].



Rysunek 5.8. Zależność stopnia powiązania warstw od współczynnika ALK[m] Poniższa tabela zawiera ostatecznie przyjęte wartości współczynnika ALK dla poszczególnych poziomów powiązania warstw, które zostały użyte w dalszych obliczeniach.

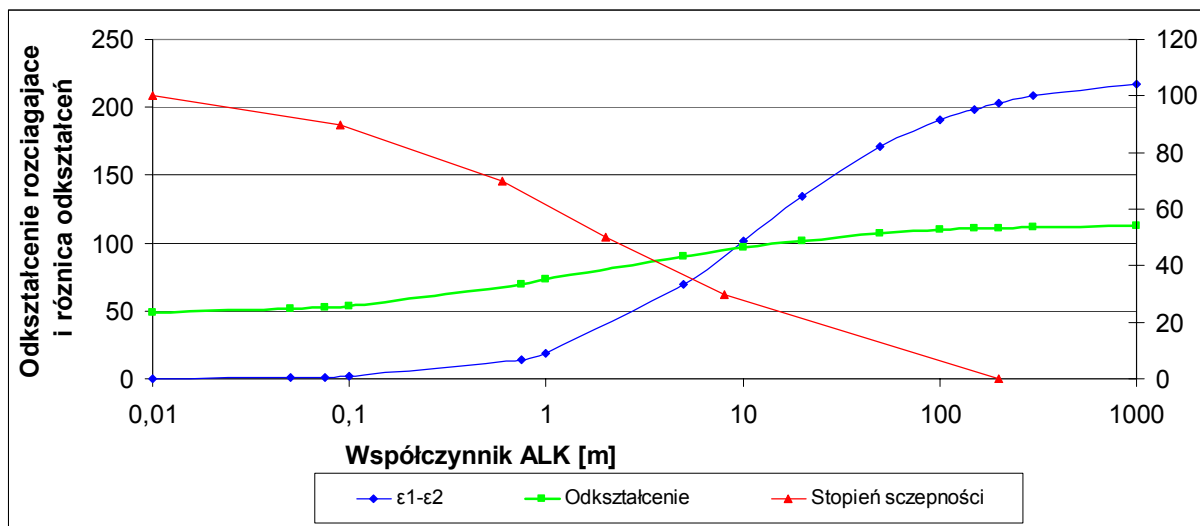
Tablica 5.4. Zebranie wartości współczynnika ALK dla poszczególnych stopni powiązania międzywarstwowego

ALK [m]	[%] Szczepność
0,00	100
0,09	90
0,60	70
2,00	50
8,00	30
200,00	0

5.2.6.2. Kalibracja metody obliczeń przy pomocy różnicy odkształceń

W trakcie wykonywania dalszych obliczeń pojawiły się wątpliwości, dotyczące zasadności przyjętego założenia. Wobec tego jako miarodajny czynnik poziomych

relacji przy stopniowej utracie szczepności między warstwami przyjęto wartość bezwzględnej różnicy odkształceń $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$, gdzie ε_1 oznacza odkształcenie poziome na spodzie warstwy górnej, a ε_2 oznacza odkształcenie poziome na górze niższej leżącej warstwy. Kalibracja metody obliczeń przy pomocy wspomnianego parametru dała wartości współczynnika ALK zgodne z wynikami otrzymanymi przy wykorzystaniu jako kryterium odkształcenia poziomego.



Rysunek 5.9. Zależność odkształcenia poziomego na spodzie warstw asfaltowych i różnicy odkształceń w górnej i dolnej warstwie od współczynnika ALK

Na rysunku 5.9 zebrane zostały oba kryteria wobec których analizowano wielkość współczynnika ALK, a mianowicie odkształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych oraz różnicę odkształceń poziomych. Zakres zmian współczynnika ALK obejmujący różnicę odkształceń pokrywa się z tymi otrzymanymi przy wykorzystaniu odkształcenia poziomego. Charakter wykresu różnicy odkształceń w zależności od współczynnika ALK (linia niebieska na powyższym wykresie) jest podobny do zależności otrzymanej na rysunku 5.3.

5.2.6.3. Kalibracja metody obliczeń przy pomocy względnego przesunięcia

Ostatecznie wykonano kalibrację posługując się wskaźnikiem zasugerowanym przez Stöckert [19], a mianowicie względnym poziomym przesunięciem.

Względne poziome przesunięcie związane jest z często wykorzystywanym w programach komputerowych służących do projektowania nawierzchni prawem Goodmana. Oczywiście zastosowanie powyższego prawa wiąże się z modelowaniem różnego stopnia powiązania warstw. Zależność nazwana prawem Goodmana pierwotnie określała charakter współpracy ośrodków ziarnistych i została zaadoptowana do symulowania połączenia międzywarstwowego nawierzchni.

Tablica 5.5. Wyznaczenie względnego przesunięcia na spodzie warstw asfaltowych

L.p.	ΔU [m]	ALK [m]	E [MPa]	τ [Pa]	ν
1.	4,64E-07	0,01	9600	3,43E+05	0,3
2.	3,79E-06	0,075	9600	3,73E+05	0,3
3.	4,61E-06	0,09	9600	3,78E+05	0,3
4.	3,89E-05	0,6	9600	4,78E+05	0,3
5.	1,54E-04	2	9600	5,70E+05	0,3
6.	7,23E-04	8	9600	6,68E+05	0,3
7.	5,10E-03	50	9600	7,53E+05	0,3
8.	1,04E-02	100	9600	7,71E+05	0,3
9.	2,12E-02	200	9600	7,82E+05	0,3
10.	3,19E-02	300	9600	7,86E+05	0,3
11.	1,07E-01	1000	9600	7,93E+05	0,3
12.	2,15E-01	2000	9600	7,95E+05	0,3
13.	1,08E+00	10000	9600	7,96E+05	0,3

τ [Pa]- naprężenie ścinające na spodzie górnej warstwy, nad płaszczyzną związania.

ΔU [m] – względne poziome przesunięcie warstw

E- moduł sztywności warstwy wyżej leżącej, nad płaszczyzną styku, ν - współczynnik Poissona

Powyższa tabela zawiera parametry przyjęte do obliczenia względnego przesunięcia warstw. Moduł sztywności i współczynnik Poissona charakterystyczne są dla warstwy podbudowy z betonu asfaltowego, wartości naprężeń odczytano z wyników obliczeń w programie BISAR-3 dla warstwy leżącej nad analizowanym stykiem.

W pozycji [19] przedstawiona została następująca zależność:

$$AK = \frac{\Delta U}{\tau} \quad (35)$$

Powyższą zależność wyprowadzić można bezpośrednio z prawa Goodmana, które ma postać:

$$\tau = K_s \cdot \Delta U \quad (36)$$

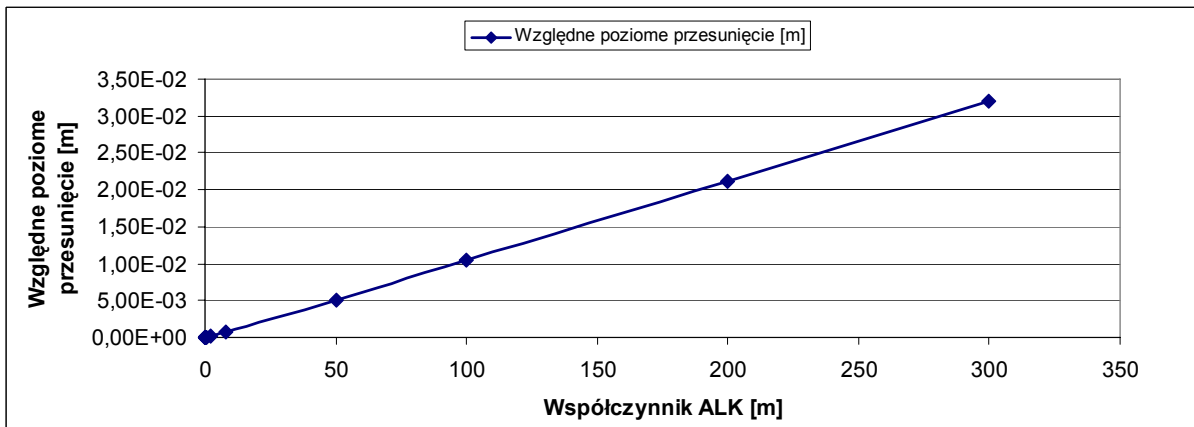
Zgodnie z powyższym prawem naprężenia ścinające na granicy warstw są wprost proporcjonalne do sztywności ścinania i względnego przesunięcia rozpatrywanych powierzchni. Jak podaje Kruntcheva w [7] sztywność ścinania na granicy warstw wynosi:

$$K_s = \frac{1}{AK} \left[\frac{N}{m^3} \right] \quad (37)$$

Na podstawie powyższych zależności oraz wzoru (34) został wyprowadzony następujący wzór na względne przesunięcie warstw:

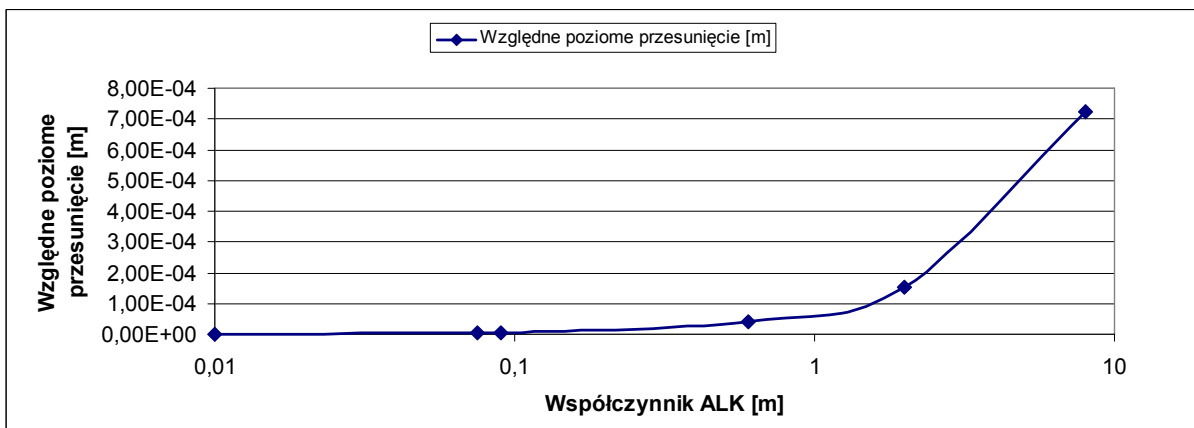
$$\Delta U = \frac{ALK \cdot \tau \cdot (1 + \nu)}{E} \quad (38)$$

Przytoczone prawo Goodmana zostało wykorzystane w wielu programach służących do projektowania nawierzchni metodami mechanistycznymi, m.in. wykorzystywany program BISAR 3.0. Na podstawie wzoru (38) ponownie wykonano kalibrację metody obliczeń, a jej wyniki przedstawione na rysunku 5.10 pokrywają się z tymi otrzymanymi przy użyciu odkształcenia poziomego na spodzie warstw asfaltowych.

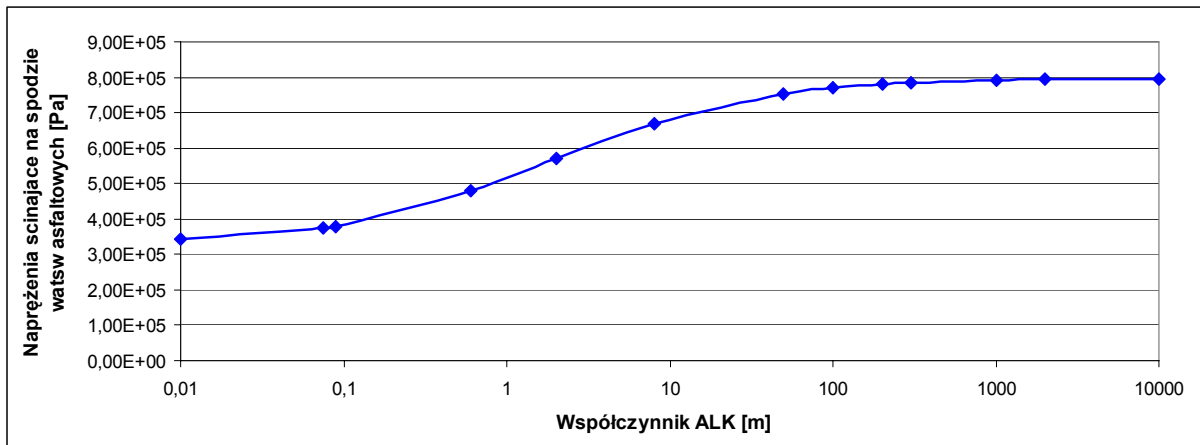


Rysunek 5.10. Zależność względnego poziomego przesunięcia od współczynnika ALK

Wydaje się, że zależność współczynnika ALK od względnego poziomego przesunięcia jest liniowa. Jest tak ale tylko dla „dużych” wartości współczynnika ALK, poniżej ALK=2 [m], wykres zakrzywia się, co zostało przedstawione na rysunku 5.11. Dopiero teraz widoczne jest podobieństwo powyższej zależności do rysunku 5.3 ukazanego w artykule [18].



Rysunek 5.11. Fragment rysunku 5.10 ukazujący zakrzywienie zależności przy małych wartościach współczynnika ALK



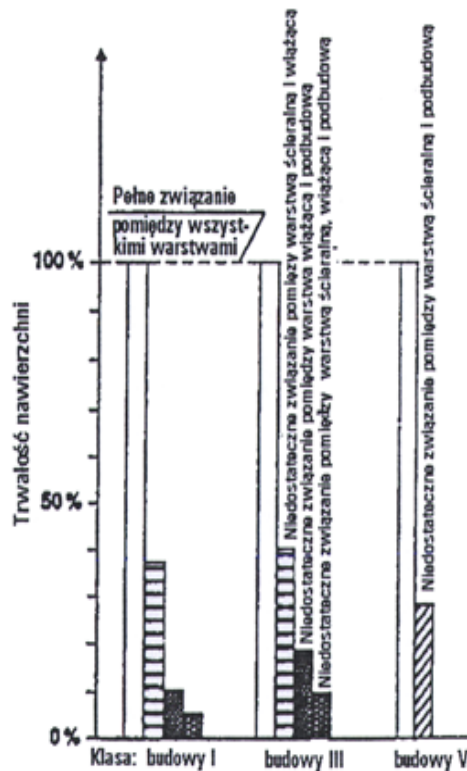
Rysunek 5.12. Zależność naprężeń ścinających na spodzie pakietu warstw asfaltowych od współczynnika ALK

Na rysunku 5.12 ukazana została zależność naprężeń ścinających w zależności współczynnika ALK i jej charakter przypomina zależność odkształcenia poziomego na spodzie warstw asfaltowych od współczynnika ALK.

5.3. Wpływ miejsca braku związania na trwałość nawierzchni

5.3.1. Przegląd publikacji

Powszechnie wiadomo, że brak należytego powiązania warstw nawierzchni powoduje zmniejszenie trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych, w związku z tym rozdział ten zostanie poświęcony analizie wielkości tego wpływu w zależności od występowania utraty szczepności i rodzaju konstrukcji nawierzchni. Obecnie przy projektowaniu nowych nawierzchni metodami mechanistycznymi, zakłada się, że wszystkie warstwy są ze sobą w pełni związane i na obciążenie ruchem będą odpowiadały jako jedna całość. Jednakże w rzeczywistości zdarzają się sytuacje gdzie powiązanie warstw uległo osłabieniu lub nastąpił poślizg między warstwami asfaltowymi. Po przeglądzie literatury wydaje się, że najlepszym sposobem zapewnienia wzajemnego powiązania warstw, mogącego przenosić naprężenia pochodzące od ruchu, jest metoda układania nawierzchni „gorące na gorące”, tzw. metoda „kompakt asfaltu”. Przy tak układanych warstwach już na etapie wbudowania warstwy zespalają się w jedną całość podobnie jak jednorodna mieszanka. Jest tpo jednak obecnie technologia rzadko stosowana. Stosują się ją tylko do dwóch warstw górnych.



Rysunek 5.13. Utrata trwałości nawierzchni w zależności od miejsca występowania braku szczepności międzywarstwowej i klasy budowy (kategorii nawierzchni) [16]

Wpływ szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni może być bardzo duży i uzależnione jest to jak podaje [20] m.in. od temperatury, ponieważ ma ona bardzo duży wpływ na wielkość naprężeń ścinających w poszczególnych warstwach, a także od przeniesionego obciążenia.

Na rysunku 5.13 przedstawiono rolę miejsca braku zawiązania na trwałość nawierzchni, jaką otrzymał Glet [16] w wyniku obliczeń przy pomocy programu BISAR. Można z niego odczytać, że zarówno dla klasy budowy I i III największy wpływ na utratę trwałości nawierzchni ma styk między warstwą wiążącą a podbudową. Przy braku szczepności w tej warstwie trwałość nawierzchni jest dużo niższa w porównaniu ze stanem pełnej szczepności.

Według Judyckiego [13] trwałość zmęczeniowa szybko maleje, gdy szczepność międzywarstwowa ulega osłabieniu. Gdy wystąpi całkowity brak szczepności i pełny poślizg, to trwałość zmęczeniowa analizowanej nawierzchni zmaleje kilka razy. Stan taki jest trudny do osiągnięcia jednak nawet przy częściowej 50% szczepności spadek trwałości zmęczeniowej jest bardzo wyraźny. Szczegółowy opis założeń do programu BISAR 3 i wyniki obliczeń analizowanego przez autora przypadku wzmocnienia nawierzchni zostały przedstawione w artykule [13].

Szczepaniak [22] przytacza obliczenia francuskie przy użyciu programu „ALIZE LCPC SETRA”, że dobrze złączone warstwy zapewniają 20 lat trwałości nawierzchni obciążonej ruchem 1,3-2,6 mln osi 13 t, podczas gdy nie zastosowanie żadnego lepiszcza do sklejenia warstw skraca ten okres do 7 – 8 lat.

Hakim [23] wskazał, że w wyniku słabego powiązania warstw asfaltowych nawierzchni, jej trwałość spada o 40%. Rezultat ten został osiągnięty poprzez wykorzystanie badań przy pomocy FWD, gdzie obliczano moduły sztywności poszczególnych warstw nawierzchni. Według Hakami [23] współdziałanie wysokiej temperatury i ruchu drogowego może poprawić związanie międzywarstwowe, ale pod warunkiem, że nie ma tam całkowitego braku szczepności.

Według Pös i innych [7] wadliwe powiązanie warstw asfaltowych może w skrajnych przypadkach zmniejszyć o 30% przewidywaną trwałość zmęczeniową nawierzchni drogowej, wychodząc jednak od przeciętnej redukcji czasu eksploatacji do pojawienia się uszkodzeń do 15%.

5.3.2. Warianty obliczeniowe

W analizach obliczeniowych przeprowadzonych w pracy przyjęto siedem wariantów miejsca wystąpienia braku szczepności. Zostały one przedstawione na rys. 5.14. Z pośród przedstawionych wariantów najważniejsze to:

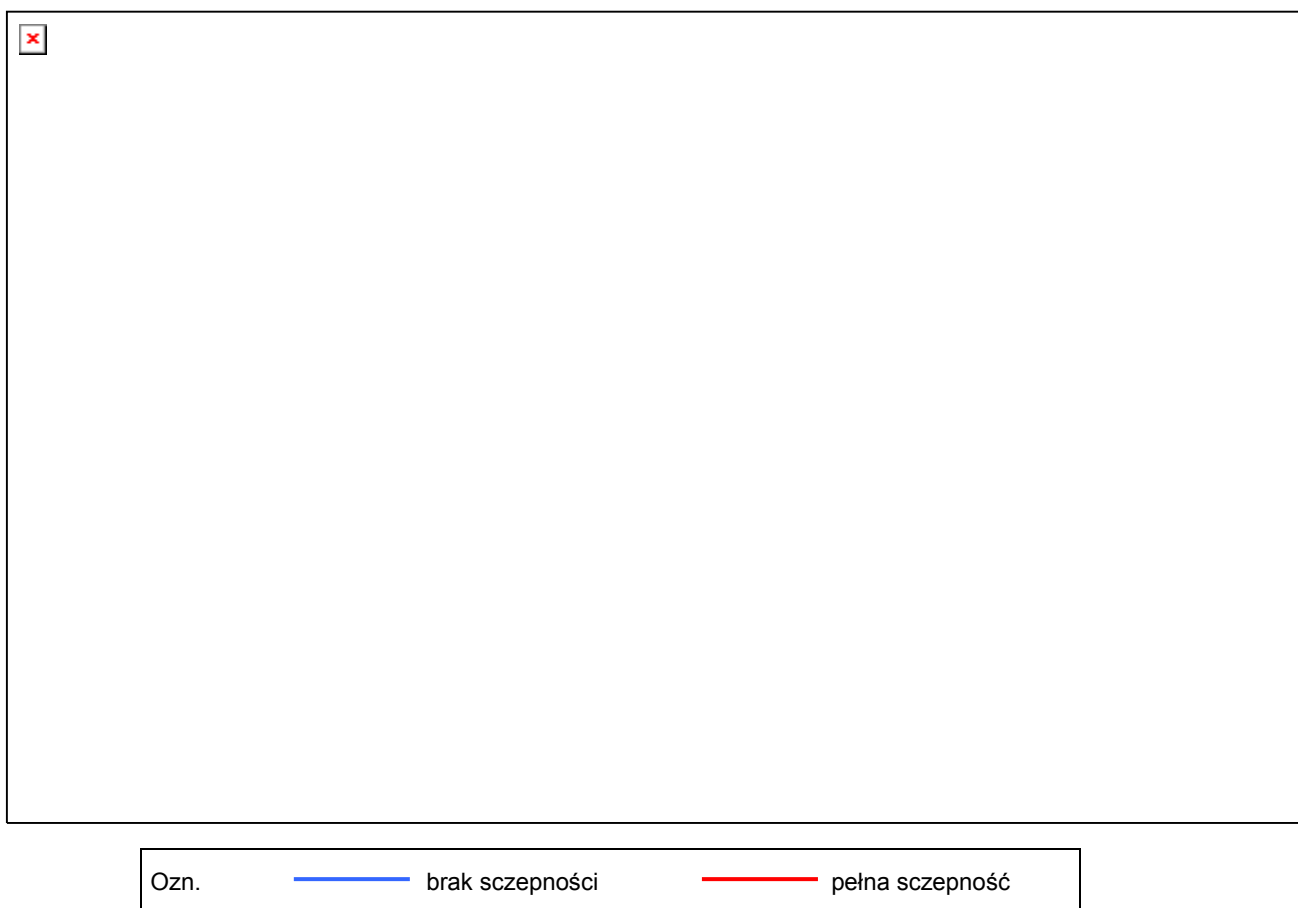
- wariant I, w którym zakłada się poślizg między warstwą ścieralną a wiążącą,
- wariant II, brak związania między warstwą wiążącą a podbudową asfaltową,
- wariant IV gdzie brak związania jest w dwóch płaszczyznach, na granicy warstwy ścieralnej i wiążącej, i na granicy warstwy wiążącej i warstwy podbudowy z betonu asfaltowego.
- wariant VII, w którym brak związania występuje w każdej płaszczyźnie międzywarstwowej, za wyjątkiem granicy między podbudową z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie a podłożem.

Pozostałe kombinacje wydają się być mniej prawdopodobne, dlatego zwrócono na nie dużo mniejszą uwagę.



5.3.3. Stan naprężeń i odkształceń w nawierzchni KR6

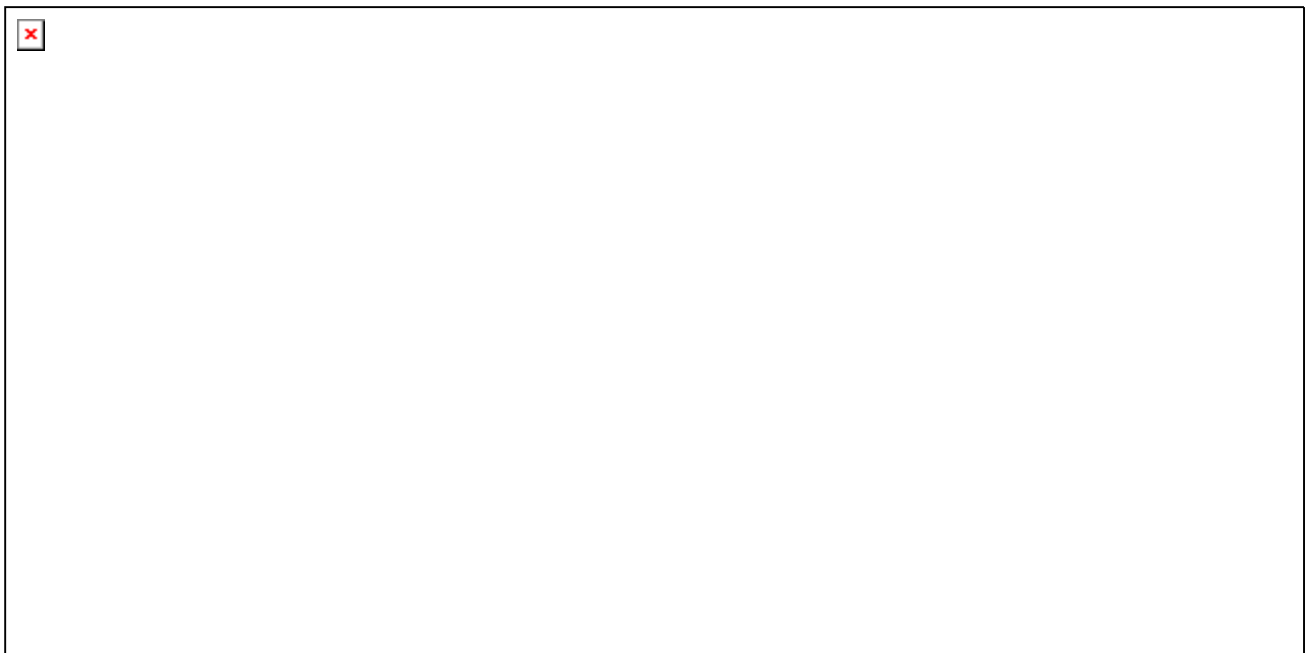
W celu poznania schematu pracy nawierzchni dla ruchu o bardzo dużym natężeniu przedstawione zostały wykresy odkształceń i naprężeń w nawierzchni. Czerwone linie oznaczają odkształcenia w nawierzchni przy pełnej szczepności z wartościami opisanymi na czerwono, niebieskie natomiast w przypadku utraty szczepności z analogicznie oznaczonymi cyframi.



Rysunek 5.15. Wykresy odkształceń poziomych oraz odkształceń pionowych na spodzie konstrukcji nawierzchni odpowiednio dla 90%, 70%, 30%, 0% szczepności międzywarstwowej(dla wariantu I) [μ strain]

Szare pola oznaczają warstwy asfaltowe w analizowanej konstrukcji.

Na powyższych wykresach widać, że przy pełnej szczepności zależności te nie są liniowe. Przy braku szczepności wykresy stają się przeważnie liniowe, co widoczne jest na rys.5.17. Wraz z utratą powiązania następuje zmiana znaku odkształceń i ich rozkład.



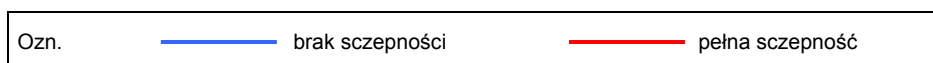
Ozn. — brak szczepności — pełna szczepność

Rysunek 5.16. Rozkład naprężeń w konstrukcji nawierzchni odpowiednio dla 90%, 70%, 30%, 0% szczepności międzywarstwowej(dla wariantu I) [MPa]



Ozn. — brak szczepności — pełna szczepność

Rysunek 5.17. Wykresy odkształceń poziomych oraz odkształceń pionowych na spodzie konstrukcji nawierzchni odpowiednio dla 90%, 70%, 30%, 0% szczepności międzywarstwowej (dla wariantu II) [μ strain]



Rysunek 5.18. Rozkład naprężeń w konstrukcji nawierzchni odpowiednio dla 90%, 70%, 30%, 0% szczepności międzywarstwowej(dla wariantu II) [MPa]

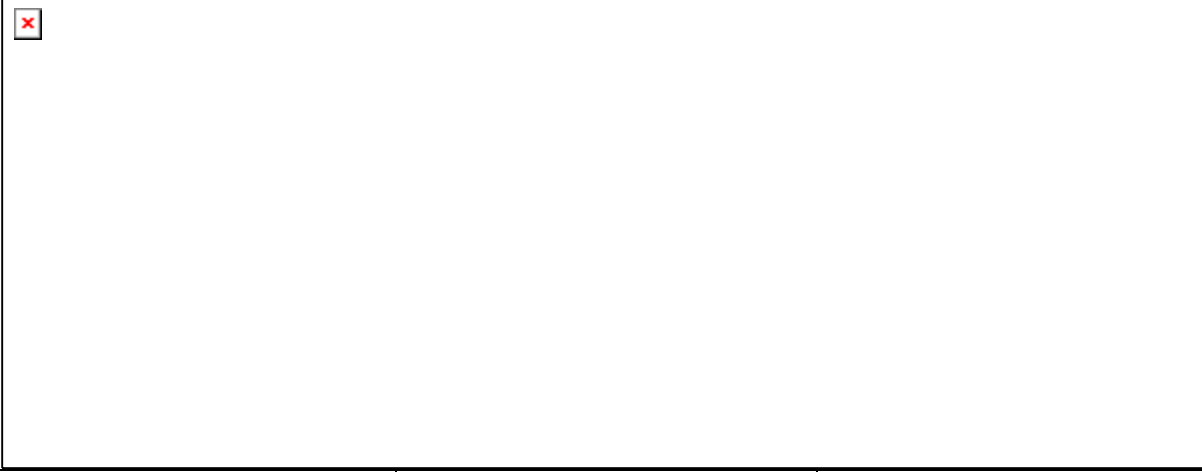
Z powyższych wykresów wynika, że utrata szczepności powoduje zmianę charakteru pracy poszczególnych elementów konstrukcji nawierzchni. W górnych warstwach nawierzchni, gdzie przy pełnym związaniu warstw występują naprężenia ściskające, stan naprężeń i odkształceń ulega diametralnie zmianie i pojawiają się naprężenia rozciągające. Dodatkowo wykres odkształceń w nawierzchni przy pełnej szczepności nie jest liniowy. Na wykresach naprężeń nie zostały naniesione wartości naprężeń w warstwie podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie, z powodu zbyt małych wartości.

Utrata szczepności powoduje wzrost naprężeń rozciągających zarówno na spodzie warstw asfaltowych, jak i w płaszczyźnie, w której nastąpił poślizg. Jest to najpoważniejszy skutek, ponieważ stosunkowo nieduży wzrost naprężeń ściskających nie jest taki groźny. Wartość naprężenia ściskającego wzrasta z $-1,07$ [MPa] do $-1,26$ lub z $-0,11$ do $-1,28$ [MPa] ale co gorsze pojawia się naprężenie rozciągające na górze warstwy wynoszące $1,003$ [MPa]. Na wykresach naprężeń niewidoczne są skoki wartości naprężenia na granicy warstw, wynikające z różnicy modułów sztywności między nimi. Ponieważ różnice te były bardzo małe (setne części naprężenia w MPa), to podano na styku warstw tylko jedną wartość.

5.3.4. Analiza wpływu miejsca braku szczepności na trwałość nawierzchni KR6

W rzeczywistych nawierzchniach brak związania międzywarstwowego może wystąpić między różnymi warstwami. Kluczowym zagadnieniem jest sprawdzenie między którymi warstwami brak szczepności, lub jej utrata będą miały największy wpływ na

trwałość konstrukcji nawierzchni. Próbą odpowiedzi na zadane zagadnienie są wyniki przeprowadzonych obliczeń konstrukcji nawierzchni, poprzez symulowanie poślizgu współczynnikiem ALK. Przedstawione poniżej wyniki wyliczeń dotyczą przypadku nawierzchni typu ciężkiego. Dodatkowo w obliczeniach założono, że na granicy podłoża gruntowego i podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie istnieje pełne związanie.

		
Wariant 0 – pełna szczepność	Wariant I-utrata szczepności między w. ściernalną a wiążącą	Wariant II-utrata szczepności między w. wiążącą a podbudową
Wariant III -utrata szczepności między w. podbudowy BA a podbudową z KŁSM	Wariant IV - połączenie wariantu I i II.	Wariant V – połączenie wariantu II i III.
Wariant VI – połączenie wariantu I i III.	Wariant VII - połączenie wariantu I,II i III.	

Rysunek 5.20. Zależność trwałości zmęczeniowej w zależności od stopnia powiązania warstw asfaltowych dla wszystkich wariantów

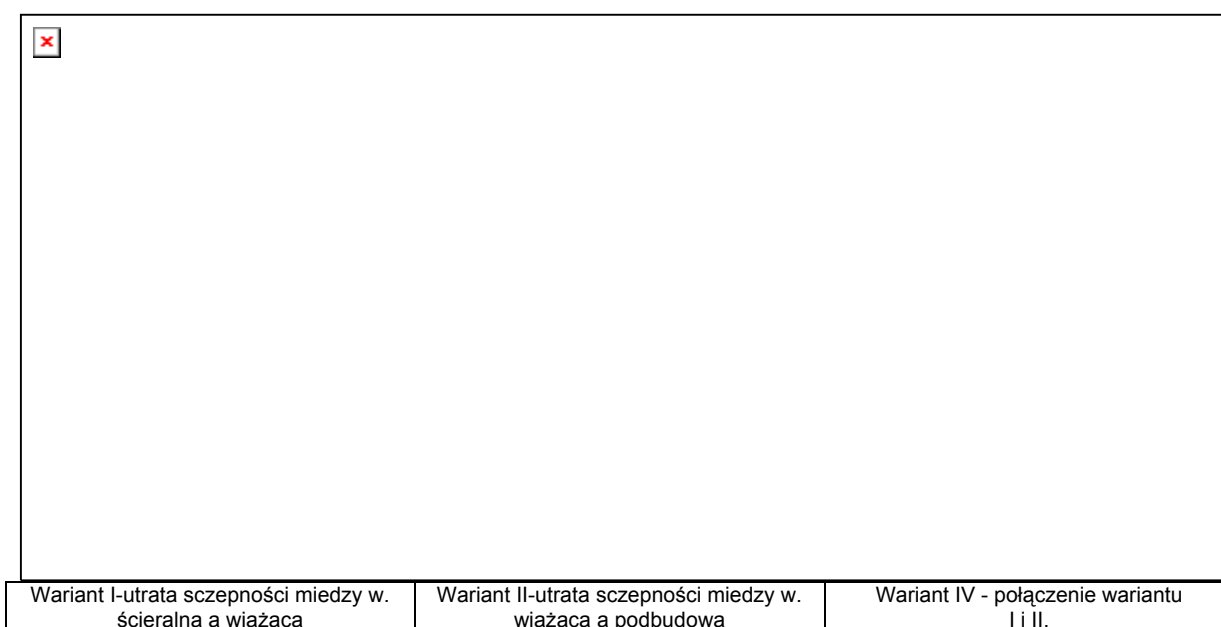
		
Wariant I-utrata szczepności między w. ściernalną a wiążącą	Wariant II-utrata szczepności między w. wiążącą a podbudową	Wariant IV - połączenie wariantu I i II.

Rysunek 5.21. Odształcenia poziome w zależności od stopnia szczepności

Warto zwrócić uwagę, że wszystkie wartości trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych wariantów przytaczane na wykresach są wartościami najmniejszymi i one wyznaczają rzeczywistą trwałość nawierzchni. Podobnie jest z wartościami odształceń poziomych z tą różnicą, że są to wartości największe. Bo im większe odształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych tym mniejsza trwałość zmęczeniowa nawierzchni.

Na rysunku 5.20 od razu wyróżnia się linia dotycząca spadku trwałości zmęczeniowej dla wariantu III w zależności od stopnia powiązania warstw asfaltowych z podbudową z KŁSM. W wariacie tym zakłada się różny stopień szczepności między warstwą podbudowy z KŁSM a warstwą podbudowy z BA. Widać z rys. 5.20, że stopień powiązania warstw asfaltowych z podbudową z KŁSM mniej wpływa na trwałość zmęczeniową niż powiązanie innych warstw. Często w literaturze można spotkać [8,15,19], że w modelach nawierzchni podatnej zakłada się iż na granicy wyżej wspomnianej warstwy występuje pełne związanie. Jest to spowodowane małym spadkiem trwałości zmęczeniowej gdy wystąpi ubytek szczepności w tej płaszczyźnie, a także obserwacjami rzeczywistych konstrukcji gdzie w wielu przypadkach odpowiednia szczepność jest zachowana. Najbardziej destrukcyjne wystąpienie braku związania ma miejsce w wariacie VII, jednak jest to wariant mało prawdopodobny.

Bardzo istotne znaczenie ma wariant IV, gdzie wszystkie warstwy asfaltowe pracują w pewnym stopniu oddzielnie i otrzymana utrata trwałości nawierzchni jest dość znaczna, sięgająca 87 [%].



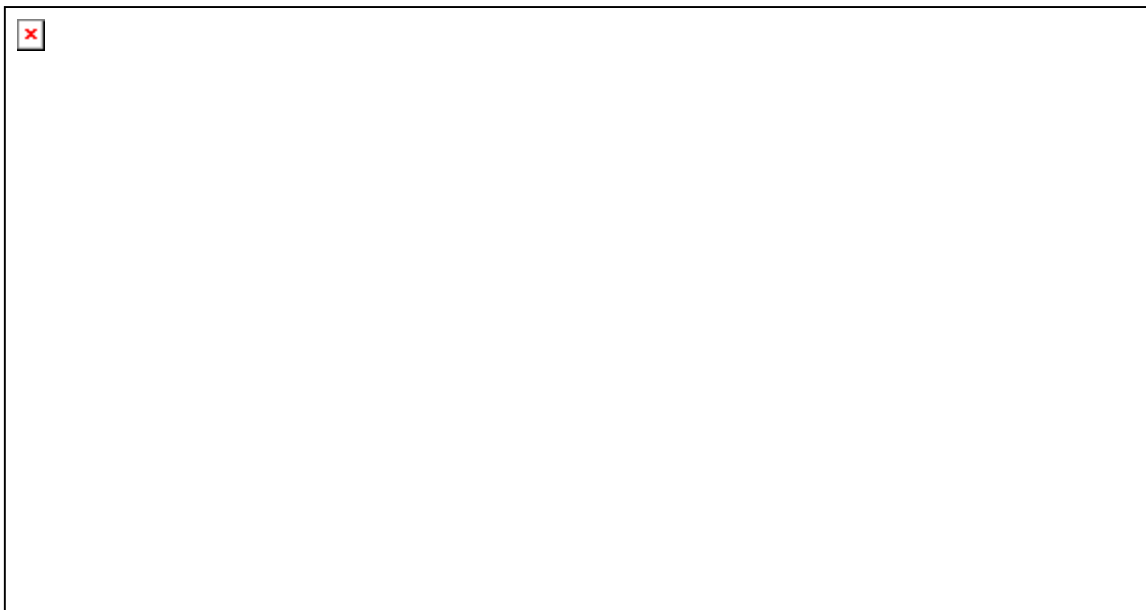
Rysunek 5.22. Zależność trwałości zmęczeniowej w zależności od stopnia powiązania warstw asfaltowych

Z rysunku 5.21 wynika, że największe odkształcenia poziome w warstwach asfaltowych występują dla wariantu IV, w którym miejsca braku szczepności występują między warstwami asfaltowymi. Największe odkształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych powodują, jak największą utratę trwałości zmęczeniowej nawierzchni. Na rysunku 5.21 zauważyć można także, że najniekorzystniejszym wariantem dla nawierzchni o ruchu ciężkim jest wariant II. Oznacza to, że przy wykonywaniu nawierzchni dla ruchu KR6 powinno się zadbać szczególnie o połączenie warstwy wiążącej i podbudowy z betonu asfaltowego. Gdyż brak związania międzywarstwowego w tej płaszczyźnie spowoduje spadek trwałości zmęczeniowej o blisko 70 % przy poziomie szczepności wynoszącym 30%.



Wariant 0 – pełna szepność	Wariant I-utrata szepności między w. ścieralną a wiążącą	Wariant II-utrata szepności między w. wiążącą a podbudową
Wariant III -utrata szepności między w. podbudowy BA a podbudową z KŁSM	Wariant IV - połączenie wariantu I i II.	Wariant V – połączenie wariantu II i III.
Wariant VI – połączenie wariantu I i III.	Wariant VII - połączenie wariantu I,II i III.	

Rysunek 5.23. Odształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych w zależności od wariantu wystąpienia szepności dla ruchu KR6



Wariant 0 – pełna szepność	Wariant I-utrata szepności między w. ścieralną a wiążącą	Wariant II-utrata szepności między w. wiążącą a podbudową
Wariant III -utrata szepności między w. podbudowy BA a podbudową z KŁSM	Wariant IV - połączenie wariantu I i II.	Wariant V – połączenie wariantu II i III.
Wariant VI – połączenie wariantu I i III.	Wariant VII - połączenie wariantu I,II i III.	

Rysunek 5.24. Utrata trwałości zmęczeniowej dla różnych wariantów wystąpienia braku szepności dla ruchu KR6

Z rysunku 5.23 zauważyć można jak duży wpływ na odształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych ma połączenie warstwy wiążącej z podbudową z BA. Wpływ ten jest porównywalny do wystąpienia braku szepności w wariantcie VI.

Ciekawym jest fakt, że nie we wszystkich wariantach różnica odkształceń poziomych między poszczególnymi stopniami związania nie jest jednakowa. W wariacie III między 90% szczepności a 70% szczepności nie ma żadnej różnicy. Podobną zależność można dostrzec na rysunku 5.24 w tym przypadku skok utraty trwałości zmęczeniowej nie jest jednakowy we wszystkich wariantach przy zmianie stopnia powiązania warstw. Porównując wariant IV i V dostrzega się, że w wyniku utraty szczepności z 90 do 70% wzrost utraty trwałości nie jest jednakowy.

Największą utratę trwałości zmęczeniowej uzyskamy dla wariantów IV, V i VII, gdzie jak wspomniano wcześniej ten ostatni jest najmniej prawdopodobny. W rzeczywistości najbardziej istotne są pierwsze dwa warianty, mogące realnie zagrozić właściwej pracy nawierzchni. Wśród wszystkich powyższych wariantów właśnie warianty I i II są najbardziej prawdopodobne.

Tablice 5.6 i 5.7 przedstawiają charakterystykę odkształceń poziomych w poszczególnych warstwach i trwałości zmęczeniowych w połączeniu z wskazaniem w której warstwie wytworzy się spękanie, powodując dalszą degradację nawierzchni. W sytuacji przedstawionej na poniższych wykresach wynika, że degradacja nawierzchni rozpocznie się bez względu na wariant wystąpienia szczepności w podbudowie, pomimo tego iż w niektórych wariantach odkształcenia poziome na spodzie warstw wiążących są większe niż w podbudowie. Taki przypadek ma miejsce w wariantach II i V przy całkowitym braku szczepności. Na uwagę zasługuje fakt, że utrata trwałości przy całkowitej utracie szczepności dochodzi do 90%, co w rzeczywistości wydaje się być nierealnym. Już sama wartość 74 % dla wariantu II budzi wątpliwości. Należy jednak wspomnieć, że w rzeczywistych warunkach rzadko kiedy zdarzają się przypadki, że powiązanie warstw jest tylko 30%. Spowodowane jest to m.in. tarciami występującym między sąsiadującymi ze sobą powierzchniami, a także wzajemne ząbienie się ziaren mieszanek mineralno-asfaltowych. Rdzeń wyciągnięty z nawierzchni może nie być połączony z niżej leżącą warstwą ale pozostaje pewna część mechanicznego ząbienia ziaren szkieletu mineralnego.

Przyczyną inicjowania spękań właśnie w podbudowie a nie w warstwie wiążącej jest duża zawartość asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej przeznaczonej do warstwy wiążącej, co znacznie wydłuża jej trwałość zmęczeniową. A do kryterium asfaltowego oprócz odkształceń wchodzi parametry składu mieszanki mineralno-asfaltowej. Większa zawartość asfaltu i mniejsza ilość wolnych przestrzeni zwiększają trwałość zmęczeniową. Dostrzegalne są także rozciągające odkształcenia poziome na spodzie warstwy ścieralnej, jednak 12,75% (objętościowo) lepiszcza sprawia, że jest ona „elastyczna” i może przenieść znacznie większe odkształcenia rozciągające. Także niebagatelny wpływ na trwałość zmęczeniową warstwy asfaltowej ma zawartość wolnych przestrzeni i im wyżej usytuowana jest warstwa tym posiada ich mniej zwiększając jej żywotność. Dodatkowo rysunku 5.24 wskazuje, że najmniejsza różnica utraty trwałości zmęczeniowej nawierzchni występuje między 30% a całkowitym brakiem szczepności.

Tablica 5.6. Odkształcenia poziome i trwałości zmęczeniowe w zależności od wariantu wystąpienia braku szczepności(KR6).³

Warstwa w nawierzchni Głębokość	100%	90% Szczepności							70% Szczepności						
	W0	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
Odkształcenia poziome na spodzie poszczególnych warstw ϵ_{xx} [μ strain]															
Ścieralna BA z=0,05 [m]	-22,17	-17,14	-21,17	-22,19	-15,89	-21,19	-17,16	-15,91	-1,27	-17,99	-22,27	5,38	-18,10	-1,317	5,349
Wiążąca BA z=0,13 [m]	5,42	4,09	13,59	5,42	12,26	13,6	4,09	12,26	0,80	35,16	5,42	31,94	35,26	0,785	32,04
Podbudowa BA z=0,31 [m]	48,55	50,30	51,59	48,61	53,48	51,67	50,37	53,57	54,60	59,61	48,97	66,87	60,24	55,12	67,63
Trwałość zmęczeniowa dla poszczególnych warstw asfaltowych [osi 115 kN]															
Ścieralna BA z=0,05 [m]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,4147E+11	-	-	3,4738E+11
Wiążąca BA z=0,13 [m]	6,4215E+10	1,6129E+11	3,11E+09	6,4215E+10	4,36E+09	3,10E+09	1,6129E+11	4,36E+09	3,4662E+13	1,36E+08	6,4137E+10	1,87E+08	1,35E+08	3,7012E+13	1,85E+08
Podbudowa BA z=0,31 [m]	1,59E+07	1,41E+07	1,30E+07	1,58E+07	1,15E+07	1,29E+07	1,40E+07	1,15E+07	1,08E+07	8,07E+06	1,54E+07	5,53E+06	7,79E+06	1,04E+07	5,33E+06
Warstwa gdzie wyst. inicjacja spękania	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa
Utrata trwałości [%]	0	11	18,12	0,406	27,26	18,53	11,41	27,66	32,06	49,11	2,80	65,13	50,84	34,14	66,41

³ Uwaga: Szary kolor w tabeli oznacza utratę szczepności międzywarstwowej.

Tablica 5.7. Odkształcenia poziome i trwałości zmęczeniowe w zależności od wariantu wystąpienia braku szczepności (KR6)⁴

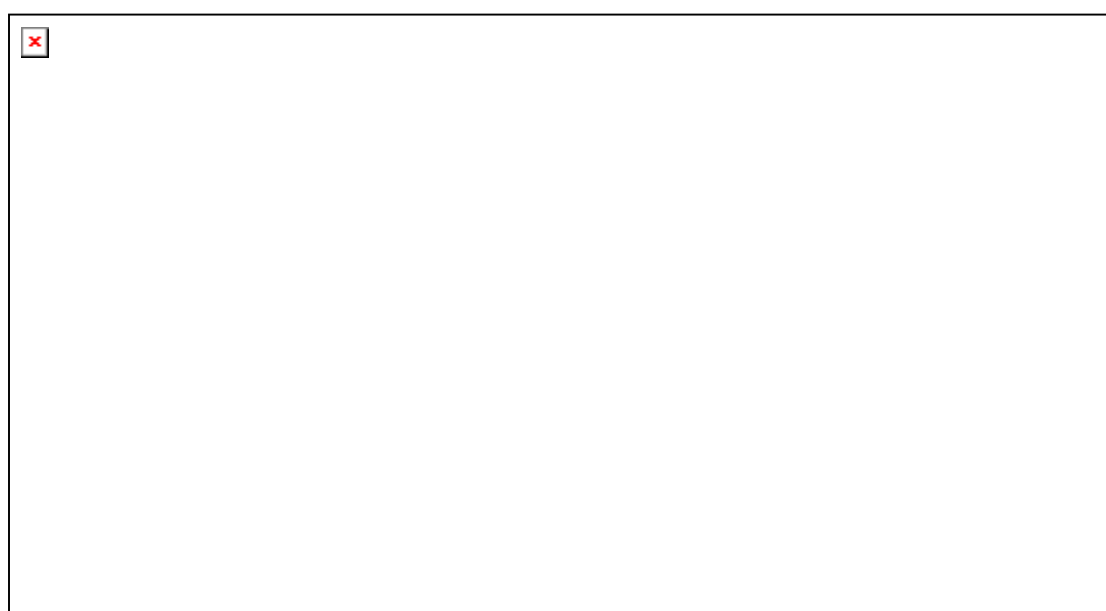
Warstwa w nawierzchni Głębokość	30% Szczepności							0% Szczepności						
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
	Odkształcenia poziome na spodzie poszczególnych warstw ϵ_{xx} [μ strain]													
Ścieralna BA z=0,05 [m]	24,34	-9,381	-22,91	41,2	-10,19	24,61	42,34	35,98	-3,99	-23,98	53,95	-5,72	37,49	58,04
Wiążąca BA z=0,13 [m]	-5,88	70,82	5,49	63,29	73,15	-6,17	65,54	-9,234	84,39	5,91	74,05	91,65	-9,94	80,58
Podbudowa BA z=0,31 [m]	60,83	71,63	51,48	86,57	77,73	65,04	94,59	62,45	73,92	55,96	90,64	89,77	73,28	111,20
Trwałość zmęczeniowa dla poszczególnych warstw asfaltowych [osie 115 kN]														
Ścieralna BA z=0,05 [m]	2,37E+09	-	-	4,20E+08	-	2,29E+09	3,84E+08	6,55E+08	-	-	1,73E+08	-	5,73E+08	1,36E+08
Wiążąca BA z=0,13 [m]	-	1,36E+07	6,141E+10	1,97E+07	1,22E+07	-	1,75E+07	-	7,63E+06	4,8074E+10	1,17E+07	5,82E+06	-	8,89E+06
Podbudowa BA z=0,31 [m]	7,55E+06	4,41E+06	1,31E+07	2,36E+06	3,37E+06	6,06E+06	1,77E+06	6,92E+06	3,97E+06	9,93E+06	2,03E+06	1,96E+06	4,09E+06	1,04E+06
Warstwa gdzie wyst. inicjacja spękania	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa
Utrata trwałości [%]	52,39	72,19	17,54	85,09	78,75	61,80	88,86	56,33	74,93	37,34	87,19	87,64	74,20	93,50

⁴ Uwaga: Szary kolor w tabeli oznacza utratę szczepności międzywarstwowej.

5.3.5. Analizy wpływu miejsca braku szczepności w nawierzchni dla ruchu KR3

Ze względu na powtarzający się schemat analiz jaki przeprowadzono w pkt. 5.3.3 i 5.3.4 obliczenia i ich wyniki dla konstrukcji nawierzchni typu lżejszego KR3 zamieszczono w załączniku 3.

Na rysunku 5.25 przedstawiono wynik końcowy analiz, gdzie można zauważyć, że w konstrukcji lekkiej decydujące znaczenie na utratę trwałości zmęczeniowej na skutek wystąpienia braku szczepności pomiędzy warstwami asfaltowymi ma powiązanie warstwy ścieralnej z wiążącą (W1). Jest to odmienny wynik do nawierzchni typu ciężkiego, gdzie decydujące znaczenie miało powiązanie warstwy wiążącej z podbudową (W2).



Wariant 0 – pełna szczepność	Wariant I-utrata szczepności między w. ścieralną a wiążącą	Wariant II-utrata szczepności między w. wiążącą a podbudową
Wariant III -utrata szczepności między w. podbudowy BA a podbudową z KŁSM	Wariant IV - połączenie wariantu I i II.	Wariant V – połączenie wariantu II i III.
Wariant VI – połączenie wariantu I i III.	Wariant VII - połączenie wariantu I,II i III.	

Rysunek 5.25. Utrata trwałości nawierzchni dla różnych wariantów wystawienia braku szczepności

5.3.6. Porównanie pracy konstrukcji nawierzchni KR3 i KR6

Istotną różnicą w pracy opisywanych konstrukcji jest to, że w nawierzchni dla ruchu ciężkiego KR6 newralgicznym połączeniem warstw jest styk między warstwą wiążącą a podbudową asfaltową, natomiast w przypadku konstrukcji dla ruchu lekkiego KR3 tą płaszczyzną jest powierzchnia styku warstwy ścieralnej z wiążącą.

W nawierzchni KR6 największe odkształcenia poziome występują w warstwie wiążącej przy całkowitej utracie szczepności i wynosi 84,39 [μ strain], natomiast kluczową wartością dla trwałości nawierzchni posiada odkształcenie na spodzie

podbudowy z betonu asfaltowego wynoszące 73,92 [μ strain]. Różnica między nimi jest zbyt mała, a warstwa wiążąca jest bogatsza w asfalt niż podbudowa, co sprawia, że w podbudowie wystąpią spękania zmęczeniowe. W nawierzchni lżejszej odkształcenia poziome na spodzie warstwy wiążącej są znacznie większe niż w podbudowie i wynoszą 167 [μ strain], co powoduje szybszą degradację warstwy wiążącej.

Dodatkowo w lekkich nawierzchniach większy wpływ na rozkład naprężeń ma warstwa podbudowy z KŁSM. Nawierzchnie mniej masywne, jak np. KR3 dla wariantu II, czyli brak szepności między warstwą wiążącą a podbudową, degradują od warstwy wiążącej, natomiast bez względu na miejsce wystąpienia braku szepności w nawierzchni typu ciężkiego niszczenie nawierzchni postępować będzie od podbudowy asfaltowej. Oba typy nawierzchni łączy, fakt, że na wartość utraty trwałości między np. 90% a 70 % szepności ma duży wpływ miejsce braku wystąpienia powiązania. Przykładowo dla nawierzchni lżejszej (KR3) przy 70% szepności między warstwą ścieralną i wiążącą utrata trwałości wynosi 41%, natomiast, przy 70% szepności między warstwą wiążącą a podbudową utrata trwałości wynosi tylko 9%.

Przyglądając się wynikom obliczeń dla nawierzchni typu ciężkiego zauważyć można sytuację odwrotną niż w przypadku nawierzchni KR3. W tym wypadku 70% szepność między warstwą ścieralną i wiążącą powoduje 32% utratę trwałości nawierzchni, natomiast 70% szepność między warstwą wiążącą a podbudową przyczynia się do blisko 50% utraty trwałości nawierzchni.

Należy wspomnieć, że wymieniane w powyższych analizach trwałości oznaczają trwałość nawierzchni określoną za pomocą kryterium asfaltowego wg Instytutu Asfaltowego. Nie wystąpił przypadek, w którym trwałość ze względu na deformacje trwale była mniejsza niż trwałość zmęczeniowa warstw asfaltowych.

5.4. Modelowanie warstwy szepnej⁵

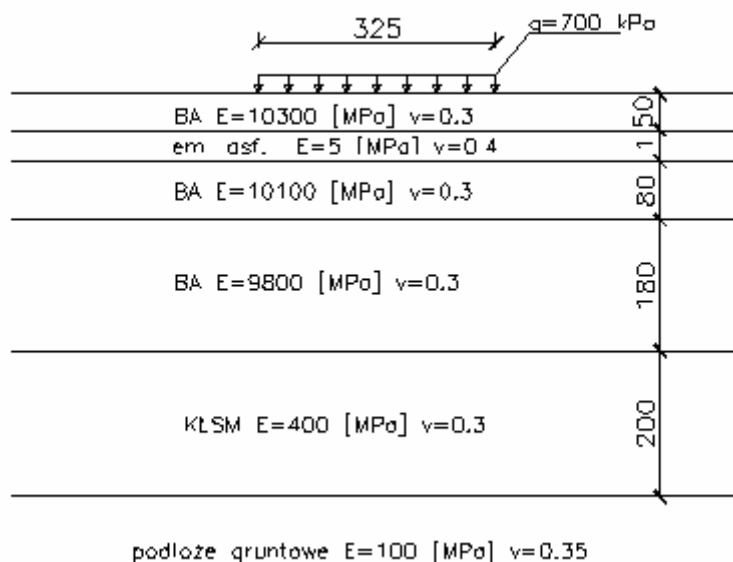
5.4.1. Wprowadzenie

Powyższe obliczenia prowadzono przy założeniu, że warstwa szepna jest nieskończenie cienka o określonej sztywności ścinania. Podjęto próbę symulowania warstwy szepnej za pomocą programu BISAR, nadając jej grubość i sztywność. Dość powszechnie do skropienia stosuje się emulsję z asfaltem 160/220. Do obliczeń dla warstwy szepnej przyjęto moduł sztywności równy $E=5$ [MPa] oraz współczynnik Poissona $\nu=0,4$. Obliczenia wykonano dla temperatury ekwiwalentnej równej 12°C. Grubość warstwy szepnej przyjęto 1 [mm]. Do obliczeń przyjęto trzy warianty wystąpienia warstwy szepnej: W1, W2 i W4.

⁵ Wyniki obliczeń dla warstwy szepnej zebrane zostały w pliku Z4.pdf na załączonej płycie CD.

5.4.2. Modele obliczeniowe

Warstwę szepną modelowano w dwóch typach konstrukcji nawierzchni, dla ruchu KR6 i KR3. Modele te posiadają standardowe grubości warstw dla odpowiednich kategorii ruchu, z tą różnicą że pomiędzy warstwy wprowadzona zostaje nowa warstwa o grubości 1 [mm]. Na styku warstwy szepnej z warstwami nawierzchni założono pełną szepność międzywarstwową.



Rysunek 5.26. Model obliczeniowy nawierzchni dla ruchu KR6 z warstwą szepną dla wariantu I

Powyższy model symuluje nawierzchnię podatną typu ciężkiego z warstwą szepną umiejscowioną zgodnie z wariantem I tzn. między warstwą ścieralną a wiążącą. Natomiast rys. 5.27 przedstawia nawierzchnie podatną typu lekkiego także z warstwą szepną wstawioną zgodnie z wariantem I.



Rysunek 5.27. Model obliczeniowy nawierzchni dla ruchu KR3 z warstwą szepną dla wariantu I

Podobnie jak w poprzednich modelach przyjęto, że podłoże gruntowe ma moduł sprężystości równy 100 [MPa].

5.4.2. Wpływ warstwy szepnej na trwałość podatnej konstrukcji nawierzchni

Poniższa analiza przedstawia wpływ modelowania skropienia międzywarstwowego na stan odkształceń poziomych i trwałość zmęczeniową poszczególnych warstw. Wyniki analizy przedstawiono w tablicy 5.8.

Zastosowana symulacja skropienia emulsją asfaltową nawierzchni powoduje, jak pokazuje tablica 5.8 utratę trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych. Dodatkowo wpływa ona negatywnie na ugięcia nawierzchni, przyczyniając się nawet do ich dwukrotnego wzrostu w porównaniu do nawierzchni bez zastosowania symulacji skropienia. Wspomniane utraty trwałości zmęczeniowej są dość znaczne, jak np. 62 [%] w przypadku wariantu II. Nasuwa się tutaj stwierdzenie, iż modelowanie warstwy szepnej z założeniami opisanymi w punkcie 3.4.1 przy pomocy programu BISAR-3 odbiega od rzeczywistości, ponieważ obecnie każda nawierzchnia wykonywana jest z wykonaniem skropienia międzywarstwowego. W przyjętych założeniach obliczeniowych wystąpiły prawdopodobnie nieścisłości. Można przyjąć, że w przyjętym modelu mogą wystąpić cztery nieścisłości, a mianowicie:

1. Nieuwzględnienie mechanicznego zazębienia warstwy górnej z dolną, poprzez ziarna warstwy górnej wciśnięte przez wałowanie w warstwę dolną:



2. Zbyt gruba warstewka szepna asfaltu przyjęta w modelu, wielokrotnie grubsza od rzeczywistej.



3. Być może moduł warstwy szepnej 5 MPa jest za mały.
4. Program komputerowy BISAR może nie być „wykalibrowany” do obliczeń dla tak cienkich warstw, lub dla tak wielkich dysproporcji kolejnych „grubych” i cienkich warstw.

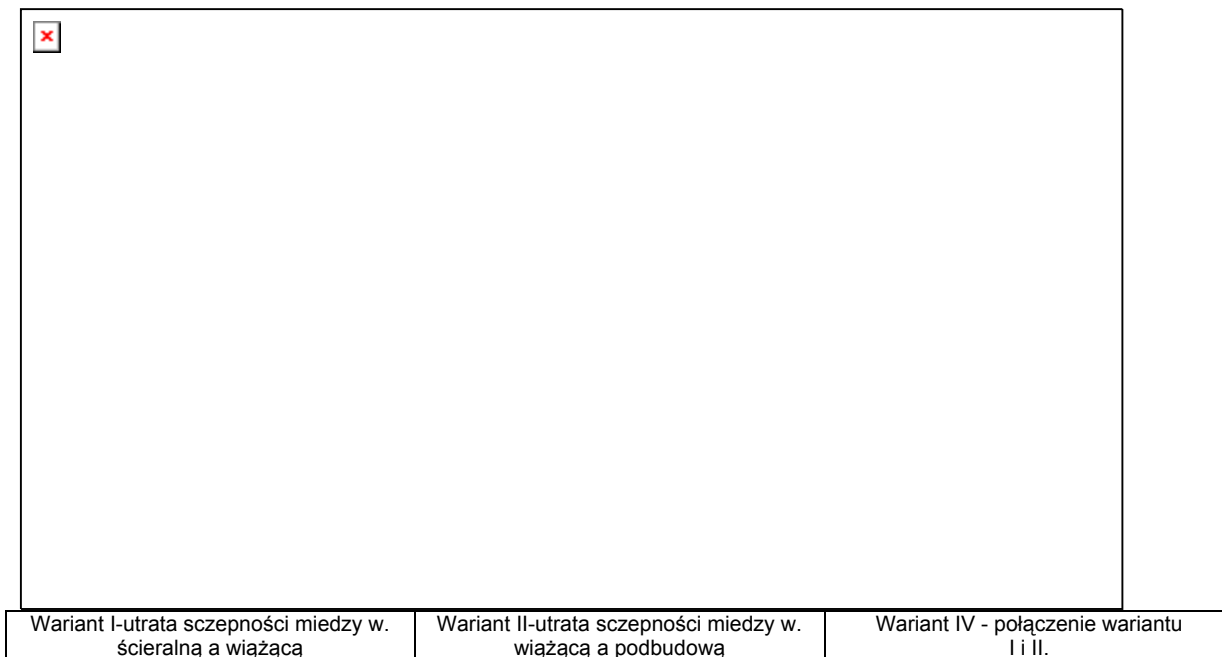
Tablica 5.8. Wpływ miejsca wystąpienia warstwy szepnej na trwałość nawierzchni KR6⁶

Warstwa w nawierzchni Głębokość	100%	Warianty z warstwą szepną		
	W0	W1	W2	W4
	Odształcenia poziome na spodzie warstw [μ strain]			
Ścieralna BA z=0,05 [m]	-22,17	88,57	-19,05	166,20
Wiążąca BA z=0,131 [m]	5,42	-4,34	90,99	200,10
Podbudowa BA z=0,312 [m]	48,55	56,37	55,52	43,83
Trwałość zm. dla poszczególnych warstw [osi 115 kN]				
Ścieralna BA z=0,05 [m]	–	3,38E+07	–	4,26E+06
Wiążąca BA z=0,13 [m]	6,42E+10	–	5,96E+06	4,45E+05
Podbudowa BA z=0,31 [m]	1,59E+07	9,70E+06	1,02E+07	2,22E+07
Warstwa gdzie wyst. inicjacja spękania	podbudowa	podbudowa	Wiążąca	wiążąca
Utrata trwałości [%]	0,00	38,83	62,41	97,19
Ugięcia [μ m]	229,70	310,10	297,80	541,90

Odpowiedzią na pytanie czemu tak jest może być zapis pochodzący z artykułu w Gleta [16], że „zasadnicza część wytrzymałości spoiny na ścinanie pochodzi z zazębienia się wzajemnego warstw, a mniejsza od siły klejącej”. Wobec tego powyższy model obliczeniowy nie jest adekwatny do rzeczywistości, gdyż model ten pomija zazębienie mechaniczne warstw, co powoduje, że naprężenia nie są przenoszone z warstwy górnej na dolną, co ma miejsce w rzeczywistości. Szacuje się, że ok. 70% powiązania warstw następuje poprzez zazębienie się i klinowanie ziaren kruszywa warstw dolnej i górnej, a pozostałe 30% pochodzi od sklejenia warstw asfaltem.

Rysunek 5.28 przedstawia zależność utraty trwałości nawierzchni w zależności od miejsca symulowania warstwy szepnej. Wynika z niego, że wprowadzenie tej warstwy zgodnie z wariantem II, tzn. między warstwą wiążącą a podbudową, powoduje utratę trwałości nawierzchni większą niż w przypadku wariantu I.

⁶ Uwaga: szare pola oznaczają warstwą szepną.



Rysunek 5.28. Utrata trwałości dla różnych wariantów wystąpienia warstwy szepnej

W przypadku nawierzchni KR6 z warstwą szepną większe znaczenie dla utraty trwałości zmęczeniowej posiada wariant II niż wariant I. Z rysunku 5.28 wynika, że największa utrata trwałości nawierzchni wystąpi, gdy w modelu wstawi się warstwę szepną na obu górnych stykach warstw (wariant IV).

Tablica 5.9 przedstawia wyniki obliczeń z modelowaniem warstwy szepnej w nawierzchni lżejszej (KR3). W wariantcie I widoczne są wysokie odkształcenia poziome w warstwie ścieralnej, rzędu 111,50 [μ strain]. Jednak pomimo tego degradacja nawierzchni rozpoczęłaby się od warstwy podbudowy.

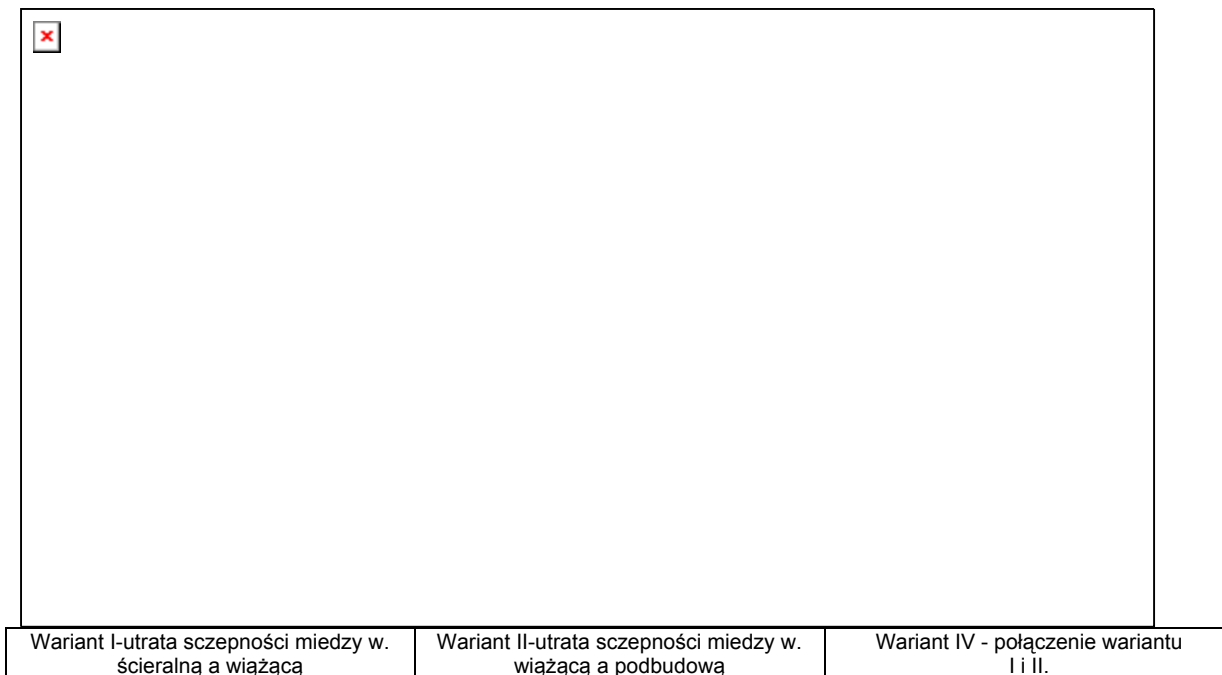
Po wprowadzeniu tej warstwy szepnej zwiększyły się znacząco odkształcenia poziome w niektórych warstwach wiążących lub ścieralnych. Przykładowo dla wariantu IV następuje wzrost odkształceń z wartości -35,29 [μ strain] do wartości 165,20 [μ strain]. Świadczy to także o zmianie charakteru pracy warstwy, zamiast ściskania, pojawia się rozciąganie. Tak znaczące zmiany budzą szereg wątpliwości co do poprawności przyjętej metody modelowania warstwy szepnej.

Tablica 5.9 .Wpływ miejsca wystąpienia warstwy szepnej na trwałość nawierzchni KR3⁷

Warstwa w nawierzchni Głębokość	100%	Warianty z warstwą szepną		
	W0	W1	W2	W4
Odkształcenia poziome na spodzie warstw [μ strain]				
Ścieralna BA z=0,05 [m]	-35,29	111,50	-16,28	165,20
Wiążąca BA z=0,111 [m]	24,56	3,44	146,30	146,90
Podbudowa BA z=0,181 [m]	101,40	123,70	84,40	118,00
Trwałość zm. dla poszczególnych warstw [osi 115 kN]				
Ścieralna BA z=0,05 [m]	–	1,58E+07	–	4,35E+06
Wiążąca BA z=0,111 [m]	4,44E+08	2,8572E+11	1,25E+06	1,23E+06
Podbudowa BA z=0,181 [m]	1,38E+06	7,30E+05	2,57E+06	8,53E+05
Warstwa gdzie wyst. inicjacja spękania	podbudowa	podbudowa	wiążąca	podbudowa
Utrata trwałości [%]	0,00	47,09	9,52	38,20
Ugięcia [μ m]	229,70	462,4	444	568,9

Jak wynika z rysunku 5.29 najważniejszym jest wariant I, podobnie jak w konstrukcji nawierzchni bez wykorzystania warstwy szepnej. Następuje tutaj największa utrata trwałości nawierzchni, nawet większa niż w przypadku wariantu IV, będącego sumą dwóch poprzednio opisanych. Inicjacja spękań nastąpi w przypadku wariantu II od spodu warstwy wiążącej. Ciekawe jest to, że utrata trwałości dla nawierzchni typu lekkiego jest relatywnie niska 9,52 % wartości początkowej, co znacznie odbiega od danych uzyskanych dla nawierzchni KR6.

⁷ Uwaga: szare pola oznaczają warstwę szepną.



Rysunek 5.29. Utrata trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych w zależności od miejsca wystąpienia warstwy szepnej KR3

W nawierzchni typu lekkiego wprowadzenie warstwy szepnej powoduje znaczne zmiany w odkształceniu poziomym w porównaniu do stanu przed jej zastosowaniem. Różnice te są większe niż w analogicznym przypadku dla nawierzchni KR6. Przyglądając się otrzymanym wynikom nasuwa się wniosek, że symulacja warstwy szepnej tą metodą ma przypomina modelowanie utraty szczepności.

Zasadność i poprawność modelowania warstwy szepnej tą metodą jest wątpliwa, ze względu na anomalie dotyczące znacznego obniżenia trwałości nawierzchni, a także osiągnięcie nietypowych wartości odkształceń poziomych.

5.4.3. Porównanie pracy konstrukcji nawierzchni z symulacją utraty szczepności i nawierzchni z warstwą szepną

W obu przypadkach nastąpi zmiana rozkładu naprężeń w poszczególnych warstwach, tam gdzie zamodelowano warstwę szepną lub wprowadzono przy pomocy współczynnika ALK brak powiązania w górnej warstwie pojawią się odkształcenia rozciągające. Powodują one zmniejszenie trwałości zmęczeniowej tej warstwy, jak i całej nawierzchni. Modelowanie skropienia międzywarstwowego w programie BISAR -3, nie daje realnych wyników, ze względu na znaczny spadek trwałości nawierzchni i sposób pracy nawierzchni. Badania laboratoryjne wskazują, że przeważnie prawidłowo wykonane skropienie międzywarstwowe wpływa poprawnie na jakość połączenia warstw, powodując wzrost sztywności ścinania na ich granicy.

Porównując wyniki obliczeń nawierzchni z utratą szczepności z wykorzystaniem współczynnika ALK z wynikami obliczeń dla warstwy szepnej można odnieść wrażenie, że warstwa ta w tym przypadku powoduje utratę szczepności. Świadczyć to może o tym, że zastosowany model jest wątpliwy i nieprzydatny w zastosowaniu.

5.5. Wpływ grubości warstwy ścieralnej na naprężenia rozciągające przy różnych stopniach połączenia warstw⁸

5.5.1. Modele obliczeniowe

Przy modelowaniu tego zagadnienia wartość obciążenia pionowego nie uległa zmianie, podobnie wartość modułu sztywności zachowało podłoże gruntowe.



Rysunek 5.30. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni z zmienną grubością ścieralnej: 5cm,4cm,3,5cm

Do analiz przyjęto konstrukcję nawierzchni typu ciężkiego KR6, zmianie ulegają tylko grubości warstw ścieralnych.

5.5.2. Grubość warstwy ścieralnej a trwałość nawierzchni, przy różnych wariantach wystąpienia braku szczepności

Przyjęto, że obliczenia zostaną wykonane przy 50% szczepności i jej całkowitym braku.

⁸ Wyniki obliczeń dla różnych grubości warstwy ścieralnej zebrane zostały w pliku Z5.pdf na załączonej płycie CD.

Tablica 5.10. Odkształcenia poziome i trwałość zmęczeniowa nawierzchni dla warstwy ścieralnej grubości 3,5 [cm]

Warstwa w nawierzchni Głębokość	100%	50% Szczepności				0% Szczepności			
	W0	W1	W2	W4	W7	W1	W2	W4	W7
Odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych									
Ścieralna z=0,035 [m]	-54,20	7,15	-43,23	34,19	35,53	52,52	-28,44	97,02	114,60
Wiążąca BA z=0,095 [m]	13,76	-2,08	108,30	101,60	105,80	-14,30	165,80	154,00	183,80
Podbudowa BA z=0,0,175 [m]	105,90	126,50	121,20	151,70	162,20	133,30	117,50	163,40	226,30
Trwałość zmęczeniowa dla poszczególnych warstw asfaltowych [osi 115 kN]									
Ścieralna z=0,035 [m]	-	1,34E+11	-	7,75E+08	6,83E+08	1,89E+08	-	2,50E+07	1,45E+07
Wiążąca BA z=0,095 [m]	2,99E+09	-	3,36E+06	4,14E+06	3,63E+06	-	8,27E+05	1,05E+06	5,89E+05
Podbudowa BA z=0,175 [m]	1,22E+06	6,78E+05	7,81E+05	3,73E+05	2,99E+05	5,71E+05	8,65E+05	2,92E+05	1,00E+05
Warstwa gdzie wyst. Inicjacja spękania	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	wiążąca	podbudowa	podbudowa
Utrata trwałości [%]	0	44	36	69	75	53	32	76	92

Tablica 5.11. Odkształcenia poziome i trwałość zmęczeniowa nawierzchni dla warstwy ścieralnej grubości 4 [cm]

Warstwa w nawierzchni Głębokość	100%	50% Szczepności				0% Szczepności			
	W0	W1	W2	W4	W7	W1	W2	W4	W7
Odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych									
Ścieralna z=0,04 [m]	-46,89	14,57	-33,98	44,42	46,10	58,50	-18,56	107,60	127,10
Wiążąca BA z=0,1 [m]	15,98	-1,03	107,50	101,00	105,00	-14,07	163,50	151,80	180,70
Podbudowa BA z=0,18 [m]	102,50	125,00	115,50	148,80	158,80	132,30	110,70	160,60	222,10
Trwałość zmęczeniowa dla poszczególnych warstw asfaltowych [osi 115 kN]									
Ścieralna z=0,04 [m]	-	1,28E+10	-	3,28E+08	2,90E+08	1,32E+08	-	1,78E+07	1,03E+07
Wiążąca BA z=0,1 [m]	1,82E+09	-	3,44E+06	4,23E+06	3,72E+06	-	8,66E+05	1,11E+06	6,23E+05
Podbudowa BA z=0,18 [m]	1,33E+06	6,93E+05	8,99E+05	3,91E+05	3,15E+05	5,75E+05	1,03E+06	3,04E+05	1,05E+05
Warstwa gdzie wyst. Inicjacja spęknięcia	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	wiążąca	podbudowa	podbudowa
Utrata trwałości [%]	0	48	32	71	76	57	35	77	92

Tablica 5.12. Odkształcenia poziome i trwałość zmęczeniowa nawierzchni dla warstwy ścieralnej grubości 5 [cm]

Warstwa w nawierzchni Głębokość	100%	50% Szczepności				0% Szczepności			
	W0	W1	W2	W4	W7	W1	W2	W4	W7
Odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych									
Ścieralna z=0,05 [m]	-34,44	28,00	-18,60	61,90	64,04	70,21	-2,23	126,20	148,40
Wiążąca BA z=0,11 [m]	19,49	0,86	104,80	98,39	102,10	-13,54	157,60	145,70	172,30
Podbudowa BA z=0,19 [m]	95,98	121,50	104,90	141,60	150,80	129,80	98,31	153,20	211,10
Trwałość zmęczeniowa dla poszczególnych warstw asfaltowych [osi 115 kN]									
Ścieralna z=0,05 [m]	-	1,50E+09	-	1,10E+08	9,83E+07	7,26E+07	-	1,05E+07	6,19E+06
Wiążąca BA z=0,11 [m]	9,49E+08	2,72E+13	3,74E+06	4,61E+06	4,08E+06	-	9,77E+05	1,27E+06	7,29E+05
Podbudowa BA z=0,19 [m]	1,68E+06	7,74E+05	1,26E+06	4,68E+05	3,80E+05	6,23E+05	1,55E+06	3,61E+05	1,26E+05
Warstwa gdzie wyst. Inicjacja spękania	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	wiążąca	podbudowa	podbudowa
Utrata trwałości [%]	0	54	25	72	77	63	42	79	93

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w tablicach 5.10, 5.11 i 5.12 bez względu na zastosowaną grubość warstwy ścieralnej, przy całkowitym braku szczepności między warstwą wiążącą a podbudową inicjacja spękania nastąpi w warstwie wiążącej. Utrata trwałości będzie większa dla nawierzchni z warstwą ścieralną grubości 5 [cm], np. 63 % w porównaniu do nawierzchni z warstwą ścieralną grubości 3,5 [cm], gdzie otrzymano utratę trwałości na poziomie 53 %.

5.5.3. Grubość warstwy ścieralnej a różne kryteria trwałości nawierzchni

Poniższe wyniki obliczeń przedstawiają sprawdzenie, które kryterium trwałości nawierzchni jest bardziej wrażliwe na grubość warstwy ścieralnej w różnych wariantach wstawienia braku szczepności.

Tablica 5.13. Wpływ grubości warstwy ścieralnej na ugięcie nawierzchni, przy różnych stopniach powiązania międzywarstwowego

Utrata szepności	Wariant wystąpienia szepności	Grubość warstwy ścieralnej		
		5 [cm]	4 [cm]	3,5 [cm]
		Wartość ugięcia [μm]		
100%	W0	3,38E+02	3,52E+02	3,59E+02
50%	W1	3,73E+02	3,81E+02	3,86E+02
	W2	3,96E+02	4,15E+02	4,24E+02
	W4	4,39E+02	4,50E+02	4,56E+02
	W7	4,47E+02	4,60E+02	4,65E+02
0%	W1	4,19E+02	4,21E+02	4,21E+02
	W2	4,75E+02	4,95E+02	5,04E+02
	W4	5,51E+02	5,59E+02	5,62E+02
	W7	6,50E+02	6,61E+02	6,66E+02



Wariant 0 – pełna szepność	Wariant I-utrata szepności między w. ścieralną a wiążącą	Wariant II-utrata szepności między w. wiążącą a podbudową
Wariant III -utrata szepności między w. podbudowy BA a podbudową z KŁSM	Wariant IV - połączenie wariantu I i II.	Wariant V – połączenie wariantu II i III.
Wariant VI – połączenie wariantu I i III.	Wariant VII - połączenie wariantu I,II i III.	

Rysunek 5.31. Zależność ugięcia od wariantu wystąpienia 50% szepności

Z powyższego wykresu odczytać można, że im cieńsza warstwa ścieralna, tym ugięcie większe, co jest spowodowane zmniejszaniem się wysokości całej konstrukcji nawierzchni. Zmiany te są niewielkie ze względu na niedużą różnicę między grubościami warstw ścieralnych.

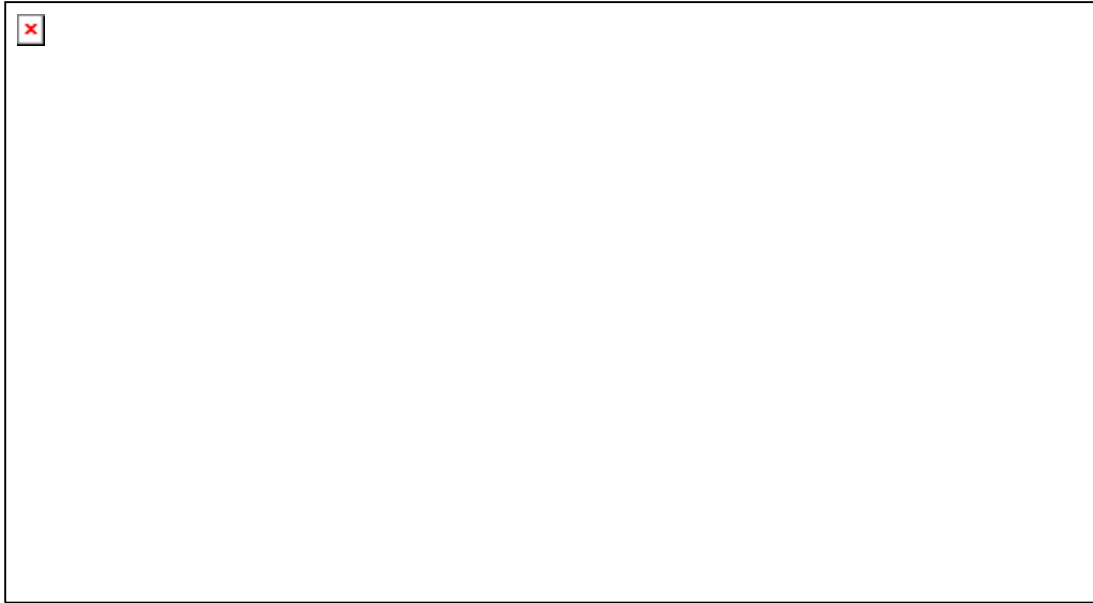
Tablica 5.14. Wpływ grubości warstwy ścieralnej na trwałość nawierzchni ze względu na deformacje trwałe, przy różnych stopniach powiązania międzywarstwowego

Utrata szepności	Wariant wystąpienia szepności	Grubość warstwy ścieralnej		
		5 [cm]	4 [cm]	3,5 [cm]
		Trwałość ze względu na deformacje trwałe [osi 115 kN]		
100%	W0	8,90E+06	7,49E+06	6,86E+06
50%	W1	6,29E+06	5,67E+06	5,39E+06
	W2	4,79E+06	4,02E+06	3,68E+06
	W4	3,44E+06	3,08E+06	2,93E+06
	W7	2,97E+06	2,65E+06	2,51E+06
0%	W1	3,76E+06	3,68E+06	3,65E+06
	W2	2,09E+06	1,80E+06	1,68E+06
	W4	1,25E+06	1,19E+06	1,17E+06
	W7	4,44E+05	4,13E+05	4,03E+05

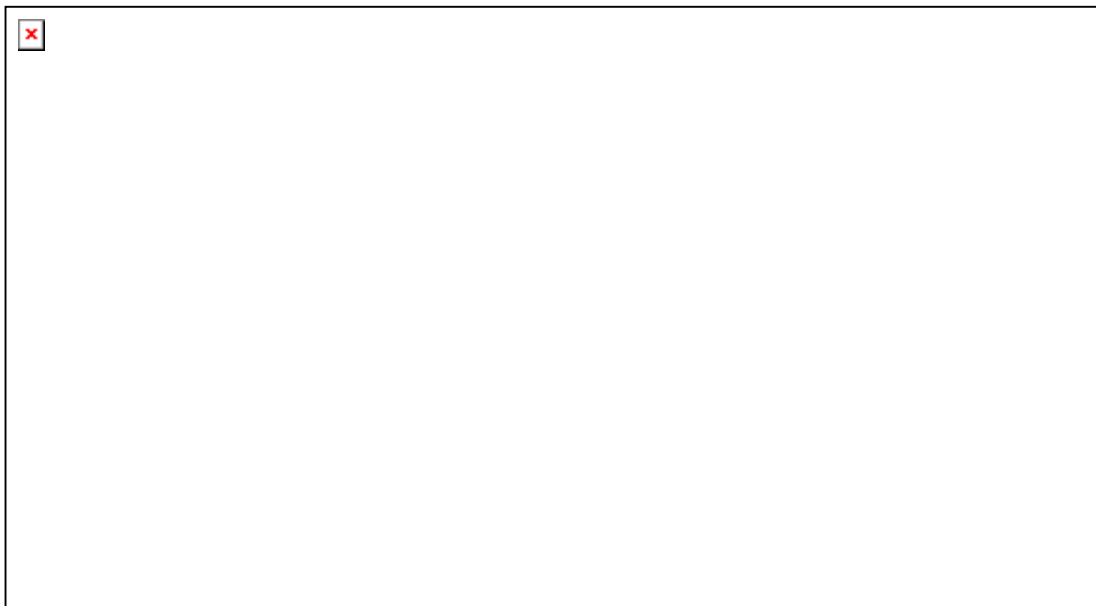


Rysunek 5.32. Zależność utraty trwałości (zmęczeniowej warstw asfaltowych i ze względu na deformacje trwałe) od grubości warstwy ścieralnej, dla wariantu VI

Tablica 5.14 i rysunek 5.32 ukazują, że wraz ze zmniejszeniem się grubości warstwy ścieralnej następuje spadek zarówno „utraty trwałości zmęczeniowej” warstw asfaltowych jak i „utraty trwałości” ze względu na deformacje trwałe.



Rysunek 5.33. Zależność utraty trwałości (zmęczeniowej warstw asfaltowych i ze względu na deformacje trwałe) od grubości warstwy ścieralnej, dla wariantu 1



Rysunek 5.34. Zależność utraty trwałości (zmęczeniowej warstw asfaltowych i ze względu na deformacje trwałe) od grubości warstwy ścieralnej, dla wariantu 2

Porównując rysunki 5.33 i 5.34 zauważyć można, że przy utracie szczepności międzywarstwowej stopień utraty trwałości nawierzchni zależy od grubości warstwy ścieralnej. Im jest ona cieńsza, tym utrata trwałości zmęczeniowej, jak i trwałości ze względu na deformacje trwałe jest mniejsza. Wskazane wyniki na rysunkach 5.32, 5.33 i 5.34, nie świadczą o tym, które kryteria trwałości nawierzchni są istotne, ponieważ w każdym analizowanym przypadku kryterium asfaltowe jest decydujące. Cieńsze warstwy ścieralne mają mniejszy wpływ na utratę trwałości nawierzchni, ponieważ przy braku związania cieńsza warstwa pracuje oddzielnie i gdy z przekrój zmniejszamy o wartość mniejszą tym sztywność będzie większa.

Tablica 5.15. Wpływ grubości warstwy ścieralnej na utratę trwałości zmęczeniowej nawierzchni przy różnych stopniach powiązania międzywarstwowego

Utrata szepności	Wariant wystąpienia szepności	Grubość warstwy ścieralnej		
		5 [cm]	4 [cm]	3,5 [cm]
		Utrata trwałości zmęczeniowej [%]		
100%	W0	0	0	0
50%	W1	54	48	44
	W2	25	32	36
	W4	72	71	69
	W7	77	76	75
0%	W1	63	57	53
	W2	42	35	32
	W4	79	77	76
	W7	93	92	92

Tablica 5.16 Wpływ grubości warstwy ścieralnej na utratę trwałości nawierzchni ze względu na deformacje trwałe, przy różnych stopniach powiązania międzywarstwowego

Utrata szepności	Wariant wystąpienia szepności	Grubość warstwy ścieralnej [cm]		
		5	4	3,5
		Utrata trwałości ze względu na deformacje trwałe [%]		
100%	W0	0	0	0
50%	W1	29	24	21
	W2	46	46	46
	W4	61	59	57
	W7	67	65	63
0%	W1	58	51	47
	W2	77	76	75
	W4	86	84	83
	W7	95	94	94

W tablicy 5.16 zauważyć można, iż w wariacie II przy 50% szepności grubość warstwy ścieralnej nie ma znaczenia na utratę trwałości ze względu na deformacje trwałe, co nie ma miejsca w przypadku trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych. W wariacie II występuje anomalia, gdyż tylko tam utrata trwałości dla nawierzchni z warstwą ścieralną 3 [cm] jest większa niż nawierzchni z warstwą 5 [cm].

5.6. Wpływ związania międzywarstwowego na ugięcia nawierzchni

Obliczenia wpływu szepności międzywarstwowego na ugięcia nawierzchni zostały wykonane dla dwóch wariantów szepności (wariant I i II), dla konstrukcji KR3 i KR6. Wyniki obliczeń i ich analizę zamieszczono w załączniku 4.

Rysunek 5.35 przedstawia przykładową czaszę ugięć otrzymaną w wyniku obliczeń wykonanych w programie BISAR. Widoczne są różnice w kształcie czasz ugięć w zależności od stopnia powiązania warstw.



Rysunek 5.35. Przykładowa czasza ugięć otrzymana w wyniku obliczeń

W tabelicy 5.17 przedstawiono porównanie wyników obliczeń wpływu szczepności międzywarstwowej na ugięcia konstrukcji nawierzchni KR3 i KR6.

Tablica 5.17. Porównanie ugięć nawierzchni KR3 i KR6 przy różnych wariantach wystąpienia braku szczepności

L.p.	Wariant wystąpienia braku szczepności	Wzrost ugięcia [%]	
		KR3	KR6
1	I	25	16
2	II	39	42
3	III	13	9
4	IV	64	52
5	V	57	58
6	VI	46	27
7	VII	93	71

Wariant 0 – pełna szczepność	Wariant I-utrata szczepności między w. ścierną a wiążącą	Wariant II-utrata szczepności między w. wiążącą a podbudową
Wariant III -utrata szczepności między w. podbudowy BA a podbudową z KŁSM	Wariant IV - połączenie wariantu I i II.	Wariant V – połączenie wariantu II i III.
Wariant VI – połączenie wariantu I i III.	Wariant VII - połączenie wariantu I,II i III.	

Na podstawie tablicy 5.17 można stwierdzić, przyjmując za kryterium różnice wzrostu ugięcia między jedną a drugą nawierzchnią, że w przypadku wariantów II, III i V obie konstrukcje „pracują” podobnie. W wspomnianych wariantach różnica wzrostów ugięć nie przekracza 5, co świadczy o tym, że gdy w tych konstrukcjach nastąpi utrata szczepności według opisanych wcześniej wariantów to procentowy wzrost ugięcia będzie jednakowy. Świadczy to o tym, że wielkość wzrostu ugięcia szczególnie dla przypadku V nie zależy od grubości nawierzchni, lecz od miejsca jego wystąpienia. Oczywiście jest fakt, że w przypadku nawierzchni dla ruchu KR3 procentowy wzrost będzie większy niż dla KR6, jednak wariant V jest przykładem sytuacji odmiennej.

6. Wnioski z przeprowadzonych prac w roku 2005 i 2006

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można przedstawić następujące wnioski:

1. Szczepność między warstwami asfaltowymi ma zasadniczy wpływ na stan naprężeń i odkształceń w konstrukcji nawierzchni drogowej.
2. Wadliwe połączenie międzywarstwowe powodują obniżenie sztywności całego pakietu warstw asfaltowych, zwiększając ugięcia konstrukcji, które generują zwiększone poziome odkształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych, zmniejszając tym samym trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni.
3. Szczepność międzywarstwowa zależna jest od wielu czynników, z których istotnie decydujące są: rodzaj emulsji zastosowany do sprysku międzywarstwowego i skuteczność zagęszczenia warstw stykających się ze sobą (szczepianych).
4. Emulsje asfaltowe do sprysku międzywarstwowego wyprodukowane na bazie twardych asfaltów to znaczy asfaltów o penetracji mniejszej niż 70 j.pen. i asfaltów modyfikowanych charakteryzują się najlepszą wytrzymałością ścinania.
5. Efektywne zagęszczenie warstw asfaltowych stykających się ze sobą gwarantuje lepszą szczepność międzywarstwową.
6. Skuteczną metodą określenia jakości połączenia międzywarstwowego w konstrukcji nawierzchni jest badanie bezpośredniego ścinania wg metody Leutnera dla próbek wyciętych z nawierzchni, czy przygotowanych w laboratorium.
7. Należy wprowadzić do specyfikacji technicznych zapisy odnośnie reżimów technologicznych i odbioru wykonanych warstw szczepnych jeszcze przed wbudowaniem warstwy wyżej leżącej. Oceniać jednorodność i ilość sprysku.
8. Wpływ powiązania międzywarstwowego na stan naprężeń i odkształceń konstrukcji nawierzchni można określać przy pomocy programu BISAR. Można w nim jednoznacznie modelować szczepność międzywarstwową poprzez parametryczne określenie braku szczepności (poślizg warstw) i całkowitej szczepności. Modelowanie pośredniej szczepności, która najczęściej odpowiada warunkom rzeczywistym, panującym w konstrukcji nawierzchni wydaje się jeszcze nie do końca rozwiązana w programie BISAR.
9. Analizy obliczeniowe wykazały, że duży wpływ na utratę trwałości nawierzchni ma miejsce wystąpienia braku szczepności. W nawierzchni KR6 istotnym miejscem jest połączenie warstwy wiążącej i podbudowy, natomiast w przypadku nawierzchni KR3 miejscem tym jest styk warstw ścieralnej i wiążącej.
10. Z powodu braku szczepności pojawienie się odkształceń rozciągających w warstwie ścieralnej, nawet o bardzo dużych wartościach zmniejsza jej trwałość zmęczeniową. Stosunkowo duża zawartość asfaltu rzędu 5-6%, a także stosunkowo mała zawartość wolnych przestrzeni sprawia, że trwałość zmęczeniowa warstwy ścieralnej jest stosunkowo duża. Tym niemniej warstwa ścieralna niepołączona z warstwą wiążącą jest bardziej narażona na zniszczenie od większych naprężeń od ruchu, a także naprężeń termicznych.

11. Istotne jest zachowanie dobrego związania warstwy ścieralnej z wiążącą, gdyż na głębokości 4÷5 [cm] występuje maksymalne naprężenie ścinające, zwłaszcza w miejscach działania dużych sił stycznych, które wpłyną na rozerwanie warstwy ścieralnej.
12. Brak powiązania międzywarstwowego przyczynia się do obniżenia nośności nawierzchni, czego charakterystycznym wskaźnikiem jest ugięcie nawierzchni. Wzrost ugięcia nawierzchni przy spadku stopnia powiązania warstw spowodowany jest m.in. przez obniżenie sztywności całego pakietu warstw nawierzchni.
13. Obliczenia teoretyczne ugięć konstrukcji zostały potwierdzone w zachowaniu się odcinka doświadczalnego, gdzie wymuszano brak szczepności międzywarstwowej, a następnie mierzono ugięcia konstrukcji ugięciomierzem dynamicznym FWD.
14. Nieuwzględnienie wadliwego połączenia międzywarstwowego przy obliczeniach odwrotnych (modułów sprężystości warstw konstrukcji nawierzchni na podstawie czaszy ugięć) skutkuje późniejszym niedowymiarowaniem konstrukcji, czyli zaniżeniem trwałości zmęczeniowej.
15. Potrzebne są dalsze badania i analizy dla wyznaczenia rzeczywistych parametrów charakteryzujących szczepność międzywarstwową w konstrukcji nawierzchni. Pomocne w tej kwestii mogą być zaawansowane programy, wykorzystujące metodę elementów skończonych MES, w których wieloparametrowo można symulować szczepność międzywarstwową.
16. Zaproponowano badanie Leutnera jako metodę oceny szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych w konstrukcji nawierzchni.
17. Kryteria szczepności międzywarstwowej do badania Leutnera wymagają jeszcze dodatkowych badań i analiz.

7. Zalecenia do wprowadzenia w Polsce

Sprawą konieczną jest określenie niezbędnych wymagań dla nawierzchni budowanych w naszym kraju oraz ich kontrola poprzez zapisy w specyfikacjach technicznych. Choć powszechnie stosuje się sprysk międzywarstwowy konieczna jest weryfikacja sposobu jego wykonania. Na podstawie przedstawionych w niniejszej pracy danych widać, że stosowanie używanych w Polsce emulsji na bazie miękkich asfaltów mija się z celem. Tak wykonany sprysk nie tylko nie polepsza wiązania między warstwami, ale zdają się działać w sposób przeciwny do zamierzonego. Podobne konstrukcje wykonane bez sprysku osiągają większe wytrzymałości warstw szepnych. Wobec czego konieczna jest weryfikacja przyjętej praktyki i przyjęcie do sprysku emulsji z twardymi asfaltami bazowymi. Niezbędnym jest też wprowadzenie odpowiednich procedur kontroli powykonawczej warstw szepnych w nawierzchniach budowanych w Polsce, jak i zaleceń przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni.

7.1. Instrukcje kontroli warstwy szepnej

Poniżej proponuje się wprowadzenie 2 instrukcji do przepisów ogólnokrajowych odnośnie: badania szczepności międzywarstwowej oraz kontroli ilości sprysku międzywarstwowego.

Instrukcja badania szczepności międzywarstwowej opracowana na podstawie instrukcji niemieckiej „ALP A-StB, Teil 4, Prufung des Schichtenverbundes nach Leutner, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrsweesen, Ausgabe 1999” z niewielkimi zmianami. Instrukcję badania szczepności wg Leutnera zamieszczono w Załączniku 1.

Instrukcja kontroli ilości i jakości sprysku międzywarstwowego powstała na podstawie normy amerykańskiej „ASTM D2995 Standard Practice for Estimating Application Rate of Bituminous Distributors, ASTM International, July 1999”. Instrukcję kontroli ilości i jakości sprysku międzywarstwowego zamieszczono w Załączniku 2.

7.2. Zalecenia do projektowania konstrukcji nawierzchni metodami mechanistycznymi

Nie wprowadza się żadnych zaleceń dotyczących projektowania nowych konstrukcji nawierzchni metodami mechanistycznymi, poza utrzymaniem zasady obliczania odkształceń i naprężeń przy pełnej szczepności międzywarstwowej w konstrukcji nawierzchni.

Dodatkowe zalecenia dotyczące szczepności międzywarstwowej wprowadza się do:

- projektowania wzmocnień istniejących nawierzchni i,
- diagnostyki nawierzchni – badania nośności nawierzchni metodą ugięć dynamicznych FWD.

Zaleca się kontrolę szczepności międzywarstwowej inwentaryzowanej i poddawanej badaniom diagnostycznym (nośność przy zastosowaniu aparatu FWD) konstrukcji nawierzchni. Zaleca się wykonywać obliczenia odkształceń i naprężeń w konstrukcji nawierzchni ze szczepnością lub z ograniczoną szczepnością międzywarstwową.

Literatura

- [1] Judycki J., Jaskuła P., Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej, Raport z I etapu badań, Gdańsk 2005
- [2] West R.C.; Zhang J.; Moore J.; Evaluation of bond strength between pavement layers, NCAT Report 05-08, Auburn University, Alabama, December 2005.
- [3] Tech Notes 34; Tack coat, Baystate roads program, Local technical Assistance Program (LTAP) 2004.
- [4] ASTM D 2995, Standard Practice for Estimating Application Rate of Bituminous Distributors, ASTM International, July 1999.
- [5] Instrukcja dotycząca wiązania warstw, spoin, połączeń i kształtowania asfaltowych poboczy powierzchni komunikacyjnych M SNAR, materiały instytutu niemieckiego, 1998.
- [6] Wskazówki robocze do badań asfaltu ALP A-StB cz. 4 „Badanie powiązania warstw według LEUTNER'A”, materiały instytutu niemieckiego 1999.
- [7] Pös J., Kruntcheva M., Collop A., Thom N., Powiązanie asfaltowych warstw nawierzchni: badania, wpływy, ocena- rozważania porównawcze Niemcy-Wielka Brytania, opracowanie Mikulski J., Nowości w Zagranicznej Technice drogowej, 154/2003, str. 5-30.
- [8] Buchanan M.S., Woods M.E., Field Tack Coat Evaluator, Mississippi Transportation Research Center, December 15, 2004.
- [9] Błazejewski K., Styk S., Technologia warstw asfaltowych, Poradnik, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2004.
- [10] Górszczyk J., Zieliński P., Modelowanie konstrukcji nawierzchni asfaltowej zbrojonej geosyntetyczną warstwą pośrednią przy zastosowaniu MES, Politechnika Krakowska, Konferencje w Kielcach 2004, str.271-277.
- [11] Grzybowska W., Górszczyk J., Zieliński P., Wpływ związania międzywarstwowego na propagację pęknięć odbitych w konstrukcji nawierzchni bitumicznej, Politechnika Krakowska, Konferencje w Kielcach 2003, str.299-305.
- [12] Hakim B.A., Cheung M.W., Armitage R.J., Use of FWD Data for Prediction of Bonding Between Pavement Layeres, International Journal of Pavement Engineering, 2000, Vol.1(1), str. 49-59.
- [13] Judycki J., Szczepność między warstwami asfaltowymi nawierzchni, Drogownictwo, Wrzesień 2003 r., str.275-279.
- [14] Kukielka J., Szydło A., Projektowanie i budowa dróg. Zagadnienia wybrane, WKiŁ, Inżynieria komunikacyjna, Warszawa 1986r.
- [15] Romanoschi S.A., Metcalf J.B., The characterization of pavement layers interfaces, Copenhagen 2002, Kansas State University, Louisiana State University.
- [16] Glet W., Układ i związanie warstw w konstrukcjach nawierzchni asfaltowych, opracowanie Wałęcka H.K., Nowości w Zagranicznej Technice drogowej, nr 140/2000str.37-53.
- [17] Bielewicz E., Wytrzymałość materiałów, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1998r.
- [18] BISAR 3.0 User Manual, Instrukcja obsługi programu komputerowego, Bitumen Business Group, maj 1998.

- [19] Stöckert U., Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund In Asphaltstraßenban. Elektornische Publikationen Darmstadt, 2002.
- [20] Raab C., Partl M.N., Shear strength properties between asphalt pavement layers, Archives of Civil Engineering, 3/1998, str.353-365.
- [21] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, IBDiM, Warszawa, 1997.
- [22] Szczepaniak Z., Wpływ emulsji asfaltowej na połączenie warstw asfaltowych nawierzchni, Konferencje w Kielcach 2004 r., str.187-195.
- [23] Hakim B.A., The importance of good bond between bituminous layers, Scott Wilson Pavement Engineering, United Kingdom

Załącznik 1.

Instrukcja badania szczepności międzywarstwowej próbek pobranych z budowy

1. Wiadomości ogólne

Do ilościowego ustalenia powiązania warstw służy bezpośrednie badanie na ścinania, przeprowadzone na rdzeniach odwiertu o średnicy 150 mm, przy którym siła ścinająca jest obliczana w zależności od przemieszczenia w płaszczyźnie ścinania (granica warstwy). Pobór próbki poprzez odwiert powinien w miarę możliwości tylko w minimalnym stopniu wpływać na powiązanie pomiędzy poszczególnymi warstwami.

Maksymalna siła ścinająca oznacza stan ścięcia, przy czym powiązanie pomiędzy obydwoma warstwami ulega uszkodzeniu. Grubość ścinanej warstwy ze względu na warunki techniczno – badawcze musi wynosić, co najmniej 25 mm. Maksymalna siła ścinająca i związane z nią przemieszczenie ścinania są uzależnione od wielkości wpływających na zazębienie (tekstura górnej powierzchni, głębokość zagłębień, wymiar maksymalnego ziarna, wielkość wolnych przestrzeni, stopień zagęszczenia, stan górnej powierzchni podbudowy), oraz siły powiązania (sklejenia) (adhezja, kohezja, objętość zaprawy, rodzaj i ilość środków wstępnego spryskania, stan górnej powierzchni podbudowy). Istotne znaczenie posiadają nie tylko właściwości warstw biorących udział w powiązaniu, ale także warunki brzegowe występujące na powierzchniach granicznych. Przy wiązaniu warstw chodzi nie o specyficzne właściwości materiału, ale o kompleksową cechę, która określona jest przez liczne współdziałające czynniki. 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**

Przy badaniu bezpośredniego ścinania chodzi o 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 ustala się przy bezpośrednim badaniu na ścinanie, występująca w płaszczyźnie ścinania (granica warstwy).

2.3. **Przemieszczenie ścinania**

Przemieszczenie ścinania S jest to mierzone w kierunku obciążenia i korygowane przesunięcie szczęk ścinających przy osiągnięciu siły ścinającej F_{max} .

2.4. Płaszczyzna ścinania

Płaszczyzna ścinania jest to płaszczyzna dzieląca, w której przeprowadzane jest bezpośrednie badanie na ścinanie. Powinna ona być tożsama z powierzchnią graniczną pomiędzy dwiema sąsiednimi warstwami rdzenia wiertniczego.

3. Pobieranie próbek

3.1. Zasady pobierania próbek

Rdzenie wiertnicze do badań powiązania warstwowego należy pobrać w ramach badania kontrolnego, możliwie przed oddaniem drogi do ruchu.

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

Dla uzyskania identyfikacji bez zarzutów (błędów) co do położenia i pozycji na rdzeniu wiertniczym należy przed przystąpieniem do odwiertu nanieść niezbędne oznakowania (np. strzałki w kierunku ruchu).

3.2. Przyrząd do odwiertu rdzenia

Przyrządy do odwiertu rdzeni muszą posiadać stabilne, jak również odporne na skręcanie urządzenie do zapuszczania i przesuwania z precyzyjnym mechanizmem prowadzącym rdzenie wiertnicze. Ciężar własny przyrządu musi być na tyle duży, aby podczas przebiegu odwiercania mógł służyć jako opora, a tym samym wykluczać wibracje, przemieszczenia lub przesunięcia.

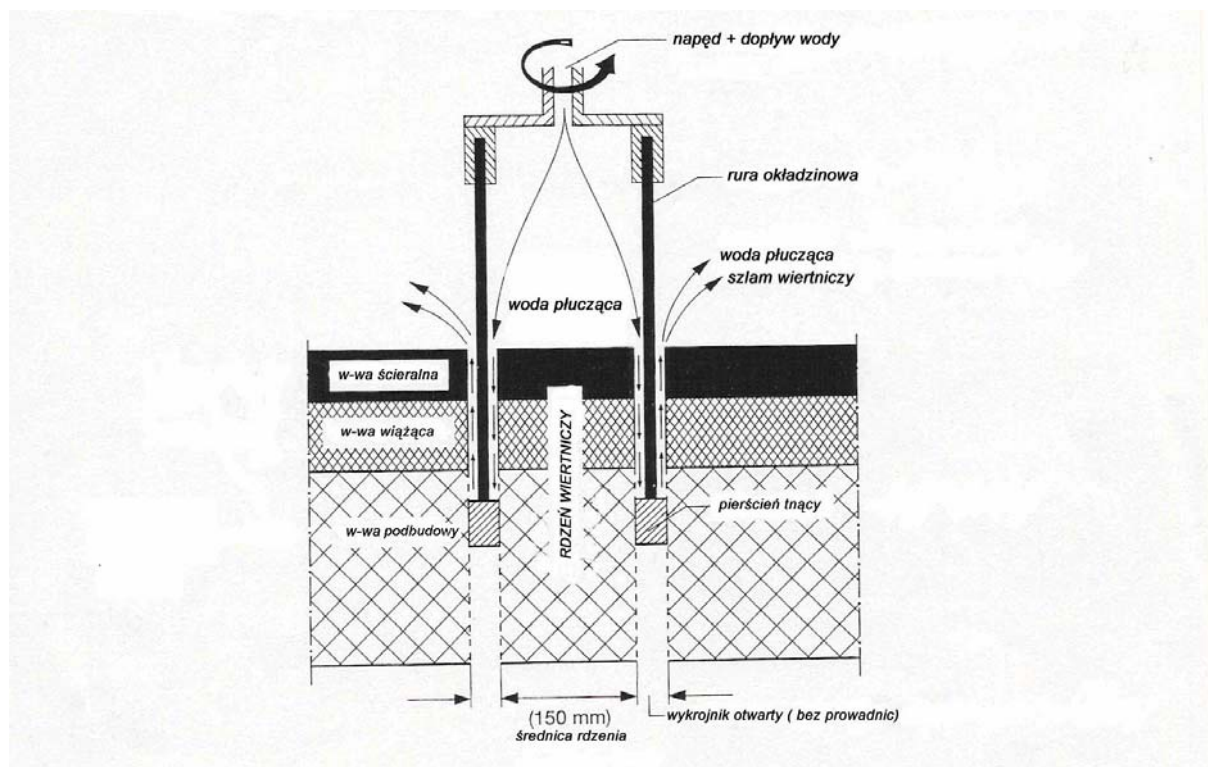
Dla wyjmowania rdzenia odwiertu należy odpowiednio dobrać i uzgodnić liczbę obrotów silnika, ilość dodawanej wody oraz prędkość przesuwu wgłąb tak, aby było zapewnione prawidłowe cięcie rdzenia odwiertu.

3.3 Koronka wiertnicza

Koronka wiertnicza (o średnicy 150 mm) składa się z pierścienia tnącego ze specjalnej stali, wyposażonego w diamenty oraz kanały do prowadzenia wody płuczącej, jak również rurę okładzinową, której długość musi być dobrana odpowiednio do głębokości przewidywanej głębokości odwiertu.

3.4. Wiadomości podstawowe o przebiegu procesu odwiertu

Rys. 1 zawiera ideowy szkic dla przedstawienia przebiegu odwiertu.



Rys. 1: Ideowy szkic dla opisu przebiegu odwiertu

Średnica rdzenia odwiertu określona jest przez wewnętrzną średnicę pierścienia tnącego. Stosowane do badań powiązania warstw średnice rdzenia wiertniczego wymagają koronki wiertniczej - nowoczesnym wykonaniu, o wewnętrznej średnicy 150mm. Na skutek zużycia powiększa się automatycznie wewnętrzna średnica pierścienia tnącego i odpowiednio do stopnia zużycia uzyskuje się większe średnice rdzenia wiertniczego. Równocześnie zmniejsza się przy tym tzw. otwarty wykrojnik. Od określonego stanu zużycia wykrojnik otwarty staje się tak mały, że utrudniony jest odpływ wody płuczającej, a tym samym proces odwiertu musi być przerwany, ponieważ swobodne płukanie rdzenia odwiertu oraz transport szlamu wiertniczego jest utrudniony.

W przypadku, gdy ziarna lub elementy rdzenia ulegną zaklinowaniu należy je wyjąć po zdemontowaniu koronki rdzeniowej. Rdzenie te nie mogą być już wykorzystywane do badania stopnia powiązania warstw.

Wielokrotnie zaobserwowane uderzenie i pukanie w wysoko uniesioną koronkę rdzeniową w pojedynczych przypadkach oszczędza demontaż koronki rdzeniowej, jednakże zbyt silne uderzenia (np. przy użyciu stalowego młotka) prowadzą do miejscowego zmniejszenia wewnętrznej średnicy rury płaszczowej tak, że możliwe staje się zaklinowanie rdzenia wiertniczego w koronce rdzeniowej.

Koronkę wiertniczą należy wymienić, gdy występują następujące efekty:

- zaklinowanie materiału ściernalnego, odłamane elementy oraz kruszywa odwiertu pomiędzy rurą płaszczową a powierzchnią płaszczową rdzenia

- odwiertu z silnym wzrostem tarcia. Rdzeń odwiertu poddany jest bardzo silnym, niepożądanym momentom skręcającym;
- nierówne powierzchnie płaszcza rdzenia odwiertu;
 - problemy przy wyjmowaniu rdzenia odwiertu przy pomocy kleszczy chwytnych rdzenia na skutek zbyt wąskiego wcięcia rdzenia odwiertu.

3.5. Wyjmowanie i znakowanie rdzenia odwiertu

Po zakończeniu czynności wiertniczych należy wyjąć rdzeń odwiertu przy pomocy kleszczy chwytnych rdzenia. Szczęki kleszczy muszą obejmować rdzeń możliwie głęboko, przylegając w pełni ze wszystkich stron, ale tak, aby nie wystąpiły żadne zmiany strukturalne w warstwach asfaltowych i pokładach asfaltowych. Delikatne wyżłobienia w szczękach kleszczy, podnoszą ich przyczepność przy obejmowaniu rdzeni odwiertów.

Odłamywanie rdzenia nie odwierconego na całej głębokości (wycinanie przy użyciu śrubokręta lub podobnego narzędzia) jest niedopuszczalne.

W przypadku, gdy przy wyjmowaniu brak już jest powiązania, a tym samym poszczególne warstwy i pokłady muszą być wyjmowane oddzielnie należy fakt ten zaznaczyć w protokole wyjmowania z podaniem poszczególnych warstw oraz ich kolejność i położenie.

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

3.6. Transport i składowanie (przechowywanie) rdzeni wiertniczych

Po wyjęciu rdzenie odwiertów powinny być chronione przed wysoką temperaturą i przetransportowane niezwłocznie do laboratorium.

Podczas transportu należy starannie unikać dodatkowych uszkodzeń, zgnieceń, odłamków i podobnych szkód.

Zasadniczo rdzenie wiertnicze należy transportować w pozycji leżącej, zabezpieczone przed przewracaniem i uderzeniami.

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

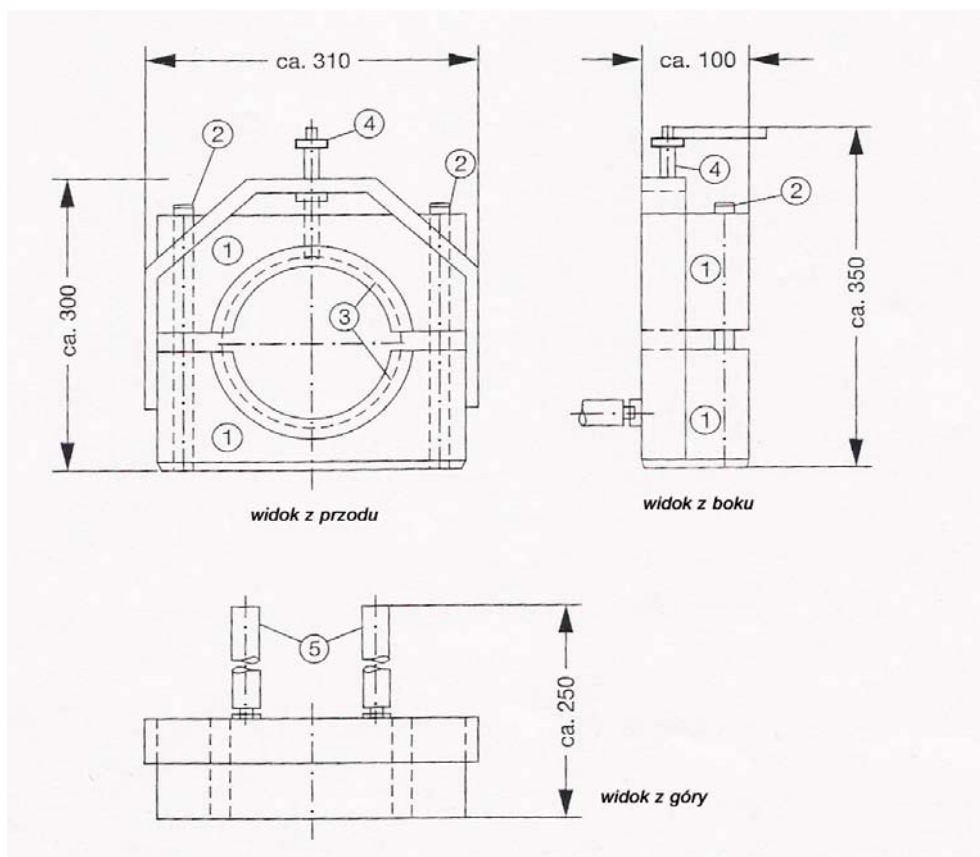
3.7. Ilość próbek

Z każdego miejsca odwiertu należy pobrać dwa rdzenie wiertnicze.

4. Wykonanie badania

4.1. Sprzęt i środki badawcze

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



Rys. 2: Przyrząd do prób ścinania wg. Leutnera (wymiar w mm)

Przyrząd ścinający, przedstawiony jest z podstawowymi wymiarami na rys. 2. Dwuczęściowa masywna ramownica (1) wykonana jest z aluminium. Obie części są to idealne równoległe w kulowych tulejach prowadzone na dwóch utwardzonych precyzyjnych prowadnicach (2) półkoliste szczęki tnące (3), które leżą na tym samym poziomie co i płaszczyzna ścinania. Do szczęk wpuszczone są stalowe, utwardzone wstawki szczęk tnących, które są wymienne dla rdzeni odwiertowych o średnicy od 148mm do 152mm. Przeznaczony do badania rdzeń odwiertu ryglowany jest zaciskiem (4), przez szczękę zaciskową z wpuszczonym filcowym paskiem. Na odwrotnej stronie urządzenia ścinającego umieszczone jest

oparcie (5) dla długich rdzeni odwiertu. To dodatkowe prowadzenie następuje poprzez dwa pręty nakładkowe, które za pomocą mimośrodowo można dopasować do różnych średnic rdzeni odwiertów.

- maszyna wytrzymałościowa do prób na ściskanie, która odpowiada wymaganiom co najmniej klasy 3. Musi ona być wyposażona w urządzenie do samoczynnej regulacji prędkości posuwu (pod obciążeniem) od 50 mm/min \pm 3 mm/min.

Górna płyta naciskowa maszyny zastąpiona jest przez przyrząd ścianający (patrz rys 2).

Szerokość w świetle pomiędzy słupami maszyny wytrzymałościowej do prób na ściskanie musi wynosić minimum 320 mm, szerokość w świetle wysokości pomiędzy warstwą oraz poprzecznym przęsem powinna wynosić minimum 350mm.

- urządzenie piszące dla wykresu siła – przemieszczenie,
- regulowana kąpiel powietrzna względnie komora klimatyzacyjna do regulacji temperatury badanego rdzenia na $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,
- termometr.

4.2. Próbki

4.2.1. Kształt próbek

Jako próbki służą rdzenie odwiertu o średnicy od 150 mm \pm 2 mm.

4.2.2. Ilość próbek

Badać należy minimum dwa rdzenie z jednego miejsca pobrania.

4.3. Właściwości zewnętrzne

Poszczególne warstwy rdzenia ze względu na niejednorodność (uszkodzenia przez rozpad, zwietrzałe lub pozbawione zaprawy elementy materiałowe, niedostateczne zagęszczenie, powstawanie rys, wyłamania ziaren i zanieczyszczeń) oceniać wizualnie.

Należy określić średnice rdzenia odwiertu i stwierdzić równomierność średnicy na całej długości rdzenia (wałki, rowki).

4.4. Podstawowe wymagania w odniesieniu do próbek

4.4.1. Grubość warstw

Przyrząd ścinający wg Leutnera wymaga minimalnej grubości warstw od 25 mm dla warstwy odcinanej, warstwy leżące poniżej muszą łącznie wykazywać długość minimum 70 mm, przez co możliwe jest silne (pewne) umocowanie rdzenia w aparacie ścinającym.

Dokładne oznakowanie granic warstw oraz ustalenie ich grubości należy przeprowadzić przed rozpoczęciem badań.

4.4.2. Ortogonalność granicy warstwy w stosunku do powierzchni pobocznic próbki

Badanie na ścinanie winno być przeprowadzone tylko (włącznie) w granicach warstw, które przebiegają ortogonalnie w stosunku do powierzchni pobocznic próbki. Przy położeniach skośnych do 5 mm należy występujący skos określić przy wkładaniu rdzenia do urządzenia ścinającego. Granice warstw ze skosem przekraczającym 5 mm należy wyłączyć z procesu badania.

4.5. Przeprowadzanie badania

4.5.1. Przygotowanie próbek w laboratorium

Po wykonaniu podanych w rozdziałach 4.2 do 4.4 kroków roboczych wyrównujemy temperaturę rdzenia odwiertu do $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ w kąpeli powietrznej minimum przez 12 godzin (suszarka); przy tym zabiegu rdzenie wiertnicze w pozycji leżącej, nie dotykając się wzajemnie muszą być przechowywane aż wszystkie próbki wykazywać będą jednakową temperaturę.

4.5.2 Przygotowanie przyrządu ścinającego

Przyrząd ścinający wraz ze wstawkami ścinającymi oraz rdzeniem o ustalonej zgodnie z rozdziałem 4.3 średnicą zostaje wbudowany do prasy badawczej. Aby uniknąć częstej wymiany wkładów celowym jest, aby już podczas przygotowywania rdzeni dokonać segregacji tychże na grupy o tych samych średnicach rdzeni.

4.5.3. Badanie

Wyjęty z kąpeli powietrznej rdzeń wkładamy do przyrządu ścinającego.

Poprzez wizualną kontrolę należy zbadać czy wkłady ścinające zostały dobrane prawidłowo, a rdzeń odwiertu przylega całym obwodem do formy ścinającej.

Przez obracanie rdzenia w kierunku radialnym, względnie przez przesuw w kierunku osiowym, przy stałej kontroli wizualnej należy możliwie optymalnie dopasować płaszczyznę ścinania do granicy warstwy.

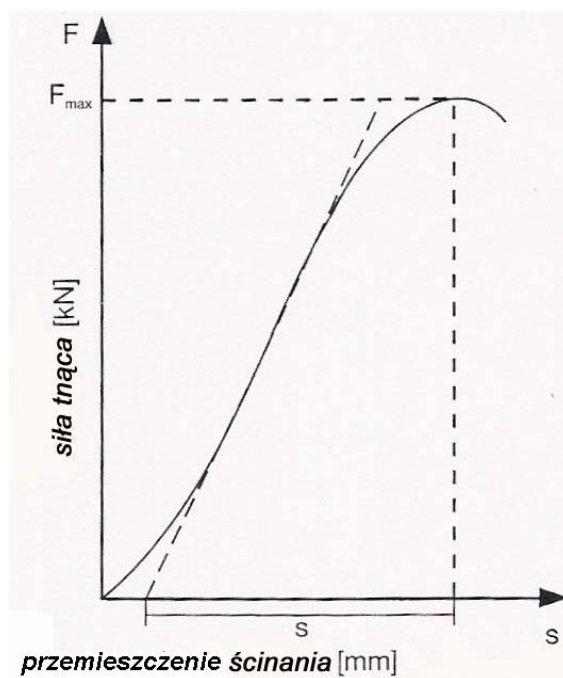
Przez silne dokręcenie śruby radełkowanej na zacisku rdzeń odwiertu zostaje zablokowany do bezpośredniego badania na ścinanie.

Proces ścinania następuje z prędkością postępową $50 \text{ mm/min} \pm 3 \text{ mm/min}$ aż powyżej maksymalnej siły, względnie do osiągnięcia, podyktowanej konstrukcyjnymi względami maksymalnego przemieszczenia ścinania równego 8 mm. Podczas badania należy wykreślić diagram siła – przemieszczenie.

Dalsze wyrównywanie temperatury rdzenia podczas przebiegu procesu ścinania (przy pokojowej temperaturze) nie jest potrzebne, jeżeli okres czasu od wyjęcia z komory cieplnej do zakończenia procesu ścinania nie przekracza 10 minut. Jeżeli na jednym rdzeniu procesowi ścinania mają być podane liczne warstwy, względnie pokłady 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. Wykorzystanie badania

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



Rys. 3: Podstawowy wykres przebiegu siły tnącej w zależności od drogi ścinania przy bezpośrednim badaniu ścinania

4.7. Przetawienie wyników

Jako wynik badania należy dla każdego przeprowadzonego tekstu (badania) podać maksymalną siłę tnącą F_{max} oraz przemieszczenie ścinania S .

W oparciu o niniejsze wskazówki robocze należy podawać poszczególne wartości:

- siłę tnącą (ścinającą) w zaokrągleniu do 0,1 kN,
- przemieszczenie ścinania w zaokrągleniu do 0,1 mm.

Załącznik 2.

Kontrola aplikacji warstwy szepnej na budowie

1. Wiadomości ogólne

Kontrola aplikacji warstwy szepnej umożliwia oszacowanie rzeczywistej wielkości sprysku zarówno w kierunku poprzecznym wbudowywanej nawierzchni, jak i w kierunku podłużnym (wyznaczonym przez poruszającą się cysternę).

Kontrola pozwala na stwierdzenie sprawności urządzeń rozpylających. Odpowiednie środki zaradcze mogą być podjęte natychmiast gwarantując właściwe wykonanie warstwy szepnej na pozostałych odcinkach.

2. Przyrządy

Przyrządy: waga z dokładnością do 0,1 g; podkładki z geowłókniny o wymiarach 304,8 na 304,8 mm; mocna taśma klejąca; papier pakowy.

3. Wykonanie kontroli w kierunku poprzecznym

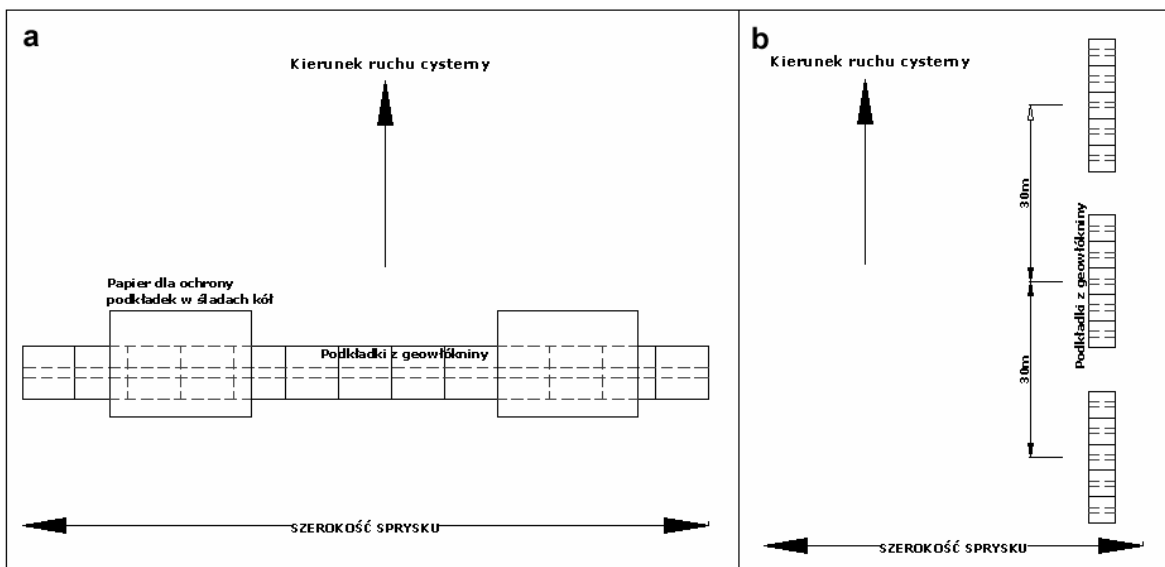
W tym celu potrzeba wykonać tyle podkładek z geowłókniny, aby ułożone w rzędzie obok siebie zajęły całą szerokość jezdni przeznaczoną do sprysku. Płaty geowłókniny przyklejamy do powierzchni warstwy przy pomocy odpowiednio złożonej taśmy klejącej tak, aby wierzchnia warstwa była bezwzględnie czysta. Przed umiejscowieniem podkładek należy zważyć każdą z nich osobno z dokładnością do 0,1 g. Odcinki geowłókniny, na których spodziewany jest przejazd kół cysterny powinny zostać zakryte arkuszami papieru pakowego w celach ochronnych. Papier powinien przywrzeć do kół cysterny w trakcie przejazdu umożliwiając sprysk geowłókniny także w tym miejscu. Po wykonaniu sprysku należy usunąć podkładki, zważyć każdą z nich (dokładność jak wyżej) i zanotować pozycje jaką miały na odcinku testowym.



Rysunek 1. Kontrola wielkości sprysku: a) i b) ułożenie podkładek z geowłókniny, c) sprysk, d) "czyste" miejsce po zdjęciu podkładek

4. Wykonanie kontroli na kierunku podłużnym

Od przypadku powyższego różni się sposobem ułożenia podkładek. Przyklejane są one wzdłuż powierzchni przeznaczonej do sprysku na odcinku około 100 m. Ich położenie musi być takie aby nie pokrywało się z miejscem przejazdu kół cysterny. Po wykonaniu sprysku każda podkładka musi być zważona, a jej położenie zanotowane.



Rysunek 2. Procedura kontroli wielkości sprysku w kierunkach: a) poprzecznym, b) podłużnym.

5. Obliczenie ilości sprysku

W celu obliczenia ilości sprysku należy od masy spryskanych podkładek odjąć masę podkładek suchych - otrzymamy wielkość „A” w gramach i podzielić przez pole powierzchni podkładki z geowłókniny „F”:

$$\text{sprysk [kg/m}^2\text{]} = A/F$$

Gdzie:

A – masa netto, różnica podkładek spryskanych i suchych [kg],

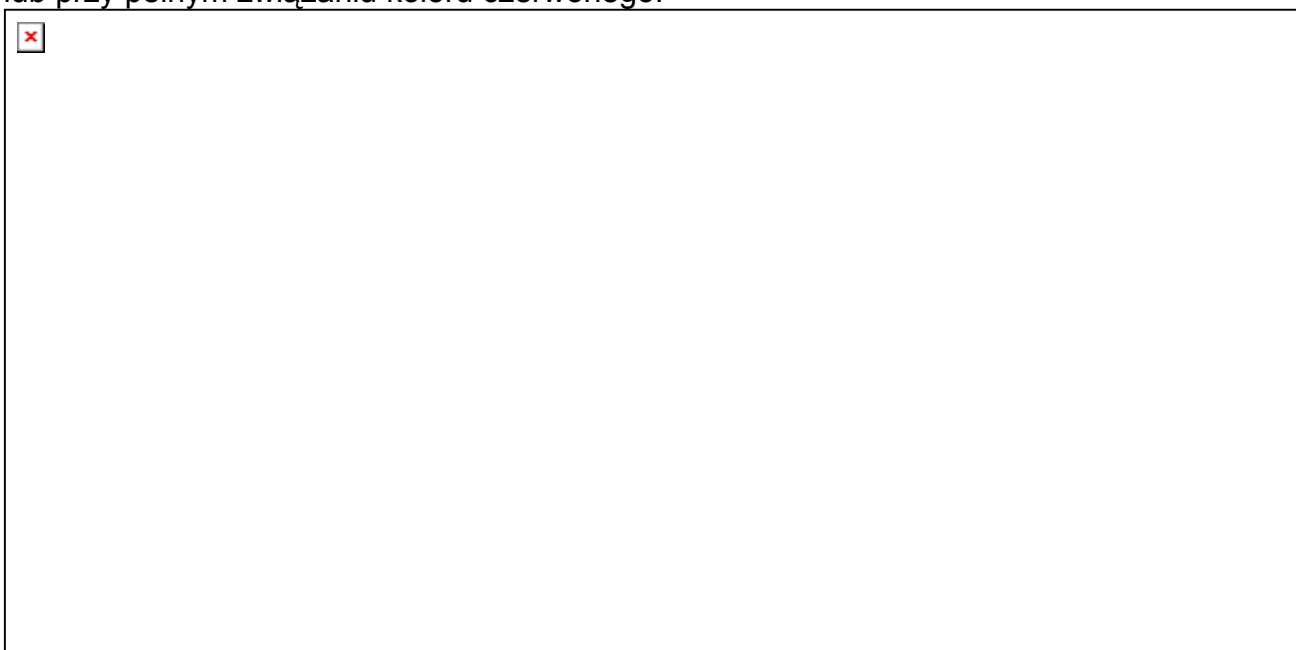
F – pole powierzchni podkładek z geowłókniny [m²].

Załącznik 3

Stan naprężeń i odkształceń oraz analiza wpływu miejsca braku szczepności w nawierzchni dla ruchu KR3

Z3.1. Stan naprężeń i odkształceń w nawierzchni dla ruchu KR3

Na poniższych rysunkach przedstawiono stany naprężeń w nawierzchni dla ruchu KR3, przy różnych stopniach powiązania warstw. Czerwone linie oznaczają odkształcenia poziome lub naprężenia występujące w nawierzchni posiadającej pełne związanie na wszystkich płaszczyznach międzywarstwowych. Niebieskie natomiast przedstawiają sytuację jaka występuje przy danym stopniu utraty szczepności dla wariantu I lub II. Podane wartości dotyczą odkształceń i naprężeń występujących przy utracie szczepności – koloru niebieskiego lub przy pełnym związaniu koloru czerwonego.



Ozn.



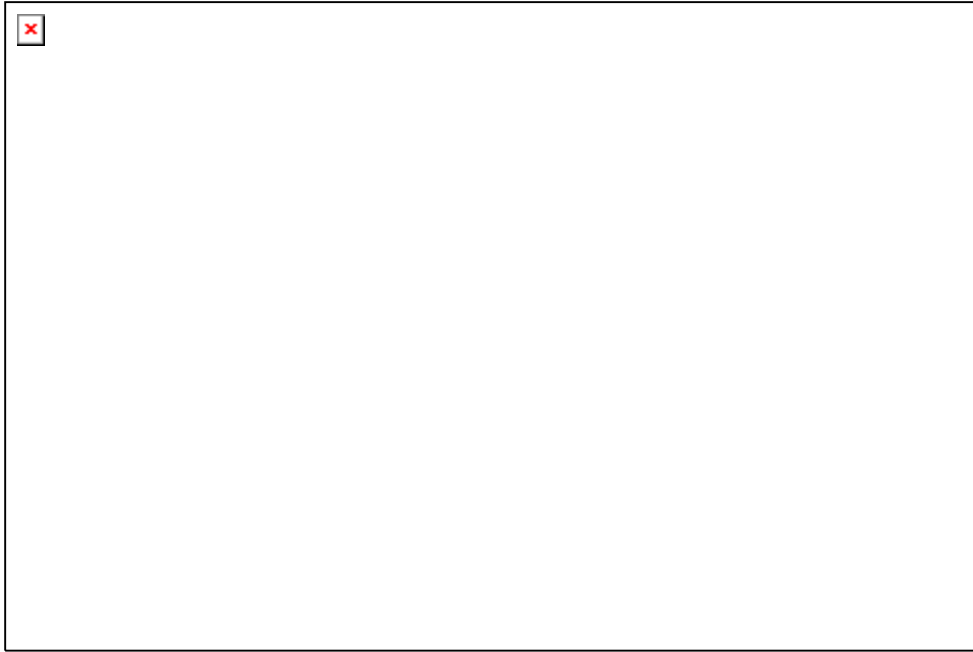
brak szczepności



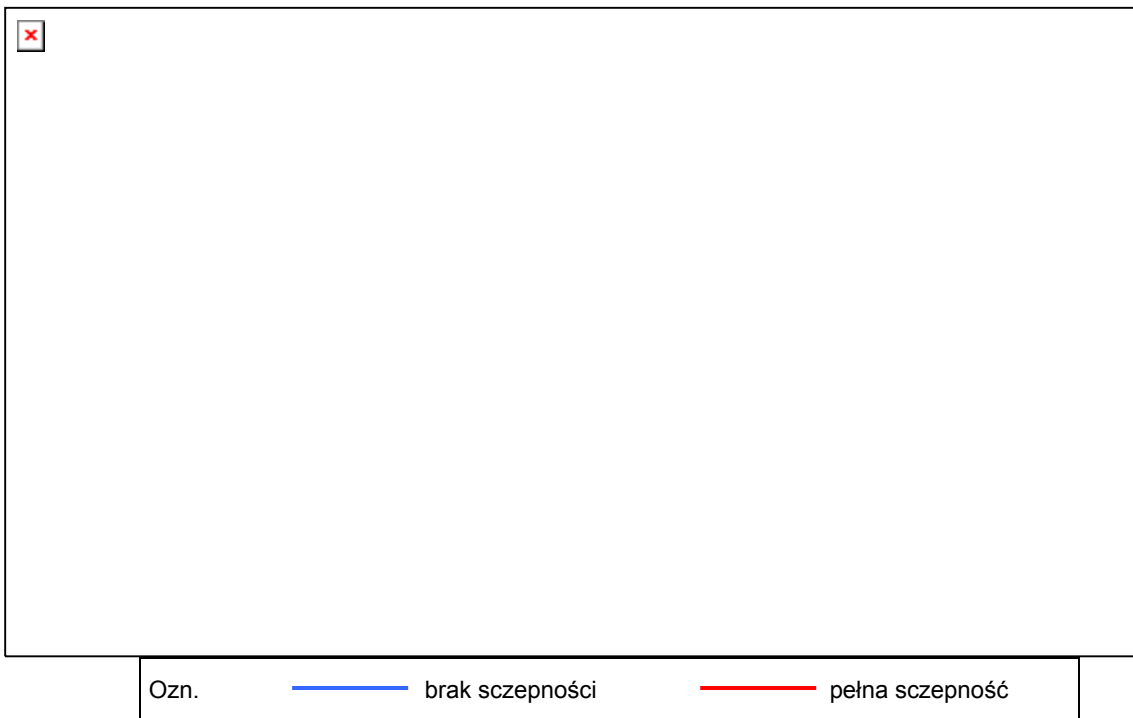
pełna szczepność

Rysunek 5.25. Wykresy odkształceń w poszczególnych warstwach nawierzchni dla ruchu KR3 [μ strain]

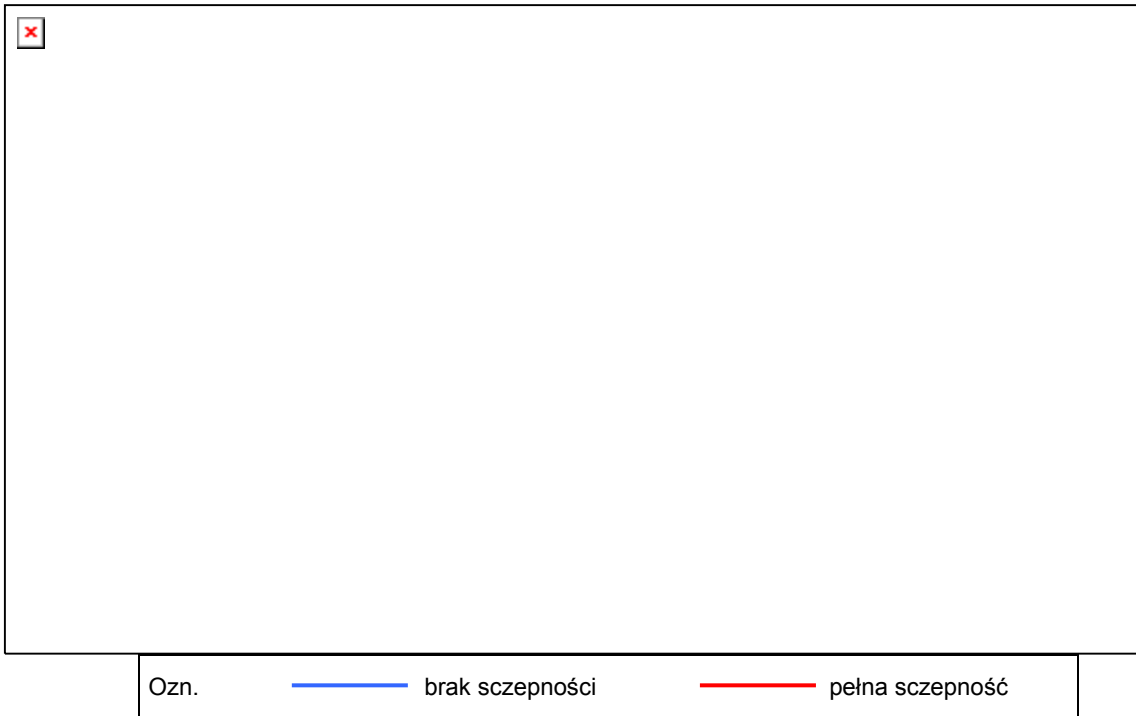
Z wykresu widać, że utrata szczepności międzywarstwowej powoduje zmianę rozkładu naprężeń i odkształceń konstrukcji nawierzchni. Poślizg międzywarstwowy powoduje, że nie cały pakiet warstw asfaltowych pracuje razem, rozdzielając się na dwie części, pracujące oddzielnie. Skutkiem tego jest spadek nośności nawierzchni. Charakterystyczne dla tych wykresów jest wygięcie linii zarówno dla pełnego związania międzywarstwowego, jak i dla jego braku, występujące w podbudowie asfaltowej.



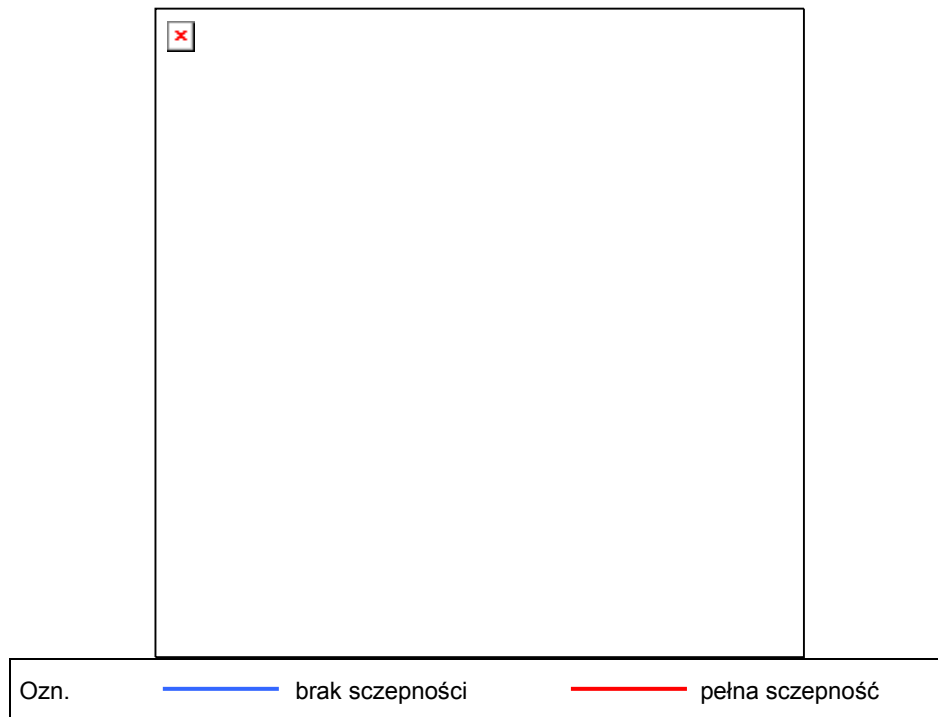
Rysunek 5.26. Wykresy odkształceń poziomych w nawierzchni KR3 dla wariantu I [μstrain]



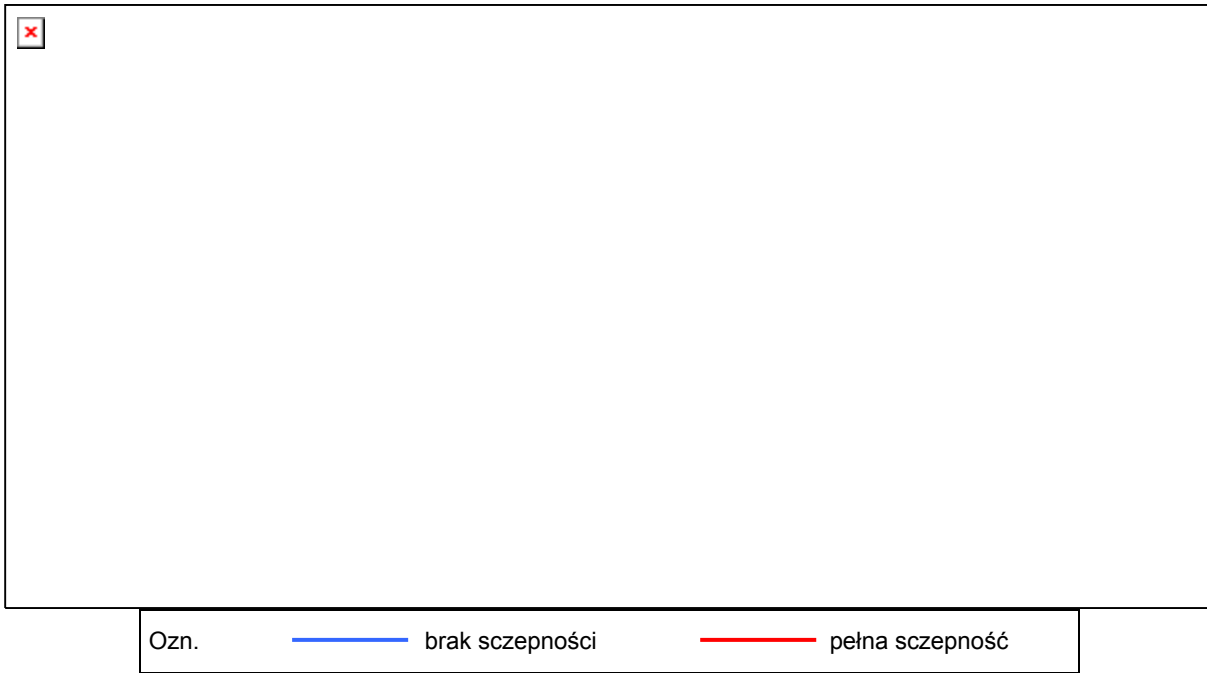
Rysunek 5.27. Rozkład naprężeń w warstwach asfaltowych nawierzchni KR3 dla wariantu I [MPa]



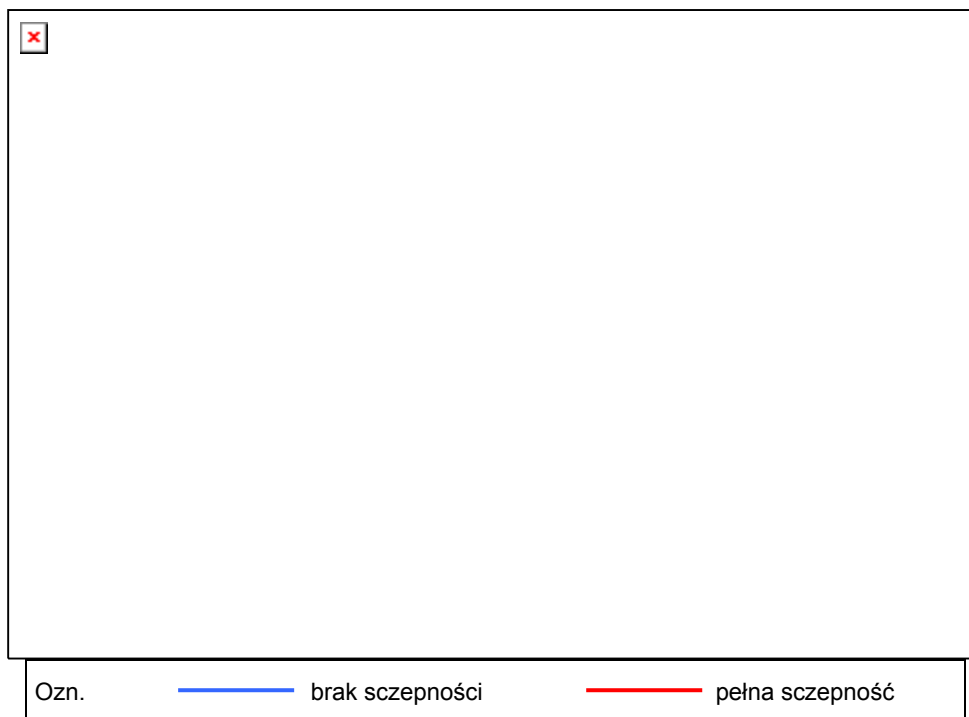
Rysunek 5.28. Rozkład naprężeń w warstwach asfaltowych nawierzchni KR3 dla wariantu I [MPa]



Rysunek 5.29. Rozkład naprężeń w warstwach asfaltowych nawierzchni KR3 dla wariantu I [MPa]



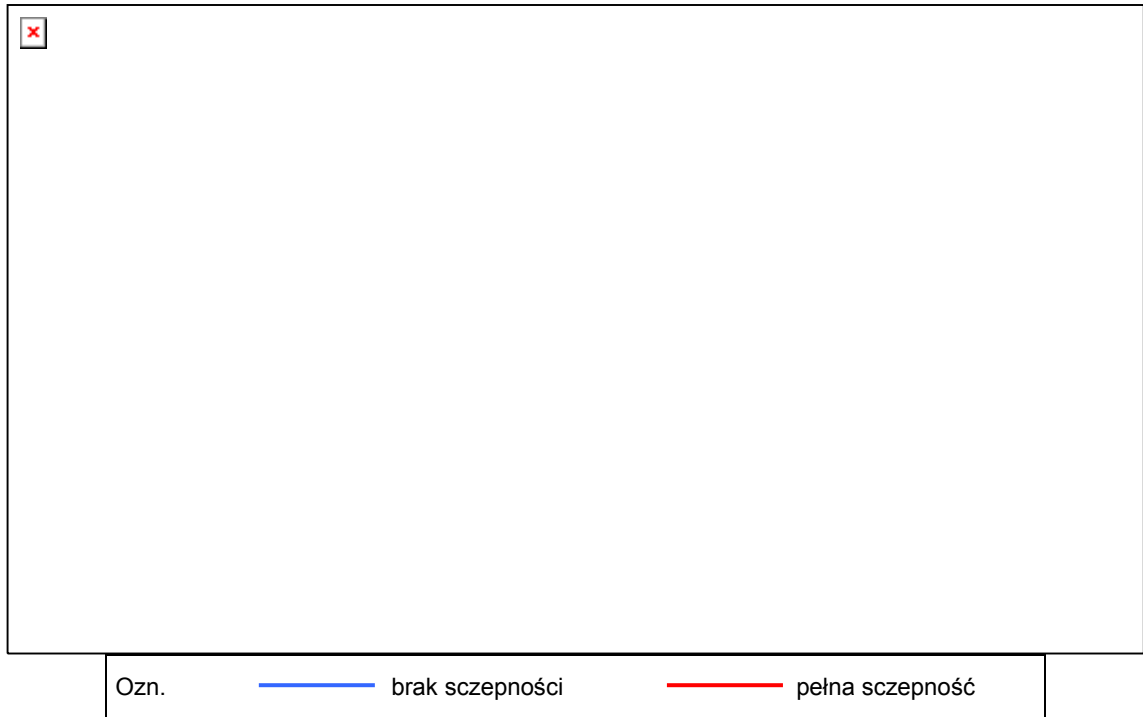
Rysunek 5.30. Odształcenia poziome dla trzech poziomów powiązania międzywarstwowego w wariancie II [μstrain]



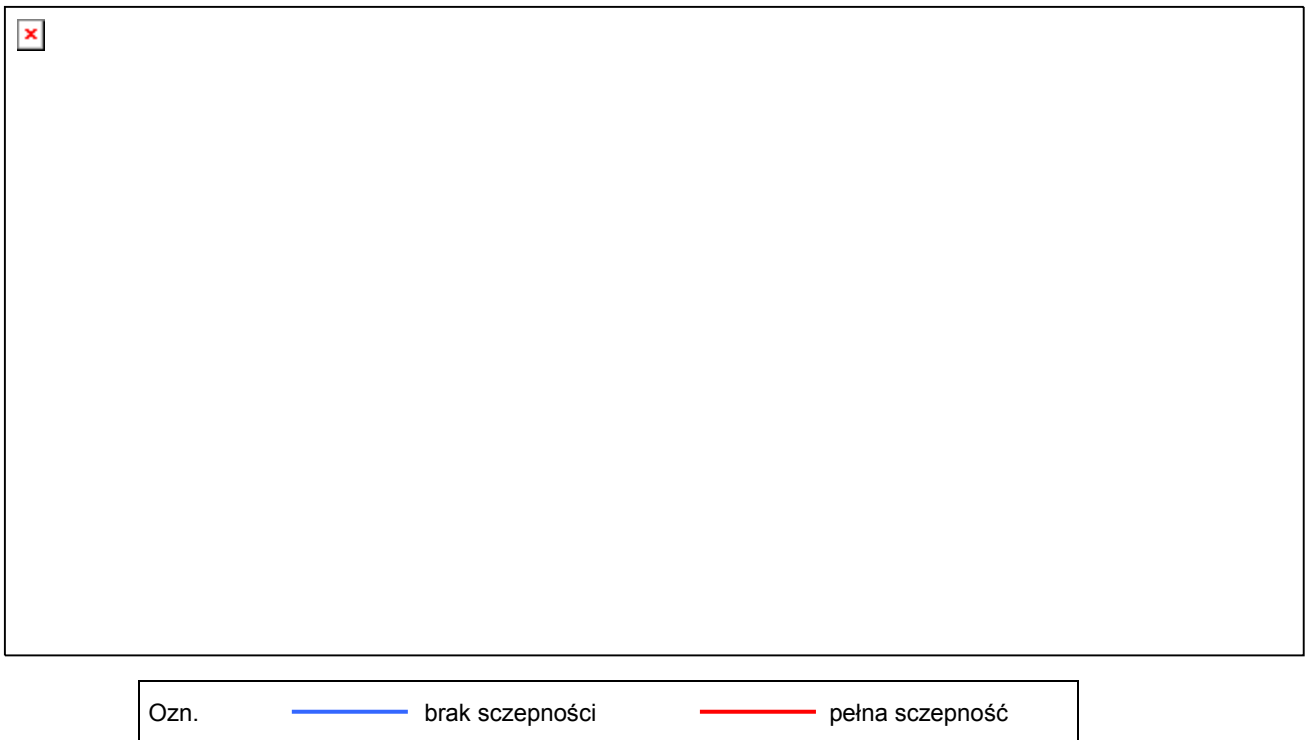
Rysunek 5.31. Odształcenia poziome i pionowe w konstrukcji nawierzchni dla wariantu II [μstrain]

Na rysunku 5.31 odształcenie poziome na spodzie warstwy wiążącej jest większe niż odształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych. Dla przypadku całkowitego braku szczepności (rysunku 5.31b) odształcenie poziome na spodzie warstwy wiążącej wynosi 167 [μstrain], natomiast w podbudowie 91,45 [μstrain]. Jest

to bardzo duży wzrost, i tak znaczne odkształcenie poziome przyczynia się do inicjacji spękania w warstwie wiążącej, pomimo stosunkowo dużej zawartości asfaltu. W podbudowie odkształcenie poziome zmniejszyło swoją wartość w porównaniu do stanu charakterystycznego dla pełnej szczepności z 101,4 do 91,45 [μ strain]. Spadek ten jest mało znaczący.

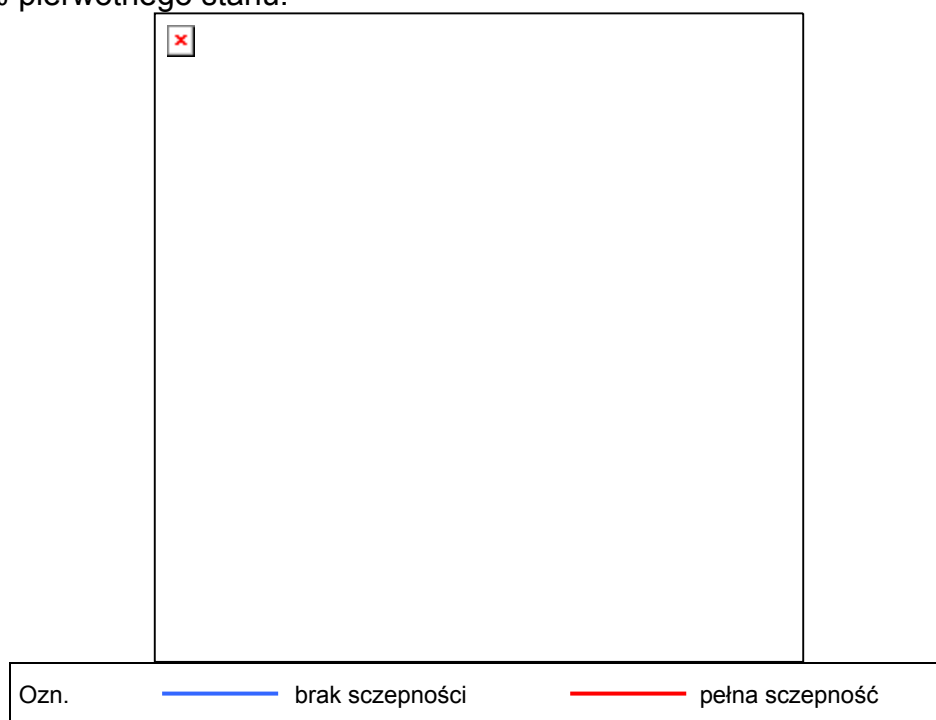


Rysunek 5.32. Rozkład naprężeń w nawierzchni dla wariantu II [MPa]



Rysunek 5.33. Rozkład naprężeń w nawierzchni dla wariantu II [MPa]

Na wykresach naprężeń w nawierzchniach dla ruchu lekkiego dostrzec można większy wzrost naprężeń ściskających między stanami z pełnym związaniem warstw, a stanem gdzie powiązania nie ma. Wzrost ten wynosi z -1,79 MPa do -2,48 MPa, czyli 39% pierwotnego stanu.



Rysunek 5.34. Rozkład naprężeń w nawierzchni dla wariantu II [MPa]

Na rysunku 5.34 widoczna jest znacząca różnica w naprężeniach na spodzie warstwy wiążącej między stanem pełnej szczepności, a jej brakiem. Przy braku powiązania naprężenie rozciągające wynosi 2,27 [MPa], natomiast przy pełnej szczepności tylko 0,21 [MPa]. Znaczny wzrost naprężeń rozciągających w warstwie wiążącej powoduje zmniejszenie jej trwałości zmęczeniowej. W przypadku naprężeń na spodzie warstw asfaltowych sytuacja przedstawia się podobnie jak w przypadku odkształceń. Przy braku szczepności naprężenia na spodzie warstw asfaltowych są mniejsze niż dla przypadku pełnej szczepności.

W związku z faktem, że naprężenia ścinające posiadają największą wartość na głębokości 4÷6 cm, dlatego największy wpływ na trwałość nawierzchni dla ruchu lekkiego ma brak szczepności pomiędzy warstwą ścieralną a wiążącą.

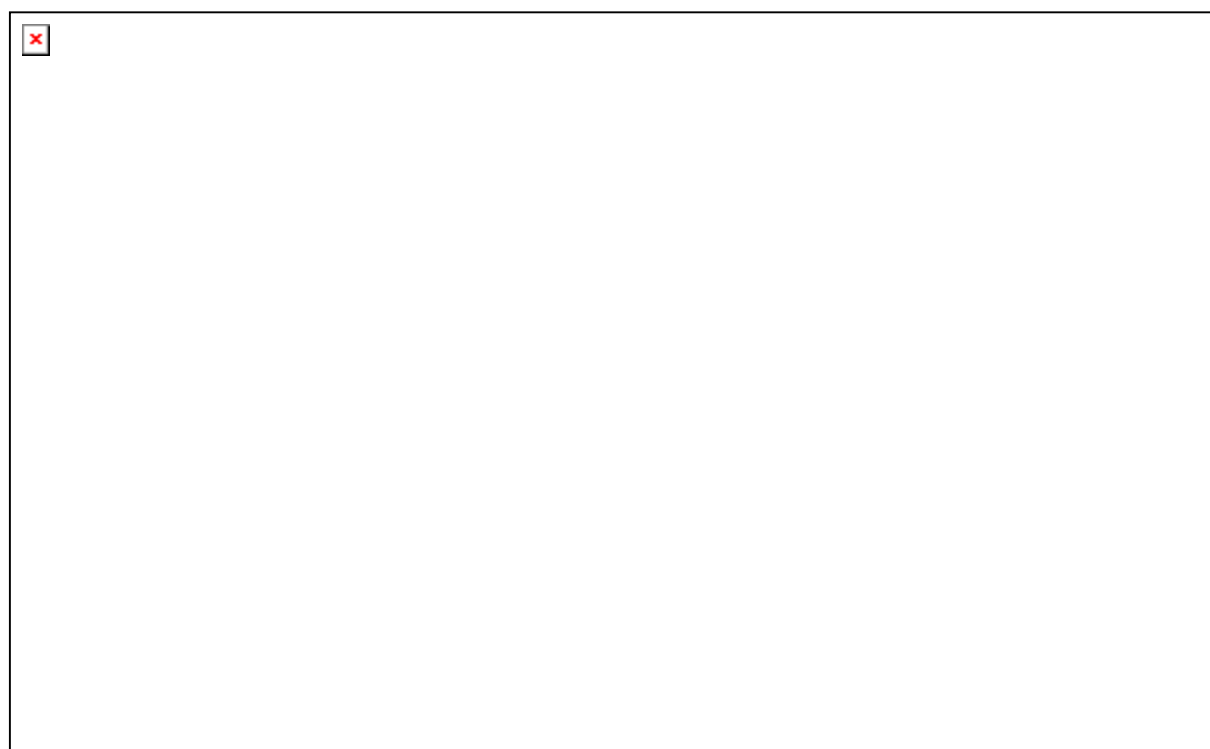
Z3.2. Analiza wpływu miejsca braku szczepności w nawierzchni typu lekkiego

W punkcie tym analizowany będzie wpływ szczepności międzywarstwowej na trwałość nawierzchni dla ruchu lżejszego. Drogi te są często spotykane i na nich jest większe prawdopodobieństwo wystąpienia oddzielenia warstw. Założenie dotyczące powiązania podłoża z podbudową jest tutaj też aktualne. Także obciążenie pozostaje bez zmian. Jediną zmianą jest inna konstrukcja nawierzchni, przyjęta na podstawie „Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych” [21].

Z rysunku 5.35 odczytać można, że zmianie uległa wielkość utraty trwałości dla wariantu II. W nawierzchni dla ruchu lekkiego istotne jest połączenie warstwy ścieralnej z wiążącą bardziej niż w przypadku łączenia warstwy wiążącej z

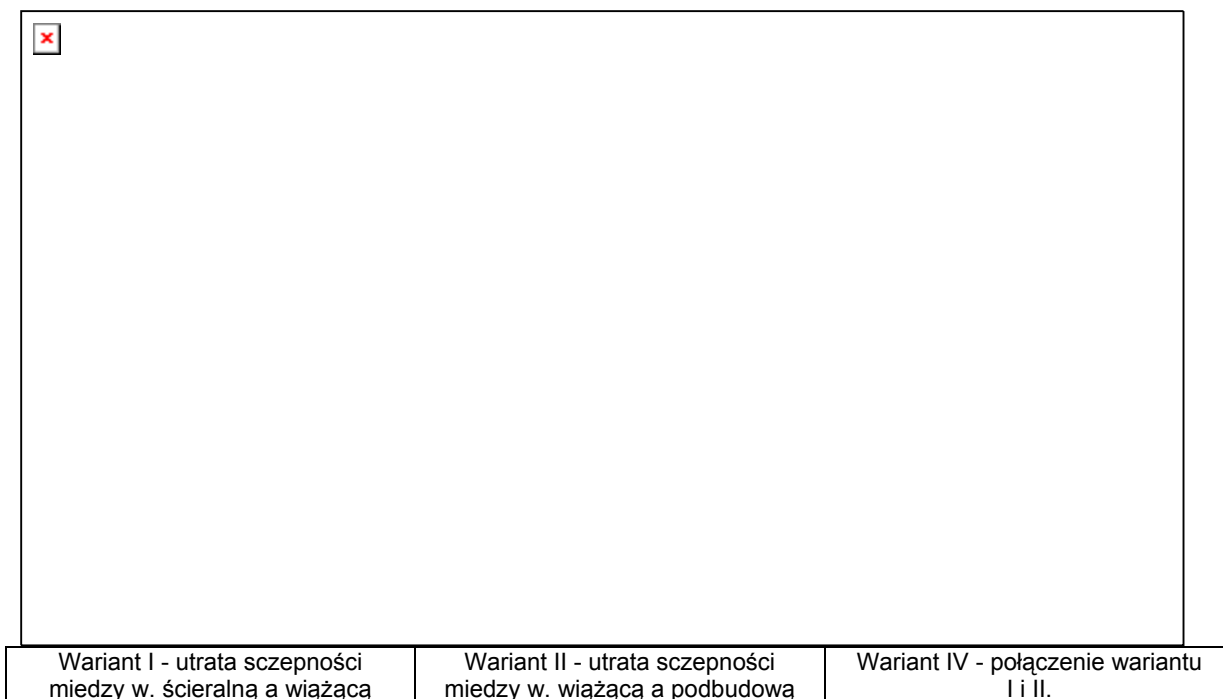
podbudową z BA. Dziwną anomalią w przypadku wariantu II jest wzrost trwałości zmęczeniowej dla poziomu 30 [%] szczepności. Przy tego typu nawierzchniach już bardzo istotne jest połączenie warstwy podbudowy z BA z warstwą podbudowy z KŁSM, ponieważ trwałość zmęczeniowa wyraźnie maleje.

Spowodowane jest to większym udziałem w przenoszeniu obciążeń warstwy podbudowy niezwiązanej w przypadku nawierzchni dla ruchu KR3, natomiast w przypadku nawierzchni dla ruchu ciężkiego gruby zestaw warstw w większym stopniu sam przenosi to samo obciążenie. Największe odkształcenia poziome w opisywanej nawierzchni zgodnie z rysunkiem 5.36. występują dla wariantu III, jednakże większa utrata trwałości zmęczeniowej powodowana jest w przypadku braku połączenia w miejscu opisanym w wariantcie I. Ostatecznie największe odkształcenie poziome charakterystyczne jest dla wariantu II, co jak pokazuje rysunek 5.37 nie gwarantuje większej utraty trwałości zmęczeniowej.

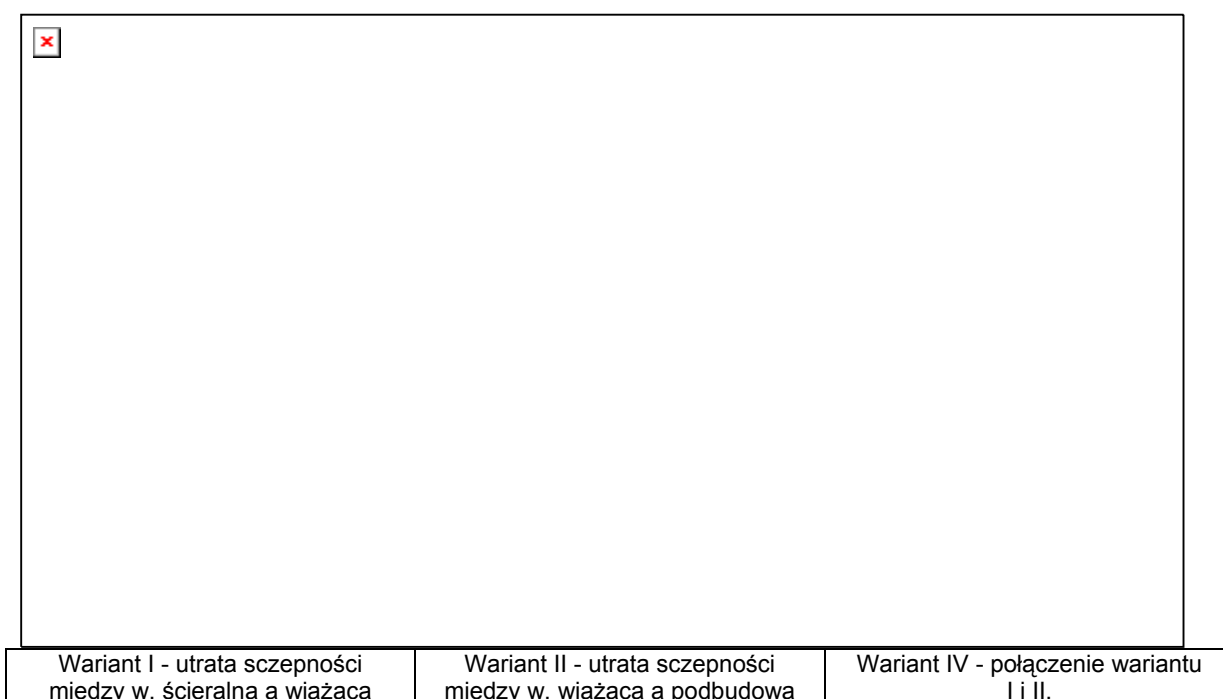


Wariant 0 – pełna szczepność	Wariant I-utrata szczepności między w. ścieralną a wiążącą	Wariant II-utrata szczepności między w. wiążącą a podbudową
Wariant III -utrata szczepności między w. podbudowy BA a podbudową z KŁSM	Wariant IV - połączenie wariantu I i II.	Wariant V – połączenie wariantu II i III.
Wariant VI – połączenie wariantu I i III.	Wariant VII - połączenie wariantu I,II i III.	

Rysunek 5.35. Trwałość zmęczeniowa nawierzchni w zależności od stopnia szczepności



Rysunek 5.36. Zależność maksymalnych odkształceń poziomych od stopnia szczepności międzywarstwowej



Rysunek 5.37. Zależność trwałości zmęczeniowej od stopnia powiązania warstw

Z rysunku 5.37 widoczne jest że dla wariantu I występuje większa utrata trwałości zmęczeniowej niż w przypadku wariantu II.



Wariant 0 – pełna szepność	Wariant I-utrata szepności między w. ścieralną a wiążącą	Wariant II-utrata szepności między w. wiążącą a podbudową
Wariant III -utrata szepności między w. podbudowy BA a podbudową z KŁSM	Wariant IV - połączenie wariantu I i II.	Wariant V – połączenie wariantu II i III.
Wariant VI – połączenie wariantu I i III.	Wariant VII - połączenie wariantu I,II i III.	

Rysunek 5.38. Utrata trwałości nawierzchni dla różnych wariantów wystawienia braku szepności

Rysunek 5.38 ukazuje, że na różnicę w utracie trwałości zmęczeniowej między stopniem powiązania warstw ma miejsce jego wystąpienia. Podobna sytuacja występuje w konstrukcji nawierzchni dla ruchu ciężkiego. Opisany wpływ jest różny dla poszczególnych wariantów wystąpienia szepności.



Wariant 0 – pełna szepność	Wariant I-utrata szepności między w. ścieralną a wiążącą	Wariant II-utrata szepności między w. wiążącą a podbudową
Wariant III -utrata szepności między w. podbudowy BA a podbudową z KŁSM	Wariant IV - połączenie wariantu I i II.	Wariant V – połączenie wariantu II i III.
Wariant VI – połączenie wariantu I i III.	Wariant VII - połączenie wariantu I,II i III.	

Rysunek 5.39. Zależność odkształcenia poziomego od wariantu wystąpienia braku szepności

Powyższy wykres jest potwierdzeniem, że większa utrata trwałości zmęczeniowej spowodowana jest wystąpieniem braku związania w wariancie I, niż w wariancie II.

Tablice 5.8 i 5.9 przedstawiają zestawienie wyników pracy nawierzchni KR3. W przypadku tej konstrukcji inicjacja spękań, rozpoczyna się w niektórych wariantach od warstwy wiążącej. Sytuacja ta ma miejsce w przypadku wariantów II i V przy całkowitej utracie szczepności, natomiast tylko II przy 30% szczepności. Spowodowane jest to tak dużymi wartościami odkształceń poziomych, że większa zawartość lepiszcza nie jest w stanie zrekompensować większej utraty trwałości zmęczeniowej. Większe odkształcenia związane są z grubością zestawu warstw asfaltowych, których jest mniej w nawierzchniach dla ruchu lekkiego. Charakterystyczne wygięcia linii na rysunkach 5.36 i 5.37 spowodowane są przyjęciem wartości odpowiednio odkształceń i trwałości zmęczeniowych z warstwy wiążącej, zamiast podbudowy. Podyktowane to było ich wyższymi wartościami, niż dla warstwy niżej leżącej, ponieważ tam rozpocznie się formowanie i dalsza propagacja spękania. W wyniku obliczeń uzyskano tutaj całkiem realne wartości utraty trwałości zmęczeniowej przy 90 % szczepności międzywarstwowej.

Tablica 5.8. Odształcenia poziome i trwałości zmęczeniowe w zależności od wariantu wystąpienia braku szczepności (KR3)⁹

Warstwa w nawierzchni Głębokość	100%	90% Szczepności							70% Szczepności						
	WO	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
Odształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych															
Ścieralna BA z=0,05 [m]	-35,29	-25,99	-33,27	-35,33	-23,30	-33,30	-26,01	-23,32	4,42	-26,80	-35,51	22,29	-27,03	4,519	22,58
Wiążąca BA z=0,11 [m]	24,56	21,74	37,90	24,63	35,33	37,98	21,81	35,42	13,85	77,39	24,98	73,19	78,19	14,28	74,17
Podbudowa BA z=0,18[m]	101,40	106,30	102,50	101,70	107,80	102,80	106,60	108,10	119,30	104,40	103,00	127,40	106,3	121,40	130,10
Trwałość zmęczeniowa dla poszczególnych warstw asfaltowych [osie 115 kN]															
Ścieralna BA z=0,05 [m]	-	-	-	-	-	-	-	-	6,5E+11	-	-	3,2E+09	-	6,1E+11	3E+09
Wiążąca BA z=0,11 [m]	4,44E+08	6,63E+08	1,06E+08	4,39E+08	1,34E+08	1,06E+08	6,56E+08	1,33E+08	2,92E+09	1,02E+07	4,19E+08	1,22E+07	9,81E+06	2,64E+09	1,17E+07
Podbudowa BA z=0,18 [m]	1,38E+06	1,18E+06	1,33E+06	1,37E+06	1,13E+06	1,32E+06	1,17E+06	1,12E+06	8,08E+05	1,25E+06	1,31E+06	6,51E+05	1,18E+06	7,63E+05	6,08E+05
Warstwa gdzie wyst. inicjacja spękania	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa
Utrata trwałości [%]	0	14	3	1	18	4	15	19	41	9	5	53	14	45	56

⁹ Uwaga: Szary kolor w tabeli oznacza utratę szczepności międzywarstwowej.

Tablica 5.9. Odształcenia poziome i trwałości zmęczeniowe w zależności od wariantu wystąpienia braku szczepności (KR3)

Warstwa w nawierzchni Głębokość	30% Szczepności							0% Szczepności						
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
Odształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych														
Ścieralna BA z=0,05 [m]	57,36	-11,14	-36,70	111,80	-12,34	61,47	121,80	76,89	-3,33	-37,73	139,40	-5,42	88,06	164,20
Wiążąca BA z=0,11 [m]	-1,91	145,00	27,68	141,90	154,20	0,75	155,30	-8,60	166,90	32,46	161,10	188,20	-2,09	190,80
Podbudowa BA z=0,18[m]	135,20	98,48	111,70	150,40	113,30	152,80	177,90	137,20	91,45	124,40	150,40	124,20	176,70	210,80
Trwałość zmęczeniowa dla poszczególnych warstw asfaltowych [osie 115 kN]														
Ścieralna BA z=0,05 [m]	1,4E+08	-	-	1,6E+07	-	1,1E+08	1,2E+07	5,4E+07	-	-	7599514	-	3,4E+07	4433651
Wiążąca BA z=0,11 [m]	-	1,29E+06	2,99E+08	1,38E+06	1,05E+06	4,27E+13	1,03E+06	-	809224	1,8E+08	909120	545004	-	520942
Podbudowa BA z=0,18 [m]	5,35E+05	1,52E+06	1,00E+06	3,77E+05	9,58E+05	3,58E+05	2,17E+05	5,10E+05	1,94E+06	7,04E+05	3,77E+05	7,08E+05	2,22E+05	1,24E+05
Warstwa gdzie wyst. inicjacja spękania	podbudowa	wiążąca	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	podbudowa	wiążąca	podbudowa	Podbudowa	wiążąca	podbudowa	podbudowa
Utrata trwałości [%]	61	7	27	73	31	74	84	63	41	49	34	61	84	91

Załącznik 4

Ugięcia w nawierzchni dla ruchu KR6 i KR3

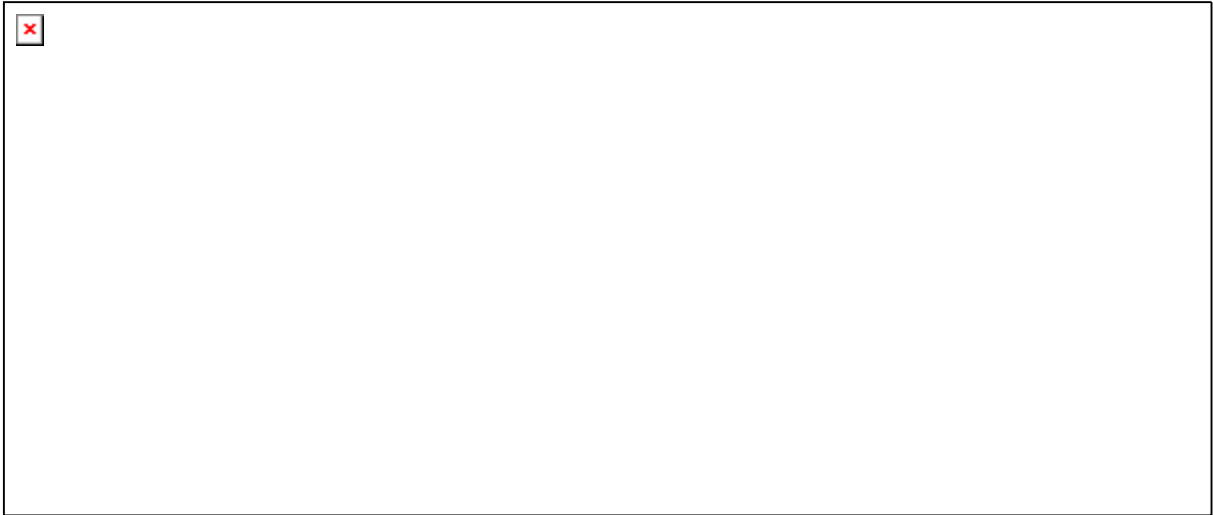
Z4.1. Ugięcia w nawierzchni dla ruchu KR6

W tabelicy 5.19 przedstawiono wartości ugięć i ich procentowy wzrost w stosunku do ugięć nawierzchni z pełną szczepnością w zależności od wariantu i stopnia wystąpienia braku szczepności. W przypadku nawierzchni dla ruchu ciężkiego zarówno większa utrata trwałości zmęczeniowej, jak i wzrost ugięcia występuje nie dla wariantu I lecz dla wariantu II. Ten wzrost jest dość znaczny, bo wynosi aż 42% przy całkowitej utracie szczepności między warstwą wiążącą a podbudową.

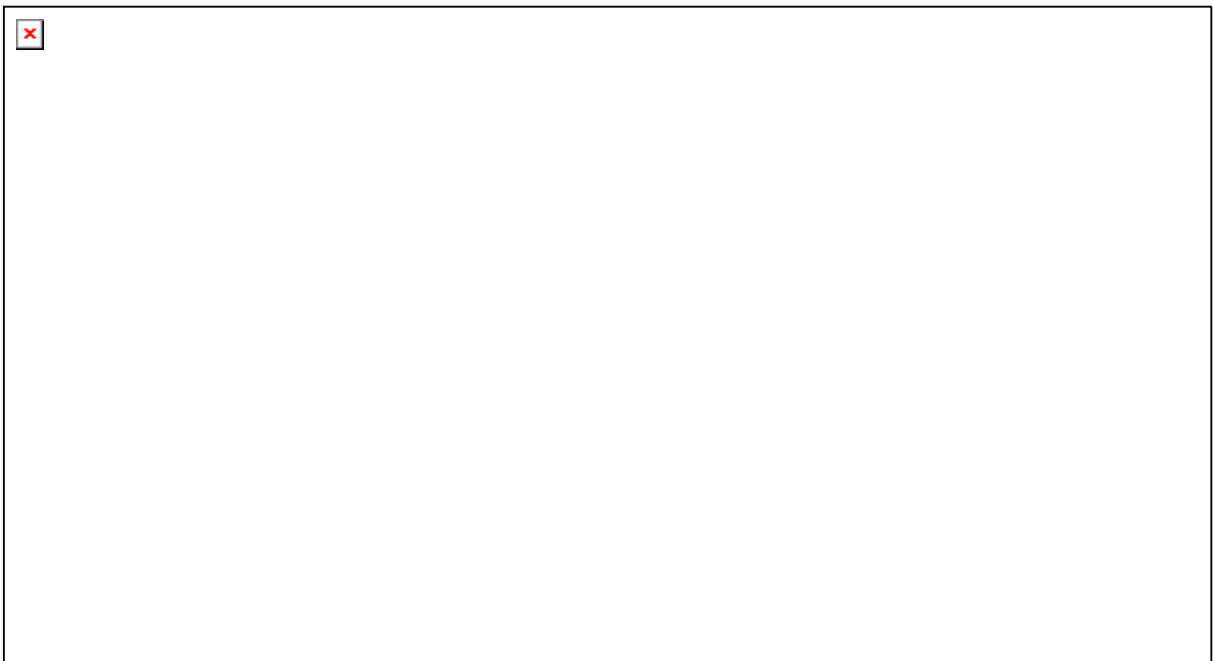
Na rysunku 5.49 przedstawiony został wpływ stopnia szczepności na ugięcie nawierzchni dla różnych wariantów wystąpienia powiązania warstw. Zawarto tam wszystkie warianty wystąpienia braku szczepności, ponieważ zauważyć można iż ich wzrosty są analogiczne do spadków trwałości zmęczeniowej.

Tablica 5.19. Wartości ugięć dla odpowiednich wartości współczynnika szczepności dla nawierzchni KR6

Lp.	Ugięcie [μm]	Wariant wystąpienia braku szczepności	Szczepność [%]	Wzrost ugięcia [%]
1.	229,7	I	100	0,0%
2.	231,1		90	0,6%
3.	236		70	2,7%
4.	251,9		30	9,7%
5.	265,9		0	15,8%
6.	229,7	II	100	0,0%
7.	233		90	1,4%
8.	245,7		70	7,0%
9.	292,4		30	27,3%
10.	326,2		0	42,0%
11.	229,7	III	100	0,0%
12.	229,7		90	0,0%
13.	230,1		70	0,2%
14.	233,7		30	1,7%
15.	249,4		0	8,6%
16.	229,7	IV	100	0,0%
17.	234,5		90	2,1%
18.	252,5		70	9,9%
19.	311,5		30	35,6%
20.	348,3		0	51,6%
21.	229,7	V	100	0,0%
22.	233,1		90	1,5%
23.	246,3		70	7,2%
24.	300,3		30	30,7%
25.	362,9		0	58,0%
26.	229,7	VI	100	0,0%
27.	231,2		90	0,7%
28.	236,4		70	2,9%
29.	257,2		30	12,0%
30.	292,3		0	27,3%
31.	229,7	VII	100	0,0%
32.	234,6		90	2,1%
33.	253,1		70	10,2%
34.	321,2		30	39,8%
35.	392,1		0	70,7%



Rysunek 5.49. Wpływ stopnia związania warstw na ugięcie nawierzchni



Rysunek 5.50. Zależność procentowego wzrostu ugięcia w zależności od wariantu wystąpienia utraty szczepności dla ruchu KR6

Powyższy wykres pokazuje jaki jest wpływ stopnia związania warstw na procentowy wzrost ugięcia. Duży skok następuje przy 30% szczepności i przy całkowitym jej braku. Jest to niezależne od wariantu, dla którego zostało obliczone.

Z4.2. Ugięcia w nawierzchni dla ruchu KR3

Tablica 5.20. Wartości ugięć dla odpowiednich wartości współczynnika szepności(KR3)

L.p.	Ugięcie [μm]	Wariant	Szepność [%]	Wzrost ugięcia [%]
1.	350,7	I	100	0,0
2.	355,1		90	1,3
3.	370,6		70	6,0
4.	414,2		30	18,0
5.	438,8		0	25,0
6.	350,7	II	100	0,0
7.	356,9		90	1,8
8.	379,9		70	8,3
9.	449,8		30	28,0
10.	488,5		0	39,0
11.	350,7	III	100	0,0
12.	350,9		90	0,1
13.	352,2		70	0,4
14.	364,0		30	3,8
15.	397,9		0	13,0
16.	350,7	IV	100	0,0
17.	361,5		90	3,0
18.	403,6		70	15,0
19.	523,4		30	50,0
20.	576,6		0	64,0
21.	350,7	V	100	0,0
22.	357,1		90	1,8
23.	381,6		70	8,8
24.	469,4		30	33,8
25.	550,9		0	57,0
26.	350,7	VI	100	0,0
27.	355,3		90	1,3
28.	372,4		70	6,2
29.	435,2		30	24,0
30.	510,8		0	46,0
31.	350,7	VII	100	0,0
32.	361,8		90	3,2
33.	405,8		70	16,0
34.	556,2		30	59,0
35.	678,5		0	93,0

Wyniki ugięć w nawierzchni KR3 (tablica 5.20) nie pokrywają się z trwałością zmęczeniową warstw asfaltowych. Tam najistotniejszy był wariant I, gdzie wystąpiła większa utrata trwałości zmęczeniowej niż w wariacie II, natomiast w przypadku ugięć sytuacja przedstawia się odwrotnie, bo dla wariantu II ugięcia są dużo większe.