



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 SZCZEPNOŚCI
MIĘDZYWARSTWOWEJ NA TRWAŁOŚĆ
KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ**

RAPORT Z PIERWSZEGO 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

Kierownik Zakładu Budowy Dróg - Prof. dr hab. inż. Józef Judycki

Gdańsk, listopad 2005

BADANIA I OCENA WPŁYWU SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	4
1. WSTĘP	5
1.1. PODSTAWA OPRACOWANIA.....	5
1.2. CEL I ZAKRES	5
1.3. OPIS PROBLEMU	5
2. PRZEGLĄD LITERATURY	7
2.1. SZCZEPNOŚĆ MIĘDZYWARSTWOWA I JEJ MECHANIZM.....	7
2.2. SKUTKI BRAKU SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ	7
2.3. WPŁYW SZCZEPNOŚCI NA TRWAŁOŚĆ NAWIERZCHNI	10
2.4. PRZYCZYNY UTRATY SZCZEPNOŚCI I RODZAJE CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCE NA SZCZEPNOŚĆ	11
2.4.1. WPŁYW GEOSYNTETYKÓW NA SZCZEPNOŚĆ MIĘDZYWARSTWOWĄ.....	13
2.5. MATERIAŁY DO WARSTWY SZCZEPNEJ.....	14
2.6. ZALECENIA STOSOWANIA WARSTWY SZCZEPNEJ	15
2.7. BADANIA SZCZEPNOŚCI.....	19
2.7.1. Rozszczepianie klinem	19
2.7.2. Metoda Pull-off.....	20
2.7.3. Metoda skręcania	21
2.7.3. Proste badanie ścinania	21
2.7.4. Metoda Leutner'a	22
2.7.5. Ścinanie przy poziomym ściskaniu	25
2.7.6. Dynamiczne impulsy.....	26
2.8. WYMAGANIA DOTYCZĄCE SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ	27
2.9. POLSKIE DOŚWIADCZENIA W BADANIACH SZCZEPNOŚCI.....	28
3. BADANIA LABORATORYJNE WYKONANE W POLITECHNICE GDAŃSKIEJ	29
3.1. MATERIAŁ WYJŚCIOWY	29
3.2. METODYKA BADAWCZA.....	30
3.2.1. Wprowadzenie	30
3.2.2. Przygotowanie próbek	30
3.2.2.1. Zagęszczanie i odwiercanie próbek	30
3.2.2.2. Sprysk międzywarstwowy – warstwa szczepna	33
3.2.2.3. Opis badania.....	36
3.3. WYNIKI BADAŃ	38
4. BADANIA TERENOWE	44
4.2. SZCZEPNOŚĆ MIĘDZYWARSTWOWA ISTNIEJĄCYCH KONSTRUKCJI	44
4.2.1. Droga krajowa nr 1, odc. Miłobądz -Tczew	44
4.2.2. Droga krajowa nr 15, odc. Morliny-Ostróda	47
4.2.3. Ulica 3-go Maja w Gdańsku.....	48
4.2.4. Droga krajowa nr 16, odcinek Górka - Zawady	49

5. ANALIZY OBLICZENIOWE	50
5.3. WPŁYW SZCZEPNOŚCI NA STAN NAPRĘŻEŃ, ODKSZTAŁCEŃ I UGIĘĆ W KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI.....	50
5.3.1. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni	50
5.3.2. Obciążenie nawierzchni ruchem.....	52
5.3.3. Stałe materiałowe	52
5.3.4. Program komputerowy.....	53
5.3.5. Forma prezentacji wyników	53
5.3.6. Ugięcia od obciążenia osią 115 kN	53
5.3.7. Odkształcenia w warstwach asfaltowych od obciążenia osią 115 kN	58
5.3.8. Wpływ szczepności na pracę warstw asfaltowych na słabym podłożu (obliczenia od obciążenia osią 115 kN)	64
5.3.8.1. Wpływ szczepności na ugięcia nawierzchni - rysunki 5.2, 5.3 i 5.4 (przedstawione wyżej)	64
5.3.8.2. Wpływ szczepności na odkształcenia w nawierzchni - rysunki 5.5, 5.6, 5.7 i 5.8 (przedstawione wyżej)	64
5.3.8.3. Wpływ szczepności na naprężenia w nawierzchni.....	65
5.4. WPŁYW SZTYWNOŚCI WARSTW ASFALTOWYCH NA NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA (OBLICZENIA OD OBCIĄŻENIA OSIĄ 115 kN)	68
5.5. WPŁYW SIŁY POZIOMEJ NA NAPRĘŻENIA ROZCIĄGAJĄCE W WARSTWACH ASFALTOWYCH (OBLICZENIA OD OBCIĄŻENIA OSIĄ 115 kN)	70
5.6. PORÓWNANIE NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ DZIAŁAJĄCYCH W DWÓCH KIERUNKACH „X” I „Y” - WZDŁUŻ I W POPRZEK DO JAZDY – WYJAŚNIENIE PRZYCZYN SPĘKAŃ PODŁUŻNYCH (OBLICZENIA OD OBCIĄŻENIA OSIĄ 115 kN)	71
5.7. BADANIE ŚCINANIA W WARSTWACH ASFALTOWYCH (OBLICZENIA OD OBCIĄŻENIA OSIĄ 115 kN)	77
5.8. OBLICZENIA PORÓWNAWCZE DLA NOŚNEGO PODŁOŻA - UGIĘCIA, ODKSZTAŁCENIA W WARSTWACH ASFALTOWYCH (OBLICZENIA OD OBCIĄŻENIA OSIĄ 115 kN)	81
LITERATURA.....	84

Streszczenie

Niniejszy raport z badań, dotyczący zagadnień związanych ze szczepnością międzywarstwową w konstrukcji nawierzchni drogowej, stanowi część z I etapu wykonanych prac zamówionych przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie, zgodnie z umową Nr WILiŚ/110/002/2005. Raport nie stanowi ostatecznej wersji, jak i nie zawiera wniosków z analizowanych zagadnień w nim zawartych.

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 przedstawiono istotę szczepności międzywarstwowej w konstrukcji nawierzchni, skutki jej braku, omówiono wpływ szczepności na trwałość nawierzchni, przybliżono przyczyny utraty szczepności pomiędzy warstwami asfaltowymi. Przedstawiono materiały stosowane do warstwy szczepnej i ilości niezbędne podczas jej aplikacji. Dokonano przeglądu metod badania i oceny szczepności międzywarstwowej (metody niszczące i nieniszczące) oraz kryteriów oceny szczepności, współpracy warstw asfaltowych.

W części badawczej opisano badania laboratoryjne i terenowe szczepności międzywarstwowej wykonane dla potrzeb opracowania. Przedstawiono także wstępne analizy obliczeniowe wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni, wykorzystując metody mechanistyczno-empiryczne dla modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej oraz wyniki badań terenowych i laboratoryjnych.

W wykonanych badaniach szczepności międzywarstwowej wykorzystano metodę Leutner'a, która polega na bezpośrednim, wolnym od momentów zginających przebiegu ścinania w płaszczyźnie połączenia rdzeni wiertniczych, która odpowiada granicy warstw konstrukcji nawierzchni. Maksymalna siła ścinająca oznacza stan zniszczenia powiązania międzywarstwowego, przy którym powiązanie pomiędzy dwoma warstwami ulega zniszczeniu. Przebadano próbki:

- przygotowane w laboratorium, zagęszczane małym walcem drogowym, z warstwą szczepną nanoszoną natryskowo, a następnie odwiercane, jak i,
- próbki odwiercone z istniejących nawierzchni drogowych.

Analizy obliczeniowe dotyczyły wpływu szczepności na słabym podłożu:

- na ugięcia, naprężenia i odkształcenia w nawierzchni od obciążeń osią 115kN,
- siły poziomej na naprężenia rozciągające w warstwach asfaltowych.

Porównano naprężenia i odkształcenia działające w dwóch kierunkach X i Y od osi pojazdu, wyznaczano naprężenia ścinające generowane przez oś pojazdu, jak i porównano otrzymane wyniki z wynikami obliczeń na nośnym podłożu.

BADANIA I OCENA WPŁYWU SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ

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.

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 i badania laboratoryjne zmierzają mają do uściślenia instrukcji i wymagań dotyczących szczepności międzywarstwowej przy zastosowaniu metody Leutner'a 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.

II Etap (zakres na rok 2006)

- 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, obciążenie 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 uwzględniać zmienną szczepność w projektowaniu strukturalnym konstrukcji nawierzchni.

Biorąc pod uwagę zagrożenie obniżenia trwałości zmęczeniowej (żywołności) nawierzchni asfaltowych poprzez zakłócenia szczepności międzywarstwowej, 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. Szczepność międzywarstwowa i jej mechanizm

Szczepnością międzywarstwową określamy połączenie między poszczególnymi warstwami w konstrukcji nawierzchni. Pożądane jest by warstwy ułożone bezpośrednio jedna na drugiej stanowiły całość, ciągłość, tworzyły zwarty kompleks budowlany (konstrukcję). Gdyż pełne połączenie międzywarstwową gwarantuje niezakłóconą pracę nawierzchni zgodnie z założeniami projektowymi, czyli przenoszeniem obciążeń od ruchu pojazdów na podłoże.

Połączenie międzywarstwowe pełni funkcję:

- zwiększa wytrzymałość zespołu warstw konstrukcji nawierzchni,
- uniemożliwia penetrację wody między warstwami.

Szczepność międzywarstwowa w konstrukcji nawierzchni to złożone zjawisko, w którym działa wiele czynników, lecz główne to: sklejenie warstw i wspólne zazębienie się warstw nawierzchni.

Sklejenie warstw następuje na skutek odpowiedniej zawartości asfaltu w mieszance, który pełni funkcję lepiszcza, kleju. Tak bywało w przypadku dawniej budowanych nawierzchni. Warstwy asfaltowe miały duże zawartości asfaltu i kruszywo drobnoziarniste. Gwarantowało to wysoką szczepność, ale nie zapewniało wystarczającej sztywności mieszanki. Dzisiejsze mieszanki mają inny skład, konieczny jest sprysk powierzchniowy np. za pomocą emulsji asfaltowych. Dużą rolę odgrywa również wałowanie mieszanki gdyż proces ten „wyciska” asfalt z mieszanki na powierzchnię styku dwóch warstw. Asfalt zaś ma większą zdolność do szczepiania warstw.

Zazębienie się warstw polega na tym, że ziarna kruszywa górnej warstwy klinują się z ziarnami warstwy dolnej. W procesie szczepiania zimna warstwa dolna jest rozgrzewana przez wbudowywaną gorącą warstwę górną. Dzięki czemu mięknie i jest możliwe zazębienie się ziaren kruszyw obu warstw. Głównym czynnikiem przy zazębianiu się warstw jest wysoka temperatura. Zazębienie przejmują większość działających poziomych naprężeń ścinających. Najlepsze zazębienie uzyskuje się w technologii „gorące na gorące” oraz przez właściwe dobranie uziarnienia górnej mieszanki w zestawieniu z niżej leżącą.

2.2. Skutki braku szczepności międzywarstwowej

Szczepność międzywarstwowa jest zagadnieniem niezwykle istotnym, dla trwałego i prawidłowego funkcjonowania nawierzchni drogowych podatnych i półsztywnych. Skutki nieprawidłowego wykonania połączenia międzywarstwowego, w nowo projektowanej konstrukcji jak i starej konstrukcji wzmacnianej mogą być bardzo różne w skutkach, od tak zwanych „księżycowatych” spękań (patrz rys.2.1) do poślizgu całej warstwy nawierzchni (patrz rys. 2.2.). Według [3] miejsca najczęstszego występowania skutków braku szczepności międzywarstwowej występują tam, gdzie pojazdy regularnie i często hamują i przyspieszają np. przed sygnalizacją świetlną,

ponadto na łukach o mniejszych promieniach tzn. tam gdzie występują duże siły odśrodkowe oraz na odcinkach o dużych spadkach podłużnych, które generują zwiększone naprężenia ścinające w konstrukcji nawierzchni.



Rys. 2.1. Widok księżycowatych spękań na skutek braku szczepności międzywarstwowej (fot. P. Jaskuła).



Rys.2.2. Widok całkowitego poślizgu warstwy na skutek braku szczepności międzywarstwowej (fot. P. Jaskuła).

Romanoschi i Metcalf [27] również wskazują na spękania ślizgowe, jako najłatwiej zauważalne zniszczenie powstające na skutek niewłaściwego wiązania między warstwą ścieralną a następną poniżej. Spękania te występują w miejscach, gdzie zauważa się wysokie tarcie między kołami pojazdów a nawierzchnią, choć mogą wystąpić również na skutek prostego przejazdu kół pojazdu, uszkodzenia te mają wygląd zbliżony do półksiężyca i o dwóch końcach skierowanych przeciwnie do kierunku ruchu (rys.2.1).

Glet [2] wytypował i opisał trzy różne przypadki oddzielenia się warstw:

- dolna warstwa nie ma odpowiedniej spójności (kohezji); dochodzi do rozerwania warstwy;
- warstwa szepna rozrywa się;
- górna warstwa nie przylega do całej powierzchni dolnej warstwy lub nie posiada odpowiedniej spójności.

Według Judyckiego [16] i Zawadzkiego [42] skutkiem braku powiązania między warstwami asfaltowymi jest wzrost ugięcia poszczególnych warstw. Utrata szczepności międzywarstwowej bardzo mocno wpływa na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni, ze względu na duże ugięcia poszczególnych warstw, powstanie spękań zmęczeniowych w wyższych warstwach konstrukcyjnych niż na spodzie warstw asfaltowych i szybszą propagację spękań zmęczeniowych na powierzchnię. Po czym następuje wnikanie wody w spękania i postępujące niszczenie nawierzchni.

Judycki [16] stwierdza, że zmniejszenie szczepności wywołuje zmianę rozkładu odkształceń rozciągających w warstwach asfaltowych. Przy braku szczepności warstwy oddzielnie przenoszą zarówno sciskanie, jak i rozciąganie. Nawet częściowa szczepność 30% jest istotna, dopiero przy braku szczepności następuje radykalny wzrost odkształceń rozciągających.

Zachowanie się nawierzchni zależy od przyjęcia mechanizmów zniszczenia. Założmy, że: pękanie powstaje na skutek obciążenia ruchem drogowym, na spodzie warstwy bitumicznej i postępuje w kierunku warstwy wierzchniej. Dla cieńszych nawierzchni powstają pęknięcia powierzchniowe i koleiny w materiałach bitumicznych. Wtedy model obliczeniowy musi uwzględniać odkształcenia rozciągające w przypadku słabego szczepienia ze spodu każdej warstwy bitumicznej. Powstałe pęknięcia mogą postępować na spodzie każdej z warstw bitumicznych (niezależnie), a jeżeli wszystkie są słabo połączone to powodują szybsze zniszczenie nawierzchni. W przypadku warstw cienkich niepołączonych spękania powierzchniowe przenoszą się na międzywarstwie i powodują separacje warstw bitumicznych [12].

Na skutek braku powiązania oczekiwać należy większych odkształceń i szybszego powstawania kolein w okresie letnim oraz wcześniejszych strukturalnych uszkodzeń, rys, wyruszeń [36].

Dodatkowy skutek braku szczepności międzywarstwowej to powstawanie spękań w obszarze poza powierzchniami działania obciążenia z niebezpieczeństwem pompowania, nagromadzenia drobnych cząstek i zniszczenia warstwy wiążącej przy penetracji wody. [36]

Hakim i inni [11] wskazuje, że brak powiązania międzywarstwowego przyczynia się do spadku modułu sztywności „pakietu” warstw asfaltowych konstrukcji, czego skutkiem jest skrócenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni. Dzieje się tak, dlatego, że poszczególne warstwy, wzajemnie niepowiązane, posiadają mniejsze wytrzymałości na rozciąganie, wskutek czego ich trwałość jest mniejsza i dochodzi do uginania się i niewłaściwego przekazywania obciążeń. Spękania zmęczeniowe pojawiają się nie na spodzie ostatniej (dolnej) warstwy bitumicznej, a tylko na spodzie warstwy leżącej na płaszczyźnie, przy której wystąpił spadek szczepności.

2.3. Wpływ szczepności na trwałość nawierzchni

Stopień szczepienia między warstwami ma wpływ na odkształcenia nawierzchni. W przypadku słabego szczepienia międzywarstwowego, żywotność nawierzchni - obliczeniowy czas eksploatacji nawierzchni spada do 40%, jako powód podaje się wzrost naprężenia i odkształceń na spodzie warstwy podbudowy asfaltowej [36].

Według Judyckiego [16] trwałość zmęczeniowa szybko maleje, gdy szczepność międzywarstwowa ulega osłabieniu. Gdy wystąpi całkowity brak szczepności i pełny poślizg, to trwałość zmęczeniowa nawierzchni zmaleje kilka razy. Stan taki jest trudny do osiągnięcia jednak nawet przy częściowej 50% szczepności spadek trwałości zmęczeniowej jest bardzo wyraźny.

Szczepaniak [8] na podstawie francuskich wyliczeń stwierdza, że dla pewnej rozważanej konstrukcji nawierzchni dobrze złączone warstwy zapewniają 20 lat trwałości nawierzchni obciążonej ruchem 1,3-2,6 mln osi 13 t, podczas gdy dla tej samej konstrukcji nie zastosowanie żadnego lepiszcza do sklejenia warstw skraca ten okres do 7 – 8 lat (o więcej niż 60%).

Hakim [12] wskazuje, że w wyniku słabego powiązania warstw asfaltowych nawierzchni, jej trwałość spada o 40%. Wartość ta jest wynikiem badań przy pomocy FWD, gdzie obliczano moduły sztywności poszczególnych warstw nawierzchni.

Raab i Partl [20] wskazują, że 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%.

Według [12] współdziałanie wysokiej temperatury i ruchu drogowego może poprawić związanie międzywarstwową, ale pod warunkiem, że nie ma tam całkowitego braku szczepności. Podobne zjawisko, polepszenia szczepności międzywarstwowej stwierdzono po letniej eksploatacji nawierzchni opisanej przez Judyckiego [16].

Wpływ szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni może być bardzo duży i uzależniony jest to jak podaje Raab [24] m.in. od temperatury, ponieważ ma ona bardzo duży wpływ na wielkość naprężeń ścinających w poszczególnych warstwach, jak i między nimi, a także przeniesionego obciążenia.

Romanoschi i Metcalf [27] na podstawie analiz metodą elementów skończonych w przypadku nawierzchni półsztywnych stwierdzają, że:

- prawie podwaja się okres użytkowania nawierzchni, gdy warstwa wiążąca/podbudowa jest w pełni związana z podbudową cementową,
- odkształcenia rozciągające na spodzie podbudowy związaną cementem podobnie jak odkształcenia pionowe rosną, gdy zerwane jest połączenie między warstwami,
- utrata połączenia między podbudową związaną cementem a warstwą wiążącą w większym stopniu wpływa na wzrost naprężeń, niż w przypadku utraty połączenia między dwiema warstwami asfaltowymi,
- ugięcie nawierzchni wzrasta o 12% w przypadku braku szczepności w warstwach asfaltowych,

- ugięcie wzrasta o 25% - 45% w przypadku braku szczepności pomiędzy podbudową związaną cementem a warstwą asfaltową.

W przypadku nawierzchni podatnych Romanoschi i Metcalf [27] stwierdzają:

- jeżeli połączenie jest zerwane, wartość odkształceń poziomych (zarówno na spodzie jak i u góry) przesuwają się w kierunku obszaru ściskanego. W tym wypadku jako pierwsza zniszczeniu ulegnie warstwa asfaltowa leżąca ponad strefą zerwanej szczepności,.
- utrata połączenia między warstwami asfaltowymi powoduje 12% wzrost naprężeń ściskających w górnej części podbudowy z kruszywa i ponad 20% wzrost naprężeń pionowych na wierzchu podłoża gruntowego – dlatego, też kolejna strukturalna od podłoża gruntowego będzie bardziej zauważalna [27]

Według [27] powiązanie warstw asfaltowych z podbudową wpływa na trwałość zmęczeniową bardziej niż powiązanie między warstwami asfaltowymi. Ale konkretna kombinacja obciążenia poziomego i szczepności międzywarstwowej może obniżyć trwałość zmęczeniową więcej niż 300 razy w przypadku nawierzchni półsztywnych, 15 razy w przypadku nawierzchni podatnych [27].

2.4. Przyczyny utraty szczepności i rodzaje czynników wpływające na szczepność

Judycki [16] wskazuje na fakt, że w Polsce problem ze szczepnością międzywarstwową zaczął występować po wprowadzeniu sztywnych i gruboziarnistych betonów asfaltowych odpornych na deformacje trwałe, zawierających w dolnych warstwach mało asfaltu. Jednocześnie autor proponuje by częściej stosować betony asfaltowe z drobniejszym uziarnieniem, a co za tym idzie z większą zawartością asfaltu.

Glet [6] zakłócenia związania warstw asfaltowych uzależniono od czterech głównych przyczyn:

- brak fizycznego związania; warstwy leżą jedna na drugiej oddzielnie,
- związanie jest za miękkie: warstwy przesuwają się,
- występuje zbyt gruba błonka lepiszcza w warstwie sklejącej: warstwy nie są stabilne,
- występuje zbyt mało zaprawy: warstwy między sobą dotykają się tylko punktowo –ziarna kruszywa ulegają zmiażdżeniu.

Judycki w publikacji [16] przedstawił opis konkretnego przypadku, jaki wystąpił podczas remontu nawierzchni drogi o bardzo ciężkim ruchu, gdzie na pewnym dość krótkim odcinku wystąpił problem ze szczepnością międzywarstwową między warstwami podbudowy asfaltowej, układanej w dwóch przejściach. Jako przyczynę utraty szczepności wyróżniono kilka prawdopodobnych przyczyn działających jednocześnie:

- niekorzystne warunki atmosferyczne – niska temperatura około 5°C i znaczna wilgotność powietrza opóźniały rozpad emulsji i zakłócały przyczepność,

- sztywna gruboziarnista mieszanka mineralno-asfaltowa – niska zawartość asfaltu (3,8%) w mieszance 0/31,5 uniemożliwiły wciśnięcie się ziaren z górnej warstwy, by uzyskać zazębienie,
- słabe właściwości klejące emulsji asfaltowej zastosowanej do skropienia – zastosowano emulsję na bazie zwykłego asfaltu w bardzo niekorzystnych warunkach,
- prawdopodobna segregacja gruboziarnistej podbudowy 0/31,5 – tworzyły się skupiska grubych ziaren, które uniemożliwiały zazębienie się warstwy górnej.

Hakim i inni [11] wskazał inne równie ważne przyczyny braku związania międzywarstwowego takie jak:

- słaba kontrola powykonawcza,
- brak warstwy szczepnej,
- zabrudzenie dolnej warstwy i
- układanie mieszanek w zbyt niskich temperaturach.

Katastrofalne skutki może mieć nieprawidłowa przebudowa starej nawierzchni asfaltowej, jak opisano w pracy Głeta (tłumaczenie Wałęckiej) [6]. Stara warstwa ścieralna przejmuje po przebudowie całkiem nowy zakres obowiązków, któremu często nie jest w stanie sprostać, czego przyczyną mogą być osłabienie związania międzywarstwowego konstrukcji nawierzchni i jej degradacja.

Dodatkowo zauważyć można przypadki, gdzie po nowej warstwie wiążącej odbywa się ruch samochodowy, co wiąże się z pozostawianiem przez koła tych pojazdów cząstek glin i innych zabrudzeń. Powoduje to w znacznym stopniu osłabienie związania międzywarstwowego [6].

Bardzo ważnym elementem wpływającym na warunki pracy warstw szczepnych jest sposób wykonania i pielęgnacja warstwy przed wbudowaniem warstwy górnej [1]. Jest to istotne zagadnienie zarówno w przypadku konstrukcji z warstwą szczepną, opryskiem, jak i w warunkach bezpośredniego wykonywania warstw. Szczegółowe zalecenia znajdziemy w instrukcji niemieckiej [1]. Wymagania odnośnie podbudowy zakładają konieczność zwracania uwagi na:

- równomierność powierzchni, brak wykruszeń, ubytków itp.,
- chropowatość i porowatość,
- materiały oddzielające np. kurz, zanieczyszczenia, woda, resztki środków oddzielających,
- luźny materiał.

W przypadku wystąpienia wymienionych objawów należy zastosować środki zaradcze w celu oczyszczenia powierzchni.

Wpływ wody na szczepność przebadano w ramach pracy [30]. Na odcinkach testowych wyodrębniono sekcje, na których zasymulowano działanie „deszczówki”. Warstwę szczepną *ang. tack-coat* polano wodą przed wbudowaniem górnej warstwy. Dowiedziono, że woda obniżyła siły wiązania, w stosunku do równoważnych sekcji bez zastosowania wody. Siły wiązania w przypadku mokrych powierzchni rosły z czasem, ale nigdy nie osiągały wartości, jakie uzyskano na sekcjach bez „deszczówki”. W jednym przypadku nie udało się nawet pobrać próbek do badania ścinania, jako, że próbka „rozpadła się”- wystąpił całkowity brak szczepności między warstwami nawierzchni.

Hachiya i Sato [10] podają, że znaczący wpływ rodzaju warstwy szepnej ma znaczenie dopiero w wysokiej temperaturze $>30^{\circ}\text{C}$, czas rozpadu emulsji jest zależny od temperatury i wilgotności otoczenia. Podają, że 16 godzin jest niezbędne do całkowitego rozpadu emulsji, przy uwzględnieniu ekstremalnych warunków atmosferycznych i zanieczyszczonego podłoża.

Glet [6] przebadął związanie warstw trzema metodami: badanie ścinania według Leutnera, badanie przyczepności i oderwania na próbce wzorcowej w badaniu według Heroína, badanie na równi pochyłej. W wyniku tych badań autor przedstawił następujące rezultaty: na wielkość siły ścinającej i drogę ścinania duży wpływ ma rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej i typ górnej warstwy, stopień zagęszczenia warstwy, zawartość lepiszcza w dolnej warstwie konstrukcji nawierzchni.

Raab i Partl [22] przedstawili badania, dotyczące szwajcarskich nawierzchni asfaltowych. Były one wykonywane na rdzeniach pozyskanych nawierzchni i wykazały, że naprężenia ścinające na granicy warstw wiążącej i ścieralnej nowej nawierzchni zależą głównie od właściwości warstwy ścieralnej. Wykazano, że duże znaczenie dla szczepności międzywarstwowej ma zawartość lepiszcza i wolnych przestrzeni, gdzie jest to szczególnie widoczne w przypadku porowatego asfaltu i asfaltu lanego. Dla SMA $F_{\max} = 19[\text{kN}]$, natomiast dla asfaltu lanego $F_{\max} = 40[\text{kN}]$ w temperaturze 20°C .

Z wyników badań przedstawionych przez Judyckiego [16] wynika, że zasadnicza część wytrzymałości spoiny na ścinanie pochodzi z zazębienia się wzajemnego warstw, a mniejsza z siły klejącej asfaltu. Dodatkowo według autora lepszą szczepność można uzyskać przy zastosowaniu zawartości asfaltu na podbudowie asfaltowej, nie mniejszej od 4%.

2.4.1. Wpływ geosyntetyków na szczepność międzywarstwową

Zastosowanie geosyntetyku prawie zawsze powoduje spadek szczepności międzywarstwowej w konstrukcji nawierzchni. Równocześnie jednak stwierdzono, jak podaje Górszczyk i Zieliński [7] na podstawie badań właściwości zmęczeniowych, że geosyntetyk o podwyższonym module sztywności może stanowić zbrojenie układu warstw bitumicznych, zwiększając liczbę cykli obciążeń do zniszczenia belek próbnych. Stwierdzono, że wpływ szczepności międzywarstwowej na odkształcenia rozciągające warstw bitumicznych jest uzależniony także od temperatury: w okresie wyższych temperatur nawierzchni jest on znaczący, podczas gdy w niższych temperaturach staje się mniej istotny. Przeprowadzone analizy doprowadziły do następujących wniosków: w przypadku zastosowania geosyntetyku w nawierzchni bitumicznej wartość maksymalnych naprężeń rozciągających warstw bitumicznych zależy od: lokalizacji geosyntetyku, jego sztywności i szczepności połączenia międzywarstwowego. Z analiz przeprowadzonych dla temperatury letniej, wynika, że wraz ze wzrostem szczepności połączenia geosyntetyku z warstwami asfaltowymi (wzrost współczynnika tarcia) zmniejszają się obliczone odkształcenia rozciągające, jest to bardziej widoczne dla geosyntetyków o niższych sztywnościach (geosyntetyki o wysokiej sztywności częściowo rekompensują zmniejszenie szczepności

międzywarstwowej). Według [7] przy zastosowaniu geosyntetyków o dużych sztywnościach spadek szczepności o 50% nie powoduje jeszcze znaczącego wzrostu odkształceń rozciągających, podczas, gdy zastosuje się geosyntetyki o małych sztywnościach różnica ta jest bardzo duża. Natomiast w obliczeniach dla niższych temperaturach wpływ szczepności pomiędzy geosyntetykiem a warstwami bitumicznymi jest znacznie niższy.

Zgodnie z [7] największe różnice w wielkości obliczonych odkształceń rozciągających stwierdzono przy braku szczepności międzywarstwowej ($f_i=0$), gdzie obliczone odkształcenia w przypadku zastosowania geosyntetyków o wysokiej sztywności mogą być o 15-40% niższe niż w przypadku geosyntetyków o małej sztywności lub nawierzchni bez geosyntetyku, zaś w przypadku współczynnika tarcia $f_i=1$ niższe o odpowiednio 5-30%.

Raab i Partl [23] w badaniach szczepności międzywarstwowej pomiędzy starą nawierzchnią betonową a nową nakładką asfaltową wykazali, że zastosowane systemu SAMI (*ang. stress absorbing membrane interlayers*) w postaci geosyntetyku do przeciwdziałania spękanom odbitym znacznie osłabia współpracę pomiędzy warstwami. Odcinki nawierzchni bez warstwy SAMI zachowują szczepność przy ścinaniu około 16 kN, co odpowiada wytrzymałości na ścinanie $0,9 \text{ N/mm}^2$. Natomiast w nawierzchni z systemami SAMI: w formie stalowej siatki spada szczepność do 2,5 kN, co odpowiada wytrzymałości na ścinanie $0,14 \text{ N/mm}^2$, a z matą szklaną do 6,6 kN i $0,37 \text{ N/mm}^2$.

Hughes za pomocą aparatu skrzynkowego do badania ścinania (*ang. shear box*) wykazał, że geosyntetyki mogą osłabiać wewnętrzną strukturę betonu asfaltowego do 20% [20].

2.5. Materiały do warstwy szczepnej

Obecnie do skrapiania nawierzchni coraz częściej stosuje się emulsje asfaltowe zamiast asfaltu upłynnionego. Według Błazejowskiego [2] do skropienia międzywarstwowego należy stosować emulsje specjalnie do tego celu wyprodukowane. Tworzy się je z asfaltu o penetracji poniżej 70 j.p. Stosuje się emulsje szybko rozpadowe do połączeń dwóch warstw asfaltowych, dzięki czemu można szybko rozpocząć układanie kolejnej warstwy asfaltowej. Natomiast w przypadku połączenia warstw asfaltowych z podbudową nieasfaltową stosuje się emulsje wolno rozpadowe (K-3) lub nadstabilne (K-4), by mogły penetrować w głąb podbudowy.

Szczepaniak [32] wykonał szereg badań dotyczących wpływu rodzaju emulsji na jakość połączenia międzywarstwowego konstrukcji nawierzchni. W wyniku tych badań stwierdzono, że im twardszy asfalt zastosowano w emulsji, tym uzyskano wyższą wartość naprężenia ścinającego złącza międzywarstwowego. Dokonano także sprawdzenia, że zastosowanie emulsji z asfaltami 100/150 i 160/220 powoduje osłabienie złącza dwóch warstw. W wyniku tych badań sformułowano zalecenia by do wykonania połączenia międzywarstwowego nawierzchni stosować emulsje asfaltowe wykonane z asfaltu rodzaju 50/70 i zaprzestać stosowania emulsji asfaltowych wykonanych z asfaltu rodzaju 160/220.

Z wyników badań zamieszczonych w artykule [32] wynika, że optymalna ilość emulsji waha się od 0,2 do 0,3 kg/m² w przeliczeniu na czysty asfalt. W tych samych badaniach zauważono także, że zastosowanie emulsji asfaltowej modyfikowanej lateksem w ilości 5% nie dała oczekiwanego wzrostu siły złącza międzywarstwowego.

W Polsce do skropienia warstw używa się emulsji asfaltowych najczęściej zwykłych (D50/70), rzadziej modyfikowanych polimerami (zawartość 4 lub 8%) [19a].

Według zaleceń niemieckich do skropienia międzywarstwowego stosuje się: bitumiczne emulsje, bitumiczne rozpuszczalniki emulsyjne, bitumiczne emulsje zawierające rozpuszczalnik oraz bitumiczne emulsje przyczepne *niem. Haftkleber* [1]. Według informacji uzyskanych od inżynierów niemieckich Haftkleber składa się asfaltu (około 35%), rozpuszczalnika (około 5%) i wody (około 60%). Jest to rzadka ciecz, która penetruje z łatwością warstewkę pyłu i ewentualnych innych zabrudzeń na powierzchni warstwy asfaltowej. Jest chętnie w Niemczech stosowana przy remontach starych nawierzchni.

Natomiast wg. FDOT (Florida Department Of Transportation): szybkorozpadową emulsję asfaltową RS-1 lub RS-2 dla robót dziennych oraz rozgrzany asfalt o odpowiedniej klasie lepkości AC-5 [30].

Jak podaje [6] istnieje pięć różnych sposobów zapewnienia związania warstw asfaltowych: spryskanie środkiem sklejającym, spryskanie emulsją modyfikowaną, spryskanie z posypaniem kruszywa, warstwa szepna i podgrzanie spodniej warstwy.

2.6. Zalecenia stosowania warstwy szepnej

Działanie warstwy szepnej zależy w dużym stopniu od grubości (ilości) zastosowanego materiału do sprysku. Warstewka powinna mieć odpowiednią grubość, jeżeli nawierzchnia ma spełniać projektowane założenia. Ilość wymaganej warstewki sprysku określana jest w kg/m² lub l/m² z reguły podawane w przeliczeniu na czysty asfalt, choć w Niemczech tyczy się to ilości emulsji użytej do sprysku.

W naszym kraju warunki te określone są wg PN-S-96025:200 (tabl.6.21). Przedstawione w kg/m², a ilość zależna jest od tego czy ma być to warstwa pod warstwy asfaltowe czy do połączenia dwóch warstw asfaltowych, jak również zależy od materiału, z jakiego zbudowane są warstwy [Piłat].

Według Romanoschi [27] to czy zastosujemy warstwę szepną zależy od przepisów stanowych. Niektóre stany dokładnie precyzują użycie *tack-coat*, w innych nie wymaga się (a przynajmniej nie jest to sformalizowane).

Bardzo dokładnie zagadnienie opisane jest w instrukcjach niemieckich [1]. Określa się, iż lepiszcze musi posiadać doskonałe właściwości rozpylające (płynność) jak również dobrą przyczepność. Rozpylana warstwa musi być równomierna, należy unikać koncentracji lepiszcza (kałuż). Zalecane dozowanie podane jest w [1] i zależy

od: szorstkości i porowatości podbudowy, zawartości zaprawy w górnej warstwie (powierzchni) podbudowy, zawartości lepiszcza i zaprawy w nowej mieszance.

Zaleca się stosowanie skrapiarek automatycznych, stosowanie skrapiarek ręcznych jest nie zalecane. Spryskiwane powierzchnie muszą być wyłączone dla ruchu. Należy również przewidzieć odpowiedni okres na częściowe wyschnięcie nałożonej warstewki zanim zacznie się wbudowywać następną warstwę nawierzchni.

W tablicy 1 zestawiono polskie wymagania dla warstwy szepnej do warstw nieasfaltowych, natomiast w tabeli 2 do warstw asfaltowych.

Tablica 1. Wymagania polskie dla warstwy szepnej do warstw nieasfaltowych

Lp	Przepis	Materiał	Miejsce	Ilość* [kg/m ²]	Temperatura
1	OST D-04.03.01 Oczyszczenie i skropienie	-kationowe emulsje średniorozpadowe wg WT. EmA-1994 -upłynnione asfalty średniorozpadowe wg PN-C-96173	Podb. nieasfaltowe	0,4-1,2	20-40°C
				0,4-0,6	D200: 140-150°C D300: 130-140°C
2	PN-96025:2000	Emulsja asfaltowa i asfalt upłynniony	Podb. tłucz.-MMA	0,7-1,0	Wg producenta
			KSM-MMA	0,5-0,7	
			CHB, ST.C-MMA	0,3-0,5	
3	KTNPiP 1997	Emulsja asfaltowa Asfalt upłynniony	Podb. tłucz.-MMA	0,7-1,0	Wg producenta
			KSM-MMA	0,5-0,7	
			CHB, ST.C-MMA	0,3-0,5	

* - ilość pozostałego asfaltu po rozpadzie lub odparowaniu

Objaśnienia skrótów użytych w tablicy:

MMA – mieszanka mineralno-asfaltowa, KSM – Kruszywo stabilizowane mechanicznie, CHB – chudy beton, ST.C – stabilizacja cementem

Tablica 2. Wymagania polskie dla warstwy szepnej do warstw asfaltowych

Lp	Przepis	Materiał	Miejsce	Ilość* [kg/m ²]	Temperatura
1	OST D-04.03.01 Oczyszczenie i skropienie	-Kationowe emulsje szybkorozpadowe wg WT. EmA-1994 -Upłynnione asfalty szybkorozpadowe wg PN-C-96173 -asfalty drogowe D200 lub D300 wg PN-C-96170 za zgodą Inżyniera	Podbudowy asfaltowe i warstwy z mieszanek MMA	04-1,2	20-40°C
				D200, D300-0,4-0,6	D200: 140-150°C D300: 130-140°C
2	PN-96025:2000	Emulsja asfaltowa i asfalt upłynniony	Podb.MMA-MMA	0,3-0,5	Wg producenta
			MMA frez. – MMA	0,2-0,5	
			Podb. MMA -podb. MMA	0,3-0,5	
			W.wy./wzm.-MMA	0,3-0,5	
			W.w.- MMA	0,1-0,3	
			W.śc.- MMA	0,1-0,3	
3	KTNPiP 1997	Emulsja asfaltowa Asfalt upłynniony	Podb. MMA -MMA	0,3-0,5	Wg producenta
			W.w. MMA - MMA	0,1-0,3	
4	Zeszyt 48 IBDiM 1995	Emulsja asfaltowa 50%	Nowe warstwy	0,15-0,25	Wg producenta
5	Zeszyt 50 IBDiM 1995	Emulsja asfaltowa 50% modyfikowana	w.w.-CWS	0,2-0,3 0,3	Wg producenta
		Asfalt upłynniony modyfikowany	w.w. – CWS	0,15-0,2 0,3	Wg producenta

* - ilość pozostałego asfaltu po rozpadzie lub odparowaniu

Objaśnienia skrótów użytych w tablicy:

MMA – mieszanka mineralno-asfaltowa, KSM – Kruszywo stabilizowane mechanicznie, CHB – chudy beton, ST.C – stabilizacja cementem, W.wy. – warstwa wyrównawcza, W.w. – warstwa wiążąca, CWS – cienka warstwa ścieralna

W tablicy 3 i 4 przedstawiono aktualnie obowiązujące wymagania niemieckie dla sprysku międzywarstwowego [1]. W Niemczech do konstrukcji nawierzchni o klasie nośności SV, I – III (najcięższy ruch) zaleca się stosowanie emulsji na bazie asfaltów modyfikowanych Pm OB. Art. CU 60K, zgodnie z tablicą 3. Dla klas nośności IV do VI zaleca się zgodnie z tablicą 4 zastosowanie emulsji na bazie zwykłych asfaltów U60K, a przy podbudowach o zamkniętej strukturze emulsję klejącą, zwierającą rozpuszczalniki (*Haftkleber*). Emulsje asfaltowe o zawartości lepiszcza 70%, ze względu na ich dużą lepkość, dużą zawartość lepiszcza oraz trudną dozowność przy niewielkiej ilości, zasadniczo nie powinny być stosowane do spryskiwania [1].

Tablica 3. Zalecane ilości emulsji modyfikowanej polimerami PmOB Art. C U 60K do sprysku międzywarstwowego dla dróg klasy SV, I-III w Niemczech [1].
(liczby podane w tablicy dotyczą ilości emulsji a nie pozostałego lepiszcza [kg/m²])

Warstwa niżej leżąca		Warstwa wyżej leżąca		
		Podbudowa z mma	Wiążąca z mma	SMA
Podbudowa z mma	Świeżo wykonana	0,15-0,25	0,25-0,35	Indywidualnie
	Frezowana	0,25-0,35	0,25-0,35	Indywidualnie
	Porowata, lub z wykruszającym się grysem	0,30-0,40	0,30-0,50	Indywidualnie
Wiążąca z mma	Świeżo wykonana	-	Indywidualnie	0,15-0,25
	Frezowana	-	0,25-0,35	0,25-0,35
	Porowata lub z wykruszającym się grysem	-	0,30-0,50	0,25-0,35

Tablica 4. Zalecane ilości emulsji zwykłej U 60K do sprysku międzywarstwowego dla dróg klasy IV-VI w Niemczech [1].
(liczby podane w tablicy dotyczą ilości emulsji a nie pozostałego lepiszcza [kg/m²])

Warstwa niżej leżąca		Warstwa wyżej leżąca					
		Podbudowa z mma	Wiążąca z mma	Beton asfaltowy		SMA	
Podbudowa z mma	Świeżo wykonana	0,15-0,25	0,25-0,35	0,15-0,25	0,20-0,30*	indywidualnie	
	Frezowana	0,25-0,35	0,25-0,35	0,25-0,35	0,20-0,30*	indywidualnie	
	Porowata, lub z wykruszającym się grysem	0,30-0,40	0,30-0,50	0,25-0,35		indywidualnie	
	zabrudzona	-	0,20-0,30*	0,20-0,30*		indywidualnie	
Wiążąca z mma	Świeżo wykonana	indywidualnie	indywidualnie	0,15-0,25	0,15-0,25*	0,15-0,25	0,15-0,25*
	Frezowana	indywidualnie		0,25-0,35	0,20-0,30*	0,25-0,35	0,25-0,35*
	Porowata lub z wykruszającym się grysem	indywidualnie	indywidualnie	0,30-0,40		0,25-0,35	
	zabrudzona	indywidualnie	indywidualnie	0,20-0,30		0,20-0,30*	

* - wartości odpowiadają asfaltowego środka klejącego Haftkleber

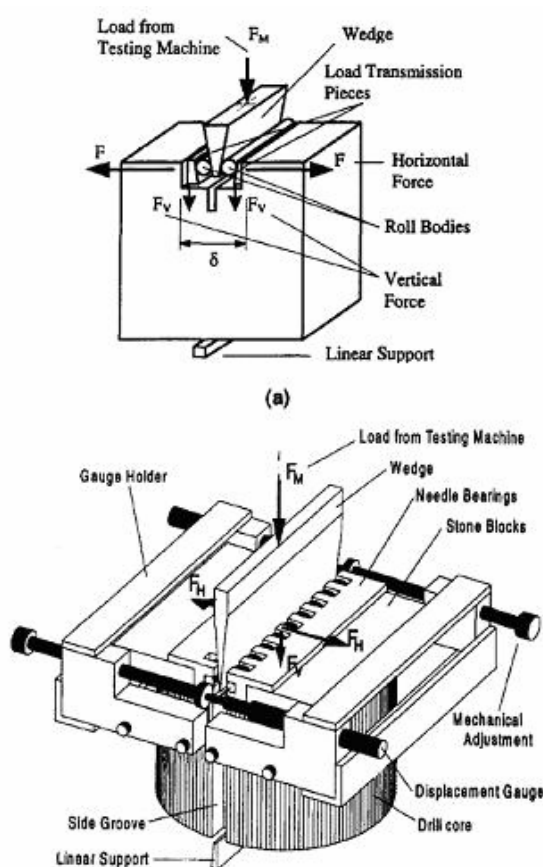
2.7. Badania szczepności

Badania szczepności międzywarstwowej wykonywane są wg następujących schematów badawczych:

- rozszczepianie klinem,
- odrywanie, metoda pull-off,
- próba skręcania,
- proste badanie ścinania,
- ścinanie w aparacie Leutnera,
- ścinanie przy poziomym ściskaniu,
- dynamiczne impulsy, badania nieniszczące.

2.7.1. Rozszczepianie klinem

Pierwsze prace nad szczepnością międzywarstwową warstw asfaltowych nawierzchni przeprowadzał Krenkel w 1957 roku, który odporność na ścinanie ustalił za pomocą uderzenia klina [31]. Spadający ciężar z określonej wysokości na uderzeniowy klin, który osadzony był w próbce asfaltowej wywoływał określone siły. Miarodajną siłą była ta, która powstawała przy określonej liczbie uderzeń.



Metodę klina rozwinął Tscheg w 1986 roku, który zoptymalizował obliczanie wyników za pomocą koła Mohr'a i uzależnił od wielkości próbek.

Zasada badania. W próbce wycina się prostokątny rowek i nacina się warstwę szczepną na dnie rowka –miejsce, od którego postępuje pęknięcie wraz ze wzrostem obciążenia. Siła ściskająca od maszyny obciążającej przekazywana jest poprzez klin i specjalne płytki; dla zmniejszenia wpływu tarcia podłożone są też wałeczki. Rozszczepienie powodowane jest przez powstającą siłę poziomą, której wartość jest prosta do wyznaczenia i zależy od smukłości użytego klina. Przy pomocy dwóch czujników (umieszczonych na linii działania siły poziomej) mierzone jest przemieszczenie „na boki” rozczepianych warstw. W sposób ciągły rejestrowane są trzy wartości w trakcie testu: wartość obciążenia i przemieszczenie boczne warstw; tworzony jest wykres obciążenie

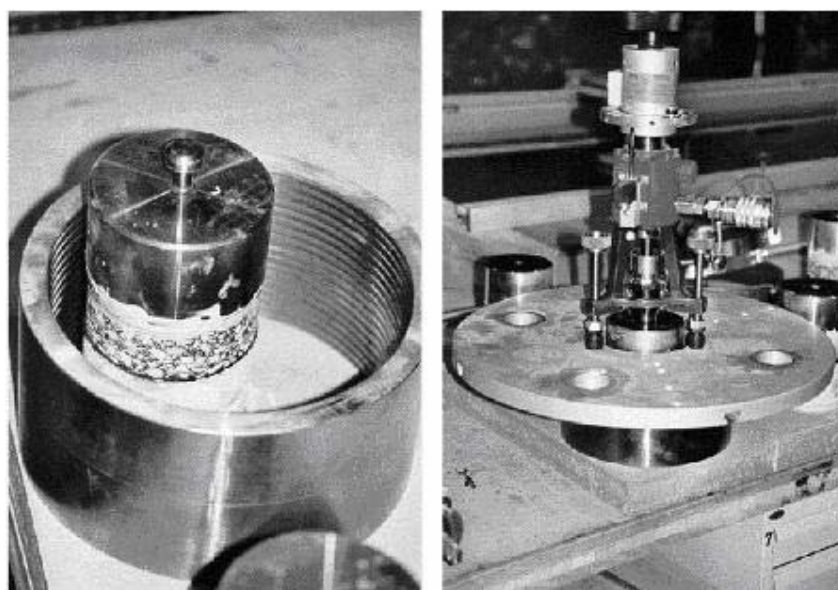
Rys. 2.1. Metoda badania szczepności poprzez rozszczepianie klinem [33].

– przemieszczenie, energię potrzebną do rozszczepienia warstwy wyprowadza się na podstawie wielkości obszaru pod wykresem.

W badaniu stosuje się próbki cylindryczne, jak i prostokątne, z różnym położeniem warstwy szepnej.

2.7.2. Metoda Pull-off

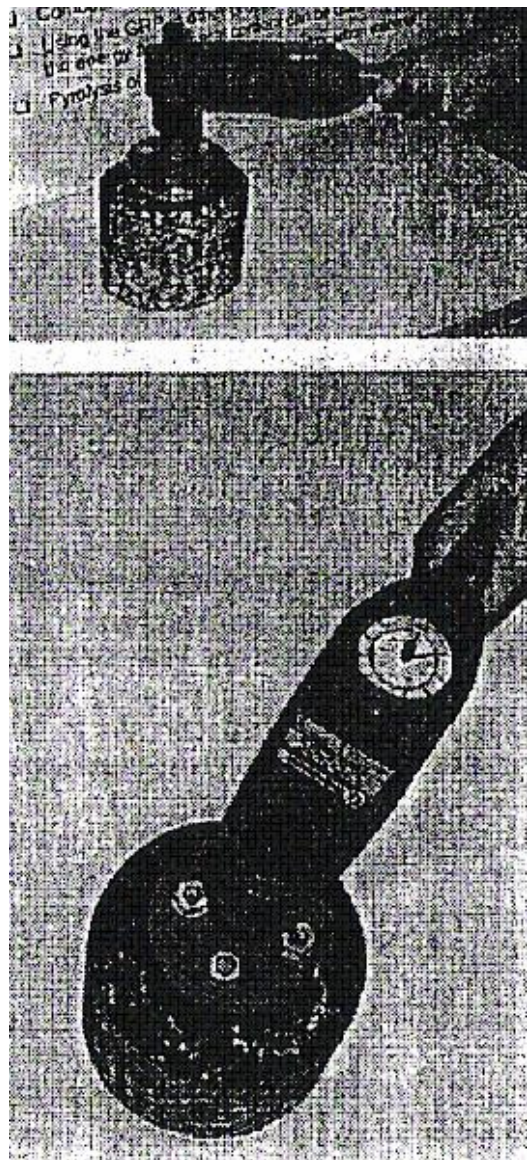
Metoda Pull-off jest stosowana w Niemczech do sprawdzania napraw elementów betonowych. Fenz [31] wskazuje, że metoda nadaje się sprawdzania połączeń cienkich warstw ścieralnych z mieszanek mineralno-asfaltowych. W nawierzchni wierce się rdzeń na głębokość poniżej badanej warstwy szepnej. Następnie na wierzch wywierconego rdzenia nakleja się metalową płytkę, a do niej mocuje się urządzenie dynamometryczne, którym wykonuje się test odrywania, ze stałą siłą (patrz rys. 2.2). Badanie przeprowadza się w temperaturze $+10^{\circ}\text{C}$. Jeżeli rdzenie badane są w laboratorium to należy je przykleić do płyty betonowej, będącej podstawą stanowiska badawczego. W Niemczech badanie jest wymagane dla cienkich warstw ścieralnych na zimno.



Rys. 2.2. Widok próbki podczas badania odrywania – pull-off [23].

2.7.3. Metoda skręcania

Jako pierwszy metodę skręcania opublikował Velske w 1982 roku [31]. Próbki Marshalla obciążone symetrycznie stałym ciężarem (siłą), poddawane są skręcaniu. Najstabszy przekrój określa wynik badania w temperaturze 40°C.



W Wielkiej Brytanii badanie skręcania (*ang. Torque Bond Test*) polega na zasadzie działania klucza dynamometrycznego [20]. Badanie jest przydatne także w warunkach terenowych. Wykonuje się wiercenie o średnicy 100mm lub 150 mm w warstwie mieszanki aż na głębokość poniżej 20 mm badanej warstwy szepnej. Następnie na wierzch nakleja się metalową płytkę, a do niej mocuje się urządzenie dynamometryczne, którym wykonujemy test ścięcia (patrz rys. 2.2). Podczas badania należy przykładać z możliwie stałą prędkością obrotową moment. Próba skręcania musi się zakończyć w ciągu 30-90 sekund. Po zerwaniu zapisuje się:

- czas do ścięcia,
- maksymalny moment obrotowy,
- temperatura na granicy warstw,
- opis granicy warstw.

Jako wynik próby skręcania podaje się wytrzymałość na ścinanie na granicy warstw:

$$\tau = \frac{12 * M * 10^6}{\pi * D^3},$$

gdzie:

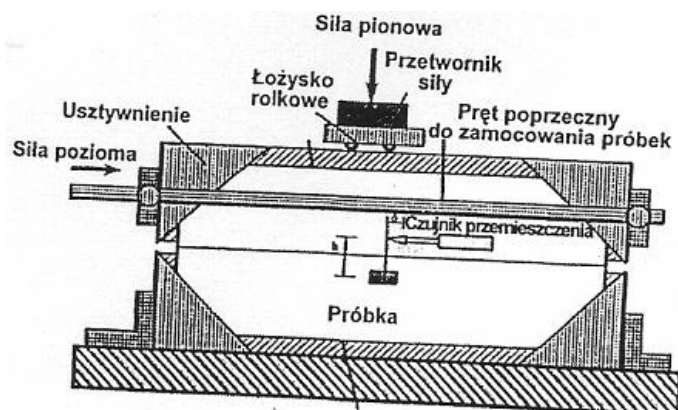
τ - wytrzymałość na ścinanie [kPa],
 M - maksymalny moment obrotowy [Nm],
 D - średnica rdzenia [mm].

Rys. 2.2. Badanie skręcania [20].

2.7.3. Proste badanie ścinania

W 1978 r Uzan i inni wprowadzili do badania mieszanek mineralno-asfaltowych specjalnie przystosowane urządzenie, które odpowiada zasadzie badania bezpośredniego ścinania w skrzynce z mechaniki gruntów (*ang. shear box*) [20]. Tu oprócz pomiaru ścinania można regulować obciążeniem pionowym w czasie

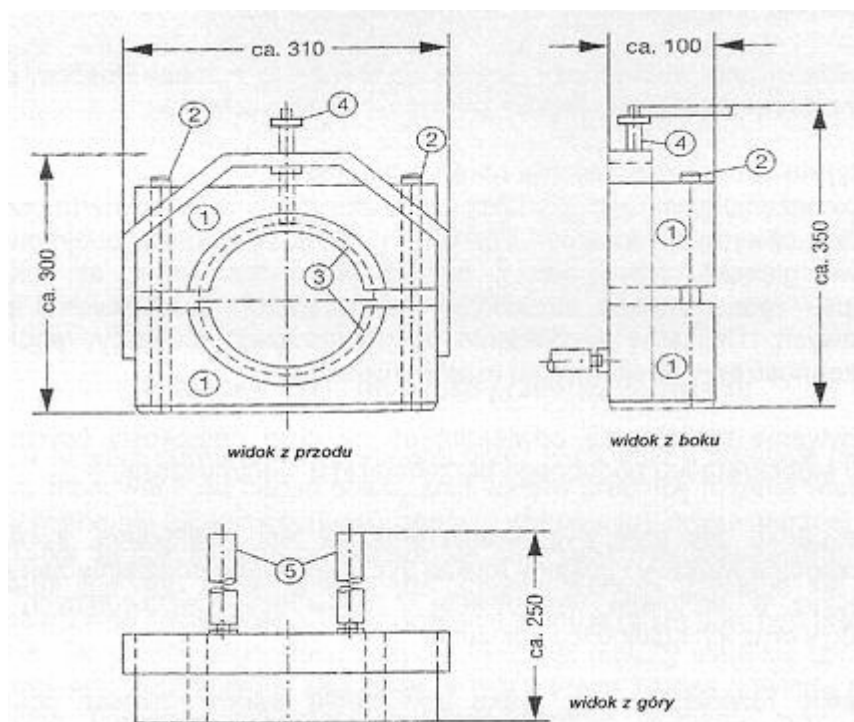
badania. W Wielkiej Brytanii w 1986 roku aparat skrzynkowy zastosował Hughes [20].



Rys. 2.5. Schemat aparatu skrzynkowego zaadaptowanego do badań mieszanek mineralno-asfaltowych [20].

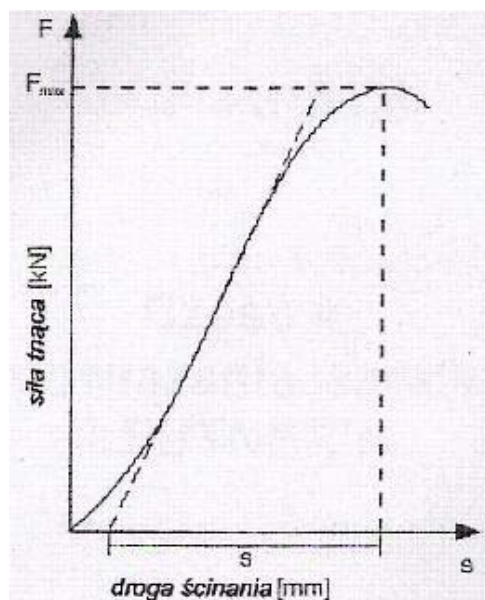
2.7.4. Metoda Leutner'a

Początek badań ścinania datujemy na koniec lat 70 XX wieku. Związany jest on z osobą niemieckiego badacza Leutner, obecnie profesora z Politechniki w Karlsruhe, który uważany jest za twórcę pierwszego aparatu do badania wytrzymałości warstw szczepnych. Działanie tego aparatu (znanego obecnie jako aparat Leutnera) opiera się na metodzie bezpośredniego ścinania.



Rys. 2.2. Aparat Leutnera do ścinania próbek [36].

Dokładne działanie tej aparatury jak również sposób badania są przedmiotem instrukcji [36]. Badanie wykonuje się je na próbkach rdzeniowych średnicy 150mm i mierzy się maksymalną siłę ścinającą, przy której następuje uszkodzenie warstwy szcypnej – zerwanie w temperaturze 20°C. Siła ścinająca jest jedyną siłą działającą na próbkę w trakcie badania. Instrukcja opisuje dokładny sposób pobierania próbek i warunki niezbędne, jakie powinny wykazywać pobrane próbki. Badanie stosuje się jako badanie kontrolne przed otwarciem nowej drogi do ruchu. Badanie określa wpływ sklejenia i zazębienia się próbek.



W teście Leutnera musimy mieć możliwość: regulacji prędkości przesuwu szczek ściskających, normalnie równej 50mm/min oraz równoczesnego zapisu wykresu siła-droga ścinania oraz utrzymywania stałej temperatury próbki.

Naprężenie ścinające wyznacza się z wzoru:

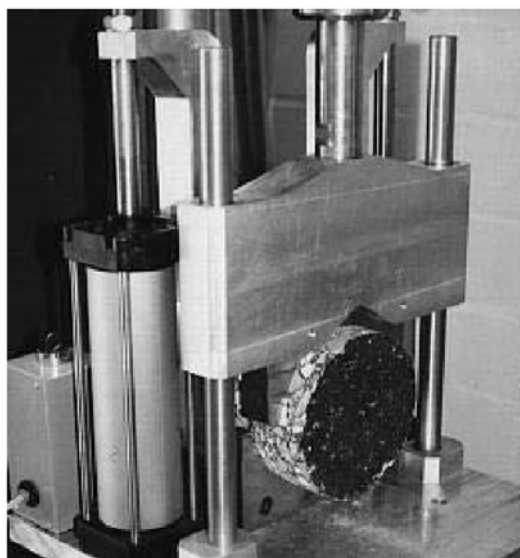
$$\tau = \frac{\max P}{A} = \frac{\max P}{\pi * D^2 / 4}$$

gdzie:

maxP – maksymalna siła ścinająca [kN],
A – powierzchnia przekroju próbki [mm²],
D – średnica próbki [mm].

Rys. 2.3. Wykres z badania

Metoda Leutnera była rozwijana i modyfikowana przez Raab'a i Partl'a w instytucie EMPA w Szwajcarii [24]. Powstało urządzenie LPDS (*ang. Layer-Parallel Direct Shear*), działające na tej samej zasadzie, lecz z dokładnym, pneumatycznym mocowaniem próbki do badania.



Badacze wprowadzili dodatkowy parametr - sztywność ścinania, definiowana wzorem:

$$S_{\max} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta w} \right)_{\max}$$

gdzie:

S_{max} – sztywność ścinania [kN/mm],
ΔP – maksymalny przyrost siły ścinającej podczas badania [kN],
Δw – maksymalny przyrost drogi ścinania [mm].

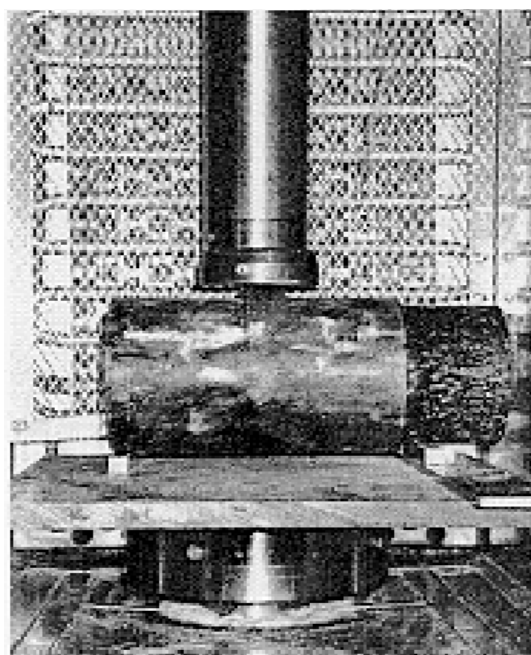
Rys. 2.4. Widok urządzenia LPDS, do ścinania [24].

Prosty przyrząd opierający się na zasadzie prostego ścinania przedstawili także Amerykanie [30]. Postanowili stworzyć nową maszynę, która byłaby prosta w działaniu, imitowała czyste ścinanie i pozwalała na użycie różnych parametrów testowych (metoda obciążania, wielkość obciążenia, temp itp.).

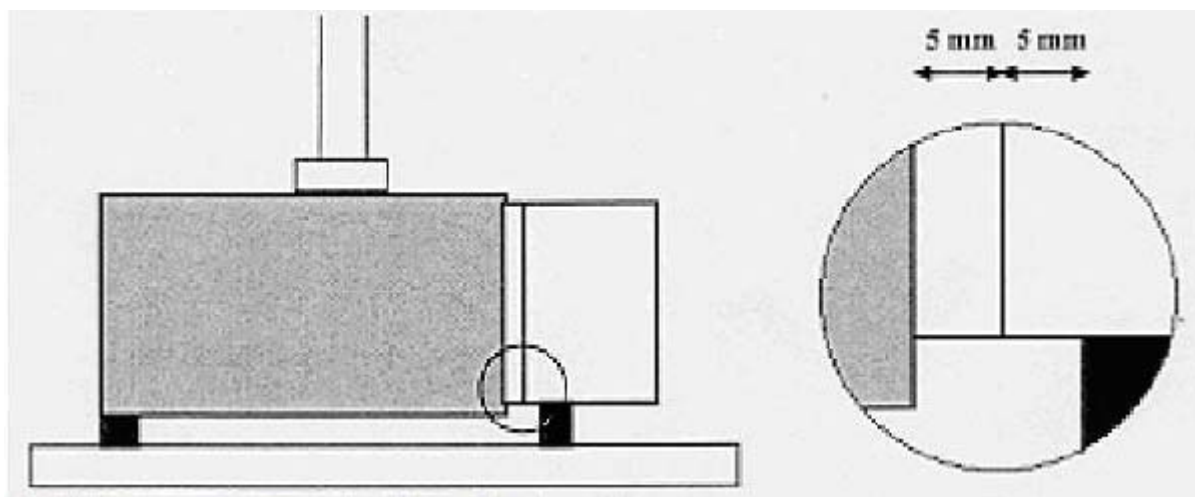


Jako aparat wyjściowy wybrano sprzęt służący do pomiaru wytrzymałości na ścinanie między cienką warstwą betonu wbudowaną na warstwie mieszanki mineralno asfaltowej „na gorąco”. Na jego podstawie stworzono aparat, który „bada” próbki drogowe o średnicy 150mm. Wszelkie założone parametry są nastawne, a aparat jest dostosowany do połączenia z typową maszyną obciążającą używaną w większości laboratoriów.

Rys. 2.5. Przyrząd do badania ścinania międzywarstwowego z USA [30].



Bardzo prostą metodę oceny warstwy szcypnej przy ścinaniu opracowano na Politechnice Katalońskiej w Hiszpanii [15]. Wycięte próbki z nawierzchni o średnicy 100 mm montowane są w rurze stalowej o zbliżonej średnicy, tak by wystawała jedna warstwa poza koniec rury (patrz rys. 2.3). Następnie w schemacie belki wolnopodpartej, jedną podporę stanowi koniec rury, drugą stanowi wysunięta próbka (np. warstwa ścieralna) wykonuje się obciążenie rury w środku rozpiętości. Badanie wykonuje się w temperaturze 40°C. W tym przypadku występuje jednak w ścinanym przekroju dodatkowo moment zginający.

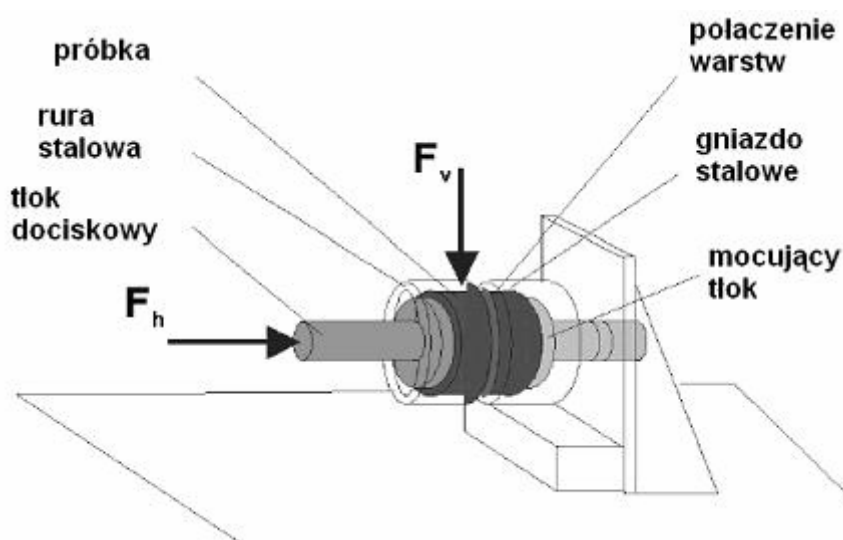


Rys. 2.5. Badanie ścinania [15]

W niektórych krajach badania ścinania zostały znormalizowane: w Austrii, Szwajcarii, Włoszech oraz określono konkretne wymagania wytrzymałości na ścinanie czy siły ścinającej.

2.7.5. Ścinanie przy poziomym ściskaniu

Inną metodą opartą na ścinaniu omówiono w artykule [27]. Próbki wycięte z nawierzchni o średnicy 95 mm poddaje się badaniu w teście ścinania, lecz jednocześnie z siłą ścinającą próbka jest obciążana poziomo działającą siłą, prostopadłą do płaszczyzny ścinania. Schemat badania przybliża rzeczywisty stan naprężeń w pracy nawierzchni.



Rys. 2.4. Schemat badania ścinania przy poziomym ściskaniu [27].

2.7.6. Dynamiczne impulsy

Badanie FWD

Ostatnią z omawianych zasad badania warstw szepnych jest metoda nieinwazyjna opisana przez Hakima [12]. Proponuje on wykorzystanie powszechnie stosowanego ugięciomierza FWD do badania szczepności warstw.

Do stworzenia metody pomocne były badania wiertnicze, jak również badanie za pomocą dynamicznej sondy stożkowej. Ideą jest stworzenie metody iteracyjnej, dzięki której na podstawie danych tylko z FWD możemy wnioskować o szczepności warstw.

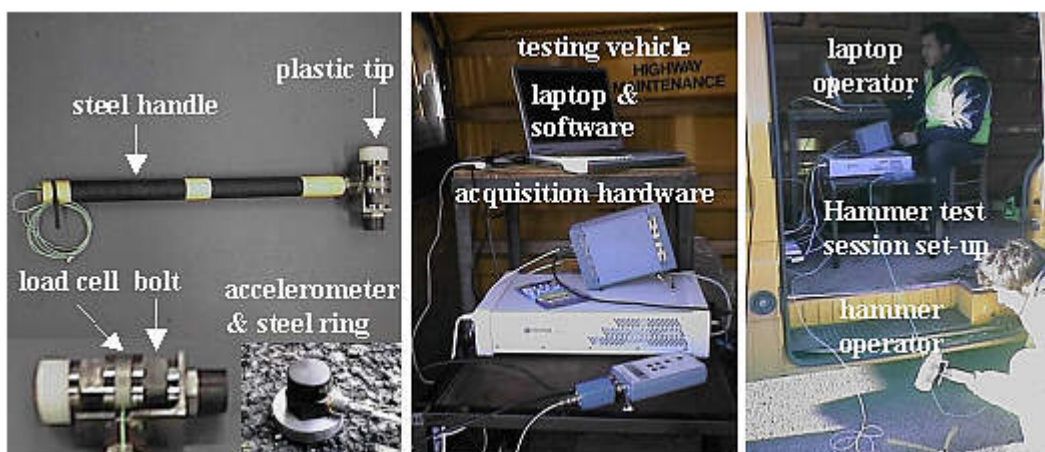
FWD na podstawie impulsowo wprowadzanych obciążeń, powoduje powstanie ugięć nawierzchni, które mierzone w różnych odstępach od centrum obciążenia dają nam czasie ugięć. Na podstawie ugięć możemy wnioskować o sztywności warstw. Metoda Hakima zakładała następnie dwu etapowy sposób analizowania, którym porównywano rzeczywiste pomierzone ugięcia z ugięciami obliczonymi (dla założonych warunków brzegowych odnośnie szczepności) zebranymi w stworzonym banku danych. Poprzez wielokrotne porównywanie wartości pomierzonych i obliczonych tworzy się realistyczny obraz powiązania badanych warstw nawierzchni.

Badanie dynamicznym młotem impulsowym (*ang. impuls hammer*) [29]

Nowoczesnym rozwiązaniem nieniszcząco oceniającym szczepność międzywarstwową jest badanie dynamicznym młotem impulsowym, które zostało opracowane w Nottingham w 1999 roku. Rozwiązanie to opiera się na wcześniej opracowywanej metodzie przez Nazariana i innych z 1993 roku – sejsmicznej analizie nawierzchni.

Metoda dynamicznego młotka impulsowego opiera się na zasadzie pomiaru dynamicznej reakcji nawierzchni, przy pomocy przyśpieszomierza, wywołanej impulsowym obciążeniem nawierzchni za pomocą młotka. Zakłada się, że zniszczenia strukturalne w formie utraty szczepnością pomiędzy warstwami asfaltowymi ma swoje odbicie w dynamicznej reakcji konstrukcji nawierzchni.

Główną częścią urządzenia jest impulsowy młotek, który zwiera skalibrowany piezoelektryczny czujnik nacisków (120 kN) umieszczony pomiędzy wstępnie naprężonymi sworzniami. Reakcja nawierzchni jest przekazywana za pomocą czujnika pomiaru przyśpieszeń (50 g, 50 razy przyśpieszenie grawitacyjne), przyklejonego do nawierzchni. Obierane sygnały rejestrowane są w systemie pomiarowym laptopa. Temperatura nawierzchni musi być mierzona. Cały pomiar wymaga dwóch operatorów.



Rys.2.9. Widok elementów dynamicznego młotka impulsowego [29].

2.8. Wymagania dotyczące szczepności międzywarstwowej

W 1987 Fenz [31] po szerokich badaniach nawierzchni asfaltowych w Austrii (17 odcinków dróg) sformułował wymagania szczepności międzywarstwowej dla minimum 5 próbek o 100 mm średnicy:

- dla warstw do 12 cm poniżej górnej powierzchni nawierzchni – co najmniej $3,0 \text{ N/mm}^2$ przy ścinaniu,
- dla warstw niżej położonych – co najmniej $2,0 \text{ N/mm}^2$ przy ścinaniu lub $0,8 \text{ N/mm}^2$ przy odrywaniu.

Na podstawie badania ścinania próbek w aparacie Leutnera w 1994 Codja i w 1995 Charif [2] zaproponowali następujące wymagania dla próbek o średnicy 150 mm w temperaturze 20°C :

1. Siła ścinająca:

- na granicy w-wy ścieralnej/wiążącej – co najmniej 14,0 kN
- na granicy w-wy wiążącej/ podbudowy – co najmniej 10,0 kN
- na granicy w-wy ścieralnej/ podbudowy – co najmniej 13,0 kN

2. Droga ścinania (przemieszczenie podczas ścinania):

- na granicy w-wy ścieralnej/wiążącej – pomiędzy 2,0 i 5,0 mm
- na granicy w-wy wiążącej/ podbudowy – pomiędzy 1,0 i 4,5 mm
- na granicy w-wy ścieralnej/ podbudowy – pomiędzy 1,5 i 4,5 mm

W 1995 roku Krzemień i Tschegg, bazując na badaniach dwóch autostrad zalecili następujące wymaganie szczepności międzywarstwowej (temperatura 20°C , próbki $\phi 100$), które zostały przyjęte w normie austriackiej RVS 11.065 z 1997 [31]:

- przy zastosowaniu emulsji zwykłej $1,0 \text{ N/mm}^2$,
- przy zastosowaniu emulsji modyfikowanej $1,5 \text{ N/mm}^2$.

W 1999 roku Raab i Partl po zmodyfikowaniu metody Leutnera przedstawili wymaganie szczepności międzywarstwowej dla warstwy ścieralnej (beton asfaltowy lub SMA) z wiążącą na poziomie 23 kN (temperatura 20°C , próbka $\phi 150$).

Stockert [31] w najnowszych rezultatach swoich badań z 2002 roku, które zawierały 500 odwiertów z 31 odcinków dróg podaje następujące wymagania (temperatura 20°C, próbki 150 mm):

1. Siła ścinająca:

- na granicy w-wy ścieralnej/wiążącej – co najmniej 25,0 kN
- na granicy w-wy wiążącej/ podbudowy – co najmniej 20,0 kN
- na granicy w-wy podbudowy/ podbudowy – co najmniej 16,0 kN

2. Droga ścinania (przemieszczenie podczas ścinania):

- na granicy w-wy ścieralnej/wiążącej – pomiędzy 2,0 i 4,0 mm
- na granicy w-wy wiążącej/ podbudowy – pomiędzy 1,5 i 3,0 mm
- na granicy w-wy podbudowy/ podbudowy – pomiędzy 1,0 i 3,0 mm

Dla cienkich warstw wykonywanych na zimno, wskazano wymaganie przyczepności $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$, przy badaniu metodą oderwania stempla [2].

Zawadzki [42] na podstawie wyników badań dla polskich mieszanek mineralno-asfaltowych zaproponował następujące wymagania względem badania połączenia warstw bitumicznych. Zakresy wartości naprężenia ścinającego τ są następujące:

dla próbki pobranej z drogi:

$$\tau_n = 0,9 \div 2,4 [N / mm^2]$$

dla próbki zagęszczone w formach walcowych

$$\tau_w = 0,85 \div 1,6 [N / mm^2]$$

dla próbek zagęszczonych w formach prostopadłościennych i wyciętych płyt:

$$\tau_p = 1,0 \div 2,4 [N / mm^2]$$

2.9. Polskie doświadczenia w badaniach szczepności

W Polsce badania warstw szczepnych rozpoczął Stefańczyk, a potem kontynuował Judycki [16a] w aparacie skrzynkowym. Na początku drugiego tysiąclecia badania rozpoczął Zawadzki, Szczepaniak, wykorzystując metodę Leutner'a oraz Zieliński i Grzybowska, konstruując nowy przyrząd do ścinania kostek z mma.

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.



Rys. 3.1. Widok pojemników z betonem asfaltowym dowiezioną z WMMA

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 powszechnie stosowane na rejonie Trójmiasta:

- kationową emulsję asfaltową modyfikowaną szybkorozpadową K1-70 MP,
- kationową emulsję asfaltową zwykłą szybkorozpadową K1-65.

Dla porównania na jednej powierzchni nie zastosowano warstwy szepnej:

- brak sprysku międzywarstwowego.

Dodatkowo 30% sprysku emulsją modyfikowaną w ilości 0,35 kg/m² posypano pyłami (części <0,075 mm) z kruszywa mineralnego – pospółki, symulując zabrudzenie powstające na drodze podczas wbudowywania warstw asfaltowych.

W sumie dla każdego rodzaju sprysku (4) przygotowano powierzchnie ~1,17 m², w sposób opisany w punkcie 3.2.2.

3.2. Metodyka badawcza

3.2.1. Wprowadzenie

Z opisanych wcześniej (rozdział 2 – Studia literatury) metod badawczych, oceniających szczepność międzywarstwową mieszanek mineralno-asfaltowych w konstrukcji nawierzchni, jak główną i jedyną metodę w niniejszej pracy wybrano metodę pierwotnie zaproponowaną przez Leutner'a (1979 r.) – ścinania międzywarstwowego. Procedura badawcza została opisana w niemieckich przepisach ALP A-StB, Część 4. Badanie powiązania warstw wg Leutner'a, wydanie 1999 [39].

Badanie wg Leutner'a polega ona na bezpośrednim, wolnym od momentów (na zginanie) przebiegu ścinania w płaszczyźnie połączenia, która jest granicą warstw rdzeni wiertniczych o średnicy 150 mm, w temperaturze 20°C. Maksymalna siła ścinająca oznacza stan zniszczenia połączenia międzywarstwowego, przy którym powiązanie pomiędzy dwoma warstwami ulega zniszczeniu. Grubość ścinanej warstwy ze względu na warunki techniczno-badawcze musi wynosić, co najmniej 25 mm. Maksymalna siła ścinająca i związana z nią droga ścinania są uzależnione od wielkości wpływających na zazębienie (tekstura górnej powierzchni, głębokość zagłębień, wymiar maksymalnego ziarna, wielkości próżni, stopień zagęszczenia, stan górnej powierzchni dolnej warstwy, oraz siłę sklejącą (adhezja, kohezja, objętość zaprawy, rodzaj i ilość sprysku międzywarstwowego) [39]. Istotne znaczenie posiadają nie tylko właściwości warstw stykających się, ale także warunki występujące na powierzchniach granicznych. Przy szczepności międzywarstwowej nie chodzi o specyficzne właściwości samych warstw, ale kompleksową cechę, współdziałających czynników. Dlatego przy ocenie szczepności w metodzie Leutner'a musi być uwzględniona siła ścinająca, jak i droga ścinania.

3.2.2. Przygotowanie próbek

3.2.2.1. Zagęszczanie i odwiercanie próbek

Beton asfaltowy zagęszczano w drewnianej formie w postaci ramy o wymiarach 90 x 130 cm i głębokości 6 cm do warstwy wiążącej oraz o głębokości 4 cm do warstwy ścieralnej. Formę do warstwy wiążącej ustawiano na posadzce betonowej, a następnie do formy wsypywano gorącą mieszanek w ilości wyliczonej z gęstości pozornej m_m , dla której wskaźnik zagęszczenia osiągnie wartość 1,00 (patrz rys.3.2). Mieszanek zagęszczano kolejnymi przejściami walca do momentu osiągnięcia przez próbkę wysokość formy, osiągając wskaźniki zagęszczenia od 0,99 do 1,01 (patrz rys. 3.3-3.5).

Zagęszczony beton asfaltowy pozostał w formie przez kolejne 2 dni, po czym wykonano sprysk międzywarstwową emulsją asfaltową (opisano w pkt.3.2.2.2). Następnie specjalnie przygotowaną nakładkę – kolejną formę, do warstwy ścieralnej nałożono na zagęszczoną i spryskaną emulsją mieszanek. Wypełniono ją betonem asfaltowym do warstwy ścieralnej i rozpoczęto proces zagęszczania betonu asfaltowego w sposób analogiczny, jak warstwę wiążącą.



Rys.3.1. Przygotowane formy do zagęszczania warstwy wiążącej.



Rys.3.2. Wypełniania form betonem asfaltowym.



Rys. 3.3. Zagęszczanie betonu asfaltowego do warstwy wiążącej walcem stalowym.



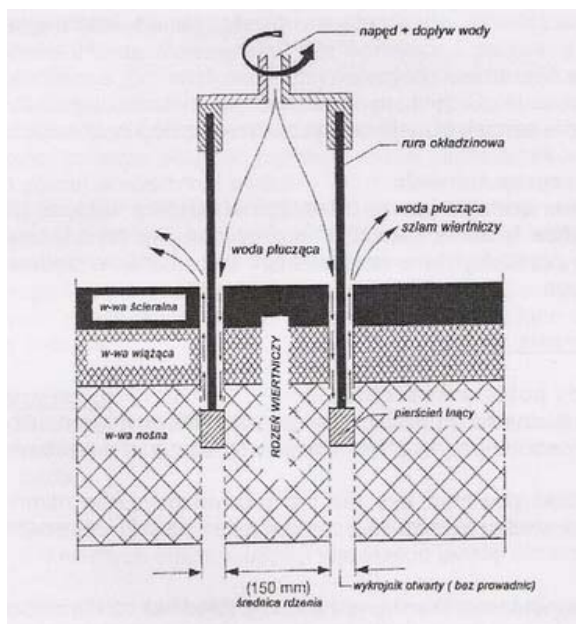
Rys. 3.4. Zagęszczanie betonu asfaltowego do warstwy wiążącej walcem stalowym.



Parametry walca były następujące:

- ciężar 465 kg,
- średnica bębna 560 mm,
- szerokość bębna 720 mm,
- nacisk liniowy statyczny 6,5 kN/mm.

Rys.3.5. Zagęszczanie betonu asfaltowego



Rys. 3.6. Szkic przebiegu odwiertu [36] i widok wiertnicy.

Z tak przygotowanych płaszczyzn z dwuwarstwowym betonem asfaltowym (warstwa wiążąca 6 cm i warstwa ścierna 4 cm) o grubości około 10 cm odwiercano próbki $\phi 150$ mm wiertnicą spalinową z koronką diamentową. Odwiercono 60 próbek, po 15 sztuk dla każdego rodzaju warstwy szepnej. Podczas odwiertu 2 próbki rozwarstwiły się oraz 1 rozpadła się podczas wybijania z wiertła.



Rys.3.7. Widok płaszczyzn z oznaczonymi miejscami odwiertu i wyciętych próbek.

3.2.2.2. Sprysk międzywarstwowy – warstwa szepna

Naniesienie warstwy szepnej – emulsji asfaltowej na przygotowaną płaszczyznę z zagęszczonym betonem asfaltowym odbywał się za pośrednictwem ręcznej lancy, zasilanej z ciśnieniowego aparatu natryskowego (WAN-Ca). Aparat ten standardowo wykorzystywany jest do natrysku powłok malarskich.

Parametry aparatu natryskowego WAN-Ca:

- Pojemność zbiornika 43 l,
- Pojemność wiadra 26 l,
- Ciśnienie dopuszczalne 5 bar,
- Ciśnienie stosowane 2-3,5 bar,
- Wymiary 480x890x365 mm
- Masa 38 kg,
- Zasilanie pneumatyczne.



Lanca do natrysku została wyposażona w oryginalną dyszę natryskową firmy Savalco Maski AB (Szwecja), stosowaną przy automatycznych spryskiwarach. Dzięki czemu uzyskiwano charakterystyczny trójkątny kształt emulsji asfaltowej na wyjściu z dyszy.

Rys.3.8. Aparat natryskowy WAN-Ca



Rys. 3.9. Widok kształtu strumienia emulsji na wyjściu z dyszy spryskiwarki.



Rys. 3.10. Wykonanie warstwy szepnej. Natrysk emulsji asfaltowej.



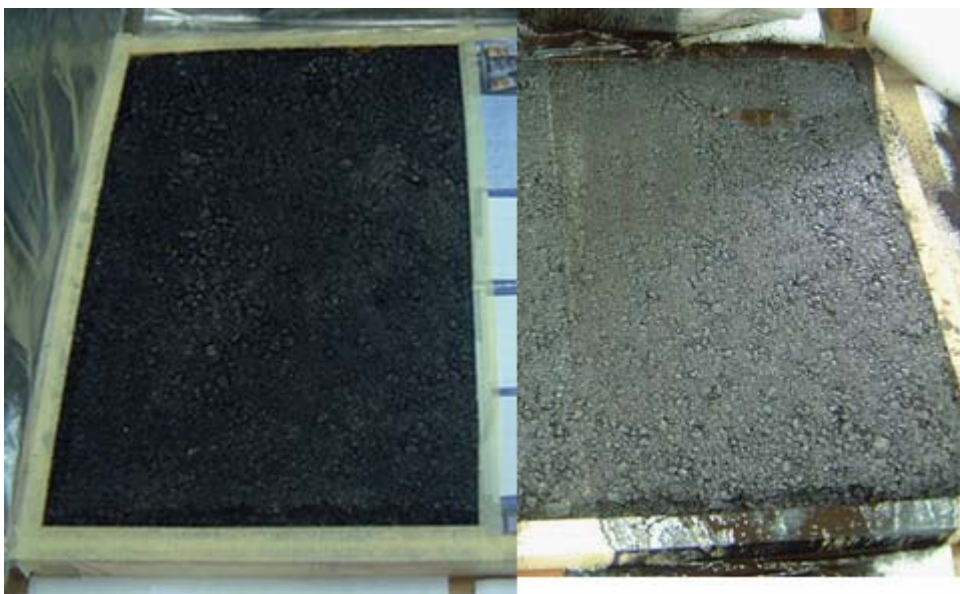
Emulsje asfaltowe bezpośrednio przed spryskiem, zgodnie z zaleceniami producenta podgrzano do temperatury:

- 35°C – emulsję zwykłą, K1-65,
- 70°C – emulsję modyfikowaną, K1-70 MP.

Ilość sprysku regulowano wielkością ciśnienia w aparacie natryskowym. Kontrolę ilości sprysku uzyskiwano przez próbny natrysk emulsji na arkusz A4 papieru. Następnie po rozpadzie emulsji asfaltowej dokonywano ważenia i obliczenia ilości sprysku.

Rodzaje sprysku międzywarstwowego przedstawiono w tablicy 3.1. Zamierzeniem eksperymentu była ocena wpływu szczepności przy: braku, optymalnej ilości, przedozowaniu i zabrudzeniu warstwy szepnej.

Rys.3.11. Widok płaszczyzn z betonu asfaltowego po wykonaniu sprysku międzywarstwowego



Rys. 3.12. Widok warstwy wiążącej z betonu asfaltowego 0/25 przed i po wykonaniu sprysku z emulsji asfaltowej.

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

Lp.	Rodzaj sprysku	Ilość [kg/m ²]	Ciśnienie w aparacie [bar]	Temperatura emulsji [°C]
1.	Emulsja modyfikowana K1-70 MP	0,3	2,2	70
2.	Emulsja modyfikowana K1-70 MP	0,5	2,6	70
3.	Emulsja zwykła K1-65	0,3	2,2	35
4.	Brak sprysku międzywarstwowego	-	-	-

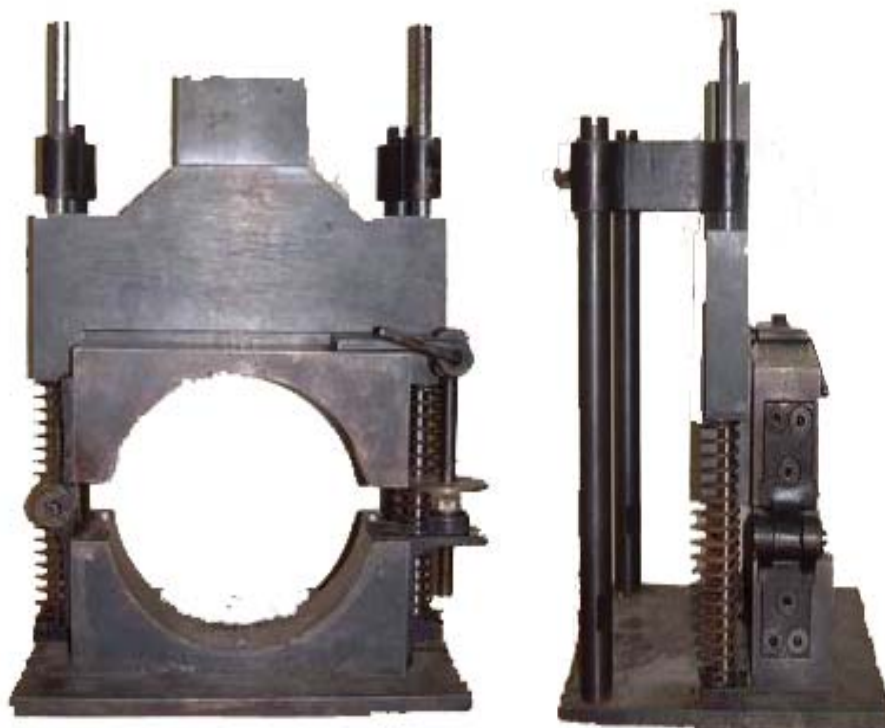
Uwaga:

Na tym etapie eksperymentu była ograniczona kontrola sprysku. Okazało się, że duży wpływ na wielkość sprysku przy zachowaniu kontroli ciśnienia ma płynność emulsji (lepkość) zmieniająca się w zależności od temperatury. W szczególności ma to znaczenie przy emulsji modyfikowanej. Temperatura podawanej emulsji ze zbiornika gwałtownie spadała podczas chwilowego zatrzymania się emulsji w wężu (3 m), łączącym zbiornik z lancą. Do następnych sprysków zostanie wykonana izolacja węża z pianki polietylenowej.

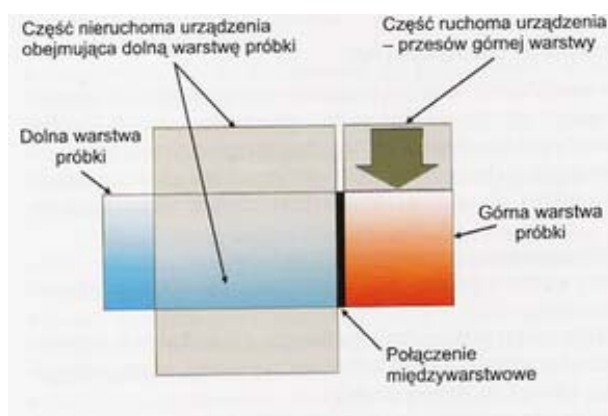
3.2.2.3. Opis badania

Bezpośrednio przed badaniem ścinania odwiercone próbki przechowywano w komorze termostaticznej w temperaturze badania $+20^{\circ}\text{C}$, przez 6 godzin.

Badanie ścinania przeprowadzono w prasie do badania Marshala, o przesuwie tłoka 50 mm/min, przy wykorzystaniu aparatu Leutner'a (patrz rys. 3.13). Schemat badania ścinania przedstawiono na rysunku 3.14.

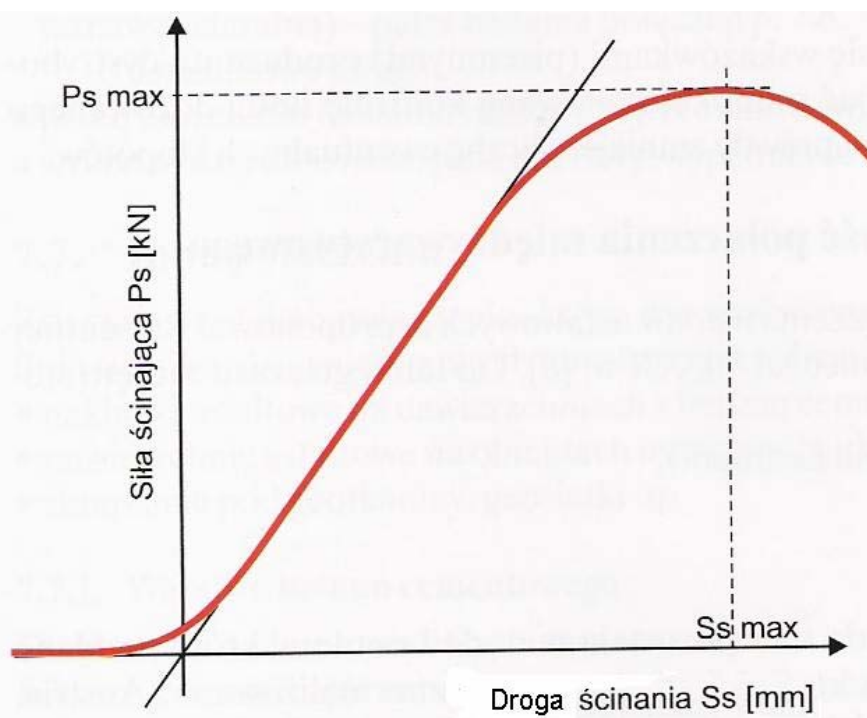


Rys. 3.13. Widok aparatu (przrządu) do ścinania wg Leutner'a, aparat wykonano na Politechnice Gdańskiej (fot. P. Jaskuła).



Rys.3.14. Schemat badania Leutner'a [2].

Podczas badania automatycznie w sposób ciągły monitorowano siłę ścinającą i drogę ścinania (patrz rys. 3.15). Dzięki czemu od razu otrzymywano parametry niezbędne do oceny szczepności międzywarstwowej wg [39]. Na podstawie maksymalnej siły ścinającej i drogi ścinania dodatkowo wyznaczano wytrzymałość na ścinanie t , zalecane przez Fenz [31], Zawadzkiego [41, 42], jak i sztywność ścinania S_s , zalecane przez Raab'a i Partl'a [24].



Rys. 3.15. Zapis graficzny ścinania międzywarstwowego z badania Leutner'a [2].

Wytrzymałość na ścinanie wyznaczano ze wzoru:

$$\tau = \frac{\max P}{S_s} ,$$

gdzie:

t – wytrzymałość na ścinanie [MPa],
 $\max P$ – maksymalna siła ścinająca [kN],
 S_s – droga ścinania [mm].

Sztywność ścinania wyznaczano z wzoru:

$$S_{\max} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta S} \right)_{\max} ,$$

gdzie:

$S_{\max}$ – sztywność ścinania [kN/mm],
 ΔP – maksymalny przyrost siły ścinającej [kN],
 ΔS – maksymalny przyrost drogi ścinania [mm].

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.

Wyniki badań ścinania wewnątrz warstwy wiążącej i ścieralnej wg metody Leutnera przedstawiono w tablicy 3.3.

Na rysunkach 3.13 i 3.14 przedstawiono widoki próbek po ścinaniu: międzywarstwowym oraz wewnątrz warstwy (warstwy wiążącej).



Rys. 3.13. Widok próbki i płaszczyzn międzywarstwowch po ścinaniu międzywarstwowym wg Leutnera.



Rys. 3.14. Widok próbki po ścinaniu wewnątrzwarstwowym (warstwa wiążąca).

Tablica 3.2. Wyniki badania ścinania międzywarstwowego wg Leutnera, temperatura badania 20°C, (ścieralna BA 0/12,8 – wiążąca BA 0/25)

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	1	149,9	6,5	6,3	2,2	2,1	0,37	0,4	2,95	3,0
1/2		150	4,8		1,8		0,27		2,67	
1/4		149,9	7,6		2,3		0,43		3,30	
2/1	2	149,6	6,1	5,8	2,1	1,9	0,35	0,3	2,90	3,0
2/2		149,8	6,2		2		0,35		3,10	
2/3		149,8	5		1,6		0,28		3,13	
3/1	3	150	4,9	4,8	1,5	1,2	0,28	0,3	3,27	3,9
3/2		149,8	5		1,2		0,28		4,17	
3/3		149,9	4,4		1		0,25		4,40	
4/1	4	149,8	6,6	5,9	2,2	1,8	0,37	0,3	3,00	3,2
4/2		149,8	5,5		1,7		0,31		3,24	
4/3		149,8	5,5		1,6		0,31		3,44	
5/1	5	149,9	6,7	4,6	2	1,4	0,38	0,3	3,35	3,4
5/2		150	3,2		1		0,18		3,20	
5/3		149,8	4		1,1		0,23		3,64	

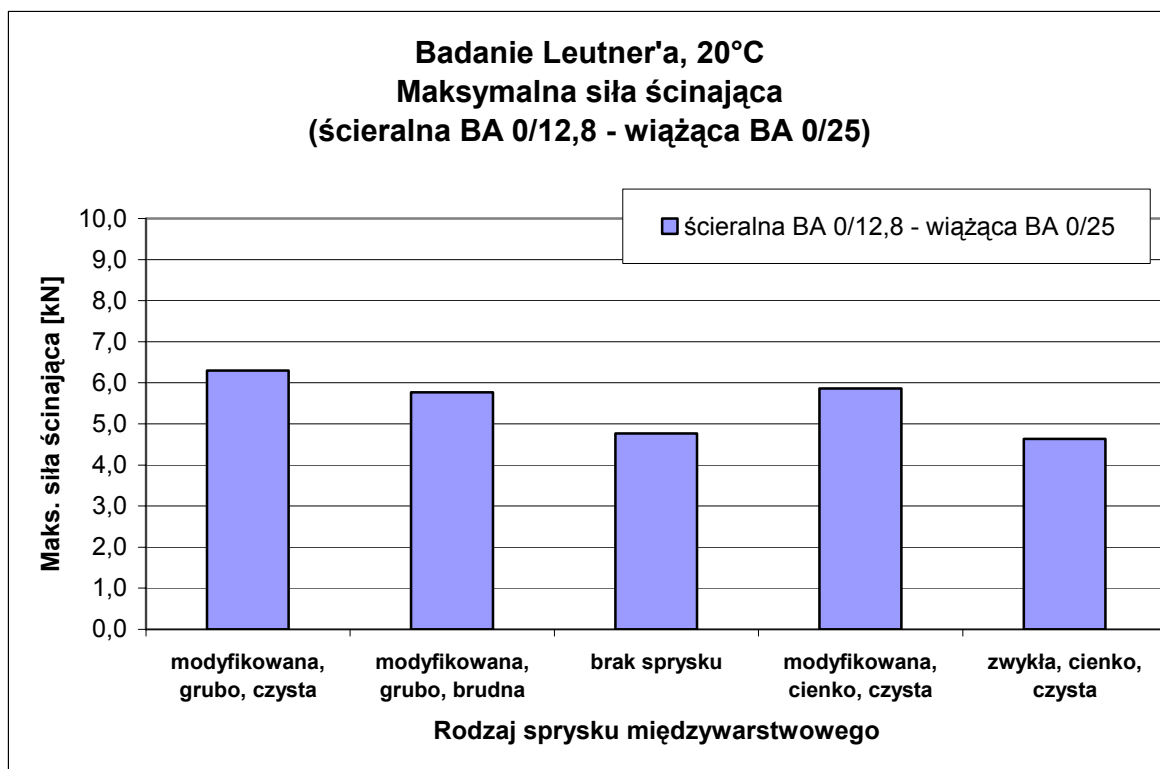
Rodzaje sprysku:

1-modyfikowany, powłoka gruba, czysta
2-modyfikowany, powłoka gruba, brudna
3-bez sprysku

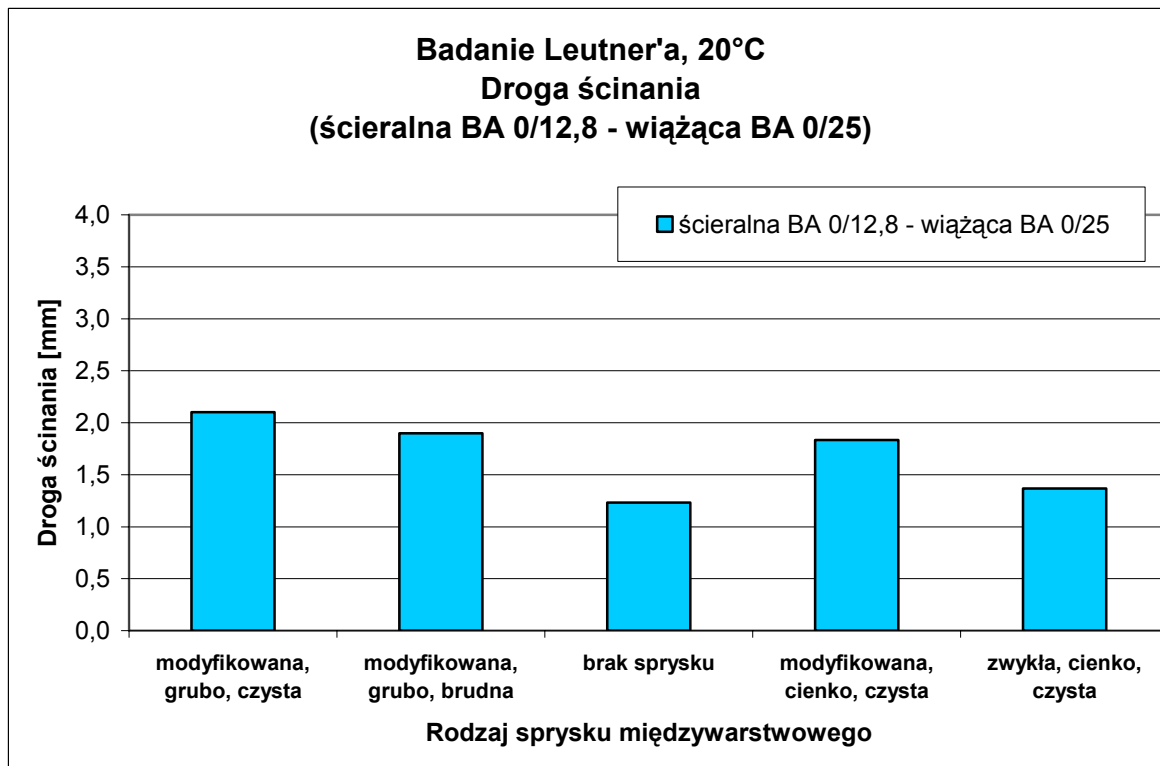
4-modyfikowany, powłoka cienka, czysta
5-zwykły, powłoka cienka, czysta

Tablica 3.3. Wyniki badania ścinania wewnątrzwarstwowego wg Leutnera, temperatura badania 20°C, (ścieralna BA 0/12,8; wiążąca BA 0/25)

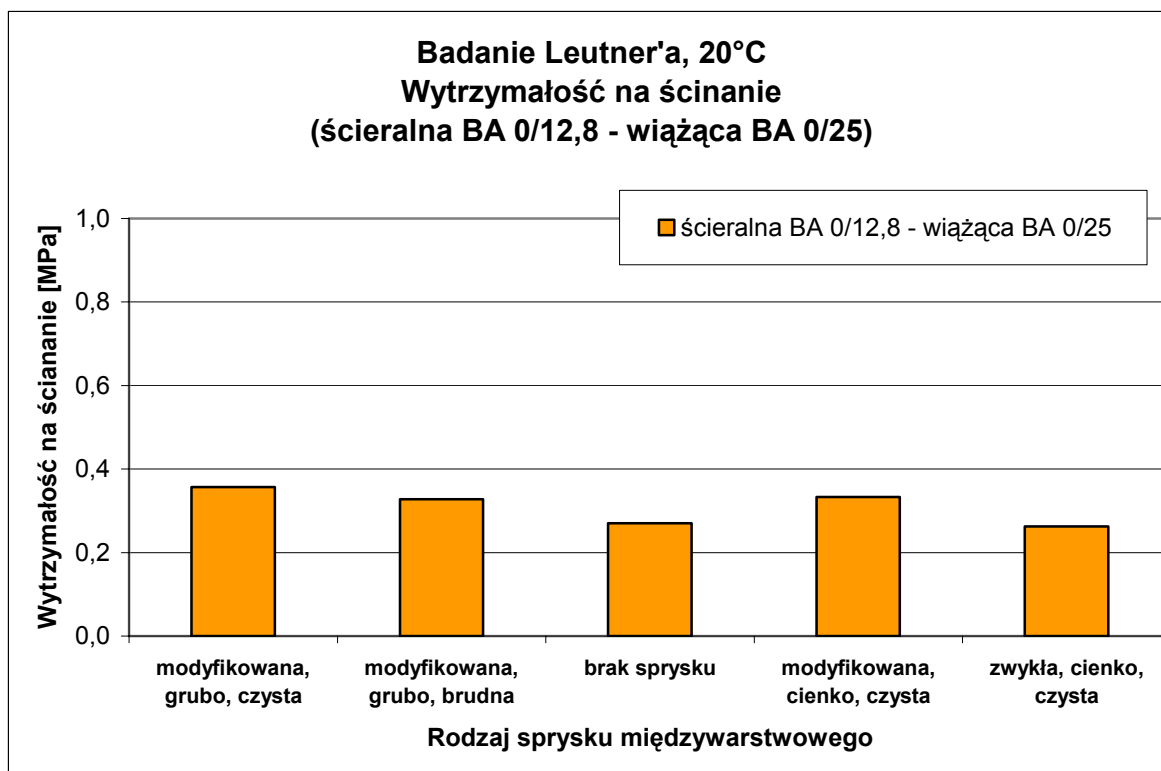
Nr próbki	Rodzaj warstwy	Średnica [mm]	Siła ścinająca [kN]	Średnia siła ścinająca [kN]	Droga ścicia [mm]	Średnia droga ścinająca [mm]	Napężenie ścinające [MPa]	Średnie napężenie ścinające [MPa]	Sztywność ścicia [kN/mm]	Średnia sztywność ścicia [kN/mm]
1/1	wiążąca	149,9	26,5	28,1	6,8	6,0	1,50	1,6	3,90	4,7
1/2		150	29,2		5,3		1,65		5,51	
1/4		149,9	28,7		6		1,63		4,78	
2/1	ścieralna	149,6	18,6	17,4	7,5	7,6	1,06	1,0	2,48	2,3
2/2		149,8	16,6		7,7		0,94		2,16	
2/3		149,8	16,9		7,7		0,96		2,19	



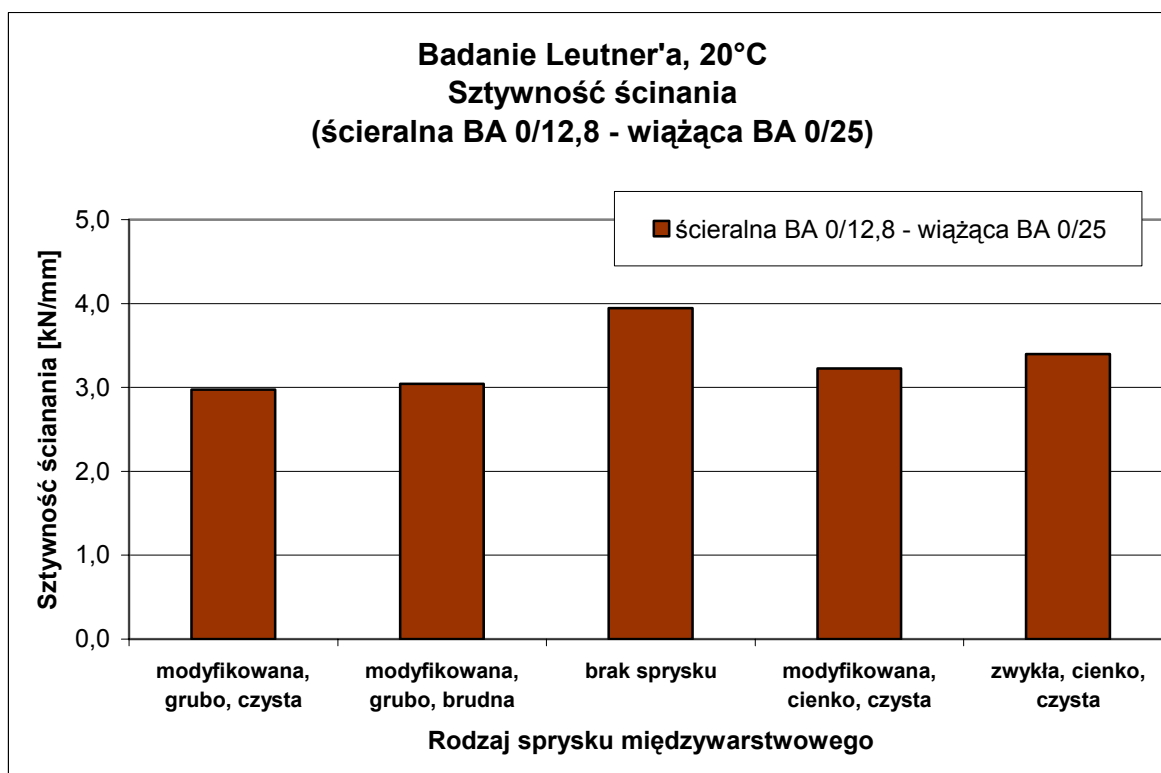
Rys. 3.16. Maksymalna siła ścinająca (ścieralna BA 0/12,8 – wiążąca BA 0/25)



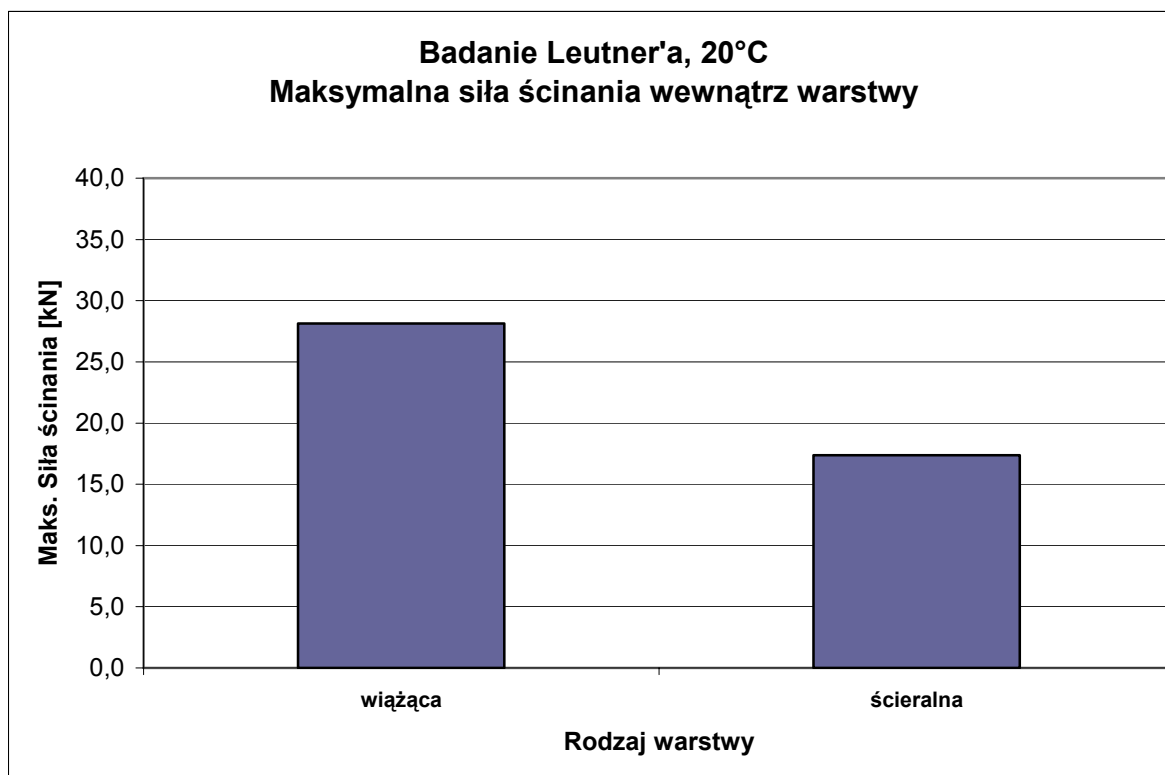
Rys. 3.17. Droga ścięcia (ścieralna BA 0/12,8 – wiążąca BA 0/25)



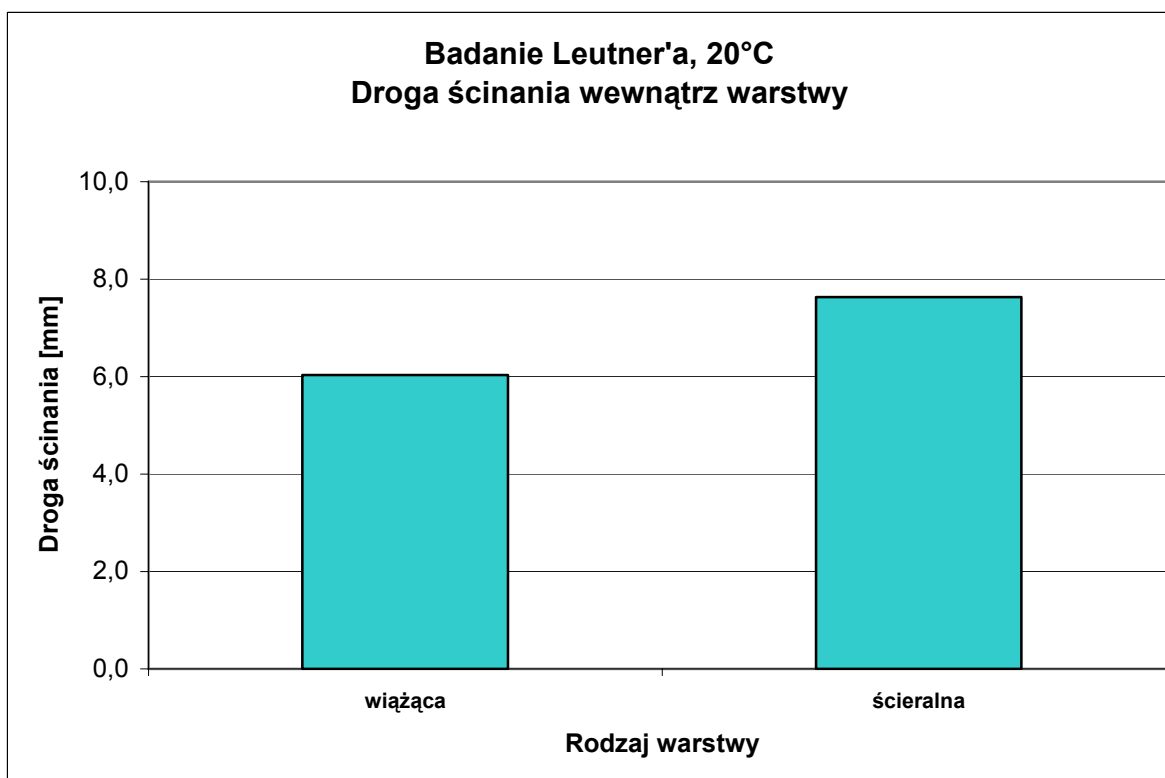
Rys. 3.18. Wytrzymałość na ścinanie (ścieralna BA 0/12,8 – wiążąca BA 0/25)



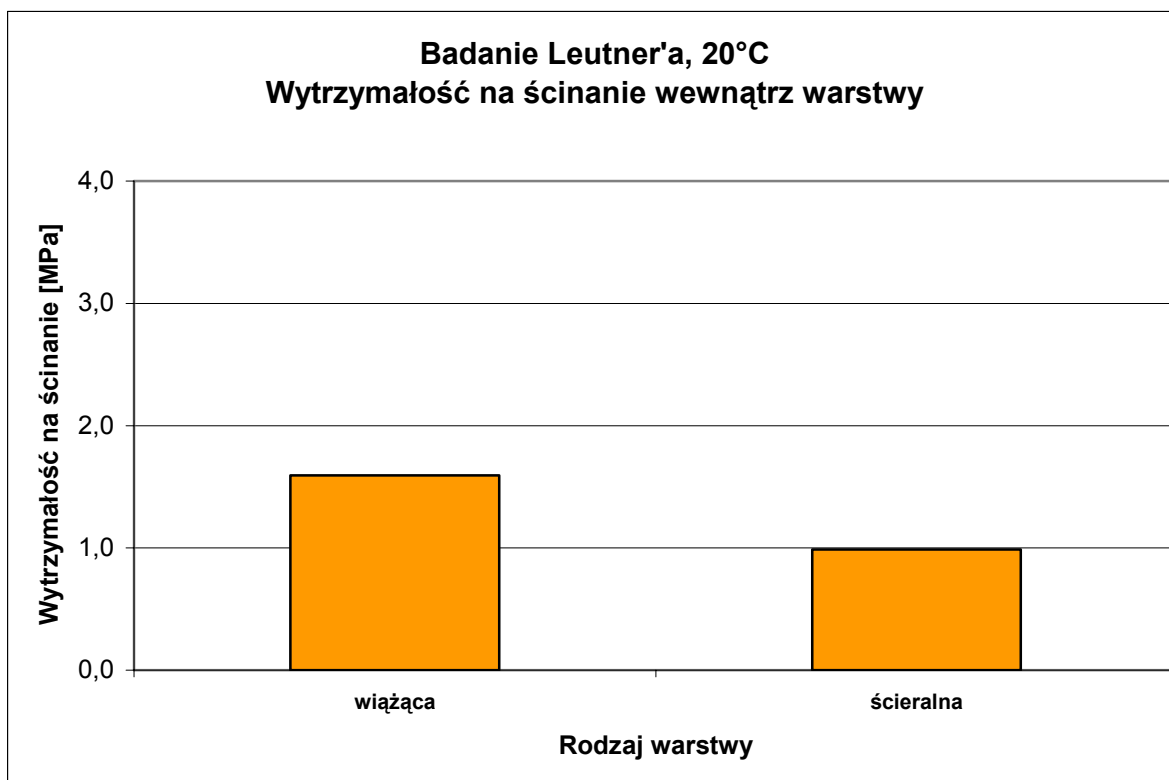
Rys. 3.19. Sztywność ścinania (ścieralna BA 0/12,8 – wiążąca BA 0/25)



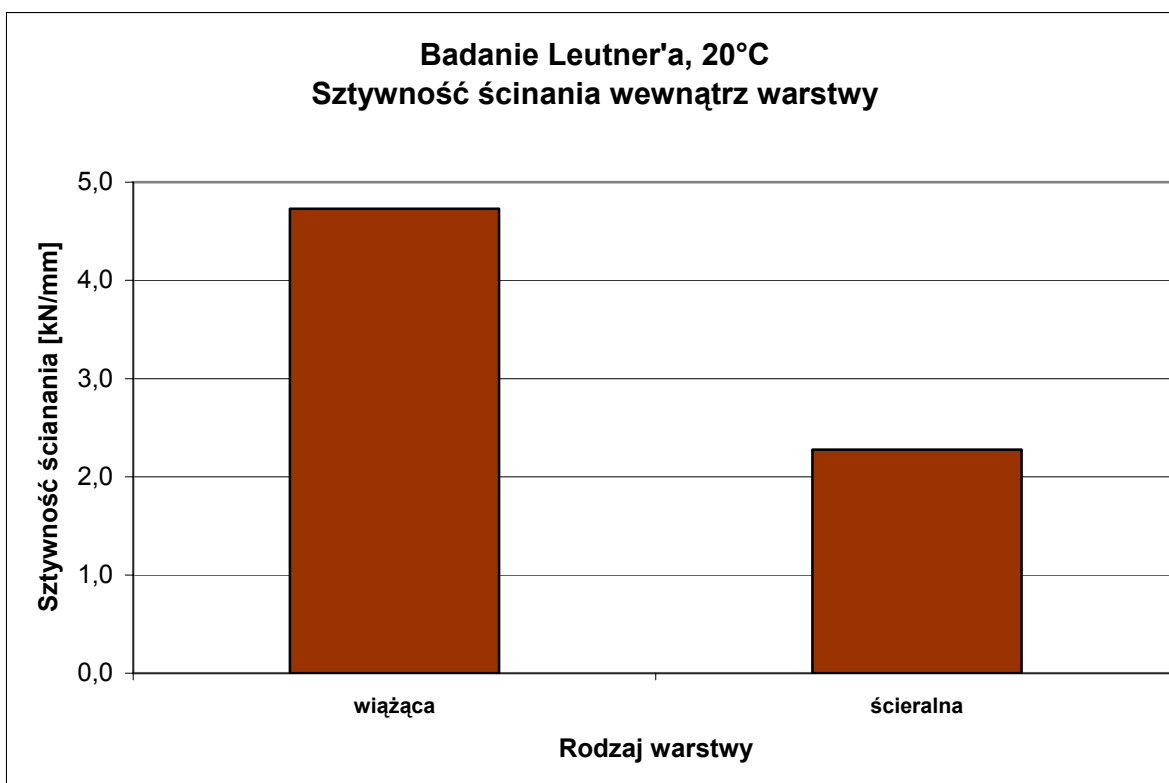
Rys. 3.20. Maksymalna siła ścinająca wewnątrz warstwy



Rys. 3.21. Droga ścięcia wewnątrz warstwy



Rys. 3.22. Wytrzymałość na ścinanie wewnątrz warstwy



Rys. 3.23. Sztywność ścinania wewnątrz warstwy

4. Badania terenowe

4.2. Szczepność międzywarstwowa istniejących konstrukcji

4.2.1. Droga krajowa nr 1, odc. Miłobądz -Tczew

W tablicy 4.1 przedstawiono wyniki badań szczepności międzywarstwowej dla próbek wyciętych z nawierzchni. Nawierzchnia leży w części na gruntach nośnych, a w innej części na gruntach słabonośnych. Na gruntach słabonośnych wystąpiły spękania nawierzchni. Opisane w tym rozdziale badania przeprowadzono w celu sprawdzenia szczepności międzywarstwowej i w celu wyjaśnienia mechanizmu spękań.

Tablica 4.1. Wyniki badań ścinania międzywarstwowego

Temperatura badania +20°C

Ścinanie międzywarstwami (podłoże słabonośne)					Ścinanie międzywarstwami (podłoże nośne)				
Nr próbki	Średnica [mm]	Siła [kN]	Odkształcenie [mm]	Napężenia ścinające [MPa]	Nr próbki	Średnica [mm]	Siła [kN]	Odkształcenie [mm]	Napężenia ścinające [MPa]
5 ś-w	148,5	38,0	6,0	2,93	20 ś-w	148,6	34,0	3,8	2,62
7 ś-w	148,5	32,6	3,9	2,51	21' ś-w	148,4	26,2	2,9	2,02
14 ś-w	148,3	33,5	4,2	2,59	22 ś-w	148,9	35,1	4,4	2,71
13 ś-w	148,1	35,3	5,4	2,73					
Średnia		34,9	4,9	2,69	Średnia		31,8	3,7	2,45
Nr próbki	Średnica [mm]	Siła [kN]	Odkształcenie [mm]	Napężenia ścinające [MPa]	Nr próbki	Średnica [mm]	Siła [kN]	Odkształcenie [mm]	Napężenia ścinające [MPa]
5 w-p	148,5	29,3	4,1	2,26	20 w-p	148,6	32,3	3,8	2,49
7 w-p	148,5	10,1	2,0	0,78	21' w-p	148,4	11,5	2,1	0,89
14 w-p	148,3	30,6	3,1	2,36	22 w-p	148,9	14,7	2,9	1,13
13 w-p	148,1	31,4	4,6	2,43					
Średnia		25,4	3,5	1,96	Średnia		19,5	2,9	1,50
Nr próbki	Średnica [mm]	Siła [kN]	Odkształcenie [mm]	Napężenia ścinające [MPa]	Nr próbki	Średnica [mm]	Siła [kN]	Odkształcenie [mm]	Napężenia ścinające [MPa]
5 p-p	148,5	15,9	2,8	1,22	20 p-p	148,6			
7 p-p	148,5	19,4	4,2	1,49	21' p-p	148,4	11,9	2,5	0,92
13 p-p	148,1	16,8	2,1	1,30	22 p-p	148,9	12,7	3,0	0,98
Średnia		17,4	3,0	1,34	Średnia		12,3	2,8	0,95

ś-w – granica między warstwą ścieralną i wiążącą,

w-p - granica między warstwą wiążącą i podbudową,

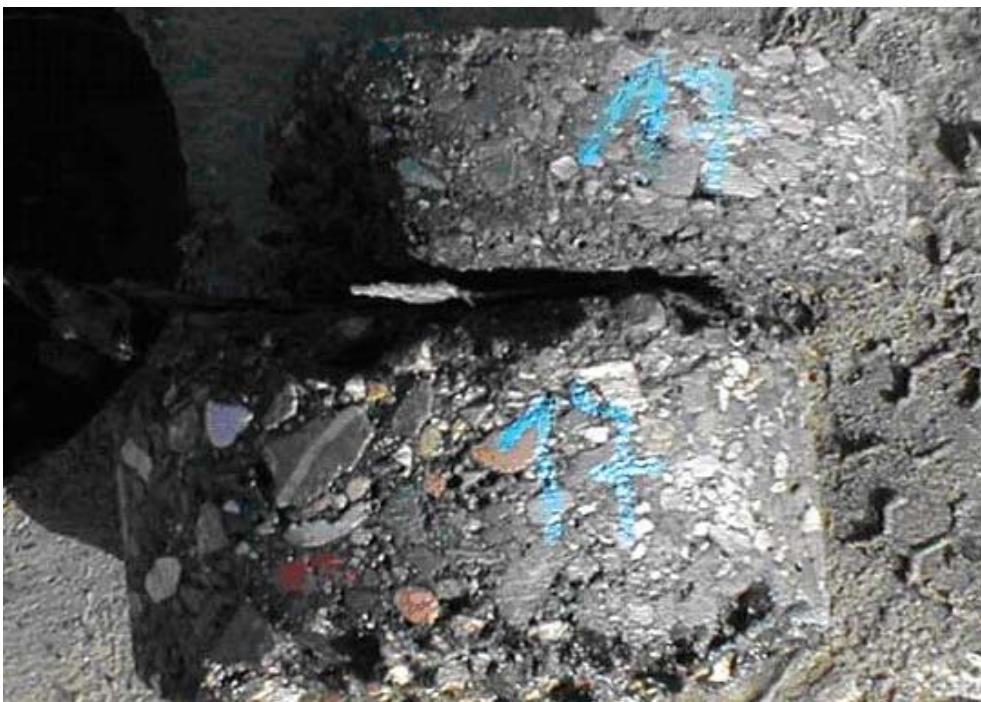
p-p – granica między warstwą podbudowy i starymi warstwami asfaltowymi

Otrzymane wyniki badań świadczą o dobrej szczepności warstw asfaltowych zarówno na odcinku na gruntach nośnych jak i na słabonośnych. Wszystkie badane próbki pobrane ze środka pasa ruchu (pomiędzy śladami kół) spełniają wymagania niemieckie.

Należy jednak stwierdzić, że podczas prac terenowych – odwiertów przez konstrukcję nawierzchni zaobserwowano braki szczepności międzywarstwowej. Występowały miejsca, gdzie brakowało szczepności między warstwami wiążącą-podbudowa, podbudowa-stare w-wy asfaltowe, patrz rysunki 4.1, 4.2. Zestawienie tych spostrzeżeń zebrano w tablicach 4.2 i 4.3.



Rysunek 4.1. Widok próbki wyciętej z nawierzchni na gruntach słabonośnych pkt. 19',
brak szczepności w nowych warstwach asfaltowych pomiędzy warstwą wiążącą a
podbudową.



Rysunek 4.2. Widok próbki wyciętej z nawierzchni na gruntach słabonośnych pkt. 17,
brak szczepności w nowych warstwach asfaltowych pomiędzy warstwą wiążącą a
podbudową.

Szczepność międzywarstwowa na odcinku gruntów słabych.

Tablica 4.2. Szczepność międzywarstwowa na gruntach słabonośnych

Lokalizacja odwiertu	Nr odwiertu	Jest szczepność lub brak szczepności
Strefa połączenia starej i nowej nawierzchni, zbrojona siatką, intensywne spękania	2	Brak wiążąca/podbudowa
	6	Brak wiążąca/podbudowa; podb./stare warstwy asf.
	17	Brak wiążąca/podbudowa
	19	Brak wiążąca/podbudowa
	16	Brak wiążąca/podbudowa
	18	Brak wiążąca/podbudowa
	19'	Brak wiążąca/podbudowa
Spękanie blisko środka jezdni	15	Brak podb./stare warstwy asf.
	19''	Jest
Strefa pomiędzy śladami kół na pasie ruchu bez spękań	1	Jest
	5	Jest
	9	Jest
	10	Jest
	11	Jest
	12	Jest
	13	Jest
Pobocze strefa poza spękaniem	3	Jest
	17	Jest
	14	Jest

Na gruntach słabonośnych wykonano 19 odwiertów przez nawierzchnię w następujących lokalizacjach:

W strefie połączenia starej jezdni z dobudowywanym utwardzonym poboczem – gdzie występują intensywne spękania typu I i II. Połączenie nawierzchni zbrojone jest siatką geosiatką. W tej strefie we wszystkich odwiertach (7 sztuk) stwierdzono rozwarstwienie międzywarstwowe. Najczęściej występowało pomiędzy warstwą wiążącą a wyrównawczą (podbudową). W tym miejscu była wbudowana siatka. W jednym przypadku (otwór Nr 6) wystąpiło rozwarstwienie dwóch styków międzywarstwowych: między warstwami wiążąca/podbudowa i podbudowa/stare warstwy asfaltowe.

W strefie spękania typu III, położonego blisko osi jezdni wykonano dwa odwierty. W jednym stwierdzono brak szczepności pomiędzy warstwą podbudowy a starymi warstwami asfaltowymi, a w drugim dobrą szczepność,

W strefach nieobciążonych ruchem, bez spękań, to znaczy na jezdni w środku pasa ruchu i na poboczu, wykonano razem 10 odwiertów. W każdym z odwiertów stwierdzono dobrą i pełną szczepność.

Opisane obserwacje pozwalają stwierdzić, że w nawierzchni na obszarze gruntów słabonośnych po wykonaniu nawierzchni była zapewniona szczepność. Badania próbek pobranych ze stref nieobciążonych pokazują, że szczepność była znacznie większa niż wymagana w przepisach niemieckich. Zmienna siła niszcząca była równa średnio 17,4 kN, 25,4 i 34,9 kN w zależności od warstw, przy wymaganej w Niemczech 10 lub 14 kN, w zależności od warstwy.

Pod wpływem ruchu, ugięć i drgań korpusu drogi na słabym podłożu nastąpiło rozerwanie połączeń międzywarstwowych, tam gdzie intensywność obciążeń była największa, a podparcie nawierzchni było najslabsze. Takim miejscem było połączenie starej nawierzchni na jezdni i dobudowanej nawierzchni na poboczu. Miejsce to zazbrojono siatką.

Tablica 4.3. Szczepność międzywarstwowa na odcinku gruntów nośnych.

Lokalizacja odwiertu	Czy jest spękanie	Nr odwiertu	Jest szczepność lub brak szczepności
Strefa połączenia starej i nowej nawierzchni, zbrojona siatką	Brak spękań	21	Brak wiążąca/podbudowa
		21'	Jest
		24	Jest
		25	Jest
		26	Jest
		27	Jest
		29	Jest
Strefa blisko połączenia starej i nowej nawierzchni poza zbrojeniem siatką	Pojedyncze spękania	28	Brak wiążąca/podbudowa
		30	Jest
Strefa mniej obciążona ruchem (oś pasa ruchu, pobocze)	Brak spękań	22	Jest
		20	Jest
		29'	Jest

Z tabl. 4.3 widać, że na 12 odwiertów na gruntach nośnych – w dwóch stwierdzono brak szczepności międzywarstwowej. Jeden taki przypadek miał miejsce w strefie połączenia starej i nowej nawierzchni, a drugi w jego bliskim sąsiedztwie. W dwóch nawierconych spękaniach, które były położone blisko strefy połączenia starej i nowej nawierzchni (ale poza siatką), w jednym stwierdzono brak szczepności, a w drugim zadowalającą szczepność. Ogólnie biorąc, na gruntach nośnych szczepność jest zadowalająca.

Spękaniom może towarzyszyć brak szczepności.

4.2.2. Droga krajowa nr 15, odc. Morliny-Ostróda

Badania wg metody Leutnera wykonano na próbkach odwierconych z nawierzchni w marcu i kwietniu 2005 r. Badano szczepność między warstwą wiążącą a warstwą wyrównawczą (BA/BA).

Tablica 4.4. Wyniki badań szczepności wg Leutner'a próbek wyciętych z drogi

Lokalizacja	Nr próbki	Siła ścinająca [kN]		Uwagi
359+780 P	1	7,1	6,9	Geokompozyt
	2	6,7		Geokompozyt
360+140 L	1	6,9	7,6	Geokompozyt
	2	8,2		Geokompozyt
360+800 P	1	7,7	8,3	Geokompozyt
	2	8,8		Geokompozyt
361+250 L	1	2,5	2,5	Brak geokompozytu
361+250 P	1	2,8	2,8	Brak geokompozytu
361+850 P	1	5,9	6,0	Geokompozyt
	2	6,1		Geokompozyt
362+600	1	11,1	10,6	Brak geokompozytu
	2	10,0		Brak geokompozytu
362+710 P	1	5,6	4,9	Geokompozyt
	2	4,1		Geokompozyt
364+710 L	1	1,9	1,9	Geokompozyt
363+520 L	1	8,1	11,2	Brak geokompozytu
	2	17,2		Brak geokompozytu
363+985 L	1	7,3	8,5	Brak geokompozytu
	2	9,6		Brak geokompozytu

4.2.3. Ulica 3-go Maja w Gdańsku

Badania wg metody Leutnera wykonano na próbkach odwierconych z nawierzchni w kwietniu 2005 r. Badano szczepność pomiędzy warstwą ścieralną i wiążącą oraz warstwą wiążącą i istniejącą.

Tablica 4.5. Wyniki badań szczepności wg Leutner'a próbek wyciętych z drogi

Lokalizacja	Nr próbki	Siła ścinająca [kN]	Uwagi
Hm 0+20	w.śc.-w.w. SMA/BA	12,6	Brak geokompozytu
Hm 0+20	w.w.-w.istniejąca (kompozyt) BA/BA	4,4	Geokompozyt
Hm 30+00	w.śc.-w.w. SMA/BA	13,4	Brak geokompozytu
Hm 30+00	w.w.-w.istniejąca (kompozyt) BA/BA	4,1	Geokompozyt
Hm 30+00	w.wyrów.- w.istniejąca BA/BA	18,1	Brak geokompozytu

4.2.4. Droga krajowa nr 16, odcinek Górka - Zawady

Badania wg metody Leutner'a wykonano na próbkach odwierconych z nawierzchni w październiku 2004 r. Badano szepność pomiędzy warstwami ścieralną i wiążącą oraz wiążącą i istniejącą.

Tablica 4.6. Wyniki badań szepności wg Leutner'a próbek wyciętych z drogi

Lokalizacja	Siła ścinająca [kN]		
	w.śc.-w.w.	w.w.-w.wy.	w.wy-w.istn.
112+500, L	14,4	18,8	22,1
110+500, L	18,8	14,7	24,3
108+500, L	21,2	10,6	23,1
106+500, L	22,0	16,3	20,0
105+500, P	26,1	22,2	20,8
107+600, P	25,1	15,0	16,8
109+500, P	19,2	18,3	21,2
111+500, P	18,9	11,0	20,8

5. Analizy obliczeniowe

5.3. Wpływ szczepności na stan naprężeń, odkształceń i ugięć w konstrukcji nawierzchni

5.3.1. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni

Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni przedstawia rys. 5.1. Model jest nieznacznym uproszczeniem stanu rzeczywistego, stwierdzonego na podstawie wierceń. Uproszczenia te polegają na połączeniu kilku podobnych warstw konstrukcji w jeden pakiet (na przykład: tłuczeń + bruk kamienny + kostka kamienna). Nie ma to istotnego wpływu na dokładność obliczeń, ponieważ warstwy te mają zbliżone właściwości mechaniczne (moduły). Uproszczenie wynika z możliwości programu komputerowego.

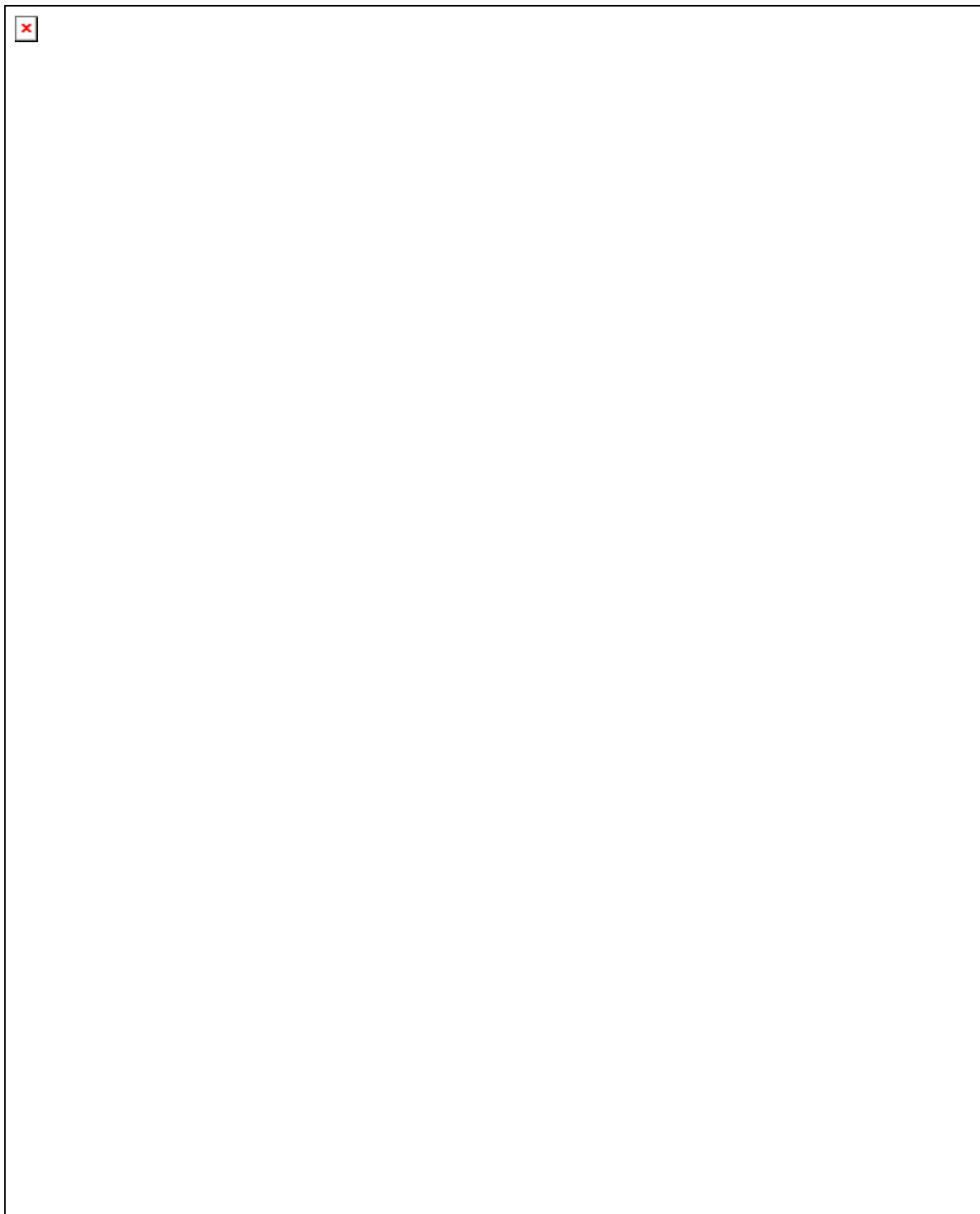
W modelu nawierzchni połączono ze sobą warstwy torfu i namułu w jeden pakiet, o średniej łącznej grubości i o uśrednionym module. Moduł uśredniony został obliczony jako średnia ważona, przy czym wagą była grubość warstw torfu i namułu.

Przy jakichkolwiek uproszczeniach w modelu nie zmieniano rzeczywistych grubości warstw.

W modelu nawierzchni przyjęto, że warstwy są sprężyste, izotropowe i jednorodne. Jest to normalne założenie w teorii sprężystości, na której bazuje metoda obliczania nawierzchni. Jest to oczywiście uproszczenie stanu faktycznego.

Przyjęto, że pomiędzy warstwami konstrukcji nawierzchni występują następujące warunki szczepności:

- Przypadek 1: Pomędzy wszystkimi warstwami występuje pełna szczepność. Przypadek ten opisany jest na rysunkach z wynikami obliczeń określeniem „**pełna szczepność**”.
- Przypadek 2: Pomędzy nowymi warstwami asfaltowymi, wykonanymi w czasie remontu w 1996 roku, a starymi warstwami asfaltowymi istniejącymi w nawierzchni przed remontem występuje całkowity brak szczepności i pełny poślizg, a pomiędzy pozostałymi warstwami występuje pełna szczepność. Przypadek ten na rysunkach z wynikami obliczeń został opisany terminem „**brak szczepności**”.



Rys. 5.1.

Zwraca się uwagę na to, że opis na rysunkach „brak szczepności” dotyczy tylko szczepności starych i nowych warstw asfaltowych, jak określono wyżej. Dwa przypadki szczepności pomiędzy warstwami asfaltowymi wprowadzono dlatego, że badania terenowe wykazały częste występowanie braku szczepności pomiędzy starymi i nowymi warstwami asfaltowymi na terenie zniszczonych nawierzchni na torach. Przy odwiertach na spękanych odcinkach warstwy nie były połączone, ale odspajały się od siebie.

5.3.2. Obciążenie nawierzchni ruchem

Rozważono dwa przypadki obciążenia nawierzchni ruchem:

Obciążenie osią pojedynczą 115 kN

W tym przypadku na nawierzchni ustawiono oś pojedynczą o rozstawie kół 180 cm, obciążoną siłą 115 kN. Koła były pojedyncze (tzw. „wide based tires”). Jest to zgodne z obecnie występującą tendencją zastępowania kół bliźniaczych kołami pojedynczymi, o większym ciśnieniu w ogumieniu. Ciśnienie kontaktowe 715 kPa.

Powyższe obciążenia są rzadko stosowane w obliczeniach nawierzchni drogowych. W standardowych obliczeniach stosuje się najczęściej obciążenie nawierzchni kołem pojedynczym. W naszym przypadku zdecydowano się na początku obliczeń na obciążenie pełną osią, czyli dwoma kołami umieszczonymi w przekroju poprzecznym, aby lepiej modelować ruch. Okazało się, że przy bardzo słabym podłożu ma to istotne znaczenie.

W wynikach występujących dalej w opracowaniu i pokazywanych w formie graficznej nie zawsze określano obciążenie. Jeżeli obciążenie na rysunku nie jest inaczej zdefiniowane to oznacza obciążenie osią pojedynczą 115 kN.

5.3.3. Stałe materiałowe

Do obliczeń przyjęto, na podstawie dotychczasowych badań i doświadczeń stałe materiałowe, jak podano na rys. 5.1.

Dla warstw asfaltowych przyjęto dwa przypadki o różnej sztywności:

„mała” sztywność

- warstwy nowe $E = 10\,000$ MPa, $\nu = 0.3$,
- warstwy stare $E = 5\,000$ MPa, $\nu = 0.3$,
- „duża” sztywność
- warstwy nowe $E = 20\,000$ MPa, $\nu = 0.2$,
- warstwy stare $E = 10\,000$ MPa, $\nu = 0.3$.

Dla starych warstw przyjęto moduły o połowę mniejsze niż dla nowych z dwóch względów. Stare warstwy były częściowo osłabione przez ruch w czasie eksploatacji i przez zniszczenia, a ponadto były to warstwy podatne, starego typu, wykonane wg normy PN-74/S-96022 lub norm starszych, bogate w bitum.

Przyjęcie dwóch wariantów sztywności, pozwoliło na ocenę wpływu sztywności warstw asfaltowych na pracę nawierzchni. Jak wynika z badań, na analizowanej drodze wbudowano w czasie ostatniego remontu stosunkowo sztywne nowe warstwy asfaltowe.

Dla warstw słabych podłoża gruntowego (torfu i namułu) przyjęto do obliczeń średnie wazone moduły edometryczne, obliczone proporcjonalnie do grubości warstw. Moduły przyjęto z wyników badań laboratoryjnych.

Dla pozostałych warstw przyjęto moduły o standardowo przyjmowanych wartościach, co nie wymaga specjalnych wyjaśnień.

5.3.4. Program komputerowy

Obliczenia wykonano przy wykorzystaniu programu komputerowego BISAR-3, opracowanego przez firmę Shell. Ogółem zrealizowano ponad 50 przebiegów obliczeniowych dla różnych przypadków.

5.3.5. Forma prezentacji wyników

Wyniki przedstawiono w formie graficznej z krótkim komentarzem, z objaśnieniami i analizą. Rysunki przedstawiające wyniki obliczeń są umieszczone w tekście tego rozdziału. Na rysunkach podano odnośniki do numerów stron wydruków komputerowych przechowywanych w archiwum.

Kolejno przedstawiono:

1. Wyniki obliczeń dla osi 115 kN
2. Ugięcia
3. Odkształcenia warstw asfaltowych
4. Wpływ szczepności na pracę warstw asfaltowych na słabym podłożu
5. Wpływ siły poziomej na naprężenia rozciągające w warstwach asfaltowych
6. Porównanie naprężeń i odkształceń w dwóch kierunkach „X” i „Y” (wzdłuż i w poprzek do jazdy)
7. Badanie ścinania w warstwach asfaltowych
8. Obliczenia porównawcze dla nośnego podłoża (ugięcia, odkształcenia w warstwach asfaltowych)

Dodatkowe wyjaśnienia:

Układ współrzędnych (X,Y,Z) został przyjęty tak, że początek układu „0” znajduje się pod jednym z kół. Oś Z jest skierowana do dołu. Oś X jest skierowana zgodnie z ruchem pojazdu, wzdłuż drogi. Oś Y jest skierowana w poprzek drogi.

Inne oznaczenia wytłumaczono na bieżąco, przy omawianiu wyników.

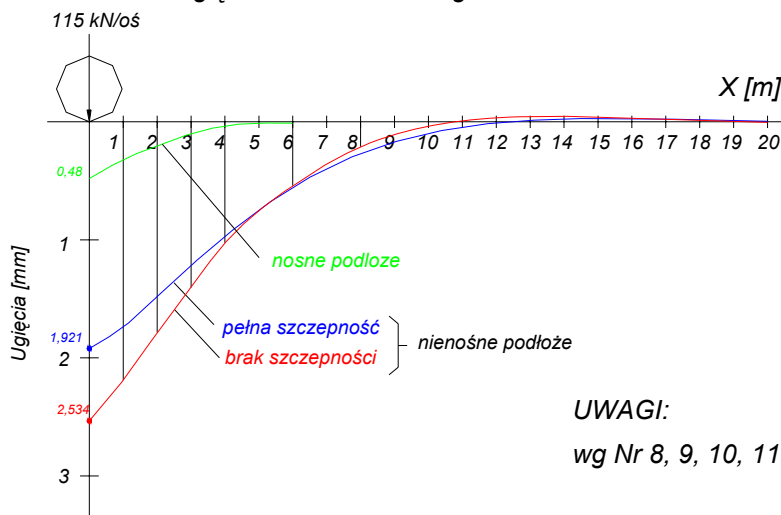
5.3.6. Ugięcia od obciążenia osią 115 kN

Ugięcia przedstawiają rys. 5.2, 5.3 i 5.4. Ugięcia podano w mm.

UGIĘCIA U_z [mm]

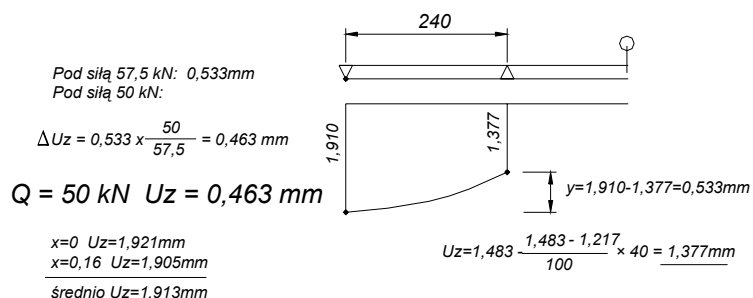
$$U_z = f(X) \text{ dla } z=0\text{m}$$

Ugięcia wzdłuż osi X - zgodnie z ruchem



Ugięcie wg Benkelmana

(szczepność)



Rysunek 5.2.

Na rys. 5.2 przedstawiono ugięcia powierzchni jezdni na słabym podłożu wzdłuż osi X , czyli w kierunku ruchu pojazdu. Pokazano ugięcia dla przypadku pełnej szczepności i braku szczepności pomiędzy nowymi i starymi warstwami asfaltowymi.

Z rys. 5.2 widać, że na słabym podłożu ugięcia są duże (1.921 mm i 2.534 mm, odpowiednio dla pełnej szczepności i dla braku szczepności). Są to wartości bardzo duże, niedopuszczalne dla ciężkiego ruchu. Czasza ugięć rozciąga się na odległość do 10 m przed i za kołem. Na słabym gruncie nawierzchnia niejako „pływa” pod obciążeniem. Podczas ruchu w nawierzchni przemieszcza się fala ugięć. Kolejne koła pojawiające się na nawierzchni wzbudzają tę falę. Występują przypadki nakładania się kolejnych oddziaływań kół. Proces ma charakter dynamiczny.

U góry rys. 5.2 pokazano wyniki porównawczych obliczeń ugięć wykonanych dla nośnego podłoża, dla którego przyjęto moduł $E = 60 \text{ MPa}$. Ugięcia na nośnym podłożu są kilkakrotnie mniejsze (0.48 mm), niż na torfach, a czasza ugięć jest znacznie krótsza (do 3 m).

Sczepność pomiędzy warstwami asfaltowymi wpływa wyraźnie na ugięcia. Brak sczepności zwiększa istotnie ugięcia. Nawierzchnia wskutek braku sczepności traci część sztywności warstwowej, ponieważ przy zginaniu warstwy mogą przesuwać się względem siebie na styku. Wpływ sczepności na wzrost ugięć jest istotny, ale bez porównania mniejszy od wpływu słabej warstwy torfu w podłożu.

Na dole rys. 5.2 pokazano jak wygląda pomiar ugięć belką Benkelmana nawierzchni, na słabym podłożu. Widać, że cały ugięciomierz ugina się razem z nawierzchnią. Ugięciomierz nie mierzy realnej wartości ugięcia. Ugięciomierz mierzy różnicę ugięć w dwóch punktach: pod czujką ugięciomierza ustawioną w środku obciążenia i w punkcie podparcia ugięciomierza. Z obliczeń wynika, że przy całkowitym ugięciu średnim pod kołem 57,5 kN, równym 1.910 mm, cały ugięciomierz przemieszcza się wraz z nawierzchnią o 1.377 mm. Ugięciomierz wskazuje wynik, jako różnicę ugięć w dwóch wyżej wymienionych punktach, równą 0.533 mm.

Obliczenia tłumaczą wyniki pomiaru ugięć wykonane na tym odcinku. Pomiary ugięć pod kołem 50 kN dały na słabych gruntach wyniki od 0.11 do 0.32 mm. Z obliczeń komputerowych wynika, że pod kołem 50 kN ugięcie zmierzone ugięciomierzem Benkelmana powinno być równe 0.46 mm. Jest to wartość większa, ale tego samego rzędu jaką określono w pomiarach terenowych.

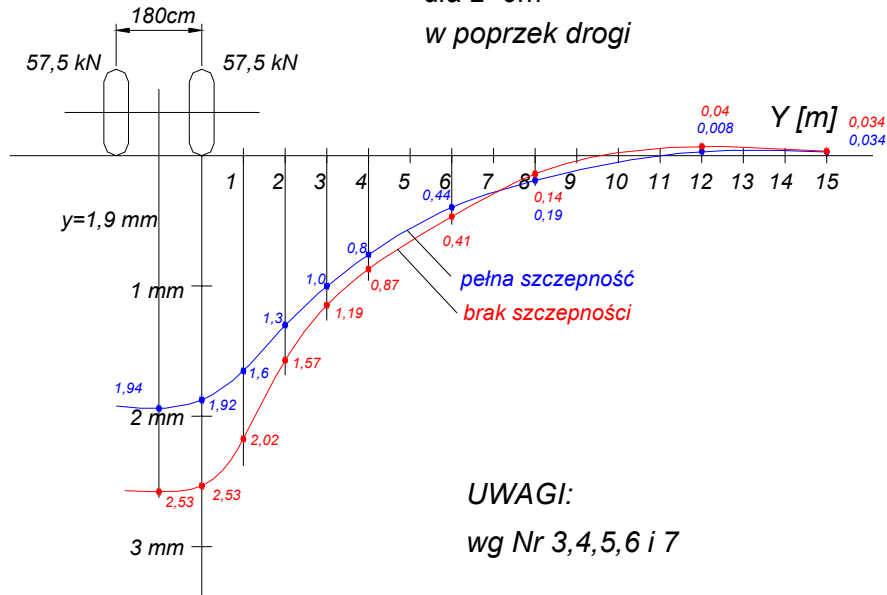
Trudno jest zweryfikować wyniki opisanych obliczeń. Być może ugięcia realne nawierzchni są nieco inne niż obliczone. Dokładność obliczeń zależy niewątpliwie od założonych parametrów obliczeniowych, jak również od uproszczeń przyjętych w modelu nawierzchni. Porównanie ugięć obliczonych na odcinku gruntów nośnych i słabonośnych wskazuje jednak na skalę problemu i na podstawowe źródło uszkodzeń nawierzchni.

UGIĘCIA U_z [mm]

$$U_z = f(Y)$$

dla $z=0\text{m}$

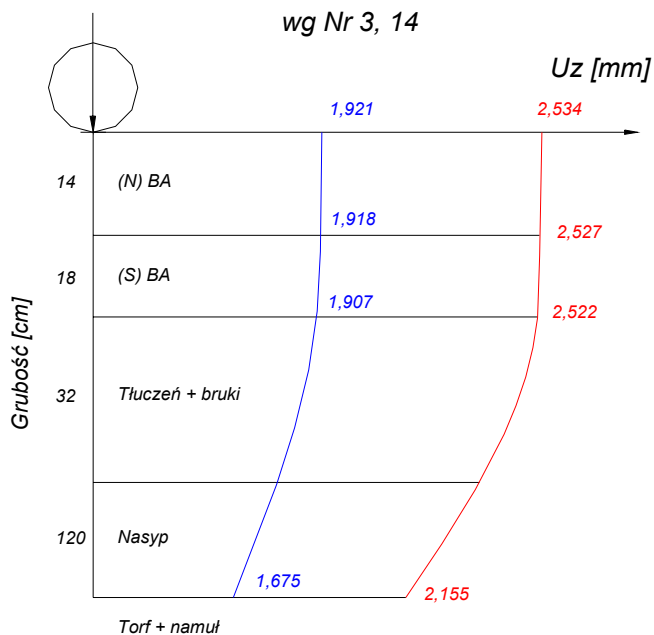
w poprzek drogi



Rysunek 5.3

Rysunek 5.3 przedstawia ugięcia nawierzchni wzdłuż osi Y , czyli w poprzek drogi. Czasza ugięć jest również rozległa, podobnie jak w kierunku X . Jest charakterystyczne, że pomiędzy kołami, w środku osi, nawierzchnia na słabym gruncie ugina się tak samo jak bezpośrednio pod kołami.

UGIĘCIE PIONOWE U_z



Ugięcie warstwy słabej pod osią 115 kN:

1,675 mm (szczepność)

2,155 mm (brak szczepności)

Ugięcie w konstrukcji i nasypie:

$U_z = 1,924 - 1,675 = 0,246$ mm (szczepność)

$U_z = 2,534 - 2,155 = 0,379$ mm (brak szczepności)

Rysunek 5.4.

Rys. 5.4 wyjaśnia przyczynę dużych ugięć nawierzchni. Podano na nim wartości ugięć na górze (spągu) każdej z warstw: powierzchni jezdni, góry starych warstw asfaltowych, podbudowy i górnej powierzchni (spągu) torfu. Widać, że za ugięcia odpowiedzialna jest głównie słaba warstwa torfu i namułu.

5.3.7. Odształcenia w warstwach asfaltowych od obciążenia osią 115 kN

W analizie mechanistycznej nawierzchni przyjmuje się, że odształcenia rozciągające powstające w warstwach nawierzchni pod obciążeniem ruchem są odpowiedzialne za ich trwałość zmęczeniową i za spękania. Przez odształcenia rozumie się wydłużenia lub skrócenia względne, czyli wyrażone w stosunku do pierwotnej długości analizowanego elementu, poddanego obciążeniu. Są więc wartościami bezwymiarowymi. W naszym przypadku wydłużenia lub skrócenia występują podczas zginania warstw pod obciążeniem kołami pojazdów.

Odształcenia na rysunkach podane są w mikrostrainach, w skrócie [$\mu\epsilon$], czyli w 10^{-6} .

Przed analizą przedstawionych dalej wyników obliczeń warto przypomnieć następujące wyniki badań terenowych, przeprowadzonych na odcinku drogi na torfach:

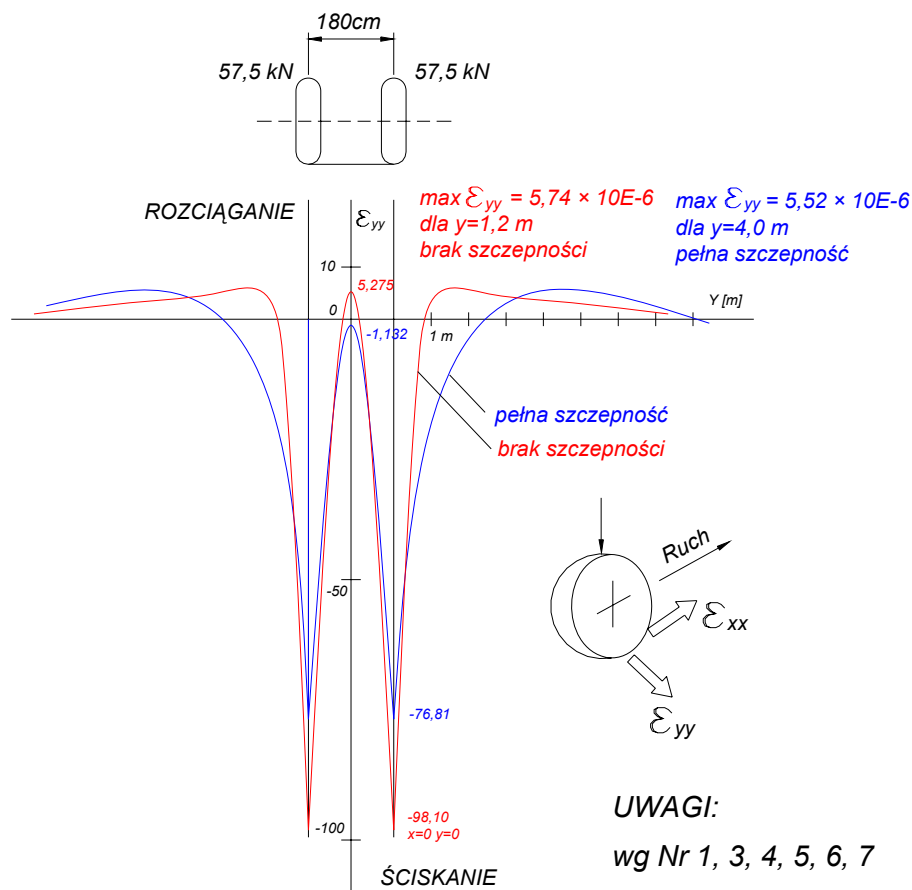
- w nawierzchni po dwóch latach eksploatacji powstała podłużna linia spękań, oznaczona jako typ I, położona pod śladem prawych kół, wzdłuż jezdni,
- po kolejnych trzech latach eksploatacji powstały dwie kolejne podłużne linie spękań, oznaczone jako typu II i III, położone wzdłuż jezdni,
- po trzech latach powstały nieliczne spękania poprzeczne tworząc ze spękaniem podłużnym typu I i II siatkę spękań,
- stwierdzono, że część spękań rozpoczyna się na górze nowych warstw asfaltowych, penetruje w dół i kończy się na starych warstwach asfaltowych, albo na ułożonych na nich siatkach zbrojących.

Wyniki obliczeń odształceń pokazują rys. 5.5, 5.6, 5.7 i 5.8.

ODKSZTAŁCENIA ε_{yy} (Y)

dla $z=0m$ $x=0m$

$E1=10000MPa$



Rysunek 5.5

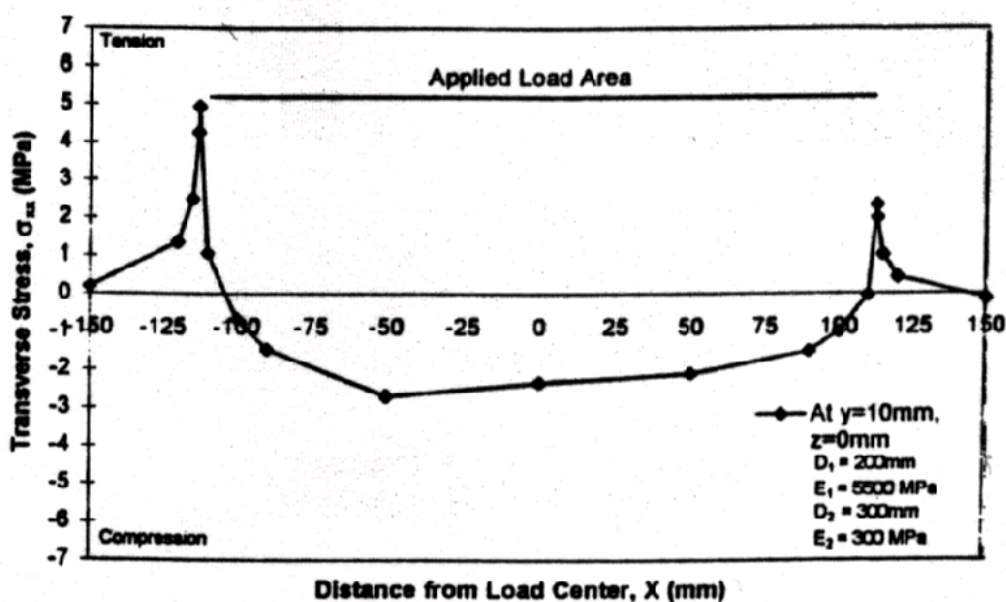
Rys. 5.5 przedstawia odkształcenia ε_{yy} powstające wzdłuż osi Y, czyli w poprzek jezdni, występujące na górnej powierzchni jezdni. Kierunek ich działania względem koła pokazuje mały rysunek, pod wykresem. Rysunek ten pokazuje koło i kierunek działania odkształceń względem położenia koła.

Z rys. 5.5 widać, że bezpośrednio pod kołami na powierzchni jezdni występuje ściskanie. W bliskim sąsiedztwie kół odkształcenia zmieniają znak i na powierzchni jezdni występują odkształcenia rozciągające. Są to dość małe wartości rozciągania, wielokrotnie mniejsze niż ściskanie pod kołem.

Odkształcenia ε_{yy} są odpowiedzialne za spękania podłużne nawierzchni, wzdłuż śladów kół. Spękania takie wystąpiły w analizowanej nawierzchni. Zaczynały się często od góry nawierzchni i penetrowały w dół, aż do siatki Tensar, na której

zatrzymywały się. Wyniki obliczeń pokazane na rys. 5.5 nie tłumaczą w pełni tego zjawiska. Obliczone odkształcenia rozciągające ε_{yy} na powierzchni warstw asfaltowych są za małe ($5,74 \mu s$), aby tak szybko zainicjować spękanie od góry warstwy ścieralnej.

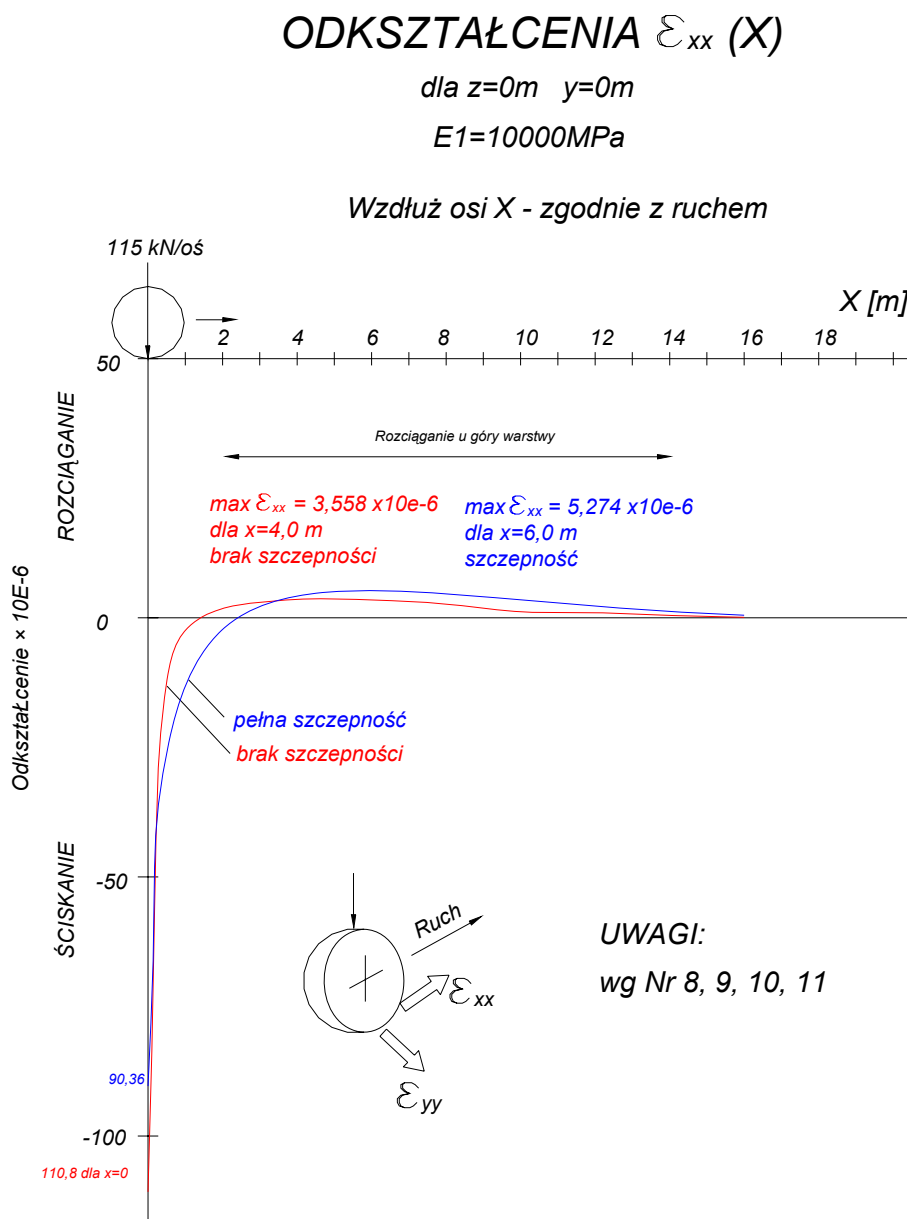
Przeprowadziliśmy rozległe studia literatury, aby wytłumaczyć rozwój spękań podłużnych nawierzchni od góry. Jest to powszechnie obserwowane zjawisko w nowoczesnych nawierzchniach, ale jednocześnie jedna z niewyjaśnionych dotychczas spraw w mechanice nawierzchni. Zgodnie z mechaniką nawierzchni spękanie powinno powstawać na dole i penetrować ku górze warstw asfaltowych, ale często jest odwrotnie. Również w naszym przypadku. Znaleźliśmy w literaturze dwie publikacje, które próbują tłumaczyć to zjawisko. Jedna tłumaczy to tym, że rozkład naprężeń pod kołem ogumionym nie jest równomierny, jak zakłada się w obliczeniach. Rozkład ten jest bardzo skomplikowany z koncentracją naprężeń na obwodzie styku koła z nawierzchnią. Z tego powodu na obwodzie styku koła z nawierzchnią, na powierzchni jezdni tworzą się znaczne rozciągania, inicjujące spękanie od góry. Ilustruje to rys. 5.5a. Inna publikacja tłumaczy spękania inicjowane na górze nawierzchni koncentracją energii rozproszonej na powierzchni warstwy i jest zbyt skomplikowana, aby na obecnym etapie mogła być zastosowana w praktyce.



Rys. 5.5a. Rozkład naprężeń na powierzchni typowej konstrukcji nawierzchni, stosując koncentrację nacisków na obwodzie koła stykającego się z nawierzchnią, rozwiązanie Jacobs.

Rys. 5.5 pokazuje jednakże pewną tendencję. Blisko obok koła, na powierzchni warstwy asfaltowej powstają odkształcenia rozciągające. Na rys. 5.5 są one małe, bo tak wynika z obliczeń przy równomiernym rozkładzie ciśnienia pomiędzy kołem a nawierzchnią. W rzeczywistości ciśnienie nie jest równomierne i dlatego odkształcenia rozciągające na powierzchni są dużo większe niż obliczone. Przy wielokrotnym obciążeniu nawierzchni ciężkimi pojazdami powodują one

powstawanie, zwłaszcza na słabym podłożu, liniowych podłużnych spękań inicjujących się od góry. Takie właśnie zjawisko stwierdzono na badanym odcinku.

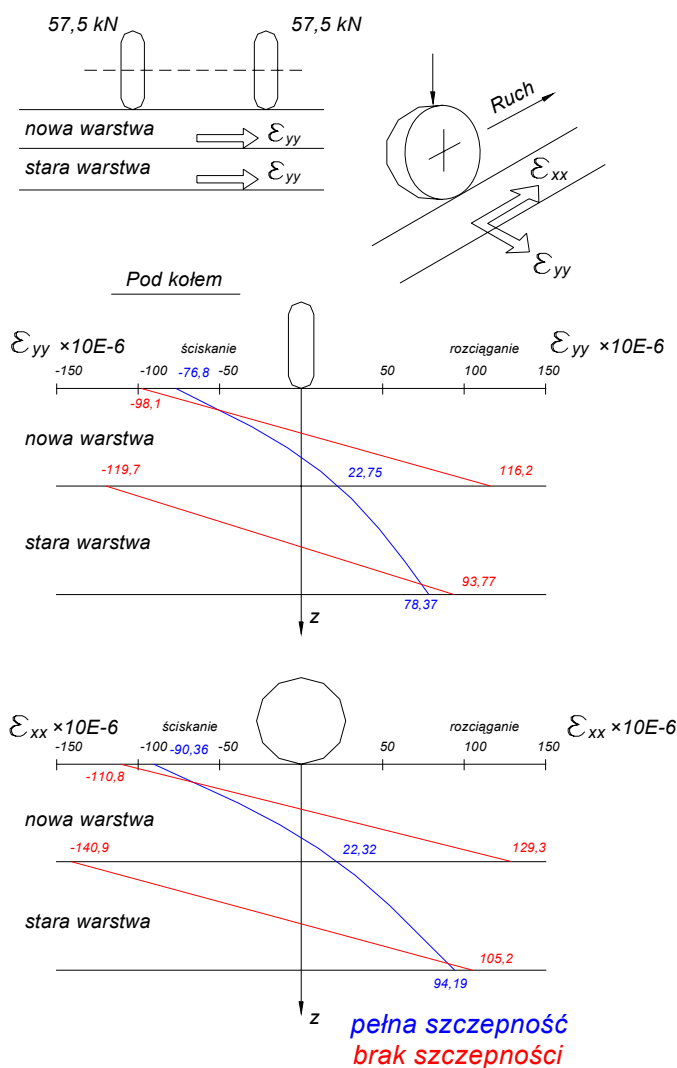


Rysunek 5.6

Rys. 5.6 przedstawia odkształcenia na powierzchni jezdni w kierunku X (w poprzek do ruchu). Po wyjaśnieniach do poprzedniego rysunku nie wymaga on dodatkowego komentarza.

ODKSZTAŁCENIA ϵ_{xx} i ϵ_{yy} W NOWYCH I STARYCH WARSTWACH ASFALTOWYCH W MIKROSTRAINACH

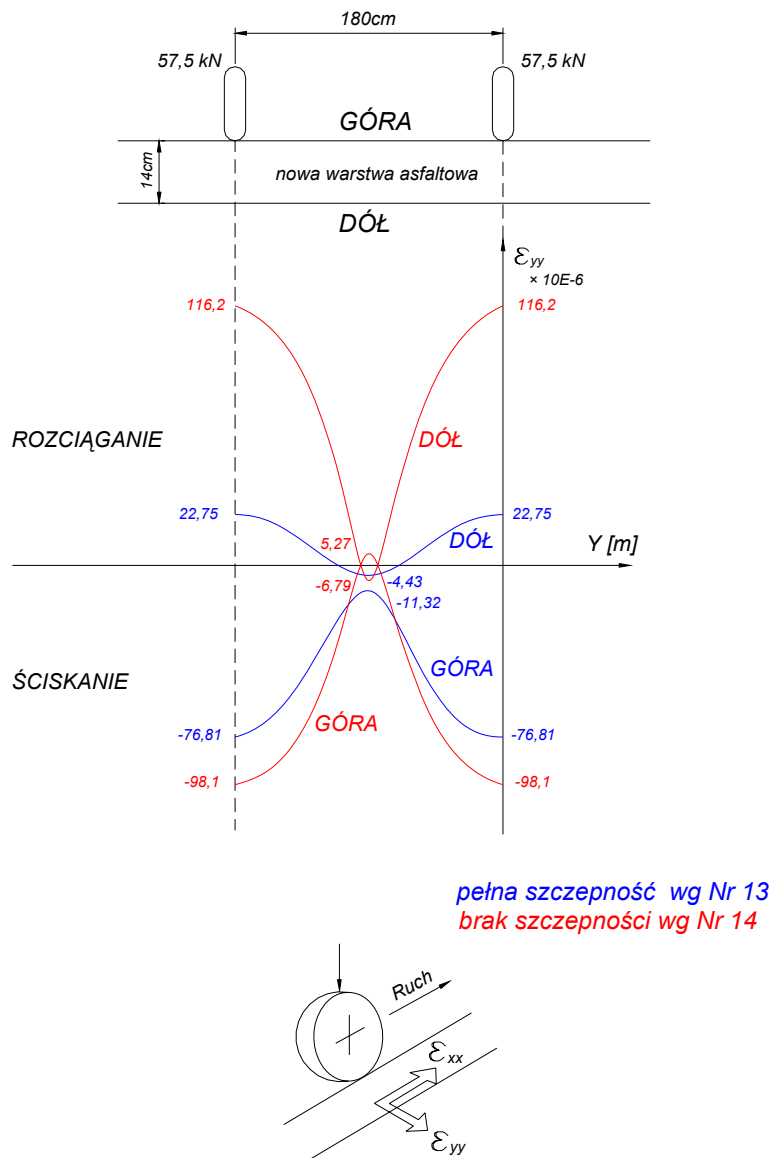
wg 13 i 14



Rysunek 5.7

Rys. 5.7 przedstawia odkształcenia powstające bezpośrednio pod kołem w przekroju poprzecznym konstrukcji nawierzchni, w nowych i w starych warstwach asfaltowych. Z rysunku tego widać jak istotny jest wpływ szczepności międzywarstwowej. Przy braku szczepności pomiędzy nowymi i starymi warstwami asfaltowymi duże odkształcenia rozciągające powstają na spodzie warstwy górnej. Przy pełnej szczepności układ pracuje jako zespolony, przy znacznie mniejszych odkształceniach.

ODKSZTAŁCENIA ϵ_{yy} NA GÓRZE I NA DOLE NOWEJ WARSTWY ASFALTOWEJ



Rysunek 5.8

Rys. 5.8 pokazuje odkształcenia w kierunku osi Y (poprzecznie do ruchu), w nowej warstwie asfaltowej. Pokazano naprężenia w przekroju poprzecznym jezdni, występujące na dole i na górze warstwy, przy pełnej szczepności i przy jej braku. Widać, że duże rozciąganie występuje bezpośrednio pod kołami, na spodzie warstwy. Ponownie widać, że ważny jest wpływ szczepności.

5.3.8. Wpływ szczepności na pracę warstw asfaltowych na słabym podłożu (obliczenia od obciążenia osią 115 kN)

Wpływ szczepności na pracę warstw asfaltowych był wielokrotnie przywoływany w podanych wyżej opisach. Zagadnieniu temu poświęcony będzie w szczególności ten rozdział.

Podczas analizy wyników obliczeń dotyczących szczepności należy pamiętać o dwóch istotnych sprawach:

- W badaniach terenowych nawierzchni na słabych gruntach stwierdzono brak szczepności międzywarstwowej w tych strefach nawierzchni, która poddana była ciężkiemu ruchowi i uległa spękanom. Dotyczy to najbardziej obciążonej strefy, którą było połączenie starej i nowej nawierzchni (jezdni i pobocza).
- Stwierdzono pełną szczepność warstw w strefach bez obciążenia ruchem (środek pasa ruchu, pobocze).
- W badaniach terenowych stwierdzono, że spękanom uległy tylko nowe warstwy asfaltowe, nie pękły stare warstwy asfaltowe.

5.3.8.1. Wpływ szczepności na ugięcia nawierzchni - rysunki 5.2, 5.3 i 5.4 (przedstawione wyżej)

Rysunki 5.2, 5.3 i 5.4 przedstawiają ugięcia nawierzchni pod osią 115 kN na gruntach słabych w zależności od szczepności międzywarstwowej. Z rys. 5.2 widać, że ugięcie bezpośrednio pod kołem wynosi:

- 1.921 mm przy pełnej szczepności i
- 2.534 mm przy braku szczepności między starymi i nowymi warstwami.

Wzrost ugięć przy braku szczepności wynosi 32%. Podobne tendencje można zauważyć na rys. 5.3 i 5.4.

5.3.8.2. Wpływ szczepności na odkształcenia w nawierzchni - rysunki 5.5, 5.6, 5.7 i 5.8 (przedstawione wyżej)

Z wymienionych rysunków najbardziej charakterystyczny jest rys. 5.7. Pokazuje on, że:

- Przy braku szczepności na spodzie nowych warstw asfaltowych powstaje odkształcenie rozciągające $\varepsilon_{YY} = 116.2$ mikrostrainów (116.2×10^{-6}).
- Przy pełnej szczepności na spodzie nowych warstw powstaje odkształcenie rozciągające $\varepsilon_{YY} = 22.8$ mikrostrainów (22.8×10^{-6}).
- Przy braku szczepności większe odkształcenia powstają w górnej (nowej) warstwie asfaltowej niż w dolnej (starej) warstwie asfaltowej.
- Przy pełnej szczepności większe odkształcenia powstają w górnej (nowej) warstwie asfaltowej.

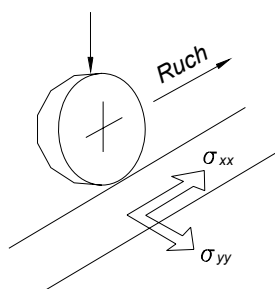
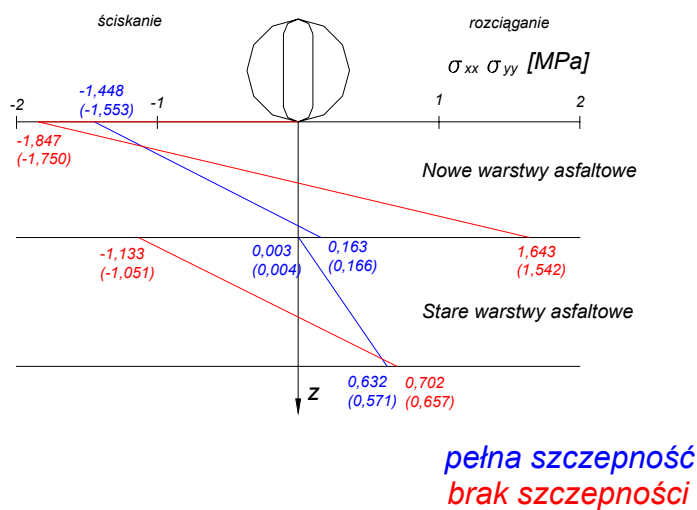
Zerwanie szczepności starych i nowych warstw powoduje wzrost odkształceń rozciągających w nowych warstwach asfaltowych o około pięć razy.

5.3.8.3. Wpływ szczepności na naprężenia w nawierzchni

NAPRĘŻENIA W WARSTWACH ASFALTOWYCH POD KOŁEM σ_{xx} i σ_{yy}

σ_{yy} podano w nawiasach

wg 13 i 14

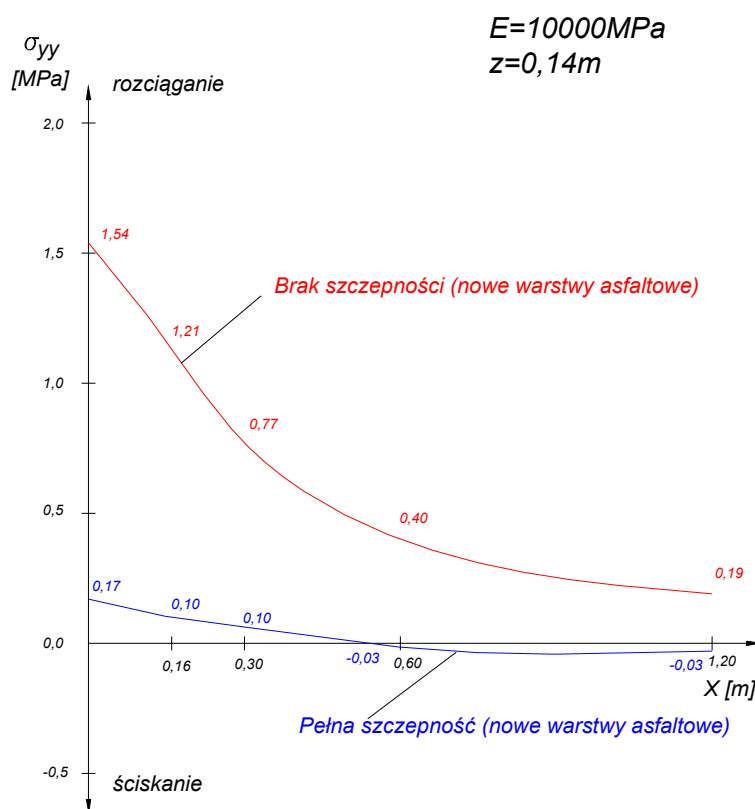


Rysunek 5.9

Rys. 5.9 pokazuje, że naprężenia rozciągające w nowej warstwie asfaltowej przy braku szczepności rosną około dziesięciu razy w stosunku do naprężeń występujących przy pełnej szczepności.

WPLYW SZCZEPNOŚCI NA NAPRĘŻENIA σ_{yy} W NOWYCH WARSTWACH ASFALTOWYCH

Spód nowych warstw asfaltowych
wg 20 i 22

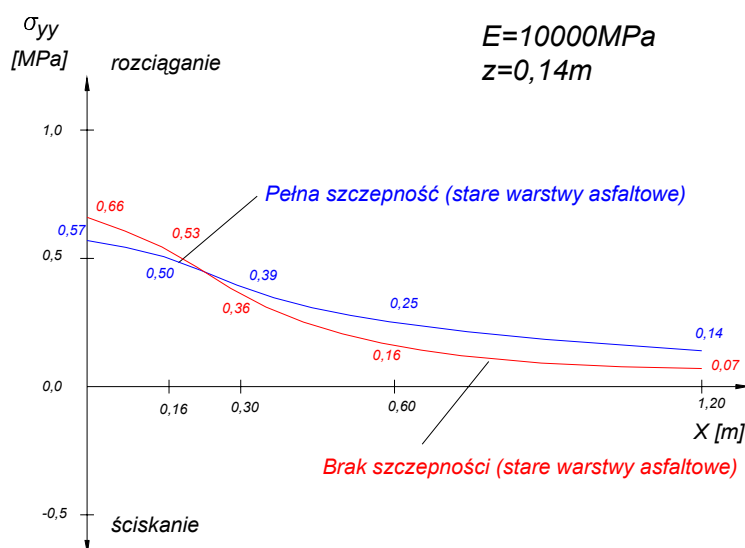


Rysunek 5.10

Rys. 5.10 pokazuje zmianę naprężeń rozciągających σ_{yy} , w nowej warstwie asfaltowej, które są odpowiedzialne za powstanie spękań podłużnych (wzdłuż śladu koła). Widać wyraźnie, że przy pełnej szczepności naprężenia są bardzo małe (0.17 MPa) i nie mogłyby spowodować spękań. Jest to możliwe przy braku szczepności, kiedy naprężenia są równe 1.54 MPa.

WPŁYW SZCZEPNOŚCI NA NAPRĘŻENIA σ_{yy} W STARYCH WARSTWACH ASFALTOWYCH

Spód starych warstw asfaltowych
wg 20 i 22



Rysunek 5.11

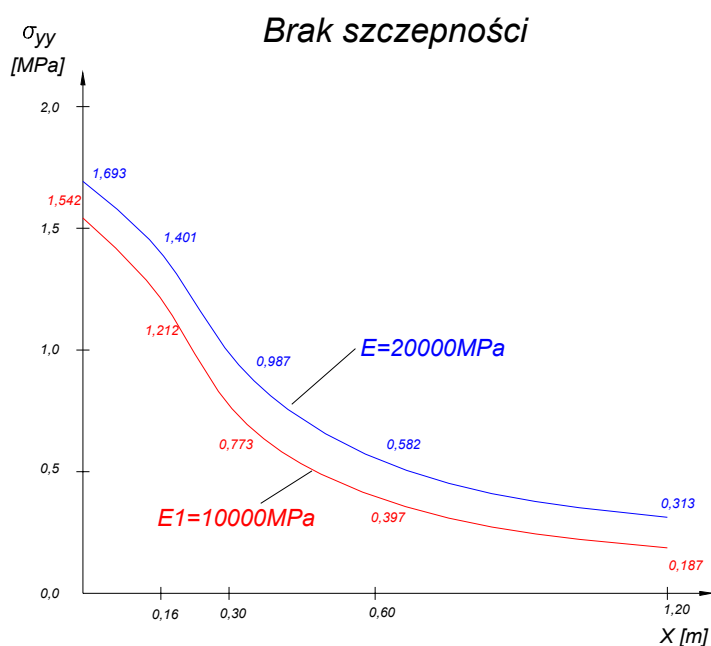
Rys. 5.11 pokazuje zmianę naprężeń rozciągających σ_{yy} , w starej warstwie asfaltowej. Naprężenia te w obu przypadkach, przy braku szczepności i przy pełnej szczepności, są dość małe, mniejsze niż wywoływane w nowej warstwie bez szczepności. Pozostałe tendencje są zgodne z już opisanymi.

5.4. Wpływ sztywności warstw asfaltowych na naprężenia i odkształcenia (obliczenia od obciążenia osią 115 kN)

Badania w laboratorium próbek pobranych z nawierzchni drogi Nr 1, zarówno na gruntach słabych jak i nośnych, wykazały, że ich moduł sztywności sprężystej jest bardzo duży. Porównanie z modułami próbek pobranych z innych lokalizacji pokazało, że beton asfaltowy z analizowanego odcinka drogi Nr 1 jest znacznie sztywniejszy (patrz rozdział 4). Celem obliczeń, opisanych w tym punkcie, była ocena wpływu sztywności warstw asfaltowych na pracę nawierzchni.

WPŁYW SZTYWNOŚCI WARSTW ASFALTOWYCH NA NAPRĘŻENIA σ_{yy}

Spód nowych warstw asfaltowych
wg Nr 22 i 34



Rysunek 5.12

Naprężenia na spodzie nowych warstw asfaltowych σ_{yy} , odpowiedzialne za spękania podłużne, istotnie rosną, gdy wzrasta moduł sztywności warstwy asfaltowej z 10 000 MPa do 20 000 MPa.

Wyniki obliczeń przedstawione na rys. 5.12 potwierdza poniższa tablica 5.1, przedstawiająca naprężenia σ_{xx} .

Tablica 5.1. Wpływ sztywności i szczepności na naprężenia rozciągające σ_{xx} na spodzie warstw asfaltowych (naprężenia podano w MPa)

Warstwa asfaltowa	Mała sztywność warstw asfaltowych		Duża sztywność warstw asfaltowych	
	Pełna szczepność	Brak szczepności	Pełna szczepność	Brak szczepności
Nowa	0.163	1.621	0.189	1.830
Stara	0.623	0.710	0.847	1.042

Z tablicy 5.1 widać, że:

- Ze wzrostem sztywności w każdym przypadku rosną naprężenia.
- Najgorszy jest przypadek dużej sztywności warstw i braku szczepności międzywarstwowej.

Rysunki 5.13 i 5.14

Z rysunków tych widać, że zgodnie z teorią, w sztywniejszych warstwach powstają mniejsze odkształcenia. Odkształcenia są odwrotnie proporcjonalne do modułu sprężystości (lub sztywności). Szczepność międzywarstwowa znacznie zmniejsza odkształcenia w nowej warstwie asfaltowej (porównaj rys. 5.13 i 5.14).

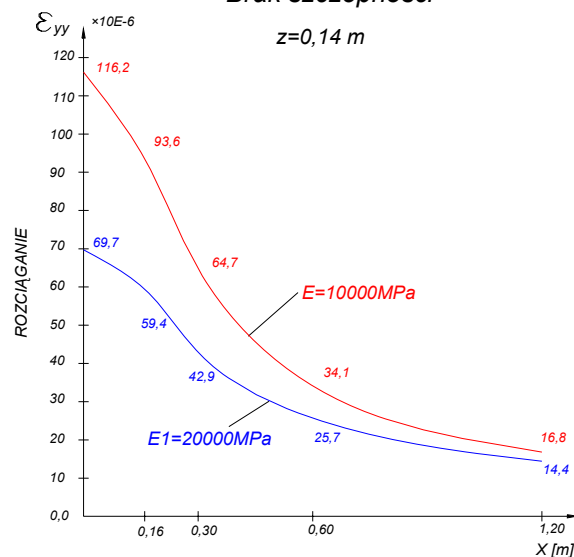
WPŁYW SZTYWNOŚCI WARSTW ASFALTOWYCH NA ODKSZTAŁCENIA ϵ_{yy} (MIKROSTRAIN)

Spód nowych warstw asfaltowych

wg Nr 22 i 34

Brak szczepności

$z=0,14\text{ m}$



Rys. 5.13

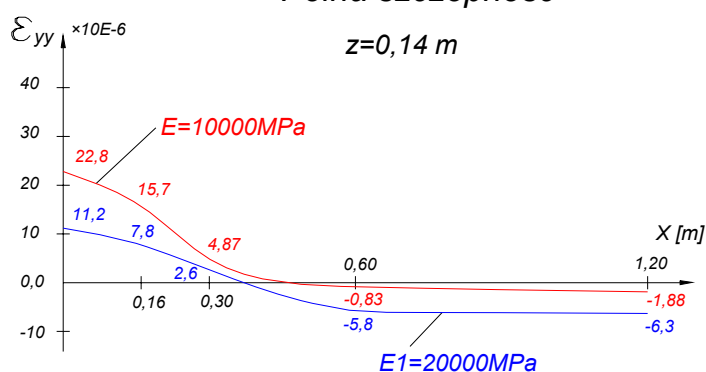
WPŁYW SZTYWNOŚCI WARSTW ASFALTOWYCH NA ODKSZTAŁCENIA ε_{yy} (MIKROSTRAIN)

Spód nowych warstw asfaltowych

wg Nr 20 i 36

Pełna szczepność

$z=0,14\text{ m}$



Rys. 5.14.

5.5. Wpływ siły poziomej na naprężenia rozciągające w warstwach asfaltowych (obliczenia od obciążenia osią 115 kN)

Przeprowadzono obliczeniowe badania tego wpływu. Założono, że siła pozioma wynosi:

- przy kole swobodnym $H = 0$;
- przy kole napędowym $H = 0.1 Q$;
- przy kole hamowanym $H = 0.6 Q$;

gdzie: Q – nacisk pionowy (ciężar).

Przeanalizowano wpływ siły poziomej na naprężenia rozciągające w starych i nowych warstwach asfaltowych przy pełnej szczepności i przy braku szczepności.

Stwierdzono pomijalnie mały wpływ siły poziomej na naprężenia rozciągające w warstwach asfaltowych. Siła pozioma powoduje wzrost naprężeń rozciągających maksymalnie o około 1%. W związku z tym, nie przedstawiono szczegółowych wyników tych obliczeń w niniejszym opracowaniu.

5.6. Porównanie naprężeń i odkształceń działających w dwóch kierunkach „X” i „Y” - wzdłuż i w poprzek do jazdy – wyjaśnienie przyczyn spękań podłużnych (obliczenia od obciążenia osią 115 kN)

Celem tych obliczeń było wyjaśnienie przyczyn powstania spękań podłużnych w nawierzchni na początku stanu jej degradacji. Stwierdzono w terenie, że najpierw powstają w nawierzchni trzy linie spękań podłużnych (kolejno w czasie: typu I, II i III). Potem pomiędzy spękaniami typu I i II, położonymi w najsłabszym miejscu nawierzchni, na styku nowej i starej konstrukcji nawierzchni, powstają spękania poprzeczne. W efekcie na połączeniu starej i nowej nawierzchni powstaje siatka spękań.

Dotychczasowe obliczenia nie tłumaczą tego zjawiska (patrz na przykład rys. 5.7 i 5.9). Rys. 5.7 pokazuje, że przy braku szczepności w górnej (nowej) warstwie asfaltowej, bezpośrednio pod kołem, powstaną większe odkształcenia ϵ_{XX} niż ϵ_{YY} :

- $\epsilon_{XX} = 129.3$ mikrostraina,
- $\epsilon_{YY} = 116.2$ mikrostraina.

Za powstawanie spękań poprzecznych odpowiadają podłużne odkształcenia rozciągające ϵ_{XX} , a za powstawanie spękań podłużnych odpowiadają poprzeczne odkształcenia rozciągające ϵ_{YY} . Z obliczeń dla punktów pod środkiem śladu koła wynikałoby, że ze względu na większe odkształcenia rozciągające w kierunku X (zgodnym z ruchem) na początku powinny powstać spękania poprzeczne, a potem podłużne. Wynik obliczeń dla środka śladu obciążenia jest więc odwrotny od wyniku obserwacji terenowych.

Podobny wynik otrzymano dla naprężeń rozciągających na spodzie warstw asfaltowych (patrz rys. 5.9). Rys. 5.9 pokazuje, że przy braku szczepności w górnej (nowej) warstwie asfaltowej, bezpośrednio pod kołem, powstaną większe naprężenia σ_{XX} niż σ_{YY} :

- $\sigma_{XX} = 1.643$ MPa,
- $\sigma_{YY} = 1.542$ MPa.

Za powstawanie spękań poprzecznych odpowiadają podłużne naprężenia σ_{XX} a za powstawanie spękań podłużnych odpowiadają poprzeczne naprężenia σ_{YY} . Z obliczeń wynikałoby więc, że ze względu na większe naprężenia rozciągające w kierunku X (zgodnym z ruchem) na początku powinny powstać spękania poprzeczne, a potem podłużne. Wynik obliczeń jest, więc ponownie odwrotny od wyniku obserwacji terenowych.

Wyniki opisanych obliczeń wprowadziły pewne zakłopotanie. Aby wyjaśnić, dlaczego wyniki obliczeń są odwrotne niż wyniki obserwacji, zdecydowano się wykonać dodatkowe obliczenia naprężeń i odkształceń, w dwóch kierunkach X i Y, nie tylko bezpośrednio pod środkiem śladu kołowego, jak się najczęściej robi, ale także dla wielu punktów położonych wzdłuż osi X, czyli wzdłuż śladu poruszającego się koła. Wyniki tych obliczeń przedstawiają rysunki 5.15, 5.16, 5.17 i 5.18.

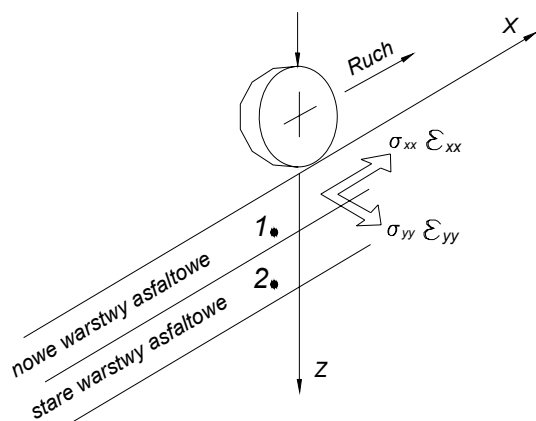
Rysunki 5.15, 5.16, 5.17 i 5.18

Są one podobne w swej treści i dlatego zostaną opisane razem. Analizę warto rozpocząć nie po kolei, ale od rys. 5.17. Rys. 5.17 pokazuje zmianę naprężeń σ_{xx} i σ_{yy} , wzdłuż osi X, dla punktu położonego bezpośrednio pod środkiem śladu koła ($X = 0$), punktu na krawędzi śladu ($X = 0.16$) oraz dla punktów w odległości 0.3 m, 0.6 m i 1.2 m od środka śladu koła.

Przypomnieć warto, że za spękania podłużne odpowiadają naprężenia rozciągające σ_{yy} (poprzeczne do drogi). Wywołują one rozciąganie w poprzek jezdni. Widać z rys. 5.17, że tylko bezpośrednio w środku śladu koła naprężenia podłużne ($\sigma_{xx} = 1.643$ MPa) są większe od poprzecznych ($\sigma_{yy} = 1.542$ MPa). Począwszy od punktu na krawędzi śladu koła, od $X = 0.16$ m, naprężenia σ_{yy} są większe od σ_{xx} . Przy $X = 0.16$ m naprężenia poprzeczne σ_{yy} są większe o 20%, przy $X = 0.3$ m są większe o 71% od σ_{xx} . To tłumaczy dlaczego nawierzchnia na początku pęka wzdłuż drogi, a potem w poprzek. Pozostałe rysunki (5.15, 5.16 i 5.18) potwierdzają powyższy opis.

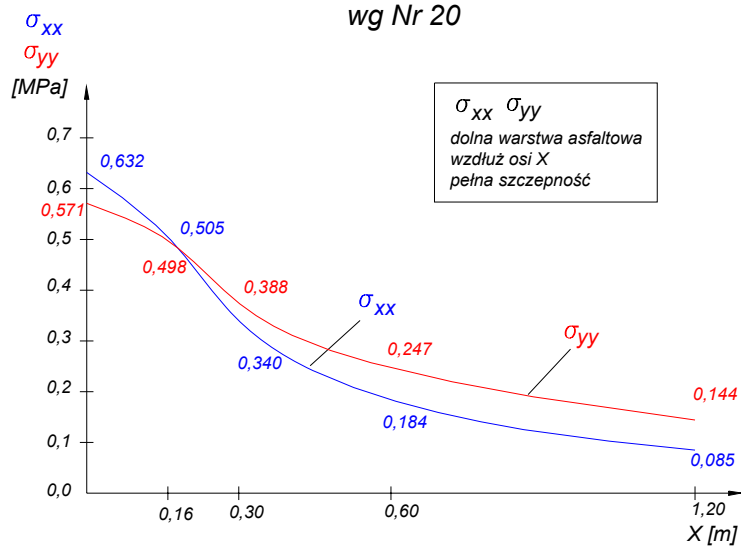
**Porównanie naprężeń i odkształceń w warstwach
asfaltowych w dwóch kierunkach X i Y wzdłuż osi X
(wzdłuż jazdy)**

wg Nr 20 i 22



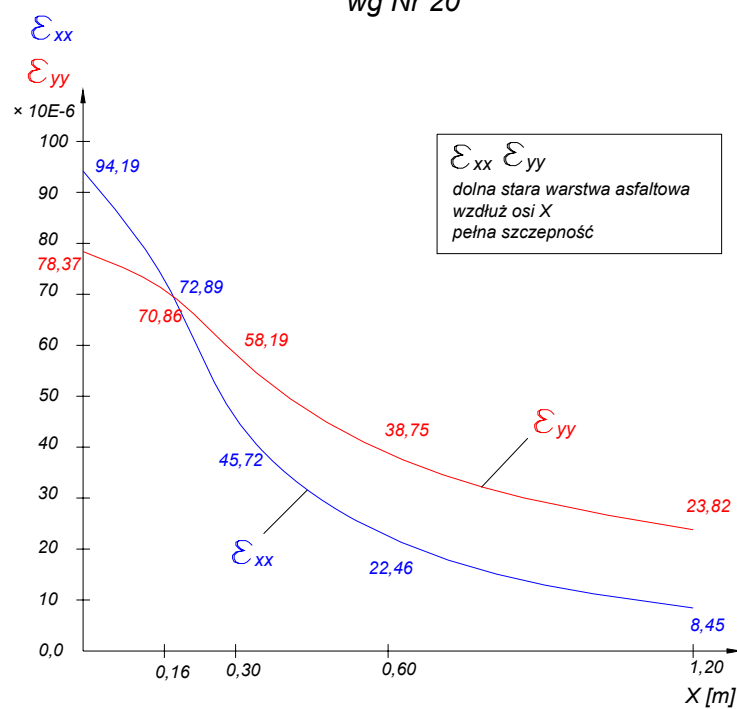
**NAPRĘŻENIA NA SPODZIE STAREJ
WARSTWY ASFALTOWEJ
PEŁNA SZCZEPNOŚĆ**

wg Nr 20



Rys. 5.15.

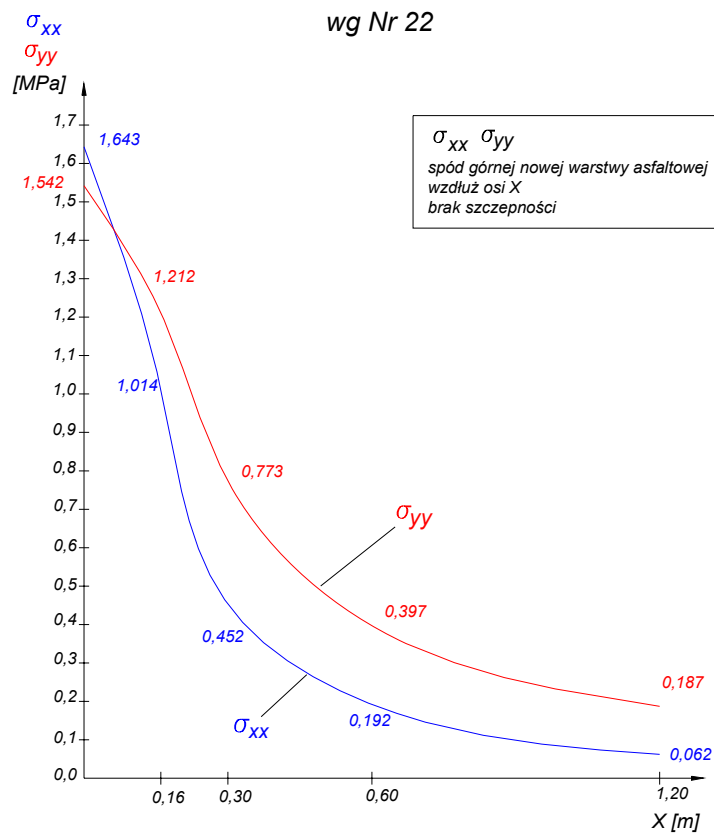
ODKSZTAŁCENIA NA SPODZIE STAREJ WARSTWY ASFALTOWEJ PEŁNA SZCZEPNOŚĆ wg Nr 20



Rys. 5.16.

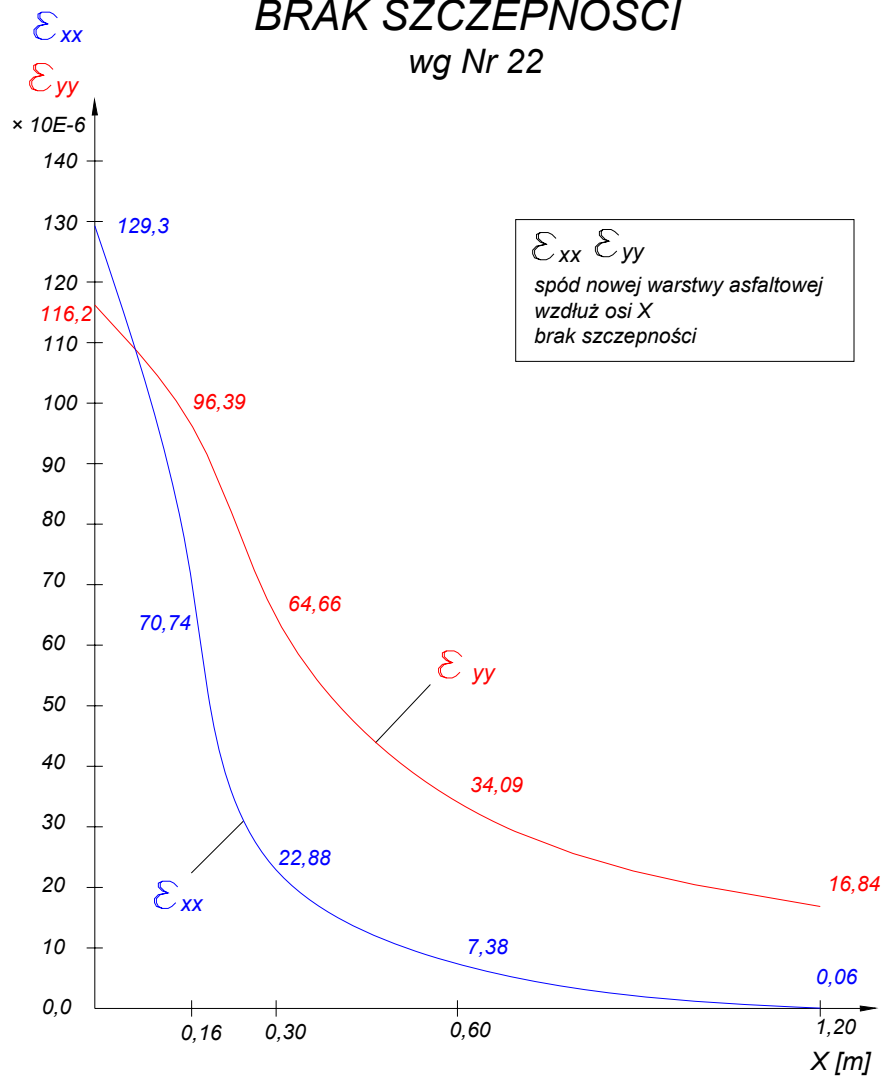
NAPRĘŻENIA NA SPODZIE NOWEJ WARSTWY ASFALTOWEJ BRAK SZCZEPNOŚCI

wg Nr 22



Rys. 5. 17.

ODKSZTAŁCENIA NA SPODZIE NOWEJ WARSTWY ASFALTOWEJ BRAK SZCZEPNOŚCI wg Nr 22



Rys. 5.18.

5.7. Badanie ścinania w warstwach asfaltowych (obliczenia od obciążenia osią 115 kN)

Celem tych obliczeń jest wyjaśnienie przyczyn zerwania szczepności międzywarstwowej na drodze. Szczepność międzywarstwowa zmierzona w laboratorium na próbkach o średnicy 150 mm pobranych z nieobciążonych miejsc w nawierzchni była duża i wynosiła średnio (patrz tablica 1 w rozdziale 4):

- warstwy ścieralna/wiążąca 34.9 kN,
- warstwy wiążąca/podbudowa 25.4 kN,
- warstwy podbudowa/podbudowa 17.4 kN.

Przy próbkach o średnicy 150 mm odpowiada to wytrzymałości na ścinanie odpowiednio równej:

- warstwy ścieralna/wiążąca 1.97 MPa,
- warstwy wiążąca/podbudowa 1.44 MPa,
- warstwy podbudowa/podbudowa 0.98 MPa.

Wyniki obliczeń przedstawiają rysunki 5.19, 5.20 i 5.21.

warstw ścieralnej i wiążącej, równej 1.97 MPa. Przy kole napędowym naprężenia styczne dla osi Z są mniejsze, a przy kole swobodnym równe zero.

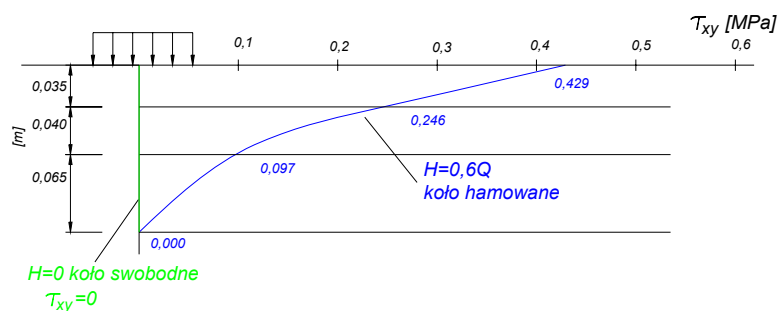
Na dole rysunku 5.19 pokazano naprężenia główne wzdłuż osi Z, odpowiedzialne za ścinanie w warstwach. Kierunek tych naprężeń jest zróżnicowany i nie odpowiadają one za ścinanie w styku warstw.

BADANIE ŚCINANIA W WARSTWACH ASFALTOWYCH (cd)

BRAK SZCZEPNOŚCI
STARE I NOWE WARSTWY ASFALTOWE

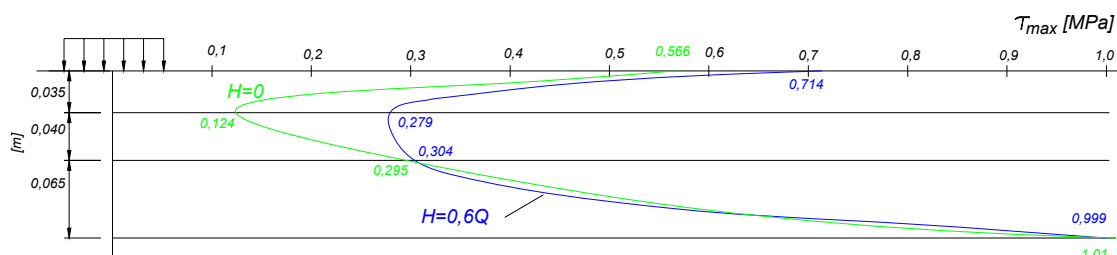
hamowanie Nr 26 $\longrightarrow H = 0,6Q$
kolo swobodne Nr 27 $\longrightarrow H = 0$

τ_{xz} w płaszczyźnie x,y; w kierunku X; na styku warstw



Główne naprężenia styczne τ_{max}

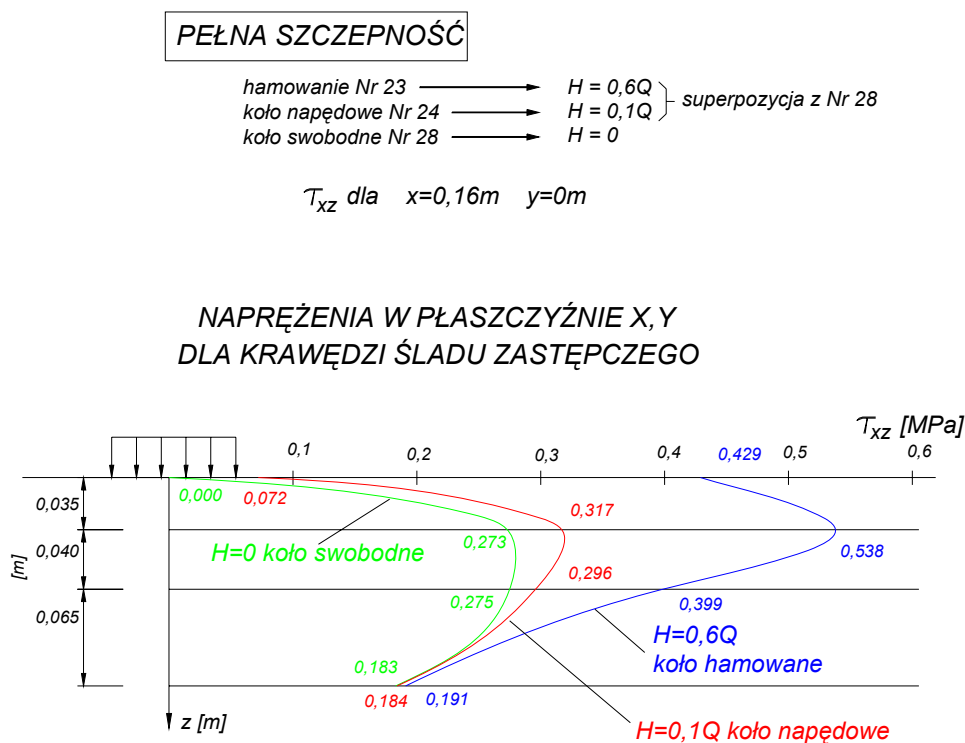
$x=0m$ $y=0m$ w osi obciążenia



Rysunek 5.20

Przedstawia on to co rys. 5.19, ale przy założeniu braku szczepności między starymi i nowymi warstwami asfaltowymi. Przy porównaniu rys. 5.19 i 5.20 widać, że wpływ tej szczepności na naprężenia styczne jest mały.

BADANIE ŚCINANIA W WARSTWACH ASFALTOWYCH (cd)



Rysunek 5.21

Jest to obraz naprężeń stycznych τ_{xy} działających pod krawędzią śladu koła dla $X = 0.16$ m i $Y =$ m w płaszczyźnie poziomej (0,X,Y). Są one odpowiedzialne za zerwanie szczepności międzywarstwowej. Jest to przypadek pełnej szczepności.

Rys. 5.21 jest klasycznym obrazem naprężeń stycznych, znanym studentom i inżynierom drogownictwa, z tym że najczęściej przedstawia się tylko przypadek swobodnego koła.

Z rys. 5.21 widać, że znaczne naprężenia powstają od koła hamowanego. Przypadek gwałtownego hamowania na rozważanym odcinku drogi jest jednak bardzo rzadki.

Drugi pod względem wielkości naprężeń stycznych τ_{xy} przypadek to ruch koła napędowego. W tym przypadku największe naprężenia styczne, w płaszczyźnie (0,X,Y) są rzędu 0.3 MPa. Zmierzona w laboratorium wytrzymałość styków warstw na ścinanie była równa w kolejnych stykach (idąc od góry) 1.97 MPa, 1.44 MPa i 0.97 MPa.

Stosunek wytrzymałości styku na ścinanie do naprężeń stycznych τ_{xy} działających w styku jest następujący:

- warstwy ścieralna/wiążąca $n = 1.97/0.273 = 7.2$
- warstwy wiążąca/podbudowa $n = 1.44/0.275 = 5.2$
- warstwy podbudowa/istniejąca stara nawierzchnia $n = 0.97/0.184 = 5.3$.

Stosunek ten jest miarą bezpieczeństwa styku i tłumaczy dlaczego zerwanie szczepności następowało w warstwach wiążąca/podbudowa i podbudowa/istniejąca stara nawierzchnia, a nigdy na styku warstw ścieralna/wiążąca.

Wytrzymałość jest kilka razy większa od obliczonych naprężeń. Dlaczego więc nastąpiło zerwanie szczepności międzywarstwowej? Obliczenia wykonane dla przypadku statycznych obciążeń nie dają odpowiedzi na to pytanie. Odpowiedzi należałoby szukać w dynamice oddziaływania ruchu na podatnym, uginającym się podłożu. Można przypuszczać, że przesuwające się w nawierzchni dynamiczne fale powodują zrywanie szczepności międzywarstwowej.

5.8. Obliczenia porównawcze dla nośnego podłoża - ugięcia, odkształcenia w warstwach asfaltowych (obliczenia od obciążenia osią 115 kN)

Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rys. 5.22, 5.23 i 5.24. Obliczenia wykonano przy założeniu, że konstrukcja nawierzchni jest identyczna jak na gruntach nienośnych, ale pod nią zalegają grunty nośne o module sprężystości $E = 60$ MPa.

Rysunki 5.22, 5.23 i 5.24

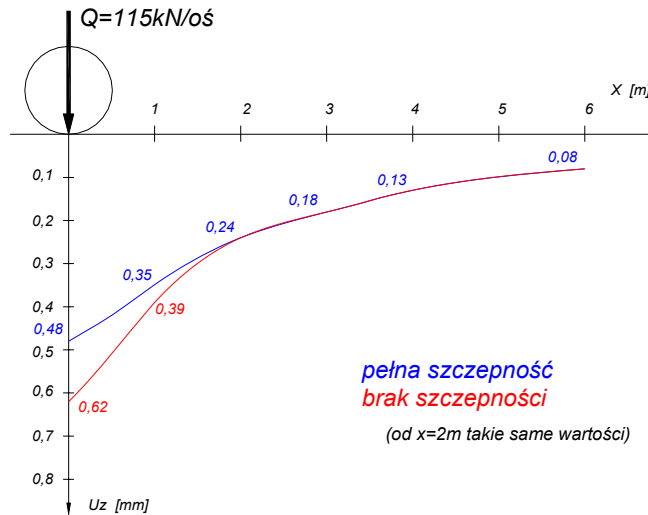
Rysunki te przedstawiają ugięcia pod kołem 115 kN i odkształcenia na powierzchni jezdni. Z rys. 5.22 i 5.23 widać, że ugięcia na gruntach nośnych są kilkakrotnie mniejsze niż na gruntach słabych. Wpływ szczepności jest mniej istotny na gruntach nośnych.

UGIĘCIA U_z [mm]

Podłoże nośne $E=60\text{MPa}$

$U_z = f(X)$ dla $z=0\text{m}$

wg Nr 34 i 35



Rys. 5.22.

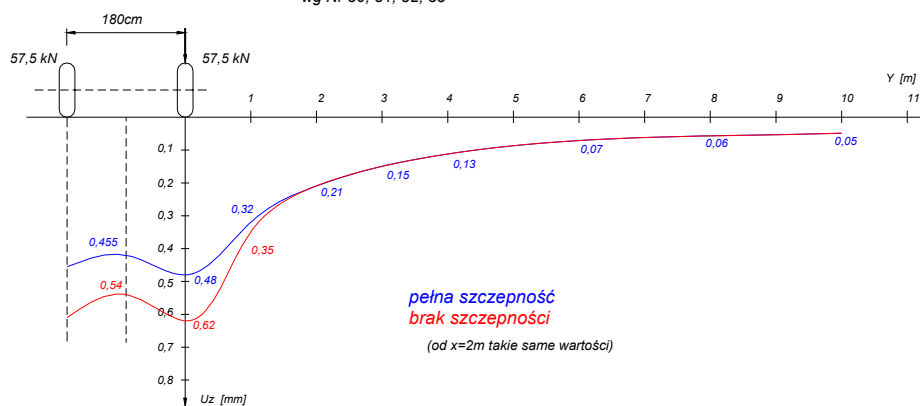
Rys. 5.23.

UGIĘCIA U_z [mm]

Podłoże nośne $E=60\text{MPa}$

$U_z = f(Y)$ dla $z=0\text{m}$

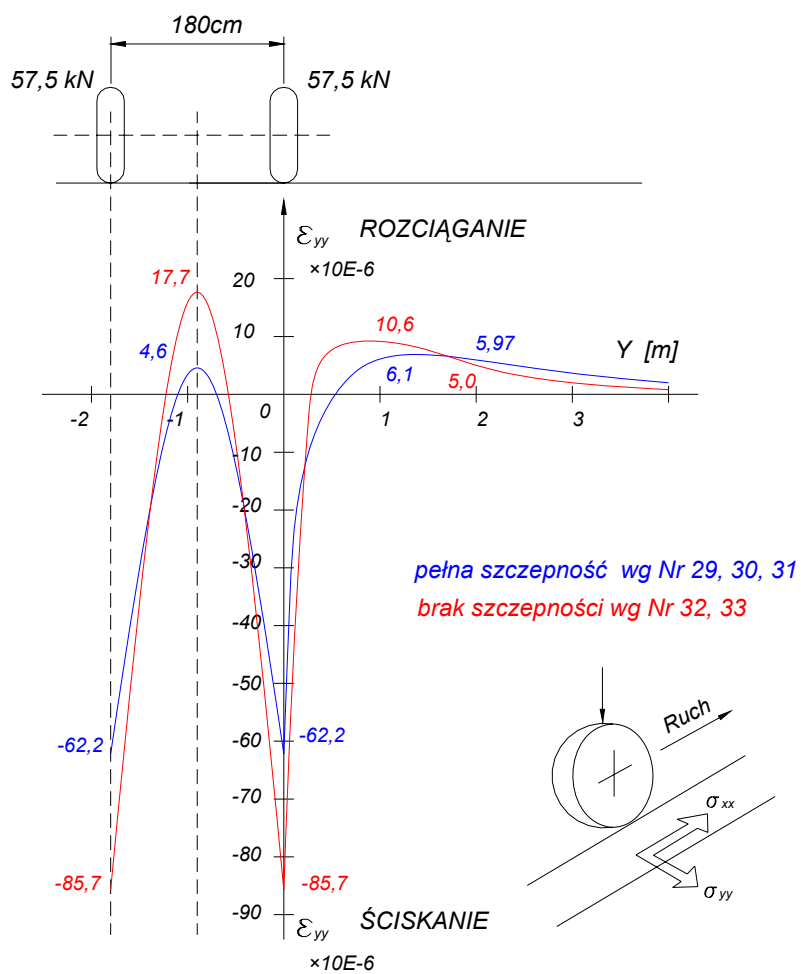
wg Nr 30, 31, 32, 33



ODKSZTAŁCENIA $\varepsilon_{yy} = f(Y)$

dla $z=0m$

Grunt nośny $E = 60MPa$



Rys. 5.24

Literatura

- [1] Berndt, Instrukcja, dotycząca wiązania warstw, spoin, połączeń i kształtowania asfaltowych poboczy powierzchni komunikacyjnych, M SNAR, Bonn 1998, tłumaczenie z języka niemieckiego dla potrzeb Zakładu Budowy Dróg PG wykonał mgr inż. Edmund Boito
- [2] Błażejowski K., Styk S., Technologia warstw asfaltowych, Poradnik, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2004, wydanie II.
- [3] Chellgren J.D., Preventing Pavenemt Slipping, Local Highway Technical News, Vol.11, No.4
- [4] Cross S.A., Shrestha P.P., Guidelines for Using Prima and Tack Coats, Technical Report FHWA-CFL-04-001, July 2004, s.113.
- [5] Galer, Instrukcja do budowy kompaktowych nawierzchni asfaltowych, MKA, Bonn 2001, tłumaczenie z języka niemieckiego dla potrzeb Zakładu Budowy Dróg PG wykonał mgr inż. Edmund Boito
- [6] Glet W., (opr. Wałęcka H.K.), Układ i związanie warstw w konstrukcjach nawierzchni asfaltowych, Nowości w Zagranicznej Technice drogowej, nr 140/2000, str.37-53
- [7] Górszczyk J., Zieliński P., Modelowanie konstrukcji nawierzchni asfaltowej zbrojonej geosyntetyczną warstwą pośrednią przy zastosowaniu MES, Politechnika Krakowska, Konferencje w Kielcach 2004, str.271-277.
- [8] Graziella D., Pierre M., From The Laboratory To The Worksite, An Innovative Spreading Test Bench for Bitumen Emulsions, 2 nd Eurasphalt &Eurobitume Congress Barcelona 2000, Proc.0151.uk, Book II, s. 129-134.
- [9] 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.
- [10] Hachiya Y., Sato K., Effect of Tack Coat on Bonding Characteristics at Interface Between Asphalt Concrete Layers, Japan, s. 349-362.
- [11] 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.
- [12] Hakim B.A., The importance of good bond between bituminous layers, Scott Wilson Pavement Engineering, United Kingdom 2002, s. 11.
- [13] Hakim B.A.; Flexible composite pavement evaluation incorporating bond between layers, Scott Wilson Pavement Engineering, Nottingham, UK.
- [14] Haramis J.E., Investigation of Bond Strength And Watertightness of Asphalt Concrete Wearing Surfaces for Timber Bridge Decks, Virginia Polytechnic Institute, April 21, 1997, str. 105.
- [15] Jiménez P.F.; Soto Sánchez José Antonio; Fernández, Cobo Milagros, Special Modified Emulsions of Modified Bitumen for Tack Coats, 2 nd Eurasphalt &Eurobitume Congress Barcelona 2000, Proc.0261.es, Book II, s. 463-471.
- [16a] Judycki J., Drogowe asfalty i mieszanki mineralno-asfaltowe modyfikowane elastomerem, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej Nr 452, Gdańsk 1991, s. 254.
- [16] Judycki J., Szczepność między warstwami asfaltowymi nawierzchni, Drogownictwo, Wrzesień 2003 r., str.275-279.

- [17] Kruntcheva M.R., Collop A.C., Thom N.H., Feasibility of Assessing Bond Condition of Asphalt Concrete Layers with Dynamic Nondestructive Testing, *Journal of Transportation Engineering* © ASCE / July/August 2004, s. 510-518.
- [18] LTRC ; Investigation of the Behavior of Asphalt Tack Coat Interface Layer, Louisiana Department of Transportation and Development and Louisiana State University, 2002.
- [19] Partl M.N., Hean S., Practical aspects of interaction between mastic asphalt and waterproofing components in bridge and tunnel construction, EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 8600 Dübendorf, Switzerland, s. 7.
- [19a] Piłat J, Radziszewski P., Nawierzchni asfaltowe, WKiŁ, Warszawa 2004.
- [20] Pos J., Kruntcheva M., Collop A., Thom N., (opr. Mikulski J.), Powiązanie asfaltowych warstw nawierzchni: badania, wpływ, ocena- rozważania porównawcze Niemcy- Wielka Brytania, *Nowości w Zagranicznej Technice drogowej*, 154/2003, str.5-30.
- [21] Raab C., Partl M.N., Besondere Aspekte des Schichtenverbundes von Belägen, EMPA, Abteilung Straßenbau/Abdichtungen, Dübendorf, s. 11.
- [22] Raab C., Partl M.N., Inter-Layer and In-Layer Shear Strength of Swiss Asphalt Pavements, EMPA, CH-8600 Dubendorf
- [23] Raab C., Partl M.N., Interlayer shear performance experience with different pavement structures, Euroasphalt and Eurobitume Congress, Viena 2004
- [24] Raab C., Partl M.N., Shear strength properties between asphalt pavement layers, *Archives of Civil Engineering*, 3/1998, str.353-365.
- [25] Raab C., Partl M.N.; Effect of tack coats on interlayer shear bond of pavements, EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf.
- [26] Raab Ch., (opr. Wałęcka H.K.), Związanie warstw asfaltowych (Normalizacja badania w Szwajcarii), *Nowości w Zagranicznej Technice drogowej*, nr 147/2002, str.12-32
- [27] Romanoschi S.A., Metcalf J.B., The characterization of pavement layer interfaces, ICAP 2002, Copenhagen, s. 18.
- [28] Sangiorgi C., Collop A.C., Thom H.N., A Non-Destructive Impulse Hammer for Evaluating the Bond Between Asphalt Layers in a Road Pavement, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., International Symposium (NDT-CE 2003), Berlin, September 16-19, 2003 s. 7.
- [29] Sangiorgi C.; Non-destructive evaluation of bond between asphalt layers, University of Bologna, ITA, Facoltà di Ingegneria;
- [30] Sholar G.A., Page G.C., Musselman J.A., Upshaw P.B., Moseley H.L., Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats, Florida Department of Transportation, Gainesville, Floryda, s. 36.
- [31] Stefańczyk B., Strukturalno-Mechaniczne właściwości asfaltów w szerokim zakresie temperatur, Szczecin 1989, s. 157-165.
- [32] Stöckert U., Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau, Elektronische Publikationen Darmstadt, 2002, s. 145.
- [33] Szczepaniak Z., Wpływ emulsji asfaltowej na połączenie warstw asfaltowych nawierzchni, IBDiM, 2004, Konferencje w Kielcach, str.187-195

- [34] Tschegg E.K., Ehart R.J.A., Ingruber M.M., Fracture Behavior of Geosynthetic Interlayers in Road Pavements, *Journal of Transportation Engineering* / September/October 1998, s. 457-464.
- [35] Tschegg E.K., Kroyer G., Dong-Ming Tan, Stanzl S.E., Litzka J., Investigation of Bonding Between Asphalt Layers on Road Construction, *Journal of Transportation Engineering* / July/August 1995, s. 309-316.
- [36] Valley Slurry Seal Co., Asphalt Emulsions: Tack Coat, http://www.slurry.com/cont_tackcoat.shtml, s. 6.
- [37] Von Becker, Wpływ szczepności międzywarstwowej na zachowanie się nawierzchni asfaltowych, FGSV 25/B5.1, Bonn 1990, tłumaczenie z języka niemieckiego dla potrzeb Zakładu Budowy Dróg PG wykonał mgr inż. Edmund Boito
- [38] Wardle L.J., Layered Elastic Design of Heavy Duty And Industrial Pavements, *Proc. AAPA Pavements Industry Conf., Surfers Paradise, Australia, 1998*, s. 10.
- [39] Woods M. E.; Laboratory evaluation of tensile and shear strenghts of asphalt tack coats, Department of Civil Engineering, Mississippi State, Mississippi, 2004.
- [40] Wornner, Badanie powiązaniemi warstw wg Leutner'a, ALP A-StB, Bonn 1999, tłumaczenie z języka niemieckiego dla potrzeb Zakładu Budowy Dróg PG wykonał mgr inż. Edmund Boito
- [41] Yetkin Y.Y.; Fortier S.A.; Korkmaz A.; Development of a Laboratory Test Procedure to Evaluate Tack Coat Performance, Department of Civil Engineering, University of Texas at Austin, 2003.
- [42] Zawadzki J., Skierczyński P., Mechowski T., Wpływ połączenia między warstwami asfaltowymi na trwałość nawierzchni, IBDiM, Konferencje w Kielcach 2003, str.415-423.
- [43] Zawadzki J., Skierczyński P., Pałys M., Połączenie między warstwami nawierzchni asfaltowej- metoda badania wymagania, IBDiM, VIII Międzynarodowa Konferencja w Kielcach, 2002, str.299-306.