

DARIUSZ SYBILSKI¹⁾
TOMASZ MECHOWSKI²⁾
PRZEMYSŁAW HARASIM³⁾

OCENA POŁĄCZENIA MIĘDZYWARSTWOWEGO NAWIERZCHNI UGIĘCIOMIERZEM FWD

STRESZCZENIE. Połączenie warstw asfaltowych nawierzchni drogowej w znacznej mierze decyduje o trwałości nawierzchni. Stosowane są różne metody oceny połączenia międzywarstwowego przede wszystkim w badaniach laboratoryjnych. Badania te wykorzystują zwykle metody ścinania lub skręcania. Z oczywistych względów badania laboratoryjne próbek z nawierzchni mają ograniczony zakres. Znacznie bardziej miarodajna byłaby metoda nieniszczącego badania nawierzchni. W artykule opisano nową metodę oceny połączenia międzywarstwowego z zastosowaniem ugięciomierza FWD.

1. WPROWADZENIE

Połączenie międzywarstwowo jest jednym z głównych czynników, do niedawna mało docenianym, wpływającym na prawidłową pracę nawierzchni drogowej. Od sposobu wykonania połączenia zależy współpraca warstw w konstrukcji nawierzchni, co ma zasadniczy wpływ na jej trwałość. Szkody wynikające z wadliwego powiązania między poszczególnymi warstwami od dawna znane są w budownictwie drogowym,

¹⁾ prof. dr hab. inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa
²⁾ mgr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa
³⁾ mgr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

jednak badania tej cechy prowadzi się dopiero od około 20 lat. W 1962 Livneh i Schklarsky [1] zauważyli, że: „kiedy współczynnik tarcia między warstwą asfaltową a sztywną podbudową jest mały, to przypadek taki może być znacznie bardziej krytyczny niż w nawierzchni podatnej”. Autorzy stwierdzili, że w takiej konstrukcji sztywna podbudowa nie bierze udziału w pracy konstrukcji nawierzchni. Punkt krytyczny jest w spodzie warstwy asfaltowej, a uszkodzenie nie jest inicjowane w sztywnej warstwie podbudowy.

Warstwa asfaltowa układana na wcześniej ułożonej innej warstwie uzyskuje połączenie międzywarstwowe poprzez oddziaływanie dwóch głównych czynników: sklejenia warstw i wzajemnego zazębienia się kruszyw obu warstw. Asphalt sklejący warstwy pochodzi ze skropienia dolnej warstwy emulsją asfaltową oraz w mniejszym stopniu z wbudowywanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Badania Judyckiego [2] wykazały, że wytrzymałość sklejenia warstw zależy od klejonego materiału, rodzaju asfaltu, zawartości polimerów, grubości spoiny oraz prędkości ścinania. Wytrzymałość na ścinanie spoin wynosiła w 20 °C od 150 do 250 kPa. Zauważono również, że spoiny wcześniej zniszczone regenerują się w temperaturze 40 °C, co może mieć praktyczne znaczenie w nawierzchni drogi. Badania te wykazały również, że drugi z elementów wpływających na dobre połączenie warstw, tj. zazębienie się warstw, zależy od takich czynników jak:

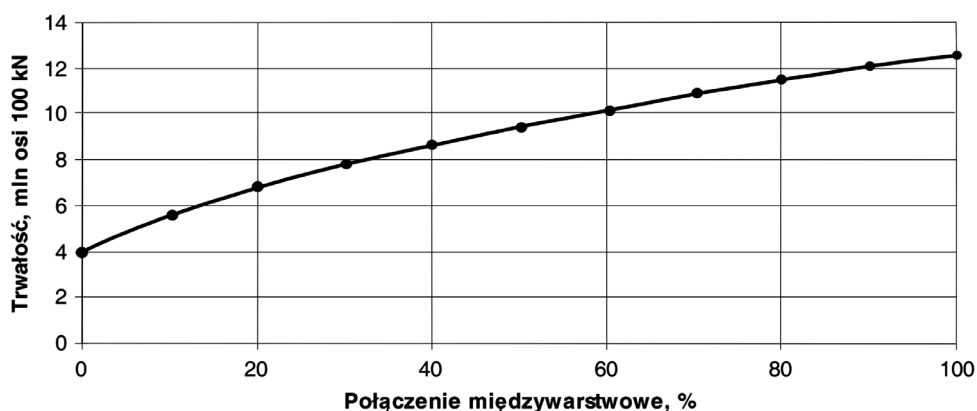
- temperatura warstwy dolnej – najlepszy efekt uzyskuje się w technologii nawierzchni asfaltowej kompaktowej,
- zawartość asfaltu w warstwach – im więcej asfaltu, tym lepszy efekt zazębienia się warstw,
- rodzaj asfaltu – im twardszy asfalt, tym trudniejsze powiązanie warstw, lecz po związaniu o większej wytrzymałości na ścinanie,
- uziarnienie mieszanki – drobniejsze mieszanki łatwiej zespalają się ze sobą,
- sztywność warstw – im sztywniejsze warstwy, tym trudniejsza penetracja ziaren z warstwy górnej w dolną,
- czystość powierzchni – połączenie warstw osłabi lub praktycznie wyeliminuje warstwa brudu lub gliny na warstwie dolnej.

Badania wytrzymałości na ścinanie wykazały, że w zależności od rodzaju łączonych warstw i ich stanu (stare lub nowe warstwy) uzyskiwana wytrzymałość na ścinanie mieściła się w przedziale 780 – 2 930 kPa. Wynika stąd, że zasadnicza część wytrzymałości spoiny na ścinanie pochodzi z zazębienia się wzajemnego warstw, a mniejsza z siły klejącej asfaltu.

Znaczny wpływ na wytrzymałość na ścinanie połączenia między warstwami asfaltowymi nawierzchni ma temperatura [3].

Brak lub zbyt słabe powiązanie między warstwami nawierzchni sprawia, że pracują one oddzielnie, co powoduje zwiększenie ugięcia warstw niezwiązanych i wpływa na przyspieszenie niszczenia nawierzchni. Stwierdzenie to potwierdzają badania terenowe.

Autorzy wykonali analizę trwałości zmęczeniowej typowej konstrukcji nawierzchni podatnej KR5 według KTKNPP 1997 w zależności od połączenia międzywarstwowego (rys. 1). Stwierdzono, że trwałość zmęczeniowa nawierzchni może zmniejszyć się o nawet 70 % z powodu słabego połączenia warstw nawierzchni.



Rys.1. Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni w zależności od stopnia połączenia międzywarstwowego

Rys.1. Pavement fatigue durability depending on the quality of interlayer bond

Wcześniejsze badania Hakima i in. [4] wykazały, że słabe połączenie międzywarstwowe może zmniejszyć trwałość zmęczeniową nawierzchni o 40 %.

Stosowane obecnie mechanistyczne metody projektowania konstrukcji nawierzchni pozwalają zwykle na założenie pełnego lub zerowego połączenia międzywarstwowego. Niektóre metody (i programy komputerowe) dają możliwość wyboru opcji pośredniej. Nieliczne modele wprowadzają moduł połączenia międzywarstwowego, lecz moduł ten nie jest zależny od temperatury lub naprężenia normalnego [5]. Połączenie międzywarstwowe w znacznym stopniu wpływa natomiast na trwałość nawierzchni podatnej lub półsztywnej.

Dotychczasowe prace badawcze w IBDiM [6 – 9] dotyczyły głównie opracowania metody badania połączenia między warstwami i ustalenia propozycji wymagań. Jako dobrą i możliwą do szybkiego wdrożenia w Polsce procedurę badania laboratoryjnego wskazano metodę Leutnera. Wyniki badania połączenia między warstwami (w 20 °C) na próbkach sporządzonych w laboratorium i wyciętych z nawierzchni drogi wykazały, że zakres wytrzymałości na ścinanie τ jest następujący:

- próbki pobrane z drogi

$$\tau_n = 0,9 \div 2,4 \text{ MPa} ,$$

- próbki zagęszczone w formach walcowych

$$\tau_w = 0,85 \div 1,6 \text{ MPa} ,$$

- próbki zagęszczone w formach prostopadłościennych i wycięte z płyt

$$\tau_p = 1,0 \div 2,4 \text{ MPa} .$$

Na podstawie wyników badań zaproponowano wymagania względem połączenia międzywarstwowego warstw asfaltowych:

- $\geq 1,0$ MPa w projektowaniu ilości i rodzaju lepiszcza do skropienia,
- $\geq 0,8$ MPa w kontroli połączenia między warstwami na odcinkach drogowych.

Na podstawie późniejszych badań wymaganie wobec próbek pobranych z nawierzchni zwiększono do 1,3 MPa [10].

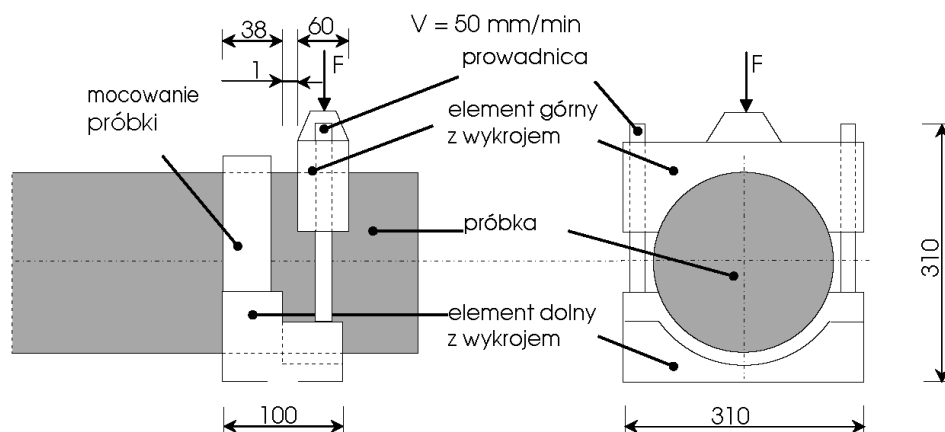
Problem braku połączenia międzywarstwowego jest coraz częstszym tematem prac badawczych. Powstają nowe metody oceny jakości szepności warstw. W niniejszej pracy podjęto próbę opracowania procedury, która pozwoli na podstawie interpretacji wyników pomiarów ugięć nawierzchni ugięciomierzem dynamicznym FWD odpowiedzieć na pytanie, czy badana konstrukcja charakteryzuje się dobrym, czy też złym połączeniem międzywarstwowym.

2. METODY OCENY POŁĄCZENIA MIĘDZYWARSTWOWEGO

Obecnie istnieje kilka metod badawczych pozwalających na ocenę powiązania między warstwami. Należą do nich m.in. laboratoryjne – metoda Leutnera [11], dynamicznego ścinania w skrzynce (Shear Box Test) [12], ścinania przy skręcaniu [13] oraz nieniszczące, terenowe – metoda Hakima [14] z wykorzystaniem ugięciomierza udarowego FWD lub badanie młotem udarowym (Impulse Hammer Test) [15].

Metoda Leutnera

Metoda ta powstała już w 1979 roku. Jest to proste badanie polegające na bezpośrednim ścinaniu próbek pobranych z nawierzchni lub wykonanych w laboratorium. Odwiercone rdzenie badane są w 20 °C w prasie Marshalla (rys. 2). Zaletami metody jest to, że próbki po badaniu mogą być wykorzystane do dalszych badań oraz, że badanie może być włączone w proces oceny nawierzchni bez czasowego i sprzętowego znaczącego podwyższania kosztów.



Rys.2. Schemat aparatu do ścinania metodą Leutnera, próbka ϕ 150 mm (widok z boku i z przodu)
Fig.2. Scheme of Leutner method shear device, 150 mm diameter core (side and front view)

Metoda skrzynkowa (*Shear Box Test*)

Metoda ta stosowana w geotechnice została zaadoptowana przez Uzana do nawierzchni asfaltowych w 1978 r. Później została udoskonalona przez Browna i in. [16]. Stosowana w badaniu próbka, składająca się z dwóch warstw, wytwarzana jest w laboratorium i zagęszczana laboratoryjnym symulatorem walca (*Roller Compactor*). Przygotowaną mieszankę mineralno-asfaltową umieszcza się w odpowiednio przygotowanej formie, a następnie rozpoczyna się proces kontrolowanego zagęszczania. Na bieżąco dokonuje się pomiaru temperatury, wysokości i liczby przejazdów walca. Po ostygnięciu z rozformowanej płyty wycinana jest piłą próbka o wymiarach $320 \times 200 \text{ mm}$. Bezpośrednio po wycięciu próbka umieszczana jest w skrzynce ścinającej (*Shear Box*) i przyklejana klejem epoksydowym. Cały proces przygotowania próbki do badania wymaga dużego doświadczenia personelu laboratoryjnego. Do wykonania próby ścinania skrzynkę ustawia się na stanowisku badawczym (rys. 3 i 4) i poddaje obciążeniu siłami poziomą i pionową. Zachowanie próbki rejestrowane jest przez czujniki przemieszczeń i siły.

Metoda budzi pewne zastrzeżenie związane z małą prędkością wymuszanych przez siłowniki przemieszczeń próbki. W stosunku do metody Leutnera są one około 30-krotnie mniejsze i odbiegają od rzeczywistych warunków prędkości ścinania warstw w konstrukcji nawierzchni drogowej obciążonej ruchem drogowym. Jednak nieznaczne prędkości umożliwiają w laboratorium dodatkowe obserwacje, które mają ułatwiać ocenę zjawiska powiązania warstw. Większość eksperymentów pokazuje, że właściwe uszkodzenia próbki w obrębie granicy warstw nie są powodowane jedynie przez naprężenia ścinające, lecz przez ich kombinację z naprężeniami rozciągającymi.

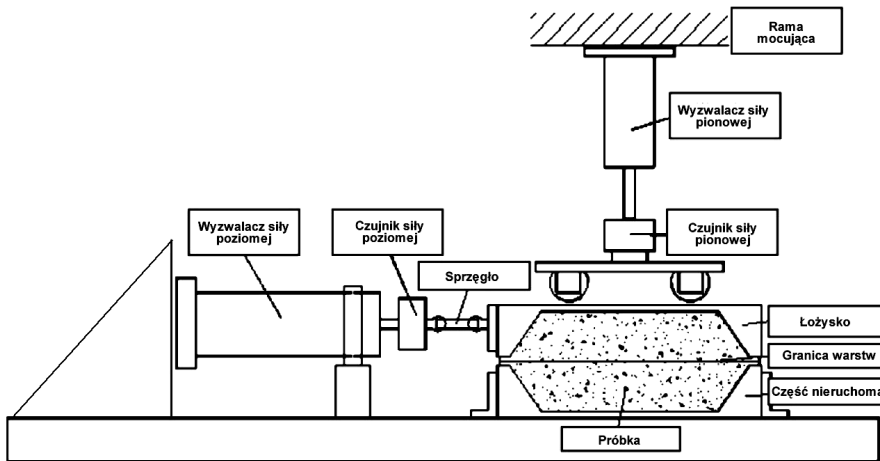
Rys.3. Schemat badania ścinania w skrzynce (*Shear Box Test*)

Fig.3. Scheme of Shear Box Test

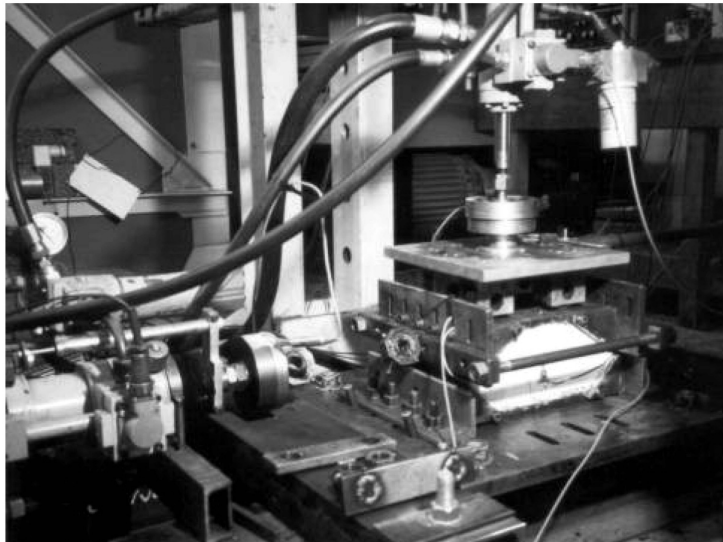
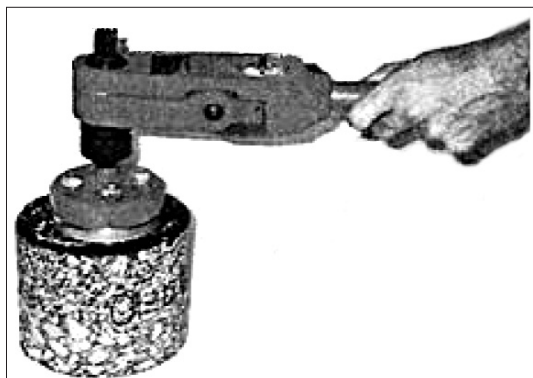
Rys.4. Stanowisko badawcze ścinania skrzynki (*Shear Box Test*)

Fig.4. Shear Box Test stand

Metoda ścinania przy skręcaniu

Metoda ta, opracowana w Wielkiej Brytanii, polega na wykorzystaniu aparatu, którego koncepcja wywodzi się z klucza dynamometrycznego (rys. 5) [17]. Aparat ten jest przydatny do badań w laboratorium i w terenie. Jest zwłaszcza stosowany do badań cienkich warstw ściernych, których stosowanie bardzo upowszechniło się w ostatnich latach w Wielkiej Brytanii.

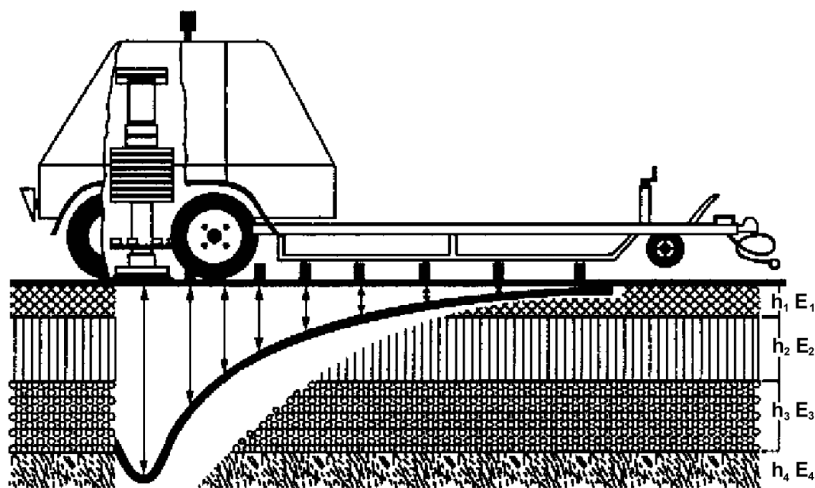


Rys.5. Aparat do badania połączenia metodą ścinania przy skręcaniu
Fig.5. Interlayer bond evaluation device by shear at torsion test



Metoda z użyciem ugięciomierza FWD

Ugięciomierz dynamiczny FWD (*Falling Weight Deflectometer*) wywołuje powstanie na powierzchni drogi czaszy ugięcia (rys. 6). Wartości ugięć w poszczególnych punktach pomiarowych służą jako dane wyjściowe do obliczenia modułu sztywności warstw konstrukcyjnych nawierzchni. Dotychczas było to podstawowe zastosowanie ugięciomierza FWD. Bezsprzeczne jest jednak, że jakość powiązania międzywarstwowego wpływa na uzyskiwane wyniki w pomiarach FWD. Opracowana przez Hakima metoda pozwala dodatkowo na ocenę związania warstw.



Rys.6. Schemat badania ugięciomierzem FWD
 Fig.6. Falling Weight Deflectometer testing method

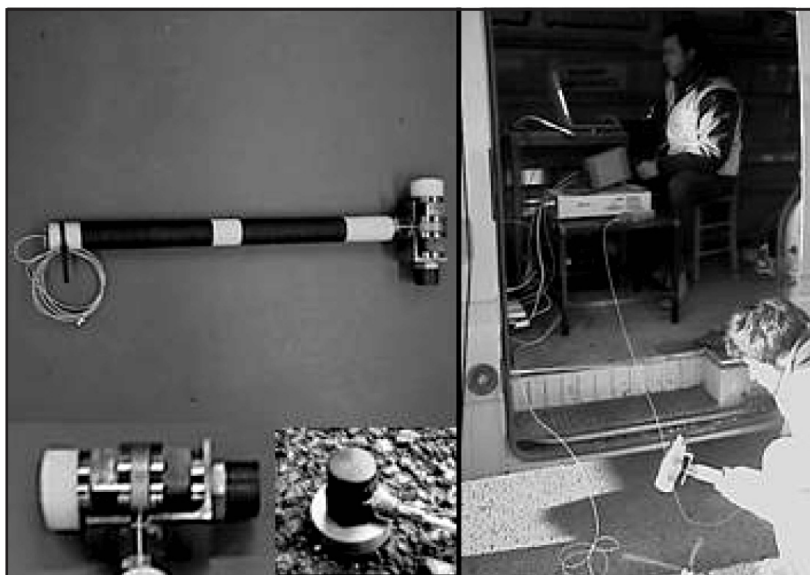
Schemat postępowania w metodzie jest następujący:

- a) zebranie danych z pomiarów czaszy ugięć, danych o konstrukcji nawierzchni (grubości i rodzaj warstwy) i założenie wartości współczynnika Poissona warstw,
- b) dokonanie obliczeń przemieszczeń nawierzchni przy zadanych wartościach modułów sztywności warstw (tzw. analiza odwrotna) i przy założeniu pełnego połączenia między warstwami (sztywność przy ścinaniu połączenia międzywarstwowego $K_{si} = 10^5 \text{ MN/m}^2$),
- c) wykonanie wielokrotnego rachunku regresji (kolejne iteracje) w celu uzyskania czaszy przemieszczeń najbardziej zbliżonej do czaszy ugięć (z pomiarów FWD),
- d) odpowiadające obliczonej czaszy przemieszczeń moduły sztywności wykorzystuje się w kolejnych analizach konstrukcji,
- e) założenie, że warstwy leżące poniżej ocenianych warstw asfaltowych (pomiędzy którymi analizowane jest połączenie międzywarstwowe) mają stały moduł sztywności wynikający z wcześniejszych obliczeń,
- f) obliczenie modułów sztywności warstw asfaltowych według zasad opisanych w punktach a), b) i c) przy założeniu zmiennego połączenia między warstwami (od $K_{si} = 10^5 \text{ MN/m}^2$ – pełne połączenie do $K_{si} = 10 \text{ MN/m}^2$ – brak połączenia),
- g) obliczenie rzeczywistych wartości modułów warstw, uwzględniających istniejący podczas badania stan połączenia międzywarstwowego.

Biorąc obliczone wartości za podstawę dalszych obliczeń, możliwa jest dokładniejsza ocena np. szkodliwej koncentracji naprężeń i oczekiwanej trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni.

Test młotem impulsowym

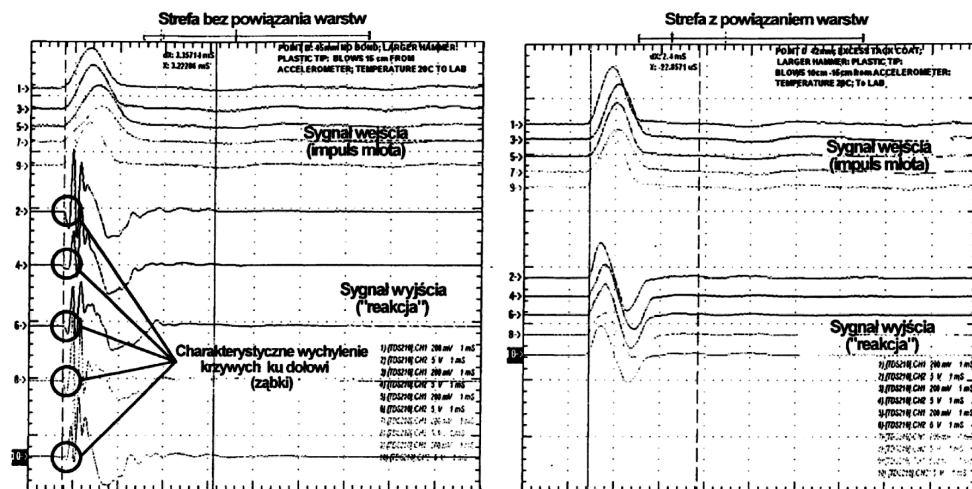
Metoda jest nowoczesnym rozwiązaniem opracowanym na Uniwersytecie Nottingham pozwalającym na ocenę powiązania pierwszych dwóch górnych warstw nawierzchni wykonanych z mieszanki mineralno-asfaltowej, bez konieczności wykonywania odwiertów w drodze. Schemat młota impulsowego przedstawiono na rysunku 7.



Rys.7. Młot impulsowy do badania połączenia międzywarstwowego
Fig.7. Impulse hammer for interlayer bond test

Zastosowana zasada pomiaru opiera się na tym, że udar młotem wzbudza reakcję falową, która zostaje zmierzona przez przetwornik przyspieszeń. Przykładowe wyniki analiz spektralnych przypadków „bez powiązania” i „z powiązaniem” przedstawia rysunek 8. Już tutaj wyraźne są różnice w przebiegu krzywych. Wadliwe, względnie nieistniejące powiązanie warstw charakteryzuje się „postrzępionymi” wykresami przyspieszeń w odróżnieniu od „płynnych” przebiegów układów dobrze połączonych.

Z wykresów na rysunku 8 widać, że pierwsze jakościowe oceny możliwe są już bez dalszej matematycznej obróbki danych. Pierwsze badania porównawcze z innymi metodami badawczymi pozwalają wnioskować o wyraźnej zgodności badania młotem impulsowym z oceną powiązania warstw metodą Leutnera.



Rys.8. Porównanie analiz spektralnych testu młotem impulsowym bez powiązania oraz z powiązaniem warstw nawierzchni

Fig.8. Comparison of spectral analyses in impulse hammer test with and without interlayer bond

Z metodą młota udarowego należy wiązać duże nadzieje w zastosowaniu praktycznym na drodze. Jest to badanie nieniszczące, które pozwoli na ocenę powiązania warstw bezpośrednio po ułożeniu nowej warstwy w trakcie procesu budowlanego.

3. NOWA METODA BADAWCZA

Podstawowym założeniem opracowania metody oceny jakości połączenia międzywarstwowego było wykorzystanie pełnych możliwości, jakie daje ugięciomierz dynamiczny FWD. W programach komputerowych służących do obliczania modułów warstw konstrukcyjnych, a następnie trwałości zmęczeniowej nawierzchni korzysta się z pomiaru czasy ugięć, na którą składają się wartości maksymalnych ugięć na poszczególnych geofonach. Program MODDYN opracowany w IBDiM, oparty na teorii zjawisk falowych w układach wielowarstwowych, wykorzystuje pełne przebiegi ugięć nawierzchni i wartości ciśnienia kontaktowego, od momentu dokonania zrzutu obciążenia do chwili odprężenia.

Dotychczasowe wieloletnie doświadczenia w wykonywaniu pomiarów ugięć FWD upoważniają do stwierdzenia, że oprócz oceny nośności nawierzchni można tym urządzeniem badać również połączenie warstw konstrukcyjnych nawierzchni.

Analizując metody oceny połączenia międzywarstwowego na podstawie badań nieniszczących (przedstawione wcześniej), wydaje się, że ze względów praktycznych najkorzystniejsze jest opracowanie metody zbliżonej do „testu młotem udarowym”.

W przypadku pomiarów FWD „młotem” jest obciążenie dynamiczne generowane przez urządzenie, natomiast odbiornikiem geofony (czujniki przemieszczeń).

Autorzy zaproponowali procedurę przetwarzania wyników pomiarów ugięć, aby pozwalały na określenie, czy warstwy w danej konstrukcji charakteryzują się dobrym połączeniem, czy niedostatecznym oraz ewentualnie, które połączenie (między którymi warstwami) jest wadliwe.

Jako ocenę jakościową połączenia międzywarstwowego zaproponowano wskaźnik połączenia warstw I_{bond} ⁴⁾, którego wartość oblicza się ze wzoru:

$$I_{bond} = \frac{D_{end} - D_{min}}{D_{max}} \cdot 100 \% , \quad (1)$$

w którym:

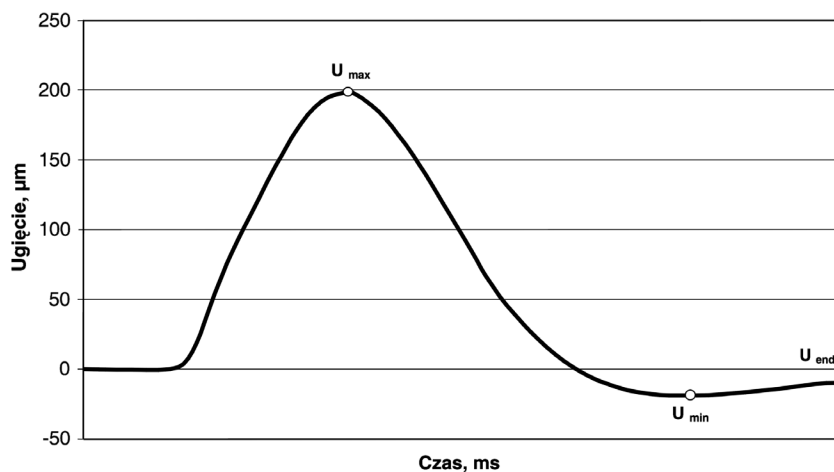
I_{bond} – wskaźnik połączenia warstw,

D_{end} – wartość ugięcia na końcu rejestrowanego przebiegu (po 600 ms),

D_{min} – najmniejsza wartość ugięcia,

D_{max} – ugięcie maksymalne.

Znaczenie wartości użytych we wzorze obrazuje rysunek 9 przedstawiający ugięcia czujnika centralnego – w punkcie obciążenia płytą naciskową.

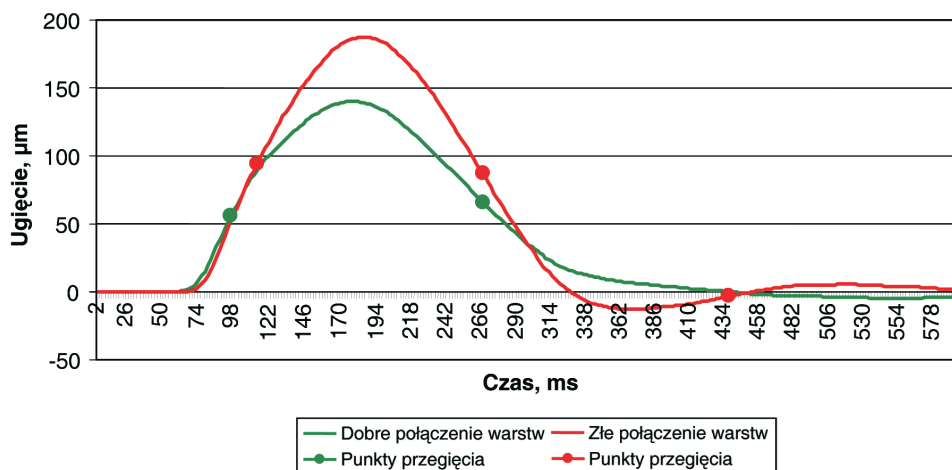


Rys.9. Zmienność ugięcia nawierzchni pod czujnikiem centralnym w czasie wraz z punktami charakterystycznymi
Fig.9. Variation of pavement deflection in time under central sensor with marking of characteristic points

⁴⁾ Symbole w proponowanych równaniach są zapisane w języku angielskim w celu zachowania jednolitości zapisów w opisach metody w pracach polsko- i angielskojęzycznych

Charakterystyczne wykresy ugięć nawierzchni z dobrym połączeniem lub bez połączenia warstw przedstawia rysunek 10. Zaznaczono na nim punkty przegięcia krzywej wykresu ugięć. Jeśli warstwy są połączone, to występują dwa punkty przegięcia i nie występuje punkt minimum (najmniejsza jest wartość D_{end}). W wypadku słabego połączenia warstw występuje trzeci punkt przegięcia krzywej i minimum lokalne ugięcia D_{min} .

Wartość I_{bond} nie może być mniejsza niż zero. Jeśli warstwy są połączone, a wartość D_{min} jest równa D_{end} , to wartość I_{bond} przyjmuje wartość zero.



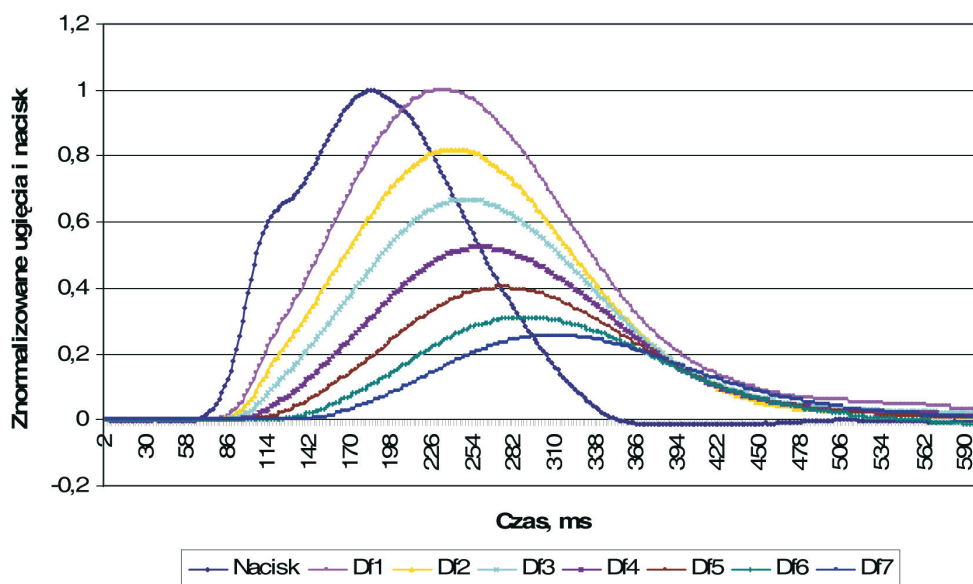
Rys.10. Wykresy ugięć pod czujnikiem centralnym nawierzchni z dobrym i złym połączeniem warstw, z zaznaczonymi punktami przegięcia krzywych

Fig.10. Deflection run in time under central sensor, points of proper and weak interlayer bond with marking of point of inflection

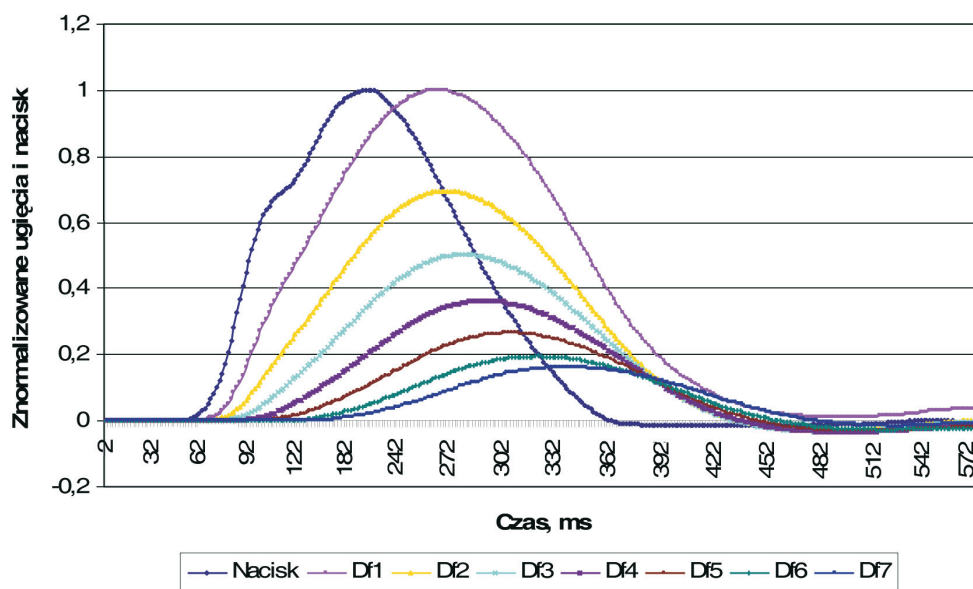
Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono wykresy ugięć i nacisku płyty w dwóch punktach pomiarowych na jednym z odcinków badawczych. Oba rysunki przedstawiają ugięcia pod wszystkimi używanymi geofonami.

Rysunek 11 przedstawia dobre połączenie warstw, natomiast rysunek 12 ugięcia w miejscu o gorszym połączeniu międzywarstwowym. W celu lepszego porównania obu wykresów wartości ugięć i nacisków znormalizowano do wartości maksymalnych.

Na rysunkach tych wyraźnie widać różnice w przebiegu ugięć nawierzchni w miejscach dobrego i złego połączenia warstw.



Rys.11. Wykresy ugięć i nacisku w miejscu dobrego powiązania warstw
 Fig.11. Deflection and loading run In time, area of proper interlayer bond



Rys.12. Wykresy ugięć i nacisku w miejscu ograniczonego powiązania warstw
 Fig.12. Deflection and loading run In time, area of weak interlayer bond

4. BADANIA ODCINKÓW BADAWCZYCH

Do badań wytypowano 18 odcinków badawczych nawierzchni drogowych. Wyboru dokonano spośród odcinków dróg, na których stwierdzono zarówno złe, jak i dobre powiązanie warstw konstrukcyjnych. Na odcinkach badawczych dokonano rozpoznania konstrukcji, pobrano próbki do badań laboratoryjnych oraz wykonano pomiary ugięć nawierzchni ugięciomierzem dynamicznym FWD.

Wybrany zbiór odcinków badawczych obejmuje szerokie spektrum dróg o różnorodnej konstrukcji nawierzchni. Wszystkie warstwy górne (ścieralna i wiążąca) są asfaltowe, niższe warstwy stanowią przegląd warstw wykonanych w różnym okresie z rozmaitych materiałów (klinkier, beton asfaltowy, pakiet różnych warstw asfaltowych, podbudowy związane cementem), podbudowy niezwiązane. W dwóch nawierzchniach zastosowano włókninę lub geokompozyt (włókninę i siatkę poliestrową) między warstwami asfaltowymi.

Odcinki znajdowały się na drogach o znacznym zróżnicowaniu pod względem funkcji, jak i obciążenia ruchem: drogi krajowe, wojewódzkie, powiatowe, ulice miejskie (np. Warszawa, Łódź), place parkingowe centrów handlowych. Niektóre z badanych odcinków wykazywały wyraźne oznaki uszkodzeń zmęczeniowych i wyczerpanej trwałości – spękania siatkowe, wykruszenia.

Badania metodą Leutnera połączenia międzywarstwowego próbek pobranych z nawierzchni badanych odcinków wykazały wartości wytrzymałości na ścinanie od 0 (całkowity brak połączenia) do 3,1 MPa.

Odcinek 1 – droga krajowa nr 17

Odcinek drogi, od km 212+00 do km 213+500 (strona lewa) charakteryzuje się niedostatecznym połączeniem pakietu warstw asfaltowych z górną warstwą podbudowy, którą stanowi kostka klinkierowa. Na odcinku wykonano pomiary ugięć z częstotliwością co 100 m.

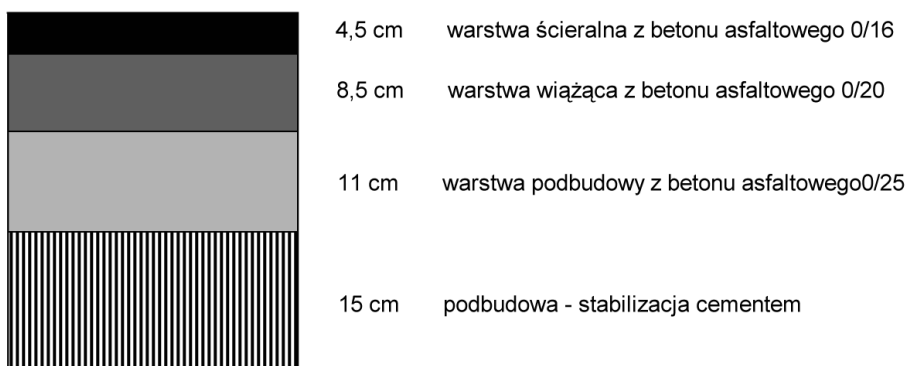
Lokalizacja próbki: km 213+000



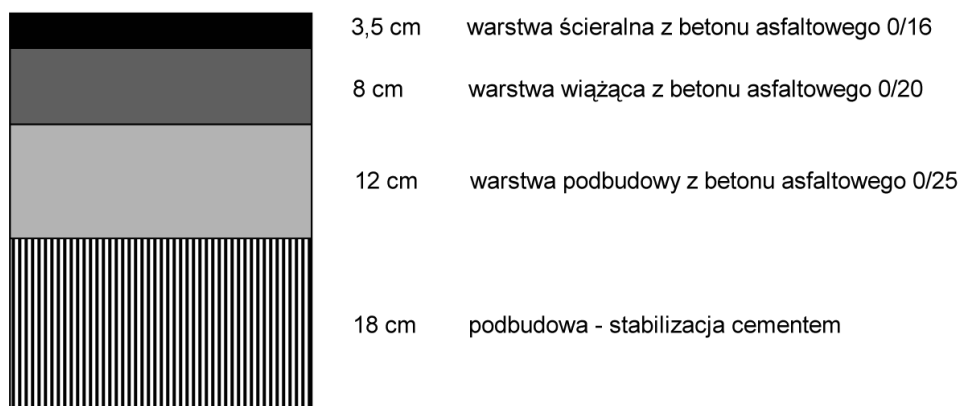
Odcinek 2 – ul. Sielska, Olsztyn

Nawierzchnia na ocenianym odcinku jest równa, bez kolein, garbów i przemieszczeń. Dominującym uszkodzeniem są ubytki powierzchniowe lepiszcza i ziaren kruszywa w warstwie ścieralnej oraz miejscowo występujące wyboje, na grubość warstwy ścieralnej. Uszkodzenia wystąpiły w ciągu kilku miesięcy po wykonanym wzmocnieniu nawierzchni. Na odcinku pobrano 6 odwiertów w celu rozpoznania konstrukcji oraz wykonania oceny połączenia międzywarstwowego (wyniki w tabl. 1). Pomiary ugięć przeprowadzono na obu pasach ruchu (w obu kierunkach) z częstotliwością co 50 m.

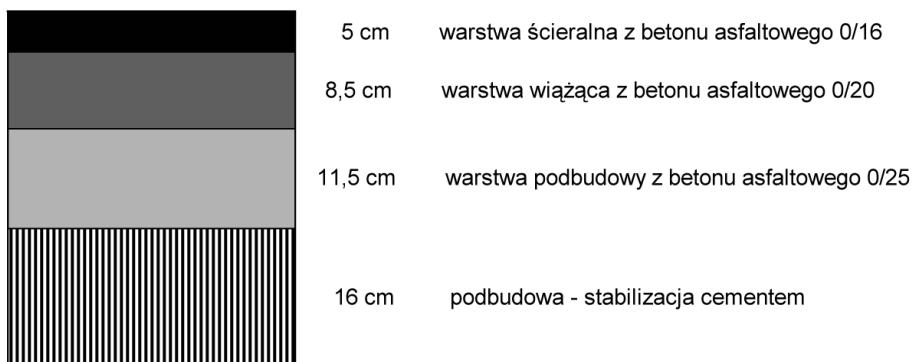
Lokalizacja próbki „A”: strona lewa, pas prawy, km 1+650



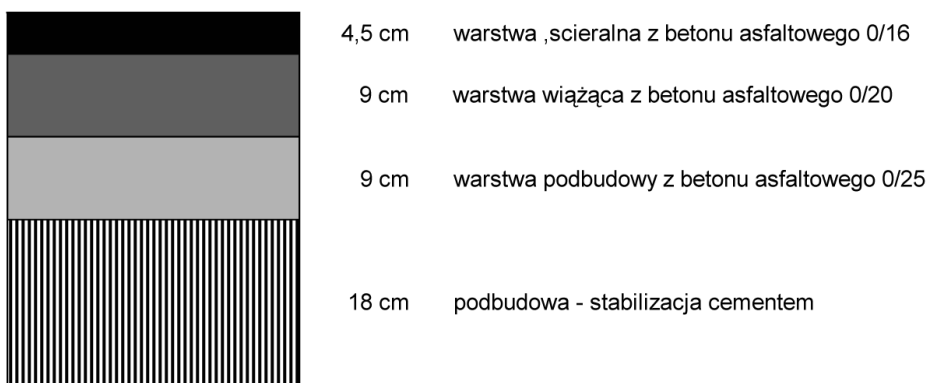
Lokalizacja próbki „B”: strona lewa, pas prawy, km 1+150



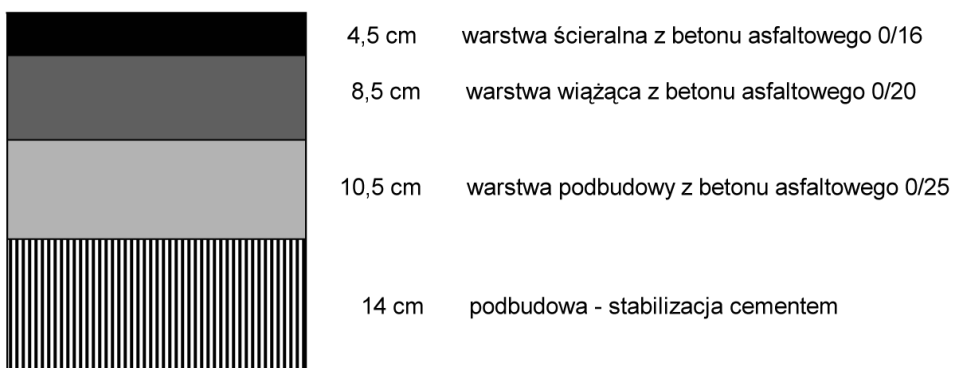
Lokalizacja próbki „C”: strona lewa, pas prawy, km 0+250



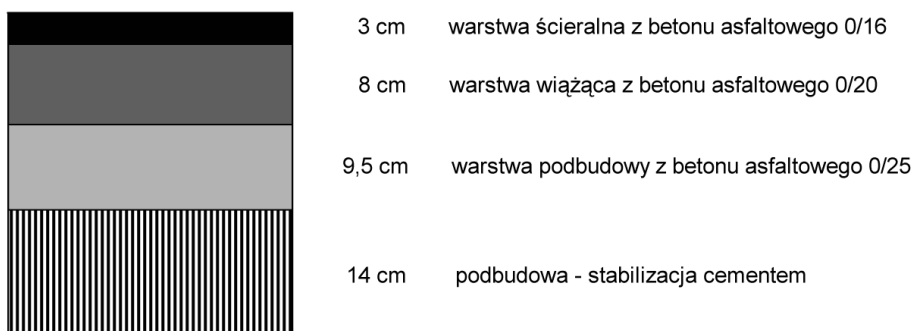
Lokalizacja próbki „D”: strona prawa, pas prawy, km 0+620



Lokalizacja próbki „E”: strona prawa, pas prawy, km 0+850



Lokalizacja próbki „F”: strona prawa, pas prawy, km 1+440



Tablica 1. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 2 (między 1 i 2 warstwą)

Table 1. Evaluation of interlayer bond on the test section 2 (between 1st and 2nd layer)

Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ścinanie metodą Leutnera, MPa
A	2,0
B	brak połączenia
C	2,2
D	1,3
E	3,0
F	1,3

Odcinek 3 – droga krajowa nr 94

Na badanym odcinku oceniono połączenie międzywarstwowo w odległości 1 m od osi, oraz w obszarze śladów prawego koła, gdzie między warstwy ścieralną i wiążącą został zastosowany geokompozyt (kompozyt włókniny z siatką szklaną). Pomiar ugięć wykonano w trzech „przejazdach”:

- przejazd 1 – pobocze,
- przejazd 2 – prawy ślad koła,
- przejazd 3 – 1 m od osi jezdni,

na trzech pododcinkach:

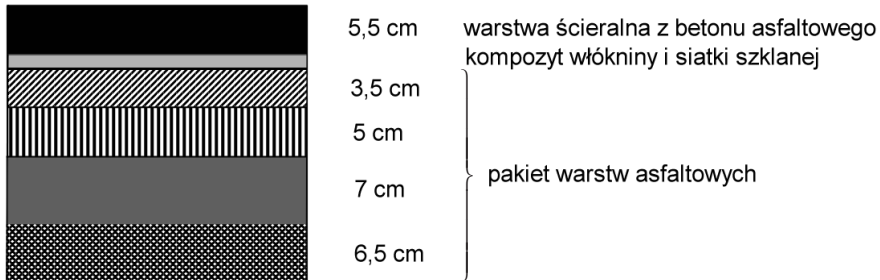
- pododcinek A – od km 321+700 do km 322+400,

pododcinek B – od km 322+900 do km 323+500,

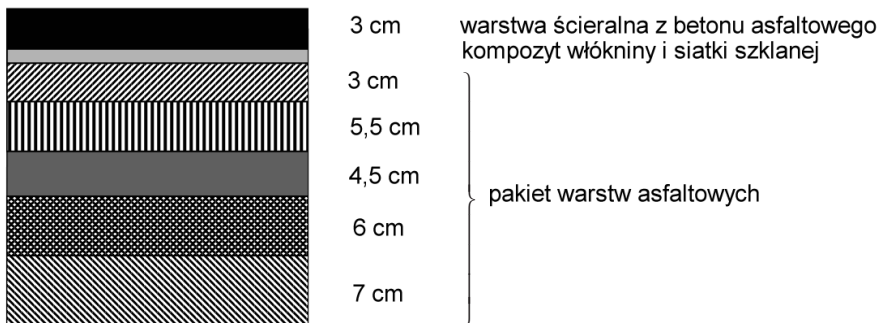
pododcinek C – od km 325+300 do km 326+000.

Z ocenianego odcinka (pododcinek C) pobrano również próbki w celu określenia konstrukcji oraz do badania połączenia międzywarstwowego (wyniki w tabl. 2).

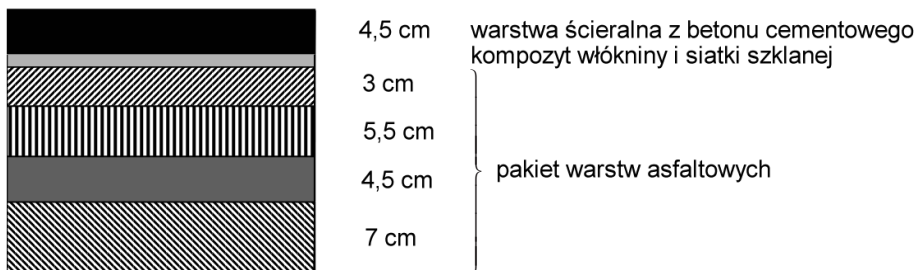
Lokalizacja próbki 1: prawy ślad koła, strona prawa, km 325+450



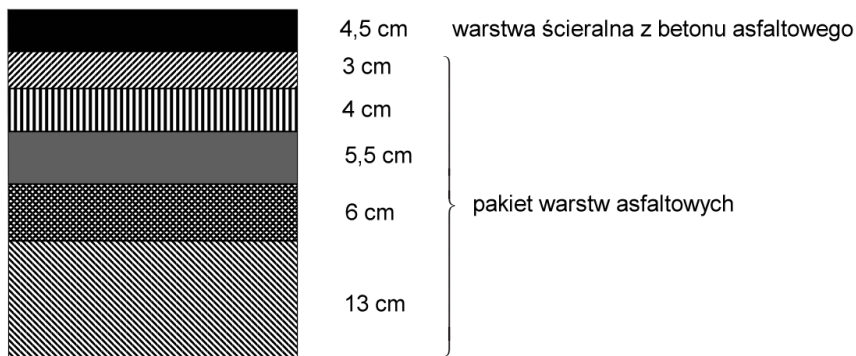
Lokalizacja próbki 2: prawy ślad koła, strona prawa, km 325+640



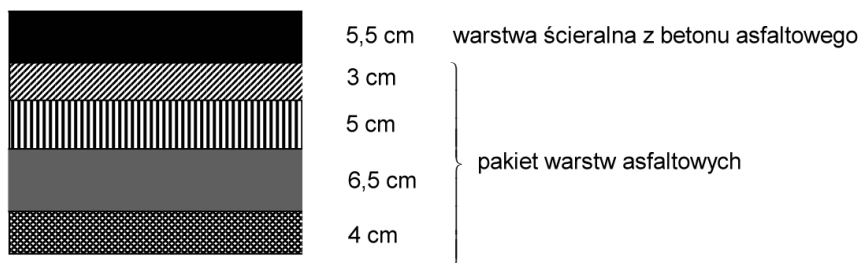
Lokalizacja próbki 3: prawy ślad koła, strona lewa, km 325+545



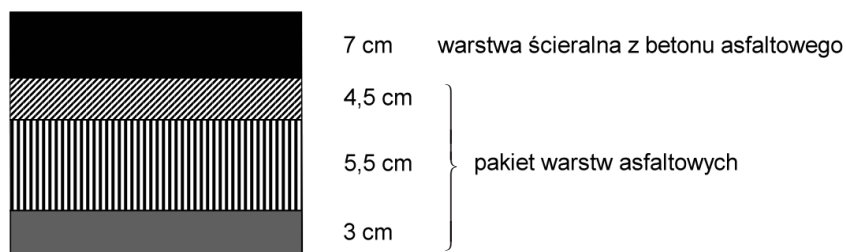
Lokalizacja próbki 4: 1 m od osi jezdni, strona prawa, km 325+700



Lokalizacja próbki 5: 1 m od osi jezdni, strona prawa, km 325+450



Lokalizacja próbki 6: 1 m od osi jezdni, strona lewa, km 325+500



Tablica 2. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 3 (między 1 i 2 warstwą)

Table 2. Evaluation of interlayer bond on the test section 3 (between 1st and 2nd layer)

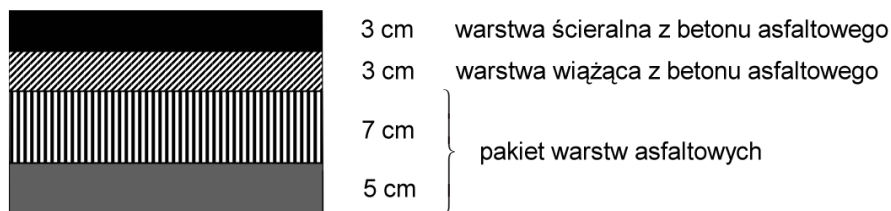
Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ścinanie metodą Leutnera, MPa
1	brak połączenia
2	brak połączenia
3	brak połączenia
4	1,7
5	1,5
6	1,4

Odcinek 4 – droga w miejscowości Ostrówek

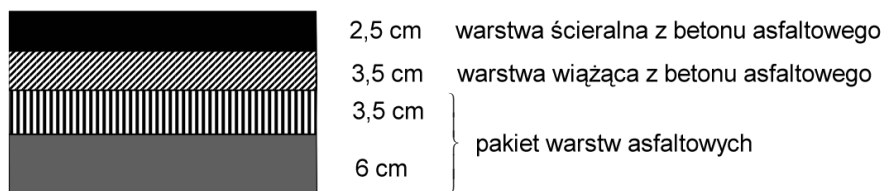
Nawierzchnię na tym odcinku wzmocniono dwiema warstwami: wyrównawczo-wiązącą i ścieralną. Na prawym pasie jezdni warstwa wyrównawczo-wiążąca została położona na mokrym, nie oczyszczonym i nie skropionym podłożu, na skutek tego nie połączyła się wcale ze starym podłożem asfaltowym. Na lewym pasie jezdni warstwa ta została położona w dobrych warunkach. Całą jezdnię przykryto warstwą ścieralną z BA.

Pomiary ugięć wykonano na obu pasach ruchu, w prawym śladzie koła oraz między śladami kół. Z ocenianego odcinka pobrano również próbki w celu określenia konstrukcji oraz do badania połączenia międzywarstwowego (wyniki w tabl. 3).

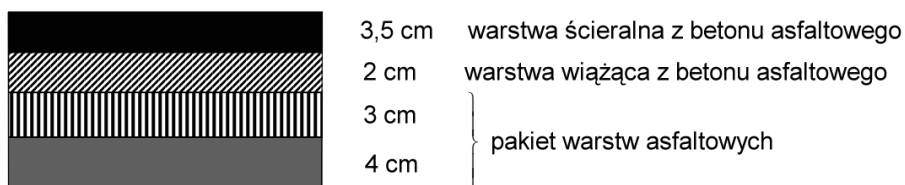
Lokalizacja próbki 1P: pas prawy, między śladami kół, km 0+050



Lokalizacja próbki 2P: pas prawy, prawy ślad koła, km 0+050



Lokalizacja próbki 1L: pas lewy, między śladami kół, km 0+130



Lokalizacja próbki 2L: pas lewy, prawy ślad koła, km 0+130



Tablica 3. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 4
 (między 2 i 3 warstwą)

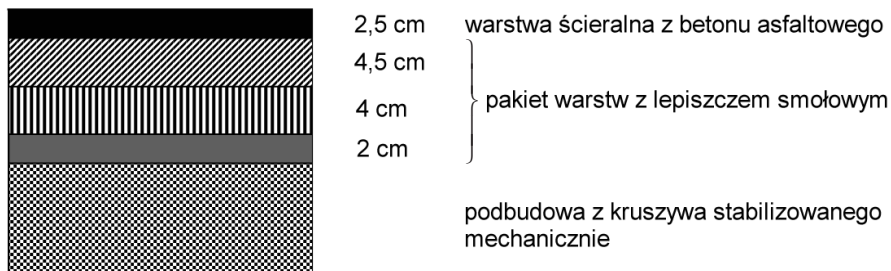
Table 3. Evaluation of interlayer bond on the test section 4
 (between 2nd and 3rd layer)

Próbka	Połączenie międzywarstwowe, ściananie metodą Leutnera, MPa
1P	brak połączenia
2P	brak połączenia
1L	1,0
2L	0,9

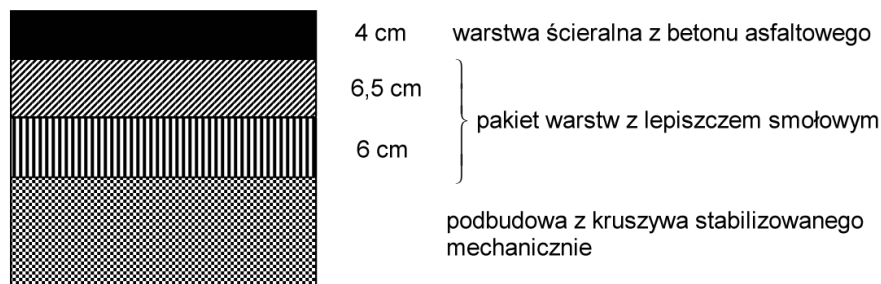
Odcinek 5 – droga krajowa nr 20

Oceniono odcinek od km 13+500 do km 14+500. Stan nawierzchni jest dobry. Natomiast próbki pobrane z odcinka charakteryzują się brakiem połączenia między warstwami bitumicznymi. Na nawierzchni wykonano pomiary ugięć, z częstotliwością co 25 m.

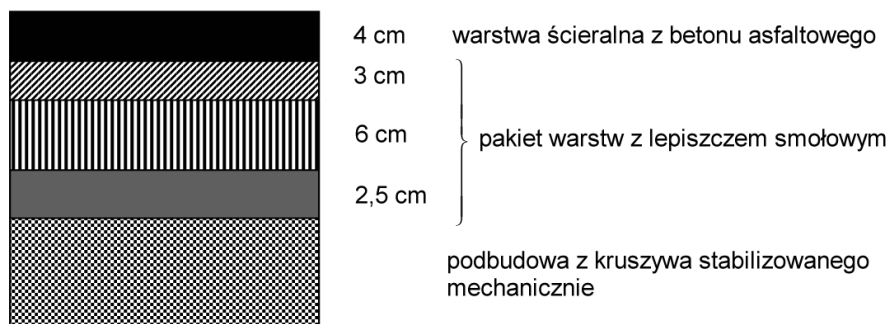
Lokalizacja próbki 1: pas prawy, km 13+600



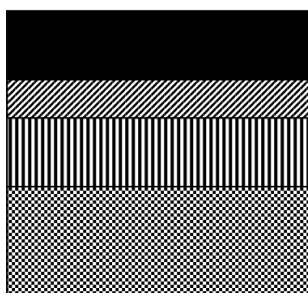
Lokalizacja próbki 2: pas lewy, km 13+800



Lokalizacja próbki 3: pas lewy, km 14+200



Lokalizacja próbki 4: pas prawy, km 14+300



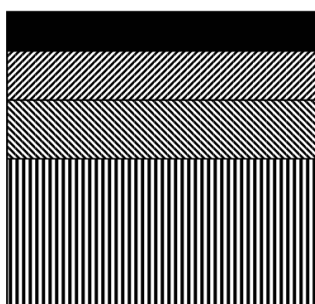
- | | |
|--------|---|
| 6,5 cm | warstwa ścieralna z betonu cementowego |
| 2,5 cm | } pakiet warstw z lepiszczem smołowym |
| 6,5 cm | |
| | podbudowa z kruszywa stabilizowanego mechanicznie |

Odcinek 6 – ul. Hipoteczna w Łodzi

Na ul. Hipotecznej wykonano remont nawierzchni polegający na sfrezowaniu warstwy (warstw) skoleniowanej. Po dwóch latach eksploatacji pojawiły się uszkodzenia w postaci spękań zmęczeniowych. Podczas wiercenia próbek z odcinka okazało się, że brak jest zespolenia warstwy ścieralnej z warstwą wiążącą oraz wiążącej z podbudową (ze starym podłożem asfaltowym).

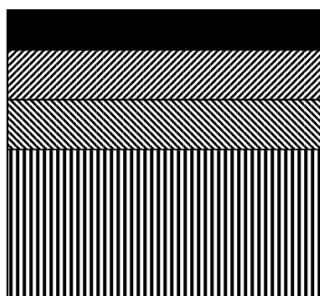
Na obu pasach ruchu wykonano pomiary ugięć, z częstotliwością co 20 m oraz pobrano próbki do badania połączenia warstw (wyniki w tabl. 4 i 5).

Lokalizacja próbki 1: lewy ślad koła, pas prawy, km 0+230



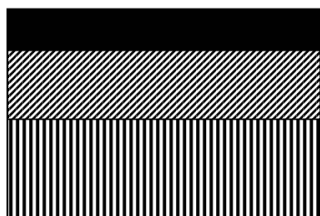
- | | |
|--------|--|
| 4 cm | warstwa ścieralna z betonu asfaltowego |
| 4,5 cm | warstwa wiążąca z betonu asfaltowego |
| 6 cm | warstwa ścieralna z betonu asfaltowego |
| 15 cm | podbudowa ze stabilizacji cementem |

Lokalizacja próbki 2: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+230



- | | |
|--------|--|
| 4 cm | warstwa ścieralna z betonu asfaltowego |
| 4,5 cm | warstwa wiążąca z betonu asfaltowego |
| 5 cm | warstwa wyrównawcza z betonu asfaltowego |
| 15 cm | podbudowa ze stabilizacji cementem |

Lokalizacja próbki 3: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+370

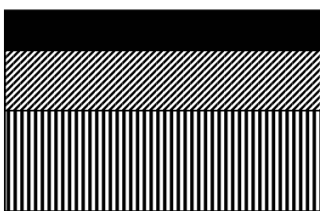


3 cm warstwa ścieralna z betonu asfaltowego

7 cm warstwa wiążąca z betonu asfaltowego

10 cm stare warstwy asfaltowe

Lokalizacja próbki 4: lewy ślad koła, pas prawy, km 0+370



3,5 cm warstwa ścieralna z betonu asfaltowego

6 cm warstwa wiążąca z betonu asfaltowego

10 cm stare warstwy asfaltowe

Tablica 4. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 6 (między 1 i 2 warstwą)

Table 4. Evaluation of interlayer bond on the test section 6 (between 1st and 2nd layer)

Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ściananie metodą Leutnera, MPa
1	1,5
2	1,2
3	brak połączenia
4	brak połączenia

Tablica 5. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 6 (między 2 i 3 warstwą)

Table 5. Evaluation of interlayer bond on the test section 6 (between 2nd and 3rd layer)

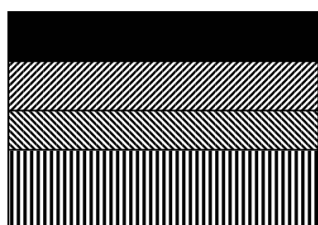
Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ściananie metodą Leutnera, MPa
1	0,9
2	1,8
3	brak połączenia
4	brak połączenia

Odcinek 7 – droga krajowa nr 51

Na wytypowanym odcinku wyodrębniono dwa pododcinki. Na pierwszym od 26+020 do km 26+820 w czasie układania warstw ścieralnej i wiążącej stosowano skropienie podłoża natomiast na drugim od km 27+070 do km 27+870 skropienia nie zastosowano. Z nawierzchni tych odcinków wycięto próbki ze śladów koleiny prawej i lewej oraz z miejsc między śladami kolein.

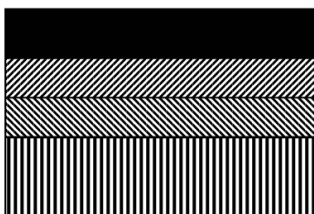
Pomiary ugięć wykonano na obu pododcinkach, na lewym i prawym pasie, w śladzie prawego koła i między koleinami. Wyniki pomiarów ścinania między warstwami próbek zestawiono w tablicy 6.

Lokalizacja próbki A: lewy ślad koła, pas lewy, km 26+800



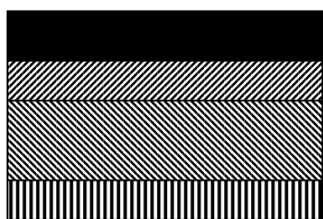
- 5 cm warstwa ścieralna z betonu asfaltowego
- 5 cm warstwa wiążąca z betonu asfaltowego
- 4 cm warstwa wyrównawcza z betonu asfaltowego
- 8 cm stare warstwy asfaltowe

Lokalizacja próbki B: prawy ślad koła, pas lewy, km 26+800



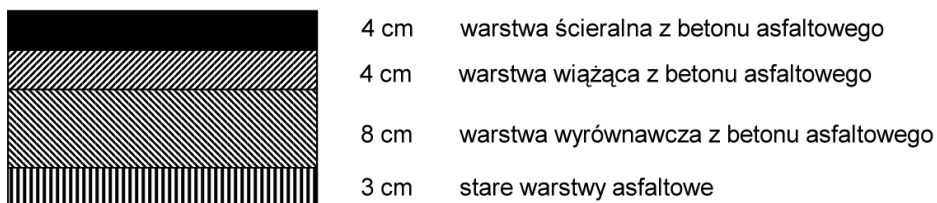
- 4 cm warstwa ścieralna z betonu asfaltowego
- 3,5 cm warstwa wiążąca z betonu asfaltowego
- 3,5 cm warstwa wyrównawcza z betonu asfaltowego
- 7,5 cm stare warstwy asfaltowe

Lokalizacja próbki C: lewy ślad koła, pas prawy, km 27+300



- 5 cm warstwa ścieralna z betonu asfaltowego
- 3,5 cm warstwa wiążąca z betonu asfaltowego
- 8 cm warstwa wyrównawcza z betonu asfaltowego
- 3 cm stare warstwy asfaltowe

Lokalizacja próbki D: prawy ślad koła, pas prawy, km 27+300



Tablica 6. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 7 (między 1 i 2 warstwą)
Table 6. Evaluation of interlayer bond on the test section 7 (between 1st and 2nd layer)

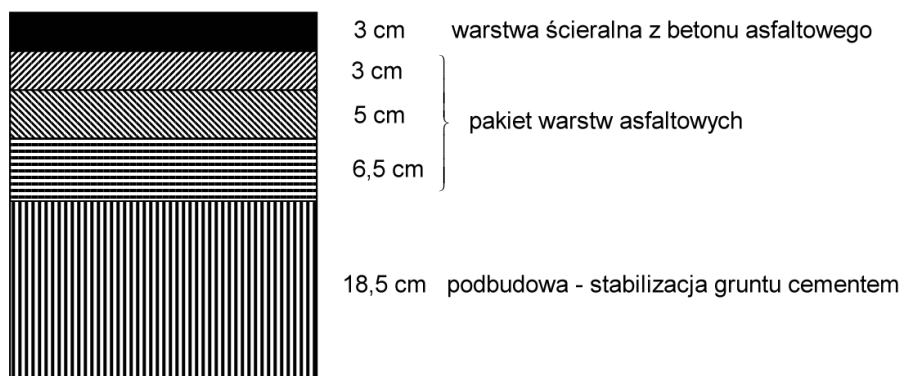
Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ścinanie metodą Leutnera, MPa
A	3,1
B	2,8
C	1,5
D	1,3

Odcinek 8 – droga krajowa nr 7

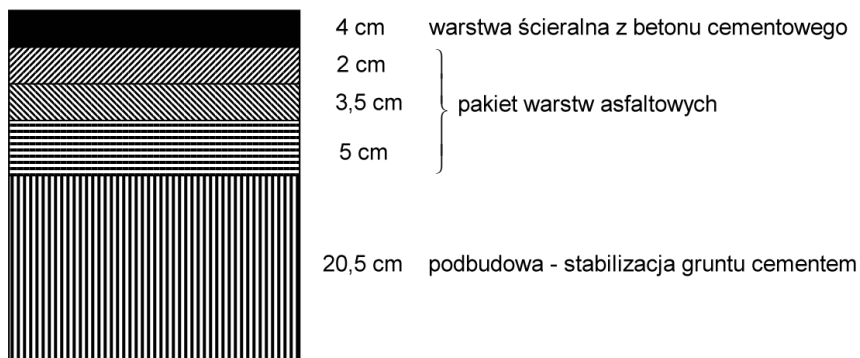
Odcinek badawczy zlokalizowany jest na drodze DK-7, na jezdni prawej od km 387+200 do km 388+000. Warstwy asfaltowe w pobranych próbkach wykazują dobre połączenie (wizualnie).

Pomiary ugięć wykonano na pasie zewnętrznym co 50 m oraz na pasie wewnętrznym z częstotliwością co 100 m.

Lokalizacja próbki I: pas prawy, km 386+700

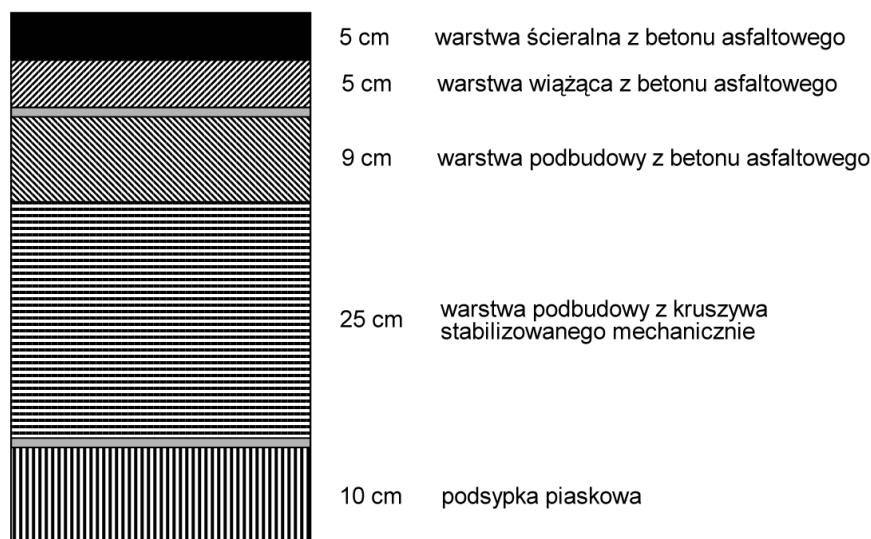


Lokalizacja próbki II: pas prawy, km 387+700



Odcinek 9 – ul. Marszałkowska w Warszawie

Odcinek badawczy zlokalizowany jest na ul. Marszałkowskiej, jezdnia wschodnia, od ul. Pięknej do ul. Nowogrodzkiej. Na odcinku tym wytypowano dwa pododcinki. Pierwszy, od ul. Pięknej do ul. Hożej ma następującą konstrukcję:

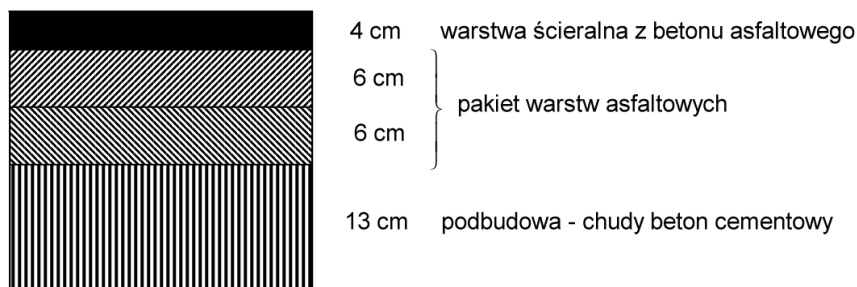


Między warstwą wiążącą i podbudową znajduje się geosiatka szklana, natomiast na podsypce piaskowej ułożono geowłókninę. Odcinek drugi, od ul. Hożej do ul. Nowogrodzkiej ma taką samą konstrukcję, lecz bez geosyntetyków. Z ocenianego odcinka nie pobierano próbek do badań połączenia międzywarstwowego. Pomiary ugięć wykonano na wszystkich trzech pasach ruchu, z częstotliwością co 25 m.

Odcinek 10 – droga krajowa nr 9

Odcinek badawczy zlokalizowany jest na drodze DK-9, na pasie prawym od km 186+300 do km 187+000. Warstwy asfaltowe w pobranej próbce wykazują dobre połączenie (wizualnie). Pomiary ugięć wykonano z częstotliwością co 50.

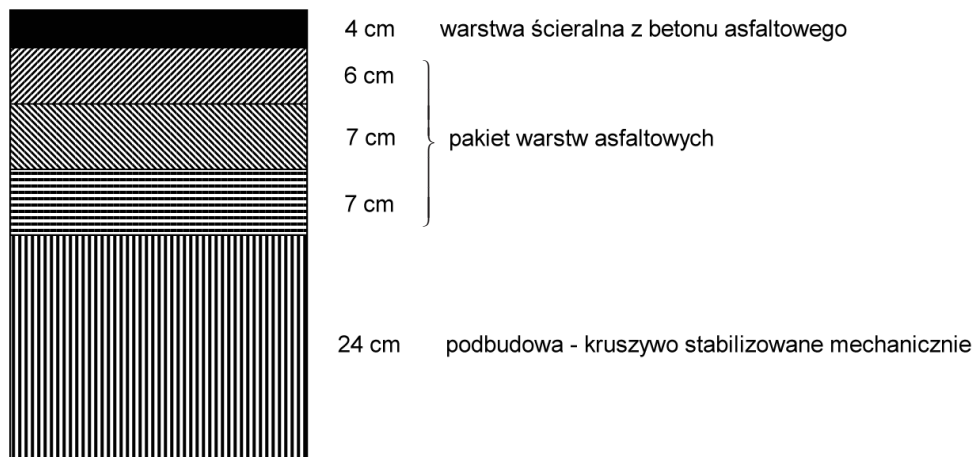
Lokalizacja próbki: pas prawy, km 186+650



Odcinek 11 – droga krajowa S-1

Odcinek badawczy zlokalizowany jest na drodze S-1, na pasie prawym od km 536+350 do km 537+350. Na nawierzchni występują liczne uszkodzenia, głównie w postaci spękań zmęczeniowych. Warstwy asfaltowe w próbce pobranej z nawierzchni nie są rozdzielone. Pomiary ugięć wykonano tylko na pasie zewnętrznym, z częstotliwością co 50.

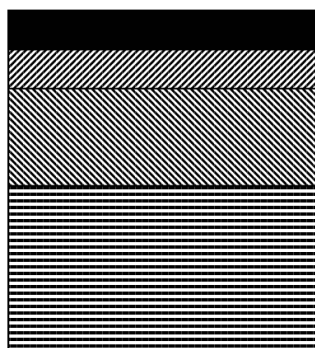
Lokalizacja próbki: pas prawy, km 186+650



Odcinek 12 – ul. Warszawska w Radomiu

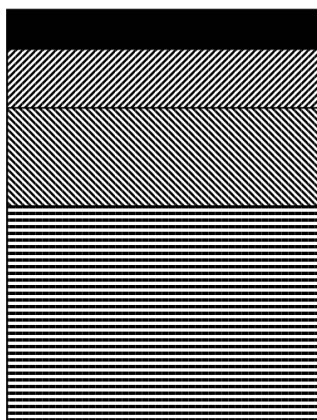
Oceniany odcinek, zlokalizowany na ul. Warszawskiej w Radomiu planowany był do naprawy w 2006 roku. Na nawierzchni występują liczne uszkodzenia: spękania siatkowe, wykruszenia ziaren i lepiszcza, wyboje, łaty po naprawach. Próbki pobrane z nawierzchni nie wykazują braku połączenia pomiędzy warstwami asfaltowymi i kostką brukową, stanowiącą podbudowę. Pomiary ugięć wykonano na jezdni lewej, na obu pasach ruchu (wewnętrznym i zewnętrznym), z częstotliwością co 50.

Lokalizacja próbki „A”: pas prawy, km 0+300



- 4 cm warstwa ścieralna z betonu asfaltowego
- 4 cm warstwa wiążąca z betonu asfaltowego
- 10 cm kostka brukowa
- 17 cm warstwa podbudowy z kruszywa stabilizowanego mechanicznie

Lokalizacja próbki „B”: pas prawy, km 0+600

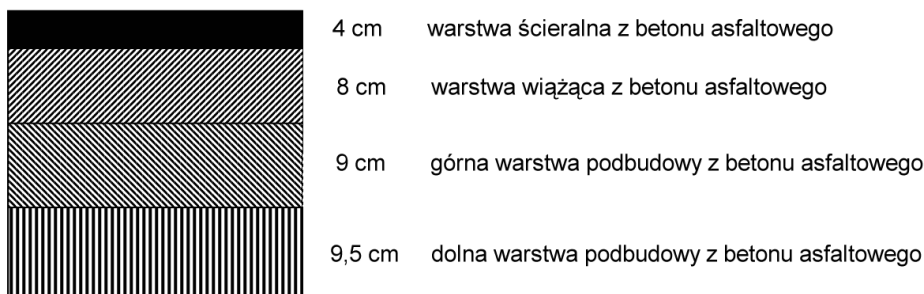


- 4 cm warstwa ścieralna z betonu asfaltowego
- 6 cm warstwa wiążąca z betonu asfaltowego
- 11 cm kostka brukowa
- 22 cm warstwa podbudowy z kruszywa stabilizowanego mechanicznie

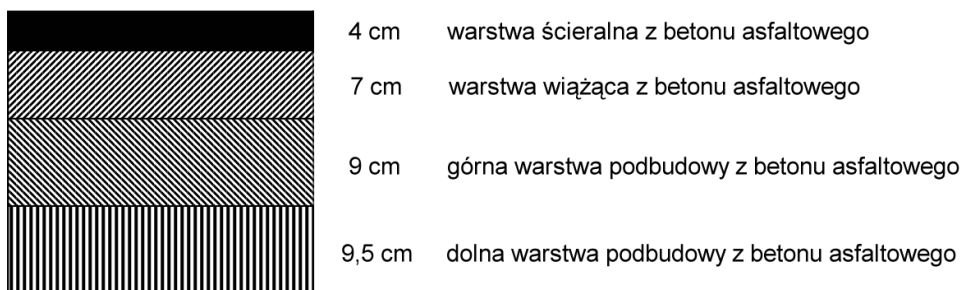
Odcinek 13 – ul. Marynarska w Warszawie

Na wytypowanym odcinku, o długości ok. 250 m prace remontowe polegały na usunięciu warstwy ścieralnej i ułożeniu nowej, grubości 4 cm. Z nawierzchni wycięto 4 próbki z prawego śladu koła. Pomiary ugięć wykonano na całej długości odcinka z częstotliwością co 25 m. Wyniki pomiarów ścinania między warstwami próbek zestawiono w tablicach 7 i 8.

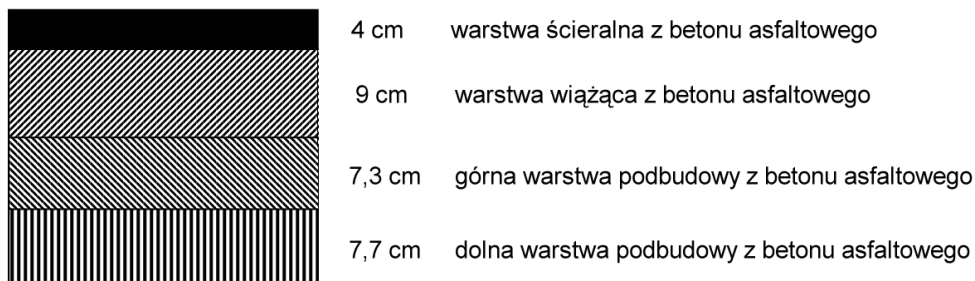
Lokalizacja próbki 1: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+020



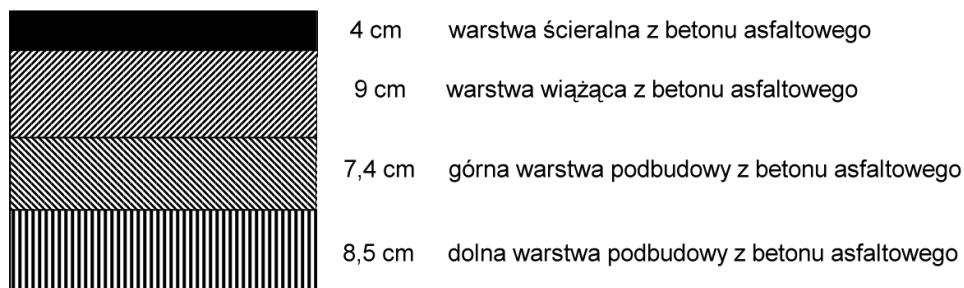
Lokalizacja próbki 2: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+020



Lokalizacja próbki 3: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+200



Lokalizacja próbki 4: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+200



Tablica 7. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 13
(między 2 i 3 warstwą)

Table 7. Evaluation of interlayer bond on the test section 13
(between 2nd and 3rd layer)

Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ściananie metodą Leutnera, MPa
	0,8
2	1,1

Tablica 8. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 13
(między 3 i 4 warstwą)

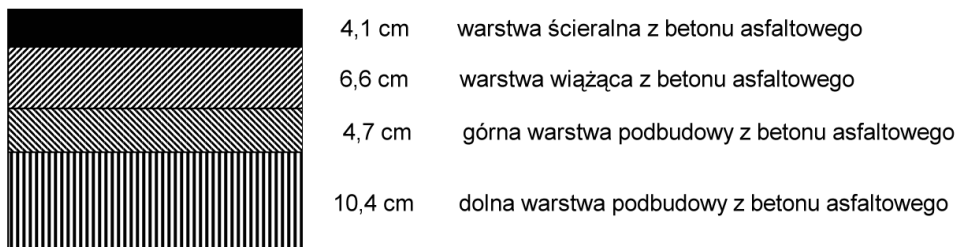
Table 8. Evaluation of interlayer bond on the test section 13
(between 3rd and 4th layer)

Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ściananie metodą Leutnera, MPa
1	0,1
2	0,3

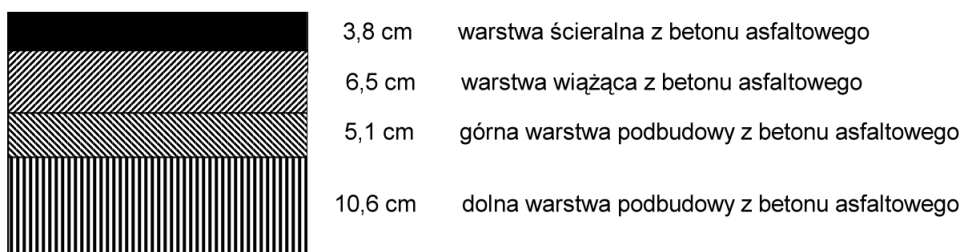
Odcinek 14 – Al. Jerozolimskie w Warszawie

Odcinek badawczy zlokalizowany jest w Al. Jerozolimskich, na dojeździe do Ronda Zesłańców Syberyjskich, na środkowym pasie ruchu. Na wytypowanym odcinku występują koleiny spowodowane brakiem odporności warstw asfaltowych na koleinowanie oraz hamowaniem i postojem pojazdów ciężkich przed sygnalizacją świetlną. Z nawierzchni pobrano 5 próbek z jednego przekroju poprzecznego. Pomiaru ugięć wykonano na całej długości odcinka z częstotliwością co 10 m. Wyniki pomiarów ścinania między warstwami próbek zestawiono w tablicach 9, 10 i 11.

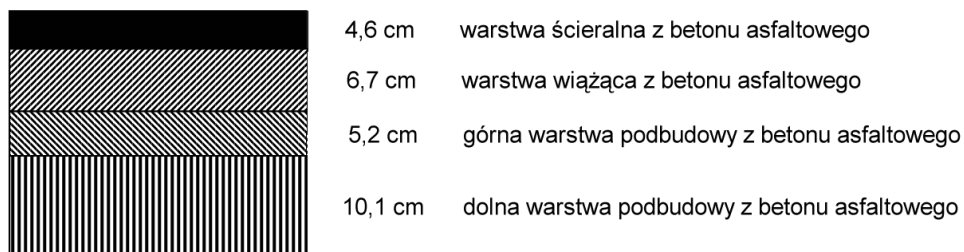
Lokalizacja próbki A: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+040
(0,2 m od krawędzi pasa)



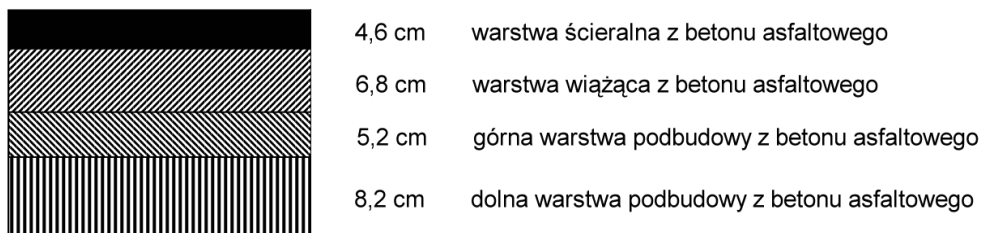
Lokalizacja próbki B: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+040
(1 m od krawędzi pasa)



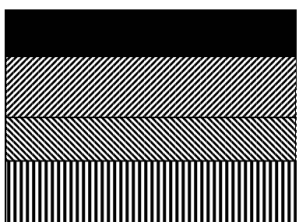
Lokalizacja próbki C: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+040
(1,6 m od krawędzi pasa)



Lokalizacja próbki D: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+040
(2,4 m od krawędzi pasa)



Lokalizacja próbki E: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+040
(3 m od krawędzi pasa)

	5,0 cm	warstwa ścieralna z betonu asfaltowego
	6,6 cm	warstwa wiążąca z betonu asfaltowego
	5,4 cm	górną warstwa podbudowy z betonu asfaltowego
	7,1 cm	dolną warstwa podbudowy z betonu asfaltowego

Tablica 9. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 14
(między 1 i 2 warstwą)

Table 9. Evaluation of interlayer bond on the test section 14
(between 1st and 2nd layer)

Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ściananie metodą Leutnera, MPa
A	2,6
B	1,7
C	2,8
D	1,0
E	2,4

Tablica 10. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 14
(między 2 i 3 warstwą)

Table 10. Evaluation of interlayer bond on the test section 14
(between 2nd and 3rd layer)

Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ściananie metodą Leutnera, MPa
A	2,4
B	1,5
C	2,7
D	2,5
E	2,1

Tablica 11. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 14 (między 3 i 4 warstwą)

Table 11. Evaluation of interlayer bond on the test section 14 (between 3rd and 4th layer)

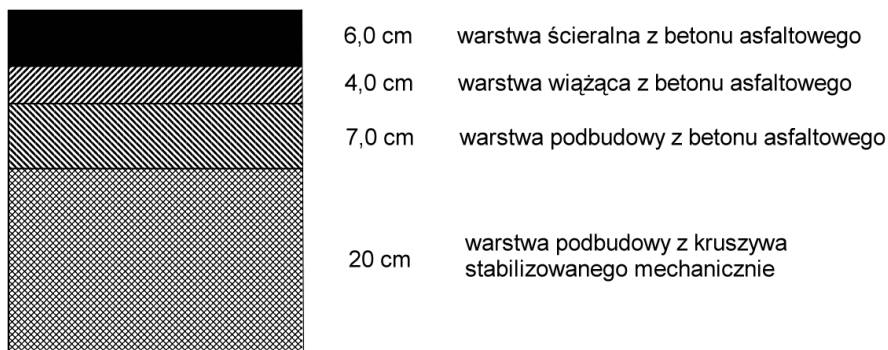
Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ścinanie metodą Leutnera, MPa
A	1,0
B	1,1
C	0,9
D	1,3
E	1,1

Dodatkowo, na próbkach pobranych w odległości: 0,4, 1,4, oraz 2,0 m od krawędzi pasa (linii rozgraniczającej) stwierdzono brak połączenia pomiędzy 3 i 4 warstwą.

Odcinek 15 – Pl. Zbawiciela w Warszawie

Odcinek badawczy zlokalizowany jest na Pl. Zbawiciela, między ul. Marszałkowską a ul. Nowowiejską, na prawym pasie ruchu. Odcinek ma nową konstrukcję, wykonaną w 2006 roku. Z nawierzchni pobrano 1 próbkę do oceny połączenia między warstwami asfaltowymi. Pomiary ugięć wykonano na całej długości odcinka (ok. 20 m) z częstotliwością co 10 m.

Lokalizacja próbki A: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+010



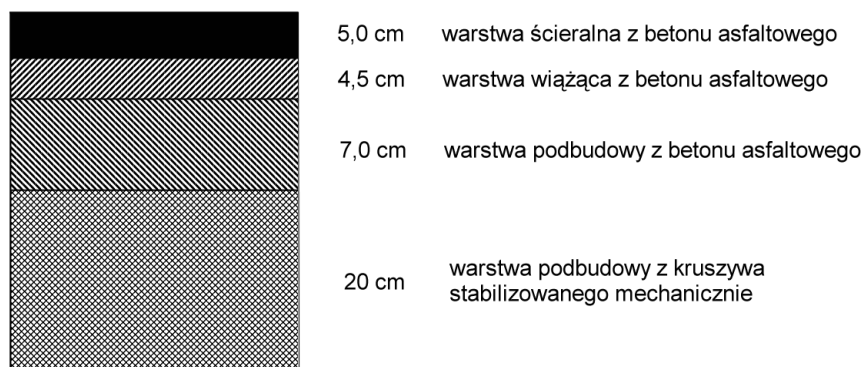
Zbadano jakość połączenia między warstwami i otrzymano następujące wyniki:

- wytrzymałość na ścinanie między 1 i 2 warstwą 1,25 MPa,
- wytrzymałość na ścinanie między 2 i 3 warstwą 0,62 MPa.

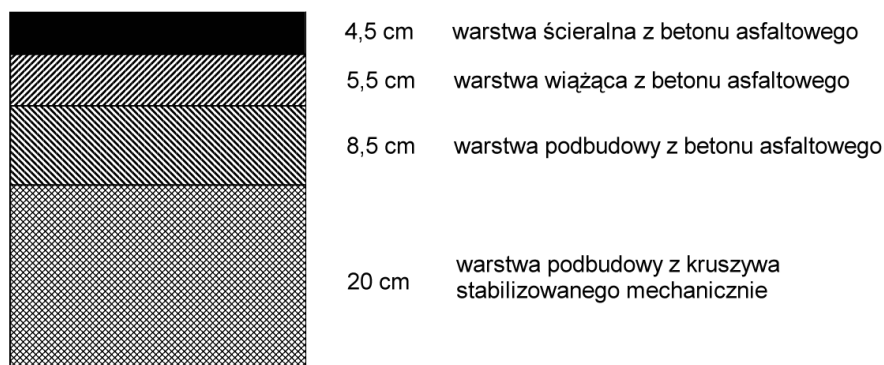
Odcinek 16 – ul. Marszałkowska w Warszawie

Na wytypowanym odcinku, podobnie jak na odcinku nr 15 wykonano nową nawierzchnię, wiosną 2006 roku. Zlokalizowany jest na części ulicy pomiędzy wiaduktem nad Trasą Łazienkowską a Placem Zbawiciela. Z nawierzchni wycięto 2 próbki i poddano je badaniu odporności na ścinanie metodą Leutnera. Pomiaru ugięć wykonano z częstotliwością co 25 m. Wyniki pomiarów ścinania między warstwami próbek zestawiono w tablicach 12 i 13.

Lokalizacja próbki 1: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+050



Lokalizacja próbki 2: prawy ślad koła, pas prawy, km 0+150



Tablica 12. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 16 (między 1 i 2 warstwą)

Table 12. Evaluation of interlayer bond on the test section 16 (between 1st and 2nd layer)

Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ścinanie metodą Leutnera, MPa
1	1,2
2	1,1

Tablica 13. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 16 (między 3 i 4 warstwą)

Table 13. Evaluation of interlayer bond on the test section 16 (between 3rd and 4th layer)

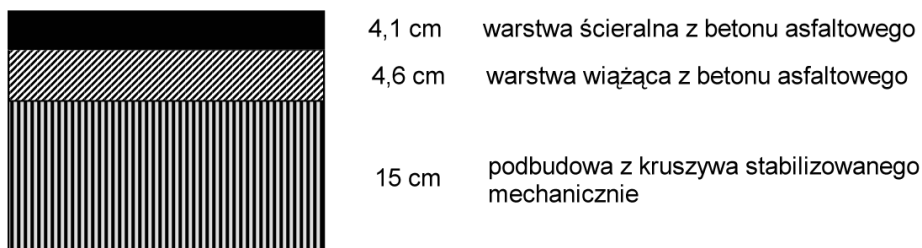
Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ścinanie metodą Leutnera, MPa
1	1,2
2	0,9

Odcinek 17 – parking przed C.H. Auchan w Piasecznie

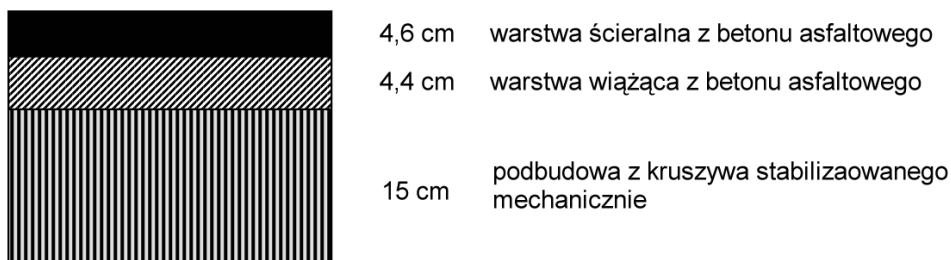
Powierzchnia nawierzchni asfaltowej parkingu charakteryzuje się licznymi pęknięciami oraz nieprawidłowym wykonaniem połączeń pomiędzy działkami technologicznymi. W wielu miejscach występowało wyraźne niedogęszczenie mieszanki mineralno-asfaltowej warstwy ścieralnej. Nawierzchnią parkingu odznaczała się dużymi nierównościami oraz występowaniem zapadniętych i wybruszonych miejsc. Zarejestrowano również naprawione, przy użyciu kostki betonowej oraz mieszanki asfaltowej, miejsca wokół studzienek kanalizacji deszczowej.

Na nawierzchni parkingu wykonano pomiary ugięć ugięciomierzem FWD oraz pobrano próbki do oceny połączenia między warstwami asfaltowymi. Wyniki pomiarów ścinania między warstwami próbek zestawiono w tablicy 14.

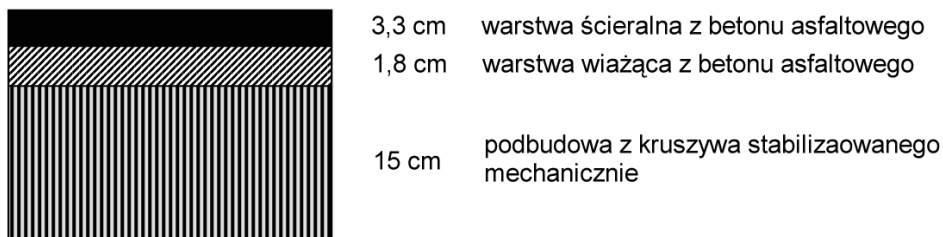
Układ warstw próbki 1



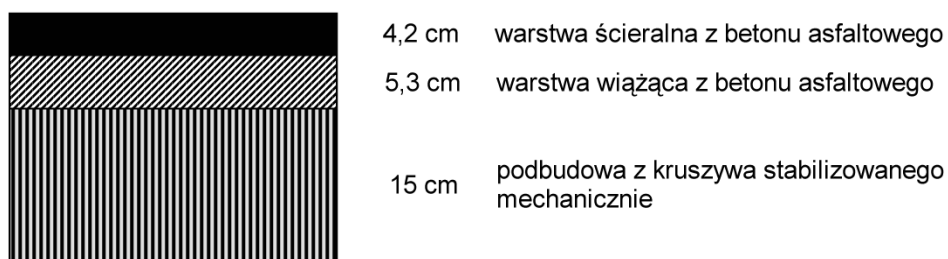
Układ warstw próbki 2



Układ warstw próbki 3



Układ warstw próbki 4



Tablica 14. Ocena połączenia międzywarstwowego na odcinku 17
(między 1 i 2 warstwą)

Table 14. Evaluation of interlayer bond on the test section 17
(between 1st and 2nd layer)

Próbka	Połączenie międzywarstwowo, ściananie metodą Leutnera, MPa
1	brak połączenia
2	1,1
3	0,8
4	1,7

Odcinek 18 – droga powiatowa nr 15921

Nawierzchnia ocenianego odcinka została przebudowana na przełomie sierpnia i października 2002 r. Celem zabiegu było podniesienie nośności konstrukcji do przeniesienia ruchu kategorii KR-3. Wzmocnienie istniejącej konstrukcji zaplanowano z wykorzystaniem jej jako podbudowy. Projekt zakładał następujący układ warstw konstrukcyjnych:

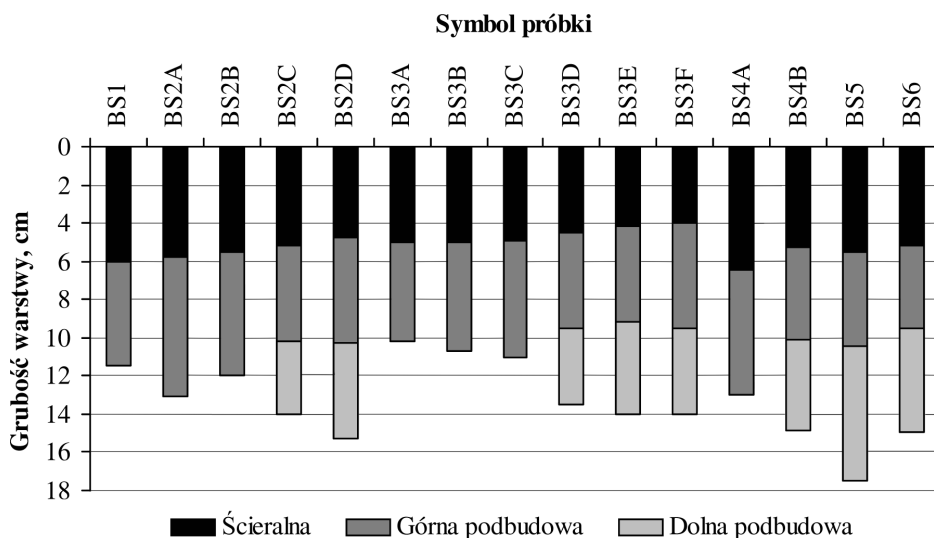
- sfrezowana na głębokość 10 cm stara nawierzchnia asfaltowa (pozostało ok. 15 cm),

- podbudowa zasadnicza z betonu asfaltowego gr. 15 cm,
- warstwa ścieralna z betonu asfaltowego gr. 5 cm.

Podbudowę z betonu asfaltowego układano w dwóch warstwach. Pomiędzy warstwami, na połączeniu jezdni z poboczem ułożono geowłókninę. Na nawierzchni w ciągu trzech lat wystąpiły uszkodzenia w postaci ubytków kruszywa i masy oraz spękań siatkowych i podłużnych. Wyniki badań wykonanych na ocenianym odcinku wskazują, że przyczyn złego stanu należy upatrywać w:

- nie uwzględnieniu warstwy odsączającej w konstrukcji pobocza,
- złej koncepcji konstrukcji nawierzchni jezdni i poboczu utwardzonych,
- brak rozwiązania technologicznego połączenia warstw konstrukcji jezdni i pobocza asfaltowego,
- zastosowaniu geowłókniny w miejscu działania największych obciążeń od ruchu,
- zmniejszeniu łącznej grubości nowych warstw asfaltowych w stosunku do projektu (rys. 13, minimum 18 cm),
- niewłaściwym zagęszczeniu warstwy ścieralnej,
- niespełnieniu wymagań co do składu wbudowanych mieszanek betonu asfaltowego, przede wszystkim zaniżona zawartość asfaltu w warstwie ścieralnej (zmniejszona ilość stosunkowo twardego asfaltu zwykłego w warstwie ścieralnej),
- zastosowaniu wątpliwego kruszywa kwarcytowego do warstwy ścieralnej.

Z nawierzchni drogi pobrano próbki oraz wykonano pomiary ugięć ugięciomierzem FWD. Układ warstw asfaltowych przedstawia rysunek 13.



Rys.13. Warstwy nawierzchni odcinka 18
Fig.13. Pavement layers on the test section 18

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Dla wszystkich pomiarów ugięciomierzem FWD na odcinkach badawczych obliczono wskaźnik połączenia warstw I_{bond} i wyznaczono wartości statystyczne (tabl. 15).

Tabela 15. Wartości wskaźnika połączenia warstw I_{bond} nawierzchni odcinków badawczych

Table 15. Interlayer Bond Index I_{bond} for pavement sections tested

Nr odcinka	Opis odcinka	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość najmniejsza	Wartość największa	Ocena połączenia
1	strona lewa	9,1	8,0	1,1	27,8	złe
2	strona lewa	4,0	3,5	0,0	10,9	nieokreślone
2	strona prawa	4,1	3,3	0,0	10,7	nieokreślone
3	1 m od osi jezdni	0,0	0,0	0,0	0,0	dobrze
3	prawy ślad koła	0,5	1,1	0,0	3,6	dobrze
4	pas prawy	2,7	2,9	0,0	9,0	nieokreślone
4	pas lewy	1,6	1,4	0,0	4,0	nieokreślone
5	km 13+500 do 14+000	0,0	0,0	0,0	0,0	dobrze
5	km 14+000 do 14+500	9,8	6,3	0,0	24,1	złe
6	prawy ślad koła	11,6	5,0	1,9	24,0	złe
6	lewy ślad koła	10,4	5,0	3,0	22,3	złe
7	km 26+020 do 26+820	7,9	4,7	0,0	17,4	złe
7	km 27+070 do 27+870	7,3	4,8	0,8	17,8	złe
8	pas wewnętrzny	1,7	2,9	0,0	8,2	nieokreślone
8	pas zewnętrzny	0,8	1,6	0,0	5,2	nieokreślone
9	odcinek z siatką	5,7	3,5	1,7	12,6	nieokreślone
9	odcinek bez siatki	6,6	5,0	0,0	14,4	nieokreślone
10	pas prawy	1,5	2,5	0,0	6,4	dobrze
11	pas prawy	1,2	2,2	0,0	6,1	dobrze
12	pas prawy	0,1	0,3	0,0	1,1	dobrze
12	pas lewy	0,8	2,4	0,0	7,7	dobrze
13	pas prawy	12,5	5,6	2,0	18,2	złe

Nr odcinka	Opis odcinka	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość najmniejsza	Wartość największa	Ocena połączenia
14	pas środkowy	4,4	5,5	0,0	14,9	nieokreślone
15	pas prawy	6,8	8,9	0,0	16,9	nieokreślone
16	pas prawy	5,5	1,8	3,4	9,2	nieokreślone
17	wybrane punkty	14,7	3,4	10,0	21,0	złe
18	strona prawa i lewa	7,8	5,1	0,0	18,6	złe

Podana w tablicy ocena połączenia międzywarstwowego wynika zarówno z wartości wskaźnika I_{bond} , ale również z badań laboratoryjnych i stanu próbek pobranych z nawierzchni drogi. Ocena „nieokreślone” jest w wypadku, gdy stan połączenia jest wyraźnie zmienny – nie można jednoznacznie ocenić jakości połączenia nawierzchni na całym badanym odcinku i potwierdzić tego stanu badaniami laboratoryjnymi.

Na podstawie wykonanych pomiarów ugięć ugięciomierzem dynamicznym FWD oraz konfrontacji uzyskanych wyników ze stanem nawierzchni ocenionym na podstawie badań laboratoryjnych i stanu próbek pobranych z nawierzchni odcinków badawczych, przyjęto następującą klasyfikację stanu połączenia międzywarstwowego:

$$\begin{aligned}
 I_{bond} = 0 & \quad - \text{pełne połączenie warstw,} \\
 0 < I_{bond} \leq 4 & \quad - \text{dobre połączenie warstw,} \\
 4 < I_{bond} \leq 8 & \quad - \text{słabe połączenie warstw,} \\
 I_{bond} > 8 & \quad - \text{brak połączenia warstw.}
 \end{aligned}$$

Jest to wstępna klasyfikacja, której nie należy traktować jako definitywnego kryterium oceny stanu połączenia. Wymaga ona weryfikacji w dalszych badaniach. Można jej natomiast używać jako narzędzia pomocniczego, wskazującego miejsca osłabionego połączenia międzywarstwowego, w których należałoby pobrać próbki do badania laboratoryjnego.

5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania i analizy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- wyniki pomiarów ugięciomierzem dynamicznym FWD (pełne przebiegi ugięć w czasie) mogą być z powodzeniem wykorzystane do oceny jakości połączenia między warstwami konstrukcyjnymi nawierzchni drogowej,
- podana metodyka oceny jakości połączenia warstw, polegająca na wyznaczeniu wskaźnika I_{bond} lub analizie wykresów ugięć w funkcji czasu, pozwala na szybkie i proste wstępne wnioskowanie o jakości połączenia,

- operatorzy aparatów FWD powinni w większym stopniu wykorzystywać możliwości ugięciomierza FWD – podczas pomiaru program obsługujący na bieżąco wizualizuje wartości ugięć nawierzchni – zaleca się więc na bieżąco rejestrowanie nietypowych przebiegów ugięć,
- na obecnym etapie badań nie można jednoznacznie określić, które warstwy charakteryzują się złym połączeniem; stwierdzono brak korelacji wyników pomiarów ugięć z głębokością występowania,
- należy opracować metodykę obliczania naprężeń i odkształceń w warstwach konstrukcyjnych nawierzchni (w konsekwencji również oceny trwałości) uwzględniającą brak lub niepełne połączenie międzywarstwowe; projektowanie wzmocnień nawierzchni przy założeniu ciągłości odkształceń (pełnego połączenia) może powodować znaczne błędy,
- ocenę połączenia warstw ugięciomierzem FWD powinno się uzupełniać badaniami penetroradarem, ponieważ analiza obrazu prześwietlanej konstrukcji nawierzchni również pozwala na wskazanie miejsc lub odcinków charakteryzujących się brakiem połączenia międzywarstwowego,
- prace badawcze, związane z wykorzystaniem ugięciomierza FWD do oceny połączenia międzywarstwowego należy kontynuować; głównym celem jest sprecyzowanie procedury pozwalającej na ilościową i jakościową ocenę oraz klasyfikacji jakości połączenia warstw na podstawie badań FWD.

PODZIĘKOWANIE

Autorzy pragną wyrazić podziękowanie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad – zleceniodawcy pracy badawczej, stanowiącej podstawę artykułu, oraz współpracownikom wykonującym badania: inż. Adamowi Kowalskiemu, Jackowi Kusiakowi i Radosławowi Boruckiemu.

Autorzy zapraszają do oceny proponowanej metody i nadsyłania informacji o jej stosowaniu i danych z pomiarów terenowych oraz ich korelacji z badaniami połączenia międzywarstwowego w laboratorium.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Livneh M., Shklarsky E.*: The bearing capacity of asphalt concrete surfacing. Proceedings of the First International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, 345-353, 1962
- [2] *Judycki J.*: Szepność między warstwami asfaltowymi nawierzchni. Drogownictwo 9/2003
- [3] *Canestrari F., Santagata E.*: Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements. The International Journal of Pavement Engineering, 6, 1, 39-46, 2005

-
- [4] *Hakim B., Al Nageim H., Pountney D.C.*: Reflection of the interface condition modeling error on backcalculated moduli and pavement remaining life. Proc. 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress, Paper E&E 8.215, Strasbourg 1996
- [5] *Romanoshi S.A., Metcalf J.B.*: The characterization of pavement layer interfaces. ISAP Conference, Copenhagen 2002
- [6] *Zawadzki J., Skierczyński P.*: Analiza wpływu połączenia międzywarstwowego na nośność nawierzchni asfaltowej. Sprawozdanie z pracy TN-225, IBDiM 2002
- [7] *Zawadzki J., Skierczyński P., Patys M.*: Połączenie między warstwami nawierzchni asfaltowej - metoda badania i wymagania. VIII Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 2002
- [8] *Zawadzki J., Skierczyński P., Mechowski T.*: Wpływ połączenia między warstwami asfaltowymi na trwałość nawierzchni. IX Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 2003
- [9] *Sybilski D., Zawadzki J., Bańkowski W., Jezierska D., Mechowski T., Mularzuk R.*: Wzmocnienie nawierzchni siatkami stalowymi i geosyntetykami. Raport końcowy z realizacji projektu KBN w ramach programu międzynarodowego COST 348, IBDiM Warszawa 2005
- [10] *Zawadzki J., Sybilski D., Skierczyński P.*: Zalecenia stosowania geowłóknin w warstwach asfaltowych nawierzchni drogowych. Zeszyt 66, Seria I, IBDiM 2004
- [11] *Leutner R.*: Untersuchung des Schichtenverbundes beim bituminösen Oberbau. Bitumen, 3/1979
- [12] *Uzan J., Livneh M., Eshed Y.*: Investigation of adhesion properties between asphaltic concrete layers. Proc. AAPT, **47**, 495-521, 1978
- [13] *Pös J., Kruntcheva M., Collop A., Thom N.*: Verbund von Asphaltsschichten: Prüfung, Einflüsse, Bewertung - Vergleichende Betrachtungen Deutschland - Großbritannien. Strasse und Autobahn, 4/2002, 177-190
- [14] *Hakim A., Armitage R., Thom N.*: Pavement assessment including bonding conditions: case studies. International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim 1998
- [15] *Sangiorgi C., Collop A.C., Thom N.H.*: A non-destructive impulse hammer for evaluating the bond between asphalt layers in a road pavement. International Symposium: Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, 16-19 September 2003
- [16] *Brown S.F., Thom N.H., Sanders P.J.*: A study of grid reinforced asphalt to combat reflection cracking. Proc. AAPT, 2001, **70**, 543-571
- [17] The British Board of Agreement Highway Authorities Product Approval Scheme. Guidelines Document for the assessment and certification of the thin surfacing systems for highways. Appendix A 3, SG 3/98/173, 2000

EVALUATION OF EFFECTIVENESS OF USE OF FWD FOR ASSESSMENT OF PAVEMENT INTERLAYER BOND

Abstract

Interlayer bonding is one of the most important factors influencing proper asphalt pavement performance, to a large extent underestimated until recently. Interaction of layers in pavement structure depends on interlayer bonding, and it influence pavement durability. Lack of or weak interlayer bond cause that layers do not interlock and pavement load is not properly transferred from upper layer to lower layer. It results in higher stresses at bottom of upper layer and higher strains in unbounded base. Life of pavement may be shorter by up to 40 - 70 %.

Deterioration of road pavement due to insufficient interlayer bond is known for years, testing of this pavement property was undertaken only some 20 years ago.

Interlayer bond between two asphalt layers is derived from two main factors: the first - gluing both layers with bituminous binders being constituents of both layers or with intentionally applied tack coat, and the second - interlocking of mineral grains of both layers.

This paper presents the trial to develop testing procedure with use of FWD (*Falling Weight Deflectometer*). The procedure shall allow estimation of interlayer bond in the real pavement on the basis of interpretation of FWD measured pavement deflections. For qualitative evaluation of the observed phenomenon, the Interlayer Bond Index I_{bond} is proposed. On the basis of relatively wide field and laboratory tests the recommendations for limits of Interlayer Bond Index were proposed.